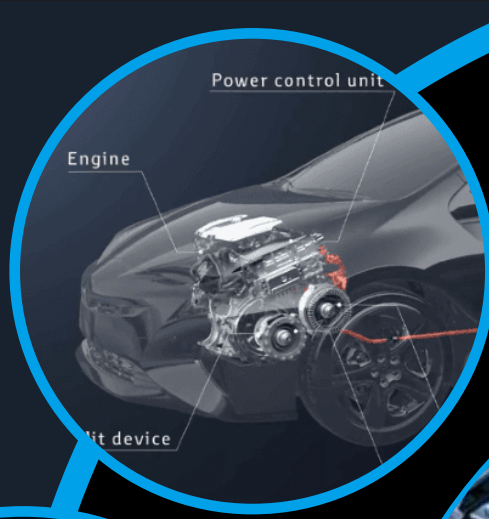




YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

Dr. Ir. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM



Mobil Listrik Hybrid

Mobil Listrik Hybrid

Penulis :

Dr. Ir. Agus Wibowo, M.Kom., M.Si., MM.

ISBN :

Editor :

Dr. Joseph Teguh Santoso, S.Kom., M.Kom.

Penyunting :

Dr. Mars Caroline Wibowo. S.T., M.Mm.Tech

Desain Sampul dan Tata Letak :

Irdha Yunianto, S.Ds., M.Kom.

Penebit :

Yayasan Prima Agus Teknik Bekerja sama dengan
Universitas Sains & Teknologi Komputer (Universitas STEKOM)

Redaksi :

Jl. Majapahit no 605 Semarang

Telp. (024) 6723456

Fax. 024-6710144

Email : penerbit_ypat@stekom.ac.id

Distributor Tunggal :

Universitas STEKOM

Jl. Majapahit no 605 Semarang

Telp. (024) 6723456

Fax. 024-6710144

Email : info@stekom.ac.id

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apapun tanpa ijin dari penulis

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan atas terselesaikannya buku yang berjudul “Mobil Listrik Hybrid” dengan baik. Kebutuhan akan efisiensi yang terus meningkat dan pengurangan emisi terus memacu pertumbuhan sektor pasar Kendaraan listrik hibrida / HEV (*Hybrid Electric Vehicle*), teknologi yang terus meningkat dan kompleks mendukung tuntutan yang berkembang yang ditempatkan pada sistem HEV.

Buku ini yang menyajikan arsitektur tingkat sistem HEV secara seimbang, mencakup konsep desain, perangkat keras, dan aspek penting implementasi HEV termasuk penggunaan daya dan strategi manajemen. Buku ini dirancang sebagai bagian dari kuliah teknik lanjutan dalam sistem HEV yang merupakan bagian dari Seri Otomotif yang praktis dan topikal bagi para peneliti dan praktisi industri, untuk mahasiswa tingkat sarjana di bidang teknik otomotif. Buku ini juga memberikan wawasan menyeluruh tentang diagnostik, prognostik, dan keandalan sistem HEV dari sudut pandang kekerasan getaran kebisingan mekanis / NVH (*Noise Vibration Harsness*) tradisional, mengintegrasikan masalah yang terkait dengan getaran elektromekanis, kompatibilitas elektromagnetik / EMC (*Electromagnetic Compatibility*) dan interferensi elektromagnetik / EMI (*Electromagnetic Interference*).

Buku Mobil Listrik Hybrid ini terbagi menjadi 19 Bab. Pada bab pertama berisi pendahuluan yang isinya tentang pengenalan mobil listrik hybrid. Bab 2 sampai bab 4 akan memperkenalkan konsep hibridisasi dan tentang arsitektur mobil listrik hybrid. Bab 5 hingga bab 7 akan membahas tentang mobil hybrid Plug-in, khusus dan kemiliteran. Bab 8 hingga bab 10, menerangkan tentang diagnostik dan masalah kompatibilitas elektromagnetik, converter daya mobil listrik hybrid dan penggerak motor induksi. Bab 11 hingga bab 13 menerangkan tentang catu daya / media penyimpanan sumber energi mobil listrik hybrid. Bab 14 dan 15 membahas tentang simulasi pada permodelan macam-macam mobil listrik hybrid hingga pengoptimalan desain / permodelan mobil listrik hybrid. Bab 16 dan bab 17 akan membahas tentang cara atau setup transfer daya nirkabel dan manajemen strategi daya pada implementasi mobil listrik hybrid. Bab 18 membahas tentang komersialisasi dan standart teknologi transportasi masa depan. Bab 19 sekaligus bab terakhir dalam buku ini akan membicarakan tentang perbicangan atau isu tentang kendaraan listrik hybrid. Akhir kata semoga buku ini berguna bagi para pembaca.

Penulis, September 2022

Dr. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM.

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Kata Pengantar	iii
Daftar Isi	iv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Transportasi Terbaru	2
1.2 Sejarah Singkat HEV	7
1.3 Rancangan HEV	10
1.4 Seri HEV	11
1.5 HEV Paralel	12
1.6 Sifat Interdisipliner HEV	16
1.7 Kecanggihan HEV	16
1.8 Tantangan dan Teknologi Utama HEV	22
BAB 2 KONSEP HIBRIDISASI MOBIL	27
2.1 Dasar-dasar Kendaraan	27
2.2 Siklus Berkendara dan Medan Berkendara	29
2.3 Dasar-dasar EV	31
2.4 Kendaraan dan Beban Propulsi	33
2.5 Dasar-dasar HEV	34
2.6 Dasar-dasar Kendaraan Sel Bahan Bakar/FCV (<i>Fuel Cell Vehicle</i>)	37
BAB 3 DASAR-DASAR HEV	39
3.1 Pendahuluan	39
3.2 Model Kendaraan	39
3.3 Kinerja Kendaraan	42
3.4 Ukuran Komponen EV Powertrain	45
3.5 Kendaraan Hibrida Seri	48
3.6 Kendaraan Hibrida Paralel	53
3.7 Konsep Hibrida Memuncak Secara Elektrik	54
3.8 Dinamika Slip Roda	61
BAB 4 ARSITEKTUR DAN DINAMIKA HEV TINGKAT LANJUT DARI HEV POWERTRAIN ...	64
4.1 Prinsip Planetary Gears	64
4.2 Toyota Prius dan Ford Escape Hybrid Powertrain	67
4.3 Transmisi Hybrid Dua Mode GM	69
4.4 Transmisi Hybrid Kopling Ganda	75
4.5 Teknologi DCT Konvensional	75
4.6 Jadwal Perpindahan Gigi	76
4.7 Powertrain Hibrida Berbasis DCT	76
4.8 Transmisi Hybrid dengan Mekanisme Kopling Kecepatan dan Torsi	81
4.9 Camry Hibrida	83

4.10	Dinamika Transmisi	87
BAB 5	KENDARAAN LISTRIK HIBRIDA PLUG-IN	90
5.1	Pengantar PHEV	90
5.2	PHEV dan EREV	90
5.3	PHEV Campuran	90
5.4	Arsitektur PHEV	94
5.5	Ekonomi Bahan Bakar PHEV	94
5.6	Faktor Utilitas	96
5.7	Manajemen Daya PHEV	97
5.8	Desain PHEV dan Ukuran Komponen	100
5.9	Konversi HEV ke PHEV	102
5.10	Teknologi V2G (<i>Vehicle to Grid</i>)	106
5.11	Kesimpulan	116
BAB 6	KENDARAAN HIBRIDA KHUSUS	118
6.1	Kendaraan Hibrida Hidrolik	118
6.2	Pengereman Regeneratif di HHV	120
6.3	HEV Off-Road	122
6.4	Excavator Hibrida	126
6.5	HEV Diesel	137
6.6	Kapal Listrik atau Hibrida, Pesawat Terbang, dan Lokomotif	138
6.7	Kendaraan Aplikasi Utilitas Industri Lainnya	146
BAB 7	APLIKASI HEV UNTUK KENDARAAN MILITER	148
7.1	Mengapa HEV Dapat Bermanfaat untuk Aplikasi Militer	148
7.2	Aplikasi Kendaraan Darat	148
7.3	Aplikasi Militer Non-Kendaraan Darat	153
7.4	Aplikasi Pesawat	155
7.5	Masalah Kekasaran	157
BAB 8	DIAGNOSTIK, PROGNOSTIK, KEANDALAN, EMC, DAN TOPIK TERKAIT HEV	159
8.1	Diagnostik dan Prognostik dalam HEV dan EV	159
8.2	Keandalan HEV	165
8.3	Menganalisis Keandalan Arsitektur HEV	166
8.4	Masalah Keandalan Perangkat Lunak	170
8.5	Masalah Kompatibilitas Elektromagnetik (EMC)	172
8.6	Masalah Kebisingan Getaran Harshness (NVH) dan Elektromekanis	174
8.7	Masalah Akhir Kehidupan	176
BAB 9	ELEKTRONIKA DAYA DI HEV	178
9.1	Pengantar	178
9.2	Prinsip Elektronika Daya	180
9.3	Rectifier Digunakan di HEV	181
9.4	Konverter Buck Digunakan di HEVs	186
9.5	Konverter DC-DC Dua Arah Non-Terisolasi	187
9.6	Konverter DC-DC Dua Arah Terisolasi	192

9.7	Penyearah PWM di HEVs	196
9.8	Pengisi Daya Baterai EV dan PHEV	197
9.9	Pemodelan dan Simulasi HEV Power Electronics	205
9.10	Manajemen Termal Elektronik Daya HEV	208
9.11	Kesimpulan	210
BAB 10 DRIVER DAN MESIN ELEKTRIKA PADA HEV		211
10.1	Pendahuluan	211
10.2	Penggerak Motor Induksi	211
10.3	Prinsip Motor Induksi	212
10.4	Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi	214
10.5	Kontrol Kecepatan Mesin Induksi	217
10.6	Efisiensi dan Kerugian Mesin Induksi	219
10.7	Penggerak Motor Magnet Permanen	237
10.8	Motor Keengganan Beralih	253
10.9	Desain dan Ukuran Motor Traksi	258
10.10	Pemilihan A dan B	259
10.11	Analisis Termal dan Pemodelan Motor Traksi	259
10.12	Kesimpulan	266
BAB 11 SUMBER ENERGI LISTRIK DAN PERANGKAT PENYIMPANAN		267
11.1	Pendahuluan	267
11.2	Karakteristik Baterai	268
11.3	SOC (State of Charge) di Baterai dan Pengukuran SOC	269
11.4	Daya Spesifik dan Kepadatan Energi	273
11.5	Efisiensi Amper-Jam (Pengisian dan Pengosongan)	274
11.6	Perbandingan Teknologi Penyimpanan Energi	288
11.7	Ultrakapasitor	290
11.8	Sistem Penyimpanan Energi Flywheel	295
11.9	Sistem Kendaraan Hibrida Berbasis Sel Bahan Bakar	297
11.10	Ringkasan dan Diskusi	301
BAB 12 MODELING BATERAI		302
12.1	Pendahuluan	302
12.2	Pemodelan Baterai NiMH (<i>Nickel Metal Hydrade</i>)	302
12.3	Pemodelan Baterai Li-Ion (<i>Lithium-Ion</i>)	304
12.4	Estimasi Parameter untuk Model Baterai	305
12.5	Contoh Kasus Menggunakan Model Baterai dalam Sistem EV	308
12.6	Ringkasan dan Pengamatan Pemodelan dan Simulasi Baterai	312
BAB 13 DESAIN PENGISI DAYA BATERAI EV DAN PHEV		314
13.1	Pengantar	314
13.2	Fitur Utama Pengisi Daya Resonansi LLC	316
13.3	Mode Operasi dan Analisis Distribusi	318
13.4	Pertimbangan Desain untuk Konverter LLC untuk Pengisi Daya Baterai PHEV	320
13.5	Desain Lintasan Pengisi Daya	323

13.6	Kendala Desain	326
13.7	Prosedur Desain	328
13.8	Hasil Eksperimen	329
13.9	Kesimpulan	333
BAB 14 PEMODELAN DAN SIMULASI KENDARAAN LISTRIK DAN HIBRIDA		335
14.1	Pengantar	335
14.2	Dasar-dasar Pemodelan Sistem Kendaraan	336
14.3	Pemodelan HEV Menggunakan ADVISOR	337
14.4	Pemodelan HEV Menggunakan PSAT	340
14.5	Pemodelan Berbasis Fisika	341
14.6	Teknik Pemodelan RCF	341
14.7	Pemodelan Powertrain Hibrida	342
14.8	Pemodelan Mesin DC	342
14.9	Pemodelan Dinamika Kendaraan	345
14.10	Model Slip Roda	346
14.11	Grafik Ikatan dan Teknik Pemodelan Lainnya	349
14.12	Kesimpulan	353
BAB 15 UKURAN KOMPONEN HEV DAN PENGOPTIMALAN DESAIN		354
15.1	Pengantar	354
15.2	Algoritma Pengoptimalan Global untuk Desain HEV	354
15.3	Keuntungan/Kerugian dari Algoritma Pengoptimalan yang Berbeda	365
15.4	Proses Optimasi Desain Model in the Loop	367
15.5	Kerangka Kontrol dari Seri HEV Powertrain	374
15.6	Kesimpulan	378
BAB 16 TRANSFER DAYA NIRKABEL UNTUK APLIKASI KENDARAAN LISTRIK		380
16.1	Pengantar	380
16.2	Teori Dasar	382
16.3	Desain Coupler Magnetik	387
16.4	Jaringan Kompensasi	391
16.5	Konverter Elektronik Daya dan Kontrol Daya	393
16.6	Metode Studi	395
16.7	Komunikasi Nirkabel	399
16.8	Topologi Kompensasi LCC Dua Sisi dan Desain Parameternya	400
16.9	Penyetelan Parameter untuk Pengalihan Tegangan Nol	405
16.10	Desain Parameter	410
16.11	Hasil Simulasi dan Eksperimen	414
16.12	Pengisi Daya Nirkabel Berbasis LCLC dengan Prinsip Transfer Daya Kapasitif	423
16.13	Desain Topologi Sirkuit	423
16.14	Ringkasan	430
BAB 17 STRATEGI KONTROL DAYA KENDARAAN MANAJEMEN ENERGI		431
17.1	Kerangka, Definisi, dan Kebutuhan Umum	431
17.2	Metodologi untuk Diimplementasikan	433

17.3	Metodologi untuk Optimasi	440
17.4	Optimalisasi Fungsi Biaya	442
17.5	Manfaat Manajemen Energi	448
BAB 18 KOMERSIAL, STANDARISASI HEV DAN TRANSPORTASI MASA DEPAN		450
18.1	Apa itu Komersialisasi dan Mengapa Penting untuk HEV	450
18.2	Standarisasi dan Komersialisasi	451
18.3	Masalah dan Dampak Komersialisasi pada Berbagai Jenis Kendaraan	452
18.4	Komersialisasi HEV untuk Truk dan Aplikasi Off-Road	453
18.5	Komersialisasi dan Masa Depan HEV dan Transportasi	453
BAB 19 PERSPEKTIF HOLISTIK TENTANG ELEKTRIFIKASI KENDARAAN		455
19.1	Elektrifikasi Kendaraan – Apa yang Terlibat?	455
19.2	Sejauh Mana Kendaraan Harus Dialiri Listrik	455
19.3	Gambaran Lebih Lengkap Menjuju Elektrifikasi Kendaraan	458
19.4	Isu Pamungkas: untuk Mengelekkkan Kendaraan atau Tidak?	461
Daftar Pustaka		463

BAB 1 PENDAHULUAN

Dalam membangun ekonomi sosial, masyarakat modern bergantung pada transportasi berbasis bahan bakar fosil. Menurut BPS (Badan Pusat Statistik), jumlah kendaraan naik menjadi 133.617.012 unit pada tahun 2019. Dengan urbanisasi, industrialisasi, dan globalisasi lebih lanjut, tren peningkatan pesat jumlah mobil pribadi di seluruh duniapun tak dapat dihindari lagi. Karena transportasi sangat bergantung pada minyak, isu terkait tren ini menjadi sangat jelas. Padahal sumber daya minyak di bumi sangat terbatas, dan emisi dari pembakaran bahan bakar minyak menyebabkan kualitas udara menjadi buruk, memberikan perubahan iklim yang signifikan serta memunculkan konflik politik. Dari sini, muncul masalah lingkungan dan sistem energi global yang dikaitkan dengan transportasi pribadi. Menyebabkan konflik yang mengarah pada meningkatnya kekhawatiran tentang lingkungan dan keberlanjutan penggunaan sumber daya alam oleh manusia.

Konflik pertama, dunia menghadapi tantangan serius dalam permintaan dan pasokan energi. Dunia mengkonsumsi sekitar 85 juta barel minyak setiap hari padahal barel cadangan yang ada hanyalah 1300 miliar. Dengan perkiraan tingkat konsumsi saat ini, dunia akan kehabisan minyak dalam 30 tahun kedepan. Kecepatan penemuan cadangan minyak baru jauh lebih lambat jika dibanding dengan permintaan konsumtif pada minyak yang semakin meningkat. Sekitar 60% minyak digunakan sebagai bahan bakar transportasi diseluruh dunia. Demi mencapai kelestarian energi dan lingkungan maka, mengurangi konsumsi minyak di sektor transportasi pribadi menjadi sangat penting.

Konflik kedua, dunia menghadapi tantangan besar dalam hal perubahan iklim global. Emisi dari pembakaran bahan bakar fosil meningkatkan konsentrasi karbon dioksida (CO_2) di atmosfer bumi, ini juga disebut sebagai emisi gas rumah kaca atau GRK. Peningkatan konsentrasi CO_2 membuat panas yang berlebihan ditangkap oleh permukaan bumi, hingga menyebabkan peningkatan suhu global dan kondisi cuaca ekstrim di berbagai belahan dunia. Konsekuensi jangka panjang dari pemanasan global ini akan menyebabkan naiknya permukaan air laut dan ketidakstabilan ekosistem.

Salah satu kontributor utama emisi CO_2 adalah kendaraan berbahan bakar bensin dan diesel. Selain itu, ada emisi lain dari kendaraan bertenaga bahan bakar fosil konvensional, termasuk karbon monoksida (CO) dan nitrogen oksida (NO dan NO_2 , atau NOX) dari pembakaran bensin, hidrokarbon, atau senyawa organik volatil/VOC (*Volatile Organic Compounds*) dari bahan bakar yang tidak terbakar dengan nilai evapo, sulfur oksida dan partikulat dari pembakaran bahan bakar diesel. Emisi ini menyebabkan polusi udara yang pada akhirnya mempengaruhi kesehatan manusia dan hewan yang hidup di bumi. Konflik ketiga, masyarakat membutuhkan keberlanjutan. Upaya untuk mempertahankan penggunaan sumber daya alam dalam batas yang berkelanjutan ini harus dilakukan dengan cara membatasi penggunaan bahan bakar fosil dan mengurangi emisi karbon. Dengan alasan ini, transportasi dimasa depan harus memberikan peningkatan kebebasan, mobilitas yang berkelanjutan, dan pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan serta kemakmuran bagi masyarakat.

Untuk mencapai hal ini, satu-satunya solusinya adalah membuat kendaraan yang digerakkan oleh listrik dari energi bersih, aman, dan cerdas. Kendaraan bertenaga listrik memiliki banyak kelebihan. Pertama, kendaraan dengan bahan bakar listrik jauh lebih hemat dalam memproses pembakaran didalam mobil. Sesuai dengan studi *well-to-wheel* yang menunjukkan bahwa, dalam mobil listrik, 1 galon bensin mampu menggerakkan kendaraan sejauh 173km, sedangkan dalam mobil yang menggunakan pembakar internal/ICE

(*Internal Combustion Energy*) 1 galon bensin hanya mampu mencapai jarak sejauh 53km, Perbedaannya sangat signifikan, mobil dengan bahan bakar listrik jauh lebih hemat dan ramah lingkungan.

Listrik dapat dihasilkan melalui sumber terbarukan, seperti pembangkit listrik tenaga air, angin, matahari, dan biomassa. Di sisi lain, jaringan listrik yang ada saat ini memiliki kapasitas tambahan yang tersedia pada malam hari. Sangat ideal untuk mengisi kendaraan listrik/EV (*Electric Vehicle*) di malam hari ketika jaringan memiliki kapasitas energi ekstra. Walaupun begitu, ada tantangan terbesar dari EV bertenaga baterai, ini membutuhkan biaya yang sangat mahal, dengan jarak tempuh yang terbatas dan waktu pengisian daya yang lumayan lama.

Berbeda dengan Kendaraan listrik hibrida/HEV (*Hybrid Electric Vehicle*), kendaraan ini menggunakan ICE dan motor listrik untuk bergerak, ini mampu mengatasi masalah biaya dan jangkauan EV murni tanpa perlu mengisi daya. Jika dibandingkan dengan kendaraan bertenaga mesin bensin konvensional, konsumsi bahan bakar HEV dapat dikurangi secara signifikan.

Berbeda dengan HEV, kendaraan listrik hibrida plug-in/PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*) dilengkapi dengan baterai yang lebih besar dan motor berukuran lebih besar. PHEV dapat diisi dari jaringan dan dikendarai dalam jarak terbatas (53-100km) menggunakan listrik, proses ini disebut sebagai operasi mode penipisan muatan/CD (*Charge Depletion*). Setelah energi baterai habis, kendaraan PHEV akan beroperasi seperti HEV biasa, ini disebut sebagai operasi mode CS (*Charge Sustain*), atau operasi jangkauan yang diperluas.

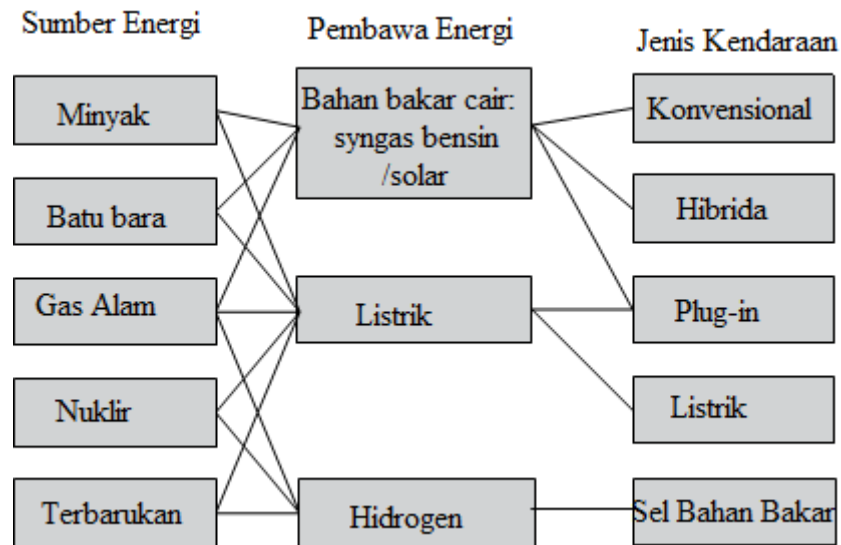
Menurut survei, kebanyakan dari kendaraan pribadi hanya digunakan untuk bepergian dengan jarak yang dekat, yang 75% darinya dikendarai hanya sejauh < 50km setiap hari. Bahan bakar fosil ini dapat digantikan dengan PHEV, yang mampu menempuh jarak sekitar 70km jika dibanding dengan kendaraan berbasis listrik murni sebagai tenaga penggerak. Dalam operasi jarak jauh, PHEV bekerja seperti HEV, menggunakan motor listrik dan baterai on-board untuk mengoptimalkan operasi sistem mesin dan kendaraan dalam mencapai efisiensi bahan bakar yang lebih tinggi. Berkat daya baterai dan kapasitas energi yang lebih besar, PHEV dapat memulihkan lebih banyak energi kinetik selama pengereman, sehingga ini akan semakin meningkatkan efisiensi bahan bakar.

1.1 TRANSPORTASI TERBARUKAN

Untuk memahami bagaimana transportasi yang berkelanjutan dapat dicapai, mari kita lihat bagaimana energi dapat diperoleh dan bagaimana kendaraan dapat digerakkan. Energi yang tersedia saat ini dapat dibagi menjadi tiga kategori: energi terbarukan, energi tak terbarukan berbasis bahan bakar fosil, dan energi nuklir. Energi terbarukan meliputi tenaga air, matahari, angin, laut, panas bumi, biomassa, dan sebagainya. Energi tak terbarukan meliputi batubara, minyak bumi, dan gas alam. Sedangkan energi nuklir, meskipun berlimpah, tidak dapat diperbarui karena sumber daya uranium dan unsur radioaktif lainnya di bumi sangat terbatas. Selain itu, ada kekhawatiran terhadap keselamatan nuklir (seperti kecelakaan di Jepang akibat gempa dan tsunami) dan pengolahan limbah nuklir dalam jangka panjang. Energi biomassa bersifat terbarukan karena dapat dibuat dari kayu, tanaman, selulosa, sampah, dan tempat pembuangan akhir. Listrik dan hidrogen adalah bentuk energi sekunder. Mereka dapat dihasilkan dengan menggunakan berbagai sumber energi asli, termasuk energi terbarukan dan tidak terbarukan. Bensin, solar, dan syngas merupakan pembawa energi yang berasal dari bahan bakar fosil.

Gambar 1.1 menunjukkan berbagai jenis sumber energi, pembawa energi, dan jenis kendaraan. Kendaraan konvensional berbahan bakar bensin/solar mengandalkan bahan bakar cair yang hanya dapat diperoleh dari bahan bakar fosil. Meskipun lebih efisien dan

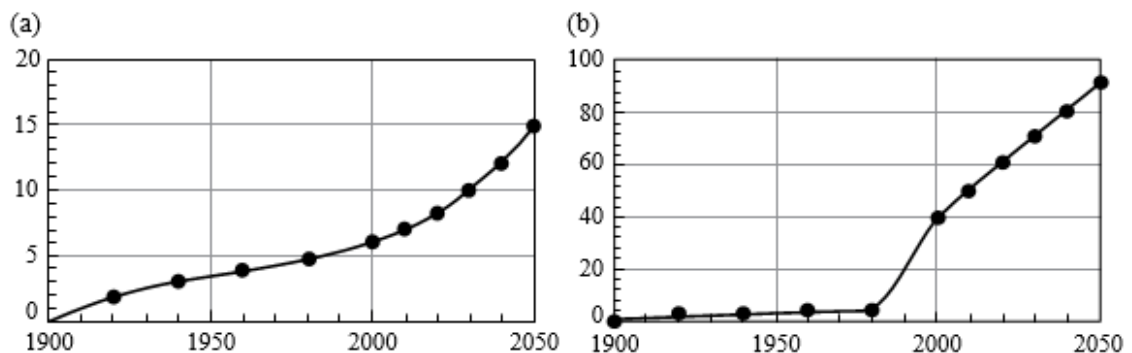
mengonsumsi lebih sedikit bahan bakar dibandingkan kendaraan konvensional, HEV masih mengandalkan bahan bakar fosil sebagai energi utama. Oleh karena itu, baik mobil konvensional maupun HEV energinya tidak berkelanjutan. EV dan kendaraan sel bahan bakar masing-masing mengandalkan listrik dan hidrogen. Baik listrik dan hidrogen dapat dihasilkan dari sumber energi terbarukan, oleh karena itu mereka berkelanjutan. Meskipun tidak sepenuhnya berkelanjutan, PHEV menawarkan keunggulan kendaraan konvensional dan EV pada saat yang bersamaan. PHEV dapat menggantikan penggunaan bahan bakar fosil dengan menggunakan jaringan listrik. Mereka bukan solusi akhir untuk keberlanjutan tetapi mereka membangun jalan menuju keberlanjutan di masa depan.



Gambar 1.1 Terbarukan (*renewable*)

Populasi, Energi dan Transportasi

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.2a populasi dunia tumbuh dengan cepat. Pada saat yang sama, penjualan kendaraan pribadi juga tumbuh dengan pesat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.2b. Ada korelasi yang jelas antara pertumbuhan penduduk dan jumlah kendaraan yang terjual setiap tahun.



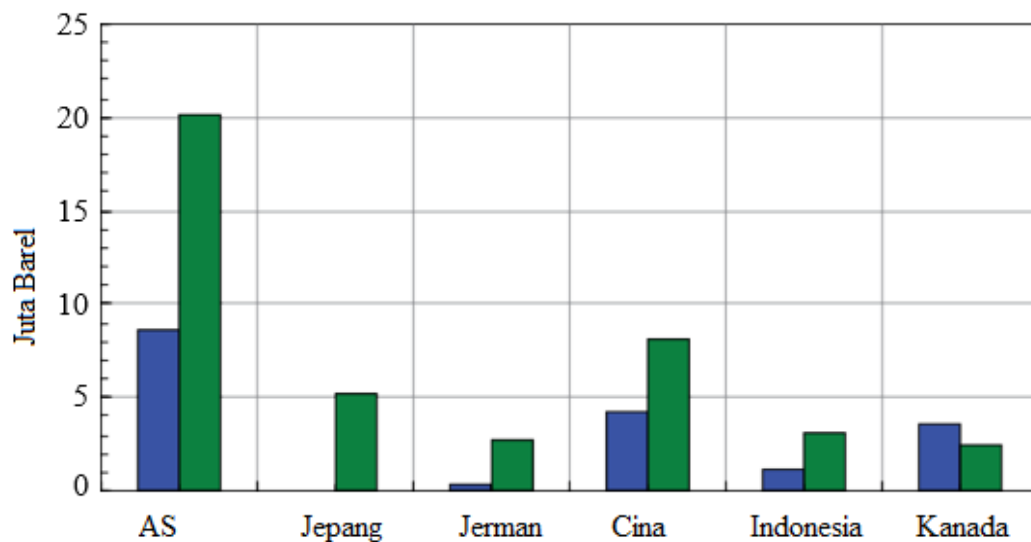
Gambar 1.2 Tren populasi dunia dan kendaraan yang terjual per tahun. (a) Populasi dunia, dalam miliar. (b) Mobil penumpang terjual per tahun, dalam jutaan.

Ekonomi bahan bakar mengevaluasi jauh jarak km yang dapat ditempuh dengan 1 galon gas. Konsumsi bahan bakar, seperti yang digunakan di sebagian besar negara di dunia, mengevaluasi konsumsi bensin (atau solar) dalam liter untuk setiap 100 km mobil digerakkan (l per 100 km). *Standar Ekonomi Bahan Bakar Rata-Rata Perusahaan* menetapkan penghematan bahan bakar untuk mobil penumpang di dari tahun 1989 hingga 2008. Dengan bahan bakar rata-rata 150.000 km ekonomi didorong per tahun, dan 250 juta mobil Mobil Listrik Hybrid (Dr. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM.)

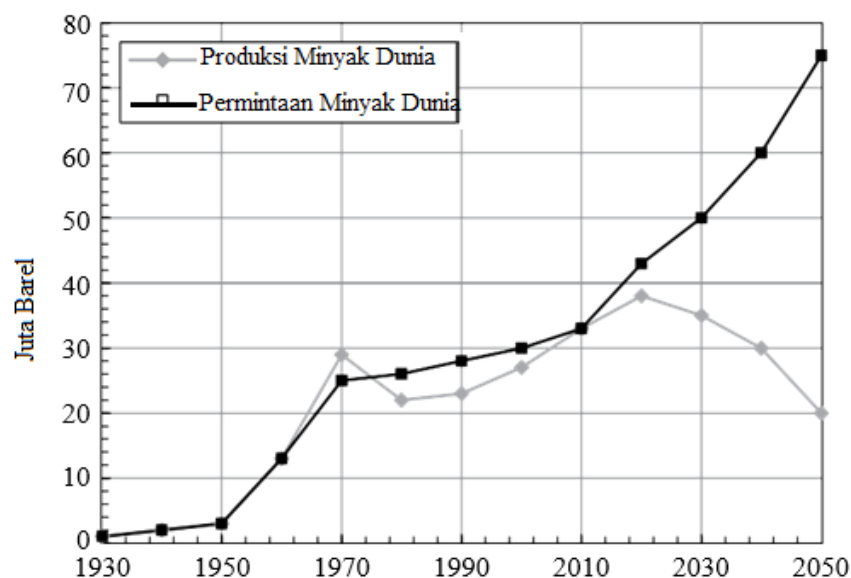
bermunculan di jalan. Di Indonesia sendiri mengkonsumsi 136 miliar galon bensin per tahun. Ini setara dengan 7 miliar barel minyak, atau 0,5% dari semua cadangan minyak bumi.

Pada tahun 2009 Cina menjadi pasar kendaraan terbesar di dunia hingga melampaui Amerika Serikat, dengan lebih dari 13 juta kendaraan bermotor terjual pada tahun 2009. Pertumbuhan di Cina telah mencapai dua digit selama lima tahun berturut-turut. Penjualan kendaraan secara keseluruhan turun 20% di seluruh dunia karena krisis keuangan global, tetapi pasar mobil China masih tumbuh lebih dari 6%, seiring dengan pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan mendekati 10%. Pada 2016, China menjual lebih dari 27 juta kendaraan. China dulunya swasembada dalam pasokan minyak, tetapi sekarang diperkirakan mengimpor 50% dari konsumsi minyaknya (<http://data.chinaoilweb.com/crudeoil-import-data/index.html>).

Selain negara-negara industri seperti Jepang dan Jerman yang memiliki permintaan impor minyak yang tinggi, negara-negara berkembang seperti India dan Brasil juga mengalami pertumbuhan penjualan mobil yang luar biasa. Negara-negara ini menghadapi tantangan yang sama dalam permintaan minyak dan aspek lingkungan. Gambar 1.3 menunjukkan konsumsi dan permintaan energi cair per hari menurut negara.



Gambar 1.3 Rata-rata konsumsi minyak mentah per hari menurut negara pada tahun 2014, dalam juta barel. Kolom kiri untuk masing-masing negara adalah produksi dan kolom kanan adalah konsumsi.



Gambar 1.4 Sejarah dan proyeksi permintaan dan penipisan minyak dunia.

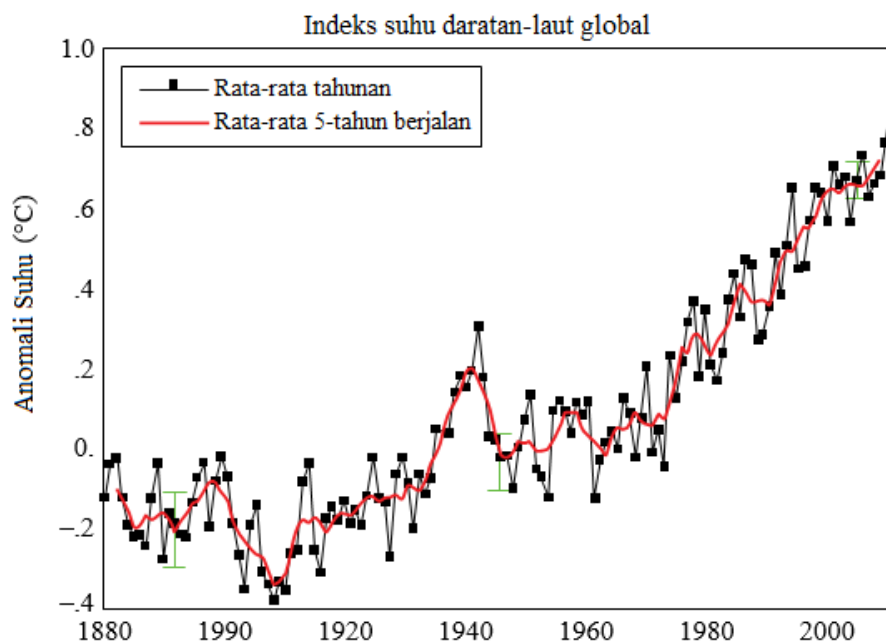
Gambar 1.4 menunjukkan sejarah dan proyeksi permintaan dan produksi minyak (<http://www.eia.doe.gov/steo/contents.html>). Banyak analis percaya pada teori minyak puncak saat ini, yang memprediksi bahwa produksi minyak berada pada puncaknya dalam sejarah, dan akan segera di bawah permintaan minyak. Kesenjangan yang dihasilkan oleh permintaan dan produksi kemungkinan besar dapat menyebabkan krisis energi lain tanpa adanya perencanaan yang matang.

Lingkungan

Emisi karbon dari pembakaran bahan bakar fosil merupakan sumber utama emisi GRK yang menyebabkan lingkungan global dan perubahan iklim. Gambar 1.5 menunjukkan emisi karbon fosil dari tahun 1900 tahun 2000. Peningkatan emisi GRK yang paling dramatis telah terjadi dalam 100 tahun terakhir, yakni peningkatan suhu global. Gambar 1.6 menunjukkan perubahan suhu rata-rata daratan-laut global dari tahun 1880 hingga 2015, menggunakan periode suhu 1951–1980 sebagai dasar perbandingan (<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/>).

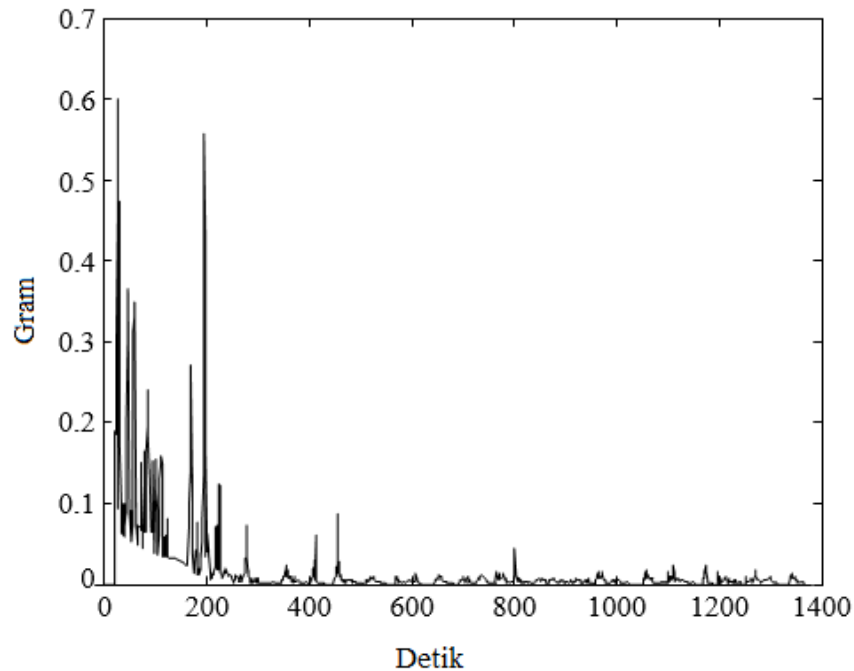


Gambar 1.5 Emisi karbon fosil global dari 1800 hingga 2004. Di titik ujung kanan, dari atas ke bawah: total CO₂, minyak, batubara, produksi semen, dan lainnya. Sumber: ONRL.

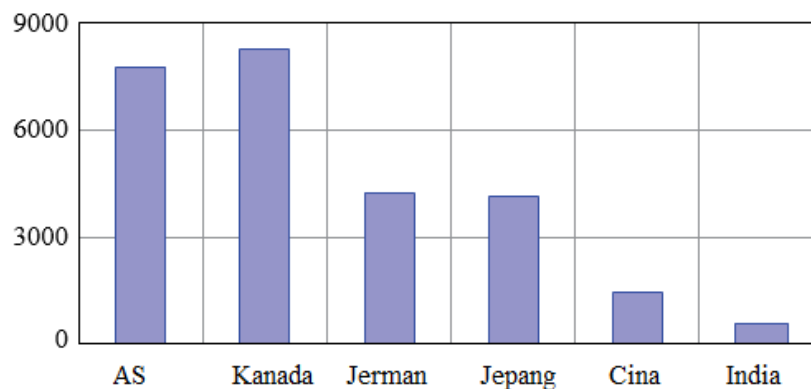


Gambar 1.6 Perubahan suhu udara permukaan rata-rata tahunan global. Data dari <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/>.

Sebagai contoh bagaimana emisi mobil berkontribusi terhadap emisi GRK, Gambar 1.7 menunjukkan emisi mobil penumpang biasa selama start dingin. Mobil modern dilengkapi dengan catalytic converter untuk mengurangi emisi dari knalpot/knalpot mobil. Tetapi *catalytic converter* perlu dipanaskan hingga sekitar 350°C agar berfungsi secara efisien. Diperkirakan bahwa 70–80% dari total emisi terjadi selama dua menit pertama setelah start dingin selama siklus mengemudi standar.



Gambar 1.7 Emisi tipikal mobil penumpang selama start dingin (menunjukkan total emisi dalam gram, terdiri dari hidrokarbon, karbon monoksida, nitrogen oksida, dan partikel).



Gambar 1.8 Konsumsi energi per kapita tahun 2014 dalam kilogram setara minyak. (http://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.PCAP.KG.OE?order=wbapi_data_value_2014+wbapi_data_value+wbapi_data_value-last&sort=desc).

Pertumbuhan Ekonomi

Pertumbuhan ekonomi sangat bergantung pada pasokan energi. Misalnya, dari tahun 1999 hingga 2015, ekonomi China mencapai tingkat pertumbuhan rata-rata hampir 10%. Pada periode yang sama, permintaan energi meningkat lebih dari 15% per tahun. Pada awal 1990-an, produksi minyak Cina cukup untuk mendukung perekonomiannya sendiri, tetapi pada tahun 2009, Cina mengimpor sebagian besar konsumsinya, diperkirakan 40% (<http://data.chinaoilweb.com/crude-oil-import-data/index.html>). China mengimpor lebih dari 50% konsumsinya dari bahan bakar cairnya. Gambar 1.8 menunjukkan konsumsi energi per

kapita, dalam kilogram setara minyak. Terbukti bahwa negara-negara berkembang masih jauh di bawah tingkat negara-negara maju. Untuk mencapai keberlanjutan, ekonomi global harus merangkul model baru.

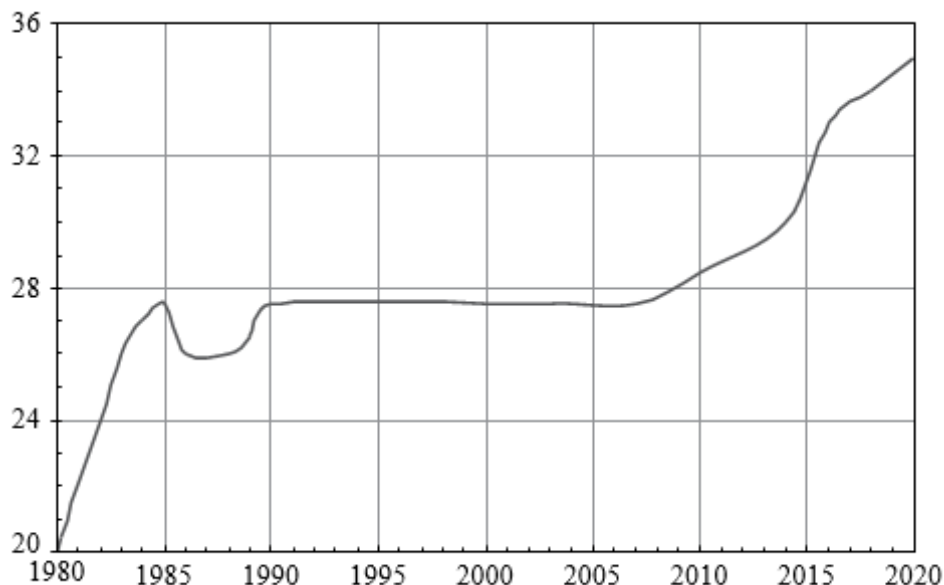
Persyaratan Ekonomi Bahan Bakar Baru

Pembuat mobil harus beralih dari mobil besar dan truk pikap ke kendaraan yang lebih kecil untuk menyeimbangkan portofolio. Kedua, mereka harus terus mengembangkan teknologi yang mendukung peningkatan efisiensi bahan bakar pada mesin bensin konvensional. Terakhir mereka harus meningkatkan produksi HEV dan PHEV.

1.2 SEJARAH SINGKAT HEV

EV ditemukan pada tahun 1834, sekitar 60 tahun lebih awal dari mobil bertenaga bensin, yang ditemukan pada tahun 1895. Pada tahun 1900, ada 4.200 mobil yang dijual, dan 40% adalah mobil listrik (<http://sites.google.com/site/petroleumhistoryresources/Home/cantankerous-combustion>). Dr Ferdinand Porsche di Jerman membangun HEV pertama pada tahun 1898, menggunakan ICE untuk memutar generator yang menyediakan daya untuk motor listrik yang terletak di hub roda (<http://aoghs.org/editors-picks/first-auto-show/>). Kendaraan hybrid lainnya, yang dibuat oleh Krieger Company pada tahun 1903, menggunakan mesin bensin untuk menambah tenaga motor listrik yang menggunakan listrik dari baterai (<http://www.hybridcars.com/history/history-of-hybrid-vehicle.html>). Kedua hybrid ini mirip dengan seri modern HEV.

Di tahun 1900-an, pembuat mobil Belgia, Pieper, memperkenalkan Voiturette 3,5 hp di mana mesin bensin kecil dikawinkan dengan motor listrik di bawah jok (<http://en.wikipedia.org/wiki/Voiturette>). Saat mobil melaju, motor listriknya digunakan sebagai generator untuk mengisi baterai. Ketika mobil sedang menanjak, motor listrik, yang dipasang secara koaksial dengan mesin gas, membantu mesin untuk menggerakkan kendaraan. Pada tahun 1905, seorang insinyur AS, H. Piper, mengajukan paten untuk kendaraan hibrida bensin-listrik. Idennya adalah menggunakan motor listrik untuk membantu ICE, memungkinkan kendaraan mencapai 25 mph. Kedua desain hybrid mirip dengan HEV paralel modern.



Gambar 1.9 Evolusi ekonomi bahan bakar.

Di Amerika Serikat, ada sejumlah perusahaan mobil listrik pada 1920-an, dengan dua di antaranya mendominasi pasar EV – Baker of Cleveland dan Woods of Chicago. Kedua

perusahaan mobil tersebut menawarkan mobil listrik hybrid. Namun, mobil hibrida lebih mahal daripada mobil bensin, dan memiliki penjualan yang sangat buruk.

HEV, bersama dengan EV, memudar pada tahun 1930 dan semua perusahaan mobil listrik gulung tikar. Ada banyak alasan yang menyebabkan hilangnya EV dan HEV. Jika dibandingkan dengan mobil bertenaga bensin, EV dan HEV:

- lebih mahal daripada mobil bensin karena baterai yang digunakan besar
- kurang bertenaga dibandingkan mobil berbahan bakar bensin karena terbatasnya daya dari baterai bawaan
- memiliki jangkauan terbatas antara setiap pengisian daya
- membutuhkan waktu berjam-jam untuk mengisi ulang baterai onboard.

Selain itu, daerah perkotaan dan pedesaan akses listrik untuk mengisi daya mobil listrik dan hibrida masih sangat minim. Kemajuan besar dalam mobil bertenaga bensin juga mempercepat hilangnya EV dan HEV. Penemuan starter membuat permulaan mesin bensin lebih mudah, dan produksi jalur perakitan kendaraan bertenaga bensin, seperti Model-T oleh Henry Ford, membuat kendaraan ini jauh lebih terjangkau daripada kendaraan listrik dan hibrida.

Tidak sampai embargo minyak Arab pada tahun 1973 bahwa melonjaknya harga bensin memicu minat baru pada EV. Undang-Undang Penelitian, Pengembangan, dan Demonstrasi Kendaraan Listrik dan Hibrida pada tahun 1976 merekomendasikan penggunaan EV sebagai sarana untuk mengurangi ketergantungan minyak dan polusi udara. Pada tahun 1990, CARB (*California Air Resource Board*), dengan pertimbangan kabut asap yang mempengaruhi California Selatan, meloloskan mandat kendaraan tanpa emisi/ZEV (*Zero Emission Vehicle*), yang mengharuskan 2% kendaraan yang dijual di California tidak memiliki emisi pada tahun 1998 dan 10% pada tahun 2003. Penjualan mobil California memiliki pangsa sekitar 10% dari total penjualan mobil di Amerika Serikat. Produsen mobil besar takut mereka akan kehilangan pasar mobil California tanpa ZEV. Oleh karena itu, setiap pembuat mobil besar mengembangkan EV dan HEV. Kendaraan sel bahan bakar juga dikembangkan pada periode ini. Banyak EV dibuat, seperti GM EV1, Ford Ranger pickup EV (Gambar 1.10), Honda EV Plus, Nissan Altra EV, dan Toyota RAV4 EV.



Gambar 1.10 Ford Ranger Listrik.

Pada tahun 1993, Departemen Energi AS membentuk program PNGV (*Partnership for Next Generation Vehicle*) untuk merangsang pengembangan EV dan HEV. Kemitraan tersebut merupakan program penelitian kerjasama antara pemerintah AS dan perusahaan otomotif besar, yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi kendaraan secara dramatis. Dalam program ini, tiga perusahaan mobil AS menunjukkan kelayakan berbagai teknologi otomotif baru, termasuk HEV yang dapat mencapai 70 MPG. Program ini dibatalkan pada tahun 2001 dan dialihkan ke Freedom CAR (Cooperative Automotive Research), yang bertanggung jawab

atas program penelitian HEV, PHEV, dan baterai di bawah Departemen Energi. Sayangnya, program EV memudar lagi pada tahun 2000, dengan ribuan program EV dihentikan oleh perusahaan mobil. Hal ini sebagian disebabkan oleh fakta bahwa penerimaan konsumen tidak berlebihan, dan sebagian karena fakta bahwa CARB melonggarkan mandat ZEV-nya.

Sejarah otomotif dunia membuka lembaran baru pada tahun 1997 ketika mobil listrik hybrid modern pertama, Toyota Prius, dijual di Jepang. Mobil ini, bersama dengan Honda's Insight dan Civic HEV. Mobil jenis HEV ini menandai perubahan radikal dalam jenis mobil yang ditawarkan kepada publik: kendaraan yang memanfaatkan keunggulan EV baterai dan kendaraan konvensional berbahan bakar bensin.

Pelajaran dari EV yang Muncul dan Gagal pada 1990-an

Selama tahun 1990-an, masalah kabut asap dan polusi yang luar biasa sangat perlu ditangani. CARB mengeluarkan mandat ZEV yang mengharuskan produsen mobil untuk menjual ZEV. Hal ini menyebabkan pengembangan mobil listrik oleh semua produsen mobil besar. Dalam beberapa tahun, ada lebih dari 10 EV produksi yang tersedia untuk konsumen, seperti GM EV1, Toyota RAV4, dan Ford Ranger.

Sayangnya, pasar EV runtuh pada akhir 1990-an. Apa yang menyebabkan industri EV gagal? Alasannya beragam, tergantung bagaimana orang melihatnya, tetapi berikut ini adalah kontributor utama runtuhnya EV di tahun 1990-an:

- **Batasan EV:** Ini menyangkut jangkauan terbatas (kebanyakan EV menyediakan 96–160 km, dibandingkan dengan 480 km atau lebih dari kendaraan bertenaga bensin); waktu pengisian yang lama (delapan jam atau lebih); biaya tinggi (40% lebih mahal daripada mobil bensin); dan ruang kargo terbatas di banyak EV.
- **Bensin murah:** Biaya pengoperasian (biaya bahan bakar) mobil tidak signifikan dibandingkan dengan investasi yang dilakukan pemilik EV untuk membeli EV.
- **Konsumen:** Konsumen percaya bahwa kendaraan sport besar/SUV (*Sport Utility Vehicle*) dan truk pikap lebih aman untuk dikendarai dan memiliki berbagai fungsi yang salah satunya sebagai penarik (derek). Ini membuat konsumen lebih memilih SUV besar daripada kendaraan efisien yang lebih kecil (sebagian karena harga bensin yang rendah).
- **Perusahaan mobil:** Pabrik mobil menghabiskan triliunan rupiah untuk penelitian, pengembangan, dan penerapan EV, tetapi pasar tidak merespons dengan baik. Mereka mengalami kerugian yang besar setelah penjualan barang. Pemeliharaan dan servis EV adalah beban tambahan pada dealer mobil. Tanggung jawab menjadi perhatian utama, meskipun tidak ada bukti bahwa EV kurang aman daripada kendaraan bensin.
- **Perusahaan gas:** EV dipandang sebagai ancaman bagi perusahaan gas dan industri minyak. Lobi oleh perusahaan mobil dan bensin dari pemerintah federal dan pemerintah California untuk membatalkan mandat adalah salah satu faktor kunci yang menyebabkan hilangnya EV pada 1990-an.
- **Pemerintah:** CARB beralih pada menit terakhir dari mandat untuk EV ke kendaraan hidrogen.
- **Teknologi baterai:** Baterai asam timbal digunakan di sebagian besar EV pada 1990-an. Baterainya besar dan berat, dan membutuhkan waktu lama untuk diisi.
- **Infrastruktur:** Ada infrastruktur terbatas untuk mengisi ulang EV.

Saat berjuang menuju transportasi berkelanjutan, pelajaran dari sejarah akan membantu menghindari kesalahan yang sama. Dalam konteks pengembangan HEV dan PHEV saat ini, kita harus mengatasi banyak hambatan agar berhasil:

- **Teknologi utama:** Yaitu, baterai, elektronika daya, dan motor listrik. Secara khusus, tanpa terobosan signifikan dalam baterai dan dengan harga bensin yang terus

berlanjut pada tingkat rendah, akan ada hambatan signifikan untuk penyebaran EV dan PHEV dalam skala besar.

- **Biaya:** HEV dan PHEV jauh lebih mahal daripada bensin. Upaya perlu dilakukan untuk memotong biaya komponen dan sistem. Ketika penghematan bahan bakar dapat dengan cepat memulihkan investasi di HEV, konsumen akan dengan cepat beralih ke HEV dan PHEV.
- **Infrastruktur:** Ini harus siap untuk penyebaran besar PHEV, termasuk pembangkit listrik untuk peningkatan permintaan oleh PHEV dan peningkatan pembangkit energi terbarukan, dan untuk pengisian PHEV jaringan yang cepat dan nyaman.
- **Kebijakan:** Kebijakan pemerintah memiliki dampak signifikan pada penerapan banyak teknologi baru. Kebijakan yang menguntungkan termasuk perpajakan, standar, insentif konsumen, investasi dalam penelitian, pengembangan, dan pembuatan produk teknologi canggih semuanya akan berdampak positif pada penerapan HEV dan PHEV.
- **Pendekatan:** Pendekatan terpadu yang menggabungkan mesin berefisiensi tinggi, keselamatan kendaraan, dan jalan raya yang lebih cerdas pada akhirnya akan membantu membentuk masa depan transportasi pribadi yang berkelanjutan.

1.3 RANCANGAN HEV

HEV adalah kombinasi dari kendaraan bertenaga ICE konvensional. HEV menggunakan ICE dan motor / generator listrik untuk propulsi. Kedua perangkat daya, ICE dan motor listrik, dapat dihubungkan secara seri atau paralel dari sudut pandang aliran daya. Ketika ICE dan motor dihubungkan secara seri, HEV adalah hibrida seri di mana hanya motor listrik yang memberikan tenaga mekanik ke roda. Ketika ICE dan motor listrik dihubungkan secara paralel, HEV adalah hibrida paralel di mana motor listrik dan ICE dapat mengirimkan tenaga mekanik ke roda.

Dalam HEV, bahan bakar cair masih menjadi sumber energi. ICE adalah konverter daya utama yang menyediakan semua energi untuk kendaraan. Motor listrik meningkatkan efisiensi sistem dan mengurangi konsumsi bahan bakar dengan memulihkan energi kinetik selama pengereman regeneratif, dan mengoptimalkan pengoperasian ICE selama pengendaraan normal dengan menyetel torsi dan kecepatan engine. ICE menyediakan kendaraan dengan jangkauan mengemudi yang diperpanjang sehingga mengatasi kerugian dari EV murni.

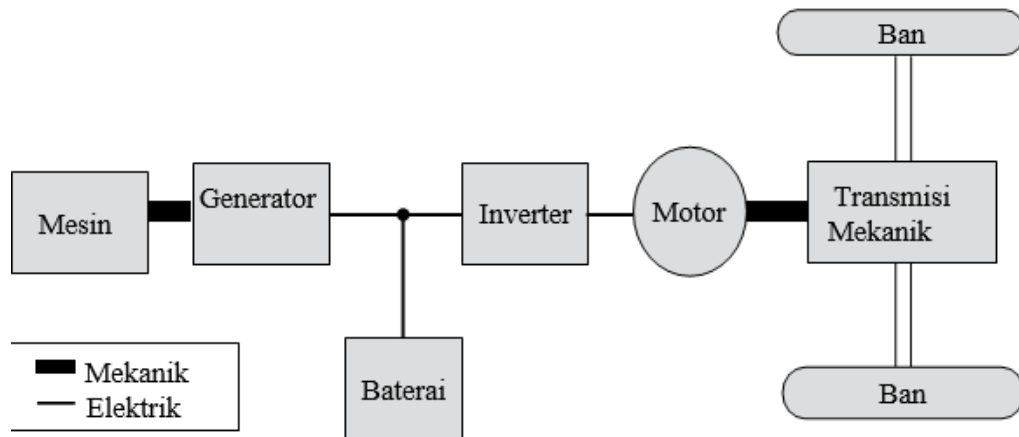
Dalam PHEV, selain bahan bakar cair yang tersedia di kendaraan, ada juga listrik yang tersimpan di baterai, yang dapat diisi ulang dari jaringan listrik. Oleh karena itu, penggunaan bahan bakar dapat lebih dikurangi.

Dalam rangkaian HEV atau PHEV, ICE menggerakkan generator (disebut sebagai set I/G). ICE mengubah energi dalam bahan bakar cair menjadi energi mekanik, dan generator mengubah energi mekanik dari output mesin menjadi listrik. Motor listrik akan menggerakkan kendaraan menggunakan listrik yang dihasilkan oleh I/G set. Motor listrik ini juga digunakan untuk menangkap energi kinetik saat pengereman. Akan ada baterai antara generator dan motor listrik untuk menyangga energi listrik antara set I/G dan motor.

Dalam HEV atau PHEV paralel, ICE dan motor listrik digabungkan ke poros penggerak akhir melalui mekanisme kopling mekanis, seperti kopling, roda gigi, sabuk, atau katrol. Konfigurasi paralel ini memungkinkan ICE dan motor listrik untuk menggerakkan kendaraan, baik dalam combine mode atau secara terpisah. Motor listrik juga digunakan untuk pengereman regeneratif dan untuk menangkap kelebihan energi dari ICE selama meluncur.

HEV dan PHEV juga dapat memiliki konfigurasi seri-paralel atau konfigurasi yang lebih kompleks yang biasanya berisi lebih dari satu mesin listrik. Konfigurasi ini umumnya dapat

lebih meningkatkan kinerja dan penghematan bahan bakar kendaraan dengan biaya komponen tambahan.

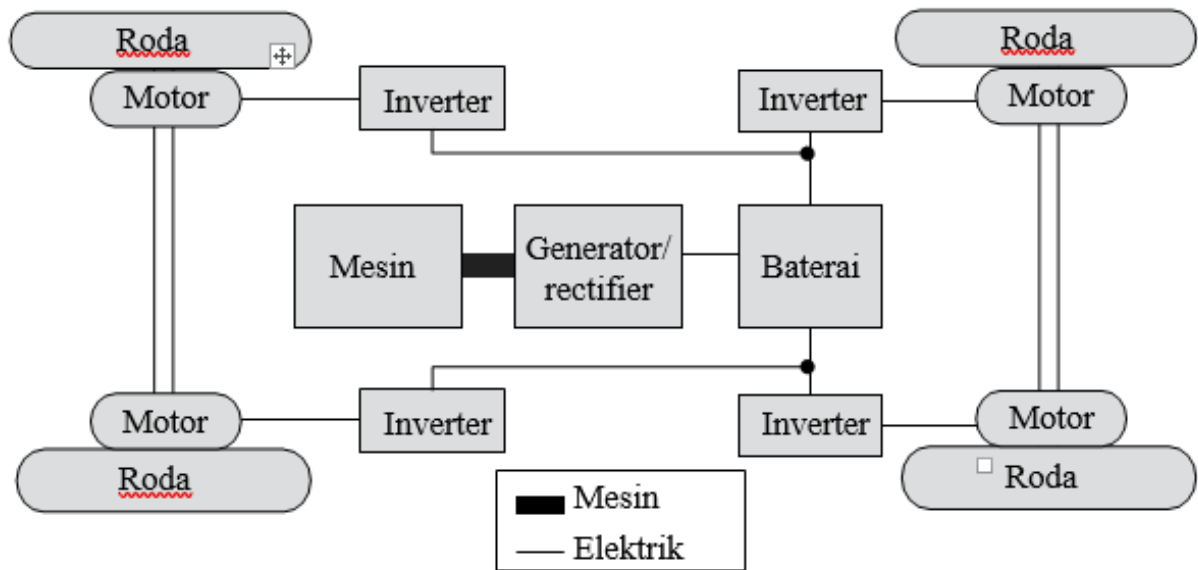


Gambar 1.11 Rancangan seri HEV

1.4 SERI HEV

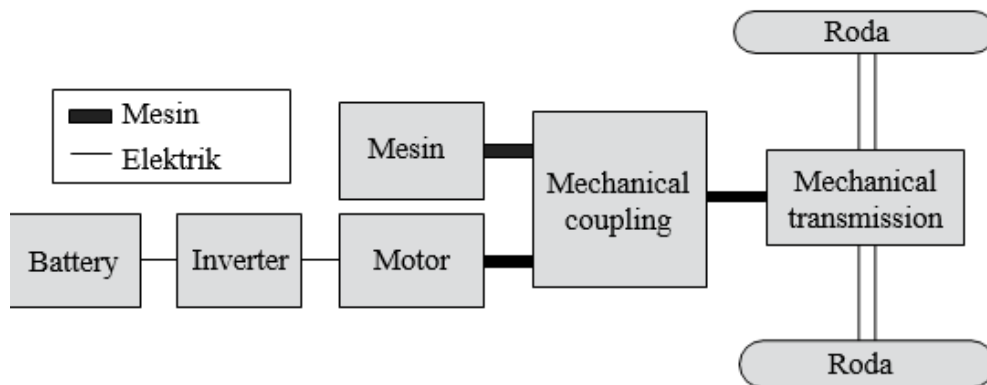
Gambar 1.11 menunjukkan konfigurasi rangkaian HEV. Dalam HEV ini, ICE adalah konverter energi utama yang mengubah energi asli dalam bensin menjadi tenaga mekanik. Output mekanis ICE kemudian diubah menjadi listrik menggunakan generator. Motor listrik menggerakkan final drive menggunakan listrik yang dihasilkan oleh generator atau listrik yang disimpan dalam baterai. Motor listrik dapat menerima listrik langsung dari mesin, atau dari baterai, atau keduanya. Karena mesin dipisahkan dari roda, kecepatan mesin dapat dikontrol secara independen dari kecepatan kendaraan, tidak hanya menyederhanakan kontrol mesin, tetapi, juga memungkinkan pengoperasian mesin pada kecepatan optimal untuk mencapai penghematan bahan bakar terbaik. Ini juga memberikan fleksibilitas dalam menemukan mesin pada kendaraan. Tidak perlu transmisi mekanis tradisional dalam seri HEV. Berdasarkan kondisi operasi kendaraan, komponen penggerak pada HEV seri dapat beroperasi dengan kombinasi yang berbeda:

- **Battery only:** Bila baterai memiliki energi yang cukup, dan permintaan daya kendaraan rendah, perangkat I/G dimatikan, dan kendaraan hanya ditenagai oleh baterai.
- **Combined power:** Pada permintaan daya tinggi, perangkat I/G dihidupkan dan baterai juga memasok daya ke motor listrik.
- **Engine alone:** Selama jelajah jalan raya dan pada permintaan daya yang cukup tinggi, set I/G dihidupkan. Baterai tidak diisi atau dikosongkan. Hal ini sebagian besar disebabkan oleh fakta bahwa status pengisian baterai (SOC) sudah pada tingkat tinggi tetapi permintaan daya kendaraan mencegah mesin mati atau mungkin tidak efisien untuk mematikan mesin.
- **Pemisahan daya:** Saat I/G dihidupkan, kebutuhan daya kendaraan di bawah daya optimal I/G, dan SOC baterai rendah, maka sebagian daya I/G digunakan untuk mengisi daya baterai.
- **Pengisian stasioner:** Baterai diisi dari daya I/G tanpa kendaraan dikemudikan.
- **Pengereman regeneratif:** Motor listrik dioperasikan sebagai generator untuk mengubah energi kinetik kendaraan menjadi energi listrik dan mengisi baterai.



Gambar 1.12 Konfigurasi motor hub seri HEV

HEV seri dapat dikonfigurasi dengan cara yang sama seperti konfigurasi kendaraan konvensional, yaitu motor listrik sebagai pengganti mesin seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.11. Pilihan lain juga tersedia, seperti motor *hub in-wheel*. Dalam hal ini, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.12, ada empat motor listrik, satu dipasang di dalam setiap roda. Karena penghapusan transmisi dan final drive, efisiensi sistem kendaraan dapat ditingkatkan secara signifikan. Kendaraan ini juga akan memiliki kemampuan AWD (*All Wheel Drive*). Namun, mengendalikan keempat motor listrik secara mandiri bisa menjadi tantangan tersendiri.



Gambar 1.13 Arsitektur HEV parallel paralel

1.5 HEV PARALEL

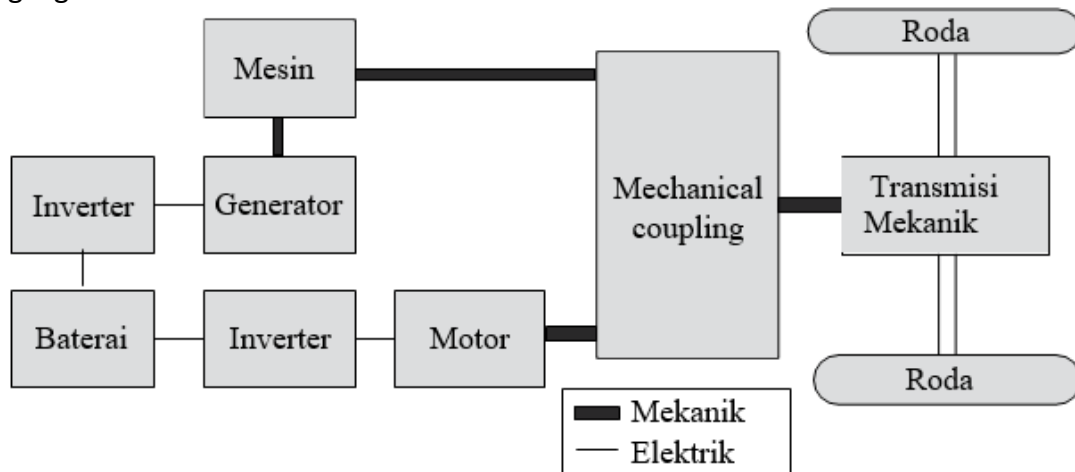
Gambar 1.13 menunjukkan konfigurasi hibrida paralel. Dalam konfigurasi ini, ICE dan motor listrik digabungkan ke final drive melalui mekanisme seperti kopleng, sabuk, puli, dan roda gigi. Baik ICE maupun motor dapat menyalurkan daya ke final drive, baik dalam combine mode, atau masing-masing secara terpisah. Motor listrik dapat digunakan sebagai generator untuk memulihkan energi kinetik selama pengereman atau dengan menyerap sebagian daya dari ICE. Hibrida paralel hanya membutuhkan dua perangkat propulsi, ICE dan motor listrik, yang dapat digunakan dalam mode berikut:

- **Mode motor-alone:** Ketika baterai memiliki energi yang cukup, dan permintaan daya kendaraan rendah, maka mesin dimatikan dan kendaraan hanya ditenagai oleh motor dan baterai.

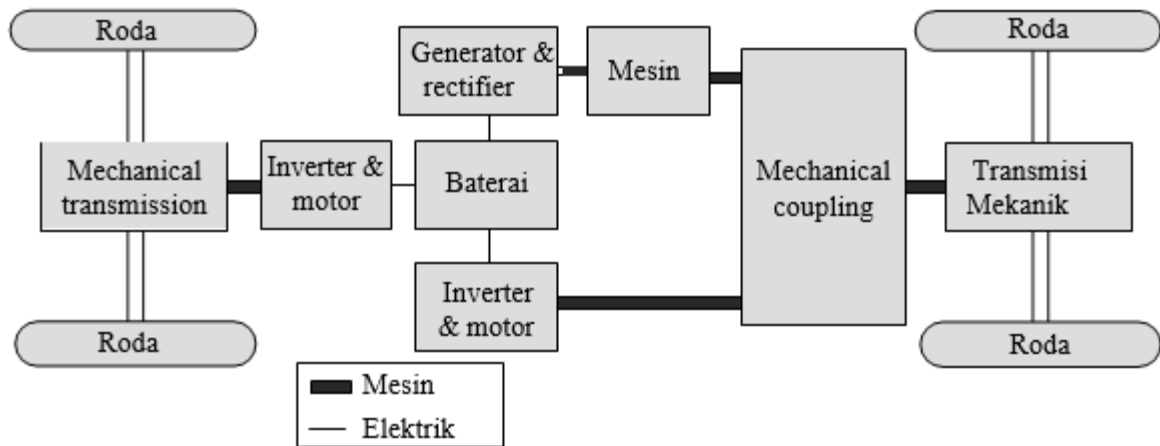
- **Mode combined power:** Pada permintaan daya tinggi, mesin dihidupkan dan motor juga memasok daya ke roda.
- **Mode engine-alone:** Selama jelajah jalan raya dan pada permintaan daya yang cukup tinggi, mesin menyediakan semua daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan kendaraan. Motor tetap idle. Hal ini sebagian besar disebabkan oleh fakta bahwa baterai SOC sudah pada tingkat tinggi tetapi permintaan daya kendaraan mencegah mesin mati, atau mungkin tidak efisien untuk mematikan mesin.
- **Mode Power-split:** Saat mesin hidup, tetapi permintaan daya kendaraan rendah dan SOC baterai juga rendah, maka sebagian daya mesin diubah menjadi listrik oleh motor untuk mengisi daya baterai.
- **Mode pengisian stasioner:** Baterai diisi dengan menjalankan motor sebagai generator dan digerakkan oleh mesin, tanpa kendaraan digerakkan.
- **Mode pengereman regeneratif:** Motor listrik dioperasikan sebagai generator untuk mengubah energi kinetik kendaraan menjadi energi listrik dan menyimpannya di baterai. Perhatikan bahwa dalam mode regeneratif, pada prinsipnya dimungkinkan untuk menjalankan mesin juga, dan memberikan arustambahan untuk mengisi baterai lebih cepat (saat motor penggerak dalam mode generator) dan memerintahkan torsi sesuai, yaitu, untuk mencocokkan total input daya baterai. Dalam hal ini, mesin dan pengontrol motor harus dikoordinasikan dengan baik.

Seri-HEV Paralel

HEV seri-paralel yang ditunjukkan pada Gambar 1.14 menggabungkan fitur seri dan HEV paralel. Oleh karena itu, dapat dioperasikan sebagai HEV seri atau paralel. Dibandingkan dengan HEV seri, HEV seri-paralel menambahkan hubungan mekanis antara mesin dan final drive, sehingga mesin dapat menggerakkan roda secara langsung. Jika dibandingkan dengan HEV paralel, HEV seri-paralel menambahkan mesin listrik kedua yang berfungsi terutama sebagai generator.



Gambar 1.14 Arsitektur seri-paralel HEV



Gambar 1.15 Sistem penggerak empat roda listrik menggunakan arsitektur yang kompleks

Karena HEV seri-paralel dapat beroperasi dalam mode paralel dan seri, efisiensi bahan bakar dan kemampuan berkendara dapat dioptimalkan berdasarkan kondisi pengoperasian kendaraan. Tingkat kebebasan yang meningkat dalam kontrol membuat HEV seri-paralel menjadi pilihan yang populer. Namun, karena peningkatan komponen dan kompleksitas, HEV seri-paralel umumnya lebih mahal daripada seri atau HEV paralel.

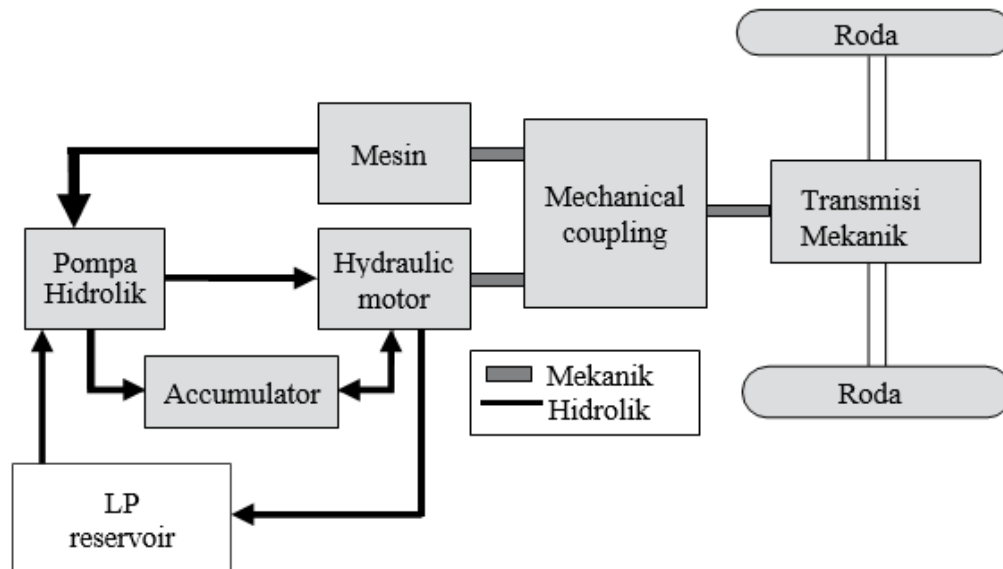
HEV kompleks

HEV kompleks biasanya melibatkan penggunaan sistem roda gigi planetary dan beberapa motor listrik (dalam kasus penggerak empat/semua roda). Salah satu contoh tipikal adalah sistem penggerak empat roda (4WD) yang diwujudkan melalui penggunaan gandar penggerak terpisah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.15. Generator dalam sistem ini digunakan untuk mewujudkan operasi seri serta untuk mengontrol kondisi operasi mesin untuk efisiensi maksimum. Kedua motor listrik tersebut digunakan untuk mewujudkan penggerak semua roda, dan untuk memberikan kinerja yang lebih baik dalam pengereman regeneratif. Mereka juga dapat meningkatkan kontrol stabilitas kendaraan dan kontrol pengereman antilock dengan penggunaannya.

Diesel dan Hibrida lainnya

HEV juga dapat dibangun di sekitar kendaraan diesel. Semua topologi yang dijelaskan sebelumnya, seperti seri, paralel, seri-paralel, dan HEV kompleks, dapat diterapkan untuk hibrida diesel. Karena fakta bahwa kendaraan diesel secara umum dapat mencapai penghematan bahan bakar yang lebih tinggi, efisiensi bahan bakar kendaraan diesel hibridisasi dapat lebih baik jika dibandingkan dengan rekan-rekan mereka yang berbahan bakar bensin. Kendaraan seperti truk pengiriman dan bus memiliki pola mengemudi yang unik dan penghematan bahan bakar yang relatif rendah. Ketika hibridisasi, kendaraan ini dapat memberikan penghematan bahan bakar yang signifikan. Truk dan bus hibrida dapat berupa seri, paralel, seri-paralel, atau terstruktur kompleks dan dapat menggunakan bensin atau solar.

Lokomotif diesel adalah jenis khusus dari hibrida. Sebuah lokomotif diesel menggunakan mesin diesel dan generator set untuk menghasilkan listrik. Kereta ini menggunakan motor listrik untuk menggerakkan kereta. Meskipun lokomotif diesel dapat disebut sebagai hibrida seri, di beberapa arsitektur tidak ada baterai untuk sistem penggerak utama untuk menyangga energi antara set I/G dan motor listrik. Konfigurasi khusus ini kadang-kadang disebut sebagai hybrid sederhana. Dalam arsitektur lain, baterai digunakan dan dapat membantu mengurangi ukuran generator, dan juga dapat digunakan untuk menangkap energi regeneratif. Baterai, dalam hal ini, juga dapat digunakan untuk arus tinggi jangka pendek karena kebutuhan torsi, tanpa menggunakan generator yang lebih besar.



Gambar 1.16 Kendaraan hibrid hidraulik paralel (LP, Tekanan Rendah).

Pendekatan Lain untuk Hibridisasi Kendaraan

Fokus utama buku ini adalah pada HEV, yaitu hibrida listrik-bensin atau listrik-diesel. Namun, ada jenis lain dari metode hibridisasi yang melibatkan jenis lain dari penyimpanan energi dan propulsi, seperti udara tekan, flywheel, dan sistem hidraulik. Hibrida hidraulik tipikal ditunjukkan pada Gambar 1.16. Sistem hidraulik dapat memberikan torsi dalam jumlah besar, tetapi karena kerumitan sistem hidraulik, hibrid hidraulik hanya dipertimbangkan untuk truk besar dan kendaraan utilitas yang memerlukan periode penghentian mesin yang sering dan diperpanjang.

Rasio Hibridisasi

Beberapa konsep baru juga muncul dalam beberapa tahun terakhir, antara lain full hybrid, mild hybrid, dan micro hybrid. Konsep-konsep ini biasanya terkait dengan peringkat daya motor listrik utama dalam HEV. Misalnya, jika HEV berisi motor listrik yang cukup besar dan baterai terkait, itu dapat dianggap sebagai hibrida penuh. Namun jika ukuran motor listriknya relatif kecil, maka bisa dikatakan sebagai micro hybrid.

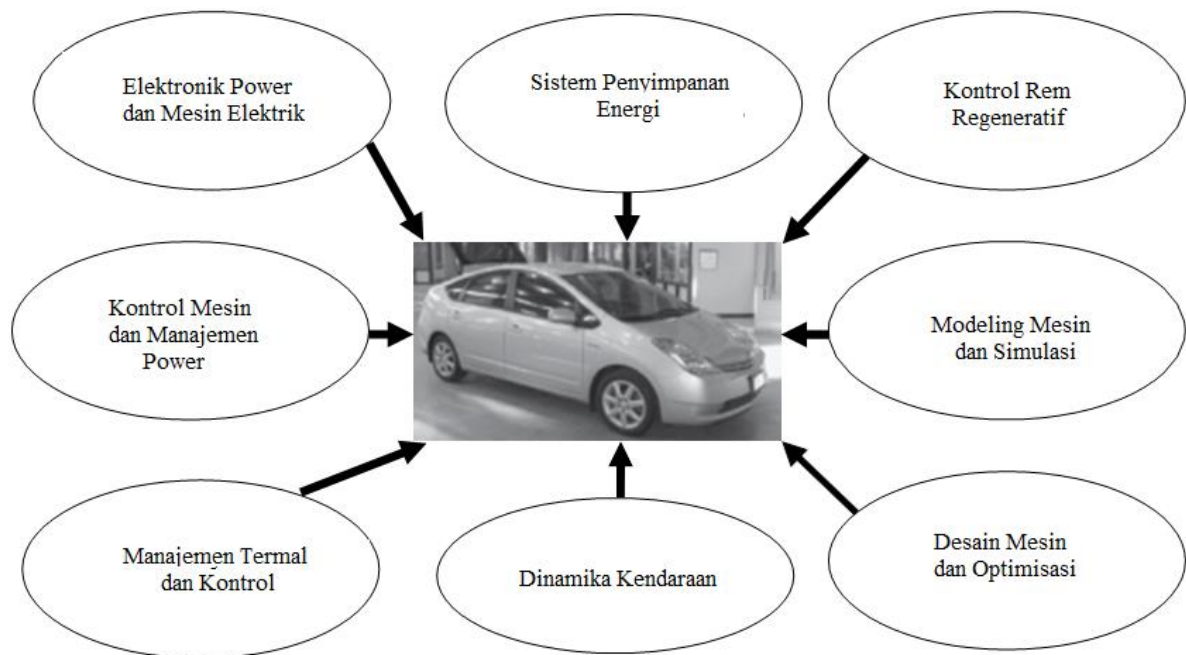
Biasanya, hibrida penuh harus dapat mengoperasikan kendaraan menggunakan motor listrik dan baterai hingga batas kecepatan tertentu dan mengemudikan kendaraan untuk jangka waktu tertentu. Ambang kecepatan biasanya batas kecepatan di daerah perumahan. Peringkat daya khas motor listrik di mobil penumpang hibrida penuh adalah 50–75 kW.

Hibrida mikro, di sisi lain, tidak menawarkan kemampuan untuk menggerakkan kendaraan hanya dengan motor listrik. Motor listrik hanya untuk menghidupkan dan mematikan mesin. Peringkat khas motor listrik yang digunakan dalam hibrida mikro kurang dari 10 kW. Hibrida ringan berada di antara hibrida penuh dan hibrida mikro.

Pendekatan yang efektif untuk mengevaluasi HEV adalah dengan menggunakan rasio hibridisasi untuk mencerminkan tingkat hibridisasi HEV. Dalam hibrida paralel, rasio hibridisasi didefinisikan sebagai rasio daya listrik terhadap total daya powertrain. Misalnya, HEV dengan motor dengan daya 50 kW dan mesin dengan daya 75 kW akan memiliki rasio hibridisasi $50 / (50 + 75) \text{ kW} = 40\%$. Kendaraan bertenaga bensin konvensional memiliki rasio hibridisasi 0% dan baterai EV memiliki rasio hibridisasi 100%. Seri HEV juga akan memiliki rasio hibridisasi 100% karena kendaraan ini mampu dikendarai dalam mode EV.

1.6 SIFAT INTERDISIPLINER HEV

HEV melibatkan penggunaan mesin listrik, konverter elektronika daya, dan baterai, selain ICE konvensional dan sistem mekanis dan hidraulik. Sifat interdisipliner sistem HEV dapat diringkas dalam Gambar 1.17. Bidang HEV melibatkan mata pelajaran teknik di luar teknik otomotif tradisional, yang berorientasi pada teknik mesin. Elektronika daya, mesin listrik, sistem penyimpanan energi, dan sistem kontrol kini menjadi bagian integral dari rekayasa HEV dan PHEV.



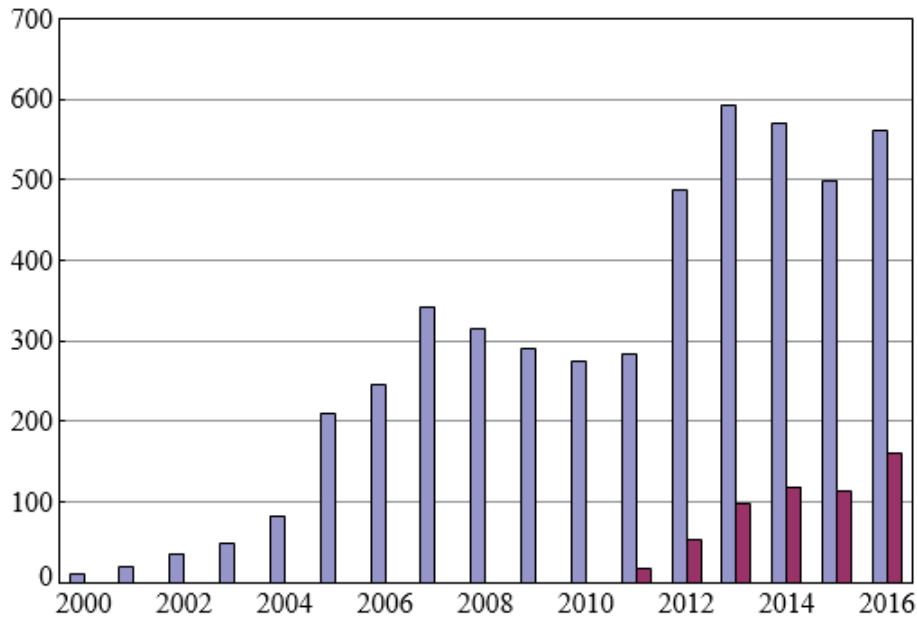
Gambar 1.17 Sifat umum dan bidang teknik yang dibutuhkan oleh HEV.

Selain itu, manajemen termal juga penting dalam HEV dan PHEV karena elektronika daya, mesin listrik, dan baterai semuanya memerlukan suhu yang jauh lebih rendah untuk beroperasi dengan baik, dibandingkan dengan komponen powertrain kendaraan non-hibrida. Pemodelan dan simulasi, dinamika kendaraan, dan desain dan optimalisasi kendaraan juga menimbulkan tantangan bagi bidang teknik otomotif tradisional karena meningkatnya kesulitan dalam pengemasan komponen dan sistem manajemen termal terkait, serta perubahan berat, bentuk, dan distribusi berat kendaraan.

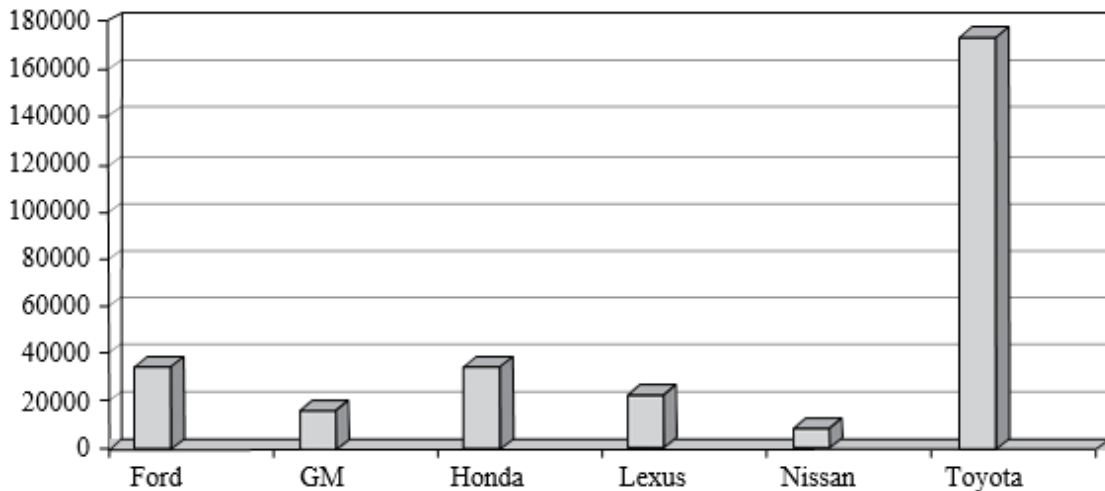
1.7 KECANGGIHAN HEV

Dalam 20 tahun terakhir, banyak HEV telah digunakan oleh produsen otomotif besar. Gambar 1.18 menunjukkan penjualan HEV di Amerika Serikat dari tahun 2000 hingga 2016, dan prediksi (<http://electricdrive.org/ht/d/sp/i/20952/pid/20952>). Gambar 1.19 menunjukkan perincian penjualan HEV menurut produsen (https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwjO kp-wtZvNAhVDF2MKHSWGAMQQFggmMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.afdc.energy.gov%2Fupl oads%2Fdata%2Fdata_source%2F10301%2F10301_hev_sales.xlsx&usg=AFQjCNEpgbwPbd7 Y-swdSbwDq14QJHVCDg&sig2=ofMr8WxcdjNmngxIC5Wxcd9). Jelas bahwa penjualan HEV telah tumbuh secara signifikan selama 20 tahun terakhir. Pada tahun 2008, penjualan tersebut mengalami penurunan, sejalan dengan penjualan mobil konvensional yang turun lebih dari 20% pada tahun 2008 dari tahun sebelumnya. Pengamatan lain adalah sebagian besar

penjualan HEV adalah milik Toyota, yang memproduksi HEV modern paling awal, Prius, dan juga membuat sebagian besar model tersedia (termasuk Lexus).



Gambar 1.18 Jumlah total HEV yang dijual dari tahun 2000 hingga 2016 (dalam ribuan): bilah kiri, nomor penjualan aktual; bilah kanan, diprediksi.



Gambar 1.19 Rincian penjualan HEV menurut produsen pada tahun 2009 (dalam ribuan).

Tabel 1.1 Penjualan Hybrid Electric Vehicle (HEV) Berdasarkan Model.

Kendaraan	Pra 2010	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total
Toyota Prius	814,173	140,928	136,463	164,618	145,172	122,776	113,829	1,637,959
Toyota Camry	154,977	14,587	9,241	45,656	44,448	39,515	30,640	339,064
Honda Civic	197,177	7,336	4,703	7,156	7,719	5,070	4,887	234,048
Ford Fusion	15,554	20,816	11,286	14,100	37,270	35,405	24,681	159,112
Lexus RX400h	87,790	15,119	10,723	12,223	11,307	9,351	7,722	154,235
Toyota Prius C	—	—	—	30,838	41,979	40,570	38,484	151,871
Toyota Highlander	102,053	7,456	4,549	5,921	5,070	3,621	4,015	132,685

Toyota Prius V	—			28,450	34,989	30,762	28,290	122,491
Ford Escape	95,285	11,182	10,089	1,440				117,996
Hyundai Sonata	—		19,673	20,754	21,559	21,052	19,908	102,946
Honda Insight	34,490	20,962	15,549	5,846	4,802	3,562	1,458	86,669
Lexus CT 200 h	—		14,381	17,831	15,071	17,673	14,657	79,613
Ford CMax Hybrid	—			10,935	28,056	19,162	14,177	72,330
Honda Accord	27,086				996	13,977	11,065	53,124
Lexus ES Hybrid	—			7,027	16,562	14,837	11,241	49,667
Kia Optima Hybrid	—			10,245	13,919	13,776	11,492	49,432
Toyota Avalon Hybrid	—			747	16,468	17,048	11,956	46,219
Ford Lincoln MKZ	—	1,192	5,739	6,067	7,469	10,033	8,403	38,903
Chevy Malibu	6,255	405	24	16,664	13,779	1,018	59	38,204
Nissan Altima	26,564	6,710	3,236	103				36,613
Buick Lacrosse	—		1,801	12,010	7,133	7,353	4,042	32,339
Honda CRZ	—	5,249	11,330	4,192	4,550	3,562	3,073	31,956
Lexus HS 250 h	6,699	10,663	2,864	650	4			20,880
Mercury Mariner	11,916	890						12,806
Saturn Vue	9,979	50						10,029
Chevy Tahoe	7,045	1,426	519	533	376	65	8	9,972
Volkswagen Jetta Hybrid	—			162	5,655	1,939	740	8,496
Nissan Infiniti Q50	—				307	3,456	4,012	7,775
Lexus GS 450 h	4,576	305	282	615	522	183	91	6,574
Buick Regal	—		123	2,564	2,893	662	186	6,428
GMC Yukon	3,543	1,221	598	560	288	31	10	6,251
Cadillac Escalade	2,759	1,210	819	708	372	41	7	5,916
Chevrolet Sierra/Silverado	1,598	2,393	1,165	471	104	24	2	5,757
Subaru XV Crosstrek	—						5,589	5,589
Nissan Pathfinder Hybrid	—				334	2,480	2,245	5,059
Nissan Infiniti QX60	—				676	1,678	2,356	4,710
Porsche Cayenne	—	206	1,571	1,180	615	650		4,222
Lexus NX Hybrid	—					354	2,573	2,927

Mercury Milan	1,468	1,416						2,884
Acura ILX Hybrid	–			972	1,461	379	22	2,834
Lexus LS600hL	2,102	129	84	54	115	65	47	2,596
Nissan Infiniti M35h	–		378	691	475	180	176	1,900
Saturn Aura	1,584	54						1,638
Audi Q5 Hybrid	–			270	854	283	97	1,504
Toyota RAV4	–						1,494	1,494
BMW ActiveHybrid 3 (335ih)	–			402	905	151	30	1,488
Mercedes S400	–	801	309	121	64	10	1	1,306
Mazda Tribute		570	484	90				1,144
BMW ActiveHybrid 5 (535ih)	–			403	520	112	12	1,047
Chevy Impala Hybrid	–				56	565	272	893
VW Touareg Hybrid	–		390	250	118	30	16	804
BMW ActiveHybrid 7	–	102	338	230	31	45	25	771
Porsche Panamera S	–		52	570	113			735
Mercedes ML450h	–	627	1	22	11	20	10	691
Mercedes E400H	–				282	158	53	493
Acura RLX	–					133	250	383
BMW X6	–	205	43	3				251
Chrysler Aspen	79							79
GMC Sierra	–				65	6	1	72
Dodge Durango	9							9
TOTAL	1,614,76	274,210	268,807	434,344	495,534	443,823	384,404	3,915,883
	1							

(Sumber Data: Lembar kerja dan catatan tersedia di www.afdc.energy.gov/data/)

Tabel 1.2 menunjukkan HEV saat ini yang tersedia di Amerika Serikat, bersama dengan perbandingan model dasar mobil bertenaga bensin (www.toyota.com, www.ford.com,

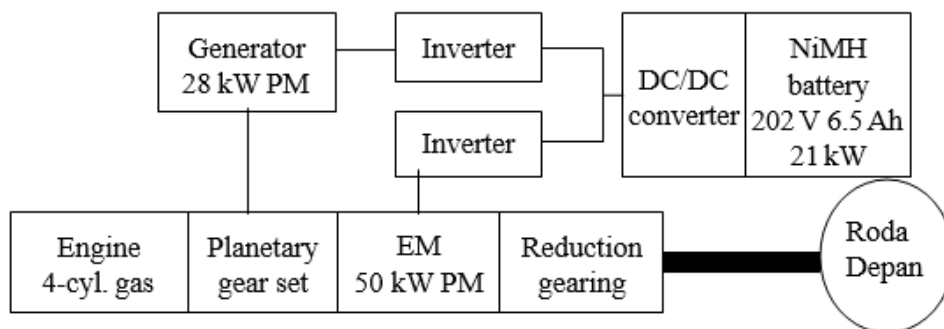
www.gm.com, <http://www.nissan.com/>, www.honda.com, www.fca.com). Dalam kasus Toyota Prius, perbandingan dibuat dengan Toyota Corolla. Dapat dilihat bahwa harga HEV umumnya 40% lebih mahal dari model dasarnya. Peningkatan penghematan bahan bakar pada HEV juga signifikan, khususnya untuk berkendara di kota.



Gambar 1.20 Toyota Prius (model 2010).

Toyota Prius

Toyota memproduksi HEV modern pertama di dunia yang dipasarkan secara massal pada tahun 1997, Prius, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.20. Penjualan Prius di seluruh dunia melebihi 1 juta unit pada tahun 2009. Toyota Prius menggunakan planetary gear set untuk mewujudkan CVT (*Continuous Variable Transmission*). Oleh karena itu, transmisi konvensional tidak diperlukan dalam sistem ini. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.21, mesin terhubung ke pembawa roda gigi planet, sedangkan generator terhubung ke roda gigi matahari. Roda gigi ring digabungkan ke final drive, seperti halnya motor listrik. Perangkat planetary juga bertindak sebagai perangkat split power/torsi. Selama operasi normal, kecepatan ring gear ditentukan oleh kecepatan kendaraan, sedangkan kecepatan generator dapat dikontrol sedemikian rupa sehingga kecepatan mesin berada dalam kisaran efisiensi optimumnya.

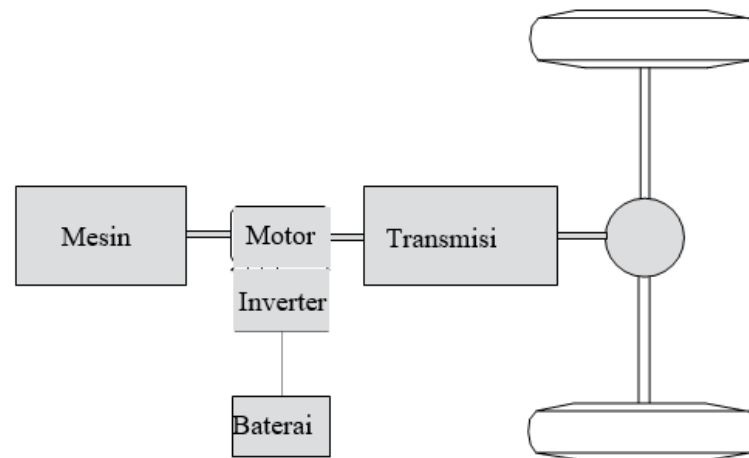


Gambar 1.21 Tata letak powertrain Toyota Prius (EM, mesin listrik; PM, magnet permanen).

Baterai nikel metal hidrida 6,5 Ah, 2,1 kW diisi oleh generator selama meluncur dan oleh motor penggerak (dalam mode pembangkitan) selama pengereman regeneratif. Mesin dimatikan selama mengemudi kecepatan rendah. Teknologi yang sama digunakan dalam hibrida Camry, hibrida Highlander, dan hibrida merek Lexus. Namun, hibrida Highlander dan Lexus menambahkan motor ketiga di roda belakang. Performa berkendara, seperti untuk akselerasi dan pengereman, dapat lebih ditingkatkan.

Honda Civic

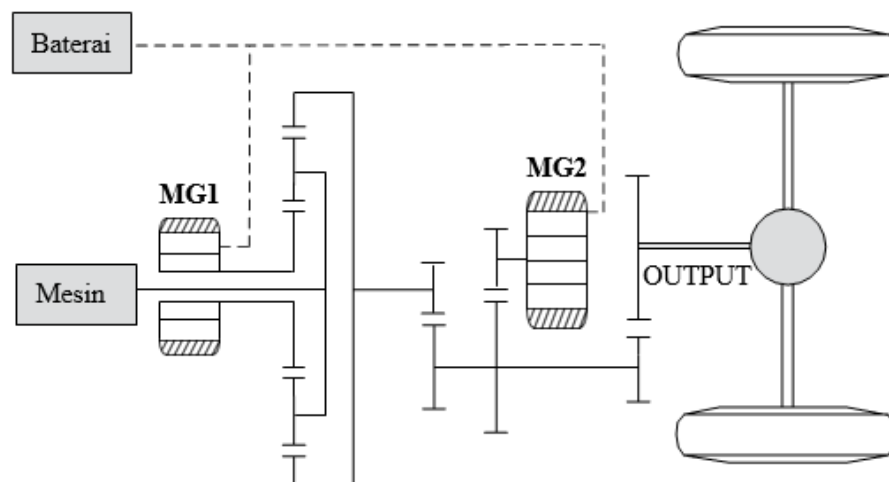
Hibrida Honda Civic memiliki motor listrik yang dipasang di antara ICE dan CVT, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.22. Motor listrik memberikan bantuan kepada mesin selama permintaan daya tinggi, atau membagi tenaga mesin selama permintaan daya rendah.



Gambar 1.22 Tata letak powertrain dari Honda Civic hybrid.

Ford Escape

Hibrida Escape dari Ford Motor Company (Gambar 1.23) adalah hibrida pertama dalam kategori SUV. Hibrida Escape menggunakan konsep roda planetary gear yang sama dengan sistem Toyota.



Gambar 1.23 SUV hybrid Ford Escape.

Hibrida Dua Mode

Transmisi hibrid dua mode GM awalnya dikembangkan oleh GM (Alison) pada tahun 1996, dan kemudian dikembangkan oleh GM, Chrysler, BMW, dan Mercedes-Benz melalui usaha patungan bernama Global Hybrid Cooperation pada tahun 2005. GM two-mode hybrids (Gambar 1.24) menggunakan dua set roda planetary gear dan dua mesin listrik untuk mewujudkan dua mode operasi yang berbeda, yaitu mode kecepatan tinggi dan mode kecepatan rendah. Operasi rinci dari hibrida dua mode akan dibahas dalam Bab 4.



Gambar 1.24 Hibrida dua mode Chrysler Aspen.

1.8 TANTANGAN DAN TEKNOLOGI UTAMA HEV

HEV dapat mengatasi beberapa kelemahan EV murni bertenaga baterai dan kendaraan konvensional bertenaga bensin. Keunggulan ini termasuk penghematan bahan bakar yang dioptimalkan dan pengurangan emisi jika dibandingkan dengan kendaraan konvensional, dan peningkatan jangkauan, pengurangan waktu pengisian, dan pengurangan ukuran baterai (sehingga mengurangi biaya) jika dibandingkan dengan EV murni.

Tabel 1.2 Daftar sebagian HEV yang tersedia (data dari 2011).

Pabrik	Model	Harga HEV (US \$)	Harga Berdasarkan Model (US \$)	Price Kenaikan Harga (%)	HEV MPG		Base MPG		Kenaikan MPG (%)	
					Kota	Hwy	Kota	Hwy	Kota	Hwy
Toyota	Prius ^a	22 800	15 450	47.6	51	48	26	35	96	37
	Camry	26 400	19 595	34.7	33	34	22	33	50	3
	Highlander	34 900	25 855	35.0	27	25	20	27	35	12
Ford/Mercury	Fusion	27 950	19 695	41.9	41	36	22	34	86	6
	Escape	29 860	21 020	42.1	34	31	22	28	55	11
	Mariner	30 105	23 560	27.8	34	31	21	28	62	11
Honda	Milan	31 915	21 860	46.0	41	26	23	34	78	-24
	Insight ^b	19 800	15 655	26.5	40	43	26	34	54	26
Nissan	Civic	23 800	15 655	52.0	40	45	26	34	54	32
	Altima	26 780	19 900	34.6	35	33	23	32	52	3
Lexus	RX 450h	42 685	37 625	13.4	32	28	18	25	78	12
	GS 450h	57 450	54 070	6.3	22	25	17	24	29	4
	LS 600h	108 800	74 450	46.1	20	22	16	23	25	-4
GM GMC, Chevrolet, and Cadillac Saturn ^c	Tahoe	50 720	37 280	36.1	21	22	15	21	40	5
	Yukon	51 185	38 020	34.6	21	22	15	21	40	5
	Sierra	38 710	20 850	85.7	21	22	15	22	40	0
	Malibu	22 800	21 825	4.5	26	34	22	33	18	3
	Escalade	73 425	62 495	17.5	21	22	13	20	62	10
	Silverado	38 340	29 400	30.4	22	21	13	17	69	24
Chrysler Dodge	Aspen ^d	44 700	40 000	11.8	18	19	15	20	38	6
	Durango ^d	45 900	40 365	13.7	18	19	15	20	38	6

a) Perbandingan dengan Corolla

b) Perbandingan dengan Civic

c) Kendaraan Merek Saturnus termasuk Vue dan Saturn Aura tidak ditawarkan

d) Chrysler Aspen menggunakan platform yang mirip dengan Durango tetapi tidak lagi ditawarkan

Namun, HEV dan PHEV masih menghadapi banyak tantangan, termasuk biaya yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan kendaraan konvensional, interferensi elektromagnetik yang disebabkan oleh komponen berdaya tinggi, dan masalah keamanan dan keandalan

karena peningkatan komponen dan kompleksitas, pengemasan sistem, kontrol kendaraan, dan daya. pengelolaan.

- **Power listrik dan mesin listrik:** Subjek elektronika daya dan motor listrik bukanlah hal baru. Namun, penggunaan elektronika daya di lingkungan kendaraan menimbulkan tantangan yang signifikan. Kondisi lingkungan, seperti suhu tinggi dan rendah yang ekstrem, getaran, guncangan, dan perilaku transien sangat berbeda dari apa yang biasanya memengaruhi motor listrik dan konverter elektronik daya. Tantangan dalam elektronika daya dalam HEV meliputi pengemasan, ukuran, biaya, dan manajemen termal.
- **Interferensi elektromagnetik:** Peralihan frekuensi tinggi dan operasi daya tinggi power elektronik daya dan motor listrik akan menghasilkan kebisingan elektromagnetik yang melimpah akan mengganggu sistem kendaraan lainnya jika tidak ditangani dengan benar.
- **Sistem penyimpanan energi:** Sistem ini merupakan tantangan utama bagi HEV dan PHEV. Perilaku daya berdenyut dan kandungan energi yang diperlukan untuk kinerja terbaik biasanya sulit dipenuhi oleh baterai konvensional. Siklus hidup dan toleransi penyalahgunaan juga penting untuk aplikasi kendaraan. Saat ini, baterai hidrida logam nikel digunakan oleh sebagian besar HEV dan baterai lithium-ion ditargetkan oleh PHEV. Ultrakapasitor juga telah dipertimbangkan dalam beberapa aplikasi khusus di mana permintaan daya menjadi perhatian utama. Flywheel juga telah diselidiki. Keterbatasan sistem penyimpanan energi saat ini adalah kepadatan daya dan kepadatan energi yang tidak memuaskan, siklus hidup yang terbatas, biaya tinggi, dan potensi masalah keamanan.
- **Kontrol pengereman regeneratif:** Memulihkan energi kinetik selama pengereman adalah kuncinya fitur HEV dan PHEV. Namun, mengkoordinasikan pengereman regeneratif dengan sistem pengereman hidraulik/gesekan menghadirkan tantangan besar sejauh menyangkut keselamatan dan kinerja pengereman.
- **Manajemen daya dan kontrol kendaraan:** HEV melibatkan penggunaan beberapa komponen propulsi yang memerlukan koordinasi yang harmonis. Oleh karena itu, manajemen daya merupakan aspek penting dari fungsi kontrol kendaraan di HEV. Pengendali kendaraan yang dioptimalkan dapat membantu mencapai efisiensi bahan bakar yang lebih baik dalam HEV.
- **Manajemen termal:** Elektronik daya, mesin listrik, dan baterai semuanya memerlukan suhu pengoperasian yang jauh lebih rendah daripada mesin bensin. Loop pendinginan terpisah diperlukan dalam HEV.
- **Pemodelan dan simulasi, dinamika kendaraan, desain kendaraan, dan optimasi:** Karena peningkatan jumlah komponen dalam HEV, pengemasan komponen dalam ruang yang sama menjadi tantangan. Dinamika kendaraan terkait, desain kendaraan, dan pemodelan dan simulasi semuanya melibatkan tantangan besar.

Tangan Tak Terlihat—Dukungan Pemerintah

Tanpa dukungan pemerintah, HEV dan PHEV mungkin membutuhkan waktu lebih lama untuk berhasil di pasar karena biayanya yang tinggi dan keterbatasan lainnya. Sejauh menyangkut konsumen, ada dua jenis pembeli HEV. Satu jenis mengharapkan untuk menghemat uang dari waktu ke waktu dengan menghemat konsumsi bahan bakar; yang lain membeli hibrida karena masalah lingkungan. Periode pengembalian, atau waktu yang diperlukan pemilik untuk memulihkan investasi dalam HEV karena penghematan bahan bakar, sangat bergantung pada harga bensin.

Ambil contoh Toyota Prius. HEV ini dibandrol dengan harga 22.800 sedangkan model serupa konvensional, Corolla, hanya 15.450. MPG meningkat sebesar 96% dalam mengemudi

di kota dan 37% di jalan raya. Asumsikan bahwa setiap tahun seorang pemilik berkendara rata-rata 10.000 mil di kota dan 5.000 mil di jalan raya. Maka konsumsi bahan bakar tahunan untuk model dasar dan hibrida adalah sebagai berikut:

Konvensional:	10,000 mil/26 MPG + 5000/35 MPG = 527 galon
HEV:	10,000 mil/51 MPG + 5000/48 MPG = 300 galon

Dengan 2,50 per galon, penghematan bahan bakar adalah 568 per tahun. Dengan kata lain, dibutuhkan 13 tahun untuk menutupi selisih biaya antara kedua kendaraan. Namun, jika bensin berharga 6,5 per galon, hanya perlu 5 tahun untuk memulihkan perbedaan biaya.

Pertimbangkan SUV Ford Escape sebagai contoh lain. HEV ini dibanderol dengan harga 29.860 sedangkan model konvensional dibanderol dengan harga 21.020. Asumsikan seorang pemilik mengendarai rata-rata 10.000 mil di kota dan 5.000 mil di jalan raya setiap tahun. Maka konsumsi bahan bakar tahunan untuk model dasar dan hibrida adalah sebagai berikut:

Konvensional:	10,000 mil/22 MPG + 5000/28 MPG = 633 galon
HEV:	10,000 mil/34 MPG + 5000/31 MPG = 455 galon

Total bahan bakar yang dihemat adalah 178 galon. Dengan IDR 30 ribu per galon, penghematan bahan bakarnya adalah IDR 8juta per tahun, jadi dibutuhkan 19 tahun untuk membuat perbedaannya. Namun, jika bensin mahal 6,5 per galon, dibutuhkan 7,5 tahun untuk memulihkan perbedaan biaya.

Insentif pemerintah dapat membuat perbedaan dalam skenario ini. Tabel 1.3 mencantumkan kredit pajak yang tersedia untuk PHEV tertentu tahun 2011–2016. Jika kita mengambil Ford Escape HEV sebagai contoh, ketika kredit pajak dianggap waktu pemulihan investasi adalah 5 dan 13 tahun, masing-masing, untuk harga bensin IDR 80ribu dan IDR 42 ribu per galon.

Tabel 1.3 Kredit pajak yang tersedia untuk PHEV tertentu
(<https://www.irs.gov/businesses/qualified-vehicles-acquired-after-12-31-2009>).

Model year	Make	Model	Credit amount (\$)
2011	BMW	I3	7,500
2011–2017	GM	Chevrolet Volt	7,500
		Cadillac ELR	7,500
		Chevrolet Spark EV	7,500
2013–2016	Mercedes-Benz	smart Coupe/Cabrio EV	7,500
2011–2016	Nissan	Leaf	7,500
2015	Porsche	Caynee S E-Hybrid	5,336
2012–2015	Toyota	Prius PHEV	2,500
		RAV4 EV	7,500

Beberapa negara bagian dan kota metropolitan di Amerika Serikat, seperti California dan Washington DC, mengizinkan akses HEV ke jalur HOV (*High Occupancy Vehicle*). Karena fakta bahwa sejumlah besar waktu dapat dihemat dengan mengemudi di jalur HOV, beberapa konsumen termotivasi untuk membeli HEV atau PHEV untuk perjalanan sehari-hari mereka untuk menghemat waktu.

Beberapa negara bagian lain, seperti Colorado dan California, memiliki insentif terpisah selain insentif dari pemerintah federal. Sejumlah perusahaan swasta seperti Google, Bank, STMicroelectronics, dan Hyperion memberi penghargaan kepada karyawan mereka

untuk membeli atau menyewa HEV. Menarik untuk dicatat bahwa motivasi perusahaan terhadap investasi semacam itu oleh karyawan mereka mungkin untuk memungkinkan mereka menghabiskan waktu di kantor daripada di lalu lintas. Pada saat penulisan buku ini, Cina, Jepang, Indonesia, Uni Eropa, dan banyak negara lain di seluruh dunia telah memprakarsai dukungan untuk pengembangan, demonstrasi, dan penyebaran EV, PHEV, dan baterai terkait serta komponen penggerak listrik.

Namun, hibridisasi kendaraan bukanlah solusi akhir untuk keberlanjutan, meskipun membangun jalan menuju masa depan yang berkelanjutan. Teknologi yang dikembangkan di sepanjang jalur ini akan memungkinkan transisi yang diperlukan dari transportasi berbasis bahan bakar fosil ke elektrifikasi akhir sektor transportasi.

Elektrifikasi saja tidak akan memberikan keberlanjutan. Akan ada kebutuhan untuk upaya terkoordinasi di sepanjang jalur kritis ini, termasuk perencanaan kota yang lebih cerdas, sistem transien publik, jaringan kereta api berkecepatan tinggi, dan kendaraan serta jalan yang lebih cerdas dan lebih aman. Juga akan ada kebutuhan untuk upaya kolektif oleh berbagai pemangku kepentingan. Industri ketenagalistrikan harus meningkatkan energi terbarukan dan pembangkit energi yang lebih bersih. Pemerintah perlu mengembangkan sistem transportasi kereta cepat di dalam dan di antara kawasan metropolitan yang padat.

Perkembangan Terbaru dalam EV dan HEV, Lonjakan Penjualan EV China

Pada saat penulisan edisi kedua buku ini, ada kemajuan signifikan dalam elektrifikasi mobil:

- Penjualan HEV, EV, dan PHEV terus meningkat, dengan penjualan PHEV dan EV meningkat secara signifikan selama lima tahun terakhir.
- China menjual 21,15 juta mobil penumpang pada tahun 2015, termasuk sedan, kendaraan sport, dan minivan, meningkat 7,3% dari tahun 2014; dan menjual 23,9 juta mobil pada tahun 2016, naik 15,9% dibandingkan tahun 2015. Ini masing-masing kurang dari 10% dan 16% pada tahun 2013 dan 2014. Diperkirakan bahwa Cina akan melihat peningkatan 7,8% dalam penjualan mobil pada tahun 2016, meningkat menjadi 22,76 juta kendaraan untuk tahun 2016.
- China mengalami lonjakan penjualan EV terbesar karena insentif pemerintah yang besar, dan menjual lebih dari 300.000 pada tahun 2015 (188.700 mobil penumpang dan 124.000 bus listrik) atau 223% dari penjualan tahun sebelumnya, tidak termasuk lebih dari 300.000 kendaraan berkecepatan rendah penjualan. (<http://cleantechnica.com/2016/03/08/china-electric-car-sales-increased-223-in-2015/> dan <http://www.wsj.com/articles/china-car-sales-growth-slows-further-1452587244>). Itu menjual 350.000 kendaraan listrik dan kendaraan listrik plug-in pada tahun 2017, hampir setengah dari semua EV / PHEV yang dijual di dunia.
- Sejumlah perusahaan bangkrut dalam 6 tahun terakhir, sementara penjualan EV terus meningkat, termasuk pembuat EV Fisker Karma, pembuat baterai lithium-ion A123, dan perusahaan pertukaran baterai Better Place.
- Harga minyak dipertahankan rendah, mencapai di bawah 30 per barel pada tahun 2016, turun 80% dari puncaknya pada tahun 2008.

Secara historis, harga minyak yang tinggi telah meningkatkan minat pada kendaraan listrik. Rendahnya harga minyak saat ini akan menimbulkan ketidakpastian bagi masa depan kendaraan listrik dan hibrida, sebagian karena harga bensin yang rendah. Ambil contoh di bagian sebelumnya di mana harga bensin ditetapkan pada IDR 50 ribu per galon, biaya mengemudi dengan bensin hampir lima kali lipat biaya mengemudi menggunakan listrik. Dengan harga bensin IDR 28 ribu per galon, biaya untuk mengendarai mobil menggunakan bensin hanya 2,5 kali lipat dari listrik. Dengan rata-rata 24.000 km per tahun, itu akan menghemat 375 per tahun untuk mobil berukuran kompak yang khas. Oleh karena itu, jika

biaya tambahan EV (termasuk biaya baterai) adalah IDR 90 juta, dibutuhkan hampir 15 tahun untuk memulihkan investasi awal. Oleh karena itu, secara ekonomi, EV dan HEV menjadi kurang menarik.

Insentif pemerintah benar-benar dapat mengubah skenario. Misalnya, pada tahun 2015, China menjual lebih dari 300.000 EV. Namun, dalam tiga bulan terakhir tahun itu mereka melihat 75% penjualan EV dibandingkan dengan total EV yang terjual dalam sembilan bulan pertama. Lonjakan ini disebabkan beberapa subsidi pemerintah akan berakhir pada akhir tahun. Dalam beberapa kasus, subsidi akan menutupi lebih dari 90% dari harga jual mobil. Namun, China secara bertahap akan mengurangi subsidi pemerintah, pada tingkat 20% per tahun mulai tahun 2016, sehingga tidak ada atau sedikit subsidi untuk EV pada tahun 2020. Kita harus melihat bagaimana pasar dan konsumen bereaksi dengan pengurangan subsidi.

Di sisi lain, Tesla, misalnya, telah memperoleh banyak momentum dalam penjualan EV-nya, terutama Model 3 yang sangat dinanti-nantikan, yang dimulai dengan harga hanya 35.000, dibandingkan dengan 75.000 untuk Model S. Model 3 telah memiliki lebih dari 400.000 pesanan dilakukan pada Juni 2016. Tetapi bahkan dengan volume penjualan yang terealisasi, Tesla kehilangan 889 juta pada tahun 2015 dan 282 juta pada kuartal pertama 2016. (<https://finance.yahoo.com/q/is?s=TSLA&annual>, <http://gizmodo.com/tesla-is-losing-money-but-making-more-cars-1758351727>, <http://seekingalpha.com/article/3968035-tesla-lose-money-every-car-sold>).

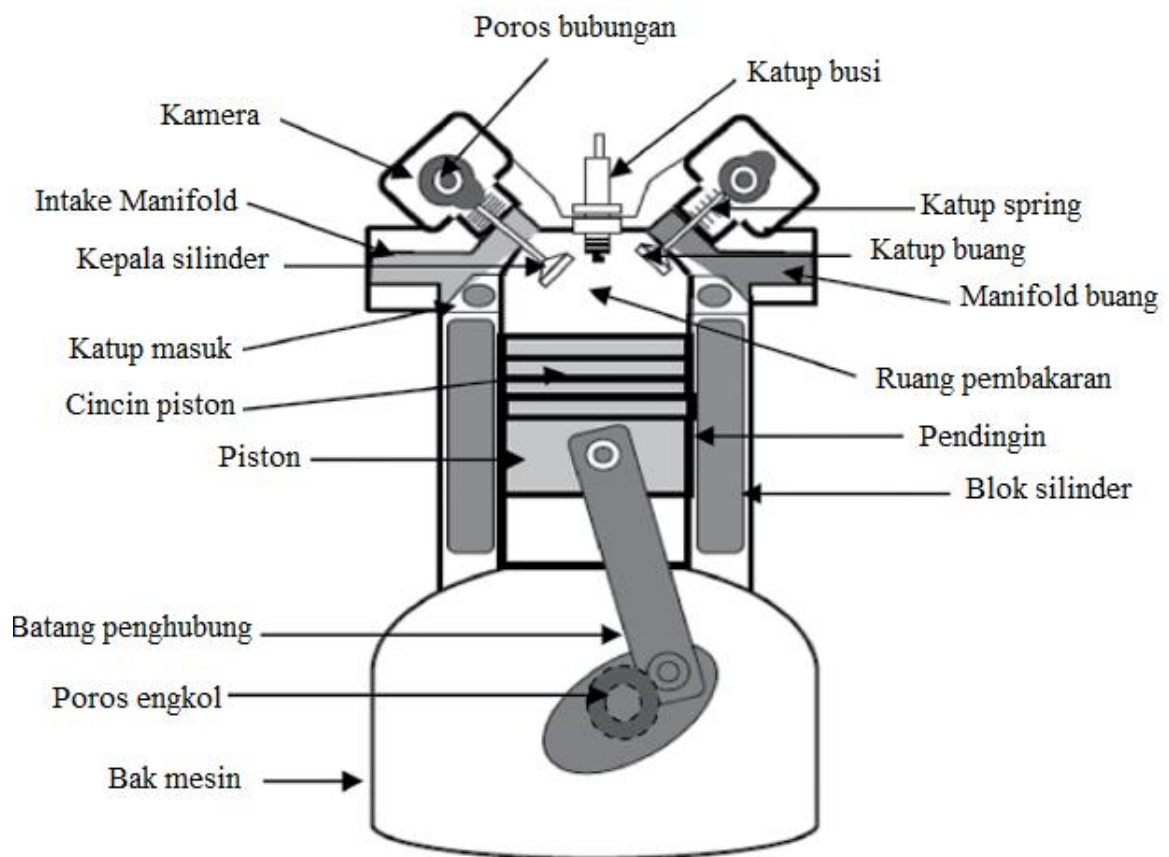
Baterai masih menjadi leher botol untuk penetrasi EV. Biaya, kepadatan energi, daya tahan, keandalan, dan keamanan adalah perhatian utama untuk baterai lithium-ion yang tersedia saat ini. Teknologi lain, seperti bahan graphene, yang berpotensi membantu meningkatkan kepadatan energi baterai secara signifikan, masih harus dikembangkan dan divalidasi lebih lanjut. Jika memang kepadatan energi bisa tiga kali lipat atau empat kali lipat dalam beberapa tahun ke depan, dan biayanya bisa turun hingga 1/3 dari biaya saat ini, dan EV akan lebih kompetitif daripada mobil bertenaga bensin.

BAB 2 KONSEP HIBRIDISASI MOBIL

2.1 DASAR-DASAR KENDARAAN

Komponen Kendaraan Konvensional

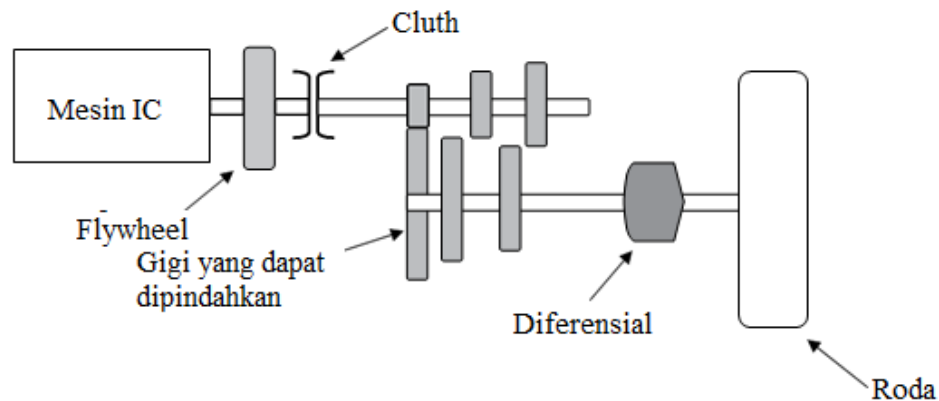
Saat ini mobil yang digerakkan oleh mesin sudah berevolusi selama bertahun-tahun. Mobil awalnya dimulai dengan propulsi uap dan kemudian dialihkan menjadi yang berbasis mesin pembakaran internal/ICE (*Internal Combustion Engine*). Fokus bab ini adalah pada kendaraan ICE. Jadi, kendaraan yang kita gunakan saat ini memiliki mesin diesel atau bensin (atau bensin, seperti yang disebut di negara-negara di luar Amerika Utara). Mesin memberikan tenaga untuk menggerakkan kendaraan. Ilustrasi ICE ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Tampilan potongan ICE

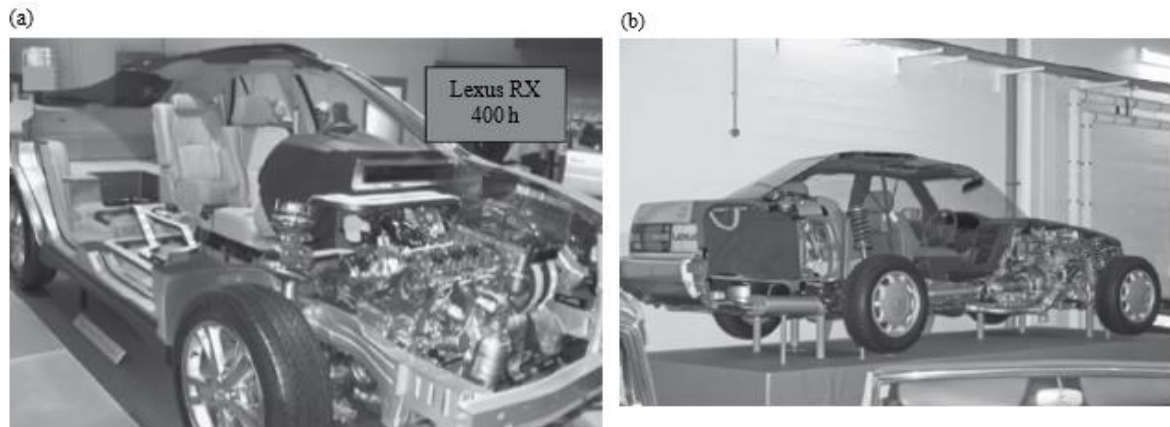
Mesin memiliki ruang di mana bensin atau solar dinyalakan, dan sebagai akibatnya, ketika campuran udara-bahan bakar gas meledak, itu menciptakan tekanan yang sangat tinggi untuk menggerakkan piston. Sebuah piston dihubungkan melalui lengan reciprocating ke poros engkol, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Crankshaft dihubungkan dengan flywheel yang kemudian dihubungkan dengan sistem transmisi. Tujuan dari sistem transmisi adalah untuk mencocokkan profil kecepatan torsi mesin dengan profil kecepatan torsi beban. Gambar 2.2 menunjukkan diagram yang disederhanakan dari sistem transmisi yang terhubung ke mesin dan beberapa perangkat perantara.

Poros dari sistem transmisi pada akhirnya terhubung ke roda melalui beberapa antarmuka mekanis tambahan seperti roda gigi diferensial. Sistem kendaraan secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 2.3 dengan elemen penyusun tingkat sistem dasar dalam kendaraan masa kini.



Gambar 2.2 Sistem transmisi dan mesin dihubungkan bersama.

Gambar 2.3 menunjukkan pandangan cutaway dari hibrida dan kendaraan biasa yang menunjukkan kompleksitas dan pengemasan yang ketat dari berbagai komponen dalam batas-batas ruang kecil di mobil masa kini.



Gambar 2.3 (a) Tampilan potongan (a) Lexus RX 400h. (b) Tampilan potongan Lexus LS 400. Courtesy Wikimedia,

http://LexusRXen.wikipedia.org/wiki/File:Lexus_RX_400h_cutaway_400hmodel.jpg;
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lexus_Cutaway_LS_400.jpg

Kendaraan dan Beban Propulsi

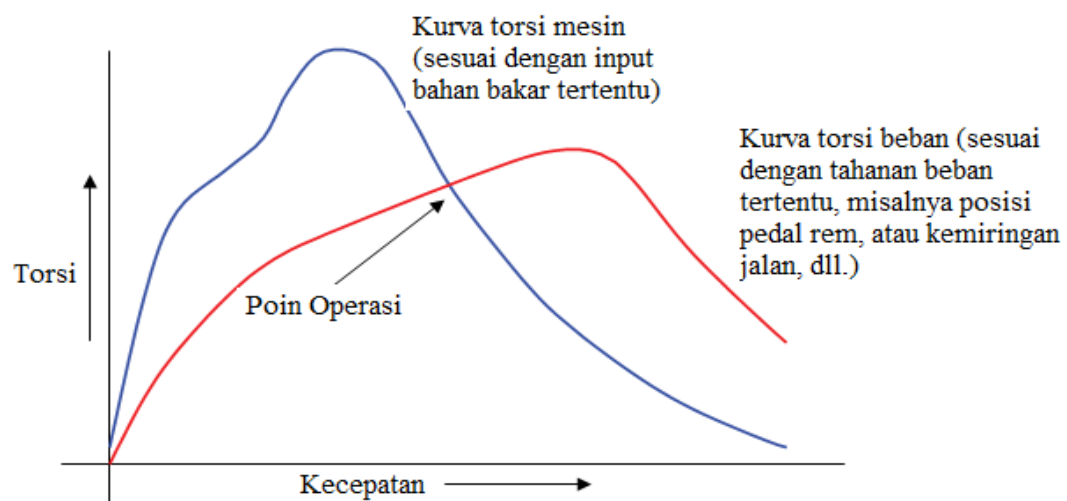
Daya yang dihasilkan oleh mesin pada akhirnya digunakan untuk menggerakkan beban. Dalam sebuah mobil, beban ini mencakup hambatan jalan akibat gesekan, dorongan menanjak atau menurun yang terkait dengan profil jalan, dan pengaruh lingkungan, misalnya, angin, hujan, dan salju. Selain itu, sebagian energi yang dikembangkan di dalam kendaraan terbuang sia-sia untuk mengatasi hambatan internal di dalam berbagai komponen dan subsistem kendaraan, yang tidak ada yang 100% efisien. Contoh subsistem atau komponen tersebut termasuk kipas radiator, berbagai pompa, baik listrik maupun mekanik, motor untuk wiper, dan pengangkat jendela. Barang-barang ini hanyalah beberapa contoh dari beban kendaraan. Energi yang hilang dalam perangkat ini akhirnya dilepaskan sebagai panas dan dikeluarkan ke atmosfer.

Biasanya load / "beban" dapat dikaitkan dengan jumlah gaya atau torsi yang berlawanan, tetapi definisi beban yang lebih ilmiah berasal dari fakta bahwa beban tidak ditentukan oleh angka tunggal atau nilai numerik. Beban adalah kumpulan angka yang ditentukan oleh karakteristik kecepatan-torsi atau kecepatan-gaya dalam bentuk tabel atau grafik, yaitu melalui persamaan matematis yang berkaitan dengan kecepatan dan torsi. Demikian pula, mesin juga didefinisikan oleh karakteristik kecepatan-torsi dalam bentuk tabel

atau grafik, yaitu melalui persamaan matematis. Titik operasi kombinasi mesin dan sistem beban bersama-sama kemudian akan berada di persimpangan dua karakteristik ini. Situasi ini ditunjukkan pada Gambar 2.4. Juga harus dicatat bahwa, untuk mesin, kurva kecepatan torsi adalah hubungan ketika sejumlah bahan bakar tertentu (sesuai dengan posisi pedal akselerasi tertentu) masuk ke dalam mesin. Demikian pula, untuk beban, kurva kecepatan torsi adalah hubungan, misalnya di bawah tekanan rem tertentu (yaitu tekanan pedal rem jika itu adalah beban rem), atau kemiringan atau gradien tertentu di mana kendaraan bergerak, dan sebagainya. Dengan kata lain, kurva pada Gambar 2.4 sebenarnya adalah anggota tunggal dari keluarga kurva.

Sebuah kendaraan atau sistem otomotif yang lengkap memiliki beban yang beragam. Beberapa di antaranya adalah perangkat listrik, dan lainnya adalah perangkat mekanis. Beban listrik biasanya dijalankan pada tegangan rendah (nominal 12 V). Alasan menjalankan beban non-propulsi pada tegangan rendah terutama terkait dengan masalah keselamatan dan berbagai standar yang harus diikuti. Ada basis manufaktur yang ada untuk banyak beban non-propulsi ini (seperti yang ditunjukkan di bawah), di mana lebih mudah untuk memanfaatkan situasi, dan menggunakan komponen tegangan rendah yang ada, daripada mengubah sistem tegangan. Contoh beban ini adalah:

- Rem – mekanis (dibantu dengan listrik hidrolik atau tegangan rendah)
- AC – umumnya mekanis
- Kipas radiator – dapat digerakkan dengan sabuk secara mekanis atau digerakkan oleh motor listrik bertegangan rendah
- Berbagai pompa – bisa mekanis atau listrik tegangan rendah
- Pengangkat jendela – listrik
- Kunci pintu – listrik
- Wiper – listrik
- Berbagai lampu – beban non-motor, listrik tegangan rendah
- Radio, TV, GPS – beban non-motor, listrik tegangan rendah
- Berbagai pengontrol – misalnya, pengontrol mesin, pengontrol transmisi, pengontrol bodi kendaraan
- Berbagai mikroprosesor komputasi – beban non-motor, listrik tegangan rendah.

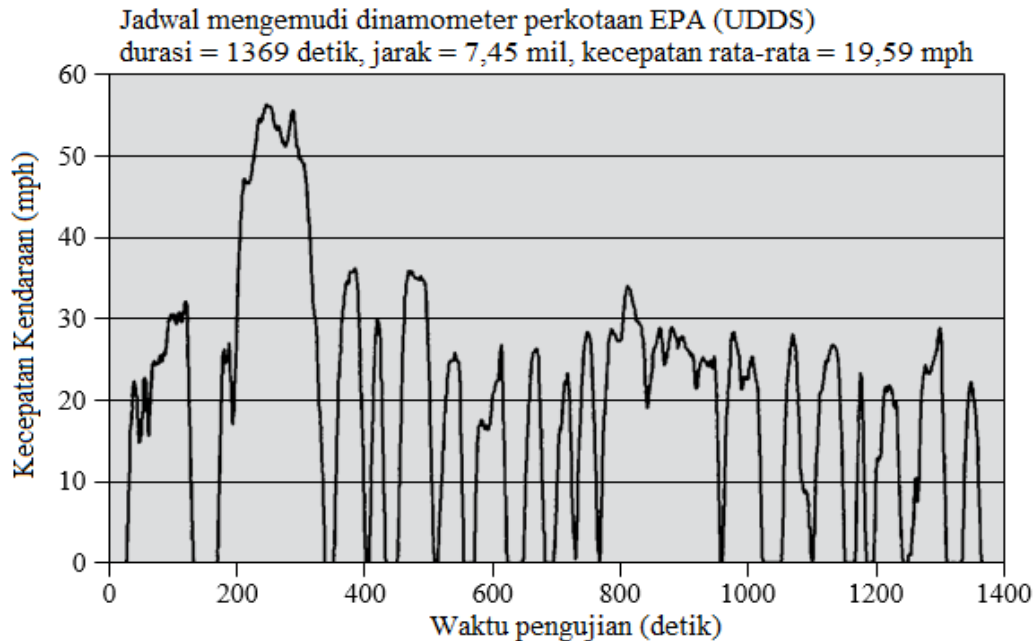


Gambar 2.4 Karakteristik beban dan mesin kendaraan.

2.2 SIKLUS BERKENDARA DAN MEDAN BERKENDARA

Karena kendaraan akan dikendarai melalui semua jenis profil jalan dan kondisi lingkungan, untuk mengetahui secara pasti sebelumnya tentang beban apa yang akan

dihadapi kendaraan dalam segala keadaan adalah sulit. Tentu saja dimungkinkan untuk melakukan eksperimen dan menempatkan sensor untuk memantau kecepatan dan torsi kendaraan, tetapi melakukannya dalam semua keadaan untuk semua platform kendaraan sama sekali tidak realistis, jika bukan tidak mungkin. Oleh karena itu, untuk kepentingan studi teknik, beberapa situasi terbatas telah dikembangkan, yang kurang lebih mencakup profil jalan yang khas dan medan yang biasanya ditemui. Dengan menggunakan beberapa profil ini, kita dapat membuat atau mensintesis berbagai profil jalan arbitrer.



Gambar 2.5 Siklus penggerak otomotif pada umumnya. Atas perkenan EPA.

Profil tersebut dapat melibatkan hal-hal seperti mengemudi di dalam kota, di jalan raya, melintasi beberapa medan menanjak atau menurun khusus, untuk beberapa nama. Siklus berkendara hanya menyediakan waktu dan fluktuasi kecepatan yang sesuai, dengan label yang dilampirkan pada ini memberi tahu kita jenis siklus berkendara itu, misalnya, kota atau jalan raya. Data siklus drive dengan sendirinya tidak mengungkapkan medan; itu adalah label yang dilampirkan pada data yang memberi tahu apa siklus drive itu. Satu siklus penggerak yang mungkin ditunjukkan pada Gambar 2.5. Perlu dicatat bahwa data siklus penggerak yang digabungkan dengan sifat medan menentukan torsi (atau daya) yang dibutuhkan kendaraan, untuk melewati medan tertentu. Misalnya, kurva kecepatan torsi yang identik di jalan datar akan membutuhkan daya yang jauh lebih rendah untuk dilalui, dibandingkan dengan jalan dengan kemiringan 30° dengan profil kecepatan versus waktu yang sama.

Berdasarkan hal di atas, mudah untuk melihat bahwa jika kendaraan melewati situasi mengemudi yang berbeda, sebagian kota, sebagian jalan raya, dan seterusnya, maka seseorang dapat memperoleh data kecepatan vs waktu kumulatif dengan mensintesis beberapa siklus penggerak yang khas.

Pertanyaan kemudian muncul tentang cara memanfaatkan informasi siklus drive. Asumsikan bahwa kita ingin mengetahui penghematan bahan bakar kendaraan X tertentu. Tidaklah cukup untuk mengatakan bahwa kendaraan X mencapai 25 MPG. Kita juga perlu mengatakan dalam kondisi apa ini diperoleh, apakah itu di bawah siklus berkendara kota, atau siklus berkendara di jalan raya, atau yang lainnya. Baru kemudian kita dapat membuat perbandingan yang adil antara kendaraan X dan kendaraan lain Y.

Karena ada berbagai jenis siklus berkendara, mobil penumpang tidak dapat dibandingkan dengan siklus mengemudi truk sampah atau kendaraan pos, karena mereka memiliki jenis berhenti dan mulai mengemudi yang sangat berbeda. Demikian pula siklus

mengemudi kendaraan pertambahan berat berbeda lagi. Kita akan mengatakan lebih banyak tentang ini di bab selanjutnya tentang kendaraan off-road. Intinya adalah siklus berkendara memungkinkan kita untuk membuat perbandingan yang adil antara kendaraan, khususnya dalam hal penghematan bahan bakar, dan juga dalam hal kinerja.

Akhirnya, harus dicatat bahwa siklus mengemudi menyangkut profil jalan yang dilalui kendaraan dan karenanya merupakan situasi di luar kendaraan. Namun, respons kendaraan terhadap siklus penggerak tertentu, dalam hal penghematan bahan bakar, akan berbeda tergantung pada apakah kendaraan tersebut merupakan kendaraan ICE biasa, kendaraan listrik penuh (EV), kendaraan listrik hibrida (HEV), dan sebagainya. Oleh karena itu pembahasan tentang siklus berkendara di atas juga berlaku untuk jenis kendaraan lainnya, seperti yang dibahas di bawah ini.

2.3 DASAR-DASAR EV

Mengapa EV?

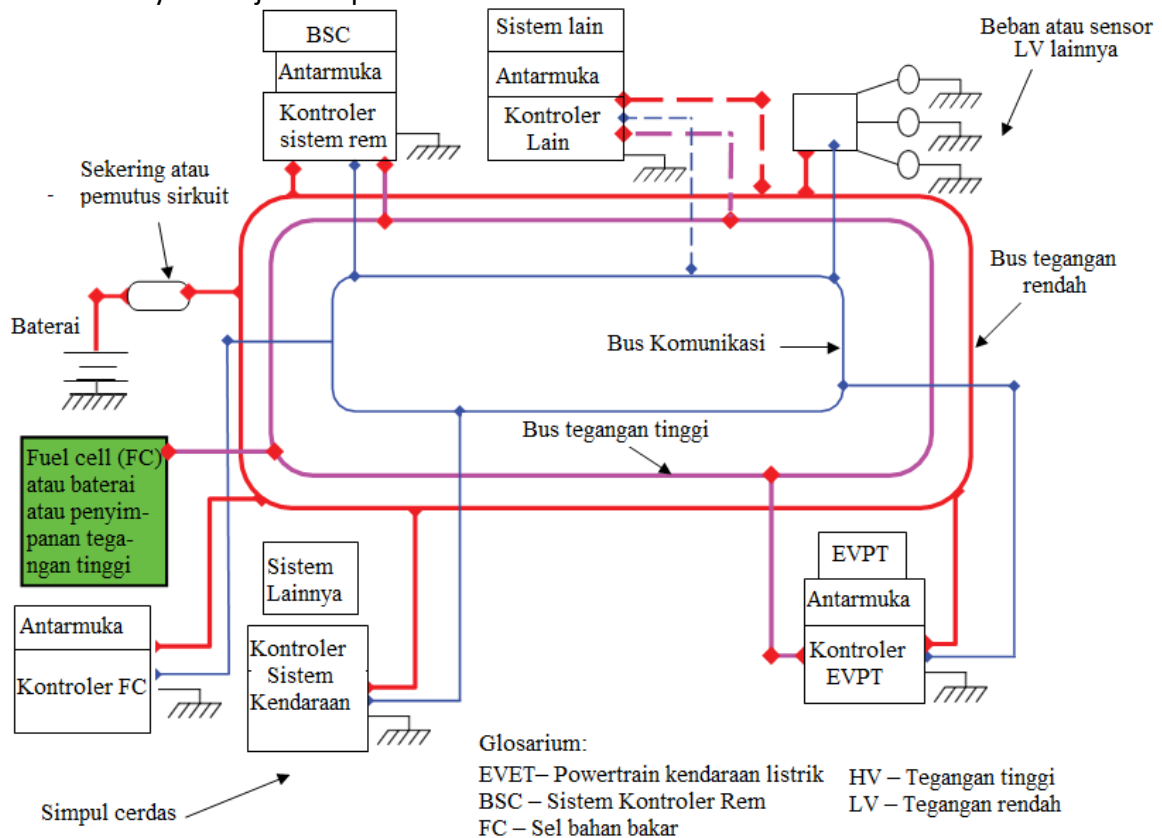
Meskipun akhir-akhir ini orang berbicara lebih banyak tentang HEV, yang telah menjadi sangat populer, sistem dasarnya rumit karena memiliki dua sumber penggerak. Sebuah EV murni relatif sederhana karena hanya memiliki satu sumber energi, baterai atau mungkin sel bahan bakar. Meskipun dimungkinkan untuk memiliki baterai dan sel bahan bakar dalam EV murni, saat ini teknologi berada pada tahap di mana secara umum dianggap tidak terlalu hemat biaya, atau efisien dalam hal ukuran dan berat. Demikian pula, penggeraknya dilakukan oleh motor listrik, dan kebutuhan akan ICE tidak ada. Jika tidak ada ICE, kendaraan tidak memerlukan injektor bahan bakar, berbagai pengontrol mesin yang rumit, dan semua periferal lain yang terkait dengan mesin dan transmisi. Dengan jumlah suku cadang yang berkurang dan sistem yang lebih sederhana, juga akan lebih andal.

Selain itu, EV sebenarnya adalah kendaraan tanpa emisi (hanya "hampir" karena tidak ada yang secara teknis nol emisi dalam arti global yang sebenarnya). Tentu saja, jika kita mempertimbangkan sumber energi utama, dengan menelusuri jalur mundur dari baterai ke industri utilitas, akan ditemukan bahwa lokasi polusi pada dasarnya telah bergeser dari kendaraan ke tempat lain. Selain itu, EV sangat tenang. Bahkan, bisa sangat sunyi sehingga orang bahkan berbicara tentang memasukkan suara buatan ke dalam kendaraan sehingga mereka dapat mendengarnya, yang merupakan sesuatu yang penting untuk diketahui dari sudut pandang keselamatan. Juga harus diakui bahwa jika baterai atau teknologi sel bahan bakar – satu-satunya mata rantai lemah dalam hal kematangan teknologi – sepenuhnya matang, yaitu, mampu menyediakan daya dan energi yang diperlukan dalam ukuran, berat, dan biaya yang ringkas, HEV mungkin tidak diperlukan. Jelas, EV ada dalam daftar keinginan semua orang dan dapat dianggap sebagai titik puncak sebenarnya dari teknologi otomotif.

Dari sudut pandang teknis, EV memiliki manfaat lain. Di ICE, yang merupakan mesin reciprocating, torsi yang dihasilkan bersifat berdenyut. Flywheel membantu menghaluskan torsi, yang jika tidak akan menyebabkan getaran. Di EV, motor dapat menciptakan torsi yang sangat halus dan, pada kenyataannya, dimungkinkan untuk menghilangkan flywheel, sehingga menghemat bahan dan biaya produksi, selain mengurangi bobot. Akhirnya, efisiensi ICE (bensin ke poros torsi) sangat rendah. Mesin itu sendiri memiliki efisiensi sekitar 30–37% untuk bensin dan sekitar 40% untuk diesel, tetapi pada saat tenaga tiba di kemudi, efisiensinya hanya 5-10%. Tetapi efisiensi motor listrik sangat tinggi – sekitar 90%. Baterai dan elektronika daya untuk menggerakkan motor juga memiliki efisiensi tinggi. Jika masing-masing komponen ini memiliki efisiensi pada urutan 90%, pada saat energi baterai meninggalkan poros motor dan mencapai roda, efisiensi keseluruhan akan menjadi sekitar 70%, jauh lebih tinggi daripada ICE.

Konstituen dari EV

Seperti disebutkan sebelumnya, EV lebih sederhana daripada HEV. Konstituen tingkat sistem dasarnya ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Diagram tingkat sistem dari EV. Dari, © 2008 IEEE.

EV lengkap tidak hanya terdiri dari penggerak listrik dan elektronika daya untuk propulsi, tetapi juga subsistem lain untuk membuat seluruh sistem bekerja. Pada Gambar 2.6, kita membutuhkan baterai (atau sel bahan bakar) untuk menyediakan energi listrik. Hal ini ditunjukkan oleh blok di sebelah kiri, yang menyediakan tenaga untuk menggerakkan motor listrik. Motor adalah bagian dari powertrain EV, diberi label EVPT di sebelah kanan. Untuk setiap item ini, baterai atau EVPT, ada pengontrol. Pengontrol baterai mengontrol pengisian atau pengosongan, dan demikian pula pengontrol EVPT mengontrol kecepatan atau torsi motor dengan mengontrol elektronika daya. Harus disadari bahwa meskipun balok-balok dalam diagram diperlihatkan berada pada posisi yang sangat berbeda, pada kenyataannya beberapa di antaranya dapat secara fisik berada dalam jarak yang dekat. Ini karena masalah pengemasan, dan juga, dengan menempatkannya di dekat, dimungkinkan untuk mengurangi panjang kabel arus tinggi dan/atau tegangan tinggi. Demikian pula, meskipun pengontrol FC (untuk pengontrol sel bahan bakar, atau akan menjadi pengontrol baterai jika menggunakan baterai) dan pengontrol EVPT ditampilkan secara terpisah untuk menunjukkan fungsi yang terpisah, pada kenyataannya mereka dapat menjadi bagian dari kotak fisik yang sama dan dapat bahkan menggunakan mikroprosesor yang sama untuk mencapai fungsinya. Aspek-aspek ini adalah masalah desain halus yang melibatkan biaya dan pengemasan. Selain itu, ada kotak yang ditampilkan sebagai antarmuka. Ini adalah kotak pengontrol yang menerima sinyal dan juga daya, baik tegangan tinggi untuk penggerak maupun tegangan rendah untuk perangkat tertentu tertentu yang beroperasi pada tegangan rendah, dan kemudian melalui fungsi antarmuka menyalurkannya ke motor EVPT atau baterai tegangan tinggi. Sekali lagi, blok yang terpisah secara fungsional ini dapat digabungkan saat mengintegrasikan sistem secara fisik.

Selain blok di atas, ada berbagai blok lain, misalnya, pengontrol kendaraan, yang dapat menerima sinyal seperti kecepatan kendaraan, dan posisi pedal pengemudi, dan membuat keputusan apakah diperlukan torsi tambahan atau tidak dari blok tersebut. motor. Berdasarkan informasi tersebut dapat mengirimkan sinyal ke kontroler EVPT dengan permintaan torsi yang sesuai. Demikian pula, pengontrol rem dapat menerima sinyal yang sesuai dengan posisi pedal rem, kecepatan kendaraan, dan sebagainya, dan memutuskan berapa banyak gaya rem yang dibutuhkan. Itu juga dapat menerima sinyal seperti status pengisian baterai dan mencari tahu apakah ada peluang pengereman regeneratif. Jika demikian, ia kemudian dapat mengirim sinyal ke pengontrol EVPT untuk melakukan ini. Semua hal di atas menggambarkan pentingnya aliran informasi dan sinyal yang berkelanjutan antara berbagai blok kontrol dan pengambilan keputusan yang sesuai di setiap subsistem.

Transmisi informasi antara berbagai blok biasanya dilakukan melalui bus *controller area network* (CAN). Ini pada dasarnya adalah jenis jaringan komputer di mana satu kabel (yang juga bisa berupa kabel yang dipilin) dapat berisi berbagai sinyal informasi atau komunikasi yang digandakan bersama. Beberapa jenis protokol harus diamati ketika banyak sinyal dilewatkan dan dibagikan oleh media yang sama. Dengan kata lain, ada semacam aliran sinyal berbasis prioritas ketika mencoba berbagi media fisik yang sama. Untuk sinyal yang relatif lambat – misalnya untuk memutar saklar kunci pintu – kita bisa menunggu, sedangkan untuk fungsi yang sangat penting seperti pengereman dan kemudi, yang merupakan fungsi keselamatan, sinyal harus segera ditransmisikan. Ada beberapa protokol baru yang memungkinkan aktivitas semacam itu. Selain itu, untuk fungsi kritis keselamatan, mungkin perlu memiliki mekanisme komunikasi cadangan berbasis perangkat keras tambahan, untuk menghindari kegagalan.

2.4 KENDARAAN DAN BEBAN PROPULSI

Ada sejumlah kesamaan yang signifikan antara beban dalam EV dan mobil biasa. Oleh karena itu, seperti halnya kendaraan biasa, beberapa dari beban ini adalah perangkat listrik dan yang lainnya adalah perangkat mekanis. Seperti disebutkan sebelumnya, beban-beban yang biasanya listrik berjalan pada tegangan rendah (nominal 12 V), dengan pengecualian beban propulsi, yaitu motor penggerak, yang berjalan pada tegangan tinggi (beberapa ratus volt). Beban tegangan rendah ini untuk tujuan non-propulsi juga disebut sebagai beban tambahan. Alasan penggunaan tegangan rendah untuk beban tambahan terutama terkait dengan keselamatan. Dan, tentu saja, basis manufaktur yang ada untuk banyak beban non-propulsi ini dapat menjadi keuntungan, dengan menggunakan komponen tegangan rendah yang ada, daripada mengubah sistem tegangan. Contoh beban bantu ini sama dengan yang disebutkan dalam Bagian 2.1.2:

- Motor rem (jika sistem rem listrik sepenuhnya atau sebagian digunakan) – tegangan rendah
- Motor AC (jika listrik) – tegangan rendah
- Kipas radiator (jika listrik) – tegangan rendah
- Berbagai pompa (jika listrik) – tegangan rendah
- Pengangkatan jendela – tegangan rendah
- Kunci pintu – listrik
- Wiper – listrik
- Berbagai lampu – beban non-motor, listrik tegangan rendah
- Radio, TV, GPS – non-motor, listrik tegangan rendah
- Berbagai pengontrol, seperti pengontrol mesin, pengontrol transmisi, pengontrol bodi kendaraan

- Berbagai mikroprosesor komputasi, prosesor sinyal digital/*Digital Signal Processor* (DSP) – non-motor, listrik tegangan rendah

Beban propulsi dapat beberapa kilowatt untuk sistem pengereman regeneratif kendaraan hybrid ringan, hingga 50 kW, atau beberapa ratus kilowatt untuk propulsi dalam kendaraan hybrid. Berbagai pompa dan kipas hanya beberapa ratus watt atau kurang, sedangkan beberapa motor kecil seperti motor kunci pintu bisa hanya beberapa puluh watt. Demikian pula lampu dapat berkisar dari beberapa puluh hingga sekitar seratus watt.

Beban di atas diumpangkan oleh baterai, generator, atau kombinasi keduanya. Kita juga dapat melihat dari Gambar 2.6 bahwa beban non-propulsi diumpangkan oleh baterai tegangan rendah. Tegangan rendah ini dapat diturunkan baik dengan menggunakan bagian dari sistem baterai tegangan tinggi utama, atau melalui transformasi sistem tegangan tinggi dengan konverter turun DC-DC; bahkan bisa menjadi baterai tegangan rendah yang benar-benar terpisah dengan sistem generatornya sendiri untuk mengisi dayanya. Dengan kata lain, lebih dari satu arsitektur dimungkinkan untuk sistem tegangan rendah.

2.5 DASAR-DASAR HEV

Mengapa HEV?

Di bagian sebelumnya kita membahas arsitektur EV murni. Seperti yang kita lihat, penggerak EV menggunakan motor listrik. Energi berasal dari baterai (atau mungkin sel bahan bakar). Bank baterai dalam EV murni bisa sangat besar jika kendaraan harus menempuh beberapa ratus dengan sekali pengisian daya. Alasannya adalah karena teknologi baterai, seperti yang ada saat ini, tidak memiliki kepadatan energi yang sangat tinggi dalam hal berat dan ukuran, dibandingkan dengan bahan bakar cair seperti bensin. Meskipun teknologi baterai baru seperti lithium-ion memiliki kepadatan energi yang jauh lebih tinggi daripada asam timbal atau hidrida logam nikel, itu masih jauh lebih rendah daripada bahan bakar cair.

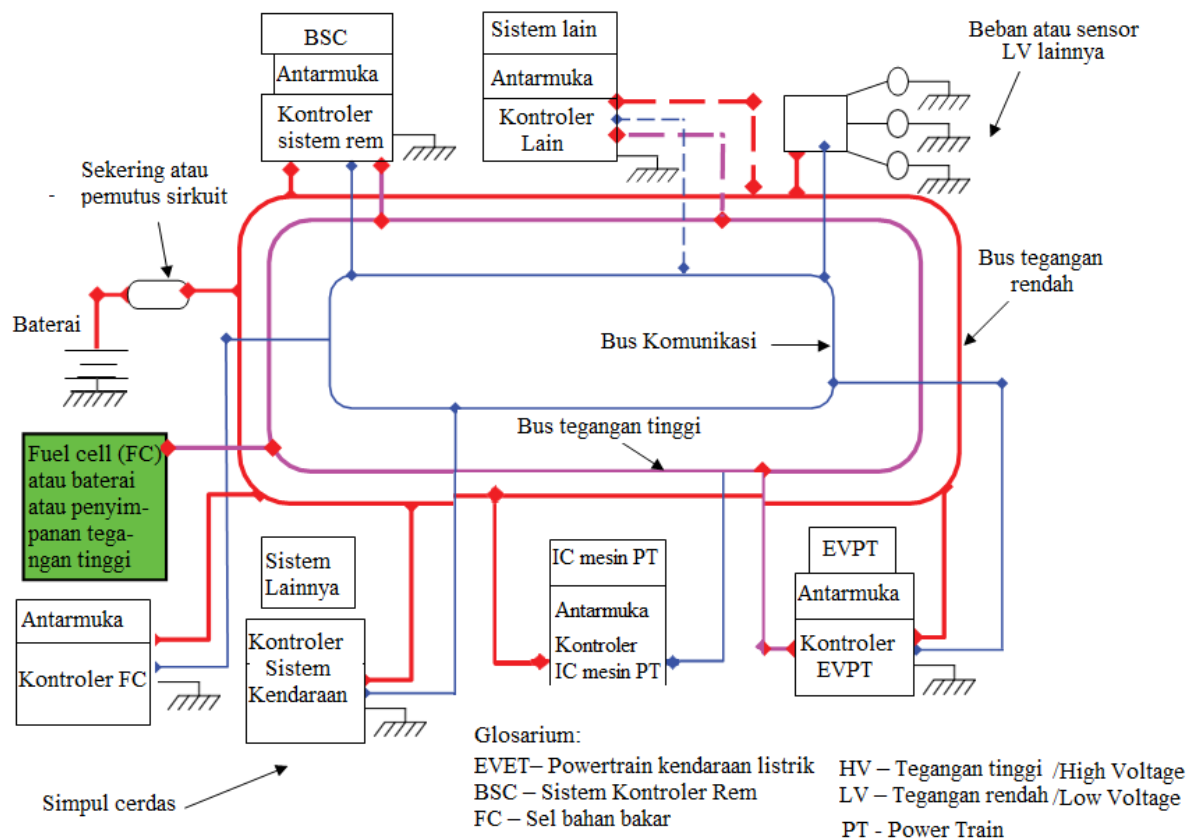
HEV adalah sistem yang kompleks karena memiliki setidaknya dua sumber propulsi, sedangkan EV murni hanya memiliki satu sumber energi, baterai atau sel bahan bakar. Di EV, tenaga penggerak hanya dihasilkan oleh motor listrik dan tidak ada ICE. Ini menghilangkan kebutuhan akan injektor bahan bakar, pengontrol mesin yang rumit, dan periferal lainnya. Oleh karena itu, dengan pengurangan jumlah suku cadang, sistem ini lebih sederhana dan lebih andal. Tentu saja, ada peningkatan efisiensi di HEV dibandingkan dengan ICE, tetapi masih akan lebih rendah daripada di EV. Efisiensi keseluruhan akan tergantung pada ukuran relatif ICE dan daya motor penggerak listrik.

Sebuah varian dari HEV ditemukan di lokomotif dan kendaraan off-road bertenaga sangat tinggi. Dalam sejumlah varian sistem seperti itu tidak ada baterai. ICE digunakan untuk menggerakkan generator yang menghasilkan daya AC (arus bolak-balik) (tidak terkendali). Daya ini diterjemahkan ke DC dan kemudian ke daya AC lain (terkendali) yang diperlukan untuk menggerakkan motor listrik. Masalah dengan sistem ini adalah mesin harus dijalankan terus menerus untuk menghasilkan listrik. Keuntungannya adalah tidak memerlukan baterai. Selanjutnya, ICE dapat dijalankan pada kecepatan optimal untuk mencapai efisiensi terbaik. Satu masalah dengan sistem ini adalah sistem ini tidak memungkinkan pemulihan energi regeneratif selama pengereman. Baterai membantu pemulihan energi regeneratif dengan memungkinkan penyimpanan, dan juga dapat dikoordinasikan secara lebih optimal dalam hal kapan ICE dan/atau motor listrik harus dijalankan. Lebih lanjut tentang ini akan disajikan dalam bab selanjutnya.

Konstituen dari HEV

Seperti disebutkan sebelumnya, EV lebih sederhana daripada HEV. Konstituen tingkat sistem dasar untuk HEV ditunjukkan pada Gambar 2.7. Seperti yang dapat kita lihat, satu-satunya perbedaan antara diagram ini (Gambar 2.7) dan satu untuk EV (Gambar 2.6) adalah

yang satu ini memiliki subsistem tambahan yang disebut mesin IC, bersama dengan antarmuka yang diperlukan dan pengontrol. Jika tidak, kedua diagram itu identik. Semua item dan diskusi lainnya sama dengan EV.



Gambar 2.7 Diagram tingkat sistem dari HEV © 2008 IEEE.

Dasar-dasar HEV

Dasar-dasar *Plug-In Hybrid Electric Vehicle (PHEV)*

Mengapa PHEV?

PHEV, seperti namanya, berbeda dari HEV hanya karena dapat dicolokkan, melalui kabel, ke stopkontak rumah tangga atau di tempat lain, untuk mengisi daya baterai kendaraan. Untuk memperluas fleksibilitas sistem, pada prinsipnya juga dimungkinkan untuk menggunakan mesin dan/atau sistem baterai di dalam kendaraan untuk menghasilkan daya AC dan menyalurkannya kembali ke jaringan utilitas. Karena plug-in memungkinkan cukup banyak energi sistem utilitas eksternal untuk menggerakkan kendaraan, akan sangat membantu untuk menggunakan baterai yang lebih besar (dalam hal kandungan energi) daripada di HEV biasa. Baterai yang lebih besar bukanlah bagian yang diperlukan dari propulsi PHEV, tetapi memiliki baterai yang pasti menguntungkan penghematan bahan bakar dan juga meningkatkan jangkauan kendaraan.

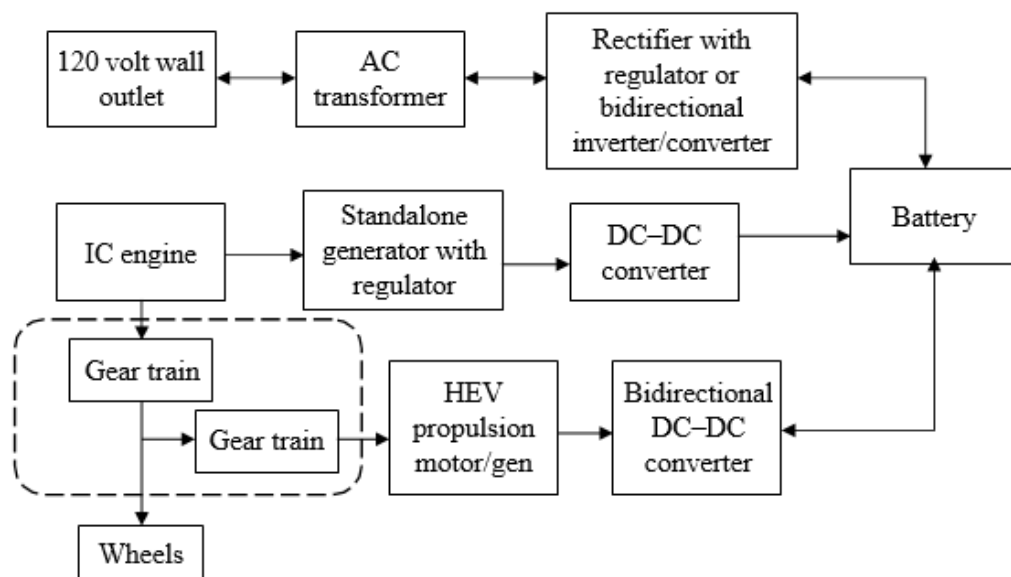
Pada HEV, penggunaan baterai yang jauh lebih besar bukanlah sebuah pilihan untuk masalah desain yang optimal pada kendaraan, karena ICE selalu mampu bekerja, saat baterai perlu diisi. Orang terkadang berpikir bahwa baterai besar adalah hal wajib untuk PHEV, yang sebenarnya tak seharusnya orang berfikir demikian. Seberapa besar baterainya, tergantung pada ruang pengemasan yang tersedia di dalam kendaraan. Jika ukuran baterai kecil, maka manfaat PHEV hanya akan bertambah, sedangkan jika terlalu besar, bisa sangat mahal dan membutuhkan waktu lebih lama untuk diisi ulang dari sistem utilitas. Perhatikan juga bahwa sistem utilitas rumah tangga mungkin memiliki beberapa batasan pada berapa banyak arus yang dapat dipertahankan dalam pengisian sistem baterai, dan karenanya beberapa pelindung

yang aman diperlukan untuk plug-in. Karena biaya energi utilitas saat ini jauh lebih rendah daripada harga bensin, masuk akal untuk menggunakan PHEV jika memungkinkan.

Konstituen dari PHEV

Diagram yang sama seperti sebelumnya, Gambar 2.6 (untuk EV), berlaku untuk PHEV. Perbedaannya adalah PHEV memiliki soket penghubung tambahan di dalam kendaraan, dari mana kabel dapat ditarik keluar dan dicolokkan ke stopkontak di dinding. Jelas, ketika kendaraan terhubung ke stopkontak, motor penggeraknya tidak diperlukan dan begitu juga ICE, sejauh menyangkut memutar roda. Namun, kendaraan mungkin masih perlu menggunakan beban tambahan (biasanya beban tegangan rendah pada 12 V), AC (bisa juga tegangan rendah), atau pemanas dan beberapa lampu. Oleh karena itu tepat untuk memberikan beban tersebut pada tegangan rendah.

Menjalankan ICE dan menggunakan penggerak generator atau memiliki generator terpisah akan menjadi sesuai untuk pengisian cepat baterai yang dibutuhkan. Akan tetapi, ini tergantung pada skema yang digunakan, perubahan dalam sistem kereta gigi diperlukan. Meskipun seluruh proses interkoneksi antara utilitas dan sistem PHEV pada prinsipnya sederhana, ada beberapa pertimbangan yang harus diperhitungkan, seperti yang akan terlihat jelas dari arsitektur yang memungkinkan untuk kendaraan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8



Gambar 2.8 Arsitektur yang memungkinkan untuk kendaraan hibrida plug-in dan antarmuka outlet rumah.

Dari Gambar 2.8 terlihat bahwa untuk mengisi baterai, satu jalur langsung dari stopkontak ke baterai, melalui isolasi transformator dan penyearah atau kombinasi konverter DC-DC. Situasi ini terlibat langsung dengan bagian plug-in dari sistem. Bagian bawah gambar menunjukkan bahwa proses pengisian dilakukan dengan menggerakkan alternator mandiri atau menggunakan motor penggerak itu sendiri yang dijalankan sebagai generator, yang pada akhirnya mengisi baterai. Tentu saja, dapat dipahami bahwa, ketika dicolokkan, kendaraan tidak bergerak dan roda tidak bergerak. Meskipun proses yang ditunjukkan di bagian bawah Gambar 2.8 tidak terlibat langsung dengan plug-in, proses manajemen daya secara keseluruhan harus mengoordinasikan plug-in dan ICE, karena mungkin ada situasi ketika pengisian cepat diperlukan, plug-in dan ICE (dalam mode pembangkitan) harus dijalankan secara bersamaan.

Terakhir, perhatikan penyertaan konverter dua arah di bagian plug-in pada gambar. Ini mencakup kemungkinan bahwa di masa depan peraturan utilitas memungkinkan daya untuk

diumpangkan kembali ke jaringan utilitas dari kendaraan, dengan asumsi bahwa ia memiliki daya yang cukup untuk melakukannya. Masalah ini tidak menjadi pertimbangan langsung dalam industri otomotif saat ini. Namun, kemungkinan tersebut justru dapat membantu kendaraan yang akan digunakan sebagai generator darurat untuk menerangi rumah jika terjadi pemadaman listrik.

Satu catatan terakhir di sini mungkin berguna. Meskipun di atas telah disebutkan pengisian baterai dengan menghubungkan langsung ke beberapa stopkontak, saat ini industri juga berfokus pada penggunaan pengisian baterai nirkabel, di mana daya pengisian dari sumber listrik ke kendaraan dilewatkan secara nirkabel oleh sebuah proses induktif. Ini melibatkan kumparan induktif yang terletak di sumber dan kendaraan, dan ketika kumparan ini berada dalam jarak dekat – beberapa inci biasanya – sejumlah besar daya dapat mengalir secara nirkabel untuk mengisi baterai kendaraan. Teknologi ini juga berlaku untuk HEV, EV, dan PHEV, dan diskusi lebih rinci tentang ini akan dibahas di Bab 16.

Perbandingan HEV dan PHEV

Pada dasarnya perbedaan antara HEV dan PHEV terkait dengan bagian atas Gambar 2.8, adalah stopkontak digunakan untuk mengisi baterai. Ukuran baterai mungkin sangat berbeda. Selain itu, seperti yang ditunjukkan di atas, sistem plug-in harus dikoordinasikan dengan baik dengan sisa proses pengisian dan manajemen daya secara keseluruhan dalam sistem kendaraan.

2.6 DASAR-DASAR KENDARAAN SEL BAHAN BAKAR/FCV (*FUEL CELL VEHICLE*)

Mengapa FCV?

Arsitektur FCV paling erat kaitannya dengan EV murni. Jika sumber listrik di EV diganti dengan sistem sel bahan bakar, maka ini bisa menggantikan baterai di EV. Bahkan dalam HEV dengan ICE, jika sumber energi listrik untuk propulsi diganti dengan sel bahan bakar, itu masih bisa diklasifikasikan sebagai FCV, meskipun pada kenyataannya adalah HEV. Tentu saja, seperti yang dibahas di bagian lain buku ini tentang topik sel bahan bakar, diperlukan energi kimia dalam bentuk gas hidrogen yang dapat langsung digunakan sebagai bahan bakar, atau gas alam dengan reformer yang sesuai.

Dimungkinkan juga untuk memiliki jenis bahan bakar cair tertentu lainnya bersama dengan reformer sehingga bahan bakar tersebut dapat diubah menjadi hidrogen. Dalam kasus seperti itu, sangat mungkin untuk melakukan reformasi dan penciptaan hidrogen, dan konsumsi hidrogen, oleh sel bahan bakar secara bersamaan, sehingga tidak diperlukan penyimpanan tambahan hidrogen. Tanpa reformer dan konversi dan penggunaan seperti yang diproduksi, hidrogen harus disimpan dalam tangki. Selama bahan bakar yang cukup hadir, sel akan berjalan. Perhatikan bahwa sel bahan bakar tidak berjalan sendiri pada awalnya, dan beberapa pemanasan diperlukan. Untuk tujuan itu, baterai yang relatif kecil dapat digunakan, tetapi segera setelah sel bahan bakar dimulai, itu akan mandiri dan energi awal yang diambil dari baterai untuk memanaskan sel bahan bakar dapat segera diisi ulang. Keuntungan dari sel bahan bakar adalah hampir bebas polusi dan tidak berisik. Namun saat ini teknologi tersebut masih harus matang sebelum dapat menggantikan kendaraan hybrid berbasis ICE yang ada.

Konstituen FCV

Angka yang sama yang digunakan untuk EV berlaku di sini, ini dapat dilihat pada Gambar 2.6 dimana sumber tegangan tinggi sudah diberi label sebagai baterai atau sel bahan bakar, sehingga, elemen penyusunnya identik dengan EV.

Beberapa Masalah Terkait Sel Bahan Bakar

Perangkat searah menjadi salah satu masalah sel bahan bakar, perangkat ini dapat memberikan output daya tetapi tidak dapat menerima daya kembali, berbeda dengan baterai atau ultrakapasitor. Jelaslah, sel bahan bakar harus dikesampingkan untuk setiap upaya

regeneratif di dalam kendaraan. Ini menyiratkan bahwa baterai atau ultrakapasitor harus diperkenalkan demi memberikan kemampuan regeneratif. Bukan hanya untuk pengereman regeneratif yang diperlukan baterai penyimpanan atau ultrakapasitor; elemen penyimpanan tersebut juga berfungsi sebagai mekanisme dimana sel bahan bakar dapat dimulai. Ini penting untuk kendaraan hibrida seri dan paralel. Baterai atau ultrakapasitor harus dirancang untuk memenuhi kemampuan arus awal seperti itu setidaknya selama setengah menit, jika tidak lebih lama. Selain itu, berdasarkan siklus penggerak khas kendaraan, penilaian harus dilakukan tentang kebutuhan regeneratif kendaraan selama pengereman, dan ukuran baterai atau ultrakapasitor harus cukup besar untuk skenario terburuk.

Masalah kedua dengan sel bahan bakar adalah sensitivitas dalam hal tegangan sel individu. Hal ini memberikan indikasi kesehatan kondisi sel bahan bakar. Jika usia volt sel menunjukkan perbedaan, itu akan menunjukkan masalah. Sel bahan bakar umumnya tidak dapat menangani transien besar, oleh karena itu baterai sering membantu mengurangi ukuran sel bahan bakar yang dibutuhkan dan melindunginya selama transien besar dalam proses dinamis.

Sel bahan bakar – bukan sel itu sendiri, melainkan keseluruhan modul – bersama dengan semua perangkat periferi seperti kompresor, mekanisme pembuangan air, dan sistem pemanas, bersama-sama menghasilkan efisiensi keseluruhan yang relatif rendah untuk sistem sel bahan bakar yang lengkap.

BAB 3

DASAR-DASAR HEV

3.1 PENDAHULUAN

Kendaraan listrik hibrid/HEV (*Hybrid Electric Vehicle*) telah dibahas bersama dengan berbagai alasannya pada Bab 2. Seperti disebutkan dalam bab tersebut, HEV adalah kendaraan yang menggabungkan mesin pembakaran internal/*Internal Combustion Engine* (ICE) dengan sistem traksi listrik. Sebuah kendaraan hybrid harus mengandung setidaknya dua sumber perangkat penyimpanan energi, seperti baterai, tangki bensin, atau tangki hidrogen. Berdasarkan perangkat penyimpan energi, harus ada juga sumber konversi daya yang sesuai, seperti ICE atau motor listrik, di dalam kendaraan untuk mengubah energi menjadi tenaga mekanik. Hasil akhirnya adalah tenaga mekanik ke roda berpotensi (tetapi tidak harus) berasal dari beberapa (setidaknya dua) sumber. Manfaat utama dari arsitektur kendaraan hybrid adalah memungkinkan pengambilan keuntungan dari titik operasi terbaik dari sumber (yaitu karakteristik sumber) dalam hal efisiensi untuk memberikan sejumlah daya, dan mencocokkan karakteristik sumber dengan karakteristik beban untuk mencapai efisiensi keseluruhan terbaik saat memberikan daya beban tertentu. Keuntungan yang ditawarkan oleh HEV adalah:

- Mengoperasikan operasi mesin IC pada titik operasi terbaiknya di peta efisiensi mesin
- Peningkatan efisiensi melalui pengereman regeneratif, memungkinkan energi pengereman dikembalikan ke beberapa elemen penyimpanan energi
- Permasalah mesin menjadi lebih sedikit
- Peningkatan penghematan bahan bakar, yang secara otomatis mengarah pada pengurangan emisi gas rumah kaca
- Pengurangan konsumsi bahan bakar fosil
- Jumlah terbatas dari mode operasi kendaraan yang dapat didegradasi secara halus dalam kondisi kegagalan sebagian, tergantung pada arsitektur HEV.

Bab 1 membahas berbagai arsitektur HEV berdasarkan konfigurasi drivetrain: hibrida seri, hibrida paralel, hibrida seri-paralel, hibrida kompleks, dan hibrida plug-in. Dalam bab ini, beberapa dasar akan dibahas. Selama fase desain HEV, perlu untuk memilih peringkat untuk mesin IC, motor/generator listrik traksi, generator (jika ada yang terpisah), dan elemen penyimpanan energi berdasarkan kinerja kendaraan yang diinginkan. Perlu dicatat juga bahwa untuk mesin listrik yang berfungsi baik sebagai motor dalam mode propulsi, atau sebagai generator (yang dapat dianggap sebagai negatif dari mode propulsi) pada prinsipnya ketika inputnya berasal dari mesin IC akan memungkinkan penerimaan tenaga mekanik dan mengubahnya menjadi energi listrik. Akan tetapi kadang-kadang, tergantung pada arsitekturnya, mungkin ada mesin listrik terpisah yang sebagian besar dapat bekerja sebagai generator (tetapi juga dapat beroperasi sebagai motor dari waktu ke waktu, tergantung pada bagaimana arsitektur sistem dirancang). Proses desain sistem HEV saat ini melibatkan sejumlah besar pemodelan dan simulasi sebelum pengembangan aktual. Untuk membahas beberapa hal di atas, bab ini akan membahas pemodelan beban jalan kendaraan, menentukan persyaratan untuk kinerja kendaraan dan penghematan bahan bakar, dan memasukkan dua contoh desain untuk kendaraan hibrida seri dan hibrida paralel.

3.2 MODEL KENDARAAN

Untuk keperluan bagian ini, kendaraan dimodelkan sebagai beban, dimana tahanan beban yang dirasakan kendaraan disebabkan oleh profil jalan. Dengan kata lain, mesin, dan motor listrik pada dasarnya akan melihat beberapa kecepatan dan torsi di mana mereka harus bekerja, untuk menggerakkan kendaraan di bawah profil jalan tertentu.

Pertimbangkan kendaraan dan gaya terkait yang diilustrasikan pada Gambar 3.1. Di sini, kendaraan bermassa M_v dianggap, bergerak dengan kecepatan v , dan bergerak menaiki kemiringan sudut (dalam derajat). Gaya propulsi atau gaya traksi (yaitu gaya penggerak) adalah F_{te} . Gaya ini harus mengatasi tahanan gelinding F_{rr} , gaya hambat aerodinamis F_{ad} , gaya tahanan panjat F_{rg} (komponen berat kendaraan yang bekerja menuruni lereng), dan gaya untuk mempercepat kendaraan (gaya percepatan), jika kecepatannya tidak konstan. Jumlah tiga suku pertama adalah F_{RL} gaya beban jalan. Beban jalan, oleh karena itu, dapat ditulis sebagai:

Persamaan 3.1

$$F_{RL} = F_{rr} + F_{ad} + F_{ra}$$

F_{rr} *rolling resistance* benar-benar dihasilkan pada tingkat material internal ban karena histeresis ban, dan akhirnya timbul dari interaksi ban dengan jalan raya. Tahanan gelinding bergantung pada koefisien gesekan gelinding antara ban dan jalan C_f , gaya normal F_N akibat berat kendaraan $M_v g$, dan percepatan gravitasi g . Jika kendaraan dalam keadaan diam dan gaya yang diberikan pada jalan tidak cukup besar untuk mengatasi hambatan gelinding, maka hambatan gelinding harus benar-benar menghilangkan gaya traksi yang diberikan agar kendaraan tidak bergerak. Oleh karena itu, persamaan untuk tahanan gelinding dapat ditulis sebagai:

Persamaan 3.2

$$F_{rr} = F_{te} \quad \text{jika } v = 0 \quad \text{dan } F_{te} < C_f M_v g \cos(\alpha\pi/180^\circ)$$

Jika tidak

$$F_{rr} = -C_f M_v g \cos(\alpha\pi/180^\circ)$$

Hambatan aerodinamis (yaitu hambatan yang dihadapi oleh kendaraan karena hambatan udara) tergantung pada kerapatan udara ρ (kg/m^3), koefisien hambatan C_d , luas frontal kendaraan A , dan kecepatan kendaraan v . Persamaan untuk hambatan aerodinamis adalah:

Persamaan 3.3

$$F_{ad} = 0.5 \rho C_d A v^2 \text{sgn}(v)$$

Dimana:

$$\begin{aligned} \text{Sgn}(v) &= +1 && \text{jika } v > 0 \\ &= -1 && \text{jika } v < 0 \end{aligned}$$

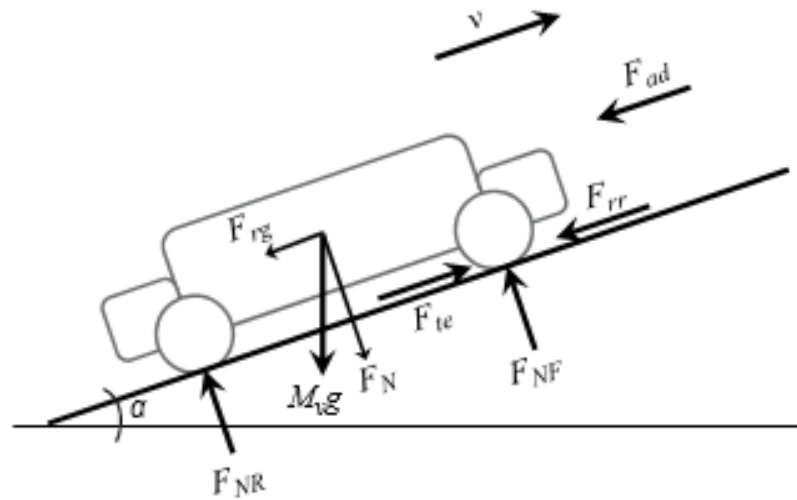
Gaya akibat kemiringan jalan (kemiringan jalan) tergantung pada massa kendaraan M_v , sudut kemiringan dalam derajat α , dan percepatan gravitasi g . Persamaan untuk gaya ini adalah:

Persamaan 3.4

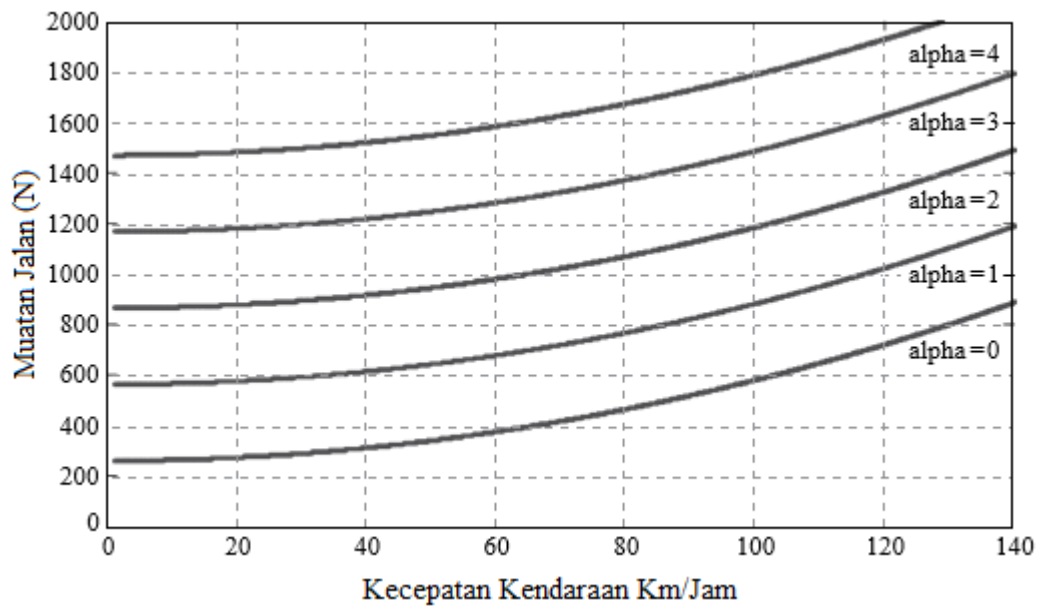
$$F_{ra} = -M_v g \cos(\alpha\pi/180^\circ)$$

Kurva beban jalan kendaraan yang sesuai dengan sudut jalan yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 3.2. Parameter kendaraan diberikan pada Tabel 3.1. Seperti yang dapat diantisipasi, beban jalan (gaya lawan) meningkat dengan kecepatan dan dengan sudut jalan. Pada beban

jalan ini, tahanan gelinding dan hambatan udara berhubungan dengan kecepatan, sedangkan gaya akibat kemiringan berhubungan dengan sudut α .



Gambar 3.1 Model Kendaraan



Gambar 3.2 Karakteristik beban jalan untuk sudut jalan $\alpha = 0^{\circ}-4^{\circ}$.

Tabel 3.1 Parameter untuk simulasi kendaraan

Parameter	Nilai	Unit
Massa Kendaraan	1767	kg
Gravitasi	9.81	m/s ²
Gesekan Bergulir	0.015	—
Densitas Udara	1.225	kg/m ³
Koefisien drag aerodinamis Frontal Area	0.35	—
Inersia roda	1.93	m ²
	3.2639	kg/m ²
Radius roda	0.2794	m
Kecepatan headwind	0	m/s

Gaya untuk mempercepat kendaraan diatur oleh hukum kedua Newton, dan mengarah ke percepatan linier kendaraan. Ini diberikan oleh:

Persamaan 3.5

$$F_{acc} = M_{va} - M_v \frac{dv}{dt}$$

Upaya traksi total adalah jumlah dari semua gaya di atas:

Persamaan 3.6

$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{ra} + F_{acc}$$

Kecepatan kendaraan dihitung dengan mengintegrasikan percepatan kendaraan dari waktu $t = 0$ detik ke waktu t yang diinginkan, dengan kecepatan awal diatur ke 0 km/jam. Ini diberikan oleh:

Persamaan 3.7

$$V = \frac{1}{M_v} \int_t^{t=0} (F_{te} - F_{rr} - F_{ad} - F_{ra}) dt$$

Dalam kasus kendaraan yang digerakkan oleh ICE, gaya traksi kendaraan berasal dari torsi poros mesin. Torsi poros dan torsi engine terkait sebagai:

Persamaan 3.8

$$T_{axle} = (T_{ICE}) (GR_{trans}) (GR_{diff}) (\eta_{trans}) (\eta_{diff})$$

di mana T menunjukkan torsi, GR menunjukkan rasio roda gigi, menunjukkan efisiensi, subskrip "trans" menunjukkan transmisi, dan subskrip "diff" menunjukkan diferensial. Jadi, gaya traksi adalah:

persamaan 3.9

$$F_{te} = \frac{T_{axle}}{\text{perputaran roda}}$$

Dalam kasus kendaraan hibrida seri, gaya traksi (penggerak) ke roda berasal dari torsi poros motor listrik; dalam kasus kendaraan hibrida paralel, torsi propulsi dapat berasal dari kombinasi torsi dari ICE dan motor traksi listrik, atau dapat berasal hanya dari salah satu entitas ini, tergantung pada algoritme yang digunakan untuk membuat keputusan.

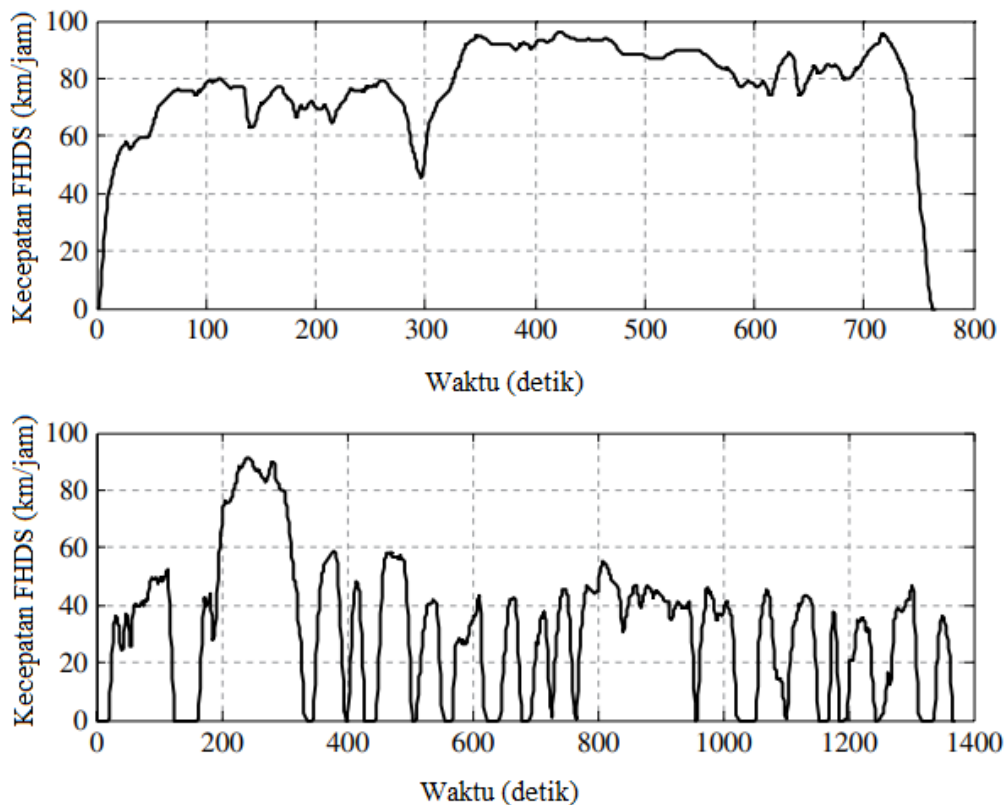
3.3 KINERJA KENDARAAN

Sebelum merancang kendaraan, batasan kinerja yang harus dipenuhi harus ditentukan terlebih dahulu. Kendala ini tergantung pada jenis dan ukuran kendaraan. Spesifikasi kinerja yang umum mencakup akselerasi awal, kecepatan jelajah, kecepatan maksimum, kemampuan menanjak, dan jangkauan berkendara. Tingkat percepatan adalah waktu minimum yang diperlukan untuk mempercepat kendaraan dari 0 ke kecepatan tertentu seperti 40, 60, atau 80 mph. Kadang-kadang tingkat akselerasi dari kecepatan rendah non-nol ke kecepatan yang lebih tinggi ditentukan, seperti dari 40 hingga 60 mph.

Akselerasi maksimum dibatasi oleh daya traksi maksimum dan kondisi jalan. Grada bility adalah kemiringan maksimum yang dapat dilalui kendaraan pada kecepatan tertentu

dengan gaya traksi maksimum yang tersedia dari powertrain. Jarak tempuh mengacu pada jarak (yaitu mil atau kilometer) yang dapat ditempuh kendaraan dengan tangki bahan bakar penuh dan/atau baterai yang terisi penuh sebelum mengisi bahan bakar atau mengisi ulang. Jangkauan penggerak EV atau HEV sangat penting untuk bersaing dengan rekan-rekan mereka di ICE. Sasaran kinerja PNGV untuk kendaraan menengah adalah:

- 0–60 mph: 12 detik
- 40–60 mph: 5,3 detik
- 0–85 mph: 23,4 detik
- Kecepatan maksimum: 85 mph
- Kelas maksimum pada 55 mph: 6,5%.
- Siklus penggerak adalah kecepatan kendaraan standar versus profil waktu untuk menguji kinerja kendaraan, penghematan bahan bakar, dan emisi. Misalnya, Jadwal Mengemudi Jalan Raya Federal (FHDS) dan Jadwal Mengemudi Perkotaan Federal (FUDS) diplot pada Gambar 3.3.



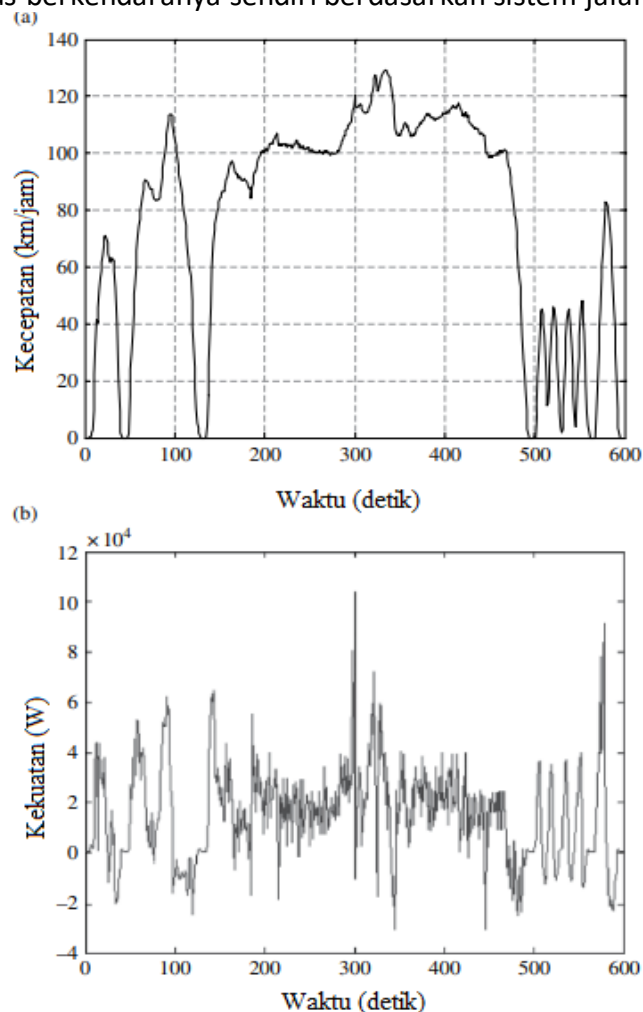
Gambar 3.3 Siklus penggerak FHDS dan FUDS.

Daya yang diperlukan untuk mengoperasikan kendaraan dapat dihitung dari siklus penggerak, dan bergantung pada massa kendaraan. Misalnya, daya yang dibutuhkan untuk mengemudikan kendaraan dengan massa total 1380 kg di bawah siklus penggerak US06 ditunjukkan pada Gambar 3.4. siklus penggerak agresif US06, berasal dari *Badan Perlindungan Lingkungan (EPA)* untuk mengukur penghematan bahan bakar dan emisi. Daya positif disebabkan oleh percepatan sedangkan daya negatif disebabkan oleh perlambatan. Bagian dari daya negatif yang terkait dengan pengereman dapat dipulihkan melalui pengereman regeneratif HEV.

Tabel 3.2 Karakteristik dari contoh siklus mengemudi

Arus Kemudi	Waktu menganggur (persentase dari total waktu)	Berhenti	Persentase waktu di zona kecepatan tertentu
CONSTANT	4	0	≤16 km/j 100%
NYGCT	68.3	5	≤5 km/j 82%
NEWYORKBUS	67.3	11	≤6 km/j 75%
NYCTRUCK	52.1	20	≤12 km/j 70%
HWFET_HTN	0.7	1	≥70 km/j 85%
HWFET	0.7	1	≥70 km/j 85%
UDDS_HDV	33	14	≤20 km/j 80%
BEIJINGBUS	59.1	23	≤20 km/j 85%

Siklus penggerak yang berbeda di berbagai belahan dunia digunakan untuk menguji kinerja dinamis dan penghematan bahan bakar dari berbagai jenis kendaraan. Saat ini, drive cycle sebagian besar berasal dari Eropa, Amerika Utara, dan Asia Tenggara. China juga mengembangkan siklus berkendaranya sendiri berdasarkan sistem jalan raya China.



Gambar 3.4 (a) Siklus penggerak US06 dan (b) kendaraan membutuhkan tenaga listrik di bawah siklus mengemudi US06.

Tabel 3.2 menunjukkan delapan contoh siklus drive: CYC_HWFET, CYC_HWFET_MTN, CYC_NYCTRUCK, CYC_NYGCT, CYC_NEWYORKBUS, CYC_UDDS_HDV, CYC_BEIJINGBUS, dan CYC_CONSTANT. Seperti dapat dilihat pada Tabel 3.2, setiap siklus penggerak memiliki karakteristik yang berbeda. Namun secara umum persentase waktu idle (dihabiskan), jumlah berhenti, dan persentase waktu (dihabiskan) di zona kecepatan tertentu, adalah item utama yang mempengaruhi ekonomi bahan bakar. Misalnya, dalam siklus berkendara UDDS_HDV, kendaraan memiliki 14 berhenti dan mulai, 33% waktu idle, dan berjalan pada kecepatan lebih rendah 20 km/jam atau kurang selama 80% dari periode waktu mengemudi.

Ekonomi bahan bakar mengacu pada jarak yang dapat ditempuh kendaraan per unit bahan bakar (biasanya dalam mil atau kilometer per galon). Untuk EV atau HEV, definisinya bisa agak rumit. Di sini, mil per galon bensin setara (MPGGE) digunakan untuk mengukur berapa mil kendaraan dapat melakukan perjalanan dengan konsumsi energi setara dengan jumlah energi yang dilepaskan dari pembakaran 1 galon bensin. Hal ini disebabkan karena pada EV sumber energinya sepenuhnya listrik dan pada HEV energinya berasal dari campuran dua sumber yang berbeda, yaitu bensin dan listrik dari baterai. Penghematan bahan bakar HEV juga tergantung pada siklus penggerak. Jadi kadang-kadang ekonomi bahan bakar komposit atau ekonomi bahan bakar gabungan digunakan. Misalnya, penghematan bahan bakar komposit dapat dihitung sebagai rata-rata tertimbang dari nilai ekonomi bahan bakar seimbang state of charge (SOC) selama siklus berkendara kota dan siklus berkendara jalan raya:

$$\text{Ekonomi bahan bakar komposit} = \frac{1}{\frac{0.55}{\text{City FE}} + \frac{0.45}{\text{Hwy FE}}}$$

di mana City_FE dan Hwy_FE masing-masing menunjukkan nilai ekonomi bahan bakar kota dan jalan raya. Dimungkinkan untuk menggunakan pemodelan beban jalan kendaraan di bagian sebelumnya, untuk melakukan studi desain parametrik untuk desain kendaraan. Ini dapat membantu menunjukkan bagaimana kinerja kendaraan dipengaruhi oleh perubahan nilai C_f , A , C_d , dan M_v .

3.4 UKURAN KOMPONEN EV POWERTRAIN

Pada bagian ini, beberapa contoh diberikan untuk mengilustrasikan konsep dan metode dasar untuk ukuran komponen EV. Seperti yang telah dibahas sebelumnya, ketika kita mengukur powertrain sebuah EV, kita harus memastikan kekuatan traksi yang cukup bagi kendaraan untuk:

- Mempercepat dari kecepatan nol ke kecepatan tertentu dalam batas waktu yang diperlukan
- Mengatasi gaya hambatan angin jika kecepatan angin sakal bukan nol
- Mengatasi gaya aerodinamis
- Mengatasi hambatan bergulir
- Mendaki lereng tertentu (tingkat).

Contoh 3.1 Mari kita cari nilai perkiraan powertrain EV dengan berat kendaraan 1364 kg (3000 lb). Pertama, mari kita tentukan gaya yang diperlukan untuk mempercepat pada $4,47 \text{ m/s}^2$, dengan asumsi bahwa gaya aerodinamis, rolling, dan hill-climbing berarti tambahan 10% dari gaya percepatan yang dibutuhkan.

$$\begin{aligned} F_{te} &= 1.1 \times m_{aa} \times \text{akselerasi} \\ &= 1.1 \times 1364 \times 4.47 \end{aligned}$$

$$= 6704\text{N}$$

Kemudian, mari kita tentukan daya rata-rata yang dibutuhkan untuk mempercepat kendaraan dari 0 ke 96,5 km/jam (60 mph):

$$\begin{aligned}\text{Energi yang dibutuhkan} &= \text{mass} \times V^2/2 \\ &= 1364 \times (26.8\text{m/s})^2/2 \\ &= 489839\text{J}\end{aligned}$$

Waktu yang dibutuhkan kendaraan untuk berakselerasi dari 0 hingga 96,5 km/jam adalah:

$$\begin{aligned}\text{Waktu} &= (26.8\text{m/s})/(4.47\text{m/s}^2) \\ &= 6\text{s}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Kekuatan rata-rata} &= \text{gaya} \times \text{jarak/detik} = \text{energi/waktu} \\ &\approx 81.7\text{kW} \quad (\text{Kekuatan puncak } P_{\text{max}} = F_{\text{te}} \times V \approx 180\text{kW})\end{aligned}$$

Contoh 3.2 Menentukan gaya traksi yang diperlukan untuk sebuah kendaraan bermassa 1364 kg untuk mempercepat hingga 96,5 km/jam dalam 10 detik, dengan asumsi percepatan konstan. Daya total yang diperlukan untuk percepatan adalah:

$$\begin{aligned}\text{Akselerasi } a &= V/t = 26.8/10 = 2.68\text{m/s}^2 \\ \text{Tekanan } F_{\text{te}} &= \text{massa} \times \text{akselerasi} = 1364 \times 2.68 \text{ m/s}^2 = 3657 \text{ N} \\ \text{Kekuatan akhir} &= F_{\text{te}} \times V = 3657 \times 26.8 = 98 \text{ kW} \quad (\text{pada kecepatan } 60 \text{ mph})\end{aligned}$$

Dalam contoh ini, percepatan konstan diasumsikan. Dalam kehidupan nyata, akselerasi mendekati 60 mph akan sangat berkurang. Oleh karena itu, daya aktual yang dibutuhkan untuk mempercepat kendaraan jauh lebih kecil dari 98 kW:

$$\text{Kekuatan rata-rata} = \text{kekuatan akhir}/w = 49 \text{ kW}$$

Contoh 3.3 Asumsikan bahwa kendaraan berakselerasi sesuai dengan gelombang sinus (Gambar 3.5, plot atas) hingga kecepatan akhir 60 mph dan abaikan semua hambatan lainnya. Mari kita cari gaya traksi yang dibutuhkan kendaraan 3000 lb untuk berakselerasi.

$$\begin{aligned}V_{\text{final}} &= 60\text{mph} = 60 \times 1608/3600 = 26.8\text{m/s} \\ a_m(1-\cos\pi)/\omega &= 26.8 \quad (\omega t = \pi \text{ pada } 10 \text{ s}, \omega=0.314) \\ \therefore a_m &= 0.314 \times 26.8/2 = 4.2\text{m/s}^2 \\ a &= 4.2 \sin 0.314t \\ F &= \text{massa} \times a = 3000/2.2 \times 4.2 \sin 0.314t = 5727 \sin 0.314t \\ P &= FV = 5727 \sin 0.314t \times 4.2(1-\cos 0.314t)/0.314 \\ P_{\text{max}} &\approx 90\text{kW}\end{aligned}$$

P juga diilustrasikan pada Gambar 3.5, plot bawah, di mana dua suku dalam P diplot secara terpisah.

Contoh 3.4 Dalam contoh ini, kita akan membandingkan gaya resistif dan percepatan kendaraan. Gaya percepatan dihitung dalam Contoh 3.2 sebagai 3657 N (berakselerasi hingga 60 mph dalam 10 detik). Massa kendaraan adalah 1364 kg.

- 1) Gaya aerodinamis: Pertimbangkan kendaraan dengan yang berikut:
 - a. Koefisien drag aerodinamis 0,109

- b. Kepadatan udara $1,16 \text{ kg/m}^3$
 c. Luas frontal $1,543 \text{ m}^2$ (atau $16,6 \text{ ft}^2$)

Maka gaya aerodinamis pada kecepatan 60 mph (96 km/jam) adalah:

$$F_{ad} = 0.5 \times 1.16 \times 0.109 \times 1.543 \times 26.82^2 = 70 \text{ N}$$

- 2) Tahanan gelindingan: Pertimbangkan kendaraan dengan koefisien gelinding $0,02$. Jadi gaya tahanan gelinding adalah:

$$F_{rr} = 0.02 \times 1364 \times 9.8 = 270 \text{ N}$$

- 3) Resistensi mendaki bukit: Pertimbangkan kendaraan dengan kemiringan $0,5^\circ$. Jadi gaya mendaki bukit adalah:

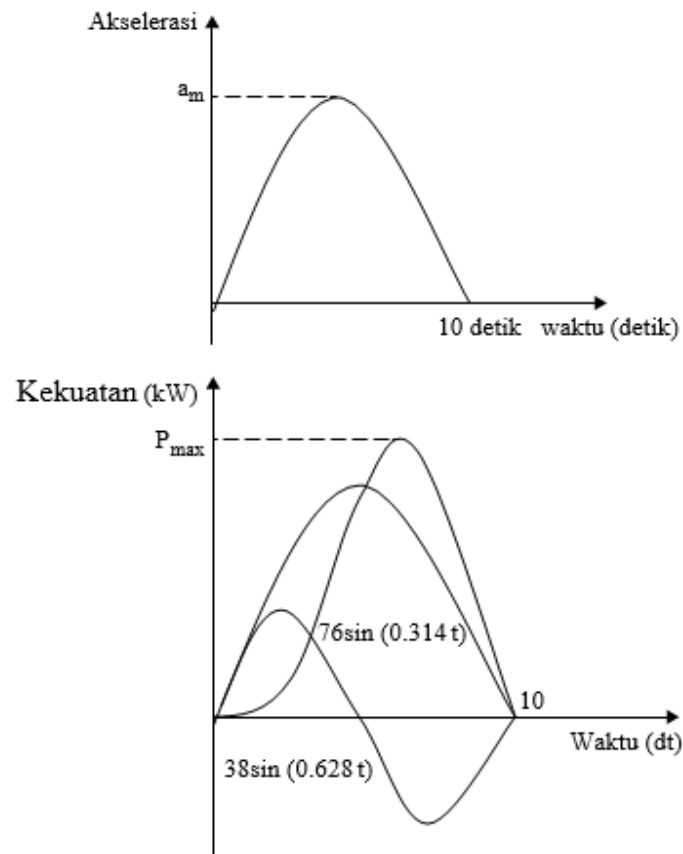
$$F_{rg} = mg \times \sin \alpha = 1364 \times 9.8 \times \sin 0.5^\circ = 117 \text{ N}$$

Gaya hambatan total di jalan raya adalah (kecuali untuk percepatan)

$$F_{RL} = F_{ad} + F_{rr} + F_{rg} = 70 + 270 + 117 = 457 \text{ N}$$

$$P_r = F_{RL}V = 457 \times 26.8 \text{ m/s} = 12,3 \text{ kW} \text{ (pada kecepatan terbatas)}$$

Perhatikan bahwa gaya tarik hanya untuk $P_r/P_{max} = 12,3 \text{ kW}/98 \text{ kW} = 12,5\%$ dari total gaya traksi. Selanjutnya, perhatikan bahwa daya yang dibutuhkan kendaraan untuk melaju di jalan raya dengan kecepatan 60 mph hanya sekitar 6% dari daya yang dibutuhkan untuk mempercepat kendaraan dari 0 sampai 60 mph dalam 10 detik.



Gambar 3.5 Akselerasi dan tenaga kendaraan.

Karena sebagian besar motor listrik dapat dirancang untuk kelebihan beban untuk waktu yang singkat, motor dapat dirancang pada peringkat yang jauh lebih rendah. Perhatikan juga bahwa motor listrik dapat memiliki efisiensi (termasuk pengontrol) lebih dari 90%, sedangkan ICE memiliki efisiensi yang lebih rendah dari 30%. Selain itu, ICE tidak memiliki kemampuan kelebihan beban transien seperti halnya motor. Inilah sebabnya mengapa daya pengenal ICE biasanya jauh lebih tinggi daripada yang dibutuhkan untuk jelajah jalan raya. Sekarang mari kita lihat secara singkat pengereman di sebuah EV. Energi terbuang selama pengereman di kendaraan konvensional, tetapi energi pengereman sebagian dapat dipulihkan di EV dan HEV. Akibatnya, kinerja sistem antilock brake system (ABS) dapat ditingkatkan pada HEV/EV, dan kontrol traksi lebih mudah dicapai pada HEV/EV. Mari kita hitung energi yang diharapkan ketika membawa kendaraan 1364 kg berhenti dari kecepatan 60 mph dalam 10 detik:

$$\begin{aligned} \text{Energi} &= \frac{1}{2} \times \text{massa} \times V^2 = \frac{1}{2} \times 1364 \times (26.8 \text{ m/s})^2 \\ &= 489.709 \text{ J} = 0.136 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Menggunakan kecepatan rata-rata 30 mph, kendaraan akan bergerak dengan kecepatan 44 kaki/s atau 440 kaki dalam 10 detik. Dengan asumsi gaya drag rata-rata 100 lbf, kerugian drag adalah:

$$100 \times 4.455 \times 440/3.28 = 59.762 = 0.0166 \text{ Wh}$$

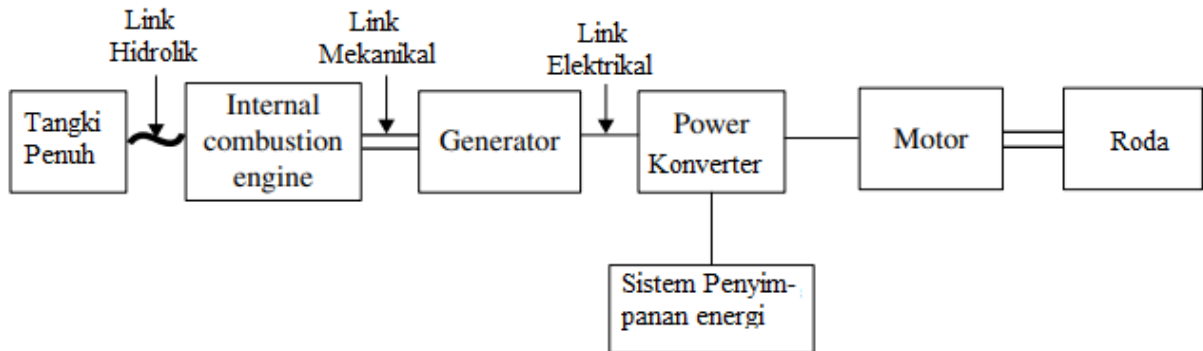
Energi yang berpotensi dapat dipulihkan adalah $0,136 - 0,0166 = 0,1194 \text{ kWh}$. Desain sistem propulsi lengkap adalah masalah kompleks yang melibatkan banyak variabel, kendala, pertimbangan, dan penilaian, yang berada di luar cakupan buku ini. Kebutuhan tenaga dan energi dari powertrain ditentukan dari spesifikasi daya jelajah dan akselerasi kendaraan tertentu. Desain EV/HEV adalah proses berulang dan membutuhkan banyak insinyur dari berbagai disiplin ilmu untuk berkolaborasi guna memenuhi tujuan desain:

- Insinyur listrik dan mekanik merancang motor listrik untuk EV atau kombinasi motor listrik dan ICE untuk HEV.
- Insinyur elektronika daya merancang sirkuit konversi daya yang menghubungkan sumber energi dengan motor listrik.
- Insinyur kontrol, bekerja sama dengan insinyur elektronika daya, mengembangkan sistem kontrol propulsi.
- Ahli elektrokimia dan insinyur kimia merancang sumber energi berdasarkan kebutuhan energi dan pedoman dari produsen kendaraan.

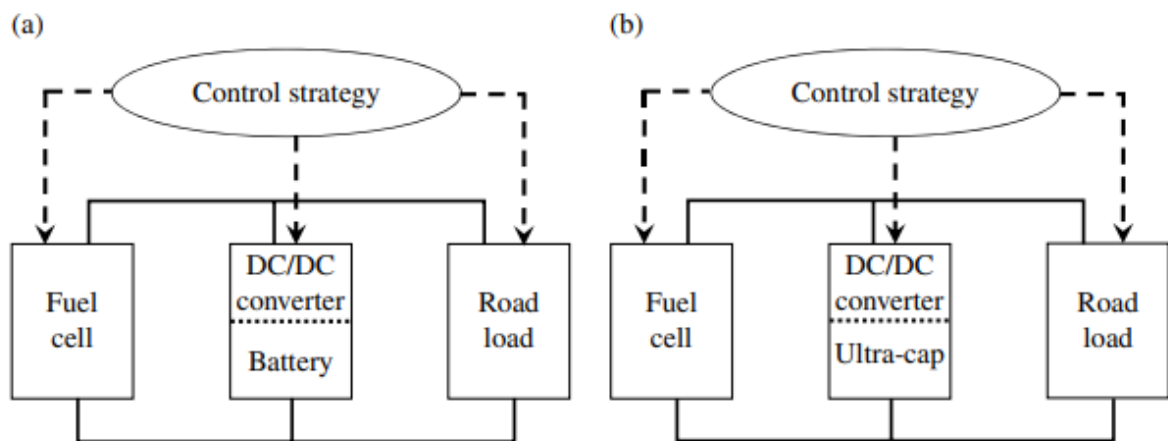
3.5 KENDARAAN HIBRIDA SERI

Pada powertrain hybrid seri, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.6, output mekanis dari ICE diubah menjadi energi listrik menggunakan generator dan energi listrik digunakan untuk mengisi baterai atau dilewatkan dari baterai ke motor traksi listrik yang mendorong roda. Sehubungan dengan komponen elektronika daya, diperlukan konverter AC-DC untuk mengisi daya baterai dan inverter DC-AC untuk penggerak motor traksi. Dalam konfigurasi seri, mesin dipisahkan dari beban jalan sehingga mesin tidak akan mengalami perubahan mendadak dalam kondisi operasi dan akan memiliki sedikit waktu idling, sehingga emisi berkurang dan ini lebih baik bagi lingkungan. Beberapa keuntungan lain dari hibrida seri adalah fleksibilitas dalam lokasi set engine-generator dan kesederhanaan dalam desain. Namun, diperlukan tiga komponen penggerak: ICE, generator, dan motor. Ini menghasilkan rantai transmisi energi yang lebih panjang sehingga efisiensi hibrida seri umumnya lebih

rendah daripada hibrida paralel. Motor harus dirancang untuk daya berkelanjutan maksimum yang mungkin diperlukan kendaraan, seperti saat mendaki tanjakan tinggi. Namun demikian, kendaraan beroperasi di bawah daya maksimum sebagian besar waktu. Ketiga komponen drivetrain harus berukuran untuk daya maksimum untuk mengemudi jarak jauh, berkelanjutan, dan kecepatan tinggi, jika tidak, baterai akan habis dengan cukup cepat, meninggalkan ICE untuk memasok semua daya melalui generator. Contoh aplikasi hybrid seri adalah pada penggerak lokomotif.



Gambar 3.6 Powertrain Seri HEV.



Gambar 3.7 Konfigurasi powertrain hybrid sel bahan bakar.

Fuel cell EV merupakan salah satu jenis hybrid series dan akan digunakan sebagai contoh desainnya. Dalam sel bahan bakar EV, perangkat penyimpanan energi dapat berupa baterai atau ultrakapasitor atau keduanya. Sistem sel bahan bakar memasok daya dasar sementara baterai/ultrakapasitor memasok daya puncak untuk akselerasi cepat, dan menangkap energi pengereman untuk regenerasi. Derajat hibridisasi didefinisikan sebagai:

$$HD = \frac{P_{ESS}}{P_{ESS} + P_{fc}}$$

di mana P_{ESS} adalah kekuatan perangkat penyimpanan energi dan P_{fc} adalah kekuatan sel bahan bakar. HD 0 sesuai dengan kendaraan sel bahan bakar murni, dan HD 1 sesuai dengan EV murni seperti kendaraan listrik baterai (BEV). Dalam powertrain sel bahan bakar hibrida, strategi kontrol yang baik diperlukan untuk mengelola aliran daya dengan mempertimbangkan karakteristik masing-masing komponen yang sangat berbeda. Kedua jenis powertrains sel bahan bakar hibrida yang akan dipelajari diilustrasikan pada Gambar 3.7. Mode operasi dari seri hybrid ini meliputi:

- 1) **Battery Mode** atau ultrakapasitor saja di mana sel bahan bakar dimatikan

- 2) **Fuel Cell Only**
- 3) **Combine Mode** di mana sel bahan bakar dan penyimpanan energi menyediakan daya untuk beban jalan
- 4) **Split Fuel Cell Power Mode** di mana sel bahan bakar menyediakan daya untuk beban jalan kendaraan dan mengisi baterai atau ultrakapasitor
- 5) **Regenerative Brake Mode** di mana penyimpanan energi memulihkan sebagian energi pengereman.

Untuk membandingkan penghematan bahan bakar dan kinerja kedua jenis powertrain hybrid sel bahan bakar, empat kendaraan hybrid sel bahan bakar dirancang di ADVISOR (ADvanced Vehicle Simulator). Kasus desain pertama di ADVISOR adalah kendaraan sel bahan bakar default dengan baterai, dan digunakan sebagai kendaraan dasar (nama file input: FUEL_CELL_defaults_in). Mobil kecil hipotetis ini secara kasar didasarkan pada Saturnus SL1 1994 dengan data utama tercantum dalam Tabel 3.3. Sel bahan bakar adalah jenis sistem sel bahan bakar hidrogen tekanan ambien. Gearbox satu kecepatan digunakan untuk transmisi. Kontroler powertrain menggunakan hibrida dengan strategi kontrol termostat seperti yang didefinisikan dalam ADVISOR. Singkatnya, sel bahan bakar dikendalikan untuk mati ketika SOC penyimpanan energi mencapai batas atas yang telah ditentukan dan dikendalikan untuk hidup ketika SOC turun di bawah batas bawah yang telah ditentukan. Desain sel bahan bakar dan penyimpanan energi dijelaskan lebih rinci di bawah ini.

Tabel 3.3 Parameter yang diasumsikan untuk kendaraan.

Parameter	Nilai	Unit
Massa peluncur kendaraan, m	592	kg
Gravitasi, g	9.81	m/s^2
Koefisien tahanan gelinding, f_r	0.009	—
Efisiensi transmisi, η_t	0.92	—
Kepadatan udara, ρ_a	1.2	kg/m^3
Koefisien drag aerodinamis, C_d	0.335	—
Area depan, A_f	2.0	m^2
Jari-jari roda	0.282	m
Beban aksesoris listrik rata-rata	700	W
Massa kargo kendaraan	136	kg
Massa motor listrik	91	kg
Massa sistem sel bahan bakar	223	kg

Dalam powertrain hybrid, sel bahan bakar memasok daya dasar, P_e , untuk memenuhi kebutuhan daya kendaraan untuk jelajah dan/atau mengemudi di jalan dengan kemiringan:

$$P_e = \frac{(mgf_r + \frac{1}{2}\rho_a C_d A_f V^2 + mgi)V}{1000\eta_t \eta_{em}}$$

di mana m adalah massa total kendaraan (diasumsikan 1380 kg), i adalah kemiringan jalan, dan η_{em} adalah efisiensi rata-rata motor (diasumsikan 0,90). Kemudian, dengan perhitungan,

P_e adalah 13,1 kW pada kecepatan jelajah 60 mph (96 km/jam) di jalan datar; P_e adalah 42,1 kW pada kecepatan maksimum 95 mph (152 km/jam) di jalan datar; dan P_e adalah 50,0 kW jika tingkat maksimum pada 55 mph adalah 10%. Ini menentukan ukuran sel bahan bakar untuk pengendalian yang stabil. Total daya listrik maksimum yang diperlukan untuk akselerasi kendaraan dari 0 hingga 60 mph dalam 11 detik adalah:

$$P_{tot} = \frac{(mgf_r + \frac{1}{2}\rho_a C_d A_f V^2 + m\delta \frac{dv}{dt})V}{1000\eta_t \eta_{em}}$$

di mana δ adalah faktor massa (diasumsikan 1,035). P_{tot} maksimum dihitung menjadi 124,8 kW. Berdasarkan perhitungan di atas, daya puncak bersih sistem sel bahan bakar dirancang sebesar 50 kW dan ukuran baterai minimal 75 kW (termasuk beban aksesoris listrik). Motor/inverter AC Westinghouse 75 kW (kontinu) dengan efisiensi puncak 0,92 digunakan dalam powertrain. Singkatnya, empat kasus desain adalah:

- Kasus 1 (dasar): 25 modul baterai asam timbal (Hawker Genesis 12 V, 26 Ah 10EP VRLA) digunakan; daya puncak baterai adalah 86,35 kW; massa total kendaraan adalah 1380 kg.
- Kasus 2: 85 sel ultrakapasitor Maxwell digunakan; daya puncak ultrakapasitor adalah 86,0 kW; total massa kendaraan adalah 1140 kg (tingkat hibridisasi yang sama seperti Kasus 1).
- Kasus 3: 170 sel ultrakapasitor digunakan (dua kali dalam Kasus 2); daya puncak ultrakapasitor adalah 172,0 kW; massa total kendaraan adalah 1174 kg.
- Kasus 4: 50 modul baterai asam timbal digunakan (dua kali lipat dari Kasus 1); daya puncak baterai adalah 172,8 kW; massa total kendaraan adalah 1655 kg

Sebagai pemeriksaan ganda, total daya listrik yang dibutuhkan di bawah siklus mengemudi US06 untuk Kasus 1 diberikan pada Gambar 3.4b. Perhatikan bahwa total daya maksimum yang diperlukan adalah sekitar 105 kW pada waktu instan mendekati 300 detik. Ini mendekati (tetapi lebih kecil dari) P_{tot} maksimum di atas 124,4 kW. Jadi desain kita memenuhi kebutuhan daya beban jalan kendaraan.

Asumsi untuk baterai dan ultrakapasitor diberikan pada Tabel 3.4. Daya puncak, kapasitas penyimpanan energi, berat, dan biaya dari dua jenis powertrain hybrid sel bahan bakar dibandingkan pada Tabel 3.5. Perhatikan bahwa kendaraan sel bahan bakar yang dirancang memiliki perangkat penyimpanan energi peringkat daya yang besar karena kendaraan sel bahan bakar adalah hibrida seri. Dengan demikian, sistem sel bahan bakar dapat dianggap sebagai unit daya tambahan, yang dikendalikan untuk bekerja pada daerah efisiensi optimalnya.

Dalam studi simulasi, strategi manajemen energi (strategi kontrol termostat seri) tetap sama dalam semua kasus. SOC tertinggi yang diinginkan adalah 0,8; SOC terendah yang diinginkan adalah 0,4. SOC awal untuk baterai dan ultrakapasitor diatur ke nilai yang sama (0,7) untuk semua kasus. Simulasi dijalankan di bawah tiga jadwal mengemudi yang berbeda: UDDS (jadwal mengemudi dinamometer perkotaan), HWFET (uji ekonomi bahan bakar jalan raya), dan US06 (siklus mengemudi agresif). Ekonomi bahan bakar dalam hal MPGGE untuk empat kasus dibandingkan pada Tabel 3.6. MPGGE dihitung berdasarkan nilai kalor yang lebih rendah dari bensin (42,6 kJ/g), densitas bensin (749 g/l), dan total konsumsi energi dari sistem penyimpanan energi. Definisi rinci MPGGE diberikan dalam.

Tabel 3.4 Asumsi sistem penyimpanan energi.

	Massa per sel (kg)	Daya spesifik (W/kg)	Energi spesifik (Wh/kg)	Biaya (\$/kW)
Baterai	11	314.6	28.4	10
Ultrakapasitor	0.408	2500	6	15

Tabel 3.5 Perbandingan sistem penyimpanan energi.

	Kekuatan puncak (kW)	HD	Kapasitas penyimpanan energi (kWh)	Massa (kg)	Biaya (\$)
Kasus 1 (Baterai)	86.4	0.63	7.81	275	864
Kasus 2 (Ultrakapasitor)	86.4	0.63	0.21	35	1296
Kasus 3 (Ultrakapasitor)	172	0.78	0.42	71	2580
Kasus 4	172.8	0.78	15.62	550	1728

Tabel 3.6 Ekonomi bahan bakar (MPGGE).

	Kasus 1	Kasus2	Kasus 3	Kasus 4
UDDS (empat siklus, 29,8 mil (47,7 km))	58.5	75.8	73.3	50.9
HWFET (empat siklus, 41 mil (66 km))	78.7	84.4	83.2	74.7
US06 (empat siklus, 32 mil (51 km))	58.7	64.1	63.1	56.8

Tabel 3.7 Simulasi kinerja kendaraan.

	0-60 mph (s)	40-60 mph (s)	0-85 mph (s)	Kecepatan maksimum (mph)	Kemiringan maksimum pada 55 mph (%)
Kasus 1	11.1	5.8	22	97.6	9.8
Kasus 2	19.2	13.6	44.5	95.0	12.0
Kasus 3	6.9	3.2	36	95.1	11.7
Kasus 4	8.2	4.0	16	97.2	8.0
Kendala PNGV	≤12	≤5.3	≤23.4	85	6.5

Dari angka pada tabel, Kasus 2 dengan ultrakapasitor memiliki penghematan bahan bakar yang lebih tinggi daripada Kasus 1. Peningkatan modul ultrakapasitor dari Kasus 2 ke Kasus 3 tidak meningkatkan penghematan bahan bakar (perbedaannya kecil). Meningkatkan modul baterai dari Kasus 1 ke Kasus 4 mengurangi penghematan bahan bakar. Performa kendaraan yang disimulasikan tercantum pada Tabel 3.7. Secara khusus, indeks kinerja mencakup waktu kendaraan untuk berakselerasi dari 0 hingga 60 mph, dari 40 hingga 60 mph, dan dari 0 hingga 85 mph, kecepatan maksimum yang dapat dicapai, dan tingkat berkelanjutan maksimum pada 55 mph. Baris terakhir juga mencantumkan batasan kinerja PNGV untuk mobil berukuran sedang. Dari angka yang diberikan, Kasus 1 memiliki performa yang lebih baik dari Kasus 2. Peningkatan modul ultracapacitor dari Kasus 2 ke Kasus 3 sangat meningkatkan

performa kendaraan. Akibatnya, hibrida sel bahan bakar-ultrakapasitor (Kasus 3) memiliki kinerja yang jauh lebih baik daripada hibrida sel bahan bakar-baterai dasar (Kasus 1). Meningkatkan modul baterai dari Kasus 1 ke Kasus 4 juga meningkatkan performa kendaraan. Dari hasil simulasi pada Tabel 3.6 dan 3.7, dengan derajat hibridisasi yang sama (0,63), penghematan bahan bakar kendaraan hibrida sel bahan bakar-ultrakapasitor lebih tinggi sekitar 30% dibandingkan dengan baterai, tetapi kinerjanya lebih buruk. Jika lebih banyak ultrakapasitor digunakan dengan derajat hibridisasi 0,78, kinerja kendaraan dapat ditingkatkan secara luar biasa, sementara penghematan bahan bakar dipertahankan secara kasar pada tingkat tinggi yang sama.

Secara keseluruhan, hibrida sel bahan bakar-ultrakapasitor lebih baik karena ultrakapasitor dapat lebih efektif membantu sel bahan bakar untuk memenuhi permintaan daya sementara. Jika lebih banyak ultrakapasitor ditambahkan, kinerja meningkat, sementara penghematan bahan bakar tetap tinggi. Meskipun modul baterai juga dapat ditingkatkan untuk hibrida sel bahan bakar-baterai, hanya kinerjanya yang dapat ditingkatkan, sementara penghematan bahan bakar akan berkurang seperti yang ditunjukkan oleh Kasus 4. Baterai memiliki energi spesifik yang lebih tinggi daripada ultrakapasitor. Namun dalam powertrain hybrid yang menopang muatan, ini tidak selalu merupakan keuntungan, karena jangkauannya ditentukan oleh volume tangki bahan bakar.

Seperti yang ditunjukkan dalam bab ini, karakteristik daya spesifik yang lebih tinggi dari ultrakapasitor merupakan keuntungan besar untuk powertrain sel bahan bakar hibrida, yang dapat meningkatkan ekonomi bahan bakar dan kinerja akselerasi kendaraan. Selain itu, karakteristik memungkinkan variasi SOC yang luas juga memungkinkan ultrakapasitor membantu sel bahan bakar secara lebih efektif untuk memenuhi permintaan daya kendaraan dan membantu mencapai kinerja yang lebih baik dan penghematan bahan bakar yang lebih tinggi.

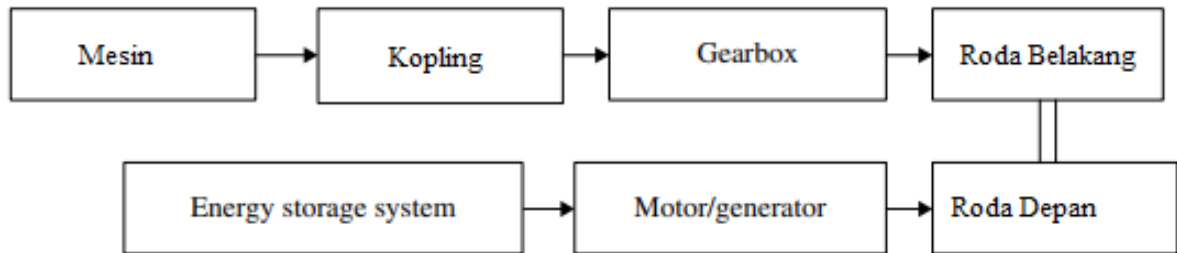
3.6 KENDARAAN HIBRIDA PARALEL

Dalam powertrain hybrid paralel, lebih dari satu sumber energi dapat memberikan tenaga penggerak. Dalam sistem hybrid ini, ICE dan motor digabungkan dalam banyak cara yang memungkinkan. Gaya propulsi dapat disuplai oleh ICE saja, oleh motor listrik saja, atau keduanya. Motor listrik dapat beroperasi sebagai generator listrik untuk mengisi baterai selama pengereman regeneratif atau ketika daya output ICE lebih besar dari daya yang dibutuhkan pada roda. ICE yang lebih kecil dan motor yang lebih kecil dapat dipilih untuk mendapatkan kinerja yang serupa pada rekanan non-hibrida. Hibrida paralel dapat menawarkan biaya yang lebih rendah dibandingkan dengan hibrida seri. Namun, satu kelemahannya, pertama membutuhkan sistem kontrol yang kompleks. Dalam kendaraan hibrida paralel, ICE dan motor listrik secara terpisah dapat memberikan kekuatan propulsi. Gambar 3.8 menunjukkan diagram blok untuk satu kemungkinan kendaraan hibrida paralel, yang merupakan hibrida penggerak empat roda “melalui jalan”. Berdasarkan letak gearbox atau transmisinya, hybrid paralel dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

Hibrida paralel pra-transmisi: Ini juga dikenal sebagai sistem mesin-transmisi-motor. Dalam sistem ini, gearbox terletak di poros penggerak utama setelah coupler torsi. Akibatnya, rasio kecepatan gigi berlaku pada mesin dan motor listrik. Aliran daya dijumlahkan di gearbox. Juga torsi dari motor ditambahkan ke torsi mesin pada poros input gearbox.

Hibrida paralel pasca-transmisi: Ini juga dikenal sebagai sistem transmisi mesin-motor. Dalam sistem ini, gearbox terletak sebelum coupler torsi. Alhasil, rasio kecepatan girboks hanya berlaku pada mesin. Dalam sistem ini, torsi dari motor ditambahkan ke torsi mesin pada poros output gearbox.

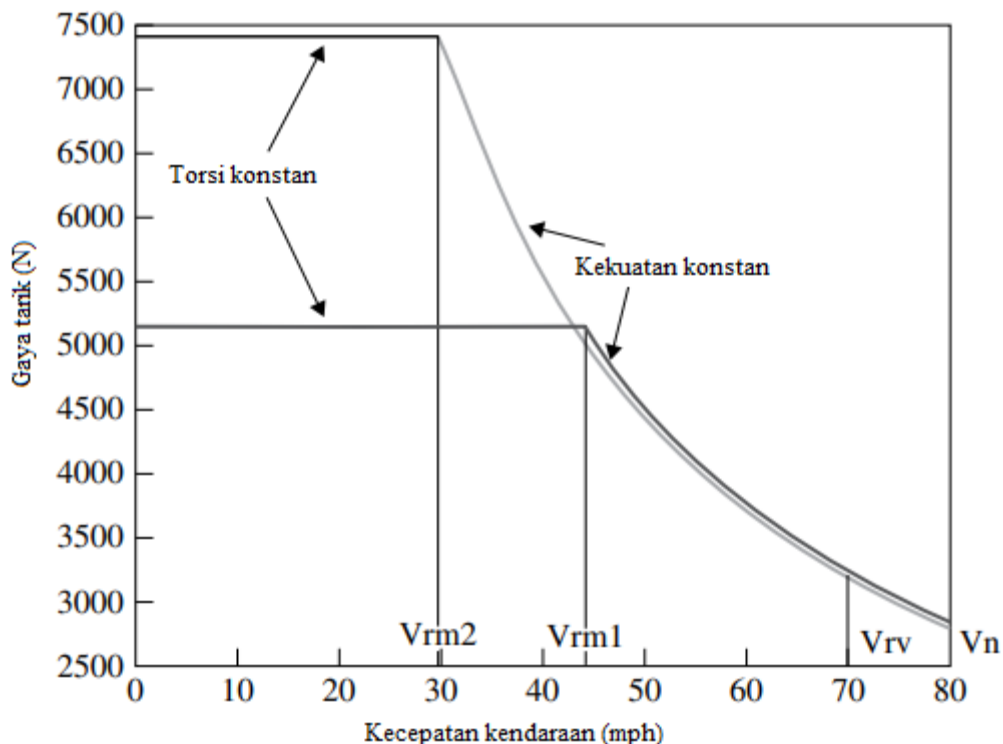
Hibrida paralel "Melalui jalan": Ini termasuk dalam kelas hibrida paralel. Powertrain berbasis ICE mendorong satu poros dan motor traksi listrik mendorong poros lainnya. Desain powertrain hybrid disederhanakan karena dua powertrain di atas dipisahkan.



Gambar 3.8 Powertrain hybrid paralel "Melalui jalan".

3.7 KONSEP HIBRIDA MEMUNCAK SECARA ELEKTRIK

Konsep ELPH (*electricly peaking hybrid*) diusulkan oleh HEV Research Group dari Texas A&M University, merupakan strategi kontrol paralel. Motor traksi listrik dikendalikan untuk mengakomodasi daya akselerasi dan deselerasi sedangkan ICE dikendalikan untuk memberikan daya rata-rata beban kendaraan. Tujuan utama dari strategi kontrol ini adalah untuk mengoperasikan ICE di wilayah kecepatan torsi dengan efisiensi tinggi dan dengan demikian meningkatkan penghematan bahan bakar ICE sekaligus mengurangi emisi berbahaya. Juga, baterai SOC dipertahankan dalam kisaran yang telah ditentukan oleh strategi kontrol ini selama periode mengemudi kendaraan.



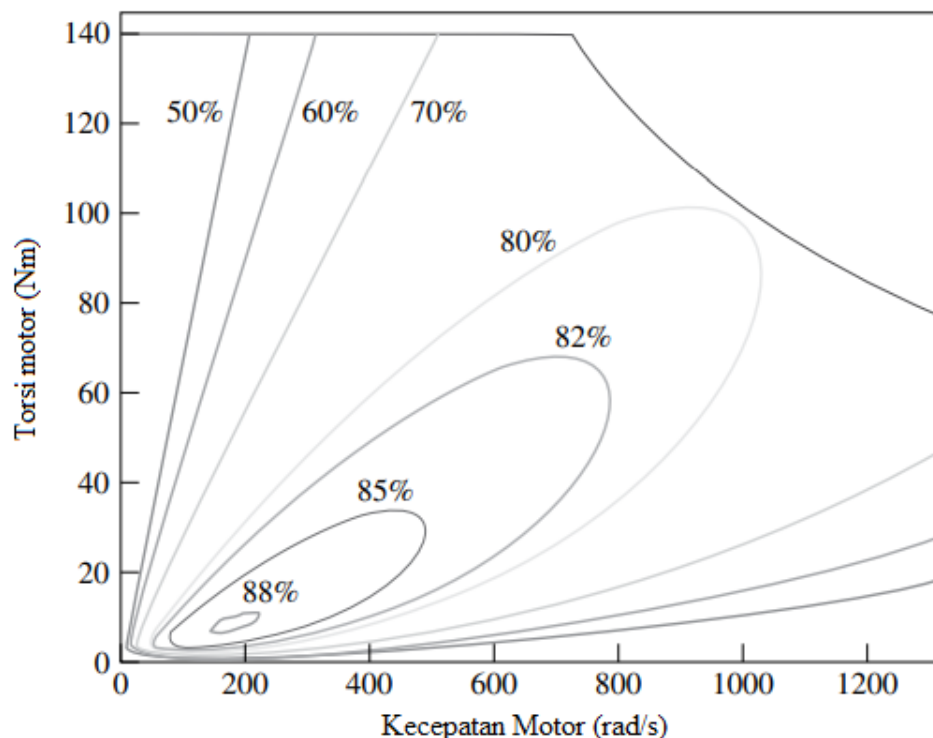
Gambar 3.9 Contoh kurva gaya traksi dan kecepatan kendaraan yang sesuai dengan motor traksi listrik.

Pada bagian ini, desain kendaraan hibrida paralel diberikan sebagai contoh. Perancangan dilakukan secara hierarkis mulai dari tingkat sistem dan berakhir pada tingkat komponen. Perancangan sistem dimulai dengan mendefinisikan batasan kinerja yang harus dipenuhi, seperti percepatan awal, kecepatan jelajah, kecepatan maksimum, dan kemampuan

gradasi. Sistem ini dirancang untuk memenuhi kriteria di atas dengan daya minimum. Spesifikasi performa kendaraan saat ini adalah sebagai berikut:

- Akselerasi: dari 0 hingga 100 km/jam dalam 16 detik.
- Gradabilitas: 5 ° pada 100 km/jam dan maksimum 25 ° pada 60 km/jam.
- Kecepatan: 160 km/jam (hanya ICE), 140 km/jam (hanya motor listrik).
- Parameter dan konstanta yang digunakan dalam perhitungan diberikan pada Tabel 3.1. Dalam desain ini, rasio roda gigi tunggal dan roda gigi bebas kerugian yang ideal dipilih untuk kesederhanaan. Sumber energi utama dalam hybrid paralel ditentukan berdasarkan strategi manajemen energi yang digunakan. Dalam contoh desain ini, strategi pengendalian ELPH diimplementasikan. Ukuran komponen dipilih sedemikian rupa sehingga SOC baterai dapat dikontrol dalam rentang yang telah ditentukan.

Pada langkah pertama desain ini, peringkat daya ICE dan motor listrik diperkirakan berdasarkan persyaratan atau spesifikasi kinerja kendaraan. Pertama, motor listrik dirancang berdasarkan strategi ELPH, yang memenuhi persyaratan akselerasi dan beban jalan. Motor beroperasi di tiga wilayah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.9, sesuai dengan rentang kecepatan kendaraan yang berbeda. Motor adalah motor tipe induksi frekuensi variabel. Wilayah pertama, yang disebut wilayah torsi/gaya konstan, memanjang dari 0 hingga kecepatan motor terukur (v_{rm}), sesuai dengan daya terukur motor.



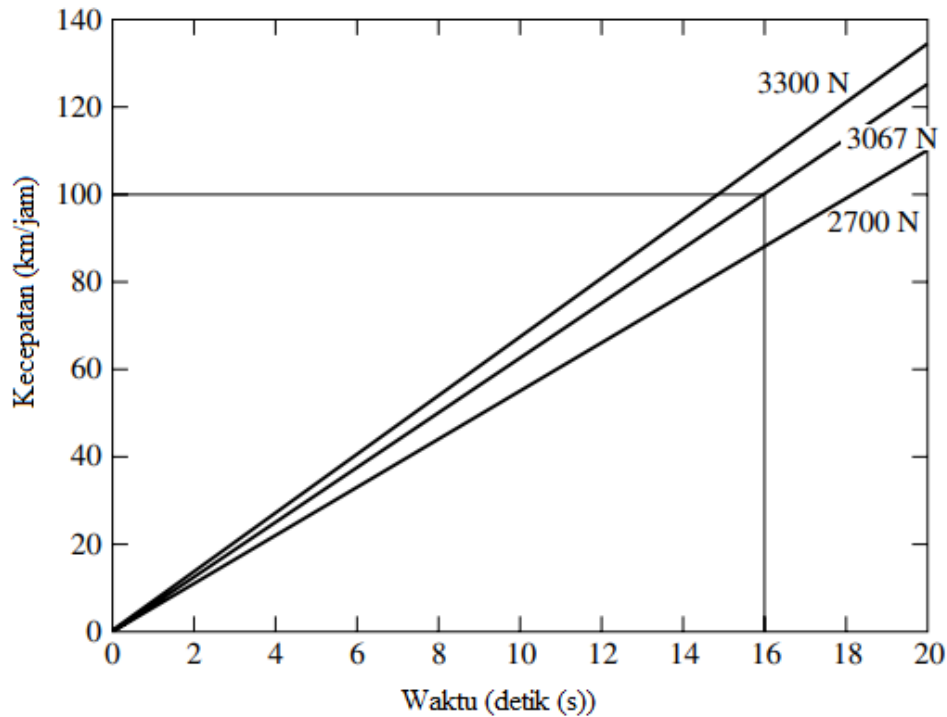
Gambar 3.10 Plot efisiensi motor

Dari kecepatan dasar hingga kecepatan maksimum (v_n), motor berjalan di wilayah daya konstan. Motor berjalan dalam mode alami jika dioperasikan di luar v_n . Torsi berkurang secara kasar sesuai dengan kebalikan kuadrat kecepatan di wilayah kecepatan tinggi ini. Perhatikan bahwa mode alami tidak ditunjukkan pada gambar dan v_{rv} mewakili kecepatan pengenalan kendaraan. Umumnya, motor dioperasikan di daerah torsi konstan untuk akselerasi cepat. Plot efisiensi motor yang sesuai ditunjukkan pada Gambar 3.10. Kerugian konstanta motor berikut diasumsikan dalam memplot efisiensi motor: *copper losses* $k_c = 1,5$, *iron losses* $k_i = 0,1$, *windage losses* $k_w = 0,0001$, dan constant loss motor = 20. Persamaan diferensial yang menggambarkan kinerja kendaraan hibrida diberikan oleh (Persamaan 3.14):

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{F_{te} - F_{RL}}{K_m m}$$

di mana F dan F_{RL} masing-masing adalah gaya gerak dan beban jalan. Dengan asumsi beban jalan 0 untuk penyederhanaan dan $K_m = 1$, maka persamaan di atas menjadi (Persamaan 3.15):

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{F}{m}$$



Gambar 3.11 Performa akselerasi dengan beban jalan nol.

Sebuah kendaraan bermassa 1767 kg bergerak dengan percepatan $1,7361 \text{ m/s}^2$ membutuhkan gaya rata-rata 3067,7 N pada antarmuka ban/jalan, kira-kira 857 Nm pada roda. Perhatikan bahwa ini adalah torsi yang dibutuhkan untuk mempercepat kendaraan, bukan untuk mengatasi beban dasar. Dapat dilihat dari Gambar 3.11 bahwa kendaraan memenuhi kinerja akselerasi 0–100 km/jam dalam 16 detik. Kebutuhan daya untuk memenuhi kinerja akselerasi diberikan pada Gambar 3.12, sekitar 95 kW. Mengintegrasikan persamaan percepatan di atas untuk periode waktu t_f dan untuk kecepatan akhir v_{rv} , kita mendapatkan:

Persamaan 3.16

$$m \int_{v_{rv}}^0 \frac{dv}{F} = \int_{t_f}^0 dt$$

Integral kiri dapat dipisahkan menjadi dua integral, satu untuk daerah torsi konstan dan satu untuk daerah daya konstan (Persamaan 3.17):

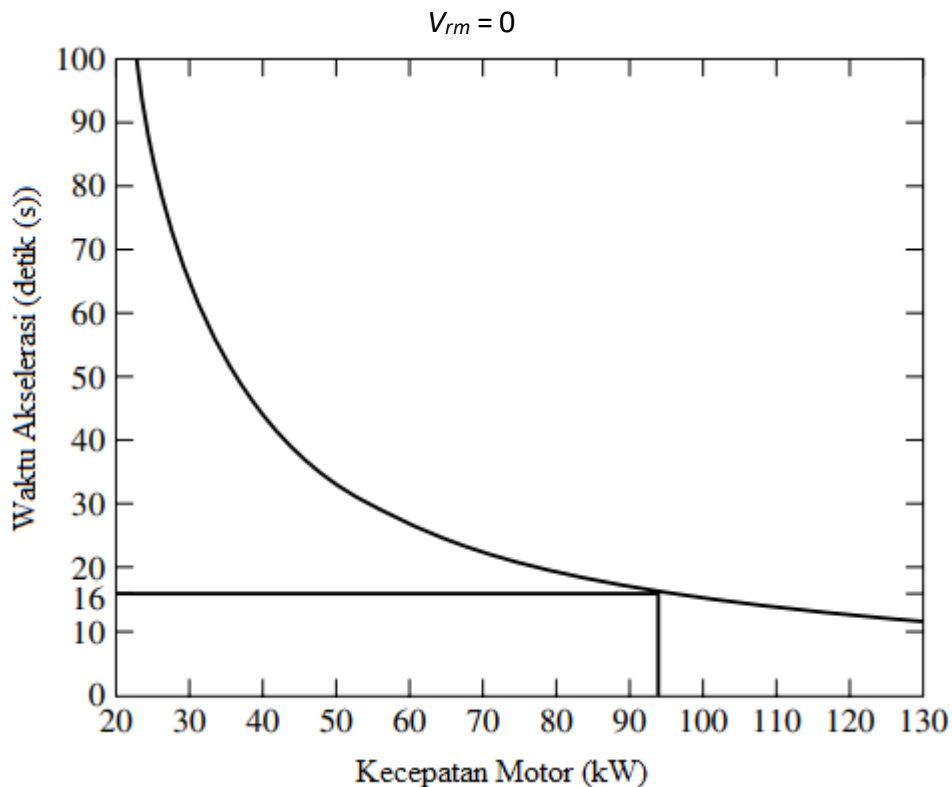
$$m \int_{v_{rv}}^0 \frac{dv}{\frac{Pm}{V_{rv}}} = m \int_{v_{rv}}^{v_{rm}} \frac{dv}{\frac{Pm}{v}} = t_f$$

Memecahkan untuk P_m memberi (Persamaan 3.18):

$$P_m - \frac{m}{2t_f} = (v_{rm}^2 + v_{rv}^2)$$

Fakta bahwa kebutuhan daya akan minimum jika motor dioperasikan pada daerah daya konstan dapat diperoleh dari persamaan ini. Untuk menemukan daya minimum, kita mengambil turunan dari P_m sehubungan dengan v_{rm} dan mengatur turunan ke 0. Ini akan menghasilkan solusi.

Persamaan 3.19



Gambar 3.12 Kebutuhan daya motor untuk memenuhi 0–100 km/jam dalam 16 detik.

Oleh karena itu, jika motor dipercepat dari 0 ke v_{rv} dalam t_f detik di wilayah daya konstan saja, kebutuhan daya minimum; sebenarnya, daya ini adalah setengah dari daya yang dibutuhkan ketika motor dioperasikan seluruhnya di daerah torsi konstan. Ketergantungan daya motor pada kecepatan pengenal motor ditunjukkan pada Gambar 3.13. Dapat dilihat bahwa daya yang dibutuhkan berkurang dengan bertambahnya daerah daya konstan dan menjadi minimum ketika motor dioperasikan sepenuhnya di daerah daya konstan.

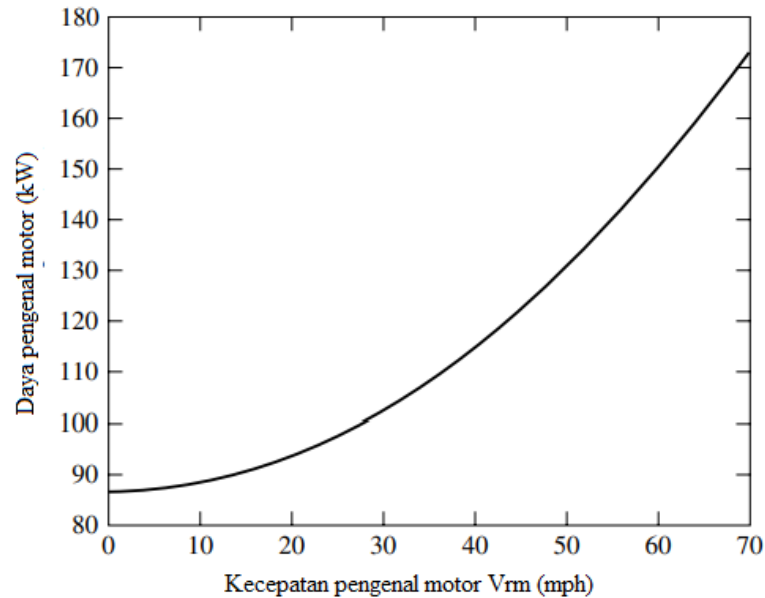
Pengaruh perluasan rentang daya konstan ditunjukkan pada Gambar 3.14. Mendefinisikan rasio rentang daya konstan sebagai v_{rm}/v_{rv} , dapat dilihat dari Gambar 3.14 bahwa, dengan rasio sekitar 1:4, penurunan P_m yang diperlukan untuk t_f tertentu menjadi kurang signifikan. Di sini, rasio 1:1 sesuai dengan daerah torsi murni konstan. Perhatikan di sini bahwa sebagai rentang daya konstan meningkat, torsi yang dibutuhkan meningkat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.9. Jadi, tradeoff harus dibuat antara daya motor dan torsi motor, tergantung pada kebutuhan. Perhatikan juga bahwa pembahasan sebelumnya untuk daya motor yang dibutuhkan diperoleh berdasarkan pengabaian gaya beban jalan. Ketika gaya beban jalan ini dimasukkan, kita memiliki persamaan berikut (Persamaan 3.20):

$$m \int_{v_{rm}}^0 \frac{dv}{\left(\frac{Pm}{v_{rm}}\right) - F_{RL}} + m \int_{v_{rv}}^{v_{rm}} \frac{dv}{\left(\frac{Pm}{v}\right) - F_{RL}} = t_f$$

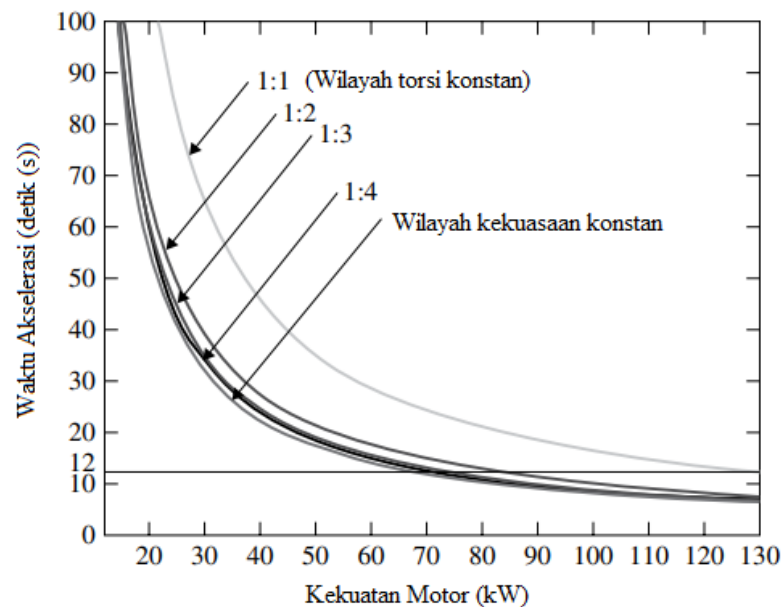
Dapat dilihat dari Gambar 3.12 bahwa motor 95 kW diperlukan untuk memenuhi kinerja akselerasi. Tetapi kebutuhan daya juga harus memenuhi persyaratan kecepatan kendaraan maksimum. Permintaan daya motor dengan kecepatan kendaraan untuk sudut kemiringan yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 3.15. Persamaan berikut digunakan dalam memplot Gambar 3.15 dengan $\eta_t = 0,92$ (persamaan 3.23):

$$P_e = \frac{v}{1000\eta_t} (C_f mg + 0.5\rho C_d A_f v^2 + mg \sin \frac{\alpha\pi}{180^\circ})$$

dimana η_t adalah efisiensi transmisi.

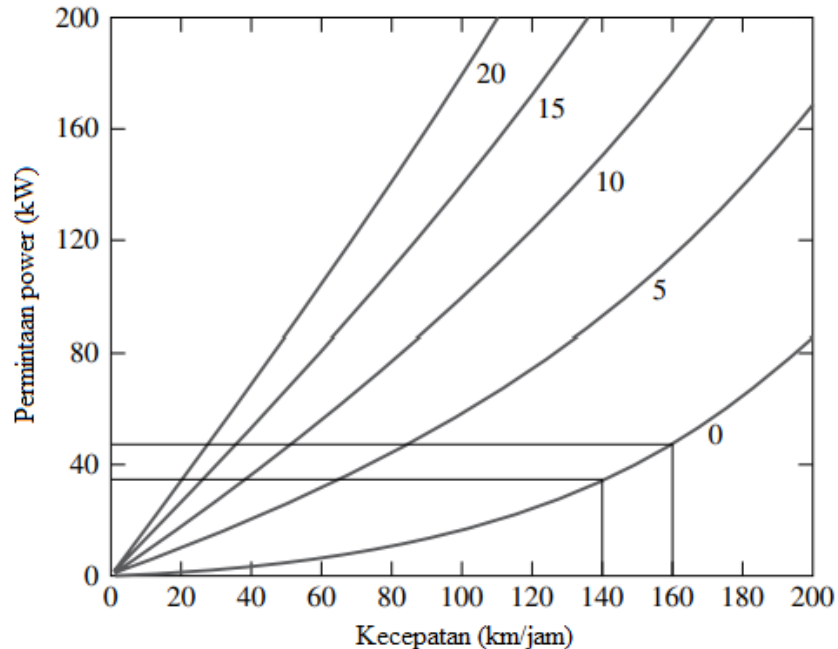


Gambar 3.13 Daya pengenal motor sebagai fungsi kecepatan pengenal motor selama akselerasi.



Gambar 3.14 Daya motor sebagai fungsi dari rentang daya konstan.

Kebutuhan daya yang dibutuhkan tergantung pada kecepatan maksimum kendaraan dan sudut jalan maksimum yang akan didaki. Dalam kasus, persyaratannya adalah 140 km/jam (ICE saja) dan 160 km/jam (motor listrik saja); kemudian dari Gambar 3.15 kebutuhan daya motor sekitar 38 kW. Perhatikan di sini bahwa daya yang dibutuhkan untuk memenuhi kecepatan maksimum kendaraan kurang dari daya yang dibutuhkan untuk memenuhi kinerja akselerasi. Untuk memenuhi kedua persyaratan, daya motor 95 kW dipilih.



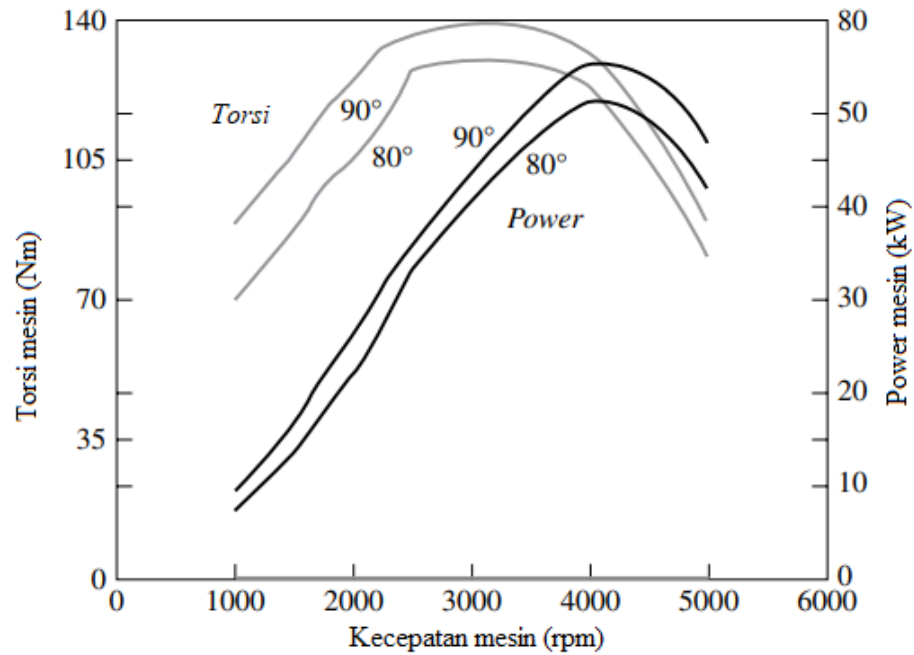
Gambar 3.15 Kebutuhan daya kendaraan pada percepatan nol dengan kecepatan kendaraan pada kemiringan jalan yang berbeda

Karakteristik ES

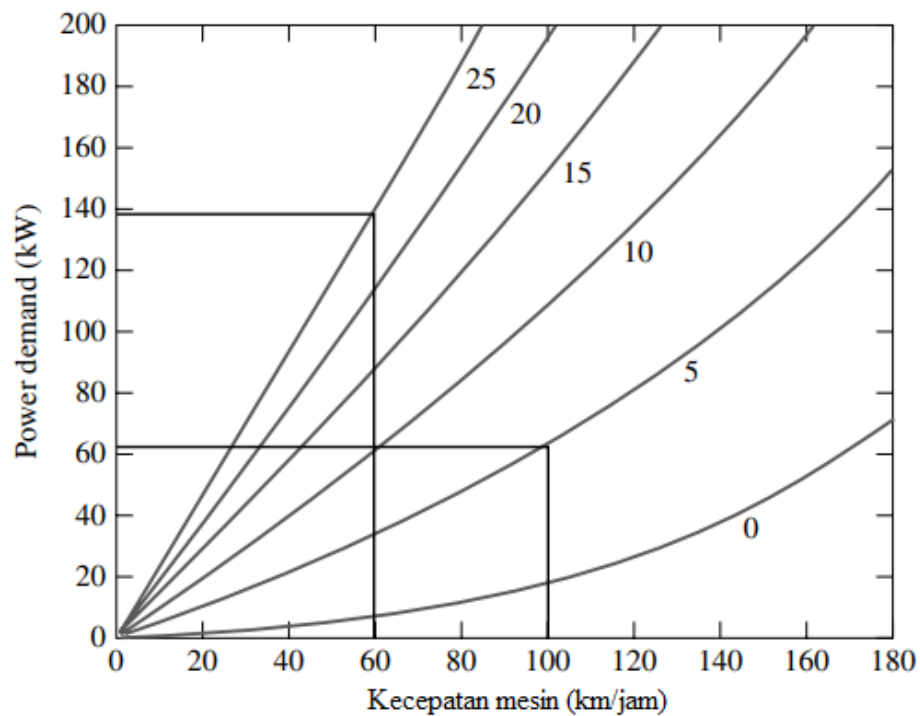
Karakteristik kecepatan torsi dan kecepatan daya ICE 55 kW dengan sudut throttle berbeda 80° dan 90° ditunjukkan pada Gambar 3.16. Plot ini diperoleh dengan menggunakan tabel pencarian dua dimensi. Gambar 3.16 dengan jelas menunjukkan bahwa, untuk output torsi tinggi, ICE harus dioperasikan pada kecepatan sedang. Selain itu, efisiensi ICE (tidak ditunjukkan pada gambar) tinggi pada kecepatan sedang. Dalam strategi pengendalian ELPH, ICE perlu diatur ukurannya agar dapat memberikan daya beban jalan dan untuk mengisi ulang baterai. Dari Gambar 3.15, untuk mencapai 160 km/jam di ICE saja daya yang dibutuhkan adalah 45 kW. Jika kita mengasumsikan permintaan daya tambahan sebesar 10 kW untuk beban hotel seperti AC, penerangan, dan beban tambahan lainnya, maka ukuran ICE harus setidaknya 55 kW.

Persyaratan Gradabilitas

Sejauh ini, dua komponen kendaraan, motor dan ICE, dirancang untuk memenuhi persyaratan akselerasi dan kecepatan maksimum. Sekarang, mari kita periksa kembali persyaratan gradabilitas. Gambar 3.17 menunjukkan daya kendaraan yang dibutuhkan pada sudut kemiringan 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, dan 25°. Dapat dilihat dari Gambar 3.17 bahwa sekitar 60 kW dan 140 kW diperlukan untuk memenuhi gradabilitas persyaratan masing-masing 100 km/jam pada kemiringan 5° dan 60 km/jam pada kemiringan 25°. Daya yang tersedia dari kendaraan adalah jumlah daya yang tersedia dari motor traksi dan ICE. Daya kendaraan yang tersedia adalah 150 kW (95 kW dari motor dan 55 kW dari ICE). Dengan demikian, daya yang tersedia lebih besar dari dua persyaratan daya gradabilitas. Oleh karena itu, persyaratan ini dipenuhi oleh desain.



Gambar 3.16 Karakteristik torsi-kecepatan ICE.

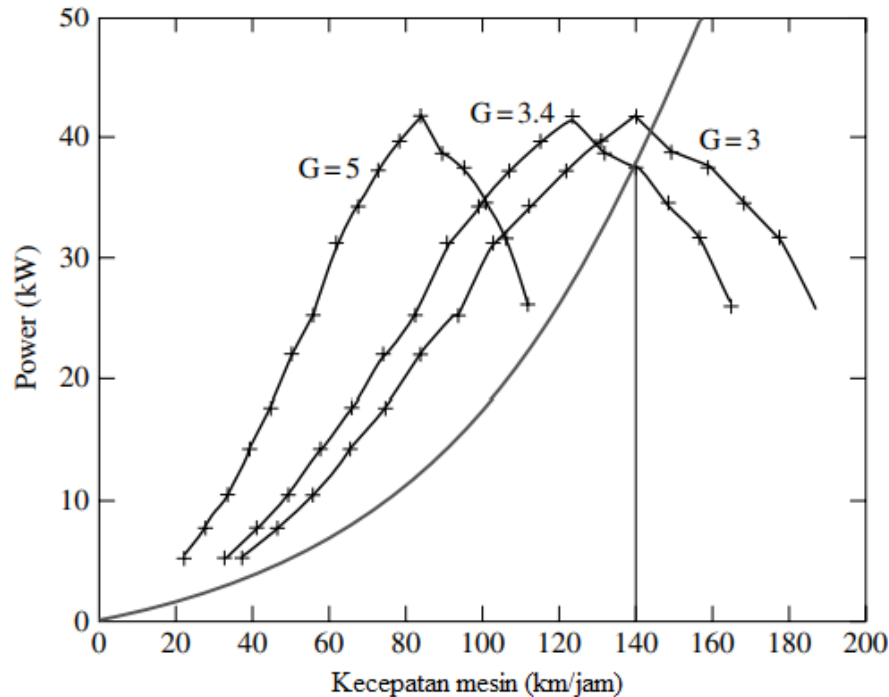


Gambar 3.17 Kurva permintaan daya kendaraan terhadap kecepatan kendaraan dan sudut kemiringan.

Pemilihan Rasio Roda Gigi dari ICE ke Roda

Dalam desain ini, rasio roda gigi tunggal diasumsikan untuk kesederhanaan. Di sini, kita mengendurkan spesifikasi rasio tunggal dan mengetahui rasio roda gigi yang diperlukan dari mesin ke roda penggerak. Roda gigi adalah perangkat mekanis yang digunakan untuk memperoleh keuntungan mekanis melalui peningkatan torsi atau pengurangan kecepatan. Rasio gigi adalah rasio kecepatan ICE (rad/s) dikalikan dengan jari-jari ban (m) terhadap kecepatan kendaraan (m/s). Pada Gambar 3.18, kurva permintaan daya kendaraan (Gambar 3.15) pada kemiringan jalan nol diplot pada grafik yang sama dengan kurva daya mesin (Gambar 3.16) pada sudut throttle 90° di bawah rasio roda gigi yang berbeda. Kurva rasio di

mana kedua kurva ini saling bersentuhan, memenuhi batasan kecepatan maksimum dan daya ICE yang tersedia, sesuai dengan rasio roda gigi minimum yang diperlukan untuk memenuhi batasan kinerja. Dapat dilihat dari Gambar 3.18 bahwa rasio roda gigi 3,4 diperlukan untuk mempertahankan kecepatan 140 km/jam dalam mode operasi khusus ICE. Dengan cara yang sama, rasio roda gigi motor listrik terhadap roda penggerak dapat ditentukan.



Gambar 3.18 Rasio roda gigi dari ICE ke roda penggerak (kurva dengan tanda '+' mewakili daya ICE dan kurva tanpa tanda '+' mewakili daya kendaraan)

3.8 DINAMIKA SLIP RODA

Pada bagian ini, dinamika slip roda kendaraan dibahas secara singkat. Saat daya yang disalurkan ke roda meningkat, akselerasi kendaraan akhirnya dibatasi oleh daya traksi. Dalam akselerasi terbatas daya, kendaraan mencapai akselerasi maksimumnya karena mesin tidak dapat menghasilkan daya traksi lagi. Dalam akselerasi dengan traksi terbatas, mesin dapat dan memang menghasilkan lebih banyak tenaga, tetapi gaya traksi dari ban ke permukaan jalan tidak dapat ditingkatkan lebih lanjut, sehingga akselerasi terbatas. Hal ini disebabkan oleh karakteristik nonlinier dari koefisien gesekan antara ban dan permukaan jalan. Skema model pengereman roda tunggal dan diagram benda bebas yang sesuai ditunjukkan pada Gambar 3.19.

Pada gambar ini, gaya normal z menyeimbangkan berat kendaraan F_z . F_x adalah gaya reaksi ban, yang dihasilkan oleh gesekan antara ban dan permukaan jalan. Gaya reaksi ban ini akan menimbulkan torsi yang mendorong roda ke depan dengan kecepatan sudut ω . Sebaliknya, torsi pengereman T_b melawan F_x dan memperlambat gerak rotasi ke depan roda. Persamaan gerak dinamis dapat ditulis mengikuti hukum Newton:

Persamaan 3.22

$$m \frac{dv}{dt} = -F_x$$

Persamaan 3.23

$$J \frac{d\omega}{dt} = rF_x - t_b \operatorname{sgn}(\omega)$$

Persamaan 3.24

$$0 = Z - F_z$$

di mana:

v = kecepatan longitudinal di mana roda bergerak di sepanjang kendaraan

ω = kecepatan sudut roda

F_z = gaya berat kendaraan

Z = gaya normal akibat gaya reaksi jalan

F_x = gaya reaksi ban akibat gesekan

r = jari-jari roda

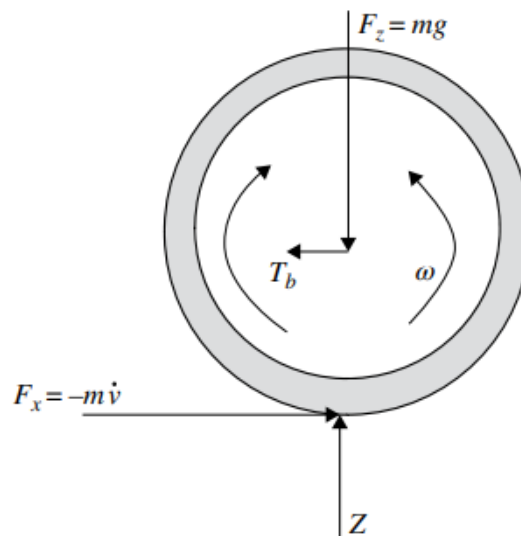
J = inersia roda

T_b = torsi pengereman.

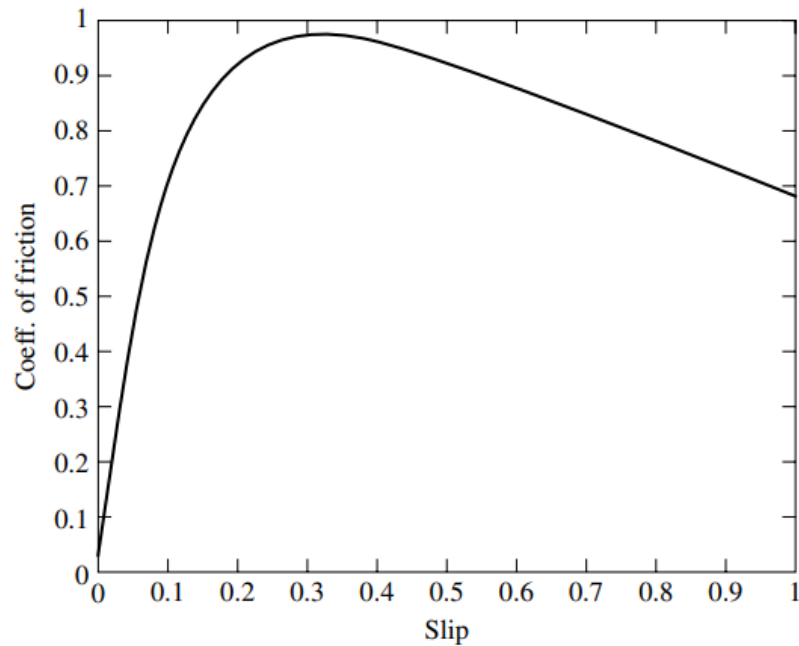
Gaya gesekan ban diberikan oleh (persamaan 3.25)

$$F_x = F_z \mu(\lambda, \mu_H, \alpha)$$

dimana koefisien gesekan adalah fungsi nonlinier dari λ , μ_H , dan α ; λ adalah slip longitudinal ban; H adalah koefisien gesekan antara ban dan jalan; dan adalah sudut slip roda. Jika gaya gesekan ban melebihi gaya yang diberikan oleh persamaan di atas, ban tergelincir berlebihan dan memasuki gesekan dinamis, di mana koefisien gesekan berkurang secara dramatis, yaitu mengerem traksi.



Gambar 3.19 Model gaya dan torsi mobil seperempat



Gambar 3.20 Koefisien gesekan (μ) dan ketergantungan pada slip (λ).

Slip longitudinal ditentukan oleh:

Persamaan 3.26

$$\lambda = \frac{v - \omega r}{v}$$

yang mengkuantifikasi perbedaan yang dinormalisasi antara kecepatan kendaraan v dan kecepatan linier pada jari-jari roda yang sesuai dengan kecepatan putaran roda ω . Jika $\lambda = 0$, roda bergerak bebas tanpa gaya gesek antara ban dan permukaan jalan. Jika $\lambda = 1$, roda dalam kondisi terkunci tanpa gerakan rotasi ($\omega = 0$) dan dengan demikian hanya ada gesekan geser. Gaya gesekan ban longitudinal biasanya diperoleh dengan data uji jalan yang sesuai dengan kurva. Rumus ajaib yang disebut Pacejka memberikan representasi yang baik dari karakteristik gesekan longitudinal, seperti yang diungkapkan oleh (persamaan 3.27)

$$y(x) = D \sin (C \arctan (Bx - E(Bx - \arctan(Bx))))$$

Parameter fungsi B, C, D, dan E ditentukan berdasarkan penyesuaian kurva. Ketergantungan yang lebih sederhana dari koefisien gesekan sebagai fungsi slip dapat diberikan oleh karakteristik gesekan unimodal (persamaan 3.28):

$$\mu(\lambda) = 1.18(1 - e^{-10\lambda}) - \frac{\lambda}{2}$$

Contoh koefisien gesekan sebagai fungsi slip ditunjukkan pada Gambar 3.20. Pada gambar, kurva koefisien gesekan (μ) dapat dibagi menjadi dua daerah: di sebelah kiri 0,3, di mana koefisien gesekan meningkat dengan meningkatnya nilai slip; dan ke kanan sebesar 0,3, dimana koefisien gesekan menurun hingga kondisi penguncian roda ($\lambda = 1$) seiring dengan meningkatnya nilai slip. Perhatikan bahwa kurva pada Gambar 3.20 berbeda untuk kondisi jalan yang berbeda seperti aspal kering, aspal basah, kerikil, dan genangan air. Maklum, koefisien gesekan jauh lebih tinggi untuk aspal kering daripada salju.

BAB 4

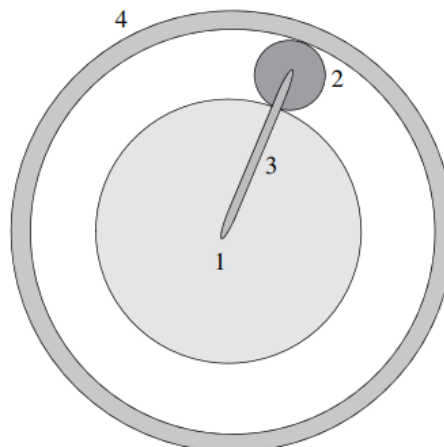
ARSITEKTUR DAN DINAMIKA HEV TINGKAT LANJUT DARI HEV POWERTRAIN

Ada berbagai arsitektur *powertrain hybrid* yang digunakan. Tujuan umum dari desain transmisi hybrid adalah untuk mewujudkan mode operasi yang berbeda dari sistem kendaraan hybrid, seperti kemampuan untuk menjalankan mode motor-alone, mode engine-alone, combine mode, mode power split, mode pengereman regeneratif, dan mode operasi pengisian stasioner. Selain itu, penting untuk dapat mengontrol tenaga dan kecepatan engine selama operasi hybrid sehingga penghematan bahan bakar yang lebih baik dan emisi yang lebih rendah dapat dicapai untuk semua rentang kecepatan dan kebutuhan daya kendaraan. Terakhir, desain sistem harus mudah diimplementasikan dan dikendalikan, dan menanggung biaya keseluruhan yang rendah. Bab ini membahas prinsip-prinsip beberapa arsitektur powertrain listrik hibrida canggih. Arsitektur ini termasuk GM two-mode hybrid yang populer dan variasinya, dual-clutch-based hybrid, hybrid Tsai, hybrid Zhang, hybrid Renault, dan hybrid Timken. Mode operasi steady state dan hubungan torsi/kecepatan disajikan terlebih dahulu. Kemudian, dinamika powertrain HEV akan dibahas secara singkat untuk transmisi hybrid Toyota.

4.1 PRINSIP PLANETARY GEARS

Banyak hibrida di pasar saat ini menggantikan transmisi otomatis tradisional dengan rangkaian roda gigi planetary yang dapat menghadirkan fungsionalitas transmisi variabel kontinu (CVT). Mesin, motor, dan generator bersama-sama membentuk jenis transmisi yang dapat menyediakan transmisi variabel kontinu listrik, yang dikenal sebagai e-CVT. Kereta roda gigi planetary memiliki satu atau lebih roda gigi planetary yang mengorbit di sekitar roda gigi matahari atau poros tengah kereta. Oleh karena itu, ada sumbu yang bergerak di rangkaian roda gigi planetary (carrier). Sebuah representasi bergambar dari kereta planet ditunjukkan pada Gambar 4.1. Seperti dapat dilihat, ada tiga sumbu total: sumbu matahari, sumbu pembawa planet, dan sumbu cincin. Gerakan relatif yang mungkin dari sumbu-sumbu ini membuat rangkaian roda gigi planetary sangat menarik.

Dari tiga poros dari rangkaian roda gigi planetary, setiap poros dapat diperlakukan sebagai poros input atau poros output. Oleh karena itu, kombinasi akan menjadi dua poros input dan satu poros output, atau satu poros input dan dua poros output. Dalam beberapa aplikasi, salah satu set roda gigi diarde sehingga hanya satu input dan satu output yang tersedia.



Gambar 4.1 Kereta roda gigi planetary: 1, roda gigi matahari; 2, gigi planet; 3, lengan atau pembawa planet; 4, gigi cincin.

Untuk memahami hubungan kecepatan/torsi di dalam rangkaian roda gigi planetary, pertama-tama kita dapat melihat hubungan antara satu set roda gigi sederhana. Kecepatan linier tepi roda relatif terhadap pusatnya didefinisikan sebagai:

Persamaan 4.1

$$V = \omega r$$

Dalam roda gigi sederhana, dua roda diletakkan dalam kontak satu sama lain. Kedua roda akan bergerak dengan kecepatan linier yang sama. Jadi, hubungan kecepatan kedua roda adalah:

Persamaan 4.2

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_2}{r_1}$$

Hubungan antara jari-jari roda gigi dan nomor gigi roda gigi dapat ditulis sebagai $2\pi r_i = pN_i$, di mana N adalah nomor gigi dan p adalah pitch (jarak busur antara dua gigi tambahan). Jika roda gigi i dan roda gigi j bersinggungan, maka mereka harus memiliki nada lingkaran p yang sama untuk mentransfer gerakan. Sehingga kita memiliki:

Persamaan 4.3

$$\frac{r_i}{r_j} = \frac{N_i}{N_j}$$

Ungkapan ini berlaku untuk setiap roda gigi dengan gerakan sudut sehubungan dengan satu titik. Untuk rangkaian roda planetary gear yang ditunjukkan pada Gambar 4.2, ada dua titik kontak: titik A antara roda gigi matahari dan roda gigi planet, dan titik B antara roda planetary gear dan roda gigi cincin. Kecepatan linier dari titik kontak dapat diperoleh dengan menggunakan dua jalur yang berbeda untuk setiap titik:

Untuk Titik A:

Persamaan 4.4

$$v_a = \omega_s r_s$$

Persamaan 4.5

$$v_a = \omega_p r_p - \omega_c r_a$$

Untuk titik B:

Persamaan 4.6

$$v_b = \omega_r r_r$$

Persamaan 4.7

$$v_b = \omega_p r_p + \omega_c r_a$$

Arah rotasi berbagai komponen telah dipilih sehingga pergerakan kereta planet layak. Dengan demikian, kita memiliki dua persamaan berikut:

Persamaan 4.8

$$\omega_s r_s = \omega_p r_p - \omega_c r_a$$

Persamaan 4.9

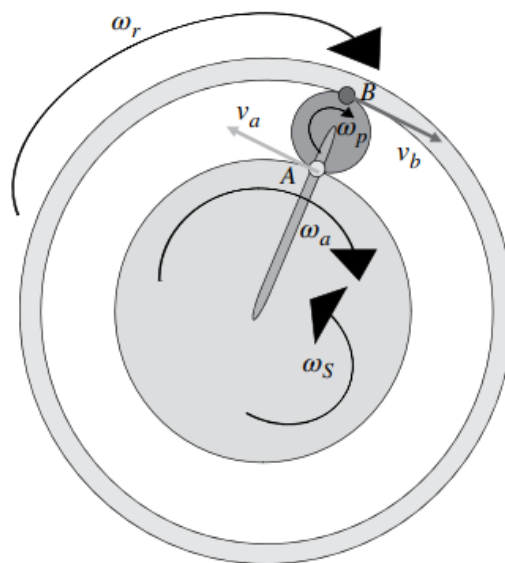
$$\omega_r r_r = \omega_p r_p + \omega_c r_a$$

Setelah manipulasi, kita mendapatkan

$$\omega_r r_r = \omega_s r_s + 2\omega_c r_a$$

Tapi $r_a = r_r - r_p$ dan $2r_p + r_s = r_r$, jadi $r_a = (r_r + r_s)/2$. Oleh karena itu, kita mendapatkan (persamaan 4.10):

$$\omega_r r_r = \omega_s r_s + \omega_c (r_s + r_r)$$



Gambar 4.2 Pengoperasian rangkaian roda gigi planetary.

Untuk memudahkan penggunaan ekspresi, arah searah jarum jam akan dianggap positif dan arah berlawanan arah jarum jam dianggap negatif. Seperti dapat dilihat pada Gambar 4.2, tidak semua kecepatan sudut memiliki arah yang sama. Jadi, kita dapat menulis ulang persamaan di atas dengan memasukkan arah referensi yang benar:

Persamaan 4.11

$$\omega_r r_r = \omega_s r_s + \omega_c (r_s + r_r)$$

Sejak:

Persamaan 4.12

$$2\pi r_i = p N_i$$

Kita memiliki :

Persamaan 4.13

$$\omega_r N_r + \omega_s N_s = \omega_c (N_s + N_r)$$

Atau :

Persamaan 4.14

$$\frac{N_r}{N_s + N_r} \omega_r + \frac{N_s}{N_s + N_r} \omega_s = \omega_c$$

Seperti disebutkan sebelumnya, dua input diperlukan sebelum satu set roda planetary gear dapat dianalisis secara unik. Jika roda gigi di-ground, kecepatannya nol; namun kecepatan nol ini merupakan salah satu nilai input.

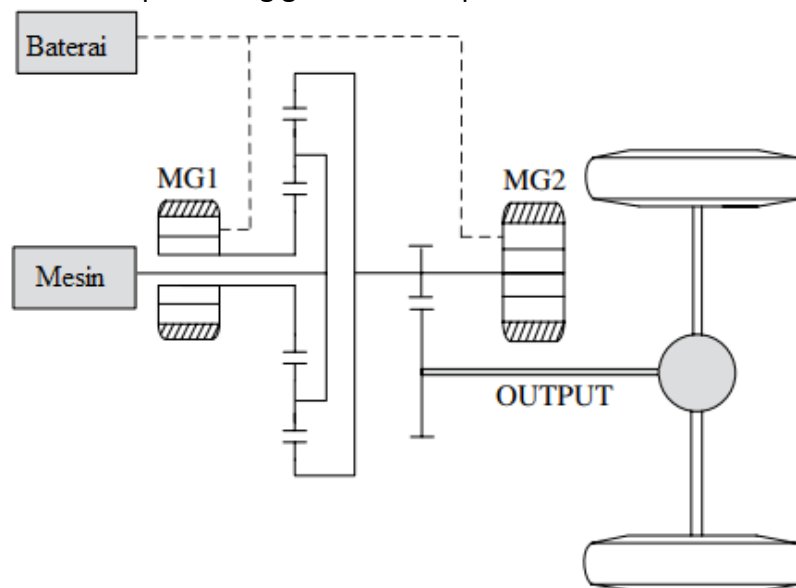
4.2 TOYOTA PRIUS DAN FORD ESCAPE HYBRID POWERTRAIN

Toyota Prius dan Ford Escape menggunakan transmisi powertrain serupa, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3 dan juga pada Gambar 1.23. Ini memiliki mesin, dua mesin listrik, dan kereta roda gigi planetary di transmisi. Mesin terhubung ke carrier, motor listrik MG2 terhubung ke ring gear serta final drive, dan generator MG1 terhubung ke sun gear. Oleh karena itu, hubungan kecepatan dan torsi adalah (persamaan 4.15)

$$\omega_e = \frac{N_s}{N_r + N_s} \omega_g + \frac{N_r}{N_r + N_s} \omega_r$$

dimana ω_e , ω_m , dan ω_g adalah kecepatan mesin, motor dan generator, masing-masing, ω_r adalah kecepatan ring gear, $\omega_m = \omega_r$; $\omega_s = \omega_g$; $i_1 = N_2/N_1$ adalah rasio final drive gear, dan N_1 dan N_2 adalah jumlah gigi gear dari final drive.

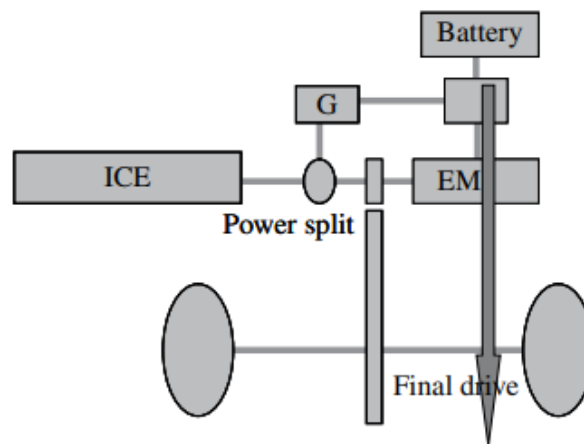
Karena tidak ada kopling, planetary gear selalu berjalan setiap kali kendaraan bergerak. Dapat dilihat dari persamaan di atas dan diagram powertrain bahwa kecepatan motor MG2 berbanding lurus dengan kecepatan linier kendaraan melalui jari-jari ban depan dan rasio final drive. Kecepatan ring gear dan kecepatan motor identik.



Gambar 4.3 Transmisi Toyota Prius

Ada empat mode operasi yang berbeda:

- Mode 0: Peluncuran dan pencadangan – motor ditenagai dari baterai; kendaraan hanya digerakkan oleh motor:



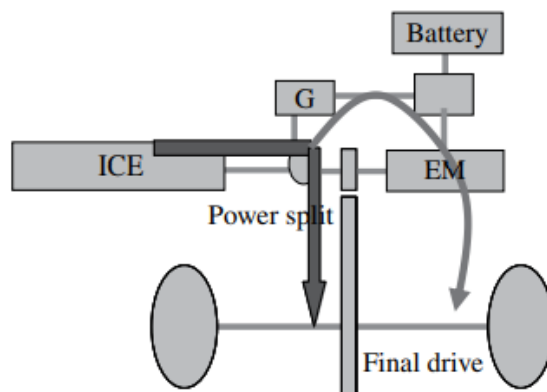
Persamaan 4.16

$$T_e = 0$$

$$T_g = 0$$

$$T_{shaft} = i_1 T_m$$

- Mode 1: Jelajah, atau mode e-CVT 1:



Persamaan 4.17

$$T_r = \frac{N_r}{N_r + N_s} T_e$$

Persamaan 4.18

$$T_g = \frac{N_s}{N_r + N_s} T_e$$

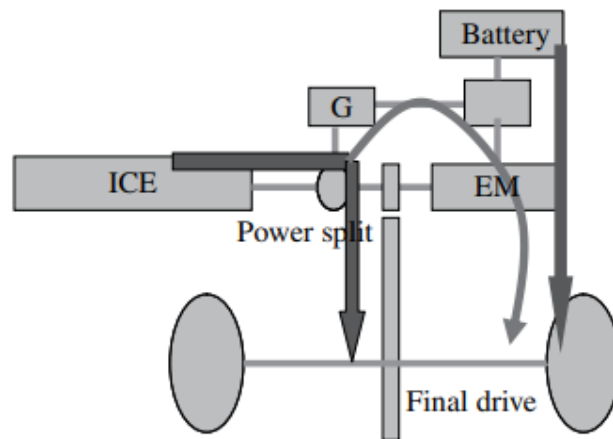
Persamaan 4.19

$$T_{out} = i_1 (T_r + T_m)$$

Persamaan 4.20

$$P_b = 0; P_m = \omega_m T_m = P_g = \omega_g T_s$$

- Mode 2: Akselerasi mendadak, mode e-CVT 2:



Persamaan 4.21

$$T_r = \frac{N_r}{N_r + N_s} T_e$$

Persamaan 4.22

$$T_g = \frac{N_s}{N_r + N_s} T_e$$

Persamaan 4.23

$$T_{out} = i_1 (T_r + T_m); P_m = \omega_m T_m = P_g + P_B$$

- Mode 3: Pengereman regeneratif – MG2 beroperasi sebagai generator untuk menghasilkan listrik untuk mengisi baterai dan pada saat yang sama memberikan torsi pengereman ke final drive. Operasi ini adalah kebalikan dari operasi peluncuran dan pencadangan.

Selama operasi normal (e-CVT atau mode akselerasi), kecepatan mesin dikendalikan oleh torsi pada generator. Pada dasarnya, daya generator diatur agar mesin berputar pada kecepatan yang diinginkan. Oleh karena itu, dengan menyesuaikan kecepatan generator, mesin dapat beroperasi pada kecepatan yang relatif konstan saat kendaraan digerakkan pada kecepatan yang berbeda. Di Prius, mesin dibatasi dari 0 hingga 4000 rpm. Motor dibatasi dari rpm negatif kecil untuk mundur dan hingga 6000 rpm (~ 103 mph atau 165 km/jam). Generator dibatasi hingga ± 5500 rpm. Ring gear dan sun gear masing-masing memiliki 78 dan 30 gigi. Empat roda planetary gear masing-masing memiliki 23 gigi. Rasio final drive adalah 3,93 dan radius roda 0,287 m. Jadi, $\omega_e = 0,7222\omega_m + 0,2778\omega_g$.

Strategi pengendaliannya adalah sebagai berikut. Untuk kecepatan kendaraan tertentu, dan daya output yang diinginkan ditentukan oleh siklus penggerak, atau input pengemudi, titik operasi mesin yang diinginkan dapat ditentukan berdasarkan kurva efisiensi maksimum mesin. Dari kecepatan kendaraan dan putaran mesin, kecepatan generator yang diinginkan kemudian dapat dihitung. Kecepatan generator diatur melalui inverter dengan mengontrol daya output generator (baik sebagai generator atau motor). Torsi motor ditentukan dengan melihat perbedaan antara permintaan torsi total kendaraan dan torsi mesin yang disalurkan ke ring gear. Baterai memberikan daya ke motor bersama dengan listrik yang dihasilkan oleh mesin.

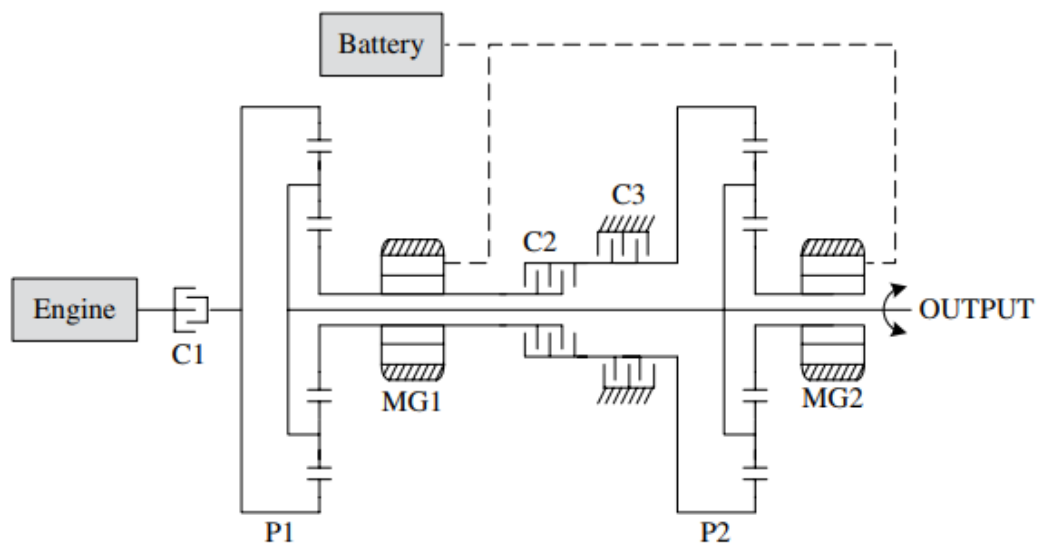
4.3 TRANSMISI HYBRID DUA MODE GM

Transmisi hybrid dua mode GM awalnya dikembangkan oleh GM (Alison) pada tahun 1996, dan kemudian dikembangkan oleh GM, Chrysler, BMW, dan Mercedes-Benz dalam usaha patungan bernama Global Hybrid Cooperation pada tahun 2005. GM two-mode hybrid electric powertrain (atau transmisi) ditunjukkan pada Gambar 4.4. Powertrain ini terdiri dari

dua set planetary gear P1 dan P2, dua mesin listrik MG1 dan MG2, dan tiga kopling C1, C2, dan C3. Powertrain mampu menyediakan transmisi variabel kontinu listrik (eCVT) untuk operasi kecepatan tinggi dan kecepatan rendah, karenanya dua mode. Konsep dua mode tersebut dapat dirujuk dan dibandingkan dengan powertrain kendaraan listrik hybrid Toyota dan Ford yang pengoperasiannya terbatas hanya pada satu mode. Pada prinsipnya, operasi dua mode dapat memberikan lebih banyak fleksibilitas untuk kontrol transmisi, peningkatan kemampuan berkendara, dan peningkatan kinerja kendaraan dan penghematan bahan bakar.

Prinsip Operasi Powertrain Dua Mode

Dalam transmisi hybrid dua mode GM, mesin terhubung ke ring gear planetary gear P1 melalui kopling C1. Mesin listrik MG1 terhubung ke sun gear P1. Pembawa P1 terhubung ke final drive melalui poros keluaran. MG2 terhubung ke roda gigi matahari planet P2. Pembawa P2 juga terhubung ke poros keluaran. Ada kopling posisi ganda yang menghubungkan ring gear P2 ke ground, atau ring gear P2 ke poros MG1. Melalui kontrol C2 dan C3, mode operasi yang berbeda dapat diwujudkan. Mesin dalam sistem ini dapat dijaga pada kombinasi kecepatan dan torsi terbaik untuk mencapai penghematan bahan bakar terbaik dengan mengontrol input/output dari dua mesin listrik. Mesin mungkin berhenti atau mungkin menganggur selama peluncuran dan cadangan kendaraan, serta pada permintaan daya yang rendah. Pada kondisi jelajah, efisiensi mesin lebih ditingkatkan dengan penonaktifan silinder, juga dikenal sebagai manajemen bahan bakar aktif (GM) atau sistem multi-perpindahan (Chrysler). Perhatikan bahwa diskusi ini bersifat umum dan mungkin tidak sama dengan yang diterapkan di kendaraan nyata oleh pabrikan mobil.



Gambar 4.4 Transmisi hybrid dua mode GM

Dalam turunan berikut, adalah kecepatan sudut, T adalah torsi, N adalah jumlah gigi roda gigi, dan P adalah daya. Subscript s adalah singkatan dari sun gear, r untuk ring gear, c untuk planetary carrier, 1 untuk planetary gear set 1, 2 untuk planetary gear set 2, g untuk motor/generator 1, atau MG1, m untuk motor/generator 2, atau MG2, dan keluar untuk output atau final drive

Mode 0: Peluncuran dan Pencadangan Kendaraan

Selama peluncuran dan pencadangan kendaraan, sistem beroperasi dalam mode motor saja (Mode 0). C2 terbuka dan C3 terhubung ke ground ring gear P2. Dalam mode ini, ada dua kemungkinan pengoperasian mesin, baik mati atau idle pada kecepatan engkol (sekitar 800 rpm) dengan menyesuaikan kecepatan MG1. Torsi MG1 tidak ditransmisikan ke final drive. MG2 menyediakan torsi yang dibutuhkan untuk meluncurkan kendaraan ke depan

atau ke belakang. Gambar 4.5 menunjukkan aliran daya selama peluncuran dan pencadangan. Hubungan kecepatan/torsi adalah:

Persamaan 4.24

$$\omega_{out} = \frac{N_{s2}}{N_{s2} + N_{r2}} \omega_m$$

Persamaan 4.25

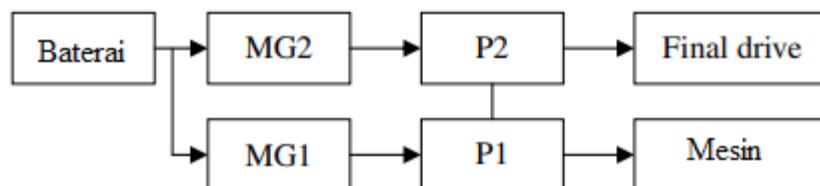
$$T_{out} = \frac{N_{s2} + N_{r2}}{N_{s2}} T_m$$

Dalam implementasi akhir, C1 dihilangkan. Oleh karena itu, mesin selalu terhubung ke ring gear P1. Karena pembawa P1 selalu terhubung ke final drive, MG1 perlu dikontrol agar mesin berada pada posisi nol atau pada kecepatan tertentu:

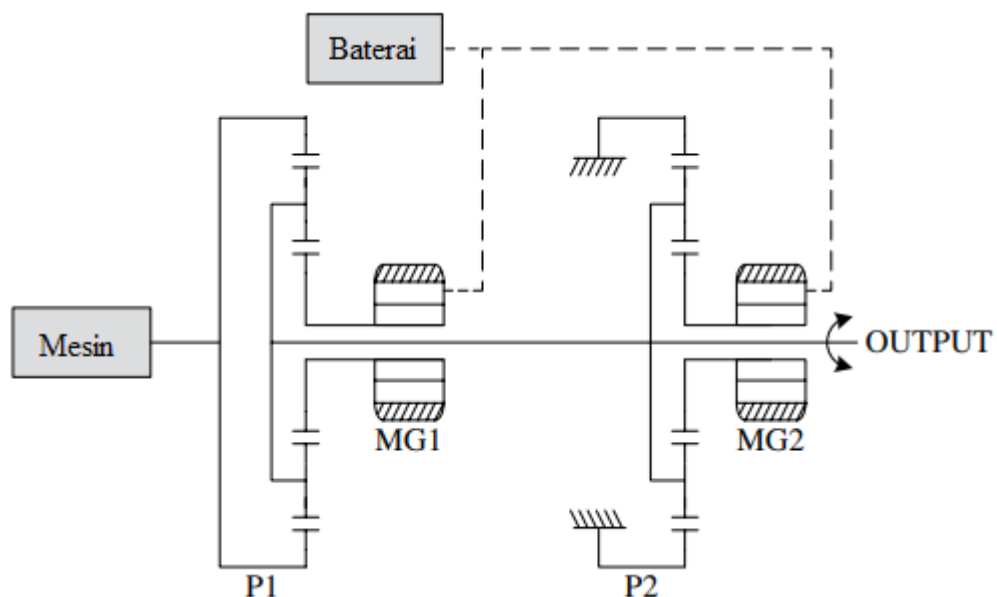
Persamaan 4.26

$$\omega_g = \frac{N_{s1} + N_{r1}}{N_{s1}} \omega_{c1} - \frac{N_{r1}}{N_{s1}} \omega_e$$

Jika mesin dipertahankan pada 800 rpm tanpa injeksi bahan bakar, masih ada kerugian gesekan, tetapi mesin dapat dinyalakan kapan saja tanpa penundaan. Jika mesin dikendalikan pada kecepatan nol, maka MG1 perlu dikendalikan agar ring gear P1 mencapai 800 rpm sebelum mesin dapat dihidupkan. Dalam hal ini, mesin dikendalikan oleh penonaktifan silinder.



Gambar 4.5 Aliran daya selama peluncuran dan pencadangan.



Gambar 4.6 Low Range.

Mode 1: Low Range

Mode 1 juga disebut mode jarak rendah atau kecepatan rendah. Dalam mode ini, C1 diaktifkan, C2 terbuka, dan C3 diaktifkan. Roda planetary gear kedua berfungsi sebagai roda gigi pengurang kecepatan untuk MG2. Gambar 4.6 mengilustrasikan sambungan mekanis transmisi. Mesin dapat dikontrol dengan penonaktifan sebagian silinder untuk lebih menghemat bahan bakar dan mengurangi emisi berdasarkan permintaan daya kendaraan. Hubungan torsi dan kecepatan selama operasi kondisi tunak dapat dinyatakan sebagai:

Persamaan 4.27

$$T_g = \frac{N_{s1}}{N_{r1}} T_e$$

Persamaan 4.28

$$\omega_{c1} = \frac{N_{r1}}{N_{s1} + N_{r1}} \omega_e + \frac{N_{s1}}{N_{s1} + N_{r1}} \omega_g$$

Persamaan 4.29

$$\omega_{out} = \omega_{c2} = \omega_{c1} = \frac{N_{s2}}{N_{s2} + N_{r2}} \omega_m$$

Persamaan 4.30

$$T_{out} = \frac{N_{r1} + N_{s1}}{N_{r1}} T_e + \frac{N_{s2} + N_{r2}}{N_{s2}} T_m$$

Operasi yang berbeda dalam Mode 1 dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. **Engine Alone (CVT 1):** MG2 mati (freewheel) dan MG1 dapat dalam mode motoring atau mode pembangkit. Saat MG1 dalam mode motoring, P1 bertindak sebagai mekanisme speed coupling untuk menggabungkan kecepatan mesin dan MG1. Saat MG1 dalam mode pembangkit, tenaga mesin dibagi antara final drive dan MG1 dengan tenaga yang dihasilkan oleh MG1 mengisi baterai. Karena baterai dapat terisi penuh dengan cepat, mode ini biasanya berlangsung singkat.
2. **Combine Mode (CVT 2):** MG2 dihidupkan untuk membantu mengemudi. P2 bertindak sebagai mekanisme kopling torsi untuk menambah torsi mesin (porsi pembawa P1) dan MG2. Jika diperlukan, baik MG1 maupun MG2 dapat bekerja dalam mode motoring untuk memaksimalkan torsi berkendara.
3. **Power Split Mode (CVT 3):** MG2 berada dalam mode pembangkitan untuk mengisi daya baterai. MG1 dapat berupa motor atau pembangkit.

Mode 2: High Range

Mode 2 juga disebut mode high-range atau kecepatan tinggi. C1 diaktifkan, C2 diaktifkan, tetapi C3 terbuka. Dalam mode ini, sun gear P1 terhubung ke ring gear P2 melalui MG1, yaitu MG1, S1, dan R2 akan memiliki kecepatan yang sama. Gambar 4.7 menunjukkan sambungan mekanis transmisi dalam Mode 2. Dalam mode operasi ini, mesin umumnya dijaga pada kecepatan konstan untuk mencapai penghematan bahan bakar terbaik. MG1 dan MG2 dikendalikan baik dalam mode motoring atau pembangkit, tergantung pada kecepatan kendaraan dan permintaan daya. Hubungan torsi dan kecepatan selama operasi kondisi tunak adalah:

Persamaan 4.31

$$T_g = \frac{N_{s1}}{N_{r1}} T_e + \frac{N_{r2}}{N_{s2}} T_m$$

Persamaan 4.32

$$\omega_{c1} = \frac{N_{r1}}{N_{s1} + N_{r1}} \omega_e + \frac{N_{s1}}{N_{s1} + N_{r1}} \omega_g$$

Persamaan 4.33

$$\omega_{c2} = \frac{N_{r2}}{N_{s2} + N_{r2}} \omega_g + \frac{N_{s2}}{N_{s2} + N_{r2}} \omega_m$$

Persamaan 4.34

$$\omega_{c2} = \omega_{c1}$$

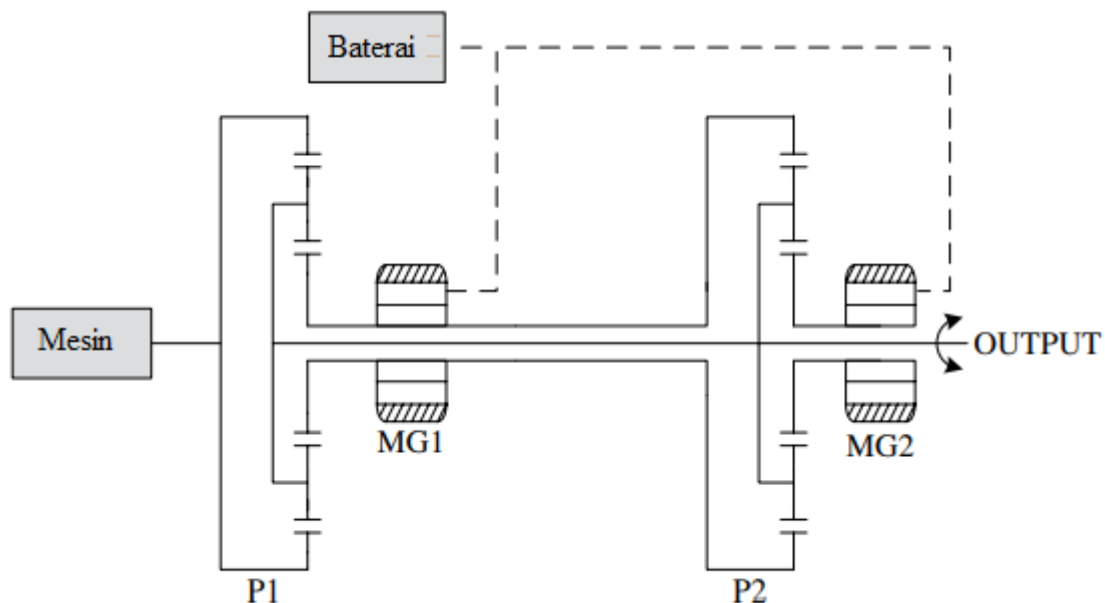
Persamaan 4.35

$$\omega_{r2} = \omega_{s1} = \omega_g$$

Persamaan 4.36

$$T_{fd} = \frac{N_{r1} + N_{s1}}{N_{r1}} T_e + \frac{N_{s2} + N_{r2}}{N_{s2}} T_m$$

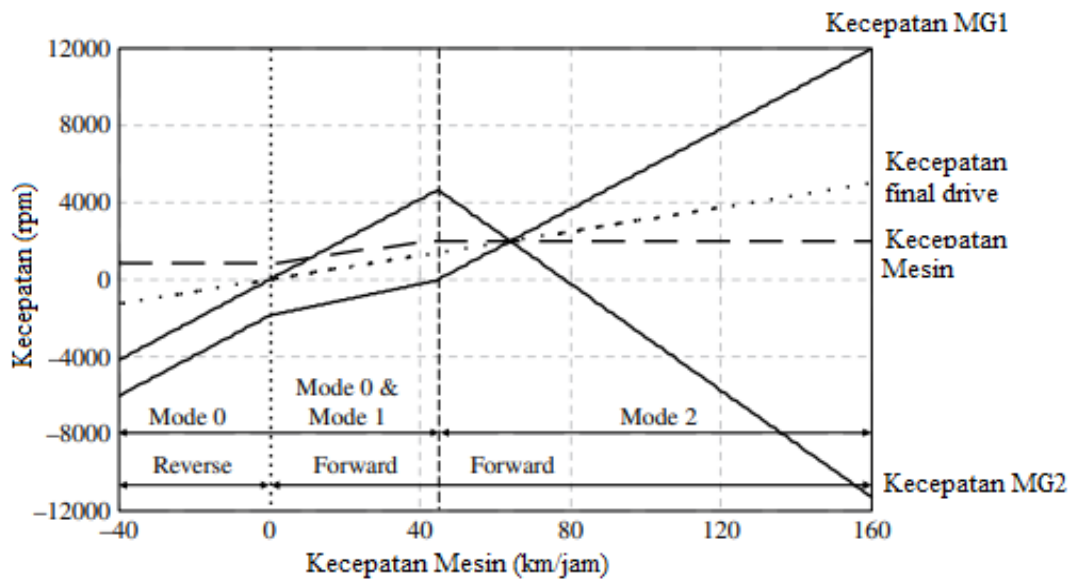
Mirip dengan Mode 1, mesin dapat dikontrol dengan menonaktifkan sebagian silinder untuk lebih menghemat bahan bakar dan mengurangi emisi, berdasarkan permintaan daya kendaraan.



Gambar 4.7 High Range



Gambar 4.8 Aliran daya dalam pengereman regeneratif



Gambar 4.9 Hubungan kecepatan transmisi dua mode

Mode 3: Pengereman Regeneratif

Selama pengereman regeneratif, C1 terbuka, C2 terbuka, dan C3 diaktifkan, untuk mengardakan ring gear P2 (Mode 3). Mesin dan MG1 mati atau freewheel. MG2 menyediakan torsi pengereman yang dibutuhkan untuk kendaraan dan, pada saat yang sama, menyimpan energi pengereman regeneratif dalam baterai onboard. Gambar 4.8 menunjukkan aliran daya selama pengereman regeneratif. Hubungan kecepatan/torsi adalah:

Persamaan 4.37

$$\omega_m = \frac{N_{s2} + N_{r2}}{N_{s2}} \omega_{out}$$

Persamaan 4.38

$$T_m = \frac{N_{s2}}{N_{s2} + N_{r2}} T_{out}$$

Pengereman hidraulik/gesekan dapat dikontrol dalam koordinasi dengan pengereman regeneratif untuk memaksimalkan torsi pengereman dan/atau menjaga stabilitas kendaraan dan mencegah penguncian roda. Dalam hal ini, MG2 hanya memberikan sebagian torsi pengereman.

Transisi antara Mode 0, 1, 2, dan 3

Secara umum, transisi dilakukan pada kondisi yang dapat meminimalkan gangguan mekanis pada sistem kendaraan secara keseluruhan. Kendaraan umumnya diluncurkan oleh MG2 dengan mesin mati (Mode 0). MG1 dihidupkan sebelum beralih ke Mode 1 sehingga putaran mesin mencapai sekitar 800 rpm. Transisi dari Mode 0 ke Mode 1 ditandai dengan mesin menyala. Ini biasanya terjadi ketika permintaan daya mencapai tingkat tertentu sehingga MG2 tidak lagi mampu memberikan torsi yang dibutuhkan. Permintaan daya merupakan kombinasi dari kecepatan kendaraan, permintaan akselerasi, beban kendaraan, dan kondisi jalan. Peralihan dari Mode 1 ke Mode 2 terjadi ketika sun gear P1 dan ring gear P2 mencapai kecepatan yang sama. Dengan kata lain, karena ring gear P1 di-ground (kecepatan nol), transisi dari Mode 1 ke Mode 2 akan terjadi ketika sun gear P1 atau MG1 mencapai kecepatan nol. Demikian pula, transisi dari Mode 2 ke Mode 1 juga terjadi ketika kecepatan

MG1 mencapai nol. Transisi dari Mode 1 ke Mode 3, atau Mode 2 ke Mode 3, dipicu oleh permintaan pengereman dari pengemudi (pedal rem ditekan).

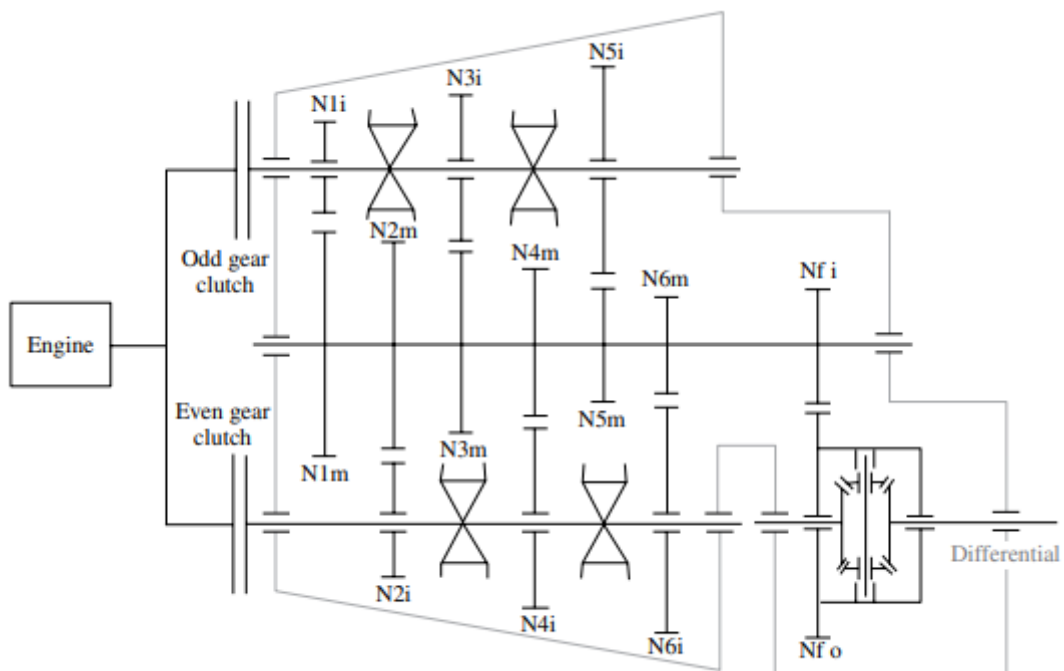
4.4 TRANSMISI HYBRID KOPLING GANDA

Ada beberapa varian transmisi otomatis seperti AMT (*Automatic Manual Transmission*), CVT, dan DCT (*Dual Clutch Transmission*). Masing-masing teknologi ini memiliki tingkat penetrasinya sendiri di berbagai wilayah di dunia (Amerika Utara, Eropa, atau Asia). Keunggulan DCT antara lain efisiensi tinggi, biaya rendah, dan kenyamanan berkendara. Perkiraan konservatif mematok teknologi DCT di sekitar 10% dari pasar global pada tahun 2015. Tabel 4.1 c membandingkan keuntungan dan kerugian dari CVT, AMT, dan DCT. Teknologi DCT sangat cocok untuk mesin diesel torsi tinggi dan mesin gas putaran tinggi. Beberapa pendorong utama untuk DCT termasuk:

- fleksibel dan tunabilitas perangkat lunak
- fleksibilitas rasio gigi sama seperti transmisi poros awam manual yang memungkinkan kompatibilitas yang lebih besar dengan karakteristik mesin apa pun.

4.5 TEKNOLOGI DCT KONVENSIONAL

Sebuah arsitektur DCT khas memiliki poros berbaring dengan sinkronisasi yang digunakan untuk efisiensi maksimum. Ini juga memiliki kopling peluncuran (baik basah atau kering) yang digunakan dengan elektronik, bersama dengan sistem aktuasi mekanis atau hidraulik untuk mencapai perpindahan otomatis. Transmisi poros awam menghasilkan efisiensi 96% atau lebih baik dibandingkan dengan efisiensi 85–87% dari transmisi otomatis. Gambar 4.11 menunjukkan diagram transmisi berbasis DCT. Ini adalah pengaturan khas yang ditemukan di banyak model kendaraan terbaru dengan DCT. Ini terdiri dari dua poros koaksial, masing-masing memiliki roda gigi ganjil dan genap. Itu sama saja dengan memiliki dua transmisi, oleh karena itu namanya.



Gambar 4.11 Transmisi kopling ganda. Perhatikan bahwa gigi mundur dihilangkan dalam diagram.

Dalam sistem DCT, kedua kopling dihubungkan ke dua set roda gigi yang terpisah. Gear set ganjil terhubung ke salah satu kopling dan gear set genap ke kopling lainnya. Hal ini

diperlukan untuk memilih roda gigi untuk menyadari manfaat dari sistem DCT. Dengan demikian, kopling yang bergerak dilepaskan pada saat yang sama dengan kopling yang datang. Ini memberikan suplai torsi yang tidak terputus ke driveline selama proses perpindahan gigi. Pemilihan roda gigi ini dapat diimplementasikan dengan menggunakan pengontrol yang rumit seperti logika fuzzy atau yang sederhana seperti pemilihan berdasarkan kecepatan kendaraan yang diantisipasi berikutnya.

4.6 JADWAL PERPINDAHAN GIGI

Awalnya, ketika kendaraan mulai, gigi N1i disinkronkan. Oleh karena itu, torsi mesin ditransmisikan ke final drive melalui gigi N1i dan N1m. Kecepatan kendaraan meningkat saat kopling ganjil bergerak. Ketika kecepatan kendaraan mencapai ambang batas tertentu, gigi N2i disinkronkan. Saat kopling genap bekerja (kopling ganjil terlepas), torsi mesin dipindahkan dari gigi N1i ke N2i. Oleh karena itu torsi mesin ditransmisikan melalui gigi N2i dan N2m. Saat kecepatan kendaraan meningkat, N3i disinkronkan. Kemudian kopling ganjil akan terhubung dan kopling genap akan terlepas. Proses ini akan terus berlanjut hingga kecepatan kendaraan menjadi stabil (dari N3i ke N4i, dari N4i ke N5i, dan dari N5i ke N6i)

Tabel 4.1 Perbandingan kualitatif transmisi otomatis dan manual.

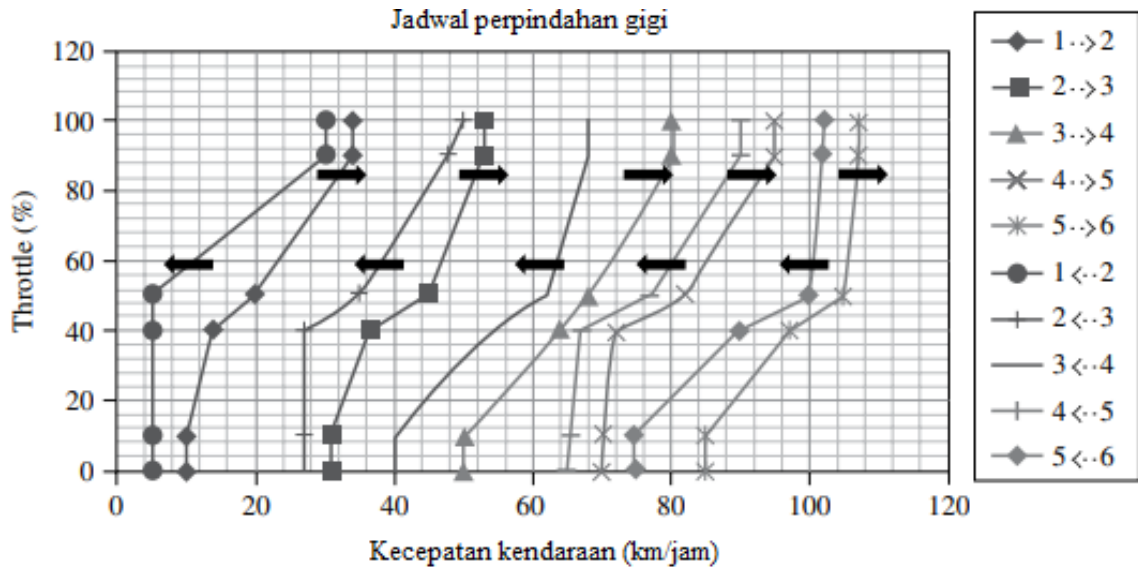
Aspek	Transmisi Otomatis	Transmisi Manual	Transmisi yang diinginkan
Biaya	Mahal	Rendah	Rendah
Efisiensi	Sedang	Tinggi	Tinggi
Mudah digunakan	Mudah	Keras	Mudah
Nyaman	Bagus	Miskin	Baik

Selama downshift, prosesnya terbalik. Sebagai contoh, asumsikan pada awalnya bahwa N4i disinkronkan dan kopling genap diaktifkan. Selama downshift, N3i disinkronkan sebelum kopling genap terbuka. Ketika kopling genap terlepas dan kopling ganjil bergerak, torsi mesin dipindahkan dari N4i ke N3i. Demikian pula, N2i akan disinkronkan sebelum kopling genap diaktifkan.

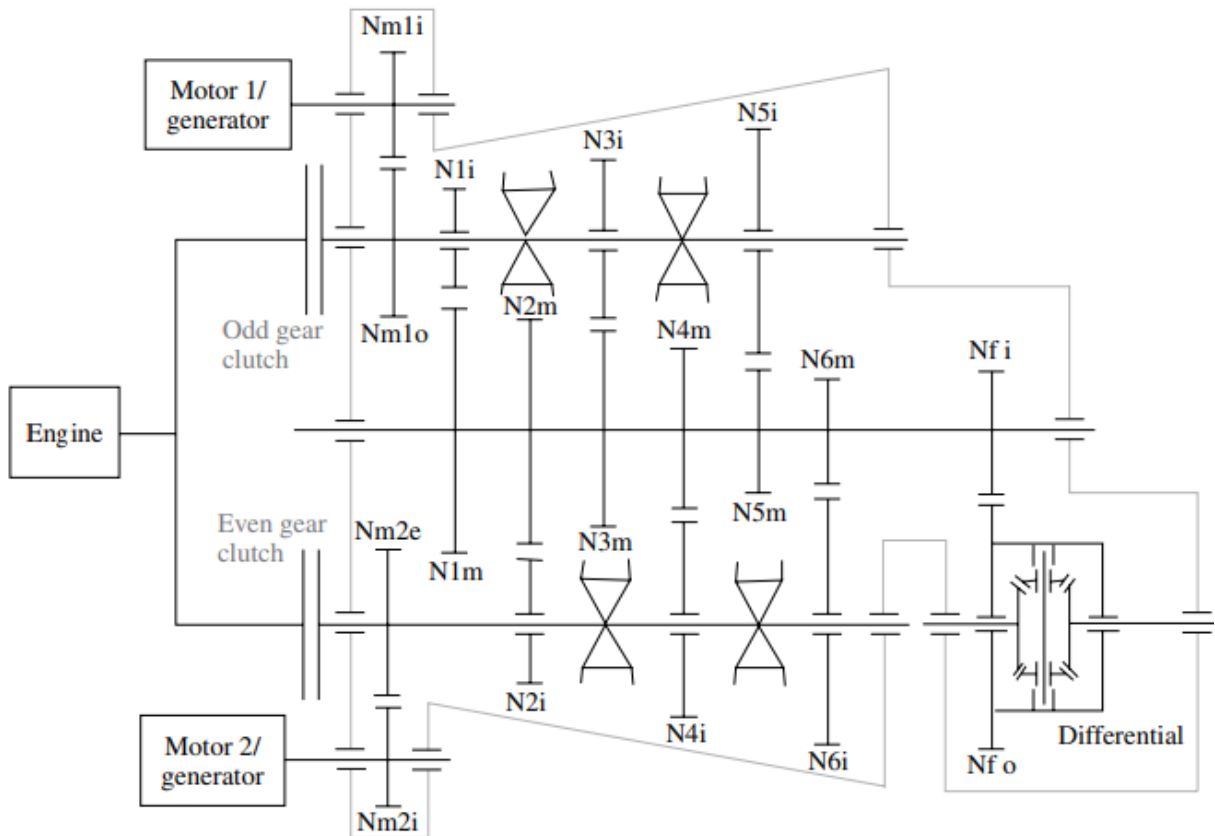
Karena semua transisi dalam DCT diatur oleh sinkronisasi gigi dan dua kopling, maka konverter torsi tidak diperlukan dalam DCT. Transisi (perpindahan gigi dan perpindahan torsi) sangat halus. Kontrol sinkronisasi dan kopling, atau pengontrol shift, terkomputerisasi di dalam kendaraan. Pengontrol perpindahan gigi memutuskan perpindahan gigi ke atas atau perpindahan gigi bawah transmisi sesuai dengan jadwal perpindahan gigi seperti yang ditunjukkan dari kiri ke kanan pada Gambar 4.12. Kontroler ini secara cerdas memilih gigi yang lebih tinggi atau lebih rendah tergantung pada kecepatan kendaraan saat ini dan yang diinginkan.

4.7 POWERTRAIN HIBRIDA BERBASIS DCT

Diagram untuk powertrain hybrid berbasis DCT ditunjukkan pada Gambar 4.13. Transmisinya adalah AMT enam kecepatan. Powertrain hybrid terdiri dari dua motor dengan masing-masing digabungkan secara mekanis ke dua poros menggunakan reduksi gigi standar. Karena adanya motor/generator, kendaraan dapat mundur tanpa gigi mundur. Poros ganjil menampung roda gigi 1, 3, dan 5, dan poros genap menampung roda gigi 2, 4, dan 6. Kedua motor juga dapat dioperasikan sebagai generator sesuai kebutuhan oleh strategi kendali hibrida.



Gambar 4.12 Jadwal perpindahan gigi



Gambar 4.13 Powertrain hybrid berdasarkan transmisi dual-clutch. Gigi mundur tidak diperlukan karena motor dapat digunakan untuk memundurkan kendaraan

Pengoperasian Powertrain Hibrida Berbasis DCT

Powertrain hybrid berbasis DCT yang ditunjukkan pada Gambar 4.13 memiliki tujuh mode operasi saat kendaraan bergerak dan satu mode operasi tambahan untuk pengisian daya saat berhenti.

Motor-Alone Mode

Kendaraan selalu diluncurkan dalam mode motor saja kecuali status pengisian baterai (SOC) di bawah level minimum. Dalam mode ini, roda gigi dipilih sesuai dengan pengontrol logika shift. Kendaraan beroperasi dalam mode ini hingga kecepatan maksimum yang

ditentukan oleh pengontrol, asalkan SOC lebih besar dari SOC minimum untuk baterai sesuai dengan desain sistem. Karena mesin tidak beroperasi dalam mode ini, kopling ganda dilepaskan untuk mencegah serangan balik ke mesin. Motor mana pun dapat digunakan untuk peluncuran dan cadangan kendaraan. Persamaan untuk mode ini adalah

Persamaan 4.39

$$\omega_0 = \frac{\omega_m}{i_g i_a i_m}$$

Persamaan 4.40

$$T_0 = i_a i_g i_m x T_m$$

Combined Mode

Mode ini dipilih saat torsi tinggi diperlukan untuk situasi seperti akselerasi mendadak atau mendaki tanjakan. Mode ini juga dipilih jika kecepatan kendaraan menjadi lebih dari kecepatan maksimum yang ditentukan oleh pengontrol dalam mode motor saja. Baik mesin maupun motor memberikan tenaga penggerak ke poros penggerak. Tergantung pada kecepatan kendaraan, pengontrol perpindahan transmisi memilih kopling dan gigi yang sesuai. Aliran daya ditunjukkan pada Gambar 4.14. Persamaan untuk mode ini adalah:

Persamaan 4.41

$$\omega_0 = \frac{\omega_m}{i_g i_a i_m} = \frac{\omega_e}{i_g i_a}$$

Persamaan 4.42

$$T_0 = i_g i_a i_m T_m + i_g i_a T_e$$

Engine-Along Mode

Mode ini melibatkan mesin sebagai satu-satunya sumber penggerak. Kontroler engine memastikan bahwa engine mentransmisikan daya ke rasio roda gigi serendah mungkin sehingga engine tetap berada di jendela efisiensi terbaik. Persamaan untuk mode ini adalah

Persamaan 4.43

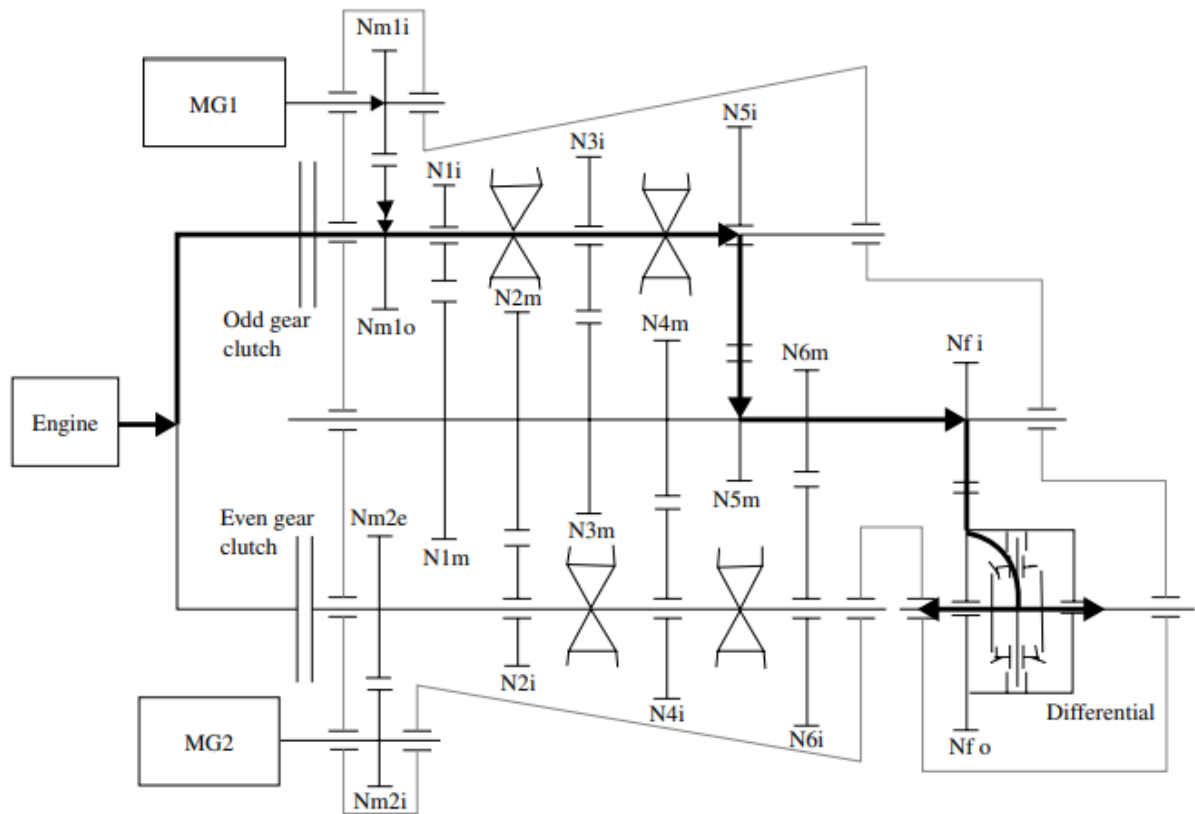
$$\omega_0 = \frac{\omega_e}{i_g i_a}$$

Persamaan 4.44

$$T_0 = i_a i_g x T_e$$

Mode Pengereman Regeneratif

Motor digabungkan ke poros output melalui roda gigi, dan dapat berfungsi sebagai generator juga. Ini digunakan untuk memulihkan energi selama pengereman untuk mengisi baterai. Tergantung pada kopling saat ini yang digunakan, pengontrol memutuskan motor mana yang akan dioperasikan dalam mode ini. Jika torsi motor tidak cukup untuk mengerem kendaraan, sistem pengereman konvensional digunakan untuk melengkapi kebutuhan pengereman.



Gambar 4.14 Aliran daya dalam combine mode.

Persamaan untuk mode ini adalah:

Persamaan 4.45

$$\omega_m = \frac{\omega_m}{i_m i_g i_a}$$

Persamaan 4.46

$$T_{in} = -i_m i_a i_g \times T_m$$

Power-Split Mode

Mode ini digunakan untuk mengisi baterai saat kendaraan sedang bergerak. Pengendali kendaraan memutuskan mode ini jika mesin memasok daya lebih dari yang dibutuhkan untuk menggerakkan kendaraan. Kelebihan daya tersebut kemudian digunakan untuk mengisi baterai. Motor pada poros yang sama yang menggerakkan poros output dipilih untuk bertindak sebagai generator untuk mengisi baterai. Kontroler motor memilih motor yang benar tergantung pada poros yang mentransmisikan daya ke final drive. Persamaan untuk mode ini adalah:

Persamaan 4.45

$$\omega_0 = \frac{\omega_m}{i_a i_m i_g} = \frac{\omega_e}{i_a i_g}$$

Persamaan 4.46

$$T_0 = i_a i_g T_e - T_m$$

Standstill Charge Mode

Mode ini dapat digunakan untuk menghidupkan mesin atau mengisi baterai saat kendaraan dalam posisi diam. Pengontrol memilih mode ini ketika SOC baterai lebih rendah dari level SOC minimum yang diizinkan oleh desain. Ini adalah satu-satunya mode operasi ketika mesin dihidupkan dan kendaraan dalam posisi diam. Karena kendaraan tidak bergerak dan tidak ada daya yang ditransmisikan ke drive train, semua roda gigi dilepas untuk keselamatan. Persamaan kinematik untuk mode ini adalah:

Persamaan 4.49

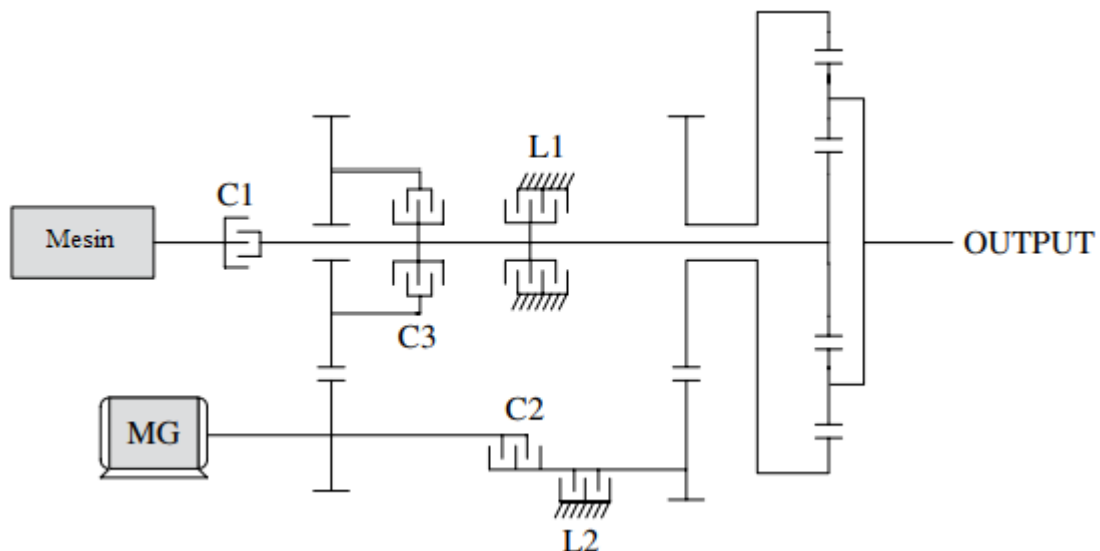
$$\omega_0 = 0$$

Persamaan 4.50

$$T_e = T_m i_m$$

Persamaan 4.51

$$\omega_e = \frac{\omega}{i_m}$$



Gambar 4.22 Sebuah transmisi hybrid diusulkan. Sumber: Ehsani 2009.

Series Hybrid Mode

Mode ini menawarkan opsi yang sangat menarik untuk powertrain hybrid berbasis DCT. Mesin dioperasikan di daerah dekat sweet spot (dengan mengubah rasio gigi secara adaptif) sehingga torsi yang dihasilkan dari mesin digunakan oleh salah satu motor untuk menghasilkan listrik. Listrik ini kemudian digunakan oleh motor lain di poros lain untuk menggerakkan kendaraan. Oleh karena itu, ini memberikan opsi untuk memiliki powertrain hybrid berbasis DCT yang beroperasi sebagai hybrid seri. Persamaan kinematik untuk mode ini adalah:

Persamaan 4.52

$$\omega_0 = \frac{\omega_m}{i_a i_m i_g}$$

Persamaan 4.53

$$T_0 = T_m i_m i_g i_a$$

4.8 TRANSMISI HYBRID DENGAN MEKANISME KOPLING KECEPATAN DAN TORSI

Konfigurasi hibrida yang diusulkan oleh Ehsani et al. menggunakan satu motor listrik, tiga kopleng, dan dua kunci untuk mencapai fungsi kopleng kecepatan dan kopleng torsi (Gambar 4.22)

- **Mode 0:** Peluncuran dan pencadangan kendaraan (mode motor sendiri), dan pengereman regeneratif. C1 terbuka, C2 tertutup, C3 terbuka, L1 tertutup, dan L2 terbuka. Hanya torsi motor yang ditransmisikan ke final drive. Sun gear dari planetary gear terkunci. Hubungan torsi/kecepatan adalah:

Persamaan 4.86

$$\omega_{out} = \frac{N_r}{N_s + N_r} \omega_m$$

Persamaan 4.87

$$T_{out} = \frac{N_s + N_r}{N_r} T_m$$

- **Mode 1:** Mode engine alone. C1 tertutup, C2 terbuka, C3 terbuka, L1 terbuka, L2 tertutup. Dalam mode ini, motor mati – hanya mesin yang mentransfer torsi ke final drive. Roda gigi cincin terkunci. Hubungan torsi/kecepatan adalah:

Persamaan 4.88

$$\omega_{out} = \frac{N_s}{N_s + N_r} \omega_e$$

Persamaan 4.89

$$T_{out} = \frac{N_s + N_r}{N_s} T_e$$

- **Mode 2:** Mode kecepatan rendah. C1 tertutup, C2 terbuka, C3 tertutup, L1 terbuka, L2 tertutup. Dalam mode ini, torsi mesin dan torsi motor ditambahkan untuk memberikan torsi drivetrain maksimum untuk kebutuhan akselerasi. Roda gigi cincin dikunci dan torsi motor ditambahkan ke poros mesin. Hubungan torsi/kecepatan adalah:

Persamaan 4.90

$$\omega_{out} = \frac{N_s}{N_s + N_r} \omega_e$$

Persamaan 4.91

$$\omega_m = \frac{N_1}{N_2} \omega_e$$

Persamaan 4.92

$$T_{out} = \frac{N_s + N_r}{N_s} \left(T_e + \frac{N_1}{N_2} T_m \right)$$

- **Mode 3:** Gabungan dan mode split daya (CVT). C1 tertutup, C2 tertutup, C3 terbuka, L1 terbuka, L2 terbuka. Dalam mode ini, motor dan output mesin digabungkan ke

planetary gear pada sun gear dan ring gear, masing-masing. Hubungan output dan masukannya adalah:

Persamaan 4.93

$$\omega_{out} = \frac{N_s}{N_s + N_r} \omega_e + \frac{N_r}{N_s + N_r} \omega_m$$

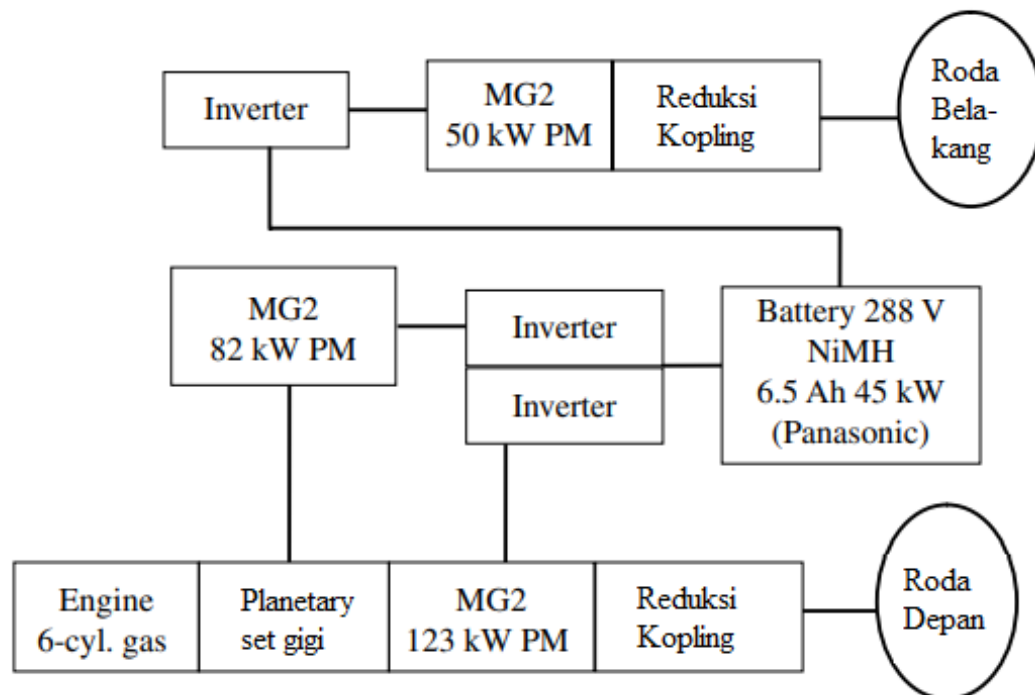
Persamaan 4.94

$$T_{out} = \frac{N_s + N_r}{N_s} T_e = \frac{N_s + N_r}{N_r} T_m$$

Kendaraan bisa berjalan antara Mode 2 dan Mode 3 selama jelajah jalan raya. Transisi mode pada transmisi ini rumit. Untuk mengurangi gangguan mekanis, kunci harus diaktifkan pada kecepatan nol dan kopling harus diaktifkan ketika kedua sisi roda gigi memiliki kecepatan yang sama.

Toyota Highlander dan Lexus Hybrid, E-Four-Wheel Drive

Kendaraan hibrida Toyota Highlander dan Lexus memiliki penggerak empat roda listrik, atau e-four, dengan roda depan digerakkan oleh powertrain hibrida berbasis roda gigi planetary, dan roda belakang digerakkan oleh motor listrik. Skema umum ditunjukkan pada Gambar 4.23.

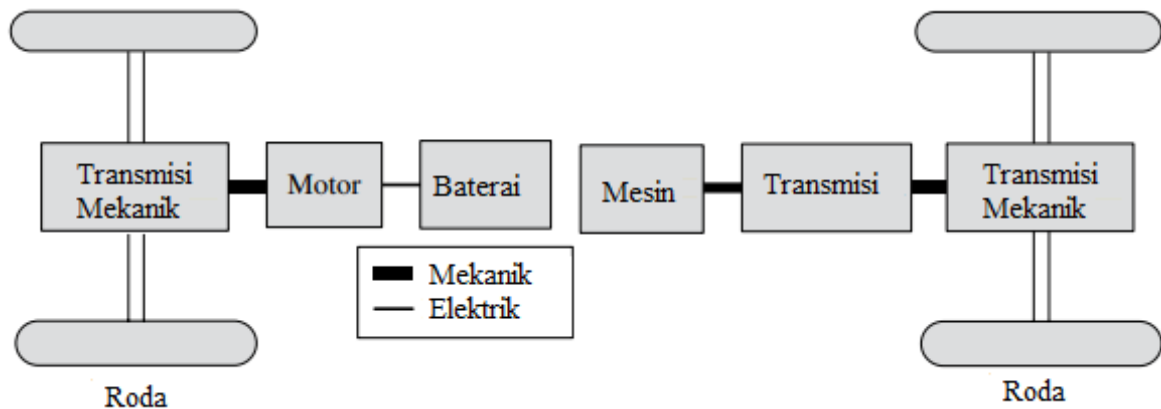


Gambar 4.23 Skema sistem hybrid penggerak empat roda listrik

Dalam skema ini, mesin terhubung ke pembawa set roda gigi planet, generator terhubung ke roda gigi matahari, dan roda gigi cincin terhubung ke penggerak akhir gandar depan. Total torsi powertrain yang tersedia selama kondisi mengemudi apa pun adalah:

Persamaan 4.95

$$T_{out} = \frac{N_r}{N_s + N_r} T_e + \frac{N_1}{N_2} T_{m1} + \frac{N_3}{N_4} T_{m2}$$



Gambar 4.24 Powertrain hybrid dengan gandar penggerak terpisah.

Torsi generator menggunakan persamaan dibawah ini:

Persamaan 4.96

$$T_g = \frac{N_s}{N_s + N_r} T_e$$

Ketika mengabaikan kerugiannya, hubungan powernya adalah:

Persamaan 4.97

$$P_{out} = P_{m1} + P_{m2} + P_r$$

Persamaan 4.98

$$P_e = P_r + P_g$$

Persamaan 4.99

$$P_{m1} + P_{m2} = P_g + P_B$$

Versi sederhana dari e-four ditunjukkan pada Gambar 4.24, dengan tujuan mengurangi biaya sistem secara keseluruhan (http://reviews.cnet.com/suv/2006-toyota-highlander-hybrid/1707-10868_7-31352761.html). Dibandingkan dengan konfigurasi di atas, konfigurasi ini memiliki keunggulan biaya yang signifikan dan mudah dibuat dan dibuat, karena tidak melibatkan modifikasi apa pun pada desain gandar depan. Namun, desain ini tidak memungkinkan fleksibilitas kontrol kecepatan engine. Selain itu, sistem ini tidak terlalu efisien selama operasi mode power split, karena tenaga mesin perlu ditransfer melalui bodi kendaraan ke gandar belakang dan kemudian ke motor listrik. Torsi total powertrain menggunakan persamaan dibawah ini:

Persamaan 4.100

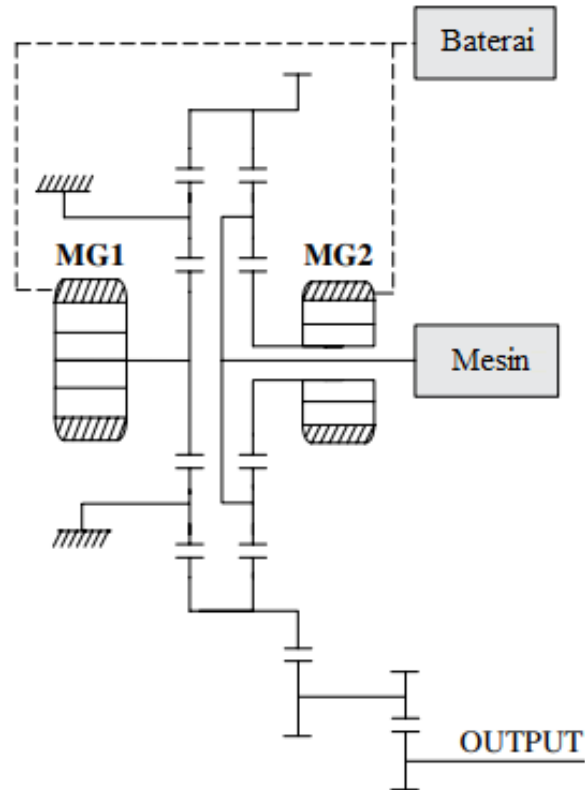
$$T_{out} = k_e T_e + k_m T_m$$

dimana k_e dan k_m masing-masing adalah rasio roda gigi dari transmisi mesin dan transmisi motor.

4.9 CAMRY HIBRIDA

Pada Camry hybrid (Gambar 4.25), ada dua set roda gigi planetary. Engine, generator, dan planetary gear set 1 dikonfigurasi dengan cara yang sama seperti pada Prius, yaitu engine

digabungkan ke carrier, dan generator digabungkan ke sun gear. Namun, ring gear terhubung ke counter gear, yang juga terhubung ke ring gear planetary gear pengurang kecepatan motor. Motor terhubung ke sun gear dari planetary gear set 2, dan carrier dari planetary gear set 2 di-ground. Gear multifungsi menghubungkan counter gear dan final drive.



Gambar 4.25 Transmisi hybrid Toyota Camry

Kecepatan ring gear dapat dihitung dari kecepatan kendaraan:

Persamaan 4.101:

$$\omega_r = \frac{N_2 N_4}{N_1 N_3} i_{fd} V$$

Mesin dan genset memuaskan (persamaan 4.102):

$$\omega_e = \frac{N_{r1}}{N_{r1} + N_{s1}} \omega_r + \frac{N_{s1}}{N_{r1} + N_{s1}} \omega_g$$

Motor dan ring gear memuaskan (persamaan 4.103):

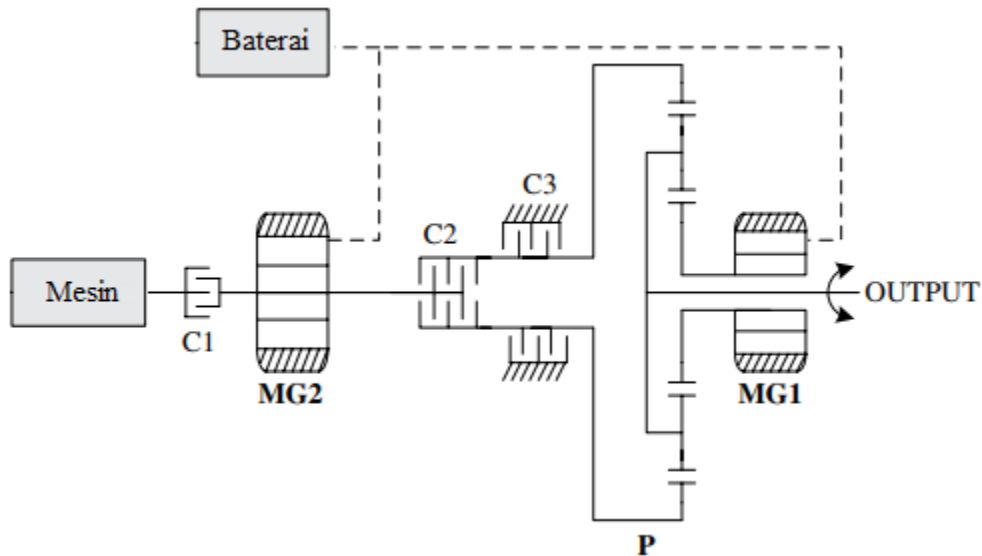
$$\omega_r = \frac{-N_{s2}}{N_{r2}} \omega_m$$

Torsi pada final drive adalah (persamaan 4.104):

$$T_{out} = \left(\frac{N_{r2}}{N_{s2}} T_m + \frac{N_{r1}}{N_{r1} + N_{s1}} T_e \right) \frac{N_2 N_4}{N_1 N_3} i_{fd}$$

Powertrain Chevy Volt

Chevy Volt dari GM (Gambar 4.26) telah digambarkan sebagai kendaraan listrik jarak jauh/EREV (*Extended Range Electric Vehicle*). Konfigurasi powertrain yang tepat belum dipublikasikan. Namun, sejumlah sumber telah menyarankan bahwa Volt menggunakan dua motor listrik dan satu set gigi planet, bersama dengan mesin dan tiga kopleng. Volt dilengkapi dengan paket baterai lithium-ion 16 kWh, motor induksi 125 kW, dan mesin empat silinder 1,4 liter. Jarak mengemudi awal 5–50 mil (40–80 km) dapat dicapai dengan menggunakan energi dari baterai onboard, dan jarak mengemudi tambahan dapat dicapai dengan menggunakan bensin.



Gambar 4.26 Transmisi Chevy Volt

Dalam transmisi Volt, MG1 adalah motor penggerak utama, yang terhubung ke roda gigi matahari sistem planet. Gear ring dapat diarde melalui kopleng C3, atau dihubungkan ke MG2 dengan mengaktifkan kopleng C2. Operator terhubung ke final drive. Mesin dapat dihubungkan ke MG2 melalui kopleng C1. MG1 dapat dihubungkan baik ke mesin untuk menjadi generator melalui C1, atau ke ring gear untuk menjadi motor melalui C2.

Cara kerja sistem tersebut dapat digambarkan sebagai berikut:

- **Mode 1:** Mode mengemudi motor tunggal. Dalam mode ini, MG1 menggerakkan sun gear dengan ring gear dikunci oleh C3. Torsi motor ditransmisikan melalui pembawa ke final drive. Mesin dan MG2 dalam keadaan idle. Semua tenaga penggerak disediakan oleh baterai. Mode ini cocok untuk peluncuran, cadangan, mengemudi kecepatan rendah, dan jelajah. Persamaannya adalah:

Persamaan 4.105

$$T_{out} = \frac{N_s}{N_s + N_r} T_{MG1}$$

- **Mode 2:** Mode mengemudi motor ganda. Dalam mode ini, MG2 terhubung ke ring gear melalui C2, dengan C3 dilepaskan. Mesin idle dengan C1 terbuka. Kedua motor menerima daya dari baterai untuk menggerakkan carrier, yang memberikan torsi ke final drive. Persamaannya adalah:

Persamaan 4.106

$$\omega_{out} = \frac{N_s}{N_s + N_r} \omega_{MG1} + \frac{N_r}{N_s + N_r} \omega_{MG2}$$

Persamaan 4.107

$$T_{out} = \frac{N_s}{N_s + N_r} T_{MG1} = \frac{N_r}{N_s + N_r} T_{MG2}$$

Karena kecepatan kedua motor ditambahkan, ini dapat mencapai kecepatan jelajah yang tinggi untuk kendaraan. Oleh karena itu, penulis percaya bahwa mode ini digunakan untuk jelajah jalan raya dengan battery only

- **Mode 3:** Jangkauan mengemudi yang diperluas. Dalam mode ini, C1 diaktifkan, sehingga mesin menggerakkan MG2 yang sekarang menjadi generator. C2 terbuka dan C3 diaktifkan untuk mengunci ring gear. Listrik yang dihasilkan oleh MG2 dikirim ke MG1 melalui power inverter. Hanya MG1 yang mengemudikan final drive. Oleh karena itu, ekspresi torsi output sama seperti pada Mode 1:

Persamaan 4.108

$$T_{out} = \frac{N_s}{N_s + N_r} T_{MG1} \quad \text{dan} \quad T_{MG2} = kT_e$$

di mana k adalah rasio roda gigi antara mesin dan MG2.

- **Mode 4:** Dengan mesin dihidupkan dan C1 diaktifkan, C2 juga diaktifkan (tetapi C3 terbuka). Sekarang, sebagian dari torsi mesin dapat ditransmisikan ke ring gear untuk menggerakkan carrier, yang menyalurkan torsi gabungan engine dan MG1 ke final drive. Porsi lain dari torsi mesin masih digunakan untuk menggerakkan MG2 untuk menghasilkan listrik. Mode ini cocok untuk kecepatan tinggi dan akselerasi berat. Dengan demikian,

Persamaan 4.109

$$T_{MG1} = T_{MG2} + T_r$$

Persamaan 4.110

$$\omega_{out} = \frac{N_s}{N_s + N_r} \omega_{MG1} + \frac{N_r}{N_s + N_r} \omega_{MG2}$$

- **Mode pengereman regeneratif:** Penggunaan kopling sama seperti pada Mode 1. Satu-satunya perbedaan adalah roda sekarang menggerakkan MG1 untuk menghasilkan listrik dan pada saat yang sama menghasilkan torsi pengereman yang diperlukan untuk memperlambat kendaraan.

Roda Gigi Non-Ideal di Sistem Planet

Pada bagian sebelumnya, hubungan torsi/kecepatan diberikan dengan asumsi bahwa kerugian transmisi/roda gigi diabaikan, dan gerak kinetik juga diabaikan. Ketika kehilangan roda gigi dipertimbangkan, persamaan torsi dari roda gigi planetary yang diatur dalam keadaan tunak dapat dinyatakan sebagai:

Persamaan 4.111

$$T_r + \xi_r \omega_r = \frac{N_r}{N_r + N_s} (T_c - \xi_c \omega_c)$$

Persamaan 4.112

$$T_s + \xi_s \omega_s = \frac{N_s}{N_r + N_s} (T_c - \xi_c \omega_c)$$

di mana ξ_c , ξ_r , dan ξ_s masing-masing mewakili koefisien rugi gesek dari carrier, ring gear, dan sun gear. m – motor, r – ring gear, s – sun gear, c – carrier, g – generator, e – engine. ζ_m adalah gigi output motor. Ketika kehilangan gigi dipertimbangkan, hubungan torsi dari transmisi Prius adalah:

Persamaan 4.113

$$T_r = \xi_r \omega_r = \frac{N_r}{N_r + N_s} (T_e - \xi_c \omega_c)$$

Persamaan 4.114

$$T_g + \xi_s \omega_s = \frac{N_s}{N_r + N_s} (T_m - \xi_c \omega_c)$$

Persamaan 4.115

$$T_o = T_r + \frac{N_{m1}}{N_{m2}} (T_m - \xi_m \omega_m)$$

di mana ξ adalah koefisien gesekan masing-masing roda gigi, dan subskrip m mewakili motor, r , ring gear, s , sun gear, c , carrier, g , generator, e , engine. ξ_m adalah koefisien gesekan dari roda gigi output motor.

4.10 DINAMIKA TRANSMISI

Ketika dinamika transmisi dipertimbangkan, juga akan ada transien dalam transmisi. Untuk setiap sistem rotasi tertentu, dinamika rotasi dapat ditulis sebagai:

Persamaan 4.116

$$T_{in} = T_{out} + J \frac{d\omega}{dt}$$

Berikut ini, dinamika transmisi hibrida berbasis planetary gear Toyota Prius dianalisis lebih lanjut. Analisis sistem lain harus sangat mirip. Inersia poros penggerak akhir dan gandar dipindahkan ke poros output transmisi:

Persamaan 4.117

$$J_{fd} = \frac{1}{G_a^2} J_a + J_{fd_sh}$$

di mana subskripnya adalah: a, gandar, dan sh, poros penggerak akhir. G_a adalah rasio gigi penggerak akhir. Final drive dan ring gear digabungkan langsung ke poros motor. Oleh karena itu, pada poros motor, inersia total adalah:

Persamaan 4.118

$$J_{ma} = J_m + J_r + J_{fd}$$

Sun gear dikopel dengan generator. Oleh karena itu, total inersia poros generator adalah

Persamaan 4.119

$$J_{gq} = (J_s + J_g)$$

Inersia poros mesin adalah total poros engkol mesin dan pembawa

Persamaan 4.120

$$J_e = J_{crank} + J_c$$

di mana J_{crank} adalah inersia poros engkol. Dari generator ke operator,

Persamaan 4.121

$$J_{gc} = \frac{(N_r + N_s)N_r}{N_s^2} (J_g + J_s)$$

Inersia poros generator dapat ditransfer ke poros motor dan poros mesin. Inersia ekuivalen dari poros mesin dan poros motor adalah:

Persamaan 4.122

$$J_{eq} = J_e + \frac{(N_r + N_a)^2}{N_s^2} J_{gq}$$

persamaan 4.123

$$J_{mq} = J_{ma} + \frac{N_r^2}{N_s^2} J_{gq}$$

Pada poros generator, persamaan 4.124:

$$T_g = \frac{N_s}{N_s + N_r} (T_e - \xi_c \omega_c - J_{eq} \omega_e - J_{gc} \omega_m) - \xi_s \omega_s$$

Pada poros keluaran, persamaan 4.125:

$$T_o = T_m - \xi_m \omega_m + \frac{N_r}{N_r + N_s} (T_e - \xi_c \omega_c) - \left(\frac{N_r}{N_r + N_s} J_{eq} J_{gc} \right) \omega_e - \left(\frac{N_r}{N_r + N_s} J_{gc} + J_{mq} \right) \omega_m$$

Torsi ini akan menggerakkan final drive shaft pada kecepatan tertentu. Karena slip roda, $\lambda = (\omega_r - V)/V$, terdapat gaya traksi $F_{fd} = mg \mu(\lambda)$, di mana $\mu(\lambda)$ adalah koefisien traksi. Gaya traksi ini untuk mengatasi gaya resistif kendaraan selama mengemudi (persamaan 4.126):

$$F_{fd} = mg \mu(\lambda) = mg \sin \alpha + \frac{1}{2} C_D A_F \rho V^2 + mg(C_0 + C_1 V^2) + m \frac{dV}{dt}$$

Perlu dicatat bahwa sebagian besar HEV berbasis planetary gear, termasuk hibrida dua mode Toyota, Ford, dan GM, tidak menyertakan starter khusus terpisah untuk mesin. Mesin dihidupkan oleh salah satu motor/generator pada kondisi yang sesuai. Karena mesin biasanya hidup pada saat penggerak membutuhkan tenaga yang lebih besar, seperti pada saat akselerasi, biasanya akan terjadi “brengsek” atau “cegukan” karena sebagian torsi motor dialihkan untuk menghidupkan mesin. Baterai memiliki kemampuan daya yang terbatas. Masalah lain yang dialami banyak pengemudi adalah lemahnya aki 14 V yang digunakan untuk

mensuplai tenaga ke tenaga bantu kendaraan, seperti untuk wiper, lampu depan, sistem hiburan, power steering, dan kompresor hidrolik.

Penulis merasa bahwa jika starter-alternator ditambahkan, "denyut" selama akselerasi dapat dihilangkan, karena mesin dapat dihidupkan dengan baterai onboard 14 V. Selain itu, starter ini juga dapat digunakan untuk mengisi baterai 14 V saat mesin hidup, yang juga dapat meringankan beban baterai 14 V. Dalam kasus sistem hibrida Toyota dan Ford, kopling tambahan antara mesin dan sistem roda planetary gear dapat membantu memperlancar akselerasi. Kontrol powertrain ini rumit. Seringkali algoritma kontrol lanjutan diperlukan untuk mengelola sistem. Logika fuzzy, pemrograman dinamis, dan bentuk gelombang trans sangat populer dalam manajemen daya kendaraan hibrida yang kompleks

BAB 5

KENDARAAN LISTRIK HIBRIDA PLUG-IN

5.1 PENGANTAR PHEV

Kendaraan listrik hibrida plug-in (PHEV) memiliki potensi untuk menggantikan konsumsi bahan bakar transportasi dengan menggunakan jaringan listrik untuk menggerakkan mobil. PHEV awalnya dapat digerakkan menggunakan energi listrik yang disimpan dalam baterai onboard, dan mesin bensin onboard kemudian dapat memperluas jangkauan mengemudi. Pada 1990-an dan awal 2000-an, mobil listrik murni tidak berhasil, dan salah satu alasan utamanya adalah terbatasnya jarak tempuh yang tersedia saat itu. Misalnya, kendaraan listrik/EV (*Electric Vehicle*) GM memiliki jangkauan sekitar 100 mil (160 km) dan truk listrik Ford Ranger memiliki jangkauan sekitar 60 mil (96 km).

5.2 PHEV DAN EREV

PHEV kadang-kadang disebut kendaraan listrik jarak jauh (ReEV) atau kendaraan listrik jarak jauh (EREV) dalam arti bahwa kendaraan ini selalu memiliki bensin atau diesel onboard yang dapat digunakan untuk mengemudikan kendaraan untuk jarak jauh ketika daya baterai onboard habis. Selain itu, kendaraan ini dapat memberikan penghematan bahan bakar yang tinggi selama rentang mengemudi yang diperpanjang karena paket baterai besar yang dapat menerima lebih banyak energi pengereman regeneratif dan memberikan lebih banyak fleksibilitas untuk optimalisasi mesin selama rentang mengemudi yang diperpanjang.

Namun, EREV, seperti GM Chevy Volt, harus dilengkapi dengan motor listrik berukuran penuh sehingga penggerak listrik murni dapat diwujudkan untuk semua jenis kondisi mengemudi. Ditunjukkan bahwa, untuk beberapa kondisi mengemudi, penggerak semua-listrik terkadang tidak memberikan manfaat maksimal, mengingat energi baterai yang tersedia terbatas. Misalnya, motor powertrain dari PHEV diberi nilai 125 kW, dan paket baterai memiliki kapasitas 16 kWh. Ini berarti bahwa pada daya powertrain penuh, baterai perlu memasok daya delapan kali lipat dari kapasitas nominalnya, atau 8 C. Tidak hanya kebutuhan daya yang tinggi ini sulit dicapai, tetapi juga mengakibatkan kerugian besar yang tak terhindarkan di dalam kemasan baterai, yang membuat sistem penggerak sangat tidak efisien.

Contoh 5.1 Paket baterai lithium-ion 400 V, 16 kWh memiliki impedansi internal sekitar 0,5Ω. Motor dan inverter memiliki efisiensi gabungan 90% dan output terukur 125 kW. Arus pengenal adalah 347 A pada sisi DC inverter. Pada arus ini, baterai akan turun 174 V secara internal. Dengan kata lain, tegangan terminal baterai hanya akan menjadi 226 V pada 347 A. Ini akan menghasilkan daya output baterai sebesar 78 kW, bukan 125 kW penuh, dan kerugian di dalam baterai sebesar 60,8 kW.

5.3 PHEV CAMPURAN

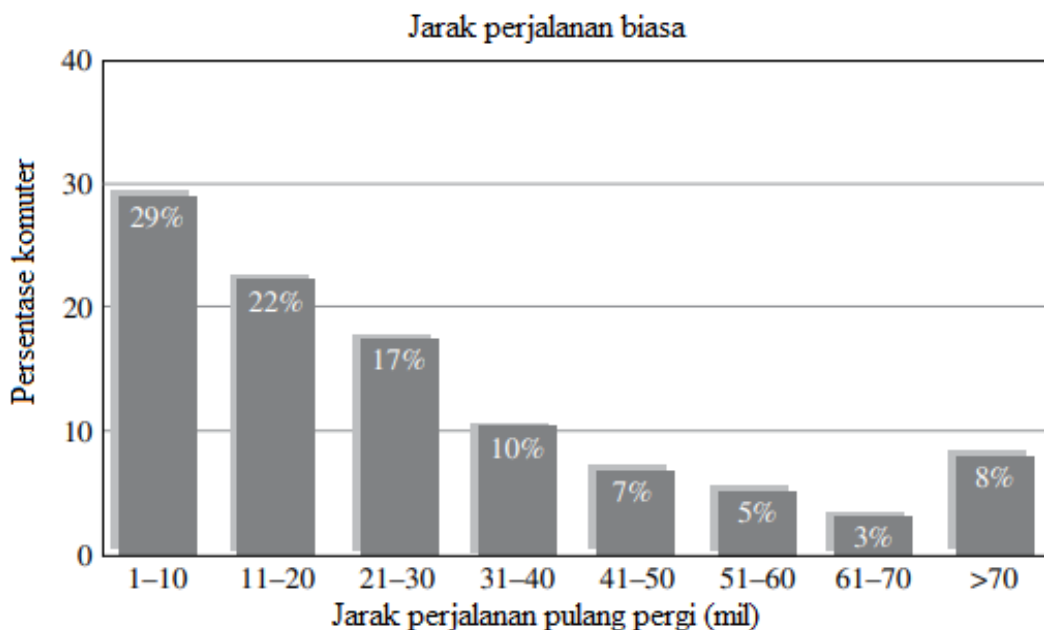
PHEV campuran menjadi lebih populer karena biaya sistem yang lebih rendah (motor listrik yang lebih kecil, baterai yang lebih kecil, dan peringkat daya baterai yang lebih rendah), serta fleksibilitas dalam mengoptimalkan penghematan bahan bakar untuk kondisi berkendara yang berbeda. Dibandingkan dengan EREV, PHEV campuran biasanya menggunakan konfigurasi paralel atau kompleks, di mana mesin dan motor dapat menggerakkan roda secara langsung. Karena mesin tersedia untuk penggerak pada permintaan daya tinggi, ukuran motor listrik dan kebutuhan daya untuk paket baterai bisa jauh lebih kecil daripada EREV. Oleh karena itu, biaya kendaraan berkurang.

Kendaraan hibrida berbasis roda gigi planet, seperti pada Toyota Prius dan hibrida dua mode GM, dapat dianggap sebagai konfigurasi paralel karena motor listrik (disebut sebagai

MG2 dalam Bab 4) paralel dengan output mesin, sedangkan generator (disebut sebagai MG1 dalam Bab 4) digunakan untuk mewujudkan transmisi variabel kontinu (CVT) dan untuk mengoptimalkan operasi mesin.

Mengapa PHEV?

Sebuah survei menunjukkan bahwa 78% masyarakat berkendara rata-rata 40 mil (64 km) atau kurang dalam perjalanan harian mereka. Gambar 5.1 menunjukkan distribusi jarak tempuh harian versus persentase populasi. Berdasarkan survei ini, PHEV dengan jangkauan listrik 40 mil (atau PHEV40) akan memenuhi kebutuhan berkendara harian 78% populasi saat mengemudi dengan listrik dalam perjalanan sehari-hari mereka. Selain itu, orang yang memiliki PHEV jangkauan listrik 40 mil tetapi mengemudi kurang dari 40 mil setiap hari tidak perlu mengisi bahan bakar bensin jika mereka mengisi daya mobil mereka di malam hari setiap hari.



Gambar 5.1 Jarak komuter harian versus populasi. Sumber: Sanna 2005. Direproduksi dengan izin EPRI.

Data dari Biro Transportasi menunjukkan bahwa 78% komuter melakukan perjalanan sejauh 40 mil atau kurang setiap hari – kisaran PHEV hanya baterai yang diharapkan dengan pengisian rutin semalaman. Untuk jarak yang lebih jauh, kendaraan dapat berjalan tanpa henti dalam mode hybrid (bensin/listrik).

PHEV dapat menghasilkan manfaat lingkungan dan ekonomi yang signifikan bagi masyarakat. Keuntungan PHEV dapat dievaluasi dengan seberapa banyak bahan bakar yang dipindahkan, serta seberapa banyak polusi, termasuk emisi gas rumah kaca (GRK), dapat dikurangi. Tujuan utama untuk mengembangkan PHEVs dapat diringkas sebagai berikut:

1. **Pergeseran konsumsi bahan bakar fosil di sektor transportasi:** Karena pemilik PHEV tidak perlu mengisi bahan bakar bensin atau membutuhkan lebih sedikit bensin, sejumlah besar bahan bakar fosil dapat dihemat. Ini akan memiliki dampak jangka panjang pada ekonomi, lingkungan, dan arena politik.
2. **Pengurangan emisi:** Karena pengurangan penggunaan bensin, sejumlah besar emisi dapat dikurangi karena penyebaran besar PHEV. Pembangkit listrik terpusat jauh lebih efisien dan menghasilkan emisi yang jauh lebih sedikit daripada mobil bertenaga bensin. Mitigasi emisi dari perkotaan (dengan mobil) ke daerah terpencil (di pembangkit listrik) di mana listrik dihasilkan juga dapat mengurangi polusi berat di

daerah metropolitan padat penduduk. Karena semakin banyak listrik di masa depan akan datang dari sumber energi terbarukan (yang akan digunakan oleh PHEV), emisi dapat dikurangi lebih lanjut.

3. **Penghematan biaya energi:** PHEV menggunakan listrik untuk jarak tempuh awal. Karena listrik lebih murah daripada bensin berdasarkan kandungan energi yang setara, biaya per 1,6km yang digerakkan dengan listrik lebih murah daripada bensin. Saat ini, biaya bensin sekitar 3 per galon, sementara biaya listrik 0,12 per kWh. Untuk mobil berukuran sedang, satu galon bensin dapat menggerakkan mobil sejauh sekitar 48 km, sedangkan satu kilowatt jam listrik dapat mengendarainya sejauh 8 km. Ini berarti akan menghabiskan biaya sekitar 0,72 (atau 6 kWh listrik) untuk berkendara sejauh 48 km sementara biaya bensin sebesar 3 untuk mengemudi 48 km. Dengan kata lain, seorang pengemudi dapat menghemat 2,28 untuk perjalanan sejauh 48 km. Namun, PHEV umumnya lebih mahal daripada mobil konvensional karena bertambahnya jumlah komponen, seperti baterai dan motor. Biaya awal PHEV akan membutuhkan waktu bagi pemiliknya untuk pulih dari penghematan bahan bakar. Dengan harga bahan bakar saat ini, pemilik membutuhkan waktu beberapa tahun untuk memulihkan investasi awal. Karena harga minyak bumi meningkat dalam jangka panjang, penghematan biaya bisa lebih menguntungkan. Juga, ketika produksi PHEV meningkat, biayanya diperkirakan akan turun. Insentif pemerintah (rabat pajak, dll.) juga membantu mensubsidi biaya awal PHEV. Struktur penetapan harga listrik yang berbeda berpotensi membantu PHEV. Struktur potensial ini akan membebaskan konsumen dengan tarif yang lebih rendah jika PHEV dibebankan selama waktu tidak sibuk. Tentu saja, konsumen masih memiliki opsi untuk menagih kapan saja.
4. **Penghematan biaya perawatan:** PHEV umumnya dapat menghemat biaya perawatan. Karena penggunaan rem regeneratif yang ekstensif, perawatan dan perbaikan sistem pengereman menjadi lebih jarang, seperti penggantian bantalan rem dan penggantian minyak rem. Karena mesin tidak beroperasi, atau beroperasi dalam waktu yang jauh lebih singkat, akan ada interval yang lebih lama untuk penggantian oli dan layanan perawatan mesin lainnya.
5. **Daya cadangan:** PHEV dapat digunakan sebagai sumber daya cadangan saat pengisi daya dua arah disediakan. Paket baterai PHEV biasa dapat menyediakan daya 3–10 kW untuk rumah atau kantor selama beberapa jam, dan generator/motor mesin terpasang dapat lebih memperpanjang durasi pencadangan dengan menggunakan bensin untuk menghasilkan listrik.
6. **Penggunaan baterai di akhir masa pakai:** Baterai yang tidak lagi dapat memberikan kinerja yang diinginkan dalam PHEV berpotensi dapat digunakan untuk penyimpanan energi jaringan, yang menyediakan pengaturan tegangan, stabilitas sistem, dan pengaturan frekuensi untuk jaringan listrik. Secara khusus, pengaturan dan stabilitas frekuensi menjadi semakin penting karena semakin banyak pembangkit energi terbarukan yang ditempatkan di jaringan listrik. Baterai “pensiun” ini, yang mungkin masih memiliki 30–50% dari kapasitas energi aslinya, dapat menyediakan jenis layanan ini.

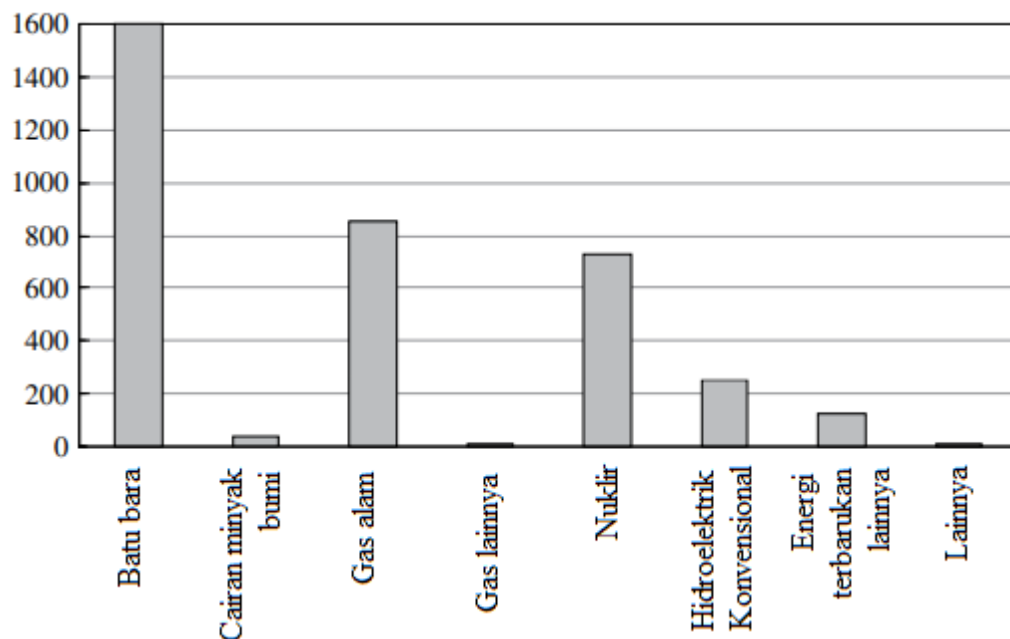
Namun, diperkirakan dunia memiliki cadangan batu bara selama sekitar 400 tahun dengan tingkat konsumsi saat ini sementara minyak bumi hanya akan bertahan 50 tahun. Terlihat juga bahwa ada potensi energi terbarukan untuk tumbuh.

Listrik untuk Penggunaan PHEV

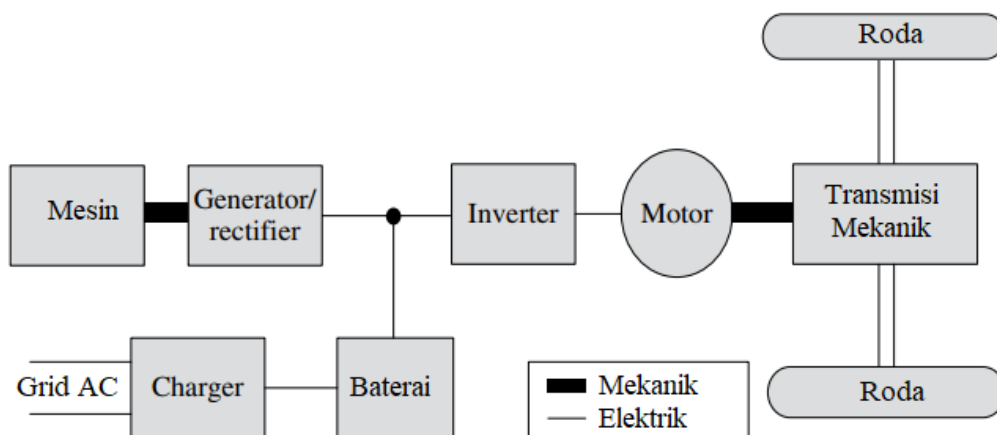
Karena PHEV perlu diisi dari jaringan listrik, industri utilitas harus siap untuk penyebaran PHEV dalam jumlah besar. Untungnya, penyebaran PHEV akan berlangsung selama periode waktu tertentu, akan memberikan waktu yang cukup bagi industri utilitas

untuk bersiap-siap. PHEV sebagian besar akan dikenakan biaya pada malam hari. Jaringan tenaga listrik memiliki kapasitas yang tersedia di malam hari dan di malam hari ketika sebagian besar PHEVs diisi. Sebuah studi Electric Power Research Institute (EPRI) menunjukkan bahwa dengan 1 juta PHEV terhubung ke jaringan, tidak perlu membangun pembangkit listrik tunggal. Dengan 10 juta PHEV di jalan, hanya perlu membangun tiga pembangkit listrik tambahan (http://www.ornl.gov/info/ornlreview/v40_2_07/2007_plug-in_paper.pdf).

Di sisi lain, listrik dapat dihasilkan dari berbagai sumber, termasuk nuklir dan energi terbarukan seperti pembangkit listrik tenaga air, angin, fotovoltaik, dan gelombang laut. Bahkan pembangkit listrik berbahan bakar batu bara akan memiliki kelebihan karena cadangan batu bara lebih banyak daripada cadangan minyak bumi. Menggunakan energi terbarukan untuk PHEV akan secara signifikan mengurangi konsumsi bahan bakar fosil berbasis minyak bumi. Akhirnya, pembangkitan terpusat akan mengurangi total emisi dan memindahkan sumber emisi dari daerah perkotaan. Gambar 5.2 menunjukkan portofolio pembangkit listrik. Pembangkit listrik tenaga batu bara merupakan pembangkit listrik utama di dunia.



Gambar 5.2 Portofolio pembangkit listrik. Sumber: Administrasi Informasi Energi.



Gambar 5.3 Arsitektur seri PHEV.

Namun, diperkirakan dunia memiliki cadangan batu bara selama sekitar 400 tahun dengan tingkat konsumsi saat ini sementara minyak bumi hanya akan bertahan 50 tahun. Terlihat juga bahwa ada potensi energi terbarukan untuk tumbuh.

5.4 ARSITEKTUR PHEV

Gambar 5.3 menunjukkan arsitektur rangkaian PHEV. Pada konfigurasi seri, output mesin bensin dihubungkan ke generator. Listrik yang dihasilkan oleh generator dapat digunakan untuk mengisi baterai atau memasok daya ke motor powertrain. Motor listrik adalah satu-satunya komponen penggerak roda. Motor dapat berupa motor induksi, motor keengganan yang diaktifkan, atau motor magnet permanen. Motor dapat dipasang pada kendaraan dengan cara yang sama seperti pada kendaraan konvensional, tanpa memerlukan transmisi. Motor hub dalam roda juga dapat dipilih. Dalam konfigurasi seri, motor dirancang untuk memberikan torsi yang dibutuhkan kendaraan untuk melaju di segala kondisi. Mesin/generator dapat dirancang untuk menyediakan kebutuhan daya rata-rata.

Hibrida paralel dan kompleks juga dapat dirancang sebagai PHEV. Dalam konfigurasi paralel dan kompleks, mesin dan motor dapat menggerakkan roda. Oleh karena itu, ukuran motor bisa lebih kecil dibandingkan dengan konfigurasi seri. Dibandingkan dengan kendaraan listrik hibrida biasa (HEV), PHEV paralel atau kompleks akan memiliki paket baterai berukuran lebih besar, yang memberikan durasi lebih lama untuk penggerak listrik yang diperpanjang. Mesin dihidupkan setiap kali permintaan daya kendaraan tinggi.

Rentang Listrik Setara PHEV Campuran Untuk EREV, rentang listrik dapat dengan mudah dihitung. Untuk PHEV campuran, mungkin tidak ada driving range listrik murni yang tersedia untuk beberapa siklus mengemudi. Untuk menemukan kisaran listrik yang ekuivalen, berguna untuk membandingkan penghematan bahan bakar dari mode campuran PHEV selama mode penipisan muatan/*charge depletion* (CD) dengan mode HEV yang sebanding.

Contoh 5.2 Asumsikan bahwa ada dua kendaraan, satu HEV biasa dan satu PHEV, keduanya menggunakan arsitektur dan komponen powertrain yang sama. Namun, PHEV memiliki baterai yang lebih besar yaitu 11 kWh sedangkan HEV memiliki baterai 2 kWh. Abaikan perbedaan berat kedua kendaraan. HEV memiliki ekonomi bahan bakar 40 MPG. PHEV memiliki penghematan bahan bakar 60 MPG selama mengemudi mode CD. Rentang mode CD total adalah 96 km untuk PHEV. Ini mencapai 40 MPG selama mengemudi mode *charge-sustaining* (CS). Ini berarti bahwa untuk 1 galon bensin, perbedaan jarak antara kedua kendaraan adalah 32 km. Oleh karena itu, jangkauan listrik setara PHEV ini adalah 32 km. Namun, harus ditunjukkan bahwa jangkauan listrik 32 km diwujudkan dalam total 96 km, bukan 32 km pertama, seperti EREV.

Contoh 5.3 (Mirip dengan Contoh 5.2): HEV memiliki penghematan bahan bakar 40 MPG dan PHEV memiliki penghematan bahan bakar 120 MPG selama mengemudi mode CD dan 40 MPG selama mengemudi mode CS. Rentang mode CD total PHEV adalah 72 km. Untuk 72 km pertama, pada 120 MPG, PHEV mengkonsumsi 0,375 galon bensin. Untuk jumlah bensin ini, HEV akan berjalan 24 km. Perbedaan antara kedua kendaraan adalah 48 km, yang dapat dianggap sebagai kisaran listrik yang setara dengan PHEV.

5.5 EKONOMI BAHAN BAKAR PHEV

Ekonomi bahan bakar kendaraan konvensional dievaluasi sebagai konsumsi bahan bakar (liter) per 100 km, atau mil per galon. Badan Perlindungan Lingkungan menetapkan metode untuk sertifikasi penghematan bahan bakar. Biasanya ada dua angka, satu untuk mengemudi di kota dan satu untuk mengemudi di jalan raya. Ada angka penghematan bahan bakar tambahan yang mengevaluasi penghematan bahan bakar gabungan dengan menggabungkan angka MPG kota 55% dan 45% jalan raya.

Persamaan 5.1

$$FE_{MPG_Combined} = \frac{1}{\frac{0.55}{FE_{city}} + \frac{0.45}{FE_{highway}}}$$

Untuk EV murni, penghematan bahan bakar paling baik dijelaskan dengan konsumsi listrik untuk rentang tertentu, misalnya, Wh/mil atau kWh/100 km. Misalnya, mobil penumpang biasa mengkonsumsi 120–250 Wh/mil. Untuk membandingkan efisiensi bahan bakar EV dengan bensin atau kendaraan diesel konvensional, kandungan energi bensin digunakan untuk mengonversi angka. Sejak 1 galon bensin mengandung energi 33,7 kWh (<http://www.eere.doe.gov>), ekonomi bahan bakar setara dari EV dapat dinyatakan sebagai:

Persamaan 5.2

$$FE_{gas_equivalent} = \frac{1}{Wh/mile} \times 33700$$

Oleh karena itu, mobil penumpang yang mengkonsumsi 240 Wh/mil akan memiliki jarak tempuh bensin setara 140 MPG dari sudut pandang energi.

Efisiensi Well-to-Wheel

Efisiensi bahan bakar di atas juga disebut efisiensi tangki-ke-roda. Ini tidak mencerminkan kerugian selama pemurnian dan distribusi. Terkadang lebih mudah untuk membandingkan efisiensi bahan bakar kendaraan konvensional dan EV secara keseluruhan. Untuk bensin, efisiensi ini adalah 83%, yang mencerminkan efisiensi gabungan dari pemurnian dan distribusi bensin. Untuk pembangkitan listrik, efisiensi ini adalah 30,3%, yang mencerminkan efisiensi gabungan yang mencakup pembangkitan listrik sebesar 32,8% (dengan asumsi listrik dihasilkan dari bensin) dan distribusi listrik sebesar 92,4%. Efisiensi pengisian baterai juga perlu dicerminkan. Dengan demikian,

Persamaan 5.3

$$FE_{EV_well_wheel} = \frac{1}{Wh/mile} \times 33700 \times \eta_{electricity}$$

Persamaan 5.4

$$FE_{ICEV_well_wheel} = FE_{mpg} \times \eta_{gasoline}$$

dimana $\eta_{electricity} = 30,3$ dan bensin $\eta_{gasoline} = 83\%$, dan subscript ICEV adalah singkatan dari kendaraan mesin pembakaran internal.

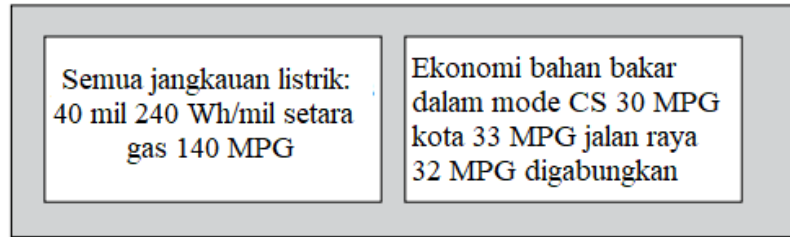
Contoh 5.4 Sebuah mobil 30 MPG akan memiliki efisiensi bahan bakar well-to-wheel sebesar 24 MPG, dan sebuah EV yang mengkonsumsi 240 Wh/mil akan memiliki efisiensi well-to-wheel sebesar 42,5 MPG.

Ekonomi Bahan Bakar PHEV

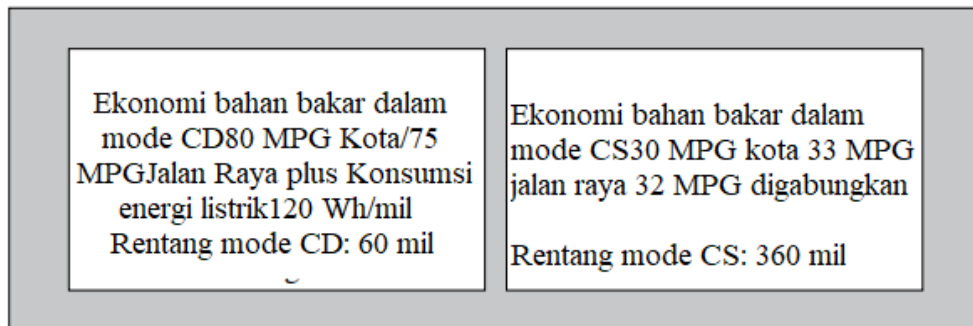
Untuk PHEV, biasanya membingungkan mengenai angka mana yang harus digunakan. Di sini, kita membahas dua skenario berbeda: PHEV berkemampuan all-electric dan PHEV campuran. Untuk PHEV berkemampuan semua-listrik, berguna untuk menunjukkan jangkauan listrik, dalam mil atau kilometer, dan konsumsi energi terkait selama rentang itu, dalam kWh/mil, dan MPG yang berpotensi setara gas. Satu set angka diperlukan untuk menunjukkan MPG selama mode CS mengemudi. Label yang disarankan ditunjukkan pada Gambar 5.4.

Untuk PHEV campuran, karena tidak ada driving range listrik murni, akan berguna untuk memberi label penghematan bahan bakar dalam mode CD dan CS secara terpisah

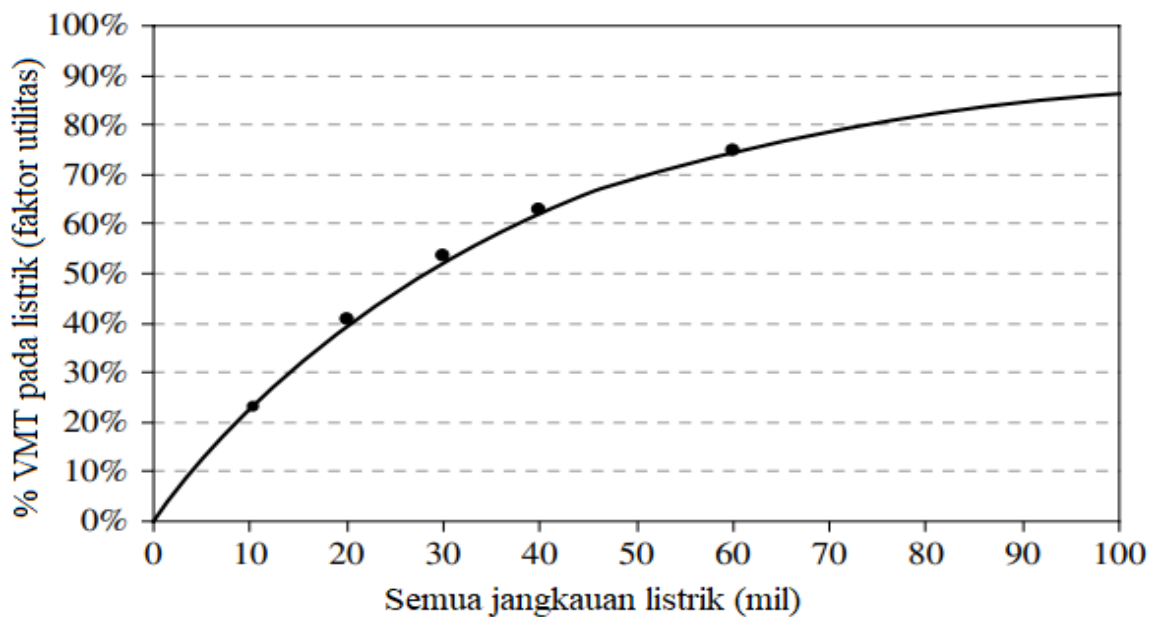
seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.5. Mungkin lebih disukai untuk memasukkan konsumsi energi listrik selama mode CD juga.



Gambar 5.4 Pelabelan ekonomi bahan bakar untuk PHEV berkemampuan listrik.



Gambar 5.5 Pelabelan ekonomi bahan bakar untuk PHEV campuran



Gambar 5.6 Definisi faktor utilitas PHEV (VMT, jarak tempuh kendaraan)

5.6 FAKTOR UTILITAS

Pendekatan lain untuk klarifikasi ekonomi bahan bakar adalah dengan menggunakan faktor utilitas. Faktor utilitas didefinisikan sebagai rasio rentang CD PHEV terhadap total jarak yang ditempuh dalam perjalanan harian oleh semua penduduk. Misalnya, jarak CD 32 km akan menghasilkan faktor utilitas 40% (Gambar 5.6). Menggunakan faktor utilitas, ekonomi bahan bakar gabungan dapat dinyatakan sebagai:

Persamaan 5.5

$$FE_{gas_equivalent} = \frac{1}{\frac{UF}{FE_{CD}} + \frac{1-UF}{FE_{CS}}}$$

di mana UF adalah faktor utilitas, dan FECD dan FECS adalah penghematan bahan bakar selama operasi CD dan CS dari PHEV, masing-masing.

Contoh 5.5 Dalam mode CD, PHEV campuran mengkonsumsi 10 kWh energi listrik dari baterai terpasang dan 1,5 liter bensin dalam 64 km pertama. Di luar 64 km, mobil memasuki mode CS, yang menghabiskan 6,25 l bensin per 100 km. Mobil ini memiliki jangkauan total 724 km. Hitung penghematan bahan bakar mobil.

- Skenario 1: Dalam mode CD, karena mobil mengkonsumsi 1,5 liter bensin pada 64 km pertama, konsumsi bahan bakarnya adalah:

$$\begin{aligned} FC_{CD,Gas} &= \frac{1.5}{64} \times 100 \\ &= 2.34 \text{ l/100km atau } 100 \text{ MPG, ditambah } 156 \text{ Wh/km listrik} \end{aligned}$$

- Skenario 2: Jika konsumsi energi total (bensin dan listrik) selama mode CD diubah menjadi setara bensin, maka konsumsi energi total adalah:

$$FC_{CD,Total} = \frac{2.341}{100 \text{ km}} + \frac{15600 \text{ Wh}}{100 \text{ km}} \times \frac{1}{33700 \times 1.609} = \frac{2.631}{100 \text{ km}} \text{ atau } 89 \text{ MPG}$$

- Skenario 3: Di luar 64 km, konsumsi bahan bakarnya adalah:

$$FC_{CS} = \frac{6.251}{100 \text{ km}} \text{ atau } 37.7 \text{ MPG}$$

- Skenario 4: UF mobil ini adalah 0,62. Penghematan bahan bakar gabungan dengan menggunakan UF akan:

$$FE_{Gas_equivalent} = \frac{1}{\frac{UF}{FE_{CD}} + \frac{1-UF}{FE_{CS}}} = \frac{1}{\frac{0.62}{100} + \frac{1-0.62}{37.7}} = 61 \text{ MPG}$$

- Skenario 5: Dalam hal ini, diasumsikan bahwa mobil memiliki tangki bensin penuh dan baterai terisi penuh. Hal ini kemudian didorong jarak penuh 724 km. Jika kita menganggap UF sebagai rasio jangkauan CD versus jangkauan total, maka UF mobil ini adalah 64 km/724 km = 0,088. Ekonomi bahan bakar keseluruhan untuk rentang total dapat dinyatakan sebagai:

$$FE_{Overall} = \frac{452 \text{ mil}}{\frac{40 \text{ mil}}{FE_{CD}} + \frac{412 \text{ mil}}{FE_{CS}}} = 40 \text{ MPG, tambah listrik } 10 \text{ kWh}$$

5.7 MANAJEMEN DAYA PHEV

PHEV melibatkan kondisi pengoperasian mode CD dan mode CS. Biasanya, ketika baterai terisi penuh, kendaraan dioperasikan dalam mode CD, dan ketika status pengisian baterai (SOC) mencapai ambang batas rendah, kendaraan akan beralih ke mode CS. Dalam

mode CD, kendaraan akan memaksimalkan penggunaan energi baterai. Dalam mode CS, kendaraan akan menggunakan bensin untuk menyalakan kendaraan sambil mempertahankan SOC baterai pada tingkat yang sama.

Selama operasi mode CD, tujuan dari manajemen daya kendaraan adalah untuk meminimalkan konsumsi energi total dengan mendistribusikan daya antara baterai dan mesin bensin/generator untuk skenario mengemudi tertentu. Dengan kata lain, tujuan manajemen daya dalam PHEV adalah untuk meminimalkan konsumsi bahan bakar untuk skenario drive tertentu. Untuk PHEV seri (atau EREV), jika jarak drive kurang dari kisaran drive listrik nominal, maka itu dimungkinkan untuk mengoperasikan kendaraan dalam mode semua-listrik, sehingga tidak ada bahan bakar yang dikonsumsi. Jika jarak berkendara lebih panjang dari jangkauan listrik, maka ada tiga kemungkinan pendekatan untuk mengoperasikan kendaraan:

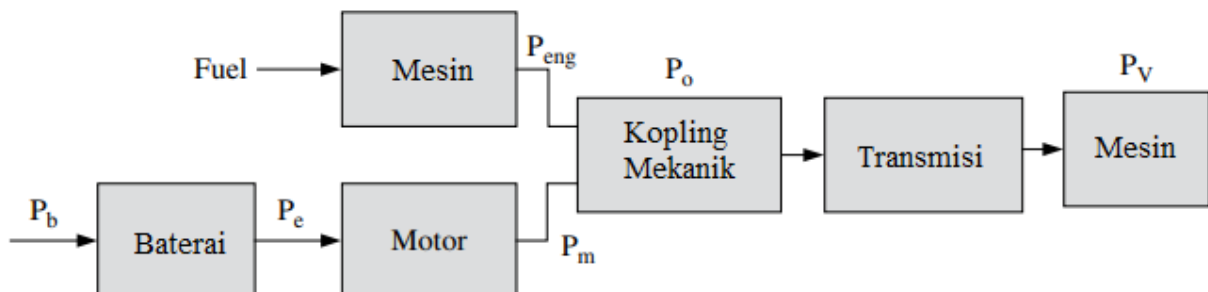
1. Operasikan kendaraan dalam mode listrik sampai baterai habis ke ambang batas yang telah ditentukan, lalu jalankan dalam mode CS.
2. Operasikan kendaraan dalam mode campuran dengan mesin menyala pada permintaan daya tinggi, dan habiskan baterai ke ambang batas yang telah ditentukan pada akhir siklus mengemudi total.
3. Operasikan kendaraan dalam mode campuran dengan mesin menyala pada kebutuhan daya tinggi tetapi dengan kebijakan pengosongan baterai yang optimal, sehingga baterai akan habis hingga ambang batas yang telah ditentukan sebelum akhir siklus mengemudi total.

Dalam pendekatan ini, karena jarak tempuh total adalah sama, yang paling sedikit mengkonsumsi bahan bakar akan menjadi pilihan terbaik. Karena baterai akan menunjukkan kehilangan daya yang besar pada output daya tinggi dibandingkan dengan daya output normalnya, mungkin menguntungkan untuk mengoperasikan kendaraan dalam mode campuran. Masalah optimasi dapat dinyatakan sebagai:

$$\min\{\text{konsumsi bahan bakar}\}$$

Tunduk pada jarak dan siklus berkendara tertentu

Untuk PHEV campuran, karena tidak ada jangkauan listrik murni yang tersedia, tujuan manajemen daya adalah meminimalkan konsumsi bahan bakar untuk siklus penggerak tertentu dan total energi baterai yang tersedia. Hal ini sangat terkait dengan karakteristik sumber tenaga (baterai dan mesin).



Gambar 5.7 Model PHEV campuran yang ideal untuk studi manajemen daya

Gambar 5.7 menunjukkan model PHEV campuran yang ideal untuk mempelajari manajemen daya. Dalam model ini, kopling mekanis dan kerugian transmisi dianggap sebagai bagian dari daya kendaraan yang dihitung. Total daya kendaraan yang diminta dipenuhi dengan menambahkan output mesin dan output motor (persamaan 5.6):

$$P_o = P_m + P_{eng}$$

Dan (persamaan 5.7)

$$P_b = P_m + P_b + P_m$$

di mana huruf kecil p mewakili kerugian dan huruf besar P mewakili daya total atau daya keluaran. Permintaan daya kendaraan dapat dihitung dengan menggunakan profil siklus mengemudi. Gambar 5.8 menunjukkan distribusi kebutuhan daya kendaraan. Gambar 5.9 adalah permintaan daya kendaraan yang dinormalisasi, di mana $f(P_o)$ mewakili total waktu yang dihabiskan kendaraan pada permintaan daya tertentu P_o . Total energi baterai yang dikonsumsi selama siklus drive menggunakan persamaan berikut:

Persamaan 5.8

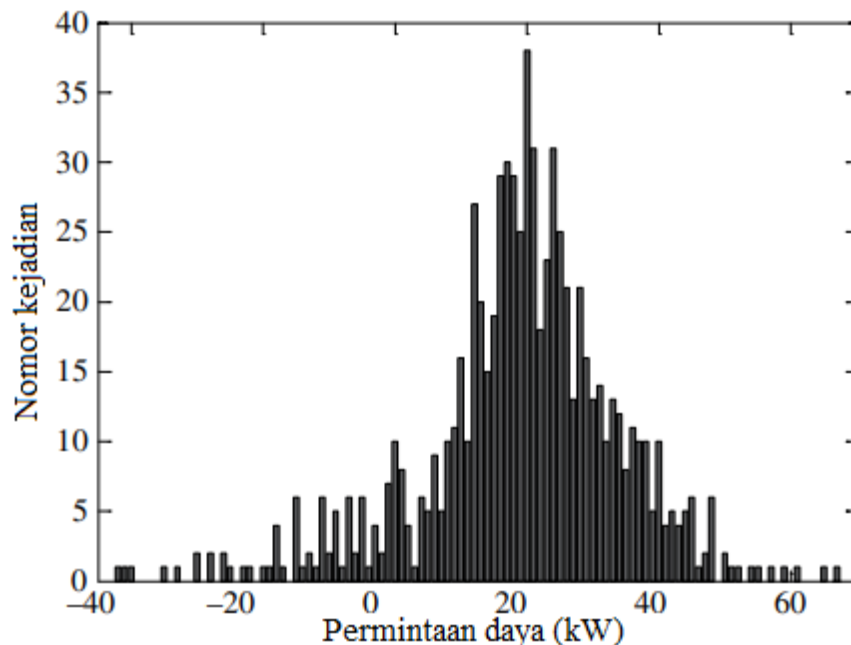
$$E_b = \int_{P_{min}}^{P_{max}} P_b f(P_o) dP_o$$

Total bahan bakar yang dikonsumsi menggunakan persamaan berikut:

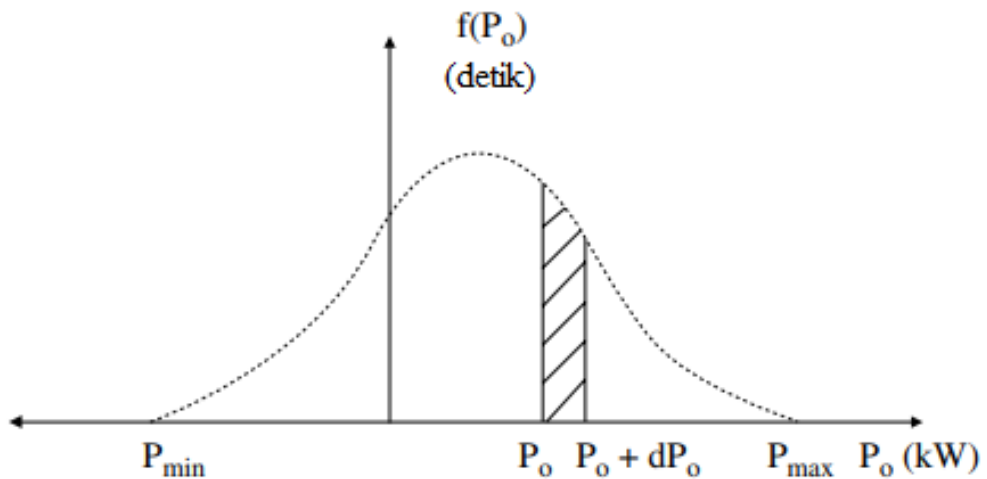
Persamaan 5.9

$$F_e = \int_{P_{min}}^{P_{max}} f(P_{eng}) f(P_o) dP_o$$

di mana $f(P_{eng})$ adalah konsumsi bahan bakar mesin untuk output daya tertentu P_{eng} . Masalah optimasinya adalah meminimalkan konsumsi bahan bakar total F_e untuk energi baterai tertentu $E_b = \text{konstan}$.



Gambar 5.8 Distribusi permintaan daya dalam mobil penumpang di bawah siklus mengemudi perkotaan UDDS EPA. Sumbu horizontal adalah permintaan daya dari powertrain dan sumbu vertikal adalah terjadinya permintaan daya. Permintaan daya dihitung setiap detik.



Gambar 5.9 Distribusi permintaan daya yang dinormalisasi.

5.8 DESAIN PHEV DAN UKURAN KOMPONEN

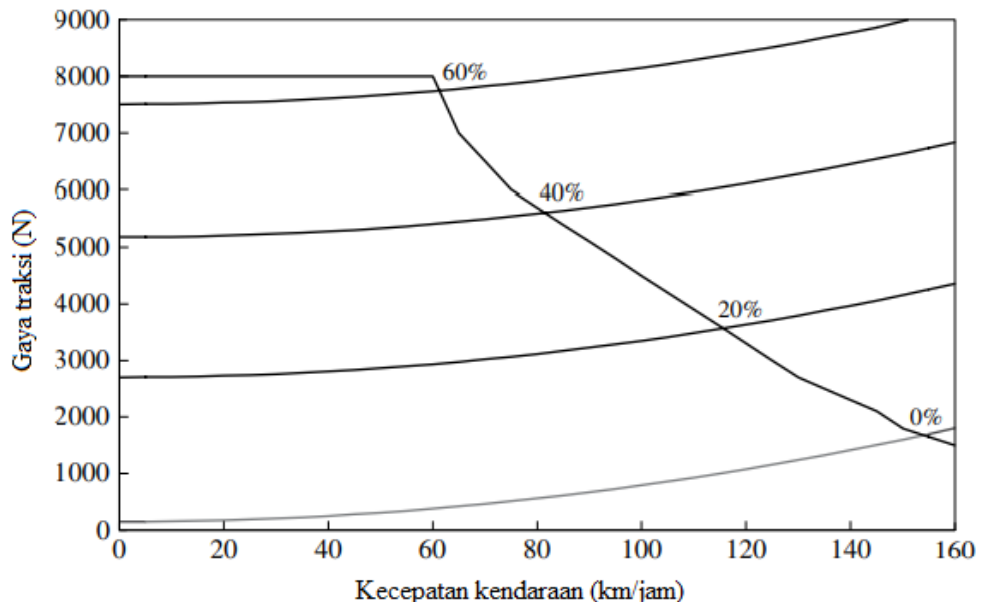
Komponen utama PHEV adalah motor powertrain dan paket baterai. Menggunakan gaya resistif kendaraan dan persyaratan akselerasi, motor penggerak dapat diukur. Gaya total kendaraan adalah:

Persamaan 5.10

$$F_{TR} = mg \sin \alpha + mgC_0 + C_1V^2 + \frac{1}{2} \rho C_D A_F V^2 + m \frac{dV}{dt}$$

di mana m adalah massa kendaraan, adalah kemiringan jalan dalam radian, g adalah gravitasi bumi, yang mana 9,8 m/s², C₀ dan C₁ adalah koefisien rolling, ρ adalah kerapatan udara (densitas udara), C_D adalah koefisien aerodinamis, A_F adalah area frontal dalam m², dan V adalah kecepatan kendaraan. Resistansi total kendaraan diplot pada Gambar 5.10. Pada setiap kecepatan kendaraan tertentu, daya pada roda adalah (persamaan 5.11)

$$P = F_{TR} V = \left(mg \sin \alpha + mgC_0 + C_1V^2 + \frac{1}{2} \rho C_D A_F V^2 + m \frac{dV}{dt} \right) V$$



Gambar 5.10 Gaya traksi mobil penumpang berukuran sedang.

Ukuran Komponen EREV

Asumsikan efisiensi driveline adalah d . Agar PHEV mampu mengemudi secara elektrik, motor powertrain perlu berukuran sedemikian rupa sehingga motor dapat memberikan torsi yang cukup untuk semua kondisi mengemudi, lihat persamaan berikut ini:

Persamaan 5.12

$$P_m = \frac{P}{\eta_d}$$

Total waktu akselerasi dan kemampuan menanjak kendaraan adalah kriteria desain lain untuk ukuran motor traksi. Secara umum, motor traksi EREV sangat mirip dengan desain seri HEV. Misalnya, peringkat daya khas mobil penumpang adalah sekitar 125 kW, dan motor traksi khas untuk kendaraan utilitas sport (SUV) berukuran menengah adalah sekitar 150 kW. Set mesin/generator dari EREV dirancang untuk memberikan tenaga rata-rata selama rentang mengemudi yang diperpanjang. Selain kebutuhan driveline, kebutuhan daya tambahan juga harus dipertimbangkan.

Untuk baterai traksi, ada dua parameter yang sangat penting: kapasitas energi dan kapasitas daya. Karena EREV dirancang untuk beroperasi dalam segala jenis kondisi tanpa menghidupkan mesin selama mode CD, peringkat daya baterai harus sesuai dengan peringkat motor traksi. Misalnya, jika motor traksi dinilai pada output 125 kW dengan efisiensi sistem 95% (inverter + motor), maka baterai harus memiliki kapasitas daya 131,6 kW.

Parameter lain dari baterai adalah kapasitas energi. Hal ini dapat dihitung berdasarkan total jangkauan listrik yang akan dirancang. Misalnya, jika kendaraan dirancang untuk memiliki jangkauan listrik 64 km, dan kendaraan tersebut mengkonsumsi rata-rata 150 W per km dalam berkendara di kota, maka baterai harus dapat menyediakan 9,6 kWh energi yang dapat digunakan. Jika kita membiarkan SOC baterai hanya turun hingga 30%, dan mempertimbangkan efisiensi rata-rata baterai menjadi 96%, maka kapasitas energi nominal baterai akan menjadi 14,3 kWh. Selanjutnya, jika kita memilih paket baterai yang terdiri dari sel baterai individual 3,2 V, 40 Ah, maka kita akan membutuhkan 112 sel. Menghubungkan semua sel secara seri akan menghasilkan tegangan nominal 358,4 V.

Ukuran Komponen PHEV Campuran

Desain motor powertrain dan mesin PHEV campuran mirip dengan desain HEV paralel. Satu-satunya persyaratan adalah motor traksi harus berukuran sedemikian rupa sehingga kendaraan dapat digerakkan dalam mode listrik untuk sebagian besar mengemudi di kota. Untuk mengemudi di jalan raya, mesin akan memberikan tenaga untuk mengemudi. Pada Gambar 5.8, motor dengan nilai 50 kW akan mencakup 95% dari permintaan daya penggerak kota. Ukuran baterai mirip dengan ukuran baterai EREV, yaitu, jarak listrik setara yang diperlukan untuk PHEV. Karena fokusnya adalah mengemudi di kota, ukuran baterai disesuaikan untuk memenuhi siklus mengemudi di kota.

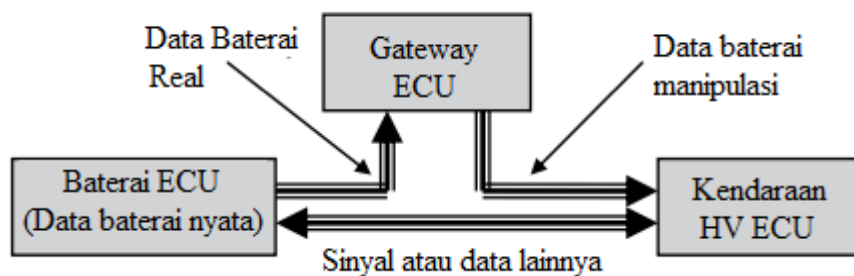
Misalnya, jika PHEV campuran dilengkapi dengan motor powertrain 50 kW dengan efisiensi 95%, maka baterai harus mampu menyediakan daya 52,6 kW. Jika jarak mengemudi kota yang diinginkan dalam mode listrik adalah 40 km, dan konsumsi daya 160 W per km, maka baterai harus memiliki kapasitas yang dapat digunakan sebesar 6,4 kWh. Sekali lagi, jika kita berasumsi bahwa SOC baterai hanya dapat turun hingga 30%, dan memiliki efisiensi rata-rata 95%, maka kapasitas nominal baterai adalah 9,6 kWh. Jika kita memilih sel baterai dengan nilai 3,75 V, masing-masing 32 Ah, maka jumlah sel baterai yang dibutuhkan adalah 80. Menghubungkan semua sel secara seri akan menghasilkan tegangan nominal 300 V.

5.9 KONVERSI HEV KE PHEV

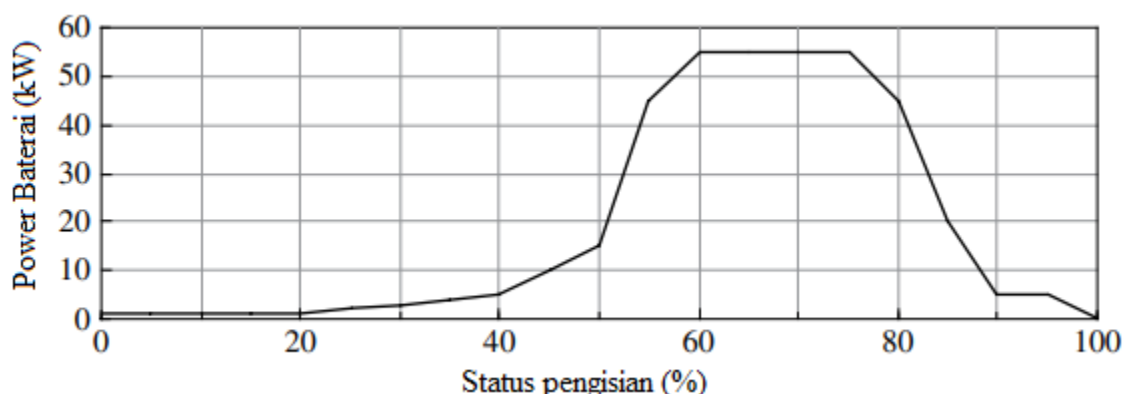
HEV biasa dapat dikonversi menjadi PHEV. Banyak konversi independen telah dilakukan oleh berbagai kelompok (seperti Cal-Cars) dan perusahaan (seperti A123 Hymotion dan EETrex) (<http://www.eaa-phev.org/>). Ada dua cara potensial untuk melakukan konversi. Salah satunya adalah mengganti baterai asli (biasanya baterai NiMH) dengan baterai yang lebih besar (biasanya lithium-ion). Cara lain adalah dengan menambahkan paket baterai ekstra ke sistem kendaraan. HEV khas saat ini dilengkapi dengan baterai NiMH 1,2-2,2 kWh. PHEV yang dikonversi biasanya memiliki paket baterai 7–16 kWh. Kapasitas baterai baru atau ekstra ini akan memungkinkan untuk mengemudikan kendaraan dalam mode all-electric atau secara signifikan meningkatkan konsumsi bahan bakar mobil dalam rentang penggerak awal.

Mengganti Baterai yang Ada

Dalam pendekatan ini, baterai asli dilepas dan baterai baru dipasang. Dalam konversi khusus HEV ke PHEV, kontrol kendaraan biasanya tetap utuh. Untuk memanfaatkan energi baterai, biasanya informasi baterai dimanipulasi, atau dipalsukan. Salah satu cara untuk melakukannya adalah dengan mengganti ECU (*Electronic Control Unit*) baterai asli dengan ECU baterai baru yang menduplikasi semua informasi baterai. Namun, informasi baterai yang sebenarnya dipalsukan ke nilai sedemikian rupa sehingga pengontrol kendaraan berpikir bahwa ada cukup energi dan daya dari baterai, sehingga menggunakan lebih banyak energi baterai untuk menggerakkan mobil.



Gambar 5.11 Pendekatan Gateway dalam konversi HEV ke PHEV.



Gambar 5.12 Daya baterai tipikal vs. SOC yang diizinkan oleh HEV

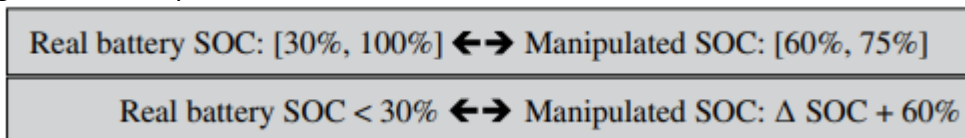
Pendekatan lain untuk memalsukan data baterai adalah dengan menggunakan gateway, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.11. Informasi baterai yang sebenarnya dikirim ke gateway, yang kemudian mengirimkan data baterai yang dimanipulasi ke pengontrol kendaraan. Gateway dapat menjadi bagian dari ECU baterai baru, atau ECU mandiri.

Sebagian besar HEV menggunakan baterai NiMH (baterai HV) tegangan tinggi (HV). Daya dan energi yang tersedia dari baterai biasanya ditentukan oleh SOC baterai dan suhu baterai. ECU baterai terus memantau kondisi baterai HV, termasuk suhu, tegangan, dan arus

listrik, dan menghitung SOC. Ketika kendaraan sedang bergerak, baterai HV melewati siklus pengisian dan pengosongan berulang (dikosongkan selama akselerasi dan diisi selama pengereman regeneratif). Baterai juga dapat diisi oleh motor/generator menggunakan tenaga mesin sesuai kebutuhan. ECU menghitung SOC dan mengirimkan permintaan pengisian/pengosongan ke ECU kendaraan untuk mempertahankan SOC pada level median.

Milany Prius, target SOC adalah 60% dalam rentang $\pm 20\%$. Ketika SOC turun di bawah daerah terkontrol (40%), ECU aki mengirimkan permintaan ke ECU kendaraan, yang kemudian mengirimkan permintaan ke ECU mesin untuk menambah tenaga mesin untuk mengisi baterai. Jika SOC meningkat di atas daerah kendali (80%), maka ECU aki mengirimkan permintaan ke ECU kendaraan, yang kemudian mengirimkan permintaan ke motor agar daya aki habis dengan menggunakan motor untuk menggerakkan kendaraan (baik sendiri atau dalam kombinasi dengan mesin).

Gambar 5.12 menunjukkan plot khas daya baterai vs. SOC dari HEV. Daya yang tersedia dari baterai berkaitan erat dengan SOC baterai. Hanya ketika SOC berada dalam kisaran sempit (55-80%) kendaraan memungkinkan daya yang lebih tinggi dari baterai. Pendekatan ini dirancang untuk masa pakai baterai.



Gambar 5.13 Informasi SOC baterai aktual dan yang dimanipulasi untuk tujuan kontrol powertrain dalam PHEV yang dikonversi.

Ketika paket baterai baru dan lebih besar ditambahkan, tujuan utamanya adalah menggunakan energi baterai sebanyak mungkin. Kisaran tipikal adalah untuk SOC turun dari 100% (terisi penuh) menjadi 30% untuk paket baterai lithium-ion. Mengoperasikan baterai di bawah 30% akan berdampak negatif pada kesehatan dan masa pakai baterai.

Tanpa modifikasi ECU kendaraan, SOC paket baterai harus dimanipulasi sedemikian rupa sehingga kendaraan akan menggunakan lebih banyak daya dari baterai. Pemetaan SOC baterai untuk batas yang ditunjukkan pada Gambar 5.13 adalah sebagai berikut. Ketika SOC aki asli di atas 30%, SOC asli dipetakan ke kisaran (60–75%) di mana ECU kendaraan akan memaksimalkan penggunaan energi aki. Ketika SOC nyata turun di bawah 30%, perhitungan SOC didasarkan pada kapasitas baterai asli sebagai berikut. Jika $SOC_{real} > 0,3$, maka

Persamaan 5.13

$$COS_{real} = \frac{(Ah)_{new} - \int idt}{(Ah)_{new}}$$

Persamaan 5.14

$$SOC_{manipulated} = 60\% + 0.21(SOC_{real} - 0.3)$$

Jika $SOC_{real} < 0,3$, maka :

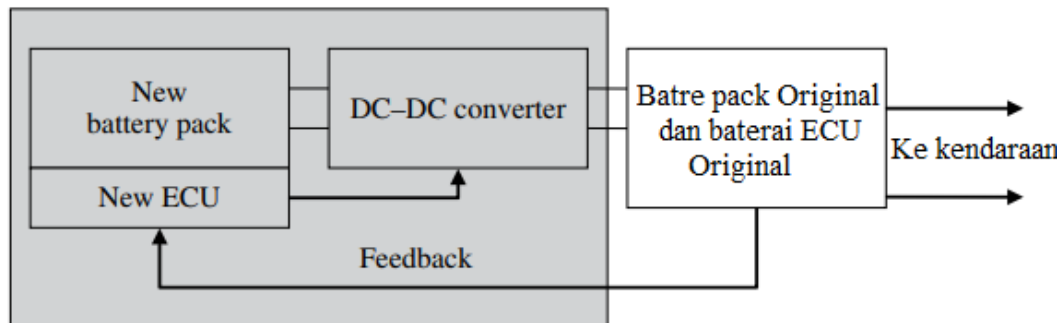
Persamaan 5.15

$$SOC_{manipulated} = \Delta SOC + 0.6 = \frac{\int idt}{(Ah)_{old}} + 0.6$$

di mana $(Ah)_{old}$ adalah kapasitas paket asli, dan $(Ah)_{new}$ adalah kapasitas paket baru.

Menambahkan Paket Baterai Ekstra

Pendekatan Hymotion Sistem A123 (<http://www.a123systems.com/hymotion/>) adalah dengan menambahkan paket baterai ekstra ke kendaraan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.14. Energi dari paket baterai ekstra secara perlahan dilepaskan ke paket baterai asli untuk digunakan oleh kendaraan. Selain mengendalikan paket baterai baru, tidak ada perubahan pada sistem kelistrikan dan kontrol asli.



Gambar 5.14 Menambahkan baterai ekstra ke HEV

Mungkin diperlukan konverter DC-DC antara baterai lithium-ion (Li-Ion) baru dan baterai NiMH asli. Konverter DC-DC akan mengambil energi dari baterai lithium-ion dan mengisi baterai NiMH. Dengan cara ini, tegangan baterai NiMH tetap tinggi. Karena ECU baterai akan mereset SOC paket baterai NiMH berdasarkan tegangan baterai, energi yang dibebankan ke baterai NiMH digunakan karena SOC tinggi yang terdeteksi.

Mengubah Kendaraan Konvensional menjadi PHEV

Beberapa kendaraan, seperti truk pickup, memiliki banyak ruang yang tersedia. Hybrid Electric Vehicles Technology Inc. dan Raser Inc. masing-masing telah mengubah truk pikap bertenaga bensin konvensional menjadi PHEV (<http://hevt.com/flyers/HEVT%20Ford%20F150%20Pickup%20Truck%20Plug-in%20Hybrid%20Electric%20Conversion.pdf>, <http://www.rasertech.com/>). Dalam pendekatan sebelumnya, perusahaan mempertahankan poros depan yang ada sebagai penggerak mesin bensin, tetapi memodifikasi poros belakang dengan menambahkan motor induksi dan paket baterai ekstra. Pengendali kendaraan perlu dimodifikasi untuk memanfaatkan energi baterai.

Pembahasan lainnya tentang PHEV

Baterai Akhir Masa Pakai untuk Dukungan Jaringan Tenaga Listrik

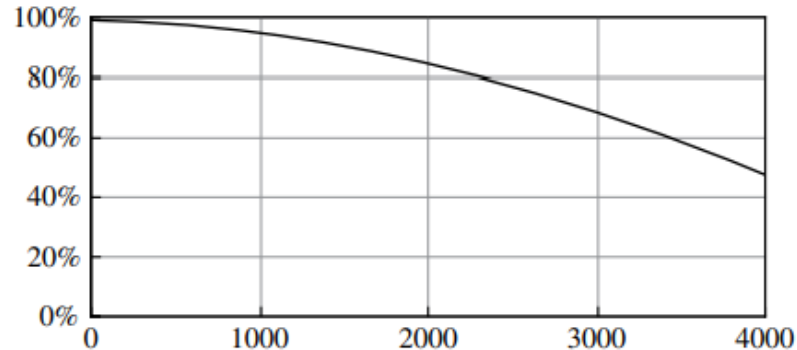
Secara umum, kapasitas energi baterai cenderung memudar seiring waktu dan siklus pengosongan. Kapasitas energi baterai tipikal sebagai fungsi waktu ditunjukkan pada Gambar 5.15. Dengan penipisan SOC 70%, baterai lithium-ion biasanya dapat bertahan 3000–4000 siklus pengisian daya. Ini adalah sekitar 10 tahun untuk PHEV. Setelah waktu tersebut, kapasitas baterai mungkin hanya 50% dari kapasitas awalnya. Meskipun hal ini tidak memuaskan bagi pemilik mobil karena jarak mengemudi listrik yang berkurang, baterai itu sendiri dapat digunakan untuk tujuan lain, seperti untuk mendukung jaringan listrik. Karena ada sedikit batasan ruang/berat untuk aplikasi jaringan listrik, baterai ini dapat digunakan untuk penyimpanan energi jaringan untuk pencukuran puncak, pengaturan frekuensi, dan kontrol stabilitas. Ketika semakin banyak energi terbarukan yang terhubung ke jaringan tenaga listrik, stabilitas jaringan menjadi sangat penting karena sifat pembangkitan energi terbarukan yang terputus-putus.

Pengurangan Emisi Mulai Dingin di PHEV

Emisi selama start kendaraan di cuaca dingin telah lama menjadi masalah. Telah ditunjukkan

(<http://cfpub.epa.gov/ncer/abstracts/index.cfm/fuseaction/display.abstractDetail/abstract/1450/report/0>) bahwa emisi dari kendaraan selama start cuaca dingin secara signifikan lebih

dibandingkan saat mulai cuaca normal. Secara khusus, emisi selama dua menit pertama dapat mencapai 80% dari total emisi selama siklus mengemudi standar (1400 detik). Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa emisi kendaraan biasanya diolah oleh catalytic converter. Konverter tipikal perlu dipanaskan agar berfungsi dengan baik.



Gambar 5.15 Kapasitas baterai umum versus masa pakai siklus

Untuk kendaraan konvensional, sejumlah metode telah diusulkan untuk mengurangi emisi awal cuaca dingin, seperti pemanas katalitik dan bahan baru. Dimungkinkan untuk mengurangi emisi cold-start di PHEV dengan menggunakan paket baterai onboard yang besar. Idennya adalah untuk mengoperasikan kendaraan dalam mode listrik saja dalam beberapa menit pertama dan, pada saat yang sama, menggunakan listrik dari baterai untuk memanaskan catalytic converter ke suhu tertentu. Setelah konverter normal dan berfungsi, mesin dapat dihidupkan sesuai kebutuhan. Namun, hampir semua baterai tidak berfungsi dengan baik dalam kondisi cuaca yang sangat dingin. Tidak hanya energi yang berguna berkurang dan impedansi internal meningkat (efisiensi turun), tetapi ada juga dampak negatif pada masa pakai baterai jika daya pelepasannya besar. Kompromi yang masuk akal perlu dibuat dalam hal ini.

Peningkatan Performa Cuaca Dingin/Cuaca Panas di PHEVs

Kisaran suhu operasi khas baterai lithium-ion adalah dari 0 hingga 50°C. Dalam kondisi cuaca yang sangat dingin atau panas, baterai akan menunjukkan impedansi internal yang besar dan tingkat daya yang berkurang. Untuk memperpanjang jarak mengemudi dan masa pakai baterai PHEV selama kondisi cuaca dingin, tindakan tambahan mungkin diperlukan. Salah satu metode adalah dengan mengisolasi baterai secara termal sehingga tidak ada atau sangat sedikit pertukaran panas yang terjadi antara sel baterai dan udara sekitar, kecuali di outlet pendingin. Isolasi termal ini akan memungkinkan baterai untuk menahan suhu stabil untuk waktu yang lama selama kondisi cuaca dingin atau panas yang ekstrim. Pendekatan lain adalah memanaskan baterai selama cuaca dingin dengan menggunakan pemanas internal yang menggunakan energi baterai untuk menghangatkan baterai. Metode tambahan termasuk menjaga baterai dalam mode trickle charge saat dicolokkan ke jaringan listrik.

Pemeliharaan PHEV

Salah satu masalah PHEV adalah jika pengemudi selalu mengemudi kurang dari jangkauan listrik dan selalu mengisi baterai, mesin mungkin tidak akan pernah hidup. Hal ini dapat menyebabkan bahan bakar menjadi basi dan beberapa bagian mekanis, termasuk beberapa di dalam mesin, rusak. Oleh karena itu, kendaraan seperti Chevrolet Volt telah dirancang dengan mode tambahan yaitu mode perawatan. Mode ini diaktifkan baik oleh pengemudi maupun secara otomatis untuk mengoperasikan mesin dan genset secara rutin untuk menjaga kesehatan komponen tersebut.

Keamanan PHEV

HEV dan PHEV menangani tegangan tinggi dan sejumlah besar energi dalam kemasan baterai. Sebuah PHEV aman dalam kondisi berkendara normal tetapi keselamatan dapat

menjadi masalah selama pengisian (hujan atau konektor steker basah), perbaikan dan servis kendaraan, serta dalam kecelakaan. Sama seperti sistem HV lainnya, sistem kelistrikan dalam HEV atau PHEV bisa menjadi tidak aman jika salah ditangani. Sistem HV dapat menyebabkan bahaya listrik jika tidak ditangani dengan benar, termasuk sengatan listrik, busur api, dan ledakan. Sistem HV mobil diisolasi dari tanah dan juga diisolasi dari sasis kendaraan. Oleh karena itu, bahaya listrik hanya dapat muncul ketika seseorang memegang terminal positif dan negatif dari sistem HV saat memperbaiki atau menyervis mobil. Namun, PHEV harus dicolokkan ke stopkontak listrik untuk mengisi baterai onboard. Teknik pengisian daya canggih, seperti pengisian daya induktif dan nirkabel, berpotensi mengurangi risiko sengatan listrik selama pengisian daya kendaraan, tetapi juga akan mengurangi efisiensi pengisian daya dan meningkatkan biaya sistem.

Mengisi daya kendaraan selama hari hujan dengan pengisi daya kontak berpotensi menyebabkan kebocoran arus ke orang yang menangani steker. Steker dan kabel yang sudah tua dan aus dapat menyebabkan kebocoran arus. Oleh karena itu, perlu kehati-hatian ekstra saat mengisi daya kendaraan. Arus bocor dapat menyebabkan sengatan listrik, yang menyebabkan kontraksi otot, fibrilasi, dan kerusakan jaringan. Arus 10 mA cukup untuk menyebabkan otot berkontraksi. Seseorang mungkin tidak dapat melepaskan genggaman tangannya jika terkena arus listrik yang cukup. Jika arus yang cukup mengalir melalui dada, otot dada orang tersebut dapat lumpuh dan berhenti bernapas.

Kerusakan yang lebih parah, seperti fibrilasi, dapat terjadi jika detak jantung normal tubuh terganggu. Sistem HV, khususnya tegangan charger dari stop kontak, cukup mengganggu arus otak dan menyebabkan jantung berhenti berdetak. Namun, arus harus mengikuti jalur melalui tubuh (tangan ke tanah, tangan ke tangan) agar fibrilasi terjadi. Jaringan dapat rusak dari kontak yang terlalu lama dengan sengatan listrik karena konsentrasi panas dalam jaringan.

Konektor tegangan tinggi berdaya tinggi dapat mengalami korsleting selama kecelakaan dan menyebabkan percikan api atau panas berlebih, yang dapat menyebabkan kebakaran atau ledakan. PHEV after-market biasanya memiliki baterai yang dipasang di bagian belakang kendaraan. Ini mungkin menjadi masalah selama tabrakan belakang. Paket baterai yang ditambahkan juga menggeser pusat gravitasi kendaraan, yang dapat menyebabkan masalah stabilitas selama pengereman. PHEV yang diproduksi secara massal akan dirancang dengan mempertimbangkan bobot baterai, dan baterai tidak mungkin dipasang di zona kecelakaan. Perangkat pemutus pengaman seperti steker servis dan sekering cepat akan memberikan langkah-langkah keamanan tambahan.

Perhatian ekstra harus diberikan saat mengerjakan PHEV selama pemeliharaan dan perbaikan. Misalnya, sarung tangan berinsulasi diperlukan untuk menghindari sengatan listrik saat menangani sistem HV. Terminal kabel perlu diisolasi jika diputuskan dari titik koneksi aslinya. Alat dan instrumen harus memiliki pegangan berinsulasi saat menangani baterai dan komponen HV lainnya di PHEV. Faktanya, penanganan dan langkah-langkah keamanan di EV, HEV, dan PHEV sama dengan yang digunakan dalam perbaikan listrik rumah.

5.10 TEKNOLOGI V2G (VEHICLE TO GRID)

Vehicle-to-grid, atau V2G, adalah sebuah konsep yang mengacu pada kemampuan kekuatan dua arah dan pertukaran energi antara jaringan listrik dan baterai kendaraan (http://www.ornl.gov/info/ornlreview/v40_2_07/2007_plug-in_paper.pdf). Dengan pengisi daya dua arah, kendaraan dapat digunakan sebagai cadangan daya untuk rumah atau kantor. Dimungkinkan juga untuk menggunakan baterai PHEV untuk mengontrol stabilitas dan mengatur frekuensi dan tegangan jaringan listrik, seperti di jaringan listrik terdistribusi dan dengan pembangkit energi terbarukan.

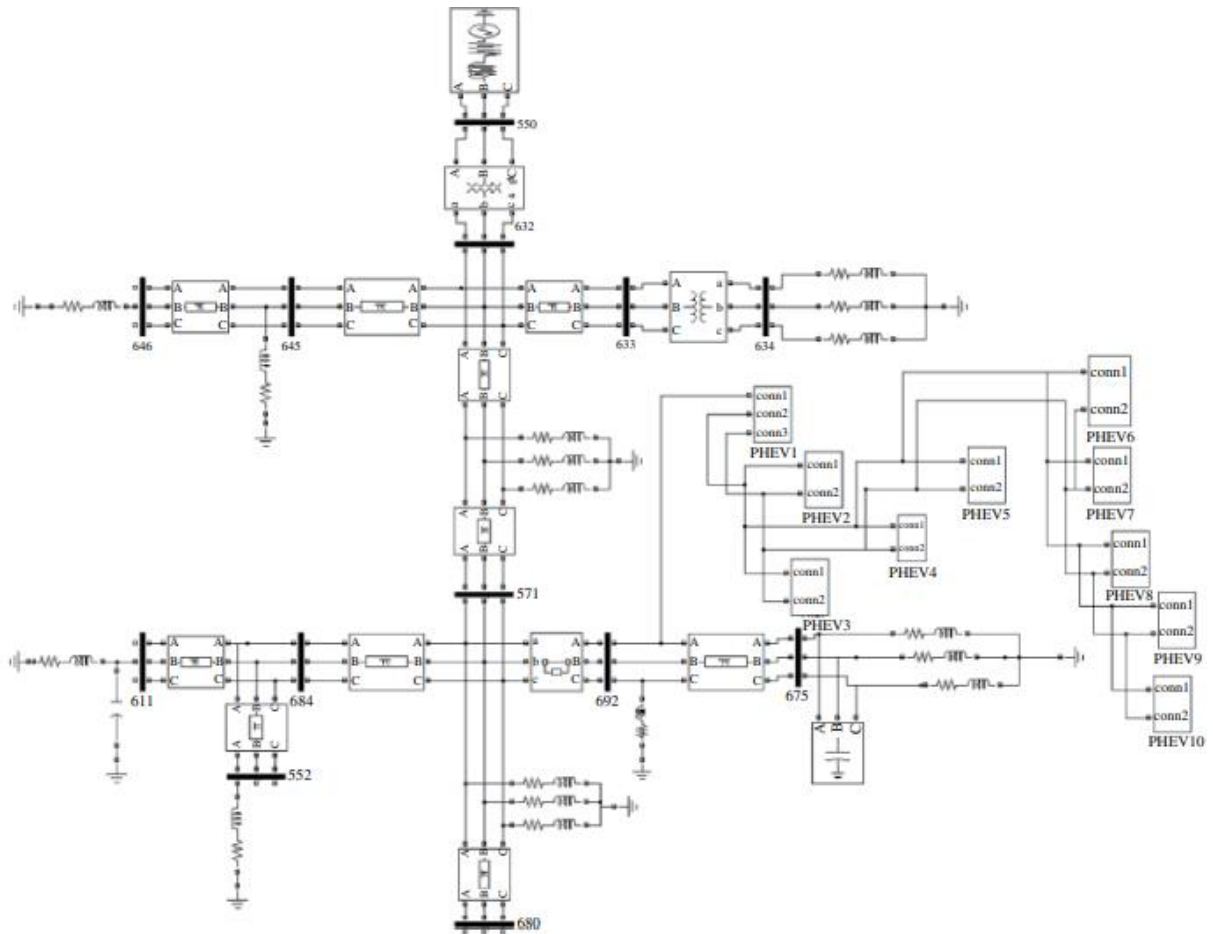
PHEV perlu diisi dari jaringan tenaga listrik. Selama pengisian, pengisi daya akan menghasilkan arus masuk dan harmonik, dan dapat menyebabkan jaringan tidak berfungsi jika tidak dikoordinasikan dengan benar. Dalam arti luas, dan di masa mendatang, ratusan ribu PHEV akan terhubung ke jaringan listrik karena transportasi penggerak listrik berlaku sebagai solusi utama kita untuk menjadi independen dari bahan bakar fosil. Sangat penting untuk mempelajari dampak G2V (*Grid to Vehicle*) pada operasi sistem tenaga dan untuk mempertimbangkan berbagai faktor seperti ukuran baterai, pengisian daya, distribusi PHEV, dan efisiensi.

Untuk mengoptimalkan G2V, penting untuk mengedukasi konsumen tentang konsep “smart grid”. Mereka harus disadarkan akan fakta bahwa pengisian baterai pada malam hari akan meningkatkan efisiensi pembangkitan utilitas, karena pada malam hari listrik dipasok oleh unit pembangkit beban dasar. Studi menunjukkan bahwa bahkan dengan penetrasi 50% PHEV ke dalam sistem tenaga, tidak ada kapasitas pembangkit tambahan dan tidak ada pembangkit listrik baru yang diperlukan. Meskipun ada kekhawatiran dengan PHEV yang membebani jaringan, PHEV, jika dikelola dengan baik, sebenarnya dapat membantu mencegah pemadaman listrik, mengurangi biaya listrik, dan mengakomodasi integrasi lebih banyak sumber daya energi terbarukan.

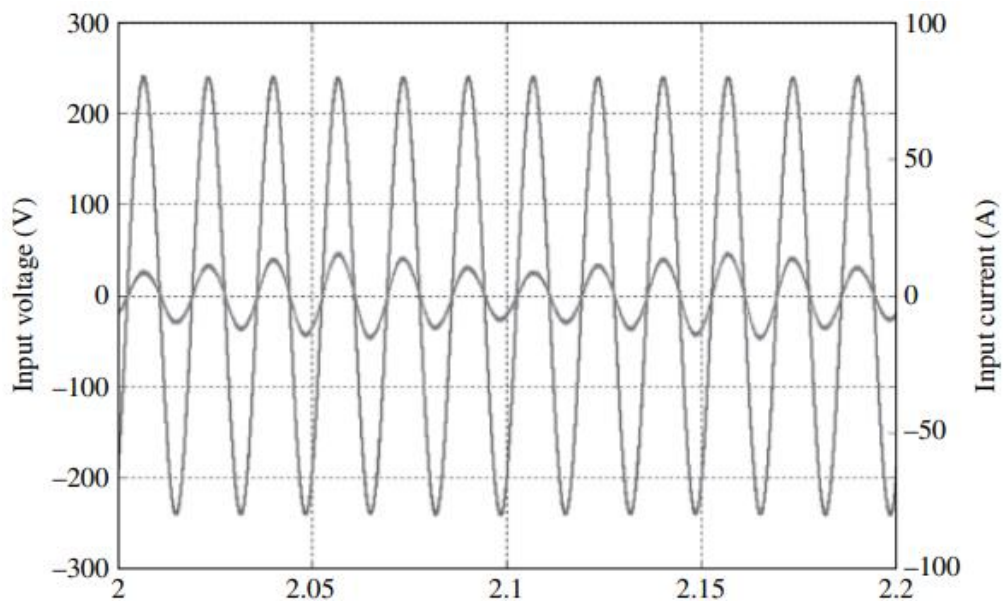
Pengisian Baterai PHEV

Ada tiga tingkat pengisian daya untuk PHEV, tergantung pada tegangan: AC satu fasa 120V, AC satu fasa 240V, dan AC tiga fasa 480V. Tingkat tegangan yang berbeda akan mempengaruhi waktu pengisian, mulai dari jam sampai puluhan menit. Secara umum, ada empat jenis algoritma pengisian untuk PHEV: tegangan konstan, arus konstan, tegangan dan arus konstan, dan pengisian pulsa. Algoritme pengisian yang berbeda ini memerlukan desain pengontrol yang sesuai untuk sirkuit elektronika daya. Pada bagian ini, teknik pengisian pulsa dipelajari secara detail melalui simulasi. Di sini PHEV terhubung ke sistem distribusi contoh. Kasus 10 PHEVs telah dipertimbangkan untuk simulasi di mana PHEVs terhubung ke sistem distribusi IEEE 13-bus. Gambar 5.16 menunjukkan sistem distribusi ini bersama dengan PHEV. Sistem ini relatif kecil dan sarat muatan. Untuk studi ini, PHEV terhubung antara node 692 dan 675 dari sistem distribusi.

PHEV yang terhubung ke sistem distribusi melalui transformator fase tunggal diisi dengan teknik pengisian pulsa. Awalnya baterai diasumsikan memiliki SOC 90%. Baterai diisi oleh konverter DC-DC dengan arus pulsa hingga mencapai 95% SOC. Konverter AC-DC yang terhubung ke sistem distribusi menarik faktor daya kesatuan, yang menunjukkan bahwa PHEV ramah utilitas. Gambar 5.17 menunjukkan faktor daya kesatuan untuk arus dan tegangan input pada sisi sekunder transformator satu fasa. Tegangan input memiliki nilai 240 V rms. Arus referensi dibangkitkan oleh blok *phase-locked loop* (PLL). Tegangan sisi sekunder transformator adalah input ke PLL. Ini pada gilirannya menghasilkan gelombang sinus untuk membentuk arus input referensi untuk pengontrol faktor daya kesatuan.



Gambar 5.16 Sistem distribusi IEEE 13-bus dengan 10 PHEV yang terhubung ke fase A pada node 692

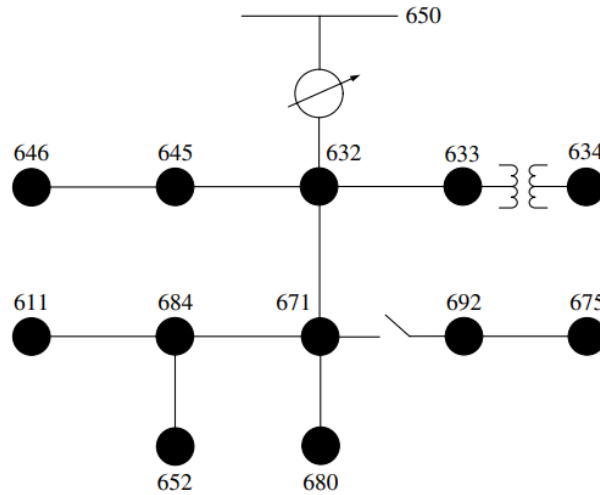


Gambar 5.17 Unity faktor daya untuk arus dan tegangan input selama pengisian

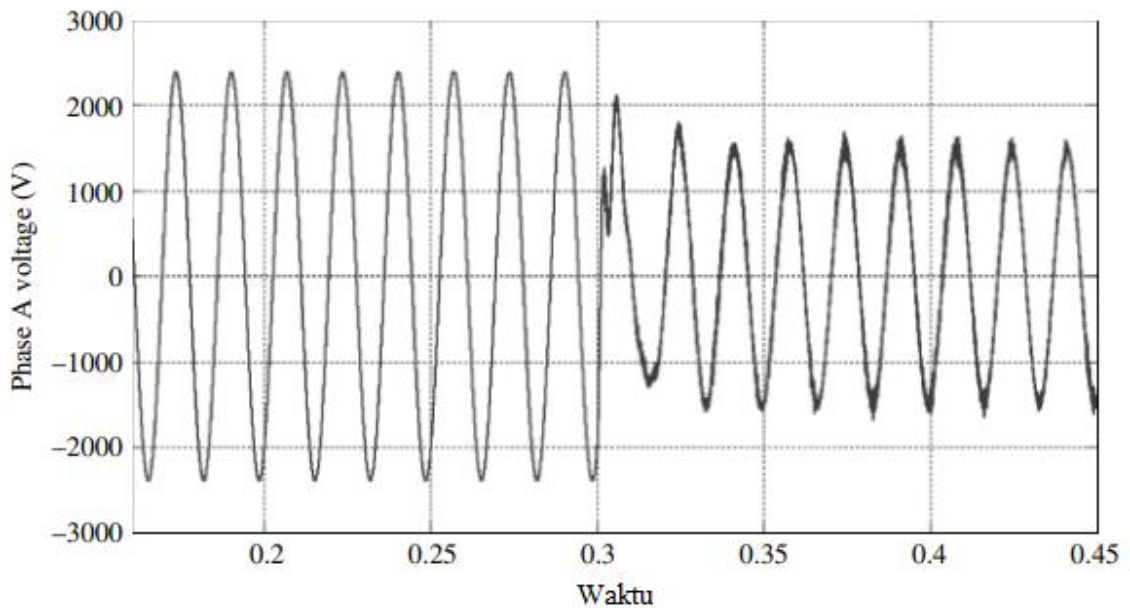
Dampak V2G

Sistem distribusi IEEE 13-bus dengan 10 PHEVs telah disimulasikan untuk mempelajari dampak menghubungkan banyak PHEVs ke sistem tenaga/grid. Kasus yang akan dibahas di sini adalah menghubungkan 10 PHEV ke jaringan pada simpul 692 dari sistem distribusi melalui

transformator step-down dengan nilai 4,16 kV/240 V. Nilai transformator gardu induk adalah 5000 kVA dengan nilai sisi primer tegangan pada 115 kV dan tegangan pengenal sisi kedua pada 4,16 kV. Jenis beban yang terhubung ke sistem distribusi adalah beban tidak seimbang dan beban terdistribusi. Gambar 5.18 menunjukkan diagram satu garis dari sistem distribusi.

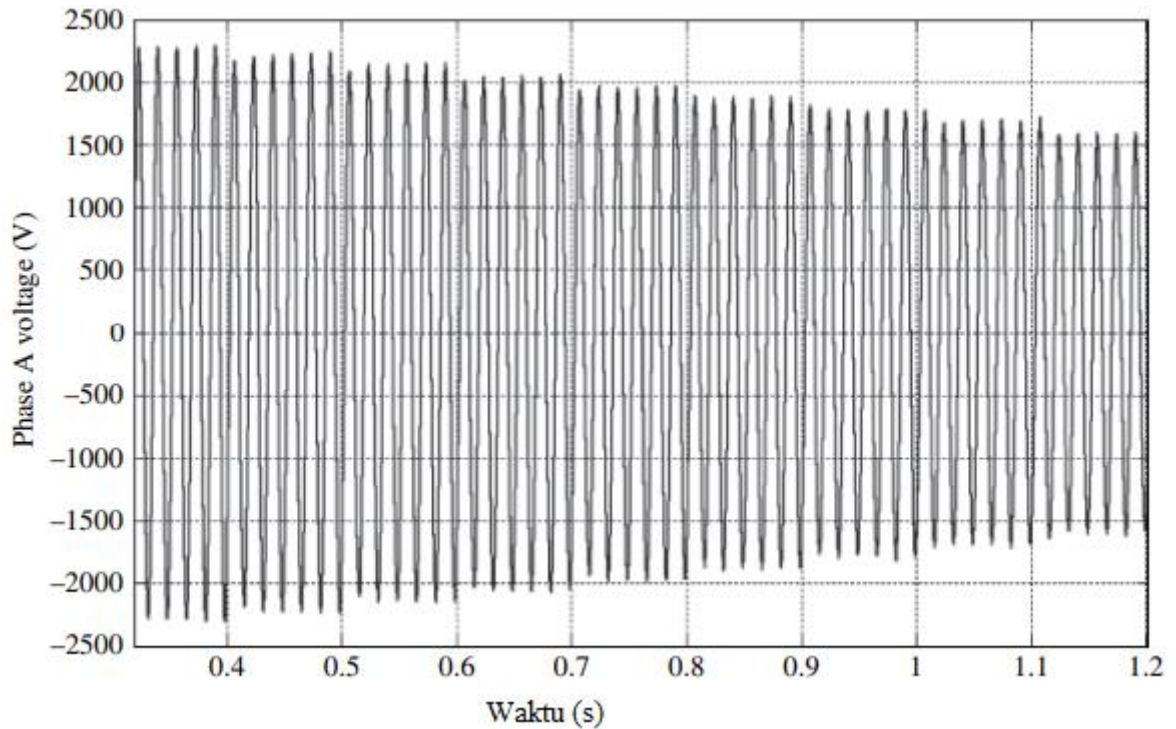


Gambar 5.18 Diagram satu baris sistem distribusi IEEE 13 bus.

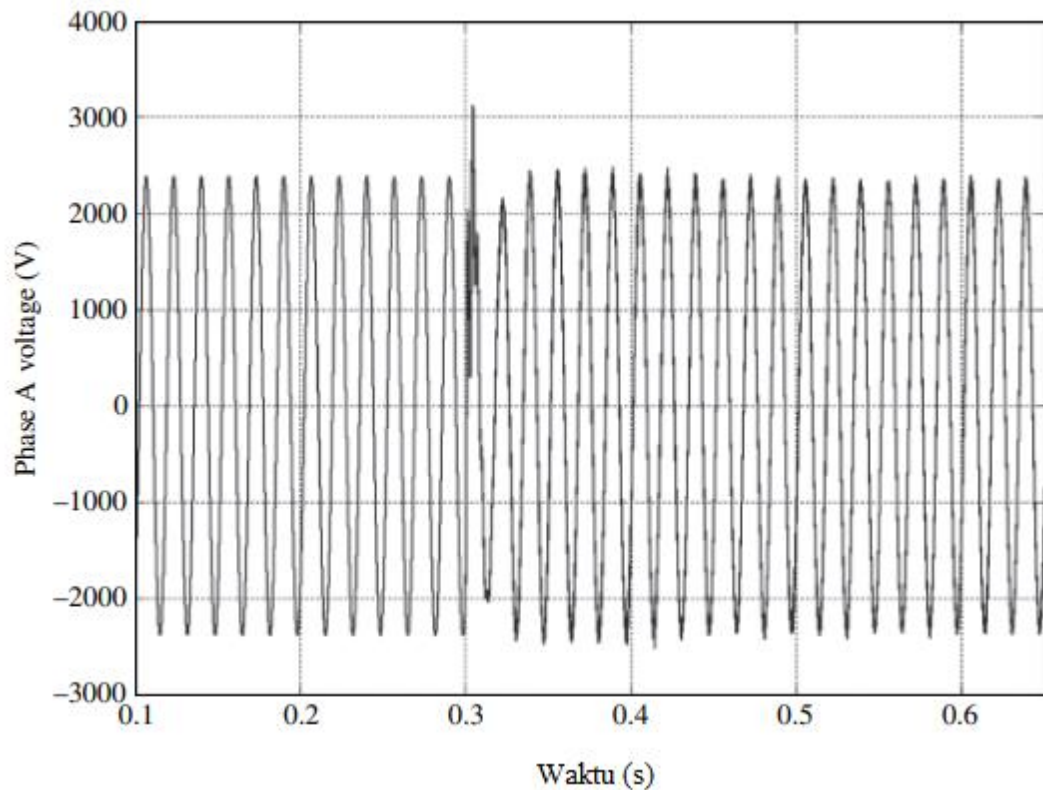


Gambar 5.19 Tegangan Fasa A dengan PHEV terhubung pada $t = 0,3$ detik

Sistem distribusi awalnya tidak memiliki PHEV yang terhubung dengannya. Setelah 0,3 detik, 10 PHEV terhubung untuk mengisi daya baterai onboard. Kajian dilakukan dengan hasil simulasi untuk melihat pengaruh pengisian PHEV terhadap tegangan, arus, dan daya aktif jaringan. Gambar 5.19 menunjukkan tegangan fasa A pada simpul 692. Dari gambar, dapat dilihat dengan jelas bahwa fasa A dibebani berat ketika semua PHEV disambungkan untuk pengisian; akibatnya tegangan pada saluran berkurang. Penurunan tegangan ditemukan 39%, yang tidak dalam batas yang diizinkan. Ketika tegangan turun di bawah nilai yang diizinkan, itu harus dikembalikan ke nilai aslinya. Sebuah bank kapasitor dapat digunakan dalam kasus di mana penurunan tegangan di bawah 20%.



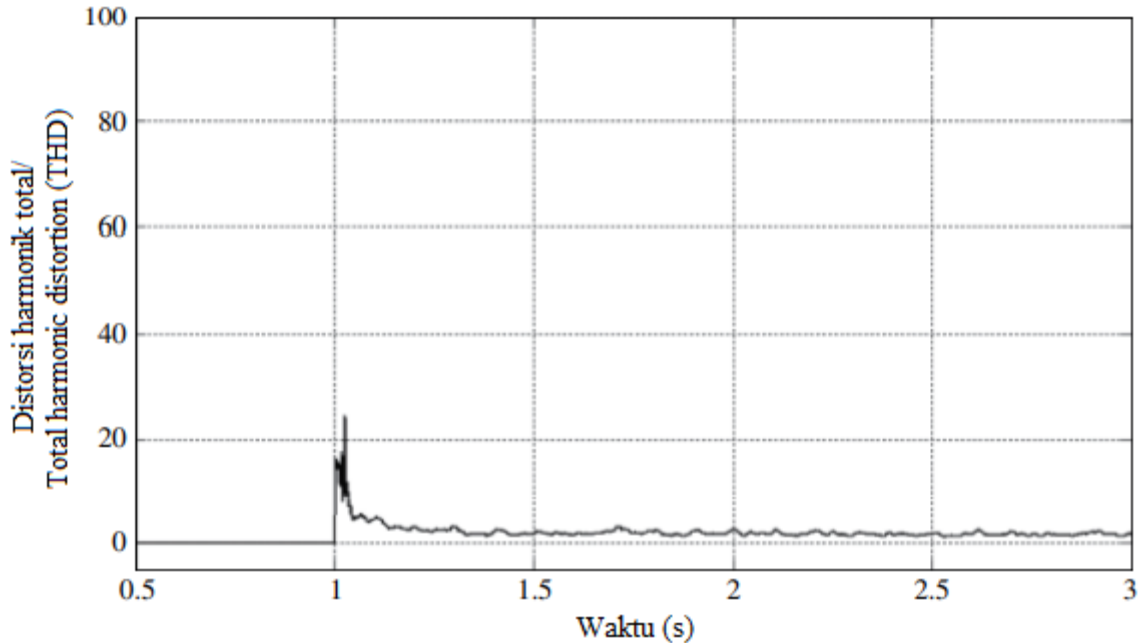
Gambar 5.20 Tegangan fase A untuk pengisian berurutan PHEV



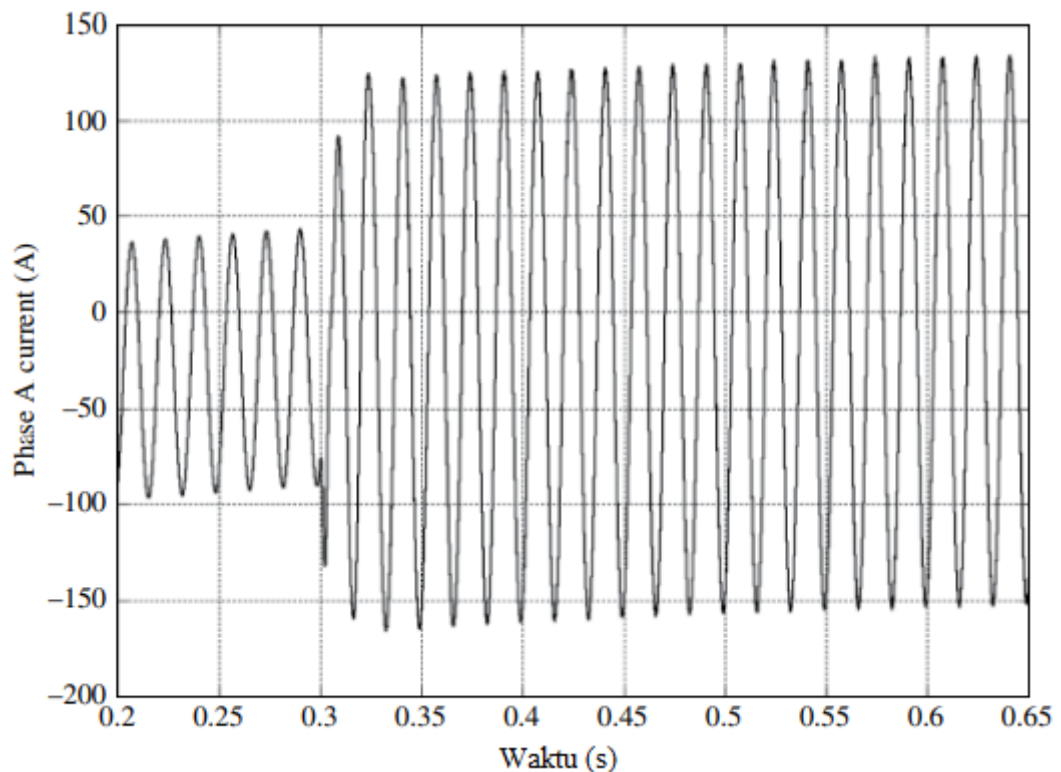
Gambar 5.21 Tegangan fasa A dipulihkan pada $t = 0,3$ detik

Namun, dalam hal ini penurunan tegangan adalah 39%, yang merupakan nilai yang sangat tinggi; pembangkitan daerah lokal akan diperlukan untuk memulihkan tegangan. Pada ujung pembangkitan, kontrol pembangkitan otomatis (AGC) dengan penstabil sistem tenaga (PSS) biasanya digunakan untuk menjaga stabilitas tegangan. Gambar 5.20 menunjukkan bentuk gelombang tegangan untuk pengisian berurutan PHEV, di mana setiap PHEV terhubung setelah 0,1 detik. Profil tegangan sangat ditingkatkan dengan metode pengisian

berurutan. Pada Gambar 5.21, dapat dilihat dengan jelas bahwa setelah 0,3 detik nilai tegangan dipulihkan. Juga, distorsi harmonik total (THD) dari tegangan sisi grid dihitung setelah menghubungkan PHEV. Itu ditemukan menjadi 1,7%, yang jauh di bawah nilai yang diizinkan. Gambar 5.22 menunjukkan grafik THD. Gambar 5.23 menunjukkan arus fasa A pada simpul 692. Dari gambar terlihat jelas bahwa arus meningkat setelah menghubungkan sejumlah besar PHEV pada $t = 0,3$ detik. Gambar 5.24 menunjukkan bentuk gelombang arus untuk pengisian berurutan PHEV.

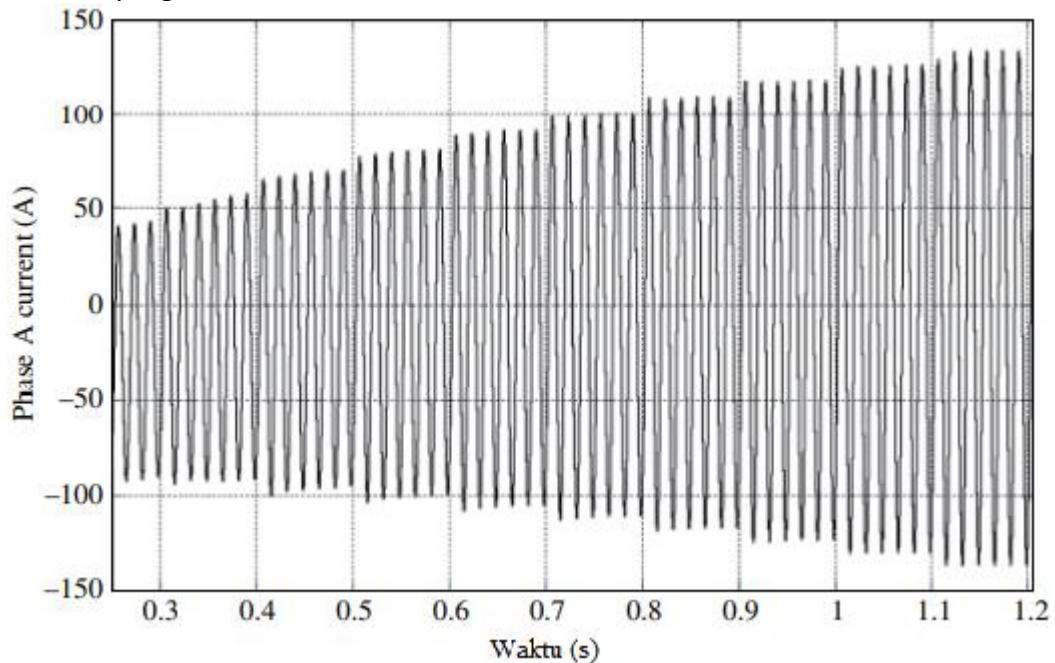


Gambar 5.22 Distorsi harmonik total (THD) dari tegangan input bentuk gelombang

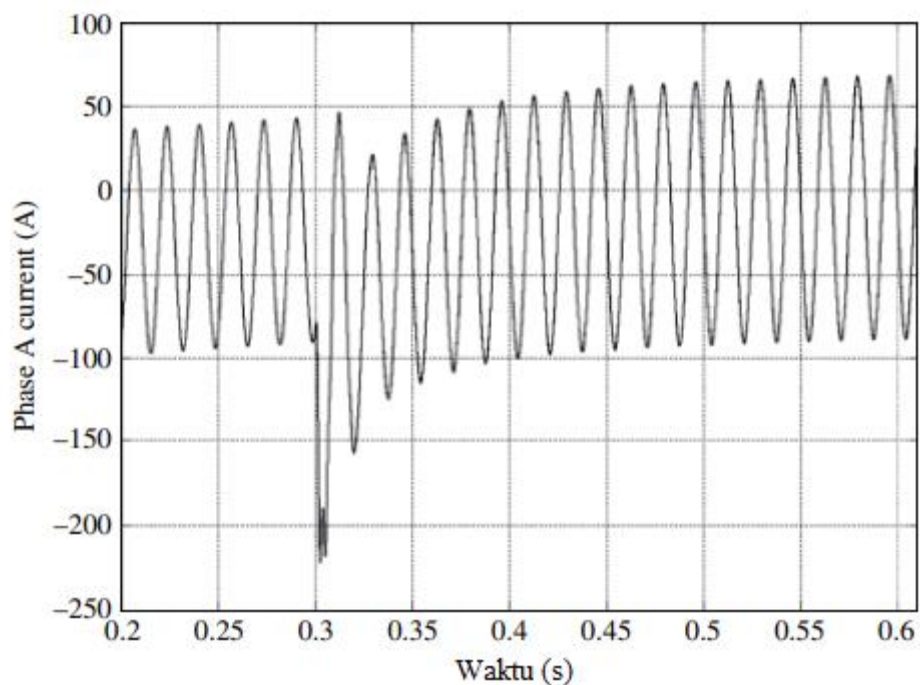


Gambar 5.23 Arus fasa A dan PHEV terhubung pada $t = 0,3$ detik.

Bentuk gelombang arus fase A yang ditunjukkan pada Gambar 5.25 dengan jelas menggambarkan bahwa arus juga dipulihkan karena PSS. Gambar 5.26 menunjukkan daya nyata rata-rata fase A pada simpul 692 dengan dan tanpa PHEV. Dapat dilihat dari gambar bahwa konsumsi daya aktif meningkat ketika sejumlah besar PHEV terhubung untuk pengisian daya pada saat yang bersamaan.



Gambar 5.24 Arus fase A untuk pengisian berurutan PHEV

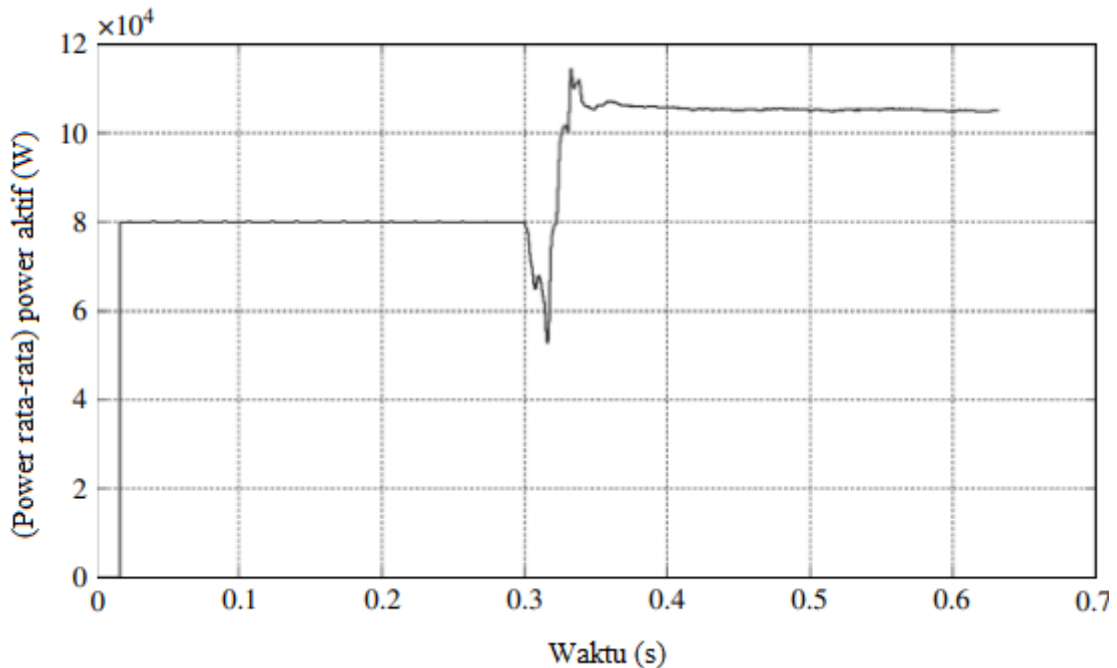


Gambar 5.25 Arus fasa A dipulihkan pada $t = 0,3$ detik.

Konsep V2G

Konsep V2G adalah energi yang tersimpan dalam baterai PHEV dapat digunakan untuk mengirim daya kembali ke jaringan. Teknologi V2G mengandaikan bahwa jika kendaraan baterai (BVs) atau PHEVs tersebar luas, maka mereka dapat memasok daya beban puncak

dengan respon cepat ketika kendaraan diparkir dan terhubung ke stasiun pengisian. Rata-rata sebuah mobil dikendarai selama satu jam per hari dan selama sisa hari itu diparkir.



Gambar 5.26 Daya nyata fase A dan PHEV terhubung pada $t = 0,3$ detik

Secara praktis, jumlah daya yang diambil dari mobil bisa sekitar 10–20 kW. Koneksi V2G dapat menyediakan antarmuka yang cepat antara sistem daya dan sistem penyimpanan baterai PHEV. Sistem dapat menghasilkan daya aktif dan reaktif untuk sistem distribusi melalui kontrol yang tepat dari rangkaian elektronika daya, meskipun baterai hanya menyimpan daya aktif.

Untuk EV dan PHEV, energi yang dapat digunakan untuk V2G dibatasi oleh ukuran baterai terpasang. Aspek unik dari aliran daya di PHEV adalah alirannya dua arah, artinya kendaraan dapat mengambil daya dari jaringan (selama pengisian) dan memberikan daya (selama debit) ke jaringan. Selain konsep V2G, ada juga konsep *vehicle to home*. Keuntungan V2G adalah paralel, yang berarti bahwa di dalam jaringan, mobil apa pun dapat digunakan untuk memberi daya pada rumah mana pun dengan menyalurkan dayanya kembali ke jaringan. Di sisi lain, kendaraan-ke-rumah terbatas dalam arti bahwa satu kendaraan hanya dapat memasok satu rumah.

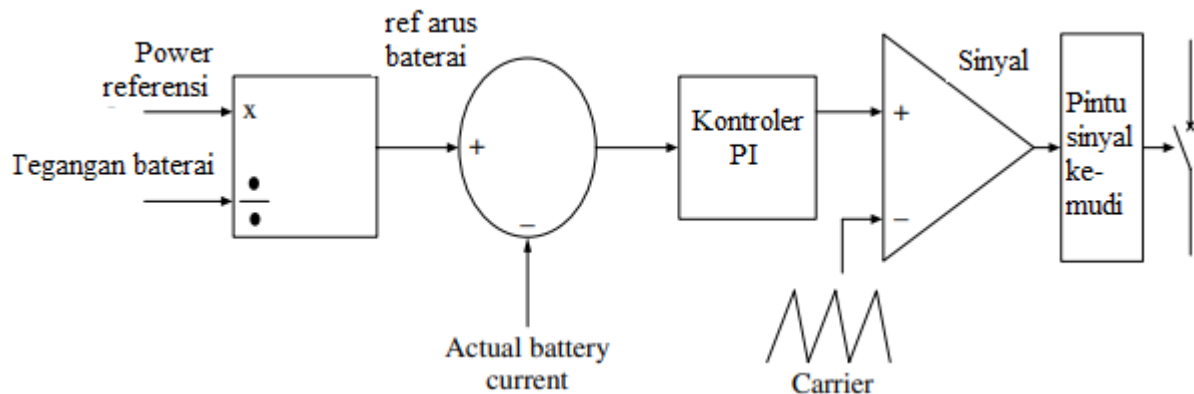
PHEV dapat diperlakukan sebagai sumber energi terdistribusi melalui V2G dan dapat memberikan pengaturan voltase dan frekuensi, cadangan pemintalan, dan manajemen sisi permintaan listrik. Fungsi V2G dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori: layanan lokal dan layanan area luas. Layanan lokal termasuk memasok daya cadangan untuk rumah atau bisnis lokal, pemahatan puncak, dan stabilisasi tegangan atau peningkatan kualitas daya. Layanan area luas mencakup layanan tambahan untuk jaringan. Layanan tambahan adalah layanan tenaga listrik dimana operator jaringan mempertahankan operasi jaringan yang andal.

Keuntungan dari V2G

Ada sejumlah keuntungan memperkenalkan V2G ke dalam sistem tenaga. Beberapa keuntungan disebutkan di bawah ini (<http://www.udel.edu/V2G/docs/V2G-PUF-LetendKemp2002.pdf>) :

- **Meningkatkan keamanan:** Inverter V2G dapat merespons dengan cepat, untuk mengontrol efek gangguan apa pun, dibandingkan dengan governor turbo-generator. Ini akan membantu sistem tenaga menjadi lebih kuat dan mengurangi kerentanan.

- **Meningkatkan keandalan:** Keuntungan menempatkan sistem V2G di mana saja dalam sistem distribusi membuat pasokan cadangan tersedia dalam jarak dekat meskipun mungkin tidak dipasang di lokasi konsumen. Hal ini akan berdampak besar pada keandalan konsumen karena sebagian besar gangguan disebabkan oleh gangguan pada jaringan distribusi.
- **Dampak pada pembangkitan:** Dengan menghubungkan sejumlah besar sistem PHEV atau V2G pada siang hari, daya puncak dapat dikurangi selama periode beban puncak harian. Juga, selama periode beban ringan, PHEV dapat dihubungkan untuk mengisi daya sistem baterai, sehingga memungkinkan generator beban dasar beroperasi secara efisien tanpa perlu membawa cadangan pemintalan dalam jumlah besar.
- **Keuntungan lingkungan:** Menggunakan PHEV dapat mengurangi pencemaran lingkungan. Mereka dapat mempromosikan pengurangan emisi gas rumah kaca dengan secara tidak langsung menggunakan listrik bersih sebagai bahan bakar transportasi.



Gambar 5.27 Strategi kontrol untuk sistem baterai saat mengirim daya kembali ke jaringan

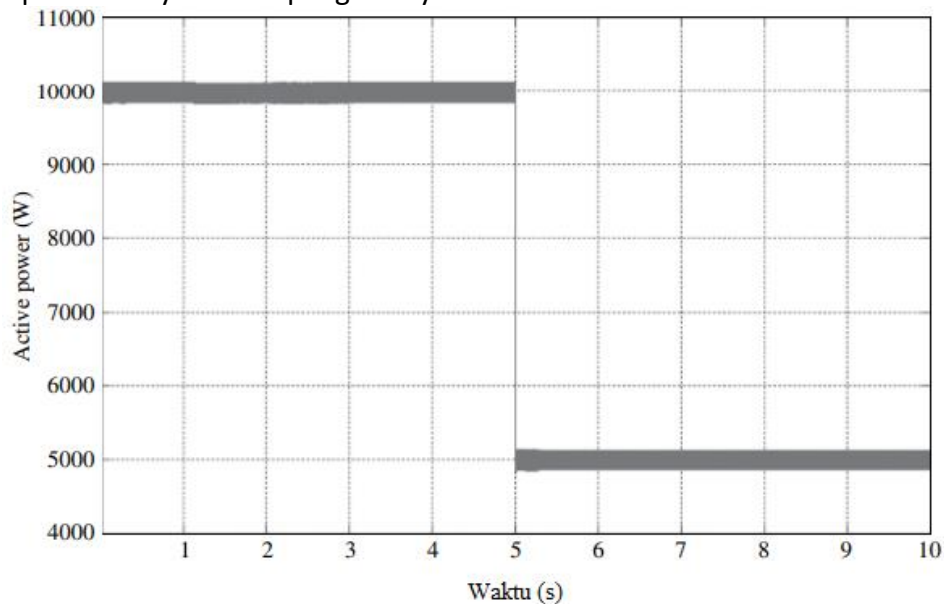
Studi Kasus V2G

Sistem distribusi, seperti yang dibahas sebelumnya, telah dipertimbangkan untuk melakukan simulasi V2G. Tujuannya di sini adalah untuk mempelajari perilaku sistem tenaga karena teknologi teknologi V2G. Dua skenario, yaitu, PHEV untuk pencukuran puncak dan PHEV untuk kompensasi daya reaktif, dibahas dan disimulasikan dengan menggunakan sistem model distribusi IEEE. PHEV terhubung ke fase A dari saluran antara node 692 dan 675 dari sistem distribusi melalui transformator step-down dengan rating 4,16 kV/240 V:

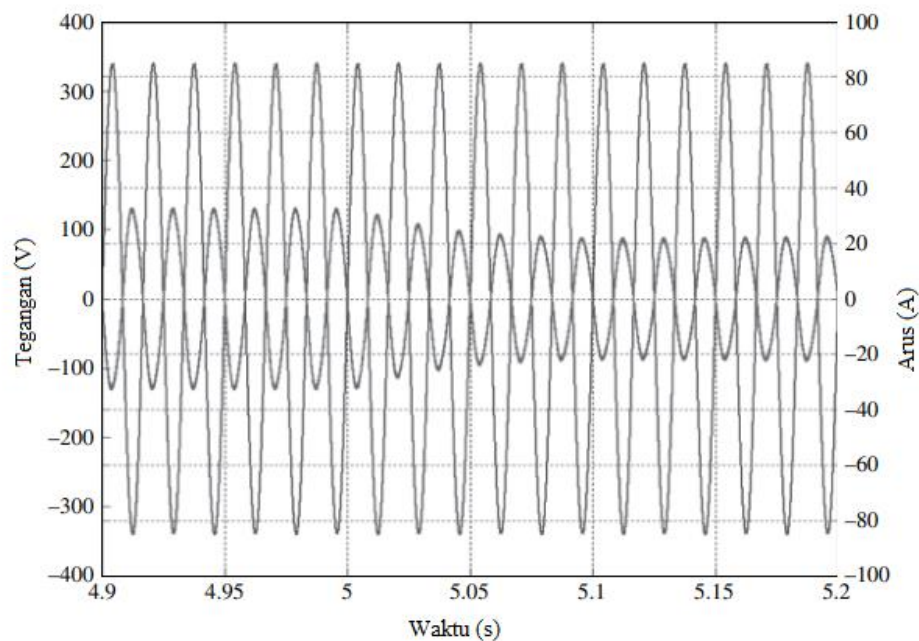
- **Kasus 1:** V2G untuk pencukuran puncak: Jika baterai memiliki daya yang cukup, misalnya, dengan SOC 95%, dan jika PHEV tidak digunakan, tergantung pada kondisi beban jaringan, PHEV dapat mengirim sebagian daya kembali ke jaringan. Pada bagian ini disajikan hasil simulasi untuk koneksi V2G. Strategi kontrol untuk mengirim daya kembali ke jaringan ditunjukkan pada Gambar 5.27. Dari gambar terlihat bahwa daya referensi dibagi dengan tegangan baterai, yang membentuk arus referensi untuk baterai. Ini pada gilirannya dibandingkan dengan arus pemakaian baterai yang sebenarnya dan sinyal kesalahan dihasilkan. Error tersebut kemudian diproses melalui pengontrol PI (proportional integrator) yang membentuk *duty cycle*, yang kemudian dibandingkan dengan gelombang car rier untuk menghasilkan pulsa untuk mengganti IGBT (transistor bipolar gerbang terisolasi) dari konverter. Gambar 5.28 menunjukkan daya aktif yang dikirim kembali ke jaringan. Ketika mobil dicolokkan ke stopkontak, dengan bantuan meteran dan sistem komunikasi, operator jaringan dan konsumen dapat berinteraksi dan memasok daya yang tersedia ke jaringan. Kasus seperti itu digambarkan di sini, di mana awalnya daya yang dipasok oleh PHEV adalah 10 kW; setelah waktu $t = 5$ detik daya yang disuplai berkurang menjadi 5 kW. Gambar 5.29

menunjukkan bahwa arus dan tegangan input berbeda fasa 180° , yang berarti faktor daya kesatuan ketika daya dikirim ke jaringan oleh baterai. Ini menunjukkan sifat pengisi daya yang ramah utilitas. Juga dari gambar dapat dilihat bahwa pada waktu $t = 5$ detik, ketika daya berkurang dari 10 menjadi 5 kW, arus di sisi jaringan juga berkurang.

- **Kasus 2:** Kompensasi daya reaktif: PHEV memiliki potensi untuk bertindak sebagai kompensator daya reaktif untuk sistem tenaga. Kapasitor umumnya digunakan untuk kompensasi daya reaktif dalam jaringan distribusi. Pada Gambar 5.30 dan 5.31 PHEV ditunjukkan sebagai kompensator daya reaktif. Awalnya PHEV terputus, dan beban induktif terhubung ke grid. Dari Gambar 5.30 dapat dilihat bahwa pada sisi sekunder transformator satu fasa pada simpul 692, arus tertinggal dari tegangan. Setelah 0,5 detik pengisi daya PHEV terhubung ke grid, dan dapat dilihat pada Gambar 5.31 bahwa arus lagging menjadi sefasa dengan tegangan. Ini menunjukkan kemampuan kompensasi daya reaktif pengisi daya PHEV.

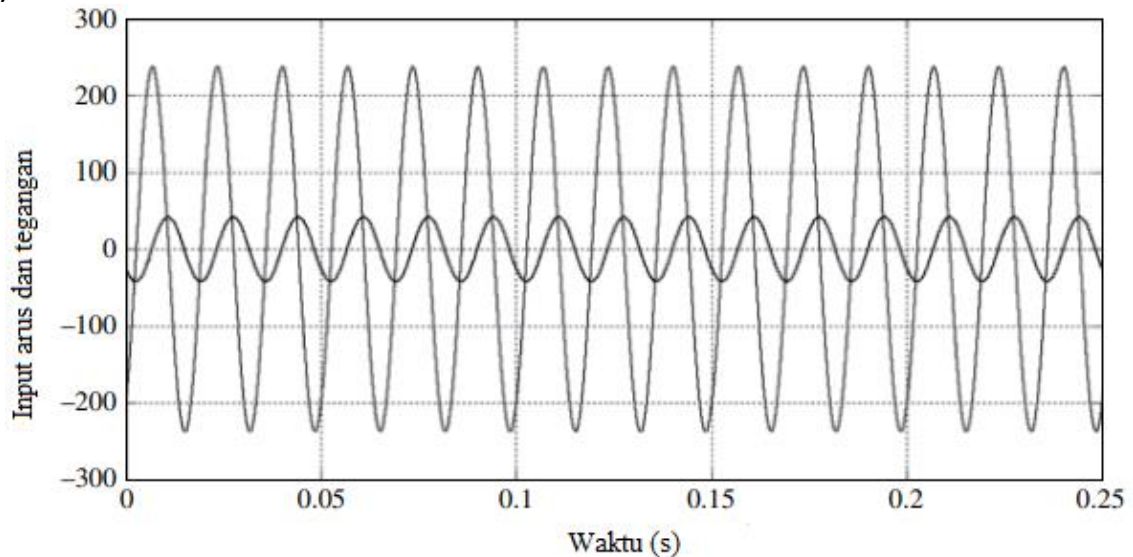


Gambar 5.28 Daya nyata (aktif) yang disuplai oleh baterai.



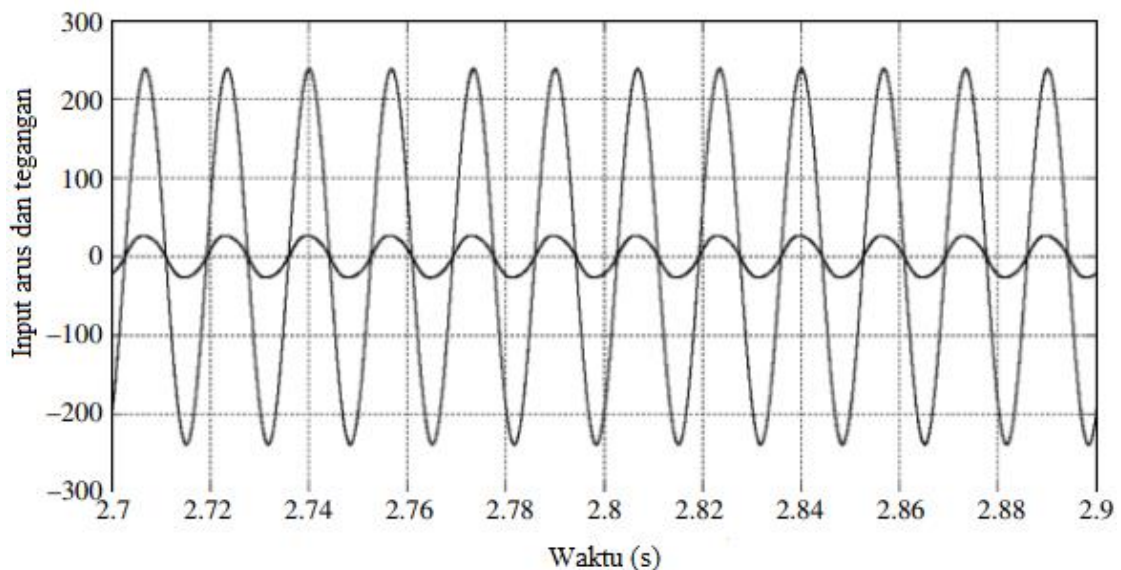
Gambar 5.29 Tegangan input dan arus input 180° keluar fase selama pemakaian.

Pada bagian ini, kita membahas secara singkat konsep G2V dan V2G. Simulasi dilakukan sebagai contoh untuk mempelajari dampak menghubungkan PHEV ke jaringan. Dari hasil terlihat bahwa tegangan dan arus sistem sangat terpengaruh, maka pembangkitan area lokal dengan PSS dapat digunakan untuk mengembalikan sistem ke keadaan normal. V2G sebagian dapat menyelamatkan perusahaan utilitas dari investasi dalam menciptakan kapasitas cadangan untuk memenuhi permintaan listrik selama jam sibuk. Beberapa simulasi disajikan untuk kasus di mana PHEV digunakan untuk pencukuran puncak dan kompensasi daya reaktif.



Gambar 5.30 Tegangan tertinggal saat ini

Sifat pengisi daya PHEV dua arah terbukti bermanfaat selama jam/periode sibuk. Juga, konsep kompensasi daya reaktif menggambarkan fakta bahwa PHEV dapat digunakan sebagai alternatif kapasitor dalam jaringan distribusi. Di sisi lain, kendaraan plug-in juga dapat dirancang untuk menyediakan daya untuk aplikasi siaga, melalui kemampuan V2G-nya.



Gambar 5.31 Kompensasi daya reaktif

5.11 KESIMPULAN

PHEV yang dilengkapi dengan paket baterai 10 kWh akan membutuhkan waktu pengisian 8–10 jam pada stopkontak 110 V/15 A reguler. Pengisian cepat hanya dimungkinkan bila stopkontak yang lebih tinggi tersedia, seperti 110 V/50 A atau 220 V/30 A, yang dapat diisi

ulang baterai 10 kWh dalam waktu kurang dari dua jam. Terakhir, daur ulang baterai PHEV harus direncanakan selama fase pengembangan PHEV, dan siap pada saat penerapan PHEV. Penggunaan baterai yang terus menerus atau tidak tepat di luar masa pakai yang dirancang dapat menyebabkan pelepasan gas beracun, cedera, atau kebakaran. Pembuangan baterai yang tidak tepat dapat menyebabkan kontaminasi tanah, air, dan udara. Lithium dan logam lain dalam baterai lithium-ion dapat diekstraksi untuk kegunaan lain ketika baterai lithium-ion didaur ulang.

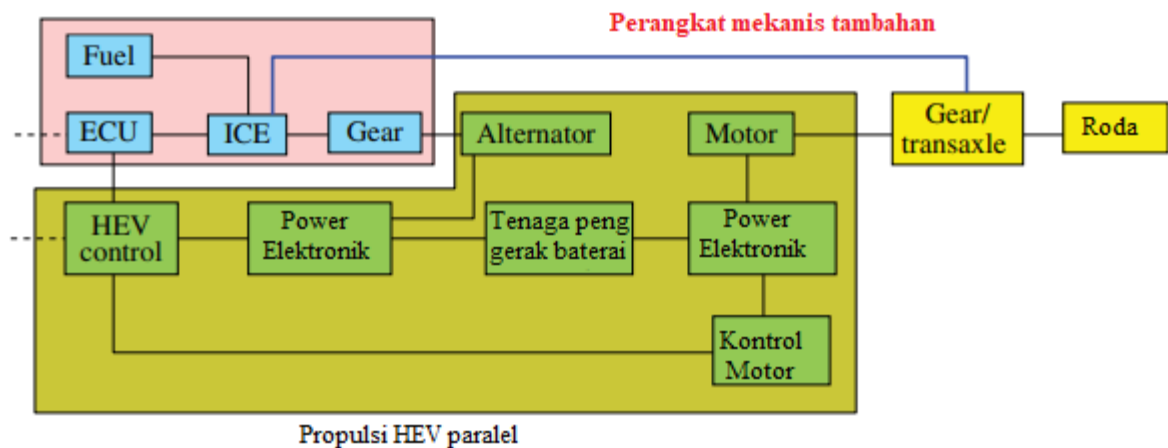
BAB 6 KENDARAAN HIBRIDA KHUSUS

6.1 KENDARAAN HIBRIDA HIDROLIK

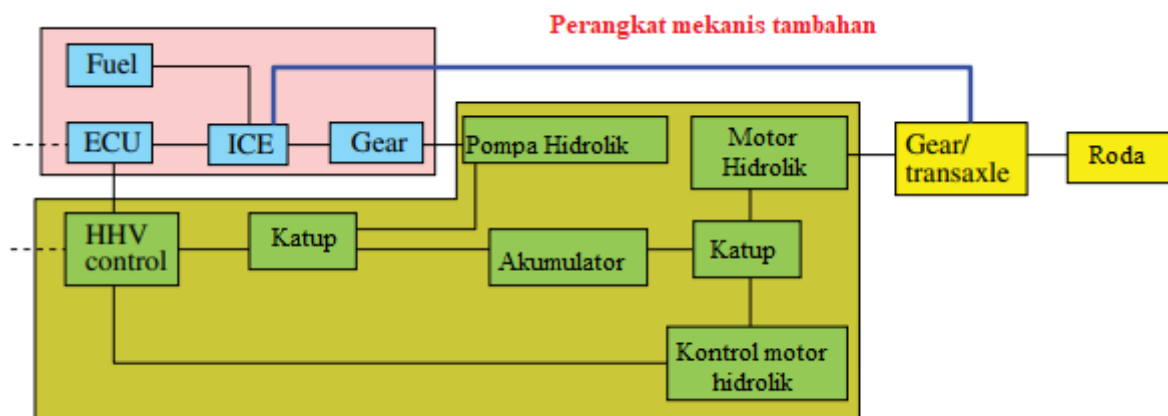
Meskipun buku ini didedikasikan untuk isu-isu yang berkaitan dengan kendaraan listrik hibrida, harus dihargai bahwa kendaraan hibrida non-listrik juga layak dan kadang-kadang dapat lebih bermanfaat daripada kendaraan hibrida listrik. Pada dasarnya, ada beberapa alasan untuk melakukan hybrid sejak awal:

- Kendaraan mesin pembakaran internal (ICE) normal menggunakan mesin pada rentang kecepatan yang lebar dan karenanya efisiensi pada rentang ini bukanlah efisiensi tertinggi yang dapat dicapai untuk mesin tertentu.
- Efisiensi maksimum propulsi ICE sangat rendah, di urutan 30%.
- Sistem penyimpanan energi listrik, termasuk baterai dan motor penggerak listrik, memiliki efisiensi tinggi pada urutan 80-90%.

Jika bukan karena ukuran dan biaya yang besar, yang dikaitkan dengan penyimpanan energi yang rendah per satuan berat atau kemampuan volume baterai, kendaraan listrik murni mungkin akan menggantikan teknologi kendaraan saat ini. Oleh karena itu, opsi berikutnya adalah kendaraan listrik hibrida, di mana ICE dapat digunakan untuk mengisi daya baterai secara optimal, dan penggeraknya dapat dibagi dengan metode listrik.



Gambar 6.1 Diagram tingkat sistem HEV (ECU, unit kontrol mesin; ICE, mesin pembakaran internal). Sumber: Masrur 2008. Direproduksi dengan izin dari IEEE.



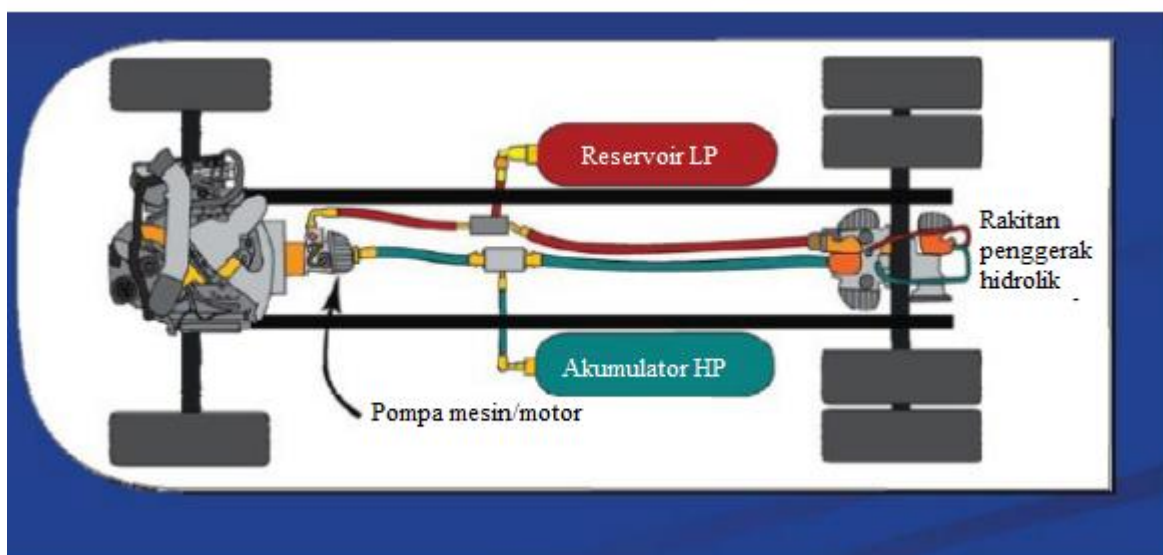
Gambar 6.2 Diagram tingkat sistem HHV. Sumber: Masrur 2008. Direproduksi dengan izin dari IEEE.

Jadi, tentu saja, akan muncul pertanyaan: apakah ada hal lain selain propulsi ICE yang tersedia? Jawabannya adalah sistem hidrolis adalah salah satu pilihan tersebut. Dalam sistem hidrolis, energi disimpan dalam bentuk cairan terkompresi dalam silinder atau dengan cara serupa. Untuk menekan fluida membutuhkan energi, yang berasal dari ICE, untuk mengaktifkan pompa hidrolis. Saat mengekstrak energi, kita dapat menggunakan motor hidrolis. Dengan kata lain, pompa hidrolis dianalogikan dengan generator listrik, motor hidrolis dengan motor listrik, dan cairan bertekanan di dalam silinder ke baterai. Jadi kita melihat bahwa sistem hidrolis memiliki kesetaraan satu-ke-satu dengan sistem kelistrikan. Meskipun biasanya orang menganggap efisiensi teoritis pompa hidrolis, motor, dan penyimpanan menjadi sangat tinggi, sekitar 90%, pada kenyataannya mereka akan mendekati 70%, yang masih jauh lebih tinggi daripada ICE. Oleh karena itu semua item yang disebutkan di atas untuk membenarkan penggunaan sistem hidrolis dalam kendaraan hybrid adalah benar.

Untuk mengilustrasikan sistem hybrid hidraulik, perhatikan diagram pada Gambar 6.1 dan 6.2, memberikan perbandingan sistem hybrid listrik dan hidraulik, berdampingan melalui analogi langsung. Dalam gambar ini, area yang diarsir menunjukkan subsistem khusus untuk ICE reguler dan propulsi listrik (Gambar 6.1) dan subsistem khusus untuk propulsi hidrolis (Gambar 6.2).

Pada arsitektur kendaraan hybrid hidraulik (HHV) yang ditunjukkan pada Gambar 6.2, alternator telah diganti dengan pompa hidrolis, motor listrik telah diganti dengan motor hidrolis, baterai telah diganti dengan akumulator hidrolis, pengontrol HEV telah diganti digantikan oleh pengontrol HHV, dan sistem elektronika daya telah digantikan oleh sistem katup hidrolis.

Gambar 6.3 menunjukkan konfigurasi truk hybrid hidraulik seri penuh. Gambar tersebut konsisten dengan diagram tingkat sistem yang ditunjukkan di atas. Akumulator termasuk akumulator tekanan tinggi (HP) yang mengandung beberapa gas jinak seperti nitrogen. Tekanan dalam silinder ini bisa mencapai 3000–5000 psi (21–35 MPa), sedangkan tekanan silinder tekanan rendah (LP) bisa sangat rendah, hingga beberapa ratus psi. ICE menggerakkan pompa, yang mengambil cairan dari sisi silinder LP, memompanya ke tekanan yang sangat tinggi, dan kemudian mengirimkannya ke sisi silinder HP sehingga energi mekanik pada akhirnya dapat disimpan dalam bentuk gas HP. Untuk menggerakkan roda kendaraan, cairan HP dari sisi silinder HP melewati unit penggerak motor hidrolis. Motor hidrolis mengambil cairan HP, mengubahnya menjadi tenaga mekanik di roda, dan ketika cairan melewati motor hidrolis, tekanannya turun dan dipindahkan ke silinder LP.



Gambar 6.3 Arsitektur fisik HHV. Sumber: US EPA 2004.

Dengan demikian, sirkuit hidrolik selesai. Perhatikan bahwa jumlah penyimpanan energi dalam sistem akumulator hidrolik agak rendah dalam hal Wh/kg. Misalnya, densitas penyimpanan energi dalam akumulator hidraulik dapat sekitar 1,9 Wh/kg, sedangkan baterai dapat memiliki densitas energi 30–240 Wh/kg. Namun, kerapatan daya sistem hidraulik bisa mencapai 2500 W/kg, sedangkan kerapatan daya sistem kelistrikan bisa sekitar 650 W/kg. Oleh karena itu jelas bahwa sistem hibrid hidraulik sangat cocok untuk sistem daya tinggi dan energi yang relatif rendah, terutama di mana semburan pendek akselerasi dan deselerasi daya tinggi terlibat.

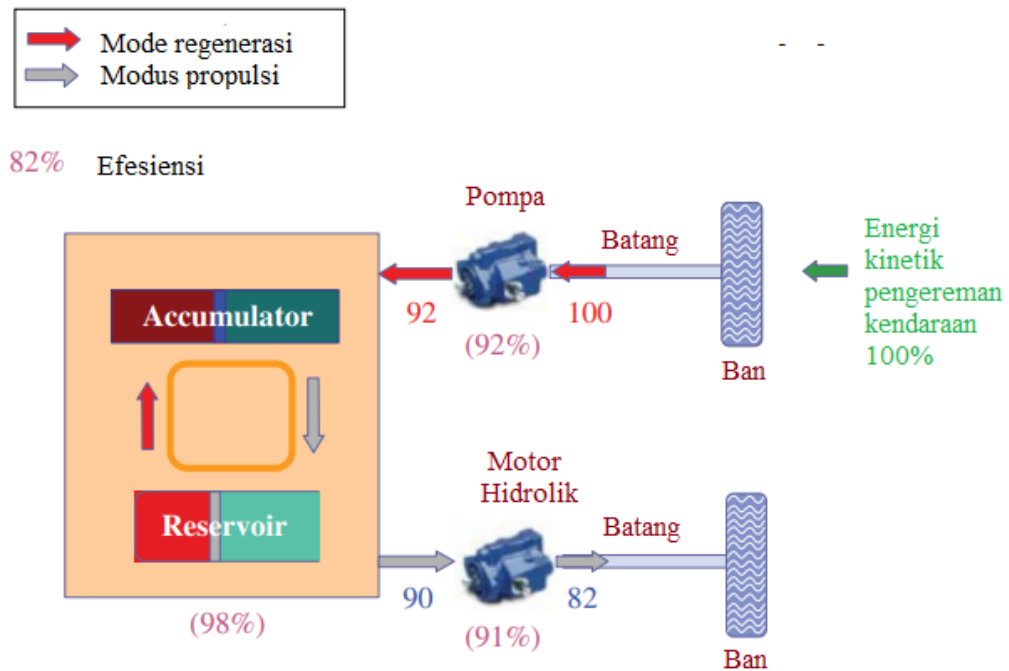
Seperti yang kita lihat dari diskusi sebelumnya, dalam sistem hidraulik hibrid, ICE dapat berjalan di zona efisiensi optimal dari kurva operasinya dan menyalurkan energi melalui sistem hidraulik ke roda. Beberapa skenario dapat terjadi di sini. Jika energi yang dibutuhkan oleh penggerak kendaraan sesuai dengan energi dari ICE, daya yang dihasilkan akan digunakan secara efektif dalam penggerak. Setiap kelebihan energi harus pergi ke akumulator untuk penyimpanan. Energi yang tersimpan di akumulator agak rendah, sehingga opsi ini tidak dapat berlangsung lama. Jika akumulator HP tidak dapat menyimpan energi tambahan, maka perlu mengubah titik pengoperasian mesin agar sesuai dengan kebutuhan propulsi. Namun, bahkan di bawah kondisi terakhir ini, dimungkinkan untuk menghentikan mesin untuk sementara waktu dan menggunakan energi dari akumulator hidrolik untuk mendorong kendaraan. Mesin dapat dihidupkan kembali ketika energi di akumulator hampir habis. Dengan demikian bisa menjadi situasi *stop and go*.

Salah satu manfaat besar memiliki sistem hidrolik untuk propulsi dapat menghilangkan kebutuhan akan sistem transmisi konvensional yang masif. Juga, cairan hidrolik dapat lebih mudah dipindahkan dari satu titik ke titik lain tanpa memerlukan transmisi transmisi yang rumit, hubungan mekanis lainnya, dan sebagainya. Konsep ini juga dapat digunakan pada kendaraan non-hybrid biasa, dimana sistem transmisi konvensional digantikan oleh sistem hidrolik. Tetapi untuk dapat menggerakkan ICE pada titik paling optimalnya memang membutuhkan semacam penyimpanan energi, yang, dalam kasus hibrid hidraulik, adalah akumulator yang mengandung sejumlah gas. Tanpa penyimpan energi, tidak mungkin untuk mewujudkan titik operasi mesin yang optimal, hanya karena tenaga penggerak rata-rata yang dibutuhkan dalam hal itu harus sesuai dengan daya rata-rata yang dihasilkan oleh mesin.

6.2 PENEREMAN REGENERATIF DI HHV

HHV menawarkan manfaat regenerasi saat kendaraan melambat, dan kemampuan untuk menggunakan energi yang ditangkap untuk berakselerasi lagi setelahnya. Seperti disebutkan sebelumnya, energi spesifik sistem hidrolik, atau Wh/kg, relatif rendah dibandingkan dengan baterai. Namun, itu masih bisa cukup baik untuk aplikasi pengereman, karena selama pengereman daya umumnya tinggi, tetapi energi total yang terlibat biasanya rendah. Oleh karena itu penyimpanan hidrolik dapat cukup memadai untuk tujuan ini. Proses regenerasi ditunjukkan pada Gambar 6.4.

Pada Gambar 6.4, dapat dilihat bahwa efisiensi pompa hidrolik dan motor keduanya sedikit di atas 90%. Efisiensi akumulator (HP dan LP bersama-sama) adalah sekitar 98%. Oleh karena itu efisiensi seluruh proses regenerasi adalah sekitar 82%. Dalam situasi lain, untuk truk hibrida, efisiensi regeneratif terbukti 61%, yang masih cukup baik. Salah satu keuntungan dari sistem hidraulik hibrid adalah teknologinya sangat matang dan telah ada selama bertahun-tahun. Komponen yang digunakan dalam sistem hidrolik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.4, memiliki efisiensi yang sangat tinggi. Gambar 6.5 dan 6.6 menunjukkan beberapa komponen hidrolik tipikal yang digunakan dalam HHV.



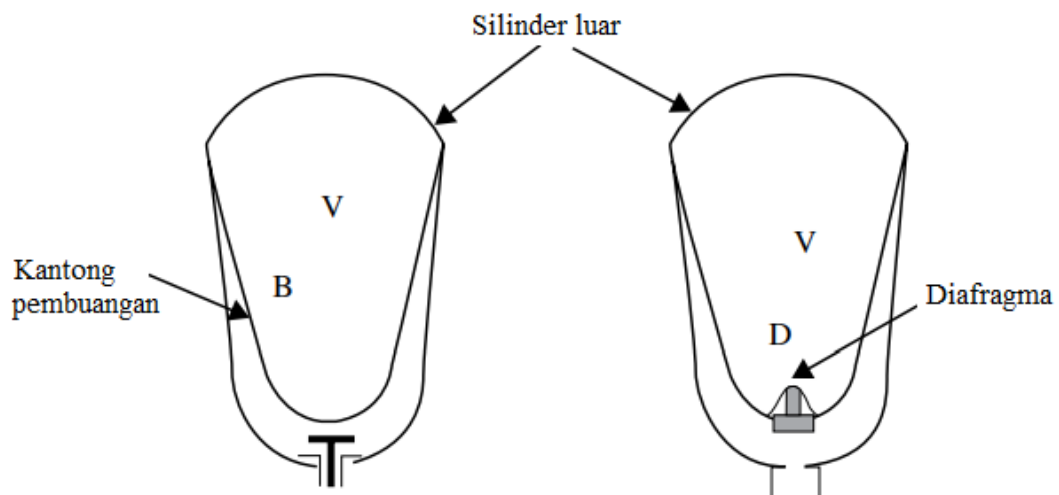
Gambar 6.4 Distribusi efisiensi pengereman regeneratif pada HHV. Sumber: US EPA 2004.



Gambar 6.5 Motor hidrolis sumbu bengkok. Sumber: Direproduksi dengan Courtesy of Bosch-Rexroth.

Gambar 6.5 adalah motor hidrolis sumbu bengkok dari Bosch-Rexroth. Tekanan gas nominal di pintu masuk bisa lebih dari 5000 psi, kecepatan maksimum bisa 4500 rpm, dan torsi pada 5100 psi bisa 371 lb-ft (503 Nm). Informasi ini untuk motor tertentu. Panjang unit, tidak termasuk poros roda gigi, adalah sekitar 5,15 inci (13,1 cm). Pompa hidrolis juga memiliki penampilan dan karakteristik yang serupa. Beberapa akumulator hanyalah sebuah silinder dengan beberapa katup untuk mengeluarkan atau memasukkan gas dengan mekanisme keamanan yang sesuai. Jenis akumulator lainnya bisa seperti jenis kantong pembuangan, di mana kantong pembuangan fleksibel terendam dalam cairan atau gas, dan diberi tekanan untuk mengembang. Ini adalah ekspansi kantong pembuangan yang menekan gas di akumulator.

Ada beberapa mekanisme kerja akumulator. Dalam skema hidro-pneumatik, cairan mendorong piston, yang kemudian mendorong gas yang disimpan dalam silinder dan memampatkannya, di mana energi disimpan. Piston memisahkan cairan dari gas. Jenis akumulator lainnya adalah jenis diafragma.



Gambar 6.6 Akumulator kantong pembuangan dan diafragma

Diagram beberapa akumulator ditunjukkan pada Gambar 6.6, yaitu akumulator diafragma dan kantong pembuangan. Diagram di sebelah kanan pada Gambar 6.6 menunjukkan akumulator diafragma. Di sini diafragma D didorong oleh beberapa cairan dari bawah, yang kemudian mengubah volume V gas di bagian atas D, yaitu antara diafragma dan silinder itu sendiri. Diagram di sebelah kiri menunjukkan akumulator kantong pembuangan di mana kantong pembuangan B berisi gas (dengan volume V), yang dapat dikompresi. Ketika cairan memasuki silinder dari bawah, kantong pembuangan dapat mengembang atau berkontraksi, sehingga energi dapat disimpan dalam gas ketika dikompresi dan dikeluarkan dari gas ketika diekspansi. Energi ditransfer melalui cairan itu sendiri

6.3 HEV OFF-ROAD

Sebelum membahas HEV off-road, perlu diulas sedikit tentang kendaraan off-road secara umum. Kendaraan off-road adalah setiap kendaraan darat yang pada umumnya tidak menggunakan jalan normal untuk pengoperasiannya. Contoh kendaraan tersebut meliputi kendaraan dan peralatan konstruksi, kendaraan pertambangan, dan kendaraan pertanian seperti traktor. Beberapa kendaraan militer juga termasuk dalam kategori ini. Kendaraan off-road yang akan dibahas dalam bagian ini memiliki siklus penggerak dan tuntutan kecepatan-torsi yang sangat berbeda dibandingkan dengan mobil biasa.

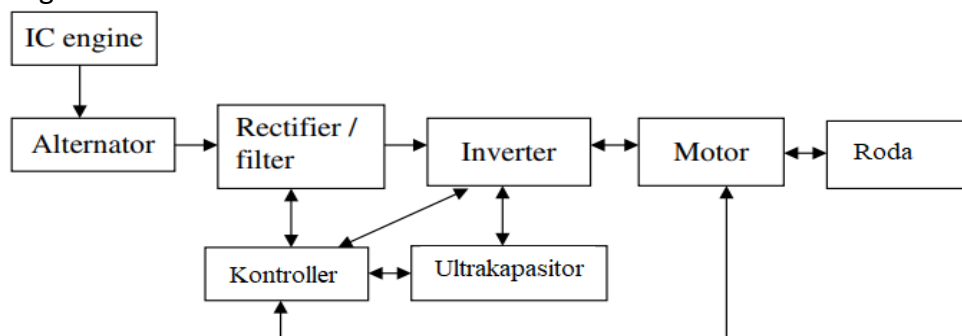
Kendaraan konstruksi dan pertambangan, khususnya, beroperasi baik di bawah kondisi stasioner atau pada kecepatan yang relatif rendah. Sangat sering mereka juga beroperasi di medan yang kasar. Jadi sistem yang sangat kasar diperlukan untuk kendaraan yang sukses. Masalah emisi tidak menjadi perhatian utama, karena sifat kendaraan ini. Persyaratan utama kendaraan ini adalah tenaga dan torsi yang sangat tinggi. Namun, belakangan ini, baik ekonomi bahan bakar maupun pengendalian polusi menjadi fokus untuk menciptakan lingkungan yang lebih hijau dan, tentu saja, untuk operasi ekonomi. Oleh karena itu kemungkinan menggunakan teknologi hybrid sedang dipertimbangkan.

Diskusi kualitatif tentang persyaratan torsi-kecepatan untuk kendaraan ini dan bagaimana mencapainya dapat dilakukan pada titik ini. Mendapatkan torsi yang sangat tinggi dari ICE biasa dapat menyebabkan sistem transmisi atau gearbox yang sangat besar, dan seterusnya. Untuk meringankan kesulitan ini, di masa lalu, sistem hidraulik telah digunakan. Sistem hidraulik beroperasi dengan terus menjalankan ICE, yang merupakan sistem berkecepatan tinggi dengan torsi yang relatif rendah. ICE ini digunakan untuk menggerakkan pompa hidraulik, yang dapat menggerakkan motor hidraulik. Menggunakan cairan yang tidak dapat dimampatkan dapat mencapai tekanan yang sangat tinggi, yang dapat ditransmisikan

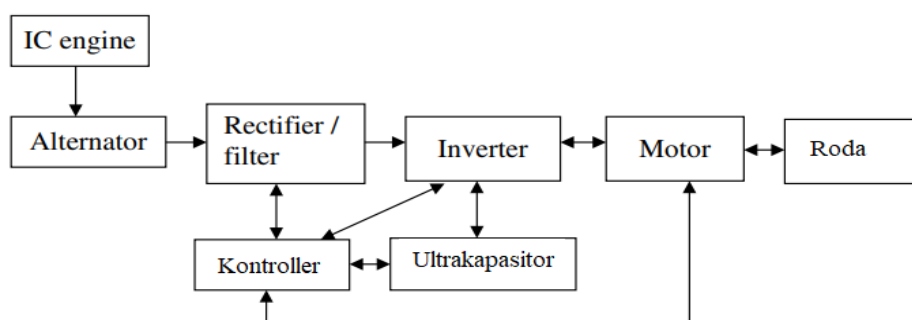
ke ujung penggerak. Namun, telah ditemukan bahwa sistem hidrolik, meskipun teknologinya sangat matang, dapat menyebabkan masalah tertentu. Misalnya, dalam sistem perpipaan yang kompleks, pipa dapat, di bawah kondisi medan yang kasar, menyebabkan kebocoran cairan. Hal ini dapat menyebabkan penurunan kinerja dan akhirnya gagal. Salah satu kelemahan sistem hidrolik adalah kerugian parasit tertentu tidak dapat dihindari. Selain itu, ICE tidak beroperasi pada titik efisiensi optimumnya sepanjang waktu karena sifat permintaan kecepatan torsi beban.

Oleh karena itu, akhir-akhir ini berbagai produsen kendaraan berat off-road, seperti industri pertambangan dan peralatan konstruksi, sedang berkonsentrasi untuk mengubah sistem mereka menjadi jenis penggerak hibrida listrik. Kata “hybrid” di sini mungkin memiliki konotasi yang sedikit berbeda dengan HEV biasa di sektor otomotif. Dalam aplikasi kendaraan yang sangat berat seperti pertambangan dan konstruksi, kita mencatat sebelumnya bahwa kendaraan ICE murni dapat menghasilkan sistem transmisi yang sangat besar yang mampu menyediakan torsi dan kebutuhan daya. Situasi ini dapat dikurangi dengan menggunakan ICE untuk menggerakkan generator atau alternator, yang pada umumnya akan menghasilkan sistem tegangan variabel kecepatan (maka frekuensi variabel) dan variabel (amplitudo). Frekuensi variabel ini, tegangan amplitudo variabel diubah menjadi tegangan DC variabel dan akhirnya nilai konstan menggunakan penyearah/regulator.

Tegangan DC konstan diterjemahkan ke dalam sistem AC tiga fase yang amplitudo, frekuensi, dan fasenya dapat dikontrol secara elektronik melalui penggunaan konverter elektronika daya yang sesuai. Lebih tepatnya, tegangan variabel sesaat sebagai fungsi waktu dapat dibangkitkan dengan menggunakan elektronika daya. Tegangan tiga fasa ini kemudian dapat menggerakkan motor listrik untuk menangani beban kendaraan. Perhatikan bahwa sistem ini dapat menghindari penggunaan baterai. Meskipun baterai merupakan elemen penyimpanan vital dalam HEV biasa, pada kendaraan off-road yang sangat besar, baterai dapat memerlukan sistem yang sangat besar dan mahal dan oleh karena itu mungkin lebih baik untuk melakukannya tanpa baterai. Dengan kata lain, sistem di atas sangat mirip jika tidak identik dengan sistem lokomotif diesel-listrik.



Gambar 6.7 Arsitektur tingkat sistem dari sistem kendaraan off-road hybrid tanpa baterai.



Gambar 6.8 Arsitektur tingkat sistem dari sistem kendaraan off-road hybrid dengan ultrakapasitor untuk penyimpanan.

Berbagai arsitektur kendaraan off-road dimungkinkan, dua di antaranya ditunjukkan pada Gambar 6.7 dan 6.8. Paragraf sebelumnya menggambarkan arsitektur sistem pada Gambar 6.7. Perhatikan bahwa motor penggerak dalam aplikasi ini dapat berupa motor apa saja, tetapi untuk aplikasi penambangan yang sangat berat, motor induksi ternyata lebih kuat dan cocok untuk lingkungan yang kasar, daripada motor magnet permanen. Motor tersebut kemudian digunakan untuk menggerakkan roda kendaraan. Umumnya, kendaraan off-road dengan berat lebih dari 150 t memiliki dua gandar, dan dua motor digunakan untuk menggerakkannya.



Gambar 6.9 Kendaraan pertambangan yang khas: (a) Caterpillar; (b) komatsu; (c) Liebherr.
Izin : (a) Caterpillar; (b) komatsu; c.Wikimedia.

Meskipun dalam arsitektur di atas tidak ada baterai, pada prinsipnya baterai dapat digunakan untuk penyimpanan energi, tetapi ukurannya akan sangat besar untuk aplikasi semacam itu. Dalam beberapa aplikasi bank ultrakapasitor juga dapat digunakan. Ultracapacitor biasanya memiliki daya spesifik yang tinggi, yaitu dapat memberikan semburan input daya yang sangat tinggi ke perangkat, tetapi durasinya akan sangat singkat dan karenanya energi yang terlibat akan menjadi kecil. Selama perlambatan kendaraan atau beberapa bagian yang bergerak, energi mekanik dapat diubah menjadi energi listrik dan disimpan dalam ultrakapasitor. Energi yang tersimpan kemudian dapat digunakan untuk mempercepat kendaraan di lain waktu. Dengan cara ini, regenerasi dapat dimanfaatkan untuk menghemat energi, sehingga menghasilkan efisiensi sistem dan penghematan bahan bakar yang lebih baik. Arsitektur untuk sistem seperti itu dengan ultrakapasitor ditunjukkan pada Gambar 6.8.

Dalam arsitektur di atas, jika kita ingin menggerakkan roda kendaraan, energinya bisa berasal dari ultrakapasitor atau dari ICE, yang menggerakkan alternator, dan kemudian

penyearah menghasilkan arus searah. Tegangan DC baik dari penyearah atau ultraca pacitor dapat diterjemahkan ke tegangan AC yang tepat untuk menggerakkan motor listrik. Sistem akan memiliki sakelar yang diperlukan, yang dapat memilih antara ultrakapasitor dan alternator/penyearah. Saat kendaraan melambat, pengontrol memerintahkan ultra kapasitor, inverter, dan alternator/penyearah untuk berkoordinasi dengan baik, sehingga energi mengalir dari sisi motor (dengan motor yang beroperasi sebagai generator) ke ultrakapasitor, melalui inverter.

Sangat menarik untuk melihat beberapa ukuran khas yang terlibat dalam kendaraan off-road yang ditunjukkan di atas. Sebagai contoh:

- Model engine Caterpillar Cat 3524B EUI memiliki daya kotor 2648 kW (3550 hp) dan berat kerja alat berat kotor 623.690 kg (1.375.000 lb) (<http://catsays.blogspot.com/2005/01/caterpillar-797b-mining-truck.html>).
- Satu model Komatsu memiliki tenaga kuda kotor 2611 kW (3500 hp) dan berat 505.755 kg (1.115.000 lb).
- Satu model Liebherr memiliki tenaga kuda kotor 2722 kW (3650 hp) pada 1800 rpm dan berat 592 ton (652,5 t).
- Kendaraan yang disebutkan di atas berukuran besar, seperti terlihat dari spesifikasi di atas dan gambar yang ditunjukkan pada Gambar 6.9

Dari kendaraan yang ditunjukkan pada Gambar 6.9, Caterpillar menggunakan powertrain konvensional, sedangkan Komatsu dan Liebherr menggunakan powertrain hybrid (HEV). Caterpillar juga kini bergerak menuju platform HEV. Dari lembar informasi Komatsu, sistem memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Arus bolak-balik	
Alternator	GTA-39
Blower in-line impeller ganda	453 m ³ /mnt (16.000 cf/m)
Kontrol	Sistem kontrol torsi AC
Roda bermotor	GDY106 AC motor traksi induksi
Perbandingan	32.62 : 1
Kecepatan (maksimum)	64,5 km/jam (40 mph)

**Penulis sangat berterima kasih kepada tim teknis Komatsu yang memberikan informasi tambahan tentang item ini.*

Meskipun detail yang tepat dari sistem biasanya merupakan informasi kepemilikan, beberapa kesamaan dapat diperhatikan di antara mereka, dan gagasan yang masuk akal tentang ukuran komponen dapat diperoleh, berdasarkan informasi di atas. Misalnya, motor traksi pada model Komatsu dan Liebherr adalah motor induksi. Alternator di kendaraan Komatsu (dibuat oleh GE) memiliki sikat, meskipun generator tanpa sikat juga dapat digunakan. Pengurangan rasio roda gigi dari motor ke roda ada di urutan 28–42. Tenaga mesin kotor kendaraan adalah sekitar 2,6–2,7 MW. Inverter yang digunakan untuk menggerakkan motor umumnya menggunakan transistor gerbang bipolar terisolasi (IGBT) untuk sakelar. Dengan asumsi efisiensi alternator dan inverter berada pada urutan 95% masing-masing, input daya motor adalah sekitar $2,6 \times 0,95 \times 0,95 = 2,35$ MW. Untuk Komatsu 930E-4SE, daya perlambatan adalah 4 MW jangka pendek dan 3 MW kontinu. Jadi masuk akal untuk mengasumsikan bahwa motor induksi pada orde setengahnya dapat digunakan, dengan asumsi dua motor untuk sistem, dengan satu di setiap poros. Oleh karena itu masing-masing motor induksi ini dapat dianggap sekitar 1,5 MW. Kendaraan pada kecepatan maksimum mencapai putaran roda sekitar 84 rpm (dengan asumsi diameter ban sekitar 4 m). Dengan rasio gigi sekitar 32,62, kecepatan motor harus sekitar 2700 rpm. Secara nominal, ini mengarah ke sekitar 3000 rpm, yang, pada 50 Hz, mengarah ke motor induksi empat kutub. Motor seperti itu adalah standar umum untuk aplikasi semacam itu.

Mengenai peringkat motor untuk truk penambangan, peringkat tegangan tautan DC nominal motor ini bisa sekitar 2600 V, yang mengarah ke sekitar 1600 V input line-to-line rms ke motor tiga fase. Untuk motor 1,2 MW, ini setara dengan sekitar 541 A AC rms, dengan asumsi faktor daya sekitar 0,8. Dalam hal ini, arus tautan DC akan menjadi $1,2 \text{ MW}/2600 = 461 \text{ A DC}$ per motor. Semua ini mengasumsikan tidak ada kerugian tambahan dalam sistem; angka-angka hanya memberikan gambaran tentang nilai tegangan dan arus. Beberapa sistem menggunakan teknologi IGBT 3,3 kV untuk menggerakkan motor ini, yang konsisten dengan peringkat di atas yang ditunjukkan untuk motor.

6.4 EXCAVATOR HIBRIDA

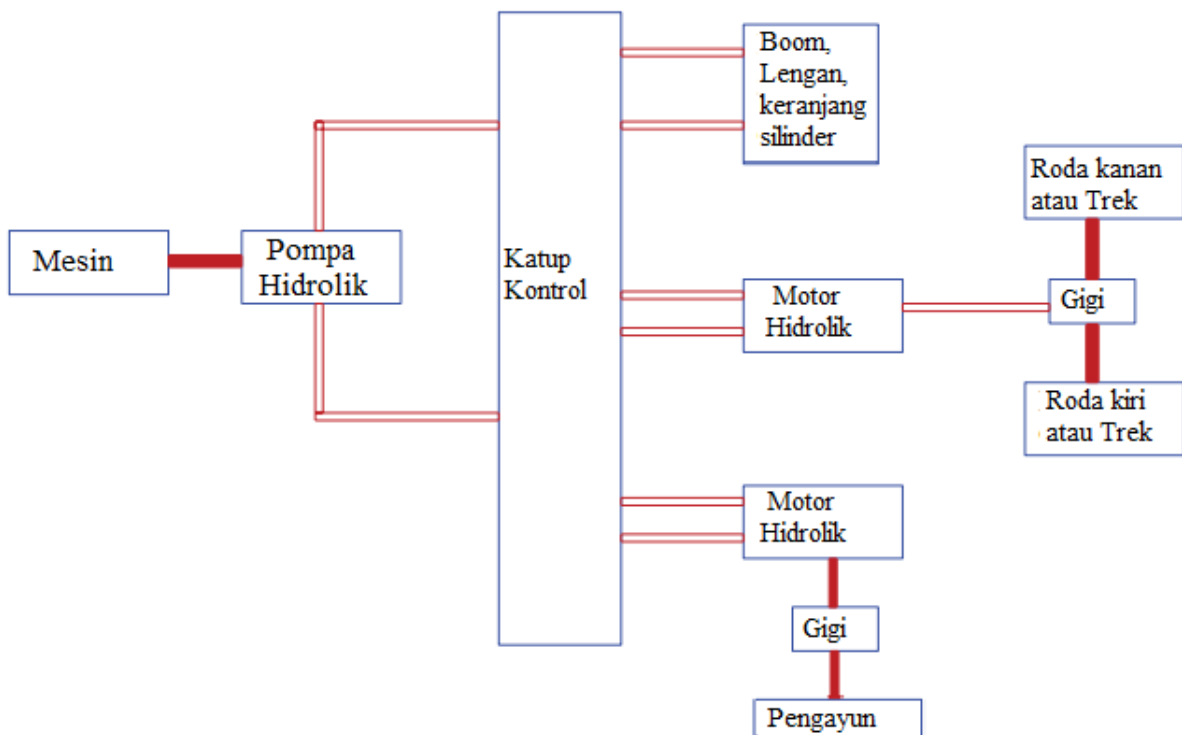
Aplikasi khusus HEV pada kendaraan off-road melibatkan ekskavator konstruksi. Meskipun ada kendaraan konstruksi lain seperti wheel loader, bulldozer, dan kendaraan utilitas industri, excavator dianggap lebih rumit dari segi arsitektur dan implementasinya. Oleh karena itu, mesin khusus ini dipilih sebagai contoh dan akan memaparkan kita pada situasi yang lebih kompleks daripada mesin konstruksi lainnya. Dalam ekskavator, penggunaan konsep HEV bukan pada penggerak kendaraan, melainkan pada gerakan lengan ekskavator. Lengan ekskavator membutuhkan ledakan daya tinggi yang sangat singkat diikuti dengan pengembalian daya rendah dan kemudian memperlambat kecepatannya untuk menghentikan lengan. Aplikasi semacam itu dipenuhi dengan sangat baik dengan menggunakan ICE yang menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik untuk menggerakkan motor lengan ekskavator, yang merupakan penggerak listrik. Mari kita lihat beberapa arsitektur yang mungkin terkait dengan ekskavator.



Gambar 6.10 Ekskavator tipikal dengan bagian-bagian yang diberi label. Sumber: Direproduksi dengan Courtesy of Komatsu.

Gambar 6.10 menunjukkan ekskavator tipikal dengan berbagai bagian yang diberi label. Meskipun ekskavator khusus dari Komatsu ini adalah ekskavator hibrida, tampilan fisik ekskavator hidrolis konvensional pada dasarnya sama. Arsitektur hidrolis konvensional ditunjukkan pada Gambar 6.11. Di sini mesin menggerakkan pompa hidrolis dan aliran fluida dikendalikan oleh satu set katup kontrol. Aliran fluida disalurkan ke berbagai silinder yang terpasang pada berbagai bagian excavator – boom, arm, dan bucket – yang berada dalam satu kelompok pada Gambar 6.11. Kelompok kedua melibatkan motor hidrolis yang juga digerakkan oleh cairan dan digunakan untuk menggerakkan ekskavator secara fisik dengan memutar roda atau trek kanan dan kiri. Torsi motor hidrolis dapat dilewatkan melalui roda gigi sebelum menuju ke roda atau trek. Kelompok ketiga melibatkan motor hidrolis yang digunakan untuk menggerakkan lengan ayun ekskavator.

Seperti disebutkan sebelumnya, mesin hanya menjalankan satu pompa pada Gambar 6.11, dan fluida mengalir ke sekelompok katup untuk mengontrol berbagai bagian yang bergerak. Perlu juga dicatat bahwa karena setiap bagian yang bergerak tidak dikendalikan oleh katup individu, selalu ada pemborosan energi yang tidak perlu mengalir melalui saluran tertentu sepanjang waktu. Dengan kata lain, energi fluida dapat terbuang dalam bentuk panas tanpa melakukan kerja yang berarti pada ekskavator konvensional. Untuk mengatasi masalah tersebut, arsitektur hybrid berikut mungkin diimplementasikan menggunakan perangkat listrik. Perlu dicatat bahwa ekskavator hybrid masih menggunakan cukup banyak perangkat hidrolik, karena untuk mesin konstruksi jumlah gaya atau torsi yang dibutuhkan terkadang sangat tinggi. Pada prinsipnya, meskipun gaya tinggi seperti itu dapat dibangkitkan secara elektrik, ukuran motor listrik dan ukuran elektronika daya mungkin menjadi penghalang dalam kasus tersebut. Jadi, sistem elektro-hidrolik dianggap paling optimal untuk tujuan ini.

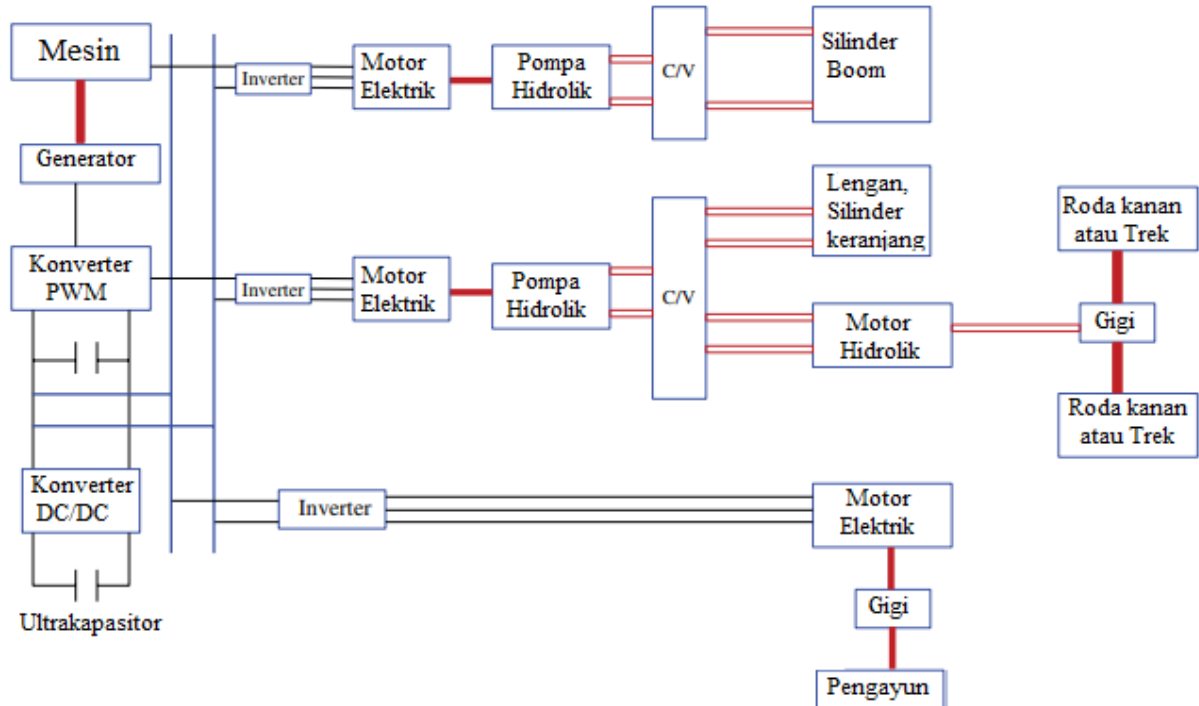


Gambar 6.11 Arsitektur ekskavator off-road konvensional.

Arsitekturnya adalah hibrida seri, ditunjukkan pada Gambar 6.12. Prinsip operasi ekskavator berbasis arsitektur seri adalah sebagai berikut:

- Mesin menggerakkan generator dan menciptakan AC tiga fase.
- Daya AC tiga fasa diubah menjadi DC.
- Daya DC mengalir ke tiga inverter terpisah.
- Daya DC juga masuk ke ultrakapasitor setelah perubahan tegangan melalui konverter DC-DC.
- Untuk silinder boom – daya inverter (AC tiga fase) menggerakkan motor listrik; motor listrik menggerakkan pompa hidrolik; pompa hidrolik menggerakkan silinder boom, yang dikendalikan oleh katup kontrol (C/V).
- Untuk silinder lengan dan ember, seperti di atas: daya inverter (AC tiga fase) menggerakkan motor listrik; motor listrik menggerakkan pompa hidrolik; pompa hidrolik menggerakkan silinder lengan dan ember, yang dikendalikan oleh katup kontrol (C/V) (terpisah dari boom).
- Pengoperasian ayunan dilakukan sepenuhnya oleh motor listrik.

Dapat segera dicatat bahwa arsitektur ini memberikan fleksibilitas yang signifikan dalam mengendalikan berbagai komponen di ekskavator dengan memungkinkan kontrol independen terhadap motor yang menggerakkan pompa hidraulik dan pengoperasian sistem ayun yang sepenuhnya elektrik. Namun, fleksibilitas ini datang dengan mengorbankan beberapa inverter dan konverter, juga beberapa motor. Meskipun mahal karena banyak komponen tambahannya, sistem ini memungkinkan penghematan bahan bakar terbaik dan fleksibilitas kontrol yang akan mengimbangi investasi awal.



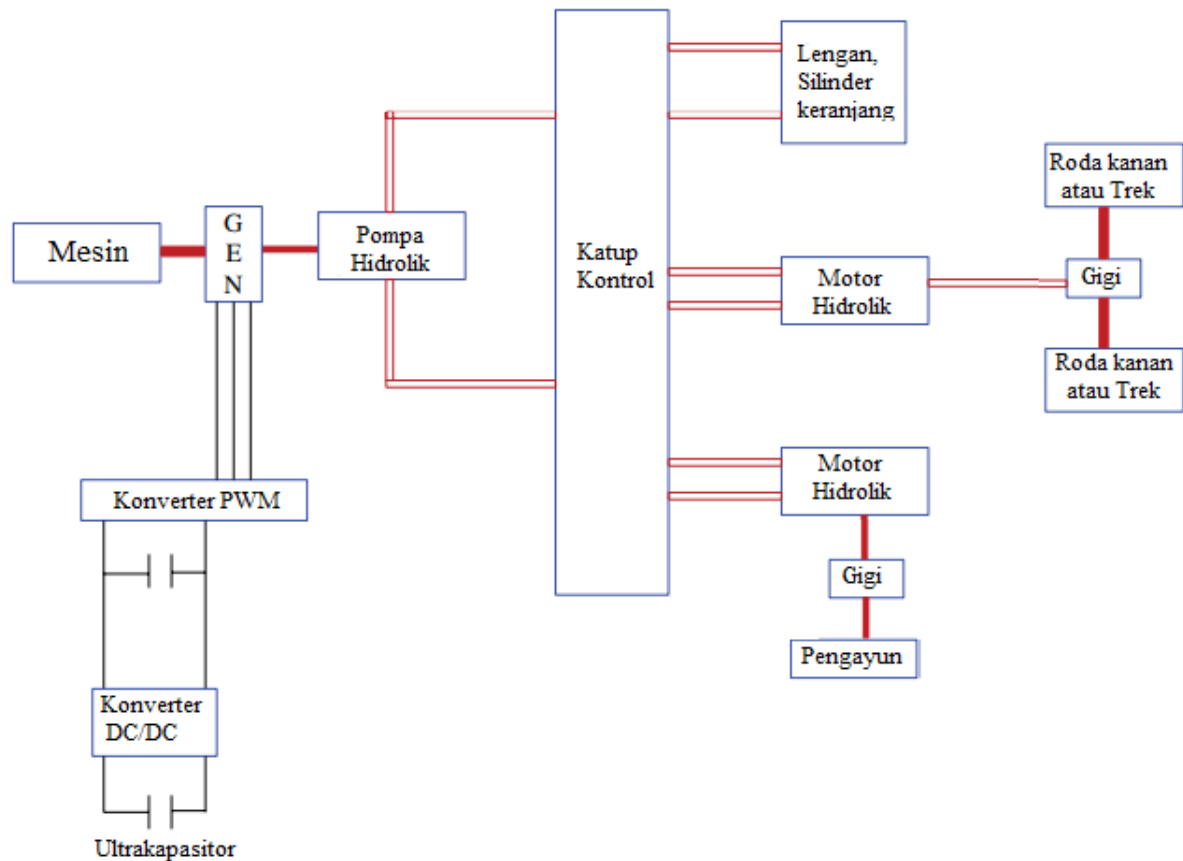
Gambar 6.12 Arsitektur ekskavator hybrid seri

Gambar 6.13 menunjukkan arsitektur paralel. Prinsip pengoperasian ekskavator berbasis arsitektur ini adalah sebagai berikut:

- Mesin menggerakkan generator dan menciptakan AC tiga fase.
- Daya AC tiga fasa diubah menjadi DC.
- Daya DC masuk ke ultrakapasitor setelah perubahan tegangan melalui konverter DC-DC.
- Generator dan pompa hidraulik berada pada poros yang sama dan digabungkan.
- Kecepatan generator tergantung pada kecepatan pompa hidraulik, ditentukan oleh beban hidraulik (semua beban). Jika mesin memiliki lebih banyak torsi yang tersedia pada kecepatan tertentu, dan jika torsi lebih tinggi dari permintaan torsi hidraulik, maka torsi tambahan apa pun dapat digunakan oleh generator, yang pada dasarnya digunakan untuk mengisi kapasitor. Sebaliknya, jika permintaan torsi hidraulik lebih tinggi, generator dapat masuk ke mode motor dan memberikan beberapa torsi ke arah beban hidraulik, sehingga berada dalam mode bantuan torsi. Ini analog dengan sesuatu seperti kendaraan penumpang hybrid ringan.
- Tidak mungkin memulihkan energi apa pun dari beban mekanis dalam konfigurasi khusus ini.

Dibandingkan dengan arsitektur seri, yang satu ini membutuhkan lebih sedikit komponen, tetapi memberikan lebih sedikit fleksibilitas dalam mengendalikan berbagai komponen di ekskavator. Singkatnya, arsitektur ini sama seperti arsitektur hidraulik konvensional, kecuali ada generator yang diapit di antara mesin dan pompa hidraulik. Generator dapat digunakan untuk mengisi daya ultrakapasitor melalui sistem pengontrol elektronik daya dan juga dapat

menerima daya dari ultrakapasitor saat berjalan dalam mode motor, menambahkan torsi transien yang diperlukan secara tiba-tiba. Dengan kata lain, sistem ini dapat disamakan dengan jenis kendaraan listrik penumpang hibrida ringan dengan sedikit bantuan daya, dan mesin utama dirancang hanya untuk memenuhi permintaan beban rata-rata. Hal ini dapat menyebabkan mesin yang lebih kecil dan beberapa penghematan bahan bakar tambahan, meskipun tidak sefleksibel arsitektur seri.



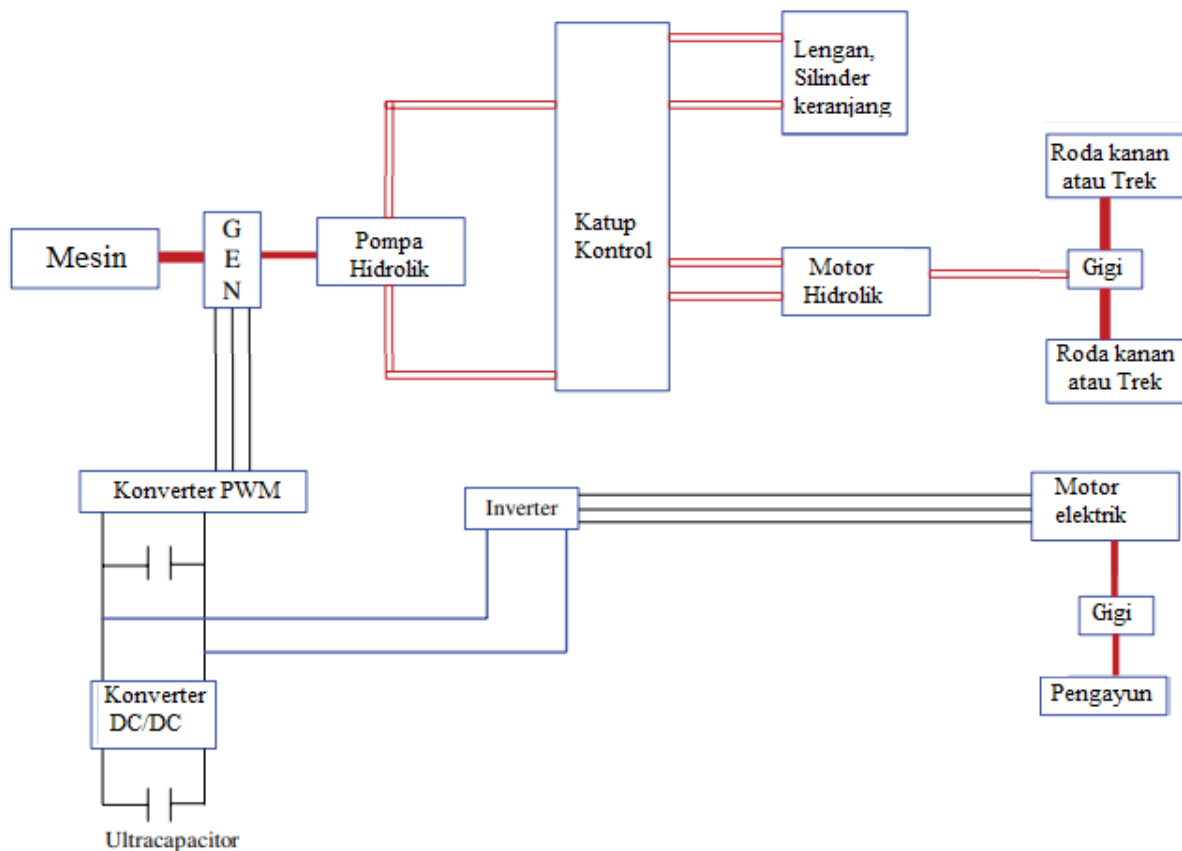
Gambar 6.13 Arsitektur ekskavator hybrid paralel

Gambar 6.14 menunjukkan arsitektur hibrida majemuk. Prinsip pengoperasian excavator berbasis arsitektur ini adalah sebagai berikut:

- Mesin menggerakkan generator dan menciptakan AC tiga fase.
- Daya AC tiga fasa diubah menjadi DC.
- Daya DC masuk ke ultrakapasitor setelah perubahan tegangan melalui konverter DC-DC.
- Generator dan pompa hidrolik berada pada poros yang sama dan digabungkan.
- Kecepatan generator tergantung pada kecepatan pompa hidrolik, ditentukan oleh beban hidrolik (kecuali beban ayun). Jika mesin memiliki lebih banyak torsi yang tersedia pada kecepatan tertentu, dan jika torsi lebih tinggi dari permintaan torsi hidrolik, maka torsi tambahan apa pun dapat digunakan oleh generator, yang pada dasarnya digunakan untuk mengisi kapasitor. Sebaliknya, jika permintaan torsi hidrolik (boom, arm, bucket) lebih tinggi, generator dapat masuk ke mode motor dan memberikan beberapa torsi ke arah beban hidrolik, sehingga generator berada dalam mode bantuan torsi. Oleh karena itu operasi ini dapat lagi dibandingkan dengan sesuatu seperti kendaraan hybrid ringan.
- Beban ayunan sepenuhnya dikendalikan oleh motor.

- Untuk memulihkan energi dari beban mekanis dalam konfigurasi khusus ini sangat dimungkinkan tetapi hanya dari operasi ayunan. Pada prinsipnya, untuk memulihkan energi dari komponen bergerak lainnya yang dioperasikan secara hidrolik juga dimungkinkan asalkan menggunakan katup kontrol dua arah yang tepat, tetapi hal itu dapat memperumit kontrol, yang menyebabkan biaya tambahan.

Arsitektur ini agak di antara seri dan paralel. Bagian atas sistem adalah sistem hidrolik konvensional dengan bantuan daya melalui generator listrik, yang juga dapat beroperasi dalam mode motor. Sistem ini juga memiliki sistem ayun yang sepenuhnya elektrik. Sistem ini merupakan kompromi antara sistem seri dan paralel dengan beberapa komponen tambahan, tetapi tidak sebanyak sistem seri. Oleh karena itu beberapa ekskavator komersial menggunakan arsitektur ini.

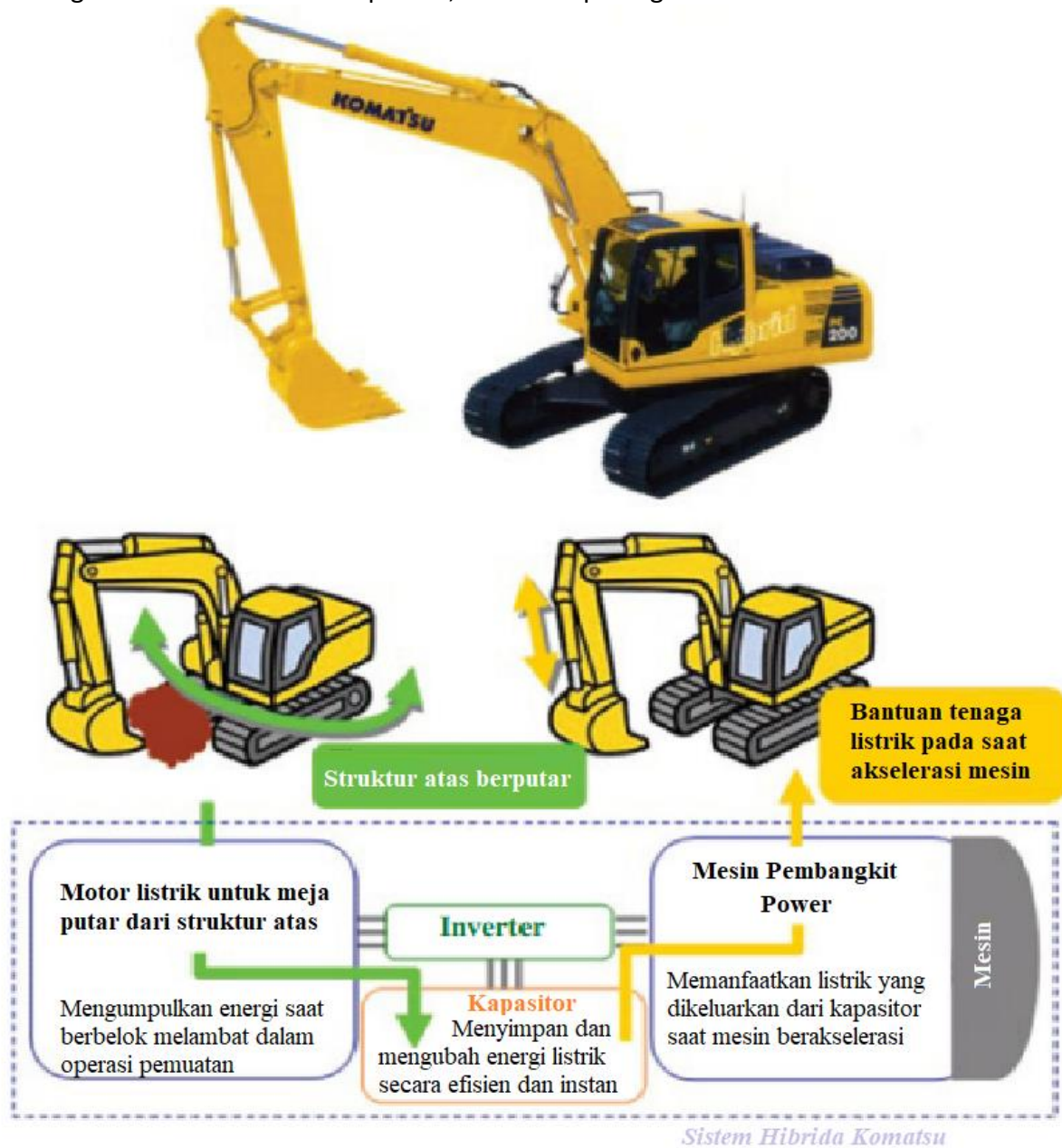


Gambar 6.14 Arsitektur ekskavator hybrid majemuk

Arsitektur untuk ekskavator Komatsu yang ditunjukkan pada Gambar 6.15 pada dasarnya sama dengan arsitektur gabungan yang ditunjukkan pada Gambar 6.14. Telah diklaim bahwa ekskavator hibrida Komatsu menghasilkan peningkatan ekonomi bahan bakar sekitar 25% dan bahwa beberapa pengguna tertentu telah mencapai peningkatan penghematan bahan bakar hingga 41%. Gambar pada Gambar 6.15 berasal dari situs web Komatsu (www.komatsu.com/CompanyInfo/press/2008051315113604588.html), yang telah diperbarui oleh Komatsu, dan informasi terbaru dapat ditemukan di <http://www.komatsu.eu/displayBrochure.ashx?id=82172>. Sebagai ilustrasi, beberapa nilai numerik disediakan di sini untuk ekskavator ini: pada 288 V DC, arus tautan DC akan menjadi sekitar 70 A, tegangan rms baris-ke-baris tiga fase untuk motor akan menjadi sekitar $0,612 \times 288 = 176$ V, dan arus motor akan menjadi sekitar 82 A.

Meskipun ultrakapasitor telah ditunjukkan dalam arsitektur sebelumnya, beberapa pabrikan lebih suka menggunakan baterai daripada ultrakapasitor untuk tujuan penyimpanan dan pengambilan energi. Contohnya adalah ekskavator New Holland yang menggunakan

mesin diesel 36 hp, generator 20 kW, dan baterai lithium 288 V. Pilihan penyimpanan sangat tergantung pada penggunaan yang tepat dan siklus tugas. Jika kendaraan hanya ekskavator berdaya tinggi, maka ultrakapasitor tampaknya menjadi kandidat yang cocok. Namun, jika selain aplikasi excavator, ada peralatan bantu lain yang membutuhkan energi yang mungkin tidak segera tersedia dari ultrakapasitor, baterai dapat digunakan.



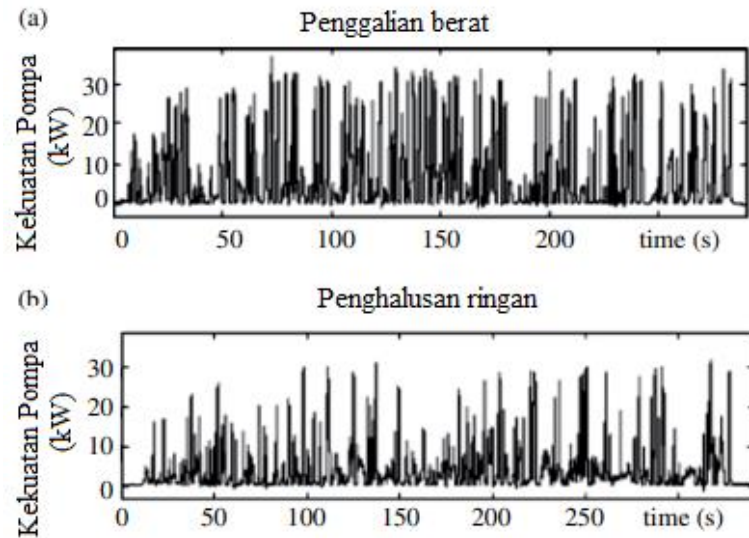
Gambar 6.15 Sistem ekskavator hybrid Komatsu. Sumber: Courtesy of Komatsu

Siklus tugas dalam hal kebutuhan torsi, durasi torsi, peralatan bantu yang digunakan, biaya, ukuran, dan faktor serupa mengarah pada proses keputusan dalam hal apa yang terbaik: ultrakapasitor atau baterai. Oleh karena itu dalam hal ini tidak ada jawaban yang unik.

Pertimbangan Desain Excavator Hibrida

Teknologi hybrid seperti yang diterapkan pada kendaraan biasa tetap sama jika diterapkan pada mesin konstruksi pada umumnya. Namun, kondisi beban di kedua situasi tersebut sangat berbeda. Misalnya, kondisi penggalian berat dan ringan dalam ekskavator bisa seperti yang digambarkan pada Gambar 6.16. Berdasarkan kondisi ini dan arsitektur yang

digunakan, kita harus memilih unit penyimpanan yang tepat untuk regenerasi, mis. selama pengereman sistem ayunan. Mari kita pertimbangkan arsitektur paralel sebagai contoh.



Gambar 6.16 Permintaan beban excavator hibrid. Sumber: Wang 2008. Direproduksi dengan izin IEEE.

Seperti yang telah disebutkan, arsitektur paralel pada dasarnya adalah arsitektur konvensional, kecuali untuk motor/generator listrik antara mesin dan pompa hidrolik, yang bertindak sebagai perangkat bantuan daya selama permintaan beban transien. Kita juga telah melihat dalam diagram arsitektur di atas bahwa perangkat penyimpanan energi yang digunakan untuk memberi energi pada perangkat bantuan daya dapat berupa kapasitor. Kapasitor ini diisi dengan menggunakan mesin ketika memiliki daya cadangan yang tersedia setelah menggerakkan beban. Pada saat permintaan beban berlebih tiba-tiba atau sementara, kapasitor dapat mengirimkan permintaan itu melalui mesin listrik, yang menjadi motor. Manfaatnya adalah menghindari ukuran mesin untuk beban transien yang diharapkan penuh. Dengan kata lain, mesin dapat dikecilkan sampai batas tertentu, misalnya, sebagai ganti generator, yang masih akan lebih baik bila menggunakan mesin listrik, dibandingkan dengan mesin yang terlalu besar. Ini juga memungkinkan mesin berjalan mendekati kecepatannya optimalnya dan dengan demikian lebih efisien.

Kurva torsi beban penggalian berat ditunjukkan pada Gambar 6.17 sebagai contoh. Penentuan strategi pengendalian dapat dilakukan sebagai berikut. Seperti yang kita ketahui, ICE memberikan daya ke beban dan sistem kelistrikan. Tugas mesin listrik adalah mensuplai defisit daya ke beban atau selisih antara kebutuhan daya rata-rata dan transien puncak.

Persamaan 6.1

$$P_{Elect} = P_{Load} - P_{ICE}$$

Dalam contoh khusus dalam referensi:

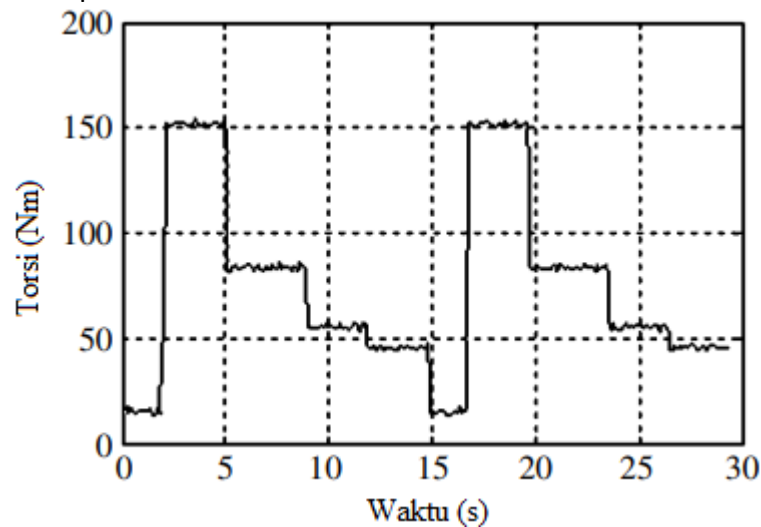
Daya ICE = 25 kW @ 2200 rpm dan berdasarkan beban rata-rata, di mana mesin diesel turbocharged dipilih.

Persamaan 6.2

$$Torsi\ ICE = 124.8Nm\ @1860rpm$$

Mari kita lihat alasan di balik angka-angka di atas. Transien maksimum sekitar 30–40 kW (tetapi mendekati 30), jadi defisitnya sebagian besar sekitar 5 kW (sekali atau dua kali kita

mungkin menemukan 15 kW). Jadi, masuk akal untuk memilih mesin listrik yang sekitar 10 kW. Melebihi batas ini sebesar 50% sekali atau dua kali dapat diterima. Peringkat torsi yang dipilih adalah 76 Nm @ 1860 rpm



Gambar 6.17 Kurva permintaan torsi. Sumber: Wang 2008. Direproduksi dengan izin IEEE

Rentang kecepatan mesin listrik harus dipilih agar sesuai dengan rentang kecepatan ICE, jika tidak, gear box akan diperlukan. Pertanyaannya adalah bagaimana kecepatan mesin dipilih sejak awal? Itu kurang lebih didasarkan pada permintaan torsi beban dan kita melihat bahwa permintaan torsi dari beban adalah sekitar 150 Nm (Gambar 6.17). Oleh karena itu total torsi mesin listrik ICE + adalah sekitar 200 Nm, yang seharusnya cukup memadai. Selanjutnya kita harus memahami bagaimana kecepatan ICE dipilih. Perhatikan bahwa kebutuhan daya beban sekitar 30 kW. Torsinya 150 Nm. Jadi, kecepatan = $30000/150 = 200$ rad/sec = $200 \times 60/(2\pi) = 1910$ rpm, yang cukup mendekati 1860 rpm. Kita perlu mengetahui permintaan torsi dan permintaan daya beban.

Perlu dicatat bahwa kita dapat mengoperasikan beban dengan lambat atau cepat, dengan torsi yang sama, tetapi jika berjalan lambat, tentu membutuhkan daya yang lebih kecil. Ini adalah masalah pilihan dan perancang harus memutuskan (berdasarkan pengalaman konstruksi), seberapa cepat beban tersebut perlu ditangani. Tentu saja, kita dapat menggunakan roda gigi untuk memperkuat torsi dan mengurangi kecepatan untuk daya yang sama. Tenaga akan tetap kurang lebih tidak berubah-ubah, tetapi torsi dan kecepatan dapat berubah, agar sesuai dengan tenaga. Pada titik ini kita masih harus memutuskan beberapa parameter desain listrik yang sekarang dibahas. Kita perlu memutuskan tegangan apa yang baik untuk tujuan tersebut, dan dalam hal ini tidak ada jawaban yang unik. Secara umum, mesin tegangan tinggi secara fisik lebih kecil. Demikian pula, mesin kecepatan tinggi secara fisik lebih kecil. Ini berarti ukuran yang lebih kecil untuk kemampuan daya yang diberikan.

Pilihan tegangan motor mungkin ada hubungannya dengan apakah kita menginginkan motor yang dibuat khusus, atau item yang tersedia berdasarkan apa yang tersedia saat ini. Dalam desain ini, mesin 240 V dipilih. Padahal tidak harus seperti itu. Jika kita menggunakan tegangan yang lebih tinggi, maka elektronika daya yang menggerakkan motor juga harus diberi nilai tegangan yang lebih tinggi. Perlu juga dicatat bahwa tegangan yang lebih tinggi membutuhkan isolasi dan pengemasan yang lebih baik daripada tegangan yang lebih rendah. Selanjutnya, tegangan yang lebih tinggi berarti arus yang lebih kecil dan karenanya belitan lebih tipis. Demikian pula, kecepatan yang lebih tinggi berarti torsi yang lebih rendah dan arus yang lebih rendah. Kecepatan tinggi juga menyiratkan medan magnet yang lebih lemah untuk tegangan tertentu, yang berarti lebih sedikit penggunaan bahan magnetik.

Jadi, pilihan terakhir adalah kompromi antara beberapa faktor dan ini adalah masalah pengalaman dan ketersediaan barang, biayanya, dan sebagainya. Jika kecepatan motor yang dipilih berbeda dari ICE dan beban, maka kita akan membutuhkan peralatan yang sesuai, yang akan menambah biaya. Sebuah mesin sinkron magnet permanen (PMSM), yang merupakan mesin yang relatif kompak untuk daya yang diberikan, dipilih dalam kasus ini. Untuk desain penyimpanan energi, kita perlu memperkirakan daya percepatan yang harus dipenuhi dan daya perlambatan yang harus diserap. Juga baik untuk mengetahui tentang siklus penggalan seumur hidup mesin, yaitu berapa kali berbagai aktuator cenderung bergerak dalam masa pakai mesin biasa. Jadi, prosesnya bisa dimulai dengan penyimpanan energi listrik dari ekskavator hibrida, dan dapat terdiri dari kemungkinan berikut:

Battery only (BO)
 Ultracapacitor only (UO)
 Battery + ultracapacitor (BU)

Seperti yang harus kita ketahui, baterai adalah perangkat yang lebih intensif energi, sedangkan ultrakapasitor adalah perangkat yang lebih intensif daya. Jadi, pertama-tama kita dapat membandingkan daya dan energi spesifik dari masing-masing perangkat ini:

Kuantitas	Nilai	
	Baterai NiMH	Ultrakapasitor
Daya spesifik – W/kg	500	11,300
Energi spesifik – Wh/kg	35 @ 3C rate	3.2
Siklus hidup	1000	1,000,000

Akhir masa pakai dapat didefinisikan sebagai jumlah siklus yang diizinkan dengan kedalaman pengosongan yang ditentukan oleh pabrikan, setelah itu baterai mungkin tidak berfungsi dengan baik, yaitu tidak menerima dan menyimpan daya untuk waktu yang lama. Untuk ultrakapasitor, siklus didefinisikan berdasarkan perjalanan tegangan dari nominal ke setengah tegangan nominal. Berdasarkan kekuatannya saja:

$$W_{bat_power} = (P_{ESU_Max}) / (\eta_{bat} \times S_{bat})$$

di mana suku pembilang menunjukkan daya maksimum yang dibutuhkan dari unit penyimpanan energi atau ESU – baterai dalam hal ini – dan suku pertama penyebutnya adalah efisiensi baterai dan suku kedua adalah daya spesifik baterai, maka baterai harus dirancang untuk menangani daya rata-rata maksimum dari siklus penggalan berat, yaitu sekitar setengah daya puncak. Daya puncaknya sekitar 34 kW. Karena makan:

Persamaan 6.3

$$W_{bat_power} = (P_{ESU_Max}) / (\eta_{bat} \times S_{bat}) = (17kW) / [0.85 \times 0.5kW/kg] = 40kg$$

Sekarang, dari perspektif waktu hidup baterai, yaitu jumlah total siklus pengosongan muatan dengan kedalaman pengosongan tertentu, kita dapatkan

Persamaan 6.4

$$W_{bat_life} = (T_{ESU} \times E_{cycle}) / (t_{cycle} \times ED_{bat} \times k \times DOD \times n \times \eta_{bat})$$

di mana:

T_{ESU} = durasi masa pakai baterai setelah itu perlu diganti, diasumsikan 4800 jam di sini.

E_{cycle} = menggali energi setiap siklus = 15 Wh.

t_{cycle} = waktu siklus penggalan = 15 detik

ED_{bat} = rapat energi baterai = 35 Wh/kg

k = koefisien energi yang dimiliki baterai = 3 Wh per kedalaman pelepasan

DOD = kedalaman debit = 0,8

n = jumlah siklus dalam masa pakai baterai = 1000

η_{bat} = efisiensi baterai = 0,85

Maka persamaan di atas menjadi persamaan dibawah ini:

Pesamaan 6.5

$$W_{bat_life} = \frac{(T_{ESU}) \times (E_{cycle})}{(t_{cycle} \times ED_{bat} \times k \times DOD \times n \times \eta_{bat})}$$

$$\frac{(4800 \times 3600 \text{ detik}) \times (15 \text{ Wh/siklus digging})}{\left(\frac{15 \text{ detik}}{\text{siklus digging}}\right) \left(\frac{35 \text{ Wh}}{\text{kg}}\right) \times 3 \times (0.8 \text{ DOD})} = 242 \text{ kg}$$

Untuk ultrakapasitor menggunakan persamaan ini:

Persamaan 6.6

$$W_{UC_power} = \left(\frac{P_{ESU_{max}}}{PD_{UC}}\right) = \frac{17 \text{ kW}}{\left(\frac{11.3 \text{ kW}}{\text{kg}}\right)} = 1.6 \text{ kg}$$

Dari pertimbangan seumur hidup dengan persamaan dibawah ii:

Persamaan 6.7

$$W_{UC_Life} = \frac{(T_{ESU}) \times (E_{cycle})}{(t_{cycle} \times k_1 \times ED_{UC} \times k_2 \times n_{UC} \times \eta_{UC})}$$

Persamaan 6.8

$$W_{UC_Life} = \left(\frac{(4800 \times 3600 \text{ detik}) \times (15 \text{ Wh per siklus digging})}{(15 \text{ detik per siklus digging}) \times 0.75 \times (3.2 \text{ Wh per kg per siklus})}\right)$$

= 9.00 kg, dan k_2 diasumsikan menjadi = 1

Sedangkan dari segi energi menggunakan persamaan berikut:

Persamaan 6.9

$$W_{UC_energy} = \left(\frac{E_{cycle}}{k_1 \times ED_{UC} \times \eta_{UC}}\right) = \frac{15 \text{ Wh}}{0.75 \times 0.8 \times 3.2 \text{ Wh per kg}} = 7.82 \text{ kg}$$

Jadi, tampak dari pertimbangan daya, energi, dan masa pakai bersama, bahwa berat baterai di atas adalah 242 kg dan berat ultracap adalah 9 kg. Oleh karena itu, UC-only tampaknya lebih baik dari sudut pandang aplikasi ini. Berkenaan dengan ukuran kapasitor, yang terbaik adalah pergi ke kondisi penggalan yang berat dan melihat seberapa cepat daya beban (seperti yang

digambarkan oleh daya pompa dalam ekskavator konvensional) meningkat. Untuk ekskavator ini, mungkin kenaikan 1 hingga 2 detik adalah wajar. Jika daya naik dari 0 menjadi 30 kW dalam 1 detik, mari kita lihat berapa ukuran kapasitor yang dibutuhkan.

Asumsikan tegangan 125 V sebagai tegangan ultracap nominal dan dapat mencapai 240 V saat mengisi daya. Dengan kata lain, kita dapat mengasumsikan bahwa itu diisi hingga sekitar 240 V dan kemudian dikosongkan hingga 125 V dalam 15 detik.

$$\text{Jadi, } dV/dt = (240-125)/15 = 7,7 \text{ V/dt}$$

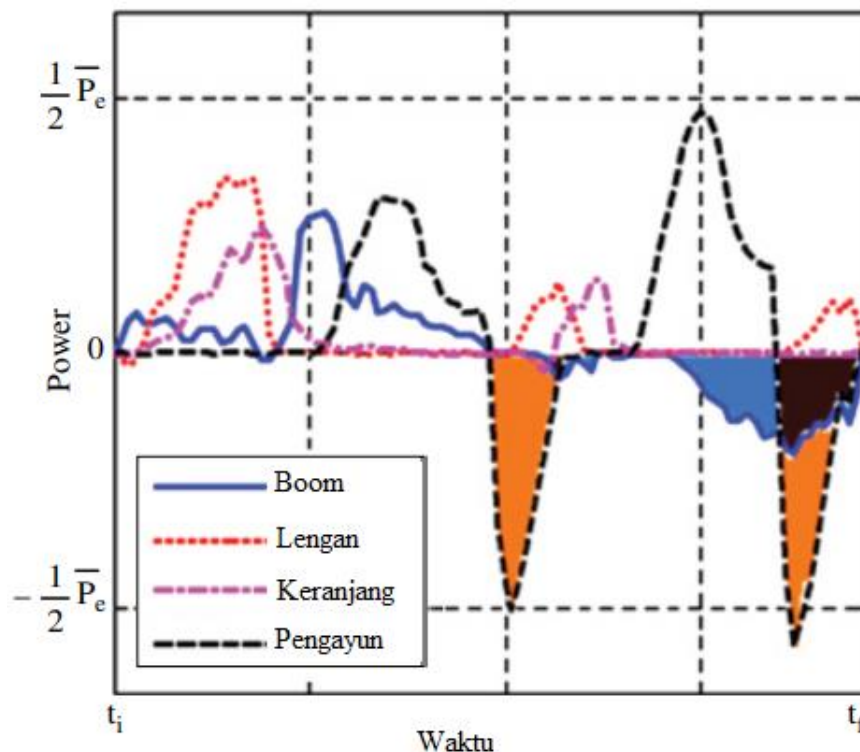
$$\text{Rata-rata 240 dan 125 adalah } = 182,5 \text{ V}$$

$$\text{Untuk daya rata-rata 15 kW, arus } = 1500/182,5 = 82,2 \text{ A}$$

$$C \times dV/dt = 82,2, \text{ jadi } C = 82,2/7,7 = 11 \text{ farad.}$$

Perhitungan di atas adalah dari kebutuhan pengiriman daya segera. Sejauh ini, pemulihan energi hanya berkenaan dengan arsitektur paralel. Di sini kapasitor digunakan hanya untuk tujuan menyimpan energi melalui motor bantu (atau generator) atau menggerakannya menggunakan daya dari kapasitor. Jika arsitektur majemuk digunakan, maka kita dapat memulihkan energi ayunan juga. Satu motor khusus yang digunakan pada motor listrik ayun Kobelco pada ekskavator kelas 8 ton adalah sekitar 8 kW dan generator/motor (bantu) adalah 10 kW.

Jadi, cukup masuk akal untuk menggunakan kapasitor terpisah untuk menyimpan energi menggunakan kapasitor dengan ukuran yang sama, yaitu sekitar 11 F, seperti yang disebutkan pada contoh sebelumnya.



Gambar 6.18 Kebutuhan daya komponen excavator. Sumber: Yoo 2009. Direproduksi dengan izin IEEE.

Beberapa orang telah mencoba memulihkan energi boom dengan menggunakan teknologi hybrid, yang dapat diklasifikasikan dalam kategori mesin kompon diperpanjang, yaitu sistem ayun dan sistem boom digerakkan secara elektrik, baik secara langsung (ayun) atau tidak langsung melalui perangkat hidrolik. Dalam hal ini, jika kita meninjau kembali

arsitektur seri, kita akan melihat bahwa boom digerakkan oleh motor listrik, yang menggerakkan pompa hidrolis.

Jadi, jika energi boom akan dipulihkan maka kita dapat menggunakan perangkat hidrolis dua arah, yaitu aktuator hidrolis di ujungnya akan menjadi pompa, pompa hidrolis yang berada tepat di depan motor listrik akan menjadi motor hidrolis, dan pompa hidrolis di depan motor listrik akan menjadi motor hidrolis. Motor akan menjadi generator listrik, yang akan mengirimkan energi ke kapasitor. Gambar 6.18 menunjukkan permintaan beban relatif dari berbagai sistem di dalam ekskavator. Area di bawah kurva pada Gambar 6.18 untuk berbagai komponen memberikan gambaran tentang seberapa besar potensi energi yang dapat ditangkap untuk penggunaan di masa mendatang.

6.5 HEV DIESEL

Pada dasarnya, HEV diesel tidak lain adalah HEV biasa, kecuali bahwa ICE adalah mesin diesel, bukan mesin bensin. Seperti diketahui bahwa mesin diesel lebih efisien daripada mesin bensin, maka dengan menggabungkan mesin diesel dengan penggerak listrik, kita bisa mendapatkan yang terbaik dari kedua dunia. Jadi, pertanyaan yang mungkin muncul: mengapa kita tidak menggunakan hibrida diesel dan apa motivasi untuk tidak melakukannya? Diskusi berikut akan membantu menjelaskan masalah ini.

Rasio kompresi mesin diesel bisa jauh lebih tinggi daripada mesin bensin – bisa sekitar 15-20 dibandingkan dengan 9-12. Rasio kompresi yang lebih tinggi berarti bahwa mesin harus lebih berat dalam konstruksi untuk mempertahankan tekanan yang lebih tinggi. Pada kecepatan rendah, mesin diesel lebih baik dalam hal penghematan bahan bakar karena tidak adanya katup throttle, sehingga menghindari kerugian parasit. Manfaat lain dari mesin diesel termasuk emisi gas rumah kaca yang lebih rendah seperti CO₂. Karakteristik kecepatan rendah dari mesin diesel juga lebih baik dibandingkan dengan mesin bensin dalam hal pembangkitan torsi awal. Tidak adanya sistem pengapian, dan karenanya lebih sedikit komponen, menyebabkan keandalan sistem secara keseluruhan lebih tinggi.

Mesin diesel, karena lebih efisien daripada mesin bensin, jelas mengarah ke mesin berukuran lebih kecil, terutama pada kecepatan rendah. Oleh karena itu untuk kinerja yang sama, dan khususnya selama akselerasi, akan lebih bermanfaat menggunakan hibrida diesel dalam ukuran kemasan yang sama. Hal ini terutama bermanfaat dalam konfigurasi hibrida paralel, di mana penggerak diesel dan listrik berperan untuk mencapai kinerja dalam hal tenaga dan akselerasi. Masalah performa ini tidak berpengaruh pada seri hybrid, karena penggerak hanya dilakukan oleh motor listrik.

Dalam bus transit, teknologi hibrida diesel memiliki manfaat, karena sifat siklus penggerak stop-start dan kebutuhan untuk akselerasi pada kecepatan rendah, yang secara khusus ditawarkan oleh hibrida diesel. Oleh karena itu, hibrida diesel adalah kandidat ideal untuk aplikasi di bus dan truk pengiriman. Mereka juga cocok untuk kendaraan tugas yang sangat berat seperti kendaraan pertambangan, lokomotif, dan sebagainya, dalam konfigurasi hibrida seri yang dapat membantu menghilangkan kebutuhan akan sistem transmisi yang sangat berat (gearbox, konverter torsi, dll.). Dalam aplikasi ini (pertambangan, lokomotif) mesin digunakan untuk menjalankan generator, yang dapat dijalankan dengan kecepatan optimal. Listrik kemudian dapat digabungkan ke motor melalui beberapa inverter elektronika daya. Jika perbandingan listrik hibrida diesel versus bensin dilakukan atas dasar yang sama, dapat diringkas secara singkat sebagai berikut:

- Mesin diesel beroperasi lebih efisien secara keseluruhan daripada mesin bensin untuk ukuran tertentu.
- Mesin diesel memiliki komponen yang lebih sedikit, sehingga membutuhkan perawatan yang lebih sedikit, dibandingkan dengan mesin bensin.

- Semakin tinggi kebutuhan daya maka semakin penting ukuran dan biayanya, sehingga solar akan memiliki keunggulan dibandingkan dengan bensin.

Oleh karena itu tampak bahwa ada titik impas dalam kebutuhan daya, di atas mana hibrida diesel akan terbukti lebih ekonomis, baik dari segi biaya dan ekonomi bahan bakar dan pemeliharaan siklus hidup secara keseluruhan, dibandingkan dengan hibrida bensin. Dari tinjauan singkat mesin diesel ini, dapat disimpulkan bahwa manfaat mesin diesel dan penggerak listrik, secara bersama-sama, dapat menghasilkan yang terbaik dari kedua dunia, dan kendaraan yang paling hemat bahan bakar, sesuai dengan kebutuhan aplikasi spesifik yang dicatat di atas.

6.6 KAPAL LISTRIK ATAU HIBRIDA, PESAWAT TERBANG, DAN LOKOMOTIF

Keberhasilan HEV dalam aplikasi otomotif telah membuat area kendaraan tertentu lainnya mempertimbangkan teknologi ini juga. Ini termasuk kapal dan pesawat, yang merupakan kendaraan non-darat. Lokomotif diesel-listrik telah menggunakan teknologi ini dalam bentuk yang sedikit berbeda, dan kita akan membahasnya juga.

Kapal

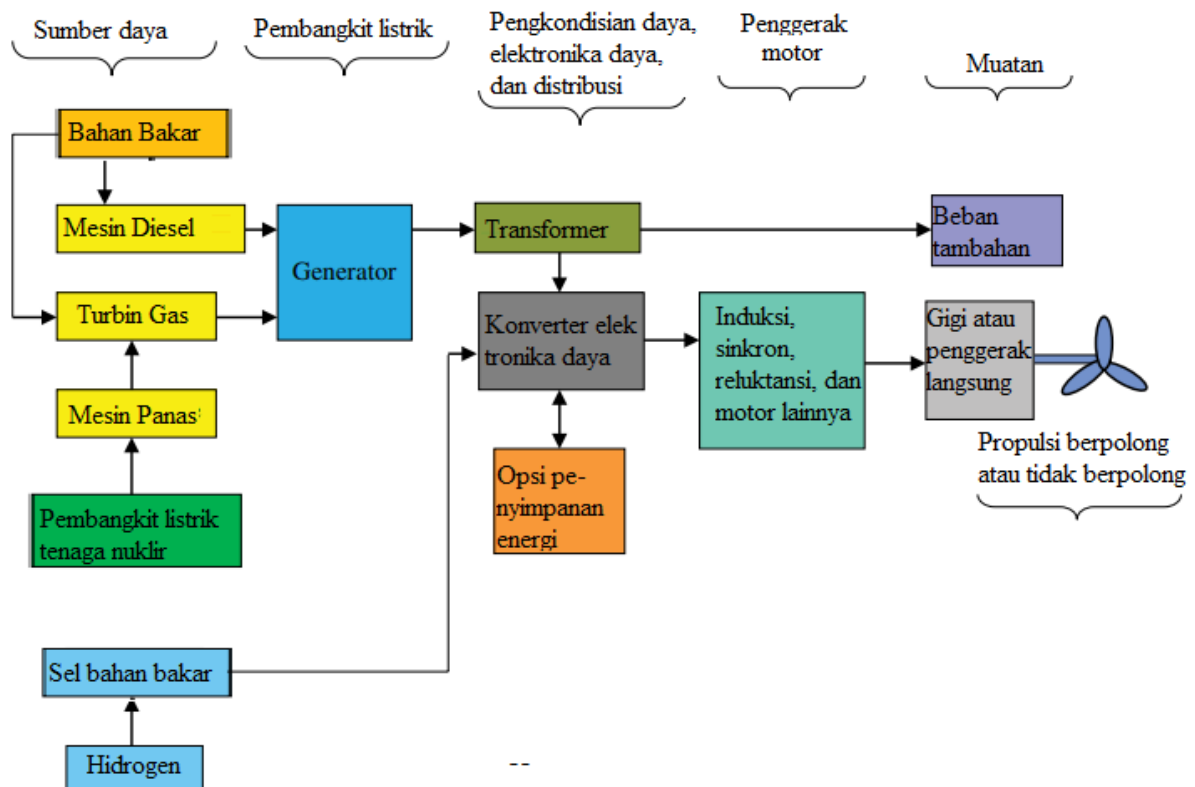
Jelas, kebutuhan dalam sebuah kapal melibatkan ukuran yang sangat besar dari segala sesuatu. Ini pada akhirnya dapat dianggap sebagai sistem tenaga industri, dengan jenis sistem utilitas dan sistem propulsi. Kebutuhan daya keseluruhan di kapal bisa di mana saja dari 1 MW sampai hampir 100 MW. Fokus buku ini, bagaimanapun, akan pada propulsi dan bukan pada keseluruhan sistem tenaga listrik kapal.

Secara historis, kapal berkembang dalam berbagai tahap, dari penggerak uap atau diesel hingga penggerak diesel-listrik. Awalnya, motor yang digunakan dalam penggerak kapal adalah motor DC. Dengan munculnya elektronika daya, motor DC sekarang dapat digantikan oleh motor induksi yang kuat dengan kontrol yang sangat baik, berdasarkan elektronika daya. Motor juga bisa berupa motor sinkron yang dirangsang medan. Manfaat menggunakan motor ini adalah keandalan dan efisiensi. Selain itu, baru-baru ini, teknologi penggerak pod menjadi populer. Dalam skema ini, motor penggerak terletak secara terpisah di dalam pod, yang secara fisik diamankan pada jarak dari badan utama kapal. Sistem elektronika daya terletak di dalam badan utama kapal dan kabel listrik dialirkan ke pod, yang menampung motor. Ukuran polong bisa sangat besar – berdiameter sekitar 10–12 kaki (3–4 m). Poros motor penggerak terhubung ke baling-baling. Selain itu, pod dapat diputar 360° jika diperlukan. Ini menghilangkan kebutuhan untuk memiliki kemudi di kapal. Sekarang mari kita lihat arsitektur sistem propulsi kapal yang ditunjukkan pada Gambar 6.19.

Gambar 6.19 bertujuan untuk memberikan gambaran lengkap tentang kemungkinan dalam hal pembangkitan, distribusi, dan propulsi di kapal. Pilihan arsitektur tertentu tergantung pada ukuran, dan ini dapat mempengaruhi biaya secara signifikan. Tidak semua komponen yang disebutkan di atas akan cocok dalam semua keadaan. Jika sistem pembangkitan kapal menggunakan turbin diesel atau gas, maka sistem kapal secara keseluruhan dapat dianggap sebagai sistem hibrida, sedangkan jika tidak ada sistem tenaga mekanik – misalnya, jika sel bahan bakar adalah satu-satunya sumber daya – maka kapal akan menjadi kapal yang sepenuhnya listrik. Kalaupun tenaga itu dibangkitkan oleh tenaga nuklir – pada akhirnya untuk mendapatkan listrik – maka akan membutuhkan semacam generator listrik, yang pada gilirannya perlu dihidupkan dengan cara non-listrik, dan dalam hal ini kapal dapat dipertimbangkan dalam kategori kendaraan hibrida. Apakah itu akan menjadi hibrida dalam hal propulsi akan tergantung pada sarana propulsi yang tepat yang digunakan, dan jenis perangkat apa yang secara langsung berkontribusi terhadap propulsi.

Jadi, subset yang lebih sederhana dari sistem di atas dapat terdiri dari turbin gas sebagai penggerak utama, yang menggerakkan generator sinkron eksitasi medan (atau bisa

juga generator magnet permanen). Keuntungan dari generator eksitasi medan adalah kemampuan untuk mengontrol tegangan dengan mengontrol medan magnet, yang dapat dilakukan dengan menggunakan semikonduktor dengan nilai arus yang relatif lebih rendah. Jika generator magnet permanen digunakan, kontrol tegangan harus berada pada tingkat daya penuh di terminal stator dengan semi konduktor yang jauh lebih tinggi. Kelebihan generator magnet permanen adalah efisiensi dan kesederhanaan yang lebih tinggi, tanpa perlu menggunakan slip ring untuk medan. Di sisi penggerak, kita dapat menggunakan motor sinkron atau induksi. Motor sinkron harus diberi makan dua kali lipat, sedangkan motor induksi hanya diberi makan di stator. Arsitektur sistem yang mungkin ditunjukkan pada Gambar 6.20. Tegangan motor penggerak dapat dinilai pada beberapa ratus hingga beberapa ribu volt, tergantung pada ukuran dan kebutuhan.

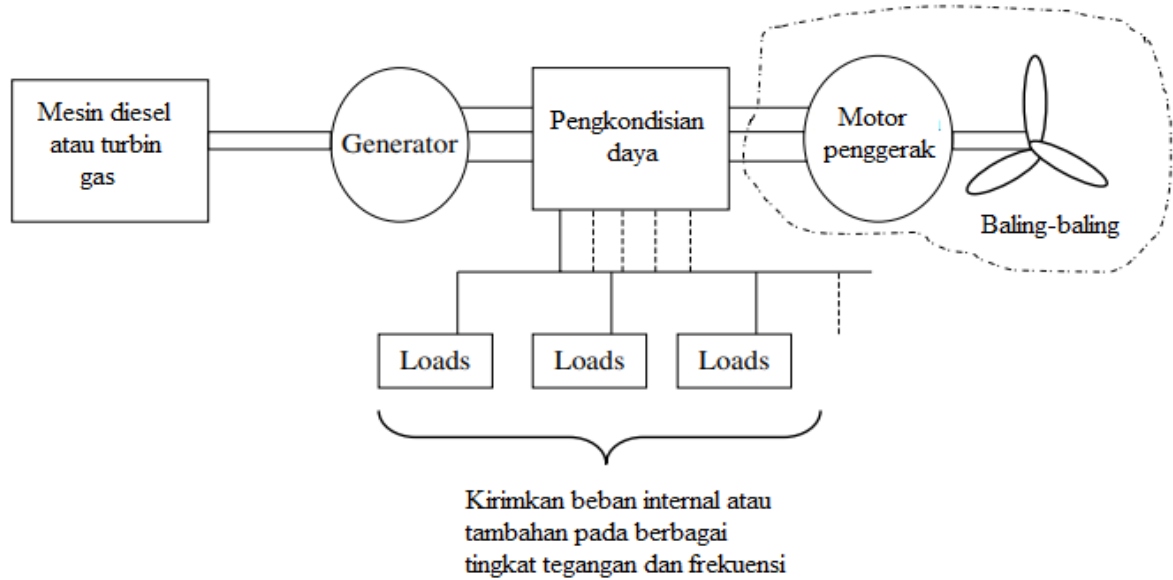


Gambar 6.19 Arsitektur umum sistem kelistrikan kapal. Jalur yang ditunjukkan oleh panah yang memasuki blok tertentu hanya menyiratkan banyak kemungkinan dan tidak selalu menunjukkan jalur bersamaan.

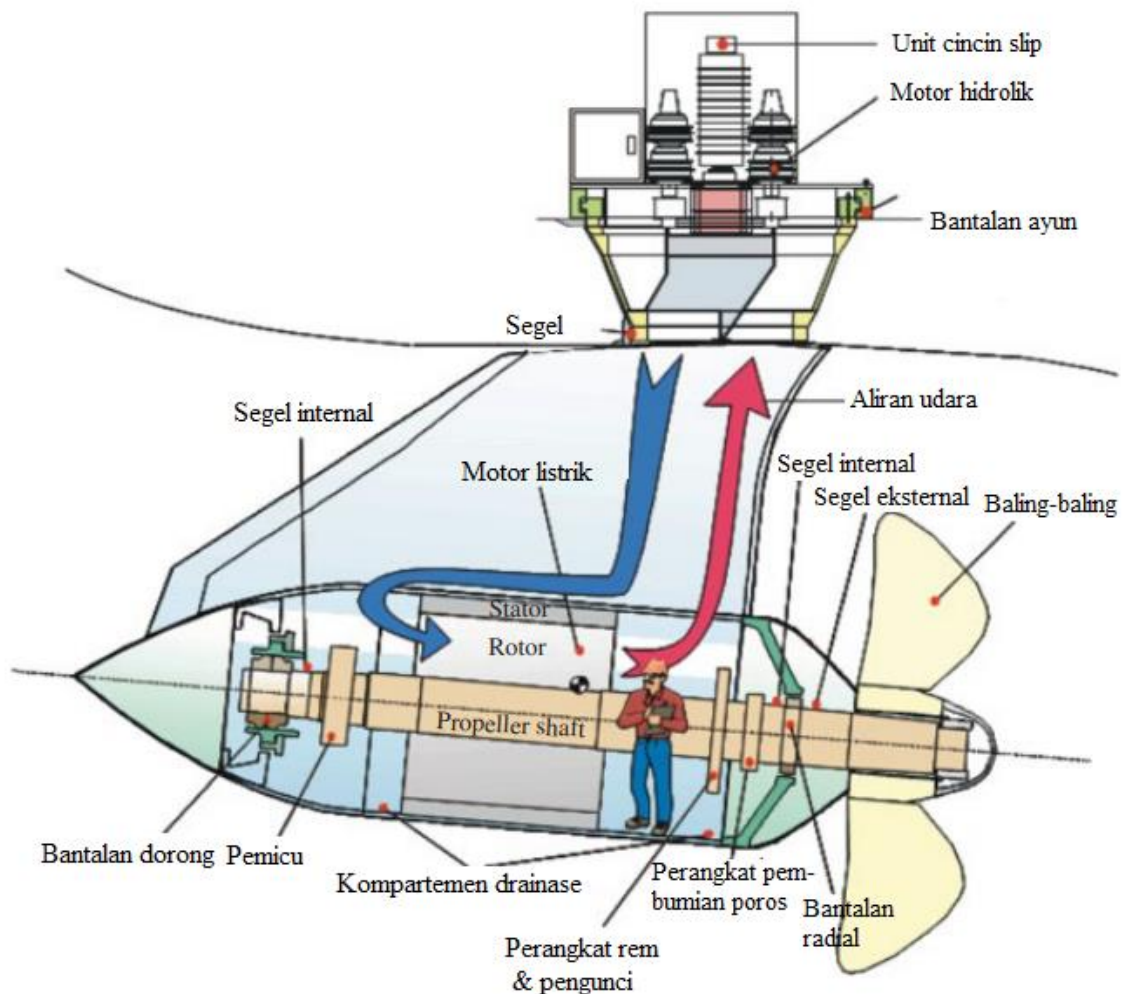
Dengan mempertimbangkan arsitektur di atas, sekarang akan menjadi pelajaran untuk melihat propulsi pod yang kita rujuk sebelumnya. Seperti namanya, itu hanya melibatkan lokasi fisik motor penggerak. Dengan kata lain, item di sebelah kanan Gambar 6.20 – motor penggerak dan baling-baling – yang ditempatkan di dalam pod. Pod itu sendiri berada di luar struktur bodi utama kapal (di bawah buritan), tetapi tentu saja diamankan melalui struktur mekanis. Kabel listrik berjalan dari kapal utama ke pod. Jadi item yang ditunjukkan di dalam garis putus-putus pada Gambar 6.20 ada di dalam pod. Gambar 6.21 menunjukkan seperti apa pod itu.

Angka tersebut cukup jelas, menunjukkan berbagai komponen. Unit slip ring harus terhubung ke sistem tenaga, yang terletak di dalam badan utama kapal. Pria dalam gambar memberikan gambaran tentang ukuran pod dan komponennya. Hanya ada segelintir produsen pod di dunia. Yang utama adalah ABB, Rolls-Royce, dan Schottel. ABB membuat Azipod dan Rolls-Royce membuat pod Mermaid. Schottel memiliki pod berdaya rendah yang

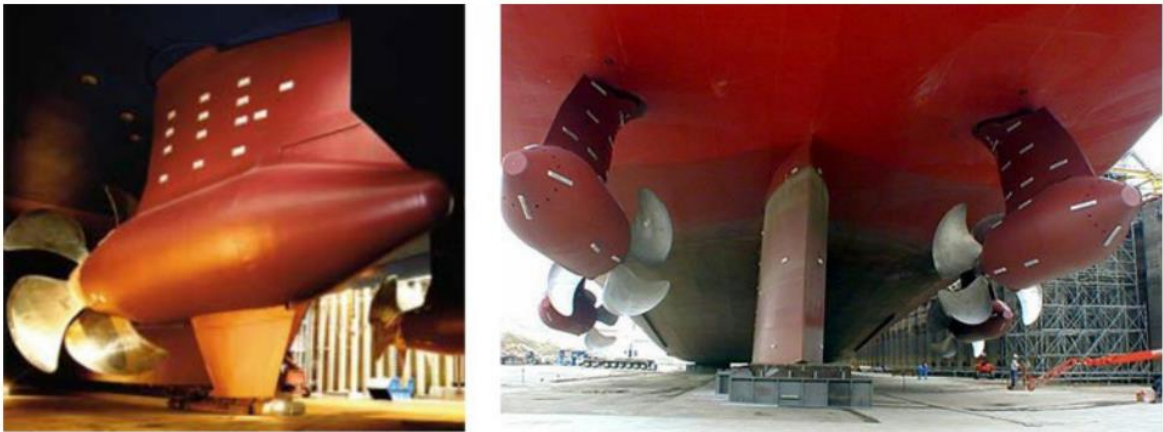
dikenal sebagai Schottel Electric Propulsion (SEP) dan ada versi berdaya tinggi yang disebut Siemens Schottel Propulsion (SSP) dalam usaha patungan dengan Siemens. Azipod dan Putri Duyung ditunjukkan pada Gambar 6.22 untuk memberikan gambaran tentang penampilan mereka.



Gambar 6.20 Arsitektur sistem kapal listrik hibrida.



Gambar 6.21 Sistem propulsi pod yang digunakan di kapal. Sumber: Courtesy of Rolls-Royce plc.



Gambar 6.22 Tampilan luar sistem propulsi pod aktual di kapal: kiri, Azipod® oleh ABB Oy; benar, pod Mermaid oleh Rolls-Royce. Sumber: Courtesy of Rolls-Royce plc.

Aircraft

Karena buku ini adalah tentang kendaraan listrik dan hibrida dari sudut pandang propulsi, mungkin bermanfaat untuk mempertimbangkan sistem propulsi pesawat terbang dan apakah propulsi hibrida dapat dipertimbangkan untuk tujuan ini atau tidak. Pertama, dengan teknologi energi yang saat ini tersedia bagi kita, sistem propulsi listrik dan hibrida tidak dapat dipertimbangkan tetapi kita akan memberikan beberapa penjelasan.

Ada beberapa masalah mendasar yang berbeda untuk pesawat dibandingkan dengan kendaraan darat atau air. Pertama, mengapa kita mempertimbangkan teknologi hybrid atau listrik? Dari diskusi kita sebelumnya dalam buku ini, pertimbangan utama adalah:

- 1) Penghematan bahan bakar
- 2) Keramahan lingkungan
- 3) Ukuran
- 4) Biaya
- 5) Keandalan
- 6) Bobot sistem transmisi mekanis dalam aplikasi off-road tertentu, termasuk lokomotif
- 7) Siklus penggerak kendaraan.

Pilihan kendaraan hibrida atau listrik tergantung pada trade off antara tujuh item ini. Siklus penggerak kendaraan darat dapat berfluktuasi sesuai dengan mengemudi di kota atau jalan raya. Kendaraan air, khususnya kapal laut (termasuk beberapa olahraga air yang lebih kecil dan kendaraan serupa), dan pesawat tidak memiliki siklus penggerak yang berfluktuasi. Oleh karena itu banyak pertimbangan yang penting dalam kendaraan darat tidak berlaku. Pertimbangan lain adalah ruang yang tersedia. Kapal memiliki banyak ruang yang tersedia, sedangkan pesawat tidak. Oleh karena itu dimungkinkan untuk menempatkan motor berdaya tinggi di kapal untuk penggerak, bersama dengan baterai besar, yang mungkin tidak realistis di pesawat terbang.

Pertimbangkan jenis pesawat komersial Boeing 747, yang membutuhkan sekitar 90 MW daya saat lepas landas dan sekitar setengahnya selama jelajah, tergantung pada kecepatannya. Terlepas dari teknologi yang digunakan, mengakomodasi motor dengan tenaga sebesar itu atau memiliki sarana (baterai atau sumber energi) untuk menggerakkannya adalah tidak realistis – setidaknya dengan teknologi motor dan sumber energi saat ini. Jika teknologi itu ada, kita pasti akan memiliki pesawat yang lebih senyap, dan secara umum juga akan lebih aman jika terjadi kecelakaan, karena tidak adanya bahan bakar yang mudah terbakar yang dapat mengakibatkan kebakaran. Untuk memberikan gambaran tentang energi dan daya

spesifik yang diperlukan, mungkin bermanfaat untuk merujuk ke Tabel 6.1, dari situs web “Battery University”, dengan beberapa modifikasi.

Tabel 6.1 Perbandingan kebutuhan energi dan daya pada sistem yang berbeda.

Spesifikasi/daya dan permintaan energi	Boeing 747 (jet jumbo)	Queen Mary 2 atau kapal laut besar	Kendaraan utilitas olahraga	Sepeda	Orang berjalan kaki
Bobot	369 t (fully loaded)	81,000 t	2.5 t	100 kg with person	80 kg (180 lb)
Kecepatan berlayar	900 km/h (560 mph)	52 km/h (32 mph)	100 km/h (62 mph)	20 km/h (12.5 mph)	5 km/h (3 mph)
Daya maksimum	77,000 kW (100,000 hp)	120,000 kW (160,000 hp)	200 kW (275 hp)	2000 W (professional)	2000 W
Kekuatan saat jelajah	65,000 kW (87–000 hp)	90,000 kW (120–000 hp)	130 kW (174 hp)	80 W (0.1 hp)	280 W (0.38 hp)
Jumlah penumpang	450	3000	4	1	1
Daya/penumpang	140 kW	40 kW	50 kW	80 W	280 W
Energi/penumpang per kilometer	580 kJ	2800 kJ	1800 kJ	14.4 kJ	200 kJ

Hal yang menarik untuk diperhatikan adalah tenaga/penumpang paling rendah untuk sebuah sepeda dan tertinggi pada 747 jumbo jet. Namun, energi/penumpang per kilometer agak berbeda – terendah di sepeda, tapi tertinggi di kapal. Menariknya, SUV membutuhkan lebih banyak energi/orang/kilometer daripada jet. Baris keempat adalah kekuatan saat jelajah, mengarah ke baris keenam setelah dibagi dengan jumlah penumpang (yaitu, baris kelima). Ini menunjukkan bahwa daya/penumpang sangat tinggi di dalam pesawat jet dan kapal. Jumlah penumpang yang ditunjukkan di atas untuk 747 dan Queen Mary 2 adalah perkiraan, sehingga baris keenam sedikit berbeda untuk kolom tersebut dibandingkan dengan yang berasal dari baris keempat dan kelima. Tetapi kapal memiliki lebih banyak ruang yang tersedia, maka kapal listrik adalah kemungkinan yang layak, sedangkan jet setara bukanlah pilihan yang layak dengan teknologi saat ini. Jadi, satu-satunya pesawat listrik yang kita lihat saat ini adalah beberapa drone tak berawak atau pesawat berpengerak baling-baling yang sangat kecil.

Dengan pemikiran di atas, kita dapat mendiskusikan pekerjaan yang dilakukan pada pesawat listrik dan di mana keadaannya saat ini. Sementara setara dengan mesin jet menggunakan sarana listrik saat ini tidak mungkin, untuk mengatasi masalah kebutuhan energi, pesawat surya kecil telah dirancang menggunakan panel surya. Beberapa di antaranya sekarang akan dibahas. Contoh terbaru dari pesawat panel surya ditunjukkan pada Gambar 6.23. Pesawat yang diberi nama Helios Prototype ini dikembangkan oleh NASA. Beratnya 1600 lb (725 kg), memiliki lebar sayap 247 kaki (75,3 m), dan luas sayap 1976 kaki persegi (184 m²). Sisi atas sayap membawa panel surya, yang sangat tipis, seperti selembur kertas. Tenaga surya dimasukkan ke dalam baterai lithium-sulfur cadangan sehingga pesawat dapat terbang tanpa adanya siang hari.

Pesawat lain adalah hibrida, dibuat oleh Falx Air Vehicles di Inggris (Gambar 6.24). Ini memiliki rotor miring, menggunakan mesin pembakaran 100 hp, susunan surya, dan motor

listrik dengan daya puncak 240 hp. Konsumsi bahan bakar diklaim 10 l/jam penerbangan. Ini jauh lebih rendah daripada helikopter biasa, yang mengkonsumsi bahan bakar sekitar 17 kali lebih banyak. Jelas dari atas bahwa pesawat listrik dan hibrida ukurannya terbatas. Masalah ini pada dasarnya karena keterbatasan mekanisme penyimpanan energi dan daya yang sangat tinggi yang dibutuhkan oleh pesawat komersial besar saat lepas landas.



Gambar 6.23 Pesawat surya Prototipe Helios NASA. Sumber: Wikimedia



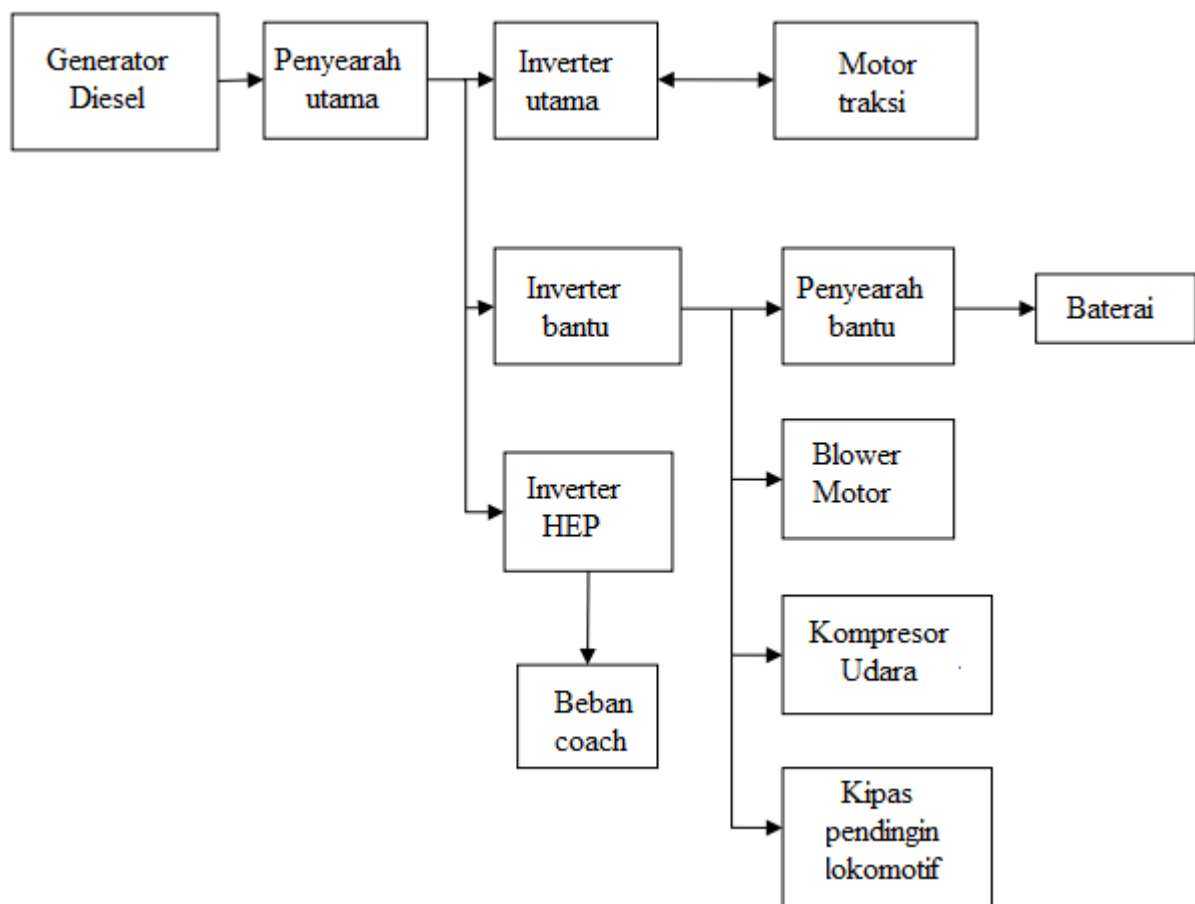
Gambar 6.24 Pesawat tenaga surya hibrida oleh Falx Air. Sumber: Courtesy of NewsUSA.com.

Lokomotif

Lokomotif telah berevolusi selama lebih dari 200 tahun, lokomotif uap ada pada awal 1800-an. Permintaan daya pada kendaraan ini rata-rata bisa mencapai 3000–6000 hp, tergantung pada aplikasinya. Ada beberapa pengecualian di mana ukurannya bisa lebih besar. Lokomotif diesel mulai menggantikan lokomotif uap mulai sekitar satu dekade sebelum pertengahan abad kedua puluh. Mereka lebih mudah dirawat daripada lokomotif uap dan lebih efisien (www.railway-technical.com/st-vs-de.shtml). Motif loco listrik murni diperkenalkan pada tahun 1894 (www.itdh.com/resource.aspx?ResourceID=GREAT21) oleh Kálmán Kandó, menggunakan motor induksi tiga fase. Namun, ini membutuhkan elektrifikasi

rel kereta api, agar berhasil dalam jangka panjang. Lalu ada lokomotif turbin gas, di mana mesin turbin gas digunakan untuk menjalankan generator listrik, dan listrik digunakan untuk menggerakkan motor penggerak. Turbin gas memiliki keuntungan dari kepadatan daya spesifik yang tinggi. Tetapi efisiensi turbin gas turun setelah putaran mesin tertentu, sehingga menjadi tidak ekonomis dalam hal konsumsi bahan bakar. Ini tidak seperti mesin diesel, yang efisiensinya lebih rata pada kecepatan yang lebih tinggi.

Untuk alasan ini, sebagian besar lokomotif sekarang menggunakan mesin diesel, tetapi sistem penggeraknya diimplementasikan melalui motor listrik, karena ada beberapa keuntungan utama dari sistem diesel-listrik. Pertama, jika penggerak murni mekanis, sistem transmisi yang agak besar dengan gearbox dan komponen lainnya, akan diperlukan untuk menciptakan torsi yang diperlukan di roda. Kedua, khususnya di kereta api jarak pendek, dengan fluktuasi kecepatan yang sering, mesin diesel dengan jumlah roda gigi yang terbatas dan banyak perlu dioperasikan pada kecepatan selain yang paling optimal dalam hal efisiensi.



Gambar 6.25 Arsitektur sistem kelistrikan dan propulsi untuk lokomotif diesel-listrik.

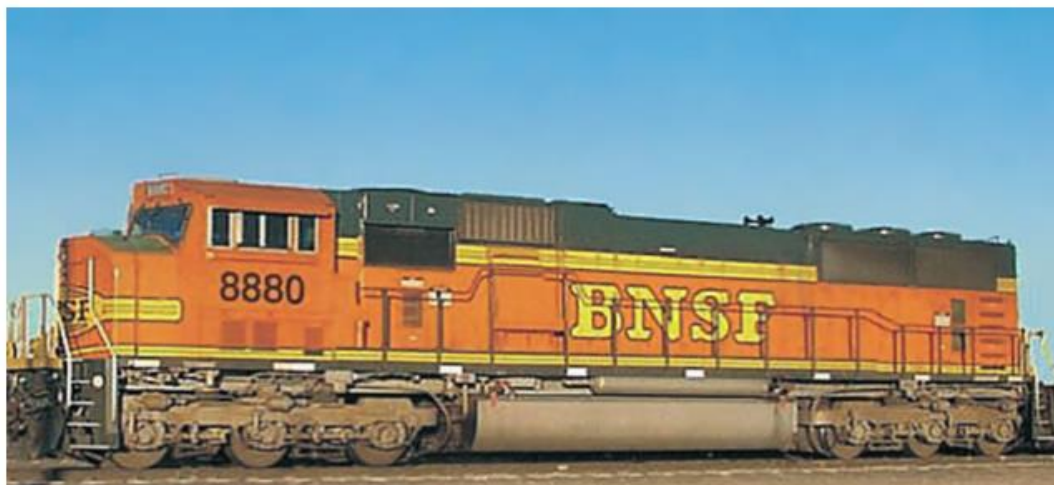
Dengan menggunakan sistem diesel-listrik, kita dapat menghilangkan kedua masalah ini. Dalam sistem ini, mesin diesel dapat dijalankan pada kecepatan optimal, dan generator dijalankan untuk menghasilkan listrik, yang dapat digunakan untuk menjalankan motor traksi untuk menggerakkan roda. Dengan munculnya elektronika daya, sistem ini sangat mudah direalisasikan, menggunakan motor traksi yang andal dan efisien, yang dapat berupa motor induksi atau motor sinkron – baik magnet permanen maupun medan tereksitasi. Dengan latar belakang ini, mari kita lihat arsitektur dasar sistem diesel-listrik (Gambar 6.25).

Pada umumnya motor traksi ditempatkan pada setiap poros lokomotif untuk menggerakkan pasangan roda. Beberapa lokomotif diesel-listrik ditunjukkan pada Gambar 6.26. Salah satu contoh lokomotif tertentu ditunjukkan pada Gambar 6.27, dengan beberapa spesifikasi teknis. Mesin dieselnnya memiliki tenaga 4000 hp, sedangkan tenaga di rodanya

adalah 3350 hp. Enam motor digunakan, satu per gandar – tiga gandar di depan dan tiga di belakang. Motornya adalah empat kutub, sangkar tupai, motor induksi tiga fase, tegangan maksimum 2030 V, dengan peringkat daya kontinu 433 kW. Jadi total tenaga motor adalah 2.598 kW, atau sekitar 3.500 hp. Kecepatan maksimum motor adalah 3220 rpm, dan ada rasio roda gigi 85:16 antara motor dan roda. Perhatikan bahwa motor induksi sangkar tupai adalah perangkat yang sangat andal untuk aplikasi semacam itu. Meskipun kerapatan daya spesifik dapat sedikit lebih kecil daripada di motor magnet permanen, dalam aplikasi motif loko di mana ruang mungkin tidak premium, katakanlah di mobil penumpang kecil, ini mungkin pilihan ideal. Selain itu, motor induksi sangat tahan terhadap kondisi suhu, tidak seperti motor magnet permanen.

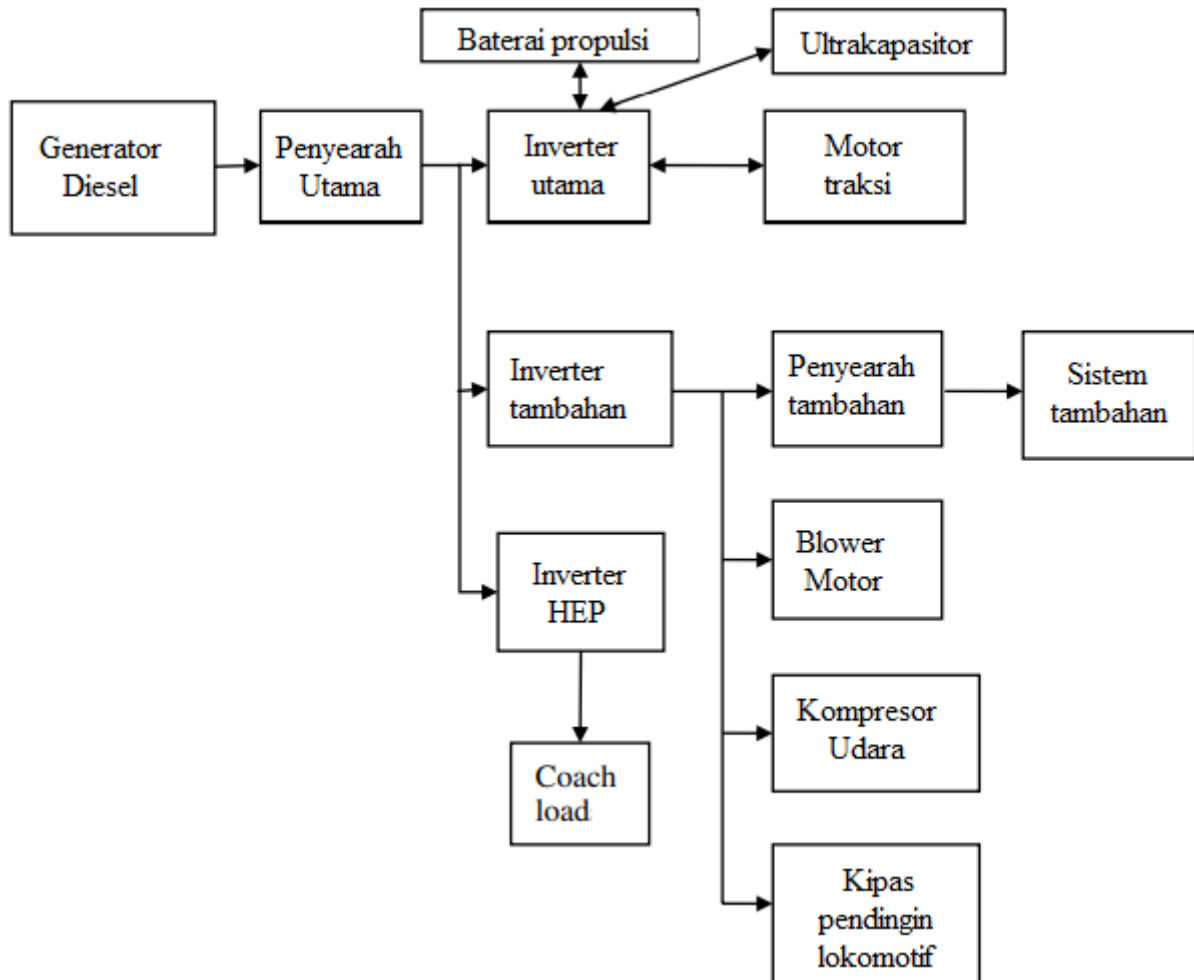


Gambar 6.26 Gambar dua lokomotif diesel-listrik oleh Siemens. Atas izin Siemens AG.



Gambar 6.27 Gambar lokomotif diesel-listrik besar buatan Siemens. Atas izin Siemens AG.

Perlu disebutkan bahwa dalam banyak aplikasi tidak ada baterai sistem traksi di lokomotif (tentu saja, mesin diesel membutuhkan mekanisme awal, yang dapat berupa listrik, hidrolik, atau pneumatik; jika itu listrik, diperlukan baterai starter kecil). Namun, untuk menangkap energi regeneratif, diperlukan baterai penyimpanan, ultrakapasitor, atau kombinasi keduanya, atau bahkan unit penyimpanan flywheel, yang dapat digunakan selama regenerasi. Regenerasi dapat membantu meningkatkan penghematan bahan bakar dan lebih penting untuk kereta api jarak pendek tetapi tidak begitu penting untuk kereta api jarak jauh. Arsitektur sistem lokomotif yang mampu beregenerasi ditunjukkan pada Gambar 6.28.



Gambar 6.28 Arsitektur sistem kelistrikan dan propulsi untuk lokomotif diesel-listrik termasuk kemampuan pengereman regeneratif.

Sistem yang ditunjukkan pada gambar ini pada dasarnya sama dengan Gambar 6.25, kecuali bahwa sistem tersebut sekarang memiliki baterai propulsi dan/atau ultrakapasitor, yang dapat memberi makan motor propulsi. Semua prinsip lainnya tetap sama. Perlu disebutkan bahwa, saat ini, transportasi kereta api listrik, terutama kereta api berkecepatan tinggi, semakin populer, yang menghilangkan kebutuhan generator diesel onboard di kereta api. Dalam aplikasi ini, mesin listrik mendapatkan daya dari kabel overhead.

6.7 KENDARAAN APLIKASI UTILITAS INDUSTRI LAINNYA

Kendaraan utilitas industri biasanya mencakup forklift industri, kapal tunda bandara, kereta golf, dan kendaraan yang digunakan di dalam pabrik dan bandara untuk transportasi internal. Beberapa di antaranya memang memenuhi syarat sebagai kendaraan off-road juga, tetapi kita akan khususkan nama kendaraan off-road untuk kendaraan yang relatif berat

seperti kendaraan pertambangan, truk sampah, dan ekskavator. Dalam cara yang lebih spesifik, dalam banyak kasus, kendaraan utilitas industri digunakan dalam ruang yang relatif terbatas dibandingkan dengan kendaraan off-road. Oleh karena itu sistem propulsi mereka terkadang menggunakan propana atau gas lainnya (termasuk gas cair) untuk bahan bakar ICE mereka. Tujuannya adalah untuk menghindari polusi jenis knalpot di dalam ruang terbatas atau tertutup tanpa ventilasi yang memadai. Namun, untuk mencegah polusi suara, dalam banyak kasus penggerakannya murni listrik.

Jadi, muncul pertanyaan: di mana kendaraan ini muncul dalam lingkup HEV? Pertama, mari kita perhatikan bahwa motivasi utama di balik HEV adalah penghematan bahan bakar dan pengurangan ukuran keseluruhan gearbox transmisi, jika memungkinkan. Dari jumlah tersebut, penghematan bahan bakar lebih penting dalam kasus kendaraan penumpang, sedangkan masalah pengurangan ukuran transmisi memainkan peran penting dalam kendaraan off-road, lokomotif, dan sebagainya. Secara umum benar bahwa jika ukuran gearbox dan komponen lainnya dapat dikurangi, penghematan bahan bakar akan terjadi secara bersamaan. Ini di samping fakta bahwa lokomotif, misalnya, juga akan mendapatkan penghematan bahan bakar yang lebih baik dengan menjalankan ICE pada titik yang paling efisien.

Dalam kendaraan utilitas industri, penghematan bahan bakar adalah masalah, tetapi pengurangan kebisingan, pengendalian polusi, dan keandalan lebih penting. Untuk itu, penggerak listrik murni tampaknya lebih menarik, yang menunjukkan kendaraan listrik plug-in. Ini umumnya cocok untuk aplikasi dalam ruangan karena, hampir selalu, listrik akan tersedia untuk mengisi baterai kendaraan untuk aplikasi semacam itu. Oleh karena itu, HEV multipropulsi tidak terlalu menarik untuk kendaraan utilitas industri yang dioperasikan dalam ruang terbatas dan siklus perjalanan pendek.

BAB 7

APLIKASI HEV UNTUK KENDARAAN MILITER

7.1 MENGAPA HEV DAPAT BERMANFAAT UNTUK APLIKASI MILITER

Ada beberapa motivasi, baik langsung maupun tidak langsung, untuk HEV dalam aplikasi militer. Aplikasi militer dapat mencakup aplikasi kendaraan langsung, yang terkait dengan penggerak kendaraan, dan aplikasi tidak langsung dalam arti menggunakan lengan yang dioperasikan secara elektrik, atau berinteraksi dengan sistem kelistrikan kendaraan untuk membuat jaringan mikro untuk memasok daya ke pangkalan militer, dll.

Salah satu alasan terpenting untuk mempertimbangkan HEV untuk aplikasi militer adalah biaya bahan bakar. Mengangkut bahan bakar ke lapangan melalui rute berisiko dan jarak jauh dapat meningkatkan biaya bahan bakar secara signifikan. Biayanya bisa naik dari 1 dalam situasi sipil biasa menjadi 400 per galon untuk membawa bahan bakar ke medan perang (<http://www.defensesystems.com/Articles/2010/03/11/Defense-IT-3-Greens.aspx>), dan jika angkutan udara diperlukan, biayanya bahkan bisa naik menjadi 1000 per galon. Secara umum, biaya untuk membawa bahan bakar ke lapangan adalah sekitar 100 per galon (<http://www.environmentalleader.com/2010/05/28/us-commanders-want-deployable-renewable-energy-generation>). Intinya adalah kita dapat mengasumsikan bahwa biaya bahan bakar akan menjadi beberapa ratus ribu per galon dalam situasi militer. Jadi, bahkan persentase kecil penghematan bahan bakar dapat menyiratkan penghematan biaya yang sangat besar, hingga triliunan rupiah per tahun.

Masalah lain dalam aplikasi militer melibatkan kebisingan, yang meliputi kebisingan akustik, *interferensi elektromagnetik* (EMI), dan juga tanda panas dalam bentuk radiasi inframerah, yang dapat dideteksi di tempat lain. HEV yang tenang dapat membantu secara signifikan untuk mencapai beberapa tujuan penghapusan kebisingan di atas.

Ada juga beberapa manfaat tidak langsung dari HEV. Ketika militer pindah ke zona pertempuran, mungkin ada pangkalan dan infrastruktur lain yang memerlukan aplikasi listrik stasioner pada tegangan tingkat utilitas. Dengan beberapa HEV, ketika dihubungkan dan dihubungkan dengan benar, dimungkinkan untuk membuat tegangan tingkat utilitas untuk menjalankan berbagai item peralatan stasioner. Ini dapat dicapai dengan menggunakan baterai HEV (dan, jika perlu, ICE di HEV). Beberapa HEV sebenarnya dapat membentuk microgrid dengan sumber daya utilitas yang cukup kuat. Tentu saja, ketika menghubungkan beberapa HEV untuk menghasilkan listrik, hal itu perlu dilakukan dengan benar melalui kontrol yang tepat dan elektronik daya. Pemanfaatan kendaraan untuk pembangkit listrik semacam ini dapat membantu secara signifikan, dalam arti dapat mengurangi kebutuhan unit daya tambahan, sehingga menghemat biaya dan berat perangkat ini, dan mengangkutnya ke lapangan.

Tergantung pada arsitektur yang digunakan dalam HEV – misalnya, jika memiliki motor hub di setiap roda, atau bahkan satu motor per gandar untuk penggerak, dan menggunakan arsitektur seri HEV (SHEV) – ini akan memiliki keuntungan redundansi dalam kasus salah satu motor gagal. Kemudian kendaraan dapat dibuat berjalan dalam mode degradable yang anggun, dengan kinerja yang agak berkurang, dan dipindahkan ke zona aman sesuai kebutuhan, sebelum diperlukan perbaikan dan perawatan. Jadi, dapat dilihat bahwa ada beberapa keuntungan dalam memperkenalkan HEV untuk aplikasi militer.

7.2 APLIKASI KENDARAAN DARAT

Arsitektur – Seri, Paralel, Kompleks

Kendaraan militer dapat memiliki arsitektur yang mirip dengan kendaraan HEV komersial biasa yang disebutkan sebelumnya. Sebuah makalah penelitian yang sangat informatif oleh Ucarol et al. telah membuat perbandingan antara ICE, SHEV, dan HEV paralel. Di sana, berdasarkan studi simulasi, dari sudut pandang berat, kendaraan ICE tercatat paling ringan, dengan HEV paralel sedikit lebih berat. Namun, kendaraan hibrida seri ditemukan sedikit lebih berat. Analisis ini, meskipun dilakukan untuk kendaraan komersial, juga berlaku untuk kendaraan militer.

Jika kendaraan ICE dianggap sebagai dasar, kita dapat membandingkan arsitektur lain. Untuk mencocokkan kinerja kendaraan baseline, jelas perlu untuk membuat ukuran total (dalam hal daya) motor listrik di SHEV sama dengan ICE di kendaraan baseline. Penulis buku ini percaya bahwa hal ini sebenarnya tidak perlu dilakukan, tetapi ukuran motor harus sedemikian rupa sehingga selama siklus penggerak tertentu, energi rata-rata yang keluar dari generator sama dengan energi rata-rata yang dikonsumsi oleh motor penggerak.

Daya puncak dapat ditangani oleh baterai, yang harus diisi dalam batasnya. Proses pemikiran serupa juga berlaku untuk pengambilan keputusan untuk memilih ukuran generator. Keputusan harus didasarkan pada studi siklus drive yang berbeda, kemudian menyajikan skenario terburuk. Kunci pengambilan keputusan ini terletak pada baterai (atau perangkat penyimpanan energi lainnya) dan apakah mereka dapat memberikan daya maksimum yang dibutuhkan atau tidak. Hanya jika baterai disimpan dalam kondisi benar-benar mengambang sepanjang waktu, dan daya dari ICE dan generator diumpankan ke motor secara paralel dengan baterai, generator harus berukuran sama dengan daya maksimum tuntutan. Tetapi tujuan baterai, atau sumber daya puncak apa pun, adalah untuk mengatasi kemungkinan puncak mendadak atau tuntutan yang lebih tinggi ini; maka ukuran ICE di SHEV dan ukuran generator pasti bisa dikurangi.

Dalam HEV paralel, ukuran motor listrik bahkan bisa kurang dari setengah ukuran SHEV. Ucarol dkk. menetapkan keseimbangan daya – yaitu, setiap defisit antara permintaan beban dan daya propulsi listrik – ke ICE dalam HEV paralel. Mekanisme untuk membagi penugasan daya antara motor dan ICE di HEV paralel ini mengasumsikan bahwa ICE asli di kendaraan baseline dipilih berdasarkan daya maksimum yang dibutuhkan di bawah skenario siklus penggerak yang paling buruk. Juga tidak ada generator di PHEV dalam penelitian yang dikutip di atas. Namun, pada beberapa arsitektur lain, seperti Toyota Prius dan GM two-mode hybrid, terdapat generator yang terpisah dari motor penggerak utama (yang juga dapat digunakan sebagai generator).

Alasan untuk memiliki generator terpisah ini sangat tergantung pada strategi pengendaliannya. Dalam kondisi tertentu dari status pengisian baterai (SOC) dan permintaan daya untuk propulsi, mungkin perlu untuk memberikan pengisian tambahan ke baterai, di situlah generator ini berperan.

Bagian yang sangat penting dari SHEV atau HEV paralel adalah baterai atau perangkat penyimpanan lainnya seperti ultrakapasitor. Ucarol dkk gunakan kapasitas baterai, yaitu, ampere-jam, sebagai metrik untuk baterai. Namun nyatanya ampere-hour itu sendiri tidak cukup untuk menentukan baterai. Penting juga untuk mengetahui arus atau peringkat daya baterai, sehingga selama permintaan daya maksimum oleh motor penggerak, baterai, bersama dengan generator, dapat menyediakannya. Ini adalah proses pengambilan keputusan penting dalam menciptakan spesifikasi desain untuk HEV. Pembahasan di atas berlaku untuk kendaraan berbahan bakar bensin dan solar. Kendaraan militer sebagian besar berbasis mesin diesel (termasuk bahan bakar JP-8). Perbaikan dalam teknologi mesin diesel akan membantu kendaraan ini, tetapi hibridisasi akan selalu memungkinkan penghematan bahan bakar yang lebih baik dan manfaat lainnya terlepas dari keadaan teknologi mesin diesel.

Pertanyaan selanjutnya yang harus dijawab adalah pilihan arsitektur pada kendaraan militer untuk tujuan hibridisasi, yaitu apakah harus seri, paralel, atau kompleks. Pertanyaan tersebut dapat dijawab dengan baik tergantung pada apa prioritasnya – apakah itu penghematan bahan bakar, ukuran atau berat, atau keandalan? Jika penghematan bahan bakar adalah prioritas utama, maka pilihannya harus HEV paralel. Jika ukuran dan bobot yang ringan menjadi perhatian karena persyaratan untuk membawa kendaraan di dalam pesawat terbang, dan seterusnya, maka HEV paralel akan lebih baik daripada SHEV. Secara umum, SHEV akan sedikit lebih berat daripada PHEV, yang mungkin sedikit memengaruhi penghematan bahan bakar. Di sisi lain, jika kinerja kendaraan menjadi perhatian utama, yaitu output daya, mungkin bermanfaat untuk menggunakan arsitektur SHEV, yang dapat membantu menghilangkan transmisi yang lebih berat dan menyediakan daya tinggi sesuai permintaan dengan sangat cepat karena kemampuan untuk mengontrol motor lebih cepat dari ICE. Pertimbangan keandalan mungkin lebih baik ditangani secara umum dengan menggunakan HEV paralel, karena redundansi dalam propulsi oleh ICE dan motor. Keandalan tidak bisa diremehkan dalam kendaraan militer. Namun, HEV paralel lebih kompleks dalam hal kontrol, dan memperkenalkan kompleksitas dalam kopling mekanisnya. Studi menyeluruh tentang mode kegagalan perangkat ini diperlukan sebelum keputusan dapat dibuat secara meyakinkan tentang masalah keandalan.

Masalah lain yang menyertai keandalan dalam sistem kendaraan militer adalah pemeliharaan. Tampaknya pemeliharaan SHEV agak lebih sederhana karena beberapa alasan. Kontrolnya lebih sederhana. Hubungan mekanisnya, tidak seperti HEV paralel, juga sangat sederhana. Jika ada motor hub dalam penggeraknya, mereka dapat dengan cepat diganti jika terjadi kegagalan. Diskusi di atas menunjukkan pro dan kontra dari paralel dan SHEV, tetapi keandalan secara keseluruhan, dan lebih khusus lagi kebutuhan survivabilitas, mungkin dapat dilayani dengan lebih baik oleh HEV paralel.

Karena itu, perlu dicatat bahwa keputusan dapat sangat bergantung pada aplikasi dan siklus drive. Kendaraan logistik atau pendukung di militer (atau jenis kendaraan non-tempur) yang menempuh jarak lebih jauh, karena siklus penggerak yang terlibat, mungkin akan lebih diuntungkan dengan menggunakan HEV paralel. Di sisi lain, untuk kendaraan tempur di mana permintaan daya dan respons cepat terhadap permintaan tersebut paling penting, SHEV akan lebih bermanfaat. Keputusan akhir atas hal-hal tersebut merupakan studi tradeoff yang cukup kompleks dan sistematis dengan mentabulasi semua persyaratan kinerja, penghematan bahan bakar, keandalan, dan sebagainya, harus dilakukan untuk menentukan keputusan yang optimal.

Kendaraan Yang Paling Bermanfaat

Ada banyak jenis kendaraan militer yang berbeda, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.1. Dalam berbagai jenis kendaraan yang ditunjukkan pada Gambar 7.1, siklus penggerak dan kebutuhannya sangat berbeda. Beberapa kendaraan berjalan untuk jarak jauh, beberapa adalah kendaraan tempur dengan kebutuhan daya dan kinerja yang sangat tinggi, sementara yang lain adalah kendaraan robot tanpa awak, di mana misi jangka panjang dan kemampuan bertahan bisa lebih penting daripada penghematan bahan bakar. Beberapa memiliki senjata terpasang, beberapa tidak. Berdasarkan kebutuhan ini, arsitektur kendaraan bisa sangat berbeda.



Gambar 7.1 Beberapa kendaraan militer: (a) HMMWV (kendaraan beroda multiguna mobilitas tinggi), (b) Stryker, (c) HEMTT (truk taktis mobilitas berat yang diperluas), (d) Bradley, (e) Abrams, (f) Fennek (Eropa), (g) MRAP (pelindung dari serangan ranjau), (h) Robot anjing besar, (i) Gladiator, dan (j) Pedang. Courtesy Wikimedia – Gambar domain publik militer AS.

Untuk memperkirakan manfaat hibridisasi kendaraan militer, beberapa jenis metrik harus ditetapkan. Cara sistematis yang mungkin untuk melakukan analisis ini disarankan di bawah ini, berdasarkan informasi terperinci yang dicatat. Informasi dan pertanyaan yang diperlukan untuk dijawab:

- Jumlah kendaraan yang dikerahkan saat ini, N
- Biaya kendaraan awalnya, C
- Ekonomi bahan bakar rata-rata kendaraan, yaitu mil per galon, F
- Peringkat daya kendaraan, P
- Mil/km perjalanan kendaraan dalam siklus hidupnya, M
- Apakah itu kendaraan tempur atau kendaraan pendukung, pada skala 1 (pertempuran minimal dan terutama dukungan) hingga 10 (sangat tempur), K

- Cara pengangkutan kendaraan ke lapangan, skala 1 (dengan sendirinya), melalui angkutan kapal (5), ke angkutan udara (10), T
- Kemudahan perawatan, dalam skala 1 (minimal) hingga 10 (sangat penting), E
- Seberapa penting survivabilitasnya dalam hal kegagalan, pada skala 1 (minimal) hingga 10 (sangat penting), S
- Keberlanjutan jangka panjang dalam hal misi tanpa pengisian bahan bakar atau intervensi lain dari luar, pada skala 1 (mudah diisi ulang, yaitu bahan bakar mudah tersedia untuk mengisi bahan bakarnya) hingga 10 (dikembangkan dan tidak dapat diisi ulang secara eksternal, mis. robot tak berawak), Q
- Biaya tambahan hibridisasi, H
- Kehilangan atau perolehan keandalan jika dihibridisasi, dibandingkan dengan kendaraan dasar pada skala 0 hingga 1 (gain tinggi = 1; perolehan atau kerugian rendah = 0), R

Karena besaran-besaran ini berada dalam satuan yang berbeda, beberapa tidak berdimensi, dan jangkauannya juga bisa sangat berbeda secara numerik, akan bermanfaat untuk menormalkannya dalam beberapa cara, untuk membawanya dalam kisaran yang sebanding dan dapat diatur. Semua jumlah ini mungkin dapat dinormalisasi kecuali jumlah kendaraan, karena ini hanya menunjukkan manfaat total. Selain menggunakan normalisasi, adalah instruktif untuk memasukkan faktor pembobotan untuk masing-masing kriteria. Semua ide ini digabungkan dalam Tabel 7.1 untuk kemudahan pemahaman dan dengan beberapa nilai numerik pengganti untuk tujuan ilustrasi.

Tabel 7.1 Mekanisme tradeoff dalam pengambilan keputusan hibridisasi

Kriteria	Faktor normalisasi	Faktor pembobotan pada skala 1 (kurang penting) sampai 10 (paling penting)
N (jumlah kendaraan)	1	1
C (biaya awal per kendaraan)	500,000	6
f (mil per galon): gunakan $1/f$	8	7
P (peringkat daya)	300 kW	5
M (mil dalam siklus hidup)	m (didefinisikan berdasarkan jenis kendaraan)	5
K (jenis kendaraan: tempur, pendukung, dll.)	5	5
T (transportasi)	5	5
E (kemudahan perawatan)	5	7
S (kemampuan bertahan)	5	8
Q (kemampuan bertahan jangka panjang tanpa pengisian bahan bakar)	5	6
H (biaya untuk hibridisasi): gunakan $1/H$	20,000	2
R (mendapatkan keandalan karena hibridisasi)	0.5	8

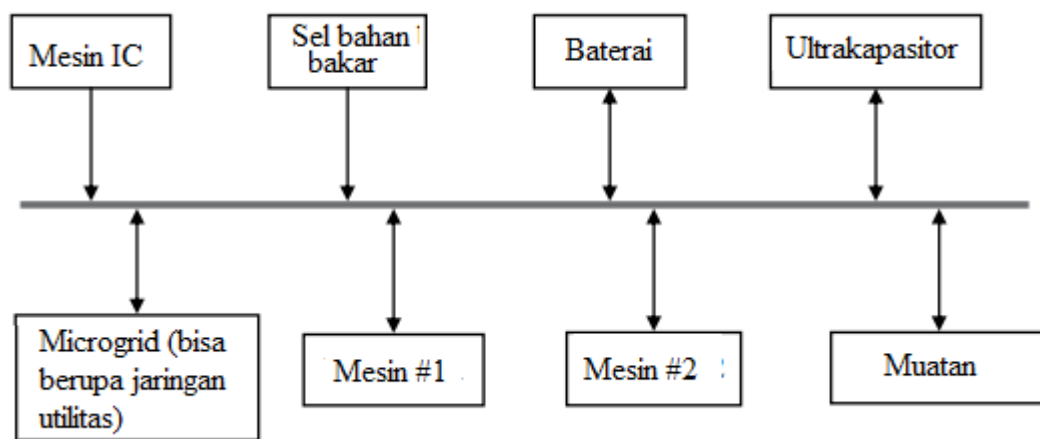
Kriteria di atas memberikan metrik untuk kendaraan tertentu. Ini mungkin bukan metrik yang sempurna tetapi setidaknya memungkinkan perbandingan kendaraan satu sama lain. Sebagai contoh, mari kita katakan bahwa manfaat hibridisasi tangki Abrams tunggal jauh

lebih besar daripada hibridisasi HMMWV tunggal. Tapi mungkin ada banyak HMMWV (dalam hal jumlah yang dikerahkan di lapangan) dibandingkan dengan tank Abrams. Oleh karena itu mungkin lebih penting untuk memperkenalkan hibridisasi dalam HMMWV, daripada di Abrams, jika ada masalah pilihan. Demikian pula, kriteria lain yang diusulkan di atas juga penting. Kolom ketiga dalam tabel, yang melibatkan faktor pembobotan (yaitu seberapa penting kriteria khusus ini pada skala 1–10), sangat penting. Biasanya semua item ini harus diselesaikan terlebih dahulu setelah berdiskusi dengan berbagai orang yang berpengalaman dengan kendaraan dalam hal aplikasi mereka dan tentang hal-hal yang berkaitan dengan item di berbagai baris tabel.

Konsep faktor normalisasi dan pembobotan yang diperkenalkan dalam bab ini belum muncul dalam literatur sejauh yang penulis ketahui. Oleh karena itu mungkin proses asli untuk hibridisasi dalam kendaraan militer. Dengan lebih banyak pengalaman di lapangan, mungkin perlu merevisi proses evaluasi metrik ini dan entri dalam Tabel 7.1. Meskipun konsep tersebut diperkenalkan untuk kendaraan militer, metrik tersebut bisa sama pentingnya untuk aplikasi pada kendaraan sipil komersial biasa. Ini bisa berguna dalam membuat keputusan tentang pindah ke platform hybrid daripada non-hibrida biasa.

7.3 APLIKASI MILITER NON-KENDARAAN DARAT

Kendaraan militer termasuk aplikasi non-otomotif juga. Ini dapat mencakup kendaraan udara dan air, yaitu pesawat terbang, kapal laut, dan perahu. Selain itu, beberapa aplikasi tidak bersifat kendaraan langsung. Misalnya, kendaraan mungkin menggunakan senjata atau perangkat serupa lainnya, beberapa di antaranya mungkin lebih baik dioperasikan secara elektrik. Contohnya bisa menjadi senjata elektromagnetik. Beberapa peralatan ini mungkin memerlukan ICE, atau sel bahan bakar, dan sebagainya, yang dapat mengisi daya baterai atau ultrakapasitor. Peralatan (senjata atau lainnya) itu sendiri dapat langsung diaktifkan oleh tenaga listrik (dari baterai atau perangkat penyimpanan serupa) yang nantinya dapat diisi ulang dengan menggunakan ICE atau sel bahan bakar.



Gambar 7.2 Arsitektur sistem tenaga hibrida generik.

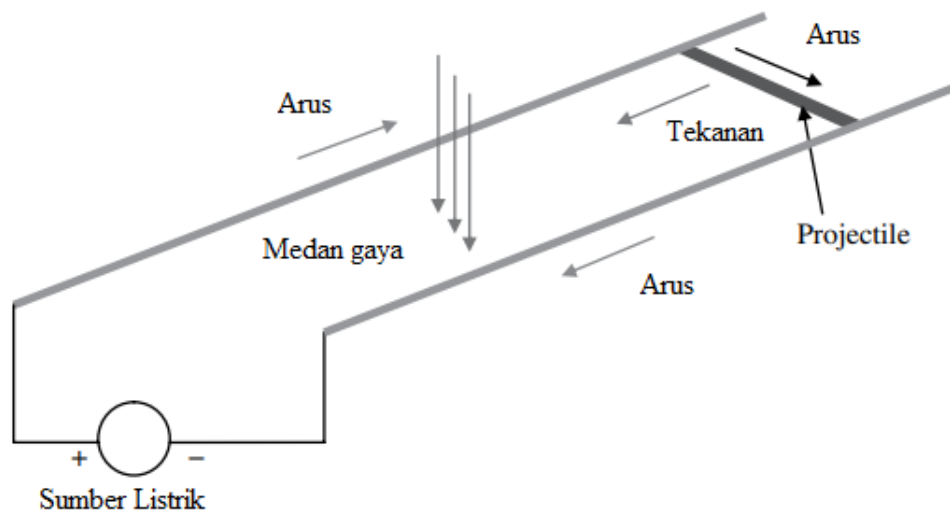
Hibridisasi, meskipun tidak dalam arti kendaraan, dapat mencakup hal-hal seperti antarmuka dengan jaringan utilitas atau jaringan mikro, di mana sejumlah kendaraan dapat bertukar daya melalui bus umum. Di sini pada prinsipnya dimungkinkan untuk memiliki generator berbasis ICE, beberapa sel bahan bakar, dan kendaraan semuanya disinkronkan dengan benar dan kemudian bertukar daya. Diagram tingkat sistem dari situasi ini ditunjukkan pada Gambar 7.2. Perhatikan bahwa HEV hanyalah kasus khusus dari sistem tenaga hibrida di atas pada tingkat kendaraan internal. Di sini (dalam Gambar 7.2) hibridisasi diperluas ke tingkat sistem yang lebih tinggi. Kendaraan 1 dan 2 pada gambar dapat berupa HEV atau EV

dan dapat bertukar daya dengan sistem lainnya. Demikian pula, jika kendaraan itu berbasis ICE, itu bisa menjalankan mesin dan menghasilkan tenaga saat tidak bergerak, dan itu bisa memberi tenaga ke kendaraan lain yang kekurangan tenaga. Contoh aplikasi kendaraan darat jenis non-propulsi adalah sebagai berikut.

Peluncur Elektromagnetik

Ini dapat menggunakan gaya elektromagnetik untuk mendorong item dengan kecepatan sangat tinggi dengan memperlakukannya dengan sangat cepat. Dalam pistol biasa pembakaran bahan kimia menyebabkan ledakan dan menciptakan kekuatan akselerasi. Sedangkan kecepatan sistem berbasis pembakaran bisa sekitar 2 km/s untuk senjata performa tinggi, senjata elektromagnetik dapat mempercepat proyektil menjadi sekitar 6-7 km/s. Ini cukup spektakuler, karena tiga kali lebih banyak dari sistem berbasis pembakaran, dan ini tentang kecepatan yang dibutuhkan untuk menempatkan satelit, dll. ke orbit rendah bumi.

Prinsip peluncur elektromagnetik ditunjukkan pada Gambar 7.3. Salah satu teknologi yang memungkinkan terkait dengan aplikasi ini adalah ketersediaan arus yang sangat tinggi dan daya sesaat untuk waktu yang sangat singkat. Sistem tenaga yang sederhana tidak dapat menyediakan ini, karena diperlukan daya pulsa yang tinggi. Setelah setiap tembakan daya pulsa tinggi, perlu untuk mengisi ulang sistem melalui beberapa sistem tenaga hibrida seperti yang disebutkan sebelumnya. Jika peluncur skala kecil akan digunakan dalam sistem berbasis kendaraan bergerak, hampir wajib untuk menggunakan sistem tenaga hibrida di dalam kendaraan. Ini adalah contoh yang mungkin bukan sistem propulsi hibrida dalam arti kendaraan langsung, tetapi jelas merupakan sistem tenaga hibrida.



Gambar 7.3 Prinsip dasar peluncur elektromagnetik.

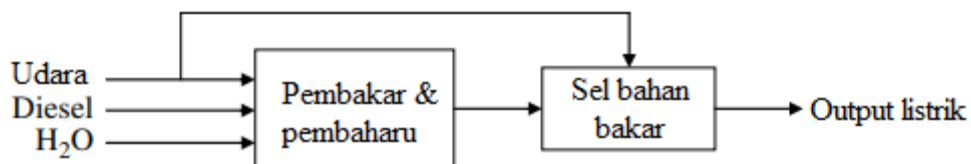
Kapal Bertenaga Hibrida

Dalam Bab 6 kita membahas kapal yang digerakkan secara elektrik secara luas, dan tidak akan mengulangi informasi itu di sini. Keuntungan dari sistem seperti itu dengan jelas ditunjukkan dalam bab itu. Dalam satu upaya khusus oleh Angkatan Laut, diesel dapat langsung direformasi menjadi hidrogen melalui proses kimia. Hidrogen ini kemudian dapat digunakan dalam sel bahan bakar untuk menghasilkan tenaga listrik, yang dapat digunakan untuk menggerakkan motor listrik. Telah ditunjukkan bahwa karena kapal bergerak dengan kecepatan yang relatif rendah, daya puncak mungkin tidak diperlukan, menyiratkan bahwa sumber daya puncak tambahan seperti baterai mungkin tidak diperlukan.

Keuntungan dari sistem seperti itu adalah ICE tidak diperlukan dan tidak akan ada polusi. Bahkan jika daya puncak diperlukan, dimungkinkan untuk menggunakan ultrakapasitor atau baterai berdaya tinggi untuk melengkapi sel bahan bakar, daripada memiliki ICE sama sekali di dalam kapal. Karena di dalam kapal terdapat lebih banyak ruang daripada di dalam

mobil, kemungkinan memiliki beberapa sumber daya puncak ini tidak boleh dikesampingkan. Lebih lanjut, jika mesin kapal berbasis turbin gas memiliki efisiensi sekitar 16-18%, sel bahan bakar memiliki efisiensi 37-52%, yang secara signifikan lebih tinggi, sehingga menghasilkan penghematan bahan bakar yang jauh lebih baik. Tentu saja, manfaat lain dari sistem berbasis sel bahan bakar adalah pengoperasian yang tenang dan kemampuan untuk menempatkan sejumlah sistem sel bahan bakar tersebut di lokasi yang berbeda (ditempatkan secara strategis di dekat beban) karena sambungan ke beban motor penggerak akan melalui kabel. Ini tidak seperti sistem berbasis ICE, yang secara mekanis kaku dalam hal lokasi. Aplikasi ini, disebutkan di atas, adalah kasus khas dari sistem tenaga hibrida dalam arti bahwa sistem reformer diesel adalah sistem elektrokimia. Sistem elektrokimia ini mungkin memerlukan penyalaan awal melalui beberapa sistem kelistrikan pilot dengan ukuran yang relatif kecil. Tapi begitu dimulai, sel bahan bakar itu sendiri bisa mempertahankan sistem reformer diesel tanpa campur tangan dari sistem startup. Sistem startup dapat berupa baterai dengan ukuran yang relatif kecil.

Dalam sistem reformer diesel, diesel, udara, dan air digunakan sebagai input. Komponen-komponen ini bereaksi dan campuran gas dengan sekitar 30% hidrogen dan gas inert lainnya seperti karbon dioksida, uap, dan nitrogen diperoleh sebagai output. Campuran gas ini kemudian diumpungkan ke catalytic burner untuk memicu sistem sel bahan bakar. Pembakar katalitik menyebabkan sekitar 80% hidrogen bereaksi dengan udara tambahan, dan menghasilkan panas dan air sebagai produk sampingan. Ini seperti sel bahan bakar dengan tingkat konversi sekitar 80%. Selanjutnya, pembakar katalitik lain digunakan untuk membuat hidrogen yang tersisa bereaksi dengan udara tambahan, dan mengubah semua hidrogen menjadi uap. Dalam sistem khusus ini, hidrogen tidak disimpan sebagai proses antara, dan hidrogen yang dihasilkan oleh proses reformasi hanya ada untuk waktu yang sangat singkat (sekitar 15 detik). Kurangnya penyimpanan hidrogen menambah keamanan sistem, karena hidrogen adalah gas yang mudah terbakar. Diagram tingkat sistem untuk sistem reformasi ditunjukkan pada Gambar 7.4.



Gambar 7.4 Sebuah reformer diesel untuk sel bahan bakar

7.4 APLIKASI PESAWAT

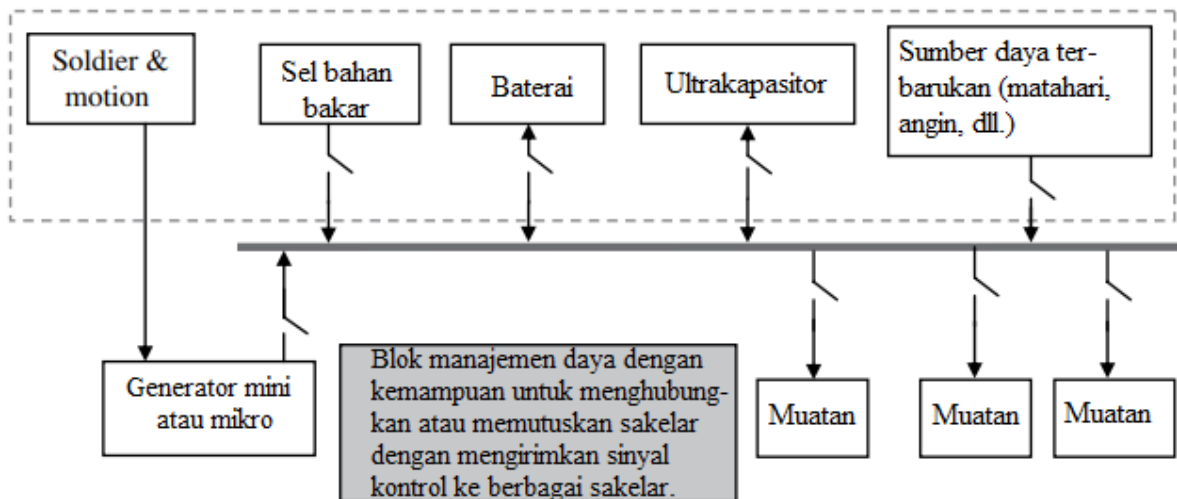
Sebagaimana ditunjukkan dalam Bab 6, karena daya dan daya dorong yang tinggi diperlukan, penerapan daya listrik untuk propulsi pesawat terbang sangat terbatas saat ini, selain pada pesawat yang sangat ringan seperti drone tak berawak tertentu dan pesawat terbang yang sangat kecil. Untuk pesawat komersial, masuk akal untuk mengasumsikan bahwa teknologi (termasuk penyimpanan energi) belum tersedia untuk aplikasi yang layak di bidang ini. Karena rincian tentang topik ini sudah diberikan dalam Bab 6, mereka tidak disertakan di sini.

Aplikasi Prajurit Turun dari Kuda

Prajurit yang diturunkan menyiratkan seorang prajurit yang secara fisik tidak berada di dalam kendaraan (yaitu individu yang berdiri sendiri) dan tidak memiliki hubungan langsung untuk mendapatkan tenaga atau energi dari kendaraan atau lainnya. Ini menyiratkan bahwa untuk peralatan apa pun yang dibawa oleh prajurit, perlu untuk membawa daya atau sumber energi pada orang tersebut untuk memberi energi pada perangkat tersebut. Pertanyaan mungkin muncul mengapa perlu membahas masalah kekuasaan untuk seorang prajurit yang turun dalam sebuah buku tentang HEVs. Alasannya adalah arsitektur HEV memiliki beberapa

kesamaan dengan arsitektur prajurit yang turun, karena keduanya adalah sistem tenaga hibrida. Konsep mengelola daya di sini juga mirip dengan HEV. Faktanya, meskipun tingkat kekuatan peralatan prajurit jauh lebih kecil daripada di HEV, masalah pengelolaannya secara konseptual sama. Faktanya, masalah manajemen daya dapat menjadi lebih penting bagi prajurit yang turun dari kuda yang dapat sepenuhnya mandiri, dalam berbagai situasi, dan perbedaan antara manajemen daya yang baik dan buruk dapat menyiratkan perbedaan antara hidup dan mati. Oleh karena itu, meskipun sistem tenaga prajurit yang diturunkan mungkin bukan sistem propulsi, sistem tenaga dapat menjadi hibrida dan menggunakan konsep manajemen daya serupa yang dapat dibahas dengan baik dalam ruang lingkup buku ini.

Arsitektur umum sistem tenaga untuk prajurit yang diturunkan ditunjukkan pada Gambar 7.5. Menurut Kementerian Pertahanan Inggris, peralatan dan perbekalan yang dibawa oleh seorang prajurit di lapangan bisa mencapai 45 kg. Lingkungan di mana tentara beroperasi tidak terlalu membantu dalam hal suhu, yang bisa mencapai 45°C, atau serendah 20°C. Berat sumber daya yang dibawa oleh seorang prajurit bisa mencapai 4 kg atau lebih, dan prajurit itu mungkin harus menanggung kondisi ini, yang mungkin bisa bertahan selama 48 jam. Selain itu, tentara di masa depan dapat membawa jaket pendingin atau pemanas, jika diperlukan. Permintaan beban prajurit yang diturunkan bisa sekecil 1 W untuk beberapa perangkat kecil atau sekitar 100–200 W untuk peralatan elektronik tertentu.



Gambar 7.5 Sistem tenaga hibrida generik untuk prajurit yang diturunkan

Seorang prajurit yang turun dari kuda biasanya menggunakan baterai dengan berbagai ukuran, dari ukuran AA hingga yang jauh lebih besar yang beratnya bisa beberapa kilogram. Baterai ini dapat diisi ulang atau sekali pakai. Kebutuhan energi bisa berada di urutan 65–200 Wh/kg. Jelas dari penjelasan di atas bahwa prajurit yang turun memiliki kebutuhan yang bisa sangat menuntut, meskipun tingkat daya mungkin tidak sebanding dengan tingkat daya kendaraan. Harapannya, di masa depan, sumber daya yang enam sampai delapan kali lebih ringan dari baterai yang ada bisa menjadi mungkin. Energi spesifik yang dibutuhkan dalam kasus itu bahkan bisa mencapai 600–800 Wh/kg.

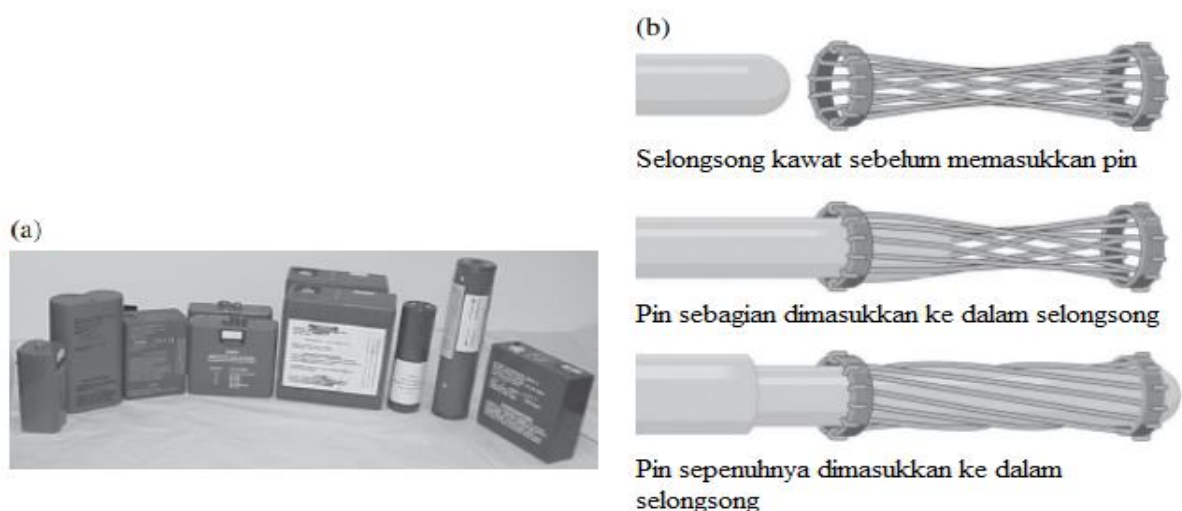
Tampaknya, oleh karena itu, terlepas dari teknologi yang tersedia, mungkin penting bagi prajurit yang turun untuk memiliki sumber daya yang sesuai dengan permintaan beban dengan cara terbaik. Misalnya, beberapa sumber daya dapat memasok jenis kebutuhan daya tinggi tetapi energi rendah, sedangkan yang lain bisa sebaliknya. Jika hanya satu jenis sumber yang digunakan, maka itu pasti akan menyebabkan sumber daya yang terlalu besar, yang menyebabkan bobot yang berlebihan. Ini tidak dapat diterima untuk seorang prajurit yang turun dari kuda. Oleh karena itu arsitektur yang ditunjukkan pada Gambar 7.5 dapat menjadi penting dalam mempertimbangkan desain sistem tenaga untuk prajurit yang diturunkan.

Arsitektur yang ditunjukkan pada Gambar 7.5 menyiratkan bahwa akan ideal untuk prajurit jika seluruh sistem ditempatkan dalam satu kemasan, mungkin dengan berbagai jack penghubung untuk peralatan yang berbeda, tanpa mengharuskan prajurit untuk menghubungkan sumber individu. Kemasan tunggal seperti itu juga dapat mencakup beberapa sakelar yang dikendalikan di dalam sistem tenaga, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.5. Mengkoordinasikan semua perangkat ini dengan pengalihan yang tepat dilakukan oleh blok manajemen daya, yang akan memantau tegangan, SOC, dan informasi lainnya, dan karenanya akan mengelola proses pengisian daya. Ini juga akan memberikan indikasi kepada prajurit ketika generator (yang dapat menjadi generator engkol tangan untuk mengisi baterai) perlu dihidupkan.

Dimungkinkan juga untuk menggunakan gerakan berjalan, berlari, dan gerakan prajurit lainnya untuk mengisi baterai, tanpa keterlibatan sukarela dari prajurit. Ini harus dilakukan secara otomatis dengan menggunakan beberapa generator mini atau mikro yang dapat bekerja sendiri, berdasarkan gerakan getaran. Mesin semacam itu termasuk dalam kategori perangkat pemanen energi. Perangkat biasanya harus bekerja menggunakan gerakan inersia dan gerakan periodik seperti berjalan, meskipun jumlah daya mungkin tidak terlalu tinggi. Prototipe tertentu ditemukan menghasilkan 7,3 W, yang mungkin masih masuk akal. Biasanya, jika alat pemanen energi tersebut dibawa oleh prajurit, tidak akan ada perbedaan yang terlihat dari sudut pandang upaya, meskipun energi tersebut pada akhirnya berasal dari prajurit tersebut.

7.5 MASALAH KEKASARAN

Dalam aplikasi militer, perangkat umumnya kokoh. Dalam arti mekanis, ini berarti bahwa penutup fisik atau kotak yang berisi komponen apa pun sangat kuat dibandingkan dengan rekan komersialnya. Dengan demikian perangkat tidak mudah rusak dalam pertemuan fisik apapun. Selain itu, sangat penting untuk memperhatikan aspek kelistrikan dan desain perangkat lainnya. Hal ini dapat disebabkan oleh fakta bahwa aplikasi militer dapat berarti suhu ekstrem yang sangat besar, baik panas maupun dingin. Secara umum, suhu tinggi tidak baik untuk barang-barang seperti elektronika daya dan baterai. Perangkat harus diturunkan nilainya untuk penggunaan militer. Ini berarti bahwa mereka dapat menjadi lebih besar secara fisik dan lebih besar, jika kinerja harus dipertahankan dalam kondisi ekstrim ini. Pertimbangan ini sebenarnya dapat berkontribusi pada keterlambatan penyebaran HEV di lapangan. Diharapkan, di masa depan, dengan elektronika daya bersuhu tinggi dan mekanis yang kuat, penyebaran HEV akan dipercepat oleh militer.



Gambar 7.6 Contoh baterai kokoh (milik EaglePicher Technologies) dan konektor (milik Hypertronics Technologies – Hypertac adalah merek dagang terdaftar).

Oleh karena itu, masalah kekasaran dasar berkaitan dengan getaran mekanis dan suhu. Tidak hanya elektronika daya, tetapi juga sirkuit elektronik biasa, yang mengalami masalah ini. Di bidang elektronika daya, diharapkan penggunaan bahan semikonduktor silikon karbida akan secara signifikan mengurangi masalah suhu dalam hal kebutuhan pendinginan tambahan. Bahkan jika sistem pendingin ditingkatkan untuk suhu ekstrim, peningkatan itu sendiri juga tunduk pada pertanyaan kekasaran yang memadai. Untuk aplikasi HEV yang menggunakan paket baterai bertegangan tinggi dan berdaya tinggi, masalah pendinginan dan pemanasan sangat penting, jika tidak, kinerja HEV dapat dikompromikan secara signifikan. Contoh baterai militer yang kokoh ditunjukkan pada Gambar 7.6 (www.mccdc.usmc.mil/OpsDiv/Integration/logistics_integration_files/Power%20Systems.pdf).



Gambar 7.7 Contoh inverter yang kokoh (milik RIEnergy AG) dan konektor (milik Adlink Technology).

Masalah penting lainnya sehubungan dengan HEV adalah desain konektor. Konektor andal yang digunakan dalam desain kabel ditampilkan di situs web Hypertronics (www.hypertronics.com/en/Products.aspx). Contoh konektor semacam ini, yang disebut konektor Hypertac® Hypertronics, melibatkan sistem kontak soket keranjang kawat. Ketika pin dimasukkan ke dalam selongsong atau cincin yang ditunjukkan pada Gambar 7.6, kabel meregang di sekitarnya, sehingga mengaktifkan beberapa jalur kontak. Dengan demikian, di bawah getaran yang keras dan situasi serupa, kehilangan kontak dapat dihilangkan atau diminimalkan. Gambar dari inverter standar militer yang kokoh dan konektor antarmuka yang kokoh ditunjukkan pada Gambar 7.7. Beberapa standar militer dapat diterapkan sehubungan dengan ruggedization, yang dapat diterapkan dalam pertimbangan desain sistem tenaga yang disebutkan di atas. Ini termasuk MIL-STD-461 (EMC), MIL-STD-901D, Grade A (shock), MIL-STD-167 (getaran), MIL-STD-810E (getaran), MIL-STD-1275 (ground-mobile), dan MIL-STD-1399 (standar antarmuka untuk sistem kapal).

BAB 8

DIAGNOSTIK, PROGNOSTIK, KEANDALAN, EMC, DAN TOPIK TERKAIT HEV

8.1 DIAGNOSTIK DAN PROGNOSTIK DALAM HEV DAN EV

Setiap kendaraan, baik konvensional, hibrida, atau listrik murni, harus memiliki semacam diagnostik (menemukan penyebab masalah yang "sudah terjadi" pada kendaraan) dan prognostik (menemukan masalah yang "akan atau mungkin terjadi" di masa depan), mengingat kondisi kendaraan saat ini berdasarkan pemantauan berbagai informasi di dalam kendaraan. Dengan pemikiran ini, semua mobil modern memiliki fungsi diagnostik onboard yang dapat memberikan sejumlah diagnostik, tetapi tidak prognostik. Diagnostik dapat dilakukan pada beberapa tingkatan. Salah satunya adalah pada tingkat kendaraan di dalam kendaraan itu sendiri; ini dapat memberi tahu pengemudi atau personel layanan tingkat dasar tentang apa yang mungkin terjadi. Tingkat kedua dapat berada pada tingkat perawatan yang lebih dalam ketika kendaraan dapat dibongkar pada tingkat subsistem yang berbeda di bengkel, masalah ditunjukkan dengan tepat, dan item yang bersangkutan diganti. Tingkat ketiga bisa di dealer otomotif atau akhirnya tingkat produsen kendaraan untuk mencari tahu mengapa subsistem gagal.

Terakhir, diagnostik dapat dilakukan pada tingkat subkomponen atau tingkat produsen komponen ketika analisis lebih mikroskopis dari komponen dapat dimulai untuk menemukan desain atau kekurangan lainnya, jika ada. Sampai dengan tingkat kedua, yaitu tingkat pemeliharaan, langkah pemyarakatan biasanya adalah penggantian/perbaikan suatu bagian atau subsistem, tanpa harus berusaha mencari akar penyebab kegagalan tersebut. Tingkat ketiga dan terakhir dapat menganalisis penyebab mendasar dari kegagalan karena cacat desain atau manufaktur. Terkadang kesalahan mungkin bukan karena desain komponen atau cacat materialnya, melainkan bisa karena aplikasi yang salah atau penggunaan perangkat yang tidak tepat – yang mungkin bukan karena pemilik atau pengemudi kendaraan, dari desain teknik. perspektif. Dalam hal ini, desain ulang sistem atau subsistem akan diperlukan dari pihak pabrikan kendaraan.

Tujuan dari bab ini bukan untuk menyelidiki diagnosis atau prognostik pada kendaraan tertentu, atau untuk digunakan sebagai manual perbaikan atau perawatan, melainkan akan membahas metodologi umum untuk ini, yang berlaku untuk kendaraan apa pun, kendaraan hibrida dan listrik. Ini juga mencakup diskusi tentang apa yang dapat dimasukkan ke dalam kendaraan masa depan, tidak hanya untuk diagnostik, tetapi juga dalam hal prognostik.

Diagnostik Onboard

Sejak tahun 1996, semua kendaraan diharuskan memiliki diagnostik onboard versi kedua, yaitu OBD II. Kendaraan hybrid memiliki OBD II seperti pada kendaraan biasa, yang perannya dalam HEV sama dengan pada kendaraan biasa. Seperti diketahui, OBD II adalah standar Amerika Utara yang berhubungan dengan sistem kontrol mesin, beberapa bagian sasis, bodi, dan perangkat lain, serta diagnostik jaringan komunikasi dan kontrol (controller area network atau CAN). Ada beberapa varian dari protokol OBD II yang sesuai dengan standar tertentu. Secara umum, misalnya, kendaraan GM menggunakan SAE 1850 VPW (modulasi lebar pulsa variabel), kendaraan Ford menggunakan SAE 1850 PWM (modulasi lebar pulsa), dan Chrysler, semua kendaraan Eropa, dan Asia menggunakan standar ISO 9141. Variasi tercermin dalam konektor soket dan penggunaan pin.



Gambar 8.1 Gambar scanner OBD II

Kendaraan OBD II saat ini pada umumnya memiliki soket di suatu tempat di bagian bawah di depan pengemudi. Ini mungkin tidak langsung terlihat saat duduk, tetapi orang biasanya dapat melihatnya dengan menundukkan kepala untuk melihat ke atas area pedal di sekitar trim plastik. Di sinilah teknisi atau pemilik dapat mencolokkan alat diagnostik atau pemindai. Pin di soket membawa berbagai sinyal dari berbagai sensor yang tersebar di seluruh kendaraan. Ada berbagai scanner yang tersedia di pasaran yang dibuat oleh produsen peralatan asli (OEM) bisa sangat mahal, tetapi produk purna jual tersedia dengan biaya yang jauh lebih rendah. Scanner ini biasanya memiliki unit tampilan.

Ada juga beberapa perangkat yang agak murah (data logger), yang mungkin tidak memiliki unit tampilan seperti scanner yang lengkap, tetapi dapat mengumpulkan informasi yang sama seperti scanner biasa, dan informasi tersebut kemudian dapat ditampilkan pada komputer pribadi atau laptop menggunakan perangkat lunak yang disediakan oleh produsen data logger. Scanner tipikal dengan aksesori ditunjukkan pada Gambar 8.1. Harga scanner semacam itu bisa mendekati 100, tetapi scanner tersedia yang harganya bisa dari beberapa ribu rupiah hingga bahkan sekitar 2000, tergantung pada fitur dan kemampuan.

Saya tidak bermaksud untuk membahas rincian berbagai sinyal OBD II yang ditampilkan pada pemindai, karena informasi tersebut tersedia di salah satu manual pemindai. Pada dasarnya ada 300 atau lebih pembacaan yang berasal dari sensor yang berbeda. Mereka dapat menunjukkan hal-hal seperti tegangan pengapian atau titik perpindahan transmisi. Sebagai contoh, kode P0032 dapat muncul di pemindai. Ini kemudian dapat ditemukan sesuai dengan: Sirkuit kontrol pemanas sensor oksigen (A/F) tinggi. Dengan sedikit penelitian lebih lanjut, kode ini kemudian dapat dikaitkan dengan kemungkinan sensor oksigen yang gagal, atau hubungan pendek di sirkuit pemanas sensor, dan seterusnya.

Mungkin ada beberapa alasan khusus lainnya yang terkait dengan kode ini, yang dapat ditemukan dari berbagai manual. Secara umum, untuk menghemat waktu, mungkin lebih baik untuk tidak melangkah lebih jauh tetapi hanya mengganti semua hal yang dapat terlibat dengan kode itu. Kode semacam ini akan umum untuk HEV dan kendaraan biasa. Demikian pula ada kode untuk item lain yang terkait dengan sasis, yang dapat berlaku umum untuk kendaraan apa pun, bukan hanya HEV. Beberapa kode adalah item OBD II generik yang dapat dibaca oleh alat pemindaian apa pun dan terkait dengan penyebab yang sesuai. Kode tertentu mungkin merupakan hak milik (dalam hal bagaimana mereka sampai) tetapi manual pabrikan akan mengungkapkan penyebabnya dan apa yang perlu diperbaiki atau diganti, meskipun mereka mungkin tidak merilis metodologi bagaimana mereka menemukan penyebabnya, yang mungkin milik.

Untuk HEV, spesifikasinya bisa sebagai berikut dalam hal diagnostik. Manual layanan pabrikan biasanya harus mengungkapkan detailnya. Untuk itu diperlukan pengetahuan tentang teknologi HEV untuk dapat mengkorelasikan kode diagnostik dengan gejala. Misalnya, pada Toyota HEV, kode P3005 akan menunjukkan bahwa “sekring tegangan tinggi putus”, yang dapat berarti bahwa kabel daya atau sekring itu sendiri mungkin perlu diganti. Jika setelah melakukan penggantian kode tetap ada, maka analisis yang lebih dalam mungkin diperlukan. Demikian pula, P3006 akan menunjukkan bahwa tingkat status pengisian baterai (SOC) tidak merata dalam modul baterai. Ini dapat disembuhkan dengan hanya mengisi baterai untuk sementara waktu. Tetapi jika gejalanya berlanjut, mungkin perlu melihat penyebabnya secara serius. Kecuali teknisi toko reparasi cukup berpengetahuan, kode itu sendiri mungkin tidak mengungkapkan penyebab sebenarnya. Itulah sebabnya diperlukan program pelatihan yang sangat baik bagi teknisi untuk memenuhi kebutuhan HEV, karena pengalaman terkait perbaikan di bidang ini masih terus berkembang.

Secara umum, Toyota dan OEM lainnya akan menyajikan bagan diagnostik terperinci dengan prosedur langkah demi langkah tentang cara melanjutkan kode diagnostik tertentu. Seperti disebutkan sebelumnya, ini akan tersedia meskipun rincian tentang bagaimana metodologi ini dikembangkan mungkin merupakan hak milik. Metodologi ini mungkin berhubungan dengan satu atau lebih diagnostik tingkat sirkuit dalam - dan mekanisme pembuatan kode itu sendiri mungkin menjadi masalah penelitian. Sebagai contoh, jika motor tidak mendapatkan suplai tegangan yang tepat karena kegagalan pada sistem inverter, mungkin perlu untuk mengetahuinya dari pembacaan sensor eksternal dari tegangan dan arus. Meskipun metode yang tepat untuk melakukan ini mungkin spesifik pabrikan kendaraan, beberapa ide dapat diperoleh dengan mengikuti prinsip-prinsip rekayasa tertentu. Beberapa analisis mungkin merupakan masalah rangkaian listrik sederhana, sementara yang lain mungkin cukup rumit.

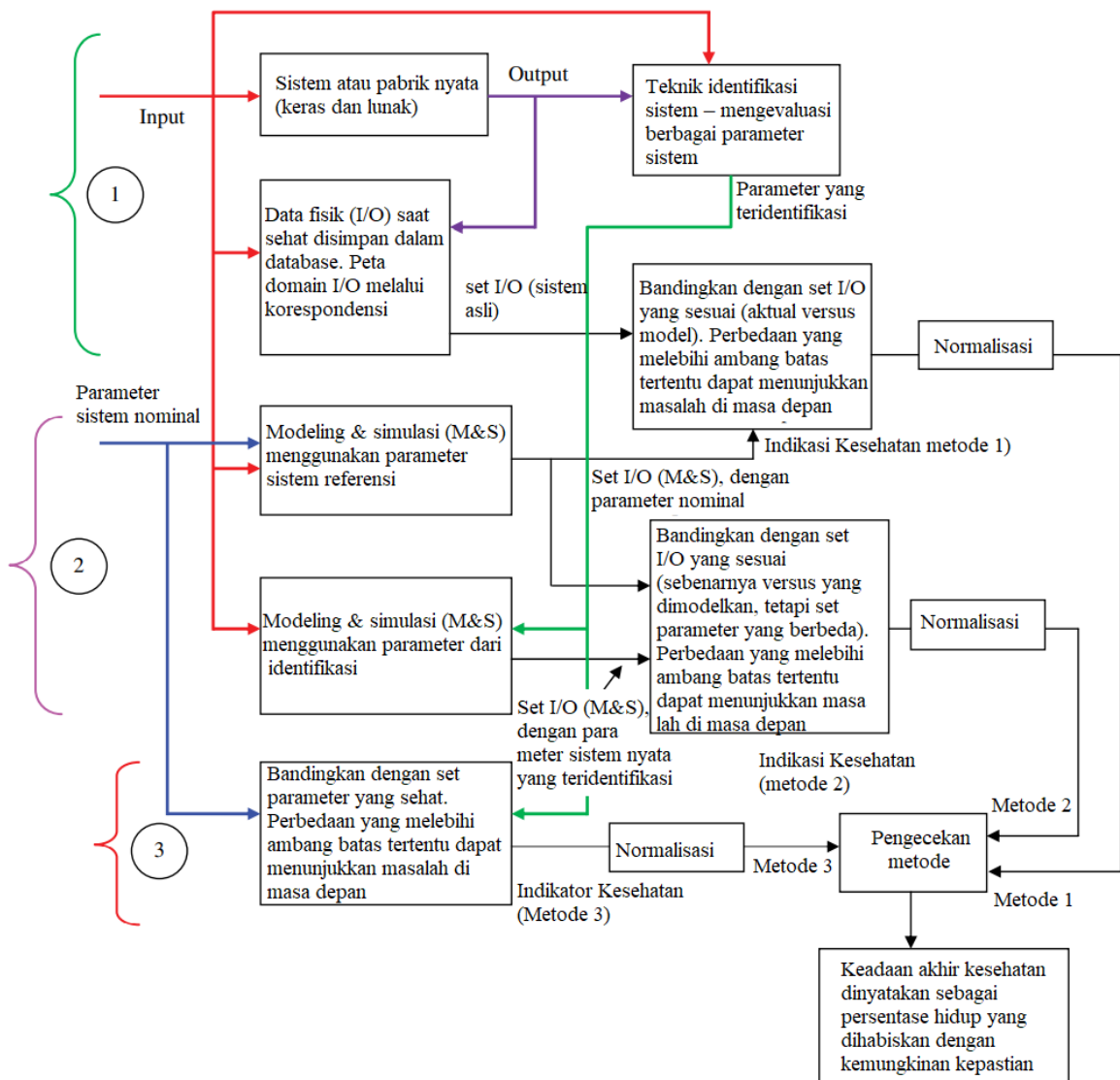
Secara khusus, penulis telah melakukan penelitian untuk mendeteksi apakah sakelar inverter tertentu rusak atau tidak, dengan memantau tegangan dan arus pada rangkaian motor/inverter. Jenis diagnostik yang lebih dalam ini mungkin penting karena dalam keadaan tertentu dimungkinkan untuk mengonfigurasi ulang sistem yang sebagian gagal secara real time (yaitu saat kendaraan berjalan) dengan menggunakan perangkat lunak, dan kemudian menjalankan kendaraan dalam mode yang dapat didegradasi secara halus di tingkat kinerja yang lebih rendah. Ini dapat secara signifikan berkontribusi pada keandalan dan keamanan. Tentu saja, cepat atau lambat akan diperlukan untuk mengganti atau memperbaiki komponen atau sistem yang rusak, untuk mengembalikan fungsionalitas penuh kendaraan.

Komentar serupa berlaku, misalnya, jika ada getaran di dalam kendaraan. Ini bisa disebabkan oleh banyak hal mekanis, tetapi bisa juga terkait dengan kegagalan motor. Di sini kode OBD II dan kode spesifik *hybrid electric* (HE) harus dianalisis bersama, dan tidak terpisah, untuk menghasilkan analisis diagnostik yang masuk akal. Pada tahap inilah metode kecerdasan buatan dapat berguna, yang secara signifikan dapat mengurangi beban dugaan manusia atau pengalaman pribadi seorang teknisi. Dalam kendaraan listrik murni, yang tidak memiliki ICE, kode OBD II terkait dengan emisi dan mesin tidak akan diperlukan. Namun sebagian dari kode OBD II yang ada masih bisa digunakan untuk hal-hal yang berkaitan dengan rem, suspensi, ABS, sasis, dan sebagainya. Segala sesuatu yang berhubungan dengan penggerak listrik akan sama seperti yang dibahas di atas sehubungan dengan HEV.

Masalah Prognostik

Prognosis melibatkan prediksi masalah sebelum terjadi, atau bisa juga melibatkan mendapatkan status kesehatan suatu sistem. Dalam HEV atau EV, prognostik pada dasarnya dapat fokus pada baterai dan elektronik daya, karena ini adalah tautan yang lebih lemah dalam sistem. Motor listrik itu sendiri penting, tetapi merupakan elemen yang lebih kuat daripada

baterai dan elektronika daya. Selain itu, prognostik dapat menjadi penting untuk kemudi dan sistem pengereman kendaraan. Ini adalah item atau subsistem yang kritis terhadap keselamatan. Sebaliknya, ada barang yang kurang penting (dalam arti keselamatan) – AC, radio, dan sejenisnya. Beberapa di antaranya bukan item khusus HEV. Terakhir, aspek penting dari kendaraan HEV dan ICE lama adalah elemen komputasi dan jaringan. Faktanya, karena sejumlah besar item dalam HEV dikendalikan oleh komputer/pengontrol dan CAN, kegagalan di sini dapat menyebabkan banyak elemen lain tidak berfungsi dengan benar (meskipun elemen lain tersebut mungkin dalam kondisi baik), yang mengarah ke sistem shutdown, jika bukan kecelakaan berbahaya. Tidak kalah pentingnya juga untuk mengetahui, jika mungkin, status kesehatan elemen komputasi tersebut dan jaringan komunikasi yang terlibat.



Gambar 8.2 Sebuah metodologi umum yang menggambarkan keadaan kuantifikasi kesehatan (konsep dasar diringkas dalam Tabel 8.1).

Status kesehatan suatu sistem ("keadaan kesehatan" atau SOH), baik itu baterai, elektronika daya, atau motor, perlu dibandingkan dengan beberapa tolok ukur atau sistem dasar untuk mendapatkan gambaran tentang kesehatannya, meskipun berfungsi dengan baik. Untuk itu, kita perlu memiliki berbagai data informasi yang tersedia ketika sistem sehat, atau lebih tepatnya ketika baru atau komponen tertentu diperbaiki atau diganti. Data tersebut dapat dicatat (yaitu disimpan dalam database) dari sistem yang sehat. Alternatifnya adalah sistem berbasis model, di mana output simulasi diperoleh berdasarkan parameter sistem yang

ideal atau baru, dan dibandingkan dengan sistem saat ini, yang dianggap tidak terlalu baru. Oleh karena itu sistem prognostik dapat memiliki struktur generik yang ditunjukkan dalam diagram blok Gambar 8.2. Pada Gambar 8.2, tiga metode estimasi keadaan kesehatan ditunjukkan. Ringkasan metodologi ditunjukkan pada Tabel 8.1. Pada Gambar 8.2, ketiga metode tersebut juga dibatasi secara khusus dengan menggunakan tanda kurung kurawal dengan label 1, 2, dan 3 yang dilingkari.

Metode 1 – Ini pada dasarnya membandingkan dua set input/output (I/O), satu diperoleh dari sistem (fisik) aktual pada saat ini dengan pengukuran langsung (dengan parameter sistem yang ada), dan yang lainnya melakukan hal yang sama tetapi menggunakan nominal parameter sistem dan pemodelan dan simulasi (M&S) sistem. Parameter sistem nominal atau baru diperoleh baik dari data pabrikan atau ditangkap oleh pengukuran (bersama dengan teknik identifikasi sistem apa pun) ketika sistem masih baru dan disimpan dalam beberapa basis data pada saat itu. Set I/O menggunakan parameter sistem (nominal) baru yang tersimpan diperoleh oleh M&S, karena sistem yang sebenarnya akan menua, dan karenanya parameter akan mengalami perubahan di antaranya. Setelah kedua I/O ini dibandingkan, kesalahan rata-rata antara dua set dapat dihitung menggunakan beberapa metode evaluasi kesalahan RMS atau beberapa proses lainnya. Jika kesalahan melebihi beberapa ambang batas, itu dapat menunjukkan kemungkinan kegagalan sistem dalam waktu dekat.

Metode 2 – Ini melakukan hal yang sama seperti metode 1, kecuali bahwa itu sepenuhnya dilakukan oleh M&S, dan dalam satu kasus menggunakan parameter sistem nominal (sudah disimpan) dan dalam kasus lain menggunakan parameter sistem yang ada, diperoleh dari menyajikan sistem I/O dan menggunakan beberapa teknik identifikasi sistem. Metode 2 memungkinkan sistem dijalankan pada titik operasi dengan kondisi overrated dan stress, yang tidak dapat dilakukan dalam sistem nyata, karena sistem nyata dapat rusak dengan berjalan pada titik operasi overrated tersebut. Meskipun pada Gambar 8.2 jalur input ke blok M&S adalah input yang sama yang menuju ke sistem nyata, tidak perlu demikian. Faktanya, input ke blok M&S dapat dihasilkan secara artifisial, yang dapat di atas nilai pengenalan atau nilai yang diizinkan, sehingga memungkinkan sistem untuk dijalankan pada domain I/O yang jauh lebih luas, di luar nilai pengenalan, yang terkadang dapat membantu untuk mendapatkan informasi dan ide tambahan tentang kesehatan sistem.

Metode 3 – Metode ini bukan merupakan perbandingan langsung dari I/Os, melainkan perbandingan antara set parameter baru nominal dan set parameter yang ada yang diperoleh dari sistem nyata pada saat ini, dengan menggunakan teknik identifikasi sistem. Pada prinsipnya, metode ini melibatkan membandingkan lebih sedikit data, karena hanya parameter yang dibandingkan dan bukan I/Os. Memang benar bahwa metode 1 dan 2 melibatkan I/O yang dipengaruhi oleh parameter sistem, tetapi beberapa I/O mungkin kurang terpengaruh (atau bahkan tidak terpengaruh) secara langsung oleh semua parameter sistem, tergantung pada sifat sistem, sementara yang lain mungkin lebih terpengaruh. Metode berbasis parameter sistem memberikan perspektif yang sedikit berbeda, dan juga dimungkinkan untuk memasukkan beberapa faktor pembobotan pada parameter tertentu yang dapat lebih memengaruhi sistem, dibandingkan dengan yang lain, dalam hal kesehatan sistem secara keseluruhan. Perlu juga dicatat bahwa dalam metode 3 tidak perlu menjalankan sistem dengan M&S, dan hanya perhitungan berbasis teknik identifikasi sistem yang diperlukan untuk mengevaluasi parameter yang terlibat. Oleh karena itu metode ini kurang intensif komputasi.

Intinya adalah dalam sistem yang kompleks, beberapa teknik untuk mendapatkan diagnostik sistem dan penilaian kesehatan memungkinkan beberapa pemeriksaan silang antara teknik dalam hal pengambilan keputusan yang lebih baik tentang kesehatan sistem.

Perbandingan aktual I/O atau parameter sistem dapat dilakukan dengan menggunakan berbagai teknik pemrosesan sinyal, atau teknik berbasis kecerdasan buatan. Perlu juga dicatat bahwa beberapa normalisasi atau penskalaan dari kumpulan data akhir mungkin diperlukan di masing-masing metode di atas untuk membawa nilai numerik ke tingkat yang tepat sebelum pemeriksaan silang.

Tabel 8.1 Ringkasan metode yang ditunjukkan pada Gambar 8.2.

Tipe input	Jenis parameter yang digunakan	Jenis output	Perbandingan antara tipe data	Kesalahan RMS atau jenis perbandingan lainnya
Set input nyata	Nilai parameter sistem baru (NP) nominal	Keluaran sistem berbasis M&S dengan parameter saat sistem baru (ONEW)	–	–
Set input nyata	Nilai parameter sistem saat ini (RP)	Output sistem nyata dari pengukuran (OREAL)	ONEW vs OREAL (Status kesehatan, metode 1) ditunjukkan oleh label di lingkaran 1, Gambar 8.2	Periksa ambang batas untuk penentuan kesehatan
Input sewenang-wenang diatur di bawah kondisi operasi nominal dan juga berlebihan	Nilai parameter sistem nominal, berdasarkan kondisi sistem (NP) baru	S&K (X)	M&S (X) vs M&S (Y) (Metode status kesehatan 2), ditunjukkan oleh label di lingkaran 2, Gambar 8.2	Periksa ambang batas untuk penentuan kesehatan
Masukan sewenang-wenang diatur di bawah kondisi operasi nominal dan juga berlebihan	Menyajikan nilai parameter berdasarkan identifikasi sistem, menggunakan input sistem nyata dan output sistem nyata, untuk sistem saat ini (SP)	S&K (Y)	NP vs SP, ditunjukkan oleh label di lingkaran 3, Gambar 8.2 (Metode status kesehatan 3) – M&S tidak digunakan, hanya teknik identifikasi sistem yang digunakan	Periksa ambang batas untuk penentuan kesehatan

Untuk memberikan beberapa perspektif praktis tentang penggunaan konsep pada Gambar 8.2, asumsikan bahwa kita ingin membatasi fokus kita hanya pada baterai, elektronika daya, dan sistem motor, yang merupakan item khusus HEV. Dalam hal ini, pendekatan yang mungkin dilakukan adalah sebagai berikut. Untuk baterai, kita perlu memantau (secara eksperimental di perangkat keras) baik tegangan atau arus sebagai input, dan mendapatkan arus atau tegangan sebagai output sebagai tanggapan. Selain itu, suhu harus dipantau sebagai masukan. Dalam diskusi langsung ini, istilah input dan output harus ditafsirkan sebagai input dan output untuk proses diagnostik. Mereka tidak harus berupa input atau output sistem aktual dalam pengertian teknik listrik normal, yang menggerakkan sistem fisik.

Untuk elektronika daya, kita perlu memantau sinyal gerbang di setiap sakelar, tegangan di setiap sakelar, dan arus yang melalui setiap sakelar. Selain itu, kita perlu memantau tegangan dan arus terminal tiga fasa yang keluar dari sistem elektronika daya. Jika menempatkan sensor arus di setiap sakelar terlalu mahal, maka dapat dihilangkan, dengan biaya kehilangan akurasi kesimpulan. Dalam sistem ini, input diagnostik dapat dianggap sebagai sinyal gerbang ke setiap sakelar dan juga tegangan di setiap sakelar. Arus yang melalui setiap sakelar atau arus pada terminal output inverter dapat dianggap sebagai output sistem. Suhu juga harus dipantau sebagai masukan. Dalam contoh elektronika daya ini, tegangan pada sakelar harus dipantau baik saat sakelar terbuka maupun saat ditutup.

Untuk sistem motor, tegangan terminal dan arus dapat dianggap sebagai input. Outputnya kemudian dapat berupa kecepatan dan torsi poros. Jika perangkat keras pemantau

torsi dianggap terlalu mahal atau rumit, dimungkinkan untuk memantau tegangan, arus, dan kecepatan, dan menyimpulkan torsi dari pengukuran ini dengan menggunakan persamaan matematis yang menghubungkannya.

Setelah semua informasi di atas tersedia, kita dapat menggunakan proses generik pada Gambar 8.2 untuk mengevaluasi status kesehatan sistem yang dijelaskan sebelumnya dan diringkas dalam Tabel 8.1.

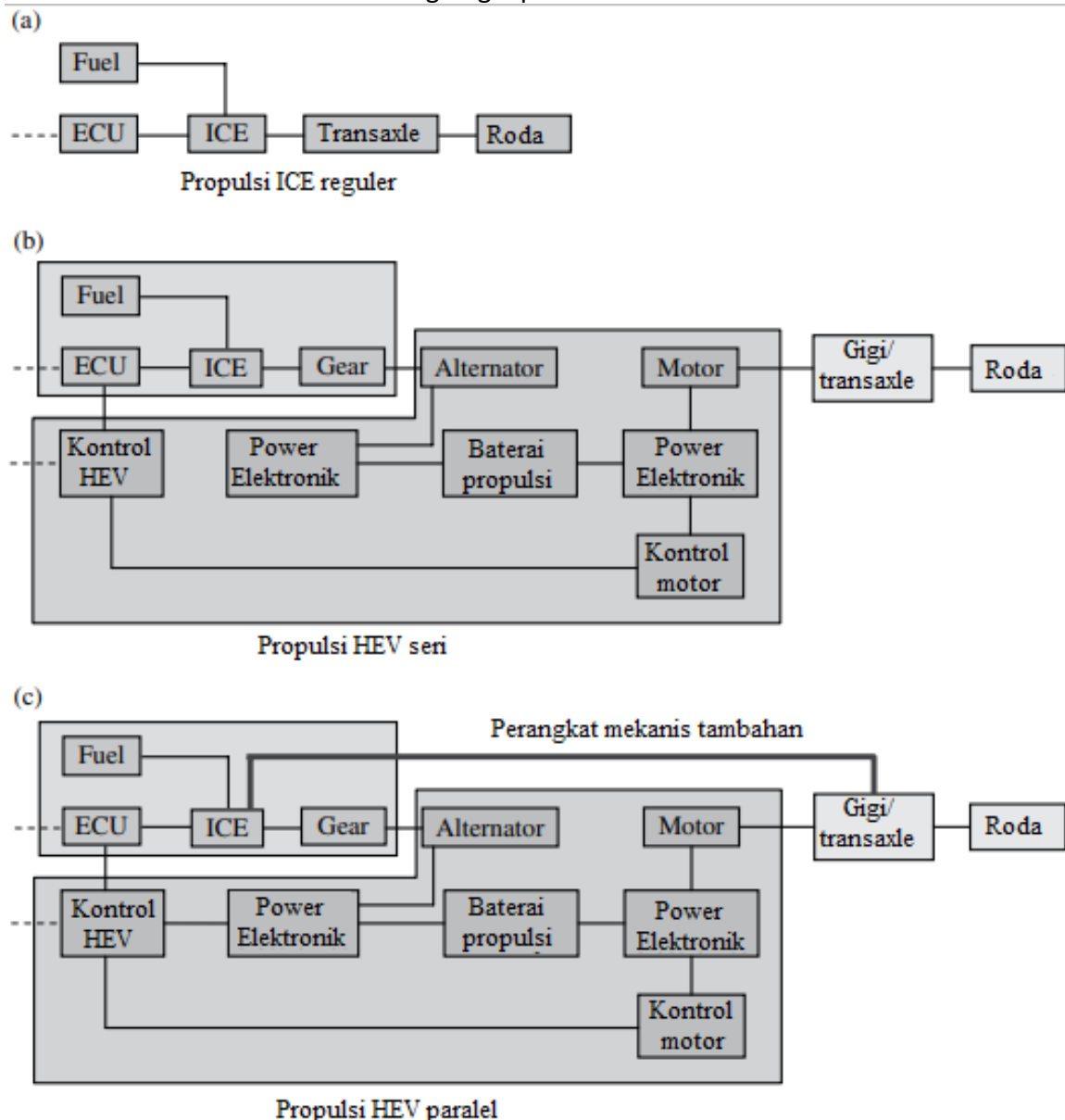
8.2 KEANDALAN HEV

Peristiwa baru-baru ini yang dilaporkan di media berita mengenai kendaraan yang rusak, termasuk HEV, yang berkaitan dengan kegagalan rem atau akselerasi mendadak, telah menimbulkan kekhawatiran yang signifikan tentang keselamatan dan keandalan HEV. Sementara beberapa kekhawatiran ini benar-benar penting, penting untuk tidak terlalu terbawa oleh apa yang tertulis di media atau membuat penilaian hanya berdasarkan itu. Sebaliknya, pendekatan yang lebih ilmiah dalam mempelajari keandalan harus digunakan untuk melihat pro dan kontra dari berbagai aspek, dan ini akan melayani komunitas teknis dan pengguna dengan baik. Mengingat hal ini, diskusi yang cukup rinci tentang subjek akan disajikan di sini dari perspektif tingkat sistem.

Kita semua tahu bahwa sistem HEV dianggap sebagai teknologi penting dalam industri otomotif saat ini. Ini karena kekhawatiran tentang penghematan bahan bakar, ketidakpastian pasokan energi di seluruh dunia, dan pengendalian polusi. Saat membahas subjek, tampaknya fokus komunitas teknis dan literatur terutama pada masalah ini, dan juga pada kontrol penggerak motor listrik yang terkait dengan HEV. Selain itu, orang berpikir dari segi biaya premi, yaitu berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk memulihkan biaya tambahan kendaraan (dibandingkan dengan kendaraan non-hibrida biasa). Berbagai angka telah ditunjukkan di media dan di tempat lain di komunitas teknis, menunjukkan bahwa diperlukan waktu antara lima hingga tujuh tahun untuk memulihkan biaya tambahan HEV melalui potensi penghematan bahan bakar. Namun, sangat sedikit yang telah dibahas tentang masalah keandalan sistem kendaraan secara keseluruhan di HEV. Masalah ini tidak sepele, dan penerimaan keseluruhan kendaraan ini dalam jangka panjang akan sangat bergantung pada hal ini, selain penghematan bahan bakar dan pemulihan biaya tambahan.

Di bagian ini, tujuannya adalah untuk menunjukkan bahwa, dalam HEV, salah satu hukuman untuk penghematan bahan bakar yang harus dibayar datang dari segi keandalan. Ditekankan di sini bahwa HEV bukan hanya kumpulan berbagai sumber propulsi dan sistem kontrol untuk mengekstraksi bahan bakar yang lebih hemat; melainkan memiliki sejumlah besar item di dalamnya. Keseluruhan fungsi tingkat sistem yang andal tidak kalah pentingnya dalam membuat HEV beroperasi dengan sukses, dan dapat diterima oleh konsumen dalam jangka panjang, selain perhatian terhadap penghematan bahan bakar dan pengurangan biaya. Sayangnya, literatur tentang topik ini tidak tersedia dalam domain publik sejauh pengetahuan penulis. Tiga referensi yang kita ketahui dan yang membahas topik serupa tentang keandalan sistem kendaraan dari sudut pandang kuantitatif, telah ditulis/ditulis bersama oleh salah satu penulis buku ini. Alasan utama kurangnya literatur yang diterbitkan di bidang keandalan ini adalah, kita percaya, bahwa orang-orang hingga sekarang sebagian besar hanya terlibat dengan teknologi penggerak dan kontrol kendaraan hibrida, dan hal-hal yang terkait dengan penghematan bahan bakar dan emisi. Alasan kedua adalah teknologi kendaraan hibrida relatif baru, dan sejauh ini tidak banyak informasi tentang keandalannya yang ada di industri. Alasan penting lainnya adalah data keandalan pada komponen dan subsistem membutuhkan waktu lama untuk dipantau dan dikumpulkan, dan bahkan jika dikumpulkan di industri, data biasanya disimpan sebagai informasi kepemilikan.

Kita akan mempertimbangkan arsitektur kendaraan berbasis ICE biasa, diikuti dengan arsitektur HEV seri dan paralel. Keseluruhan subsistem dan keandalan tingkat komponen diperkenalkan dengan menggunakan beberapa angka yang diasumsikan untuk keandalan, dan kemudian menganalisisnya. Selain itu, konsep degradasi anggun diperkenalkan, dan implikasinya dari sudut pandang kuantitatif dibahas. Nilai numerik keandalan yang digunakan dalam bagian ini hanya untuk menggambarkan konsep; situasi keandalan yang tepat akan tergantung pada arsitektur sistem dan nilai-nilai yang tepat dari angka keandalan yang terlibat dalam sistem yang diteliti. Tentu saja, harus diakui bahwa menemukan angka keandalan yang akurat untuk berbagai komponen dalam suatu sistem memerlukan upaya yang lama, kadang-kadang menggunakan studi pemodelan dan simulasi, dan juga uji eksperimental; masalah-masalah ini tidak berada dalam ruang lingkup diskusi ini.



Gambar 8.3 Diagram blok tingkat sistem untuk: (a) ICE reguler, (b) seri HEV, dan (c) arsitektur paralel HEV. Dari, © 2008 IEEE.

8.3 MENGANALISIS KEANDALAN ARSITEKTUR HEV

Untuk perspektif tingkat sistem dalam mempelajari keandalan HEV, perlu untuk melacak nilai keandalan individu dari subsistem dan komponen yang dicatat dalam arsitektur

di Bab 2 di mana perspektif yang sedikit berbeda digunakan. Arsitektur untuk HEV paralel juga dibahas secara singkat di Bab 6. Beberapa arsitektur ini digambar ulang di sini. Untuk pembahasan ini, istilah keandalan didefinisikan sebagai probabilitas bahwa suatu komponen, subsistem, atau sistem berfungsi, yaitu, melakukan fungsi yang dimaksudkan, pada akhir periode waktu tertentu, tanpa perubahan atau kegiatan pemeliharaan dalam jangka waktu tersebut. Dengan demikian, keandalan terhubung dengan probabilitas dan rentang waktu. Selain itu, kita mendefinisikan istilah ketersediaan di mana kita mengambil sistem hipotetis dengan keandalan sama dengan 1. Sistem seperti itu akan dikatakan "sepenuhnya" tersedia. Kita dapat mempelajari keandalan keseluruhan dari masing-masing subsistem ini pada Gambar 8.3 dengan mengikuti sederhana metodologi di bawah ini. Pertimbangkan berbagai item (subsistem) pada Gambar 8.3, dan biarkan keandalan masing-masing seperti yang diberikan pada Tabel 8.2. Perhatikan bahwa setiap item di atas dibangun dengan menggunakan banyak subsistem dan komponen penyusunnya. Namun, kita dapat menggunakan angka reliabilitas kumulatif tunggal untuk setiap item di atas; misalnya, untuk motor, keandalan keseluruhan 0,99995 dapat digunakan, daripada mempelajari komponen penyusun individu di dalam motor.

Tabel 8.2 Angka keandalan yang diasumsikan untuk subsistem ditunjukkan pada Gambar 8.3.

Komponen/Subsistem	Reabilitas
Fuel system	0.9999
ECU	0.99999
ICE	0.9999
Transaxle	0.99995
Wheel system	0.9999
Gear	0.99995
Alternator	0.99995
Motor	0.99995
Power electronics	0.99992
Propulsion battery	0.9999
Motor control	0.99999
HEV control	0.99999

Angka-angka dalam Tabel 8.2 hanya digunakan untuk tujuan mengilustrasikan konsep-konsep dalam bagian ini. Seperti disebutkan sebelumnya, angka keandalan tingkat komponen umumnya disimpan sebagai barang eksklusif oleh produsen. Oleh karena itu memperoleh angka yang tepat bisa sangat sulit, jika bukan tidak mungkin. Masalah lainnya adalah angka-angka ini dapat bervariasi dari satu produsen ke produsen lainnya. Oleh karena itu selama studi arsitektur dalam tahap desain, kita tidak perlu terlalu khawatir mencoba menemukan angka yang tepat untuk berbagai keandalan.

Menggunakan definisi keandalan yang diberikan sebelumnya, sekarang dimungkinkan untuk mempelajari sistem. Nilai numerik yang ditunjukkan terhadap setiap item di atas berarti bahwa pada akhir periode waktu penggunaan atau jarak tempuh kendaraan tertentu (atau dipilih) (misalnya 100.000 mil atau 160.000 km), ketika keandalan diberi nilai, katakanlah, 0,9999 untuk ICE, artinya kemungkinan gagalnya adalah 1 banding 10.000 (dalam jarak tempuh atau waktu pemakaian tersebut, mulai dari saat item baru dipasang). Memang benar

bahwa keandalan adalah fungsi waktu seiring bertambahnya usia sistem. Namun, itu akan dianggap konstan untuk tujuan diskusi di sini. Telah ditunjukkan bahwa berdasarkan konsep-konsep di atas, angka-angka reliabilitas dalam contoh ilustrasi ini adalah sebagai berikut:

- 1) Untuk propulsi ICE reguler,
 $R_{ICE} = 0.99964$
 di mana R_{ICE} adalah keandalan (atau kemungkinan tersedia) sistem kendaraan ICE lengkap.
- 2) Untuk propulsi HEV seri,
 $R_{SH} = 0.999210280440917$
 dimana R_{SH} (reliability of series hybrid architecture) didefinisikan sama seperti sebelumnya.
- 3) Untuk propulsi paralel,
 $R_{PH} = 0.999160319926895$
 di mana R_{PH} (keandalan arsitektur hibrida paralel) didefinisikan dengan cara yang analog dengan R_{SH} .

Keandalan dan Degradasi Anggun

Pertimbangkan propulsi HEV paralel pada Gambar 8.3c, di mana demarkasi antara subsistem berbasis ICE dan berbasis propulsi listrik ditunjukkan menggunakan area yang diarsir. Menggunakan terminologi EVP (untuk bagian kendaraan listrik) dan ICE (untuk bagian mesin pembakaran internal dari sistem propulsi) kita dapat menulis probabilitas berikut untuk berbagai kombinasi EVP dan ICE:

- a. ICE dan EVP keduanya bagus: $0,999\ 74 \times 0,999\ 62 = 0,999\ 36$
- b. ICE baik dan EVP buruk: $0,999\ 74 \times (1 - 0,999\ 62) = 0,000\ 379\ 84$
- c. ICE buruk dan EVP baik: $(1 - 0,999\ 74) \times 0,999\ 62 = 0,000\ 259\ 87$
- d. ICE dan EVP buruk: $(1 - 0,999\ 74) \times (1 - 0,999\ 62) = 0,000\ 000\ 098\ 776\ 320\ 7$
- e. Keandalan roda dan transaxle akhir bersama-sama = $0,999\ 85$

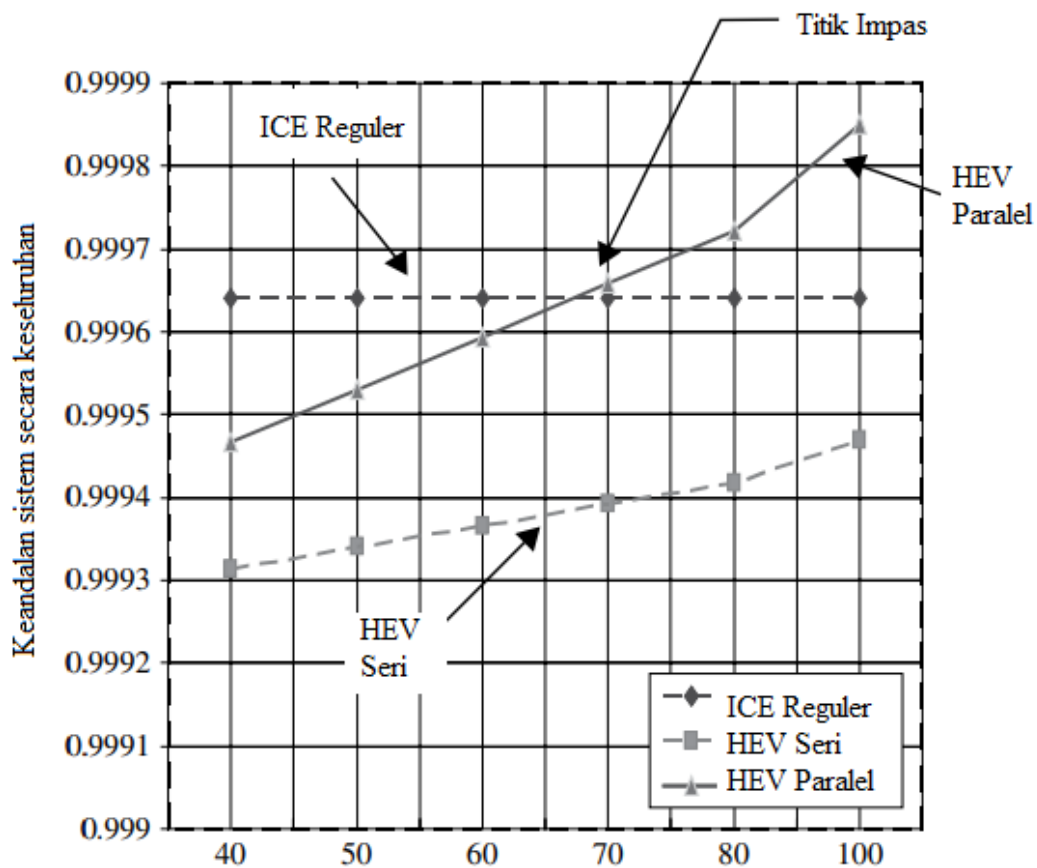
Oleh karena itu, probabilitas memiliki "beberapa" jumlah fungsionalitas sistem selama kondisi kegagalan parsial (yaitu di bawah degradasi yang baik) diberikan oleh jumlah item (a) hingga (c).

Persamaan 8.4

$$P_{GR} = (a+b+c) \times (e) = 0.999849906238495$$

di mana P_{GR} adalah keandalan atau probabilitas sistem di bawah degradasi anggun, dan (a), (b), (c), dan (e) dalam Persamaan 8.4 adalah angka keandalan yang sesuai dengan item (a), (b), (c), dan (e) dalam daftar di atas. Dengan demikian dapat dilihat bahwa dalam mode degradasi anggun ketersediaan sistem lebih tinggi daripada situasi di mana ketersediaan sebagian atau mode degradasi anggun tidak diperhitungkan. Namun, perlu dicatat bahwa dalam kondisi (b) dan (c), hanya fungsionalitas sebagian yang diperoleh, bukan fungsionalitas penuh. Jadi untuk item (b) dan (c), kita harus mengubah item ini dengan beberapa faktor pembobotan untuk menunjukkan bahwa fungsionalitasnya menurun.

Beberapa masalah tambahan yang berkaitan dengan HEV juga harus dipertimbangkan. Misalnya, jika EVP pada HEV paralel gagal, kendaraan masih dapat beroperasi dengan ICE, mengisi ulang tangki bensin sesuai kebutuhan, dan tetap berjalan pada performa yang lebih rendah. Jika ICE gagal, kendaraan masih dapat berjalan dengan EVP, tetapi hanya selama baterai masih ada. Setelah itu operasi plug-in diperlukan, jika ada ketentuan untuk itu, tetapi sebaliknya, tidak ada pilihan. Di sini baterai tidak boleh berjalan di bawah tingkat SOC yang diizinkan, untuk menghemat masa pakai baterai. Analisis serupa telah dilakukan untuk kendaraan seri juga, dan hasilnya dapat diringkas melalui grafik pada Gambar 8.4.



Gambar 8.4 Perbandingan keandalan sistem vs. faktor persepsi kinerja sebagai persentase untuk tiga jenis kendaraan yang berbeda. Dari, © 2008 IEEE.

Dari grafik ini dan dari diskusi sebelumnya terlihat bahwa angka keandalan keseluruhan untuk seri HEV sedikit lebih rendah daripada untuk HEV paralel. Keandalan sistem secara keseluruhan baik seri dan paralel HEV, tanpa mempertimbangkan degradasi yang anggun, tentu saja lebih rendah daripada kendaraan berbasis ICE biasa. Hal ini disebabkan fakta bahwa ICE memiliki lebih sedikit komponen dan karenanya pada awalnya memiliki keunggulan dalam hal keandalan. Ide dasarnya di sini adalah dalam HEV paralel, secara umum, ICE dan EVP akan dirancang pada peringkat yang agak lebih rendah. Oleh karena itu selama kondisi kegagalan parsial baik ICE atau EVP, kinerja kendaraan berkurang.

Jadi fungsionalitas kinerja penuh tidak tersedia selama kegagalan parsial. Untuk kinerja yang lebih baik selama kegagalan parsial, perlu untuk mendesain ICE dan EVP secara berlebihan sampai batas tertentu. Definisi "faktor persepsi kinerja" selama kondisi kegagalan parsial pada dasarnya adalah rasio daya pengenal ICE atau EVP dalam HEV, dengan daya pengenal ICE dari kendaraan non-hibrida. Dengan kata lain, katakanlah, kendaraan non-hibrida memiliki nominal 200 hp (150 kW). Dalam HEV paralel yang setara, mari kita asumsikan bahwa ICE dan EVP masing-masing berukuran ke nilai yang lebih rendah, katakanlah, 80 hp untuk EVP dan 120 hp untuk ICE. Dalam hal ini, jika ICE dari HEV gagal, itu hanya akan memberikan 80/200 dari kinerja nominal, yaitu 40%. Ini akan disebut faktor kinerja yang dirasakan.

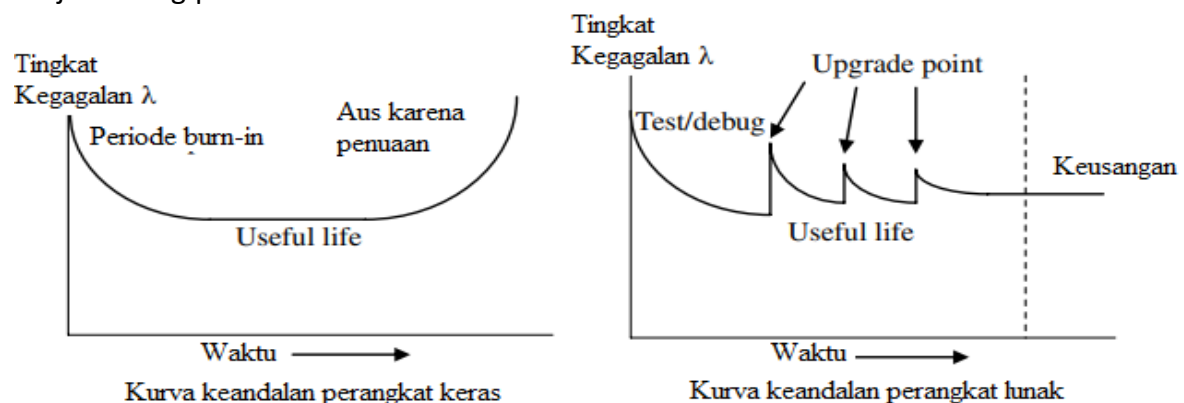
Untuk kinerja yang lebih tinggi, ukuran EVP harus ditingkatkan. Jika ukurannya lebih tinggi, jelas kinerja sistem akan lebih baik di bawah degradasi anggun. Oleh karena itu "kualitas" keseluruhannya meningkat bahkan di bawah degradasi. Sumbu horizontal (pada Gambar 8.4) pada dasarnya mengatakan bahwa jika EVP atau ICE overdesign, maka faktor keandalannya, karena kinerja yang lebih baik, akan meningkat. Jadi, tanpa overdesign, sistem

ICE non-hibrida lebih andal daripada HEV, tetapi dengan overdesign di luar titik tertentu, HEV paralel lebih andal, yang mencakup efek kinerja dan keandalan. Tetapi untuk seri HEV, karena hanya memiliki sistem penggerak tunggal, bahkan dengan overdesign, keandalannya secara keseluruhan tidak dapat melebihi kendaraan non-hibrida, karena kendaraan non-hibrida memiliki komponen yang lebih sedikit dibandingkan dengan seri HEV. Pembaca yang tertarik dirujuk ke untuk elaborasi dan detail lebih lanjut.

8.4 MASALAH KEANDALAN PERANGKAT LUNAK

Dengan proliferasi perangkat lunak dalam kehidupan kita sehari-hari dan penggunaannya dalam perangkat kecil yang dikendalikan secara elektronik, untuk mobil, pesawat terbang, pesawat ruang angkasa, kapal, dan sebagainya, pentingnya fungsi yang dapat diandalkan tidak dapat terlalu ditekankan. Dalam banyak kasus, kegagalan fungsi perangkat lunak hanya dapat menyebabkan ketidaknyamanan. Dalam sejumlah besar aplikasi lain seperti pengereman otomotif, kemudi, kontrol mesin, dan kontrol stabilitas pesawat, atau dalam aplikasi medis dan pertahanan tertentu, perangkat lunak yang tidak berfungsi dapat mengakibatkan kecelakaan serius, cedera, dan bahkan hilangnya nyawa. Beberapa contoh kegagalan bencana disajikan dalam artikel yang tersedia di http://users.ece.cmu.edu/~koopman/des_s99/sw_reliability/. Ini termasuk tragedi dengan Therac 25, mesin terapi radiasi yang dikendalikan komputer, yang disebabkan oleh ketidakmampuan perangkat lunak untuk mendeteksi kondisi balapan, dan kasus kapal perusak Inggris HMS Sheffield yang tenggelam karena sistem radar mengidentifikasi rudal yang masuk sebagai rudal ramah. Situs web ini juga menunjukkan bahwa beberapa kali kesalahan atau penyimpangan kecil yang tidak terlihat dapat menyebabkan kegagalan. Misalnya, kesalahan pemotongan meleset 95 ns dalam presisi setiap 10 detik dan, terakumulasi lebih dari 100 jam, membuat rudal Patriot gagal menargetkan rudal Scud, yang menyebabkan hilangnya 28 nyawa. Berikut adalah kasus di mana kesalahan, yang dianggap tidak signifikan, tetapi ketika diakumulasi, dan tampaknya tidak diperbaiki, menyebabkan kegagalan. Peristiwa terbaru yang terkait dengan masalah di HEV dan juga kendaraan biasa, meskipun belum sepenuhnya diteliti, mungkin memiliki masalah perangkat keras dan perangkat lunak dan belum terlihat.

Kurva keandalan perangkat lunak dan perangkat keras telah dibandingkan di situs web yang sama, melalui diagram pada Gambar 8.5. Dapat dilihat bahwa perangkat keras melewati fase burn-in awal, diikuti dengan tingkat yang cukup stabil, dan akhirnya terjadi keausan fisik dan tingkat kegagalan meningkat. Pada saat itu penggantian perangkat keras mungkin diperlukan. Tidak seperti perangkat keras, perangkat lunak pada awalnya mengalami koreksi kegagalan yang signifikan dalam fase pengujian/debug. Setelah itu, setiap peningkatan mengarah ke semacam mini-replikasi dari fase awal. Akhirnya perangkat lunak menjadi matang dan faktor keandalan menjadi berkurang, tetapi perangkat lunak juga cenderung menjadi usang pada saat itu.



Gambar 8.5 Kurva keandalan perangkat keras dan perangkat lunak

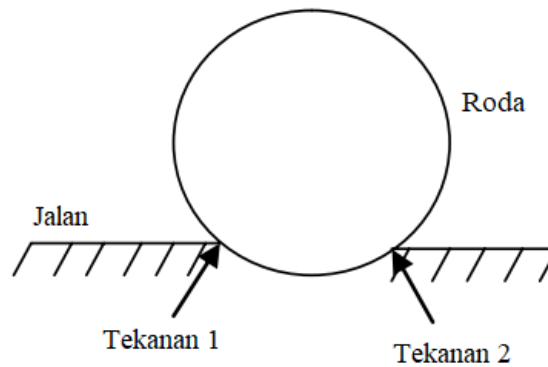
Kebanyakan orang yang menggunakan sistem operasi komputer (OS) tahu bahwa OS yang lebih lama dengan peningkatan berfungsi dengan baik. Contohnya adalah Windows XP. Tetapi meskipun beroperasi dengan cukup memuaskan, orang mungkin memikirkan fitur baru, dan karenanya menjadi usang. Untuk Windows XP, ini telah menyebabkan Vista dan Windows 7, dan seterusnya. Intinya adalah masih belum ada ukuran kuantitatif yang pasti dari keandalan perangkat lunak dan metode pengujian yang dapat menjamin keandalan perangkat lunak dalam semua kondisi. Meskipun orang telah mendokumentasikan berbagai model untuk evaluasi keandalan, pada kenyataannya tidak ada yang berlaku untuk semua situasi.

Oleh karena itu muncul pertanyaan: bagaimana semua hal di atas berhubungan dengan HEV? Dari bab sebelumnya dapat dicatat bahwa HEV adalah sistem yang rumit, di mana berbagai pengontrol terlibat dengan algoritma yang membuat sejumlah besar keputusan. Pengontrol yang terlibat untuk fungsionalitas HEV yang sukses juga melibatkan pengontrol lain dalam sistem, yang mungkin merupakan item warisan yang ditingkatkan untuk antarmuka HEV. Contoh-contoh tersebut meliputi pengontrol bodi, pengontrol mesin, pengontrol transmisi, elektronika daya/pengontrol penggerak motor, pengontrol manajemen baterai, pengontrol manajemen daya, untuk beberapa nama, dan algoritme terkaitnya. Semua ini melibatkan sejumlah besar perangkat lunak.

Meskipun pengujian dapat dilakukan untuk beberapa situasi tertentu, sebenarnya tidak ada jaminan bahwa tidak ada situasi yang dapat membuat perangkat lunak tidak efektif. Ini berarti situasi menciptakan kondisi sedemikian rupa sehingga output dari perintah mengarah ke berikut: (1) output yang tidak seharusnya menjadi respons yang diinginkan terhadap input sesuai desain; (2) algoritma yang membuat loop tanpa akhir dengan output tetap tidak berubah (yang tidak diinginkan), atau output flip-flop antara sejumlah status output yang berbeda. Baik (1) maupun (2) tidak diinginkan, tetapi selama tidak mengarah pada perintah yang berbahaya bagi HEV, mereka setidaknya dapat diterima sebagai cacat sistem yang memerlukan desain ulang atau perbaikan. Namun, jika perintah dibuat secara otomatis, misalnya, akselerasi terus meningkat, atau jika perintah rem tidak mengaktifkan rem saat pengguna perlu menghentikan kendaraan, maka itu bisa menjadi bencana besar atau bahkan fatal. Beberapa alasan kegagalan perangkat lunak di HEV adalah:

- 1) Cacat desain karena ketidakmampuan pengembang untuk memperhitungkan semua kemungkinan skenario
- 2) Spesifikasi yang tidak tepat yang dapat menyebabkan keragu-raguan oleh perangkat lunak karena kurangnya informasi yang memadai untuk melaksanakan tugas, meskipun perancang atau pengembang perangkat lunak tidak bersalah
- 3) Kurangnya kesadaran akan kebutuhan akan tingkat presisi yang lebih tinggi dalam jumlah tertentu, yang dapat mengakumulasi kesalahan dari waktu ke waktu dan beroperasi dengan keputusan yang salah
- 4) Kurangnya pengujian perangkat lunak secara menyeluruh untuk semua situasi yang mungkin terjadi.

Beberapa skenario kegagalan katastrofik di area otomotif, khususnya di HEV (misalnya, kebisingan sporadis), dapat menyebabkan input yang salah ke perangkat lunak di mesin atau kontrol motor. Jika perangkat lunak tidak memiliki ketentuan untuk memperbaiki kesalahan, itu dapat memberikan sinyal yang salah ke mesin atau motor, yang mengarah ke perilaku yang sangat tidak diinginkan, mungkin dalam akselerasi.



Gambar 8.6 Sebuah roda dalam lubang.

Situasi lain dapat dipertimbangkan. Mari kita lihat Gambar 8.6 dan asumsikan bahwa pengemudi menekan rem, dan tindakan regeneratif terjadi, tetapi rem mekanis tidak diaktifkan berdasarkan algoritma rem. Mari kita asumsikan juga bahwa sebuah roda mobil, yang sebelumnya berada di permukaan yang halus, untuk sesaat melewati sebuah lubang. Pada saat itu, ban kehilangan kontak dengan permukaan jalan yang lebih lebar, torsi gesekan berhenti, dan tepi lubang memberikan gaya reaksi F_1 dan F_2 , kurang lebih akan tegak lurus terhadap permukaan ban. Bahkan jika ada gaya rotasi (sehingga menciptakan torsi) tangensial ke ban, mereka akan membatalkan untuk semua tujuan praktis, karena arah gaya F_1 dan F_2 yang ditunjukkan pada Gambar 8.6 (dengan asumsi gaya adalah sama, yang masuk akal untuk tujuan diskusi ini). Pada saat itu juga, tenaga regeneratif dari rem tidak akan tersedia, dan jika rem mekanis tidak aktif, karena melihat roda lain masih melakukan regenerasi, maka roda mobil tersebut akan melaju ke depan meskipun pengemudi telah menekan rem.

Jika algoritme tidak sepenuhnya mengevaluasi situasi berdasarkan berbagai kondisi roda dan tidak mengoordinasikannya dengan benar, itu dapat mengganggu kestabilan kendaraan atau gagal memperlambatnya dengan benar. Ini hanyalah situasi hipotetis, karena rincian algoritme pabrikan pada umumnya adalah milik umum dan sulit untuk mengetahui secara pasti apa yang akan terjadi dalam skenario ini. Tetapi masalah baru-baru ini seperti ini terungkap, dan meskipun masalahnya mungkin karena masalah sensor, atau tidak memiliki sensor yang memadai, masalah perangkat lunak masih bisa menjadi salah satu alasannya.

Terlepas dari kenyataan bahwa masalah perangkat lunak dapat menimbulkan bahaya yang signifikan jika perangkat lunak tidak berfungsi, manfaat memiliki perangkat lunak secara umum lebih besar daripada kerugiannya. Oleh karena itu satu-satunya cara untuk mengetahui kualitas perangkat lunak yang sebenarnya adalah dengan menerapkannya selama bertahun-tahun layanan. Hanya pengujian di lingkungan lab tidak akan pernah bisa menjamin atribut ini

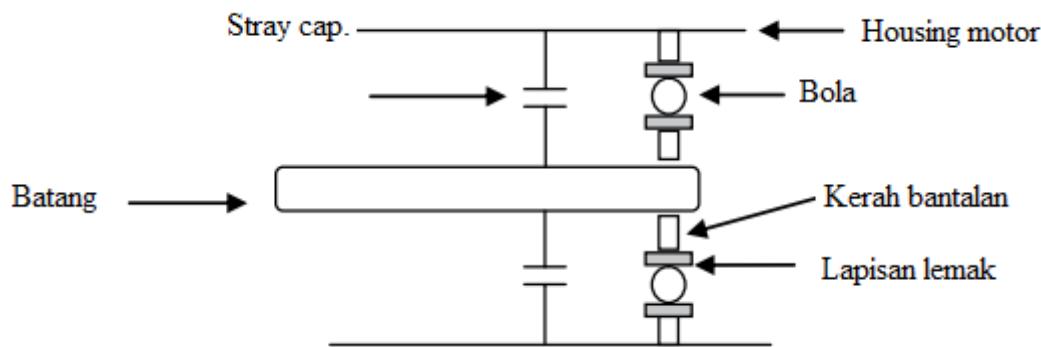
8.5 MASALAH KOMPATIBILITAS ELEKTROMAGNETIK (EMC)

Kompatibilitas elektromagnetik adalah masalah penting akhir-akhir ini, mengingat fakta bahwa HEV dan EV menggunakan sejumlah besar elektronika daya yang menggunakan switching frekuensi tinggi daya tinggi. Masalah EMC dapat dikurangi sebagian besar dengan tata letak sirkuit yang tepat pada berbagai papan sirkuit dan sistem distribusi daya, baik dari segi pembangkitan maupun propagasi.

Electromagnetic Intervention (EMI) dihasilkan oleh sirkuit daya tinggi di konverter daya dan pengontrol terkait. Beberapa standar, seperti EMC Directive 89/336/EEC, Automotive Directive 95/54/EC, dan IEC 61800-3, Persyaratan EMC dan Metode Uji untuk Sistem Penggerak Tenaga Listrik Kecepatan yang Dapat Disesuaikan, dianggap penting. Selain itu, 55055 tentang karakteristik gangguan untuk perlindungan receiver onboard juga telah dipertimbangkan. Standar SAE J551 pada kendaraan permukaan EMC dianggap lebih ketat dibandingkan dengan aplikasi lain, tidak seperti otomotif.

Dalam kendaraan listrik, inverter terletak di dekat motor penggerak dan ditempatkan dalam kotak logam yang melindungi emisi kebisingan. Namun, modul baterai biasanya terletak jauh, dan kabel daya tanpa pelindung dapat digunakan untuk menyambungkannya ke elektronika daya. Oleh karena itu kabel unshielded dapat menyebabkan sejumlah besar perambatan kebisingan. Studi oleh Chen dan Xudalam EV menunjukkan bahwa sebagian besar energi kebisingan berada pada frekuensi di bawah beberapa megahertz dan ini menyebabkan transien yang dapat mempengaruhi sistem digital lebih dari menciptakan kebisingan terpancar ke lingkungan. Tetapi tingkat energi kebisingan yang terpancar itu sendiri juga tinggi, dan belum tentu dalam batas.

Dalam presentasi yang sangat menarik, dampak EMI pada HEV dan bagaimana pengaruhnya terhadap berbagai item dipelajari. Meskipun penting untuk aplikasi militer, informasi tersebut juga berlaku untuk kendaraan biasa. Namun, pentingnya EMI pada sistem komunikasi lebih penting untuk militer dibandingkan dengan kendaraan komersial. Standar yang relevan untuk militer dalam konteks ini adalah MIL-STD-461E – Persyaratan, Desain, dan Uji EMI, dan MIL-STD-464 – EMC Kendaraan dan Persyaratan Petir. Terakhir ini lebih berlaku untuk pesawat komersial. Standar lainnya termasuk RTCA-DO-160 – EMI dan Persyaratan LIT Termasuk Metode Uji, dan AC-20-136 – FAA LIT Advisory Circular. Selain itu, Aturan dan Regulasi FCC, Judul 47, Bagian 15, Subbagian B, sangat penting. Beberapa standar Eropa juga ditunjukkan sebelumnya.



Gambar 8.7 Arsitektur elektronik daya dalam penggerak motor EV

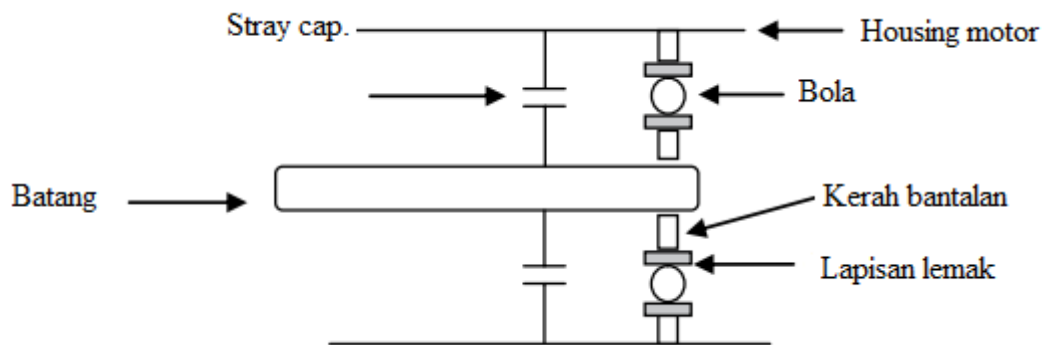
Gambar 8.7 menunjukkan diagram blok penggerak motor listrik. Sejumlah kapasitansi kecil, yang dapat diabaikan pada frekuensi rendah, menjadi penting, terutama ketika frekuensi switching tinggi. Di sini, kapasitor ditampilkan di antara elemen rumah individu ke tanah atau sasis/badan kendaraan. Berbagai arus, dalam mode umum dan diferensial, dapat mengalir melalui kapasitansi nyasar ini. Mereka juga dapat membuat masalah pada poros dan bantalan sebagai berikut. Perhatikan Gambar 8.8, yang menunjukkan bantalan dan poros penggerak motor. Kapasitansi nyasar yang ditunjukkan dapat menimbulkan tegangan melintasi lapisan lemak yang diarsir. Hal ini berpotensi melebihi tegangan tembus lemak, menyebabkan percikan api pada material baja bantalan, sehingga menyebabkan kerusakan bantalan dan akhirnya gagal. Tentu saja, kapasitansi lain juga dapat menyebabkan arus nyasar tambahan dan radiasi kebisingan yang diakibatkannya.

Beberapa mekanisme yang diperlukan untuk mengurangi efek EMI meliputi:

- 1) Menggunakan bahan penghantar yang sangat baik untuk rumah elektronika daya dan peralatan lainnya
- 2) Berbagai sambungan dalam rumahan harus rapat dan tidak boleh ada diskontinuitas yang tiba-tiba pada struktur rumahan, misalnya, celah atau lubang kecil yang tidak diinginkan pada struktur yang dapat menyebabkan emisi tinggi
- 3) Berbagai kabel harus dilindungi dengan benar sejauh dapat dilakukan, dan pemutusan yang benar harus digunakan

- 4) Pelindung magnetik dan listrik harus digunakan
- 5) Filter mode umum dan diferensial harus digunakan, sebagaimana berlaku
- 6) Jarak sekrup harus dibuat dengan benar dan gasket konduktor harus digunakan sesuai kebutuhan.

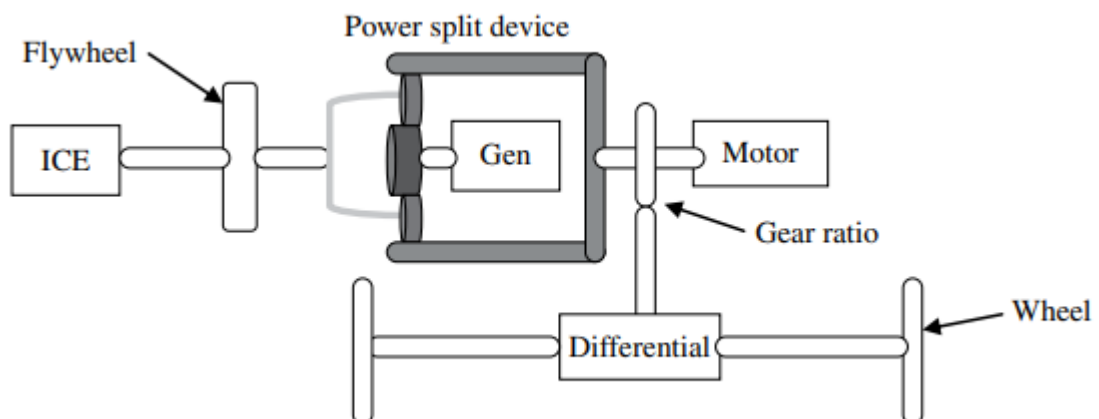
Teknik lain, termasuk penggunaan bus bar berlapis, kapasitor tautan DC frekuensi tinggi, snubber yang baik, dan pemisahan sirkuit elektronik digital dan daya tinggi, telah disarankan untuk rangkaian elektronika daya. Untuk kabel listrik, manfaat dapat diperoleh dengan mengempang bundel daya tinggi secara berlebihan. Selain itu, bus data harus dilindungi dengan benar. Dalam kabel daya tinggi EV, bahkan jika tidak dilindungi, setidaknya bus data harus dilindungi untuk melindungi tidak berfungsinya sirkuit digital ini karena EMI.



Gambar 8.8 Penyelesaian rangkaian melalui poros, kapasitansi nyasar, dan bantalan.

8.6 MASALAH KEBISINGAN GETARAN HARSHNESS (NVH) DAN ELEKTROMEKANIS

Seperti disebutkan sebelumnya dalam bab ini, sehubungan dengan HEV, biasanya orang lebih peduli dengan hal-hal yang berkaitan dengan ekonomi bahan bakar dan mekanisme kontrol dan algoritme, baterai, elektronika daya, dan sebagainya. Tetapi fakta bahwa HEV mengalami penghentian dan penyalaan mesin yang sering untuk menghemat bahan bakar, atau bahkan penghentian atau penyalaan motor listrik yang terlalu banyak, patut dipertimbangkan dalam hal getaran atau tekanan pada mesin, motor, atau anggota mekanis yang terkait dengan sistem.

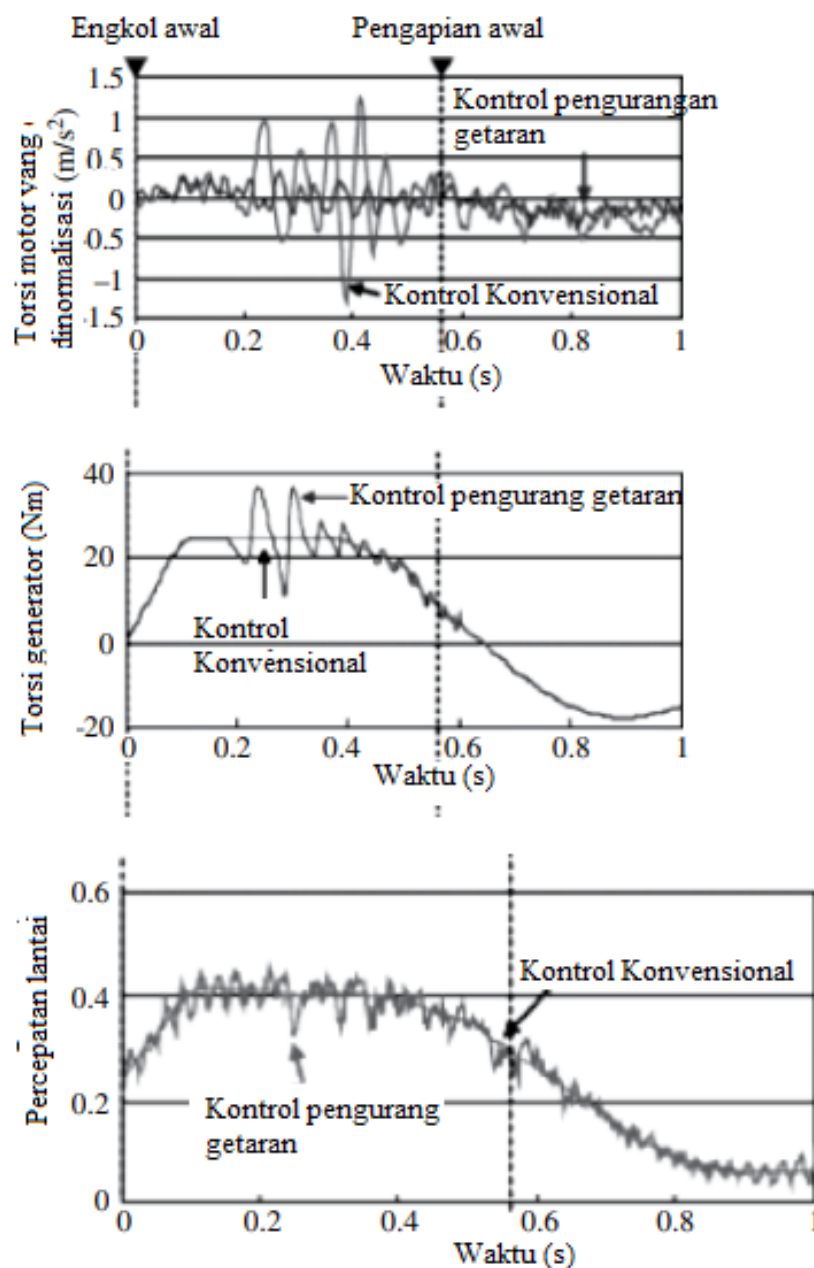


Gambar 8.9 Konfigurasi HEV split daya tipikal

Perhatikan Gambar 8.9 yang menunjukkan konfigurasi HEV pemisahan daya yang khas. Dalam sistem khusus ini, perangkat split power, yaitu sistem roda gigi planet, digunakan untuk menghubungkan berbagai item yang ditampilkan. Ini khas untuk Toyota HEV. Dalam sistem ini, karena tidak ada kopling, torsi traksi dari ICE dan motor listrik langsung ditransmisikan ke roda. Oleh karena itu, jika ada tindakan menghidupkan/mematikan mesin, getaran yang

menyertainya ditransmisikan ke roda melalui berbagai komponen di antaranya, termasuk poros dan roda gigi penghubung.

Getaran dari mesin dapat terjadi baik sebelum maupun sesudah penyalaan. Ketika tidak ada pengapian, ada tekanan kompresi dan pemompaan di dalam silinder. Setelah penyalaan, akan terjadi perubahan torsi mendadak pada mesin akibat pembakaran. Perhatikan bahwa ini adalah perubahan awal karena proses diskontinu, yaitu menghidupkan atau mematikan mesin, yang terpisah dari torsi berdenyut biasa di mesin dalam kondisi normal. Ito dkk telah mempelajari masalah getaran pada mesin HEV dengan detail yang masuk akal. Getaran dikurangi dengan menggunakan dua pengontrol, pertama mengendalikan riak karena tekanan kompresi dan pemompaan di silinder mesin, dan yang kedua mengendalikan getaran torsi yang disebabkan oleh perubahan torsi yang cepat. Hasilnya menjanjikan dalam hal mengurangi akselerasi lantai.



Gambar 8.10 Perbandingan kualitatif pengurangan getaran akibat aksi kontrol. Garis yang mewakili kontrol konvensional dan garis yang menunjukkan kontrol pengurangan getaran yang diusulkan dalam ditunjukkan oleh panah. Dicitak ulang dari R&D Review of Toyota CRDL, vol. 40, tidak. 2, hal. 42

Ito dkk menyajikan hasil eksperimen mereka sesuai dengan metode kontrol getaran yang digunakan. Diagram perbandingan kualitatif yang disederhanakan diberikan pada Gambar 8.10 untuk menunjukkan perbedaannya. Sangat menarik untuk dicatat bahwa dengan menggunakan metodologi kontrol baru, getaran pada percepatan lantai telah berkurang secara substansial. Namun, perlu juga dicatat bahwa secara bersamaan torsi yang dihasilkan pada motor dan generator meningkat. Peningkatan ini pada dasarnya adalah apa yang meniadakan getaran lantai. Namun, fenomena di atas menyebabkan pengurangan torsi mekanik, dan memang membutuhkan tindakan kontrol frekuensi tinggi melalui sistem motor dan generator. Ini mungkin memiliki beberapa konsekuensi dalam hal peralihan yang lebih cepat dari sakelar elektronika daya dan arus frekuensi tinggi dan medan magnet di motor, dan itu sebenarnya dapat menyebabkan kerugian yang lebih tinggi pada komponen tersebut. Dengan kata lain, ada beberapa hukuman yang harus dibayar di satu tempat setiap kali beberapa manfaat dicapai di tempat lain. Dalam kasus khusus ini, pengurangan getaran mekanis pada dasarnya ditransfer ke dalam bentuk listrik. Isu-isu ini, terkait dengan kontrol frekuensi tinggi dan konsekuensinya, belum, sejauh pengetahuan penulis, telah dipelajari.

Dalam paten, masalah banyak mulai dan berhenti telah dibahas. Diindikasikan bahwa desain kendaraan biasanya dioptimalkan untuk meminimalkan kebisingan getaran kekerasan (NVH) baik untuk kecepatan idle dan di atasnya, dan khususnya untuk kondisi frekuensi tinggi. Tetapi getaran kecepatan rendah dan frekuensi rendah biasanya sulit diatur. Paten ini secara khusus menunjukkan bahwa pada 0-800 rpm, masalah dan resonansi NVH sangat bermasalah. Rupanya situasi ini disebabkan oleh pulsa kompresi di mesin dan fluktuasi kecepatan flywheel. Selain itu, masalahnya penting untuk mesin bensin, tetapi lebih untuk mesin diesel, pertama memiliki tekanan kompresi sekitar 120 psi (827 kPa), dan yang terakhir sekitar 400 psi (2758 kPa). Tampaknya sering start/stop setiap beberapa menit dan mematikan mesin hanya beberapa detik bisa sangat penting dalam hal NVH.

Metode yang disarankan untuk memperbaiki masalah NVH termasuk membuka lubang buang (katup) selama urutan mematikan mesin. Idenya adalah untuk mengurangi tekanan kompresi di dalam silinder, sehingga mengurangi getaran. Hal ini juga menunjukkan bahwa proses di atas mempengaruhi perubahan inersia rotasi di mesin yang mencegah transmisi ke sasis. Masalah NVH di atas khusus untuk HEV yang memiliki banyak sumber daya dan melibatkan beberapa urutan shutdown. Dalam kendaraan listrik murni, masalah ini kecil kemungkinannya karena tidak adanya ICE dan juga bahwa torsi motor listrik jauh lebih halus dibandingkan dengan torsi ICE.

8.7 MASALAH AKHIR KEHIDUPAN

Dalam HEV dan EV, masalah akhir masa pakai dikaitkan dengan masa pakai berbagai komponen dan manajemen siklus hidup secara keseluruhan. Sejauh menyangkut sistem mekanis, yaitu mesin dan transmisi (berbasis power split atau jenis kopling mekanis lainnya), ini sama seperti pada kendaraan ICE biasa. Jadi, akhir masa pakai dapat dianggap sebagai nominal sekitar 100.000 mil (160.000 km), dalam hal garansi pabrik, dan, tergantung pada kualitasnya, masa pakai dapat dengan mudah sekitar 240.000 hingga 320.000 km. Namun, item penting yang perlu dipertimbangkan untuk HEV adalah baterai, elektronika daya, dan motor. Itu tautan terlemah di sini adalah baterai, selanjutnya adalah elektronika daya, dan kemudian motor. Dalam HEV, baterai dijamin selama sekitar 10 tahun, yang kompatibel dengan masa pakai kendaraan yang dijamin. Biaya baterai baru bisa sekitar IDR 65 juta, tergantung pada ukuran kendaraan tertentu.

Laporan Laboratorium Nasional Oak Ridge (ORNL) mengatakan bahwa biaya elektronika daya saat ini adalah sekitar IDR500 ribu/kW. Upaya sedang dilakukan untuk menurunkannya di masa depan menjadi IDR50 ribu/kW. Jadi, untuk kendaraan dengan

perangkat elektronik daya 60 kW, biayanya sekitar IDR 200 juta pada saat laporan (2011), dan garansi barang khusus hibrida sekitar 240.000km atau 10 tahun. Menurut studi ORNL, biaya motor 75 kW sedikit di atas IDR10juta hingga sekitar IDR30juta tergantung pada ukurannya. Motor dianggap sebagai entitas yang paling kuat dalam komponen spesifik hybrid. Meskipun informasi yang tepat tidak tersedia, penulis percaya bahwa harapan hidup motor itu sendiri mungkin lebih dari 10-12 tahun, yaitu antara 240.000 dan 320.000 km.

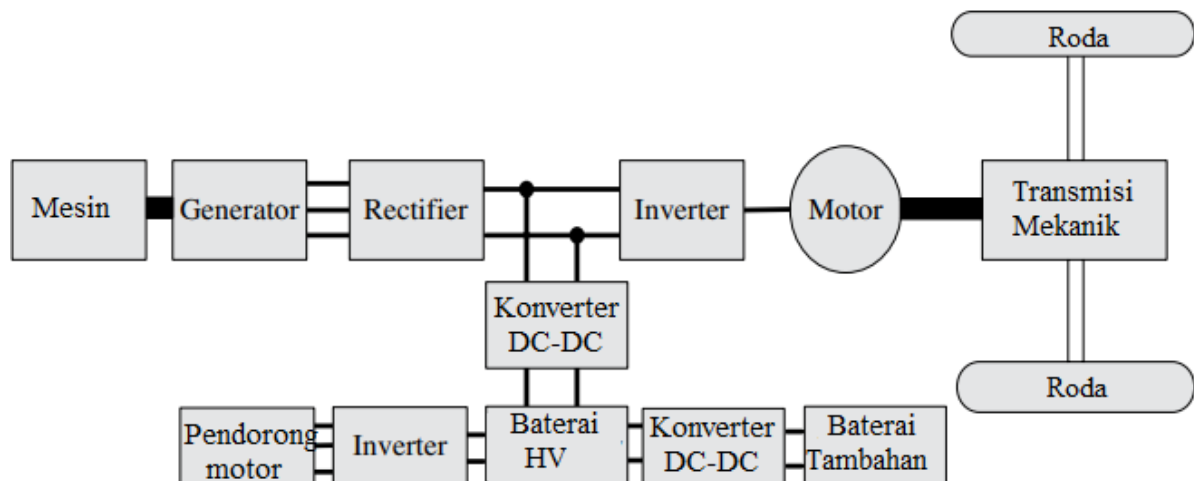
Masa pakai semua item yang spesifik hibrida (baterai, motor, dan elektronika daya) dipengaruhi secara signifikan oleh suhu sekitar dan mode operasional. Ini berarti bahwa variasi antara tuntutan siklus penggerak kontinu dan puncaknya mempengaruhi siklus hidup secara keseluruhan. Ini berlaku untuk baterai, elektronika daya, dan motor. Jika ada puncak dan lembah yang sangat tinggi, dengan harmonik terkait dalam tegangan dan arus, itu akan mempengaruhi harapan hidup secara keseluruhan.

Sehubungan dengan masalah siklus hidup, perlu dicatat bahwa beberapa bahan di dalam baterai dan motor dapat didaur ulang. Misalnya, casing baterai dapat langsung digunakan kembali, dan beberapa bahan di dalamnya mungkin diproses ulang. Hal yang sama berlaku untuk motor. Motor kemungkinan besar dapat direkondisi dalam hal belitan, dan jika itu adalah motor magnet permanen, magnet dapat diganti jika kehilangan beberapa sifat mereka. Dengan elektronika daya, komponen silikon itu sendiri dapat diganti, yaitu modul sakelar elektronika daya. Kontrol elektronik kemungkinan besar bisa dipertahankan. Penggantian dan rekondisi komponen akan membutuhkan beberapa infrastruktur, sehingga operasi penggantian dan rekondisi dapat dilakukan dengan sedikit ketidaknyamanan bagi pengguna. Semua proses ini agak baru dan hanya dapat berkembang seiring waktu.

BAB 9 ELEKTRONIKA DAYA DI HEV

9.1 PENGANTAR

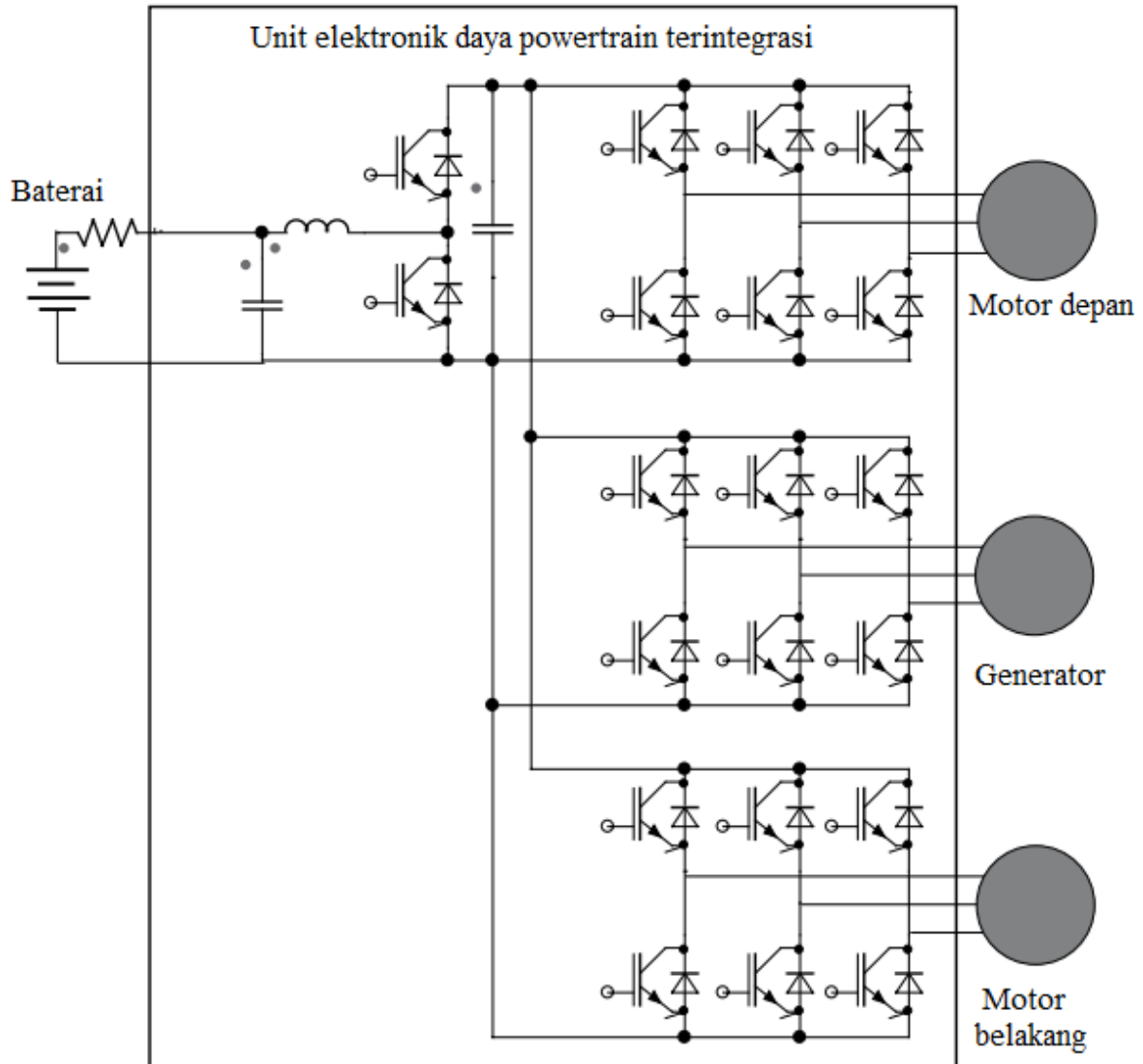
Elektronika daya adalah salah satu teknologi yang memungkinkan mendorong peralihan dari kendaraan bertenaga mesin bensin/diesel konvensional ke kendaraan listrik, hibrida, dan sel bahan bakar. Bab ini membahas elektronika daya yang digunakan dalam HEV dan PHEV. Namun, fokus bab ini adalah pada aspek unik dari elektronika daya di HEV dan PHEV. Untuk menjelaskan jenis rangkaian elektronika daya yang digunakan dalam HEV, kita menggunakan konfigurasi rangkaian powertrain HEV khas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.1. Dalam konfigurasi ini, mesin pembakaran internal (ICE) menggerakkan generator sinkron magnet permanen tiga fase, yang outputnya adalah tegangan tiga fase dengan frekuensi variabel dan tegangan variabel. Output ini perlu diperbaiki ke DC.



Gambar 9.1 Konverter elektronika daya yang digunakan dalam rangkaian HEV

Roda depan digerakkan oleh motor induksi yang perlu dikendalikan oleh inverter sumber tegangan (VSI) atau inverter sumber arus (CSI). Sistem penyimpan energi terhubung ke bus DC, antara output generator/penyearah dan inverter. Namun, ada konverter DC-DC dua arah yang mengatur pengisian/pengosongan baterai, serta mengontrol tegangan bus DC. Pada kendaraan konvensional, kompresor AC (A/C) digerakkan oleh mesin melalui sabuk. Pada HEV tingkat lanjut, mesin sangat sering dimatikan selama pola mengemudi stop-and-go. Untuk memiliki A/C saat mesin mati, kompresor perlu digerakkan oleh motor listrik yang dijalankan dari baterai hybrid. Mungkin ada pompa tekanan hidraulik yang digerakkan secara elektrik untuk sistem hidraulik kendaraan, seperti rem gesek dan power steering. Motor A/C dan motor kompresor biasanya merupakan motor DC brushless dengan inverter.

Selain itu, komponen tambahan, seperti lampu depan, wiper, sistem hiburan, dan kursi pemanas, dijalankan dari baterai tambahan 14 V. Sebagian besar kendaraan hibrida canggih tidak lagi memiliki alternator, yang berarti bahwa baterai 14 V perlu diisi dari baterai tegangan tinggi (HV). Di sisi lain, bahkan jika ada alternator, saat mesin mati, baterai 14 V masih dapat terkuras dengan cepat tanpa perawatan pengisian daya yang tepat. Oleh karena itu, diperlukan konverter DC-DC untuk mengisi baterai 14 V dari baterai HV. Untuk PHEV, ada juga pengisi daya baterai yang dipasang di kendaraan atau di stasiun pengisian daya.



Gambar 9.2 Unit elektronik daya powertrain terintegrasi yang digunakan untuk mengontrol kendaraan hibrida Toyota Highlander. Courtesy, CC Chan, Kecanggihan Kendaraan Listrik, Hibrida, dan Sel Bahan Bakar, Edisi Khusus IEEE tentang Kendaraan Listrik, Hibrida, dan Sel Bahan Bakar, vol. 95, tidak. 4, hlm. 704–718, 2007 © [2007] IEEE. Dicitak ulang, dengan izin, dari Prosiding IEEE.

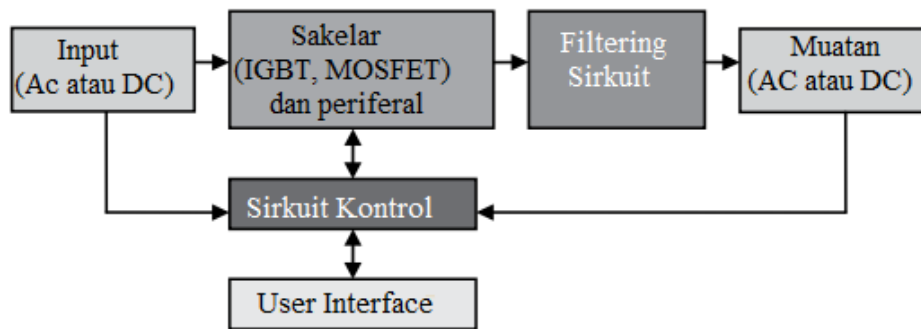
Meskipun ada kesamaan antara konverter daya yang digunakan dalam HEV dan yang digunakan dalam aplikasi industri, komersial, atau perumahan lainnya, ada beberapa fitur unik khusus untuk aplikasi otomotif. Contohnya termasuk suhu operasi sekitar yang lebih luas (-20 hingga 90°C), getaran dan guncangan, kompatibilitas elektromagnetik, dan manajemen termal. Gambar 9.2 menunjukkan unit elektronik daya utama terintegrasi yang digunakan untuk mengontrol Toyota Highlander HEV (<http://www.toyota.com>). Unit elektronika daya terdiri dari konverter DC-DC dua arah yang menghubungkan baterai hibrida dan bus DC, dan tiga sirkuit penggerak motor yang mengontrol motor/generator depan dan belakang. Masalah yang akan dibahas dalam desain sirkuit elektronika daya HEV meliputi:

- **Desain kelistrikan:** Termasuk desain sirkuit switching utama, desain sirkuit pengontrol, optimalisasi frekuensi switching, dan perhitungan kerugian.
- **Desain algoritma kontrol:** Termasuk mengembangkan algoritma kontrol untuk mencapai tegangan, arus, dan frekuensi yang diinginkan pada output, dan untuk mewujudkan aliran daya dua arah sesuai kebutuhan.

- **Desain magnetik:** Meliputi desain induktor, transformator, dan komponen lain seperti kapasitor yang diperlukan untuk penyangkutan, switching, dan unit driver gerbang.
- **Desain EMC:** Termasuk memahami masalah interferensi elektromagnetik (EMI), menganalisis transien switching, dan tata letak sirkuit yang meminimalkan induktansi dan kapasitansi parasit.
- **Desain mekanis dan termal:** Termasuk pemodelan hilangnya perangkat daya dan komponen magnetik; sistem pendingin, heat sink, dan desain enklosur; dan integrasi unit elektronika daya.

9.2 PRINSIP ELEKTRONIKA DAYA

Secara luas, elektronika daya adalah disiplin ilmu yang mempelajari konverter daya yang memproses dan mengontrol aliran daya dengan cara elektronik. Ini terutama melibatkan penggunaan dan kontrol sakelar semikonduktor daya, seperti dioda daya, transistor bipolar gerbang terisolasi (IGBT), dan transistor efek medan oksida logam (MOSFET). Gambar 9.3 saya mengilustrasikan skema konverter daya.



Gambar 9.3 Skema konverter daya

Seperti dapat dilihat dari Gambar 9.3, konverter daya tipikal akan terdiri dari empat segmen: sirkuit switching dan periferal, sirkuit penyangkutan, sirkuit kontrol dan umpan balik, dan antarmuka pengguna opsional.

- **Jenis konverter daya:** Konverter daya biasanya diklasifikasikan berdasarkan input dan outputnya. Karena input dan output dari konverter daya dapat berupa AC atau DC, ada empat jenis konverter daya:
 - Konverter DC–DC
 - Inverter DC–AC
 - Penyearah AC-DC
 - siklokonverter AC-AC.

Tiga jenis konverter daya pertama semuanya digunakan dalam HEV. Tipe keempat, siklokonverter AC-AC, hanya digunakan dalam sistem AC-AC berdaya tinggi untuk mengontrol besaran tegangan dan frekuensi motor besar. Namun, konversi AC-AC yang melibatkan sirkuit AC-DC dan sirkuit DC-AC tidak biasa. Tergantung pada konfigurasi powertrain dan tingkat hibridisasi, HEV dapat melibatkan satu atau lebih konverter daya dari jenis yang berbeda.

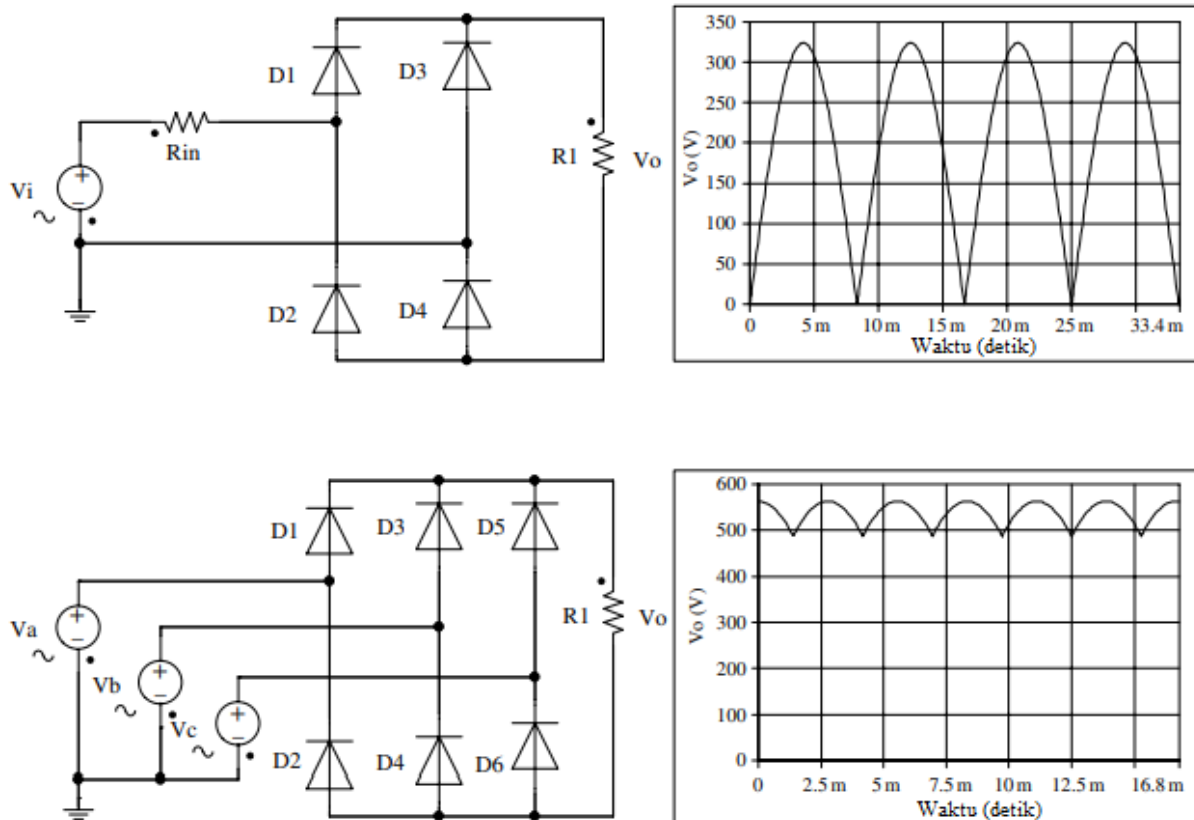
- **Sirkuit utama (saklar, periferal):** Sirkuit utama terdiri dari perangkat semikonduktor daya (saklar dan dioda) dan sirkuit periferal. Saklar semikonduktor dikendalikan untuk menghidupkan dan mematikan pada frekuensi mulai dari beberapa kilohertz hingga beberapa puluh atau ratusan kilohertz untuk aplikasi HEV. Tergantung pada tingkat tegangan sistem, baik MOSFET dan IGBT digunakan dalam konverter daya HEV.

- **Sirkuit penyearangan:** Konverter elektronika daya biasanya melibatkan filter low-pass LC yang akan menyaring komponen frekuensi tinggi dari tegangan output dan membiarkan komponen frekuensi rendah atau komponen DC lolos ke sisi beban.
- Sirkuit kontrol dan umpan balik: Kontrol dan umpan balik biasanya melibatkan penggunaan mikrokontroler dan sensor. Aplikasi powertrain HEV biasanya melibatkan kontrol torsi umpan balik. Umpan balik saat ini biasanya diperlukan.

Sebagai disiplin yang berkembang dengan baik, elektronika daya telah dibahas dengan sangat baik di banyak buku teks. Bab ini hanya akan berfokus pada aspek unik dari elektronika daya yang berkaitan dengan aplikasi HEV.

9.3 RECTIFIER DIGUNAKAN DI HEV

Rectifier digunakan untuk mengubah input AC menjadi output DC. Meskipun ada penyearah terkontrol, mereka jarang digunakan dalam aplikasi otomotif. Oleh karena itu, kita hanya akan membahas penyearah pasif yang tidak terkontrol dan aspek uniknya dalam aplikasi HEV.



Gambar 9.4 Penyearah ideal: atas, rangkaian penyearah satu fasa dan bentuk gelombang tegangan keluaran; bawah, rangkaian penyearah tiga fasa dan bentuk gelombang tegangan keluaran.

Penyearah Ideal

Gambar 9.4 menunjukkan penyearah satu fasa dan penyearah ideal tiga fasa yang beroperasi dari sumber tegangan ideal. Dengan karakteristik dioda yang ideal, output penyearah satu fasa dapat dinyatakan sebagai:

Persamaan 9.1

$$V_o = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} \sqrt{2}V_i \sin(\omega t) dt = 0.9V_i$$

dimana V_o adalah tegangan keluaran, V_i adalah nilai rms dari tegangan masukan, T adalah periode tegangan masukan, dan ω adalah frekuensi sudut masukan. Output penyearah tiga fasa yang ideal adalah

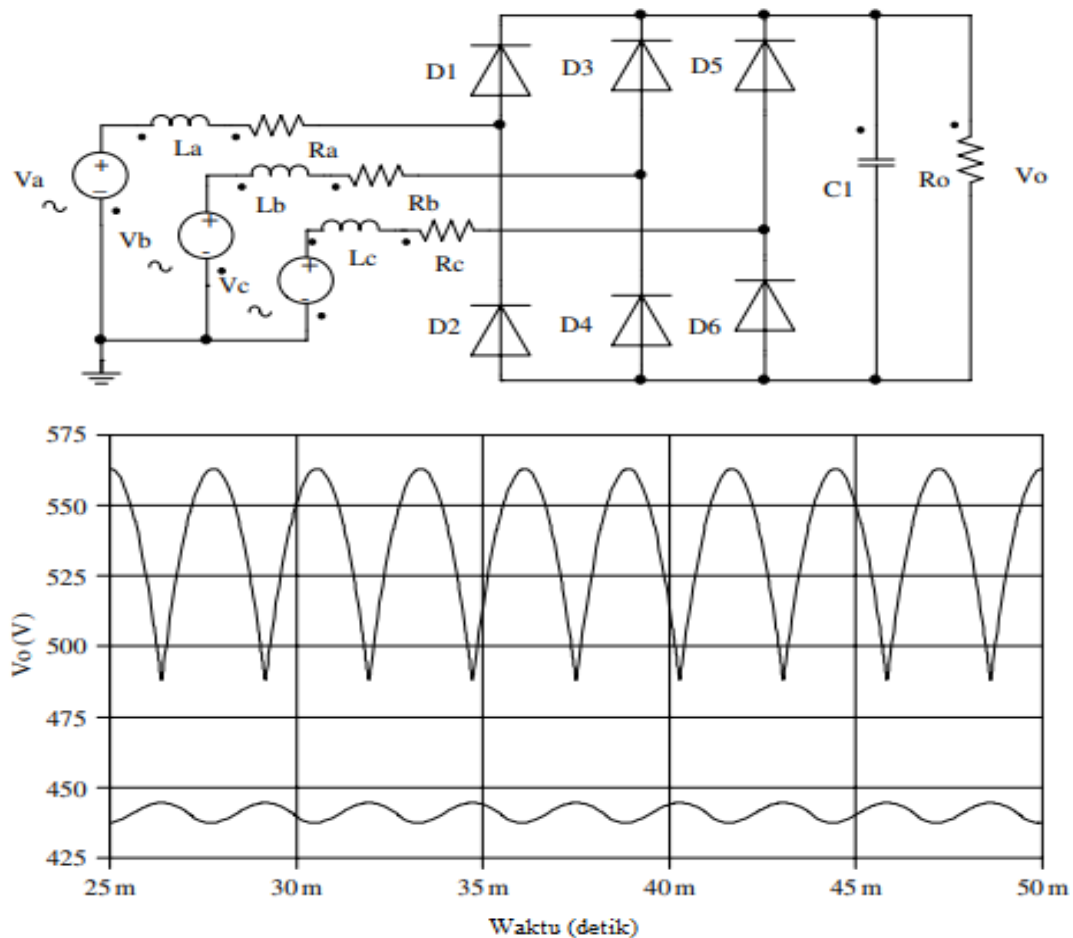
Persamaan 9.2

$$V_o = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} (V_a - V_b) dt = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{2V_{LL}} \cos(\omega t) dt = 1.35V_{LL}$$

dimana V_{LL} adalah nilai rms dari tegangan line-to-line.

Penyearah Praktis

Dalam aplikasi HEV, input ke penyearah biasanya merupakan output dari generator sinkron (seperti dalam seri HEV atau HEV kompleks), atau alternator (dalam sabuk-alternator-starter HEV). Bentuk gelombang rangkaian dan tegangan output dari penyearah HEV praktis ditunjukkan pada Gambar 9.5. Impedansi generator seri dengan sumber tegangan, dan penurunan tegangan dioda juga disertakan. Dapat dilihat bahwa ada penurunan tegangan yang signifikan dalam penyearah praktis jika dibandingkan dengan penyearah ideal. Penurunan tegangan disebabkan oleh impedansi generator, yang umumnya tidak dapat diabaikan, berbeda dengan penyearah yang terhubung ke jaringan AC tak terbatas. Selain itu, akan terjadi rugi komutasi akibat induktansi generator. Oleh karena itu, tegangan output dapat berbeda secara signifikan antara kondisi tanpa beban dan kondisi berbeban. Perbedaannya didefinisikan sebagai pengaturan tegangan.



Gambar 9.5 Penyearah praktis yang digunakan dalam HEV: rangkaian penyearah atas; bawah, tegangan output dibandingkan dengan penyearah ideal (kurva atas, penyearah ideal; kurva bawah, penyearah praktis).

Penyearah Satu Fasa

Selanjutnya kita akan menggunakan sirkuit fase tunggal untuk menganalisis regulasi tegangan, riak tegangan, dan pergantian. Pada kondisi tanpa beban, karena adanya kapasitor keluaran, tegangan output akan sama dengan puncak sin tegangan masukan, perhatikan persamaan berikut:

Persamaan 9.3

$$V_0 = \sqrt{2V_a} = 1.414V_a$$

Ketika arus beban meningkat, impedansi generator, dan dioda, masing-masing akan mengalami penurunan tegangan. Jika kapasitor tautan DC cukup besar, maka kita dapat mengasumsikan bahwa tegangan output V_1 (tegangan tautan DC) adalah konstan. Kita selanjutnya mengasumsikan bahwa penurunan tegangan dioda V_D juga konstan.

Dengan memecahkan $\sqrt{2V_a} \sin \omega t = 2V_D + V_1$, kita mendapatkan (persamaan 9.4):

$$\theta_1 = \omega t_0 = \arcsin\left(\frac{2V_D + V_1}{\sqrt{2V_a}}\right)$$

Analisis dapat dibagi menjadi dua skenario: mode diskontinu dan kontinu. Dalam mode diskontinu, arus sisi AC tidak kontinu. Arus dimulai dari nol dan bertambah ketika $\omega t \geq \theta_1$ mencapai maksimum ketika:

$$\sqrt{2V_a} \sin \omega t = 2V_D + V_1 \quad (\omega t = \pi - \theta_1)$$

Arus kemudian turun ke nol pada $\theta_2, \theta_2 < \pi - \theta_1$.

Mode Kontinu: Dalam mode kontinu, arus sisi AC tidak mencapai 0 pada $\pi + \theta_1$. Dengan kata lain, $\theta_2 < \pi - \theta_1$. Dalam mode kontinu, persamaan tegangannya adalah

Persamaan 9.6

$$V_i - L_a \frac{di}{dt} - R_a i - 2V_D = V_1, i(t_0) = 0$$

Persamaan 9.7

$$\frac{di}{dt} + \frac{R_a}{L_a} i = \frac{1}{L_a} (\sqrt{2V_a} \sin \omega t - 2V_D - V_1) \quad \text{ketika } \omega t \geq \theta_1$$

Perhatikan bahwa input AC tidak akan memiliki arus sampai tegangan melebihi tegangan output ditambah penurunan dioda. Namun, arus akan terus mengalir hingga mencapai nol pada sudut θ_2 . Kita selanjutnya mengabaikan perlawanan. Persamaan diferensial di atas dapat disederhanakan dan solusi berikut diperoleh:

Persamaan 9.8

$$i(t) = \frac{\sqrt{2V_a}}{\omega L_a} \cos \omega t - \frac{2V_D + V_1}{\omega L_a} \omega t + C, \theta_1 \leq \omega t \leq \theta_2$$

Karena $i(\theta_1) = 0$, dari persamaan di atas kita peroleh

Persamaan 9.9

$$C = \sqrt{\frac{2V_a}{\omega L_a}} \cos \theta_1 + \frac{2V_D + V_1}{\omega L_a} \theta_1$$

Karena itu,
Persamaan 9.10

$$i(t) = \sqrt{\frac{2V_a}{\omega L_a}} (\omega t - \cos \theta_1 - \frac{2V_D + V_1}{\omega L_a} (\omega t - \theta_1)), \quad \theta_1 \leq \omega t \leq \theta_2$$

Untuk mencari θ_2 ,
Persamaan 9.11

$$\frac{1}{\omega L_a} \int_{\theta_1}^{\theta_2} (\sqrt{2V_a} \sin \omega t - 2V_D - V_1) d\omega t = 0$$

Persamaan 9.12

$$\cos \theta_2 + \frac{2V_D + V_1}{\sqrt{2V_a}} \theta_2 = \cos \theta_1 + \frac{2V_D + V_1}{\sqrt{2V_a}} \theta_1$$

Daya output penyearah harus sama dengan daya yang dikonsumsi oleh beban:
Persamaan 9.13

$$P = \frac{1}{\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sqrt{2V_a} \sin \omega t * i(t) d(\omega t) = \frac{V_1^2}{R}$$

jadi tegangan output penyearah adalah:

Persamaan 9.14

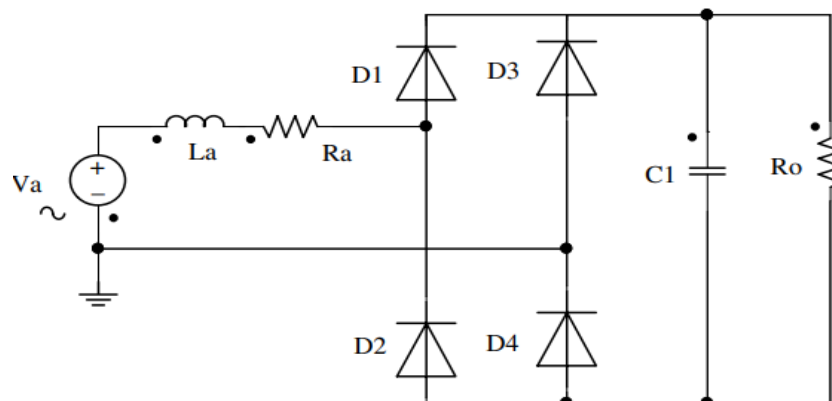
$$V_o = \sqrt{\frac{R}{\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sqrt{2V_a} \sin \omega t * i(t) d(\omega t)}$$

Ekspresi di atas tidak dapat diselesaikan secara langsung karena θ_1 dan θ_2 adalah fungsi dari V_o . Tetapi dapat dilihat bahwa output penyearah sangat erat hubungannya dengan impedansi generator. Regulasi tegangan kemudian dapat dihitung dari Gambar 9.6. Itu adalah:

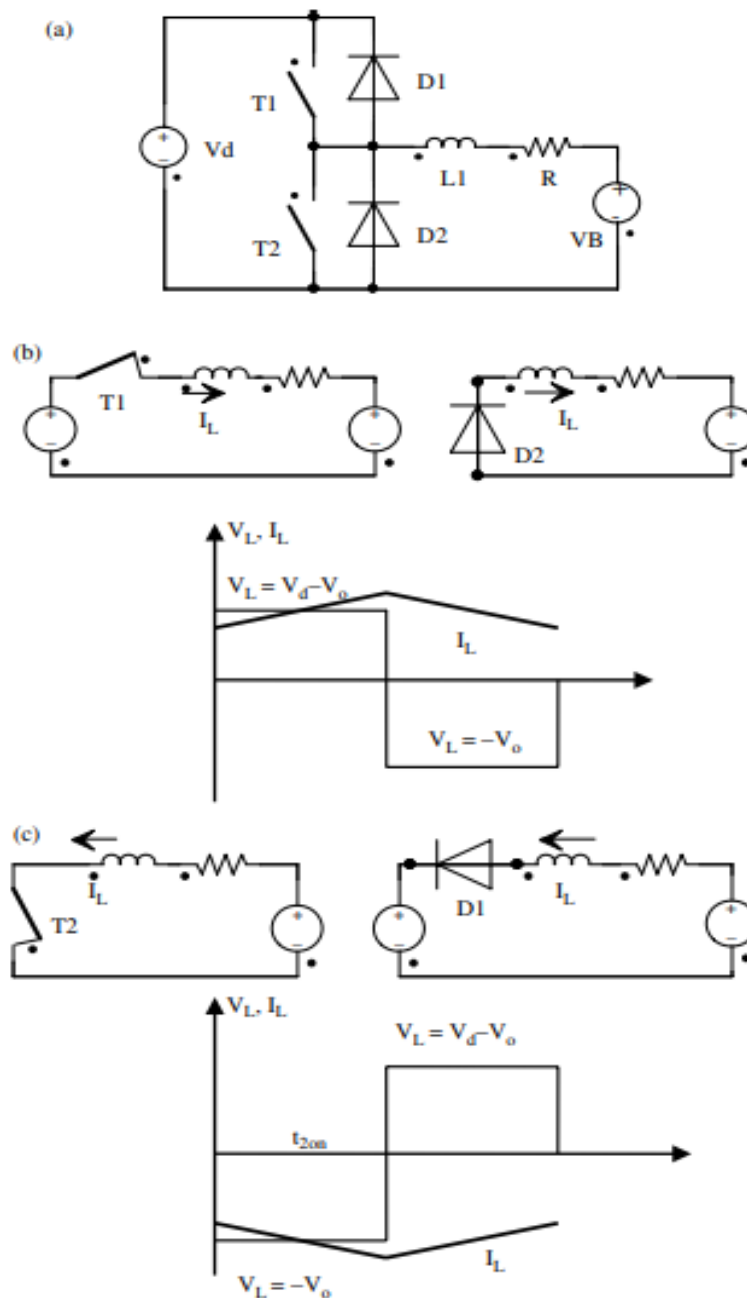
Persamaan 9.15

$$\Delta V_o = \frac{V_1 - V_o}{V_o} \times 100\%$$

Rupanya, regulasi tegangan adalah fungsi dari impedansi internal dari generator, dan daya keluaran.



Gambar 9.6 Regulasi tegangan, pergantian penyearah praktis yang digunakan dalam HEV.



Gambar 9.7 Pengoperasian konverter boost dua arah: (a) topologi sirkuit; (b) tegangan induktor dan bentuk gelombang arus selama operasi buck; dan (c) bentuk gelombang tegangan dan arus induktor selama operasi boost.

Riak Tegangan

Derivasi di atas mengasumsikan bahwa tegangan output konstan. Namun, dapat dilihat bahwa arus dari input AC terputus-putus. Ini berarti bahwa, selama bagian siklus ketika tidak ada arus dari sisi AC arus beban disuplai oleh kapasitor. Namun, karena arus nonlinier, ketika arus beban lebih kecil dari arus sisi AC, kapasitor masih harus mensuplai sebagian arus ke beban. Oleh karena itu, kita dapat mengasumsikan bahwa jika arus beban konstan, dan kapasitor mensuplai arus ke beban 50% dari waktu, maka riak tegangan adalah:

$$\Delta V_o = \frac{1}{2} \frac{1}{C} \frac{V_o}{R} \frac{\pi}{\omega}$$

9.4 KONVERTER BUCK DIGUNAKAN DI HEVs

Prinsip Operasi

Konverter buck akan menurunkan tegangan input DC yang lebih tinggi ke output DC tegangan yang lebih rendah. Aplikasi khas dari buck converter dalam HEV adalah untuk menurunkan tegangan baterai hybrid (biasanya 200-400 V) untuk mengisi baterai tambahan (14 V). Keunikannya adalah perbedaan besar antara tegangan input dan output konverter dan rasio tugas kecil (3,5%) yang diperlukan untuk mengontrol switching. Gambar 9.8 menunjukkan rangkaian utama konverter buck. Ini terdiri dari sakelar, dioda freewheeling, dan filter LC. Rasio tugas yang kecil akan membuat kontrol dan regulasi menjadi sangat sulit. Ini juga mempengaruhi desain induktor, kapasitor, riak arus, dan riak tegangan. Sebagai titik awal analisis, kita berasumsi bahwa komponennya ideal, yaitu jatuh tegangan adalah nol saat dihidupkan. Selanjutnya asumsikan tegangan output konstan, ketika sakelar dihidupkan, tegangan melintasi induktor adalah:

Persamaan 9.24

$$V_L = V_d - V_o$$

Ketika sakelar dimatikan, kita menganggap rangkaian beroperasi dalam mode kontinu; maka jatuh tegangan pada induktor adalah:

Persamaan 9.25

$$V_L = -V_o$$

Dalam operasi keadaan tunak, tegangan rata-rata induktor harus nol. Karena itu,

Persamaan 9.26

$$(V_d - V_o)DT_s = V_o(1 - D)T_s$$

dan

Persamaan 9.27

$$V_o = DV_d$$

Riak arus pada induktor adalah:

Persamaan 9.28

$$\Delta I_L = \frac{1}{L} V_o(1 - D)T_s$$

Riak tegangan output dapat dihitung. Arus beban adalah konstan; maka semua riak arus akan masuk ke kapasitor adalah:

$$\Delta V_o = \frac{1}{C} \frac{1}{2} \frac{\Delta I_L T_s}{2} = \frac{T_s^2}{8LC} V_o (1 - D)$$

Model Nonlinier

Analisis di atas didasarkan pada asumsi bahwa tegangan output relatif konstan dan parameter parasit (resistansi, induktansi) dapat diabaikan. Karena kenyataan bahwa rasio antara tegangan input dan output sangat besar, asumsi ini mungkin tidak benar. Untuk menganalisis secara akurat hubungan dan pengaruh berbagai parameter, kita dapat menggunakan model terperinci untuk menggambarkan sistem. Dalam mode kontinu, saat sakelar dihidupkan,

Persamaan 9.30

$$V_d = r_d i_L + r_s i_L + L \frac{di_L}{dt} + r_L i_L + V_o$$

Persamaan 9.31

$$i_L = i_c + i_o = C \frac{dV_o}{dt} + i_o = C \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R}$$

di mana r_d , r_s , dan r_L masing-masing adalah resistansi ekivalen dioda, sakelar, dan induktor, dan i_o , i_c , dan i_L masing-masing adalah arus yang melalui resistansi beban, kapasitor, dan induktor. Persamaan di atas dapat ditulis ulang menjadi

Persamaan 9.32

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_o}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r_d + r_s + r_L}{L} - \frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} - \frac{1}{CR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} V_d$$

Ketika saklar ditutup,

Persamaan 9.33

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_o}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r_d + r_L}{L} - \frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} - \frac{1}{CR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_o \end{bmatrix}$$

Persamaan ini dapat diselesaikan dengan menggunakan alat numerik seperti MATLAB.

9.5 KONVERTER DC-DC DUA ARAH NON-TERISOLASI

Konverter DC-DC dua arah dalam HEV kadang-kadang juga disebut konverter manajemen energi, atau konverter DC-DC boost. Konverter DC-DC ini adalah konverter daya tinggi yang menghubungkan baterai HV pada tegangan yang lebih rendah dengan bus DC HV. Tegangan khas paket baterai dirancang pada 300–400 V. Tegangan operasi terbaik untuk motor dan inverter adalah sekitar 600 V. Oleh karena itu, konverter ini dapat digunakan untuk menyesuaikan tegangan sistem baterai dan sistem motor. Fungsi lain dari konverter DC-DC ini termasuk mengoptimalkan pengoperasian sistem powertrain, mengurangi arus riak di baterai,

dan mempertahankan tegangan tautan DC, sehingga pengoperasian powertrain dengan daya tinggi.

Prinsip Operasi

Konverter DC–DC menyediakan transfer daya dua arah. Prinsip operasi ditunjukkan pada Gambar 9.7.

- **Operasi buck:** Dalam operasi buck seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.7b, daya ditransfer dari V_d ke V_B . Ketika T_1 ditutup dan T_2 terbuka, karena $V_d > V_B$, $V_L = V_d - V_B$ dan arus induktor I_L menumpuk. Ketika T_1 terbuka, arus induktor I_L terus mengalir melalui D_2 . Jadi, $V_L = V_B$.

Dengan asumsi komponen ideal dan V_o konstan, arus induktor selama satu siklus dalam operasi kondisi tunak akan tetap sama, misalnya,

Persamaan 9.34

$$\int_0^{t_{1\ on}} (V_d - V_o) dt = \int_{t_{1\ on}}^{t_{1\ on} + t_{1\ off}} (-V_o) dt$$

Persamaan 9.35

$$V_o = \frac{t_{1\ on}}{T} V_d = D_1 V_d$$

di mana D_1 adalah rasio tugas yang didefinisikan sebagai persentase waktu-on-saklar T_1 :

Persamaan 9.36

$$D_1 = \frac{t_{1\ on}}{T}$$

- **Operasi boost:** Dalam operasi boost, daya ditransfer dari V_B ke V_d . Ketika T_2 ditutup dan T_1 terbuka, V_B dan induktor membentuk hubungan pendek melalui sakelar T_2 , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.9c, oleh karena itu $V_L = V_B$ dan arus induktor I_L meningkat. Ketika T_2 terbuka, arus induktor terus mengalir melalui D_1 ke V_d , oleh karena itu $V_L = V_d - V_B$:

Persamaan 9.37

$$\int_0^{t_{2\ on}} V_o dt = \int_{t_{2\ on}}^{t_{2\ on} + t_{2\ off}} (V_d - V_o) dt$$

Persamaan 9.38

$$V_d = \frac{1}{1 - D_2} V_o$$

di mana D_2 adalah rasio tugas yang didefinisikan sebagai persentase waktu-on-saklar T_2 :

Persamaan 9.39

$$D_2 = \frac{t_{2\ on}}{T}$$

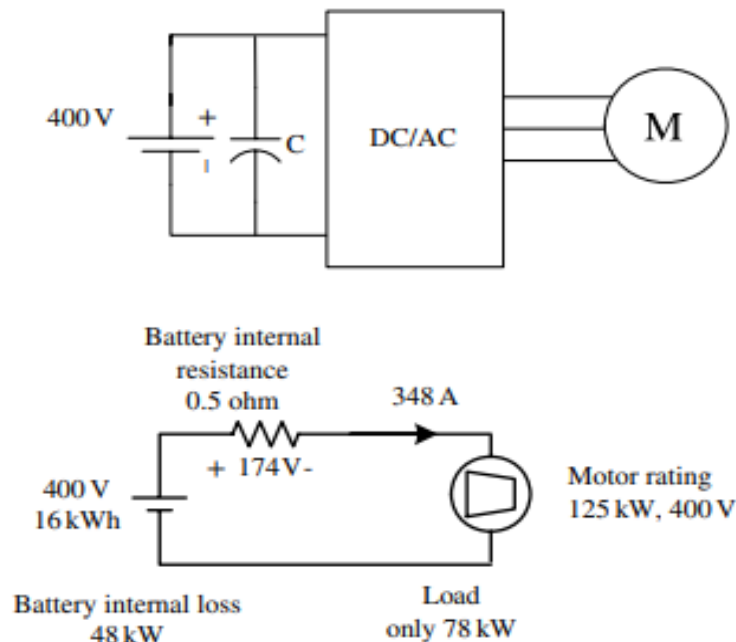
Dalam kontrol konverter boost dua arah, karena T_1 dan T_2 tidak dapat dinyalakan secara bersamaan, strategi kontrol praktis adalah mematikan T_2 saat T_1 menyala dan sebaliknya. Pada kasus ini,

Persamaan 9.40

$$D_2 = 1 - D_1$$

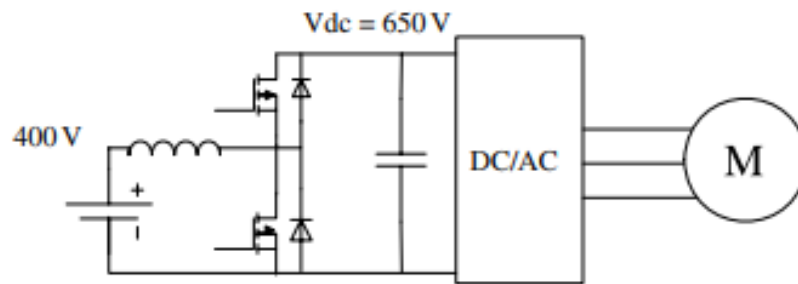
Mempertahankan Kisaran Torsi Konstan dan Kemampuan Daya

Analisis di atas mengabaikan impedansi internal baterai. Bahkan, impedansi seringkali tidak dapat diabaikan. Ketika motor listrik dan inverter dihubungkan langsung ke baterai tanpa konverter DC-DC dua arah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.8, saat arus (daya atau torsi) naik, tegangan terminal baterai mulai turun karena penurunan tegangan dari impedansi internal baterai. Misalnya, baterai lithium-ion 16 kWh dengan kimia besi fosfat akan memiliki impedansi internal 0,5. Jika inverter/motor powertrain diberi peringkat pada 125 kW, 400 V, efisiensi 90%, arus pengenal adalah 348 A pada 400 V. Penurunan tegangan internal baterai adalah 174 V. Penurunan tegangan ini akan secara signifikan mempengaruhi kinerja motor powertrain. Faktanya, dalam contoh ini, daya maksimum yang dapat disalurkan ke motor hanya 78 kW. Selain itu, karena tersedianya tegangan pada input, daerah torsi konstan motor juga terpengaruh. Dalam contoh di atas, daerah torsi konstan dipersingkat sebesar 43,5%. Faktor lain adalah tegangan baterai terkait dengan status pengisian baterai (SOC). Saat SOC baterai turun, tegangan baterai juga akan turun. Oleh karena itu, tegangan yang tersedia pada terminal motor/inverter juga berubah, yang akan menyulitkan untuk mempertahankan kisaran torsi yang konstan.



Gambar 9.8 Motor powertrain terhubung langsung ke baterai tanpa konverter DC-DC: top, topologi sirkuit; bawah, rangkaian ekuivalen dari rangkaian

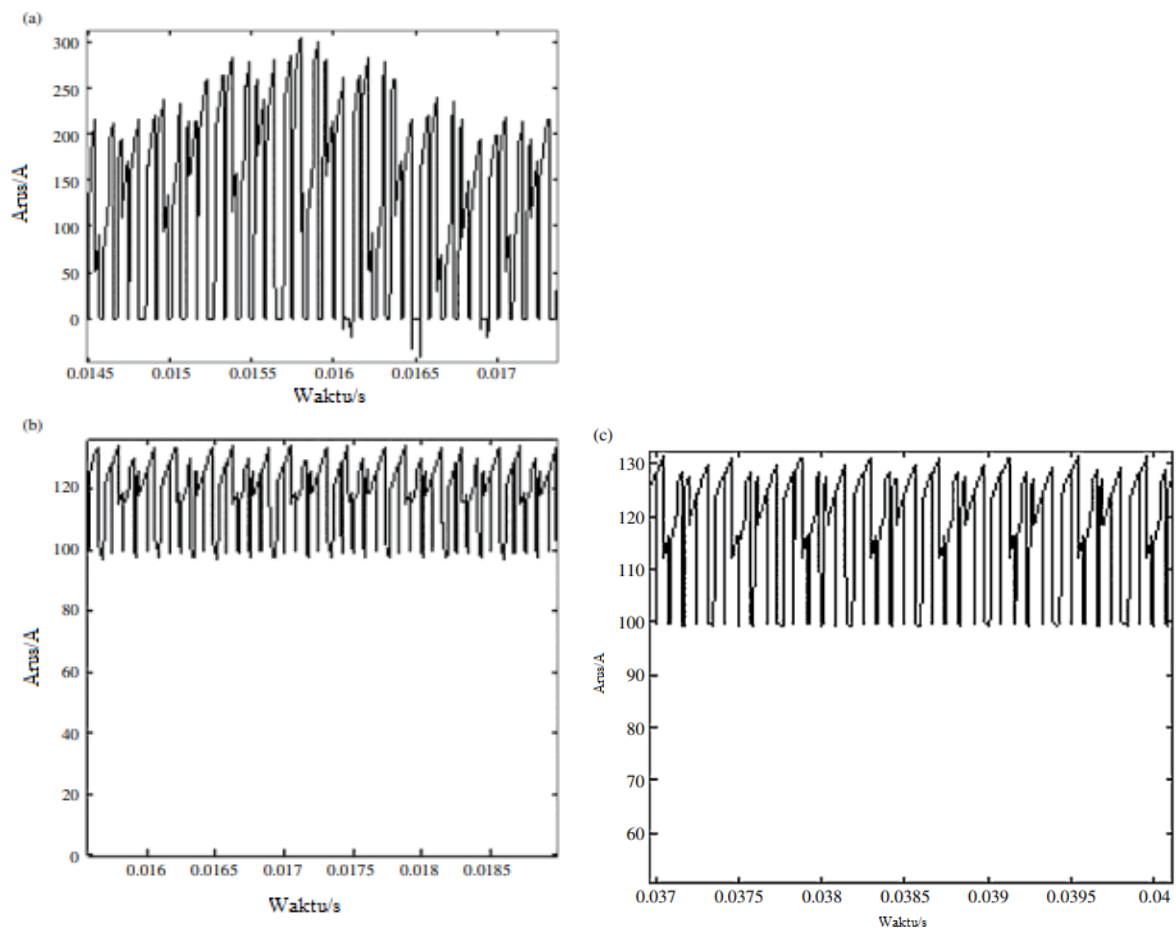
Ketika konverter DC-DC dimasukkan antara baterai dan inverter/motor seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.9, tegangan bus DC sebelum inverter dapat dipertahankan sebagai konstan. Oleh karena itu, kisaran torsi konstan tidak akan terpengaruh oleh SOC baterai atau daya besar yang ditarik oleh inverter/motor. Analisis di atas mengasumsikan bahwa sistem baterai dirancang untuk menangani disipasi daya yang besar selama penarikan daya yang besar.



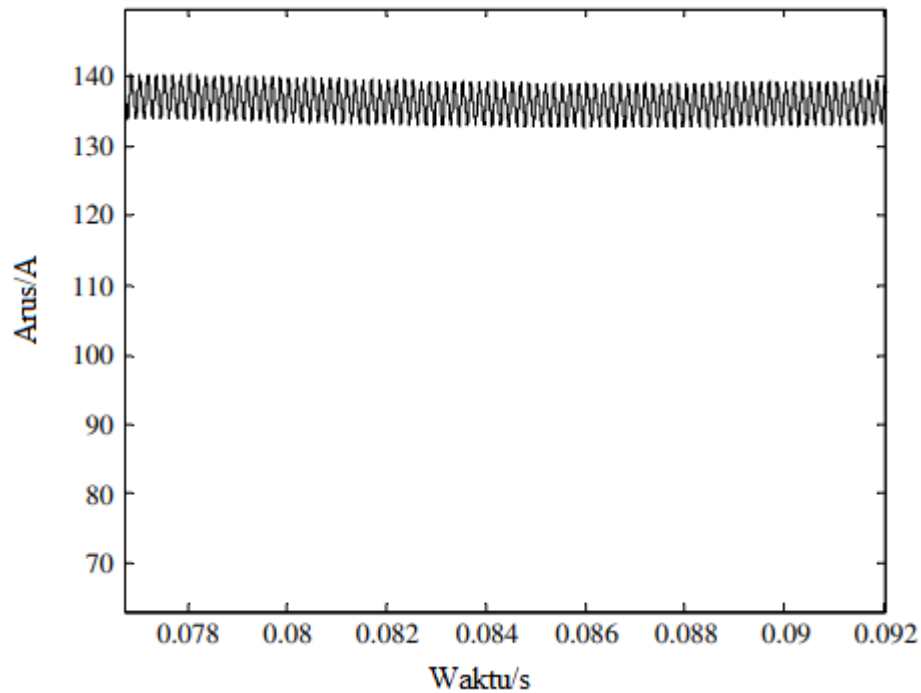
Gambar 9.9 Motor powertrain terhubung ke baterai melalui konverter DC–DC

Mengurangi Riak Arus di Baterai

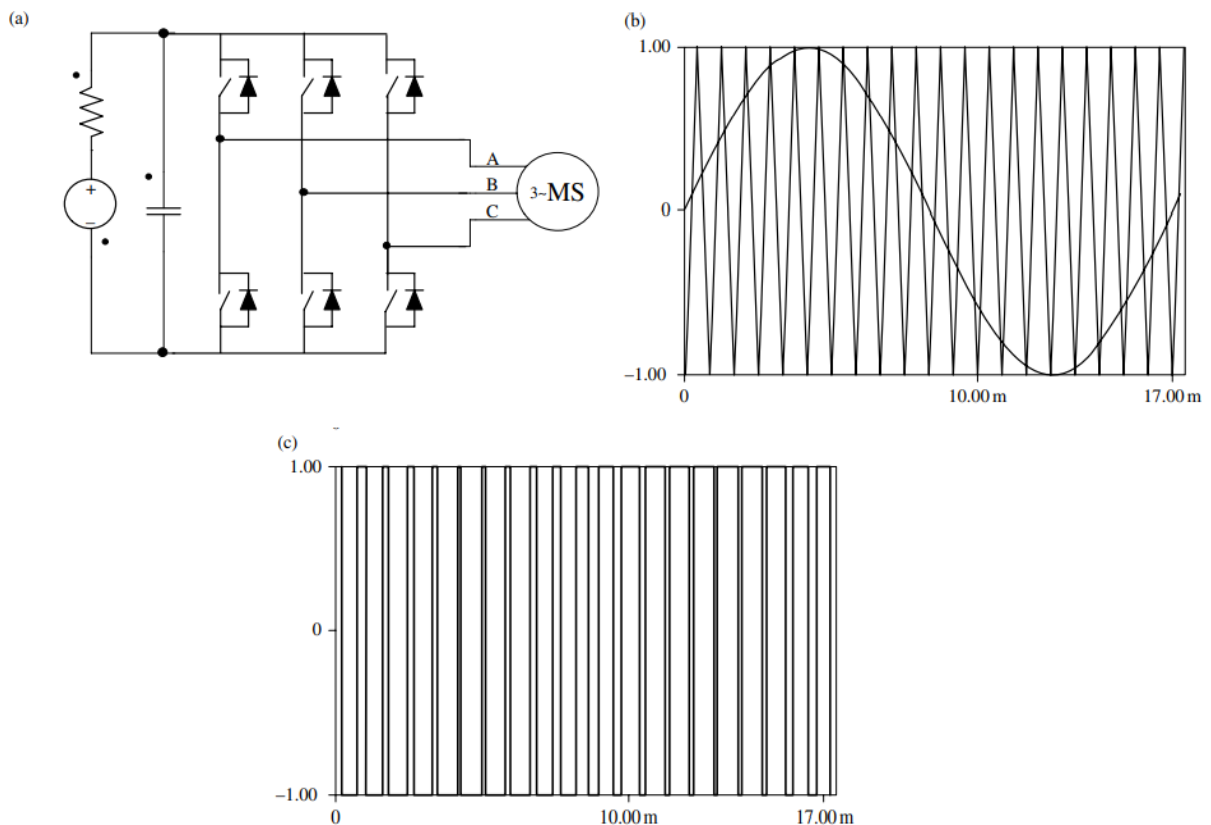
Karena fungsi switching dari inverter yang digunakan dalam sistem powertrain, ada banyak harmonik arus frekuensi tinggi di sisi DC. Jumlah riak arus yang masuk/keluar dari baterai tergantung pada metodologi switching, frekuensi switching, dan kapasitansi pada bus DC. Ketika tidak ada konverter DC-DC di tempat, jumlah arus riak baterai ditentukan oleh kapasitansi bus DC C dan rasio impedansi kapasitor terhadap impedansi baterai. Tanpa kapasitansi, arus baterai akan langsung ditentukan oleh status switching inverter DC-AC, yaitu kombinasi arus tiga fasa motor, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.10. Ketika ada kapasitor bus DC secara paralel dengan baterai, jumlah riak arus yang mengalir masuk/keluar baterai ditentukan oleh kapasitansi dan impedansi parasit dari kapasitor bus DC. Misalnya, jika $C = 10 \text{ mF}$, impedansi kapasitif kapasitor pada frekuensi switching hanya $2,65 \text{ m}\Omega$, yang jauh lebih kecil daripada impedansi internal baterai. Idealnya riak frekuensi tinggi akan mengalir melalui kapasitor dan arus baterai seharusnya konstan.



Gambar 9.10 Arus baterai tanpa konverter DC-DC: (a) Arus bus DC tanpa kapasitansi bus DC; (b) Arus bus DC untuk $C = 1 \text{ mF}$, $R_c = 100 \text{ m}\Omega$; (c) Arus bus DC untuk $C = 10 \text{ mF}$, $R_c = 100 \text{ m}\Omega$.



Gambar 9.11 Arus baterai saat konverter DC-DC dimasukkan antara inverter dan baterai.



Gambar 9.13 Inverter sumber tegangan: (a) diagram rangkaian; (b) kendali sakelar; (c) sinyal kontrol gerbang melalui bentuk gelombang PWM

Namun, resistansi parasit kapasitor juga tidak dapat diabaikan. Sebuah kapasitor 10 mF berkualitas tinggi memiliki hambatan internal 26 m Ω dan kapasitor kelas dua memiliki 100 m Ω . Kualitas kapasitor mempengaruhi riak arus baterai. Semakin rendah impedansi kapasitor, semakin rendah riak baterai, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.10. Arus riak frekuensi

tinggi diyakini berbahaya bagi masa pakai baterai. Ketika konverter DC-DC ditambahkan, arus baterai dapat dipertahankan dengan riak yang relatif kecil, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.13.

Pengereman Regeneratif

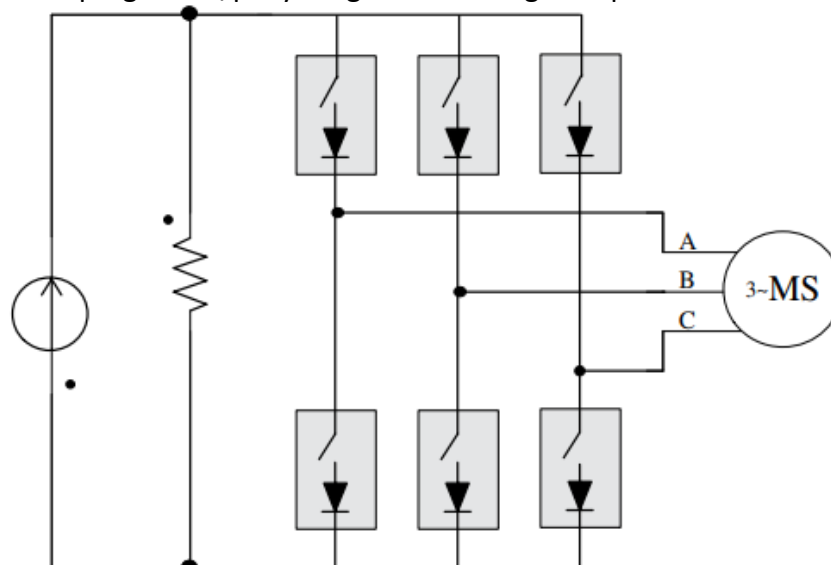
Pengereman regeneratif dari dua topologi – yaitu, dengan dan tanpa konverter DC-DC – juga akan berbeda. Dalam topologi di mana tidak ada konverter DC-DC, tegangan bus DC akan berfluktuasi selama transisi dari motor ke pengereman. Misalnya, jika motor mula-mula bergerak pada 50 kW, dan tegangan internal baterai 400 V dengan resistansi internal 0,5 , maka arus baterai adalah 155 A dan tegangan bus DC adalah 322 V. Jika motor dialihkan ke pengereman pada 50 kW, maka arus baterai adalah 110 A dan tegangan bus DC adalah 455 V. Perubahan dramatis tegangan bus DC ini akan membuat kontrol motor, seperti pengendalian vektor, menjadi sangat sulit. Di sisi lain, dalam sistem yang berisi konverter DC-DC antara inverter/motor bus DC dan baterai, tegangan bus DC dapat dipertahankan relatif konstan. Oleh karena itu, transisi antara motor dan pengereman lebih mudah ditangani.

Inverter Sumber Tegangan

Inverter sumber tegangan (VSI) digunakan dalam kendaraan hibrida untuk mengontrol motor listrik dan generator. Gambar 9.14 menunjukkan susunan rangkaian elektronika daya dari VSI untuk mengontrol motor induksi, motor sinkron PM, dan motor tanpa sikat PM. Sakelar biasanya IGBT untuk konfigurasi hibrid daya tinggi tegangan tinggi atau MOSFET untuk desain tegangan rendah. Output dari VSI dikendalikan melalui sinyal pulse width-modulated (PWM) untuk menghasilkan bentuk gelombang sinusoidal. Harmonik tertentu ada dalam skema switching seperti itu. Frekuensi switching tinggi digunakan untuk memindahkan harmonik dari frekuensi dasar.

Inverter Sumber Saat Ini

Gambar 9.12 menunjukkan topologi rangkaian inverter sumber arus (CSI). CSI beroperasi menggunakan prinsip yang sama seperti pada VSI, dengan input sebagai sumber arus. Tiga kapasitor pergantian/penyaringan kecil mungkin diperlukan di sisi AC.

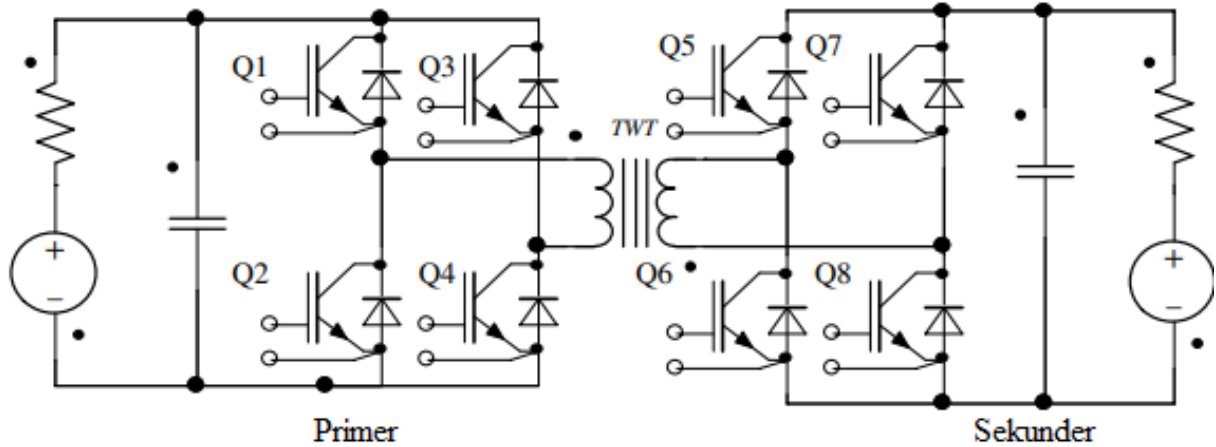


Gambar 9.14 Inverter sumber arus.

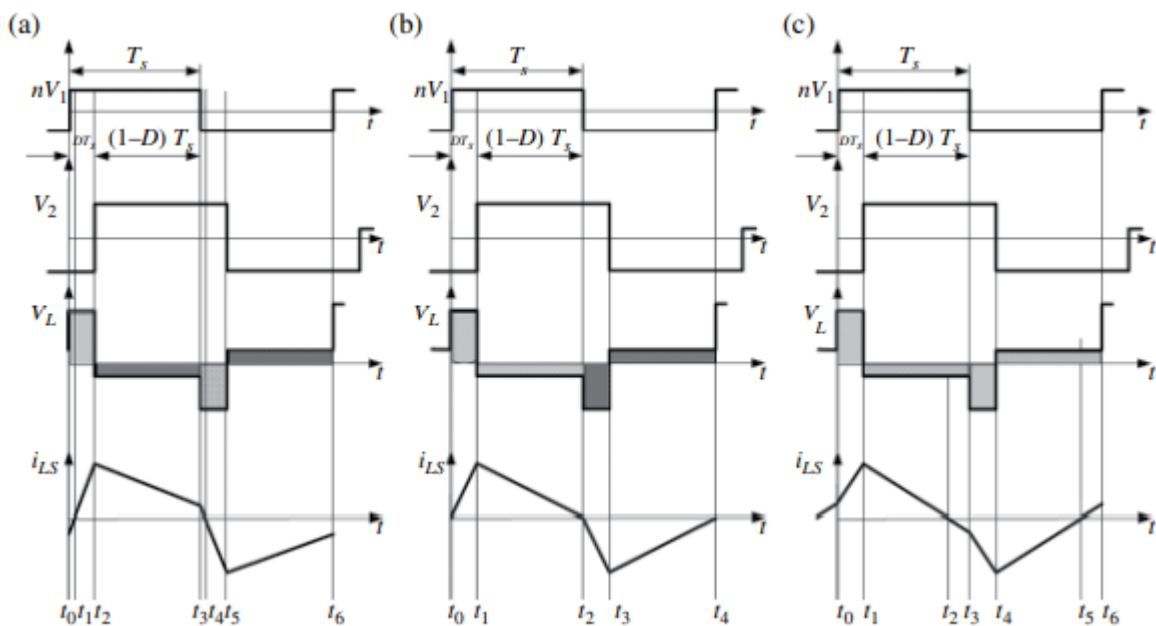
9.6 KONVERTER DC-DC DUA ARAH TERISOLASI

Dalam beberapa aplikasi, isolasi galvanik antara baterai dan unit beban diperlukan dan diinginkan. Gambar 9.14 menunjukkan konverter DC-DC dua arah terisolasi jembatan penuh. Pada Gambar 9.14, inverter jembatan utama beralih pada 20-50 kHz, dengan rasio tugas 50%. Output dari primer adalah tegangan gelombang persegi yang diterapkan pada belitan primer

transformator isolasi. Gulungan sekunder transformator karena itu akan memiliki tegangan gelombang persegi. Tanpa kontrol pada gerbang konverter jembatan sekunder, tegangan sekunder transformator disearahkan melalui empat dioda freewheeling. Tegangan output akan berfluktuasi dengan kondisi beban dan tegangan primer.



Gambar 9.15 Konverter DC-DC dua arah terisolasi.



Gambar 9.16 Bentuk gelombang tegangan dan arus tipikal untuk $V_2 > nV_1$: (a) bentuk gelombang untuk $i(t_0) < 0$; (b) bentuk gelombang untuk kondisi batas $i(t_0) = 0$; (c) bentuk gelombang untuk $i(t_0) > 0$.

Prinsip Dasar dan Operasi Steady State

Operasi steady state dari konverter DC-DC dua arah yang terisolasi telah dipelajari secara rinci di tempat lain. Pada bagian ini, kita melengkapi studi ini dengan membedakan mode operasi dari konverter DC-DC dua arah yang terisolasi menurut sudut pergeseran fasa, kondisi beban, dan tegangan output. Dalam analisis ini, dinamika pita mati dan switching akan diabaikan tetapi akan dianalisis kemudian.

Dalam analisis berikut, rasio belitan transformator adalah n , tegangan primer transformator adalah V_1 , dan frekuensi switching adalah f_s . Untuk memudahkan analisis, kita mendefinisikan T_s sebagai setengah dari periode peralihan, yaitu, $T_s = 1/(2f_s)$. Siklus kerja atau pergeseran fasa didasarkan pada setengah periode, $D = t_{on}/T_s$. Oleh karena itu, DT_s adalah

pergeseran fasa antara dua jembatan. Selanjutnya, I_{LS} adalah arus induktansi bocor dari belitan sekunder. Tegangan output dari jembatan sekunder adalah V_2 .

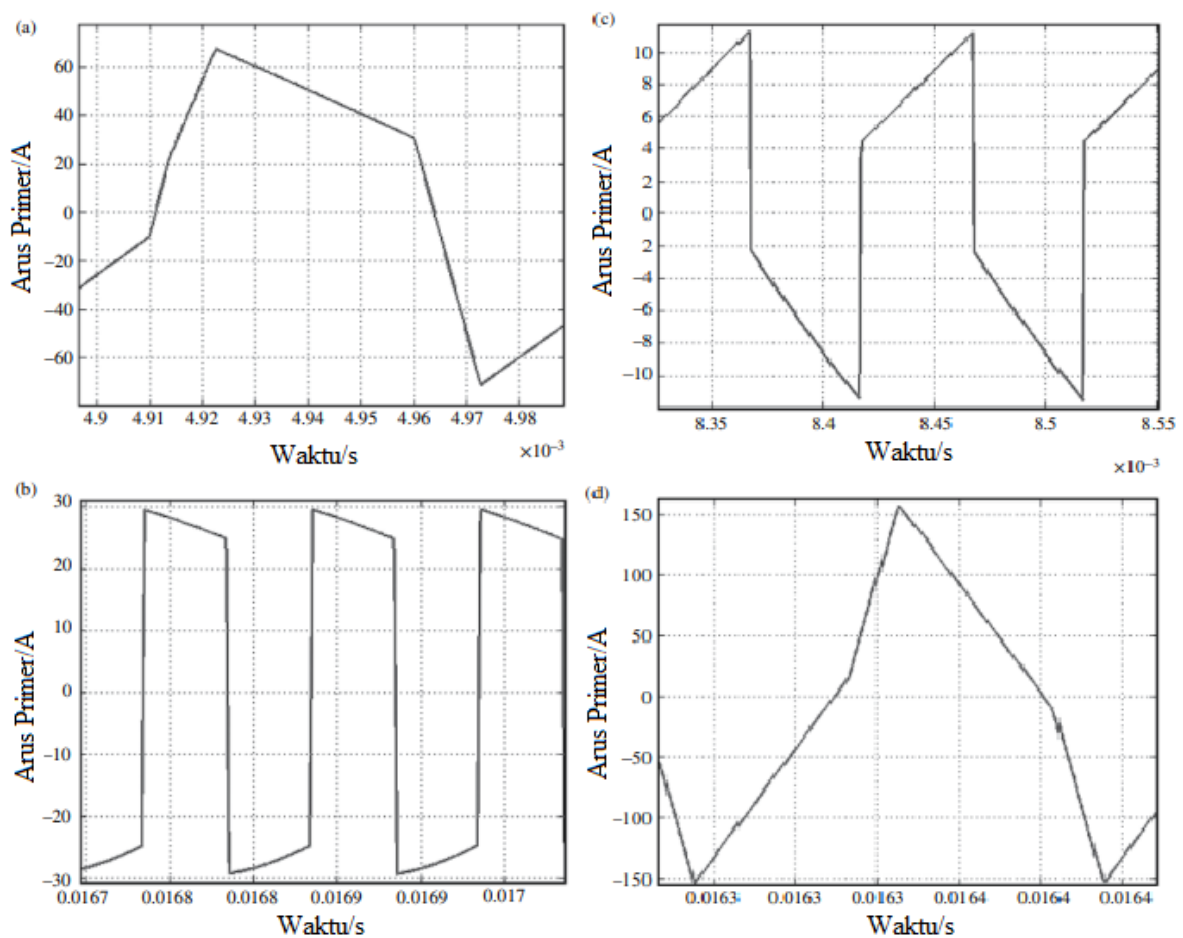
Riak Tegangan

Mode switching di atas secara inheren nonlinier, yang akan menyebabkan riak tegangan pada kapasitor keluaran. Arus kapasitor adalah kombinasi dari arus induktor I_L dan arus beban I_o pada mode operasi yang berbeda. Dari Gambar 9.16, arus kapasitor dapat ditulis sebagai:

Persamaan 9.58

$$i_c = -(I_o + i_L), \quad 0 \leq t \leq DT_s$$

$$i_c = i_L - I_o, \quad DT_s \leq t \leq T_s$$



Gambar 9.17 Simulasi arus primer pada tegangan dan output daya yang berbeda: (a) arus primer untuk $V_2 = 500$ V, $R = 200\Omega$, $P = 1,8$ kW; (b) arus primer untuk $V_2 = 600$ V, $R = 40\Omega$, $P = 9$ kW; (c) arus primer untuk $D = 1/8$, $R = 60\Omega$, $P = 9,2$ kW; (d) arus primer untuk $D = 1/8$, $R = 100\Omega$, $P = 13,6$ kW.

Arus kapasitor ditunjukkan pada Gambar 9.20, di mana pada $t=t_1+\Delta_2$, $i_L = I_o$, atau $i_C(t_1+\Delta_2)=0$, yaitu,

Persamaan 9.59

$$I_{max} + \frac{nV_1 - nV_2}{L_s} \Delta_2 = I_o$$

Karena itu

Persamaan 9.61

$$\Delta_2 = \frac{I_{max} - I_o}{nV_1}$$

Berdasarkan kekekalan energi, $P_1 = P_o$, atau $nV_1\bar{I} = V_2I_o$. Mengganti Persamaan 9.51 untuk P_o , arus output dapat diperoleh dari persamaan dibawah ini:

Persamaan 9.61

$$I_o = \frac{nV_1}{2f_sL_s} D(D - 1)$$

Riak tegangan menggunakan persamaan berikut:

Persamaan 9.62

$$\Delta V_2 = \frac{1}{C} \int_{DT_s}^{DT_s + \Delta_2} (iL_s(t) - I_o) dt = \frac{\Delta_2 I_{max} I_o}{C} \frac{1}{2}$$

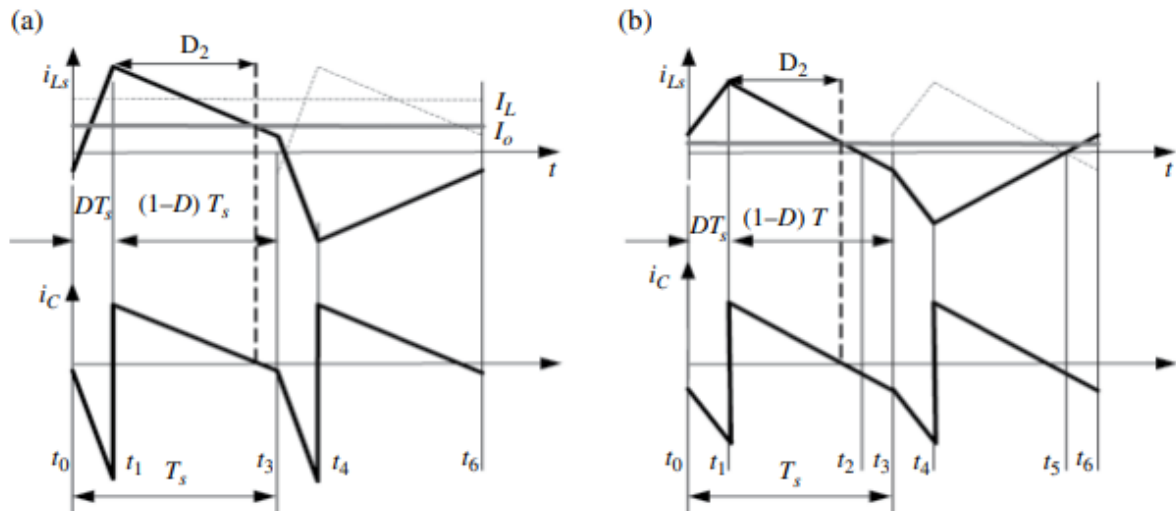
Substitusi Persamaan 9.59-9.61 ke Persamaan 9.62, riak tegangan dapat diturunkan sebagai:

Persamaan 9.63

$$\Delta V_2 = \frac{[V_2 + (2D^2 - 1)n(V_1)]^2}{32f_s^2L_sC(V_2 - nV_1)} = \frac{[D(1 - D)R_L - 2L - 2(1 - 2D^2)f_sL_s]^2 nV_1}{64f_s^3L_s^2[D(D - 1)R_L - 2f_sL_s]} \frac{1}{C}$$

$$\Delta V_2\% = \frac{\Delta V_2}{V_2} = \frac{[D(1 - D)R_L - 2L - 2(1 - 2D^2)f_sL_s]^2}{32f_s^2L_sC[D^2(1 - D)^2R_L^2 - 2f_sL_sD(1 - D)R_L]}$$

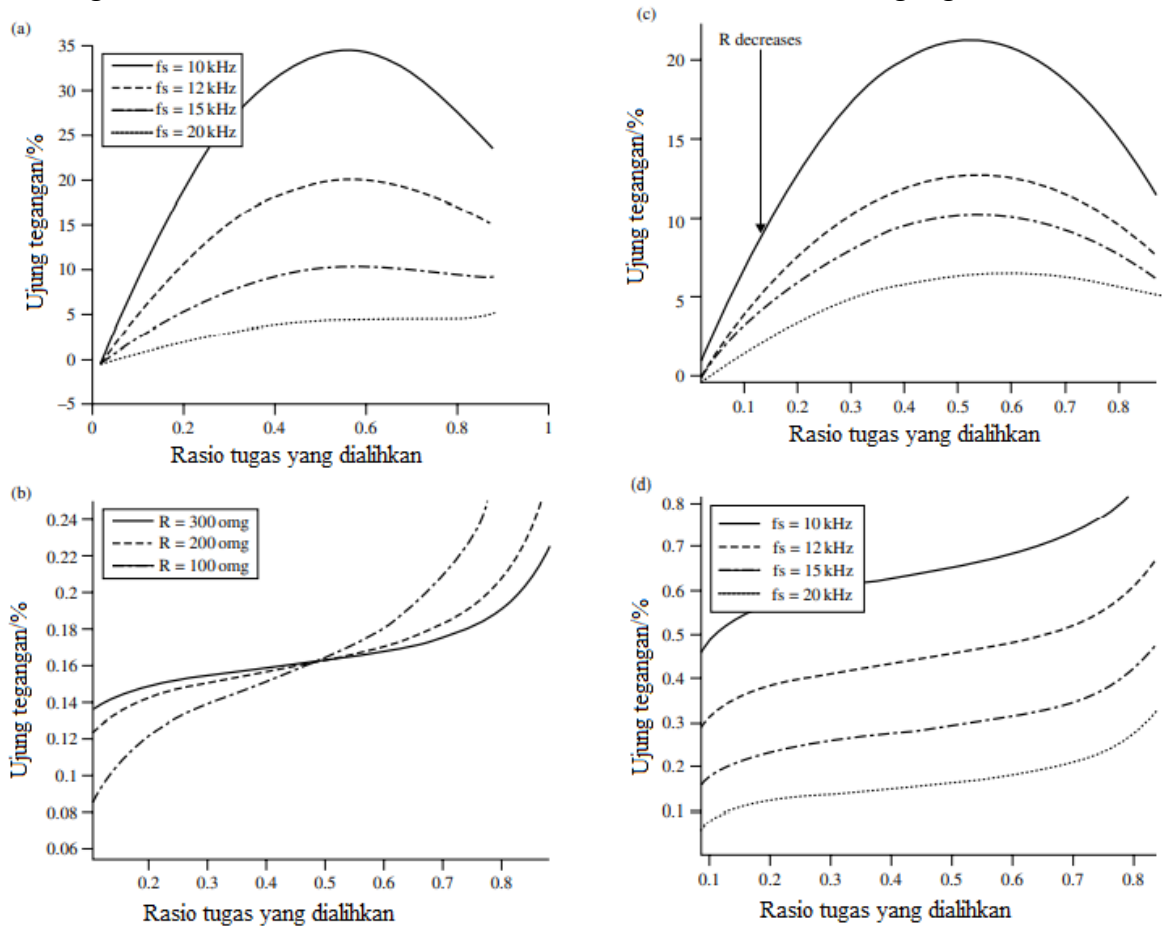
Oleh karena itu riak tegangan adalah fungsi dari D, R, dan nV_1 . Ekspresi ini berlaku untuk kontrol loop terbuka dan kontrol loop tertutup. Kondisi Persamaan 9.63 adalah $V_2 > nV_1$, yang berarti $D(1 - D)R_L > 2f_sL_s$. Dari Persamaan 9.63, mudah untuk melihat bahwa V_2 berbanding lurus dengan nV_1/C . Untuk mempelajari lebih lanjut faktor-faktor yang berpengaruh, riak tegangan dalam kondisi yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 9.21.



Gambar 9.20 Riak arus dalam kapasitor: (a) riak arus untuk $i(t_0) < 0$; (b) riak arus untuk $i(t_0) > 0$.

Dari Gambar 9.21a, riak tegangan absolut berkurang ketika R_L berkurang di bawah D tertentu, dan riak mencapai maksimum pada $D = 0,5$. Namun, pada Gambar 9.21b, riak relatif

adalah fungsi peningkatan D dan hanya mencapai maksimum ketika D = 1. Semua kurva bersilangan pada D = 0,5. Ketika D < 0,5, resistansi tinggi akan menghasilkan riak tinggi di bawah a tetap D. Ketika D > 0,5 riak absolut berkurang dengan D untuk resistansi beban yang diberikan, tetapi riak relatif meningkat dengan D. Dari Gambar 9.21c,d, peningkatan frekuensi switching bermanfaat untuk membatasi riak absolut dan relatif riak tegangan keluaran.



Gambar 9.21 Riak tegangan pada simulasi operasi yang berbeda: (a) riak tegangan sebagai fungsi D dan R_L ; (b) riak tegangan (%) sebagai fungsi dari D dan R_L ; (c) Riak tegangan sebagai fungsi dari D dan f_s ; (d) Riak tegangan (%) sebagai fungsi dari D dan f_s

9.7 PENYEARAH PWM DI HEVs

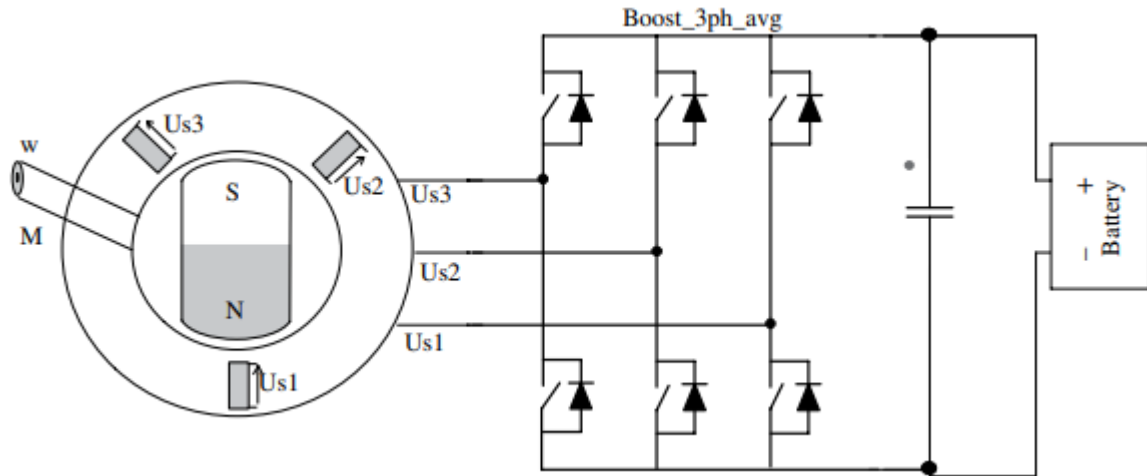
Operasi Penyearah Inverter

Dalam mode pengereman, motor dikendalikan untuk mencapai pengereman regeneratif. VSI dioperasikan sebagai penyearah PWM, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.22. Prinsip operasi penyearah PWM, ketika kecepatan motor (dioperasikan sebagai generator) di bawah kecepatan dasar daerah daya konstan, pada dasarnya sama dengan operasi boost konverter DC-DC terisolasi di bagian sebelumnya. Ketika kecepatan motor di atas kecepatan dasar daerah daya konstan, generator mengembangkan emf balik jauh lebih tinggi daripada tegangan link DC, terutama ketika rentang daya konstan yang besar dirancang. Dalam hal ini, motor perlu dikontrol di daerah pelemahan medannya untuk mengurangi tegangan terminal belitannya. Mengabaikan resistansi stator dan salience, rangkaian ekuivalen kontrol diilustrasikan pada Gambar 9.23, di mana E_o adalah emf balik induksi dari motor PM, L_q adalah induktansi sinkron, dan V_{vsi} adalah output gelombang sinus ekuivalen dari VSI:

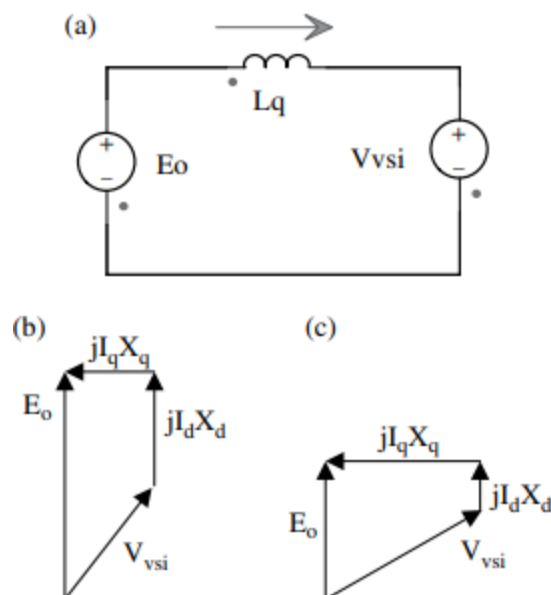
Persamaan 9.64

$$V_{vsi} = E_o - jI_q X_q - jI_d X_d$$

Tujuan dari kontrol pelemahan medan adalah untuk mencapai V_{vsi} konstan untuk E_o yang lebih tinggi, dengan menerapkan arus yang berlawanan dengan arah sumbu d.



Gambar 9.22 Penyearah PWM



Gambar 9.23 Pengereman regeneratif di wilayah daya konstan: (a) rangkaian ekivalen; (b) diagram fasor pada kecepatan tinggi di daerah daya konstan; dan (c) diagram fasor pada kecepatan rendah di daerah torsi konstan.

9.8 PENGISI DAYA BATERAI EV DAN PHEV

Sistem pengisian baterai adalah bagian penting dari EV dan PHEV. Efisiensi, kecepatan pengisian, dan biaya pengisi daya tersebut sangat penting untuk komersialisasi PHEV. Ada banyak topologi berbeda yang tersedia untuk pengisi daya baterai. Karena persyaratan dan standar keselamatan, sebagian besar pengisi daya baterai harus diisolasi dari jaringan listrik AC. Dalam beberapa kasus, aliran daya dua arah diperlukan untuk mewujudkan fungsi kendaraan-ke-jaringan.

Sebuah survei yang dilakukan oleh Lembaga Penelitian Tenaga Listrik (EPRI) mengungkapkan bahwa 78% penduduk berkendara sejauh 40 mil (64 km) atau kurang dalam perjalanan harian mereka. Oleh karena itu, PHEV yang mampu menempuh jarak mengemudi listrik 40 mil dapat secara signifikan mengurangi penggunaan bensin di mobil penumpang. Untuk kendaraan penumpang biasa (mobil dan SUV), konsumsi energi rata-rata adalah sekitar

150–300 Wh per km. Untuk mencapai jangkauan listrik 40 mil, baterai yang mengandung energi yang dapat digunakan 6-12 kWh sesuai. Baterai lithium-ion dianggap sebagai satu-satunya solusi penyimpanan energi yang layak untuk PHEV untuk saat ini. Untuk mencapai pengoperasian yang aman dan andal sambil mempertahankan masa pakai dan kesehatan baterai dalam PHEV, energi yang tersedia pada umumnya dari baterai lithium-ion adalah sekitar 60–70% dari kapasitas nominal. Oleh karena itu, paket baterai lithium-ion 10-16 kWh sangat khas di banyak PHEV yang sedang dikembangkan.

Baterai onboard PHEV perlu diisi dari grid melalui charger onboard atau offboard. Untuk kendaraan pribadi, PHEV ini akan dikenakan biaya di rumah atau di stasiun pengisian umum melalui input AC 110 atau 220 V. Untuk memastikan kendaraan siap digunakan keesokan paginya, baterai harus terisi penuh dalam waktu yang wajar, biasanya 2–8 jam.

Dalam beberapa dekade terakhir, berbagai sirkuit pengisian daya telah dikembangkan dengan menargetkan aplikasi yang berbeda, seperti komputer laptop, elektronik portabel, dan catu daya tak terputus (UPS). Isolasi adalah salah satu persyaratan dasar untuk semua pengisi daya baterai untuk keselamatan. Arus pengisian biasanya dikendalikan oleh umpan balik terus menerus dari parameter baterai kritis, seperti tegangan baterai, SOC, dan suhu. Sejauh menyangkut sistem pengisian daya searah, pengisi daya berdasarkan flyback dan konverter maju adalah contoh umum untuk aplikasi berdaya rendah. Kedua topologi hanya membutuhkan satu saklar aktif. Namun, konverter flyback dan forward mengalami lonjakan HV ketika energi berlebih yang tersimpan dalam induktansi bocor dari transformator isolasi habis pada saat mati. Oleh karena itu, pada operasi daya yang lebih tinggi, diperlukan rangkaian snubber tambahan. Terlepas dari batasannya, topologi flyback/forward digunakan dalam pengisi daya PHEV.

Pengisi daya berdasarkan konverter DC-DC searah setengah jembatan dan jembatan penuh adalah alternatif yang baik untuk pengisi daya berdasarkan flyback dan konverter maju. Magnetisasi transformator isolasi dalam konverter setengah jembatan adalah dua arah, oleh karena itu rangkaian demagnetisasi dihilangkan. Induktansi kebocoran transformator adalah parameter utama untuk transfer energi. Pengoperasian konverter DC-DC jembatan penuh mirip dengan konverter setengah jembatan. Tegangan listrik dari semikonduktor pada konverter setengah jembatan/jembatan penuh berkurang secara signifikan. Soft switching mudah diimplementasikan pada konverter half-bridge/full-bridge. Kerugian dari konverter ini adalah peningkatan jumlah sakelar semikonduktor.

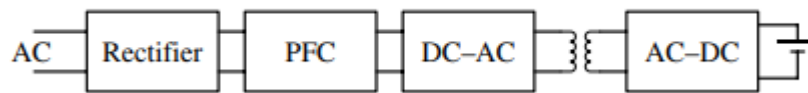
Konverter resonansi juga dapat digunakan sebagai pengisi daya baterai dengan biaya yang sangat rendah. Namun, pengisi daya resonansi biasanya menyediakan arus pengisian pulsa, seperti kasus dalam pemanasan induktif, selain pengisian arus konstan atau tegangan konstan. Dampak pengisian arus berdenyut pada kapasitas baterai dan siklus hidup tidak sepenuhnya dipahami saat ini. Gambar 9.24 menunjukkan arsitektur umum pengisi daya baterai PHEV searah. Ini terdiri dari penyearah front-end, tahap koreksi faktor daya (PFC), dan tahap DC-DC yang terisolasi.

Konverter Maju/Flyback

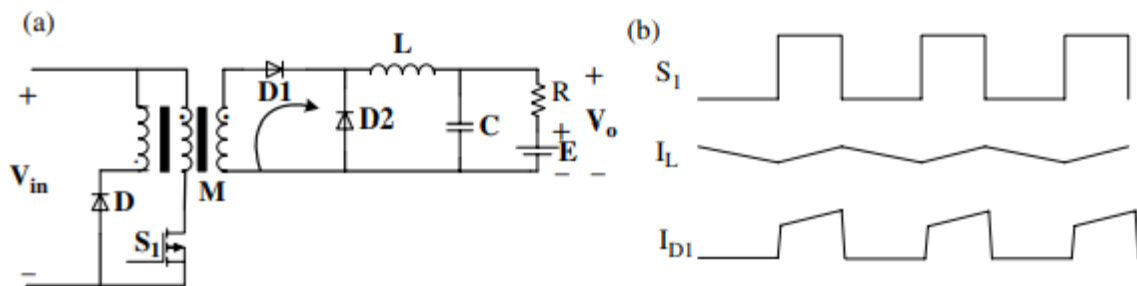
Gambar 9.25 dan 9.26 masing-masing menunjukkan rangkaian dan pengoperasian konverter maju dan mundur, di mana R adalah resistansi internal baterai, E adalah tegangan internal baterai, dan V_o adalah tegangan output melintasi baterai (termasuk tegangan internal baterai dan penurunan tegangan). Pengoperasian forward converter mirip dengan buck converter.

Ketika saklar S_1 pada Gambar 9.25a mati, induktansi bocor transformator akan menghabiskan semua energi berlebih melalui sakelar. Oleh karena itu menginduksi lonjakan tegangan yang signifikan di seluruh sakelar. Energi yang tersimpan dalam induktansi magnetisasi dapat dikeluarkan melalui belitan bantu yang ditunjukkan pada Gambar 9.25a;

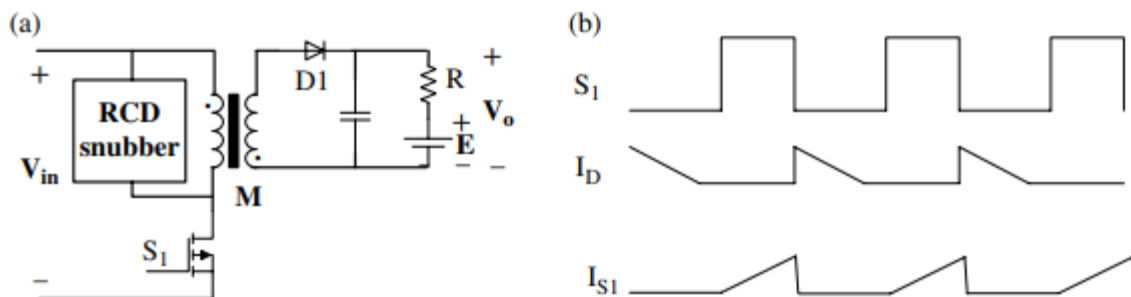
namun, kelebihan energi dalam induktansi kebocoran transformator hanya dapat dikurangi melalui rangkaian snubber, yang juga diperlukan dalam konverter flyback.



Gambar 9.24 Arsitektur pengisi daya PHEV dasar.



Gambar 9.25 Konverter maju: (a) topologi rangkaian; (b) bentuk gelombang operasi.



Gambar 9.26 Konverter flyback: (a) topologi sirkuit; (b) bentuk gelombang operasi.

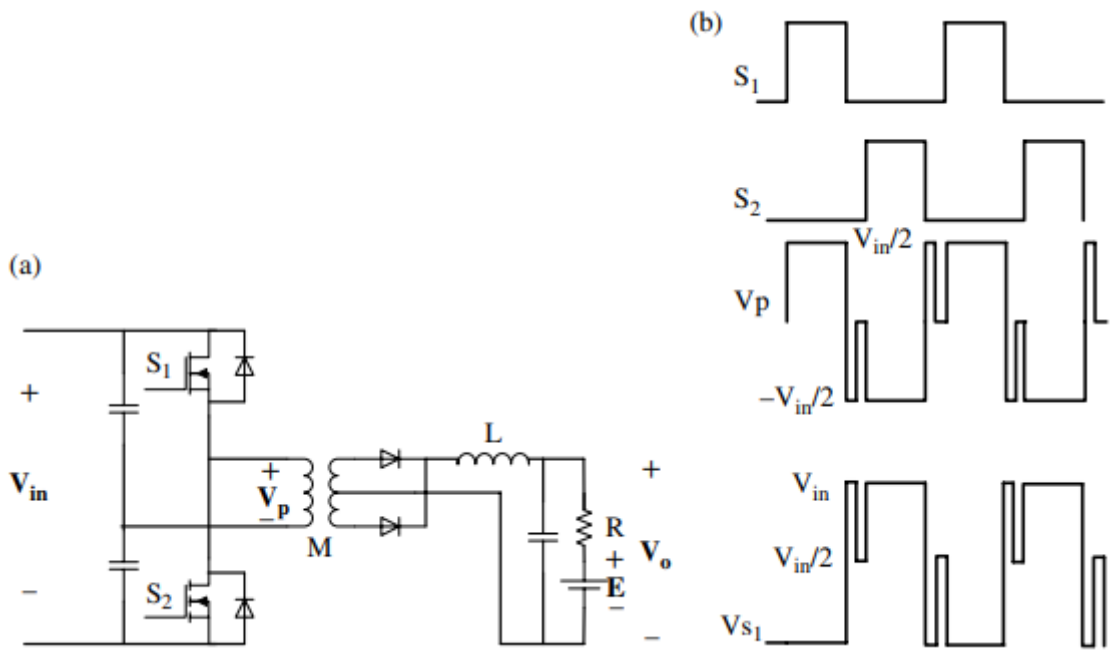
Pada konverter flyback yang ditunjukkan pada Gambar 9.26a, ketika D1 konduksi, tegangan beban akan diinduksi ke sisi primer. Oleh karena itu, dalam keadaan tidak aktif S1, tegangan pada S1 adalah $V_{in} + V_o/n$, di mana n adalah rasio belitan transformator isolasi. Ini menunjukkan bahwa meskipun mungkin tidak perlu memiliki induktor penyangkutan dalam konverter flyback, sakelar semikonduktor sebenarnya akan mengalami tegangan yang lebih tinggi.

Konverter DC-DC Setengah Jembatan

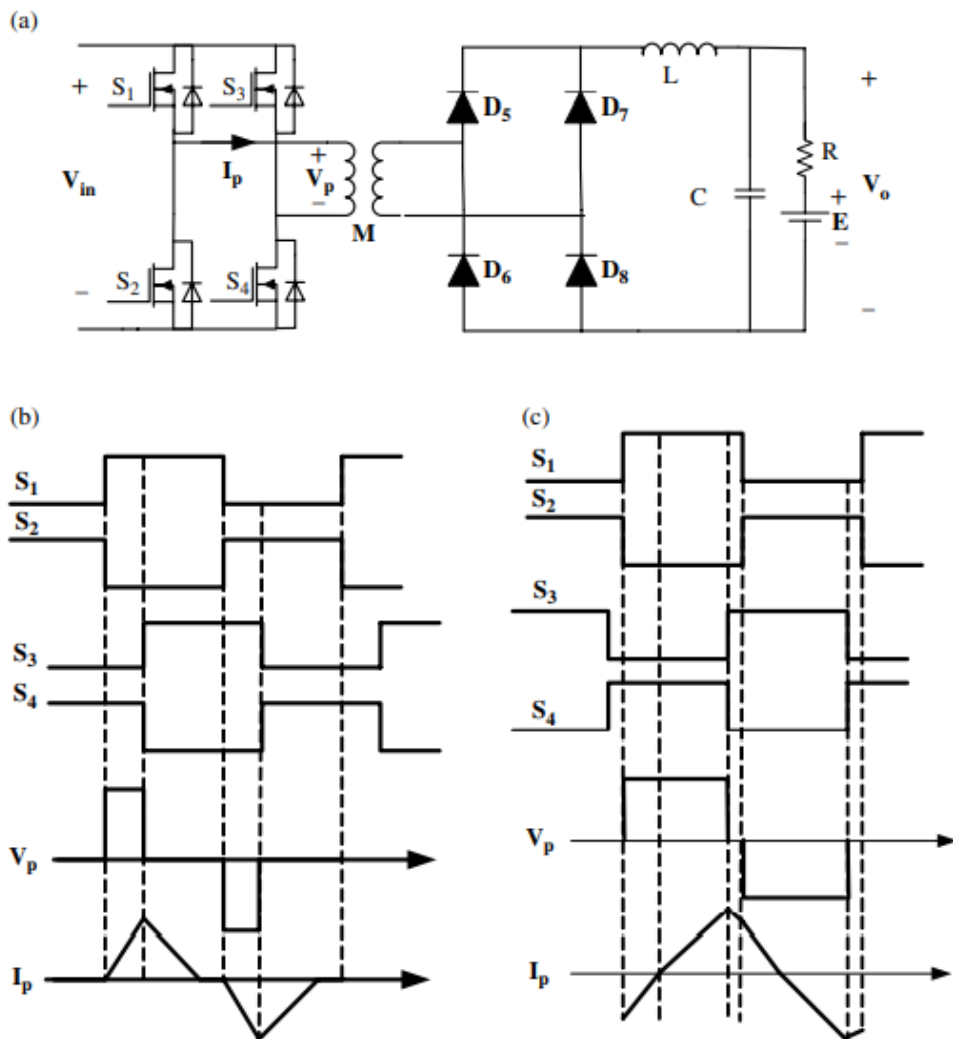
Gambar 9.27 menunjukkan konverter DC-DC setengah jembatan. Sakelar S1 dan S2 disakelar dengan fasanya digeser 180° . Induktansi kebocoran transformator berfungsi sebagai komponen untuk transfer energi. Jika induktansi parasit dari loop komutasi dapat diabaikan, lonjakan tegangan melintasi semikonduktor tidak akan menjadi perhatian.

Konverter DC-DC Jembatan Penuh

Gambar 9.28 menunjukkan topologi rangkaian dan pengoperasian konverter DC-DC jembatan penuh. Dibandingkan dengan konverter setengah jembatan di mana hanya setengah dari tegangan DC dikenakan pada sisi primer transformator dalam setiap siklus switching, konverter jembatan penuh menggunakan seluruh tegangan link DC. Mirip dengan konverter setengah jembatan, induktansi kebocoran transformator dalam konverter jembatan penuh tidak berkontribusi pada lonjakan tegangan apa pun di sakelar. Induktansi kebocoran ini harus dirancang dengan tepat untuk kinerja terbaik.



Gambar 9.27 Konverter setengah jembatan: (a) topologi sirkuit; (b) bentuk gelombang operasi



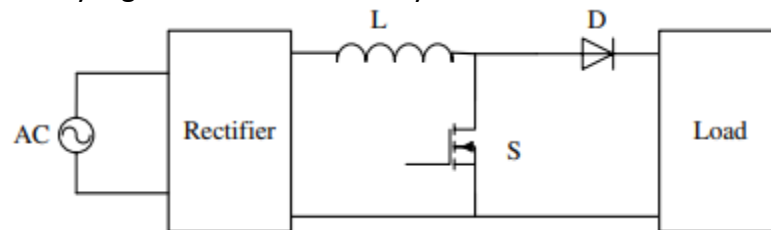
Gambar 9.28 Konverter jembatan penuh: (a) topologi sirkuit; (b) operasi mode terputus-putus; (c) operasi mode kontinu.

Tahap Koreksi Faktor Daya

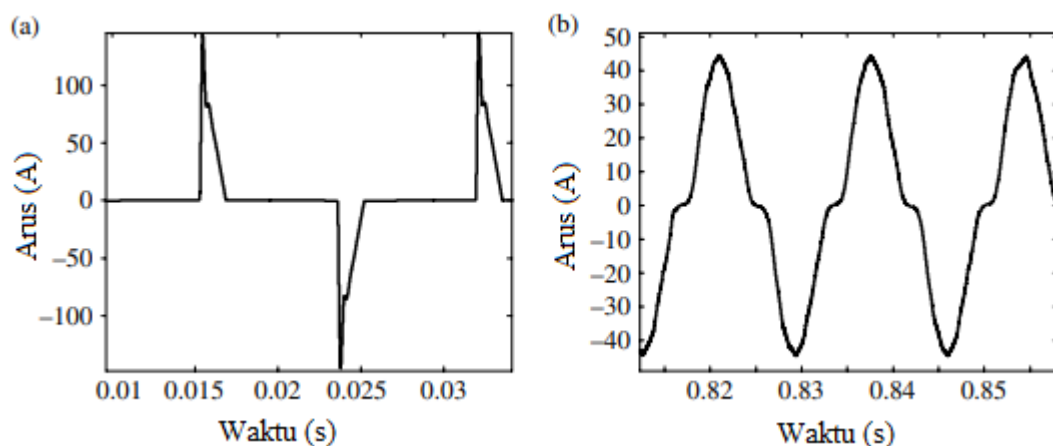
Tahap PFC biasanya ditempatkan antara penyearah dan tahap DC-DC untuk menghindari polusi harmonik ke grid serta untuk menstabilkan tegangan link DC. Sirkuit PFC yang khas, ditunjukkan pada Gambar 9.29, terdiri dari induktor L , sakelar aktif S , dan dioda free-wheeling D . Sirkuit PFC tanpa jembatan juga telah digunakan dalam pengisi daya baterai.

a. Mengurangi Dampak pada Grid

Arus sisi jaringan AC dengan dan tanpa tahap PFC ditunjukkan pada Gambar 9.30, di mana tegangan jaringan adalah 110 V AC, dan daya output pengisi daya adalah 5 kW. Dapat dilihat dari Gambar 9.30 bahwa dengan PFC, arus input jauh lebih baik. Arus mendekati sinusoidal dan puncak arus berkurang secara signifikan. Dampak arus harmonik pada jaringan dimitigasi. Juga penyearah dioda primer akan mengalami tegangan arus yang lebih kecil. Faktor daya mendekati 1.



Gambar 9.29 Tahap koreksi faktor daya pada pengisi daya PHEV.



Gambar 9.30 Arus sisi jaringan AC dengan dan tanpa PFC: (a) tanpa PFC; (b) dengan PFC

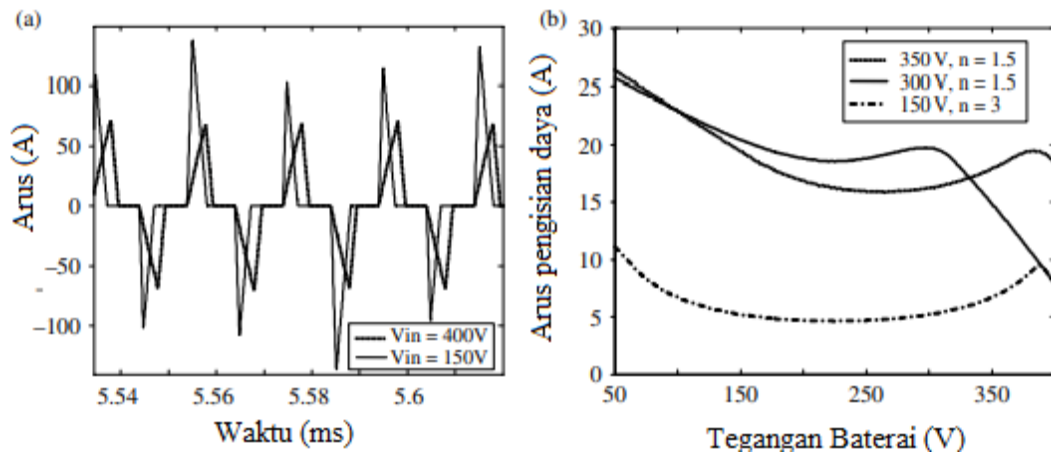
b. Mengurangi Dampak pada Sakelar

Sirkuit PFC juga membantu meningkatkan tegangan tautan DC ke tingkat yang lebih tinggi dan menstabilkan tegangan tautan DC. Oleh karena itu, pada daya output yang sama, arus yang melalui sakelar akan diturunkan untuk meningkatkan keamanan dan kemampuan keluaran. Gambar 9.31a menunjukkan arus sakelar pada V_{in} yang berbeda dengan daya output yang sama. Ketika V_{in} dinaikkan menjadi 400 V DC, arus sakelar berkurang secara signifikan. Selama tegangan pada sakelar tidak melebihi nilai kerusakan, tegangan bus DC yang lebih tinggi akan menghasilkan kemampuan daya yang lebih tinggi untuk perangkat yang sama yang digunakan. Gambar 9.31b menunjukkan arus pengisian maksimum yang dapat diberikan sistem. Meningkatkan tegangan link DC akan menguntungkan kemampuan output. Di sini arus pemutusan maksimum berulang dari sakelar semikonduktor diatur ke 70 A.

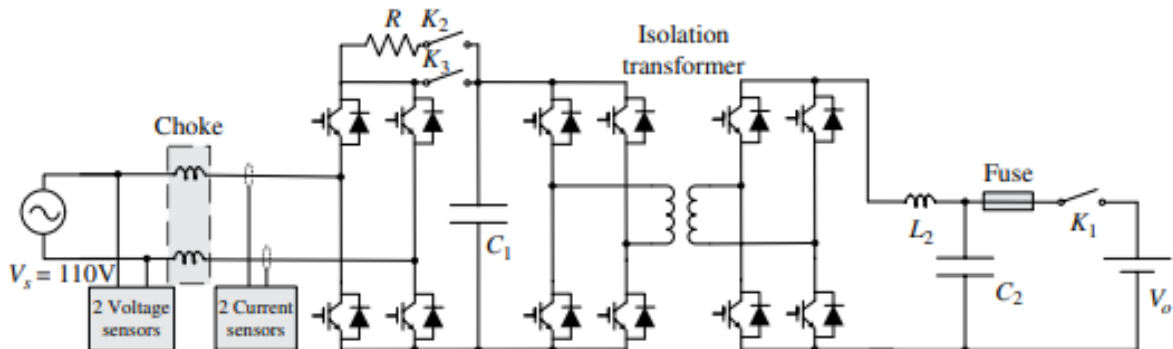
Pengisi Daya Baterai Dua Arah

Dimungkinkan untuk melengkapi PHEV dengan pengisi daya dua arah. Dengan kemampuan transfer daya dua arah, energi yang tersimpan dalam baterai PHEV dapat dikirim

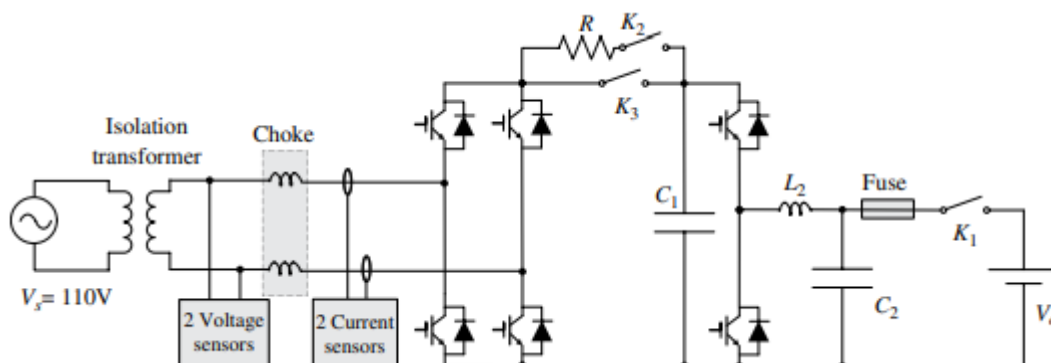
kembali ke jaringan selama jam permintaan puncak untuk pencukuran puncak jaringan listrik AC, atau untuk memasok daya ke rumah dan kantor selama pemadaman listrik. Isolasi dapat dicapai dengan menggunakan transformator frekuensi tinggi di tahap DC-DC pada tingkat frekuensi tinggi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.32. Isolasi juga dapat dicapai dengan menggunakan transformator pada tingkat frekuensi grid seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.33. Sulit untuk menambahkan tahap PFC ke pengisi daya dua arah tetapi arus sisi AC dapat dikontrol menggunakan inverter sisi grid untuk membatasi harmonik dan meningkatkan faktor daya.



Gambar 9.31 Perbandingan arus sakelar tanpa PFC: (a) perbandingan arus sakelar; (b) arus pengisian maksimum di bawah V_{in} yang berbeda.



Gambar 9.32 Isolasi menggunakan transformator frekuensi tinggi



Gambar 9.33 Isolasi pada tingkat jaringan dengan transformator frekuensi saluran

Topologi Pengisi Daya Lainnya

Pengisi daya di atas didasarkan pada input daya rendah fase tunggal. Dalam aplikasi seperti transportasi komersial dan stasiun pengisian ulang, perlu untuk mengisi baterai dalam

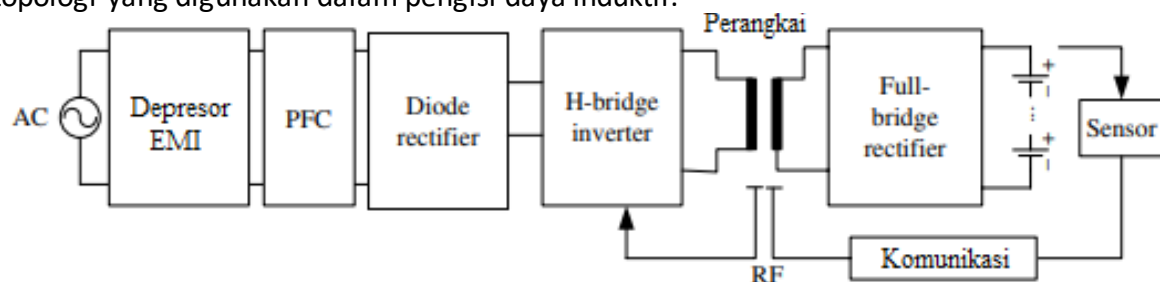
waktu yang relatif singkat. Misalnya, untuk paket 16 kWh, untuk mengisi baterai dari 30 hingga 80% SOC dalam 5 menit akan membutuhkan $16 \text{ kWh} \times (80\% - 30\%) / (5/60) = 96 \text{ kW}$. Dengan asumsi bahwa baterai dapat menerima jenis pengisian ini, daya pengisian harus disuplai. Ini biasanya dilakukan melalui input daya tinggi tiga fase. Panas yang berlebihan dapat dihasilkan selama pengisian cepat daya tinggi baterai EV dan PHEV. Tingkat pengisian daya yang tinggi juga dapat memengaruhi kapasitas jangka panjang atau masa pakai baterai.

Dengan semakin banyak energi terbarukan dan pembangkit terdistribusi, jaringan DC mulai muncul. Hampir semua sumber terbarukan, termasuk matahari dan angin, dapat berupa DC. Jika PHEV terhubung ke jaringan DC, maka baterai dapat diisi langsung dari sumber DC. Pengisi daya tradisional yang dirancang untuk input AC dapat digunakan untuk menerima input DC, tetapi pengisi daya DC yang dirancang khusus tidak memerlukan penyearah dan tahap PFC.

Pengisian Tanpa Kontak

Semua pengisi daya di atas memerlukan kontak listrik dengan stopkontak. Sambungan listrik kabel ini memiliki beberapa peringatan. Misalnya, jika kabel dicabut dari stopkontak (baik sengaja atau tidak sengaja) saat baterai masih diisi, maka bisa terjadi percikan api dan potensi kerusakan atau cedera. Contoh lain adalah seseorang (seperti anak-anak) dapat terluka jika mereka bermain dengan kabel, dll. Mengisi daya kendaraan saat hujan juga berpotensi berbahaya. Keausan steker dan kabel juga bisa menjadi sumber bahaya.

Oleh karena itu pengisian tanpa kontak telah dianggap sebagai alternatif. Pada tahun 1995, Grup Sistem Pengisian Kendaraan Listrik SAE AS, pabrikan Jepang termasuk Toyota, Nissan, Honda, dan DENSO serta IEC/ISO, bersama-sama mengembangkan standar pengisian induktif SAE J1773. Pada tahun 1999, SAE J1773 diberlakukan dan direkomendasikan sebagai standar internasional (<http://www.toyota.com>). GM telah memproduksi kendaraan listrik yang mengadopsi pengisian tanpa kontak secara elektrik, yang disebut sebagai pengisi daya induktif pada waktu itu, dalam program EV1 GM pada 1990-an. Karena pengisian tanpa kontak tidak melibatkan kontak langsung dengan listrik, ini adalah cara yang aman dan nyaman untuk mengisi baterai EV. Tugas tersebut bahkan dapat diselesaikan oleh seorang anak dengan pengisian daya tanpa kontak 50 kW. Pengisian tanpa kontak melibatkan transformator isolasi di mana belitan dan inti sekunder dapat dilepas dari primer. Gambar 9.34 menunjukkan topologi yang digunakan dalam pengisian daya induktif.



Gambar 9.34 Pengisian daya induktif terisolasi.

Pengisian Nirkabel

Dalam dekade terakhir, makna pengisi daya induktif telah berkembang. Sebagai contoh, pada SAE J1773 serta charger induktif yang digunakan oleh GM di EV1-nya, charger induktif disebut sebagai contactless charger yang mungkin sering dianggap sebagai charger yang tidak memiliki kontak listrik langsung. Namun, alas mungkin masih harus dicolokkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.34. Saat ini pengisi daya induktif biasanya disebut pengisi daya yang menggunakan prinsip medan magnet sebagai medianya dan biasanya memiliki jarak atau celah tertentu antara pemancar dan penerima. Oleh karena itu, lebih

umum disebut pengisi daya nirkabel seperti yang dibahas di bawah ini, dengan lebih detail di Bab 16.

Pengisian nirkabel melibatkan penggunaan transfer daya dan energi pada jarak yang jauh lebih jauh daripada pengisian tanpa kontak yang disebutkan di atas. Meskipun pengisi daya nirsentuh yang dibahas di bagian terakhir dapat menghilangkan kontak listrik langsung, pengisi daya ini tetap membutuhkan colokan, kabel, dan sambungan fisik coupler induktif. Keausan steker dan kabel juga masih dapat menyebabkan bahaya. Pengisian nirkabel bisa menghilangkan kabel dan colokan sama sekali. Dalam skenario ini, seorang pengemudi dapat mengemudikan mobilnya di atas tempat parkir yang dirancang khusus dan aki mobil terisi secara otomatis tanpa menghubungkan kabel atau steker apa pun, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.35. Ini memberikan pendekatan teraman untuk pengisian baterai EV. Pengantar singkat disediakan dalam bab ini untuk kelengkapan isi. Pembahasan yang lebih komprehensif akan diberikan pada Bab 16.

Ada beberapa eksperimen berbeda yang dilakukan untuk transfer energi nirkabel. Teknologi yang paling menjanjikan adalah menggunakan resonansi elektromagnetik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.36. Dalam pengaturan ini, ada dua antena dengan satu ditempatkan di struktur parkir sebagai pemancar dan satu di dalam mobil sebagai penerima. Kedua antena dirancang untuk beresonansi pada frekuensi yang dikendalikan. Keterbatasannya adalah tingkat transfer daya, dan efisiensi karena celah udara yang besar antara kedua antena.

Dalam rangkaian yang ditunjukkan pada Gambar 9.36, R_s adalah impedansi internal sumber dan resistansi kumparan primer, R_o adalah resistansi beban dan resistansi kumparan sekunder, L_l adalah induktansi kebocoran masing-masing kumparan, dan L_m adalah induktansi timbal balik dari kedua kumparan. Ada dua cara untuk membuat rangkaian beresonansi. Jika kita merancang rangkaian dan memilih frekuensi catu daya V_1 sedemikian rupa sehingga:

Persamaan 9.65

$$\omega L_l - \frac{1}{\omega C} = -2\omega L_m$$

impedansi ekuivalen total adalah:

Persamaan 9.66

$$Z = R_s - \frac{j\omega L_m R_o}{R_o - j\omega L_m}$$

Jika kita mendesain:

Persamaan 9.67

$$\omega L_l = \frac{11}{\omega C} = 0$$

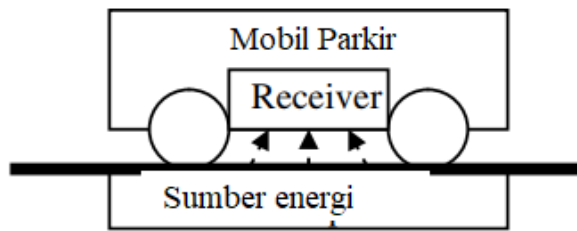
dan total impedansi ekuivalen adalah:

Persamaan 9.68

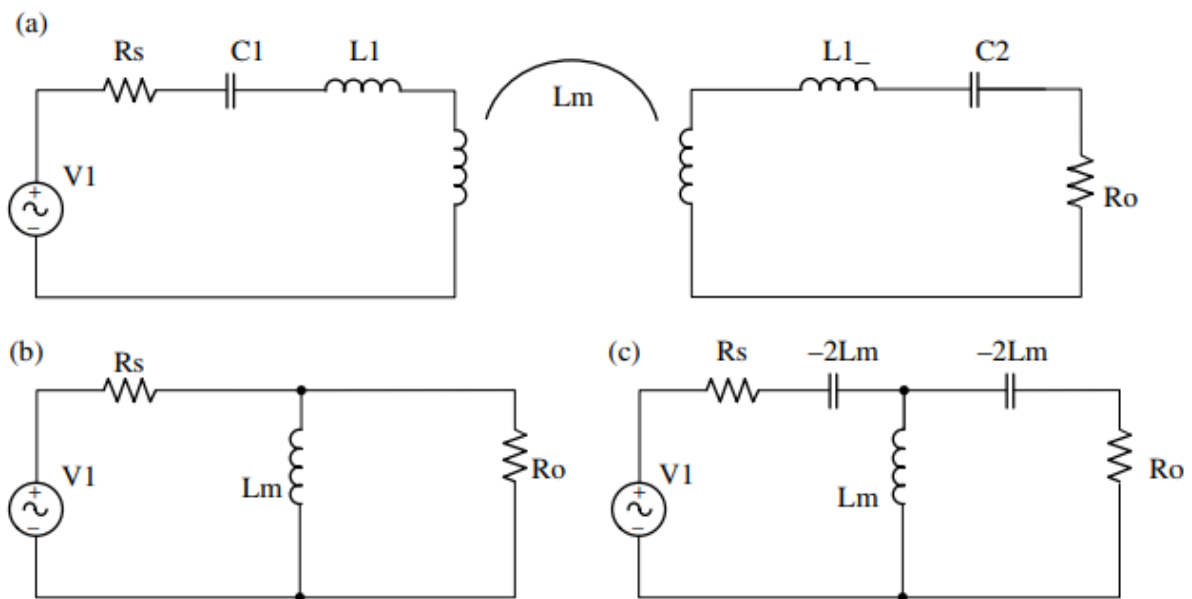
$$Z = R_s - \frac{j\omega L_m R_o}{j\omega L_m + R_o}$$

maka rangkaian akan mengalami resonansi. Namun, karena induktansi timbal balik dan induktansi bocor berubah dengan jarak antara dua kumparan, frekuensi harus disetel berdasarkan jarak dalam aplikasi dunia nyata. Gambar 9.36b,c menunjukkan rangkaian ekuivalen selama resonansi kedua kondisi tersebut. Gambar 9.37 menunjukkan hasil simulasi rangkaian. Plot pertama menunjukkan dua frekuensi resonansi. Plot kedua menunjukkan

bahwa ketika jarak antara dua kumparan meningkat, kedua frekuensi resonansi semakin dekat.



Gambar 9.35 Pengisian nirkabel PHEV/EV di lantai parkir



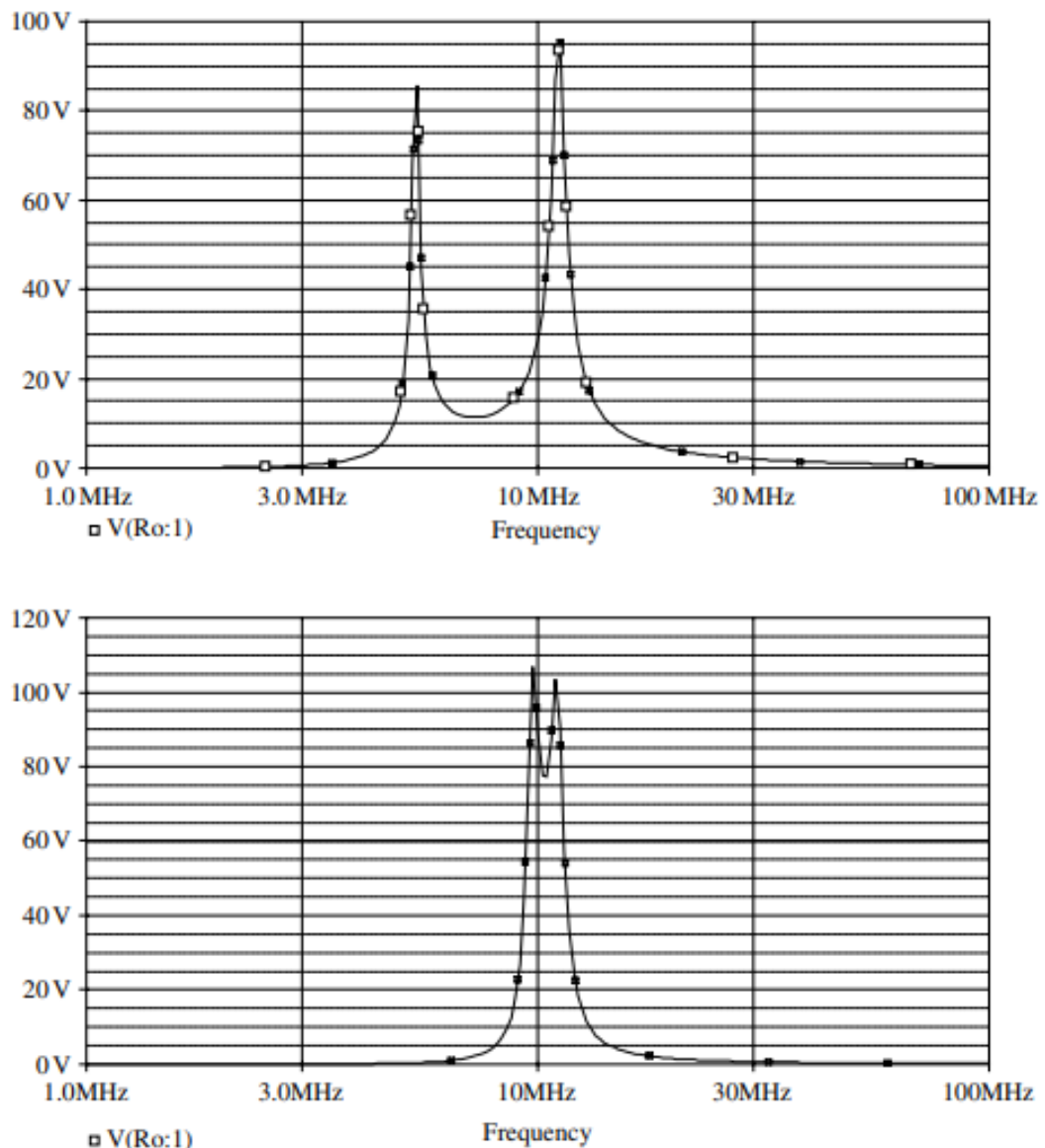
Gambar 9.36 Sirkuit untuk pengisian nirkabel berbasis resonansi elektromagnetik: (a) sirkuit; (b) rangkaian ekuivalen pada frekuensi resonansi kondisi 1; (c) rangkaian ekuivalen pada frekuensi resonansi pada kondisi 2

9.9 PEMODELAN DAN SIMULASI HEV POWER ELECTRONICS

Pemodelan dan simulasi memainkan peran penting dalam desain dan pengembangan rangkaian elektronika daya. Simulasi rangkaian elektronika daya dalam aplikasi kendaraan hybrid dapat dibagi menjadi dua kategori: level perangkat dan level sistem.

Simulasi Tingkat Perangkat

Simulasi tingkat perangkat dapat mengungkapkan detail perilaku perangkat. Untuk mendapatkan data kerugian yang terperinci, tegangan lebih, dan tegangan komponen lainnya karena sifat perangkat elektronika daya yang tidak ideal, dan induktansi dan kapasitansi yang menyimpang dari rangkaian, perlu untuk mensimulasikan sejumlah siklus pensaklaran terperinci yang berkaitan dengan skenario kasus terburuk.

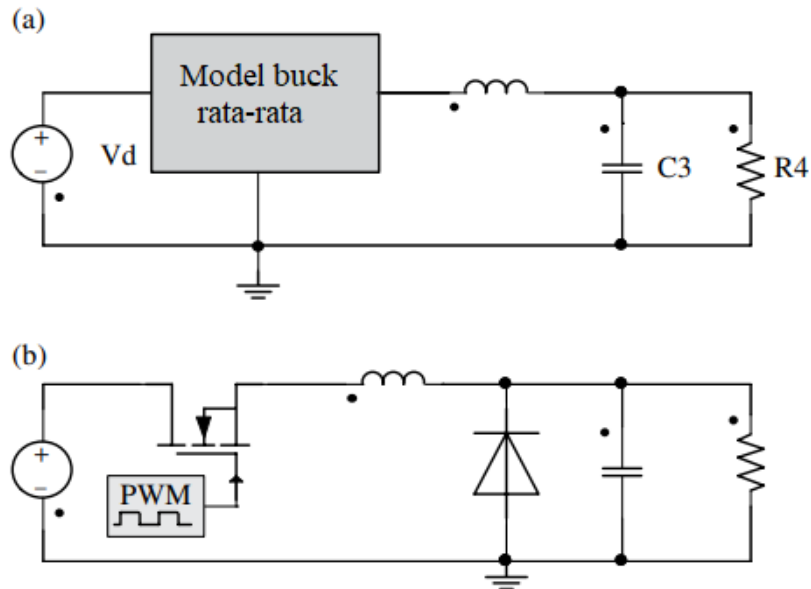


Gambar 9.37 Frekuensi resonansi dari rangkaian pengisian nirkabel: atas, tegangan output untuk jarak yang lebih pendek; bawah: tegangan output untuk jarak yang lebih jauh.

Model Tingkat Sistem

Simulasi tingkat perangkat yang terperinci dapat memakan banyak waktu karena frekuensi switching yang tinggi yang digunakan dalam rangkaian elektronika daya, sedangkan konstanta mekanis dari sistem kendaraan bisa beberapa detik atau lebih. Oleh karena itu, simulasi tingkat perangkat, meskipun kinerja dinamis sirkuit dapat mensimulasikan, tidak akan cocok untuk mensimulasikan kinerja kendaraan, seperti kemampuan menanjak, akselerasi, dan penghematan bahan bakar. Di sisi lain, sirkuit elektronik memiliki transien yang sangat cepat jika dibandingkan dengan dinamika kendaraan.

Dalam simulasi tingkat sistem, model rata-rata umumnya digunakan. Misalnya, konverter buck dapat direpresentasikan dalam simulasi dengan model rata-rata seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.38a. Sebuah simulasi kinerja sistem satu detik hanya membutuhkan waktu simulasi dua detik, sedangkan pada Gambar 9.38b, yang menggunakan model tingkat perangkat rinci, dibutuhkan sekitar 20 menit untuk mendapatkan kinerja sistem satu detik.



Gambar 9.38 Pemodelan tingkat perangkat dan tingkat sistem dari konverter buck: (a) model tingkat sistem hanya dengan mempertimbangkan karakteristik nonlinier dari induktor; (b) model tingkat perangkat yang melibatkan peralihan detail MOSFET.

Perangkat Elektronik Daya yang Muncul

Teknologi silikon (Si) saat ini mencapai batas teoretis material dan tidak dapat memenuhi semua persyaratan aplikasi kendaraan hibrida dalam hal kekompakan, bobot ringan, kepadatan daya tinggi, efisiensi tinggi, dan keandalan tinggi dalam kondisi yang sulit. Bahan semikonduktor baru, seperti silikon karbida (SiC), untuk perangkat daya memiliki potensi untuk akhirnya menyalip perangkat daya Si dalam aplikasi powertrain kendaraan hibrida.

Perangkat daya SiC berpotensi memiliki kerugian switching dan konduksi yang jauh lebih kecil dan dapat beroperasi pada suhu yang jauh lebih tinggi daripada perangkat daya Si yang sebanding. Oleh karena itu, konverter daya berbasis SiC akan memiliki efisiensi yang jauh lebih tinggi daripada konverter berbasis perangkat daya Si jika frekuensi switching yang sama digunakan. Atau, frekuensi switching yang lebih tinggi dapat digunakan untuk mengurangi ukuran komponen magnetik dalam konverter daya berbasis SiC. Selain itu, karena perangkat daya SiC dapat dioperasikan pada suhu yang jauh lebih tinggi tanpa banyak perubahan dalam sifat kelistrikannya, kemudahan pengelolaan termal dan keandalan yang tinggi dapat dicapai.

Kemasan Sirkuit

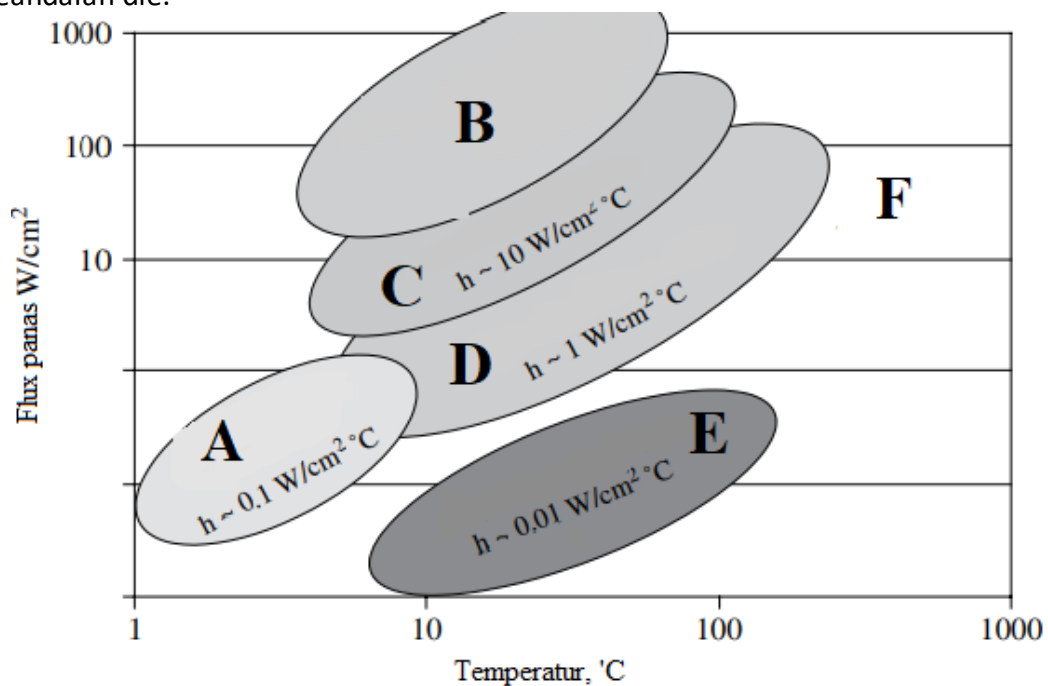
Interferensi elektromagnetik (EMI) adalah salah satu masalah yang paling menantang dalam rangkaian elektronika daya. Frekuensi switching yang tinggi dan arus yang tinggi menghasilkan medan elektromagnetik yang akan merembes ke komponen lain dalam sistem kendaraan dan menciptakan kebisingan listrik dalam jumlah besar. Untuk meminimalkan EMI, komponen harus ditempatkan dengan hati-hati sehingga EMI ditampung oleh pelindung dan akan memiliki efek minimal pada sistem lainnya. Semua jalur harus dijaga sedekat mungkin sehingga bidang yang dihasilkan akan meniadakan satu sama lain. Untuk meminimalkan parasit dan membantu masalah EMI, panjang kabel harus dibuat sesingkat mungkin.

Rangkaian kontrol perlu memberikan perlindungan untuk arus lebih, hubung singkat, tegangan lebih, dan tegangan kurang. Kemampuan mendeteksi sinyal gangguan dan mematikan sinyal penggerak gerbang ke sakelar utama adalah bagian penting dari desain rangkaian elektronika daya. Sekering cepat perlu digunakan di sirkuit untuk melindungi konverter agar tidak rusak oleh kesalahan lain dan digunakan untuk keselamatan

9.10 MANAJEMEN TERMAL ELEKTRONIK DAYA HEV

Pada tingkat daya 100 kW, bahkan dengan efisiensi 96-98%, daya yang hilang dari setiap unit elektronik daya adalah 2-4 kW. Dengan dua atau tiga motor powertrain dan sirkuit elektronik daya terkait, bersama dengan konverter DC-DC dua arah berdaya tinggi, panas yang dihasilkan dalam sistem kendaraan hibrida bisa menjadi signifikan. Kemajuan signifikan dalam manajemen termal elektronik daya dan motor untuk HEV sistem propulsi harus dicapai untuk memenuhi tujuan industri otomotif pengurangan berat badan, volume, dan biaya. Melalui optimalisasi teknologi yang ada dan perluasan metode pendinginan perintis baru, komponen powertrain hybrid dapat mencapai kepadatan daya yang lebih tinggi, volume yang lebih kecil, dan keandalan yang meningkat. Penyelidikan dan kemajuan dalam masalah termal dapat memberikan jalan yang layak untuk menjembatani kesenjangan yang masih mengganggu pencapaian target teknis otomotif yang sukses sekaligus meningkatkan kemampuan untuk menerapkan teknologi baru ke aplikasi otomotif saat mereka matang.

Kinerja termal modul daya diukur dengan kenaikan suhu maksimum di die pada tingkat disipasi daya tertentu dengan suhu heat sink tetap. Semakin rendah suhu die, semakin baik kinerja listrik. Karena resistansi termal dari sambungan die ke heat sink berkurang, rapat daya yang lebih tinggi dapat dicapai untuk kenaikan suhu yang sama, atau untuk rapat daya yang sama, suhu sambungan yang lebih rendah dapat dicapai. Penting untuk mengurangi siklus termal atau mempertahankan suhu lingkungan yang rendah untuk meningkatkan masa pakai dan keandalan die.



Keterangan :

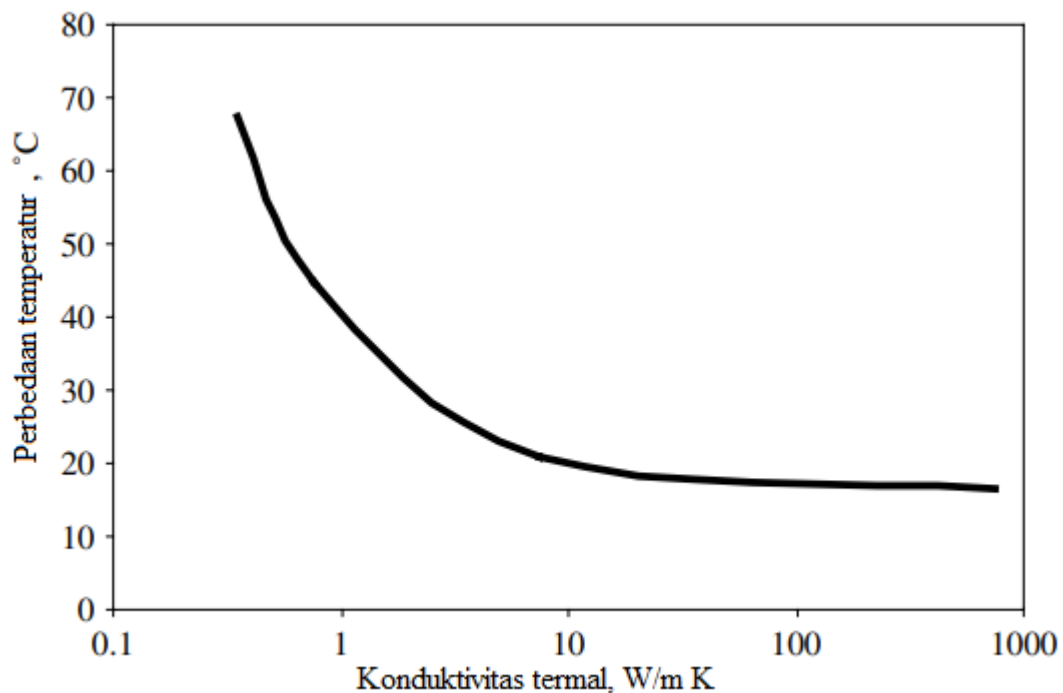
- A : Cairan, konvensi alami
- B : Jet imping dua fase., semprot, gemuk termal konduktivitas tinggi, penyebar panas
- C : Pendidihan dua fase
- D : Cair, konveksi paksa
- E : Udara, konveksi paksa
- F : Berbagai cairan kerja di bawah berbagai tekanan

Gambar 9.39 Teknologi pendinginan yang ada.

Area utama yang menjadi perhatian dalam manajemen termal elektronika daya adalah: suhu pengoperasian IGBT (harus kurang dari 125°C); resistensi kontak antara berbagai

lapisan modul daya; pasta termal konduktivitas termal rendah; keterbatasan fluks panas (idealnya, IGBT yang lebih cepat harus menolak panas pada laju 250 W/cm^2); batasan suhu cairan pendingin masuk (disarankan untuk menggunakan cairan pendingin mesin pada 105°C); biaya sistem pendingin; dan berat dan volume. Teknologi pendinginan yang ada digambarkan pada Gambar 9.39. Ditunjukkan teknik pendinginan konvensional seperti konveksi paksa dan teknik perebusan dua fase sederhana tidak mampu menghilangkan fluks panas tinggi (dalam kisaran 250 W/cm^2) pada perbedaan suhu rendah (20°C). Namun, angka ini menunjukkan dengan jelas bahwa penggunaan teknologi yang memungkinkan seperti pendinginan semprot dan pelampiasan jet, bersama dengan beberapa peningkatan inovatif lainnya akan dapat memenuhi tujuan industri otomotif.

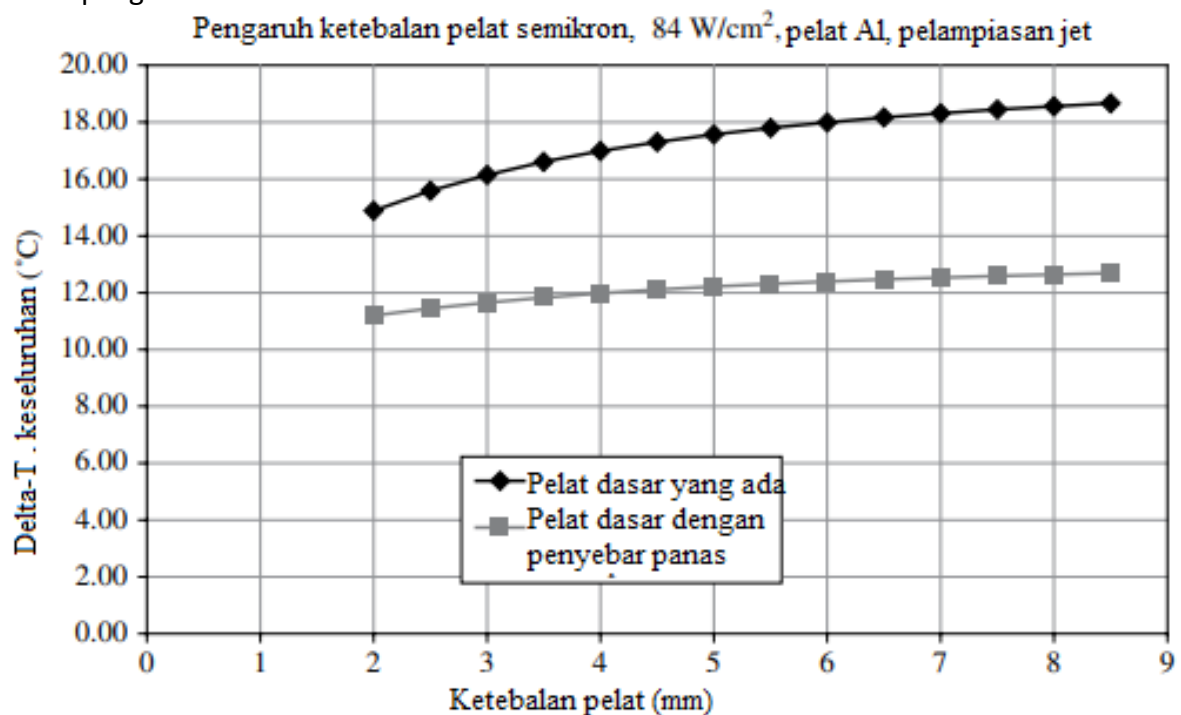
Idealnya, akan lebih menguntungkan jika IGBT dapat dirancang untuk beroperasi pada suhu yang lebih tinggi. Industri ini mengejar berbagai proyek penelitian jangka panjang untuk mengevaluasi dan mencapai tujuan itu. Namun, untuk memenuhi kebutuhan mendesak dari industri otomotif, IGBT yang ada harus dioperasikan pada suhu di bawah 125°C . Modul daya yang ada dibuat dengan menyatukan die, lapisan tembaga, substrat, dan pelat dasar. Seluruh modul kemudian dipasang pada heat sink menggunakan pelumas termal atau bantalan termal. Gemuk termal yang ada yang digunakan oleh industri yang tahan suhu tinggi memiliki konduktivitas yang sangat rendah pada kisaran $0,3\text{--}0,5 \text{ W/(m K)}$. Sebagai hasil dari konduktivitas termal yang rendah ini, pelumas termal membentuk $30\text{--}40\%$ dari total resistansi termal antara sambungan dan unit pendingin. Oleh karena itu sangat penting untuk mengurangi resistensi ini dengan meningkatkan konduktivitas termal dari pelumas termal. Gambar 9.40 menunjukkan dampak konduktivitas pelumas termal pada perbedaan suhu keseluruhan antara sambungan dan unit pendingin. Untuk konduktivitas termal $0,5 \text{ W/(m K)}$, perbedaan suhu sekitar 65°C . Jika konduktivitas termal pelumas termal digandakan menjadi $1,0 \text{ W/(m K)}$, perbedaan suhu maksimum dapat dikurangi hingga 35°C .



Gambar 9.40 Dampak konduktivitas bahan antarmuka termal pada perbedaan suhu.

Untuk meningkatkan densitas daya modul daya, fluks panas yang lebih tinggi harus dikeluarkan dari modul karena frekuensi switching yang meningkat. Pendekatan penting untuk menghilangkan fluks panas yang lebih tinggi dari IGBT adalah dengan menyebarkan fluks panasnya ke permukaan yang lebih besar. Pelat dasar tembaga atau aluminium yang ada

menyebarkan panas 20-30%, mengurangi fluks panas maksimum dengan jumlah yang sesuai. Penggunaan penyebar panas yang lebih efektif seperti lapisan logam yang sangat konduktif, pipa panas mini, dan/atau bahan pengubah fasa di dalam pelat dingin dapat menyebarkan fluks panas tinggi IGBT ke area permukaan yang lebih besar dan mengurangi fluks panas maksimum yang diperlukan. dihilangkan sebanyak 40%. Ini adalah pengurangan 50% dalam fluks panas maksimum yang perlu dihilangkan, dan persyaratan ini dapat dengan mudah dipenuhi oleh salah satu teknologi pendinginan yang memungkinkan seperti pelampiasan jet dan pendinginan semprot yang saat ini sedang dipertimbangkan. Gambar 9.41 menunjukkan efek penggunaan penyebar panas yang menghasilkan penurunan suhu tambahan 4–6°C di persimpangan.



Gambar 9.41 Dampak penggunaan penyebar panas pada suhu sambungan.

Salah satu pendekatan untuk mempertahankan suhu modul daya pada 125°C atau di bawahnya adalah dengan menyediakan loop pendingin terpisah di mana pendingin dapat masuk ke unit pendingin pada suhu serendah 25°C, sehingga memberikan perbedaan suhu yang memadai untuk mempertahankan IGBT. ' pada nilai yang diinginkan sambil menghilangkan fluks panas setinggi 250 W/cm².

9.11 KESIMPULAN

Bab ini menyajikan tinjauan umum sirkuit elektronika daya untuk aplikasi HEV dengan fokus pada topologi sirkuit khusus, analisis, dan manajemen termal. Perangkat pengalih daya baru dan sistem elektronika daya memiliki potensi untuk meningkatkan kinerja keseluruhan kendaraan hibrida. Upaya berkelanjutan dalam penelitian dan pengembangan sirkuit elektronika daya kemungkinan besar akan difokuskan pada topologi sirkuit inovatif, kontrol optimal, perangkat switching baru, dan metode manajemen termal baru.

BAB 10

DRIVER DAN MESIN ELEKTRIK PADA HEV

10.1 PENDAHULUAN

Kemajuan dalam mesin listrik, bersama dengan kemajuan dalam elektronika daya, adalah kunci utama untuk kendaraan listrik hibrida, listrik, dan plug-in hybrid (HEV). Mesin induksi, mesin sinkron magnet permanen (PM), mesin DC tanpa sikat PM, dan mesin reluktansi terswitch (SRM) semuanya telah dipertimbangkan dalam berbagai jenis aplikasi powertrain kendaraan. Motor DC brushed, yang dulu populer untuk aplikasi traksi seperti di trem, tidak lagi dianggap sebagai pilihan yang tepat karena konstruksinya yang besar, efisiensi yang rendah, kebutuhan untuk perawatan sikat dan komutator, interferensi elektromagnetik yang tinggi (EMI), keandalan yang rendah, dan rentang kecepatan terbatas.

Saat menggunakan motor listrik untuk aplikasi powertrain, ada beberapa kemungkinan konfigurasi. Motor listrik saat ini, dikombinasikan dengan inverter dan pengontrol terkait, memiliki rentang kecepatan yang lebar untuk operasi torsi konstan, dan rentang kecepatan yang diperpanjang untuk operasi daya konstan, yang membuat desain powertrain jauh lebih mudah. Tergantung pada konfigurasi powertrain hybrid, desain dan pemilihan penggerak motor listrik juga bisa berbeda. Misalnya, untuk kendaraan hybrid seri, motor powertrain harus mampu memberikan torsi dan kecepatan yang dibutuhkan untuk semua kondisi berkendara. Oleh karena itu, ukuran motor akan cukup besar, biasanya mencapai 100 kW atau lebih untuk mobil penumpang. Motor PM atau motor induksi adalah pilihan yang lebih disukai. Untuk hibrida ringan dan mikro, hanya diperlukan motor berukuran kecil beberapa kilowatt. Oleh karena itu motor dapat berupa motor DC kutub cakar, atau motor keengganan yang diaktifkan.

Transmisi otomatis tradisional atau transmisi variabel kontinu (CVT) yang digunakan pada mobil konvensional tidak lagi diperlukan pada kendaraan listrik (EV) dan banyak HEV. Namun, pengurangan kecepatan rasio gigi tetap seringkali diperlukan. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa motor berkecepatan tinggi memiliki ukuran yang lebih kecil dan bobot yang lebih ringan dibandingkan dengan mesin berkecepatan rendah. Transmisi otomatis dua kecepatan mungkin bermanfaat dalam menghemat konsumsi energi kendaraan. Motor listrik banyak dibahas di berbagai buku teks dan banyak publikasi teknis. Dalam bab ini, kita akan fokus pada beberapa aspek unik dari motor listrik yang khusus untuk aplikasi traksi.

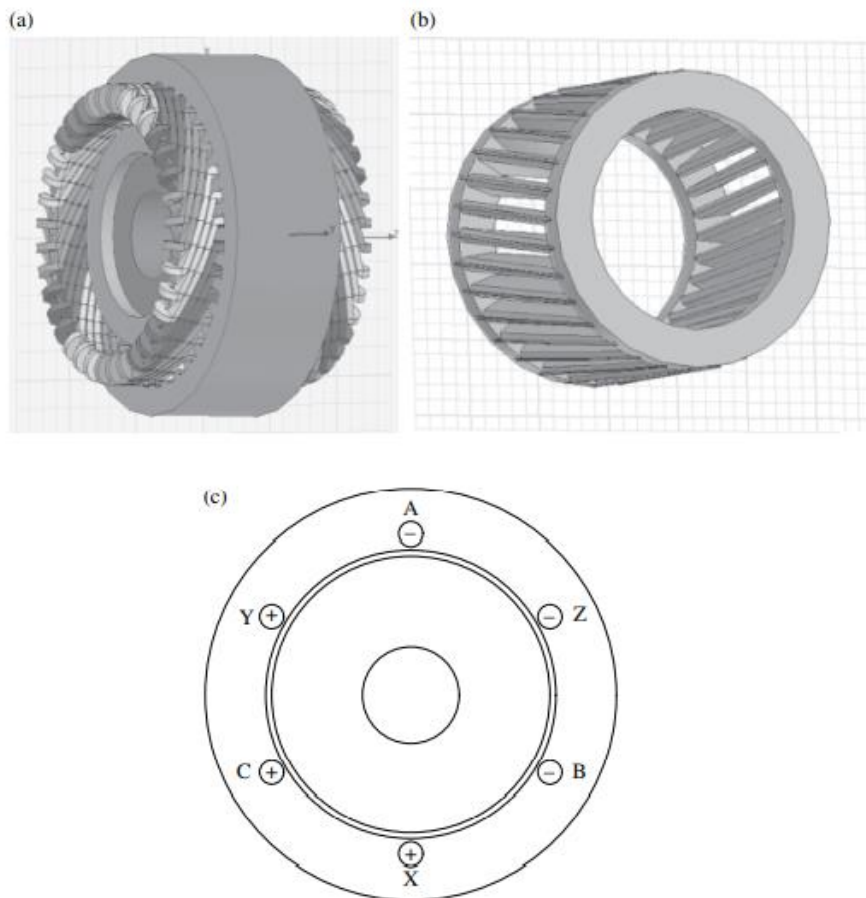
10.2 PENGGERAK MOTOR INDUKSI

Motor induksi adalah pilihan populer untuk aplikasi traksi karena konstruksinya yang kokoh, biaya rendah, rentang pelemahan medan yang luas, dan keandalan yang tinggi. Khusus untuk EV, PHEV, dan HEV yang membutuhkan motor berdaya tinggi, motor induksi dapat memberikan pengoperasian yang lebih andal dibandingkan jenis motor listrik lainnya. Namun, jika dibandingkan dengan motor PM, motor induksi memiliki efisiensi yang lebih rendah dan kerapatan torsi yang lebih kecil.

Salah satu motor induksi yang umum digunakan untuk aplikasi traksi adalah motor induksi sangkar tupai. Inverter digunakan untuk mengontrol motor sehingga torsi yang diinginkan dapat diberikan untuk kondisi mengemudi tertentu pada kecepatan tertentu. Metodologi kontrol lanjutan, seperti kontrol vektor, kontrol torsi langsung, dan kontrol berorientasi medan, populer dalam kontrol motor induksi untuk aplikasi traksi.

10.3 PRINSIP MOTOR INDUKSI

Struktur dasar mesin induksi ditunjukkan pada Gambar 10.1. Dua bagian utama motor induksi adalah stator (yang menampung belitan) dan rotor (yang menampung sangkar tupai). Baik stator maupun rotor terbuat dari baja silikon berlapis dengan ketebalan 0,35, 0,5, atau 0,65 mm. Lembaran baja yang dilaminasi pertama-tama dilubangi dengan slot dan kemudian ditumpuk bersama untuk masing-masing membentuk stator dan rotor. Gulungan diletakkan di dalam slot stator sementara rotor dilemparkan ke dalam aluminium. Ada beberapa komponen tambahan untuk membentuk keseluruhan alat berat: rumah yang membungkus dan menopang seluruh alat berat, poros yang mentransfer torsi, bantalan, sensor posisi opsional, dan mekanisme pendinginan (seperti kipas atau tabung pendingin cair).



Gambar 10.1 Motor induksi: (a) rakitan rotor dan stator; (b) sangkar tupai rotor; (c) tampilan penampang dari motor induksi ideal dengan enam konduktor pada stator.

Pada Gambar 10.1c, AX adalah fase a, BY adalah fase b, dan CZ adalah fase c. Arah arus fasa adalah untuk momen tertentu $\omega t = 60$ derajat listrik; “+” menunjukkan positif dan “-” menunjukkan negatif. Dapat dilihat bahwa konduktor AZB membentuk satu grup dan XCY membentuk grup lain. Bersama-sama mereka menciptakan medan magnet pada 30° LU–SE. Arah medan akan berubah seiring perubahan arus dari waktu ke waktu. Gulungan stator yang ditunjukkan pada Gambar 10.1c disuplai dengan arus sinusoidal AC tiga fase. Asumsikan amplitudo arus adalah 1 m ampere, dan frekuensi sudut arus adalah radian per detik; maka arus tiga fasa dapat dinyatakan sebagai:

Persamaan 10.1

$$\begin{aligned}i_a &= I_m \cos(\omega t) \\i_b &= I_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\i_c &= I_m \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)\end{aligned}$$

Karena arus masing-masing dari tiga fase adalah fungsi waktu, arah arus seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.1c akan berubah seiring waktu. Jika kita menandai arah arus pada waktu tertentu, kita dapat melihat medan magnet yang dihasilkan oleh arus stator dengan posisi puncaknya berubah dari waktu ke waktu.

Secara matematis, kita dapat menurunkan medan magnet ini. Masing-masing arus tiga fasa akan menghasilkan medan magnet. Karena ketiga belitan terletak 120° satu sama lain dalam ruang di sepanjang permukaan dalam stator, medan yang dihasilkan oleh setiap fase dapat ditulis sebagai berikut, dengan asumsi distribusi medan magnet spasial di celah udara akibat arus belitan adalah sinusoidal dengan rancangan:

Persamaan 10.2

$$\begin{aligned}B_a &= Ki_a(t) \cos(\theta) \\B_b &= Ki_b(t) \cos(\theta - 120^\circ) \\B_c &= Ki_c(t) \cos(\theta - 240^\circ)\end{aligned}$$

dimana K adalah konstanta. Menggunakan Persamaan 10.1 dan 10.2, dengan mempertimbangkan bahwa $\cos(\omega t)\cos(\theta) = [\cos(\omega t - \theta) + \cos(\omega t + \theta)]/2$ dan $\cos(\omega t + \theta) + \cos(\omega t + \theta - 240^\circ) + \cos(\omega t + \theta - 480^\circ) = 0$, kita dapatkan:

Persamaan 10.3

$$\begin{aligned}B_{gap} &= \\&= \frac{3}{2}KI_m \cos(\omega t - \theta) + \frac{1}{2}KI_m [\cos(\omega t + \theta) + \cos(\omega t + \theta - 240^\circ) + \cos(\omega t + \theta - 480^\circ)] \\&= B_m \cos(\omega t - \theta)\end{aligned}$$

Persamaan 10.3 menunjukkan bahwa medan magnet adalah gelombang berjalan di sepanjang permukaan bagian dalam stator. Dengan kata lain, medan magnet total adalah medan sinusoidal dengan puncaknya berputar pada kecepatan sudut ω rad/s. Karena $\omega = 2\pi f$, kecepatan putaran medan akan sama dengan frekuensi suplai: f putaran per detik atau $n_s = 60f$ putaran per menit (rpm). Perhatikan bahwa penurunan di atas didasarkan pada sepasang kutub, persamaan yang lebih umum untuk kecepatan medan (atau kecepatan sinkron) dari mesin induksi dapat diberikan sebagai:

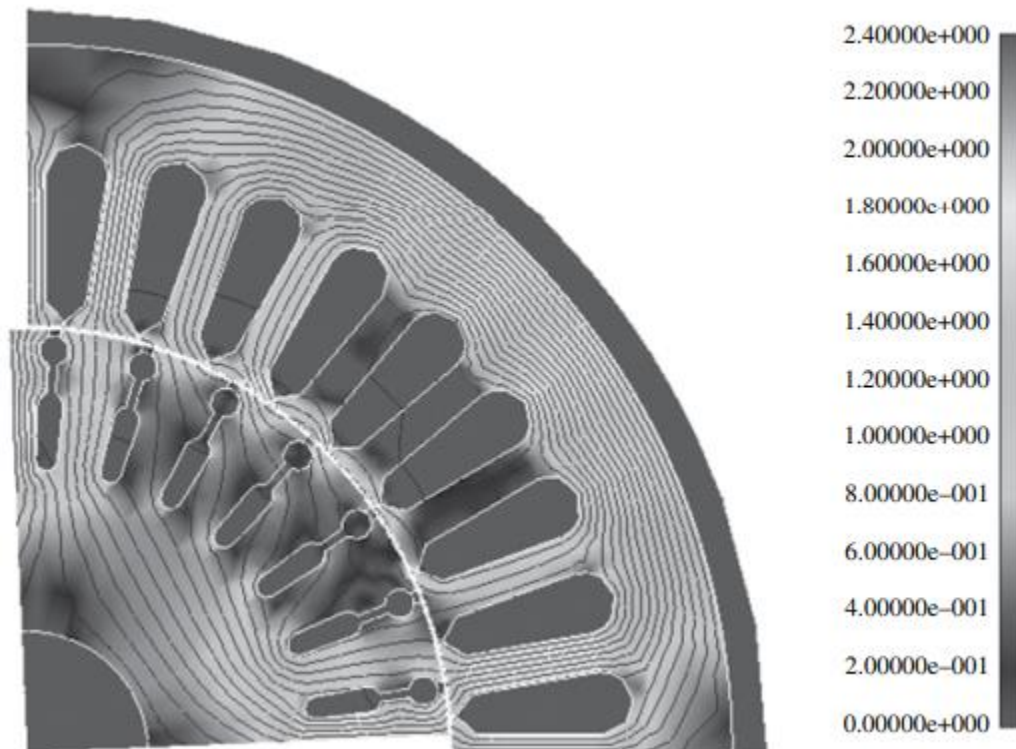
Persamaan 10.4

$$n_s = \frac{60f}{p} \quad \text{dan} \quad \omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} = \frac{2\pi f}{p} = \frac{\omega}{p}$$

di mana p adalah jumlah pasangan kutub. Gambar 10.2 menunjukkan susunan motor induksi sangkar-tupai empat kutub dengan distribusi fluks.

Dengan asumsi awalnya bahwa rotor diam, gaya gerak listrik (ggl) akan diinduksi di dalam batang rotor sangkar tupai. Oleh karena itu, arus terbentuk di dalam batang rotor melalui cincin ujung. Demikian pula, karena medan berputar, arus ini akan menghasilkan gaya

pada batang rotor (arus batang rotor berada di bawah medan magnet stator). Jika gaya (atau torsi) cukup besar, rotor akan mulai berputar. Kecepatan maksimum rotor akan lebih kecil dari kecepatan sinkron karena, jika rotor mencapai kecepatan sinkron, tidak akan ada gerakan relatif antara batang rotor dan medan stator, sehingga tidak ada emf atau gaya yang akan dihasilkan. Perbedaan antara kecepatan rotor dan kecepatan sinkron didefinisikan sebagai slip s , yaitu, $s = (n_s - n_m)/n_s = (\omega_s - \omega_m)/\omega_s$, di mana n_m dan ω_m adalah kecepatan rotor dalam rpm dan radian per kedua, masing-masing. Slip khas motor induksi berada dalam 1-3%.



Gambar 10.2 Distribusi fluks motor induksi empat kutub selama analisis elemen hingga transien.

10.4 RANGKAIAN EKIVALEN MOTOR INDUKSI

Kita dapat merepresentasikan motor induksi dengan dua rangkaian terpisah, satu untuk stator dan satu untuk rotor. Karena ketiga fasa simetris, kita hanya perlu menganalisis satu fasa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.3. Kita menggunakan fasor untuk analisis rangkaian AC. Di sini kita telah mendefinisikan arah aliran arus menggunakan konvensi transformator. Perlu dicatat bahwa jumlah rotor dan stator akan memiliki frekuensi yang berbeda kecuali ketika rotor stasioner. Persamaan tegangan dari rangkaian primer dan sekunder dapat ditulis sebagai:

Persamaan 10.5

$$\begin{aligned} V_S &= I_S R_S + j\omega l_S I_S + E_S \\ 0 &= I_R R_R + j\omega l_R I_R + E_R \end{aligned}$$

di mana V adalah tegangan fasa, I arus fasa, R resistansi fasa, dan L induktansi bocor belitan. Subskrip S dan R masing-masing mewakili stator dan rotor.

Karena medan berputar pada kecepatan sinkron S dan rotor berputar pada kecepatan ω_m , kecepatan medan magnet relatif terhadap batang rotor adalah $\omega_s - \omega_m = s\omega_s = s\omega/p$, dan $\omega_R = p\omega_s = s\omega$ adalah frekuensi arus rotornya. Jika kita kalikan dengan k dan bagi dengan s untuk kedua ruas persamaan kedua dalam Persamaan 10.5, maka kita peroleh

Persamaan 10.6

$$0 = \left(k^2 \frac{R_R}{S}\right) \left(\frac{I_R}{k}\right) + j \left(k^2 \frac{\omega_R}{S} R\right) \left(\frac{I_R}{k}\right) + \frac{kE_R}{S}$$

Rotor memiliki besaran AC pada frekuensi slip $\omega_R = s\omega$. Dengan menggunakan yang berikut, $R^{\prime}R = k^2 R_R$, $X^{\prime}_R = k^2 \omega L_R = k^2 X_R$, $I^{\prime}_R = I_R/k$, $E^{\prime}_R = kE_R/S$ kita dapatkan:

Persamaan 10.7

$$0 = \frac{R^{\prime}_R}{S} I^{\prime}_R + jX^{\prime}_R I^{\prime}_R + E^{\prime}_R$$

Kita akan memilih k sedemikian rupa sehingga $E_S = E^{\prime}_R$. Kemudian kita dapat menggambar ulang rangkaian ekivalen motor induksi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.4a. Di sini kita mengabaikan kerugian magnetik di inti stator. Jika kita memasukkan kerugian magnetik, maka rangkaian ekivalen dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 10.4b. Dalam rangkaian ekivalen di atas, untuk suplai tegangan tertentu, arus rangkaian dapat ditulis sebagai:

Persamaan 10.8

$$I_S = \frac{V_S}{R_S + j\omega L_S + (R_m + jX_m) \parallel \left(\frac{R^{\prime}_R}{S} + jX^{\prime}_R\right)}$$

Untuk menyederhanakan analisis, kita dapat mengabaikan $R_m + j\omega X_m$. Berdasarkan asumsi ini, daya elektromagnet yang ditransfer dari stator ke rotor adalah

Persamaan 10.9

$$P_{em} = m I_S^2 \frac{R^{\prime}_R}{S} = \frac{m V_S^2 R^{\prime}_R}{\left(R_S + \frac{R^{\prime}_R}{S}\right)^2 + (X_S + X^{\prime}_R)^2 S}$$

Memperhatikan bahwa daya elektromagnetik atau daya rotor memiliki dua bagian, yaitu hilangnya belitan rotor dan daya yang ditransfer ke porosnya, persamaan di atas dapat ditulis ulang sebagai:

Persamaan 10.10

$$P_{em} = \frac{m V_S^2}{\left(R_S + \frac{R^{\prime}_R}{S}\right)^2 + (X_S + X^{\prime}_R)^2} \left[R^{\prime}_R + \frac{(1-s)}{S} R^{\prime}_R \right]$$

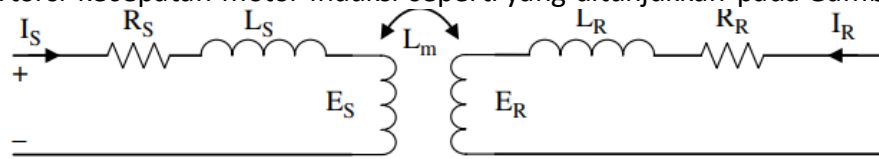
Suku pertama menyatakan rugi tembaga rotor dan suku kedua menyatakan daya mekanik pada poros. Torsi elektromagnetik motor dapat ditulis sebagai:

Persamaan 10.11

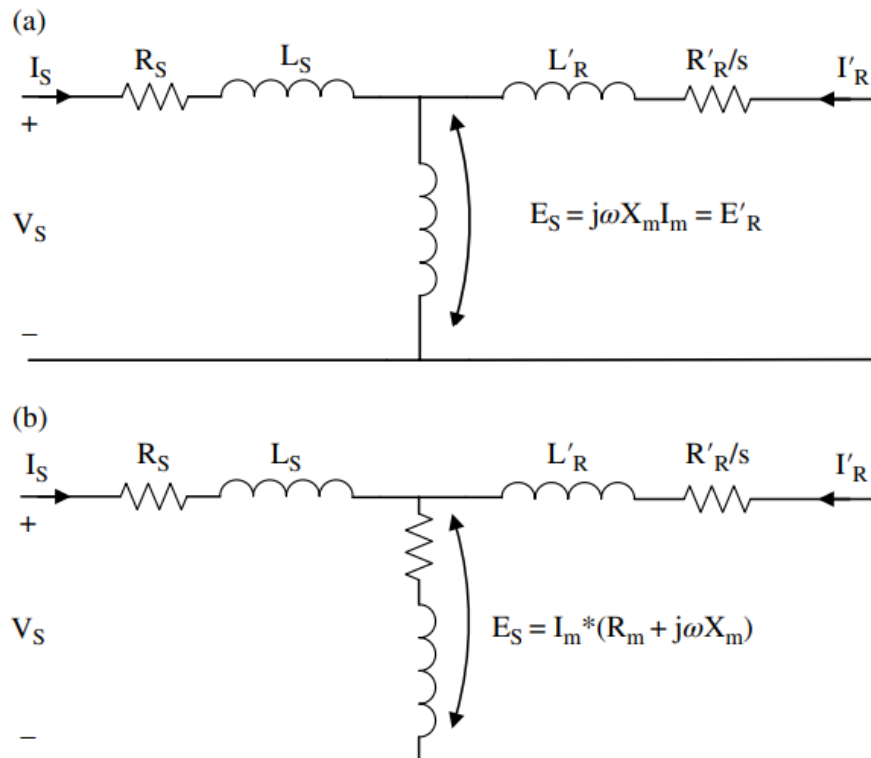
$$T_{em} = \frac{m}{\omega_S} \frac{V_S^2}{\left(R_S + \frac{R^{\prime}_R}{S}\right)^2 + (X_S + X^{\prime}_R)^2} \frac{1}{S} R^{\prime}_R$$

$$\frac{m}{\omega_m} \frac{V_S^2}{\left(R_S + \frac{R^{\prime}_R}{S}\right)^2 + (X_S + X^{\prime}_R)^2} \frac{(1-s)}{S} R^{\prime}_R$$

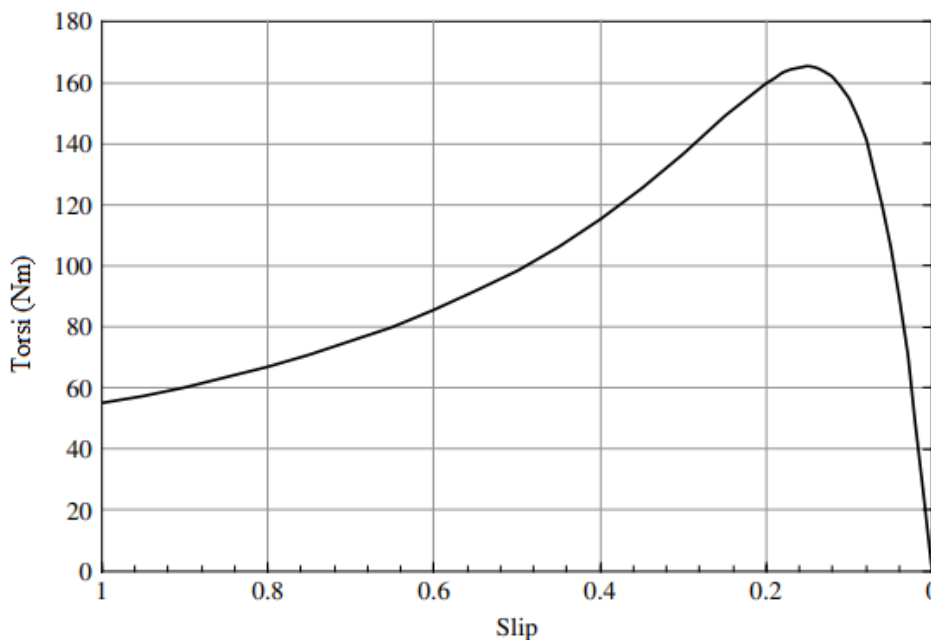
Kita dapat memplot torsi T_{em} sebagai fungsi slip s dari Persamaan 10.11 dan memperoleh karakteristik torsi-kecepatan motor induksi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.5.



Gambar 10.3 Sirkuit stator dan rotor dari mesin induksi.



Gambar 10.4 Rangkaian ekuivalen yang dimodifikasi dari mesin induksi: (a), mengabaikan rugi-rugi besi; (b), mempertimbangkan kehilangan besi



Gambar 10.5 Karakteristik torsi-kecepatan motor induksi untuk frekuensi konstan dan suplai tegangan konstan

10.5 KONTROL KECEPATAN MESIN INDUKSI

Kecepatan motor induksi, dalam rpm, dapat dinyatakan sebagai:

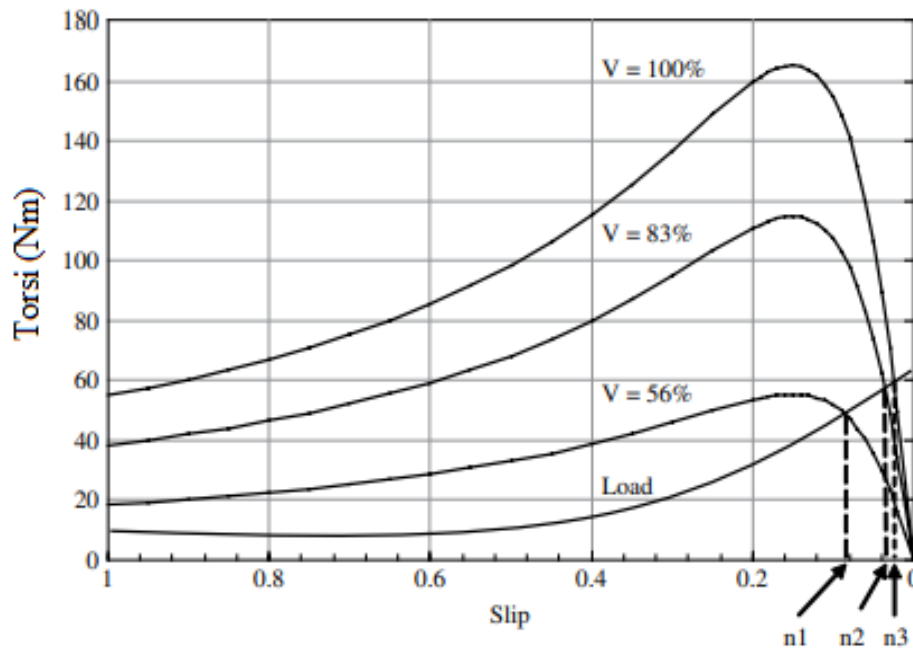
Persamaan 10.12

$$n = (1 - s)n_s = (1 - s) \frac{60f}{p}$$

Oleh karena itu, kita akan memiliki tiga pendekatan untuk mengubah kecepatan motor induksi: mengubah jumlah kutub, mengubah frekuensi, dan mengubah slip:

- 1) **Ubah jumlah kutub:** Belitan stator dirancang sedemikian rupa sehingga, dengan mengubah konfigurasi belitan, jumlah kutub akan berubah. Misalnya, beberapa motor induksi dirancang dengan kemampuan kutub 4/6, 6/8, atau 4/8. Meskipun perubahan jumlah kutub telah digunakan dalam mengendalikan kecepatan motor induksi di masa lalu, kini semakin jarang digunakan karena kerumitan konfigurasi belitan stator dan efisiensi yang rendah.
- 2) **Ubah frekuensi tegangan suplai:** Ini adalah metode paling populer untuk mengontrol kecepatan motor induksi dalam sistem penggerak modern, termasuk penggerak traksi. Ini akan dibahas secara lebih rinci di bagian selanjutnya.
- 3) **Ubah slip:** Karena torsi elektromagnetik motor induksi sangat erat kaitannya dengan slip seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 10.11, ada beberapa cara untuk mengubah slip untuk mengontrol kecepatan motor induksi:
 - a) **Mengubah besarnya tegangan suplai:** Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.6, saat tegangan diubah, kecepatan motor juga berubah. Namun, metode ini memberikan rentang kecepatan variabel terbatas karena torsi sebanding dengan kuadrat tegangan.
 - b) **Mengubah resistansi stator atau induktansi kebocoran stator:** Ini dapat dilakukan dengan menghubungkan resistor atau induktor secara seri dengan belitan stator.
 - c) **Ubah resistansi rotor atau induktansi kebocoran rotor:** Ini hanya berlaku untuk motor induksi rotor belitan.
 - d) **Terapkan tegangan eksternal ke belitan rotor:** Tegangan ini memiliki frekuensi yang sama dengan emf balik rotor atau arus rotor. Generator tenaga angin modern yang diberi makan ganda termasuk dalam kelompok ini. Metode ini hanya berlaku untuk motor induksi rotor belitan.

Ketika resistansi eksternal dirangkai seri dengan belitan stator atau rotor, ada kerugian yang terkait dengan resistor ini. Oleh karena itu efisiensi sistem terganggu. Ketika induktor eksternal dirangkai seri dengan stator atau rotor, faktor daya terganggu. Oleh karena itu, menambahkan resistansi atau induktansi tidak lagi menjadi metode yang populer dalam sistem penggerak listrik modern.



Gambar 10.6 Mengatur kecepatan motor induksi dengan memvariasikan tegangan terminal.

Frekuensi Variabel, Kontrol Tegangan Variabel Motor Induksi

Memvariasikan frekuensi catu daya sejauh ini merupakan metode paling efektif dan paling populer untuk menyesuaikan kecepatan motor induksi. Jika kita mengabaikan resistansi stator, induktansi bocor, dan rugi-rugi magnet, persamaan tegangan stator dapat ditulis sebagai:

Persamaan 10.13

$$V_s = E_s = k_s \omega \phi = k_s 2\pi f \phi$$

di mana k_s adalah konstanta mesin dan ϕ adalah fluks total. Oleh karena itu, ketika mengubah frekuensi, tegangan stator juga harus diubah secara proporsional untuk mempertahankan fluks yang relatif konstan sehingga inti stator dan rotor tidak jenuh, sedangkan torsi output dapat dipertahankan konstan,

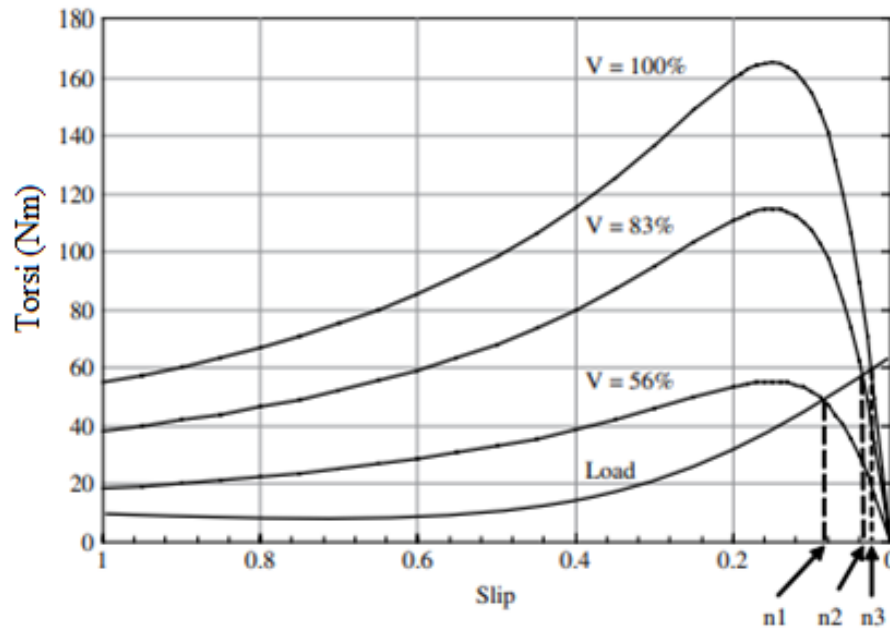
Persamaan 10.14

$$\frac{V_s}{f} = \text{Konstan}$$

Ketika frekuensi dan tegangan diatur, karakteristik torsi-kecepatan ditunjukkan pada Gambar 10.7. Meskipun ungkapan di atas umumnya benar, tiga pengamatan dapat dilakukan:

- 1) Untuk operasi frekuensi rendah, penurunan tegangan pada resistansi stator dan induktansi tidak lagi dapat diabaikan, sehingga tegangan stator harus ditingkatkan untuk mengimbangnya.
- 2) Kecepatan motor yang sesuai dengan frekuensi pengenal dan tegangan pengenal disebut kecepatan pengenal atau kecepatan dasar.
- 3) Ketika tegangan stator mencapai suplai pengenalnya (maksimum), untuk lebih meningkatkan frekuensi (atau kecepatan), fluks stator harus dikurangi untuk memenuhi Persamaan 10.13. Ini disebut sebagai operasi pelemahan fluks. Rasio kecepatan maksimum dengan kecepatan dasar pengenal motor didefinisikan sebagai

rentang kecepatan yang dapat disesuaikan, atau X. Motor induksi modern dapat mencapai hingga X = 5 rentang kecepatan yang dapat disesuaikan.



Gambar 10.7 Menyesuaikan kecepatan motor induksi menggunakan suplai frekuensi variabel. Dalam contoh ini, kecepatan pengenalnya adalah 6000 rpm, dan kecepatan maksimumnya adalah 12.000 rpm. Rentang kecepatan yang dapat disesuaikan X = 2.

10.6 EFISIENSI DAN KERUGIAN MESIN INDUKSI

Kerugian pada mesin induksi ditunjukkan pada Gambar 10.8. Rugi-rugi tersebut meliputi: (1) rugi-rugi tembaga pada belitan stator; (2) rugi magnet pada besi stator (atau rugi inti atau rugi besi); (3) rugi tembaga pada belitan rotor; (4) kerugian windage karena rotasi rotor dan kerugian gesekan pada bantalan; dan (5) rugi-rugi tambahan yang tidak dapat diperhitungkan oleh komponen-komponen tersebut di atas, disebut juga rugi tambahan atau rugi beban nyasar. Persamaan keseimbangan daya adalah:

Persamaan 10.15

$$\begin{aligned}
 P_{em} &= P_1 - P_{cu1} - P_{iron} \\
 P_{mec} &= P_{em} - P_{cu2} \\
 P_2 &= P_{mec} - P_{fw} - P_{ad}
 \end{aligned}$$

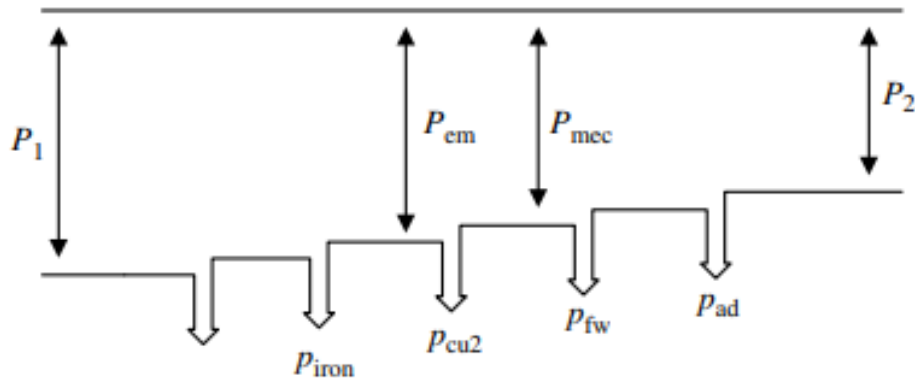
P_1 adalah daya input dari suplai tegangan; P_{em} adalah daya elektromagnetik yang ditransfer dari stator ke rotor; P_{mec} adalah total daya mekanik pada poros rotor; P_2 adalah daya output ke beban yang terhubung ke poros; p_{cu1} adalah kerugian tembaga dari belitan stator; p_{cu2} adalah kehilangan tembaga pada rotor; p_{iron} adalah kehilangan besi pada inti stator; p_{fw} adalah kerugian gesekan dan angin; dan p_{ad} adalah kehilangan beban nyasar. Efisiensi dapat dinyatakan sebagai:

Persamaan 10.16

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{cu1} + P_{iron} + P_{cu2} + P_{fw} + P_{ad}}$$

Salah satu aspek motor traksi untuk HEV modern adalah operasi kecepatan tinggi. Secara tradisional, lembaran baja silikon laminasi dirancang untuk digunakan pada frekuensi rendah

(50 atau 60 Hz), dan penggerak traksi saat ini biasanya beroperasi pada sekitar 6000–15.000 rpm. Dengan desain empat kutub, frekuensi operasi adalah 500 Hz. Beberapa motor traksi beroperasi pada frekuensi setinggi 800-1200 Hz. Karena rugi arus eddy dan rugi histeresis sebanding dengan frekuensi atau kuadrat frekuensi, rugi inti akan signifikan pada frekuensi tinggi. Untuk menjaga kerugian inti dalam kisaran yang wajar, fluks magnet pada besi harus relatif lebih rendah daripada yang digunakan pada motor kecepatan rendah, dan ketebalan lembaran baja silikon mungkin harus dikurangi juga.



Gambar 10.8 Rugi-rugi pada motor induksi

Aspek kedua adalah motor induksi yang dioperasikan inverter akan mengandung harmonik dalam tegangan dan arusnya. Harmonik ini akan menimbulkan kerugian tambahan pada belitan dan inti stator dan rotor. Seperti diketahui, rugi arus eddy dapat berlipat ganda pada banyak motor induksi karena suplai *pulse-width-modulated* (PWM). Kerugian tambahan ini dapat menyebabkan kenaikan suhu yang berlebihan yang harus dipertimbangkan selama desain dan analisis motor induksi

Rugi Tambahan pada Motor Induksi Karena Pasokan PWM

Untuk menganalisis kerugian tambahan pada motor induksi akibat operasi PWM, pertama-tama kita melihat bentuk gelombang PWM. Prinsip umum suplai PWM bipolar ditunjukkan pada Gambar 10.9, di mana bentuk gelombang segitiga (pembawa, V_{tri}) dari frekuensi switching f_c dibandingkan dengan sinyal kontrol ($V_{control}$) dari frekuensi dasar f_1 . Perpotongan dari dua bentuk gelombang menentukan titik switching perangkat daya. Rasio frekuensi switching f_c ke frekuensi dasar f_1 didefinisikan sebagai rasio modulasi frekuensi, $m_f = f_c/f_1$.

Rasio amplitudo bentuk gelombang kontrol $V_{control}$ dengan bentuk gelombang segitiga V_{tri} didefinisikan sebagai rasio modulasi amplitudo, $m_a = V_{control}/V_{tri}$. Ada banyak metode yang berbeda untuk menentukan titik switching, seperti aturan pengambilan sampel alami, pengambilan sampel reguler, dan aturan eliminasi harmonik yang dipilih. Aturan pengambilan sampel reguler simetris adalah metode dasar dalam pengambilan sampel. Titik sakelar dapat ditentukan dari Gambar 10.9 untuk metode pengambilan sampel ini:

Persamaan 10.17

$$\alpha_k = \frac{\pi}{2m_f} \left\{ 2k - 1 + \left(-1 \right)^k m_a \sin \left[\frac{(k+m)\pi}{m_f} \right] \right\} \quad k = 1, 2, \dots, 2m_f$$

ketika $(-1)^k = 1, \quad m = -1, \quad \text{ketika } (-1)^k = -1, \quad m = 0$

di mana α_k adalah titik peralihan. Tegangan output inverter berisi tegangan dasar dan tegangan harmonik frekuensi tinggi lainnya. Deret Fourier umum dari tegangan output dapat diberikan oleh :

Persamaan 10.18

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} v_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} v_n \sin(n\omega t + \phi_n)$$

di mana ω adalah frekuensi sudut fundamental, n adalah orde harmonik, V_n adalah amplitudo harmonik ke- n , a_n dan b_n adalah koefisien Fourier; ϕ_n adalah sudut fase dari harmonik ke- n , dan

Persamaan 10.19

$$a_n = \frac{V_{dc}}{n\pi} \sum_{k=1}^{2m_f} (-1)^k \sin(n\alpha_k)$$

Persamaan 10.20

$$b_n = \frac{V_{dc}}{n\pi} \sum_{k=1}^{2m_f} (-1)^k \cos(n\alpha_k)$$

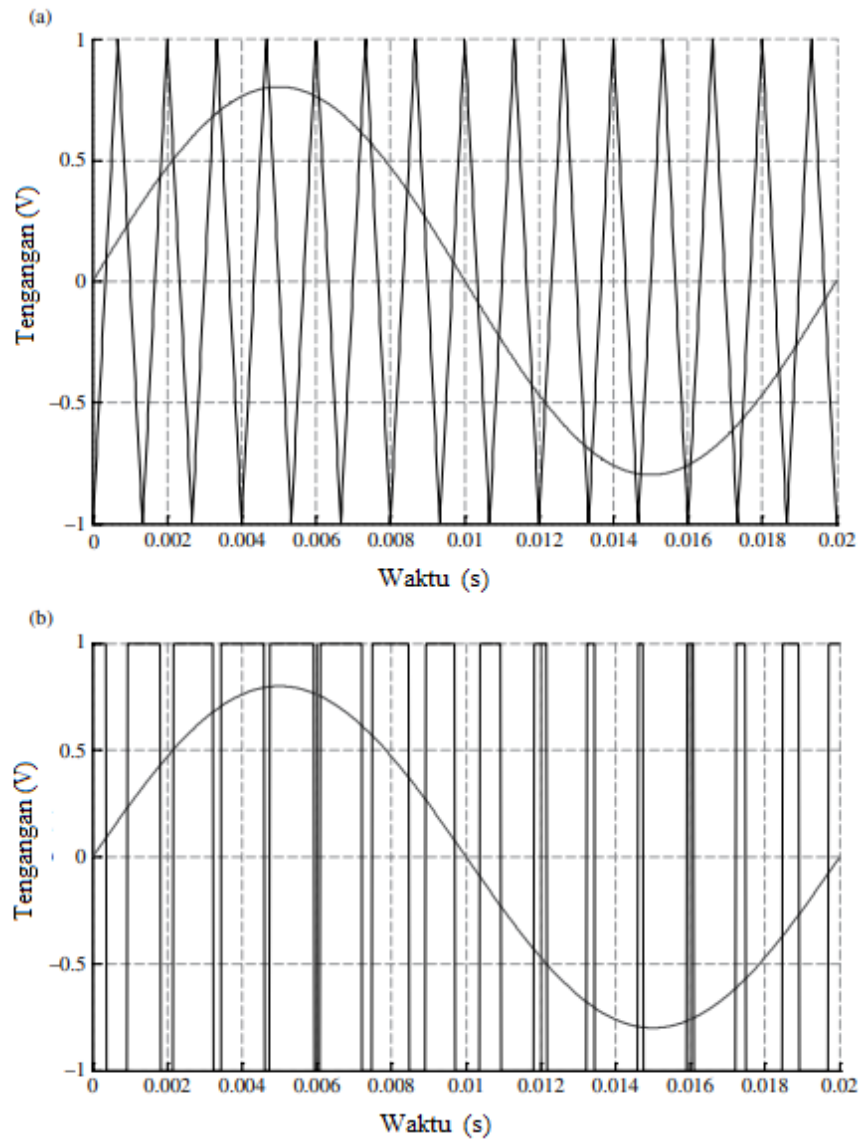
Persamaan 10.21

$$V_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} = \frac{V_{dc}}{n\pi} \sqrt{\left[\sum_{k=1}^{2m_f} (-1)^k \cos(n\alpha_k) \right]^2 + \left[\sum_{k=1}^{2m_f} (-1)^k \sin(n\alpha_k) \right]^2}$$

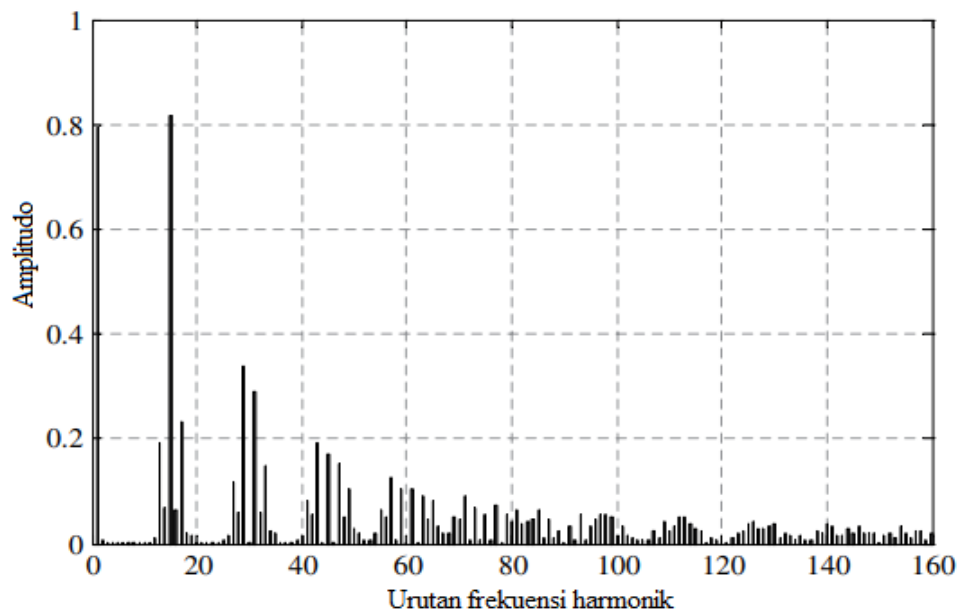
Persamaan 10.22

$$\phi_n = \arctan\left(\frac{b_n}{a_n}\right)$$

di mana V_{dc} adalah tegangan tautan Dc



Gambar 10.9 Prinsip suplai PWM bipolar ($m_a = 0,8$, $m_f = 15$, $f_1 = 50$ Hz): (a) bentuk gelombang pembawa V_{tri} dan bentuk gelombang kontrol $V_{control}$; (b) output PWM dan komponen dasarnya.



Gambar 10.10 Analisis frekuensi harmonik tegangan keluaran.

Menurut Persamaan 10.21, amplitudo harmonik tergantung pada tegangan hubungan DC dan V_{dc} , urutan bentuk gelombang harmonik n , dan titik switching k . Titik switching ini ditentukan dari rasio modulasi frekuensi m_f dan rasio modulasi amplitudo m_a . Gambar 10.10 menunjukkan spektrum harmonik bentuk gelombang output PWM untuk $m_f = 15$ dan $m_a = 0,8$. Gelombang output PWM berisi harmonik terkait frekuensi pembawa dengan pita samping terkait frekuensi modulasi dalam bentuk $mf_c \pm nf_1$, di mana m dan n adalah bilangan bulat dan $m + n$ adalah bilangan bulat ganjil. P_{iron} kerapatan kehilangan besi total umumnya dinyatakan dalam bentuk berikut untuk kerapatan fluks magnet sinus soidal yang bervariasi B dengan frekuensi sudut ω :

Persamaan 10.23

$$P_{iron} = P_h + P_c = k_h B^\beta \omega + k_c B^2 \omega^2 \left(\frac{W^3}{m} \right)$$

di mana p_h dan p_c masing-masing adalah rapat rugi histeresis dan rapat rugi arus eddy klasik, k_h dan k_c masing-masing adalah konstanta arus histeresis dan pusaran, dan β adalah konstanta Steinmetz – semuanya bergantung pada bahan laminasi. Karena peningkatan rugi-rugi besi yang besar dalam kasus suplai PWM terutama disebabkan oleh kenaikan rugi-rugi arus eddy, bagian ini akan fokus pada analisis rugi-rugi arus eddy.

Persamaan 10.23 hanya berlaku untuk kerapatan fluks di bawah kondisi perubahan waktu sinusoidal. Di bawah pasokan PWM, ada banyak komponen kerapatan fluks harmonik frekuensi tinggi. Dengan asumsi material linier, amplitudo harmonik kerapatan fluks sebanding dengan amplitudo harmonik tegangan. Sehingga komponen harmonik dari output tegangan PWM dapat dianalisa, dan dapat dihitung rugi-rugi arus eddy dari masing-masing komponen harmonik. Meskipun asumsi tersebut tidak sesuai dengan sifat magnetik bahan inti, mengingat tujuannya di sini adalah untuk membandingkan rugi-rugi besi yang dipengaruhi oleh suplai PWM, kesalahan absolut yang disebabkan oleh asumsi tersebut tidak mempengaruhi hasil akhir. Untuk memberikan gambaran yang jelas tentang kerugian besi yang terkait dengan parameter PWM, fase tunggal digunakan. Di bawah kondisi tanpa beban (rotor berliku kondisi sirkuit terbuka), persamaan rangkaian adalah:

Persamaan 10.24

$$v(t) = e(t) + i(t)R + L_\sigma \frac{di(t)}{dt}$$

di mana $v(t)$ adalah tegangan yang diberikan, $e(t)$ adalah emf balik, $i(t)$ adalah arus, L_σ adalah induktansi bocor belitan stator, dan R adalah resistansi belitan stator. Ketika mengabaikan penurunan tegangan pada resistor berliku R dan induktansi bocor L_σ ,

Persamaan 10.25

$$v(t) \approx e(t) = N_1 \frac{d\Phi(t)}{dt} = N_1 A \frac{dB(t)}{dt}$$

di mana N_1 adalah jumlah lilitan belitan dan A adalah luas penampang inti. Di bawah asumsi material linier, kerapatan fluks adalah:

Persamaan 10.26

$$B(t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos(n\omega t + \varphi_n)$$

di mana B_n adalah kerapatan fluks dari harmonik ke- n :

Persamaan 10.27

$$B_n = \frac{V_n}{N_1 A n \omega}$$

Rugi arus eddy kemudian dapat diperoleh dengan mensubstitusi Persamaan 10.27 ke Persamaan 10.23:

Persamaan 10.29

$$\begin{aligned} p_c &= \sum_{n=1}^{\infty} p_n = \sum_{n=1}^{\infty} k_c B_n^2 (n\omega)^2 = \sum_{n=1}^{\infty} k_n \left(-\frac{V_n}{N_1 A n \omega} \right)^2 (n\omega)^2 \\ &= \frac{k_c}{(N_1 A)^2} \sum_{n=1}^{\infty} (V_n)^2 \end{aligned}$$

Menggabungkan Persamaan 10.18 dan 10.26, kerugian arus eddy dapat diturunkan sebagai:

Persamaan 10.29

$$p_c = \frac{k_c}{(N_1 A \pi)^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{V_{dc}}{n} \right)^2 \left\{ \left[\sum_{\infty}^{k=1} (-1)^k \cos(n\alpha_k) \right]^2 + \left[\sum_{\infty}^{k=1} (-1)^k \sin(n\alpha_k) \right]^2 \right\}$$

Persamaan 10.30

$$p_c = K \sum_{\infty}^{n=1} \left(\frac{V_{dc}}{n} \right)^2 \left\{ \left[\sum_{2r}^{k=1} (-1)^k \cos(n\alpha_k) \right]^2 + \left[\sum_{2r}^{k=1} (-1)^k \sin(n\alpha_k) \right]^2 \right\}$$

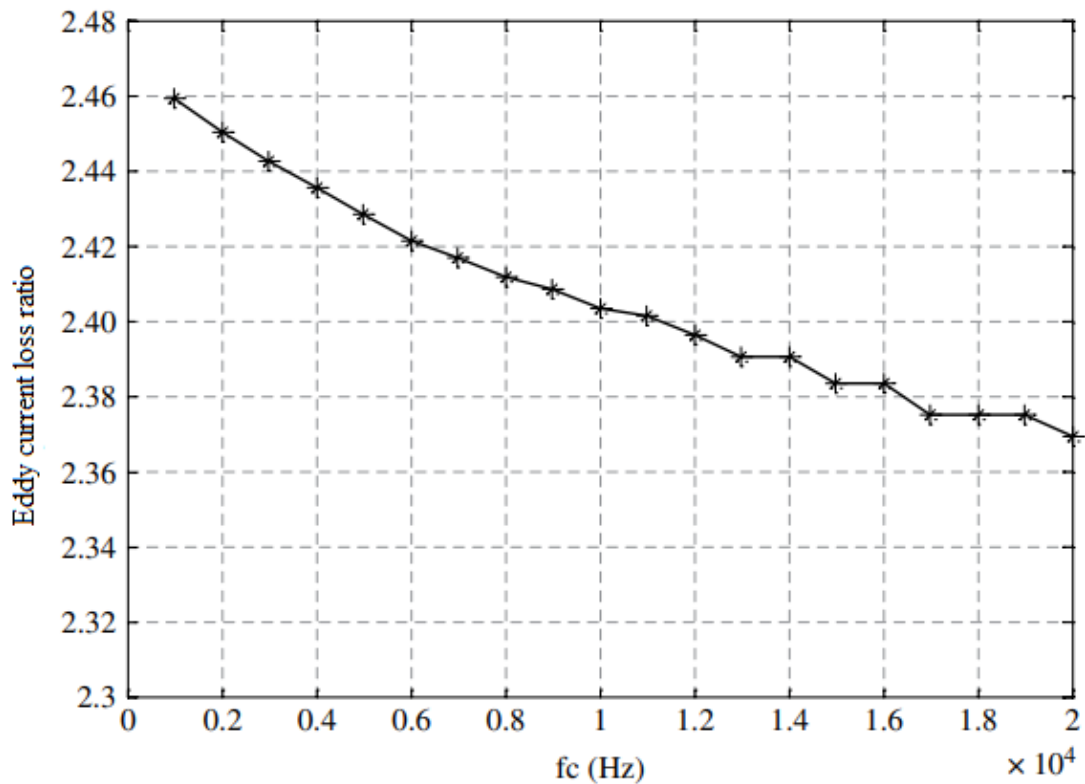
di mana

$$k = \frac{K_c}{(n_1 a \pi)^2}$$

Dari persamaan di atas, dapat disimpulkan bahwa rugi arus eddy berhubungan dengan amplitudo harmonik fundamental dan harmonik orde tinggi lainnya. Selanjutnya terkait dengan titik switching k dan tegangan link DC V_{dc} . Titik switching k terkait dengan metode pengambilan sampel titik switching. Jika metode pengambilan sampel reguler diadopsi, α_k ditentukan oleh rasio modulasi frekuensi dan rasio modulasi amplitudo. Setiap komponen harmonik akan memberikan kontribusi terhadap rugi-rugi arus eddy total. Menurut gambar 10.10, tegangan dasar dan harmonik pada frekuensi switching lebih berkontribusi pada rugi arus eddy.

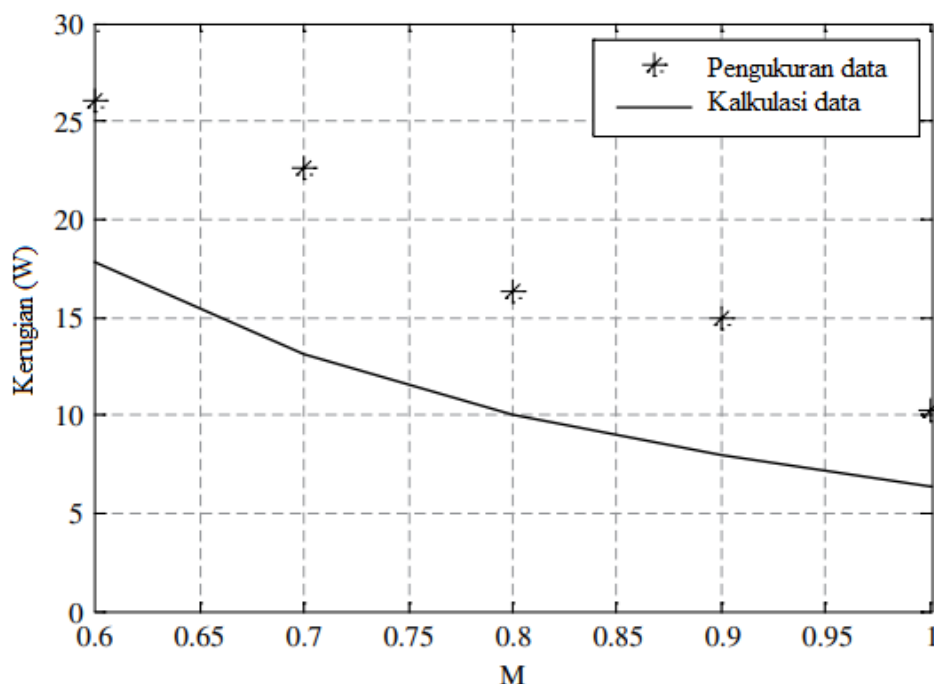
Gambar 10.11 menunjukkan rugi-rugi arus eddy versus frekuensi switching untuk motor induksi, di mana rasio rugi-rugi arus eddy didefinisikan sebagai rugi-rugi dari suplai PWM ke hilangnya suplai sinusoidal. Dapat dilihat bahwa rugi arus eddy lebih dari dua kali lipat dengan suplai PWM. Gambar 10.12 menunjukkan rugi-rugi besi dari motor induksi 2 kW, 208 V ketika dioperasikan pada 80 V sehubungan dengan rasio modulasi (tegangan bus DC

disesuaikan untuk mempertahankan tegangan dasar pada 80 V). Dapat dilihat bahwa kehilangan besi meningkat dengan pengurangan rasio modulasi. Kehilangan besi meningkat ketika rasio modulasi amplitudo menurun.

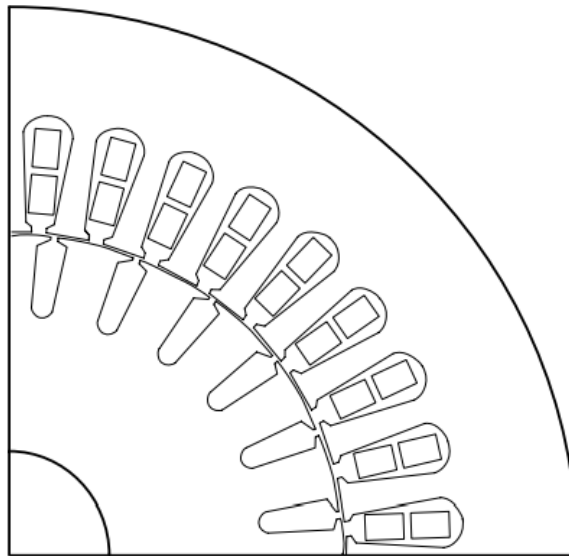


Gambar 10.11 Rasio rugi arus Eddy vs frekuensi switching pada $m_a = 0,9$.

Sebuah percobaan dilakukan pada motor induksi 3 hp. Motornya adalah motor induksi tiga fase empat kutub, 60 Hz, 208 V, terhubung-Y. Gambar 10.13 menunjukkan penampang mesin. Mesin ini memiliki belitan stator tiga fase berlapis ganda, dengan 36 slot di stator dan 24 slot di rotor.

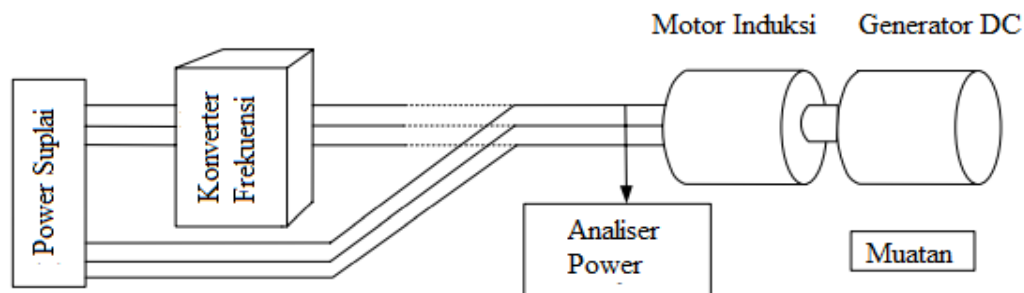


Gambar 10.12 Pengaruh rasio modulasi amplitudo pada rugi-rugi besi PWM motor induksi untuk motor induksi 2 hp.



Gambar 10.13 Induksi eksperimental motor

Bangku percobaan ditunjukkan pada Gambar 10.14, yang meliputi catu daya, inverter PWM unipolar, penganalisis daya, motor induksi, generator DC (sebagai beban), dan beban elektronik DC yang terhubung ke output generator DC. Garis tebal menunjukkan bahwa motor induksi dioperasikan oleh suplai sinusoidal secara langsung dan garis putus-putus menunjukkan bahwa motor ini digerakkan oleh inverter PWM. *Power analyzer* digunakan untuk menangkap tegangan saluran dan arus fasa.



Gambar 10.14 Meja percobaan.

Daya input motor induksi dapat diperoleh langsung dari power analyzer. Tes tanpa beban dan beban dilakukan. Selain itu, pengujian tanpa beban dengan frekuensi dasar 60 Hz dan frekuensi switching antara 3,5 hingga 9 kHz dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh frekuensi switching pada rugi-rugi tambahan. Untuk memahami mekanisme kerugian tambahan dan dampaknya pada suhu, model elemen hingga (FEM) dua dimensi (2D) dikembangkan untuk menghitung kerugian. Model FEM tiga dimensi (3D) dibuat untuk memperkirakan profil termal di dalam motor.

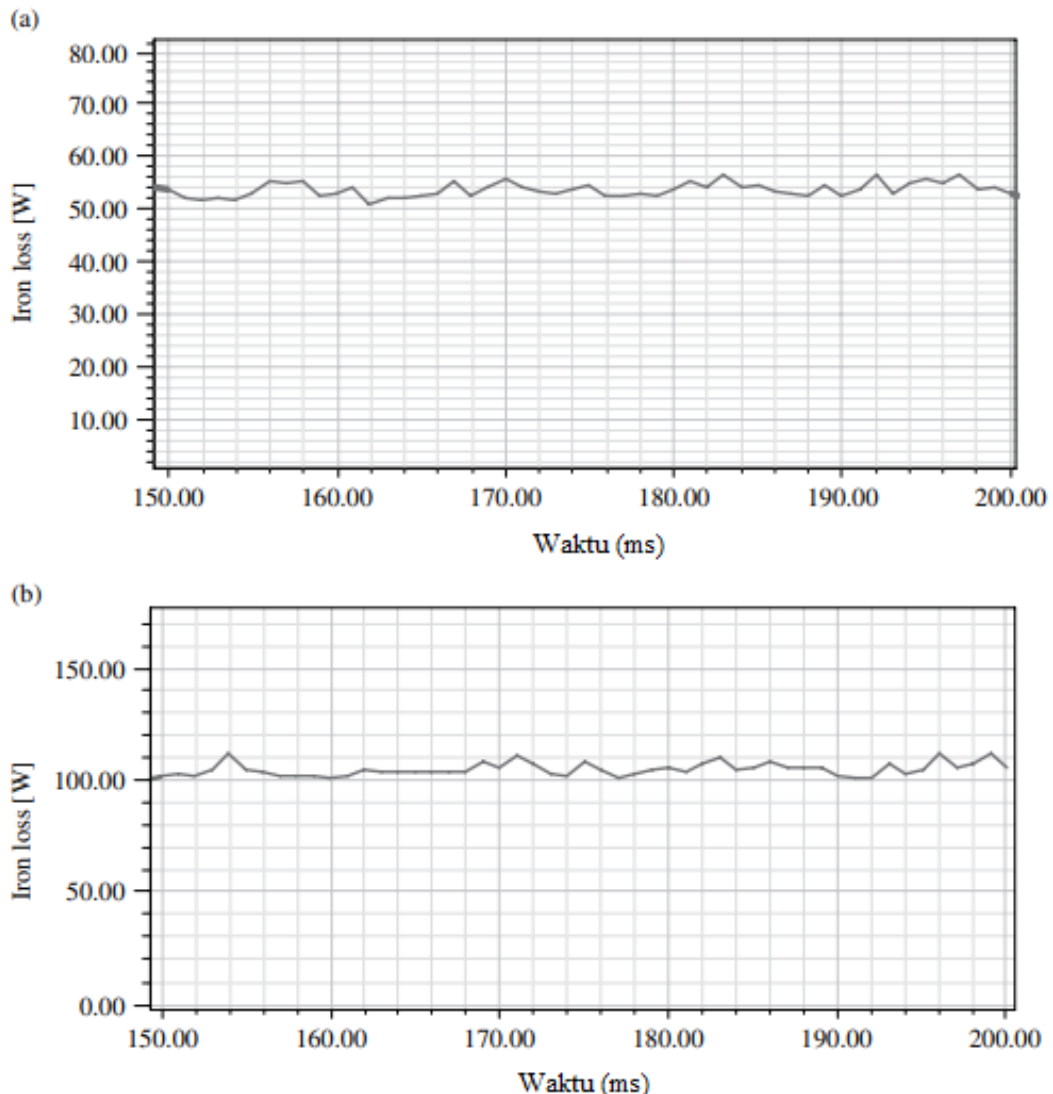
Rugi-rugi besi yang disimulasikan masing-masing ditunjukkan pada Gambar 10.15 dan 10.16 untuk suplai sinusoidal dan PWM. Pada operasi tanpa beban, rugi besi dengan suplai PWM adalah 104 W, meningkat 48,2 W dibandingkan rugi besi saat dioperasikan dari suplai sinusoidal (55,8 W). Namun, ketika motor dihubungkan ke beban, rugi-rugi besi tambahan diinduksi oleh harmonik pada suplai PWM, dengan rugi-rugi besi pada 139,1 W atau hanya 31,1 W lebih besar daripada rugi-rugi besi sinusoidal (108 W). Semua kerugian dari simulasi dan eksperimen masing-masing tercantum dalam Tabel 10.1 dan 10.2.

Hasil pengujian konsisten dengan hasil simulasi pada frekuensi switching tetap. Untuk memahami dampak frekuensi switching pada kerugian tambahan, pengujian telah dilakukan dengan menggunakan beberapa frekuensi switching yang berbeda (3,5-9 kHz) untuk inverter

PWM. Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 10.17. Total kerugian menurun secara proporsional dengan peningkatan frekuensi, yang konsisten dengan pekerjaan sebelumnya.

Dengan menetapkan semua kerugian ke dalam model 3D FEM dan menggabungkan kondisi batas yang diperlukan berdasarkan model motor yang sebenarnya, profil suhu dapat diperoleh. Gambar 10.18 menunjukkan distribusi temperatur pada stator tanpa beban pada suplai sinusoidal. Tabel 10.3 dan 10.4 menunjukkan suhu keseluruhan motor, dan lokasi titik uji seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.19 kecuali titik 1, yang berada di tengah rumah permukaan luar.

Dapat dilihat dari Tabel 10.3 dan 10.4 bahwa kenaikan suhu motor induksi secara signifikan lebih tinggi ketika digerakkan oleh inverter PWM daripada oleh catu daya sinusoidal. Kesimpulannya, untuk desain motor induksi, penting untuk mempertimbangkan kerugian tambahan yang dihasilkan karena harmonik pada suplai PWM dan kemungkinan kenaikan suhu yang berlebihan di dalam mesin. Perhatian ekstra perlu dilakukan dalam aplikasi yang mengalami rentang suhu sekitar yang luas, seperti yang digunakan di HEV.



Gambar 10.15 Rugi besi dari simulasi untuk suplai sinusoidal: (a) tanpa beban dan (b) dengan beban

Kontrol Berorientasi Lapangan dari Mesin Induksi

Dengan kontrol berorientasi lapangan, mesin induksi dapat bekerja seperti mesin DC. Bagian ini menjelaskan teori dan implementasi kontrol berorientasi medan pada mesin induksi.

Jika dinyatakan dalam fasor, persamaan tegangan untuk mesin induksi tiga fasa dengan tiga belitan stator simetris diberikan sebagai:

Persamaan 10.31

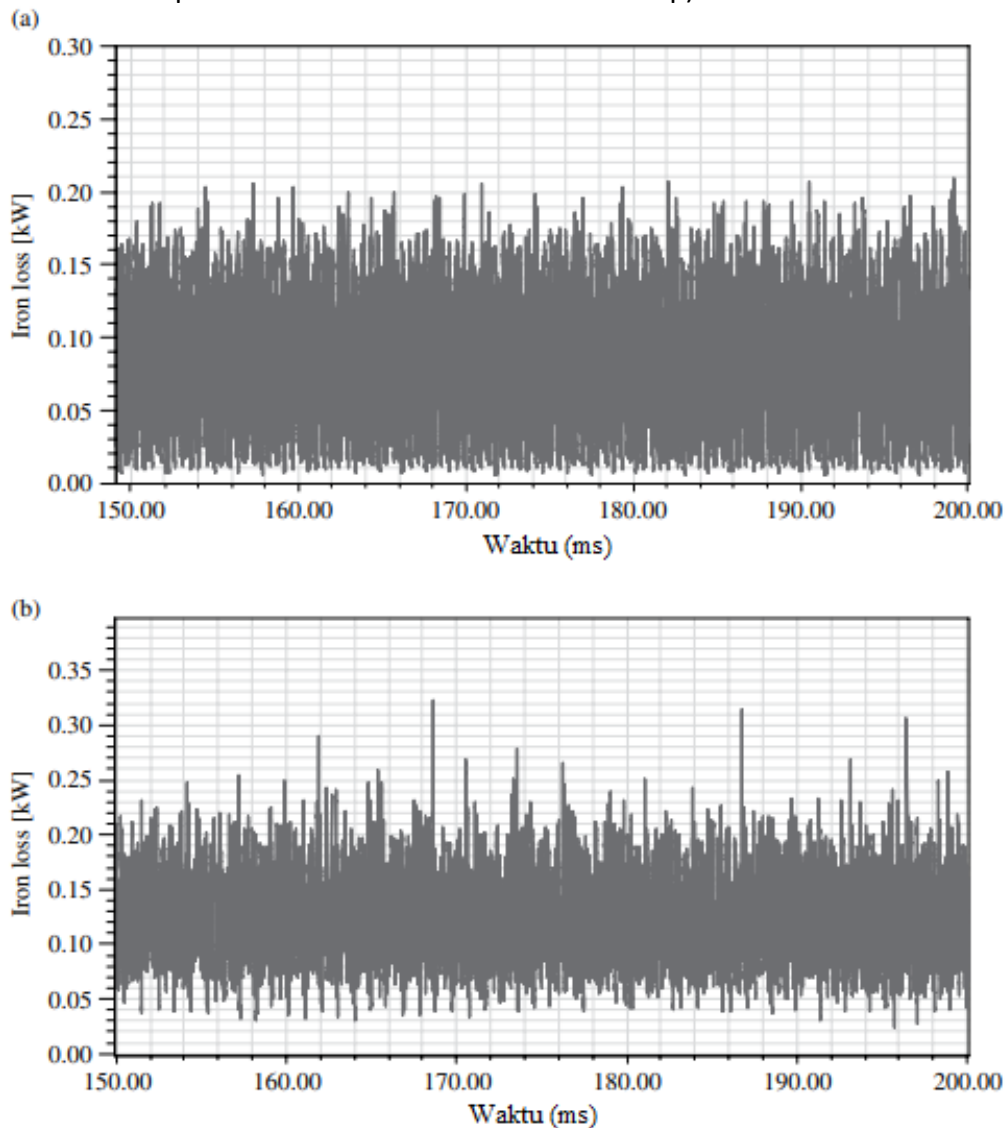
$$V_S = R_S i_S + P \lambda_S$$

Persamaan 10.32

$$V_R = R_R i_R + P \lambda_R$$

di mana p adalah operan diferensial d/dt , dan V , i , dan λ masing-masing adalah fasor hubungan tegangan, arus, dan fluks. Subscript S berkaitan dengan jumlah stator dan R mengacu pada kuantitas rotor.

Persamaan 10.31 dan 10.32 masing-masing dinyatakan dalam koordinat stator dan rotor. Oleh karena itu, rangka stator S adalah stasioner dan rangka rotor R adalah rotasi (jumlah rotor berada pada frekuensi rotor atau frekuensi slip).



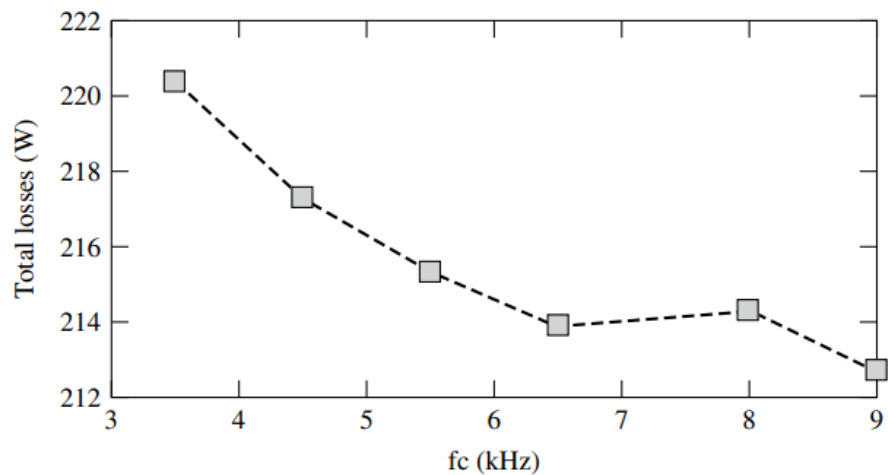
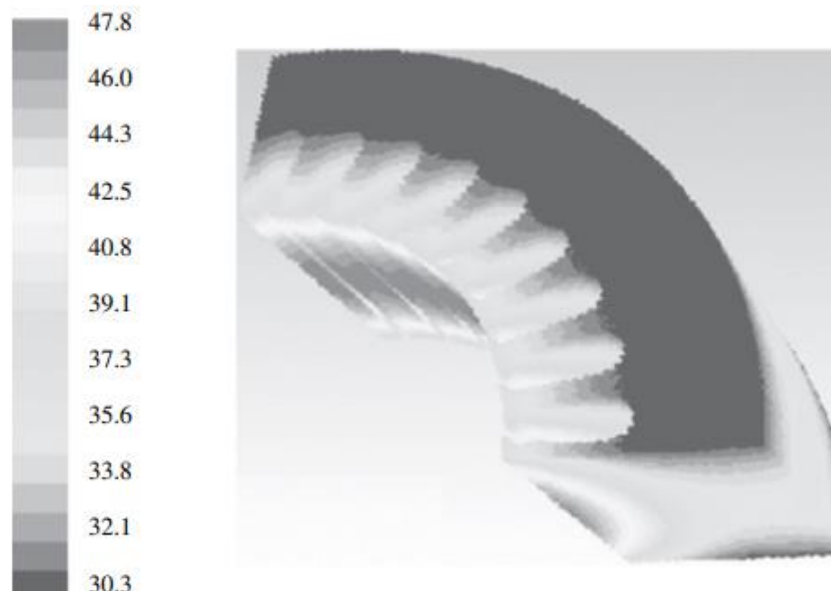
Gambar 10.16 Rugi-rugi PWM dari simulasi: (a) tanpa beban dan (b) dengan beban.

Tabel 10.1 Kerugian dari simulasi.

	No load (W)		Load (W)	
	PWM	Sinusoidal	PWM	Sinusoidal
Iron loss	88.5	53.9	130.0	118.6
Copper loss	139.5	50.1	150.1	113.7

Tabel 10.2 Kerugian dari eksperimen

	No load (W)		Load (W)	
	PWM	Sinusoidal	PWM	Sinusoidal
Iron loss	104	55.8	139.1	108
Copper loss	133.7	58.8	148.9	124.5

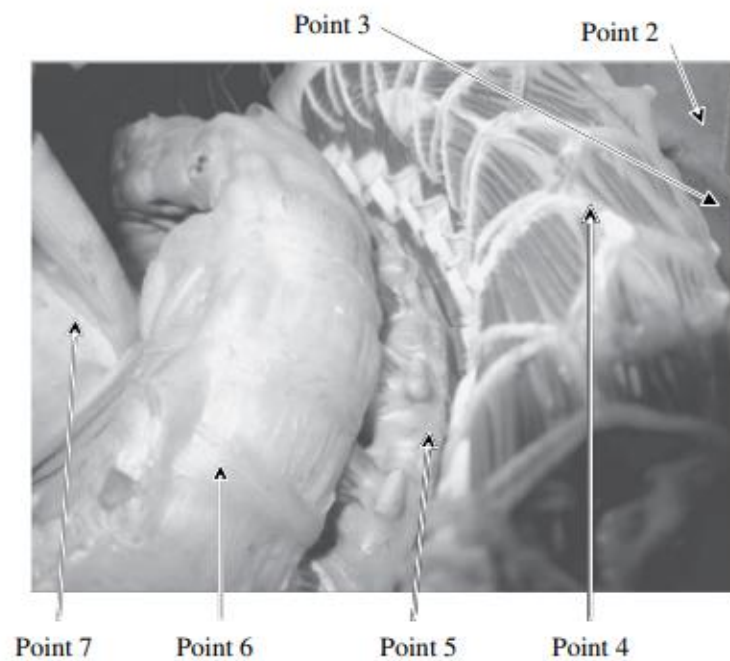
**Gambar 10.17** Rugi dengan frekuensi switching yang berbeda.**Gambar 10.18** Distribusi temperatur pada stator.

Tabel 10.3 Profil suhu tanpa beban.

	Eksperimen (°C)		Simulasi (°C)	
Poin 1	31.4	40.9	30.3	37.3
Poin 2	36.9	42.4	34.7	38.7
Poin 3	38.2	47.1	35.6	45.6
Poin 4	39.5	52.7	36.3	49.3
Poin 5	40.2	51.1	43.3	47.3
Poin 6	39.6	49.7	34.4	45.4
Poin 7	50.8	55.7	53.6	53.6

Tabel 10.4 Profil suhu dengan beban.

	Eksperimen (°C)		Simulasi (°C)	
Poin 1	34.2	41.8	32.7	37.7
Poin 2	41.4	47.8	37.9	42.9
Poin 3	47	52.8	44.6	50.6
Poin 4	50.8	57.2	49.7	53.7
Poin 5	60.5	63.9	55.5	56.3
Poin 6	59.9	63.3	52.3	55.3
Poin 7	67.6	71.7	63.6	66.7

**Gambar 10.19** Tampak dalam dari motor percobaan

Misalkan ada bingkai B, dan sudut antara stator dan bingkai B ini adalah δ , oleh karena itu sudut antara rotor dan bingkai ini adalah $(\delta-\theta)$. Mengalikan Persamaan 10.31 dengan $e^{-j\delta}$ dan Persamaan 10.32 dengan $e^{-j(\delta-\theta)}$, kita dapatkan:

Persamaan 10.33

$$\begin{aligned} V_S * e^{-j\delta} &= R_S i_S * e^{-j\delta} + P \lambda_S * e^{-j\delta} \\ V_R * e^{-j(\delta-\theta)} &= R_R i_R * e^{-j(\delta-\theta)} + P \lambda_R * e^{-j(\delta-\theta)} \end{aligned}$$

Diketahui

Persamaan 10.34

$$\begin{aligned} V_S^{(B)} &= V_S x e^{-j\delta}, & V_R^{(B)} &= V_R x e^{-j(\delta-\theta)} \\ i_S^{(B)} &= i_S x e^{-j\delta}, & i_R^{(B)} &= i_R x e^{-j(\delta-\theta)} \\ \lambda_S^{(B)} &= \lambda_S x e^{-j\delta}, & \lambda_R^{(B)} &= \lambda_R x e^{-j(\delta-\theta)} \end{aligned}$$

Dengan menggunakan persamaan

Persamaan 10.35

$$P(\lambda_S^{(B)}) = P(\lambda_S * e^{-j\delta}) = -j * \lambda_S(P\delta) * e^{-j\delta} + P \lambda_S * e^{-j\delta}$$

atau

Persamaan 10.36

$$P \lambda_S * e^{-j\delta} = P(\lambda_S^{(B)}) + j * \lambda_S(P\delta) * e^{-j\delta}$$

Persamaan 10.37

$$P \lambda_R * e^{-j(\delta-\theta)} = P(\lambda_R^{(B)}) + j * \lambda_R e^{-j\delta} P(\delta - \theta)$$

Persamaan 10.31 dan 10.32 kemudian dapat ditransfer ke kerangka umum B, di mana semua fasor ruang dinyatakan dalam kerangka B dengan superskrip (B) seperti yang ditunjukkan di bawah ini:

Persamaan 10.38

$$V_S^{(B)} = R_S i_S^{(B)} + p \lambda_S^{(B)} + j * \lambda_S^{(B)} p \delta$$

Persamaan 10.39

$$V_R^{(B)} = R_R i_R^{(B)} + p \lambda_R^{(B)} + j * \lambda_R^{(B)} p(\delta - \theta)$$

Superscript (B) akan dihilangkan lebih lanjut di bagian ini untuk kenyamanan. Ketika dinyatakan dalam fasor, hubungan fluks dapat dinyatakan sebagai:

Persamaan 10.40

$$\lambda_S = (L_m + L_{1\sigma}) * i_S + L_m * i_R$$

Persamaan 10.41

$$\lambda_R = L_m * i_S + (L_m + (L_m + L_{2\sigma})) * i_R$$

di mana L_m adalah induktansi stator dan $L_{1\sigma}$ dan $L_{2\sigma}$ masing-masing adalah induktansi kebocoran stator dan rotor. Perhatikan bahwa meskipun fasor berada dalam bingkai yang berbeda, fluks stator dan fluks rotor berputar pada kecepatan yang sama. Untuk mesin induksi sangkar tupai, arus rotor i_R tidak dapat diakses. Oleh karena itu, arus magnetisasi rotor fiktif i_{mr} didefinisikan sedemikian rupa sehingga fluks rotor dapat dinyatakan dalam arus magnetisasi rotor fiktif ini dan induktansi stator dalam dengan cara yang sama seperti pada Persamaan 10.40:

Persamaan 10.42

$$\lambda_R = i_{mr} * L_m$$

Arus rotor kemudian dapat dinyatakan sebagai fungsi dari arus magnetisasi dan arus stator dari Persamaan 10.41:

Persamaan 10.43

$$i_R = \frac{i_{mr} - i_S}{1 + \sigma}$$

dimana

Persamaan 10.44

$$\sigma = \frac{L_{2\sigma}}{L_m}$$

Substitusi Persamaan 10.42 dan 10.43 ke Persamaan 10.41 dan mengingat bahwa V_R biasanya diatur ke 0 untuk motor induksi sangkar tupai, persamaan rotor dapat ditulis ulang sebagai

Persamaan 10.45

$$0 = i_{mr} - i_S + T_r * p i_{mr} + j * T_r * i_{mr} * p(\delta - \theta)$$

di mana T_r adalah konstanta waktu rotor yang dapat dinyatakan sebagai

Persamaan 10.46

$$T_r = \frac{L_m(1 + \sigma)}{R_R}$$

Sebagaimana dinyatakan di atas, arus magnetisasi rotor adalah arus fiktif. Besarnya arus ini dapat diamati melalui pendekatan berikut. Jika persamaan rotor ditulis dalam rangka stator maka $\delta = 0$, $p\theta$ sama dengan kecepatan rotor ω , dan Persamaan 10.45 memiliki bentuk sebagai berikut:

Persamaan 10.47

$$0 = i_{mr} - i_S + T_r * p i_{mr} - j * T_r i_{mr} * \omega$$

Karena persamaan ini ditulis dalam kerangka stator, kita dapat menemukan komponen α dan β dari fasor i_S dan i_{mr} :

Persamaan 10.48

$$\begin{aligned} i_s &= i_{s\alpha} + j i_{s\beta} \\ i_{mr} &= i_{mr\alpha} + j i_{mr\beta} \end{aligned}$$

Oleh karena itu Persamaan 10.47 menjadi

Persamaan 10.49

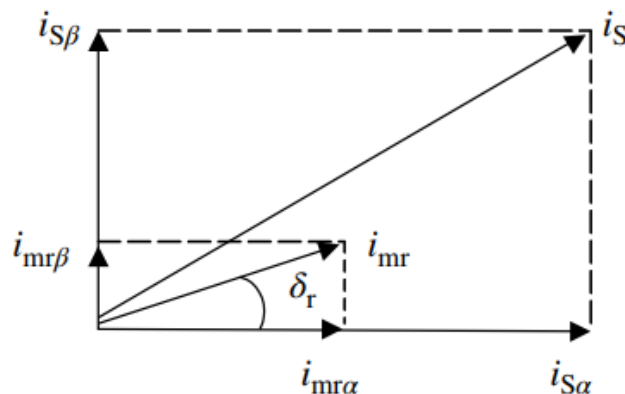
$$\begin{aligned} \frac{di_{mr\alpha}}{dt} &= \frac{1}{T_r} (i_{s\alpha} - i_{mr\alpha}) - i_{mr\beta} * \omega \\ \frac{di_{mr\beta}}{dt} &= \frac{1}{T_r} (i_{s\beta} - i_{mr\beta}) - i_{mr\alpha} * \omega \end{aligned}$$

dapat diimplementasikan secara diskrit dalam domain waktu, sehingga $i_{mr\alpha}$ dan $i_{mr\beta}$ dapat diamati. Setelah ini dilakukan, i_{mr} dan δ_r akhirnya dapat dihitung:

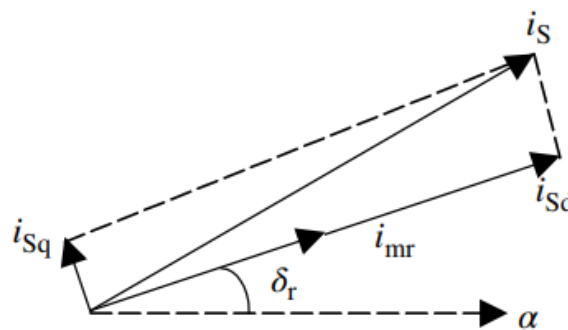
Persamaan 10.50

$$i_{mr} = \sqrt{i_{mr\alpha}^2 + i_{mr\beta}^2}, \cos(\delta_r) = \frac{i_{mr\alpha}}{i_{mr}}, \sin(\delta_r) = \frac{i_{mr\beta}}{i_{mr}}$$

di mana δ_r adalah sudut antara arus fiktif i_{mr} dan arus stator $i_{s\alpha}$ seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.20.



Gambar 10.20 Arus stator dan rotor pada koordinat α, β



Gambar 10.21 Arus stator pada koordinat d, q dan α, β .

Jika frame dipilih sedemikian rupa sehingga B sejajar dengan λR seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.21, i_{mr} hanya akan memiliki komponen real. Oleh karena itu persamaan rotor ini kemudian dapat didekomposisi menjadi komponen langsung dan kuadratnya sebagai:

Persamaan 10.51

$$\begin{aligned}i_{sd} &= i_{sa} \cos(\delta_r) + i_{s\beta} \sin \delta_r \\i_{sq} &= i_{sa} \sin(\delta_r) + i_{s\beta} \cos \delta_r\end{aligned}$$

Dari Persamaan 10.45, ketika i_s didekomposisi menjadi komponen d, q, persamaan tersebut dapat ditulis sebagai:

Persamaan 10.52

$$i_{mr} - i_{sd} + T_r * p i_{mr} = 0$$

Persamaan 10.53

$$-i_{sq} + T_r * i_{mr} * p(\delta - \theta) = 0$$

Dari Persamaan 10.52 terlihat bahwa i_{mr} hanya berhubungan dengan i_{sd} . Oleh karena itu, i_{mr} dapat dikendalikan dengan mengendalikan i_{sd} . Torsi pada mesin adalah:

Persamaan 10.54

$$T_q = \frac{3}{2} * \frac{p}{2} * (\lambda_s x i_s)$$

yang harus diseimbangkan dengan beban dan torsi percepatan:

Persamaan 10.55

$$T_q = T_L + J * p\omega$$

di mana T_q adalah torsi yang dikembangkan dan T_L adalah torsi beban; ω adalah kecepatan sudut motor. Jika θ adalah sudut antara stator dan rotor, maka $\omega = p\theta$. Dapat juga dibuktikan bahwa i_{sq} berhubungan langsung dengan torsi motor sebagai berikut. Dengan mensubstitusi i_s dan i_r ke dalam torsi dalam Persamaan 10.54, torsi dapat diturunkan:

Persamaan 10.56

$$T_q = \frac{3}{2} * \frac{p}{2} * \frac{L_s}{1 + \sigma} i_{mr} i_{sq}$$

Arus magnetisasi i_{mr} dapat dikontrol dengan mengontrol komponen nyata dari arus stator, dan kontrol torsi dicapai dengan mengontrol komponen imajiner dari arus stator. Untuk kemudahan penerapan kontrol, kita akan memperkenalkan sistem per unit. Sistem per unit pada dasarnya adalah sistem parameter tak berdimensi yang terjadi dalam himpunan persamaan tak berdimensi seluruhnya atau sebagian. Sistem semacam ini secara ekstensif dapat menyederhanakan fenomena masalah.

Parameter mesin berada dalam kisaran numerik sempit yang masuk akal ketika dinyatakan dalam sistem per unit yang terkait dengan peringkatnya dan oleh karena itu ini sangat berguna dalam mensimulasikan sistem mesin dan menerapkan kontrol mesin listrik oleh komputer digital. Umumnya, daya pengenal dan frekuensi dapat dipilih masing-masing sebagai nilai dasar daya dan frekuensi untuk normalisasi, sedangkan nilai puncak arus fasa pengenal dan tegangan fasa dapat dipilih masing-masing sebagai nilai dasar arus dan tegangan. Nilai dasar yang diturunkan dari impedansi, induktansi, dan kebocoran fluks adalah sebagai berikut (dengan subskrip B menunjukkan variabel sebagai nilai dasar):

Persamaan 10.57

$$\begin{aligned} Z_B &= \frac{V_B}{I_B} \\ L_B &= \frac{Z_B}{\omega_B} \\ \lambda_B &= L_B I_B \end{aligned}$$

Torsi yang dinormalisasi dapat dinyatakan sebagai

Persamaan 10.58

$$T_{qB} = \frac{3p}{2} \lambda_B I_B = \frac{3p}{2} L_B I_B^2$$

Persamaan torsi kemudian dapat dinormalisasi. Membagi Persamaan 10.56 dengan Persamaan 10.58, kita dapatkan

Persamaan 10.59

$$T_q^* = \frac{1}{1 + \sigma} \frac{L_S}{L_B} \frac{i_{mr}}{I_B} \frac{i_{sq}}{I_B} \frac{L_S^*}{1 + \sigma} i_{mr}^* i_{sq}^*$$

Superscript * menyumbangkan nilai yang dinormalisasi. Untuk kenyamanan, superscript * akan dihilangkan dalam derivasi lebih lanjut. Untuk menerapkan strategi pengendalian tersebut, perlu dikembangkan suatu teknik untuk mengidentifikasi besarnya arus magnetisasi i_{mr} dan sudut δ_r .

Ada dua cara untuk mengimplementasikan pengamat fluks dari Persamaan 10.49. Salah satu caranya adalah dengan mengambil transformasi Laplace dari Persamaan 10.49 dan menerapkan transformasi bilinear untuk mengubah transformasi Laplace menjadi transformasi z. Transformasi z terbalik dapat digunakan untuk mendapatkan $i_{mr\alpha}$ dan $i_{mr\beta}$ dalam domain waktu diskrit. Metode alternatif adalah dengan mendiskritisasi Persamaan 10.49 secara langsung dalam domain waktu. Dengan asumsi waktu sampel adalah T_s , maka persamaan berikut dapat diperoleh dari Persamaan 10.49:

Persamaan 10.60

$$\begin{aligned} \frac{(i_{mr\alpha_i} - i_{mr\alpha_{i-1}})}{T_s} &= \frac{1}{T_r} \left(\frac{i_{s\alpha_i} + i_{s\alpha_{i-1}}}{2} - \frac{i_{mr\alpha_i} + i_{mr\alpha_{i-1}}}{2} \right) - \frac{i_{mr\beta_i} + i_{mr\beta_{i-1}}}{2} \cdot \omega \\ \frac{(i_{mr\beta_i} - i_{mr\beta_{i-1}})}{T_s} &= \frac{1}{T_r} \left(\frac{i_{s\beta_i} + i_{s\beta_{i-1}}}{2} - \frac{i_{mr\beta_i} + i_{mr\beta_{i-1}}}{2} \right) - \frac{i_{mr\alpha_i} + i_{mr\alpha_{i-1}}}{2} \cdot \omega \end{aligned}$$

Oleh karena itu $i_{mr\alpha}$ dan $i_{mr\beta}$ dapat diturunkan dari Persamaan 10.60:

Persamaan 10.61

$$\begin{aligned} i_{mr\alpha_i} &= \frac{1 - \kappa}{1 + \kappa} i_{mr\alpha_{i-1}} + \frac{\kappa}{1 + \kappa} (i_{s\alpha_i} + i_{s\alpha_{i-1}}) - T_r \frac{\kappa}{1 + \kappa} (i_{mr\beta_i} + i_{mr\beta_{i-1}}) \cdot \omega \\ i_{mr\beta_i} &= \frac{1 - \kappa}{1 + \kappa} i_{mr\beta_{i-1}} + \frac{\kappa}{1 + \kappa} (i_{s\beta_i} + i_{s\beta_{i-1}}) + T_r \frac{\kappa}{1 + \kappa} (i_{mr\alpha_i} + i_{mr\alpha_{i-1}}) \cdot \omega \end{aligned}$$

di mana adalah rasio waktu pengambilan sampel dengan konstanta rotor,

Persamaan 10.62

$$K = \frac{T_s}{2T_r}$$

Variabel waktu juga dapat dibuat tak berdimensi dengan mengalikan ω_B ke kedua ruas persamaan. Oleh karena itu baik T_s dan T_r dinyatakan dalam nilai per unit dalam Persamaan 10.60 dan 10.62. Diagram blok pengamat fluks ditunjukkan pada Gambar 10.22. Pengamat fluks mengambil arus fasa dan kecepatan sebagai masukan, dan menghitung i_{mr} , $\cos \alpha$, dan $\sin \alpha$.

Telah ditunjukkan pada bagian sebelumnya bahwa adalah mungkin untuk mengontrol komponen magnetisasi dan komponen torsi dari arus stator secara terpisah. Kontroler PI adalah salah satu cara untuk mengimplementasikan kontrol. Ekspresi numerik untuk pengontrol PI adalah:

Persamaan 10.63

$$V_o = K_{PI}(T_{PI}\varepsilon + \int \varepsilon dt)$$

di mana V_o adalah output dari pengontrol PI dan adalah sinyal kesalahan input V_i (di sini V_i dapat menjadi arus atau torsi yang diukur dari motor, dan V_o dapat menjadi sinyal PWM). Untuk mendapatkan ekspresi diskrit domain waktu, kita membedakan Persamaan 10.63:

Persamaan 10.64

$$\frac{dV_o}{dt} = K_{PI}(T_{PI} \frac{d\varepsilon}{dt} + \varepsilon)$$

Implementasi lebih lanjut sangat mudah:

Persamaan 10.65

$$\frac{V_{oi} - V_{oi-1}}{T_s} = K_{PI}T_{PI} \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}}{T_s} + T_{PI} \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}}{2}$$

Persamaan 10.66

$$V_{oi} = V_{oi-1} + K_1(\varepsilon_i - K_2 \varepsilon_{i-1})$$

di mana K_1 dan K_2 dapat dinyatakan sebagai:

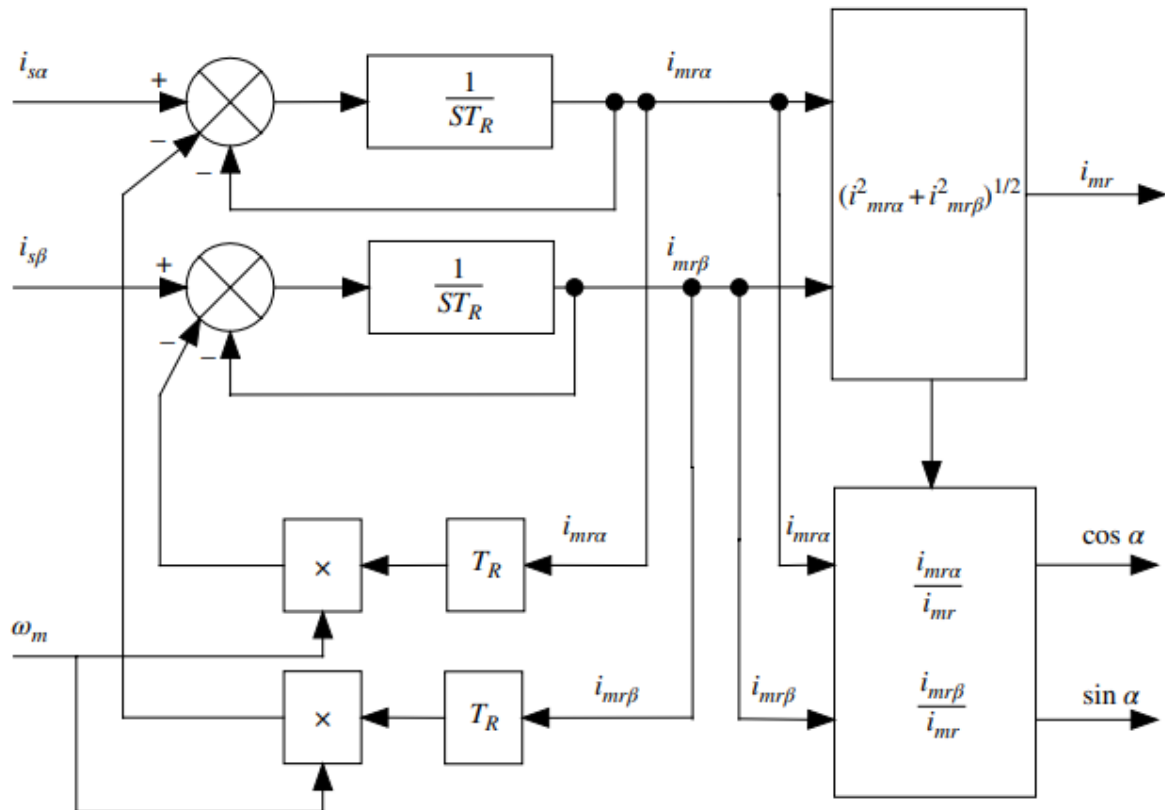
Persamaan 10.67

$$K_1 = \left(\frac{1 + T_s}{2T_r} \right) K_{PI}T_{PI}$$

$$K_2 = \frac{\left(\frac{1 + T_s}{2T_r} \right)}{\left(\frac{1 + T_s}{2T_r} \right)}$$

Misalnya, jika gain dipilih sebagai $K_{PI} = 50$, $T_{PI} = 0,02$ detik, waktu sampling $T_r = 0,02$ detik, dan $T_s = 0,67$ ms, maka konstanta K_1 dan K_2 adalah $K_1 = 1,0168$, $K_2 = 0,9671$.

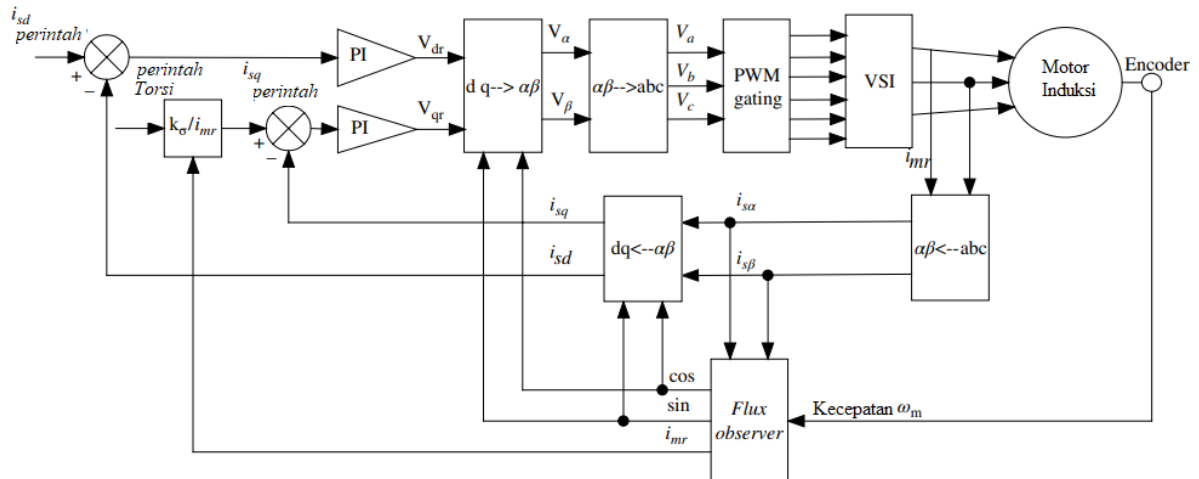
Tujuan dari kontrol berorientasi medan adalah untuk mengontrol mesin induksi sedemikian rupa sehingga berperilaku seperti motor DC. Diagram blok ditunjukkan pada Gambar 10.23 dan diagram alir ditunjukkan pada Gambar 10.24. Sebuah encoder tambahan digunakan untuk mengukur kecepatan motor. Seperti ditunjukkan dalam Persamaan 10.52, arus magnetisasi tidak berubah seketika dengan i_{sd} seperti yang terjadi pada motor DC. Sebaliknya, arus magnetisasi tertinggal dari konstanta waktu T_r sesuai dengan perubahan i_{sd} . Dalam pengaturan ini, pengamat fluks menggunakan sinyal kecepatan dari enkoder tambahan dan pengukuran arus melalui dua sensor arus eksternal. Hanya arus dua fase yang diperlukan untuk melakukan transformasi koordinat karena simetri.



Gambar 10.22 Diagram blok pengamat fluks rotor.

10.7 PENGGERAK MOTOR MAGNET PERMANEN

Motor PM adalah pilihan paling populer untuk aplikasi powertrain EV dan HEV karena efisiensi tinggi, ukuran kompak, torsi tinggi pada kecepatan rendah, dan kemudahan kontrol untuk pengereman regeneratif. Motor PM dalam powertrain HEV dioperasikan baik sebagai motor selama mengemudi normal atau sebagai generator selama pengereman regeneratif dan pemisahan daya, seperti yang dipersyaratkan oleh operasi kendaraan dan strategi kontrol. Motor PM dengan kepadatan daya yang lebih tinggi juga kini semakin menjadi pilihan untuk aplikasi pesawat terbang, kelautan, angkatan laut, dan ruang angkasa.

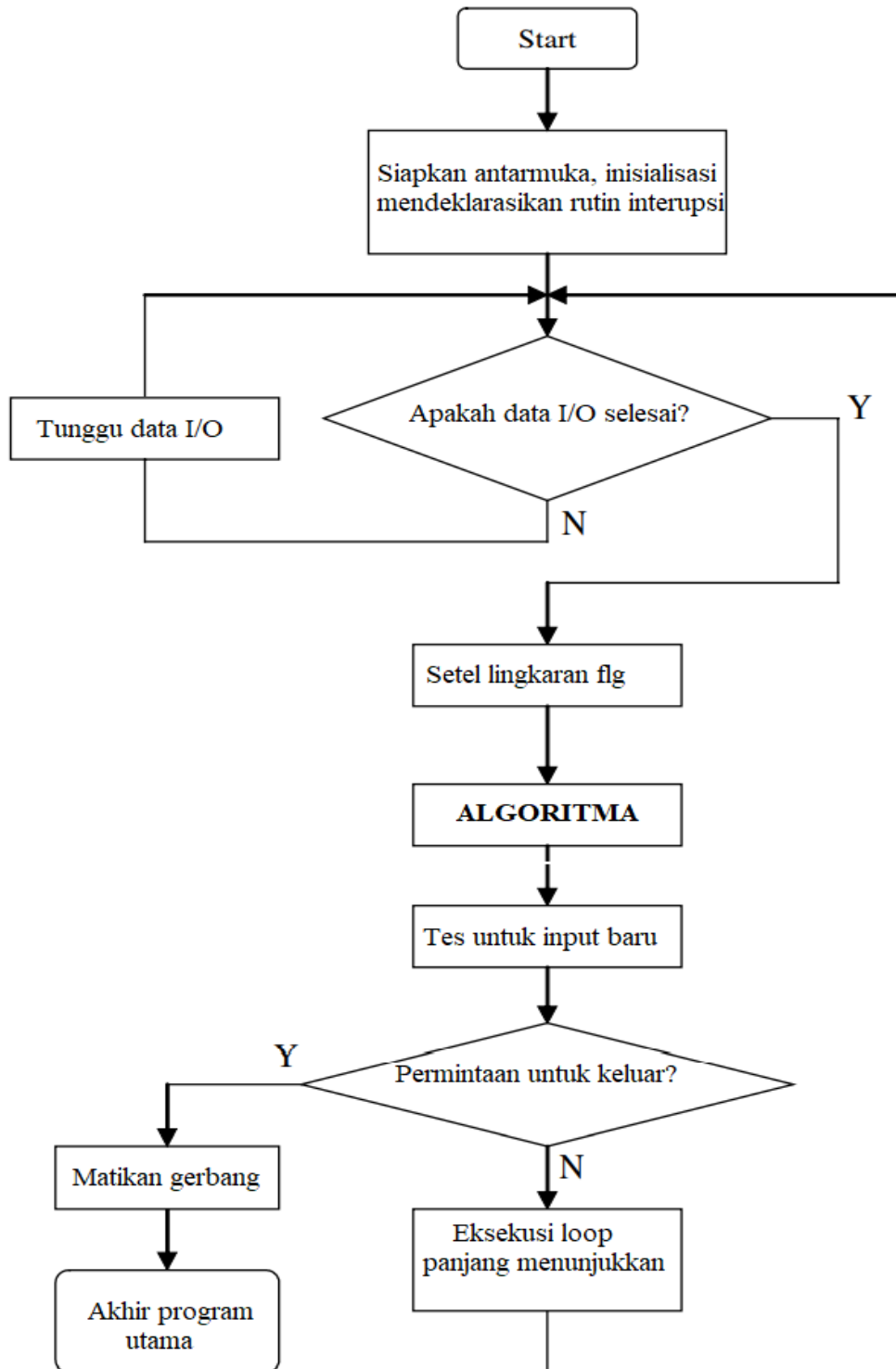


Gambar 10.23 Kontrol berorientasi lapangan dari mesin induksi.

Bahan PM yang paling banyak digunakan secara komersial dalam motor penggerak traksi adalah *neodymium-ferrite-boron (Nd-Fe-B)*. Bahan ini memiliki suhu Curie yang sangat rendah dan sensitivitas suhu yang tinggi. Seringkali perlu untuk meningkatkan ukuran magnet untuk menghindari demagnetisasi pada suhu tinggi dan arus tinggi. Di sisi lain, adalah menguntungkan untuk menggunakan bahan PM sesedikit mungkin untuk mengurangi biaya tanpa mengorbankan kinerja mesin.

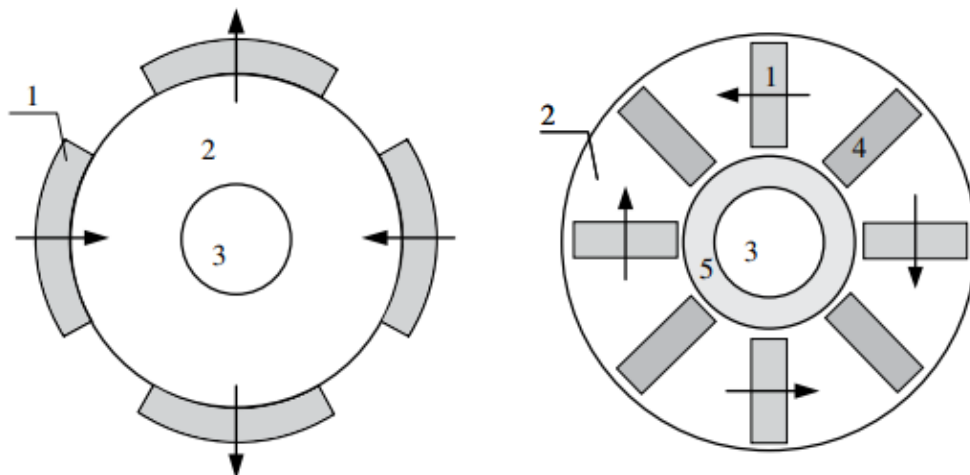
Konfigurasi Dasar Motor PM

Ketika PM digunakan untuk menghasilkan medan magnet di mesin listrik, itu menjadi motor PM. Baik motor DC dan AC dapat dibuat dengan PM. Hanya motor sinkron PM dan motor DC tanpa sikat PM yang dipilih untuk penggerak traksi modern.



Gambar 10.24 Diagram alir kontrol loop tertutup dari mesin induksi

Motor sinkron PM berisi rotor dan stator, dengan stator mirip dengan motor induksi, dan rotor berisi PM. Dari bagian motor induksi, kita mengetahui bahwa belitan tiga fasa, dengan suplai AC simetris tiga fasa, akan menghasilkan medan magnet yang berputar. Untuk menghasilkan torsi rata-rata yang konstan, rotor harus mengikuti medan stator dan berputar pada kecepatan sinkron yang sama. Ini juga mengapa mesin ini disebut motor sinkron PM.



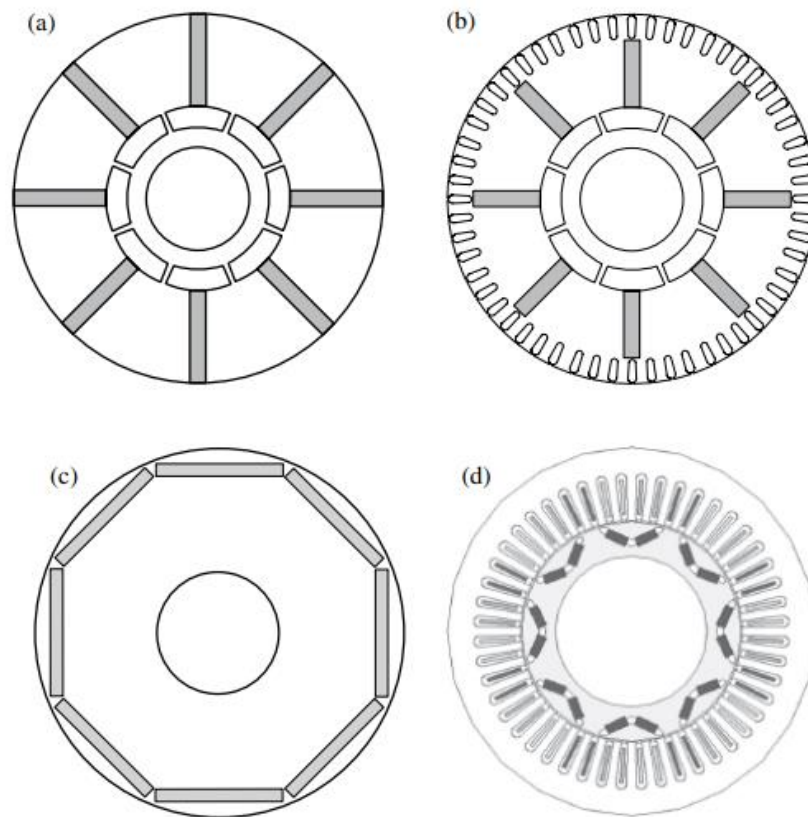
Gambar 10.25 Magnet yang dipasang di permukaan dan magnet interior: kiri, motor SPM; benar, motor IPM. 1 – magnet; 2 – inti besi; 3 - poros; 4 – bahan non-magnet; 5 - bahan non-magnet.

Ada berbagai cara untuk menempatkan magnet pada rotor, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.25. Jika magnet direkatkan pada permukaan rotor, itu disebut motor PM yang dipasang di permukaan (SPM). Jika magnet dimasukkan ke dalam rotor di slot pra-potong, maka itu disebut motor magnet permanen interior (IPM). Untuk motor SPM, rotor dapat berupa baja padat karena inti besi rotor itu sendiri tidak dekat dengan celah udara, sehingga rugi arus eddy dan rugi histeresis akibat harmonisa slot/gigi dapat diabaikan. Untuk motor IPM, rotor perlu dibuat dari baja silikon yang dilaminasi karena harmonik gigi/slot akan menghasilkan arus eddy dan rugi-rugi histeresis.

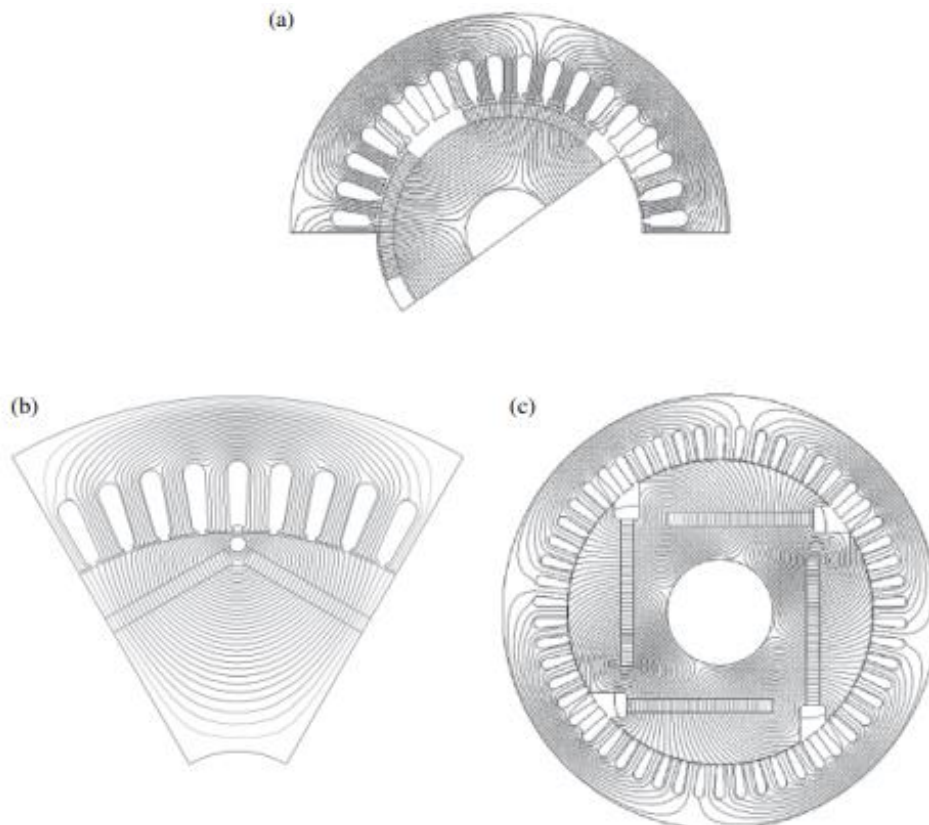
Karena celah udara yang besar serta fakta bahwa magnet memiliki permeabilitas yang mirip dengan udara, motor SPM memiliki reaktansi sumbu langsung x_d dan reaktansi sumbu kuadrat yang sama x_q . Di sisi lain, motor IPM memiliki x_d dan x_q yang berbeda. Perbedaan ini akan menghasilkan apa yang disebut torsi reluktansi. Perlu ditunjukkan bahwa meskipun ada komponen torsi keengganan, itu tidak berarti bahwa motor IPM akan memiliki peringkat torsi yang lebih tinggi daripada motor SPM untuk ukuran dan jumlah bahan magnetik yang sama yang digunakan. Hal ini karena, pada motor IPM, untuk menjaga integritas laminasi rotor, ada apa yang disebut "jembatan magnet" yang akan mengalami kebocoran fluks magnet. Jadi untuk jumlah bahan magnet yang sama yang digunakan, motor SPM akan selalu memiliki fluks total yang lebih tinggi. Ada banyak konfigurasi yang berbeda untuk motor IPM seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.26.

Prinsip Dasar dan Pengoperasian Motor PM

Medan magnet tanpa beban mesin PM ditunjukkan pada Gambar 10.27. Ketika rotor digerakkan oleh sumber eksternal (seperti mesin), medan magnet yang berputar akan menghasilkan tegangan tiga fasa pada belitan tiga fasa. Ini adalah operasi mode generator dari mesin PM. Ketika dioperasikan sebagai motor, belitan tiga fasa, mirip dengan motor induksi, disuplai dengan arus berbentuk trapesium (DC brushless) atau arus sinusoidal (AC sinkron). Arus ini menghasilkan medan magnet yang berputar pada kecepatan yang sama dengan rotor, atau kecepatan sinkron. Dengan menyesuaikan frekuensi arus stator, kecepatan rotor atau kecepatan sinkron dapat disesuaikan.



Gambar 10.26 Empat konfigurasi rotor IPM yang umum digunakan: (a) magnet tipe melingkar yang cocok untuk motor DC atau sinkron tanpa sikat; (b) magnet tipe melingkar untuk motor sinkron line-start; (c) motor IPM slot persegi panjang; (d) motor IPM slot tipe-V.



Gambar 10.27 Distribusi medan magnet mesin PM pada kondisi tanpa beban (arus stator nol): (a) motor SPM empat kutub; (b) motor IPM simetris delapan kutub; (c) konfigurasi IPM empat kutub yang tidak simetris.

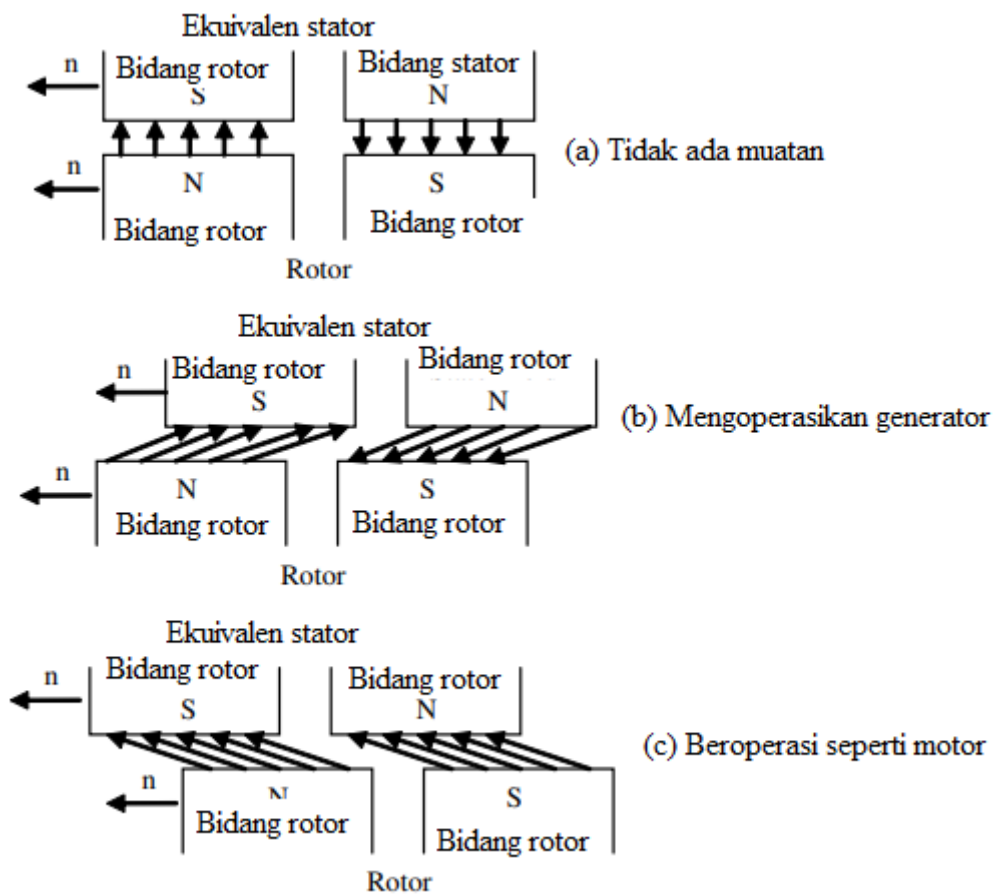
Torsi adalah gaya tarik-menarik antara medan magnet rotor dan medan magnet stator dalam arah melingkar. Oleh karena itu, pada kondisi tanpa beban, medan rotor dan stator hampir sejajar. Ketika sudut antara medan rotor dan medan stator mencapai 90 derajat listrik, torsi maksimum tercapai pada motor SPM. Untuk motor IPM, torsi maksimum terjadi pada sudut yang sedikit lebih besar dari 90° karena adanya enggan torsi.

Gambar 10.28 mengilustrasikan bagaimana motor PM beroperasi dalam mode yang berbeda. Belitan stator menghasilkan medan putar yang menarik magnet rotor. Jika kedua medan itu sejajar, gaya tarik antara dua medan magnet itu dalam arah radial, maka tidak ada torsi elektromagnetik. Ketika medan stator memimpin medan rotor, stator akan menarik magnet rotor. Mesin kemudian beroperasi sebagai motor. Ketika medan stator tertinggal dari medan rotor, mesin menjadi generator. Pada keadaan tanpa beban, medan magnet rotor akan menghasilkan emf balik E_o pada belitan stator. Ketika tegangan dengan frekuensi yang sama diterapkan pada belitan stator, maka arus akan dihasilkan dan persamaan tegangan dapat ditulis sebagai:

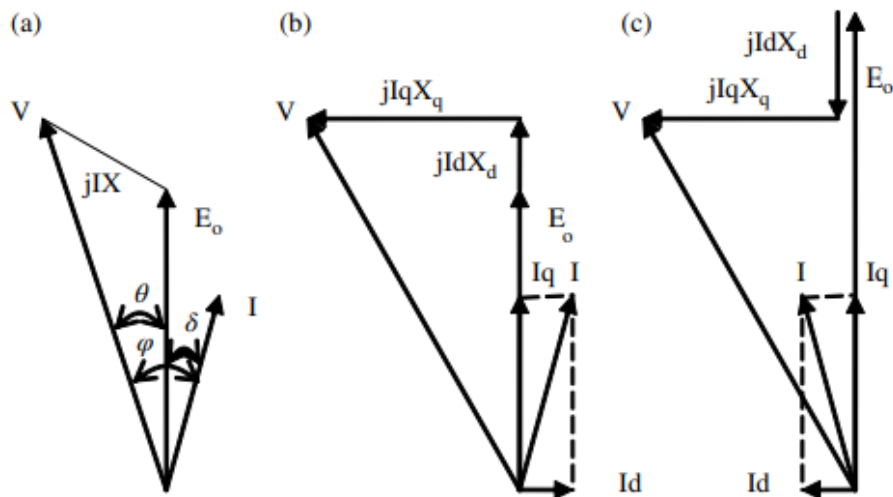
Persamaan 10.68

$$V = E_o + IR + jIX$$

di mana R adalah resistansi stator dan X adalah impedansi sinkron. Diagram fasor ditunjukkan pada Gambar 10.29 ketika mengabaikan resistansi stator. Dari diagram, istilah jIX dapat diuraikan lebih lanjut menjadi dua komponen: $jI_d X_d$ dan $jI_q X_q$. Padahal, pada motor IPM, sumbu d dan sumbu q akan memiliki reaktansi yang berbeda.



Gambar 10.28 Pengoperasian mesin sinkron PM



Gambar 10.29 Diagram fasor motor sinkron PM: (a) SPM; (b) IPM; (c) modus pelemahan fluks IPM.

Dengan menggunakan Gambar 10.29, Persamaan 10.68 dapat ditulis ulang untuk motor IPM sebagai:

Persamaan 10.69

$$V = E_o + IR + jI_d X_d + jI_q X_q$$

Daya sebenarnya dapat dihitung, karena dari Gambar 10.29, $\phi = \delta + \theta$:

Persamaan 10.70

$$\begin{aligned} P_1 &= mIV \cos \phi = mIE_o \cos \delta = mV (I \cos \delta \cos \theta - I \sin \delta \sin \theta) \\ &= mV (I_q \cos \theta - I_d \sin \theta) \end{aligned}$$

di mana ϕ adalah sudut faktor daya (sudut antara tegangan dan arus), θ adalah sudut antara tegangan dan emf balik, dan δ adalah sudut daya dalam (sudut antara emf belakang dan arus). Dari Gambar 10.29,

Persamaan 10.71

$$\begin{aligned} I_q X_q &= V \sin \theta \\ I_d X_d &= V \cos \theta - E_o \end{aligned}$$

Oleh karena itu, kekuatan motor PM dapat dinyatakan sebagai:

Persamaan 10.72

$$P = \frac{mIE_o V}{X_d} \sin \theta + \frac{mV^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\theta)$$

Torsi dapat diturunkan dengan membagi Persamaan 10.72 dengan kecepatan rotor seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.30, di mana karakteristik kecepatan torsi dari motor PM tipikal ditunjukkan. Untuk motor SPM, karena $X_d = X_q$, suku kedua Persamaan 10.72 adalah nol. Untuk motor IPM, sumbu q memiliki reluktansi yang lebih kecil karena adanya besi lunak di jalurnya, dan sumbu d memiliki magnet di jalurnya yang memiliki reluktansi lebih besar. Oleh karena itu, X_q jauh lebih besar dari X_d .

Di sisi lain, dari Persamaan 10.70, dan mengabaikan kerugian, kita dapat melihat bahwa

Persamaan 10.73

$$T = \frac{mI E_o \cos \delta}{\frac{\omega}{p}} = \frac{mIk\omega\phi}{\frac{\omega}{p}} \cos \delta = mkI\phi \cos \delta$$

$$T_{max} = mIk\omega\phi = \text{konstan}$$

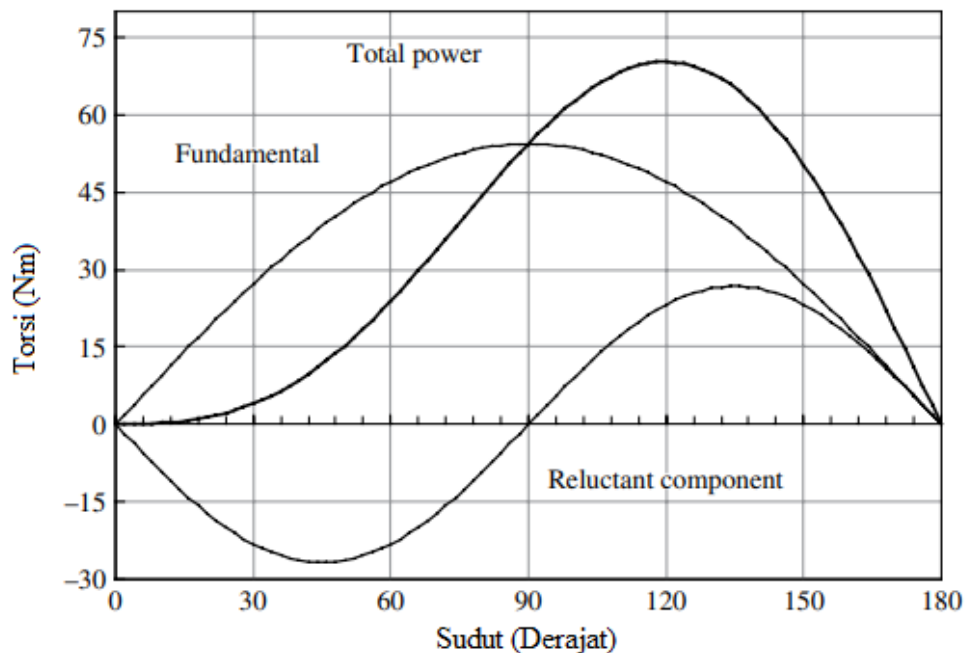
Oleh karena itu, ketika sudut daya dalam $\delta = 0$, untuk arus stator tertentu, torsi motor mencapai maksimum. Pada kondisi ini, arus stator sefasa dengan emf balik E_o , dan

Persamaan 10.74

$$V^2 = E_o^2 + (I_q X_d)^2 = (k\omega\phi)^2 + (I\omega L_q)^2$$

$$\frac{V}{\omega} = \sqrt{(k\phi)^2 + (L_q I)^2}$$

Oleh karena itu, tegangan stator harus sebanding dengan frekuensi untuk memenuhi Persamaan 10.74 dan mempertahankan output torsi maksimum pada waktu yang sama. Operasi ini juga disebut operasi torsi konstan. Dapat juga dilihat dari Persamaan 10.72 bahwa untuk tertentu, daya berbanding terbalik dengan frekuensi, karena V , X_d , dan E_o semuanya sebanding dengan frekuensi ω . Ini mirip dengan kontrol V/f motor induksi



Gambar 10.30 Daya motor IPM sebagai fungsi sudut daya dalam.

Ketika tegangan stator mencapai maksimum, Persamaan 10.74 tidak dapat dipertahankan lagi. Ketika ω meningkat, V menjadi konstan, dan arus dalam arah sumbu d harus disuplai, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.29c. Hubungan tegangan dan frekuensi dapat dinyatakan sebagai:

Persamaan 10.75

$$V^2 = (E_o - I_d X_d)^2 + (I_q X_q)^2 = (k\omega\phi - I_d \omega L_d)^2 + (I_q \omega L_q)^2$$

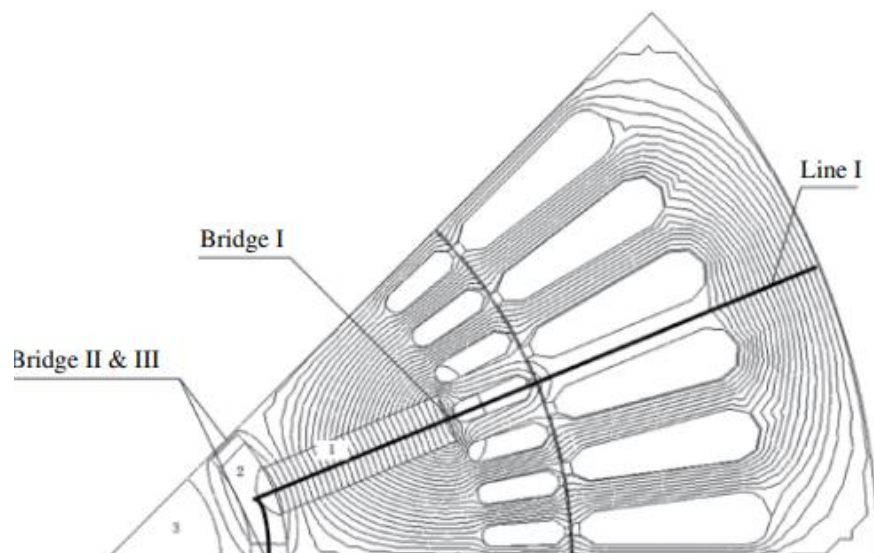
$$\frac{V}{\omega} = \sqrt{(k\phi - I_d L_d)^2 + (L_q I_q)^2}$$

Operasi ini juga disebut daerah operasi pelemahan fluks karena arus sumbu d menghasilkan fluks magnet yang berlawanan arah dengan medan PM. Perhatikan bahwa karena kendala seperti batas arus inverter, arus sumbu q mungkin harus diturunkan dari nilai pengenalnya sehingga arus total dari inverter tetap sama. Kerugian tambahan pada kecepatan yang lebih tinggi mungkin membuat perlu untuk lebih mengurangi output torsi. Dapat juga dilihat dari Persamaan 10.72 bahwa untuk θ yang diberikan, suku pertama adalah konstan karena V adalah konstan, dan X_d dan E_o sebanding dengan frekuensi ω . Secara teori, torsi berbanding terbalik dengan frekuensi dalam operasi ini, sehingga dayanya konstan. Oleh karena itu mode ini juga disebut sebagai rentang operasi daya konstan.

Analisis Sirkuit Magnetik Motor IPM

Meskipun desain motor saat ini biasanya dibantu dengan analisis elemen hingga (FEA), tahap desain awal masih diwujudkan melalui metode analisis. Fluks celah udara adalah salah satu parameter terpenting dari desain motor PM dan analisis rangkaian magnetik ekuivalen digunakan untuk menghitung fluks celah udara pada motor PM. Untuk motor SPM, rangkaian magnetik ekuivalen sangat mudah. Tetapi untuk motor IPM, PM dikubur di dalam laminasi rotor, dengan magnet dimasukkan ke dalam slot yang telah dilubangi. Susunan ini melindungi magnet dari terbang menjauh dari permukaan rotor karena gaya sentrifugal, kelelahan, dan penuaan material selama pengoperasian motor. Keuntungan lain dari motor IPM adalah magnet persegi panjang (kubus) dapat digunakan untuk menyederhanakan proses pembuatan dan mengurangi biaya pembuatan bahan PM. Struktur konsentrasi fluks (seperti magnet yang disusun dalam bentuk-V) sering digunakan untuk meningkatkan kerapatan fluks celah udara pada motor IPM.

Menghitung fluks celah udara pada motor IPM agak merepotkan karena adanya apa yang disebut jembatan magnet. Ketika laminasi terintegrasi digunakan untuk motor IPM, sirkuit pendek magnetik ada di sekitar tepi magnet. Jembatan magnetik ini dirancang untuk meningkatkan integritas rotor. Jembatan magnetik memperkenalkan sirkuit pendek magnet dan memperumit desain dan analisis motor IPM. Di sisi lain, ada juga kekhawatiran tentang bagaimana membatasi kebocoran fluks di jembatan magnet ini sambil mempertahankan kekuatan mekanik rotor. Kebocoran fluks dan distribusi fluks di jembatan magnet dapat diperoleh dengan tepat melalui metode numerik seperti FEA. Namun, FEA hanya dapat dilakukan setelah dimensi awal motor ditentukan. FEA juga rumit dan memakan waktu pada tahap awal desain motor PM di mana banyak iterasi biasanya dilakukan. Perhitungan analitis dan analisis semua jenis motor PM sangat penting dalam tahap desain awal.



Gambar 10.31 Distribusi fluks motor sinkron line-start IPM dengan magnet tipe melingkar: 1, magnet; 2, bahan non-magnetik; 3, poros.

Bagian ini membahas metode analitik untuk menghitung fluks celah udara mesin IPM menggunakan model rangkaian magnetik ekuivalen dengan mempertimbangkan celah rakitan dan saturasi pada baja. Faktor-faktor yang mempengaruhi kebocoran fluks pada motor IPM juga akan dibahas.

Gambar 10.31 menunjukkan konfigurasi dan distribusi fluks tanpa beban dari motor sinkron start-start tipe keliling delapan kutub IPM yang dihitung menggunakan FEA. Laminasi terintegrasi digunakan untuk menjaga integritas rotor. Ini berisi tiga jembatan magnet di setiap kutub: jembatan I antara magnet dan slot rotor; jembatan II dan III pada ruang antar kutub antara magnet dan poros. Gambar 10.32 menunjukkan kerapatan fluks di sepanjang garis I dari Gambar 10.31. Dapat dilihat dari Gambar 10.32 bahwa kerapatan fluks berbeda di kedua jembatan.

Akan ditunjukkan nanti bahwa kerapatan fluks magnet di jembatan magnet terkait dengan lebar dan panjang jembatan magnet, bukan konstan. Untuk situasi di sini, ada kebocoran fluks di slot rotor dan bahan non-magnetik antara magnet dan poros. Kebocoran fluks melalui slot stator dapat diabaikan. Magnet permanen tanah jarang (REPM) modern memiliki kurva demagnetisasi lurus seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.33. Biaya rendah membuat REPM Nd-Fe-B ideal untuk aplikasi motor. Namun, efek suhu, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.33, harus dipertimbangkan ketika merancang motor PM. Pada suhu kamar (25 °C), kurva demagnetisasi REPM berbentuk kubus dapat diwakili oleh

Persamaan 10.76

$$\Phi_m = \Phi_r - \frac{F_m \Phi_r}{F_c} = \Phi_r - \frac{F_m}{R_m}$$

di mana Φ_r dan F_c adalah fluks sisa dan gaya gerak magnet (mmf) masing-masing kutub, dan R_m adalah reluktansi magnet, yang merupakan kebalikan dari permeans magnet λ_M :

Persamaan 10.77

$$R_M = \frac{1}{\lambda_M} = \frac{F_c}{\Phi_m}$$

Untuk kutub magnet paralel atau melingkar, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.26a,b,

Persamaan 10.78

$$\Phi_r = 2B_r A_m, \quad F_c = I_m H_c$$

sedangkan untuk kutub magnet seri atau radial, seperti ditunjukkan pada Gambar 10.26c,d,

Persamaan 10.79

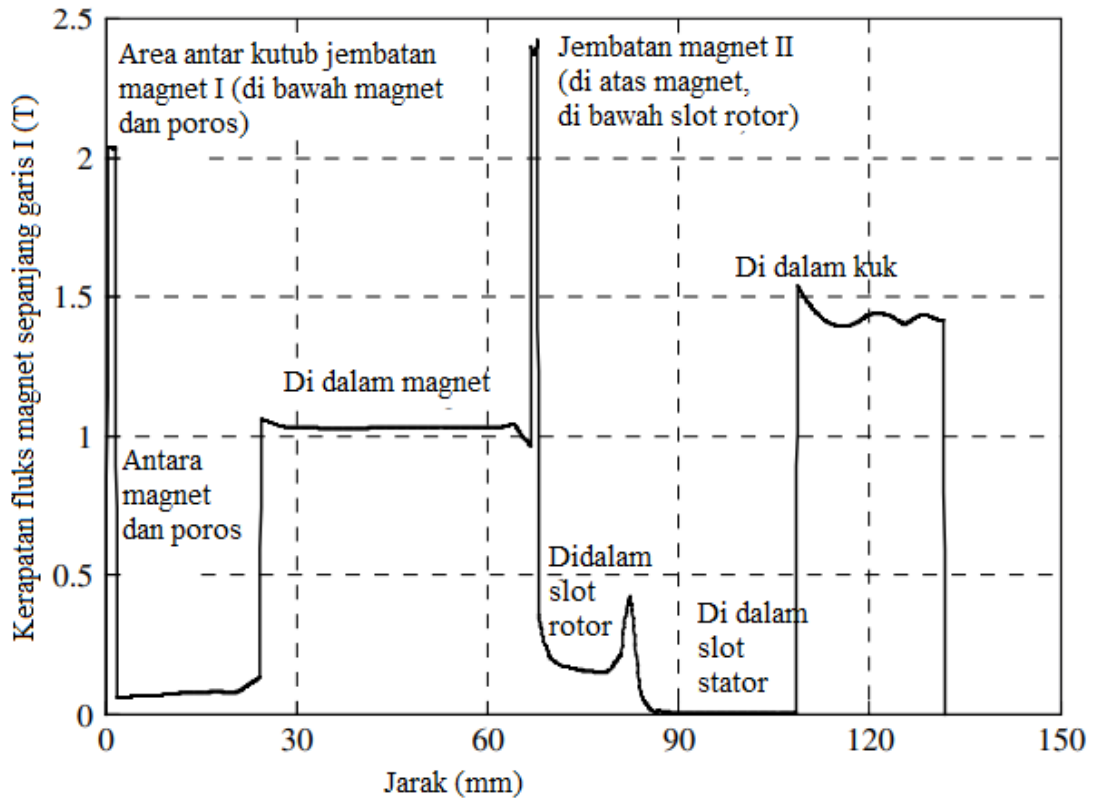
$$\Phi_r = B_r A_m, \quad F_c = 2I_m H_c$$

di mana B_r dan H_c masing-masing adalah gaya remanensi dan gaya koersif magnet, I_m adalah panjang magnet, dan A_m adalah luas penampang. Dengan demikian

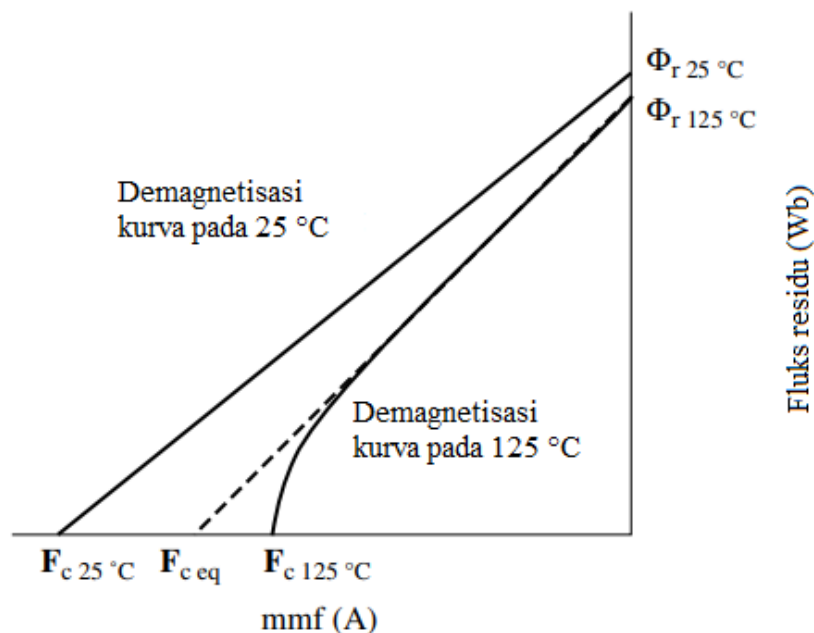
Persamaan 10.80

$$A_m = b_m I_{fe}$$

di mana I_{fe} adalah panjang magnet sepanjang arah poros dan biasanya sama dengan panjang tumpukan laminasi rotor.

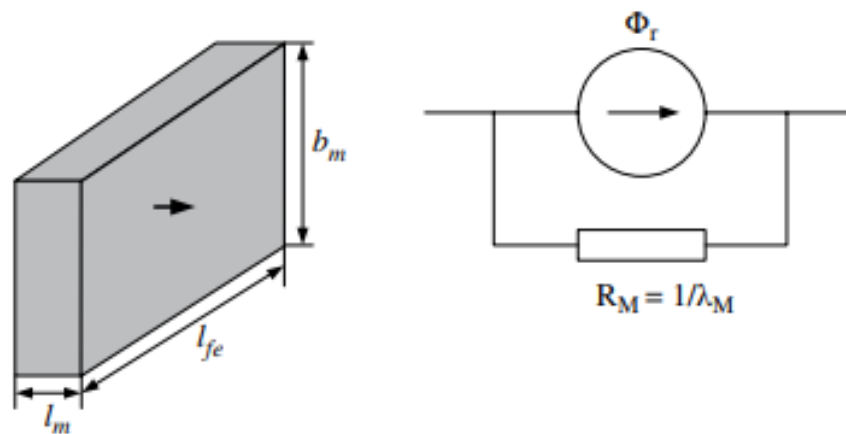


Gambar 10.32 Densitas fluks sepanjang garis I dari Gambar 10.31.



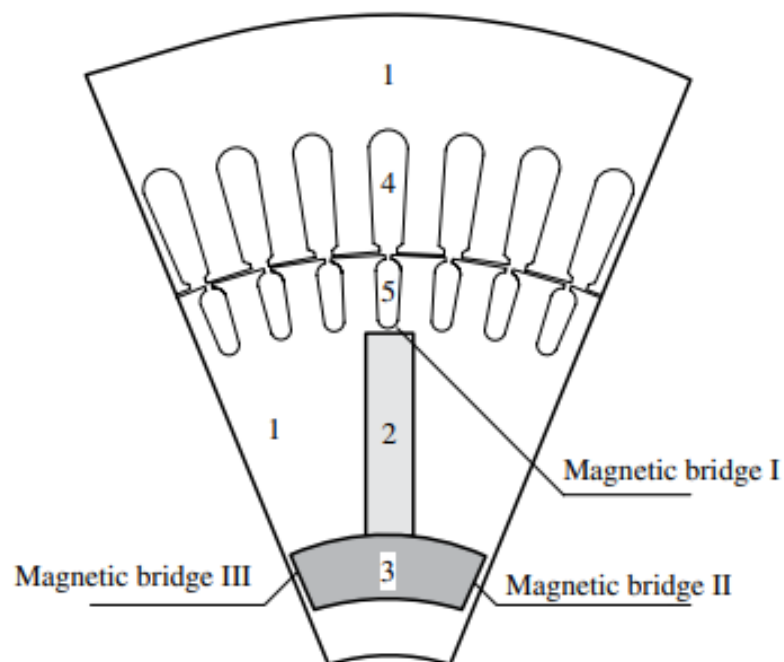
Gambar 10.33 Kurva demagnetisasi magnet Nd-Fe-B dengan mempertimbangkan efek suhu; F_{ce} adalah mmf ekuivalen dari bagian linier dari kurva demagnetisasi.

Pada suhu operasi, parameter ini diganti dengan nilai masing-masing pada suhu operasi. Ada kemungkinan bahwa kurva demagnetisasi dapat menjadi nonlinier pada suhu operasi. Dalam hal ini, F_{ceq} harus digunakan sebagai pengganti F_c seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.33. Setara Norton dari magnet berbentuk kubus ditunjukkan pada Gambar 10.34.



Gambar 10.34 Setara dengan Norton dari magnet berbentuk kubus.

Konfigurasi rotor IPM yang dimagnetisasi secara umum dan melingkar ditunjukkan pada Gambar 10.35. Rangkaian magnetik ekivalen konfigurasi ini ditunjukkan pada Gambar 10.36, di mana R_δ , R_{y1} , R_{y2} , R_{t1} , R_{t2} , R_σ , R_1 , R_2 , R_s adalah reluktansi celah udara, yoke stator, yoke rotor, gigi stator, gigi rotor, celah perakitan antara magnet dan laminasi, jembatan magnetik I, jembatan magnetik II dan III (dikombinasikan karena simetri), dan kebocoran masing-masing melalui slot rotor dan bahan non-magnetik. Efek akhir diabaikan.



Gambar 10.35 Susunan magnet motor IPM line-start: 1, laminasi besi stator dan rotor; 2, magnet permanen; 3, bahan non-magnetik; 4, slot stator; 5, slot rotor. Jembatan magnetik adalah bagian dari laminasi rotor untuk menjaga integritas laminasi rotor.

Fluks yang melewati jembatan ini adalah fluks bocor. Jembatan magnetik ini sangat jenuh seperti dapat dilihat dari Gambar 10.32. Rangkaian magnetik dapat disederhanakan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.36b, di mana permeansi total λ_δ yang menggabungkan celah udara, gigi stator, kuk stator, gigi rotor (jika ada), dan kuk rotor; λ_1 adalah permeansi jembatan magnet I; λ_2 adalah permeansi jembatan magnet II dan III; dan S adalah kebocoran permeansi total melalui slot rotor dan bahan non-magnetik. Membiarkan

Persamaan 10.81

$$\lambda'_\delta = \frac{1}{(R_{\delta\neq} + R_{t1} + R_{t2} + R_{y1} + R_{y2})}$$

$$\lambda_o = \lambda_{i\delta} + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_s$$

$$\lambda_{ex} = \lambda_o || \lambda_\sigma$$

di mana λ_{ex} adalah total permeansi eksternal. Memecahkan sirkuit magnetik, titik operasi magnet dan semua fluks dapat ditemukan:

Persamaan 10.82

$$F_m = \frac{\Phi_r}{(\lambda_m + \lambda_{ex})}$$

$$\Phi_m = \frac{\Phi_r \lambda_{ex}}{(\lambda_m + \lambda_{ex})}$$

$$\Sigma F = F_m - \frac{\Phi_m}{\lambda_\sigma}$$

Persamaan 10.83

$$\Phi_\delta = \lambda_\delta \Sigma F$$

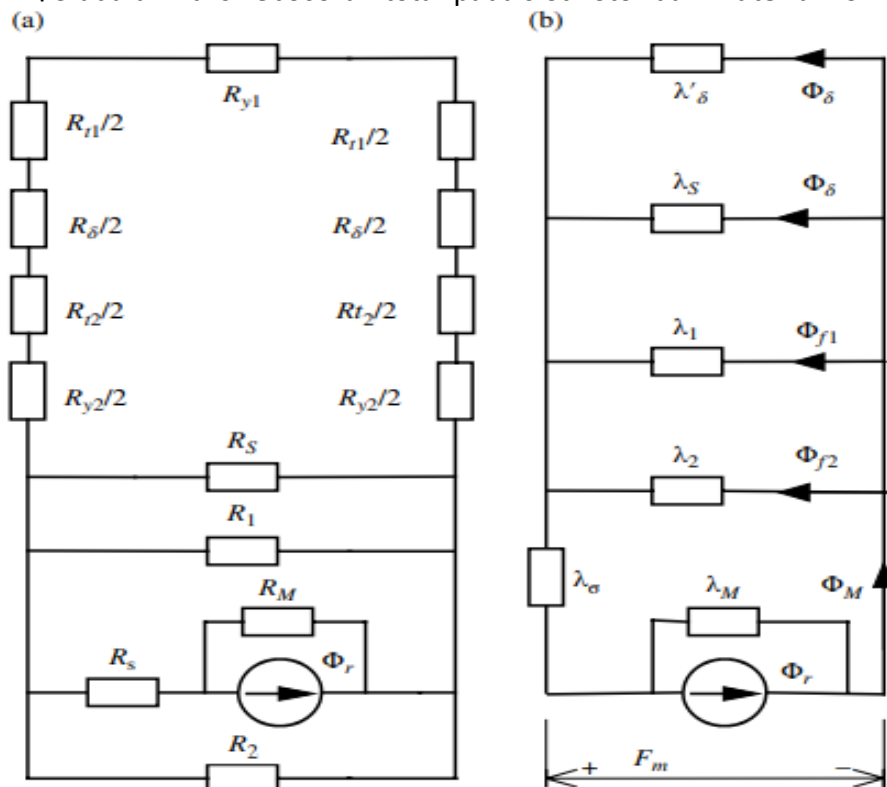
$$\Phi_\delta = (\lambda_1 + \lambda_2) \Sigma F$$

$$\Phi_s = \lambda_s \Sigma F$$

Persamaan 10.84

$$\Phi_m = \Phi_{\delta+} \Phi_f + \Phi_s$$

di mana Φ_δ adalah fluks celah udara total, Φ_f adalah fluks kebocoran total pada jembatan magnet, dan Φ_s adalah fluks kebocoran total pada slot rotor dan material non-magnetik.



Gambar 10.36 Rangkaian magnetik ekivalen motor IPM dengan magnet melingkar: (a) model eksak; (b) model yang disederhanakan

Dapat dilihat dari Gambar 10.35 dan 10.36 bahwa jembatan magnet harus memiliki mmf yang sama dengan cabang celah udara. Oleh karena itu, kerapatan medan magnet masing-masing jembatan adalah:

Persamaan 10.85

$$H_f = \frac{\Sigma F}{l_f}$$

di mana l_f adalah panjang jembatan magnet di sepanjang jalur fluks. Dapat dilihat dari Persamaan 10.85 bahwa jika jembatan magnet memiliki jalur yang berbeda untuk fluks magnet, maka kerapatan medan akan berbeda. Kerapatan fluks di masing-masing jembatan dapat ditemukan melalui table lookup atau curve-fitting dari bahan laminasi. Kebocoran fluks total di masing-masing jembatan magnet dapat dinyatakan sebagai:

Persamaan 10.86

$$\Phi_f = B_f A_f$$

di mana B_f adalah kerapatan fluks di jembatan magnet dan A_f adalah luas penampang jembatan magnet itu. Meskipun persamaan di atas memberikan ekspresi analitis untuk fluks celah udara, itu hampir tidak dapat diselesaikan karena saturasi pada yoke, gigi, dan jembatan magnet. Analisis grafis adalah metode yang efektif untuk memecahkan titik operasi magnet.

Ukuran Magnet di Motor PM

Ukuran magnet adalah salah satu tugas penting dari desain mesin PM. Bagian ini membahas metode analisis untuk menghitung volume dan ukuran magnet untuk motor PM. Metode yang diusulkan divalidasi oleh FEA dan eksperimen. Berikut ini, rumus akan diturunkan berdasarkan serangkaian asumsi dan kemudian dimodifikasi berdasarkan pertimbangan desain praktis. Asumsi tersebut antara lain sebagai berikut:

- Saliensi kutub magnet dapat diabaikan.
- Resistansi stator dapat diabaikan.
- Saturasi dapat diabaikan.
- Fluks celah udara terdistribusi secara sinusoidal.

Berdasarkan asumsi di atas, dan menggunakan diagram fasor motor sinkron PM seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.29, daya input motor sinkron PM dapat ditulis sebagai:

Persamaan 10.95

$$P_1 = mIV \cos \phi = mIE_o \cos \delta$$

di mana m adalah jumlah fase, I dan V adalah tegangan fase dan arus fase, E_o adalah emf balik induksi per fase, adalah sudut daya, yaitu sudut antara fasor I dan fasor V , dan adalah sudut daya dalam, yaitu sudut antara fasor I dan fasor E_o . emf belakang dari mesin sinkron PM dengan fluks celah udara sinusoidal dapat dinyatakan sebagai:

Persamaan 10.96

$$E_o = \sqrt{2\pi} K_w f W \Phi$$

di mana W adalah jumlah lilitan per fase, adalah fluks celah udara total per kutub, dan K_w adalah faktor belitan. Arus fasa dapat dinyatakan dalam jangkarnya maksimum reaktan sumbu langsung mmf F_{adm} :

Persamaan 10.97

$$I = F_{adm} \frac{p}{0.9mW K_w K_{ad} K_m \sin \delta}$$

di mana K_{ad} adalah koefisien reaksi jangkar sumbu d, K_m adalah arus jangkar maksimum yang mungkin (per unit), dan p adalah jumlah kutub. Mengganti Persamaan 10.97 dan 10.98 ke dalam Persamaan 10.96, daya input dapat dinyatakan sebagai:

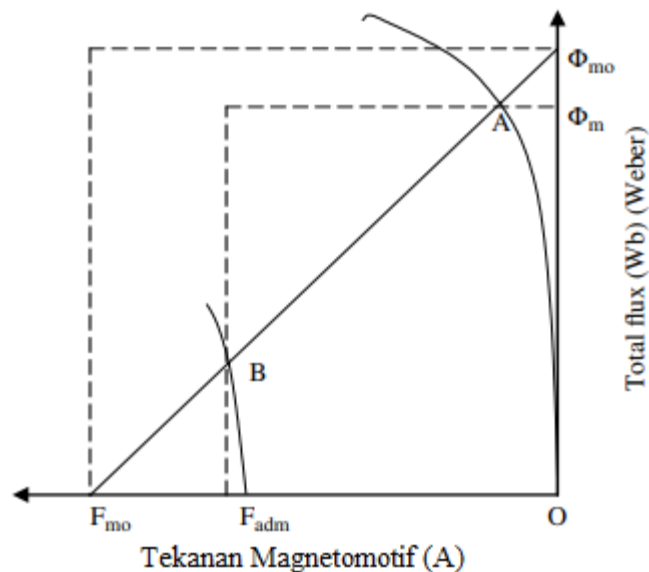
$$P_1 = \frac{\sqrt{2\pi p f}}{0.9m K_{ad} K_m \tan \delta}$$

Dalam bab ini, istilah baru – rasio penggunaan magnet ξ – diperkenalkan dan didefinisikan sebagai berikut:

Persamaan 10.99

$$\xi = \frac{F_{adm} \Phi_m}{F_{mo} \Phi_{mo}}$$

di mana Φ_{mo} adalah fluks sisa total per kutub, F_{mo} adalah total mmf per kutub, Φ_m adalah fluks total per kutub pada kondisi tanpa beban, dan F_{adm} adalah reaktan sumbu langsung maksimum m_{mf} motor.



Gambar 10.39 Ilustrasi penggunaan magnet dimana A adalah titik operasi tanpa beban dan B adalah titik arus balik maksimum.

Definisi rasio penggunaan magnet ini diilustrasikan pada Gambar 10.39, di mana titik A adalah titik operasi magnet tanpa beban, dan titik B adalah titik operasi magnet pada mmf maksimum. Fluks celah udara per kutub Φ dapat dinyatakan sebagai fungsi fluks yang disuplai oleh magnet Φ_m dan koefisien kebocoran fluks σ_o :

Persamaan 10.100

$$\Phi = \frac{\Phi_m}{\sigma_o}$$

Untuk magnet seri, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.40a,

Persamaan 10.101

$$\begin{aligned}\Phi_{mo} &= B_r S_m \\ F_{mo} &= 2H_c I_m\end{aligned}$$

Untuk magnet paralel, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.40b,

Persamaan 10.102

$$\begin{aligned}\Phi_{mo} &= 2B_r S_m \\ F_{mo} &= H_c I_m\end{aligned}$$

di mana I_m adalah ketebalan magnet per kutub sepanjang arah magnetisasi, dan S_m adalah luas penampang magnet di bawah setiap kutub. Pada akhirnya, daya input motor dapat dinyatakan sebagai berikut dengan mensubstitusi Persamaan 10.100-10.102 ke Persamaan 10.99:

Persamaan 10.103

$$P_1 = \frac{\sqrt{2\pi\xi f}}{0.9mK_{ad}K_m\sigma_o \tan\delta} B_r H_c 2pS_m I_m$$

Karena volume magnet total adalah:

Persamaan 10.104

$$V_m = 2pS_m I_m$$

Oleh karena itu, volume magnet yang digunakan dalam motor sinkron PM dapat dinyatakan sebagai:

Persamaan 10.105

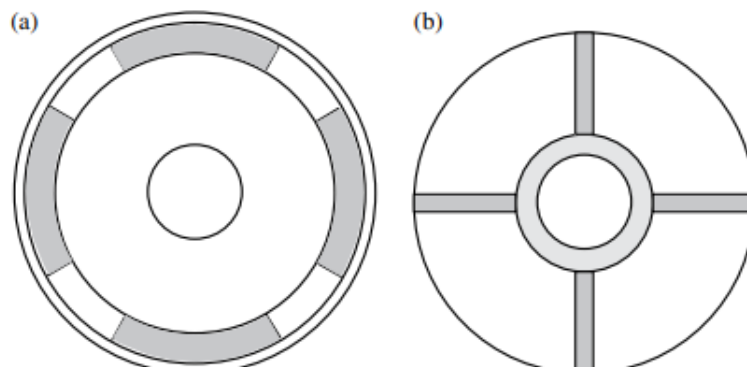
$$V_m = \frac{0.2\sigma_o K_{ad} K_m}{\xi} \tan\delta \frac{P_1}{f B_r H_c}$$

di mana CV adalah koefisien:

Persamaan 10.106

$$C_V = \frac{0.2\sigma_o K_m K_{ad}}{\xi} \tan\delta$$

Untuk menggunakan persamaan di atas untuk menentukan volume magnet yang diperlukan untuk motor PM, parameter tertentu dari motor perlu diidentifikasi.



Gambar 10.40 Konfigurasi magnet seri dan paralel: (a) permukaan dipasang dengan cincin lengan; (b) magnet paralel.

Kerugian Arus Eddy di Magnet Mesin PM

Kehilangan arus eddy pada magnet motor PM dalam HEV dan PHEV biasanya tidak dipertimbangkan dalam desain dan analisis motor tradisional. Namun, karena konduktivitas yang tinggi dari magnet tanah jarang Nd–Fe–B, dan harmonik slot/gigi, ada rugi arus eddy yang dihasilkan di dalam magnet. Kehilangan ini mungkin tidak terlalu mempengaruhi efisiensi motor, tetapi kenaikan suhu di dalam magnet yang disebabkan oleh kehilangan ini dapat menyebabkan kerusakan magnet yang tidak terduga, seperti penurunan kinerja dan potensi demagnetisasi. Selain itu, tegangan output dari inverter PWM mengandung harmonik frekuensi tinggi yang melimpah, yang menyebabkan kerugian berlebihan pada magnet. Panas yang berlebihan pada motor PM yang disebabkan oleh rugi arus eddy yang digabungkan dengan rugi-rugi lain dapat menurunkan kinerja mesin.

Untuk suplai sinusoidal, rugi arus eddy pada magnet motor SPM diperoleh dari FEA dengan langkah waktu menjadi 102 W untuk motor PM 50 kW. Rugi arus eddy dalam magnet IPM dihitung menjadi 10 W untuk motor yang sama. Untuk suplai PWM, rugi arus eddy dalam magnet SPM adalah 249 W untuk motor PM 50 kW. Rugi arus eddy dalam magnet IPMSM adalah 25 W untuk motor yang sama.

10.8 MOTOR KEENGGANAN BERALIH

Kedua motor reluktansi sakelar dan motor reluktansi sinkron telah menarik perhatian dalam aplikasi traksi karena strukturnya yang sederhana, tidak memerlukan sangkar tupai atau magnet pada rotor, sangat sedikit kehilangan pada rotor, dan kemudahan kontrol. Meski memiliki banyak kelebihan, motor PM dan motor induksi sama-sama memiliki keterbatasan. Misalnya, motor PM menghadapi kemungkinan demagnetisasi pada suhu yang sangat tinggi, rentang kecepatan terbatas, dan kesulitan dalam melindungi powertrain selama kondisi gangguan. Motor induksi memiliki kemampuan torsi yang terbatas pada kecepatan rendah, kerapatan torsi yang lebih rendah dan efisiensi yang lebih rendah, kebisingan akibat kombinasi slot stator/rotor, dan sebagainya.

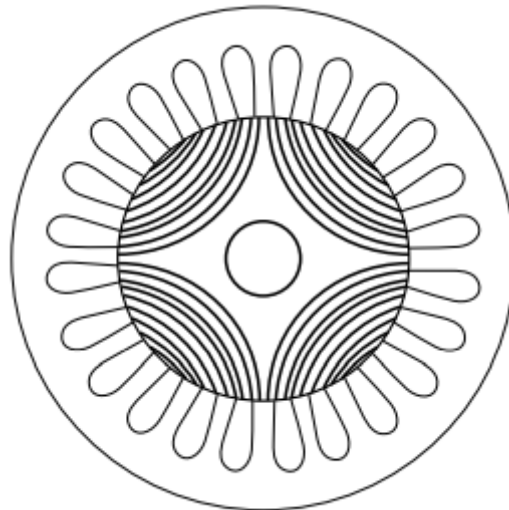
Dari bagian sebelumnya kita telah melihat bahwa torsi motor sinkron memiliki dua istilah, satu terkait dengan E_o dan X_d , yang diinduksi oleh medan PM rotor, dan satu terkait dengan V , X_d , dan X_q , yang diinduksi oleh medan magnet memiliki perbedaan reaktansi pada sumbu d dan sumbu q . Dengan kata lain, bahkan jika magnet dilepas, motor IPM masih dapat menghasilkan torsi dengan suplai sinusoidal karena adanya salience dari rotor. Ini disebut motor keengganan sinkron. Stator dan rotor motor reluktansi sinkron memiliki jumlah kutub yang sama.

Switched reluctance atau *motor synchronous reluctance* tidak menggunakan magnet atau sangkar tupai. Mereka hanya menggunakan perbedaan reaktansi sumbu d dan sumbu q untuk menghasilkan torsi enggan. Oleh karena itu, mereka mirip dengan motor sinkron tanpa eksitasi dan karena itu dikenal sebagai motor reluktansi yang diaktifkan. Oleh karena itu hanya suku kedua dari Persamaan 10.72 yang ada. Torsi motor reluktansi sakelar dengan suplai sinusoidal adalah:

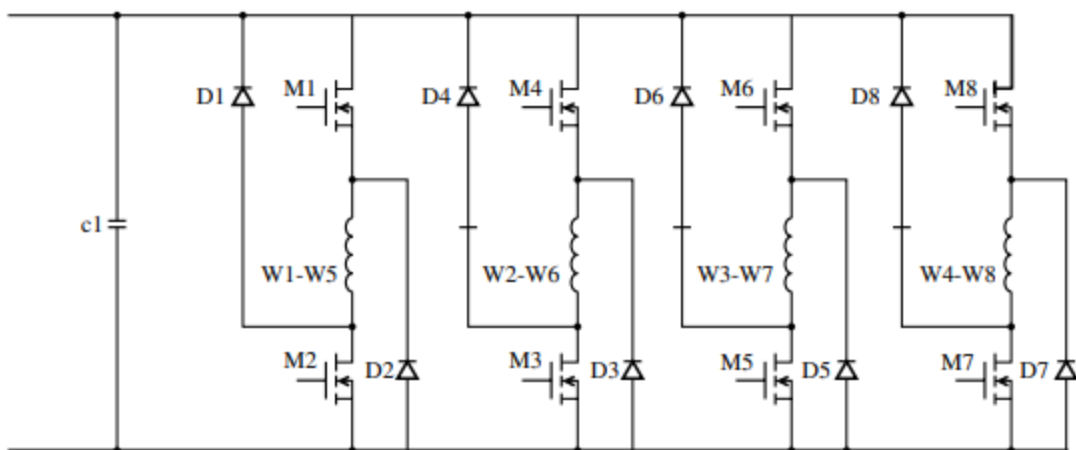
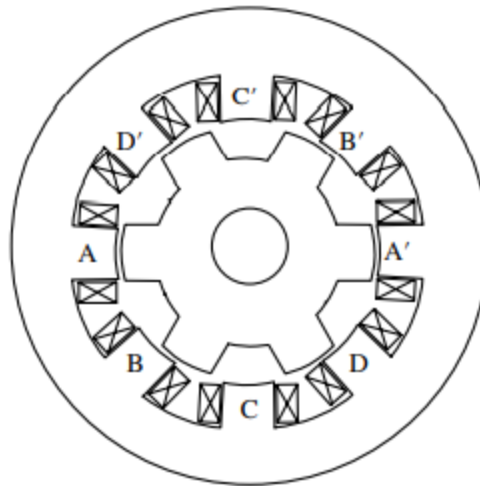
Persamaan 10.118

$$T = \frac{mN^2}{2\omega R} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\theta)$$

Untuk meningkatkan torsi motor reluktansi yang diaktifkan, reaktansi sumbu q dan sumbu d dirancang untuk memiliki perbedaan yang besar. Penampang motor reluktansi sinkron ditunjukkan pada Gambar 10.42



Gambar 10.42 Keegganan sinkron motor.

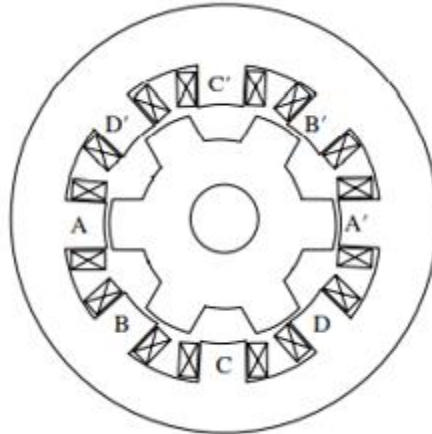


Gambar 10.43 Penampang melintang motor reluktansi sakelar 6/8 kutub dan sirkuit kontrolnya: atas, luas penampang SRM; bawah, sirkuit kontrol SRM

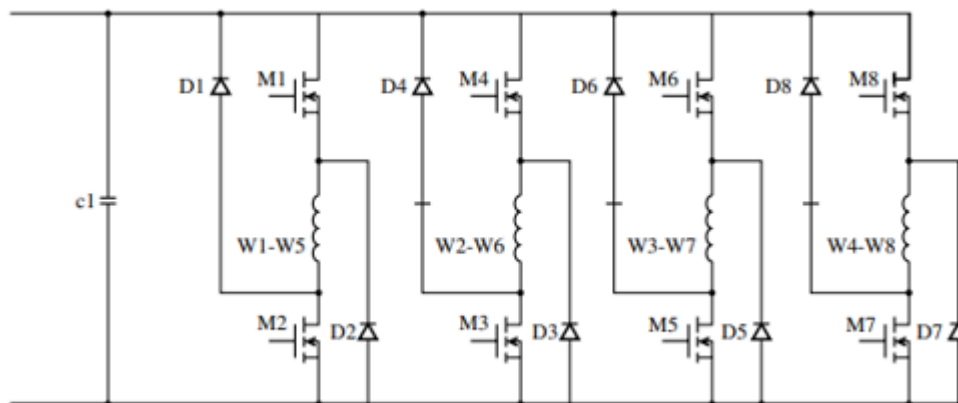
Motor reluktansi sakelar mirip dengan motor sinkron tetapi akan memiliki jumlah kutub yang berbeda pada stator dan rotor. Gambar 10.43 menunjukkan penampang motor reluktansi sakelar dan rangkaian kontrolnya.

Mesin Magnet Permanen Dua Kali Penting

Mesin magnet permanen ganda-salient (DSPM), jenis baru motor traksi listrik inverter-makan pertama kali diusulkan pada awal 1990-an, menjadi lebih dan lebih menarik karena fitur-fiturnya yang berbeda, seperti efisiensi tinggi, kepadatan daya tinggi, dan struktur sederhana. Banyak kemajuan telah dibuat pada desain mesin DSPM. Misalnya, Liao et al. membahas prinsip-prinsip dasar mesin DSPM pada tahun 1992, 1993, dan 1995. Cheng dan Chau dan rekan kerja mempelajari karakteristik kondisi mapan dan kinerja mesin DSPM menggunakan analisis rangkaian magnetik jaringan bervariasi nonlinier.



Gambar 10.44 Geometri tipikal DSPM dengan pasangan kutub 6/4.



Gambar 10.45 Hubungan fluks (garis putus-putus) dan mode pergantian (garis padat).

Mesin DSPM menyerupai struktur motor SRM kecuali bahwa PM dimasukkan ke dalam stator. Oleh karena itu beberapa teknik umum yang digunakan pada motor SRM juga diadopsi dalam desain dan kontrol mesin DSPM. Misalnya, busur kutub rotor yang lebih lebar, kontrol sudut penutup yang canggih, dan kontrol sudut tembak yang tertinggal, semuanya dapat digunakan dalam desain dan kontrol mesin DSPM. Namun, karena keberadaan PM di stator, perilaku mesin DSPM berbeda dengan motor SRM. Oleh karena itu, desain baru dan konsep kontrol perlu dieksplorasi untuk mengoptimalkan kinerja mesin DSPM.

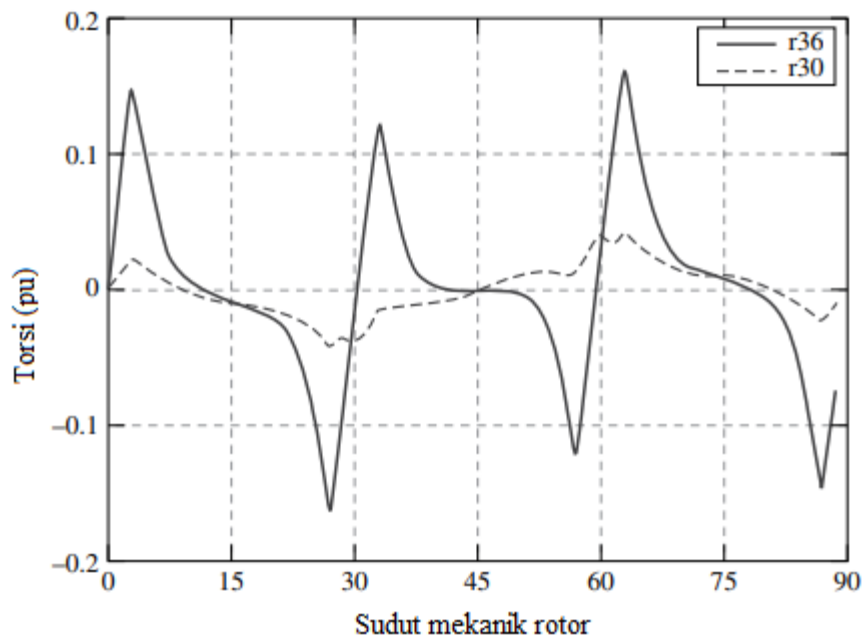
Gambar 10.44 menunjukkan geometri tipikal mesin DSPM dengan pasangan kutub 6/4, di mana AX, BY, CZ dan A'X', B'Y', C'Z' adalah belitan tiga fasa. Ini menyerupai struktur motor SRM, kecuali bahwa PM dimasukkan ke dalam stator. Hubungan fluks tiga fasa ditunjukkan pada Gambar 10.45. Karena keberadaan PM di stator, fluks PM memainkan peran utama dalam hubungan fluks belitan. Oleh karena itu, kontrol polaritas ganda dapat digunakan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.45, untuk meningkatkan densitas daya.

Dalam praktik desain motor SRM, untuk memastikan pergantian belitan dan kemampuan memulai sendiri pada setiap posisi rotor dan arah putaran mana pun, harus ada

tumpang tindih kecil antara kutub menonjol stator dan rotor yang berdekatan ketika sumbu kutub stator sejajar dengan kutub rotor.

Oleh karena itu lebar kutub rotor biasanya lebih besar daripada lebar stator. Teknologi ini juga digunakan pada mesin DSPM karena kesamaan struktural. Tetapi karena keberadaan PMs di stator, torsi cogging (karena adanya magnet permanen dan menonjol dari slot atau gigi di laminasi) ada di mesin DSPM. Menurut diagram fluks-mmf mesin PM, torsi cogging akan mencapai minimum jika reluktansi gap yang dihasilkan seragam pada setiap posisi rotor. Oleh karena itu, untuk mesin DSPM pasangan kutub 6/4, jika lebar kutub rotor sama dengan lebar stator dan lebarnya adalah setengah pitch, maka torsi cogging akan mencapai nilai minimumnya; jika lebar kutub rotor lebih besar dari lebar kutub stator, torsi cogging akan meningkat secara signifikan karena reluktansi celah tidak akan seragam karena posisi rotor bervariasi.

Torsi cogging adalah salah satu masalah paling penting dari mesin DSPM. Torsi cogging yang diperoleh dari FEA ditunjukkan pada Gambar 10.46 untuk lebar kutub rotor yang lebih besar 36° dan lebar seragam 30° . Torsi cogging dihitung menggunakan 2D FEA. Dapat dilihat dari Gambar 10.46 bahwa torsi cogging secara signifikan lebih kecil untuk lebar kutub rotor yang lebih kecil. Juga dapat dilihat bahwa torsi cogging memiliki puncak yang berbeda. Hal ini disebabkan oleh perbedaan fluks linkage dari kedua PM tersebut. Ketika kutub rotor sejajar dengan kutub stator yang berdekatan dengan magnet, kebocoran fluks berkurang. Oleh karena itu ada lebih banyak torsi cogging. Ketika kutub-kutub rotor sejajar dengan kutub-kutub stator yang berada di tengah-tengah kedua magnet, semakin banyak kebocoran fluks yang terlihat. Oleh karena itu torsi cogging lebih kecil.



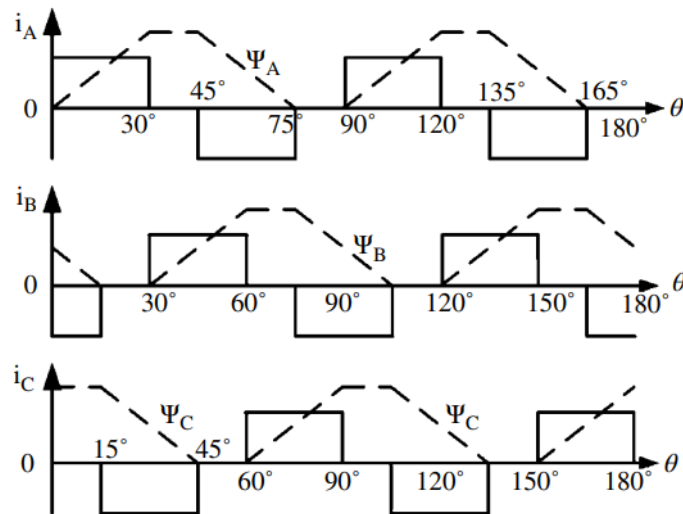
Gambar 10.46 Torsi cogging dengan lebar kutub rotor berbeda (rotor tidak miring).

Untuk meminimalkan torsi cogging dari mesin DSPM, lebar kutub rotor dirancang sama dengan lebar stator, keduanya sama dengan setengah jarak kutub,

Persamaan 10.119

$$\theta_s = \theta_r = \frac{\pi}{N_s}$$

Untuk mesin DSPM pasangan kutub 6/4, ini adalah 30° derajat mekanis



Gambar 10.47 Hubungan fluks (garis putus-putus) dan mode pergantian (garis padat) dari mesin DSPM rotor miring.

Kedua, rotor miring digunakan untuk memastikan kemampuan memulai sendiri pada setiap posisi rotor dan arah putaran mana pun. Dari kurva hubungan fluks, rotor yang miring juga dapat menyebabkan tumpang tindih antara stator yang berdekatan dan kutub menonjol rotor, yang memberikan efek yang sama seperti lebar kutub rotor yang lebih besar yang digunakan pada motor SRM. Untuk mendapatkan kemampuan output terbesar, sudut kemiringan dipilih menjadi setengah dari lebar tiang menonjol stator,

Persamaan 10.120

$$\theta_{skew} = \frac{\theta_r}{2} = \frac{\pi}{2N_s}$$

Untuk mesin DSPM pasangan kutub 6/4, sudut kemiringannya adalah 15°.

Hubungan fluks mesin DSPM rotor miring ditunjukkan pada Gambar 10.47. Dapat dilihat bahwa hubungan fluks mesin ini berbeda dengan yang tidak miring yang ditunjukkan pada Gambar 10.45; yaitu, cakupan hubungan fluks meningkat dari 120° menjadi 150°. Akibatnya, mode pergantian enam keadaan dapat digunakan.

Dalam kontrol mesin DSPM konvensional, mode pergantian tiga keadaan digunakan, yaitu, +A C, A +B, dan B +C masing-masing, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.45. Mode pergantian sederhana ini umumnya menghasilkan kinerja mesin DSPM yang buruk. Dapat dilihat bahwa arus yang berpindah dari positif ke negatif berurutan. Namun dalam praktiknya, karena kontinuitas arus, sudut pemutusan arus positif harus dimajukan, atau arus freewheeling akan menghasilkan torsi balik. Hal ini akan menyebabkan komplikasi kontrol dan penurunan kemampuan output.

Menurut prinsip pergantian yang sama seperti pada motor DSPM konvensional, yaitu, arus positif mengalir pada kemiringan yang meningkat dari hubungan fluks, sedangkan arus negatif mengalir pada kemiringan yang menurun, mode pergantian baru untuk motor DSPM rotor miring yang baru dapat dikembangkan sebagai ditunjukkan oleh garis padat pada Gambar 10.47. Ini adalah mode com bermutasi enam-negara. Urutan konduktor adalah +A B, +A C, +B C, +B A, +C A, dan +C -B. Setiap keadaan akan dilakukan selama 60 derajat listrik secara terus menerus, dan ada interval 60 derajat antara pergantian arus positif dan negatif. Mode pergantian ini memungkinkan untuk mengabaikan kontrol sudut turn-off, oleh karena itu kinerja pergantian dapat ditingkatkan dan keandalan ditingkatkan.

10.9 DESAIN DAN UKURAN MOTOR TRAKSI

Tugas terpenting dalam desain penggerak traksi adalah menghitung ukuran motor. Ambil motor PM sebagai contoh. Daya motor dapat dinyatakan seperti pada Persamaan 10.70 dan emf balik dapat dinyatakan seperti pada Persamaan 10.96. Substitusikan Persamaan 10.96 ke Persamaan 10.70, kita dapatkan

Persamaan 10.121

$$P = mE_0 I \cos \delta = mI \cos \delta \sqrt{2\pi K_w} f W \Phi$$

Rapat arus linier (atau rapat arus spesifik) sepanjang permukaan bagian dalam stator adalah A (A/m) dan diameter bagian dalam stator adalah D . Maka

Persamaan 10.122

$$2mWI = \pi DA$$

Fluks total per kutub dapat dinyatakan dalam kerapatan fluks celah udara B :

Persamaan 10.123

$$\Phi = \frac{\pi D l}{2p} B \alpha$$

di mana l adalah panjang tumpukan stator, adalah selubung kutub sebagai persentase dari pitch kutub, dan B adalah kerapatan fluks celah udara. Dalam kontrol motor PM, kita mengatur sudut daya dalam δ ke 0 untuk mencapai torsi maksimum. Karena $f = pn/60$,

Persamaan 10.124

$$P = m \frac{\pi DA}{amW} \sqrt{2\pi K_w} \frac{pn}{60} W \frac{\pi D l}{2p} B \alpha$$

Karena itu

Persamaan 10.125

$$D^2 l = \frac{60}{\sqrt{2\pi^3}} \frac{4}{\alpha K_w} \frac{P}{AB n}$$

Karena K_w , A , dan B berada dalam kisaran yang relatif sempit untuk semua jenis motor, ekspresi ini menunjukkan bahwa volume efektif motor sebanding dengan daya P dan berbanding terbalik dengan kecepatan n . Nilai tipikal untuk A adalah 100 kA/m untuk motor berpendingin udara kecil, dan hingga 400 kA/m untuk motor berpendingin cairan. Level tipikal untuk B adalah sekitar 0,4 T untuk motor kecil, dan hingga 1,2 T untuk motor kepadatan tinggi. Mempertimbangkan bahwa $P = T2\pi n/60$, kita memiliki

Persamaan 10.126

$$D^2 l = k \frac{P}{n} \propto T$$

Dengan kata lain, ukuran motor listrik sebanding dengan nilai torsinya.

10.10 PEMILIHAN A DAN B

Dalam persamaan di atas untuk ukuran motor traksi, baik A dan B adalah pilihan berdasarkan pengalaman. B menunjukkan berapa banyak bahan magnetik (baja silikon) yang digunakan dan A menunjukkan berapa banyak bahan listrik (tembaga atau aluminium) yang digunakan. B dibatasi oleh kerugian magnetik pada gigi dan kuk. A tinggi B berarti bahan magnetik kurang tetapi kerugian magnetik lebih tinggi. A tinggi berarti bahan tembaga lebih sedikit tetapi rugi-rugi listrik lebih tinggi. Suhu sekitar, frekuensi pengoperasian, dan metode pendinginan dapat memengaruhi pemilihan A dan B. Motor besar umumnya akan memiliki nilai A dan B.

Penentuan Kekuatan Batin

Dalam Persamaan 10.125, daya yang digunakan dalam sizing adalah daya dalam (bukan daya poros). Oleh karena itu, untuk motor, daya tersebut adalah daya poros dibagi dengan efisiensi dan faktor daya, $P' = KEPN/(\eta N \cos \phi_N)$, dan untuk generator, $P' = KEPN/\cos \phi_N$, di mana K_E adalah rasio emf balik dan nilai tegangan suplai. Karena efisiensi η dan faktor daya tidak diketahui sampai desain selesai, kita harus mulai dengan membuat asumsi untuk nilai-nilai ini dan memvalidasinya di akhir desain.

10.11 ANALISIS TERMAL DAN PEMODELAN MOTOR TRAKSI

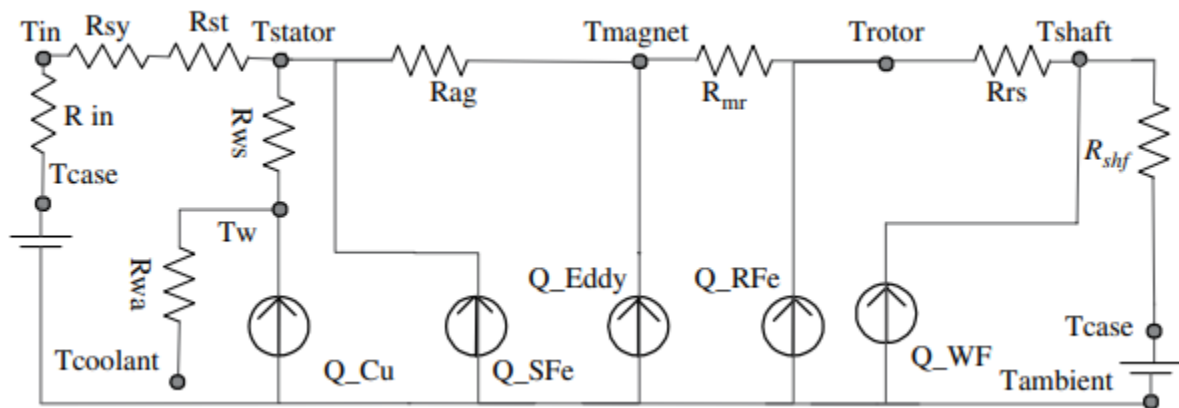
Masalah termal adalah aspek penting dalam desain dan analisis motor traksi. Motor traksi menunjukkan kerugian gesekan dan angin yang tinggi karena operasi kecepatan tinggi, kerugian magnetik tinggi karena operasi frekuensi tinggi, dan kerugian tambahan yang disebabkan oleh harmonik PWM. Analisis termal sangat penting untuk motor PM karena magnet dapat mengalami demagnetisasi pada suhu tinggi.

Studi termal pada motor listrik sering mendekati subjek menggunakan FEA. Time-stepping FEA dapat memberikan akurasi yang lebih besar untuk distribusi termal di motor. Namun, tetap relatif memakan waktu dan tidak memberikan wawasan sebanyak solusi analitis. Berbagai metode analitis dan numerik telah dikembangkan untuk analisis termal berbagai jenis motor listrik. Bagian ini berisi diskusi tentang bagaimana menghitung suhu di motor PM. Resistansi termal dalam representasi parameter yang disamakan membatasi jalur perpindahan panas dan analog dengan resistansi dalam rangkaian listrik. Model dengan demikian menetapkan parameter ekuivalen antara domain termal dan listrik, seperti yang diberikan pada Tabel 10.6.

Analogi ini memungkinkan pengembangan model termal parameter lumped untuk setiap motor listrik. Kapasitansi termal biasanya diabaikan karena hanya operasi kondisi tunak dari mesin yang sangat penting. Gambar 10.48 menunjukkan rangkaian ekuivalen termal dari SPM. T_{in} , T_{stator} , T_{magnet} , T_{rotor} , T_w , dan T_{shaft} masing-masing menggambarkan suhu permukaan bagian dalam isolasi antara stator dan casing, permukaan bagian dalam inti stator, permukaan luar magnet, permukaan luar rotor, bagian dari belitan di dalam inti stator, dan bagian dari poros di bawah inti rotor. $T_{coolant}$ dan T_{case} ditetapkan sebagai kondisi batas.

Tabel 10.6 Analogi domain termal dan listrik.

Sirkuit Eelektrik	Sirkuit termal
Tegangan listrik u (V)	Suhu T (K)
Arus I (A)	Heat loss Q (W)
Hambatan listrik R (Ω)	Resistansi termal R (K/W)
Konduktivitas listrik σ (S/m)	Konduktivitas termal k (W/(m K))



Gambar 10.48 Modus rangkaian ekuivalen.

Resistansi termal individu adalah:

R_{ag} , resistansi termal konveksi dari celah udara

R_{mr} , resistansi termal konduksi radial kutub

R_{rs} , resistansi termal konduksi radial dari inti rotor

R_{shf} , ketahanan termal poros

R_{sy} , resistansi termal konduksi radial dari kuk stator

R_{st} , resistansi termal konduksi radial dari gigi stator

R_{ws} , tahanan termal konduksi antara belitan dan stator

R_{in} , kontak tahanan termal antara stator dan housing.

Resistansi Termal dari Celah Udara, R_{ag}

Di dalam celah udara aliran panas lebih besar daripada di udara sebelah karena hampir 99% panas yang dipancarkan dari permukaan rotor ditransfer langsung ke stator. Taylor mengembangkan metode korelasi konveksi tak berdimensi dari pengujian dua silinder konsentris yang berputar relatif satu sama lain, untuk mempertimbangkan perpindahan panas melintasi celah udara; metode ini dimodifikasi lebih lanjut oleh Gazley. Resistansi termal dapat didefinisikan dalam hal panjang celah udara l_g , bilangan Nusselt N_{nu} tak berdimensi, konduktivitas termal dari udara tak bergerak K_{air} , dan luas rata-rata permukaan silinder celah udara A_{ag} :

Persamaan 10.127

$$R_{ag} = \frac{l_g}{N_{NU} K_{air} A_{ag}}$$

$$N_{nu} = 2, \quad N_{Ta} \leq 41$$

$$N_{nu} = 0.212 N_{Ta}^{0.63} N_{Pr}^{0.27}, \quad 41 < N_{Ta} \leq 100$$

$$N_{nu} = 0.386 N_{Ta}^{0.5} N_{Pr}^{0.27}, \quad N_{Ta} \leq 41$$

Nilai bilangan Nusselt N_{nu} , Taylor N_{Ta} , dan Prandtl N_{Pr} untuk dua silinder mulus yang berputar disajikan oleh Taylor. Aliran di celah udara adalah laminar ketika $N_{Ta} \leq 41$, sedangkan aliran melalui vertex dengan perpindahan panas yang ditingkatkan berada di kisaran $41 < N_{Ta} < 100$. Jika $N_{Ta} > 100$ ada aliran turbulen penuh di celah udara. Kemudian, Gazley memodifikasi perpindahan panas dengan peningkatan 10% dalam hasil eksperimen karena efek slot.

Ekspresi yang diberikan dalam (10.127) berlaku untuk motor listrik berpendingin udara. Untuk menganalisis motor berpendingin cairan, konduktivitas termal celah udara diasumsikan memiliki nilai konstan, dan resistansi celah udara yang setara dapat dihitung dengan mempertimbangkan celah udara sama dengan silinder. Hsu dkk menunjukkan bahwa

konduktivitas termal dari motor traksi Toyota Prius adalah 10 W/(m °C) berdasarkan campuran konvektif minyak dan udara. Dalam hal ini, ekspresi yang lebih sederhana untuk menurunkan hambatan termal celah udara adalah:

$$R_{ag2} = \frac{\ln\left(\frac{r_{is}}{r_{magnet}}\right)}{2\pi K_{ag} L_g}$$

di mana r_{magnet} adalah jari-jari magnet luar, r_{is} adalah jari-jari stator bagian dalam, dan k_{ag} adalah konduktivitas termal celah udara.

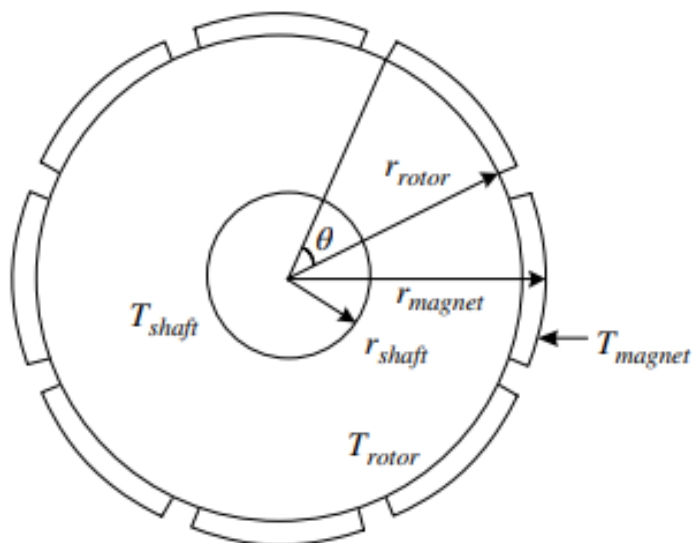
Resistansi Termal Konduksi Radial Inti Rotor, R_{rs}

Gambar 10.49 menunjukkan inti rotor sebagai silinder yang terbuat dari laminasi. Perpindahan panas radial lebih menonjol daripada perpindahan panas aksial dalam laminasi, oleh karena itu koefisien perpindahan panas dihitung untuk arah radial:

Persamaan 10.129

$$R_{rs} = \frac{\ln\left(\frac{r_{rotor}}{r_{shaft}}\right)}{2\pi K_{rotor} L_s}$$

di mana r_{shaft} adalah jari-jari poros, k_{rotor} adalah konduktivitas termal inti rotor, dan L_s adalah panjang aksial inti rotor.



Gambar 10.49 Dimensi radial rotor.

Resistansi Termal Konduksi Radial Kutub, R_{mr}

Magnet yang dipasang di permukaan yang didistribusikan pada inti rotor diasumsikan sebagai silinder ekuivalen dengan $n\theta$ radian:

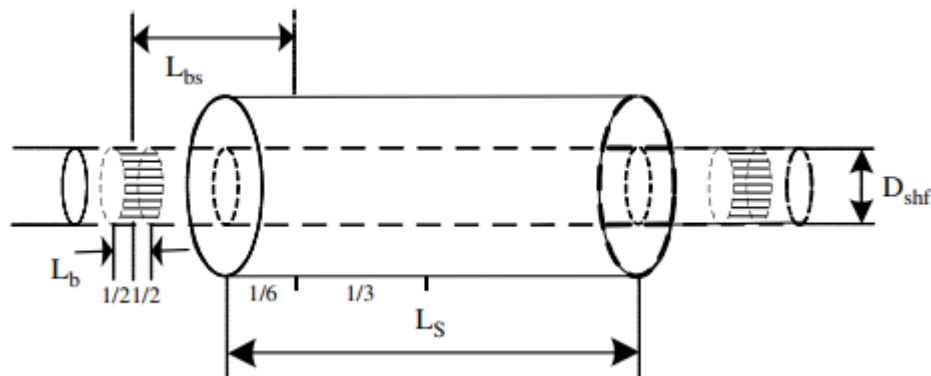
Persamaan 10.130

$$R_{mr} = \frac{\ln\left(\frac{r_{magnet}}{r_{rotor}}\right)}{n\theta K_m L_s}$$

di mana r_{magnet} adalah jari-jari rotor luar, r_{rotor} adalah jari-jari inti rotor, n adalah jumlah kutub, θ adalah lebar masing-masing kutub dalam radian, k_m adalah konduktivitas termal magnet, dan L_s adalah panjang aksial kutub.

Resistansi Termal Poros, R_{shf}

Poros direpresentasikan sebagai batang silinder dengan konduksi panas aksial dan dipisahkan menjadi tiga bagian: satu yang terletak di bawah inti rotor; detak yang terletak di bawah bantalan; dan sepertiga yang bertindak sebagai hubungan termal antara suhu rata-rata dari dua suhu sebelumnya. Karena bantalan memberikan kontak termal yang baik, cukup untuk mempertimbangkan kontak termal yang ada antara poros dan selubung termal (Gambar 10.50).



Gambar 10.50 Dimensi aksial poros.

Konveksi antara poros dan udara yang berdampingan diabaikan karena perpindahan panas dari udara ke poros dapat diabaikan. Dengan demikian:

Persamaan 10.131

$$R_{shf} = \frac{R_a + R_b}{2}$$

di mana

$$R_a = \frac{1}{2\pi k_{shf}} + \frac{L_{bs}}{2\pi k_{shf} \left(\frac{D_{shf}}{2}\right)^2}$$

$$R_b = \frac{1}{4\pi k_{shf}} + \frac{L_{bs}}{4\pi k_{shf} \left(\frac{D_{shf}}{2}\right)^2}$$

k_{shf} adalah konduktivitas termal poros, L_b adalah ketebalan bantalan, D_{shf} adalah jari-jari poros, dan L_{bs} adalah jarak dari pusat bantalan ke rata-rata rotor.

Resistansi Termal Konduksi Radial Gigi Stator, R_{st}

Karena inti rotor dan stator terdiri dari lapisan laminasi, hanya konduktivitas termal dalam arah radial yang dipertimbangkan (Gambar 10.51). Untuk menghitung tahanan termal stator secara tepat, stator dimodelkan sebagai dua bagian, satu sebagai kuk stator dan yang lainnya sebagai gigi stator. Silinder ekuivalen dengan faktor reduksi p digunakan untuk memodelkan gigi stator. Dengan demikian

Persamaan 10.132

$$R_{st} = \frac{\ln\left(\frac{r_{ms}}{r_{is}}\right)}{2\pi k_{shf} L_s \rho}$$

di mana r_{is} adalah jari-jari stator bagian dalam, r_{ms} adalah jari-jari kuk stator bagian dalam, k_{iro} adalah konduktivitas termal stator, adalah persentase bagian gigi terhadap total gigi ditambah semua bagian slot.

Resistansi Termal Konduksi Radial dari Stator Yoke, R_{sy}

Ini dihitung dari

Persamaan 10.133

$$R_{sy} = \frac{\ln\left(\frac{r_{ms}}{r_{is}}\right)}{2\pi k_{iro} L_s}$$

di mana r_{os} adalah radius kuk stator luar.

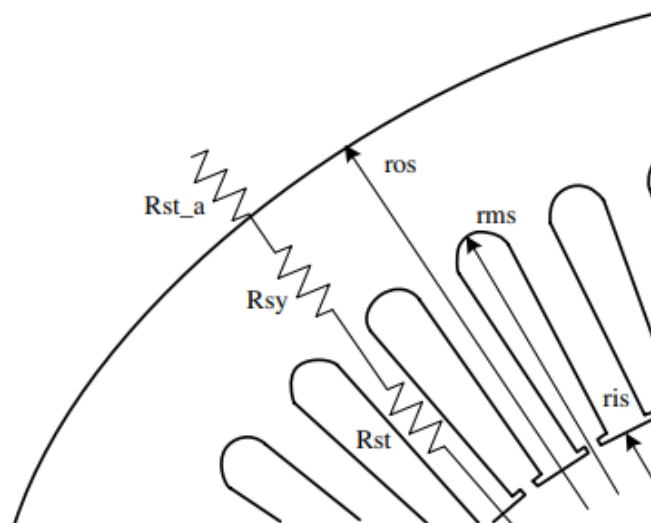
Resistansi Termal Konduksi antara Belitan dan Stator, R_{ws}

Ini diperoleh dari persamaan berikut:

Persamaan 10.134

$$R_{ws} = \frac{S_{slot} - S_{cu}}{l_s k_{cu,ir} A_{slot}}$$

di mana S_{slot} adalah permukaan slot stator, S_{cu} adalah bagian tembaga di slot stator, l_s adalah perimeter slot stator, $k_{cu,ir}$ adalah koefisien konduktivitas ekuivalen dari udara dan bahan isolasi di slot stator, dievaluasi dengan simulasi, dan A_{slot} adalah permukaan celah bagian dalam.



Gambar 10.51 Dimensi radial stator.

Resistansi Termal Konvektif antara Lilitan Luar Stator dan Udara Berdampangan, R_{wa}

Koefisien konveksi antara belitan ujung stator dan udara sekitarnya diperoleh dari.

Persamaan 10.135

$$H_{wa} = 15.5(0.29v+1)$$

di mana $v = r_{magnet}\omega\eta$ adalah kecepatan udara dalam dan v perlu tidak lebih dari 7,5 m/s; 1ω adalah kecepatan sudut rotor dan adalah efisiensi kipas. Nilai 50% diasumsikan untuk efisiensi kipas, biasanya karena tidak tersedianya informasi tentang kecepatan udara radial. Kadang-kadang, ada campuran oli dan udara yang berdampangan dengan belitan, sehingga

peningkatan efisiensi kipas yang setara digunakan. Permukaan total belitan eksternal ke stator dapat dihitung sebagai:

Persamaan 10.136

$$S_{wa} = (L_c - L_s)2\pi r_{is}$$

di mana L_c adalah panjang selubung luar. Oleh karena itu dari (10.135) dan (10.137) tahanan termal antara belitan eksternal ke stator dan udara sekitarnya dapat dihitung sebagai

Persamaan 10.137

$$R_{wa} = \frac{1}{S_{wa}h_{wa}}$$

Dengan menetapkan kerugian dan suhu selubung ($90\text{ }^\circ\text{C}$) ke sirkuit termal, suhu masing-masing komponen di motor dapat diperoleh setelah perhitungan. Perhatikan model sirkuit ekuivalen pada Gambar 10.48. Pada simpul T_{in}

Persamaan 10.138

$$\frac{T_{stator} - T_{in}}{R_{sy} + R_{st}} - \frac{T_{in} - T_{case}}{R_{in}} = 0$$

Pada simpul T_{stator}

Persamaan 10.139

$$\frac{T_{stator} - T_{in}}{R_{sy} + R_{st}} - \frac{T_w - T_{stator}}{R_l} - \frac{T_{magnet} - T_{stator}}{R_{ag}} = Q_{SFe}$$

Pada simpul T^w

Persamaan 10.140

$$\frac{T_w - T_{stator}}{R_{ws}} - \frac{T_w - T_{coolant}}{R_{wa}} = Q_{cu}$$

Pada simpul T_{magnet}

Persamaan 10.141

$$\frac{T_{magnet} - T_{stator}}{R_{ag}} - \frac{T_{rotor} - T_{magnet}}{R_m r} = Q_{Eddy}$$

Di simpul T_{rotor}

Persamaan 10.142

$$\frac{T_{rotor} - T_{shaft}}{R_{rs}} + \frac{T_{rotor} - T_{magnet}}{R_m r} = Q_{RFe} + Q_{WF}$$

Di simpul T_{shaft}

Persamaan 10.143

$$\frac{T_{rotor} - T_{shaft}}{R_{rs}} - \frac{T_{shaft} - T_{case}}{R_{shf}} = 0$$

Persamaan di atas dapat ditulis dalam bentuk matriks dan diselesaikan dengan metode numerik:

Persamaan 10.144

$$\begin{bmatrix} -1/(R_{sy} + R_{st}) - 1/R_{in} & R_{sy} + R_{st} a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1/(R_{sy} + R_{st}) & 1/R_{ag} + 1/(R_{sy} + R_{st}) + 1/R_{ws} & -1/R_{ws} & -1/R_{ag} & 0 & 0 \\ 0 & -1/R_{ws} & 1/R_{ws} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1/R_{ag} & 0 & 1/R_{mr} + 1/R_{ag} & -1/R_{mr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/R_{mr} & -1/R_{rs} + 1/R_{mr} & -1/R_{rs} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/R_{rs} & -1/R_{rs} - 1/R_{shf} \end{bmatrix}$$

Suhu motor PM diselesaikan dengan suhu yang ditunjukkan pada Gambar 10.52. Suhu dari komponen yang berbeda diberikan dalam Tabel 10.7 dan 10.8 untuk motor PM yang dioperasikan di bawah suplai sinusoidal murni dan di bawah suplai PWM.

Tabel 10.7 Distribusi suhu di bawah bentuk gelombang sinusoidal dan PWM.

Nama	Sinusoidal (°C)	PWM (°C)
Insulasi	90–113.23	90–159.14
Stator	113.23–152.35	159.14–198.25
Winding	155.29	202.47
Magnet	154.88–155.47	200.92–201.54
Rotor	155.47–169.76	201.54–213.83
Batang	90–169.76	90–213.83

Tabel 10.8 Distribusi suhu di dalam motor yang diumpankan oleh bentuk gelombang sinusoidal

Nama	Metode Analisis (°C)	Simulasi (°C)
Insulasi	90–113.23	90–119.45
Stator	113.23–152.35	120.21–156.73
Winding	155.29	162.63–180.39
Magnet	154.88–155.47	158.68–161.13
Rotor	155.47–169.76	156.34–162.90
Batang	90–169.76	90–163.58



Gambar 10.52 Profil suhu pada magnet.

10.12 KESIMPULAN

Motor listrik dan pengontrol terkait adalah salah satu teknologi pendukung utama untuk kendaraan listrik listrik, listrik hibrida, dan hibrida plug-in. Berbagai jenis motor listrik dan sistem penggerak tersedia untuk powertrain kendaraan listrik. Motor traksi dan drive mengalami kondisi lingkungan yang sangat keras, seperti rentang suhu yang luas (-30 hingga 60°C), getaran dan guncangan yang parah, kebisingan elektromagnetik yang tinggi, batasan ukuran dan berat, serta persyaratan keselamatan dan keandalan yang ketat. Akibatnya, ada banyak aspek unik dalam desain, pengembangan, analisis, manufaktur, dan penelitian motor listrik dan penggerak untuk aplikasi traksi yang semuanya merupakan aspek penting tetapi tidak semuanya dapat tercakup dalam bab ini. Pembaca dapat berkonsultasi dengan referensi di bawah ini untuk bacaan lebih lanjut. Misalnya, studi yang lebih mendalam tentang desain motor keengganan sinkron.

BAB 11

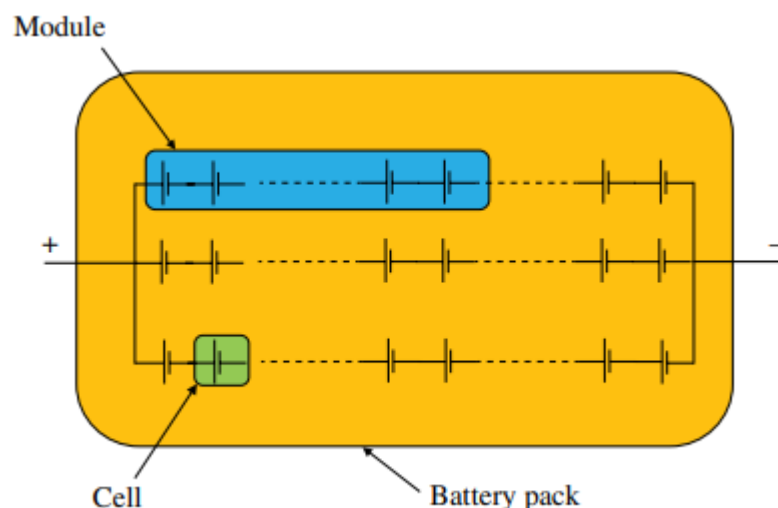
SUMBER ENERGI LISTRIK DAN PERANGKAT PENYIMPANAN

11.1 PENDAHULUAN

Pada dasarnya, memberi energi pada HEV atau EV membutuhkan dua jenis perangkat. Perangkat pertama adalah sumber energi, atau lebih tepatnya sumber daya. Contohnya adalah ICE, dan sel bahan bakar. Bab ini akan berfokus pada sumber listrik. Dalam kategori ini adalah sel bahan bakar, yang secara langsung mengubah energi kimia menjadi energi listrik. Perangkat lain yang tidak mengubah daya, melainkan menyimpan energi, adalah perangkat seperti baterai, ultrakapasitor atau superkapasitor, dan flywheel. Perangkat tersebut sesuai untuk EV, HEV, atau PHEV (plug-in hybrid). Biasanya, dalam HEV atau PHEV, baterai atau ultrakapasitor dapat diisi dengan menggunakan ICE, yang dapat menjalankan generator, dan mengisi baterai atau ultrakapasitor.

Dalam kasus EV atau PHEV, umumnya ini akan dibebankan dari jaringan listrik utilitas. Sumber daya yang disebutkan di atas, atau elemen penyimpanan energi, kemudian dapat menggerakkan motor listrik dan menyediakan tenaga penggerak. Tetapi sistem penyimpanan energi menawarkan manfaat memulihkan energi pengereman regeneratif dan menyimpannya untuk penggunaan di masa mendatang, biasanya untuk menyediakan tenaga penggerak, sehingga mengarah pada peningkatan efisiensi kendaraan. Dalam bab ini, teknik pemodelan dan simulasi juga akan dibahas sampai batas tertentu, bersama dengan manajemen dan kontrol baterai, dan kita akan membahas aplikasi ultrakapasitor untuk kontrol baterai dan ultrakapasitor.

Elemen dasar dalam baterai adalah sel, dan beberapa sel bersama-sama membentuk modul, dan beberapa modul membentuk paket baterai. Hal ini digambarkan pada Gambar 11.1. Sel adalah elemen penyusun terkecil, dan beberapa sel membuat modul (biasanya kotak plastik seperti baterai otomotif 12 V), dan beberapa modul yang dihubungkan secara seri dan paralel membuat paket baterai lengkap, yang mungkin dapat berupa nominal 240 V mengemas.



Gambar 11.1 Hubungan antara sel, modul, dan baterai.

Di HEV, karena adanya ICE, penting untuk mengoordinasikan dan mengontrol sistem HEV dengan benar untuk menyediakan manajemen energi baterai dengan benar, yang menyiratkan pengisian, pengosongan, dan pemerataan pengisian sesuai kebutuhan. Hal yang sama juga berlaku untuk ultrakapasitor, dan jika baterai dan ultrakapasitor ada, menjadi

penting untuk mengoordinasikan perangkat ini dengan ICE, dan juga berkoordinasi antara baterai dan ultrakapasitor. Ini mungkin memerlukan penggunaan konverter DC-DC yang sesuai, dan prosesnya mungkin perlu dua arah. Dengan sel bahan bakar, koordinasi dan manajemen serupa juga diperlukan, kecuali bahwa sel bahan bakar hanya dapat mengeluarkan energi, tetapi tidak dapat menerima energi.

Baterai umumnya dianggap sebagai perangkat intensif energi, sedangkan kapasitor ultra dianggap lebih merupakan perangkat intensif daya. Secara longgar, ini menyiratkan bahwa untuk ukuran dan berat tertentu, baterai mampu menyimpan lebih banyak energi dibandingkan dengan ultrakapasitor, dan ultrakapasitor mampu memberikan daya yang lebih tinggi dibandingkan dengan baterai. Dari sudut pandang rangkaian listrik, dalam hal karakteristik terminal c, ini dapat dikaitkan dengan resistansi internal yang relatif rendah dari kapasitor ultra, dibandingkan dengan baterai. Oleh karena itu, karena konstanta waktu yang rendah, ultrakapasitor memiliki respons waktu yang lebih cepat dibandingkan dengan baterai yang sebanding untuk mengirimkan permintaan arus yang tiba-tiba. Sifat-sifat ini sebenarnya karena sifat elektrokimia yang lebih mendasar dari kedua perangkat.

Meskipun baterai adalah perangkat elektrokimia yang sangat nonlinier dan tidak ada model sempurna yang tersedia, baterai dapat dimodelkan secara wajar dari sudut pandang rangkaian listrik dalam hal karakteristik terminalnya. Ini melibatkan deskripsinya melalui rangkaian ekuivalen menggunakan resistansi internal, kapasitansi, dan dioda. Selain itu, ketergantungan suhu dari perilaku baterai dapat digambarkan dengan menggunakan parameter rangkaian ekuivalen yang bergantung pada suhu.

Ultrakapasitor juga dapat dimodelkan dengan cara yang sama, dan terkadang elemen induktif juga dapat ditambahkan, selain resistansi dan kapasitansi, untuk mewakili perilaku terminalnya dengan benar. Perlu dicatat bahwa ultrakapasitor menggunakan teknologi yang berbeda (kapasitor lapisan ganda listrik) dari kapasitor yang digunakan dalam elektronik radio dan aplikasi serupa; mereka memiliki kerapatan energi yang jauh lebih tinggi, yang bisa ribuan kali lebih besar daripada kapasitor elektrolitik biasa. Juga, ultrakapasitor adalah perangkat DC tetapi dengan kemampuan arus dua arah yang memungkinkan energi untuk ditransfer ke dan dari itu, sedangkan kapasitor elektronik yang dimaksudkan untuk penyaringan dll mampu aplikasi frekuensi tinggi dengan kapasitas penyimpanan energi yang sangat kecil. Kapasitansi ultrakapasitor biasanya diukur dalam satuan farad dan bahkan bisa beberapa ratus atau lebih farad, tidak seperti kapasitor elektronik terkait teknik komunikasi yang biasanya dalam satuan mikro, nano, atau pico farad. Biasanya status muatan ultrakapasitor dapat bervariasi pada rentang yang luas dan bahkan dapat dikuras hingga nol. Selain itu, ultrakapasitor tipikal dapat menjalani sekitar satu juta siklus pengosongan muatan, tidak seperti baterai yang biasanya hanya dapat melewati beberapa ribu siklus.

11.2 KARAKTERISASI BATERAI

Kapasitas baterai

Kapasitas baterai menyiratkan jumlah muatan listrik yang dapat disuplai oleh baterai sebelum benar-benar habis, tetapi pernyataan ini perlu memenuhi syarat sampai batas tertentu. Pertama, kapasitasnya tergantung pada suhu baterai, dan kedua, istilah "habis" juga perlu diklarifikasi. Ketika dikatakan bahwa baterai habis, itu berarti tegangan telah turun ke nilai yang ditentukan dan juga tidak dapat memberikan muatan lebih lanjut ke beban. Ini akan dibahas lebih lanjut di sini. Satuan SI untuk kapasitas baterai adalah coulomb (C) yang merupakan ampere-sekon. Satuan umum lainnya untuk kapasitas baterai adalah ampere-jam (Ah), yaitu $3600 \text{ ampere-detik} = 3600 \text{ C}$. Kita dapat mempertimbangkan contoh: baterai 10 Ah menyiratkan bahwa ia dapat memasok 1 A selama 10 jam atau 2 A untuk 5 jam dll. Namun, jumlah pengisian daya yang dapat diterima baterai saat sedang diisi, dan dapat dilepaskan

selama pengosongan, juga tergantung pada tingkat pengisian atau pengosongan baterai. Secara umum, karena sifat kimia baterai, ada beberapa parameter efisiensi yang mengarah pada efisiensi yang lebih tinggi saat pengisian atau pengosongan berlangsung pada arus yang lebih rendah. Kita akan memiliki kesempatan untuk membahas ini lebih lanjut selama diskusi tentang pemodelan baterai.

Salah satu item penting yang terkait dengan proses pengisian atau pengosongan baterai dikenal sebagai C-rate. C-rate adalah arus yang akan mengisi baterai yang benar-benar kosong ke nilai ampere-jam (Ah) selama pengisian, atau mengosongkan baterai yang terisi penuh (pada nilai Ah) ke kondisi kosong sepenuhnya. Dengan kata lain, laju-C secara numerik sama dengan kapasitas Ah pengenal baterai, tetapi satuannya dalam ampere.

Energi yang Disimpan dalam Baterai

Energi yang tersimpan dalam baterai tergantung pada tegangan terminal dan jumlah muatan yang tersimpan di dalamnya pada suhu tertentu. Karena amp-hr mewakili jumlah muatan, energi akan menjadi tegangan dikalikan dengan muatan dengan satuan yang sesuai. Meskipun selama proses pengisian dan pengosongan tegangan berubah, mungkin tidak berubah secara substansial, dan oleh karena itu dapat diterima untuk menggunakan persamaan energi berikut selama tegangan tidak bervariasi secara substansial.

Persamaan 11.1

$$\text{Energi dalam watt - jam} = E = \text{amp - jam} \times \text{tegangan}$$

11.3 SOC (STATE OF CHARGE) DI BATERAI DAN PENGUKURAN SOC

Meskipun state-of-charge atau SOC, parameter penting yang terkait dengan baterai, cukup sering digunakan, pada kenyataannya definisinya membutuhkan lebih banyak elaborasi. Definisi sederhana SOC adalah jumlah muatan yang dimiliki baterai pada saat tertentu, dibandingkan dengan muatan pengenal atau amp-jam baterai, jadi, penting untuk mengetahui amp-jam pengenal. Namun, ada masalah tambahan dalam mendefinisikan SOC, karena jumlah pengisian yang dapat diambil bergantung pada suhu dan juga pada usia baterai; juga jumlah muatan yang dimasukkan selama pengisian dapat sedikit lebih banyak daripada yang dapat diambil. Jadi, masalah ini membutuhkan diskusi sebagai berikut.

Informasi yang diketahui atau tersedia saat baterai pertama kali diperoleh biasanya:

- 1) Jenis baterai – asam timbal, NiMH, Li-ion dll.
- 2) Nomor model, dan kurva karakteristik pabrikan sejauh mungkin.
- 3) Diasumsikan bahwa satu-satunya hal yang dapat diukur secara fisik adalah tegangan V, arus I, dan suhu T (suhu lingkungan sekitar casing baterai di luar, dan bukan di dalam modul baterai, untuk jenis baterai yang akan kita gunakan, jadi untuk baterai yang akan kita gunakan, kita akan menganggap bahwa tidak ada sensor internal di dalam modul baterai itu sendiri).
- 4) Untuk menggunakan "impedansi" baterai (istilah ini perlu didefinisikan lebih rinci nanti) sangat dimungkinkan, tetapi perlu dicatat bahwa impedansi baterai adalah fungsi dari V, I, dan T, dan itu adalah besaran turunan.
- 5) Juga diasumsikan bahwa satu-satunya hal yang dapat dikontrol dalam baterai adalah tegangan melintasi dua terminal atau arus yang melaluinya, yaitu V atau I, tetapi tidak keduanya secara independen. Ini dapat dilakukan melalui elektronika daya, atau dengan mengatur medan generator yang digunakan melintasi baterai untuk mengisi dayanya; atau pengisian dapat juga dilakukan oleh beberapa perangkat lain seperti sel bahan bakar yang digabungkan dengan konverter yang sesuai. Dimungkinkan juga untuk mengontrol suhu luar, yaitu suhu lingkungan baterai di sekitarnya (dan akibatnya suhu dalam baterai dapat dipengaruhi) dengan menggunakan beberapa

kipas eksternal atau metode pendinginan lainnya (mungkin menggunakan cairan pendingin), dengan kata lain mengontrol suhu T . Suhu baterai juga dapat dikontrol sampai batas tertentu dengan mengontrol bebannya – meskipun ini mungkin tidak sepenuhnya mengontrol suhu sekitar, tetapi mungkin dapat melakukannya sampai batas tertentu. Ini (kontrol beban) mungkin juga dapat membantu mengontrol suhu bagian dalam baterai sampai batas tertentu.

Selama pengukuran variabel baterai yang berhubungan dengan SOC, waktu pengambilan sampel untuk V dan I dapat menjadi penting hanya selama transien mendadak. Oleh karena itu, secara umum, pengambilan sampel lambat 100 msec atau bahkan 1 detik atau lebih, mungkin cukup memadai untuk banyak tujuan. Tetapi pengambilan sampel dapat dilakukan secara variabel atau adaptif, yaitu jika suatu tren terlihat (V or I) tidak tetap, maka waktu pengambilan sampel harus segera dikurangi, dan sebaliknya. Untuk suhu, yang umumnya memiliki konstanta waktu yang sangat lama – mungkin 10 detik atau bahkan 30 detik – waktu pengambilan sampel mungkin cukup memadai untuk sebagian besar tujuan.

1) **Penentuan SOC**

SOC dapat diukur berdasarkan dua metode: Amp-hr balancing (metode pembukuan) atau berbasis EMF atau metode langsung. Namun agar lebih akurat, disarankan untuk menggunakan kedua metode di atas secara bersamaan dan bergantian, tergantung pada kondisi baterai.

2) **Pengukuran Langsung**

Dalam metode ini, yang tidak didasarkan pada perhitungan Ah kumulatif, tidak diperlukan data historis. Di sini, kita mengukur tegangan rangkaian terbuka (OCV) dan menggunakan tabel pencarian untuk berkorelasi dengan SOC, tabel tersebut didasarkan pada data pabrik yang tersedia dalam kondisi serupa. Metode lain melibatkan pengukuran tegangan V dan arus I , dan kemudian menemukan Z (impedansi), baik melalui perhitungan langsung atau melalui pencocokan dengan model yang melibatkan resistor dan kapasitor. Metode lain adalah menerapkan (atau menyuntikkan) langkah arus, dan memantau konstanta waktu tegangan setelah penerapan langkah.

Kita dapat bertanya bagaimana, dalam lingkungan waktu nyata, semua ini dapat diimplementasikan ketika sistem mengirimkan beban. Salah satu caranya adalah dengan menerapkan persentase yang sangat kecil dari total arus beban melalui perintah arus ke baterai, dan memantau perubahan tegangan (yang bisa sangat kecil dan memerlukan pengukuran yang akurat) dan konstanta waktu dan mencatatnya. Ini tidak akan mengganggu beban secara signifikan namun akan memberikan informasi waktu nyata. Selain hal di atas, kita harus memantau suhu T , karena SOC bergantung pada suhu. Jadi, hasil akhir dari pembahasan di atas dapat dinyatakan sebagai: $SOC = f(V, I, T, Z, \tau)$ dimana:

V = tegangan rangkaian terbuka baterai

I = arus baterai

T = suhu baterai

Z = impedansi baterai

τ = waktu relaksasi tegangan baterai setelah penerapan arus langkah.

Beberapa dari lima besaran ini mungkin saling bergantung. Ekspresi ini adalah versi yang agak disederhanakan yang mungkin cukup untuk aktivitas manajemen daya, tetapi secara umum bisa sangat nonlinier, yang mungkin tidak dinyatakan sebagai bentuk fungsional langsung.

3) **Pengukuran Berbasis Amp-jam**

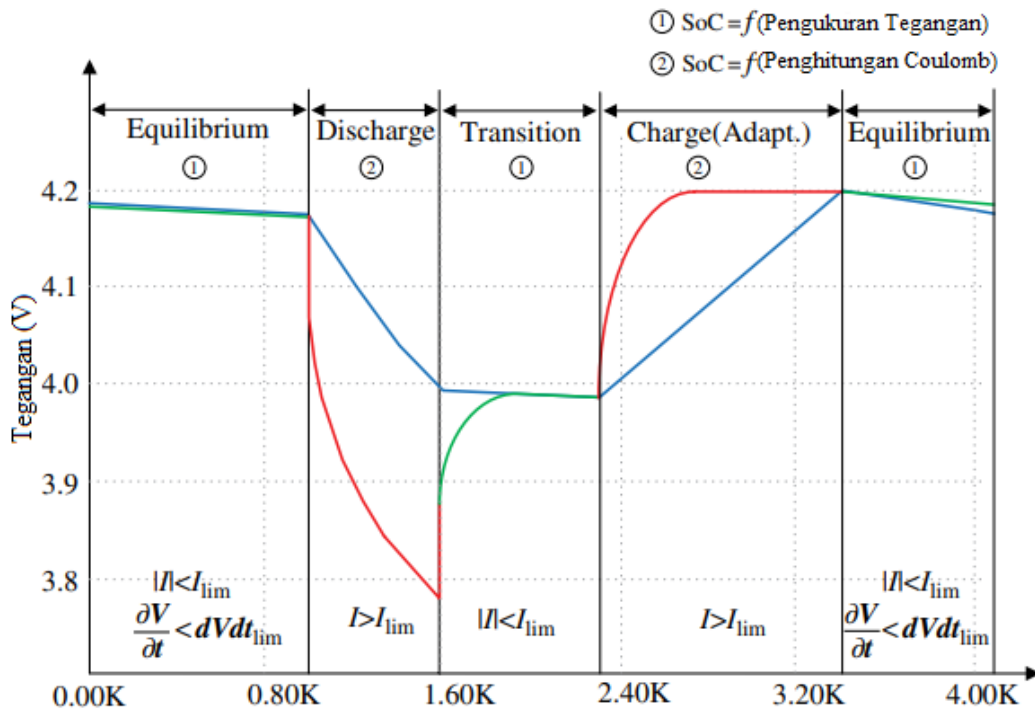
Dalam metode ini, amp-hr dihitung dengan integrasi I. Tetapi seperti disebutkan sebelumnya, ini tidak dapat menghitung amp-hr aktual yang dapat diambil berdasarkan jumlah saat pengisian, atau berapa banyak muatan yang disimpan akan keluar saat pemakaian. Ini karena self-discharge dan kerugian lain di dalam baterai, dan itu terjadi selama proses pengisian dan pengosongan. Selain itu, efisiensi pengosongan dan pengisian ini bergantung pada T. Masalah lain penghitungan amp-jam, yang dapat akurat dalam lingkungan simulasi, tidak akan bertahan dalam situasi fisik waktu nyata karena penyimpangan integrasi I dari waktu ke waktu. Jumlah penyimpangan ini dapat terus terakumulasi seiring bertambahnya waktu, yang menyebabkan ketidakakuratan yang besar.

Dalam berbagai referensi ditunjukkan bahwa selama pembukuan amp-hr tersebut perlu untuk mengkalibrasi nilai amp-hr yang terakumulasi dari waktu ke waktu. Lalu, apa yang harus dikalibrasi?. Jika seseorang ingin mengkalibrasinya dengan "sesuatu yang lain" sebagai referensi, maka "hal lain" itu jelas harus ditemukan dengan beberapa metode selain penghitungan coulomb. Kadang-kadang itu bisa menjadi kurva tegangan baterai pada suhu yang berbeda, dan pada "SOC" yang berbeda, di mana "SOC" dapat berupa kuantitas, yang dengan "definisi" diberi nilai 100% pada tegangan tertentu yang ditentukan oleh pabrikan.

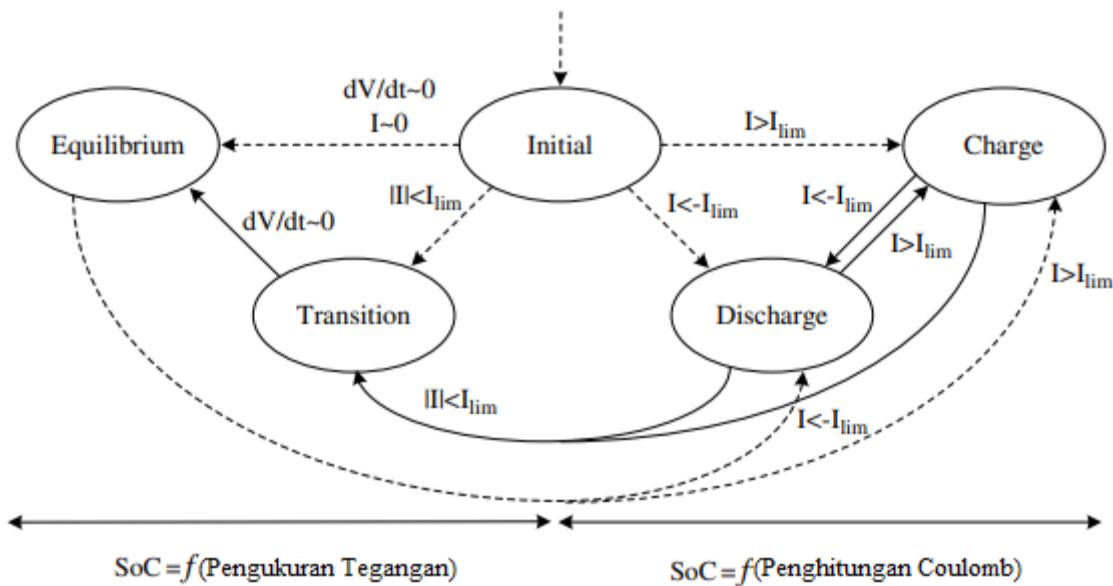
4) **Beberapa Metode yang Lebih Baik**

Untuk tujuan menghitung SOC, perlu membagi status baterai ke dalam status berikut: Awal, Kesetimbangan, Transisi, Pengisian, dan Pengosongan – dan cara untuk menentukan (setelah status awal) status baterai berada, adalah berdasarkan arus dan laju perubahan tegangan. Gambar dan diagram alir berikut menunjukkan situasinya.

Diagram pada Gambar 11.2 dan 11.3 berarti bahwa kita harus memutuskan apakah sedang mengisi/mengosongkan dengan melihat tanda arus sehubungan dengan polaritas tegangan, dan juga dengan memperhatikan apakah nilai absolutnya melebihi ambang batas kecil atau tidak. Demikian pula kita harus melihat dv/dt untuk memutuskan apakah transisi antara ekuilibrium ke keadaan non-ekuilibrium terjadi atau tidak. Perhatikan bahwa selama pengisian dan pemakaian, dv/dt dapat berubah. Pada awalnya, ketika proses komputasi akan dimulai, diasumsikan bahwa baterai, tergantung pada kondisinya, harus bertransisi ke salah satu dari empat status yang disebutkan di atas, di mana pun sebelumnya.



Gambar 11.2 Kemungkinan status baterai



Gambar 11.3 Diagram alir algoritma SOC

Proses Inisialisasi

Algoritme akan dimulai dengan memantau V, I, dan T, dan harus dipantau dengan langkah waktu yang relatif kecil, untuk memulai. Beberapa detik harus dibiarkan berlalu sebelum menggunakan data untuk mengevaluasi dV/dt , I, dll. Segera setelah perhitungan ini selesai, ini akan menentukan status mana yang harus kita transisikan, berdasarkan diagram alir. Jika blok keadaan kita berada di sisi kiri Gambar 11.3, kita harus menggunakan $SOC = f(V, T)$ dan jika berada di sisi kanan seharusnya $SOC = f(\text{accumulated amp-hr}, T)$. Rumus-rumus ini dapat ditingkatkan kemudian dengan menjadikannya sebagai fungsi SOH juga. Jadi, pembahasan di atas menunjukkan bahwa SOC baterai lebih baik dievaluasi seperti di atas, daripada menggunakan metode sederhana yang ditunjukkan dengan mengintegrasikan arus dari waktu ke waktu.

Kedalaman Discharge (DOD) Baterai

Kedalaman debit/*Depth of Discharge* (DOD) dapat didefinisikan dalam hal SOC awal ketika penuh, dan SOC pada waktu tertentu. Dengan kata lain, ini adalah jumlah penipisan yang dialami baterai selama proses pengosongan. Nilai teoritis DOD diberikan oleh (Persamaan 11.2):

$$DOD(t) = \frac{Q_0 - \int_t^{t_0} I_b(\tau) d\tau}{Q_0}$$

di mana Q_0 adalah muatan awal dalam baterai yang sesuai dengan SOC = 1,0 (pengisian penuh), dan I_b adalah arus baterai selama pengosongan. Pada kendaraan hybrid dan listrik, cukup sering (dalam keadaan normal) jumlah DOD bisa di urutan 30% (c atau sesuai dengan 70% SOC). Sekali lagi, untuk mendapatkan kedalaman debit yang benar, perlu untuk menemukan SOC pada waktu tertentu, dan membandingkannya dengan SOC awal pada 100%. Metode yang akurat untuk menemukan SOC harus didasarkan pada bagian sebelumnya, jika tidak, DOD kemungkinan besar tidak akan akurat.

11.4 DAYA SPESIFIK DAN KEPADATAN ENERGI

Daya spesifik mewakili daya pengenalan baterai untuk berat tertentu, mis. kilogram baterai. Serupa dengan ini, ada daya spesifik terkait volume yang ditentukan oleh daya pengenalan baterai untuk ukuran atau volume baterai tertentu, mis. per meter kubik. Mirip dengan daya spesifik, kita juga dapat mendefinisikan energi spesifik, yaitu energi yang tersimpan (misalnya watt-jam) per kilogram, dan energi spesifik volume, yaitu energi yang tersimpan per satuan volume, mis. per meter kubik.

Terkadang hubungan antara energi spesifik dan daya spesifik direpresentasikan dengan menggunakan grafik, yang dikenal sebagai plot Ragone di mana sumbu x dapat menjadi daya spesifik dan sumbu y dapat menjadi energi spesifik untuk baterai. Plot Ragone umumnya digunakan untuk membandingkan berbagai baterai atau jenis perangkat energi lainnya (misalnya ultrakapasitor), flywheel, berbagai sumber kimia dan sebagainya, dalam satu plot yang menunjukkan di mana masing-masing perangkat ini dalam hal energi dan daya tertentu. Tabel 11.1 menunjukkan perbandingan berbagai perangkat dalam hal energi spesifik

Tabel 11.1 Energi spesifik dari berbagai sumber energi.

Sumber Energi	Energi Spesifik (Wh/kg)
Bensin	12,500
Gas alam	9350
metanol	6200
Hidrogen	28,000
Batu bara	8200
Baterai asam timbal	35
Baterai nikel logam hidrida	50
Baterai lithium-polimer	200
Baterai ion lithium	120
Baterai natrium belerang	150–300
Roda gila (baja)	12–30
Roda gila (serat karbon)	30
Ultrakapasitor	3.3

11.5 EFISIENSI AMPERE-JAM (PENGISIAN DAN PENGOSONGAN)

Efisiensi Ampere-jam adalah rasio antara muatan listrik yang diberikan selama mengisi baterai dan muatan listrik yang dibutuhkan baterai untuk kembali ke tingkat pengisian sebelumnya. Jumlah ini tidak sama dan bisa berada di urutan 65-90% (yang mewakili efisiensi). Efisiensi tergantung pada berbagai hal seperti kimia baterai, suhu, dan laju pengisian daya. Selanjutnya, akan terlihat jelas selama pembahasan pemodelan baterai bahwa efisiensi selama pengisian baterai (energi aktual yang disimpan di dalam baterai versus input energi aktual untuk mengisi baterai) berbeda dengan efisiensi pemakaian (output energi aktual pada terminal selama pengosongan versus energi aktual yang tersedia di dalam baterai) karena variasi resistansi internal yang setara dan proses kimia selama pengisian dan pengosongan. Hal ini juga menyebabkan efisiensi pengisian dan pengosongan bervariasi tergantung pada apakah pengisian atau pengosongan dilakukan secara perlahan (arus rendah) atau cepat (arus tinggi).

Jumlah Siklus Dalam dan Masa Pakai Baterai

Baterai EV/HEV dapat mengalami beberapa ratus hingga sekitar beberapa ribu siklus dalam, mis. 80% DOD baterai. DOD yang diizinkan secara umum akan tergantung pada kimia baterai dan pola penggunaan. Konsorsium Baterai Lanjutan (USABC) menyarankan target jangka menengah 600 siklus dalam untuk baterai EV. Ini adalah rekomendasi yang sangat penting dan mempengaruhi masa pakai baterai dalam hal jumlah siklus dalam.

Contoh perhitungan pada baterai tertentu

Baterai traksi NiMH model Toyota Prius 2004 memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- 168 sel (28 modul)
- Tegangan nominal 201,6 V
- Kapasitas nominal 6,5 Ah
- Daya output 28 hp (21 kW)
- Daya spesifik 1300 W/kg
- energi spesifik 46 Wh/kg

Asumsikan bahwa tegangan relatif konstan. Dari atas, peringkat energi baterai adalah $201.6V \times 6.5Ah = 1310 \text{ Wh} = 1.31kWh$. Jika baterai dapat dikosongkan dengan kecepatan maksimum 100 A, dan hanya 40% yang dapat dikosongkan, waktu baterai dapat digunakan saat terisi penuh adalah $\frac{(40\%) 6.5 \text{ Ah}}{100 \text{ A}} = 0.026 \text{ jam} = 93.6 \text{ detik}$. Jika baterai dapat diisi dengan kecepatan maksimum 90 A, dan SOC saat ini adalah 40%, waktu yang diperlukan untuk mengisi baterai hingga 80% SOC adalah $\frac{(80\% - 40\%) 6.5 \text{ Ah}}{90 \text{ A}} = 0.0289 \text{ jam} = 1.73 \text{ menit}$. Dengan asumsi baterai memiliki resistansi internal $0,15\Omega$, efisiensi tarif charge maksimum akan menjadi $\eta = 1 - \frac{(90^2)(0.15)}{(90)(201.6)} = 93.6\%$. Jika baterai memiliki resistansi internal $0,1\Omega$, efisiensi pada debit maksimum rate jadi $\eta = 1 - \frac{(100^2)(0.1)}{(100)(201.6)} = 95\%$

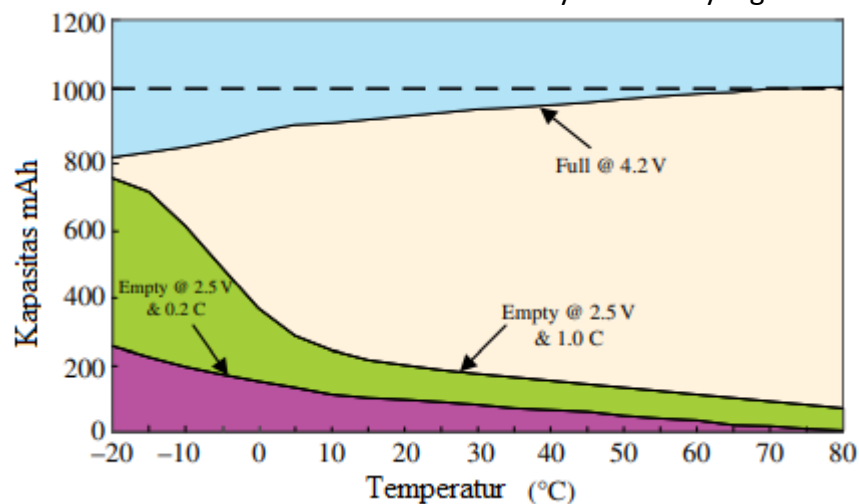
Jatuh tegangan yang disebabkan oleh resistansi internal ini pada pengisian/pengosongan maksimum adalah sebagai berikut: Pada pengisian maksimum, penurunan tegangan adalah $90 \times 0,15 = 13,5 \text{ V}$; pada debit maksimum, penurunan tegangan adalah $100 \times 0,1 = 10 \text{ V}$. Efisiensi akan berubah dengan arus charge/discharge maksimum, karena tergantung pada arus charge/discharge maksimum dan resistansi internal. Dengan asumsi arus bocor (self discharge) adalah 20 mA, jumlah hari yang diperlukan baterai untuk mengosongkan sendiri dari 80% SOC menjadi 40% SOC akan menjadi $\frac{(80 - 40\%) 6.5 \text{ Ah}}{20 \times 10^{-3} \text{ A}} = 130 \text{ jam} = 5.4 \text{ hari}$.

Beberapa Masalah Praktis Tentang Baterai dan Masa Pakai Baterai

Mari kita tinjau kembali beberapa masalah yang terkait dengan SOC. Untuk rumus $SOC = f(V_{emf})$ telah diusulkan bahwa (Rumus 11.3)

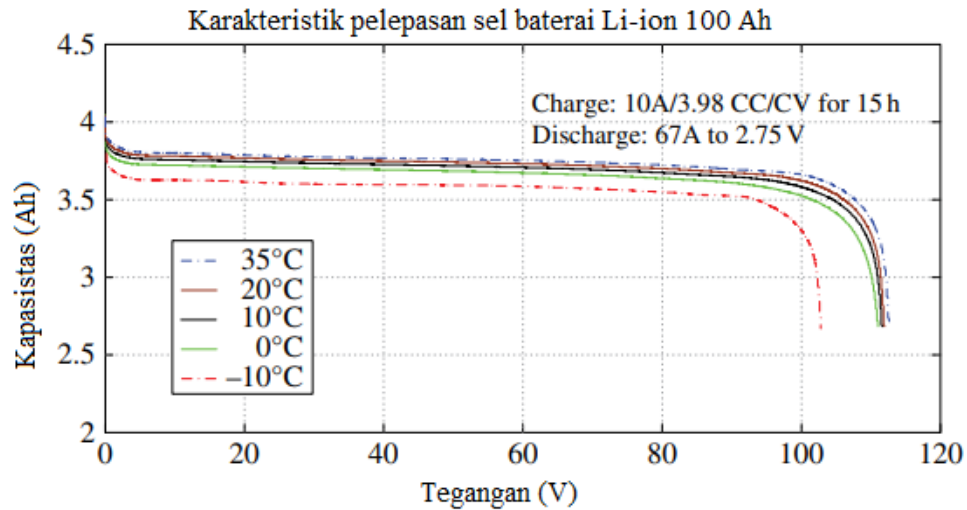
$$V_{emf} = S \times A_S + V_{emf_min}$$

di mana A_S adalah kemiringan tegangan emf dengan SOC S , dan V_{emf_min} adalah emf pada SOC nol. Jadi, bagaimana kita memutuskan tegangan di mana SOC harus dianggap 100%? Tegangan dapat diukur dengan mudah, tetapi kapan kita harus mempertimbangkan SOC menjadi 100%? Juga, mengingat bahwa, dengan penuaan, tegangan rangkaian terbuka akan berbeda bahkan jika jumlah muatan yang sama diberikan sebagai input, definisi SOC diperlukan, untuk memberikan patokan referensi. Patokan tersebut berasal dari spesifikasi pabrikan, yang dapat didefinisikan sebagai berikut. Asumsikan bahwa baterai baru yang diisi sesuai spesifikasi pabrikan pada laju arus tertentu I_{CR} ke amp-jam Ahr tertentu, tiba pada V_{CR} tegangan tertentu (berdasarkan desainnya). Kita dapat mempertimbangkan bahwa V_{CR} tegangan ini kemudian sesuai dengan 100% SOC untuk baterai tertentu pada suhu tertentu di mana pengisian selesai. SOC, oleh karena itu, didasarkan pada referensi amp-hr rating Ahr, tingkat I_{CR} , dan suhu, sehubungan dengan SOC lain yang harus dibandingkan. Hal ini juga diperlukan untuk memiliki satu set kurva dari pabrikan, diambil pada suhu dan laju arus yang berbeda, karena baterai yang sama dapat memiliki SOC yang berbeda, dengan hanya mengisinya untuk mengatakan 100% pada suhu tertentu dan kemudian memindahkannya ke suhu yang berbeda.



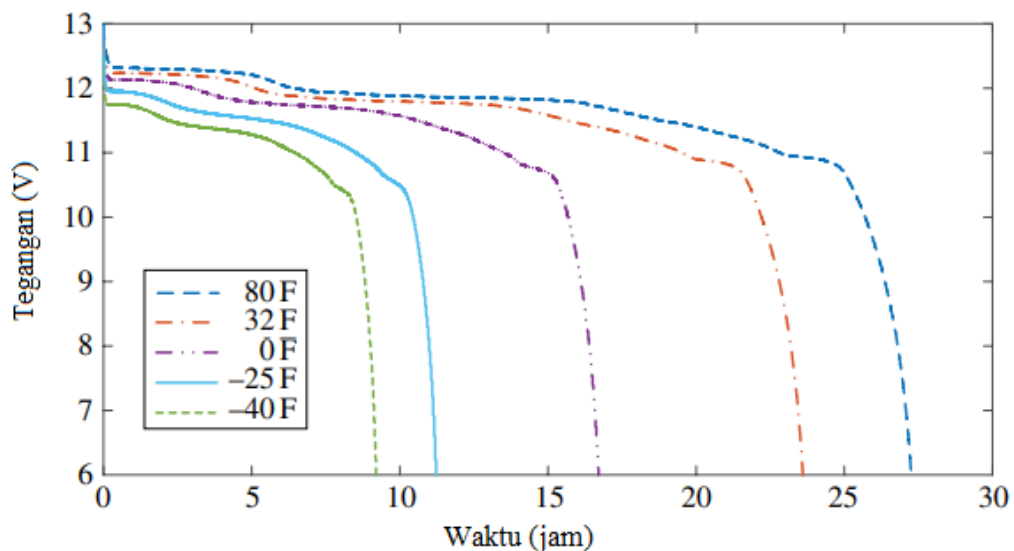
Gambar 11.4 Variasi kapasitas baterai dengan suhu. Sumber: Diadaptasi dari mpoweruk.com

Pertanyaan: jika baterai diisi pada suhu tertentu, dan ampere tertentu dimasukkan ke dalamnya, dan kemudian baterai dipindahkan ke suhu yang lebih dingin, kita tahu bahwa kita tidak akan dapat mengambil semua ampere yang kita miliki. Ke mana sisa amp-jam setelah mengubah suhu? Salah satu penjelasan berdasarkan model rangkaian adalah parameter baterai akan berubah karena perubahan suhu dan energi mungkin diubah menjadi energi kimia dalam bentuk yang tidak dapat diambil secara langsung tanpa menaikkan suhu lagi. Setelah prinsip-prinsip yang disebutkan di atas disepakati, kita kemudian dapat menghubungkan tegangan dan suhu, dan memetakannya ke SOC yang sesuai.



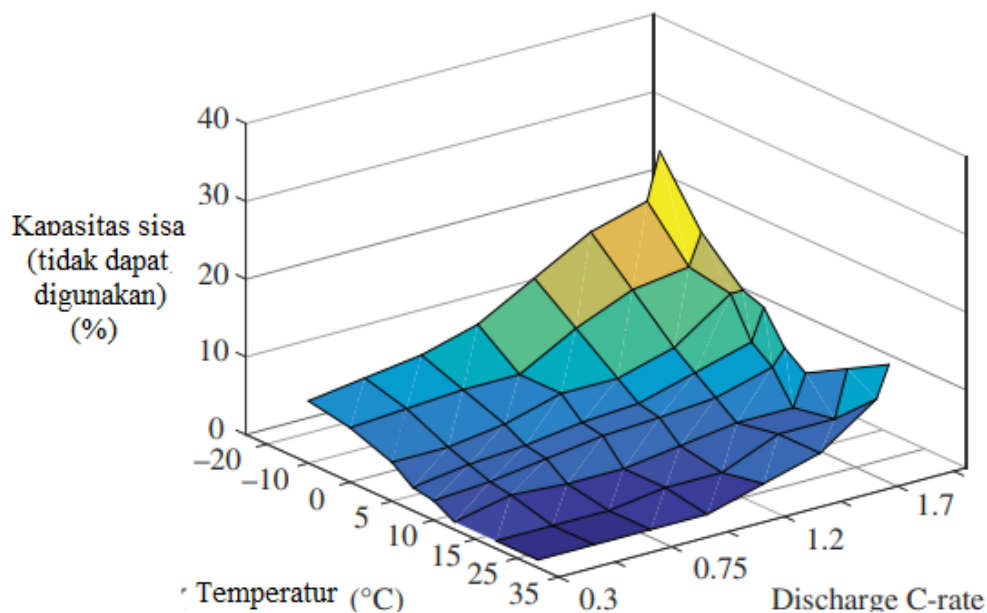
Gambar 11.5 Tegangan baterai vs. amp-jam pada suhu yang berbeda

Definisi SOC di atas didasarkan pada baterai baru. Seiring bertambahnya usia baterai, SOH-nya (yaitu status kesehatan) juga berubah. Jadi, amp-jam output yang dapat diekstraksi untuk SOC tertentu mungkin lebih kecil. Oleh karena itu kita tidak dapat benar-benar mengklaim telah menghitung SOC yang sebenarnya berdasarkan tegangan saja. Untuk tujuan yang disebutkan di atas, mungkin sangat penting untuk mempelajari kurva seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.4. Ini memberikan gambaran tentang berapa banyak kapasitas yang tersisa pada suhu tertentu. Kadang-kadang produsen mungkin tidak memberikan data dengan cara ini, tetapi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.5. Dan informasi juga dapat diberikan dalam bentuk setara berikut yang ditunjukkan pada Gambar 11.6.



Gambar 11.6 Karakteristik pelepasan baterai – tegangan terminal pada laju pelepasan 5 A (Lembar spesifikasi baterai Exide).

Hal ini dimungkinkan untuk menerjemahkan Gambar 11.6 ke yang ditunjukkan pada Gambar 11.4, yang memiliki suhu sebagai sumbu x. Gambar 11.4 memberitahu kita berapa banyak energi yang dapat diambil dari baterai pada suhu tertentu. Dengan kata lain, seperti yang disebutkan sebelumnya, baterai mungkin telah diisi pada satu suhu dan dikosongkan pada suhu lain, dalam hal ini energi yang tersedia mungkin berbeda.



Gambar 11.7 Pengurangan kapasitas baterai pada suhu dan laju pengosongan yang berbeda

Masalah ini mungkin cukup penting ketika survivabilitas kendaraan yang bersangkutan. Meskipun baterai mungkin dianggap mati pada awalnya, beberapa perubahan suhu dapat membuatnya aktif kembali, meskipun untuk waktu yang singkat. Ini mungkin bisa menjadi bagian dari algoritma manajemen baterai untuk menunjukkan kepada operator bahwa beberapa waktu harus diberikan sebelum mencoba menggunakan baterai lagi, yang bisa menjadi vital – katakanlah, dalam skenario pertempuran. Perlu dicatat bahwa Gambar 11.4-11.6 adalah untuk baterai baru. Seiring bertambahnya usia baterai, situasinya akan berubah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.7 dan 11.8 di bawah ini.

Karena baterai secara siklis melewati siklus pengisian dan pengosongan dengan berbagai amplitudo, masa pakai baterai secara alami akan berkurang seperti yang tercermin pada Gambar 11.7 dan 11.8. Karena pengisian dan pengosongan dapat terjadi pada berbagai amplitudo amp-jam, hitungan perjalanan amp-jam dan berapa banyak siklus seperti itu pada amp-jam tertentu yang terjadi, harus dipertimbangkan. Untuk tujuan ini, beberapa teknik seperti metode penghitungan “curah hujan” dapat digunakan. Referensi ada tentang bagaimana melakukan penghitungan tersebut.

Mengetahui jumlah amp-jam saat ini yang tersedia setelah penurunan peringkat untuk suhu, siklus, dan aspek kesehatan lainnya, kita dapat memperoleh perkiraan yang masuk akal tentang energi yang tersedia pada saat tertentu dalam masa pakai baterai. Jumlah ini, jika dibandingkan dengan apa yang tersedia dalam baterai baru yang terisi penuh, akan memberikan SOC baterai yang sebenarnya pada suhu tertentu dan pada saat tertentu dalam riwayat masa pakai baterai. Untuk melanjutkan pembahasan ini, mungkin berguna untuk mendefinisikan beberapa istilah sebagai berikut:

a. Akronim dan Definisi

OCV – *open circuit voltage*/ tegangan rangkaian terbuka, yaitu tegangan tanpa arus yang mengalir melalui baterai

SOCV – *stabilized OSC/OCV* yang distabilkan, yaitu tegangan pada waktu istirahat setelah membuka sirkuit

SOC – *state-of-charge*/status pengisian, yaitu kapasitas pengisian/pengisian penuh aktual: AC/FCC (persentase atau rasio)

FCC – *full charge capability*/ kapasitas pengisian maksimum (atau penuh) dalam amp-jam

FCC bervariasi dengan usia dan karenanya mungkin perlu dihitung ulang secara berkala sebagai berikut (Persamaan 11.4):

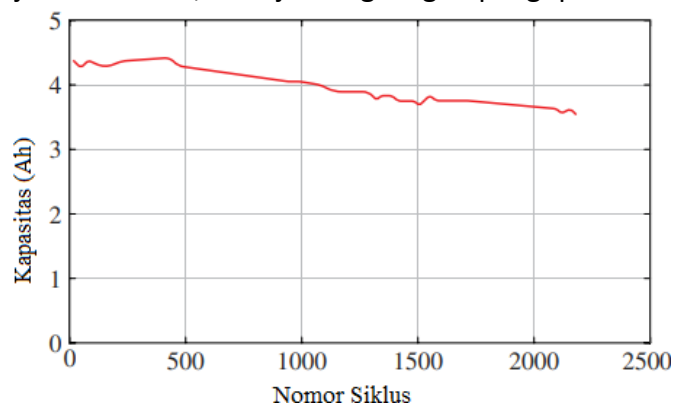
$$FCC = [(\Delta Q/\Delta(SOC))] \times 100 \times \eta$$

di mana ΔQ dan $\Delta(SOC)$ masing-masing adalah perubahan inkremental dalam muatan dan SOC yang sesuai, dan η adalah efisiensi pengisian atau pengosongan selama perubahan inkremental dalam muatan dan SOC diukur.

FCC sering "didefinisikan" sebagai jumlah amp-jam pada tingkat pengisian C/3 amp. Telah dicatat sebelumnya bahwa C didefinisikan dalam kapasitas amp-jam pengenalan baterai dan secara numerik sama dengan amp-jam itu, tetapi unitnya dalam amp. Ini berarti bahwa jika baterai dikosongkan pada FCC/3 amp, seharusnya dapat menghasilkan FCC amp-jam, di mana FCC adalah FCC baterai baru yang asli. Adalah perlu bahwa tegangan yang ditentukan pabrikan juga harus dikaitkan dengan definisi ini, yaitu setelah jumlah FCC amp-jam telah dikirimkan, tegangan harus beberapa nilai yang telah ditentukan sebelumnya. Jika tegangan yang ditentukan sebelumnya ini dicapai sebelum FCC dikirimkan, maka nilai FCC jelas telah berkurang dibandingkan dengan nilai baterai baru.

Kapasitas aktual : (AC = FCC x SOC dibagi 100 jika SOC dinyatakan dalam %)

Di atas, SOC didefinisikan dalam istilah AC dan FCC. Mengetahui FCC offline, kita dapat menghitung SOC menggunakan AC/FCC. FCC, seperti yang kita catat sebelumnya, berubah seiring bertambahnya usia, suhu, dan kecepatan pengisian daya. Efek ini dapat diperhitungkan melalui η , efisiensi baterai pada saat tertentu. AC adalah muatan aktual yang masuk atau keluar dari baterai dan dapat diukur. Oleh karena itu, seiring bertambahnya usia, SOC dan FCC akan berubah bersama, sedangkan AC akan menjadi besaran aktual yang diukur. Baik SOC dan FCC terkait dengan beberapa tegangan yang dicapai oleh baterai saat pengisian dan pemakaian. Nilai 100% FCC dan SOC berkorelasi dengan tegangan ini. Tampaknya satu postulat yang sangat sering digunakan oleh orang-orang adalah nilai tegangan (atau emf, lebih tepatnya) yang sesuai dengan SOC pada 100% atau SOC pada persentase lain, akan tetap sama pada titik SOC yang sesuai, terlepas dari apakah baterai baru atau tidak dan sesuai spesifikasi pabrikan atau jika sudah tua, atau jika lingkungan pengoperasiannya berubah.



Gambar 11.8 Baterai Ah 5 pengurangan kapasitas dengan suhu

Perhatikan bahwa, seiring bertambahnya usia, AC, kapasitas pengisian aktual dalam baterai lama, akan lebih kecil (dibandingkan dengan baterai baru) pada saat ambang tegangan yang telah ditentukan telah tercapai. Oleh karena itu seseorang

dapat berakhir dengan 100% SOC jika 100% SOC didefinisikan sebagai muatan di mana tegangan telah mencapai nilai pabrikan yang telah ditentukan ketika baterai masih baru – namun jumlah muatan atau amp-hr yang dapat diekstraksi dari baterai masih akan kurang dari apa itu ketika baterai baru. Alasannya adalah karena sekarang kita tiba pada tegangan yang sama dengan jumlah input muatan yang jauh lebih rendah.

Soal definisi: jika kita setuju bahwa FCC yang akan kita gunakan adalah FCC baterai baru yang asli (yang kita setuju untuk tetap konstan menurut definisi), maka AC akan lebih rendah, ketika ambang tegangan tercapai, dengan baterai yang lebih tua. Oleh karena itu pada tegangan penuh SOC akan kurang dari 100%. Ini tampaknya menjadi indikator yang lebih baik dalam hal SOC, yang juga akan menunjukkan berapa banyak energi yang benar-benar dapat kita keluarkan dari baterai ini pada waktu tertentu. Di sisi lain kita dapat memutuskan untuk menggunakan definisi atau persamaan lain untuk FCC, yaitu $FCC = [\Delta Q / \Delta(SOC)] \times 100\%$, tetapi kemudian FCC akan berubah seiring bertambahnya usia, AC akan menjadi apa pun yang diperlukan untuk membuat tegangan = pengenal, namun SOC dapat menunjukkan 100%, tetapi pada kenyataannya itu tidak menjamin bahwa kita dapat mengekstrak jumlah muatan yang sama.

Secara umum, tampaknya orang lebih suka memiliki nilai FCC yang berubah-ubah, maka kita akan mencapai FCC dengan AC yang lebih rendah saat baterai menua. Oleh karena itu SOC 100% tidak akan menunjukkan jumlah energi yang dapat diekstraksi yang sama untuk baterai baru dan lama. Jadi, penting untuk menghubungkan SOC dengan SOH, agar bermakna. Dengan kata lain, FCC harus disesuaikan dengan usia melalui parameter 1η . Jadi dengan definisi ini, SOC adalah "status pengisian" sehubungan dengan "muatan maksimum yang sekarang dapat diambil baterai" untuk membawa emf atau tegangan ke ambang batas yang ditentukan pabrikan. Satu hal penting selama perhitungan SOC adalah nilai "reset" SOC harus diperoleh dari waktu ke waktu saat menggunakan metode pembukuan integrasi biaya untuk menjaga angka agar tidak menyimpang.

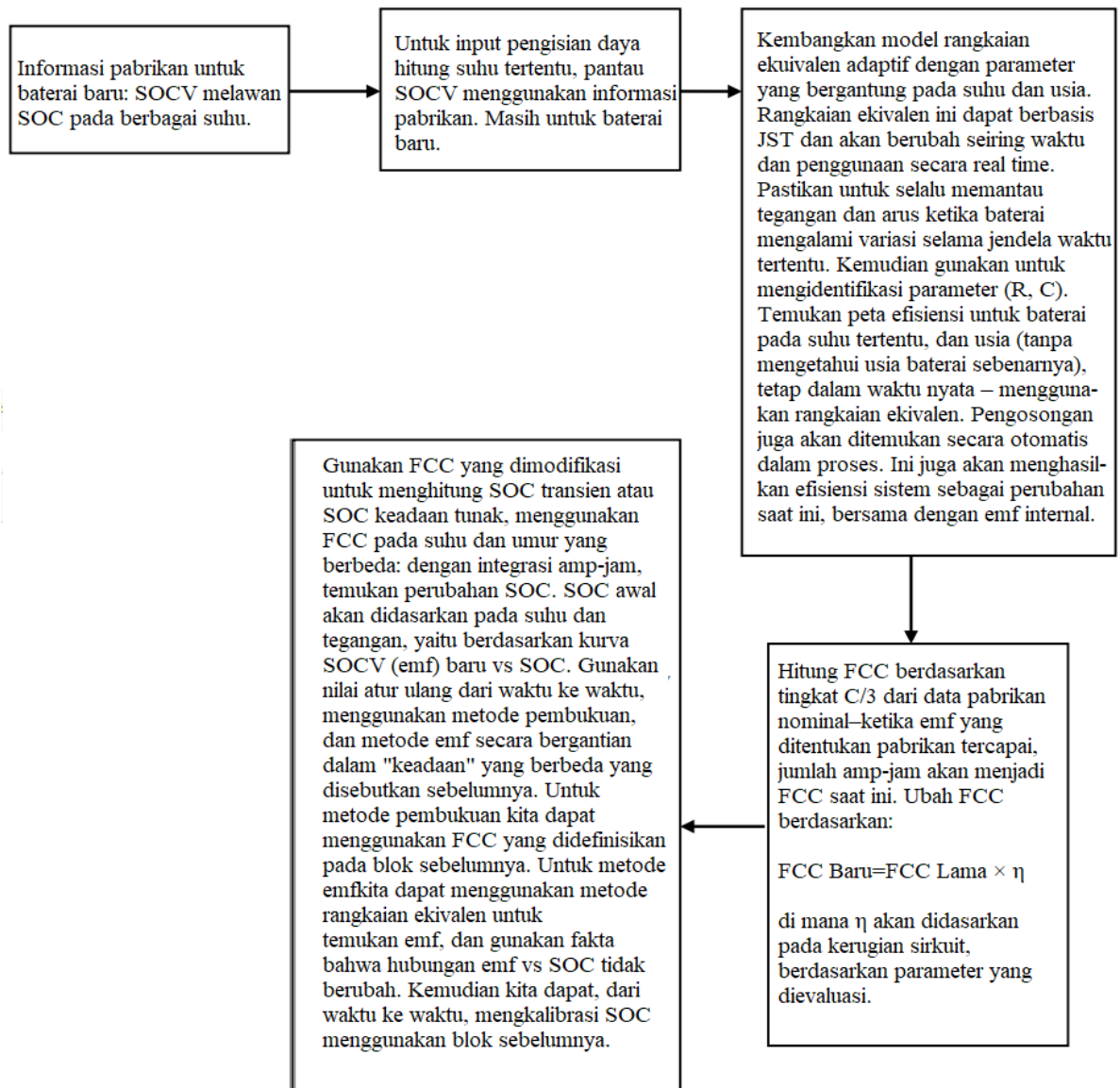
SOCV setelah 15 menit (atau kadang-kadang bahkan lebih) istirahat masuk akal untuk mendapatkan nilai "reset" SOC untuk baterai asam timbal. Hubungan antara SOCV dan SOC cukup linier dari 0 hingga mendekati 100%, di mana 100% harus didasarkan pada tegangan yang ditentukan pabrikan. Kita bisa mulai dari baterai yang kosong pada tegangan tertentu, yang ditentukan oleh pabrikan di mana dianggap berada pada SOC = 0. Pertama-tama kita dapat mengisi baterai pada arus tinggi hingga tegangan tercapai dan kemudian melakukan pengisian arus rendah hingga muatan penuh tercapai, seperti yang ditunjukkan oleh tegangan yang ditentukan pabrikan. Jumlah total amp-jam yang disuntikkan selama pengisian arus tinggi dan rendah ini adalah input muatan AC. Segera setelah tegangan akhir tercapai, kita dapat mengatakan SOC = 100% dan input amp-hr yang sesuai dapat dianggap sebagai AC pada SOC = 100% dan di sini secara numerik sama dengan FCC.

Untuk baterai NiMH, hubungan antara SOC dan SOCV cukup konstan (SOCV vs SOC konstan) pada rentang SOC yang luas, dan karenanya SOCV tidak dapat digunakan sebagai perkiraan SOC, karena SOCV tidak akan membawa informasi baru. Tetapi kita masih dapat menggunakan teknik pengisian ulang yang ditunjukkan pada paragraf sebelumnya dan menggunakan referensi pabrikan untuk menentukan tegangan ketika jumlah pengisian yang ditentukan pabrikan untuk 100% SOC telah dimasukkan ke dalam baterai. Tetapi sekali lagi, tegangan tidak dapat digunakan sebagai ukuran untuk menentukan SOC

Salah satu cara yang baik mungkin untuk melakukan hal di atas secara real time adalah memulai proses pengisian dengan mengontrol alternator, ketika permintaan beban rendah, dan baterai tidak diperlukan untuk mengirimkan permintaan beban. Pengendalian alternator dimaksudkan untuk menciptakan gangguan pada arus pengisian atau pengosongan dan memantau gangguan yang sesuai pada tegangan dan arus. Baterai Li-ion juga memiliki hubungan linier seperti asam timbal dan karenanya metode sebelumnya dapat digunakan. Dalam Li-ion SOCV dicapai jauh lebih cepat daripada asam timbal (bisa secepat 5 detik, dibandingkan dengan 15 menit dalam asam timbal) dan karenanya reset SOC dapat dilakukan lebih sering, bahkan secara real time. Li-ion tidak boleh menetes karena masalah ledakan, keamanan, dll.

Secara singkat, kita mulai perhitungan SOC kita menggunakan metode tegangan, sesuai dengan metode yang ditunjukkan sebelumnya dalam diagram transisi Gambar 11.2 dan 11.3. Kita menggunakan metode pembukuan dan voltase, tergantung pada keadaan. Lalu mengapa kita tidak bisa menggunakan metode tegangan selama ini, jika kita harus mengkalibrasi ulang menggunakan metode tegangan? Pasalnya, metode tegangan dengan SOCV perlu istirahat. Selama kondisi stabil tidak apa-apa, tetapi metode pembukuan memberikan ide yang baik tentang SOC selama perubahan kondisi non-ekuilibrium saat pengisian atau pengosongan sedang berlangsung.

Karena hal di atas, kesalahan amp-hr kumulatif dalam Li-ion akan paling kecil, diikuti oleh asam timbal, dan yang terburuk akan terjadi di NiMH, di mana periode akan paling lama sebelum SOCV tercapai. Diagram alir algoritma yang mungkin untuk SOC baterai perhitungan secara akurat di mana metode adaptif berbasis model digunakan diberikan di bawah ini pada Gambar 11.9. Jadi, ringkasan masalah reset adalah kita perlu mengetahui SOCV dan kemudian harus menghubungkannya dengan informasi pabrikan untuk memetakannya ke perkiraan SOC. Karena korelasi SOC bergantung pada suhu, kita juga harus memasukkan hal yang sama, sekali lagi berdasarkan informasi pabrikan. Begitu pula dengan usia, kita harus memodifikasi FCC.



Gambar 11.9 Kemungkinan algoritma untuk perhitungan SOC baterai yang akurat menggunakan metode adaptif berbasis model.

Jadi, kita mungkin perlu meninjau kembali model rangkaian yang ditunjukkan sebelumnya untuk mengevaluasi berbagai parameter di rangkaian itu dari waktu ke waktu, ketika permintaan beban rendah dan ikuti diagram blok pada Gambar 11.9 untuk mengevaluasinya.

b. Status Masalah Kesehatan pada Baterai

Sebelum membahas ini, masuk akal untuk menyegarkan kembali beberapa terminologi.

- *Capacity/Kapasitas* – dalam amp-jam
- *C-rate (Cr)* – satuannya adalah amp. Secara numerik sama dengan nilai arus yang akan mengisi baterai ke nilai pengenalnya dalam 1 jam. Dengan kata lain, secara numerik sama dengan amp-jam.
- *SOH* – Salah satu definisi SOH adalah: Q_{\max} (pada usia sekarang)/ Q_{\max} (baru), di mana Q_{\max} adalah jumlah muatan maksimum teoritis yang dapat diambil dari baterai. Kita dapat menafsirkannya sebagai jumlah biaya pada 100% SOC yang dapat ditarik sekarang versus apa yang dapat ditarik pada 100% ketika masih

baru. Perhatikan bahwa itu masih 100% SOC dalam kedua kasus, tetapi itu tidak berarti mereka memiliki jumlah biaya yang sama.

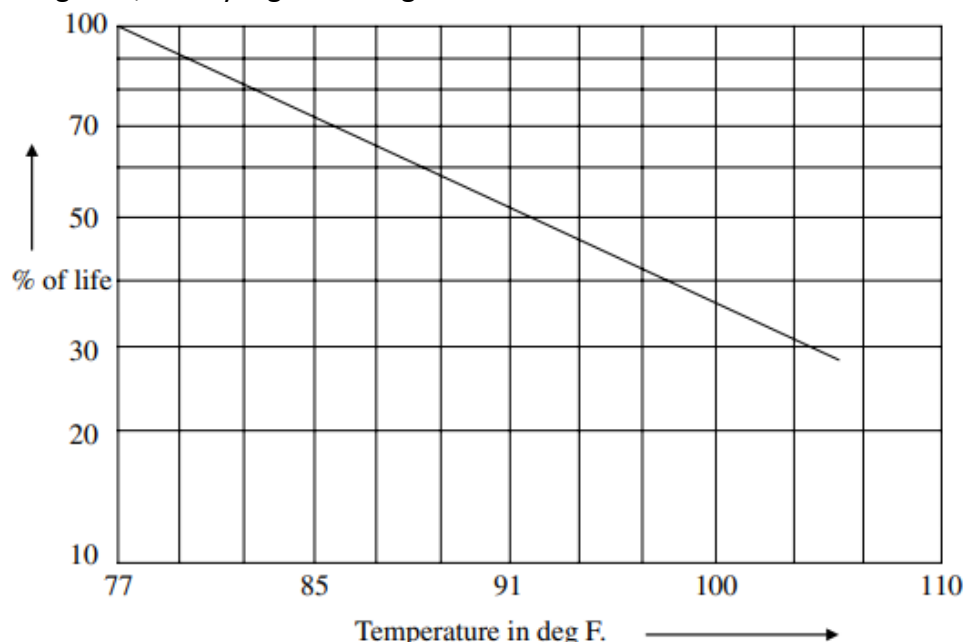
SOH memberitahu kondisi baterai secara keseluruhan berdasarkan kapasitas, resistansi internal, self discharge, dll. Salah satu cara untuk mengetahui tentang SOH dengan menghitung pola operasionalnya diberbagai suhu. Jika dioperasikan pada suhu nominal T, suhu dinilai memiliki pengaruh besar pada kesehatan baterai. Standar IEEE 450 pada baterai asam timbal menunjukkan metode penghitungan masa pakai pada titik tertentu, dengan menggunakan rumus selanjutnya, kita dapat mengasumsikan bahwa grafik degradasi termal yang tersedia dari pabrikan melalui pengujian baterai, memberikan persamaan berikut ini:

$$L_{te} = \frac{M}{\frac{mos@T_1}{\%hidup} + \frac{mos@T_2}{\%hidup} + \frac{mos@T_n}{\%hidup}}$$

dimana L_{te} = resultan % hidup, M = harapan hidup nominal, $mos@T_1$ = bulan berjalan @ T1, dan seterusnya, dan istilah %Life berasal dari grafik pada grafik (Gambar 11.10); grafik ditentukan oleh: sumbu x = suhu, sumbu y = % kehidupan.

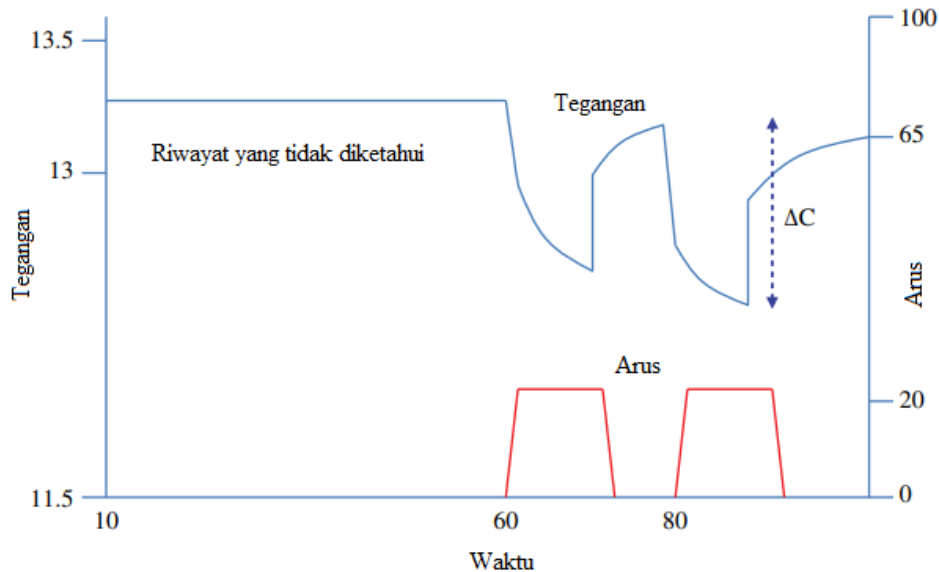
Jelas, kemudian, saat suhu meningkat, nilai penurunan % Life menurun. Ketika menyangkut penentuan SOC, SOH baterai, masalahnya terkait dengan entah bagaimana mengidentifikasi parameternya di dalam baterai, dan bagaimana mereka berubah dengan suhu dan lingkungan lainnya. Ini adalah parameter seperti resistansi, konduktansi, kapasitansi (impedansi) yang digunakan untuk memodelkan baterai seperti pada rangkaian ekuivalen yang ditunjukkan sebelumnya. Parameter ini juga bervariasi dengan SOC, SOH, selain suhu.

Pengaruh kualitatif suhu pada kesehatan dan kinerja baterai dapat dinyatakan sebagai berikut. Secara umum, pada suhu dingin baterai kehilangan kapasitasnya tetapi mendapatkannya kembali saat suhu naik. Temperatur rendah tidak baik untuk kinerja baterai, tetapi dapat membantu meningkatkan usia pakai. Sebaliknya, suhu yang lebih hangat tidak baik untuk kehidupan tetapi akan membantu kinerja dari sudut pandang SOC, suhu yang lebih hangat dapat dianggap lebih baik, sedangkan dari sudut pandang SOH, suhu yang lebih dingin lebih baik.



Gambar 11.10 Persentase pengurangan masa pakai baterai dengan suhu.

Salah satu masalah yang dapat muncul dengan baterai terkait dengan penggunaan grafik penurunan nilai pada Gambar 11.10. Secara umum, tidak selalu mungkin bahwa pengguna akan menyimpan catatan suhu dan periode waktu yang dialami baterai pada suhu tertentu. Jika ini memang tercatat, dapat membantu dalam memperkirakan SOH. Jika informasi ini kurang, dan misalkan baterai disediakan tanpa informasi apa pun tentang riwayatnya, maka cara berikut ini dapat diadopsi. Diasumsikan bahwa, minimal, jenis baterai (asam timbal, NiMH, Li-ion, dll.), grafik pabrikan seperti tegangan versus waktu, pada suhu yang berbeda dan pada tingkat C yang berbeda diberikan.

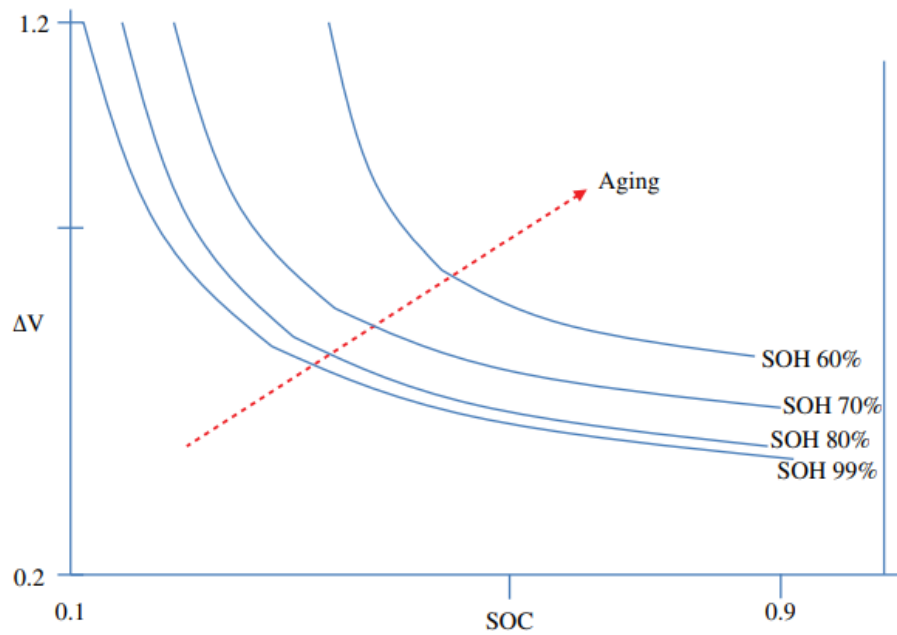


Gambar 11.11 Penentuan status kesehatan baterai berdasarkan metode dua-pulsa

c. Metode Beban Dua Pulsa untuk Mengevaluasi Status Kesehatan Baterai

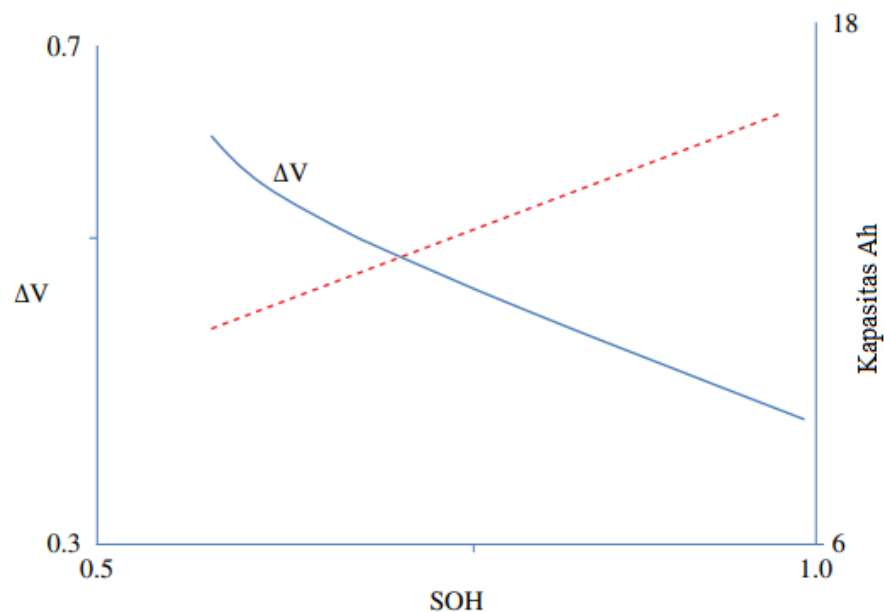
Orang-orang telah menemukan metode yang berbeda untuk mengetahui SOH. Salah satu metode diilustrasikan pada Gambar 11.11, yang menunjukkan bahwa pulsa arus disuntikkan ke baterai dan tegangan yang sesuai diamati. Hanya delta-V dari pulsa kedua yang diukur, karena pada awalnya, pulsa pertama mungkin tidak benar-benar representatif. Ini karena riwayat jejak tegangan di masa lalu, yang dapat mencakup penurunan tegangan awal yang tiba-tiba selama inisiasi arus, yang dikenal sebagai “coupe de fouet” (= “whip crack” dalam bahasa Inggris). Baterai harus dalam kondisi terbuka selama minimal 2 menit untuk menetap. Dengan menerapkan pulsa pertama, data nyasar dihindari pada saat pulsa kedua, yang lebih stabil di alam.

Perbedaan awal antara pulsa pertama dan kedua adalah karena coupe de fouet. Jika tes pulsa dilanjutkan untuk jangka waktu yang lama (katakanlah beberapa jam), delta-V akan meningkat ketika baterai hampir kosong, karena kekurangan asam sulfat dan penumpukan timbal sulfat pada elektroda. Delta-V (di bawah beban saat ini dan waktu pulsa yang sama) meningkat, karena SOH dan kapasitas menurun. Item terakhir ini dapat dianggap sebagai ukuran SOH. Delta V/Delta I R mengukur resistansi internal saat SOH menurun R meningkat



Gambar 11.12 Variasi tegangan baterai dalam kaitannya dengan penuaan, SOC, dan SOH

SOH menunjukkan kondisi baterai secara keseluruhan berdasarkan kapasitas, resistansi internal, self discharge, dll. Korelasi antara penuaan dan ΔV ditunjukkan pada Gambar 11.12, dan dapat digunakan sebagai ukuran SOH diperlukan untuk mendapatkan hasil eksperimen dan informasi yang diarsipkan, yang pada nantinya dapat membantu korelasi SOH dengan mengukur V (Gambar 11.13).



Gambar 11.13 Variasi tegangan baterai dan kapasitas amp-jam dalam kaitannya dengan SOH.

Oleh karena itu, jelas bahwa SOC adalah parameter jangka pendek sedangkan SOH adalah aspek jangka panjang. Selain itu, SOC mungkin tidak menunjukkan berapa banyak energi nyata yang dapat diekstraksi dari baterai, karena ini bergantung pada SOH. Diskusi di atas, meskipun terkait dengan baterai asam timbal, juga berguna untuk kimia baterai lainnya. Sebelum melanjutkan ini, mungkin ada baiknya untuk mempertimbangkan fakta-fakta berikut tentang baterai yang berbeda.

- Baterai asam timbal (dalam hal modelnya) relatif lebih dapat diprediksi
- Ni-MH tampaknya kurang dapat diprediksi
- Lithium-ion tampaknya lebih dapat diprediksi daripada NiMH

Ada banyak makalah penelitian di mana orang telah mencoba untuk memprediksi SOC, SOH dll berdasarkan metode kecerdasan buatan seperti jaringan saraf dan algoritma logika fuzzy. Dalam kondisi tertentu mereka tampak baik-baik saja, tetapi baterai adalah perangkat yang sangat nonlinier, dan sepertinya belum ada model yang sempurna. Dari sudut pandang pengguna, tujuannya adalah untuk mendapatkan masa pakai dan kapasitas energi maksimum dari baterai. Untuk mencapai tujuan ini, penting untuk mengenali praktik baik berikut sehubungan dengan baterai:

1. Asam timbal – selama pengisian:
 - Isi daya segera setelah digunakan
 - Debit penuh harus dihindari untuk hidup lebih lama
 - Over-cycling (siklus charge-discharge) harus dihindari
 - Pengisian tegangan konstan diikuti dengan kondisi mengambang harus diterapkan
 - Terlalu panas harus dihindari
2. Asam timbal - selama pemakaian
 - Hindari debit siklus penuh
 - Kedalaman debit 80% baik-baik saja
 - Isi ulang lebih sering
3. Lithium-ion – selama pengisian:
 - Sering mengisi daya
 - Debit penuh harus dihindari untuk hidup lebih lama
 - Over-cycling (siklus charge-discharge) harus dihindari
 - Pengisian tegangan konstan tidak boleh diikuti oleh muatan tetesan apa pun
 - Pengisian cepat mungkin
 - Terlalu panas harus dihindari
4. Lithium-ion – selama pemakaian:
 - Sama seperti asam timbal
5. NiMH - selama pengisian:
 - Jalankan sepenuhnya setiap 3 bulan penggunaan
 - Terlalu panas harus dihindari
 - Muatan arus konstan diikuti dengan muatan tetesan saat penuh, harus diterapkan
 - Pengisian daya lambat tidak disarankan
6. NiMH - selama pemakaian:
 - Hindari terlalu banyak siklus penuh (charge-discharge)
 - Gunakan kedalaman debit 80%

Faktor-faktor lain yang berhubungan dengan baterai adalah sebagai berikut:

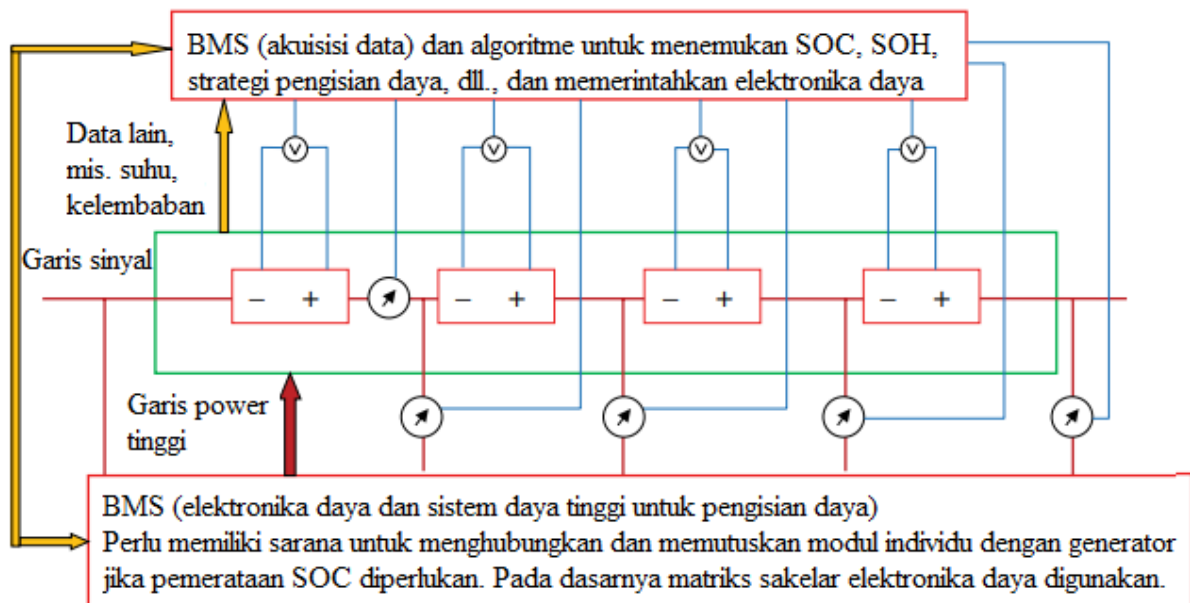
- Parameter internal dalam baterai dapat dipengaruhi oleh pabrikan.
- Parameter eksternal dapat dipengaruhi oleh pola operasional.
- Suhu tinggi berbahaya – oleh karena itu desain selungkup atau kabinet itu penting.
- Manajemen termal sangat penting.
- Debit dalam – waktu istirahat yang lama pada SOC rendah berbahaya.

d. Implementasi Manajemen Baterai

Untuk mencapai tujuan di atas, penting untuk mengontrol arus baterai, yaitu mekanisme pengisian-pengosongan, dan mengontrol kondisi lingkungan (yaitu suhu lingkungan, kelembaban, dll.) di sekitarnya. Rangkaian aktivitas ini biasanya disebut sebagai manajemen baterai. Manajemen baterai menyiratkan bahwa parameter eksternal baterai dipengaruhi sesuai dengan kimia baterai yang berbeda melalui beberapa mekanisme kontrol. Pada dasarnya ini termasuk – akuisisi data yaitu suhu, arus, tegangan, kelembaban dll melalui berbagai sensor. Data yang diukur dan dihitung dapat digunakan untuk manajemen dan kontrol baterai. Kontrol suhu (manajemen termal) dan kontrol arus (atau tegangan) pada dua terminalnya siap digunakan oleh pengguna. Fakta-fakta berikut harus diperhatikan sehubungan dengan manajemen baterai:

- Informasi dan akuisisi data tidak mahal.
- Elektronika daya dan peralihan matriks dengan banyak modul bisa jadi mahal.
- Sensor arus bisa mahal dibandingkan dengan sensor tegangan.
- Terkadang teknik kecerdasan buatan dapat digunakan, hanya menggunakan sensor tegangan, dan arus yang diturunkan berdasarkan algoritma AI.

Di sisi lain, berdasarkan tegangan dan arus, dan menggunakan AI, para peneliti telah mencoba membuat estimasi nilai parameter internal dan karenanya memprediksi SOH. Arsitektur untuk sistem manajemen baterai generik (BMS) ditunjukkan pada Gambar 11.14.



Gambar 11.14 Manajemen baterai – arsitektur tingkat sistem

Bagian akuisisi data melibatkan pengumpulan informasi dari baterai dan/atau antarmuka elektronika daya melalui sensor yang sesuai, mis. suhu, kelembaban, dan informasi kondisi lingkungan lainnya. Blok yang ditunjukkan di bagian bawah Gambar 11.14 melibatkan elektronika daya, yang berhubungan dengan arus tinggi. Idealnya, ini menyediakan antarmuka antara baterai di satu sisi, dan beban dan generator di sisi lain. Harus dimungkinkan untuk menerapkan konfigurasi ulang arsitektural dari modul baterai sehingga generator dapat secara selektif mengisi satu atau lebih modul, terlepas dari modul lainnya, dan demikian juga harus memungkinkan pengosongan baterai secara selektif, jika perlu. Ini mungkin

memerlukan penyediaan resistor pembuangan (secara paralel dengan baterai) yang dapat menghilangkan energi baterai yang dipilih untuk dikosongkan. Blok di bagian bawah Gambar 11.14 akan berisi generator, resistor pembuangan, dan koneksi ke berbagai beban. Keputusan untuk mengkonfigurasi ulang, dan bagaimana mengkonfigurasi ulang, harus berasal dari pengontrol, yaitu blok atas pada Gambar 11.14, yang seharusnya mengarahkan modul elektronika daya sesuai dengan itu.

Apa yang Harus Dilakukan dengan Semua Informasi Di Atas?

Metode untuk menentukan SOC dan SOH baterai, dan beberapa praktik baik yang terkait dengan berbagai jenis baterai telah dibahas di sini. Menemukan SOC dan SOH yang benar adalah penting. Alasan untuk ini adalah ini memberikan indikasi yang lebih baik tentang kondisi baterai dan, tergantung pada kebutuhan kendaraan, ini membantu untuk membuat keputusan optimal apakah akan mengisi baterai atau tidak, dan untuk memenuhi kebutuhan kelangsungan hidup apakah dapat menghemat baterai dengan mengurangi penggunaan. SOH terutama sangat penting dari sudut pandang prognostik – memutuskan perlunya mengganti baterai sebelum terjadi kegagalan yang tidak terduga. Hal ini juga dapat mempengaruhi kelangsungan hidup.

Seperti yang telah kita amati, ada beberapa kesamaan dalam pengoperasian berbagai jenis baterai, apakah itu asam timbal, NiMH, atau lithium-ion. Semuanya dipengaruhi secara negatif oleh suhu tinggi atau panas berlebih, dan oleh siklus berlebih, yaitu terlalu banyak siklus pengosongan muatan pada kedalaman pengosongan penuh (maksimum yang ditentukan). Oleh karena itu, informasi tentang suhu ini dapat digunakan secara efektif sebagai bagian dari manajemen baterai. Misalnya, jika suhu terlihat terlalu dekat dengan ambang batas tertentu, dan jika ada ketentuan untuk pendinginan udara atau cairan, maka proses pendinginan tersebut dapat diintensifkan dengan meningkatkan aliran udara atau cairan. Siklus yang berlebihan dapat dihindari dengan penentuan SOC yang benar, menggunakan metode yang ditunjukkan sebelumnya, di bawah kondisi yang berbeda seperti pengisian, pengosongan, keseimbangan, dan transisi. Jika siklus pengosongan terlalu mendekati kedalaman pengosongan maksimum, penggunaan baterai dapat dihentikan, atau dapat ditempatkan pada siklus pengisian daya sebelum mencapai kedalaman maksimum. Tergantung pada permintaan beban, dimungkinkan untuk mendikte penggunaan baterai dan menghindari mendekati kedalaman pelepasan maksimum. Selain itu, masa pakai baterai lithium-ion dapat diperpanjang dengan cara mengurangi tegangan ambang pengisian. Ini berarti bahwa sebelum baterai mencapai tegangan maksimum yang diizinkan selama pengisian daya, pengisian daya harus dihentikan, agak lebih awal dari tegangan maksimum tersebut. Ini kurang lebih mengurangi kedalaman debit. Untuk NiMH, sebagai bagian dari praktik baik yang disarankan sebelumnya, mungkin bermanfaat sekali setiap tiga bulan untuk membiarkannya keluar sepenuhnya, yang dapat dipantau dengan benar melalui evaluasi SOC yang tepat. Semua hal di atas membutuhkan pengukuran tegangan, arus, dan suhu yang akurat menggunakan sensor yang sesuai. Modul manajemen baterai kemudian memproses informasi dan memerintahkan rangkaian elektronika daya untuk menangani mekanisme pengisian atau pengosongan.

Juga, informasi di atas yang sama (terkait dengan SOC) dapat digunakan untuk lebih menyeimbangkan atau menyamakan SOC antara berbagai modul dalam paket baterai lengkap, dengan proses berikut untuk tujuan pemerataan biaya: (a) baik mengisi baterai secara kolektif yang dapat memungkinkan pengisian modul secara individual, atau (b) secara kolektif (diikuti dengan mengeluarkan muatan baterai tertentu tertentu yang mungkin telah diisi pada SOC yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang lain selama pengisian kolektif secara seri). Metode yang tepat akan sangat tergantung pada perangkat keras yang terlibat. Jika setiap baterai akan dikontrol secara individual untuk pemerataan, kemungkinan besar

akan diperlukan untuk memiliki mesh atau matriks sakelar elektronika daya yang terhubung ke generator atau mungkin sel bahan bakar, yang dapat dikonfigurasi untuk mengisi modul baterai secara individual dan selektif. Hal ini dapat menyebabkan elektronika daya yang agak mahal, selain persyaratan ruang pengemasan Informasi SOH, seperti disebutkan sebelumnya, akan memungkinkan pemeliharaan yang lebih baik, dan memungkinkan penggantian lebih awal. Meskipun SOH lebih untuk tujuan informasi, dan sebenarnya tidak banyak yang dapat dilakukan jika SOH untuk modul baterai tertentu terindikasi buruk, tetap dapat membantu dalam tindakan tindak lanjut. Pada saat itu, satu-satunya hal yang bisa dilakukan adalah penggantian. Tetapi jika praktik yang baik diikuti sejak awal, saat baterai masih baru, maka SOH kemungkinan besar akan lebih baik pada titik waktu tertentu dan secara umum dapat memperpanjang siklus hidup baterai secara keseluruhan. Bahkan setelah mengikuti praktik yang baik, ada beberapa kemungkinan kegagalan sistem yang tiba-tiba, dan evaluasi SOH yang akurat setidaknya dapat membantu menghindari peristiwa tersebut, atau pemantauan berkelanjutan dapat menunjukkan beberapa kegagalan yang akan datang. Ini adalah hal-hal yang sangat penting untuk diketahui sebelumnya, sehingga kebutuhan survivabilitas bencana dapat diatasi.

Sehubungan dengan SOH, telah ditemukan bahwa salah satu metode yang terkait dengan siklus hidup didasarkan pada penurunan peringkat berdasarkan suhu saja (berdasarkan standar IEEE 450), yaitu berapa banyak masa pakai berkurang karena masalah suhu. Meskipun IEEE 450 khusus untuk baterai asam timbal berventilasi, prinsip umum penurunan nilai masih berlaku untuk baterai lain. Ini mungkin memerlukan beberapa perubahan mekanisme penurunan nilai (yaitu persamaan yang menentukan masa pakai setelah penurunan peringkat untuk suhu), dan kurva penurunan peringkat tertentu dari produsen mungkin diperlukan, terlepas dari apakah itu asam timbal, NiMH, atau ion lithium.

Metode lainnya didasarkan pada penghitungan siklus, yaitu berapa banyak siklus pelepasan muatan yang telah ditemui. Ini mencakup kedalaman penuh dan sebagian dari siklus pelepasan dan entah bagaimana memasukkannya ke dalam mekanisme penghitungan melalui akumulasi siklus. Penghitungan siklus ini tentunya sangat erat kaitannya dengan perhitungan SOC yang benar. Oleh karena itu metode evaluasi SOC yang salah atau terlalu disederhanakan dapat menyebabkan penghitungan siklus yang salah. Dengan tidak adanya informasi yang memadai tentang penurunan nilai atau penghitungan siklus, juga dimungkinkan untuk menggunakan metode seperti metode dua denyut yang telah dijelaskan. Meskipun tidak ada metode yang sempurna atau tepat saat menangani baterai SOH dan SOC, kombinasi dari satu atau lebih metode - yaitu (a) penurunan nilai siklus hidup berdasarkan suhu, (b) penghitungan siklus, (c) dua pulsa metode – bersama-sama dapat membantu membuat perkiraan yang masuk akal dan memeriksa silang situasi masa pakai baterai.

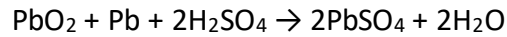
11.6 PERBANDINGAN TEKNOLOGI PENYIMPANAN ENERGI

Perbandingan beberapa teknologi penyimpanan energi disajikan pada Tabel 11.2 (Ref: US Council for Automotive Research LLC – <http://www.uscar.org> dan USABC – US Advanced Battery Consortium, dan <http://www.energy.ca.gov>). Baterai asam timbal dan baterai Li-ion yang canggih adalah yang paling menjanjikan untuk aplikasi di HEV. Sementara teknologi baterai dan ultrakapasitor memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing, hibridisasi dapat menghasilkan kinerja kendaraan yang lebih baik dan masa pakai baterai yang lebih lama. Transien beban jalan kendaraan dapat ditangani oleh ultrakapasitor selama akselerasi dan deselerasi.

Baterai Asam Timbal

Baterai asam timbal banyak digunakan dalam industri otomotif, baik untuk menghidupkan mesin dan juga untuk memasok beban tambahan saat mesin tidak bekerja,

atau untuk mengirimkan permintaan daya tinggi yang terputus-putus secara tiba-tiba yang tidak dapat dipenuhi oleh generator kendaraan saja. Baterai terdiri dari dua elektroda, satu terbuat dari timbal dan yang lainnya terbuat dari timbal dioksida. Elektrolitnya adalah asam sulfat. Persamaan kimia untuk baterai asam timbal selama pengosongan adalah (persamaan 11.6)



Persamaan kimia untuk baterai asam timbal selama pengisian adalah (persamaan 11.7)



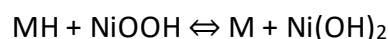
Selama pengosongan, elektrolit dan bahan aktif pada pelat baterai habis dan air serta timbal sulfat diproduksi. Selama pengisian, proses sebaliknya terjadi, dan energi listrik diserap oleh baterai, air dan timbal sulfat dikonsumsi, dan elektrolit dan bahan aktif pada pelat diproduksi.

Tabel 11.2 Perbandingan teknologi penyimpanan energi yang sesuai untuk HEVstmh

Teknologi Penyimpanan	Siklus Hidup	Efisiensi (%)	Power spesifik (W/kg)	Energi spesifik (Wh/kg)
Lead acid battery	500–800	50–92	180	30–40
Li-ion polymer battery	500–1000	80–90	>3000	130–200
NiMH battery	500–1000	66	250–1000	30–80
Ultracapacitor	1,000,000	90	1000–9000	0.5–30

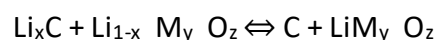
Baterai Nikel Logam Hidrida

Baterai NiMH digunakan di cukup banyak kendaraan hibrida, meskipun kimia lain seperti lithium-ion menggantikannya sampai batas tertentu. Reaksi kimia reversibel keseluruhan yang terjadi dalam sel NiMH adalah (persamaan 11.8):



Baterai ion lithium

Dalam baterai Li-ion, ion Li secara alternatif bergerak masuk dan keluar dari kisi host selama siklus pengisian dan pemakaian. Baterai Li-ion memiliki pelat anoda dan katoda seperti baterai asam timbal, tetapi mereka terbuat dari lithium kobalt oksida (atau komposit lithium lainnya) dan bon mobil. Pelat dan pemisah ini direndam dalam pelarut yang paling umum adalah eter. Baterai jenis ini dapat dibuat dengan kepadatan energi yang sangat tinggi. Reaksi kimia reversibel keseluruhan yang terjadi dalam sel Li-ion adalah (persamaan 11.9):



Baterai Li-ion tidak memiliki "efek memori" (seperti histeresis pada tingkat maksimum yang berbeda) yang menyebabkan beberapa baterai isi ulang lainnya kehilangan tingkat pengisian maksimumnya ketika berulang kali diisi dan dikosongkan ke kapasitas yang dapat berbeda dari kapasitas penuh. Baterai Li-ion berdampak relatif lebih sedikit terhadap lingkungan karena komposisinya. Tidak seperti baterai asam timbal, mereka memiliki tingkat self-discharge yang jauh lebih rendah, sehingga sangat meningkatkan kemampuan periode idle. Baterai ini juga

juta siklus), dengan sedikit degradasi selama ratusan ribu siklus pengosongan/pengisian. Sebagai perbandingan, baterai isi ulang hanya bertahan beberapa ratus siklus dalam.

Seperti dicatat pada Tabel 11.2, kerapatan energi ultrakapasitor jauh lebih rendah daripada baterai elektrokimia (3–5 Wh/kg untuk ultrakapasitor dibandingkan dengan 30–40 Wh/kg untuk baterai asam timbal, dan 120 Wh/kg atau lebih untuk baterai Li-ion), dan kerapatan energi metrik volumenya hanya sekitar 1/1000 dari bensin. Energi yang tersimpan sebanding dengan kuadrat tegangan. Penyimpanan dan pengambilan energi yang efektif memerlukan kontrol elektronik yang kompleks dan sirkuit penyeimbang yang melibatkan sakelar elektronika daya. Resistansi internal ultrakapasitor sangat rendah, menghasilkan efisiensi tinggi (95% atau lebih). Perbandingan densitas daya dan densitas energi dari sistem penyimpanan energi (ESS) yang berbeda diilustrasikan pada Gambar 11.15 (plot atau bagan Ragone).

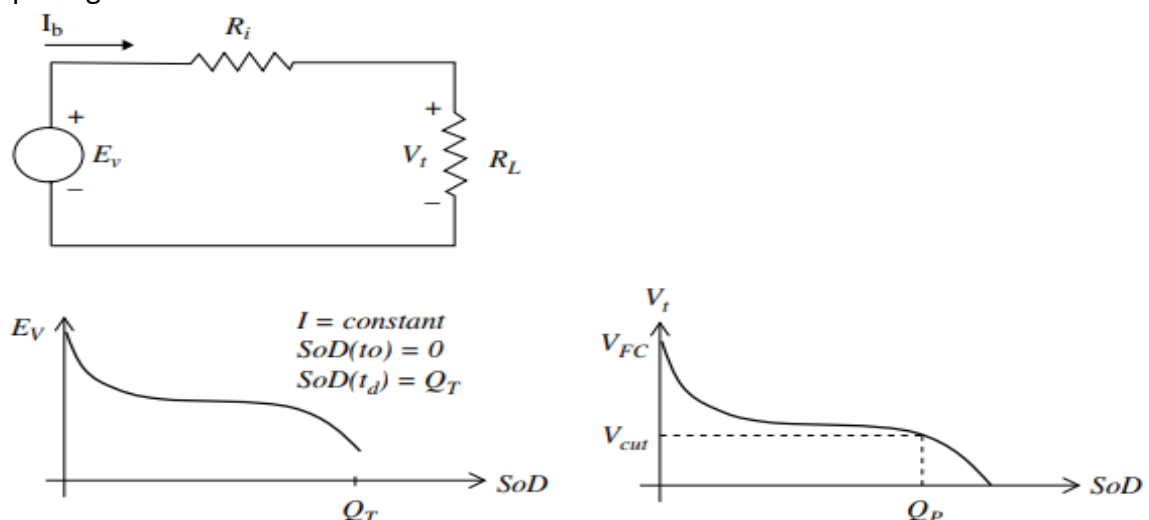
Model Sirkuit Listrik untuk Baterai dan Ultrakapasitor

Pemodelan Baterai

Model rangkaian ekuivalen sederhana dari karakteristik terminal baterai ditunjukkan pada Gambar 11.16. Ini terdiri dari baterai ideal dengan tegangan rangkaian terbuka E_v dan resistansi internal setara seri R_i . Tegangan terminal baterai adalah V_t . E_v dapat diperoleh dari percobaan pengukuran tegangan rangkaian terbuka, dan R_i dapat dievaluasi dengan menghubungkan beban dan sekaligus mengukur tegangan terminal dan arus. Perlu dicatat bahwa tegangan rangkaian terbuka (seperti yang ditunjukkan pada kurva kiri bawah pada Gambar 11.16) adalah besaran yang bervariasi dengan keadaan pengisian atau keadaan pelepasan yang setara (SoD). Baterai yang terisi penuh memiliki $SOD = 0$. Demikian pula kurva kanan bawah pada Gambar 11.16 menunjukkan hubungan antara tegangan terminal dan SOD. Tegangan terminal V_t dapat ditulis sebagai (persamaan 11.10):

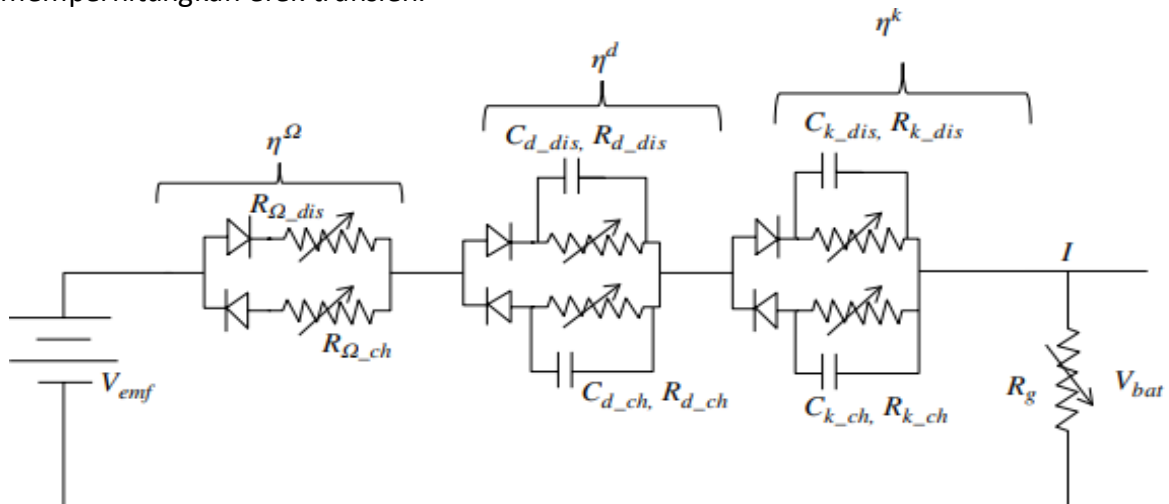
$$V_t = E_v - I_b R_i$$

Model yang ditunjukkan di atas sangat sederhana dan bekerja dengan cukup baik dalam sebagian besar keadaan normal. Namun, ini bukan model yang dinamis dan karenanya tidak dapat merespons dengan baik peristiwa transien. Juga, resistansi internal yang ditunjukkan pada model di atas adalah kuantitas yang bergantung pada keadaan muatan. Selain itu, karena baterai adalah perangkat kimia dengan reaksi kimia yang berbeda selama pengisian dan pengosongan, resistansi selama pengisian berbeda dari saat pengosongan. Jika semua hal di atas diperhitungkan, model yang lebih canggih seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.17 dapat digunakan.



Gambar 11.16 Model rangkaian ekuivalen baterai.

Ini adalah model baterai dua arah dan parameternya perlu ditangkap. Karena ini adalah sistem orde keempat (empat elemen penyimpanan di lokasi independen) dengan sifat nonlinier yaitu dioda, resistor nonlinier, V_{emf} dll., parameter yang dipetakan setara, tergantung pada parameter fisik, dapat diperkirakan melalui jaringan saraf tiruan (ANN) jenis sistem. Dengan memantau jumlah sampel variabel fisik baterai yang cukup dalam jendela geser, dimungkinkan untuk memperkirakan parameter yang setara ini. Namun, sistem harus tidak dalam keadaan tunak untuk memperkirakan parameter ini, terutama kapasitor. Karena elemen nonlinier ini juga bergantung pada suhu, fakta itu juga dapat dimasukkan dalam proses pelatihan. Oleh karena itu, proses pelatihan ANN ini membutuhkan ketersediaan banyak data pabrikan. Pilihan lainnya, yaitu eksperimen offline yang dilakukan oleh pengguna, memperoleh data untuk baterai, sangat membosankan dan menguras tenaga. Untuk memperkirakan parameter saat memberikan beban, dan secara real-time, mungkin perlu mengganggu arus beban secara berkala dengan persentase kecil dari nilai aktual pada saat tertentu, dan memantau perubahan tegangan yang sesuai, atau sebaliknya. Keuntungan menggunakan model di atas adalah dapat memperhitungkan pelepasan sendiri baterai, yang diwakili oleh resistansi paralel R_g di sisi kanan Gambar 11.17, yang penting. Hal ini juga dapat memperhitungkan efek transien.



Gambar 11.17 Model baterai terperinci

Model Sirkuit Listrik untuk Ultracapacitors

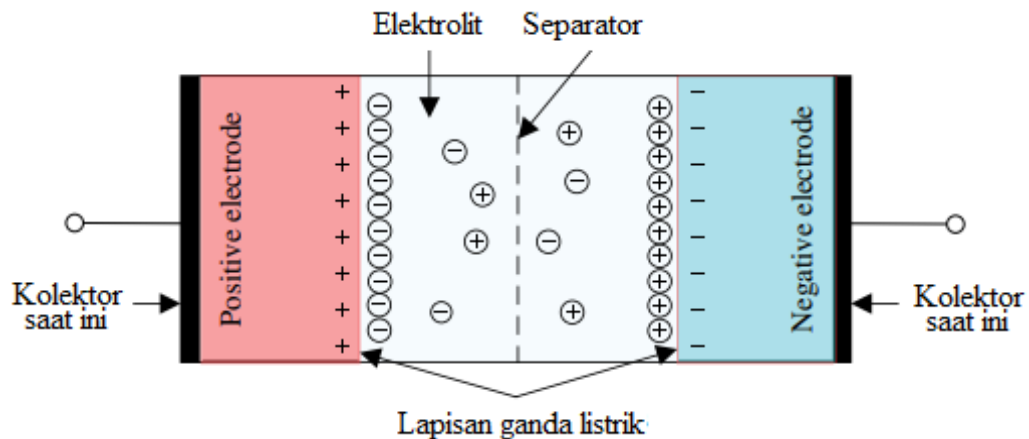
Dalam kapasitor, energi listrik disimpan dalam medan listrik antara pelat positif dan negatif (atau permukaan elektroda). Energi disimpan dalam cairan terpolarisasi kemudian pada antarmuka antara elektrolit konduktor ionik dan elektroda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.18. Ini tidak seperti baterai di mana energi disimpan dalam proses reaksi kimia. Dalam ultrakapasitor, elektroda berbasis karbon khusus dibuat untuk menyediakan area permukaan aktif internal yang sangat besar. Energi yang tersimpan dalam kapasitor diberikan oleh (persamaan 11.11)

$$E = \frac{1}{2}CV^2$$

di mana C adalah kapasitansi dalam farad, V adalah tegangan melintasi kapasitor, E adalah energi kapasitor. Untuk ultrakapasitor, SOC dapat dihitung dengan akurasi tinggi (persamaan 11.12):

$$SOC = \frac{C(V - V_{min})^2}{C(V_{max} - V_{min})^2} = \frac{(V - V_{min})^2}{(V_{max} - V_{min})^2}$$

di mana V_{\max} dan V_{\min} adalah tegangan maksimum dan minimum yang diizinkan untuk ultrakapasitor.



Gambar 11.18 Struktur ultrakapasitor

Kapasitansi C kapasitor diberikan oleh (persamaan 11.13):

$$C = \epsilon A/d$$

di mana ϵ adalah permitivitas media dielektrik, A adalah luas pelat, dan d adalah jarak antar pelat. Rangkaian ekivalen ultrakapasitor dapat direpresentasikan sebagai berikut pada Gambar 11.19. Dalam rangkaian ekivalen ini komponen utama adalah resistansi seri R_s , kapasitansi C , resistansi kebocoran paralel R_L , dan variabelnya adalah tegangan kapasitor V_C , arus terminal i , arus internal kapasitor i_C , arus bocor i_L , dan tegangan terminal adalah V_t . Persamaan dinamis untuk rangkaian ekivalen di atas adalah:

Persamaan 11.14

$$V_t = V_C - R_i i$$

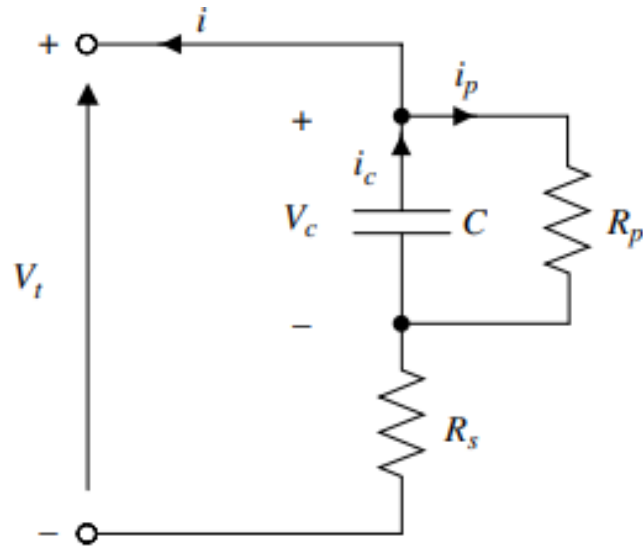
Persamaan 11.15

$$C dV_C/dt = -i_C = -i_L - i$$

Persamaan 11.16

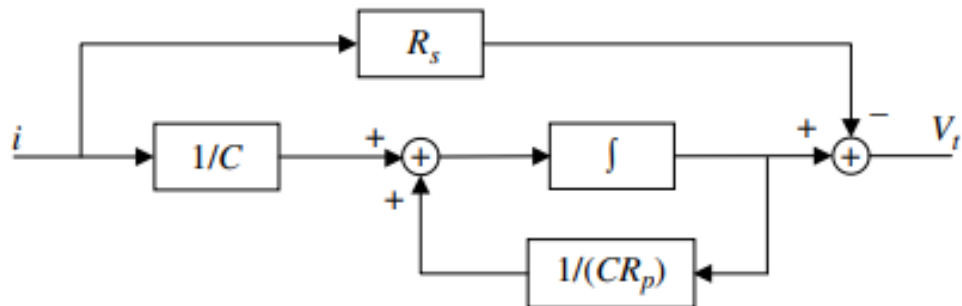
$$i_L = V_C/R_L$$

Untuk tujuan implementasi dalam simulasi rangkaian ekivalen di atas dapat direpresentasikan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.20. Ultrakapasitor dapat menyimpan energi yang jauh lebih tinggi daripada kapasitor elektronik yang digunakan dalam teknik komunikasi dan aplikasi daya rendah serupa. Namun, energi yang tersimpan dalam ultrakapasitor jauh lebih rendah dibandingkan dengan baterai dengan ukuran yang sebanding.

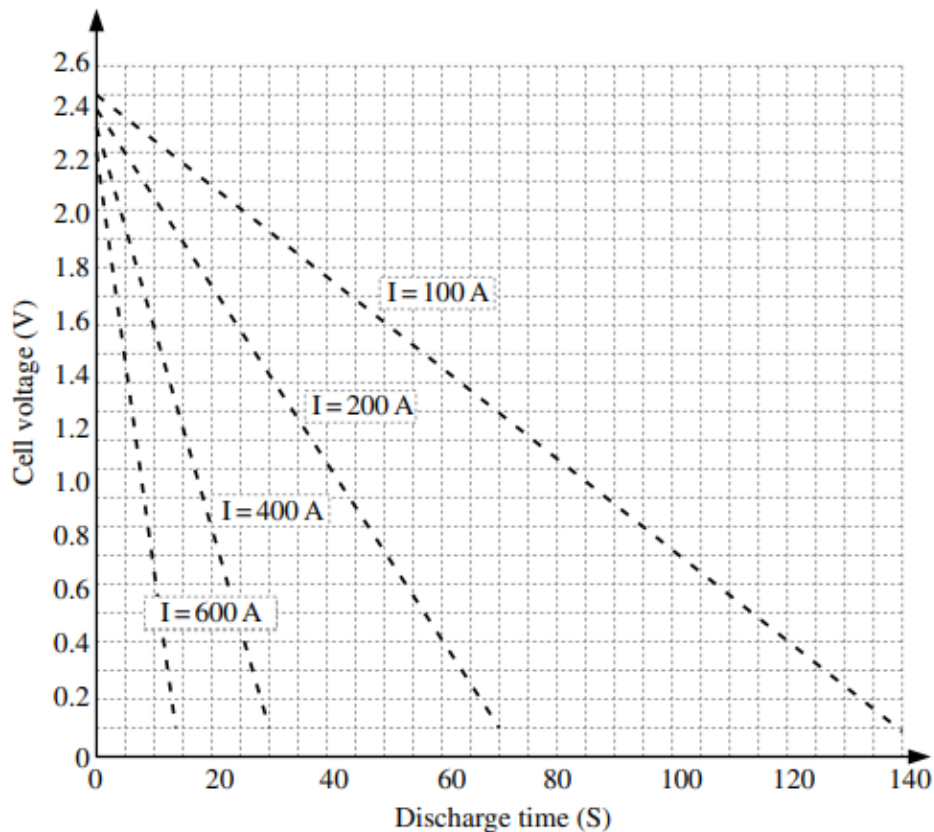


Gambar 11.19 Rangkaian ekuivalen ultrakapasitor.

Sebuah ultracapacitor khas umumnya datang dalam sel yang biasanya 2,5 volt. Banyak sel semacam itu mungkin perlu dihubungkan secara seri agar dapat bekerja pada tegangan yang lebih tinggi. Demikian pula dengan menghubungkan beberapa rangkaian ultrakapasitor paralel, kemampuan arus dapat ditingkatkan. Situasinya identik dengan yang ditunjukkan pada Gambar 11.1 untuk membuat bank baterai dari entitas yang lebih kecil. Persis sama berlaku dalam kasus ultracapacitor juga. Kurva debit khas dari ultrakapasitor ditunjukkan pada Gambar 11.21.



Gambar 11.20 Representasi simulasi rangkaian ekuivalen pada Gambar 11.19.



Gambar 11.21 Kurva debit dari ultrakapasitor tegangan sel 2600 F, 2,5 V

11.8 SISTEM PENYIMPANAN ENERGI FLYWHEEL

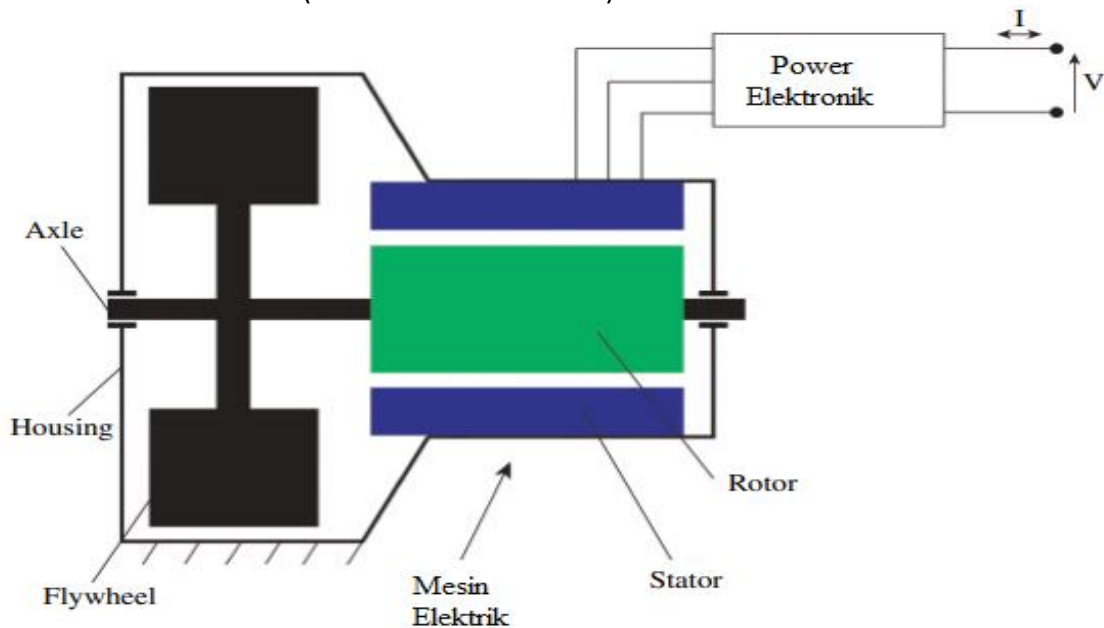
Flywheel menarik beberapa minat akhir-akhir ini dalam desain kendaraan hibrida, terutama untuk kendaraan angkutan penumpang yang lebih besar. Ada beberapa alasan untuk ini. Secara khusus, ini memungkinkan perlakuan persyaratan daya spesifik dan energi spesifik secara terpisah, menyiratkan bahwa sumber intensif daya dapat disimpan terpisah dari yang intensif energi, sambil mempertimbangkan mana yang akan digunakan untuk memenuhi karakteristik permintaan beban. Seperti dapat dilihat dari Persamaan 11.17, jumlah energi yang tersimpan dalam flywheel bergantung pada kecepatan putaran flywheel dan momen inersianya. Persamaan 11.17:

$$E = \frac{1}{2}J\omega^2$$

di mana J adalah momen inersia dan ω adalah kecepatan rotasi. Persamaan di atas dengan jelas menunjukkan bahwa ada hubungan kuadrat antara energi yang tersimpan di flywheel dan kecepatan rotasinya. Beberapa perusahaan telah mengembangkan sistem penyimpanan flywheel yang praktis.

Meningkatkan kecepatan rotasi menghasilkan peningkatan energi spesifik, tetapi meningkatkan potensi bahaya keselamatan, dan juga biaya, karena bantalan khusus dan material komposit berkekuatan tinggi mungkin menjadi penting untuk tujuan konstruksi sistem. Flywheel juga dapat mengurangi masalah siklus hidup terbatas yang diderita oleh sumber lain karena siklus hidup flywheel praktis tidak terbatas atau setidaknya lebih lama dari umur kendaraan. Diagram sistem flywheel ditunjukkan Gambar 11.22. Beberapa konsep dasar yang terkait dengan flywheel dapat dipertimbangkan pada saat ini. Sistem flywheel dapat melibatkan transfer satu bentuk energi ke bentuk energi lain, mis. energi kinetik (energi

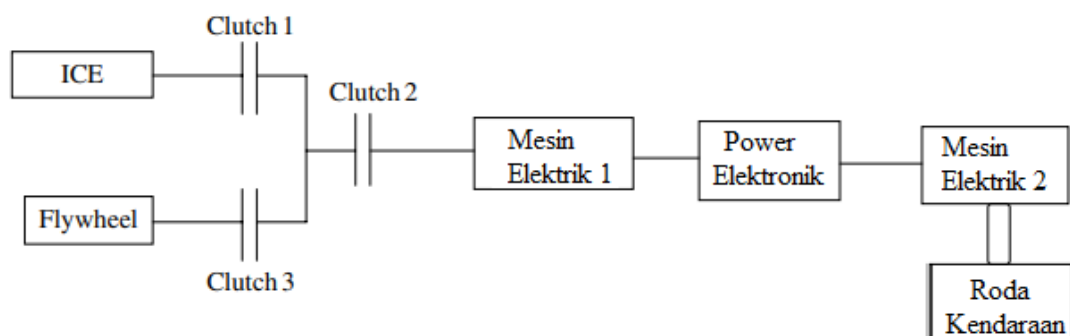
mekanik) flywheel yang entah bagaimana dapat diubah menjadi listrik dan sebaliknya, atau energi mekanik kendaraan dapat ditransfer ke flywheel, yaitu transfer energi mekanik dari satu entitas ke entitas lain (antara sistem mekanik).



Gambar 11.22 Diagram skema sistem flywheel.

Metode umum untuk mentransfer energi dari satu entitas mekanik ke yang lain adalah melalui antarmuka listrik, yang ditunjukkan oleh Gambar 11.22. Jika tidak ada sistem kelistrikan yang digunakan untuk transfer energi dari satu sistem mekanis ke sistem mekanis lainnya, maka akan membutuhkan sistem yang relatif lebih rumit dengan roda gigi, kopling, dll. Metode yang ditunjukkan pada Gambar 11.22 bekerja sebagai berikut. Jika energi dari flywheel yang berputar akan ditransfer ke roda kendaraan, cara paling sederhana adalah menghubungkan flywheel ke mesin listrik. Flywheel dan mesin listrik dapat disimpan secara mekanis terpisah dengan menggunakan kopling sementara energi rotasi tidak dikonsumsi. Untuk meminimalkan gesekan, flywheel itu sendiri dapat ditutup dalam ruang tekanan udara (vakum) yang sangat rendah dan dapat juga menggunakan bantalan magnet dalam kasus-kasus tertentu sehingga gesekan bantalan diminimalkan. Setelah flywheel terhubung dengan mesin listrik, ia dapat berjalan sebagai generator listrik. Jika generator sudah berjalan dengan dikopel ke ICE, maka torsi flywheel dapat menambah torsi ICE untuk menghasilkan daya tambahan oleh generator. Setelah itu daya generator dapat, seperti biasa, diproses melalui sistem elektronika daya dan diumpungkan ke motor penggerak. Saat menangkap energi mekanik dari roda dan menyimpannya di flywheel, prosesnya dapat dibalik.

Diagram tingkat sistem yang menggambarkan konsep antarmuka antara flywheel, ICE, dan sistem propulsi kendaraan ditunjukkan pada Gambar 11.23.



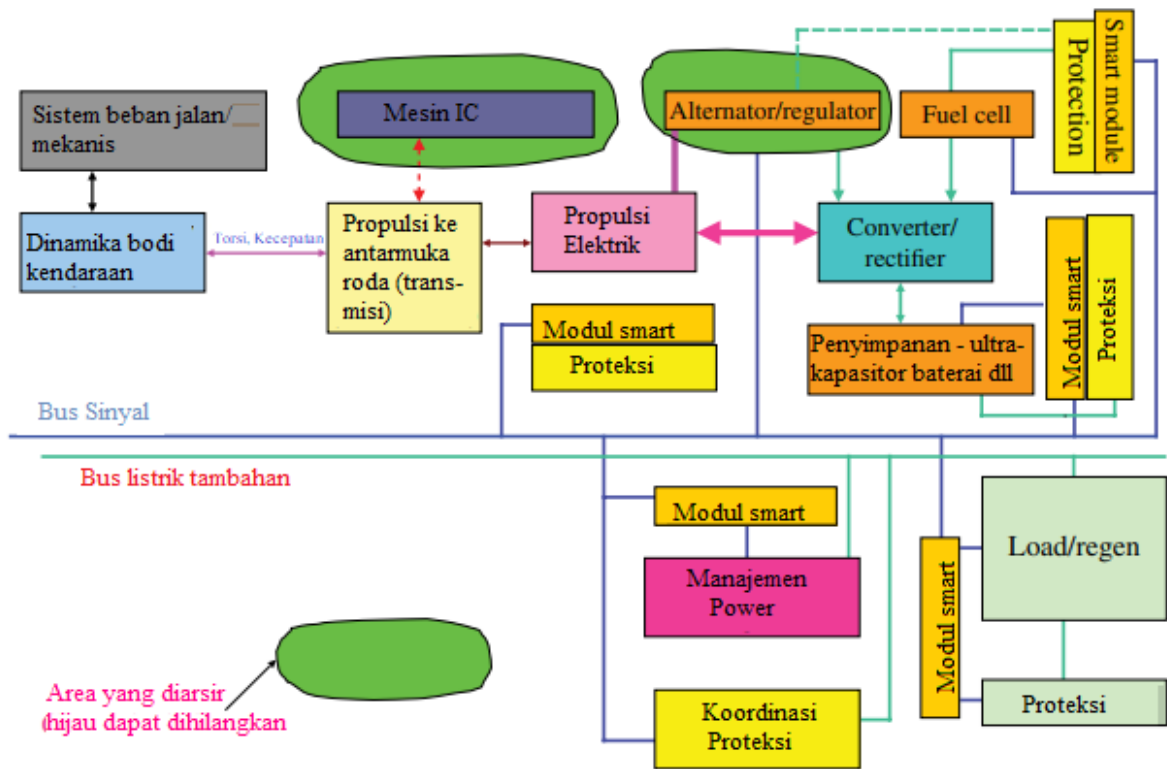
Gambar 11.23 Diagram antarmuka sistem flywheel.

Pada Gambar 11.23, jika energi rotasi flywheel akan dipindahkan ke roda kendaraan, kopling 3 harus diaktifkan dan juga kopling 2. Kopling 1 dapat diaktifkan atau tidak, tergantung pada apakah ICE akan digunakan atau tidak dalam menghasilkan daya yang dibutuhkan untuk penggerak kendaraan. Mesin listrik 1 dapat berjalan sebagai generator jika daya mengalir dari kiri ke kanan. Setelah itu, elektronika daya akan mengubah daya ke voltase, frekuensi, dll yang sesuai, dan menggerakkan mesin listrik 2 (berjalan sebagai motor) untuk penggerak roda kendaraan. Di sisi lain, jika energi dari roda kendaraan akan ditangkap (misalnya selama pengereman regeneratif) maka mesin listrik 2 dapat berjalan sebagai generator, dan kotak elektronik daya dapat menerjemahkannya ke dalam bentuk yang sesuai dan membuat mesin listrik 1 berjalan sebagai bermotor. Hanya kopling 2 dan 3 yang harus dipasang untuk menyambungkan mesin listrik 1 ke flywheel. Di antara ICE, kopling, flywheel, dan mesin listrik 1 dapat ada roda gigi yang sesuai dengan rasio yang sesuai. Demikian pula, antara mesin listrik 2 dan roda kendaraan dapat ada roda gigi yang sesuai dengan rasio yang sesuai. Agar semua hal di atas dapat dilaksanakan, diperlukan pengontrol manajemen daya yang sesuai, serta sistem kontrol elektronika daya dan mesin listrik untuk menjalankan perangkat dengan benar. Satu catatan terakhir mengenai flywheel adalah, ketika berputar, dapat menyebabkan efek gyroscopic jika kendaraan mencoba berbelok dengan cepat. Masalah ini umumnya dapat diatasi dengan memiliki dua massa rotasi dengan inersia yang sama tetapi bergerak dalam arah yang berlawanan. Ini dapat dengan mudah diimplementasikan dengan menempatkan dua anggota yang berputar dalam satu rumah dengan roda gigi di antaranya. Terkadang ada juga mekanisme lain seperti gimpal untuk menangani efek gyroscopic.

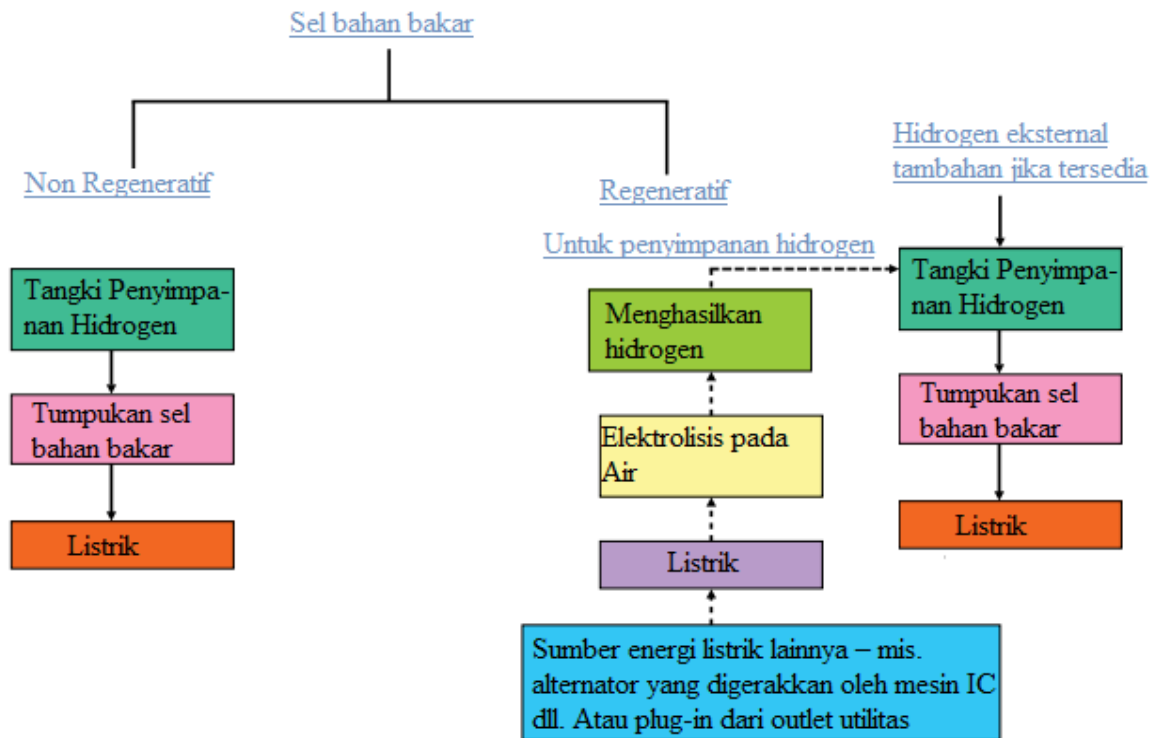
11.9 SISTEM KENDARAAN HIBRIDA BERBASIS SEL BAHAN BAKAR

Pengantar Sel Bahan Bakar

Sel bahan bakar dapat digunakan sebagai sumber daya alternatif untuk sistem kendaraan listrik dan hibrida. Ini dapat membantu untuk sepenuhnya menggantikan ICE, sehingga menjadikannya kendaraan yang sepenuhnya listrik. Ini juga dapat digunakan di lingkungan HEV. Biasanya bahkan kendaraan listrik murni, menggunakan sel bahan bakar akan membutuhkan baterai untuk memulai proses aktivasi sel bahan bakar. Dalam kendaraan listrik sel bahan bakar dimungkinkan untuk menghilangkan alternator sebagai sumber pembangkit listrik. Sebagai pengganti baterai dimungkinkan untuk memiliki ultrakapasitor dan meskipun ultrakapasitor dapat dihilangkan, disarankan untuk mempertahankannya dalam keadaan normal. Arsitektur tingkat sistem kendaraan sel bahan bakar ditunjukkan di bawah ini pada Gambar 11.24.



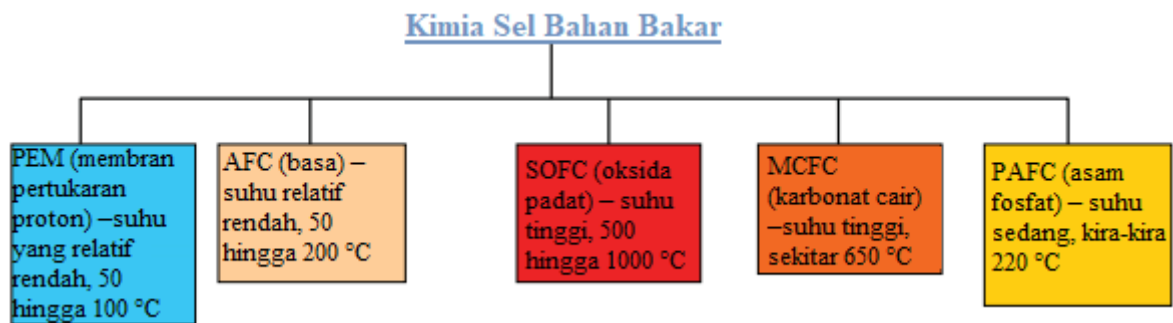
Gambar 11.24 Arsitektur tingkat sistem kendaraan sel bahan bakar



Gambar 11.25 Klasifikasi sel bahan bakar

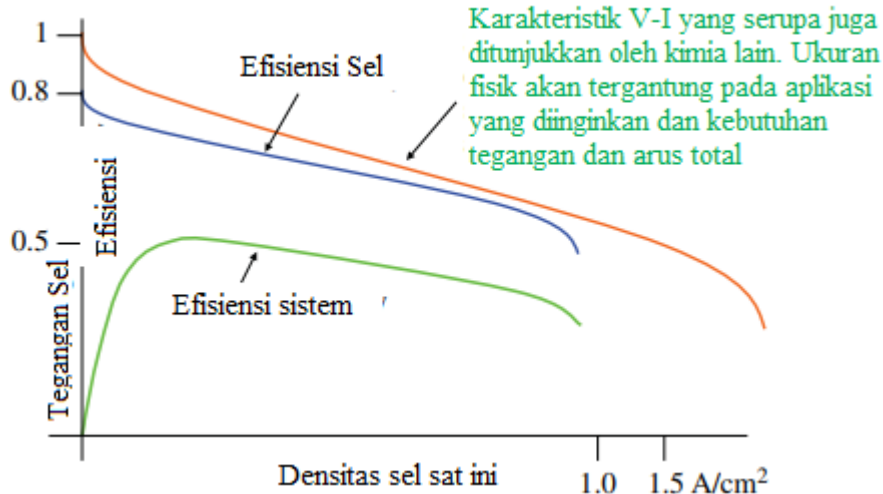
Jenis Sel Bahan Bakar

Ada berbagai jenis (atau kelas) sel bahan bakar. Klasifikasi ini ditunjukkan pada Gambar 11.25. Selain klasifikasi di atas, sel bahan bakar juga dapat dibagi berdasarkan kimianya. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 11.26.



Gambar 11.26 Sel bahan bakar berdasarkan kimia.

Kurva khas untuk V-I, dan η :



Gambar 11.27 Kurva karakteristik sel bahan bakar.

Aplikasi Tingkat Sistem

Perlu dicatat bahwa sistem sel bahan bakar bukan hanya tumpukan sel, tetapi juga mengandung beberapa komponen untuk menyusun paket:

- sel bertumpuk
- tangki bahan bakar (hidrogen)
- jika metanol atau bahan bakar lain digunakan untuk menghasilkan hidrogen, itu juga akan membutuhkan: alat penguap, reformer, proses pemurnian gas, dll.
- berbagai pompa (motor)
- kompresor jika diperlukan (motor)
- kipas pendingin (motor)
- sistem pemanas, sesuai kebutuhan

Periferal sel bahan bakar juga penting. Dalam hal ini, untuk mengoperasikan sel bahan bakar juga diperlukan:

- sel berada pada suhu minimum untuk memulai reaksi kimia sel
- baterai atau alat bantu untuk memulai proses
- sarana untuk menjaga agar voltase sel tetap tertutup dengan sangat akurat, jika tidak, masa pakai sistem dapat dikurangi secara signifikan karena sel bahan bakar sangat sensitif.

Karakteristik khas dari sel bahan bakar digambarkan pada Gambar 11.27

Pemodelan Sel Bahan Bakar

Model rangkaian ekuivalen sederhana dari sel bahan bakar dapat dilihat pada Gambar 11.28. Skema ini dapat mewakili hubungan antara arus sel dan tegangan terminal output di

mana berbagai parameter - yaitu resistansi, kapasitansi - dan emf internal didasarkan pada proses kimia di dalam sel. Model pada Gambar 11.28 sebenarnya adalah model dinamis dengan persamaan seperti yang ditunjukkan di bawah ini. Dalam model rangkaian ekivalen ini, E_{cell} mewakili potensi internal sel bahan bakar.

Output tegangan sel bahan bakar V_d adalah E_{cell} dengan tiga jenis penurunan tegangan dikurangi: penurunan tegangan aktivasi, penurunan tegangan ohmik, dan penurunan tegangan konsentrasi. Penurunan tegangan aktivasi dapat dipisahkan menjadi dua bagian, satu dipengaruhi oleh suhu internal dan yang lainnya disebabkan oleh resistansi aktivasi yang setara. Kapasitor C adalah kapasitor ekivalen karena efek pengisian lapisan ganda. Rumus untuk menghitung bagian-bagian ini adalah sebagai berikut (persamaan 11.18):

$$V_d = E_{cell} - V_{act1} - V_{act2} - V_{conc} = R_{ohmic} I$$

Dimana

$$E_{cell} = E_{0,cell} + \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{P_{H_2}^* (P_{O_2}^*)^{0.5}}{P_{H_2} (P_{O_2})^{0.5}} \right] - K_E (T - 298)$$

dan $E_{0,cell}$ adalah potensial referensi standar pada keadaan standar (298 K dan tekanan 1 atm), R adalah konstanta gas, dan F adalah konstanta Faraday. P_{H_2} dan P_{O_2} mewakili tekanan parsial H_2 dan O_2 yang diaktifkan di dalam sel bahan bakar. Tanda bintang * mewakili nilai efektif parameter. K_E adalah konstanta empiris dalam volt per kelvin dan T adalah suhu aktual saat sel bahan bakar beroperasi. Dengan demikian (persamaan 11.19)

$$V_{act1} = \eta_0 + a(T-298)$$

di mana η_0 adalah bagian suhu-invarian dari V_{act1} dan a adalah konstanta empiris dalam volt per kelvin. Demikian pula,

Persamaan 11.20

$$V_{act2} = R_{act2} I$$

Persamaan 11.21

$$V_{conc} = R_{cond} I$$

Persamaan 11.22

$$V_C = \left(1 - C \frac{dV_C}{dt} \right) (R_{act} + R_{conc})$$

Pada kondisi tunak, karakteristik statik sel bahan bakar seperti yang digambarkan dalam persamaan berikut, di mana hubungan antara tegangan output dan arus sel bahan bakar dapat dianggap linier dengan mengabaikan V_{act2} dan V_{conc} , karena nilai yang kecil dari dua parameter pada kondisi tunak (persamaan 11.23):

$$V_d = E_{cell} - V_{act1} - R_{ohmic} I$$

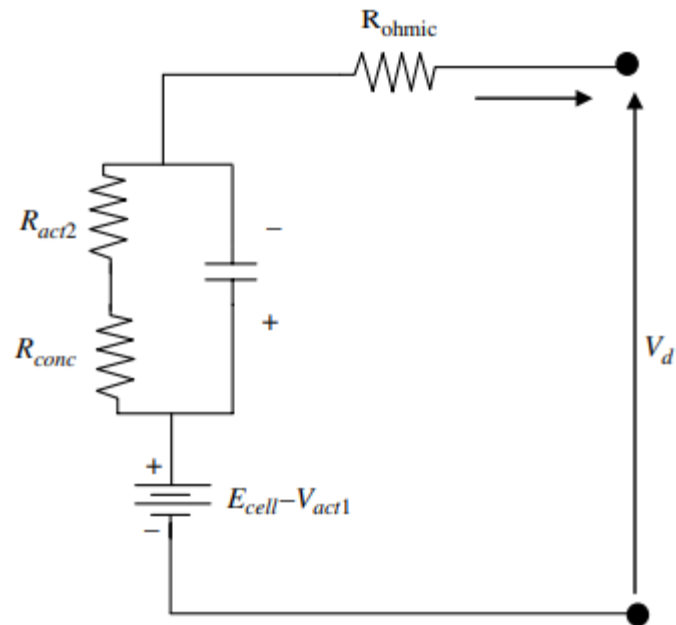
Pada kondisi tunak, E_{cell} , V_{act1} , dan R_{ohmic} dapat dianggap sebagai konstanta, sehingga persamaan di atas dapat dimodifikasi kira-kira dengan ekspresi berikut (persamaan 11.24):

$$V_d = K_1 + K_2 I$$

di mana

$$K_1 = E_{cell} - V_{act1} \text{ dan } K_2 = -R_{ohm}$$

Untuk referensi, nilai khas parameter model sel bahan bakar diberikan pada Tabel 11.3.



Gambar 11.28 Setara listrik sel bahan bakar model sirkuit

Tabel 11.3 Parameter sel bahan bakar biasa

$E_{0,cell}$ (V)	R (J/(molK))	F (C/mol)	P_{H_2} (Pa)	P_{O_2} (Pa)
58.9	8.3143	96 487	1.5	1.0
k_E (V/K)	η_0 (V)	a (V/K)	R_{ohm} (Ω)	T (K)
0.00085	20.145	-0.1373	0.2793	307.7

11.10 RINGKASAN DAN DISKUSI

Bab ini telah membahas diskusi tentang berbagai perangkat penyimpanan energi penting – baterai, ultrakapasitor, flywheel – dan sumber daya sel bahan bakar. Sudut pandang tingkat arsitektur dan sistem telah diambil dalam diskusi karena ini penting dari sudut pandang pengguna praktis. Metodologi praktis untuk menghitung status pengisian baterai/*State of Charge* (SOC) dan status kesehatan/*State of Health* (SOH) telah dibahas. Sistem manajemen baterai juga telah dijelaskan. Kombinasi baterai dan ultracapasitor, dan kemungkinan penyimpanan atau sumber lain seperti flywheel dan sel bahan bakar dapat membantu mengoptimalkan arsitektur sistem untuk memenuhi permintaan beban tertentu. Namun, saat menggunakan berbagai sumber, berat dan ukuran – yaitu kemasan – dapat menjadi masalah yang signifikan, bersama dengan total biaya perangkat ini, dan karenanya dapat menghalangi penggunaannya. Ini adalah masalah praktis, dan studi tradeoff yang tepat diperlukan untuk membuat pilihan, dan mungkin tidak ada solusi unik untuk masalah ini. Meskipun teknologi sel bahan bakar menjanjikan untuk kendaraan bersih di masa depan, teknologi ini masih membutuhkan peningkatan lebih lanjut untuk aplikasi kendaraan portabel. Jadi, idenya di sini adalah ketika memutuskan tentang pilihan komponen ini, pandangan holistik harus diambil sebelum mengembangkan arsitektur.

BAB 12 MODELING BATERAI

12.1 PENDAHULUAN

Bab 11 berisi cukup banyak diskusi tentang sumber energi, termasuk baterai, ultrakapasitor, dan flywheel. Bab tersebut juga memberikan perincian tentang item yang terkait dengan baterai dan sistem energi lainnya, status pengisian daya, status kesehatan, siklus hidup, dan detail lainnya dengan referensi khusus untuk baterai asam timbal. Dalam bab itu, baterai dan pemodelan perangkat energi lainnya juga dibahas sampai batas tertentu, jadi bab ini tidak akan terlalu banyak membahas item-item tersebut dan akan langsung fokus pada baterai kendaraan hybrid dan listrik, khususnya baterai berbasis nikel metal hidrida dan lithium. terutama yang berkaitan dengan pemodelan. Meskipun bab sebelumnya terutama berkaitan dengan baterai asam timbal, metodologi dan filosofi akan tetap kurang lebih sama dalam kimia baterai lain yang dibahas di sini.

Dalam bab ini fokus utama adalah pada pemodelan baterai. Pemodelan baterai berguna: (1) untuk perhitungan SOC, (2) untuk perhitungan SOH, (3) sebagai bagian dari model kendaraan secara keseluruhan dan untuk mempelajari keadaan tunak dan perilaku sistem dinamis kendaraan hibrida atau listrik yang dipengaruhi oleh keberadaan baterai. Ini berarti memperoleh karakteristik kinerja sistem secara keseluruhan dengan model baterai yang dimasukkan.

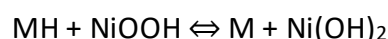
Seperti diketahui, baterai adalah perangkat yang sangat nonlinier yang menampilkan histeresis – dengan kata lain, tidak hanya situasi atau kondisi baterai saat ini, tetapi juga bagaimana sampai ke status atau titik operasi itu juga penting. Meskipun model matematika telah dikembangkan untuk berbagai kimia baterai, mereka tidak selalu memprediksi perilaku dengan benar dalam semua situasi. Selain itu, model yang didasarkan pada detail kimia baterai yang rumit dapat menjadi sangat rumit dan dapat mewakili beban komputasi yang signifikan, jika ingin diimplementasikan dengan akurat. Oleh karena itu, rangkaian listrik atau model berbasis impedansi yang relatif lebih sederhana untuk mewakili karakteristik terminal baterai cukup sering digunakan. Selain itu, terkadang model empiris sederhana berdasarkan studi eksperimental baterai dapat digunakan. Oleh karena itu tidak ada model baterai tunggal yang dapat memprediksi perilaku baterai secara akurat sepanjang waktu dan dalam segala keadaan.

12.2 PEMODELAN BATERAI NiMH (*NICKEL METAL HYDRIDE*)

Kimia Baterai NiMH

Dalam Bab 11, ditunjukkan bahwa baterai NiMH dapat dijelaskan dengan reaksi kimia reversibel keseluruhan berikut:

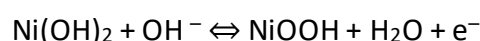
Persamaan 12.1



Reaksi ini dapat dibagi menjadi dua reaksi terpisah, satu untuk elektroda positif dan yang lainnya untuk elektroda negatif:

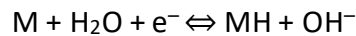
Elektroda positif :

Persamaan 12.2



Elektroda negatif:

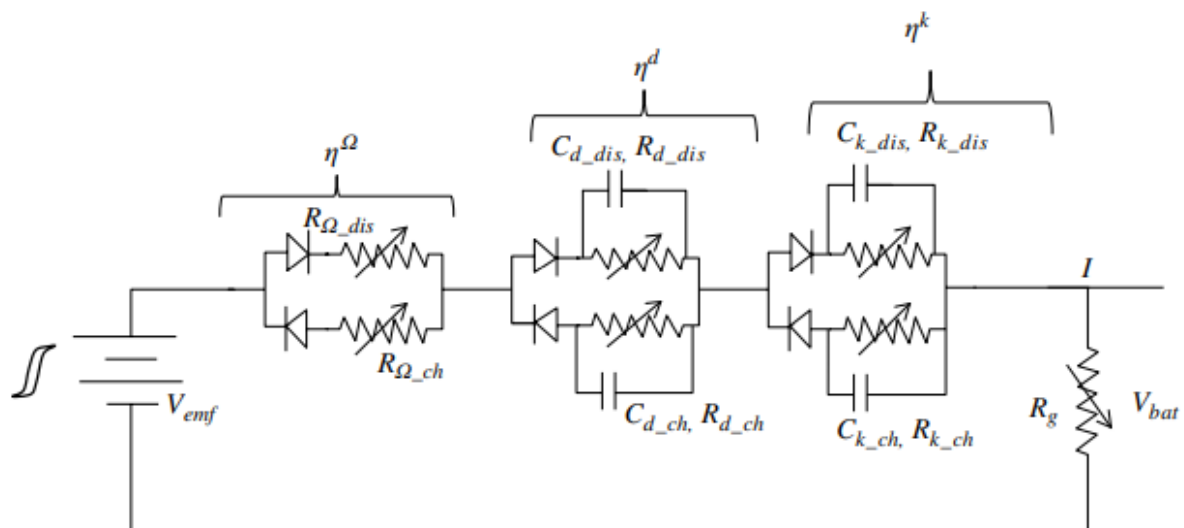
Persamaan 12.3



Menambahkan persamaan terpisah ini di (12.2) dan (12.3) segera membawa kita kembali ke (12.1). Di atas, M adalah logam, yang, dalam kasus elektroda negatif, merupakan senyawa intermetalik. Senyawa logam ini merupakan campuran dari beberapa bahan tanah jarang termasuk beberapa di antaranya: lantanum, serium, neodymium, praseodymium, nikel, kobalt, mangan, dan/atau aluminium. Senyawa ini pada dasarnya membentuk semacam campuran senyawa hidrida logam.

Meskipun dimungkinkan untuk masuk ke rincian reaksi kimia yang ditunjukkan pada (12.1)–(12.3), dan menggunakan berbagai parameter desain seperti ukuran pelat baterai, jumlah bahan kimia yang terlibat, dan sebagainya, untuk mengetahui jumlah energi kimia dan karenanya SOC di dalam baterai, prosesnya bisa menjadi sangat rumit. Oleh karena itu, untuk tujuan studi HEV dan EV, lebih mudah untuk fokus terutama pada model karakteristik listrik dua terminal di sini. Model sirkuit yang sama ditunjukkan dalam Bab 11 dan ditunjukkan pada Gambar 12.1, dapat berfungsi sebagai model generik dasar. Model ini dapat digunakan dalam baterai NiMH, sama seperti baterai asam timbal.

Sirkuit yang ditunjukkan pada Gambar 12.1 dapat dianggap sebagai versi modifikasi dari ekuivalen thevenin, untuk mewakili perilaku dua terminal baterai. Namun, perlu dicatat bahwa rangkaian ekuivalen Thevenin hanya berlaku di bawah asumsi bahwa teorema superposisi berlaku, yang berlaku dalam kasus sistem linier. Dalam baterai, linearitas tidak berlaku untuk domain operasi lengkap dalam hal suhu, SOC, SOH dll, menyiratkan bahwa resistensi dan kapasitansi di atas harus menjadi jumlah variabel, tergantung pada berbagai kondisi, terutama suhu, dan arus yang mengalir pada saat tertentu, termasuk jalur sejarah yang dilalui untuk sampai pada keadaan tertentu. Oleh karena itu rangkaian yang ditunjukkan pada Gambar 12.1 dapat dianggap sebagai situasi kuasi-linier, dengan asumsi bahwa variasinya tidak terlalu banyak pada saat tertentu. Selain itu, karena baterai NiMH juga menampilkan perilaku histeresis, ini terkadang dapat digabungkan dalam model di atas dengan memasukkan elemen histeresis seperti yang ditunjukkan dalam V_{emf} . Variabilitas yang termasuk dalam V_{emf} menyiratkan bahwa tegangan rangkaian terbuka tidak konstan dan tergantung pada berbagai faktor termasuk fakta bahwa perubahannya selama pengisian tidak mengikuti jalur yang sama seperti selama pelepasan, sehingga menampilkan histeresis.



Gambar 12.1 Model baterai terperinci yang berlaku untuk NiMH termasuk histeresis.

Kadang-kadang, rangkaian pada Gambar 12.1 dapat disederhanakan dengan mempertahankan hanya satu cabang seri dan resistansi pelepasan yang melintasi terminal di sisi kanan. Berapa banyak detail yang akan dipertahankan di sirkuit akan tergantung pada kebutuhan. Jika banyak cabang dipertahankan, parameter yang sesuai harus dievaluasi. Evaluasi parameter dapat dilakukan dengan studi eksperimental dengan data yang cukup di berbagai titik operasi. Dimungkinkan juga untuk memodelkan baterai menggunakan sistem jaringan saraf tiruan/*Artificial Neural Network* (ANN), yang juga merupakan situasi quasi-steady. Ada studi tentang sistem ANN dinamis nonlinier juga dalam literatur, yang dapat digunakan untuk pemodelan baterai untuk mendapatkan fidelitas yang lebih baik. Jika model rangkaian digunakan, evaluasi parameter seperti kapasitor akan memerlukan pengambilan data dalam kondisi transien. Karena elemen nonlinier ini juga bergantung pada suhu, ini dapat digabungkan selama evaluasi parameter, atau selama proses pelatihan ANN. Proses pelatihan ANN juga akan membutuhkan ketersediaan sebanyak mungkin data yang disediakan pabrikan. Telah ditunjukkan dalam bab sebelumnya bahwa untuk memperkirakan parameter dalam sistem yang berjalan saat mengirimkan beban, dan secara real-time, mungkin perlu untuk secara berkala mengganggu arus beban dengan persentase kecil dari nilai aktual pada saat tertentu, dan pantau perubahan tegangan yang sesuai, atau sebaliknya. Ini dapat membantu mengevaluasi parameter yang berkontribusi terhadap perilaku transien, yaitu kapasitor.

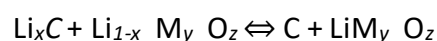
Meskipun rangkaian Gambar 12.1 mungkin berguna untuk memperoleh perilaku listrik dua terminal baterai, itu tidak akan secara langsung memberikan informasi SOC dan SOH. SOC dan SOH adalah informasi berdasarkan data historis, sehingga dapat dievaluasi dengan penyimpanan informasi yang dinamis. Meskipun metode yang melibatkan pengukuran tegangan, arus, dan suhu terminal sirkuit terbuka dapat digunakan dan dibandingkan dengan kurva yang diketahui untuk baterai untuk mengevaluasi SOC dan SOH, ini bukan fungsi titik yang sebenarnya. Oleh karena itu agar akurat, perlu memiliki data historis untuk tujuan tersebut, dan menggunakan metodologi yang ditunjukkan dalam Bab 11.

Jika model baterai dua arah yang ditunjukkan oleh Gambar 12.1 ini digunakan, maka parameternya harus ditangkap untuk kedua arah. Karena ini adalah sistem orde keempat (empat elemen penyimpanan di lokasi independen) dengan nonlinier yaitu dioda, resistor nonlinier, V_{emf} dll., parameter ekuivalennya, tergantung pada parameter fisik, dapat diperkirakan dengan menggunakan sistem ANN. Dengan memantau sampel variabel fisik yang cukup dari baterai dalam jendela geser, dimungkinkan untuk memperkirakan parameter yang setara ini. Namun, sistem harus tidak dalam keadaan tunak untuk memperkirakan parameter ini, seperti kapasitansi. Karena elemen nonlinier ini juga bergantung pada suhu, ini dapat dimasukkan dalam proses pelatihan. Pilihan lainnya – melakukan eksperimen offline, dan memperoleh data untuk baterai untuk membuat tabel pencarian pada rentang suhu yang luas, SOC, SOH, dll. – akan sangat membosankan dan padat karya, dan mungkin memerlukan sumber daya komputasi yang signifikan.

12.3 PEMODELAN BATERAI Li-Ion (*LITHIUM-ION*)

Kimia dalam Baterai Li-Ion

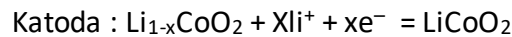
Dalam Bab 11, ditunjukkan bahwa baterai Li-ion dapat dijelaskan dengan reaksi kimia reversibel keseluruhan berikut (persamaan 12.4):



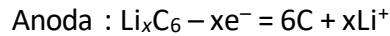
Reaksi ini dapat dibagi menjadi dua reaksi terpisah, satu untuk elektroda positif dan yang lainnya untuk elektroda negatif:

Selama debit:

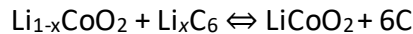
Persamaan 12.5



Persamaan 12.6



Reaksi ini reversibel selama pengisian. Menambahkan dua persamaan di atas, kita dapatkan selama debit berikut (persamaan 12.7):

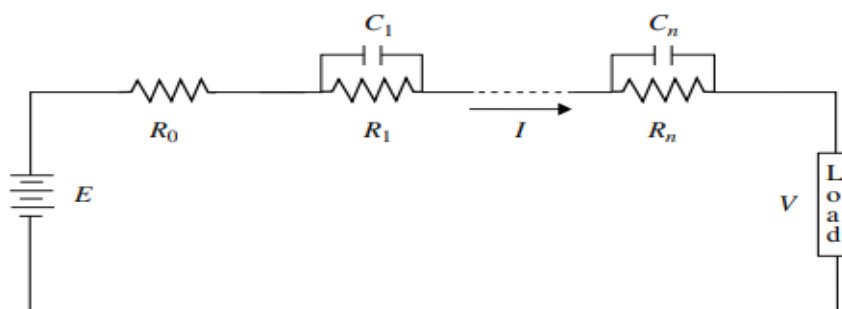


Sekali lagi, pernyataan yang sama ditunjukkan untuk baterai NiMH yang berkaitan dengan jalur reaksi kimia untuk mengetahui SOC adalah benar untuk Li-ion. Ada berbagai model yang telah dilaporkan dalam literatur untuk berbagai tujuan. Beberapa di antaranya fokus pada SOC, dan beberapa fokus pada SOH. Kita akan fokus pada model rangkaian setara yang meniru perilaku baterai ketika model terhubung ke seluruh sistem. Untuk ini kita dapat menggunakan kertas referensi, di mana rangkaian dengan resistansi seri dan resistansi paralel dengan kapasitor telah digunakan. Model ini sebenarnya dapat dengan mudah diturunkan dengan menggunakan template model generik yang sama pada Gambar 12.1 (seperti juga digunakan dalam Bab 11).

Seperti disebutkan dalam Bab 11, baterai Li-ion tidak memiliki "efek memori" (seperti histeresis pada tingkat maksimum yang berbeda) yang menyebabkan baterai isi ulang lainnya kehilangan tingkat pengisian maksimumnya ketika diisi ulang dan dikosongkan berulang kali ke kapasitas selain kapasitas penuh. Oleh karena itu elemen histeresis dalam model rangkaian dapat dihilangkan di sini.

12.4 ESTIMASI PARAMETER UNTUK MODEL BATERAI

Diskusi di bagian sebelumnya telah menunjukkan bahwa dimungkinkan untuk menggunakan template umum seperti Gambar 12.1 untuk model baterai, terlepas dari kimianya. Namun untuk NiMH, elemen memori dapat dimasukkan. Tingkat kecanggihan model dapat bergantung pada jumlah elemen yang termasuk dalam model rangkaian, yaitu resistansi, kapasitansi, dll. Juga perlu untuk menyertakan resistansi self-discharge demi kelengkapan. Terlepas dari segalanya, pengembangan model baterai pada dasarnya bergantung pada estimasi nilai resistansi dan kapasitansi dalam model rangkaian dan memvalidasinya terhadap hasil eksperimen. Setelah selesai, model kemudian dapat digunakan dalam lingkungan model sistem secara keseluruhan untuk mempelajari kinerja sistem. Estimasi SOC dan SOH kemudian menjadi bagian dari kumpulan variabel model saat menggunakan model rangkaian pada Gambar 12.1 dalam lingkungan model sistem fisik, dan menggunakan variabel tersebut untuk mengestimasi SOC dan SOH seperti yang ditunjukkan pada Bab 11.



Gambar 12.2 Model baterai generik.

Untuk tujuan estimasi parameter, pada dasarnya rangkaian yang sama pada Gambar 12.1 dengan beberapa reorganisasi dan penyederhanaan dapat digunakan. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 12.2. Metode yang digunakan untuk mencari E dan R_0 didasarkan pada teori rangkaian sederhana. Awalnya diasumsikan bahwa semua tegangan kapasitor adalah nol. Anggapan ini benar jika baterai diistirahatkan cukup lama dengan beban terbuka. Ini menyiratkan bahwa bahkan jika kapasitor memiliki muatan apa pun, ini akan dikeluarkan melalui resistor yang sesuai. Setelah itu diperlukan dua pengukuran, pertama adalah dengan beban terbuka. Tegangan yang dipantau kemudian akan sama dengan E atau $V(0^-)$. Demikian pula percobaan berikutnya dilakukan dengan beban, dengan menempatkan beberapa sumber tegangan konstan ($V(0^+)$) yang diketahui melintasi terminal, dan mencatat nilai arus (I). Karena tegangan kapasitor awal adalah nol, maka R_0 akan diberikan oleh persamaan berikut:

Persamaan 12.8

$$R_0 = (V(0^-) - V(0^+))/I$$

Selain hal di atas, juga dimungkinkan untuk memiliki resistansi pengosongan sendiri R_d di seluruh beban (dan paralel dengan beban) yang menunjukkan arus pengosongan kontinu (I_d) dari baterai bahkan ketika beban terbuka. Dalam hal ini arus total yang diukur pada terminal dapat digunakan untuk menghitung R_d dan R_0 sebagai berikut (persamaan 12.9):

$$R = (V(0^-) - V(0^+))/(I_t - I_d)$$

dimana I_t adalah arus yang mengalir melalui terminal.

Persamaan 12.10

$$I_d = V(0^+)/R_d$$

Persamaan 12.11

$$I_t = \text{arus terminal} = I - I_d$$

Dari Persamaan (12,9-12,11) kita melihat bahwa tidak mungkin untuk menemukan empat variabel R_0 , I , I_d , R_d , berdasarkan nilai terukur dari $V(0^-)$, $V(0^+)$, dan I_t . Situasi ini dapat diatasi dengan melakukan satu tes tambahan – sebagai opsi yang memungkinkan, tes hubung singkat sesaat pada baterai dan mengukur arus hubung singkat, yang dapat segera memberikan nilai $R_0 = V(0^-)/I_{sc}$, di mana I_{sc} adalah nilai terukur dari arus hubung singkat yang melalui terminal. Mengetahui R_0 , kita dapat segera menemukan I_d , dan karenanya R_d dapat dievaluasi dari persamaan di atas.

Parameter yang tersisa – R_1 , R_2 , ... R_n , dan C_1 , C_2 , ... C_n – dapat ditentukan dengan mengumpulkan data tegangan V dan arus I di terminal, selama durasi waktu yang cukup pada berbagai interval. Makalah referensi menyarankan bahwa dengan mengendalikan arus konstan melalui terminal, sambil mengumpulkan data, metode ini dapat disederhanakan secara matematis. Ini dibahas di bawah sampai batas tertentu. Metode yang lebih sederhana untuk menerapkan hal di atas dapat digunakan dengan memiliki beban arus konstan pada dua terminal keluaran. Dalam hal ini, tegangan terminal $v(t)$ dapat dinyatakan sebagai (persamaan 12.12):

$$v(t) = E - R_0 I - \sum_{k=1}^n R_k I \left(1 - \exp \left[-\frac{t}{(R_k C_k)} \right] \right)$$

Ide dasarnya di sini adalah arus konstan I diinjeksikan melalui terminal output dan $v(t)$ melintasi terminal diukur pada langkah waktu yang berbeda. Hal ini menyebabkan satu set persamaan dengan parameter R_k dan C_k dengan k berjalan dari 1 ke n . Nilai n , yang menentukan derajat persamaan dan karenanya kompleksitasnya, adalah masalah pilihan, berdasarkan akurasi yang diinginkan dari model. Satu makalah referensi menunjukkan bahwa derajat yang terlalu kecil, atau terlalu besar untuk n , dapat menimbulkan masalah, di mana data yang diperoleh dari model tidak dapat divalidasi dengan baik oleh eksperimen. Menurut makalah referensi itu, $n = 3$ tampaknya menjadi pilihan yang cukup baik, dan nilai yang lebih tinggi dapat menyebabkan lebih banyak kerumitan dan kesulitan dalam mengoptimalkan parameter untuk kecocokan terbaik. Kebetulan, Hu et al. menggunakan model orde dan melanjutkannya sebagai berikut:

Persamaan 12.13

$$v(t) = E - R_0 I - \sum_{k=1}^3 R_k I \left(1 - \exp \left[-\frac{t}{(R_k C_k)} \right] \right)$$

Untuk menemukan enam parameter untuk R_k , C_k , dengan $k = 1$ hingga 3, kita dapat memilih enam instans waktu yang berjarak sama untuk kemudahan (walaupun tidak harus berjarak sama) dan membentuk satu set persamaan sebagai berikut. $t_k = kT$, di mana $k = 1$ sampai 6 untuk interval waktu yang sama.

Mendefinisikan:

Persamaan 12.14

$$d_j = \exp[-T/R_j/C_j], j = 1 \text{ hingga } 3$$

Persamaan 12.15

$$v(kT) = E - R_0 I - \sum_{j=1}^3 R_j I (1 - d_j^k), \quad \text{dimana } d_j^k = (d_j)^k, \text{ dengan } k = 1 \text{ hingga } 6$$

Di atas, diasumsikan bahwa E dan R_0 telah ditemukan dengan metode hubung singkat dan terbuka yang dijelaskan sebelumnya di sirkuit Thevenin. Oleh karena itu, dalam Persamaan (12.15) akan ada enam nilai $v(kT)$ dengan pengukuran, yang mengarah ke enam persamaan terpisah. Meskipun keenam persamaan tersebut nonlinier dengan pangkat yang lebih tinggi, pada prinsipnya persamaan tersebut dapat diselesaikan untuk tiga pasang besaran yang tidak diketahui, yaitu R_j , C_j , hambatan dan kapasitansi dalam model. Meskipun persamaan tersebut mungkin tampak mustahil untuk diselesaikan dengan metode analitik apa pun, referensi telah menunjukkan bahwa dengan membuat beberapa perubahan pada variabel dan reorganisasi himpunan persamaan, solusi bentuk tertutup dapat ditemukan. Hal ini tampaknya mungkin untuk $j = 1$ hingga 3. Namun, jika urutan model lebih tinggi dari tiga dipilih, metode numerik harus digunakan. Rincian metode numerik ini juga telah ditunjukkan dalam.

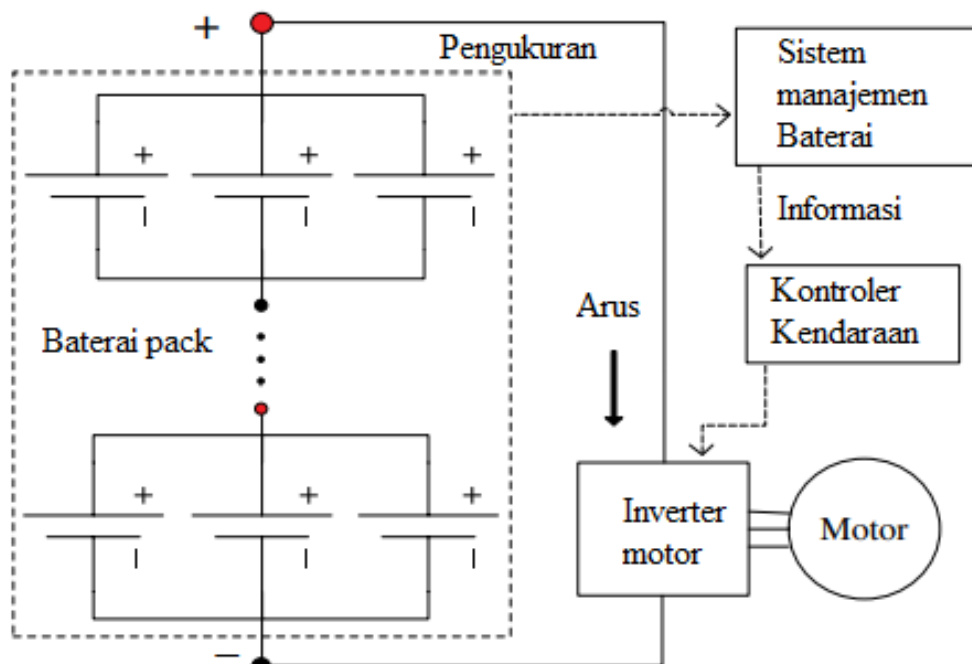
Metode yang ditunjukkan di atas sebenarnya cukup umum dan dapat diadopsi untuk digunakan dalam baterai dengan kimia yang berbeda, mis. asam timbal, Li-ion, Li-polimer, NiMH, dan juga, pada kenyataannya, untuk sel bahan bakar. Perhatikan bahwa, dalam diskusi di atas, diasumsikan bahwa kondisi operasi (SOC, SOH, suhu, beban, riwayat pengisian / discharge) dalam waktu singkat tidak berubah. Namun, jika model tersebut valid dan digunakan pada rentang yang lebih luas dari kondisi kerja tersebut, maka model akan menjadi sangat kompleks, dan set parameter perlu dievaluasi di bawah SOC, SOH, suhu, dll. yang

berbeda, dan dalam hal ini, mungkin perlu membuat tabel pencarian multidimensi untuk menggunakan model. Ini dapat memerlukan sumber daya komputasi yang signifikan.

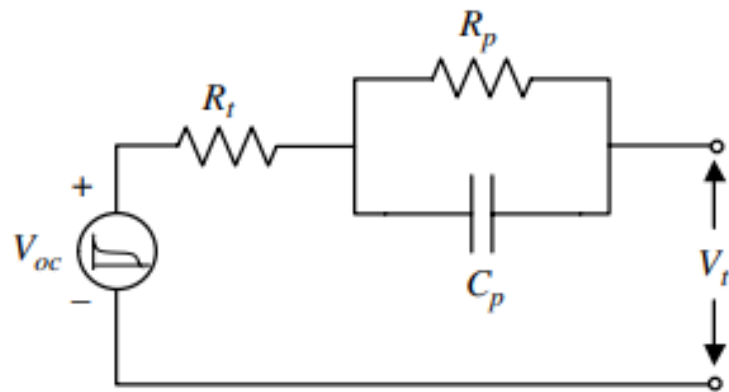
12.5 CONTOH KASUS MENGGUNAKAN MODEL BATERAI DALAM SISTEM EV

Pada bagian ini, sebuah penelitian dijelaskan yang ditulis bersama oleh salah satu penulis bersama (C. Mi) dari buku ini. Gambar 12.3 menunjukkan sistem EV yang khas. Studi ini melibatkan karakteristik paket baterai dengan sel baterai lithium-ion yang terhubung paralel. Di sini, masalah pengaruh inkonsistensi sel dalam sel terhubung paralel dipelajari, menggunakan sekelompok sel baterai lithium-ion terdegradasi yang berbeda untuk membangun berbagai paket baterai. Model rangkaian ekuivalen digunakan untuk mensimulasikan operasi paket terhubung paralel. Hasil eksperimen dan simulasi menunjukkan bahwa, dengan sel terdegradasi yang berbeda secara paralel, mungkin ada kehilangan kapasitas dan perbedaan besar dalam arus pelepasan, yang dapat menyebabkan degradasi yang dipercepat lebih lanjut dan masalah inkonsistensi yang lebih serius.

Model rangkaian ekuivalen diberikan pada Gambar 12.4 yang merupakan rangkaian ekuivalen yang sama yang ditunjukkan sebelumnya dalam bab ini (Gambar 12.1 dan 12.2), tetapi dengan urutan yang jauh lebih rendah. Pada Gambar 12.4, V_{oc} adalah tegangan rangkaian terbuka/*Open Circuit Voltage* (OCV), yang bergantung pada status pengisian baterai/*State of Charge* (SOC), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12.3. Parameter model adalah R_t , yang mewakili resistansi ohmik. R_p dan C_p timbul karena efek polarisasi baterai dan seperti disebutkan sebelumnya dalam bab ini, di mana C_p mewakili efek transien di bawah operasi dinamis. Parameter internal ini sangat bergantung pada variabel lain seperti SOC, SOH, dan temperatur. Jika kondisi ini diasumsikan diketahui pada titik operasi tertentu, yaitu di bawah kondisi kuasi-statis, maka prosedur matematika yang ditunjukkan pada bagian sebelumnya dapat digunakan untuk memperkirakan parameter tersebut. Gambar 12.5 menunjukkan hubungan antara OCV dan SOC. Hubungan ini dapat diperoleh dengan pengukuran dan dapat digunakan di sisi kiri dalam model yang ditunjukkan pada Gambar 12.4 untuk V_{oc} .

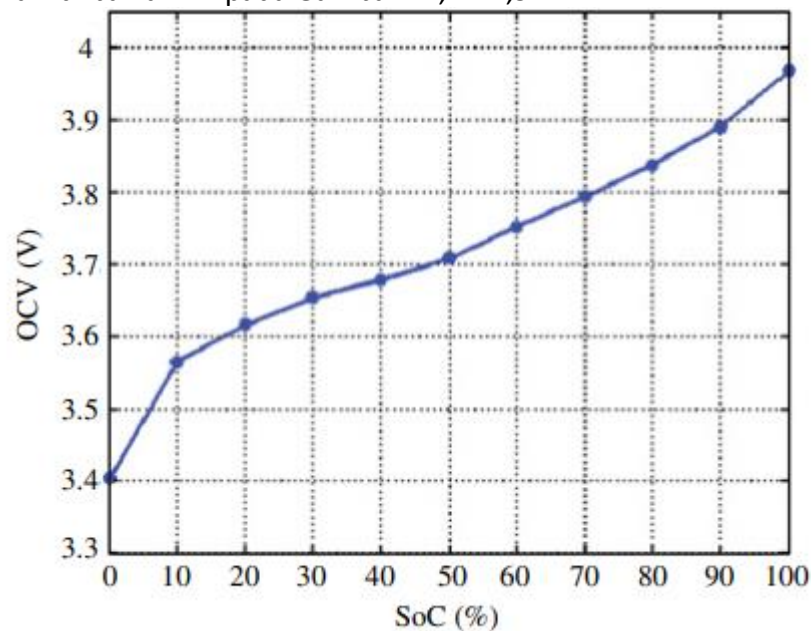


Gambar 12.3 Sistem penggerak kendaraan listrik bertenaga baterai pada umumnya.

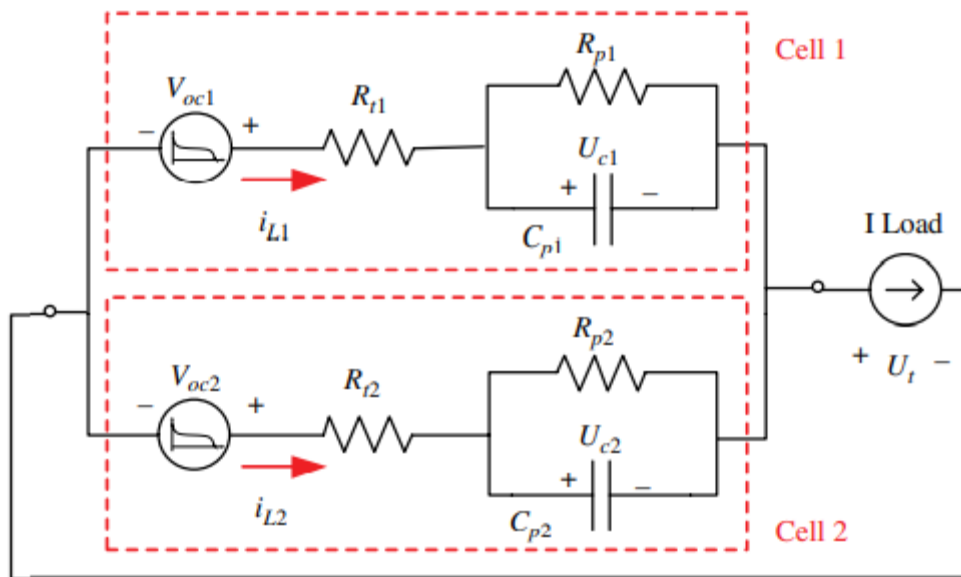


Gambar 12.4 Model rangkaian ekuivalen orde pertama dari baterai.

Setelah parameter dievaluasi, seluruh paket baterai kemudian dapat dimodelkan hanya dengan menggabungkan sejumlah model baterai individual yang ditunjukkan pada Gambar 12.4 dengan koneksi seri-paralel yang tepat, sehingga menghasilkan paket baterai yang lengkap. Model yang dibuat dalam makalah referensi diberikan pada Gambar 12.6. Model memiliki dua jaringan R_c secara paralel, bersama dengan beban yang diwakili oleh sumber arus. Arus i_{L1} dan i_{L2} pada Gambar 12.6 bergantung pada parameter internal R_{t1} dan R_{t2} , dan kapasitansi polarisasi C_{p1} dan C_{p2} , resistansi R_{p1} dan R_{p2} , dan tegangan rangkaian terbuka OCV. Seperti yang ditunjukkan sebelumnya dalam bab ini, parameter ini adalah fungsi SOC, SOH, suhu, dll. Dengan asumsi situasi kuasi-statis, parameter ini diperoleh dan beberapa contoh ditunjukkan di bawah ini pada Gambar 12,7-12,9.

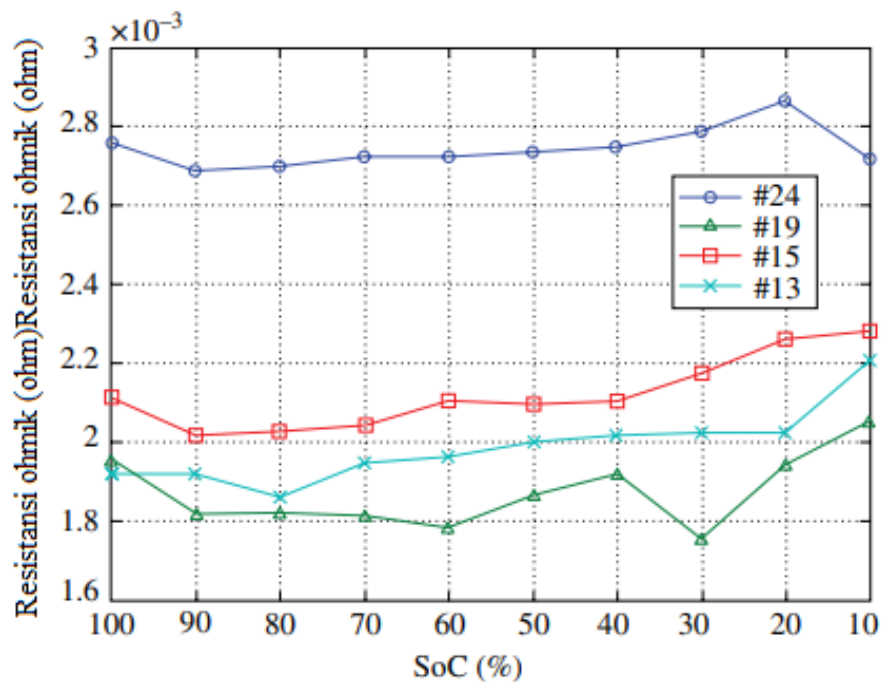


Gambar 12.5 OCV vs SOC

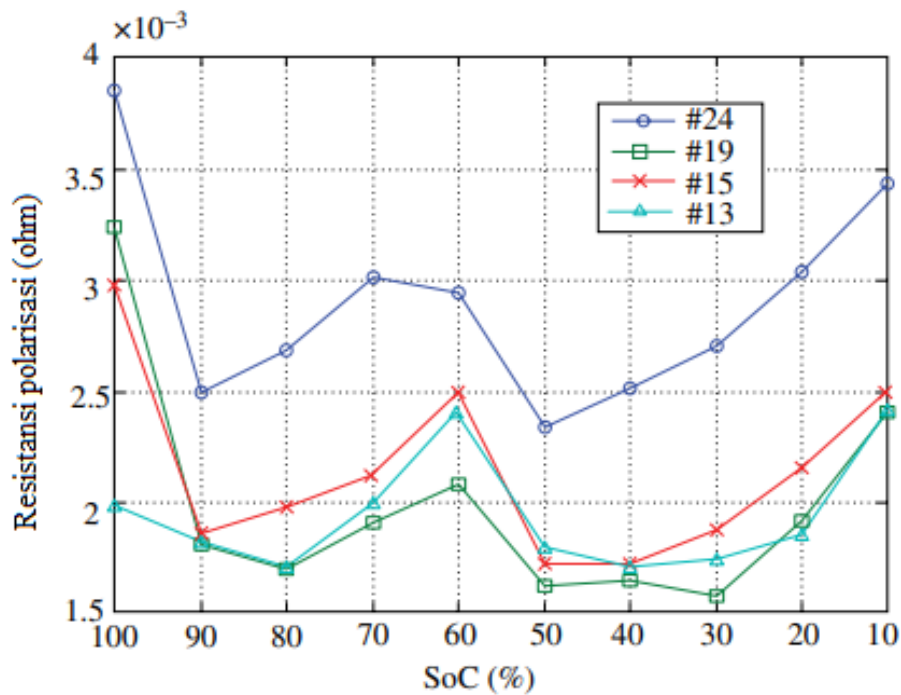


Gambar 12.6 Model parameter gabungan dari paket baterai yang terhubung paralel.

Pada gambar di atas, berbagai kurva sesuai dengan berbagai sel dalam paket, meskipun Gambar 12.6 hanya menunjukkan dua sel untuk tujuan ilustrasi. Gambar 12.10 menunjukkan diagram implementasi MATLAB-Simulink model baterai dengan dua sel, memanfaatkan parameter yang diestimasi dengan menggunakan persamaan matematis dan data eksperimen.

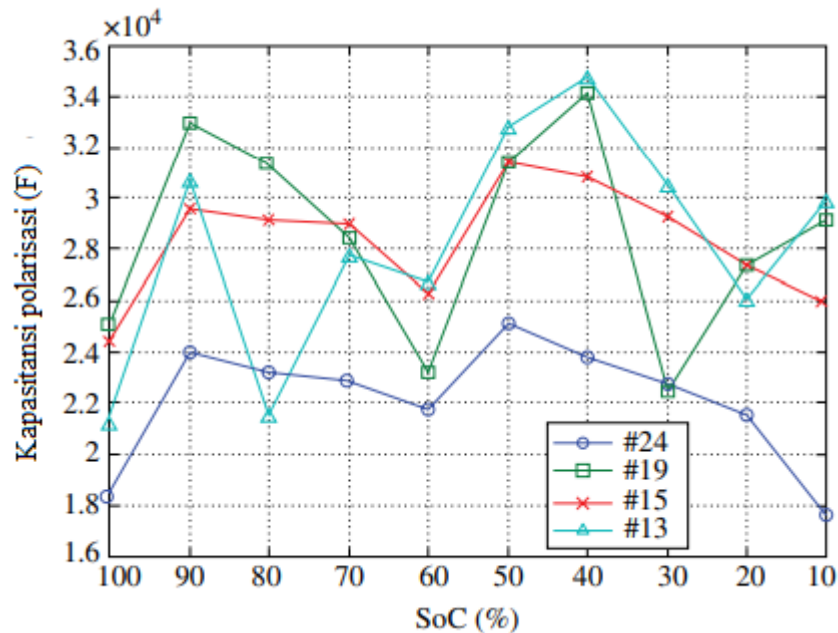


Gambar 12.7 Hasil Identifikasi Resistansi Ohmik R_t .

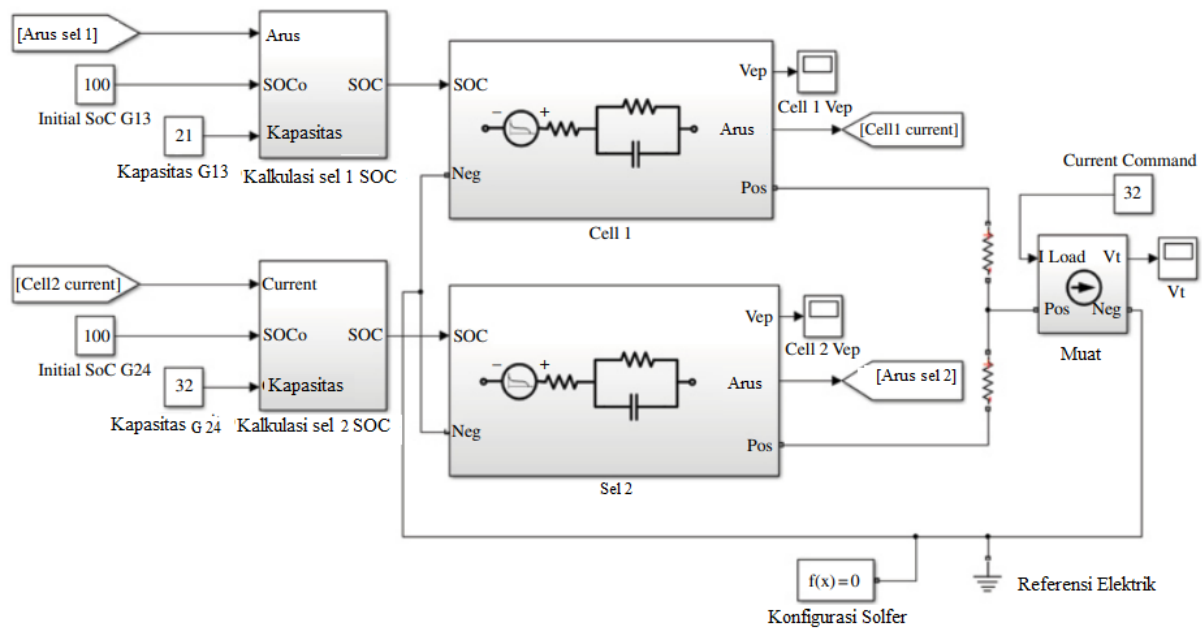


Gambar 12.8 Hasil identifikasi resistansi ohmik Rp

Temuan dari hasil eksperimen yang mengarah ke estimasi parameter (Gambar 12.7-12.9) menunjukkan bahwa inkonsistensi sel memiliki pengaruh kuat pada resistansi ohmik dan kapasitansi polarisasi, dan juga dipengaruhi oleh suhu, SOC dan SOH baterai. Akibatnya, item ini mempengaruhi parameter model dan karenanya hasil dari model itu sendiri ketika digunakan dalam lingkungan model sistem secara keseluruhan.



Gambar 12.9 Hasil identifikasi Cp resistansi ohmik

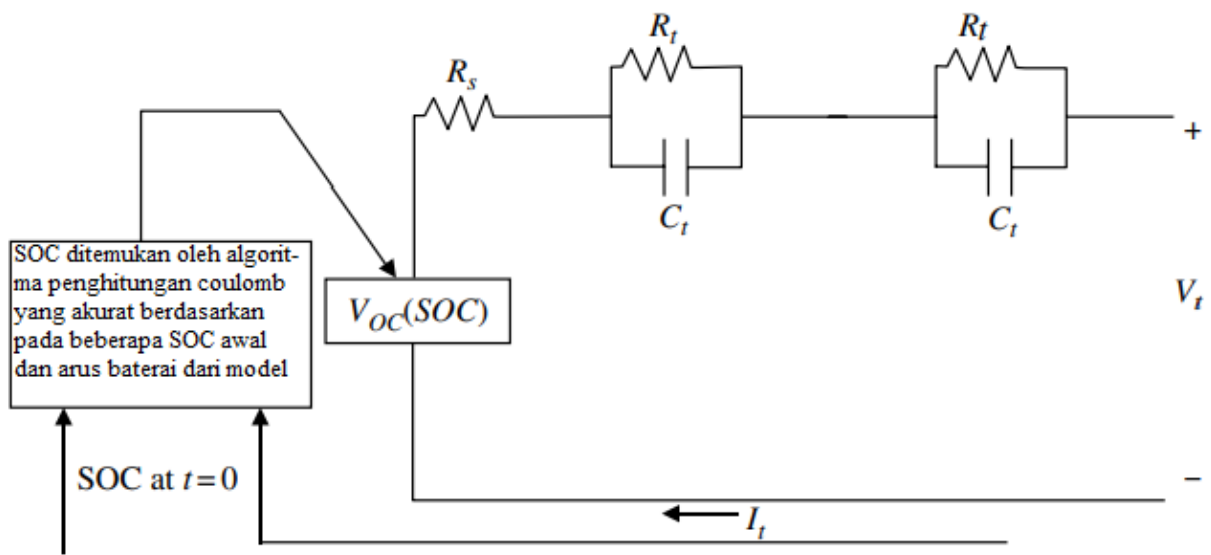


Gambar 12.10 MATLAB Simulink implementasi model

12.6 RINGKASAN DAN PENGAMATAN PEMODELAN DAN SIMULASI BATERAI

Berdasarkan apa yang telah dibahas sejauh ini dalam bab ini, pengamatan berikut dapat dilakukan. Pertama, ada beberapa jenis model yang berlaku untuk baterai. Ini dapat secara luas diklasifikasikan sebagai: (a) Model elektrokimia, berdasarkan aljabar nonlinier kompleks dan persamaan diferensial. Ini sulit untuk diterapkan karena kompleksitas sistem kimia, jika diperlukan representasi yang akurat. (b) Jenis model kecerdasan komputasional atau buatan, mis. menggunakan jaringan saraf tiruan, yang umumnya didasarkan pada pembelajaran melalui domain operasi yang luas, meskipun sistem pembelajaran untuk proses sementara juga ada. Ini dapat digunakan untuk menemukan SOC. (c) Model analitik, yang merupakan model sistem elektrokimia yang disederhanakan, mis. menggunakan persamaan Peukert, model baterai kinetik (KiBaM), atau model difusi. Ini dapat digunakan untuk melacak SOC. (d) Model rangkaian listrik berdasarkan impedansi. Beberapa di antaranya dapat digunakan untuk melacak SOC. Jenis model ini cocok untuk integrasi dalam simulasi tingkat sistem secara keseluruhan. Selain di atas, ada model stokastik, yang menggambarkan baterai sebagai proses Markov dengan probabilitas yang dijelaskan dalam parameter yang bergantung pada karakteristik fisik dari proses sel kimia. Telah ditunjukkan dalam referensi [4] bahwa model semacam itu memberikan deskripsi kualitatif yang baik tentang perilaku baterai lithium-ion di bawah pelepasan pulsa. Model tidak menangani profil beban dengan arus pelepasan yang bervariasi dan berbagai nonlinier baterai.

Jenis model yang akan digunakan dalam situasi tertentu akan tergantung pada aplikasi dan sumber daya komputasi yang tersedia. Misalnya beberapa model sangat cocok untuk menyediakan SOC yang lebih baik. Beberapa model lebih baik dalam hal penanganan efek sementara jangka pendek, sementara yang lain mungkin lebih cocok untuk efek jangka panjang seperti penuaan. Secara umum, model rangkaian listrik lebih cocok untuk situasi di mana simulasi pada tingkat sistem yang lebih besar harus diintegrasikan dengan model baterai. Terkadang mungkin lebih baik menggunakan model hybrid. Ini menyiratkan bahwa item tertentu dalam baterai dapat dihitung dengan menggunakan satu jenis model, dan kemudian item tertentu lainnya dapat dimodelkan dengan metode lain. Contoh situasi seperti itu ditunjukkan oleh Gambar 12.10.



Gambar 12.11 Model baterai hybrid.

Pada Gambar 12.11, SOC dapat dimodelkan dengan metode penghitungan coulomb yang akurat yang diselingi dengan perhitungan berbasis emf baterai yang ditunjukkan pada Bab 11. SOC ini kemudian dapat digunakan sebagai input untuk emf model rangkaian listrik. Model hibrida semacam itu dapat menghasilkan akurasi yang lebih baik dari hasil model keseluruhan, Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa tidak ada model tunggal yang terbaik untuk setiap aplikasi dan penilaian harus didasarkan pada kebutuhan, sumber daya komputasi yang tersedia, dan akurasi yang dituntut.

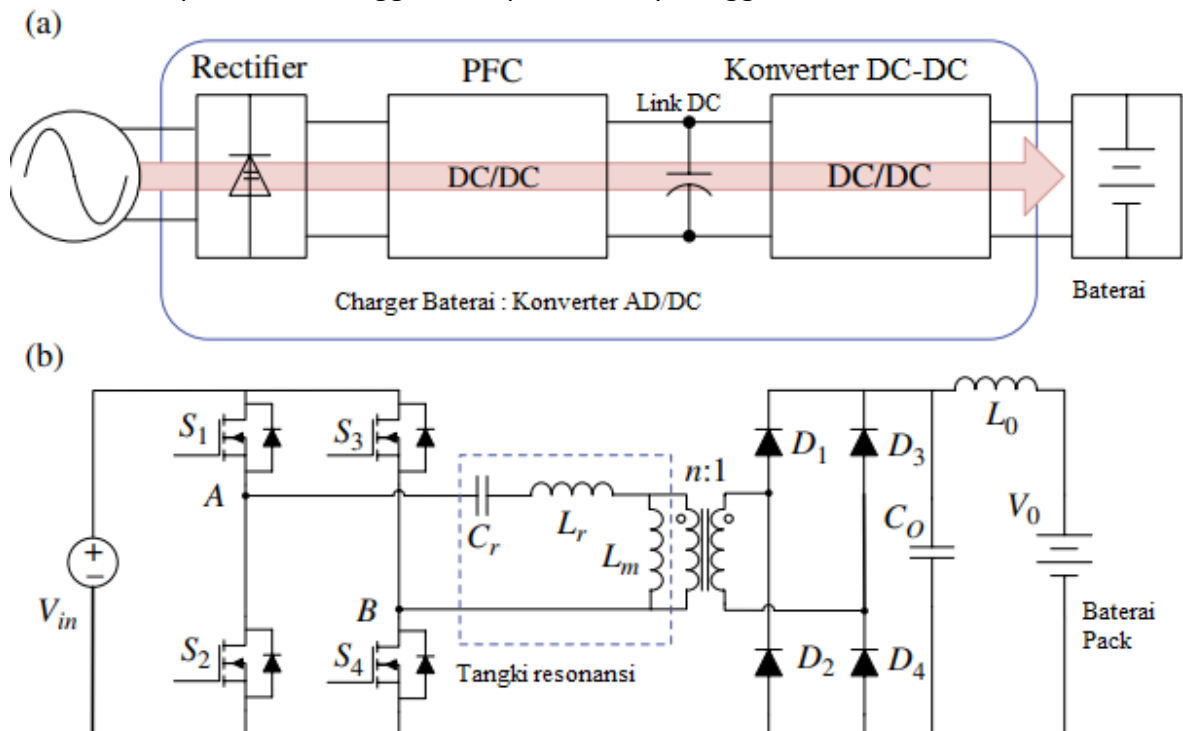
BAB 13

DESAIN PENGISI DAYA BATERAI EV DAN PHEV

Dalam bab ini, pertimbangan desain berorientasi efisiensi dibahas secara rinci pada analisis mode operasi dari konverter LLC termasuk karakteristik profil pengisian. Batas mode dan distribusi diperoleh dari model domain waktu yang tepat. Mode operasi yang menampilkan kemampuan soft-switching kedua sisi diidentifikasi untuk merancang jejak operasi proses pengisian. Kemudian batasan desain untuk mencapai soft-switching dengan beban bervariasi dari nol hingga maksimum dibahas. Akhirnya, metodologi desain lintasan pengisian diusulkan dan divalidasi melalui eksperimen pada prototipe yang mengubah 390 V dari sumber daya DC ke emulator baterai dalam kisaran 250–450 V pada 6,6 kW dengan efisiensi puncak 97,96%.

13.1 PENGANTAR

Dalam PHEV dan EV saat ini, pengisi daya terpasang dipasang untuk mengisi daya baterai lithium-ion berdaya tinggi melalui daya utilitas. Menurut survei menyeluruh, arsitektur pengisi daya EV/PHEV yang paling umum terdiri dari konverter AC-DC tipe boost untuk koreksi faktor daya aktif (PFC) dan konverter DC-DC terisolasi sebagai tahap kedua, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13.1 (a). Karakteristik pengisi daya jenis ini terutama tergantung pada tahap DC-DC, karena tegangan dan arus output diatur dalam tahap ini. Oleh karena itu, konverter DC-DC terisolasi yang efisien dan kompak adalah salah satu komponen terpenting untuk pengisi daya baterai EV dan PHEV. Konverter resonansi LLC dengan kemampuan soft-switching untuk rentang operasi yang luas dianggap sebagai topologi yang menguntungkan untuk mencapai efisiensi tinggi dan kepadatan daya tinggi.



Gambar 13.1 Konverter resonansi full-bridge LLC. (a) Sistem Pengisi Daya EV/PHEV tipikal. (b) Tahap konverter DC-DC LLC untuk Pengisi Daya EV/PHE.

Skema tipikal dari konverter DC-DC resonansi LLC jembatan penuh yang digunakan dalam aplikasi pengisi daya EV/PHEV ditunjukkan pada Gambar 13.1(b). Tangki resonansi

terdiri dari tiga komponen reaktif: L_r dan C_r secara seri, dan L_m secara paralel dengan primer transformator ideal $n:1$. C_r menunjukkan kapasitor resonansi, L_m adalah induktansi magnetisasi, dan L_r adalah induktansi kebocoran yang tercermin pada sisi primer. Konverter LLC memodifikasi karakteristik penguatan dari konverter resonansi seri (SRC) dengan memanfaatkan induktansi magnetisasi transformator untuk membentuk beberapa tahap resonansi. Ini sangat meningkatkan efisiensi beban ringan dan memungkinkan operasi mode boost. Namun, beberapa tahap resonansi dan berbagai mode operasi membuatnya sulit untuk dirancang.

Banyak metodologi desain telah diusulkan untuk konverter ini dalam beberapa dekade terakhir. Analisis yang tepat dari konverter resonansi LLC memastikan akurasi, tetapi tidak dapat dengan mudah digunakan untuk mendapatkan prosedur desain yang praktis karena kompleksitas model. Analisis aproksimasi harmonik pertama (FHA) memberikan hasil yang cukup akurat untuk titik operasi pada dan di atas frekuensi resonansi tangki resonansi, dan telah banyak digunakan dalam aplikasi tegangan output konstan di mana konverter LLC dirancang untuk bekerja pada resonansi pada kondisi nominal. Merancang konverter resonansi rentang output LLC yang lebar berdasarkan metode FHA diselidiki dalam.

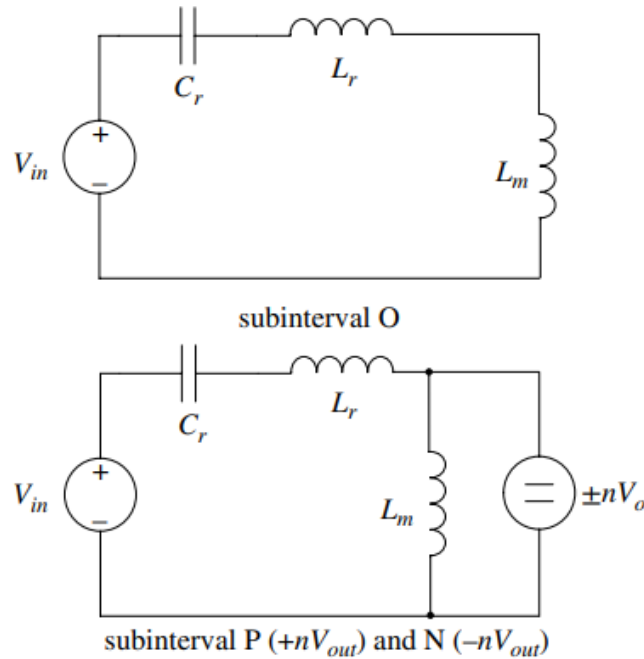
Rentang yang diperluas terutama dirancang pada frekuensi di atas frekuensi resonansi. Operasi *zero current switching* (ZCS) penyearah sekunder hanya muncul dalam kondisi beban ringan di wilayah ini, yang menyebabkan kerugian balik dioda tambahan dibandingkan dengan di wilayah di bawah resonansi. Keakuratan FHA hampir tidak memuaskan untuk desain optimal di wilayah di bawah resonansi. Metode desain yang optimal dikembangkan berdasarkan analisis mode operasi di dan pendekatan ini dapat memberikan hasil desain yang cukup baik, tetapi memerlukan penggunaan alat perhitungan yang canggih. Model berorientasi desain yang sederhana namun akurat dan prosedur desain langkah demi langkah yang memastikan sebagian besar manfaat dari konverter LLC disajikan dalam. Sebagai perpanjangan dari, metodologi desain lain untuk mengoptimalkan efisiensi dengan meminimalkan energi reaktif disajikan dalam, tetapi melibatkan penyelesaian persamaan nonlinier. Baru-baru ini, aliran desain yang berorientasi efisiensi dan langsung tanpa loop rekursif, berdasarkan metode analisis mode operasi yang disajikan dalam.

Dalam literatur yang disebutkan, beban biasanya diasumsikan sebagai resistor konstan murni dan output biasanya tetap. Rentang penguatan tegangan yang lebar biasanya diperlukan untuk menahan variasi input atau untuk memenuhi waktu penahanan. Namun, persyaratan desain konverter LLC untuk pengisi daya baterai lithium-ion tegangan tinggi dapat dibedakan dari aplikasi yang disebutkan di atas. Pertama-tama, karakteristik beban $i-v$ nonlinier yang terkait dengan profil pengisian ada dalam desain konverter resonansi untuk aplikasi pengisi daya baterai. Kedua, tidak hanya riak tegangan yang berasal dari tahap front-end perlu dilawan, tetapi tegangan output juga bervariasi secara signifikan di seluruh proses pengisian. Selain itu, konverter LLC harus mampu menangani rentang tegangan output teregulasi yang lebar, bahkan ketika arus beban bervariasi. Ketiga, proses pengisian baterai lithium-ion biasanya terdiri dari beberapa tahap, dan tegangan output dan daya beban berubah secara signifikan selama seluruh proses pengisian. Ini mungkin melalui kombinasi yang berbeda dari kondisi tanpa beban, beban penuh, dan beban ringan sesuai dengan kontrol sistem manajemen baterai. Oleh karena itu, efisiensi tinggi harus dipertahankan dalam kondisi beban yang berbeda. Akibatnya, tidak tepat untuk memilih hanya satu kondisi beban dari seluruh proses pengisian menjadi kondisi nominal yang akan ditargetkan, yang biasanya dilakukan dalam aplikasi beban resistif. Seluruh lintasan operasi harus diperhitungkan untuk desain yang optimal.

13.2 FITUR UTAMA PENGISI DAYA RESONANSI LLC

Analisis dalam Domain Waktu

Karena aksi pensaklaran ada di kedua sakelar input dan jembatan penyearah keluaran, konverter resonansi LLC mewakili sistem nonlinier dan varian waktu, yang membuat analisis menjadi rumit. Namun, dengan membagi operasi rangkaian menjadi subinterval yang berbeda, konverter dapat digambarkan antar transisi. Di bawah kondisi simetris dari konverter resonansi, keadaan tunak dapat dicirikan oleh setengah periode operasi. Selama setengah siklus pensaklaran positif di mana S1, S2 ON, konverter dapat digambarkan dengan tiga rangkaian ekuivalen ditunjukkan pada Gambar 13.2.



Gambar 13.2 Interval konverter LLC

Huruf kapital O, P, N digunakan untuk menunjukkan tiga subinterval yang berbeda, yang dicirikan oleh polaritas tegangan (mati, positif, dan negatif) melintasi induktor magnetisasi L_m . Parameter n adalah rasio lilitan transformator. Subinterval O terjadi ketika output diblokir oleh penyearah dioda, yang memaksa induktor magnetisasi L_m untuk berpartisipasi dalam resonansi tangki seri. Mengikuti prinsip dasar teori rangkaian bersama dengan normalisasi pada Tabel 13.1, persamaan ternormalisasi yang menggambarkan keadaan resonansi adalah:

Persamaan 13.1

$$m_{cr,o}(\theta) = [m_{cr,o}(0)] \cos(k\theta) + \frac{1}{k} j_{Lr,o}(0) \sin(k\theta) + 1$$

Persamaan 13.2

$$j_{Lr,o}(\theta) = k[1 - m_{cr,o}(0)] \sin(k\theta) + j_{Lr,o}(0) \cos(k\theta)$$

Persamaan 13.3

$$j_{Lm,o}(\theta) = j_{Lr,o}(\theta)$$

Persamaan 13.4

$$m_{Lm,o}(\theta) = \frac{1}{1+l} [1 - m_{Cr,o}(\theta)]$$

dengan nilai awal yang tidak diketahui $m_{Cr,o}(0)$ dan $j_{Lr,o}(0)$. Perhatikan bahwa dalam aplikasi pengisi daya, riak tegangan input dapat diabaikan dibandingkan dengan rentang tegangan output yang lebar. Jadi tegangan input harus dipilih sebagai tegangan dasar dalam normalisasi daripada output yang banyak berubah, yang berbeda dalam aplikasi beban resistif.

Tabel 13.1 Singkatan dan normalisasi.

Variabel sirkuit	Simbol	Variabel yang dinormalisasi
Frekuensi resonansi	$\omega_0 = 1/\sqrt{L_r C_r} = 2\pi f_0$	–
Impedansi karakteristik	$Z_0 = \sqrt{L_r/C_r}$	–
Rasio induktansi	$l = L_r/L_m$	–
Penguatan tegangan	$M = nV_o/V_{in}$	–
Waktu	t	$\theta = \omega_0 t$
Frekuensi resonansi kedua	$\omega_1 = 1/\sqrt{(L_r + L_m)C_r}$	$k = \omega_1/\omega_0$
Beralih frekuensi	$f_s = 1/T_s$	$f_n = f_s/f_0$
Setengah periode	$1/2f_s$	$\gamma = \omega_0/2f_s = \pi/F_n$
Tegangan kapasitor resonansi	$v_{Cr}(t)$	$m_{Cr}(\theta) = v_{Cr}(t)/V_{in}$
Arus induktor resonansi seri	$i_{Lr}(t)$	$j_{Lr}(\theta) = i_{Lr}(t)Z_0/V_{in}$
Arus induktor magnetisasi	$i_{Lm}(t)$	$j_{Lm}(\theta) = i_{Lm}(t)Z_0/V_{in}$
Tegangan induktor magnetisasi	$v_{Lm}(t)$	$m_{Lm}(\theta) = v_{Lm}(t)/V_{in}$
Tegangan output yang dipantulkan	nV_o	M

Untuk subinterval P dan N, jembatan penyearah akan konduksi. Tegangan melintasi induktor magnetisasi masing-masing dijepit positif dan dijepit negatif, $m_{Lm}(\theta) = \pm M$. Oleh karena itu, bentuk gelombang yang dinormalisasi untuk subinterval ini dapat diidentifikasi sebagai:

Persamaan 13.5

$$m_{Cr,\frac{P}{N}}(\theta) = (1 \pm M)(1 - \cos \theta) + m_{Cr,\frac{P}{N}}(0) \cos \theta + j_{Lr,\frac{P}{N}}(0) \sin \theta$$

Persamaan 13.6

$$j_{Lr,\frac{P}{N}}(\theta) = \left[1 \pm M - m_{Cr,\frac{P}{N}}(0) \right] \sin \theta + j_{Lr,\frac{P}{N}}(0) \cos \theta$$

Persamaan 13.7

$$j_{Lm,\frac{P}{N}}(\theta) = j_{Lm,\frac{P}{N}}(0) \pm Ml\theta$$

Persamaan 13.8

$$m_{Lm,\frac{P}{N}}(\theta) = \pm M$$

dimana $m_{Cr,P}(0)$, $j_{Lr,P}(0)$, dan $j_{Lm,P}(0)$ digunakan untuk menyatakan kondisi awal subinterval P yang tidak diketahui, sedangkan $m_{Cr,N}(0)$, $j_{Lr,N}(0)$, dan $j_{Lm,N}(0)$ adalah untuk subinterval N.

13.3 MODE OPERASI DAN ANALISIS DISTRIBUSI

Menurut analisis dan simulasi, total sembilan mode operasi dapat ditemukan dengan menggabungkan interval dalam urutan yang berbeda. Mode operasi dapat diberi nama dengan urutan penampilan di mana subinterval terjadi dalam setengah periode. Misalnya, mode PO berarti bahwa subinterval P adalah $\theta \in [0, \alpha]$, dan diikuti oleh subinterval O untuk sisa setengah siklus: $\theta \in [\alpha, \gamma]$. Semua mode operasi dan karakteristiknya dirangkum dalam Tabel 13.2. Dapat dilihat bahwa interval daya utama P terjadi pada setiap setengah periode kecuali untuk mode O pada kondisi beban nol. Jadi mode O dianggap sebagai mode cutoff karena tidak ada daya yang dikirimkan ke output. Ada enam mode operasi utama (PN, PON, PO, OPO, NP, dan NOP) yang dapat diamati di atas frekuensi resonansi kedua ketika frekuensi operasi dan kondisi beban bervariasi. Sementara itu, ada dua mode khusus lainnya yang hanya terjadi pada kondisi tertentu, yaitu mode P pada frekuensi resonansi dan mode OP pada batas antara mode NOP dan OPO.

Tabel 13.2 Mode operasi konverter resonansi LLC.

θ	$F_n < 1$					$F_n = 1$		$F_n > 1$				
	Mode PN	Mode PON	Mode PO	Mode OPO	Mode O	Mode P	Mode O	Mode NP	Mode NOP	Mode OP	Mode OPO	Mode O
$[0, \alpha]$	P	P	P	O	O	P	O	N	N	O	O	O
$[\alpha, \beta]$	N	O	O	P	$(\alpha=\beta)$	$(\alpha=\beta)$	$(\alpha=\beta)$	P	O	P	P	$(\alpha=\beta)$
$[\beta, \gamma]$	$(\beta=\gamma)$	N	$(\beta=\gamma)$	O	$(\beta=\gamma)$	$(\beta=\gamma)$	$(\beta=\gamma)$	$(\beta=\gamma)$	P	$(\beta=\gamma)$	O	$(\beta=\gamma)$
Sakelar utama	ZVS/ ZCS	ZVS/ ZCS	ZVS	ZVS	ZVS	ZVS	ZVS	ZVS	ZVS	ZVS	ZVS	ZVS
Sekunder penyearah	Hard switching	ZCS	ZCS	ZCS	OFF	ZCS	OFF	Hard switching	Hard switching	ZCS	ZCS	OFF
Konduksi kontinuitas	CCM	DCM	DCM	DCM	OFF	CCM	OFF	CCM	DCM	DCM	DCM	OFF
Penguatan tegangan	Mode buck dan boost		Boost ($M > 1$) mode		Cutoff mode	Unity ($M = 1$) mode	Boost mode		Buck ($M < 1$) mode			Cutoff mode
Kondisi beban Tidak diketahui pada F_n , l dan P_n yang diberikan		Heavy \rightarrow Light				Independen	Light		Heavy \rightarrow Light			
						$[j_{Lr}(0), m_{Cr}(0), \alpha, \beta, M]$						

Tabel 13.3 Kondisi kendala umum mode operasi.

Kendala	Ekspresi
Kondisi kontinuitas	$m_{Cr,X}(\theta_{X,end}) = m_{Cr,Y}(0)$ $j_{Lr,X}(\theta_{X,end}) = j_{Lr,Y}(0)$ $j_{Lm,X}(\theta_{X,end}) = j_{Lm,Y}(0)$
Kondisi simetri	$m_{Cr,B}(0) + m_{Cr,E}(\gamma) = 0$ $j_{Lr,B}(0) + j_{Lr,E}(\gamma) = 0$ $j_{Lm,B}(0) + j_{Lm,E}(\gamma) = 0$
Kondisi arus induktor	$j_{Lr,P/N}(\theta_{P/N,end}) - j_{Lm,P/N}(\theta_{P/N,end}) = 0$

Setiap mode operasi dibatasi oleh beberapa kondisi. Pertama, karena tegangan kapasitor dan arus induktor harus kontinu, nilainya harus sama pada sambungan subinterval yang berdekatan. Jadi intuitif bahwa kondisi kendala kontinuitas harus dipenuhi. Kedua, secara simetri, nilai akhir tegangan kapasitor dan arus induktor pada subinterval terakhir harus berlawanan dengan nilai awalnya selama subinterval pertama dalam keadaan tunak. Ketiga, arus magnetisasi dan arus tangki resonansi sama pada akhir subinterval P atau N saat memasuki subinterval berikutnya. Selain itu, tegangan melintasi induktor magnetisasi setidaknya harus beresonansi dengan tegangan output pada akhir subinterval O jika diikuti oleh subinterval P atau N. Jika X, Y menunjukkan dua subinterval berbeda yang berdekatan, dan B, E menunjukkan subinterval awal dan subinterval akhir masing-masing dalam setengah siklus, kondisi kendala tersebut dapat didaftar seperti pada Tabel 13.3. Karena beban terputus dari tangki resonansi di subinterval O, energi dapat diberikan hanya di subinterval P dan N. Oleh karena itu, daya output yang dinormalisasi diturunkan sebagai:

Persamaan 13.9

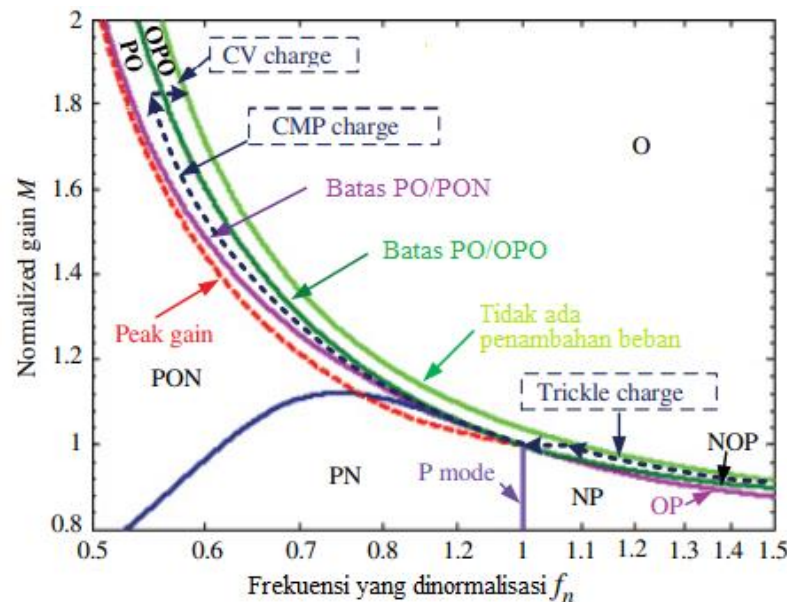
$$P_n = \frac{\overline{nV_o I_o}}{\frac{(V_m)^2}{Z_o}} = \overline{M_{Jo}} = \frac{M}{\gamma} \int_{\theta_{P,0}}^{\theta_{P,end}} [j_{Lr,P}(\theta) - j_{Lm,P}(\theta)] d\theta + \frac{M}{\gamma} \int_{\theta_{N,0}}^{\theta_{N,end}} [j_{Lm,N}(\theta) - j_{Lr,N}(\theta)] d\theta$$

Umumnya, kondisi kontinuitas digunakan dengan Persamaan (13,1-13,8) untuk mendapatkan nilai antara $x(\alpha)$ dan $x(\beta)$ dari subinterval sebelumnya. Sudut fase yang dinormalisasi α dan β digunakan untuk menunjukkan momen switching dari subinterval yang berdekatan. Kemudian mereka disubstitusikan ke dalam subinterval berikut sebagai nilai awalnya. Terakhir, nilai akhir $x(\gamma)$ pada setengah periode dari mode operasi dapat dinyatakan dengan nilai awal yang sesuai $x(0)$ dari mode ini. Dengan menerapkan kondisi arus simetri dan induktor pada AC yang diberikan P_n yang didefinisikan sebagai (13.9), mengetahui f_n dan I , sejumlah persamaan yang cukup dapat ditemukan untuk menyelesaikan variabel yang tidak diketahui seperti yang tercantum pada Tabel 13.1. Namun, solusi analitik hanya dapat ditemukan di bawah mode cutoff dan mode konduksi kontinu/*Continuous conduction modes* (CCM), yang meliputi O, P, PN, dan NP.

Tabel 13.4 Kondisi batas mode operasi.

Batasan	Selesaikan sebagai	Kendala ekstra
PN/PON	PN	$m_{Lm,N}(\alpha) = -M$
PON/PO	PO	$m_{Lm,O}(\gamma) = -M$
PO/OPO	PO	$m_{Lm,O}(0) = M$
OPO/NOP	OP	$m_{Lm,O}(\alpha) = M$
NOP/NP	NP	$m_{Lm,N}(\alpha) = M$
O	O	$m_{Lm,O}(\gamma/2) = M$
P	P	$M = 1$
Peak gain of PON	PON	$j_{Lr,P}(0) = j_{Lr,N}(\gamma) = 0$
Peak gain of PN	PN	$j_{Lr,P}(0) = j_{Lr,N}(\gamma) = 0$

Mode konduksi diskontinu/*Discontinuous conduction modes* (DCM), yang telah diringkas dalam Tabel 13.1, melibatkan penyelesaian persamaan nonlinier. Oleh karena itu, diperlukan alat komputasi berbasis numerik. Untuk menghindari kerumitan penyelesaian semua kurva karakteristik penguatan tegangan, batasan mode operasi yang berbeda dapat dilakukan terlebih dahulu untuk memberikan wawasan penting tentang karakteristik penguatan dengan parameter dan variasi beban. Kurva batas sebenarnya adalah tepi mode, yang dapat dilihat sebagai kasus kritis dari salah satu dari enam mode utama atau mode batas tertentu. Karena kondisi batas dapat diterapkan sebagai kendala tambahan, persamaan modulus dapat diselesaikan tanpa mengetahui P_n . Misalnya, batas mode PO dan PON adalah solusi mode PO yang memenuhi syarat bahwa nilai m_{Lm} pada akhir subinterval O adalah $-M$. Subinterval N tidak dapat dihindari sebelum setengah siklus berakhir jika batas bawah ini terlampaui. Semua kondisi batas telah diringkas dalam Tabel 13.4. Distribusi mode operasi diplot dengan menyelesaikan persamaan mode batas ini menggunakan fungsi MATLAB `fsolve(x)`.



Gambar 13.3 Batas mode frekuensi gain konverter resonansi LLC dengan $l = 0,2$

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13.3, distribusi mode operasi dalam rentang frekuensi dan penguatan sakelar terutama ditentukan oleh parameter l . Efek menyusut – yang berarti semua kurva batas terdistribusi dalam rentang frekuensi yang lebih kecil dengan nilai gain yang lebih tinggi – dapat diamati dengan meningkatkan nilai l . Khususnya, semua batas mode aktif menyatu ke penguatan kesatuan pada $f_n = 1$, yang menegaskan karakteristik beban independen pada resonansi. Selain itu, gain puncak terjadi dalam mode PN dan PON, dan kurva menyatu ke puncak tepi PN pada frekuensi yang sesuai. Berdasarkan analisis di atas, konverter resonansi LLC dapat dijelaskan dan diselesaikan dengan tepat, selama kondisi operasi diketahui. Karakteristik dan distribusi mode operasi memberikan pedoman desain penting untuk aplikasi yang berbeda.

13.4 PERTIMBANGAN DESAIN UNTUK KONVERTER LLC UNTUK PENGISI DAYA BATERAI PHEV

Tingkat pengisian pengisi daya baterai harus dikontrol sesuai dengan profil pengisian dan kondisi baterai. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13.4, biasanya ada tiga tahap dalam profil pengisian khas dari paket baterai tegangan tinggi. Tahap pengisian tetesan dengan arus konstan 10% nilai pengenal (I_0) dilakukan pertama kali ketika baterai sangat habis. Muatan massal mengikuti setelah tegangan naik di atas ambang batas muatan tetesan (U_0).

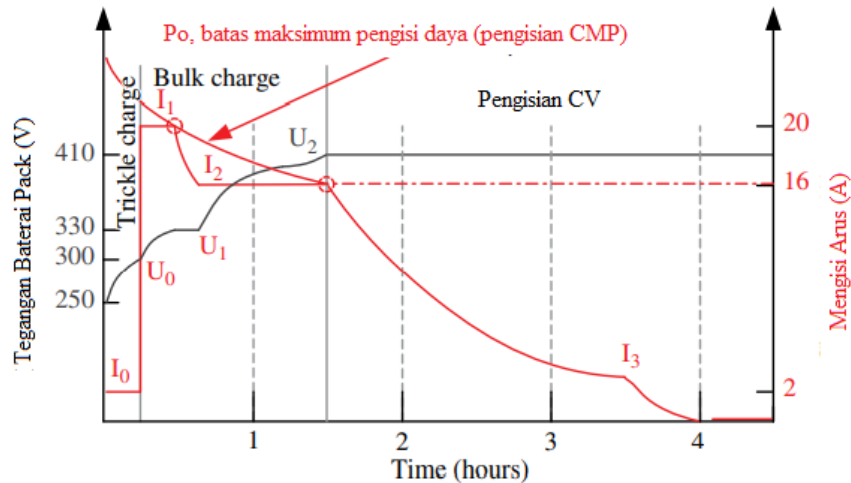
Tahap pengisian arus konstan yang berbeda (dalam kisaran 20% hingga 100% arus pengenal) mungkin ada dalam tahap pengisian massal, dibatasi oleh daya pengisi daya. Selanjutnya, tahap tegangan konstan diterapkan ketika tegangan baterai mencapai nilai tertentu. Namun, tindakan pengisian daya dapat dimodifikasi sebagai respons terhadap variasi kondisi baterai setiap saat. Juga, berbagai jenis profil pengisian diminta untuk kemasan baterai yang berbeda, tetapi semua profil harus dibatasi pada daya output maksimum konverter. Jadi mempertahankan output daya maksimum selama seluruh proses pengisian (pada tegangan input minimal), yang disebut sebagai profil pengisian daya maksimum konstan/*Constant Maximum Power* (CMP) dalam bab ini, masuk akal untuk dilihat sebagai profil pengisian keseluruhan, meskipun tidak praktis, karena pertimbangan keamanan dan siklus hidup yang panjang.

Dalam hal ini, konverter LLC sebenarnya dimulai dengan operasi beban ringan pada gain terendah. Kemudian melewati operasi beban penuh dalam rentang gain yang luas. Transisi dari operasi beban penuh kembali ke beban ringan terjadi secara bertahap pada gain tertinggi. Selain itu, operasi tanpa beban dapat terjadi pada setiap tahap, tergantung pada status baterai.

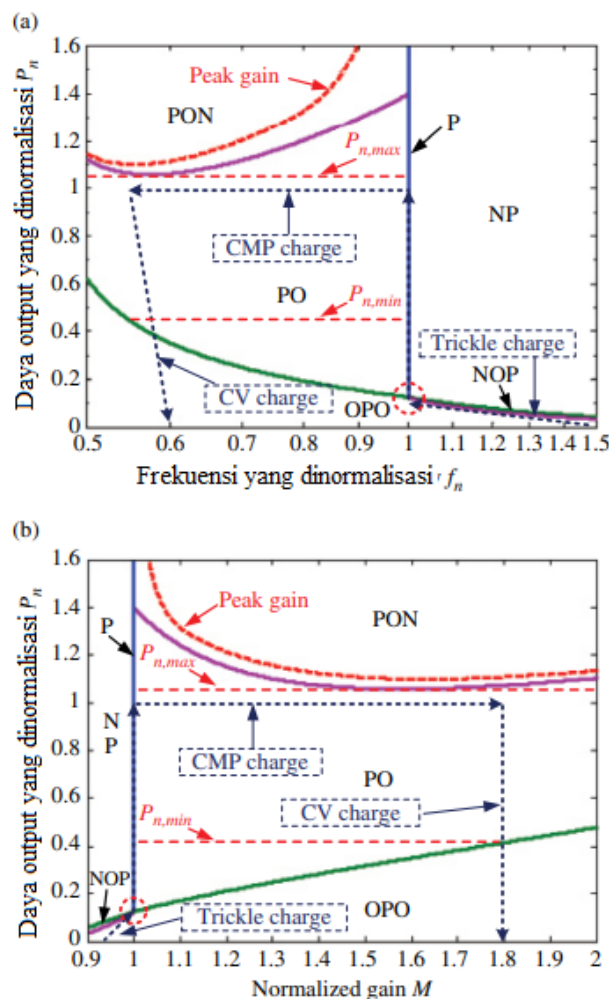
Soft-switching adalah keuntungan yang paling diinginkan dari konverter resonansi karena mengurangi kerugian switching dan EMI. Topologi LLC mampu mewujudkan switching tegangan nol/*Zero voltage switching* (ZVS) untuk chopper pembalik input dan switching arus nol/*Zero Current Switching* (ZCS) untuk penyearah output pada saat yang sama, yang meminimalkan kerugian switching dari MOSFET dan dioda. Oleh karena itu, dari sudut pandang desainer, target desain adalah untuk mencapai soft-switching dalam semua kondisi operasi, serta kemampuan operasi tanpa beban. Tabel 13.2 meringkas beberapa mode operasi yang menampilkan kemampuan ZVS primer dan ZCS sekunder: mode OPO, OP, P, dan PO. Secara khusus, mode PON juga memiliki kemampuan soft-switching kedua sisi ketika titik operasi terletak di zona yang dibentuk oleh kurva gain puncak dan batas PON/PO yang ditunjukkan pada Gambar 13.3. Di antara kandidat ini, mode OPO dapat dioperasikan sebagai mode buck dan mode boost dalam kondisi beban ringan, sehingga cocok untuk tahap pengisian daya tetesan dan tahap pengisian daya CV. Sedangkan untuk tahap pengisian CMP, dibutuhkan arus pengisian yang lebih besar saat tegangan baterai rendah. Oleh karena itu, beban ekuivalen relatif lebih berat pada awal pengisian CMP. Akibatnya, mode P, yang menampilkan karakteristik independen beban, cocok untuk titik awal tahap pengisian CMP. Sejauh ini, mode PO dan mode PON dibiarkan menjadi target untuk sisa bagian dari biaya CMP. Poin gain puncak dalam mode PON membentuk batas kritis untuk mewujudkan operasi ZVS primer. Jadi gain tegangan puncak dalam desain tertentu biasanya dipilih sebagai titik desain karena menunjukkan kemampuan pengaturan tegangan konverter pada frekuensi operasi terendah yang diizinkan. Namun, fitur yang paling penting dari mode gain puncak adalah arus switching sama dengan nol seperti yang dirangkum dalam Tabel 13.4. Dalam praktiknya, arus switching harus sedikit lebih besar dari nol untuk ZVS MOSFET yang andal. Oleh karena itu, titik gain puncak dalam mode PON tidak mungkin menjadi pilihan terbaik untuk beroperasi pada kondisi tegangan output puncak yang diperlukan, apalagi kompleksitas yang harus dipecahkan.

Sebagai perbandingan, seluruh mode PO berada dalam wilayah soft-switching kedua sisi. Gain dalam mode PO meningkat secara monoton dengan penurunan frekuensi operasi, yang memastikan stabilitas kontrol dalam desain pengontrol. Selain itu, ketika rasio induktansi lebih besar, energi yang tersimpan dalam induktor mag netizing lebih rendah karena berkurangnya arus tangki sirkulasi. Bagian energi ini akan dilepaskan lebih cepat selama subinterval N dari mode PON, yang menyebabkan batas PO/PON semakin dekat dengan kurva gain puncak dan akhirnya berpotongan pada frekuensi rendah tertentu. Oleh karena itu, mode

PO adalah mode operasi boost yang paling disukai. Sementara itu, batas PO/PON dapat dianggap sebagai kurva batasan gain yang lebih praktis daripada kurva gain puncak yang sebenarnya untuk memastikan operasi soft-switching. Last but not least, mode O ada di seluruh frekuensi dan rentang penguatan pada kondisi tanpa beban seperti yang dirangkum dalam Tabel 13.2 dan ditunjukkan pada Gambar 13.3, yang memastikan bahwa pengisian daya dapat dimatikan pada tegangan baterai apa pun karena pengisian selesai atau a deteksi kesalahan



Gambar 13.4 Profil pengisian baterai lithium-ion 410 V.



Gambar 13.5 Batas dan distribusi mode LLC dengan $l = 0,2$: (a) Distribusi frekuensi daya dan batas penguatan puncak (garis putus-putus). (b) Distribusi penguatan-daya.

Berdasarkan analisis di atas, kemungkinan lintasan operasi yang menjanjikan soft-switching di semua tahap pengisian dapat diplot pada Gambar 13.3 (garis putus-putus dengan panah). Dapat dilihat bahwa lintasan dimulai dengan mode O pada frekuensi tertinggi menunggu perintah pengisian. Ini melewati mode OPO di atas resonansi selama tahap pengisian daya. Tahap pengisian CMP dimulai dari mode P untuk memanfaatkan properti beban independennya. Dengan merancang parameter dengan benar, seluruh tahap pengisian CMP dapat dibatasi dalam wilayah mode PO. Pada tahap pengisian CV, konverter mempertahankan penguatan tegangan tertinggi yang diperlukan sementara beban ekuivalen berkurang secara bertahap dan akhirnya berakhir dengan mode O.

Selain itu, untuk mengkonfirmasi lebih lanjut kemungkinan lintasan operasi yang diusulkan, batas dan distribusi daya beban yang dinormalisasi dari mode operasi diplot pada Gambar 13.5. Lintasan operasi yang lebih disukai yang sesuai pada Gambar 13.3 juga diplot dalam koordinat distribusi mode daya-frekuensi dan daya-gain masing-masing. Seperti dapat dilihat, seluruh muatan CMP dapat dibatasi di wilayah mode PO selama daya output pengenalan $P_{n, full}$ yang dinormalisasi, dirancang antara $P_{n,max}$ dan $P_{n,min}$ seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13.5, untuk penguatan yang diperlukan dalam rentang frekuensi yang diizinkan. Namun, untuk menemukan lintasan muatan tetesan dalam zona OPO, batas atas mungkin lebih rendah dari $P_{n,max}$. Misalnya, seperti yang disebutkan, arus muatan pengenalan 10% yang konstan biasanya dilakukan dalam tahap pengisian tetesan, yang berarti daya output yang dinormalisasi selama tahap ini adalah sekitar 1/10 dari daya output pengenalan. Oleh karena itu, daya yang dinormalisasi pada titik persimpangan mode P dan batas OPO, yang disorot oleh lingkaran putus-putus pada Gambar 13.5, dapat dianggap sebagai nilai maksimum $0,1P_{n, full}$. Batas atas yang sebenarnya ditunjukkan sebagai kemungkinan lintasan muatan CMP pada Gambar 13.5. Pada tahap pengisian CV, daya output menurun secara bertahap sementara penguatan tetap sama, sehingga lintasan muatan CV juga dapat digambarkan pada Gambar 13.5.

13.5 DESAIN LINTASAN PENGISIAN DAYA

Parameter Desain Utama

Untuk merancang konverter LLC yang beroperasi di sepanjang lintasan yang menawarkan seluruh rentang dengan kemampuan soft-switching selama proses pengisian, tiga elemen kunci harus dipertimbangkan secara menyeluruh: rasio induktansi l , rasio putaran transformator n , dan impedansi karakteristik Z_0 . Pertama-tama, operasi penguatan kesatuan dirancang di bawah kondisi beban terberat ketika muatan CMP diterapkan ke baterai pada tegangan terendah. Oleh karena itu, rasio lilitan transformator dapat dihitung dari:

Persamaan 13.10

$$n = \frac{V_{in,nom}}{V_{out,min}}$$

Setelah menentukan n , keuntungan minimum diberikan sebagai:

Persamaan 13.11

$$M_{min,0} = \frac{nV_{out,nom}}{V_{in,max}} = \frac{V_{in,nom}}{V_{in,max}}$$

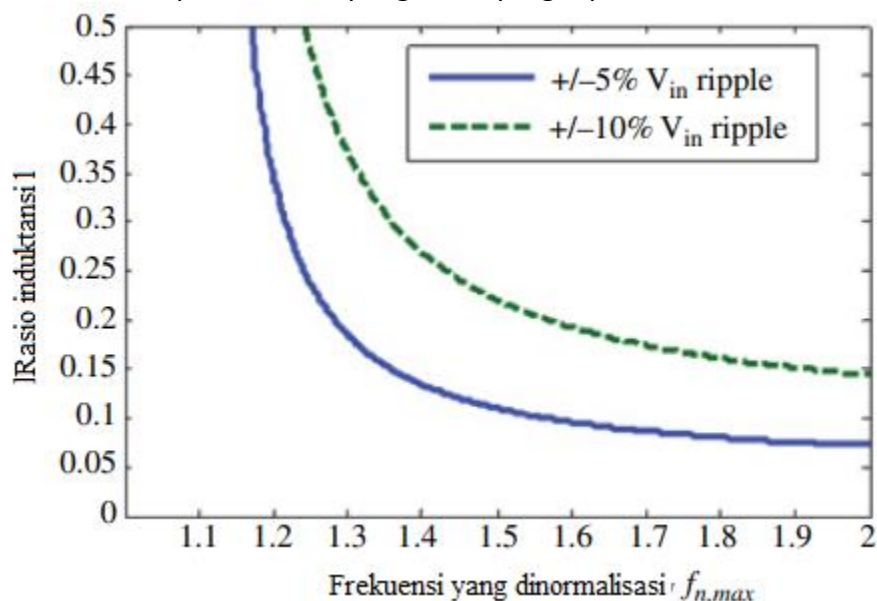
Secara umum, gain minimum terjadi ketika baterai berada pada tegangan terendah dan menunggu perintah pengisian dari sistem manajemen baterai. Frekuensi sakelar harus disesuaikan ke nilai maksimumnya untuk menurunkan output untuk operasi tanpa beban

ketika tegangan input maksimum diterapkan ke konverter. Dalam hal ini, konverter beroperasi dalam mode O dan hubungan antar variabel dapat diselesaikan secara analitik. Rasio induktansi adalah:

Persamaan 13.12

$$l = \left(\frac{1}{M_{min,0}} - 1 \right) - \frac{8f_{n,max}^2}{8f_{n,max}^2 - \pi^2}$$

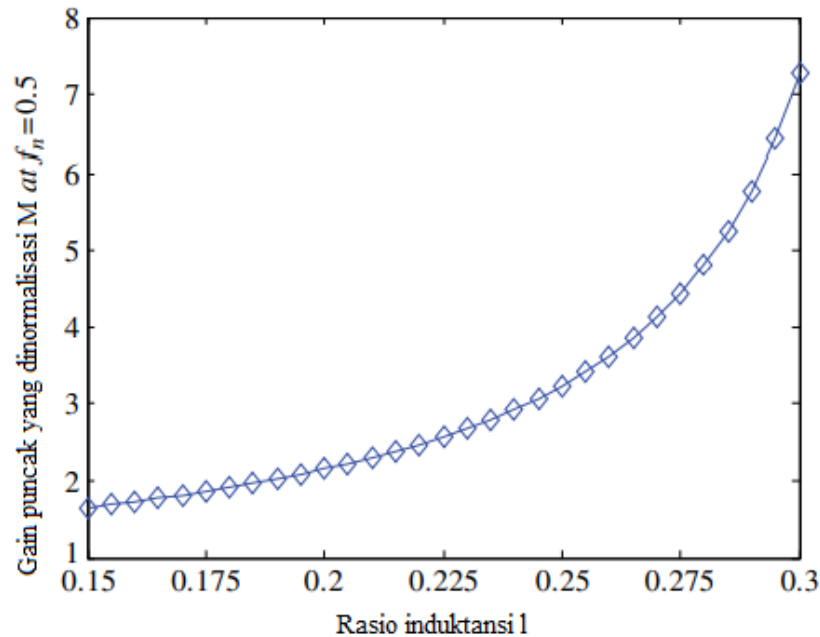
Distribusi mode ditentukan setelah rasio induktansi dipilih. Menurut (13.11), penguatan minimum yang diperlukan tergantung pada riak tegangan input, yang sebenarnya merupakan riak output tahap koreksi faktor daya/*power factor correction* (PFC) front-end dalam aplikasi pengisi daya. Akibatnya, frekuensi operasi maksimum $f_{n,max}$ menjadi parameter terpenting yang telah ditentukan sebelumnya oleh perancang. Biasanya, riak tegangan output dari PFC tipe boost adalah $\pm 5\%$ hingga $\pm 10\%$. Dalam hal ini, hubungan antara l dan $f_{n,max}$ dapat diplot seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13.6. Gambar 13.6 juga menunjukkan rentang frekuensi operasi yang diharapkan lebih kecil menimbulkan rasio induktansi yang lebih tinggi. Namun, telah ditemukan dalam bahwa arus tangki resonansi cenderung lebih rendah karena lmenurun pada daya beban ternormalisasi yang sama p_n , yang mengurangi rugi-rugi konduksi. Selanjutnya, efek ini terutama melemah ketika l lebih rendah dari 0,25. Di sisi lain, penguatan tegangan yang tersedia dalam rentang frekuensi spesifik yang sama menurun dengan l yang lebih kecil. Oleh karena itu, tujuan dari desain yang optimal adalah untuk mengurangi rugi-rugi konduksi sambil mempertahankan penguatan yang diperlukan dalam batas frekuensi.



Gambar 13.6 Hubungan antara rasio induktansi dan frekuensi maksimum yang dinormalisasi dalam kondisi tanpa beban.

Seperti yang telah disebutkan, batas PO/PON dapat dianggap sebagai batas desain konservatif untuk realisasi ZVS utama dari inverter berbasis MOSFET dalam beberapa keadaan, terutama ketika batas PO/PON dekat dengan batas gain puncak. Selain itu, nilai l yang lebih rendah dari 0,25 lebih disukai untuk mengurangi rugi-rugi konduksi, yang membuat kedua batas cukup dekat tanpa kehilangan daerah yang berguna menurut metode analisis mode operasi yang disebutkan di atas (seperti dapat dilihat pada Gambar 13.3). Jadi gain dari batas PO/PON pada frekuensi operasi terendah masuk akal untuk menjadi batasan gain. Keuntungan dibatasi oleh l ketika $f_{n,min} = 0,5$ dapat ditarik seperti pada Gambar 13.7. Menurut

analisis di atas, I dapat dipilih berdasarkan penguatan maksimum yang diperlukan dan riak tegangan input menggunakan Gambar 13.6 dan Gambar 13.7.



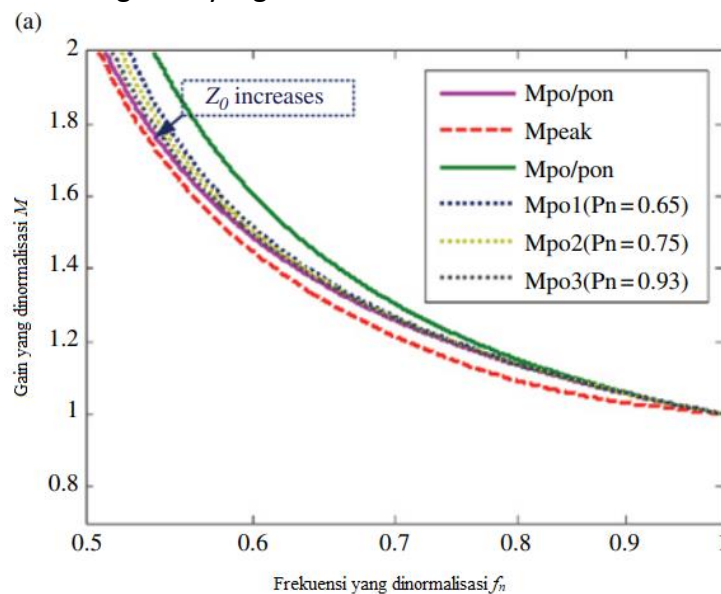
Gambar 13.7 Hubungan antara batasan gain puncak dan rasio induktansi pada $f_{n,min} = 0,5$.

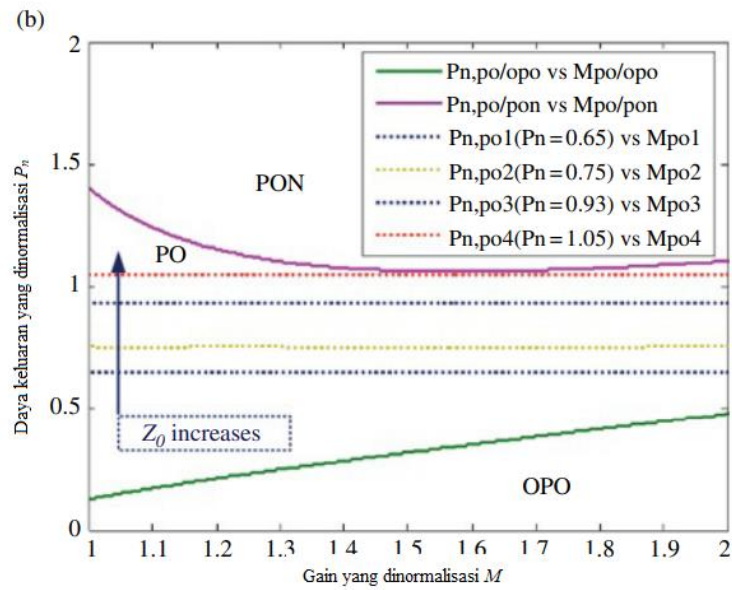
Langkah selanjutnya adalah memilih nilai yang cocok untuk impedansi karakteristik Z_0 setelah / ditentukan. Menurut definisi daya beban pengenal yang dinormalisasi:

Persamaan 13.13

$$P_{n,full} = \frac{P_o}{(V_{in,min})^2} Z_0$$

Daya output yang dinormalisasi sebanding dengan Z_0 karena tegangan input ditetapkan oleh tahap ujung depan. Jadi tempat muatan CMP sebenarnya tergantung pada impedansi karakteristik. Menetapkan nilai yang berbeda untuk $P_{n,full}$ variasi kurva gain-frekuensi dan lintasan muatan CMP dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 13.8. Dapat dilihat bahwa kurva gain didorong menuju batas PO/PON dengan meningkatkan Z_0 . Lintasan CMP juga terangkat menuju batas PO/PON dengan Z_0 yang lebih besar.





Gambar 13.8 (a) Kurva gain M yang dinormalisasi (garis putus-putus) untuk berbagai nilai P_n yang dirancang di wilayah PO dengan $l = 0,2$. (b) Lintasan muatan CMP (garis putus-putus) untuk berbagai nilai P_n yang dirancang di wilayah PO dengan $l=0,2$.

Jelas, Z_0 kecil membuat konverter LLC memenuhi syarat karena jejak operasi akan jauh dari batas. Selain itu, nilai Z_0 yang lebih besar lebih disukai untuk mengurangi rugi-rugi konduksi. Secara teori, bagian bawah batas PO/PON $P_{n, PO/PON,min}$ Gambar 13.8 (b) dapat ditargetkan sebagai daya ternormalisasi pengenalan $P_{n,full}$ untuk menghitung nilai Z_0 yang sesuai, karena memastikan bahwa seluruh proses pengisian CMP terletak di wilayah operasi PO. Kondisi ini dapat ditulis sebagai:

Persamaan 13.14

$$Z_{0,PO} \leq \frac{P_{n,PO}}{\frac{P_o}{V_{in,min}^2}}$$

Namun, tiga kendala lagi harus diperhitungkan saat merancang Z_0 .

13.6 KENDALA DESAIN

Biaya menetes hanya terjadi ketika baterai sangat habis, yang biasanya harus dihindari demi kesehatan baterai. Namun, masih layak untuk mendapatkan keuntungan wilayah pengisian tetesan dari operasi soft-switching, karena kendala dapat dengan mudah digabungkan ke dalam keseluruhan prosedur desain. Dalam yang disebutkan di atas, daya output yang dinormalisasi pada akhir muatan tetesan adalah sekitar $0,1P_{n,full}$. Nilai ini tidak boleh lebih besar dari nilai batas OPO/NOP pada frekuensi resonansi untuk membatasi jejak dalam wilayah OPO seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13.5. Akibatnya, kondisi kendala dapat dinyatakan sebagai:

Persamaan 13.15

$$Z_{0,TCK} \leq \frac{P_{n,PO} |_{f_n=1}}{\frac{0,1P_o}{V_{in,min}^2}}$$

Selain itu, arus pensaklaran, yang juga merupakan arus induktor resonansi awal $j_{Lr,x}(0)$ dalam setiap siklus, harus dievaluasi dalam mode operasi yang berbeda. Secara umum, situasi terburuk untuk operasi ZVS primer terjadi ketika tegangan output diatur pada nilai minimumnya, dan tegangan input maksimum diterapkan ke konverter dalam kondisi tanpa beban. Dalam hal ini, frekuensi switching biasanya diatur ke nilai maksimumnya dan konverter beroperasi dalam mode cutoff. Pada saat ini, arus pensaklaran harus dianggap sebagai nilai terkecil secara global untuk mengurangi rugi-rugi konduksi tanpa beban. Di sisi lain, arus ini harus cukup besar untuk melepaskan kapasitor persimpangan MOSFET dalam waktu mati untuk realisasi soft-switching. Arus switching minimum yang diperlukan $I_{sw,min}$ dihitung menurut parameter parasit dari MOSFET yang dipilih dan waktu mati. Jadi kendala ketiga dari Z_0 adalah:

Persamaan 13.16

$$Z_{0,OSW} \leq |j_{Lr0,0}(M_{min}, f_{n,max})| \frac{V_{in,min}}{I_{SW,min}}$$

Sejauh ini, ada tiga kendala yang diterapkan pada pemilihan Z_0 untuk membatasi konverter LLC untuk beroperasi dalam mode yang diinginkan dan memastikan kemampuan soft-switching. Berdasarkan (13.14)–(13.16), batas atas impedansi karakteristik dapat dinyatakan sebagai:

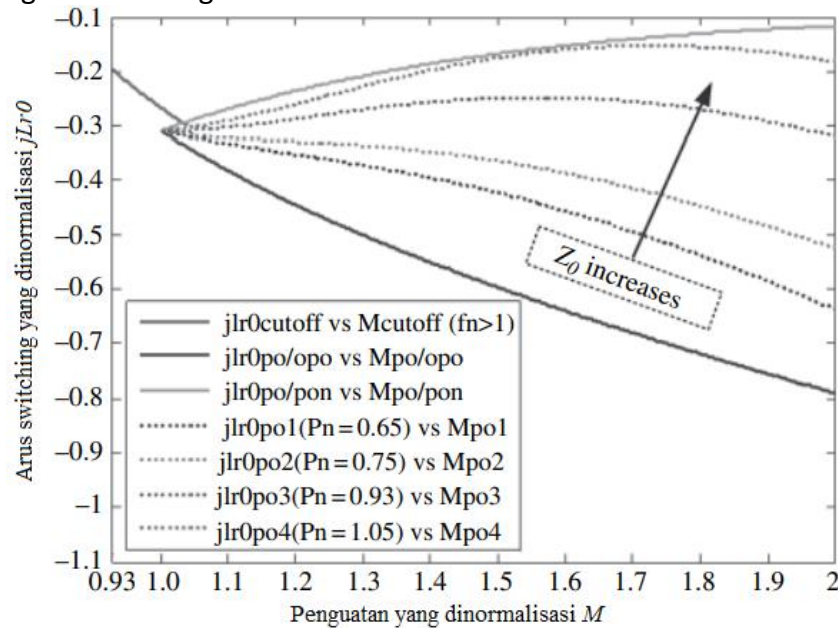
Persamaan 13.17

$$Z_{0,max} = \min\{Z_{0,PON}, Z_{0,TCK}, Z_{0,OSW}\}$$

Akhirnya, variasi arus pensaklaran dianalisis untuk memverifikasi bahwa operasi ZVS utama telah dijanjikan di bawah Z_0 yang dirancang tertentu. Variasi arus switching dalam mode cutoff di atas resonansi harus diselesaikan terlebih dahulu, karena arus switching pada frekuensi maksimum (atau pada gain terendah) diatur ke nilai terendah yang memastikan bahwa kapasitor parasit MOSFET dapat sepenuhnya terisi. Variasi arus switching batas PO/PON dan PO/OPO juga dapat diselesaikan dengan mudah untuk menggambar garis besar wilayah PO. Variasi arus sakelar yang dinormalisasi j_{Lr0} di bawah P_n yang dirancang berbeda, nilai penuh sepanjang lintasan muatan CMP dapat ditunjukkan pada Gambar 13.9 ketika $l = 0,2$. Pada Gambar 13.9, arus switching yang dinormalisasi pada penguatan minimum ($M_{min} = 0,9$) adalah 0,2, di mana negatif berarti bahwa impedansi tangki bersifat induktif. Oleh karena itu, nilai absolut dari arus switching yang dinormalisasi selama pengisian CMP harus lebih besar dari 0,2 untuk menjamin operasi ZVS., Z_0 yang lebih besar menghasilkan arus switching yang lebih kecil di wilayah PO. Namun, arus switching yang dinormalisasi tidak selalu bervariasi secara monoton dengan penguatan tegangan, yang membuatnya tidak mungkin untuk mendapatkan ekspresi kendala analitis yang berguna untuk desain Z_0 seperti sebelumnya.

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13.9, arus pensaklaran meningkat dengan penguatan ketika daya beban ternormalisasi yang dirancang adalah 0,65–0,75. Tapi monotonisitas hilang di kisaran 0,9–1,05. Nilai absolut dari arus pensaklaran yang dinormalisasi pertama-tama menurun dan kemudian naik, ketika gain meningkat. Tujuannya adalah untuk memiliki operasi ZVS ketika daya output dijaga konstan di bawah tegangan output yang berbeda (gain). Kriterianya adalah arus pensaklaran tidak boleh lebih kecil dari batas bawah yang telah ditetapkan dalam mode cutoff pada penguatan minimum, yang berarti 0,2 pada Gambar 13.9. Meskipun desain $P_{n,full}=1,05$ menjamin operasi PO, seperti dapat dilihat pada Gambar 13.8(b), hal ini tidak menjamin bahwa arus pensaklaran cukup besar untuk mempertahankan karakteristik ZVS, karena pada kurva ini, nilai absolut dari arus

switching yang dinormalisasi lebih rendah dari 0,2 ketika gain lebih tinggi dari 1,4. Artinya, impedansi karakteristik maksimum yang dihitung oleh (13.17) mungkin tidak memenuhi syarat untuk digunakan sebagai nilai desain akhir.



Gambar 13.9 Kurva arus switching yang dinormalisasi (garis putus-putus) untuk berbagai nilai P_n yang dirancang di wilayah PO dan mode cutoff di atas resonansi dengan $l=0.2$.

Akibatnya, satu langkah lagi diperlukan untuk menarik kesimpulan. Daya beban normalisasi maksimum yang sesuai $P_{n, \max} = (P_o/V_{in}^2)Z_{0, \max}$ yang dihitung oleh (13.13) dan (13.17) harus ditetapkan ke persamaan mode PO untuk menyelesaikan kurva arus switching yang dinormalisasi. Jika kurva yang diplot terletak di bawah garis $j = j_{Lr0, 0}(M_{\min}, f_{n, \max})$, $Z_{0, \max}$ memenuhi syarat untuk digunakan. Jika tidak, nilai Z_0 perlu dikurangi lebih lanjut untuk memenuhi kriteria. Dengan Z_0 yang diterima, parameter rangkaian resonansi dihitung sebagai:

Persamaan 13.18

$$L_r = \frac{Z_0}{2\pi f_0}, C_r = \frac{1}{2\pi f_0 Z_0}, L_m = \frac{L_r}{l}$$

13.7 PROSEDUR DESAIN

Prosedur desain yang diusulkan untuk aplikasi pengisi daya baterai PHEV diilustrasikan pada Gambar 13.10. Metode desain ini berfokus pada pembatasan seluruh lintasan pengisian dalam mode operasi yang lebih disukai yang menawarkan kemampuan soft-switching kedua sisi konverter. Upaya untuk meminimalkan energi yang bersirkulasi telah dilakukan dengan dua langkah yang sangat penting selama proses desain. Pertama, rasio induktansi l diminimalkan sesuai dengan kisaran penguatan yang diperlukan. Kedua, minimalisasi lebih lanjut dicapai dengan mencari impedansi karakteristik maksimum yang diijinkan Z_0 dibatasi oleh beberapa batasan desain yang memastikan operasi ZVS yang andal. Kedua langkah optimasi ini telah menginduksi dua loop rekursif di seluruh aliran desain.

Keakuratan dan keberadaan solusi dapat dijanjikan oleh model domain waktu yang tepat. Khususnya, untuk aplikasi pengisi daya EV, riak input ditetapkan pada tahap ujung depan ($\pm 5\%$ hingga $\pm 10\%$) dan rentang output bergantung pada spesifikasi paket baterai (biasanya 250–500 V). Telah ditemukan bahwa nilai l di sekitar 0,2 mampu menutupi rentang penguatan ini dalam rentang frekuensi yang wajar ($f_n = 0,5 \sim 1,6$) menurut Gambar 13.6 dan Gambar 13.7. Jumlah rekursi dapat sangat dikurangi dengan memulai dari nilai eksperimental.

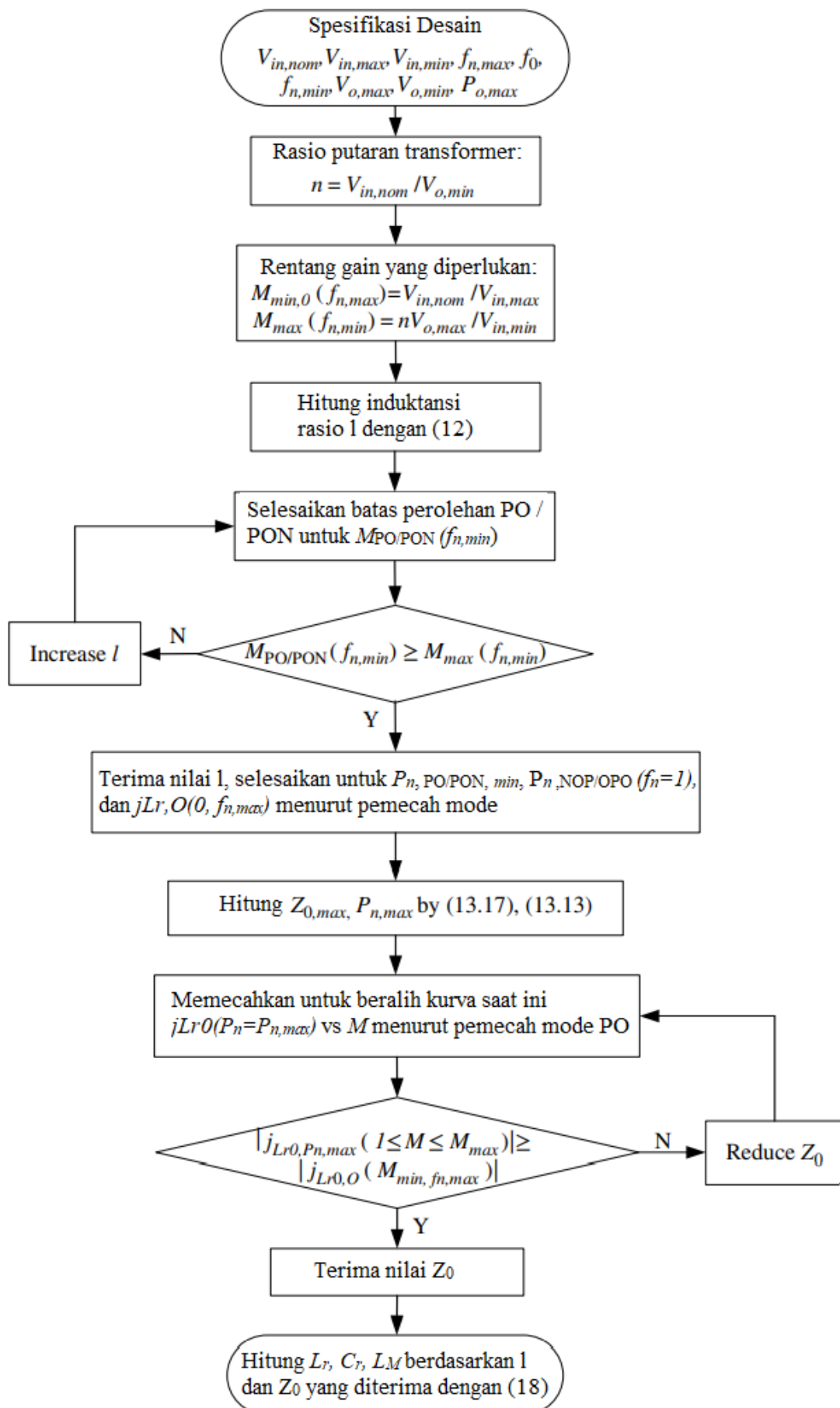
Adapun loop rekursif kedua, ditemukan bahwa arus switching dari mode cutoff pada $f_{n,max}$, yang bergantung pada kapasitansi parasit dari MOSFET yang dipilih, memainkan peran paling penting dalam merancang Z_o . Estimasi yang tepat sangat membantu dalam mengurangi jumlah rekursi

13.8 HASIL EKSPERIMEN

Untuk mendemonstrasikan metode desain lintasan pengisian yang diusulkan, prototipe konverter resonansi LLC jembatan penuh untuk pengisi daya Level 2 berdasarkan spesifikasi yang diberikan pada Tabel 13.5 telah dibuat. Perangkat semikonduktor dan komponen rangkaian utama konverter tercantum dalam Tabel 13.6. Mengikuti prosedur yang diusulkan, rasio putaran dihitung dengan (13,10) sebagai 1,56. Rasio induktansi diselesaikan sebagai $I = 0,1984$ dari (13,12). Batas mode dan pemecah distribusi yang disebutkan dalam Bagian 13.2 digunakan untuk menyelesaikan batasan Z_o yang ditetapkan oleh (13.14)–(13.16). Hasil yang dihitung adalah sebagai berikut: $P_{n,PO/PON,min} = 1,05$, $P_{n,NOP/DPO}(f_n = 1) = 0,1254$, $|j_{Lr,O}(M_{min} = 0,9512, f_{n,max} = 1,29)| = 0,2185$. Batasan yang sesuai adalah $Z_{o,PO/N} = 21,78$, $Z_{o,TCK} = 26,01$, $Z_{o,OSW} = 22,45$. Perlu dicatat bahwa ISW arus switching ibu mini, min dalam (16) diatur ke 3,6 A, berdasarkan parameter parasit dari MOSFET yang dipilih. Oleh karena itu, batas atas Z_o dipilih sebagai 21,78 menurut (13,17). Jadi batas atas sebenarnya ditentukan oleh batas PO/PON $P_{n,PO/PON,min} = 1,05$ dalam contoh desain ini.

Untuk memverifikasi perlunya loop rekursif kedua dari prosedur desain yang diusulkan, Z_o yang dihitung di atas diterima sementara sebagai nilai desain akhir. Parameter tangki resonansi dapat dihitung dengan (13,18) sebagai berikut: $L_r = 22,36 \mu\text{H}$, $C_r = 47,14 \text{ nF}$, dan $L_m = 112,7 \mu\text{H}$. Tangki resonansi telah dibangun dan diuji berdasarkan parameter di atas pada kondisi beban penuh. Bentuk gelombang eksperimental ditunjukkan pada Gambar 13.11. Pada gambar ini, $v_{AB}(t)$ menunjukkan tegangan yang diterapkan pada tangki resonansi. Tegangan melintasi kapasitor resonansi ditunjukkan sebagai $v_{Cr}(t)$, $i_{Lr}(t)$, dan $i_{Lm}(t)$ digunakan untuk masing-masing menunjukkan arus tangki resonansi utama dan arus magnetisasi transformator. Arus sekunder melalui penyearah ditunjukkan sebagai $i_o(t)$. Seperti yang diperkirakan pada Gambar 13.9, meskipun konverter beroperasi dalam mode PO yang lebih disukai, arus switching $I_{sw} = 3,2 \text{ A}$ (lebih rendah dari arus switching cutoff yang dirancang 3,6 A) tidak cukup besar untuk melepaskan kapasitor parasit MOSFET untuk memastikan realisasi ZVS.

Osilasi dapat diamati ketika waktu mati berakhir dan sinyal penggerak gerbang diterapkan ke sakelar yang sesuai, yang menyebabkan rugi-rugi pensaklaran, dan ini harus dihindari. Oleh karena itu, nilai impedansi karakteristik perlu dikurangi lebih lanjut. Variasi arus pensaklaran ternormalisasi yang ditunjukkan pada Gambar 13.9 digunakan sebagai referensi desain, karena I yang dirancang sangat dekat dengan 0,2. Dapat dilihat bahwa arus switching bervariasi secara monoton ketika daya output yang dinormalisasi lebih rendah dari 0,75, sehingga daya output yang dinormalisasi ini dipilih sebagai daya output terukur untuk operasi ZVS yang andal. Parameter tangki resonansi dihitung ulang sebagai berikut: $L_r = 15,97 \mu\text{H}$, $C_r = 66 \text{ nF}$, dan $L_m = 80,51 \mu\text{H}$. Nilai terukur aktual diberikan untuk perbandingan: $n_a = 1,58$, $I_a = 0,198$, $L_{r,a} = 15,3 \mu\text{H}$, $C_{r,a} = 68,2 \text{ nF}$, dan $L_{m,a} = 77,3 \mu\text{H}$. Perhatikan bahwa integrasi magnetik diadopsi untuk mengecilkan tangki resonansi, yang membuatnya sulit untuk menyesuaikan parameter agar sesuai dengan nilai yang dirancang dengan tepat.



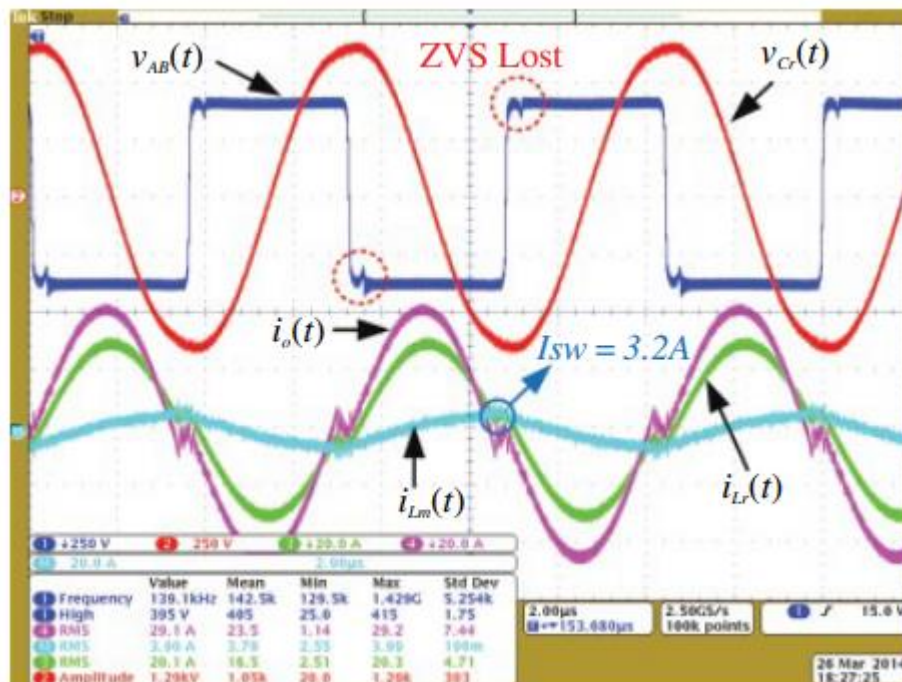
Gambar 13.10 Prosedur desain lintasan pengisian.

Tabel 13.5 Spesifikasi desain untuk konverter resonansi LLC

Parameter	Designator	Nilai
Rentang tegangan Input	$V_{in,min} \sim V_{in,max}$	370–410 V
Tegangan Input nominal	$V_{in,nom}$	390 V
Rentang tegangan Output	$V_{out,min} \sim V_{out,max}$	250–450 V
Daya output maksimum	$P_{out,max}$	6.6 kW
Frekuensi resonansi	f_0	155 kHz
Rentang frekuensi operasi	$f_{smin} \sim f_{smax}$	85–200 kHz

Tabel 13.6 Komponen yang digunakan pada prototype converter.

Komponen	Manufaktur
MOSFET	Teknologi Infineon
Penyearah dioda	Semikonduktor Fairchild
Kapasitor film resonansi	EPCOS
Inti ferit magnetik transformator	TDK
Kawat Litz	HM Wire Internasional
Kapasitas output film	Vishay

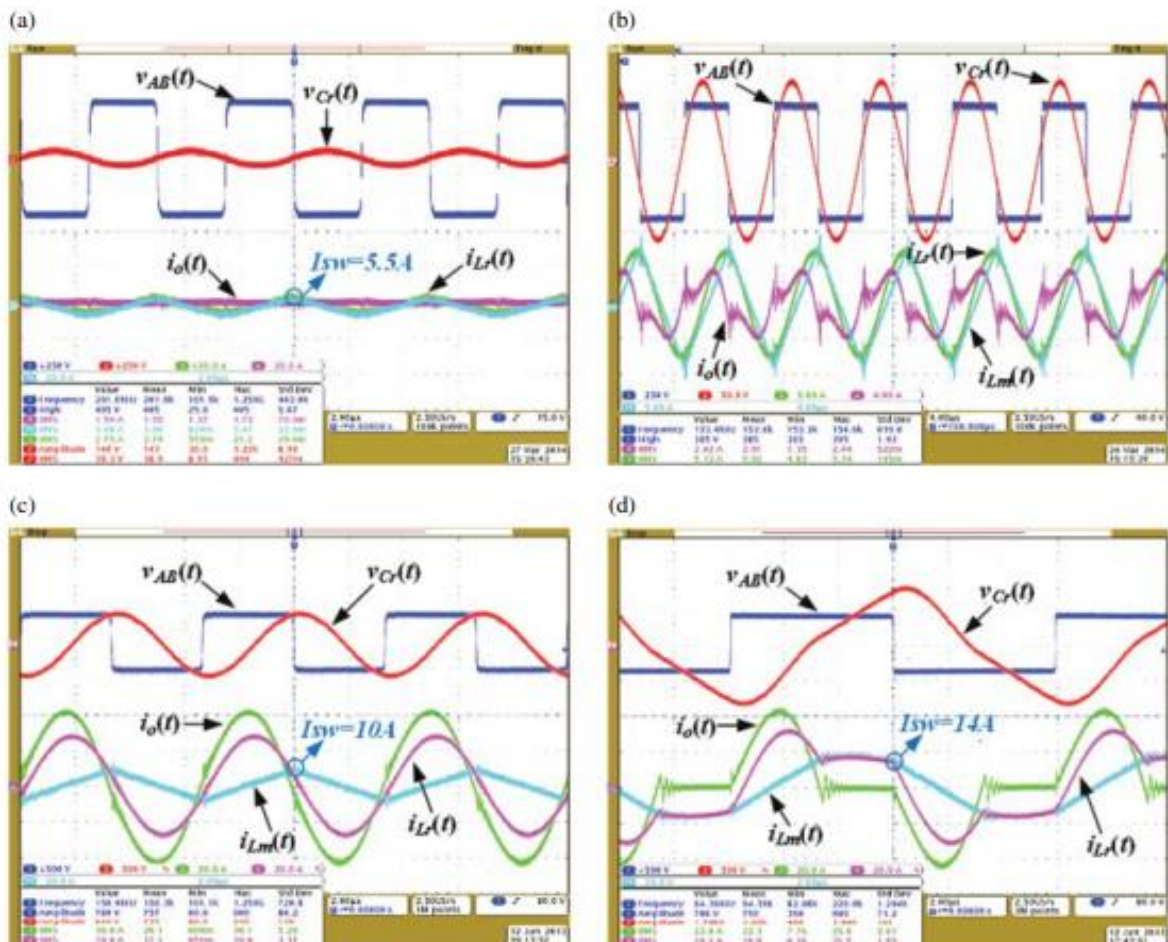


Gambar 13.11 Bentuk gelombang eksperimental dari prototipe konverter LLC dengan parameter yang melewati langkah terakhir prosedur pada $V_{in} = 390$ V, $V_o = 280$ V, $P_o = 6,6$ kW.

Lintasan operasi selama seluruh prosedur pengisian diverifikasi terlebih dahulu. Empat titik operasi khusus dipilih untuk mengkonfirmasi pencapaian target desain. Bentuk

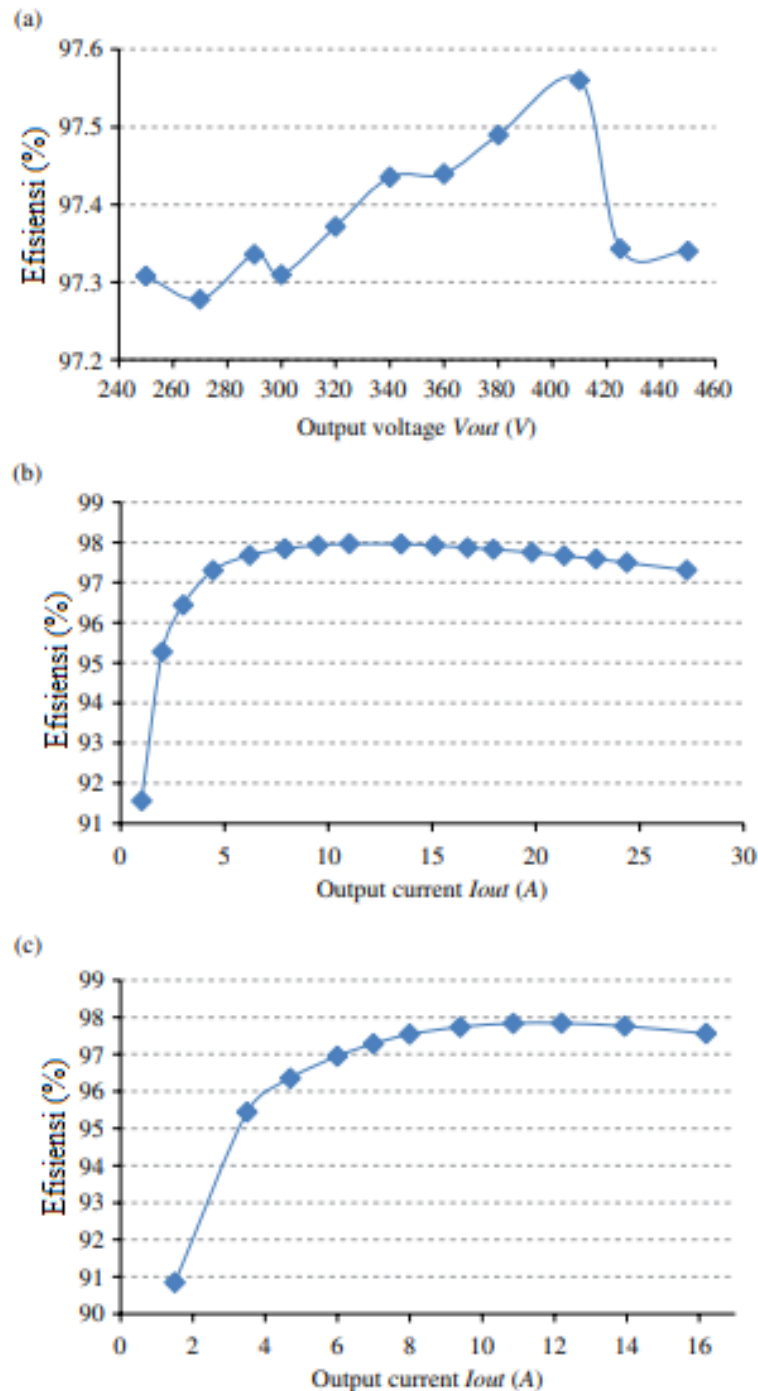
gelombang eksperimental dari operasi ini diberikan pada Gambar 13.12, di mana definisi simbolnya sama dengan yang ada pada Gambar 13.11. Pertama, operasi tanpa beban ($i_o(t) = 0$) pada tegangan output terendah (250 V) dipastikan ketika frekuensi switching diatur ke nilai maksimumnya (201 kHz) oleh Gambar 13.12(a). Kedua, operasi mode OPO dapat diamati pada Gambar 13.12(b) ketika arus output diatur sekitar $0,1I_{o,full}$ pada output 250 V, yang merupakan akhir dari tahap pengisian tetesan. Osilasi $i_o(t)$ disebabkan oleh kapasitor parasit dari penyearah output ketika mereka terputus dari tangki resonansi selama subinterval 0 dari mode OPO. Ketiga, daya output maksimum diberikan pada tegangan output 250 V sementara operasi mode P dijanjikan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13.12(c). Jadi kondisi beban terberat dirancang dalam mode independensi beban. Terakhir, bentuk gelombang operasi mode PO tipikal dapat dilihat pada Gambar 13.12(d) ketika tegangan output diatur ke nilai maksimum 450 V sementara daya output maksimum ditransfer, yang menunjukkan bahwa seluruh muatan CMP dibatasi dalam wilayah PO. Selain itu, dapat disimpulkan dari Gambar 13.12 bahwa soft-switching kedua sisi direalisasikan, karena lintasan pengisian berjalan sepanjang jejak yang diinginkan di wilayah yang lebih disukai.

Kinerja muatan CMP kemudian diuji. Beban elektronik digunakan untuk mensimulasikan karakteristik beban baterai dalam percobaan. Efisiensi konverter sebagai fungsi tegangan output untuk muatan CMP ditunjukkan pada Gambar 13.13(a). Dapat dilihat bahwa efisiensi lebih tinggi dari 97,2% selama seluruh tahap pengisian CMP dan mencapai puncaknya 97,96% pada output 410 V. Kurva efisiensi tahap pengisian CV pada output 250 V dan 410 V juga diberikan pada Gambar 13.13(b) dan 13.13(c) untuk evaluasi kinerja beban ringan. Terlihat bahwa efisiensi konversi tetap di atas 90% dari beban 10% menjadi beban penuh. Efisiensi puncak 97,96% ditunjukkan pada arus output 11 A pada 250 V (2,75 kW).



Gambar 13.12 Bentuk gelombang eksperimental dari konverter LLC

- (a) operasi tanpa beban: $V_{in} = 390 \text{ V}$, $V_o = 250 \text{ V}$, $f_s = 201 \text{ kHz}$.
 (b) Operasi mode OPO dalam trickle charge: $V_{in} = 390 \text{ V}$, $V_o = 250 \text{ V}$, $I_o = 2 \text{ A}$, $f_s = 153,4 \text{ kHz}$.
 (c) Operasi mode P pada awal pengisian CMP: $V_{in} = 390 \text{ V}$, $V_o = 250 \text{ V}$, $P_o = 6,6 \text{ kW}$, $f_s = 150,4 \text{ kHz}$.
 (d) Operasi mode PO pada akhir pengisian CMP: $V_{in} = 390 \text{ V}$, $V_o = 450 \text{ V}$, $P_o = 6,6 \text{ kW}$, $f_s = 84,19 \text{ kHz}$.



Gambar 13.13 Kinerja prototipe konverter LLC: (a) Efisiensi terukur vs tegangan output pada $P_o = 6,6 \text{ kW}$ dan $V_{in} = 390 \text{ V}$. (b) Efisiensi terukur vs arus output pada $V_o = 250 \text{ V}$ dan $V_{in} = 390 \text{ V}$. (c) Efisiensi terukur vs arus output pada $V_o = 410 \text{ V}$ dan $V_{in} = 390 \text{ V}$.

13.9 KESIMPULAN

Konverter resonansi LLC yang diterapkan dalam sistem pengisi daya baterai EV/PHEV telah dianalisis dalam bab ini, dan metodologi desain disajikan. Berbeda dari aplikasi beban

resistif, yang datang dengan kondisi nominal tunggal, operasi beban penuh diperlukan dalam rentang tegangan output yang sangat lebar untuk pengisi daya baterai, sehingga merupakan target desain lintasan daripada target desain titik tunggal. Batas mode dan distribusi konverter LLC dibahas untuk tujuan pemetaan jejak operasi ke wilayah yang lebih disukai. Parameter utama yang mempengaruhi lintasan operasi yang dirancang diidentifikasi. Akhirnya, semua diskusi telah mengarah pada prosedur desain yang memastikan soft-switching di bawah semua kondisi operasi. Konverter LLC 6,6 kW, 390 V DC, dan output 250–450V dibuat menggunakan metode yang diusulkan, yang mencapai efisiensi puncak 97,96%.

BAB 14

PEMODELAN DAN SIMULASI KENDARAAN LISTRIK DAN HIBRIDA

14.1 PENGANTAR

Dibandingkan dengan kendaraan konvensional, ada lebih banyak komponen listrik yang digunakan dalam listrik, hibrida, dan kendaraan sel bahan bakar, seperti mesin listrik, elektronika daya, *electronic continuously variable transmissions* (CVT), dan pengontrol powertrain tertanam. Perangkat penyimpanan energi canggih dan konverter energi, seperti baterai Li-ion, *ultracapacitors* (UC), dan sel bahan bakar diperkenalkan di powertrain generasi berikutnya. Selain komponen atau subsistem elektrifikasi ini, konvensional *internal combustion engines* (ICE), sistem mekanis, dan sistem hidraulik mungkin masih ada. Interaksi dinamis antara berbagai komponen dan sifat multidisiplin membuat sulit untuk menganalisis *hybrid electric vehicle* (HEV) yang dirancang baru. Setiap parameter desain harus dipilih dengan cermat untuk penghematan bahan bakar yang lebih baik, peningkatan keselamatan, kemampuan berkendara yang optimal, dan kinerja dinamis yang kompetitif – semuanya dengan harga yang dapat diterima oleh pasar konsumen. Membuat prototipe dan menguji setiap kombinasi desain rumit, mahal, dan memakan waktu. Pemodelan dan simulasi sangat diperlukan untuk evaluasi konsep, pembuatan prototipe, dan analisis HEV. Terutama ketika konfigurasi dan pengontrol powertrain hybrid baru dikembangkan.

Selain itu, kompleksitas desain powertrain baru dan bergantung pada perangkat lunak yang disematkan menjadi perhatian di antara para insinyur penelitian dan pengembangan otomotif. Hal ini mengakibatkan meningkatnya kesulitan dalam memprediksi interaksi antara berbagai komponen dan sistem kendaraan. Dalam situasi seperti itu, lingkungan pemodelan yang dapat memodelkan tidak hanya komponen tetapi juga perangkat lunak yang disematkan, seperti perangkat lunak the *electronic throttle controller* (ETC), diperlukan. Diagnosis yang efektif juga menghadirkan tantangan. Pemodelan dapat memainkan peran penting dalam diagnostik komponen operasi. Misalnya, menjalankan model sel bahan bakar tertanam dan membandingkan variabel operasi sel bahan bakar yang sebenarnya dengan yang diperoleh dari model dapat membantu diagnosis kesalahan sel bahan bakar.

Pertarungan dengan alat pemodelan dan simulasi dalam industri elektronik telah menunjukkan bahwa alat serupa di domain otomotif masih kekurangan daya, kecanggihan, dan otomatisasi yang dibutuhkan oleh dan tersedia untuk desainer elektronik. Kemajuan dalam alat desain elektronik telah memvalidasi hukum Moore (seperti yang diterapkan pada kompleksitas sirkuit terpadu) dan telah membantu mencapai standar luar biasa dalam daya komputasi, sekaligus menurunkan biaya. Untuk perancang sistem otomotif untuk menduplikasi dan mengelola tingkat kerumitan yang serupa, alat desain yang mengotomatiskan proses rincian tingkat rendah perlu dikembangkan.

Tergantung pada tingkat detail di mana masing-masing komponen dimodelkan, model kendaraan mungkin steady-state, quasi-steady, atau dinamis. Misalnya, ADVISOR (ADvanced Vehicle SimulatOR) dapat dikategorikan sebagai model kondisi mapan, *powertrain system analysis toolkit* (PSAT) model sebagai quasi-steady, dan PSIM dan Virtual Test Bed (VTB) sebagai model dinamis. Disisi lain, tergantung pada arah perhitungan, model kendaraan dapat diklasifikasikan sebagai berwawasan ke depan atau model menghadap ke belakang. Dalam model berwawasan ke depan, kecepatan kendaraan dikendalikan untuk mengikuti siklus mengemudi selama analisis ekonomi bahan bakar, sehingga memfasilitasi pengembangan pengontrol.

Keuntungan utama menggunakan model steady-state atau model quasi-steady adalah komputasi yang cepat, sedangkan kerugiannya adalah ketidakakuratan untuk simulasi

dinamis. Sebaliknya, model berbasis fisika dapat memfasilitasi simulasi dinamis dengan ketelitian tinggi untuk sistem kendaraan pada rentang waktu yang berbeda. Model dinamis semacam ini harus berguna untuk mengembangkan strategi kontrol powertrain yang efektif. Model terkait erat dengan fisika yang mendasarinya melalui tautan seperti persamaan diferensial koefisien lumped atau beberapa model ekuivalen digital. Bab ini membahas berbagai metode pemodelan dan simulasi untuk kendaraan listrik dan hibrida.

14.2 DASAR-DASAR PEMODELAN SISTEM KENDARAAN

Penting untuk mendefinisikan istilah umum yang digunakan dalam pemodelan. Definisi berikut didasarkan pada teks oleh Dr Peter Fritzson dari Linköping University di Swedia dan terkait dengan pemodelan HEV:

- **Sistem:** Objek atau objek yang ingin kita pelajari. Dalam konteks bab ini, sistem akan menjadi kendaraan listrik atau HEV.
- **Eksperimen:** Tindakan memperoleh informasi dari sistem yang dapat dikontrol dan diamati dengan memvariasikan input sistem secara cerdas dan mengamati output sistem.
- **Model:** Sebuah pengganti untuk sistem nyata di mana "eksperimen" dapat dilakukan untuk mendapatkan wawasan tentang sistem nyata. Jenis eksperimen yang dapat valid diterapkan pada model tertentu biasanya terbatas. Dengan demikian, model yang berbeda biasanya diperlukan untuk sistem target yang sama untuk melakukan semua eksperimen yang ingin kita lakukan. Meskipun ada berbagai jenis model (misalnya model skala yang digunakan dalam terowongan angin), dalam bab ini kita akan membahas model matematika berbasis fisika.
- **Simulasi:** Eksperimen yang dilakukan pada model.
- **Pemodelan:** Tindakan membuat model yang cukup mewakili sistem target untuk tujuan mensimulasikan model tersebut dengan eksperimen spesifik yang telah ditentukan sebelumnya.
- **Simulator:** Program komputer yang mampu melakukan simulasi. Program-program ini sering kali menyertakan fungsionalitas untuk konstruksi model dan sering dapat digunakan dalam hubungannya dengan mesin statistik canggih untuk menjalankan studi perdagangan (sensitivitas), desain eksperimen, rutinitas Monte Carlo, dan rutinitas lainnya untuk desain yang kuat.

Pemodelan sistem kendaraan dilakukan di berbagai bidang yang diminati untuk menjawab banyak hal pertanyaan yang berbeda (yaitu eksperimen yang berbeda). Area tradisional mencakup pemodelan untuk analisis *noise vibration harshness* (NVH); pemodelan kinerja kendaraan (misalnya akselerasi, gradabilitas, dan kecepatan jelajah maksimum); pemodelan untuk prediksi, evaluasi, dan optimalisasi penghematan bahan bakar; pemodelan untuk keselamatan, stabilitas, dan kelayakan kecelakaan; pemodelan kontrol kendaraan; pemodelan untuk integritas struktural; pemodelan untuk memfasilitasi pengujian dan validasi komponen; pemodelan untuk desain konseptual awal dan eksplorasi desain; pemodelan untuk biaya dan kemasan; dan pemodelan untuk prediksi emisi.

Ada berbagai jenis model matematika dan simulator yang tersedia untuk melakukan simulasi sistem kendaraan. Misalnya, beberapa simulator dapat digunakan untuk membangun model yang menggunakan statistik makro dari siklus kerja dan efisiensi rata-rata siklus komponen untuk prediksi konsumsi bahan bakar dan kinerja yang hampir seketika, sedangkan simulator lain melakukan simulasi transien sub-detik yang terperinci untuk eksperimen yang lebih rinci. Ada juga tradeoff khas dalam pemodelan kendaraan antara jumlah asumsi teknik yang harus dibuat oleh pembuat model dan jumlah waktu yang dibutuhkan untuk menyiapkan dan membangun model. Model tingkat tinggi yang sederhana dapat memperkirakan konsumsi bahan bakar menggunakan pengetahuan insinyur tentang

efisiensi komponen rata-rata siklus "khas". Model yang lebih rinci sebenarnya akan mensimulasikan masing-masing komponen dari waktu ke waktu dan secara matematis menentukan efisiensi rata-rata siklus. Selain asumsi/ tradeoff spesifisitas, ada juga tradeoff antara detail model dan waktu berjalan. Secara umum, semakin detail hasil, semakin lama waktu total untuk pengaturan model, simulasi, dan interpretasi hasil.

Model sistem kendaraan terperinci biasanya berisi campuran data empiris, asumsi teknik, dan algoritma berbasis fisika. Simulator yang bagus memberikan banyak berbagai komponen kendaraan beserta kumpulan data untuk mengisi komponen tersebut. Komponen-komponen tersebut kemudian dapat dihubungkan bersama sesuai keinginan pengguna untuk menciptakan powertrain, bodi, dan sasis kendaraan yang berfungsi. Koneksi antar komponen secara matematis mengirimkan upaya dan aliran (misalnya torsi dan kecepatan atau tegangan dan arus) selama simulasi. Tergantung pada tingkat detail yang diinginkan, ada berbagai model yang tersedia seperti model spreadsheet keadaan tunak, model aliran daya transien, dan model aliran usaha transien (aliran usaha mengacu pada kombinasi kecepatan sudut, tegangan-arus, kecepatan gaya-linier, dll.).

Model sistem kendaraan transien dapat dibagi menjadi dua kategori berdasarkan arah perhitungannya. Model yang dimulai dengan upaya traksi yang diperlukan pada roda dan "bekerja mundur" ke arah mesin disebut model menghadap ke belakang. Model yang dimulai dari mesin dan bekerja dalam torsi yang ditransmisikan dan dipantulkan disebut model menghadap ke depan. Apa yang disebut model non-kausal memungkinkan operasi maju atau mundur tergantung pada eksperimen yang dilakukan. Model menghadap ke belakang adalah biasanya jauh lebih cepat daripada model yang menghadap ke depan dalam hal waktu simulasi. Model yang menghadap ke depan lebih baik mewakili pengaturan sistem nyata dan lebih disukai di mana pengembangan kontrol dan hardware-in-the-loop (HIL) akan digunakan. Model maju biasanya harus menggunakan semacam "model driver" seperti proporsional-integral-derivative (PID) controller untuk mencocokkan siklus tugas target. Beberapa model "hibrida" mencakup kedua konsep tersebut.

Selain itu, model sistem kendaraan dapat berinteraksi dengan sejumlah model yang lebih rinci seperti model analisis struktural, model getaran, dan model termal.

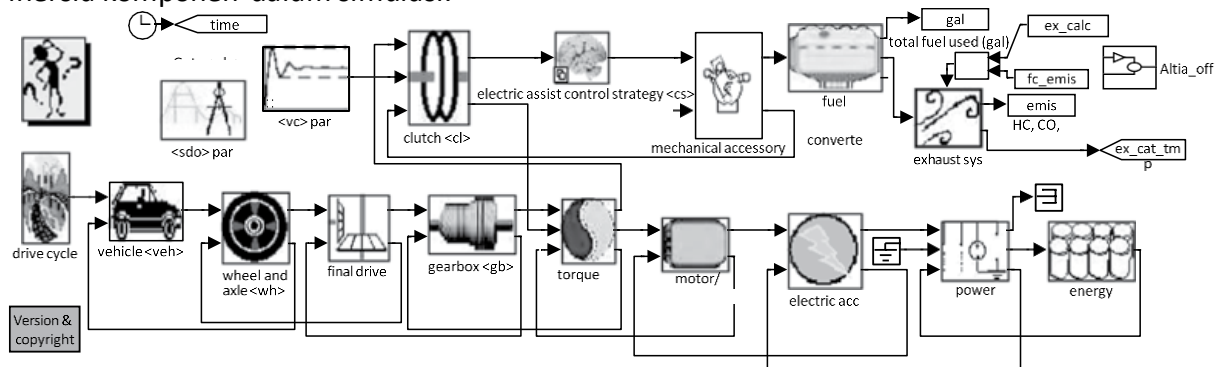
Didorong oleh kebutuhan akan waktu simulasi yang cepat, komponen kompleks seperti mesin dan motor biasanya disimulasikan menggunakan "peta pencarian" konsumsi energi versus torsi poros dan kecepatan sudut. Setelah torsi rata-rata dan kecepatan poros sudut untuk langkah waktu tertentu ditentukan, interpolasi pada data empiris dilakukan untuk menentukan tingkat konsumsi energi komponen. Ada studi ekstensif dalam pemodelan dan simulasi kendaraan hibrida dan listrik. Alat pemodelan seperti ADVISOR, Autonomie, dan PSAT tersedia di domain publik, dan dibahas lebih detail di bagian berikut.

14.3 PEMODELAN HEV MENGGUNAKAN ADVISOR

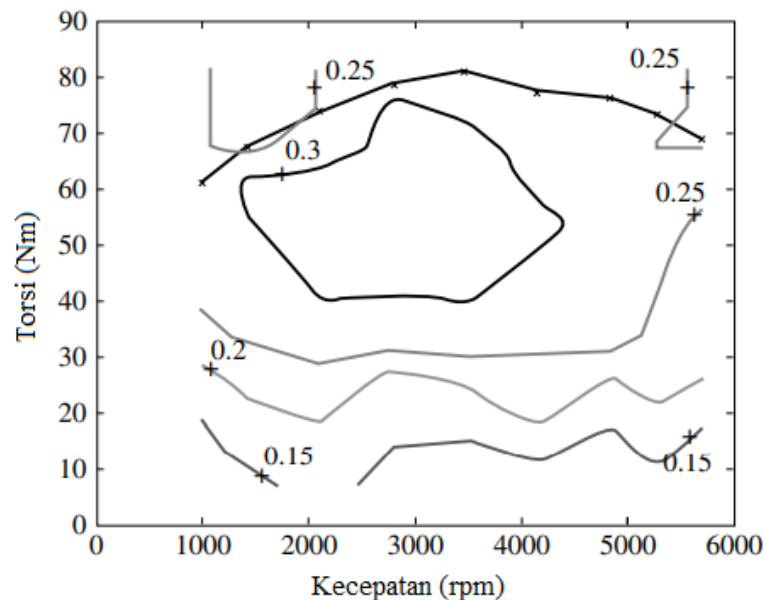
ADVISOR adalah alat pemodelan dan simulasi yang dikembangkan oleh NREL (*National Renewable Energy Laboratory*). Ini dapat digunakan untuk analisis kinerja, penghematan bahan bakar, dan emisi kendaraan konvensional, listrik, hibrida listrik, dan sel bahan bakar. Tulang punggung model ADVISOR adalah diagram blok Simulink yang ditunjukkan pada Gambar 14.1, untuk HEV paralel sebagai contoh. Setiap subsistem (blok) dari diagram blok memiliki file MATLAB (m-file) yang terkait dengannya, yang mendefinisikan parameter subsistem tertentu. Pengguna dapat mengubah model di dalam blok dan m-file yang terkait dengan blok agar sesuai dengan kebutuhan pemodelan. Misalnya, pengguna mungkin memerlukan model yang lebih tepat untuk subsistem motor listrik. Model yang berbeda dapat menggantikan model yang ada selama input dan outputnya sama. Di sisi lain, pengguna dapat membiarkan model tetap utuh dan hanya mengubah m-file yang terkait dengan diagram blok.

Ini sama dengan memilih pembuat yang berbeda dari komponen yang sama (misalnya memilih baterai 12 Ah yang diproduksi oleh Hawker Genesis daripada baterai 6 Ah yang diproduksi oleh Caterpillar). ADVISOR memberikan fleksibilitas pemodelan bagi pengguna.

Model ADVISOR cocok dengan data empiris yang diperoleh dari pengujian komponen untuk mensimulasikan subsistem tertentu. Secara umum, efisiensi dan membatasi kinerja menentukan operasi setiap komponen. Misalnya, ICE dimodelkan menggunakan peta efisiensi yang diperoleh melalui eksperimen. Peta efisiensi engine Geo 1,0 l (43 kW) ditunjukkan pada Gambar 14.2. Berbagai garis kontur pada diagram ini menunjukkan nilai efisiensi tertentu yang diberi label di samping kontur yang sesuai. Kurva torsi maksimum juga ditampilkan di peta ini. Mesin tidak dapat bekerja melebihi batasan torsi maksimum ini. Perubahan torsi maksimum adalah kendala lain pada subsistem mesin. Dengan kata lain, model mempertimbangkan inersia komponen dalam simulasi.

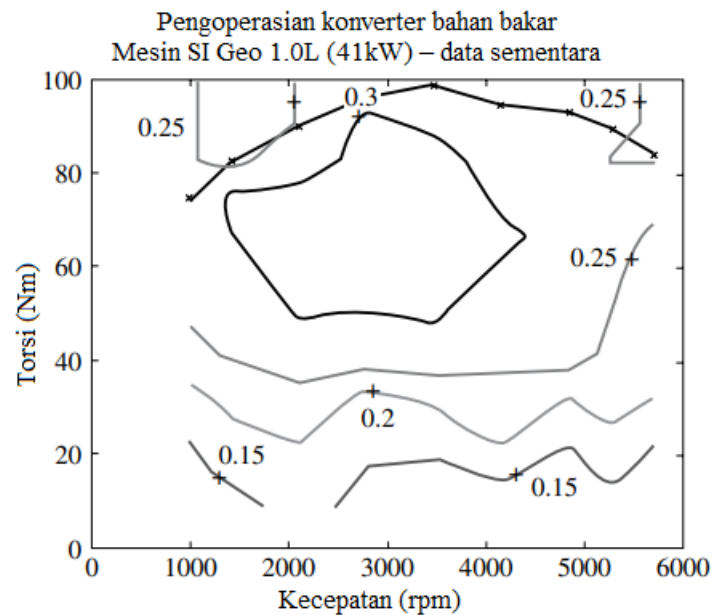


Gambar 14.1 Block diagram of the parallel HEV in ADVISOR. Source: Markel 2002.



Gambar 14.2 Peta efisiensi mesin penyalaan percikan Geo 1,0 l (43 kW).

Program ini juga memungkinkan untuk penskalaan linier komponen. Untuk ICE, ini berarti penskalaan torsi linier untuk memberikan daya maksimum yang diperlukan. Jenis penskalaan ini hanya berlaku di lingkungan dekat parameter aktual dimana peta efisiensi untuk komponen yang sedikit lebih besar atau lebih kecil tidak akan berubah secara drastis. Penskalaan Geo ICE ditunjukkan pada Gambar 14.3, sehingga ICE memberikan daya maksimum 50 kW bukannya nominal 43 kW.



Gambar 14.3 Mesin Geo 1.0 I diskalakan untuk memberikan daya maksimum 50 kW dengan perubahan linier karakteristik torsi.

Dalam versi terbaru ADVISOR, fungsionalitas perangkat lunak ditingkatkan dengan memungkinkan tautan ke paket perangkat lunak lain seperti Ansoft Simplorer dan Synopsys Saber. Paket yang kuat ini memungkinkan untuk melihat lebih detail pada sistem kelistrikan kendaraan.

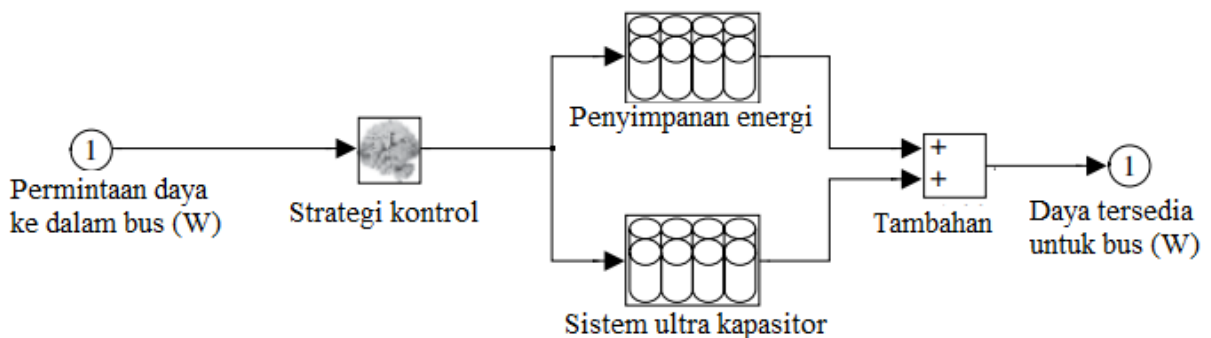
Sebagai contoh aplikasi, ADVISOR digunakan untuk mensimulasikan sistem penyimpanan energi baterai-ultrakapasitor hibrida. Aplikasi yang lebih luas dapat ditemukan, dimana ADVISOR digunakan untuk memodelkan powertrain sel bahan bakar/baterai hybrid dan powertrain sel bahan bakar hybrid/ultrakapasitor dan mensimulasikan penghematan bahan bakar dan kinerjanya. Konsep menggunakan sistem penyimpanan energi hibrida yang terdiri dari baterai dan UC dikenal dan didokumentasikan dengan baik dalam literatur. UC menyediakan dan menyerap puncak arus, sedangkan baterai menyediakan daya rata-rata yang dibutuhkan untuk motor listrik. Pengaturan penyimpanan energi hibrida dalam HEV ini memperpanjang umur baterai dan memungkinkan motor beroperasi lebih agresif. Mensimulasikan sistem seperti itu di ADVISOR memungkinkan pengguna untuk memvisualisasikan manfaat ekonomi bahan bakar. Mensimulasikan sistem seperti itu di ADVISOR memungkinkan pengguna untuk memvisualisasikan manfaat ekonomi bahan bakar. Pada saat yang sama, program ini memungkinkan pengguna merancang strategi kontrol terbaik untuk hibrida baterai-ultrakapasitor guna meningkatkan masa pakai baterai dan kinerja sistem secara keseluruhan. Terakhir, ukuran komponen dapat dioptimalkan, sehingga biaya dan bobot sistem dapat dikurangi.

Model baterai default di ADVISOR beroperasi dengan meminta jumlah daya tertentu dari baterai seperti yang ditentukan oleh strategi kontrol kendaraan. Tergantung pada jumlah daya yang dapat disuplai oleh baterai, modul baterai akan mengirimkan daya yang tersedia dari baterai ke subsistem lainnya. Karena metode simulasi mundur/maju hybrid ADVISOR, jumlah daya yang dapat disuplai dan dibutuhkan baterai dalam langkah waktu tertentu dihitung dalam satu iterasi. Dari nilai ini, model baterai menghitung variabel baterai seperti arus, tegangan, dan suhu.

Namun, sistem penyimpanan energi baterai-ultrakapasitor hibrida tidak dapat dimodelkan dalam ADVISOR menggunakan model baterai default di atas. Di sini, kita harus mengganti model penyimpanan energi dengan model yang lebih kompleks. Untungnya, model

subsistem di ADVISOR dapat diubah selama jenis input dan output ke seluruh kendaraan tidak diubah. Dalam simulasi, kita mengganti model baterai dengan model kombinasi baterai dan UC yang terhubung ke unit strategi kontrol lokal yang membagi permintaan daya antara baterai dan UC. Informasi rinci tentang strategi kontrol tersedia di Representasi diagram blok dari sistem ditunjukkan pada Gambar 14.4.

Penggunaan model yang dijelaskan di atas memberi pengguna cara untuk dengan cepat dan mudah mensimulasikan subsistem baterai-ultrakapasitor di lingkungan kendaraan. Hal ini memungkinkan pengguna untuk mengamati manfaat penggunaan UC pada penghematan bahan bakar kendaraan serta manfaat baterai dengan membuat status pengisian baterai lebih merata dan dengan mengurangi puncak arus baterai yang harus dimiliki baterai menerima.



Gambar 14.4 Diagram blok representasi subsistem baterai baru yang terdiri dari baterai dan ultrakapasitor. Hubungan input/output dengan sistem lainnya dibiarkan tidak berubah.

Ini juga memungkinkan pengguna untuk memvalidasi apakah sistem beroperasi seefisien jika ukuran baterai dikurangi. Akhirnya, pengguna dapat mengoptimalkan strategi kontrol baterai-ultrakapasitor (dengan kata lain, bagaimana permintaan daya akan dibagi) tanpa harus memikirkan kerumitan perancangan elektronika daya untuk membuat sistem kontrol ini layak. Selain itu, sistem dapat dioptimalkan sebelum sistem apa pun dibangun dan biaya sistem serta kemungkinan penghematan dapat dengan mudah dihitung pada tahap desain awal. Setelah strategi kontrol dioptimalkan, konverter DC-DC aktual dengan strategi kontrol yang diperlukan dapat diintegrasikan ke dalam simulasi dengan berinteraksi dengan perangkat lunak Sabre atau Ansoft Simplorer.

14.4 PEMODELAN HEV MENGGUNAKAN PSAT

PSAT (AUTONOMIE) adalah perangkat lunak simulasi fleksibel canggih yang dikembangkan oleh Argonne National Laboratory dan disponsori oleh US DOE (*Department of Energy*). PSAT dimodelkan dalam lingkungan MATLAB/Simulink dan diatur dengan GUI (*Graphical User Interface*) yang ditulis dalam C#, yang membuatnya ramah pengguna dan mudah digunakan. Menjadi model berwawasan ke depan, PSAT memungkinkan pengguna untuk mensimulasikan lebih dari 200 konfigurasi yang telah ditentukan, termasuk konvensional, listrik murni, sel bahan bakar, dan hibrida (paralel, seri, power split, dan seri-paralel). Pustaka besar data komponen memungkinkan pengguna untuk mensimulasikan kendaraan ringan, sedang, dan berat.

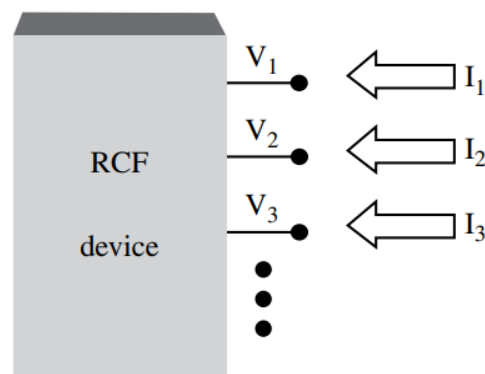
Tingkat detail dalam model komponen bisa fleksibel; misalnya, model tabel pencarian atau model dinamis kesetiaan tinggi dapat digunakan untuk komponen, tergantung pada persyaratan simulasi pengguna. Untuk menjaga modularitas, setiap model harus memiliki jumlah parameter input dan output yang sama. Penggunaan model quasi-steady dan strategi kontrol termasuk mendorong, pengereman, dan strategi pergeseran membedakan PSAT dari

alat simulasi steady-state lainnya seperti ADVISOR. Fitur ini memungkinkan PSAT untuk memprediksi penghematan bahan bakar dan performa kendaraan dengan lebih akurat. Akurasi pemodelannya telah divalidasi terhadap Ford P2000 dan Toyota Prius. PSAT dirancang untuk melakukan simulasi bersama dengan lingkungan lain dan mampu menjalankan rutinitas optimasi. Pengujian HIL dimungkinkan di PSAT dengan bantuan PSAT-PRO, kode kontrol untuk mendukung kontrol komponen dan kendaraan.

Sebagai contoh aplikasi, PSAT digunakan untuk mengoptimalkan HEV paralel untuk penghematan bahan bakar maksimum pada siklus mengemudi komposit. Empat algoritme global – divided rectangle (DIRECT), simulated annealing (SA), genetic algorithm (GA), dan particle swarm optimization (PSO) digunakan dalam optimasi desain berbasis model. Detailnya dapat ditemukan di Bab 13.

14.5 PEMODELAN BERBASIS FISIKA

PSAT dan ADVISOR didasarkan pada model pengalaman dalam bentuk tabel pencarian dan peta efisiensi. Keakuratan alat ini mungkin tidak cukup baik untuk kendaraan yang beroperasi dalam kondisi ekstrem. Untuk pemodelan dinamis dan simulasi sistem HEV yang terperinci, diperlukan pemodelan berbasis fisika. VTB, PSIM, Simplorer, dan V-Elph adalah contoh yang baik dari alat pemodelan berbasis fisika, di mana variabel keadaan komponen atau subsistem dimodelkan sesuai dengan hukum fisika yang mewakili prinsip. Model yang dihasilkan merupakan fungsi dari parameter perangkat, konstanta fisik, dan variabel. Model berbasis fisika seperti itu dapat memfasilitasi simulasi dengan ketelitian tinggi untuk dinamika pada rentang waktu yang berbeda dan juga untuk pengembangan pengontrol.



Gambar 14.5 Teknik pemodelan bentuk pendamping resistif berbasis fisika (RCF).

Pada bagian ini, teknik pemodelan berbasis fisika dieksplorasi – khususnya pemodelan bentuk pendamping resistif (RCF). Metode RCF berasal dari teknik elektro, tetapi cocok untuk aplikasi pemodelan multidisiplin seperti: mesin hibrida.

14.6 TEKNIK PEMODELAN RCF

Metode RCF telah berhasil digunakan di sejumlah alat desain elektronik standar industri seperti SPICE dan Sabre. Baru-baru ini, itu juga telah diterapkan di VTB yang diakui sebagai perangkat lunak terkemuka untuk pembuatan prototipe skala besar, sistem dinamis multiteknik. Dengan menggunakan teknik pemodelan RCF, kita dapat memperoleh model berbasis fisika fidelitas tinggi dari setiap komponen dalam format modular. Model-model ini dapat diintegrasikan dengan mulus untuk membangun model simulasi sistem yang sesuai untuk desain. Sama seperti perangkat fisik yang terhubung ke perangkat lain untuk membentuk suatu sistem, perangkat tersebut dapat dimodelkan sebagai blok dengan sejumlah terminal yang dapat dihubungkan dengan model komponen lainnya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14.5. Setiap terminal memiliki yang terkait lintas variabel dan

melalui variabel. Jika terminalnya listrik, variabel-variabel ini adalah tegangan terminal sehubungan dengan referensi umum dan arus listrik yang mengalir ke terminal, masing-masing. Perhatikan bahwa konsep lintas dan melalui variabel dalam RCF mirip dengan konsep aliran usaha yang digunakan dalam ADVISOR dan PSAT.

Bentuk umum model RCF dapat dinyatakan sebagai berikut, yang diperoleh dengan mengintegrasikan secara numerik persamaan diferensial-aljabar yang menggambarkan dinamika komponen:

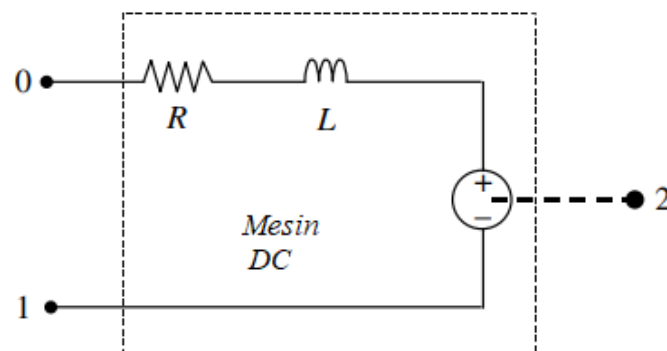
Persamaan 14.11

$$\begin{bmatrix} i(t) \\ 0 \end{bmatrix} = G[v(t), v(t-h), i(t), i(t-h), y(t), y(t-h), t] \\ \times \begin{bmatrix} v(t) \\ y(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b_1[v(t), v(t-h), i(t), i(t-h), y(t), y(t-h), t] \\ b_2[v(t), v(t-h), i(t), i(t-h), y(t), y(t-h), t] \end{bmatrix}$$

di mana \mathbf{i} adalah vektor melalui variabel; \mathbf{v} adalah vektor lintas variabel; \mathbf{y} adalah vektor dari variabel status internal; h adalah langkah waktu integrasi numerik; \mathbf{G} adalah matriks Jacobian; \mathbf{b}_1 , \mathbf{b}_2 adalah vektor-vektor yang bergantung secara umum pada nilai-nilai sejarah masa lalu melalui dan melintasi variabel dan keadaan internal, dan pada nilai-nilai besaran ini pada waktu instan t . Perhatikan bahwa \mathbf{G} , \mathbf{b}_1 , dan \mathbf{b}_2 bergantung pada metode integrasi yang dipilih. Metode integrasi yang paling umum yang dapat digunakan adalah aturan trapesium dan metode Gear orde kedua. Setelah semua komponen powertrain dimodelkan dalam RCF, mereka dapat diintegrasikan ke dalam satu set persamaan aljabar dengan menerapkan kendala konektivitas antara komponen modular tetangga, yang kemudian dapat diselesaikan untuk mendapatkan variabel status sistem.

14.7 PEMODELAN POWERTRAIN HIBRIDA

Contoh pemodelan untuk komponen powertrain diberikan untuk mesin DC, konverter elektronika daya boost DC-DC, dan dinamika kendaraan. Melalui contoh-contoh pemodelan ini, prinsip-prinsip teknik pemodelan berbasis fisika ditunjukkan. Cakupan model yang luas untuk semua komponen powertrain tidak dimaksudkan untuk bab ini.



Gambar 14.6 Pemodelan mesin DC

14.8 PEMODELAN MESIN DC

Model rangkaian ekuivalen dari mesin DC diilustrasikan pada Gambar 14.6, di mana R dan L masing-masing adalah resistansi jangkar dan induktansi. Mesin DC memiliki dua terminal listrik (0,1) dan satu terminal mekanik (2).

Variabel through adalah: $\mathbf{i} = [i_0, i_1, T_{sh}]^t$, di mana $T_{sh} (= i_2)$ adalah torsi mekanik pada poros mesin; superskrip t menunjukkan transpos matriks. Variabel lintas adalah: $\mathbf{v} = [v_0, v_1, \omega]^t$, di mana $\omega (= v_2)$ adalah kecepatan putar poros mesin. Persamaan aljabar diferensial yang menggambarkan dinamika mesin adalah:

Persamaan 14.2

$$\begin{cases} i_0 = -\frac{L}{R} \frac{di_0}{dt} + \frac{1}{R} (v_0 - v_1) - \frac{k_e \phi}{R} v_2 \\ i_1 = -i_0 \\ i_2 = -(K_T \phi) i_0 + J \frac{dv_2}{dt} + d * v_2 \end{cases}$$

di mana J adalah inersia poros, d adalah koefisien hambatan, dan ϕ adalah fluks per kutub. Menerapkan aturan integrasi trapesium, kita mendapatkan model RCF berikut:

Persamaan 14.3

$$i(t) = G(h) * v(t) - b(t-h)$$

Dimana,

Persamaan 14.4

$$G(h) = \begin{bmatrix} \frac{h}{hR + 2L} & -\frac{h}{hR + 2L} & \frac{-hk_e \phi}{hR + 2L} \\ -h & h & -hk_e \phi \\ \frac{h}{hR + 2L} & -\frac{h}{hR + 2L} & \frac{hk_e \phi}{hR + 2L} \\ \frac{-hk_T \phi}{hR + 2L} & -\frac{hk_T \phi}{hR + 2L} & \left(\frac{hk_e \phi hk_T \phi}{hR + 2L} + \frac{2J}{h} \right) \end{bmatrix}$$

Persamaan 14.5

$$b(t-h) = \begin{bmatrix} b_0(t-h) \\ -b_0(t-h) \\ b_2(t-h) \end{bmatrix}$$

Persamaan 14.6

$$\begin{aligned} b_0(t-h) &= \frac{hR - 2L}{hR + 2L} i_0(t-h) - \frac{h}{hR + 2L} v_0(t-h) \\ &+ \frac{h}{hR + 2L} v_1(t-h) + \frac{hk_e \phi}{hR + 2L} v_2(t-h) \end{aligned}$$

Persamaan 14.7

$$b_2(t-h) = -k_T \phi b_0(t-h) + -k_T \phi i_0(t-h) + i_2(t-h) + \frac{2J}{h} - v_2(t-h)$$

Pemodelan Konverter Boost DC-DC

Model rangkaian ekuivalen dari konverter boost DC-DC diilustrasikan pada Gambar 14.7. Konverter boost DC-DC memiliki tiga terminal listrik (0,1, dan 2). Di sini, kita menurunkan model ruang keadaan rata-rata, berdasarkan dua keadaan sirkuit saat sakelar hidup atau mati. Ketika sakelar Q ON, kita memiliki persamaan dinamis ruang keadaan berikut:

Persamaan 14.8

$$\begin{aligned}\frac{di_0}{dt} &= \frac{1}{L}(v_0 - v_1) \\ \frac{d(v_2 - v_1)}{dt} &= \frac{1}{C}i_2\end{aligned}$$

Ketika sakelar Q adalah OFF, kita memiliki persamaan dinamis ruang keadaan berikut:

Persamaan 14.9

$$\begin{aligned}\frac{di_0}{dt} &= \frac{1}{L}(v_0 - v_2) \\ \frac{d(v_2 - v_1)}{dt} &= \frac{1}{C}(i_0 + i_2)\end{aligned}$$

Oleh karena itu, model rata-rata ruang negara bagian Middlebrook adalah ($d = \text{duty}$)

Persamaan 14.10

$$\begin{aligned}\frac{di_0}{dt} &= \frac{d}{L}(v_0 - v_1) + \frac{(1-d)}{L}(v_0 - v_2) \\ \frac{d(v_2 - v_1)}{dt} &= \frac{d}{C}i_2 + \left(\frac{1-d}{C}\right)(i_0 + i_2)\end{aligned}$$

Menerapkan aturan integrasi trapesium, kita mendapatkan model RCF berikut untuk konverter daya boost:

Persamaan 14.11

$$I(t) = G(h) * v(t) - b(t-h)$$

Dimana,

Persamaan 14.12

$$G(h) = \begin{bmatrix} \frac{h}{2L} - \frac{hd}{2L} - \frac{h(1-d)}{2L} \\ -\frac{hd}{2L} - \frac{hd^2}{2L} + \frac{2C}{h} - \frac{hd(1-d)}{2L} - \frac{2C}{h} \\ \frac{h(1-d)}{2L} - \frac{hd(1-d)}{2L} - \frac{2C}{h} - \frac{hd(1-d)^2}{2L} - \frac{2C}{h} \end{bmatrix}$$

Persamaan 14.13

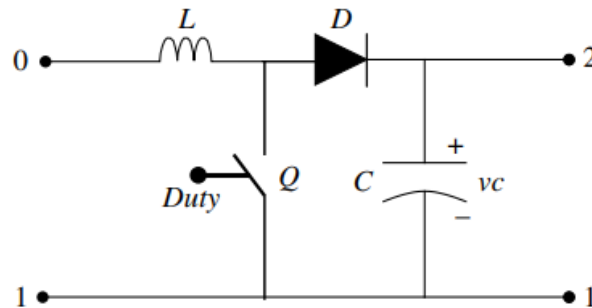
$$b(t-h) = \begin{bmatrix} b_0(t-h) \\ -b_0(t-h) - b_2(t-h) \\ b_2(t-h) \end{bmatrix}$$

Persamaan 14.14

$$b_0(t-h) = -i_0(t-h) - \frac{h}{2L}v_0(t-h) + \frac{hd}{2L}v_1(t-h) + \frac{h(1-d)}{2L}v_2(t-h)$$

Persamaan 14.15

$$b_2(t-h) = -(1-d)b_0(t-h) + (1-d)i_0(t-h)i_2(t-h) \pm \frac{2C}{h}v_1(t-h) + \frac{2C}{h}v_2(t-h)$$



Gambar 14.7 Pemodelan konverter boost DC-DC

14.9 PEMODELAN DINAMIKA KENDARAAN

Model dinamis kendaraan dapat diturunkan dari hukum kedua Newton dengan mempertimbangkan semua gaya yang diterapkan pada kendaraan. Tenaga penggerak berasal dari torsi poros powertrain, yang dapat ditulis sebagai torsi roda:

Persamaan 14.16

$$T_{wh} = R_g \eta_{trans} T_{sh}$$

di mana R_g dan η_{trans} masing-masing adalah rasio roda gigi transmisi dan efisiensi transmisi. Torsi roda ini memberikan tenaga penggerak ke kendaraan:

Persamaan 14.17

$$F_d = \frac{T_{wh}}{r}$$

dimana r adalah jari-jari roda.

Gaya tahanan total terdiri dari tahanan gelinding, tahanan aerodinamis, dan gaya gravitasi. Oleh karena itu, persamaan dinamis kendaraan dapat diperoleh:

Persamaan 14.18

$$\begin{aligned} F_d &= F_{gxt} + F_{roll} + F_{ad} + ma \\ &= mg \sin(\alpha) + mg (C_0 + C_v) \operatorname{sgn}(v) + \frac{1}{2} \rho C_d A_F (v - v_0)^2 \operatorname{sgn}(v) + \left(m + \frac{J_{wh}}{r^2} \right) \frac{dv}{dt} \end{aligned}$$

di mana F_{gxt} adalah gaya gravitasi pada tanjakan, F_{roll} adalah tahanan gelinding, F_{ad} adalah tahanan aerodinamis, m adalah massa kendaraan, g adalah percepatan gravitasi, α adalah sudut kemiringan, C_0 dan C_1 adalah koefisien rolling, ρ adalah densitas udara, C_d adalah koefisien drag aerodinamis, A_F adalah area frontal kendaraan, v_0 adalah kecepatan angin, v adalah kecepatan linier kendaraan, dan J_{wh} adalah inersia roda. Demikian pula, menerapkan aturan integrasi trapesium, kita mendapatkan model RCF berikut: untuk dinamika kendaraan:

Persamaan 14.19

$$i(t) = G(h) * v(t) - b(t-h)$$

di mana variabel melalui adalah $i(t) = F_d$ dan variabel lintas $v(t) = v$ (kecepatan kendaraan). Perhatikan bahwa Persamaan 14.18 adalah model nonlinier, membutuhkan prosedur solusi Newton-Raphson iteratif pada setiap langkah waktu simulasi; $G(h)$ Jacobian adalah:

Persamaan 14.20

$$G(h, v(t)) = mgC_1 \operatorname{sgn}(v) + \rho C_d A_F (v(t) + v_o) \operatorname{sgn}(v) + \frac{2}{h} \left(m_{veh} + \frac{J_{wh}}{r^2} \right)$$

Model RCF lain untuk mesin induksi, baterai, UC, dan sebagainya, dapat ditemukan. Berdasarkan prinsip yang sama, model ICE dan model sel bahan bakar dapat dikembangkan. Terakhir, sebagai contoh penggunaan teknik RCF untuk HEV, model kendaraan sel bahan bakar hibrida-ultrakapasitor-baterai dimodelkan dalam VTB, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14.8. Setelah simulasi, variabel yang menarik dapat diplot, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14.9, di mana referensi kecepatan kendaraan, baterai, UC, dan arus motor DC diplot. Detail cara menggunakan VTB dapat ditemukan.

14.10 MODEL SLIP RODA

Dalam simulasi yang melibatkan dinamika kendaraan, model slip roda harus diimplementasikan.

Gambar 14.10 menunjukkan model satu roda dari HEV. Menerapkan torsi penggerak atau gaya pengereman F_m ke ban pneumatik menghasilkan gaya traksi (pengereman) F_d pada bidang kontak ban-tanah karena slip roda. Rasio slip λ didefinisikan sebagai:

Persamaan 14.21

$$\lambda = \frac{V_\omega - V}{\max\{V, V_\omega\}}$$

di mana V adalah kecepatan kendaraan dan V_ω adalah kecepatan linier roda. Kecepatan roda dapat dinyatakan sebagai:

Persamaan 14.22

$$V_\omega = \omega r$$

di mana ω adalah kecepatan sudut roda dan r adalah jari-jari roda. Selama pengendalian normal, $\lambda > 0$, terdapat gaya gesekan pada roda dengan arah gerak maju. Gaya gesekan ini, juga dikenal sebagai *gaya traksi*, disebabkan oleh slip antara permukaan jalan dan ban. Gaya ini berkontribusi pada gerak maju kendaraan selama mengemudi normal. Selama pengereman, gaya eksternal diterapkan pada roda sehingga kecepatan linier roda kurang dari kecepatan kendaraan; yaitu $\lambda < 0$. Oleh karena itu, terdapat gaya pengereman yang berlawanan dengan gerakan maju.

Gaya traksi, atau gaya pengereman dalam hal pengereman, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14.10, dapat dinyatakan sebagai:

Persamaan 14.23

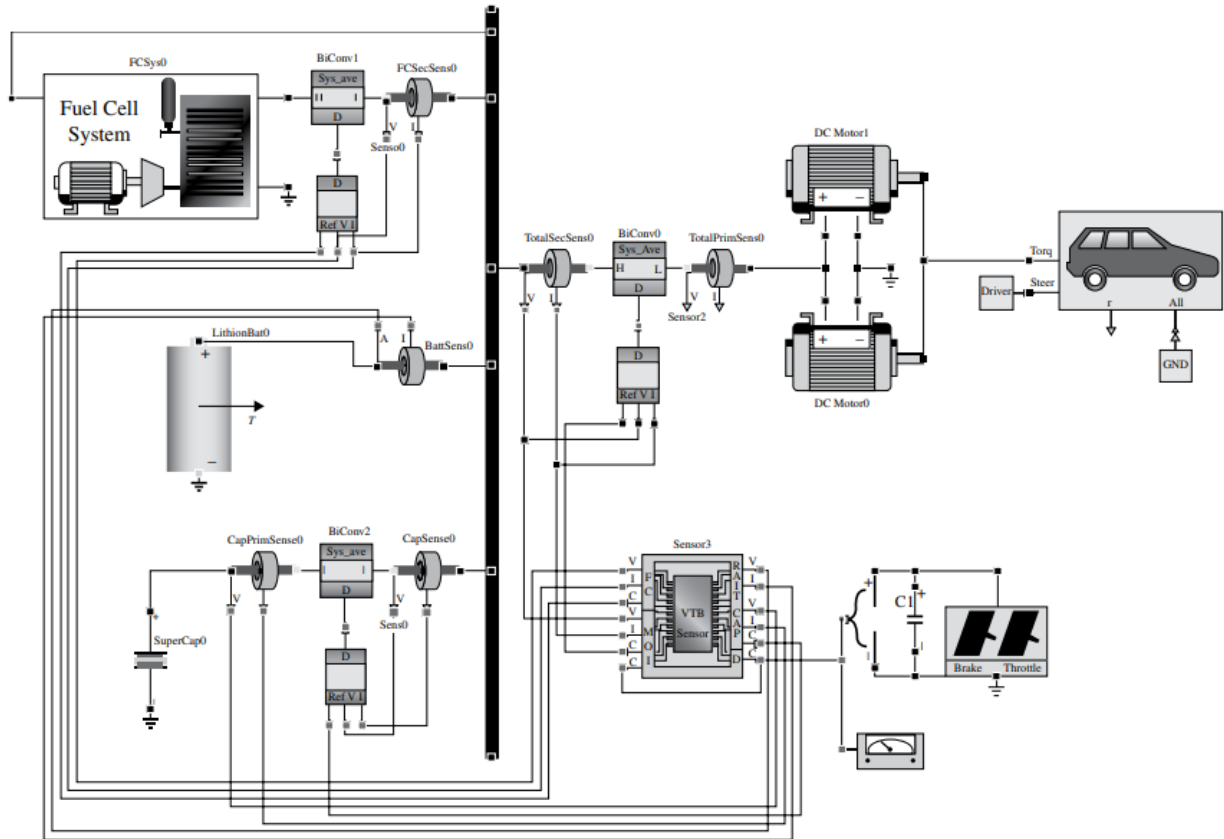
$$F_d(\lambda) = \mu(\lambda) mg$$

di mana $\mu(\lambda)$ adalah koefisien perekat antara permukaan jalan dan ban. $\mu(\lambda)$ adalah fungsi rasio slip λ dan merupakan fungsi dari kondisi ban dan kondisi jalan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14.11. Persamaan gerak kendaraan dapat dinyatakan sebagai:

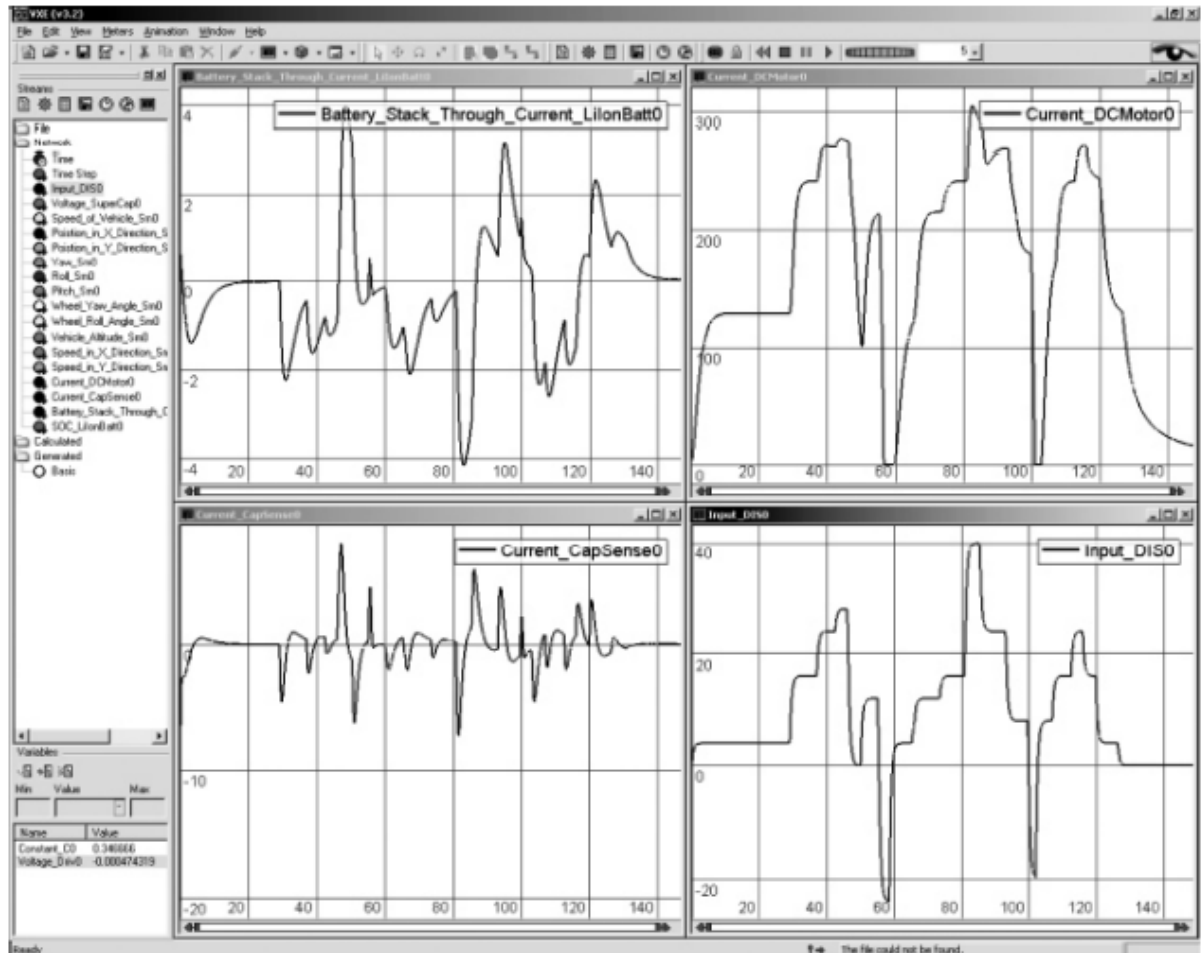
Persamaan 14.24

$$m \frac{dV}{dt} = F_a (\lambda - (F_{gxt} + F_{AD} + F_{roll}))$$

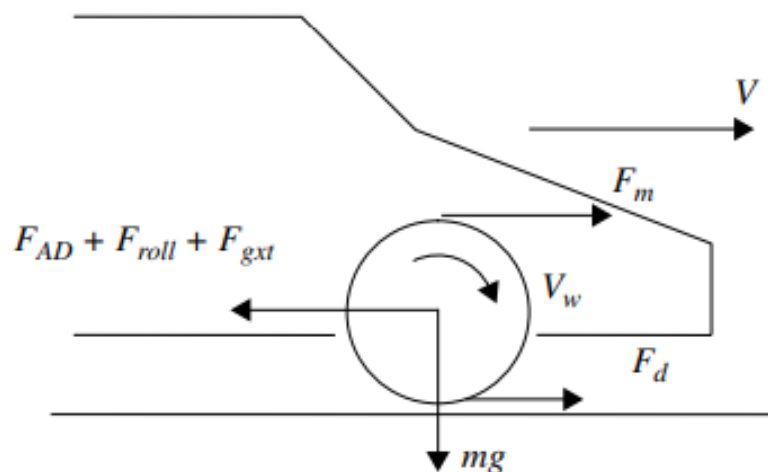
Persamaan ini mirip dengan Persamaan 14.18 tetapi gaya traksi dihubungkan dengan rasio slip.



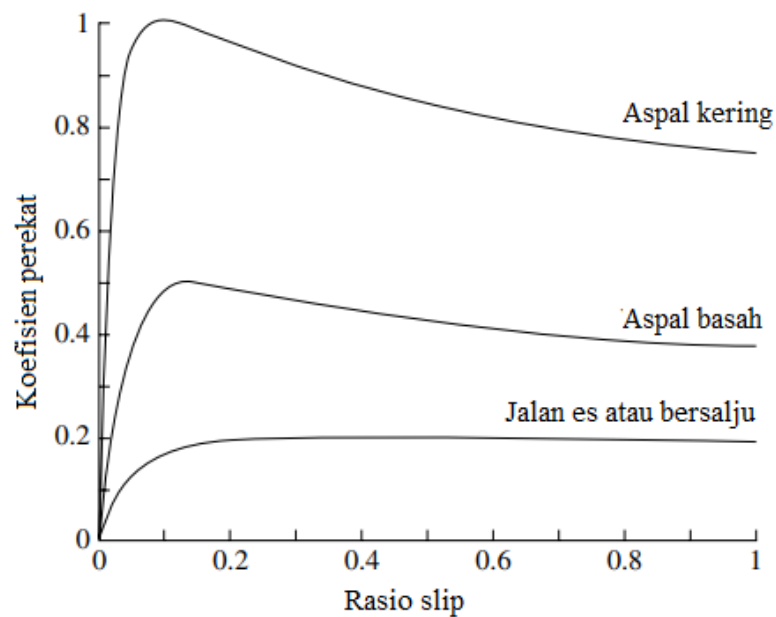
Gambar 14.8 Pemodelan kendaraan hybrid fuel cell/ultrakapasitor/baterai di VTB. Sumber: Dewan Pengawas Universitas Carolina Selatan.



Gambar 14.9 Hasil simulasi kendaraan hybrid di VTb.



Gambar 14.10 Model kendaraan satu roda, di mana F_m adalah gaya yang diterapkan pada roda oleh powertrain, F_d adalah gaya traksi yang disebabkan oleh slip ban, m adalah massa kendaraan



Gambar 14.11 Koefisien perekat tipikal antara permukaan jalan dan ban, sebagai fungsi dari rasio slip dan kondisi permukaan jalan.

Selama mengemudi normal, torsi eksternal yang diterapkan ke roda adalah positif. Untuk memasuki mode pengereman, torsi eksternal harus diterapkan ke roda untuk memperlambatnya. Dalam HEV, torsi ini adalah jumlah dari torsi pengereman regeneratif motor dan torsi pengereman tambahan yang disediakan oleh sistem pengereman mekanis, jika torsi motor tidak cukup untuk memberikan pengereman yang efektif.

Selama mengemudi normal, torsi powertrain mencoba mempercepat roda sementara gaya traksi akan mencoba memperlambatnya. Selama pengereman, torsi powertrain yang diterapkan ke roda berlawanan arah dengan putaran roda dan memperlambat roda. Gaya traksi, di sisi lain, berada dalam arah yang sama dengan putaran roda dan oleh karena itu akan mempercepat roda, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14.10. Oleh karena itu, persamaan gerak roda dapat dinyatakan sebagai:

Persamaan 14.25

$$\frac{J_{\omega} d\omega}{dt} = T_m - rF_d(\lambda)$$

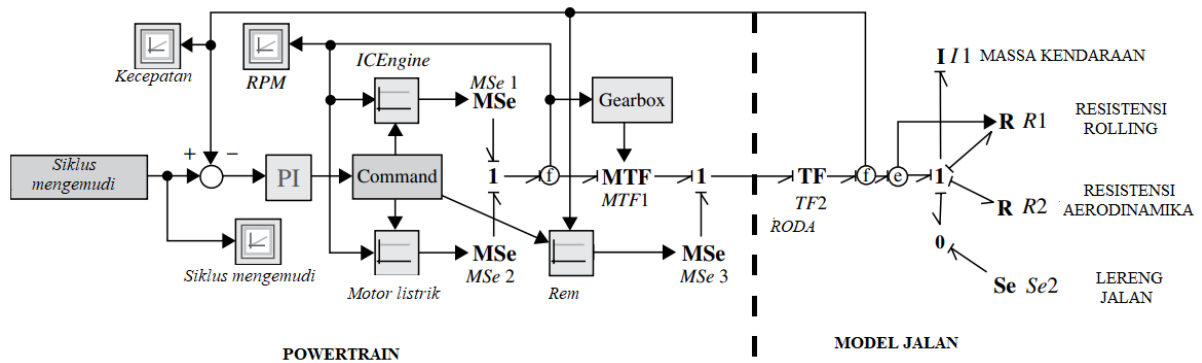
di mana J_{ω} adalah inersia roda dan T_m adalah torsi pengereman total, $T_m = F_m r$

14.11 GRAFIK IKATAN DAN TEKNIK PEMODELAN LAINNYA

Pemodelan Grafik Ikatan untuk HEVs

Dibuat oleh H.M. Paynter pada tahun 1959, grafik ikatan adalah alat grafis yang digunakan untuk menggambarkan dan model interaksi subsistem yang melibatkan pertukaran daya. Formulasi ini dapat digunakan dalam hidrolika, mekatronik, termodinamika, dan sistem kelistrikan. Grafik ikatan telah terbukti efektif untuk pemodelan dan simulasi sistem multidomain termasuk sistem otomotif.

Dalam model grafik ikatan, sistem fisik diwakili oleh elemen pasif dasar yang dapat bertukar daya: *resistances* (R), *capacitances* (C), dan *inertias* (I). Meskipun nama-nama ini menyarankan aplikasi langsung dalam sistem kelistrikan, mereka juga digunakan di domain lain; misalnya, gesekan sebagai hambatan mekanis, fluida kompresibel sebagai kapasitansi, dan flywheel sebagai elemen inersia.



Gambar 14.12 Contoh pemodelan grafik ikatan: model powertrain HEV terhubung ke model jalan.

Setiap elemen memiliki satu atau lebih port di mana pertukaran daya dapat terjadi. *Power (P)* ini dinyatakan sebagai produk dari dua variabel: *effort (e)* dan *flow (f)*. Nama-nama ini digunakan secara luas di semua domain, tetapi memiliki nama unik di setiap domain: gaya dan kecepatan dalam sistem mekanik, tegangan dan arus dalam sistem kelistrikan, tekanan dan aliran dalam hidrolika, dan sebagainya. Variabel tambahan didefinisikan: *momentum (p)* sebagai integral waktu usaha dan *displacement (q)* sebagai integral waktu aliran.

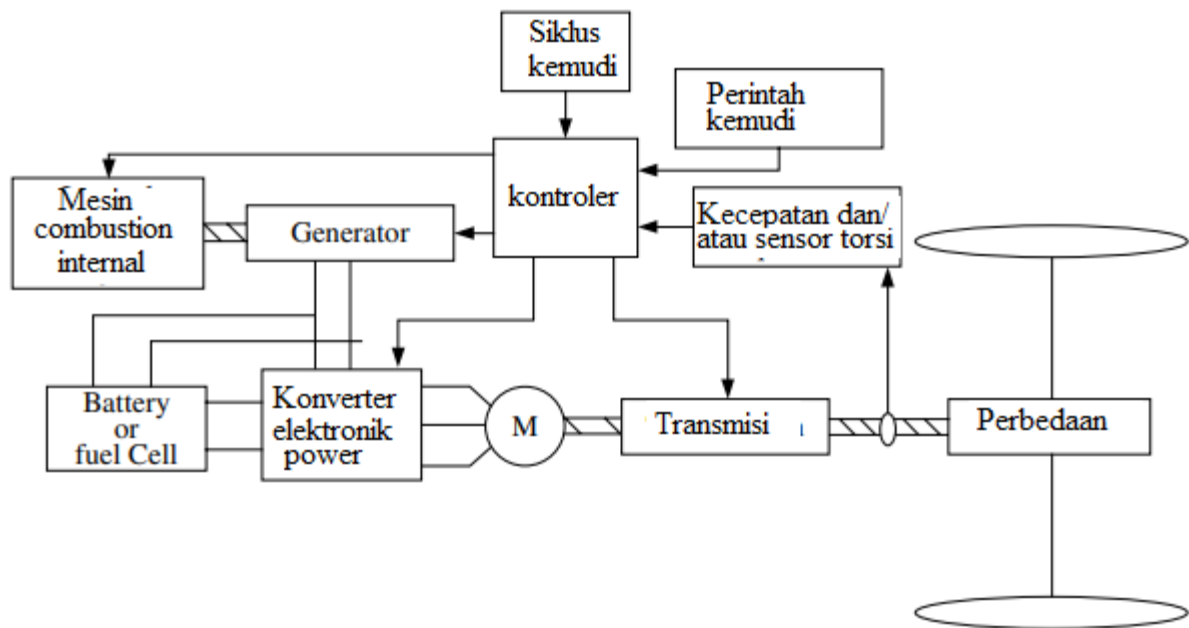
Elemen tambahan diperlukan untuk sepenuhnya menggambarkan sistem: *sources of effort (Se)* dan *sources of flow (Sf)* adalah elemen aktif yang menyediakan sistem dengan upaya dan aliran, masing-masing; transformer (TFs) dan gyrators (GYs) adalah elemen dua port yang mentransmisikan daya, tetapi skala usaha dan variabel aliran mereka dengan modulus mereka; dan elemen *satu persimpangan (1)* adalah elemen multiport yang mendistribusikan aliran daya yang sama, sedangkan elemen *persimpangan nol (0)* mendistribusikan daya, memiliki upaya yang sama di antara semua port.

Elemen grafik ikatan dihubungkan dengan setengah panah (ikatan) yang mewakili pertukaran daya di antara mereka. Arah panah menunjukkan arah aliran daya ketika upaya dan aliran positif. Panah penuh digunakan ketika parameter akan dilewatkan di antara elemen, tetapi tidak ada aliran daya yang terjadi. Grafik ikatan dapat dihasilkan dari struktur fisik sistem. Sebagai contoh, powertrain HEV yang terhubung ke model beban jalan dapat digambarkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14.12, di mana beban jalan dijelaskan oleh Persamaan 14.18.

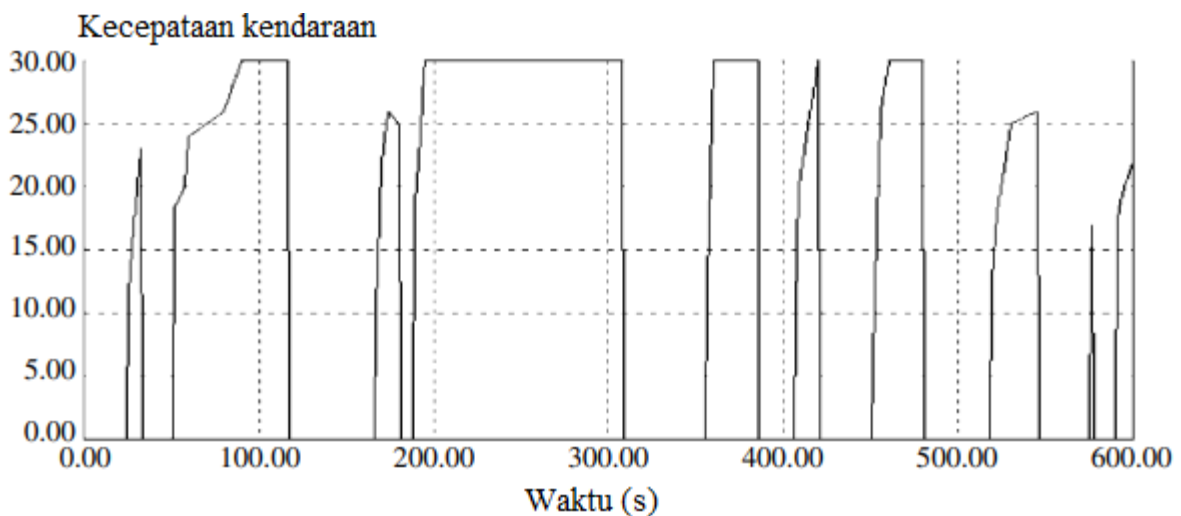
Kausalitas dalam model grafik ikatan ditunjukkan dengan goresan vertikal di awal atau akhir panah ikatan. Stroke kausal ini menetapkan hubungan sebab dan akibat antara unsur-unsur. Kausalitas dalam grafik ikatan memungkinkan ekstraksi persamaan dinamika sistem. Ini juga memberikan wawasan tentang perilaku dinamis model dan berguna untuk memprediksi masalah pemodelan seperti loop aljabar, kausalitas diferensial, dan loop kausal. Pemodelan yang disajikan dalam menunjukkan bahwa pemodelan grafik ikatan adalah alat yang tepat untuk pemodelan dan simulasi kendaraan hibrida dan listrik.

Pemodelan HEV Menggunakan PSIM

PSIM adalah paket simulasi yang mudah digunakan yang awalnya dikembangkan untuk simulasi konverter elektronika daya dan penggerak mesin listrik. Versi barunya memungkinkan interaktif kemampuan simulasi dan menyediakan model magnetik dan termal untuk analisis desain mekatronik otomotif yang lebih fleksibel dan akurat. Namun, dengan beberapa model tambahan yang dibuat oleh pelanggan, itu juga dapat digunakan untuk memodelkan dan mensimulasikan kendaraan listrik dan hibrida.



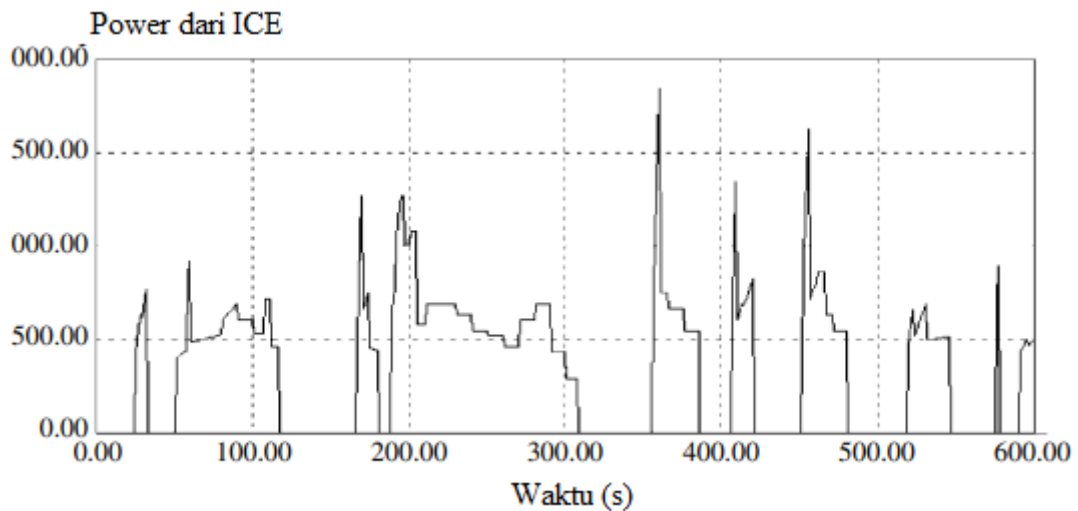
Gambar 14.13 Konfigurasi Seri HEV.



Gambar 14.14 Kecepatan engine ($\times 100$ rpm) vs. waktu dalam detik.

Kotak modul untuk sistem kelistrikan yang diperlukan dan juga untuk mekanik, penyimpanan energi, dan sistem termal dibuat. Modul ini termasuk ICE, konverter bahan bakar, transmisi, skrup torsi, dan baterai. Setelah modul-modul ini dibuat dan disimpan di perpustakaan model PSIM, pengguna dapat membangun model kendaraan listrik atau hibrida. Sebagai contoh, konfigurasi hibrid seri, yang ditunjukkan pada Gambar 14.13, dimodelkan dalam PSIM.

Karena torsi beban hanya dikenakan pada motor penggerak, ICE dapat dioperasikan pada efisiensi optimalnya sepanjang waktu, terlepas dari torsi beban. Oleh karena itu, strategi pengelolaan energinya sederhana. Tugas desain utama difokuskan pada bagaimana dan di mana mengoperasikan ICE di wilayah yang optimal. Hasil simulasi putaran mesin untuk siklus penggerak UDDS disajikan pada Gambar 14.14.



Gambar 14.15 Daya ($\times 100$ W) dari ICE vs. waktu dalam detik.

Model simulasi ini mengasumsikan bahwa daya yang dihasilkan mesin sama dengan daya yang dihasilkan oleh generator dan disimpan langsung di baterai. Itu bisa diamati daya yang dihasilkan saat mesin hidup (Gambar 14.15).

Pemodelan HEV Menggunakan Simplorer dan V-Elph

Simplorer adalah paket simulasi multidomain yang dapat digunakan untuk pemodelan HEV tingkat sistem. Ini memiliki perpustakaan komponen otomotif yang komprehensif, termasuk baterai, sel bahan bakar, kabel (konduktor), sekering, lampu, motor listrik, alternator, model mesin, dan relai, selain elektronik, elektronika daya, dan model pengontrol. Selanjutnya, Simplorer dapat dihubungkan untuk simulasi bersama dengan paket simulasi medan elektromagnetik berbasis elemen hingga, Maxwell. Kemampuan ini memberikan akurasi pemodelan dan simulasi yang lebih baik untuk elektronik otomotif dan desain mesin. Dalam sebuah seri HMMWV listrik hibrida dimodelkan di Simpler. Model kendaraan terdiri dari ICE/generator, motor DC PM, konverter DC–DC, sistem manajemen baterai dan baterai, pengontrol PI, dan model kendaraan. Simulasi memfasilitasi pengembangan dan verifikasi fungsional pengontrol dan manajemen baterai. Respon dinamis/sementara dari tegangan baterai, torsi motor, dan tegangan motor di bawah siklus penggerak yang berbeda dapat disimulasikan. Selain itu, respons kendaraan terhadap kemiringan kemiringan jalan dapat diperoleh untuk memprediksi kinerja sistem secara keseluruhan.

V-Elph adalah pemodelan, simulasi, dan alat analisis berbasis MATLAB/Simulink tingkat sistem yang dikembangkan di Texas A & M University. Paket ini menggunakan detail dinamis model motor listrik, ICE, baterai, dan kendaraan. Performa dinamis dan penghematan bahan bakar, efisiensi energi, emisi, dan sebagainya, dapat diprediksi untuk hybrid dan kendaraan listrik. Selain itu, paket perangkat lunak seperti Modelica juga digunakan dalam pemodelan berbasis fisika dan simulasi kendaraan hibrida dan listrik.

Pertimbangan Metode Integrasi Numerik

Integrasi numerik dari persamaan diferensial atau persamaan keadaan sangat penting untuk melakukan simulasi sistem dinamis. Oleh karena itu, pembahasan metode integrasi numerik merupakan bagian penting dari studi yang berfokus pada pemodelan dan simulasi. Ada beberapa jenis metode integrasi numerik: metode Euler mundur, trapesium, Simpson, Runge–Kutta, Gear, dan sebagainya. Dari metode ini, integrasi trapesium adalah yang paling populer dalam pemodelan dan simulasi dinamis, karena manfaat distorsi rendah dan stabilitas absolut (A-stabil). Misalnya, aturan integrasi trapesium digunakan dalam EMTP, Spice, dan VTB. Namun, osilasi numerik sering dijumpai, terutama dalam simulasi rangkaian elektronika

daya, yang sangat sering digunakan pada powertrain hybrid. Secara khusus, nilai numerik dari variabel tertentu berosilasi sekitar nilai-nilai yang sebenarnya. Dengan kata lain, hanya nilai rata-rata dari hasil simulasi yang benar. Besar dan frekuensi osilasi numerik ini secara langsung terkait dengan parameter elemen penyimpanan energi dan langkah waktu simulasi. Terkadang, masalah ini sangat parah sehingga hasil simulasinya salah.

Dua teknik dapat digunakan untuk mengurangi masalah osilasi numerik semacam ini: trapesium dengan metode penstabil numerik dan metode orde kedua Gear. Penghapusan osilasi numerik sangat penting dalam melakukan simulasi yang berarti untuk rangkaian elektronika daya di mana peralihan perangkat semikonduktor menyebabkan gangguan arus.

14.12 KESIMPULAN

Bab ini telah menyajikan ikhtisar pemodelan dan simulasi HEV, dengan: penekanan khusus pada pemodelan berbasis fisika. Metode untuk mitigasi numerik osilasi dalam simulasi digital dinamis dibahas secara singkat. Teknik simulasi tambahan, seperti pemodelan grafik ikatan, memberikan fleksibilitas tambahan dalam pemodelan dan simulasi HEV.

Dengan munculnya komputasi yang kuat, pengembangan metode komputasi, dan kemajuan dalam pemodelan dan simulasi perangkat software-in-the-loop (SIL) dan HIL, sekarang dimungkinkan untuk mempelajari banyak iterasi dari desain yang berbeda dengan kombinasi komponen yang berbeda dan konfigurasi topologi yang berbeda. HIL menjadi semakin penting untuk rapid prototipe dan pengembangan sistem kontrol untuk kendaraan baru seperti X-by-Wire. Pemodelan dan simulasi akan memainkan peran penting dalam keberhasilan desain dan pengembangan HEV.

BAB 15

UKURAN KOMPONEN HEV DAN PENGOPTIMALAN DESAIN

15.1 PENGANTAR

Salah satu topik penelitian dan pengembangan utama untuk *hybrid electric vehicles* (HEV) adalah powertrain hibrida yang inovatif, yang parameternya harus disetel untuk kinerja kendaraan hibrida yang diinginkan. Powertrain hybrid terdiri dari motor listrik, konverter elektronika daya, perangkat penyimpanan energi seperti baterai dan ultrakapasitor, dan pengontrol canggih, selain komponen klasik seperti *internal combustion engines* (ICE), transmisi, kopling, poros penggerak, dan diferensial. Oleh karena itu, hibrida powertrain jauh lebih rumit daripada powertrain konvensional.

Ukuran komponen dan sistem prototipe dari powertrain hybrid sulit karena banyak pilihan desain dan teknologi yang berkembang pesat di industri otomotif. Biaya dan kinerja powertrain hybrid yang dirancang ditentukan oleh konfigurasi yang dipilih dan ratusan variabel dan parameter desain. Metode desain parametrik dapat digunakan untuk menentukan ukuran komponen kendaraan hybrid. Contoh variabel desain meliputi peringkat daya konverter bahan bakar (ICE), pengontrol motor, jumlah sel baterai, rasio penggerak akhir, dan parameter strategi kontrol. Desain parametrik dapat menghasilkan kendaraan hybrid dengan performa yang lebih baik dari kendaraan baseline. Secara keseluruhan desain tidak mungkin optimal, tetapi dapat digunakan sebagai desain kasar untuk pengoptimalan lebih lanjut sehingga dapat memaksimalkan penghematan bahan bakar dan meminimalkan emisi, berat, dan biaya. Pada saat yang sama, persyaratan kinerja kendaraan harus dipenuhi. Ada berbagai algoritma optimasi yang tersedia untuk desain HEV. Mereka dapat dikategorikan dengan cara yang berbeda: misalnya, algoritma optimasi lokal versus algoritma optimasi global; deterministik versus stokastik; atau berbasis gradien versus bebas turunan. Pilihan algoritma optimasi yang baik untuk penerapan desain powertrain hybrid tidak terlalu jelas. Dalam bab ini, empat algoritma optimasi dibahas secara menyeluruh. Contoh optimasi desain diberikan untuk HEV paralel dan HEV seri. Karena ekspresi analitis untuk fungsi tujuan tidak ada, model simulasi kendaraan digunakan untuk evaluasi fungsi. PSAT (*Powertrain System Analysis Toolkit*) dan ADVISOR dipilih sebagai alat pemodelan HEV untuk studi optimasi. Bab ini mengeksplorasi kelayakan berbagai algoritme pengoptimalan global dengan membandingkan kinerja dan akurasinya.

15.2 ALGORITMA PENGOPTIMALAN GLOBAL UNTUK DESAIN HEV

Untuk desain HEV, kinerja dan tujuan desain, seperti penghematan bahan bakar, dapat dievaluasi dari model kendaraan dan simulasi komputer. Nilai ini juga disebut *fungsi respon*, yang biasanya multimodal (melibatkan banyak minimum lokal), dan kadang-kadang berisik dan terputus-putus. Algoritma berbasis gradien seperti *sequential quadratic programming* (SQP) menggunakan informasi turunan untuk menemukan minimum lokal. Kerugian utama dari algoritma optimasi lokal adalah mereka tidak mencari seluruh ruang desain dan tidak dapat menemukan minimum global.

Derivative-free algorithms such as divided rectangles (DIRECT), simulated annealing (SA), *genetic algorithm* (GA), dan *particle swarm optimization* (PSO) tidak bergantung pada turunan dan karena itu dapat bekerja dengan sangat baik ketika fungsi tujuan berisik dan terputus-putus. Metode bebas turunan seringkali merupakan algoritma global terbaik karena mereka harus sering mencicipi sebagian besar ruang desain agar berhasil. Perbandingan algoritma berbasis gradien dan algoritma bebas turunan untuk optimasi HEV. Perhatikan di sini bahwa meskipun DIRECT, SA, GA, dan PSO algoritma mencari ruang desain secara global,

perbedaan utama adalah DIRECT adalah algoritma deterministik, sedangkan SA, GA, dan PSO adalah algoritma stokastik.

DIRECT

DIRECT adalah algoritma sampling yang dikembangkan oleh Donald R. Jones. Algoritma optimasi global ini merupakan modifikasi dari pendekatan Lipschitz standar yang menghilangkan kebutuhan untuk menentukan konstanta Lipschitz. Konstanta ini merupakan parameter penimbangan, yang menentukan perbedaan penekanan pada pencarian global atau lokal. Penggunaan konstanta Lipschitz dihilangkan dengan mencari semua nilai yang mungkin untuk itu, sehingga memberikan penekanan yang seimbang pada pencarian global dan lokal. Pengantar singkat tentang algoritma DIRECT disajikan di sini, tetapi penjelasan rincinya dapat ditemukan nanti. DIRECT adalah modifikasi dari Lipschitz satu dimensi algoritma oleh Shubert dan perpanjangan untuk masalah multidimensi. Pendekatan yang diusulkan oleh Shubert diberikan sebagai berikut:

Suatu fungsi $f(x)$ yang didefinisikan dalam interval tertutup $[l,u]$ dikatakan memiliki batas bawah sedemikian rupa sehingga terdapat konstanta Lipschitz K positif yang memenuhi kondisi berikut:

Persamaan 15.1

$$|f(x) - f(x')| \leq K|x - x'| \text{ untuk semua } x, x' \in [a, b]$$

Dari Persamaan 15.1, perubahan nilai fungsi $f(x)$ seharusnya lebih kecil dari perubahan antara x dan x' dikalikan dengan konstanta K . Selanjutnya, mari kita substitusi a atau b untuk x' dalam Persamaan 15.1; maka kendala pertidaksamaan berikut diperoleh untuk $f(x)$:

Persamaan 15.2

$$f(x) \leq f(a) + K(x - a)$$

Persamaan 15.3

$$f(x) \leq f(b) + K(x - b)$$

Kedua persamaan ini sesuai dengan dua garis dengan kemiringan $-K$ dan $+K$ seperti yang ditunjukkan pada Gambar 15.1. Kedua garis ini membentuk bentuk V dan nilai terkecil yang mungkin dapat diperoleh $f(x)$ berada di bagian bawah bentuk V; yaitu, $X(a, b, f, K)$. Jadi, $f_{min}(a, b, f, K)$ sesuai dengan batas bawah $f(x)$:

Persamaan 15.4

$$X(a, b, f, K) = \frac{a + b}{2} + \frac{[f(a) - f(b)]}{2K}$$

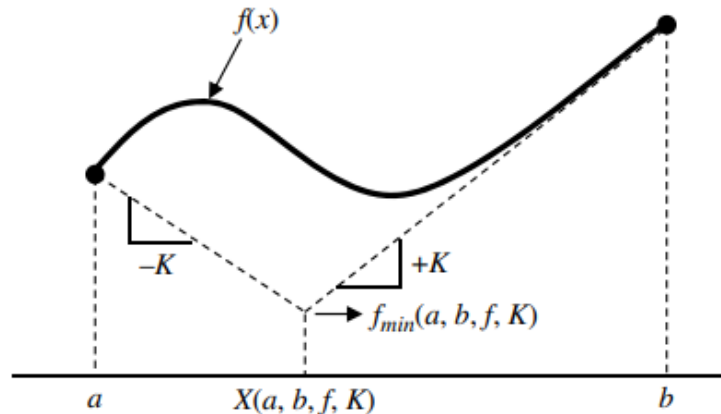
Persamaan 15.5

$$f_{min}(a, b, f, K) = \frac{[f(a) - f(b)]}{2K} - K(b - a)$$

di mana $f(a)$ dan $f(b)$ adalah nilai fungsi dari f di a dan b .

Titik minimum ini diambil sebagai x_1 , yang digunakan untuk membagi ruang pencarian menjadi dua interval. Kemudian salah satu dari dua interval dengan nilai fungsi terkecil f_{min} dipilih untuk divisi lebih lanjut. Pembagian ini dilanjutkan sampai beberapa toleransi yang ditentukan sebelumnya dari final solusi terpenuhi. Persamaan (15.5) menjelaskan pencarian lokal dan global dari algoritma. M9 Istilah pertama mengarah ke pencarian lokal dan istilah kedua mengarah ke pencarian global. Bobot relatif antara pencarian lokal dan global

ditentukan oleh konstanta Lipschitz. Semakin besar nilai K , semakin tinggi penekanan pada pencarian global.

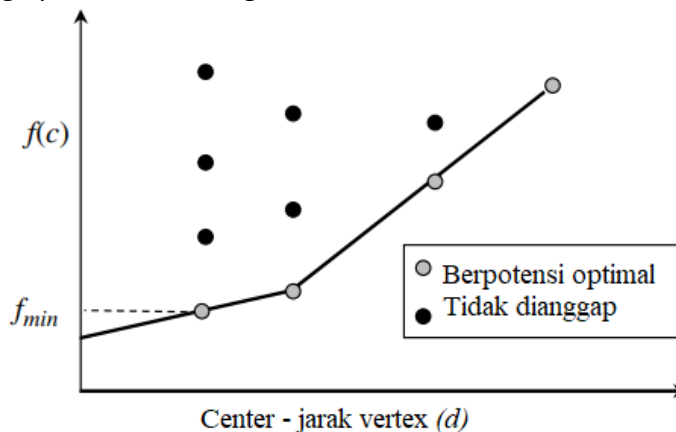


Gambar 15.1 Batas bawah fungsi $f(x)$ menggunakan konstanta Lipschitz.

Namun, pendekatan Lipschitz yang diikuti oleh Shubert memiliki dua kelemahan utama sebagai berikut:

1. Kebutuhan untuk menentukan nilai konstanta Lipschitz K yang benar.
2. Perlunya evaluasi 2n fungsi untuk ruang desain n -dimensi.

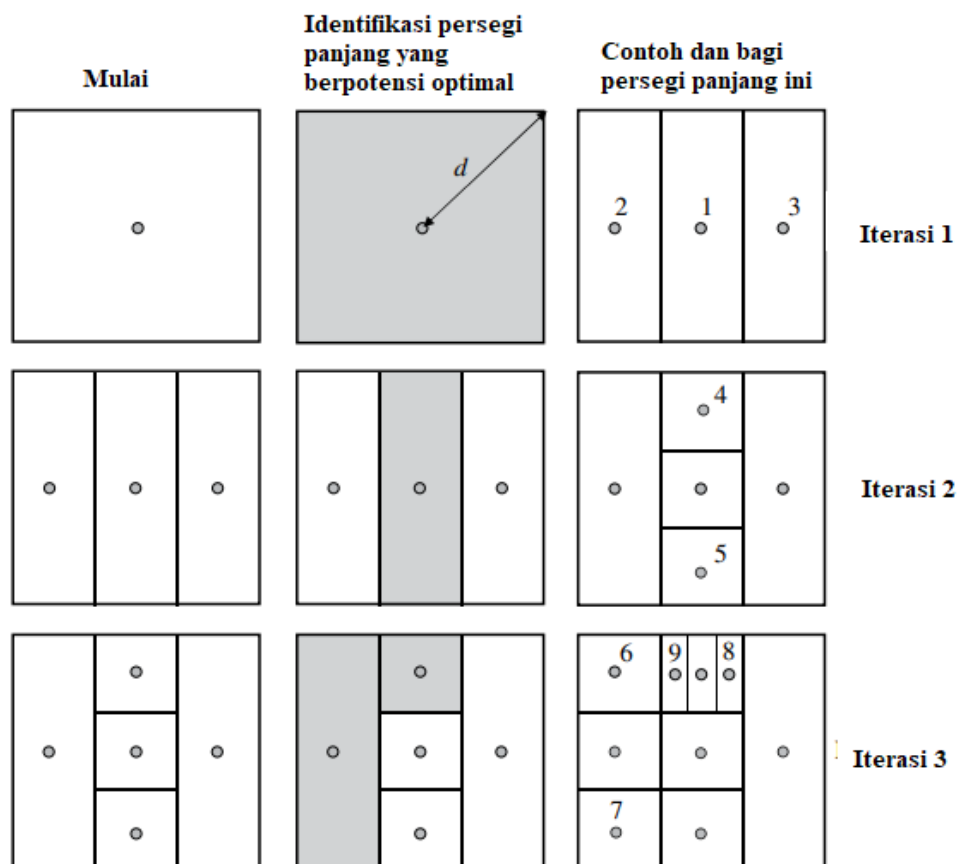
Masalah-masalah ini diperbaiki dalam algoritma DIRECT, di mana pengambilan sampel dilakukan dititik tengah interval daripada di titik akhir untuk mengurangi jumlah evaluasi fungsi. Keseimbangan antara pencarian lokal dan global di DIRECT algoritma dicapai dengan memilih interval optimal (persegi panjang optimal) dengan asumsi semua nilai yang mungkin untuk konstanta Lipschitz. Misalnya, asumsikan bahwa Gambar 15.1 dibagi menjadi 10 interval sehingga diperoleh 10 titik pusat. Nilai fungsi pada titik pusat interval dievaluasi. Plot yang menunjukkan 10 titik ini dengan lebar interval pada sumbu x dan nilai fungsi yang sesuai diberikan dalam Gambar 15.2. Jika sebuah garis dengan kemiringan yang diberikan oleh konstanta Lipschitz K ditarik dari suatu titik, maka intersep y adalah batas lokal untuk fungsi tersebut. Alih-alih menetapkan satu nilai K , diambil berbagai kemungkinan nilai K . Ini memberikan interval batas bawah terendah yang diwakili oleh lambung cembung bawah dari titik-titik yang ditunjukkan pada Gambar 15.2. Prosedur yang sama akan diikuti untuk memilih persegi panjang yang optimal dalam algoritma DIRECT untuk masalah n -dimensi.



Gambar 15.2 Pemilihan persegi panjang menggunakan semua kemungkinan K .

Algoritma DIRECT didasarkan pada latar belakang teoritis di atas, dan pada dasarnya adalah algoritma pengambilan sampel. Pada awal algoritma, kotak ruang desain n -dimensi diskalakan ke hypercube unit n -dimensi. Untuk memulai pencarian, fungsi tujuan desain

dievaluasi pada titik pusat hypercube. DIRECT kemudian membagi tiga persegi panjang ini dan mengambil sampel titik pusat dari dua hiperpersegi panjang yang dihasilkan. Dari sini, DIRECT memilih hiperpersegi panjang yang optimal menggunakan berbagai nilai konstanta Lipschitz dan membaginya menjadi tiga. Contoh pemilihan hyperrectangle yang optimal oleh lambung titik cembung bawah pada Gambar 15.2. Pemilihan hyperrectangle optimal memilih persegi panjang yang lebih besar (pencarian global) serta persegi panjang yang lebih kecil (pencarian lokal). Proses pembagian ini berlanjut sampai evaluasi fungsi yang ditentukan sebelumnya tercapai atau konvergensi tercapai. Pembagian persegi panjang dalam tiga iterasi pertama dari masalah dua dimensi diilustrasikan pada Gambar 15.3. Dalam gambar ini, d menunjukkan jarak antara pusat dan titik, dan setiap titik pusat diberi label dengan angka untuk penjelasan. Pada iterasi pertama, unit hypercube dibagi menjadi tiga persegi panjang. Nilai fungsi tujuan dievaluasi pada titik pusat dari tiga persegi panjang yang dihasilkan.



Gambar 15.3 Tiga iterasi pertama dari masalah dua dimensi.

Pada iterasi pertama, unit hypercube dibagi menjadi tiga persegi panjang. Nilai fungsi tujuan dievaluasi pada titik pusat dari tiga persegi panjang yang dihasilkan. Nilai fungsi tujuan diplot versus jarak pusat-simpul seperti yang ditunjukkan pada Gambar 15.4a. Kemudian persegi panjang dengan nilai objektif terkecil di setiap kolom titik dipilih sebagai persegi panjang yang optimal. Pada iterasi pertama, hanya ada satu kolom titik, jadi persegi panjang 1 dipilih sebagai persegi panjang yang optimal dan dibagi tiga pada iterasi kedua. Demikian pula, pada iterasi kedua, persegi panjang 4 dan persegi panjang 2 memiliki nilai fungsi tujuan terkecil, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 15.4b. Kedua persegi panjang ini dipilih sebagai optimal persegi panjang dan dibelah tiga lagi pada iterasi ketiga. Proses ini dilanjutkan sampai jumlah maksimum evaluasi fungsi habis.

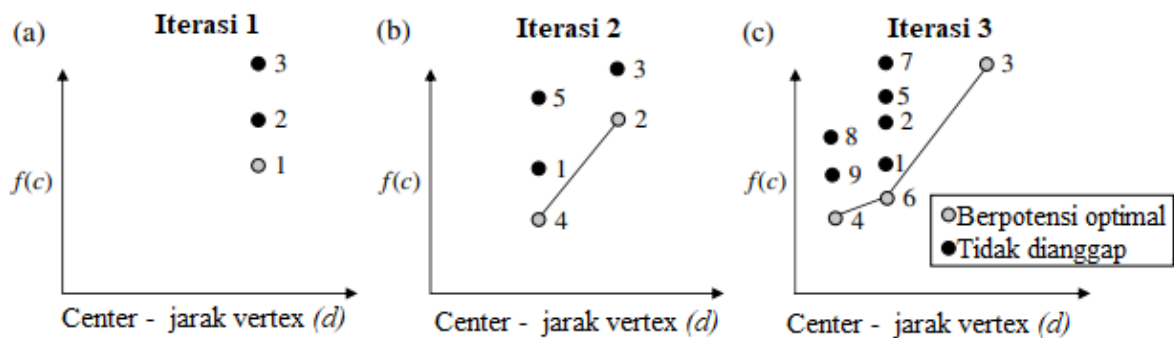
Kendala pertidaksamaan ditangani oleh fungsi bantu yang diberikan yang menggabungkan informasi dari fungsi tujuan dan kendala. Persamaan bantu diberikan dalam

Persamaan 15.6 dan merupakan jumlah tertimbang dari kendala yang dilanggar dan deviasi nilai fungsi tujuan dari minimum global yang diproyeksikan:

Persamaan 15.6

$$\max (f_r - f^*, 0) + \sum_{j=1}^m C_j \max (g_{rj}, 0)$$

Dalam persamaan ini, f_r adalah nilai fungsi tujuan di titik pusat persegi panjang r , f^* adalah asumsi minimum global, m adalah jumlah kendala ketidaksetaraan, c_j adalah koefisien penimbangan positif, dan g_{rj} adalah pelanggaran kendala kendala ke- j di titik tengah persegi panjang r . Diagram alur yang menjelaskan algoritme DIRECT ditunjukkan pada Gambar 15.5.

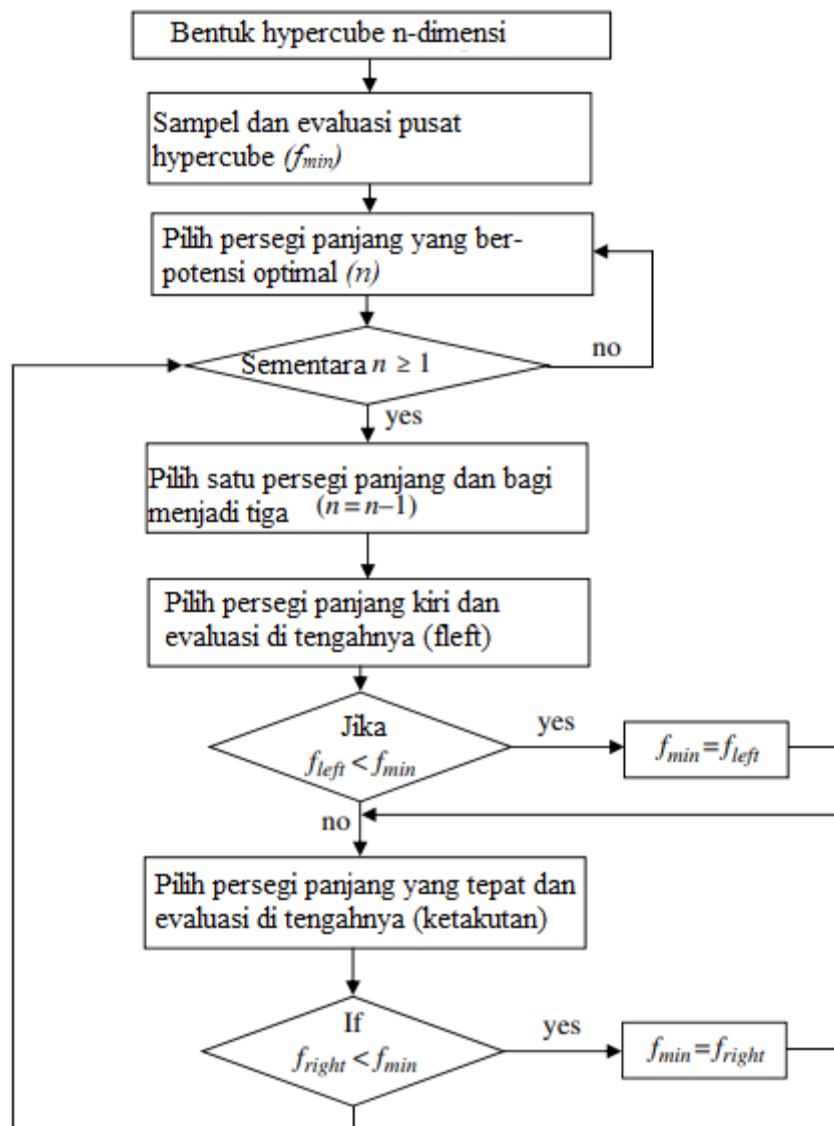


Gambar 15.4 Pemilihan persegi panjang yang optimal di setiap iterasi.

Awalnya, DIRECT mengubah ruang desain n -dimensi menjadi hypercube unit n -dimensi. Ini sampel dan mengevaluasi pada titik pusat persegi panjang ini. Nilai fungsi ini ditetapkan ke variabel f_{min} yang memegang tujuan fungsi minimum nilai. Kemudian satu set persegi panjang optimal dipilih, dengan asumsi berbagai nilai yang mungkin untuk konstanta Lipschitz. Persegi panjang ini membentuk lambung titik cembung yang lebih rendah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 15.4. Namun, pada iterasi pertama, satu-satunya persegi panjang yang ada dipilih sebagai persegi panjang yang optimal. Setiap persegi panjang dalam set persegi panjang optimal dibagi tiga untuk memberikan dua persegi panjang lagi (persegi panjang kiri dan kanan). Fungsi tujuan dievaluasi pada titik pusat persegi panjang kiri dan kanan dan f_{min} diperbarui jika ada peningkatan pada fungsi tujuan. Seluruh proses dilanjutkan sampai sejumlah evaluasi fungsi yang ditentukan sebelumnya tercapai.

Simulasi Annealing

Simulated annealing (SA) termasuk dalam kelas algoritma hill-climbing stokastik, yang berarti mereka mengikuti jalur acak dalam setiap proses pencarian global optimal. SA telah dipresentasikan oleh banyak penulis tetapi Kirkpatrick et al. pada tahun 1983 mulai menggunakannya dalam berbagai masalah kombinatorial. SA didasarkan pada Metropolis et al. Simulasi Monte Carlo diusulkan.



Gambar 15.5 Flowchart menunjukkan algoritma DIRECT.

Deskripsi Algoritma

Algoritma SA analog dengan proses physical annealing yang terjadi pada logam dan meminimasi fungsi. Analogi ini dijelaskan secara singkat di sini. Ketika logam berada pada suhu tinggi, atom-atom dalam struktur kisi dapat bergerak relatif bebas dalam keadaan energi yang lebih tinggi karena pemanasan, dan ketika suhu diturunkan secara perlahan, atom memiliki cukup waktu untuk bergerak dan mulai mengadopsi orientasi paling stabil dengan mengambil keadaan energi serendah mungkin. Namun, jika suhu diturunkan dengan cepat, atom menjadi beku pada keadaan energi tinggi. Mencapai keadaan serendah mungkin dapat dianggap sebagai mencapai minimum global dalam proses optimasi. Temperatur diturunkan secara perlahan (pendinginan) sehingga desain akan menemukan minimum global (keadaan energi terendah). Pada awal algoritma, nilai fungsi tujuan dievaluasi pada titik desain layak acak. Dari desain ini titik, titik desain acak baru dipilih, dan nilai fungsi tujuan dan kelayakan titik desain baru dievaluasi. Jika tetangga baru lebih baik dari yang sebelumnya, maka titik baru diterima sebagai titik optimal; jika tidak, penerimaan atau penolakan titik desain baru bergantung pada kriteria probabilitas,

Persamaan 15.7

$$P(f, T) = e^{-\left[\frac{f_{new} - f_{current}}{T}\right]}$$

Dari persamaan ini terlihat bahwa titik baru lebih mungkin diterima jika nilai fungsi titik desain baru mendekati nilai fungsi titik desain saat ini. Juga, kemungkinan menerima titik desain lebih tinggi ketika suhu tinggi. Perhatikan di sini bahwa titik desain baru mungkin diterima meskipun tidak sebagai sebaik (yaitu nilai fungsi pada titik baru lebih tinggi) titik desain saat ini. Namun, fitur ini akan membantu metode menghindari terjebak dalam minimum lokal. Jadi, awalnya, ketika suhu tinggi, algoritme melakukan pencarian global di mana bahkan poin desain yang lebih buruk lebih mungkin diterima, dan kemudian beralih ke pencarian lokal saat suhu diturunkan, di mana poin desain yang lebih buruk berada kecil kemungkinannya untuk dipilih. Jadi, beralih dari pencarian global ke pencarian lokal tergantung pada nilai suhu; ini disebut *gradual cooling* – hingga bertahap mengurangi kemungkinan menerima titik desain tetangga dengan kinerja yang lebih buruk. Parameter lain yang bertanggung jawab untuk beralih dari pencarian global ke lokal adalah ukuran langkah maksimum. Variabel ini berkurang seiring berjalannya algoritma, memaksanya untuk mencari lebih lokal. Jika salah satu dari jumlah pengurangan suhu yang ditentukan siklus atau jumlah evaluasi fungsi yang telah ditentukan terlampaui, maka algoritma akan berhenti.

Parameter Tunable

SA memiliki banyak parameter yang perlu disetel untuk meningkatkan efisiensi algoritma. Jadi, perhatian khusus harus diberikan pada parameter ini. Parameter yang digunakan dalam algoritma ini adalah:

- *num_steps*: jumlah langkah sebelum mengurangi suhu dan ukuran langkah maksimum
- *TO_init*: suhu awal
- *VO_init*: ukuran langkah awal (maksimum)
- *temp_red*: faktor penurunan suhu; suhu untuk siklus berikutnya dikurangi oleh faktor ini
- *VO_red*: faktor ini dikalikan dengan ukuran langkah awal untuk mendapatkan ukuran langkah untuk titik desain berikutnya.

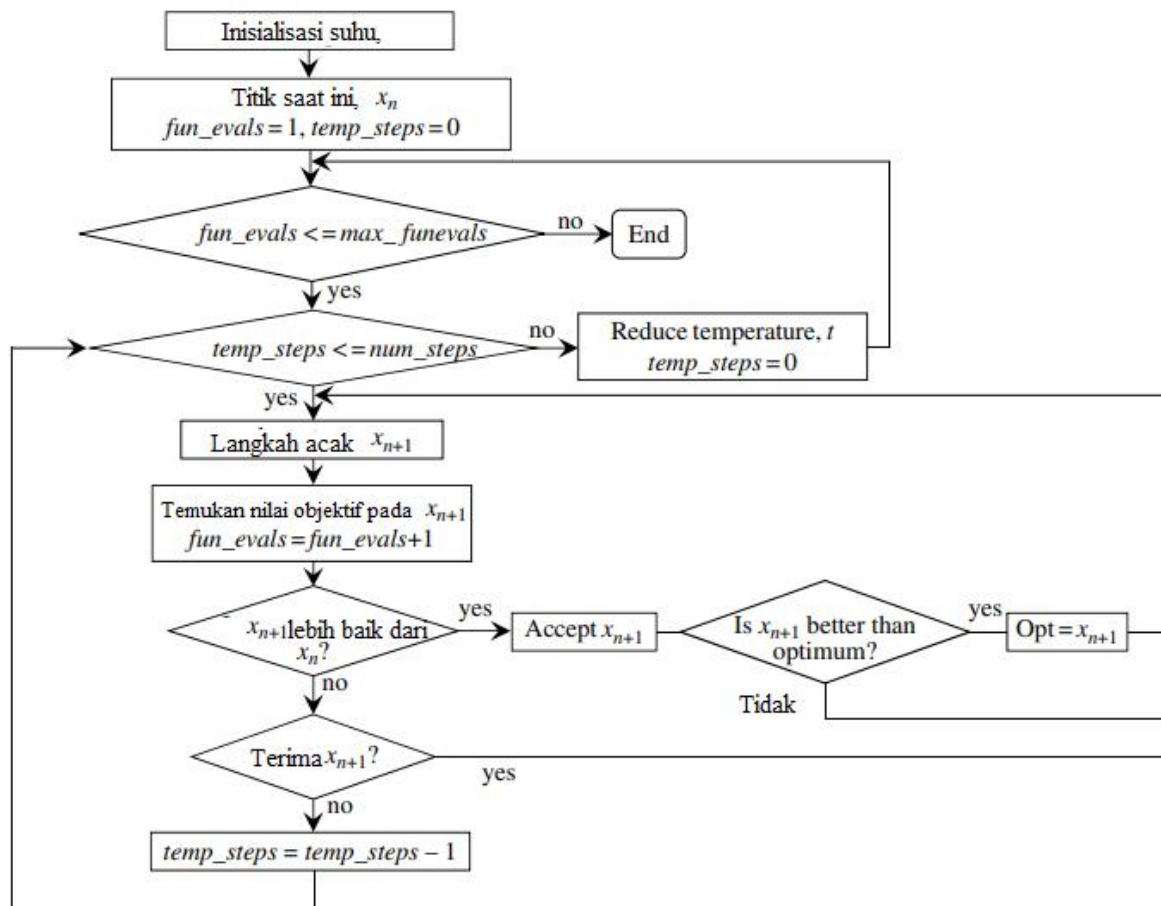
Flow Chart

Diagram chart yang menunjukkan inti SA diberikan pada Gambar 15.6. SA dimulai dengan menginisialisasi suhu t . Selanjutnya, titik desain acak x_n dipilih, sehingga memenuhi semua kendala dan semua variabel desain berada dalam batas (yaitu titik yang layak). Titik ini dilewatkan sebagai titik saat ini ke inti algoritma. SA dilakukan dalam dua loop. Loop luar mendefinisikan jumlah evaluasi fungsi yang harus dijalankan oleh algoritme sebelum diakhiri. Parameter ini ditentukan oleh parameter *max_funevals*. Loop dalam menentukan jumlah langkah setelah itu suhu dan ukuran langkah untuk x_n untuk melompat ke x_{n+1} dikurangi. Parameter ini ditentukan oleh *parameter num_steps*. Seperti dibahas di atas, parameter ini bertanggung jawab untuk beralih dari pencarian global ke pencarian lokal. Seperti yang ditunjukkan pada diagram chart, titik layak yang ditemukan awalnya dibuat arus titik x_n . Kemudian, itu membuat langkah acak ke x_{n+1} dan nilai fungsi tujuan dan kendala dihitung pada langkah berikutnya. Ukuran langkah saat ini digunakan dalam menemukan titik desain baru. Pada langkah selanjutnya, nilai fungsi dan kendala pada titik desain ini dievaluasi. Kemudian titik desain baru dibandingkan dengan titik desain lama untuk melihat apakah lebih baik atau tidak. Perbandingan ini dilakukan dengan metode penalti. Fungsi penalti kuadrat berikut digunakan:

Persamaan 15.8

$$Penalty(x_i) = f(x_i) + \sum_n^{j=1} \left\{ f(x_i) \left[\frac{\max(0, g_j(x_i))}{\text{bounding value}_j} \right] \right\}^2$$

di mana g_j menunjukkan batasan desain dan n adalah jumlah total batasan desain. Fungsi ini memberikan nilai penalti yang lebih tinggi pada titik desain yang lebih banyak melanggar batasan desain. Jadi, jika nilai penalti titik x_{n+1} saat ini lebih kecil dari penalti untuk titik desain x_n , maka nilai tersebut diterima dan diuji untuk melihat apakah nilai tersebut lebih baik dari nilai optimum saat ini. Jika lebih baik, maka ditetapkan sebagai optimal saat ini dan titik ini diumpankan kembali untuk menghasilkan titik desain baru. Jika penalti titik x_{n+1} saat ini lebih dari penalti untuk titik desain x_n maka keputusan penerimaannya diambil dengan menggunakan kriteria Metropolis yang diberikan dalam Persamaan (15.7). Jika titik saat ini diterima maka titik desain baru dihasilkan berdasarkan titik desain x_{n+1} . Jika tidak diterima kemudian $temp_step$ dinaikkan 1 dan kemudian titik desain baru dihasilkan dari titik desain sebelumnya x_n .



Gambar 15.6 Diagram alir yang menunjukkan algoritma simulasi annealing.

Genetic Algorithms

Algoritma genetika (GA) didasarkan pada proses evolusi dan konsep seleksi alam Darwin. Dalam seleksi ini, hanya populasi yang paling cocok yang bertahan dan diizinkan untuk menghasilkan keturunan sementara populasi yang buruk disingkirkan. Selama proses tersebut, beberapa proses alami seperti crossover, mutasi, dan seleksi alam digunakan untuk memilih populasi yang paling cocok. Konsep yang sama diperluas ke masalah optimasi matematis di mana hanya titik desain yang baik yang dipilih sementara titik desain yang buruk diabaikan. Dalam konteks ini, fungsi tujuan biasanya disebut sebagai *fungsi fitness*, dan proses

“survival of the fittest” menyiratkan maksimisasi prosedur. Kendala desain dapat dimasukkan sebagai hukuman dalam fungsi kebugaran.

Flow Chart

Diagram alur untuk GA diberikan pada Gambar 15.7. GA dimulai dengan menghasilkan atau menyemai populasi awal solusi kandidat secara acak (titik desain). Dimulai dengan populasi acak awal, GA kemudian menerapkan urutan operasi seperti desain crossover dimana dua individu (orang tua) dari populasi awal dipilih secara acak dan direproduksi untuk mendapatkan dua individu baru (anak), dan mutasi dimana satu individu dari populasi awal sedikit diubah untuk mendapatkan individu baru. Jika individu baru yang dihasilkan dari crossover dan operator mutasi lebih baik dari orang tua yang digunakan, maka orang tua akan digantikan oleh individu yang baru dibuat. Sekali lagi, pada akhirnya, poin desain terburuk disingkirkan dari populasi untuk meningkatkan fungsi kebugaran. Seluruh proses dapat disebut sebagai satu generasi dan dilanjutkan untuk beberapa generasi atau sampai jumlah maksimum evaluasi fungsi habis untuk lebih meningkatkan fungsi kebugaran.

Operator dan Metode Pemilihan

Ada banyak operator untuk GA. Operator crossover aritmatika dijelaskan sebagai berikut. Dua orang tua bereproduksi untuk menghasilkan dua individu baru (anak). Individu induk dipilih secara acak. Individu yang baru dihasilkan dapat direpresentasikan sebagai kombinasi linier dari orang tua sebagai:

Persamaan 15.9

$$\begin{aligned} X_{ind1} &= r * X_{par1} + (1 - r) * X_{pasr2} \\ X_{ind2} &= (1 - r) * X_{pasr1} + r * X_{par2} \end{aligned}$$

di mana X_{ind1} , X_{ind2} mewakili dua individu yang baru dibuat, X_{par1} , X_{par2} mewakili orang tua, dan r mewakili variabel acak antara 0 dan 1.

Dalam mutasi, orang tua dipilih dan diubah untuk mendapatkan individu baru. Metode seleksi diperlukan untuk memilih individu yang paling cocok. Metode seleksi geometris yang dinormalisasi, yang merupakan metode tipe peringkat, digunakan sebagai seleksi metode. Metode peringkat dipilih karena adanya fitness negatif. Dengan metode seleksi ini, probabilitas diberikan kepada setiap individu dari populasi menggunakan Persamaan (15.10), di mana q menunjukkan probabilitas memilih desain terbaik, r menunjukkan peringkat individu, dan P ukuran populasi:

Persamaan 15.10

$$\text{Probabilitas setiap individu} = \frac{q}{1 - (1 - q)^p} (1 - q)^{r-1}$$

Parameter Tunable

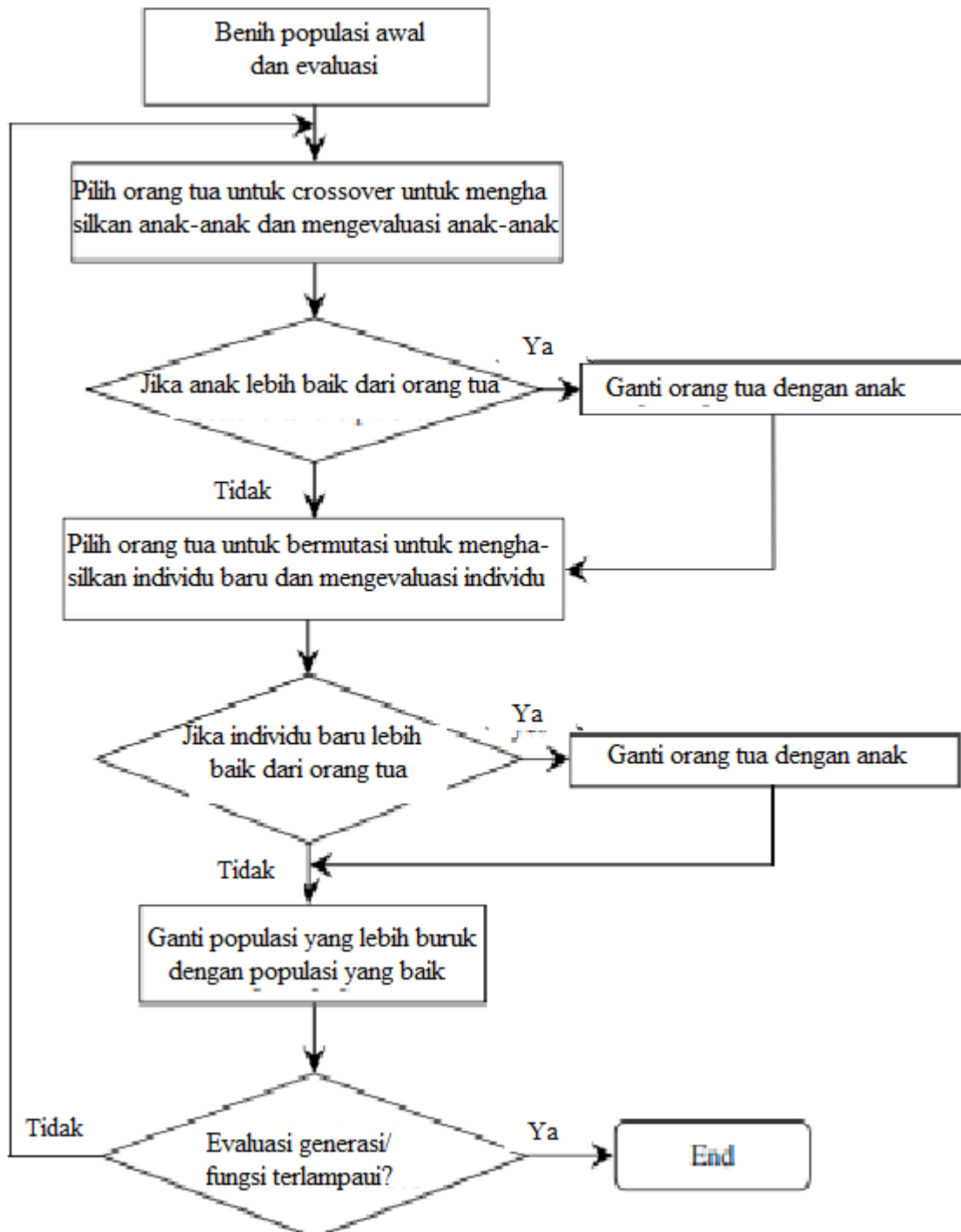
Seperti SA, GA memiliki banyak parameter yang perlu disetel untuk kinerja yang lebih baik, meskipun GA memiliki parameter tunable lebih sedikit daripada SA. Parameter tunable dan deskripsi mereka adalah

- *pop_size*: jumlah individu dalam satu generasi
- *xoverfns*: berapa kali operasi crossover harus dilakukan
- *mutFNs*: berapa kali operasi mutasi harus dilakukan.

Optimasi Segerombolan Partikel

Particle swarm Optimization (PSO) dikembangkan oleh Kennedy dan Eberhart, dan merupakan teknik optimasi global stokastik berbasis evolusi. Ide dari PSO berasal dari kecerdasan swarm yang ditemukan di banyak sistem alami dengan perilaku kelompok. Sistem

seperti itu biasanya terdiri dari populasi (kerumunan) agen atau partikel sederhana yang berinteraksi secara lokal dengan tetangga mereka dan dengan organisasi kelompok mereka. Sekelompok semut, kawanan burung, dan kawanan hewan adalah beberapa contoh dari sistem alam tersebut. Dalam sistem ini, agen berinteraksi secara lokal dan ini dapat menghasilkan perilaku global. Sebagai contoh, individu dapat mengubah posisi atau kecepatan secara lokal dan pola perilaku global dapat diamati. Prinsip yang mendasarinya digunakan untuk mengembangkan teknik untuk menemukan maksimum global dalam masalah optimasi.



Gambar 15.7 Diagram alir yang menunjukkan algoritma genetika.

Deskripsi Algoritma

Sama seperti GA, PSO adalah prosedur pencarian berbasis populasi. Pada awalnya, solusi acak yang disebut *partikel* diinisialisasi dalam ruang d didefinisikan oleh sebuah titik dalam ruang desain yang disebut *posisi* dan kecepatan terbangnya disebut *kecepatan* esain multidimensi. Dalam sistem PSO, setiap partikel terbang di ruang desain multidimensi mencari maksimum global. Setiap partikel dalam PSO. Juga, setiap partikel menyadari posisi terbaiknya sejauh ini (*pbest*) dan posisi terbaik grup sejauh ini (*gbest*). Selama penerbangan, setiap partikel menyesuaikan posisinya menurut pengalamannya sendiri (*pbest* value), dan juga menurut pengalaman partikel tetangganya (*gbest* value). Posisi dimodifikasi menggunakan konsep kecepatan. Kecepatan setiap partikel diperbarui sebagai berikut:

Persamaan 15.11

$$v_i^{n+1} = kv_i^n + \alpha_1 rand_1(pbest_i - p_i^n) + \alpha_2 rand_2(gbest - p_i^n)$$

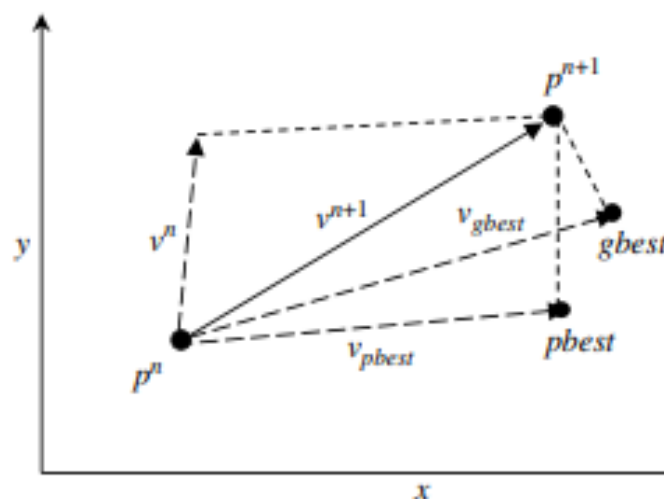
dimana v_i^{n+1} adalah kecepatan partikel i pada iterasi $n+1$, k adalah fungsi pembobotan, α_1 dan α_2 adalah faktor penimbangan, $rand_1$ dan $rand_2$ adalah dua bilangan acak antara 0 dan 1, p_i^n adalah posisi partikel i pada iterasi n , *pbest* adalah posisi terbaik dari partikel i , dan *gbest* adalah posisi terbaik dari grup (terbaik dari semua *pbest*). Untuk contoh studi di Bagian 15,4, $k = 0,6$ dan $\alpha_1 = \alpha_2 = 1,7$ diambil untuk konvergensi yang lebih baik. Demikian pula posisi diperbarui sebagai berikut:

Persamaan 15.12

$$p_i^{n+1} = p_i^n + v_i^{n+1}$$

Pembaruan kecepatan dan posisi untuk partikel i diilustrasikan pada Gambar 15.8. Perhatikan bahwa gambar ini mewakili masalah dua dimensi.

Dari Gambar 15.8, dapat dilihat bahwa posisi partikel menyesuaikan diri ke posisi *gbest*. Hal ini karena kecepatan telah berubah arah menuju nilai *pbest* dan *gbest*.



Gambar 15.8 Pembaruan kecepatan dan posisi dalam optimasi gerombolan partikel.

Kendala di PSO diperlakukan dengan cara yang sama seperti di SA dan GA. Sebuah penalti diberikan untuk setiap titik desain menggunakan Persamaan (15.8). Hukumannya digunakan untuk memperbarui *pbest* dan *gbest* untuk setiap partikel. Untuk partikel i , nilai *pbest* diperbarui jika penalti partikel lebih kecil dari penalti terbaik sebelumnya. Hal yang sama dilakukan ketika *gbest* diperbarui. Ini memastikan bahwa fungsi tujuan dimaksimalkan.

Flow Chart

Diagram chart yang mewakili algoritme PSO ditunjukkan pada Gambar 15.9. Algoritma dimulai dengan menginisialisasi populasi (partikel) dari titik desain acak. Dalam kasus PSO, solusi acak dinormalisasi untuk kinerja yang lebih baik. Ukuran populasi (n) ditentukan oleh pengguna. Titik desain acak dievaluasi untuk memberikan langkah selanjutnya. Awalnya, nilai posisi terbaik ($pbest$) dan nilai objektif terbaik ($pbestval$) dari setiap partikel ditetapkan ke nilai posisi awal (pos) dan nilai awal terbaik nilai (out).

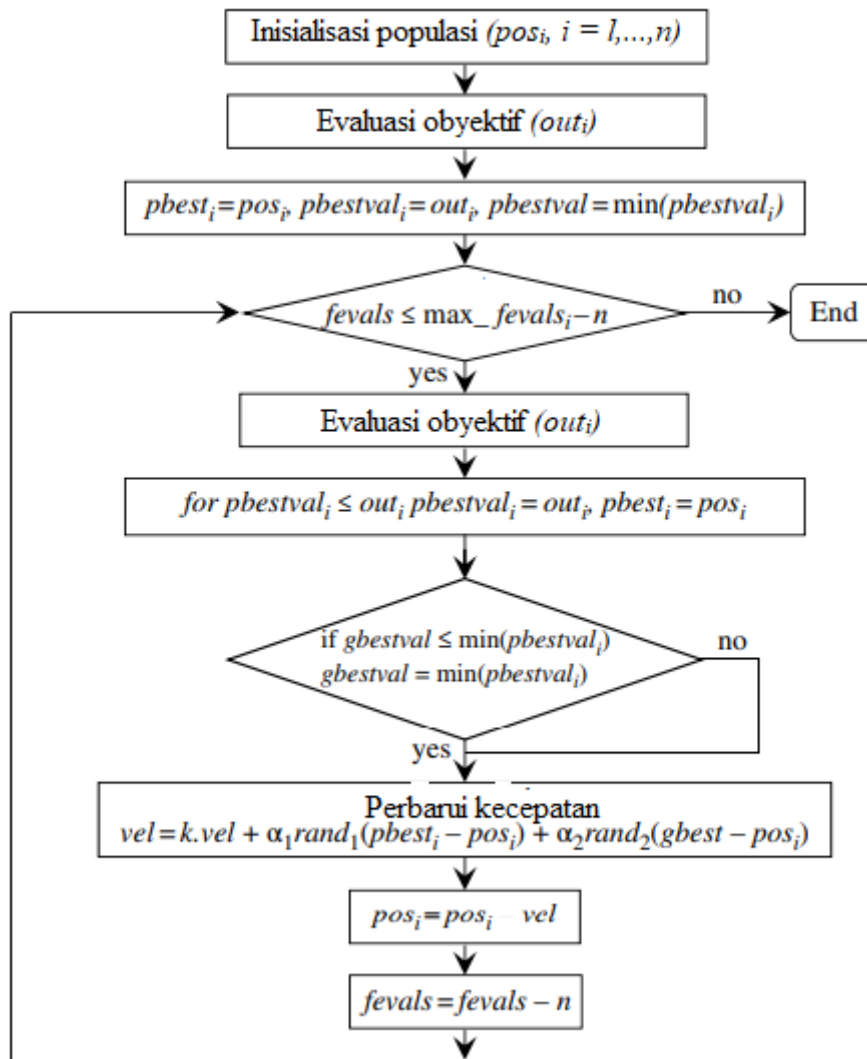
Nilai terbaik dari semua partikel ($gbestval$) adalah nilai terkecil dari semua $pbest$. Variabel $gbestval$ memegang maksimum global terbaik saat ini dari fungsi tujuan. Selanjutnya, ketika loop dijalankan untuk sejumlah evaluasi fungsi tertentu. Perulangan ketika memperbarui nilai $pbest$ dan $pbestval$ jika ada peningkatan pada nilai $pbest-val$ saat ini. Itu juga memperbarui $gbestval$ jika ada peningkatan. $Pbest$ dan $gbest$ yang diperbarui digunakan untuk menentukan kecepatan (vel) dan posisi (pos) yang baru. Evaluasi fungsi ($fevals$) ditambah dengan ukuran populasi setiap iterasi.

15.3 KEUNTUNGAN/KERUGIAN DARI ALGORITMA PENGOPTIMALAN YANG BERBEDA

Berikut ini, keuntungan dan kerugian dari empat algoritma optimasi yang berbeda di atas dibahas.

DIRECT

DIRECT tidak memiliki parameter tuning untuk mendapatkan kinerja algoritmik yang baik. Selain itu, pengguna tidak perlu menentukan titik awal karena DIRECT menggunakan titik pusat ruang desain sebagai titik awalnya. Oleh karena itu, menghilangkan masalah memilih titik awal yang baik. Perhatikan di sini bahwa pengoptimal lokal memerlukan titik awal yang baik untuk mencapai nilai optimum. Keuntungan lain adalah DIRECT mencakup seluruh ruang desain, menghindari kemungkinan kehilangan optimal global.



Gambar 15.9 Diagram alir optimasi gerombolan partikel

DIRECT dapat menyatu ke wilayah optimal global setelah lebih sedikit evaluasi fungsi, tetapi untuk benar-benar mencapai titik optimal global lebih banyak evaluasi fungsi sering diperlukan. Algoritma ini dapat diimplementasikan untuk komputasi paralel.

SA

Keuntungan utama SA adalah algoritma yang sangat efisien untuk menemukan minimum global. Ia menerima beberapa poin yang lebih buruk selama proses dengan harapan menemukan minimum global. Kerugian dari SA adalah parameter tuning yang dibahas di atas. Set parameter yang tepat diperlukan untuk meningkatkan efisiensi algoritma. Penyetelan ini pada gilirannya menjadi masalah optimasi. Mirip dengan DIRECT, SA efisien dalam menemukan wilayah minima global, tetapi untuk mencapai minima global yang sebenarnya lebih banyak evaluasi fungsi sering diperlukan.

GA

Populasi awal yang dihasilkan terutama menentukan titik awal yang baik untuk GA. Jadi, dapat diungkapkan dengan beberapa poin desain yang baik untuk meningkatkan efisiensinya. Sesuai dengan sifat masalah desain, berbagai jenis metode seleksi dan operator untuk crossover dan mutasi dapat dipilih dalam menggunakan GA.

Kerugian utama adalah penyetelan parameter. Juga, populasi awal dipilih secara acak. Populasi awal acak ini mungkin tidak mencakup seluruh ruang desain seragam. Diamati bahwa sebagian besar titik desain yang dihasilkan oleh operator crossover dan mutasi tidak dapat

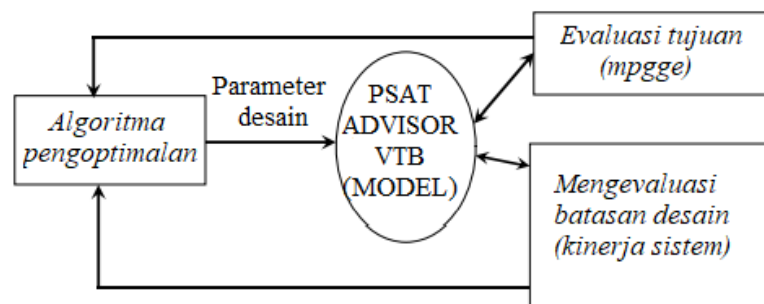
memenuhi kendala (titik tidak layak) karena operator tidak memiliki pengetahuan tentang kendala. Ini menghasilkan banyak poin yang tidak layak. Inilah alasan mengapa algoritme mengalami kesulitan dalam meningkatkan yang terbaik nilai fungsi tujuan yang ditemukan dalam populasi acak awal.

PSO

Keuntungan utama dari algoritma PSO adalah lebih sedikit parameter yang perlu disesuaikan dibandingkan dengan SA dan GA. Konstanta untuk memperbarui kecepatan sangat penting dalam memperoleh kinerja yang lebih baik. Banyak set konstanta yang tersedia dan cocok untuk masalah tertentu. Selain itu, tidak ada operator alami seperti crossover, mutasi, dan seleksi yang diperlukan dalam PSO. Selain itu, PSO lebih mudah dipahami dengan persamaan yang lebih sederhana. Kerugiannya terletak pada pemilihan konstanta untuk memperbarui kecepatan. Jika konstanta yang tidak tepat dipilih maka masalahnya mungkin tidak konvergen ke optimal.

15.4 PROSES OPTIMASI DESAIN MODEL IN THE LOOP

Pendekatan untuk optimasi desain HEV biasanya merupakan desain model-in-the-loop proses pengoptimalan, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 15.10. Di tengah diagram, kendaraan dimodelkan dalam alat simulasi seperti PSAT, ADVISOR, atau VTB, dan model ini tertanam dalam loop komputasi. Awalnya, model kendaraan disimulasikan menggunakan nilai awal dari variabel desain, dan kita mendapatkan numerik nilai fungsi tujuan, dalam hal ini ekonomi bahan bakar komposit diukur dalam mpgge (mil per galon setara bensin). Pada saat yang sama, fungsi kendala – dalam hal ini kinerja kendaraan – dievaluasi. Kemudian hasil simulasi ini diumpungkan kembali ke algoritme pengoptimalan, yang menghasilkan serangkaian nilai baru untuk variabel desain. Selanjutnya model kendaraan disimulasikan kembali untuk mendapatkan nilai fungsi tujuan dan fungsi kendala. Hasil simulasi diumpungkan kembali ke algoritme pengoptimalan lagi untuk menghasilkan set baru lainnya variabel desain. Proses iterasi ini berlangsung terus menerus hingga beberapa kriteria penghentian tercapai untuk proses optimasi. Perhatikan bahwa variabel desain dibatasi dalam batas-batasnya selama proses ini.



Gambar 15.10 Proses optimasi desain model in the loop.

Untuk tujuan ilustrasi, dalam bab ini PSAT digunakan sebagai pemodelan dan simulasi alat. PSAT dikembangkan oleh Argonne National Laboratory, disponsori oleh *Departement of Energi* (DOE). Ini dapat membantu perancang kendaraan untuk mengukur komponen dan mengembangkan powertrain hybrid yang realistis dan sistem kontrolnya. PSAT dapat secara akurat mensimulasikan kinerja kendaraan, penghematan bahan bakar, dan emisi. Dalam menggunakan PSAT, kita terutama perlu memilih topologi powertrain, menentukan ukuran komponen, dan menyusun strategi kontrol. Perhatikan bahwa ukuran komponen diotomatisasi oleh proses model-in-the-loop.

Contoh Pengoptimalan Desain HEV Paralel*

Sebagai contoh aplikasi, PSAT digunakan untuk mengoptimalkan HEV paralel untuk penghematan bahan bakar maksimum pada siklus mengemudi komposit. Empat algoritma global, LANGSUNG, SA, GA, dan PSO, digunakan dalam optimasi desain berbasis model. Fokus utama dari contoh ini adalah untuk menunjukkan perbandingan algoritma optimasi yang berbeda untuk desain kendaraan yang optimal daripada hasilnya. Model kendaraan *gui_par_midsize_cavalier_ISG_in* (tersedia di perpustakaan model PSAT) telah dipilih untuk studi optimasi ini. Kendaraan ini adalah konfigurasi paralel starter-alternator penggerak dua roda dengan manual penularan. Konfigurasi dasar dari HEV paralel yang digunakan untuk studi simulasi diilustrasikan pada Gambar 15.11, dan komponen utama HEV tercantum dalam Tabel 15.1.

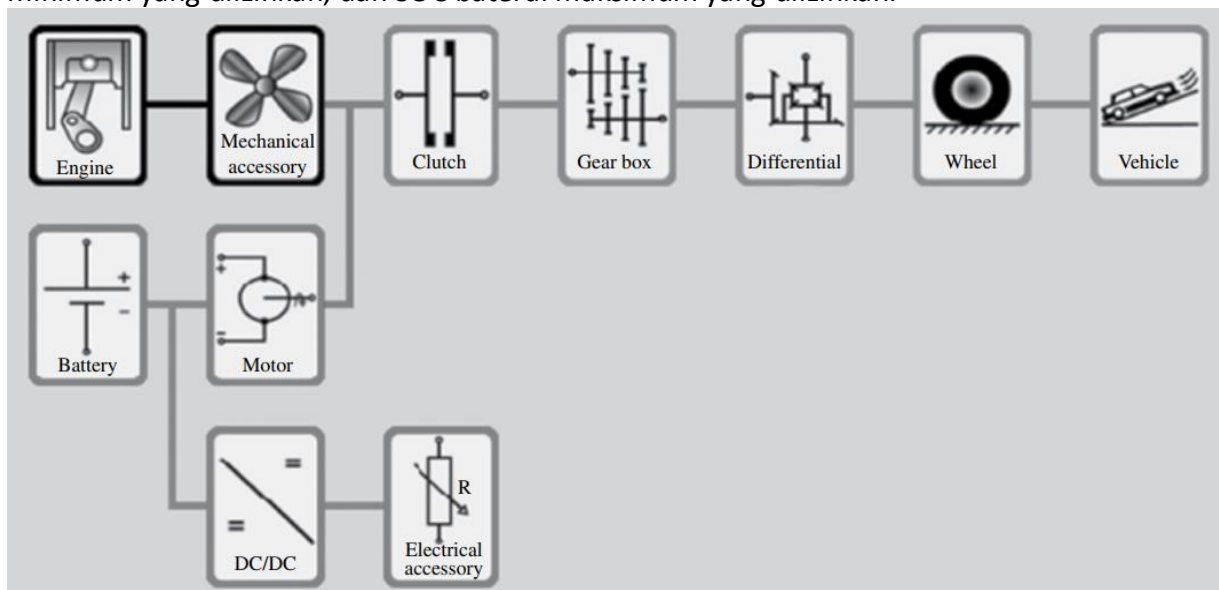
$$Ekonomi\ bahan\ bakar\ komposit = \frac{1}{\frac{0.55}{City_FE} + \frac{0.45}{Hwy_FE}}$$

di mana *City_FE* dan *Hwy_F* masing-masing menunjukkan nilai ekonomi bahan bakar kota dan jalan raya.

Siklus mengemudi yang dipilih adalah Federal Test Procedure city driving cycle FTP-75 dan Highway Fuel Economy Test drive cycle HWFET. Kedua siklus penggerak masing-masing ditunjukkan pada Gambar 15.12 dan 15.13. Kendala masalah desain berasal dari kinerja kendaraan yang diperlukan sebagai berikut:

- waktu akselerasi 0–60 mph (0–96 km/jam) 18,1 detik
- waktu akselerasi 40–60 mph (64–96 km/jam) 7 detik
- waktu akselerasi 0–85 mph (0–136 km/jam) 35,1 detik
- akselerasi maksimum 3,583 m/s²

Tabel 15.2 menunjukkan enam variabel desain yang digunakan dalam penelitian ini. Dua yang pertama menentukan peringkat daya konverter bahan bakar (mesin) dan pengontrol motor. Ketiga, variabel keempat, dan kelima menentukan jumlah modul baterai, SOC baterai minimum yang diizinkan, dan SOC baterai maksimum yang diizinkan.

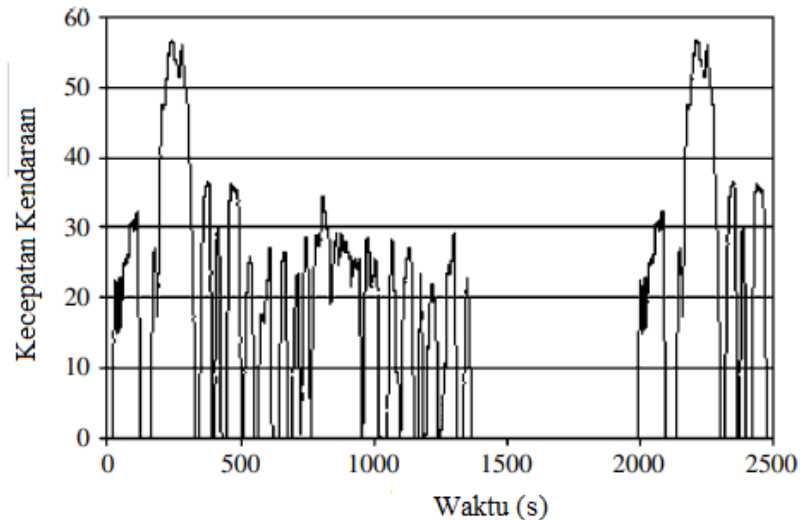


Gambar 15.11 Konfigurasi HEV paralel yang dipilih di PSAT. Sumber: Transportation.anl.gov

Tabel 15.1 Komponen HEV Paralel.

Komponen	Deskripsi
Konverter bahan bakar	84 kW dan mesin bensin Cavalier 2,2 l

Motor Baterai Transmisi Strategi kontrol	Model motor ECOSTAR dengan daya berkelanjutan 33 kW dan daya puncak 66 kW Baterai Panasonic NiMH dengan kapasitas 6,5 Ah dan 240 sel Gearbox manual empat kecepatan dengan rasio final drive 3,63 Strategi mendorong, menggeser, dan mengerem default
---	--



Gambar 15.12 Siklus drive FTP-75.

Tabel 15.2 Batas atas dan bawah variabel desain.

Variabel desain	Deskripsi	Batas bawah	Batas atas
eng.scale.pwr_max_des	Peringkat daya konverter bahan bakar	40 kW	100 kW
mc.scale.pwr_max_des	Peringkat daya pengontrol motor	10 kW	80 kW
ess.init.num_module	Jumlah sel baterai	150	350
ess.init.num_module	SOC minimum yang diizinkan	0.2	0.4
ess.init.soc_max	SOC maksimum yang diizinkan	0.6	0.9
fd.init.ratio	Rasio penggerak akhir	2	4

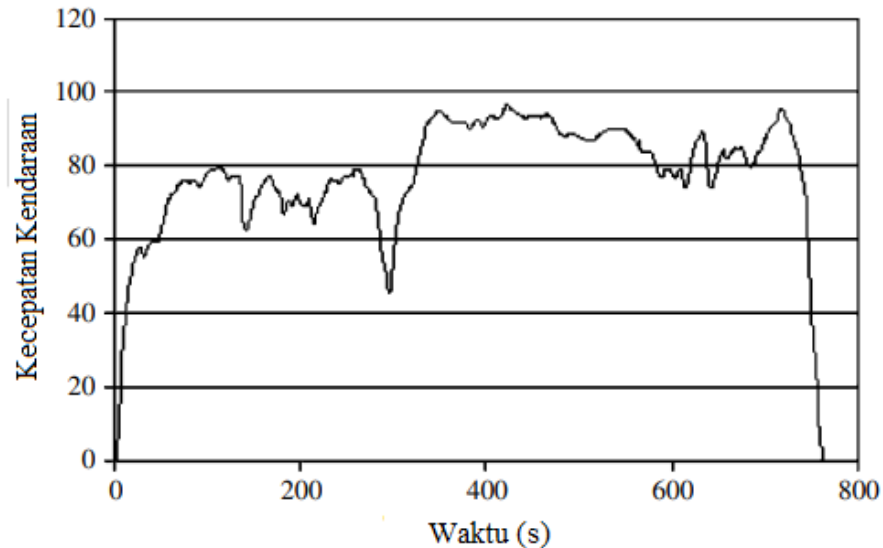
Tabel 15.3 Nilai variabel desain awal.

Variabel desain	Nilai
eng.scale.pwr_max_des	86 kW
mc.scale.pwr_max_des	65.9 kW
ess.init.num_module	240
ess.init.num_module	0
ess.init.soc_max	1
fd.init.ratio	3.63

Tabel 15.4 Perbandingan penghematan bahan bakar.

Sebelum Optimisasi		Ekonomi bahan bakar		
		Setelah Optimisasi		
DIRECT		SA	GA	PSO
35.1 mpg	39.64 mpg	40.37 mpg	37.6 mpg	3.71 mpg

Perhatikan bahwa nilai SOC adalah bagian dari parameter strategi kontrol. Meskipun tidak terkait dengan ukuran komponen, mereka memiliki dampak langsung pada penghematan bahan bakar dari desain HEV. Variabel desain keenam mendefinisikan rasio final drive. Setiap variabel desain juga dibatasi dalam batas bawah dan atas.



Gambar 15.13 Siklus drive HWFET.

Masalahnya sekarang menjadi cukup menantang, karena ini adalah multivariabel yang dibatasi masalah pengoptimalan. Pertama, kendaraan default disimulasikan dalam PSAT. Variabel desain dan nilai awalnya tercantum dalam Tabel 15.3. Ekonomi bahan bakar diamati menjadi 35,1 mpg (6,7 l/100 km), seperti yang diberikan pada Tabel 15.4 di bawah kolom pertama. Kedua, algoritma optimasi, DIRECT, SA, GA, dan PSO, di-loop dengan simulator kendaraan PSAT dan optimasi dilakukan. Untuk langkah ini, sama konfigurasi kendaraan default yang diberikan pada Gambar 15.12 dan Tabel 15.1 diambil, dan batas untuk variabel desain diberikan pada Tabel 15.2

Tabel 15.5 Nilai variabel desain akhir

Variabel Desain	Nilai inisial	Nilai akhir			
		DIRECT	SA	GA	PSO
eng.pwr_max_des (kW)	86	83.1	82.4	95.5	87.1
mc.pwr_max_des (kW)	65.9	20.2	21.9	24.2	14.8
ess.init.num_module	240	245	311	300	238
ess.init.soc_min	0	0.25	0.22	0.34	0.26
ess.init.soc_max	1	0.84	0.78	0.89	0.78
fd.init.ratio	3.63	3.9	4.0	3.49	3.42

Tabel 15.6 Perbandingan kinerja HEV.

Batas	Nilai batas	Sebelum Optimisasi	Setelah Optimisasi			
			DIRECT	SA	GA	PSO
0–60 mph	≤ 18.1 s	18.1 s	15.5 s	10.8 s	11.9 s	11.1 s
40–60 mph	≤ 7 s	7 s	6.8 s	5 s	4.4 s	4.9 s
0–85 mph	≤ 35.1 s	35.1 s	30.6 s	20.7 s	21.2 s	20 s
Maximum acceleration	≥ 3.583 m/s ²	3.583 m/s ²	3.97 m/s ²	4.07 m/s ²	3.94 m/s ²	3.99 m/s ²

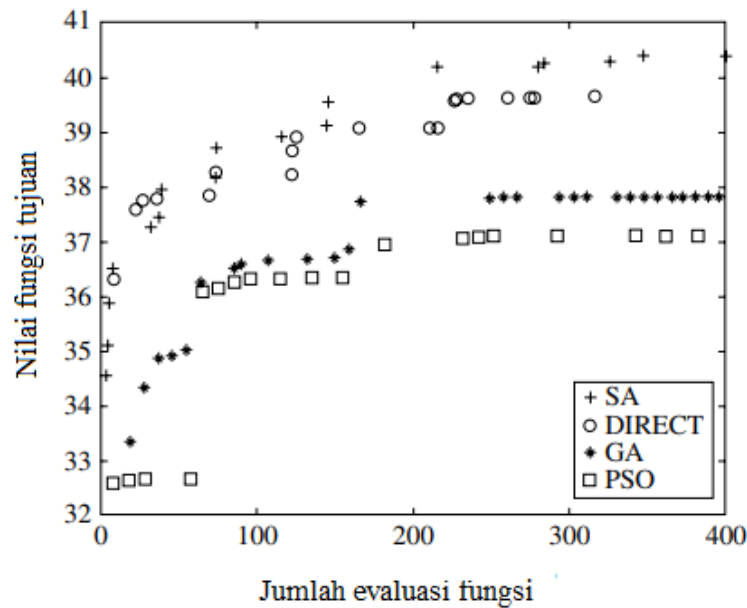
Empat algoritma diperbolehkan untuk menjalankan 400 evaluasi fungsi. Menggunakan jumlah evaluasi fungsi yang sama akan memungkinkan kita untuk membandingkan kinerja dari algoritma optimasi yang berbeda. Perbandingan penghematan bahan bakar sebelum dan sesudah pengoptimalan diberikan pada Tabel 15.4. Peningkatan yang signifikan dalam penghematan bahan bakar terlihat karena optimasi (pada tingkat yang lebih rendah dalam kasus PSO dan GA). Dari keempat algoritme, SA dilakukan baik dengan peningkatan perkiraan 5 mpg.

Tabel 15.5 menunjukkan nilai akhir dari enam variabel desain setelah pengoptimalan. Perhatikan bahwa peringkat motor listrik sangat berkurang, menyiratkan bahwa perampingan motor listrik telah tercapai. Di sisi lain, mesin dirampingkan menjadi lebih kecil luas dalam kasus DIRECT dan SA, sementara ditingkatkan oleh GA dan PSO. Mengingat kendala kinerja, tradeoff dari perampingan mesin dan perampingan motor dapat diwujudkan dengan menyesuaikan batas bawah dan atas dari variabel desain.

Tabel 15.6 menunjukkan hasil performa powertrain hybrid setelah pengoptimalan. Pada dasarnya, semua algoritma optimasi menghasilkan peningkatan kinerja kendaraan. Massa kendaraan berubah ketika variabel desain berubah karena massa kendaraan bergantung langsung pada beberapa variabel desain. Secara khusus, dari enam variabel desain yang dipilih, tiga (peringkat daya mesin dan motor, dan modul energi) mempengaruhi massa kendaraan. Massa kendaraan sebelum dan sesudah optimasi diberikan pada Tabel 15.7.

Tabel 15.7 Massa HEV sebelum dan sesudah optimasi.

Massa Kendaraan				
Sebelum Optimisasi	Setelah Optimisasi			
	DIRECT	SA	GA	PSO
1683	1635	1656	1694	1690



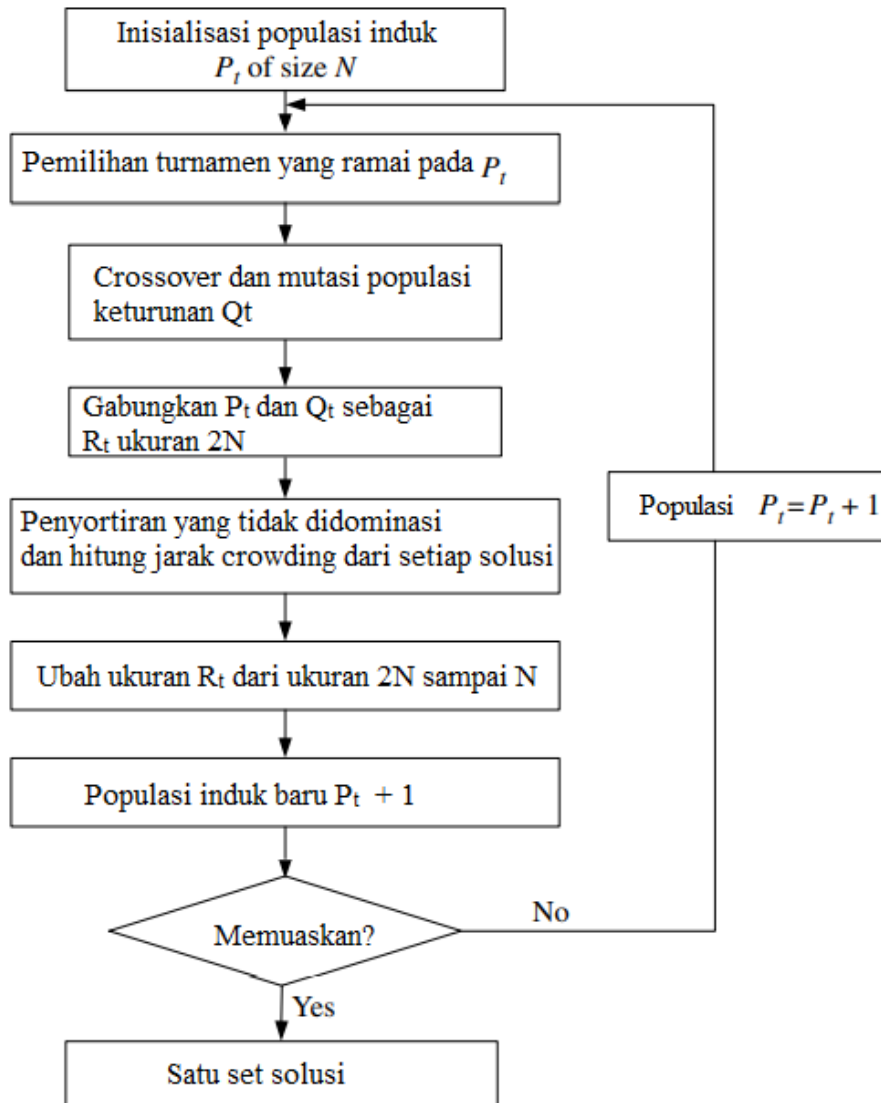
Gambar 15.14 Perbandingan Kinerja DIRECT, SA, GA, dan PSO.

Massa kendaraan menurun untuk kasus DIRECT dan SA dan sedikit meningkat dalam kasus GA dan PSO. Gambar 15.14 menunjukkan bagaimana nilai fungsi tujuan (ekonomi bahan bakar) meningkat dibandingkan nomor iterasi desain. Kurva silang adalah untuk kasus SA; kurva lingkaran adalah untuk kasus LANGSUNG; kurva bintang adalah untuk kasus GA; dan kurva persegi adalah untuk kasus PSO. Kita dapat melihat bahwa peningkatan penghematan bahan bakar dengan algoritma SA dan DIRECT sangat dekat hingga sekitar 125 evaluasi fungsi, setelah itu SA melompat lebih dulu dari DIRECT. GA lambat untuk menangkap SA dan DIRECT pada awalnya karena dibutuhkan beberapa evaluasi fungsi untuk menghasilkan populasi awal. Setelah sekitar 50 evaluasi fungsi, GA tidak menemukan titik desain yang baik untuk mendapatkan peningkatan lebih lanjut dalam penghematan bahan bakar. Performa PSO mirip dengan GA. Secara keseluruhan, SA melakukan yang terbaik untuk masalah optimasi desain khusus ini.

Contoh Optimasi Desain Seri HEV

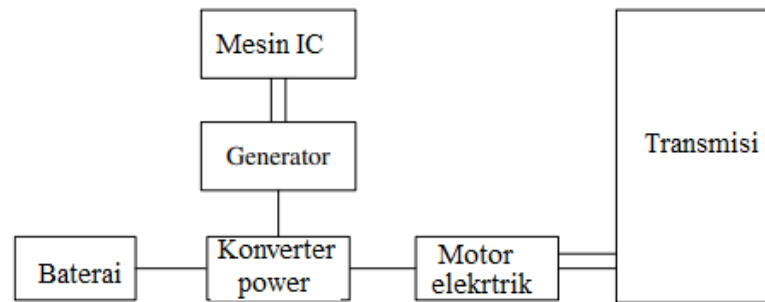
Pada bagian ini, algoritma genetika penyortiran non-dominasi NSGA-II diterapkan untuk optimasi desain seri HEV. NSGA-II adalah salah satu algoritma evolusioner yang paling efisien. Tiga operator yang berbeda (pemilihan turnamen yang ramai, crossover biner yang disimulasikan, dan mutasi polinomial) diterapkan pada populasi untuk menghasilkan yang lebih baik populasi pada setiap iterasi.

Tugas utama dari operator seleksi adalah untuk menekankan solusi yang baik dari populasi dengan membuat banyak salinan dari mereka untuk menggantikan solusi yang buruk dari populasi. Tugas operator crossover adalah untuk bertukar informasi parsial antara dua atau lebih solusi yang direproduksi dan untuk membuat solusi keturunan baru. Tugas operator mutasi adalah secara lokal mengganggu solusi keturunan. Aplikasi berturut-turut dari iterasi tersebut telah ditunjukkan untuk bertemu dekat dengan solusi optimal yang benar dari masalah baik secara teoritis dan komputasi.



Gambar 15.15 Langkah-langkah komputasi dalam NSGA-II.

Gambar 15.15 mengilustrasikan langkah-langkah komputasi utama dalam NSGA-II. Populasi induk P_t pertama-tama diinisialisasi berdasarkan rentang dan batasan variabel desain. Melalui pemilihan turnamen yang ramai, simulasi crossover biner, dan polinomial mutasi, populasi keturunan Q_t dihasilkan. Kemudian populasi induk P_t dan populasi keturunan Q_t digabungkan bersama untuk membentuk R_t berukuran $2N$. Setelah itu, prosedur penyortiran non-dominasi diterapkan untuk mengklasifikasikan seluruh populasi R_t ke dalam angka depan hierarkis yang tidak didominasi. Setelah penyortiran yang tidak didominasi selesai, jarak crowding setiap solusi juga dihitung. Populasi induk baru P_{t+1} berukuran N diturunkan dari R_t berukuran $2N$ melalui perhitungan berikut: Perhitungan dimulai dengan front non-dominasi terbaik dan berlanjut dengan solusi front non-dominasi kedua, dan seterusnya. Ketika front terakhir yang diizinkan sedang dipertimbangkan dan ada lebih banyak solusi di front terakhir daripada slot yang tersisa dalam populasi baru, jarak berkerumun harus dipertimbangkan untuk memilih anggota front terakhir, yang berada di wilayah yang paling sedikit berkokok di bagian depan. Iterasi menghasilkan populasi baru berulang sampai beberapa kondisi terminasi terpenuhi. Seiring perkembangan generasi, solusi dalam populasi baru dioptimalkan.



Gambar 15.16 Konfigurasi powertrain seri HEV

15.5 KERANGKA KONTROL DARI SERI HEV POWERTRAIN

Konfigurasi powertrain khas dari seri HEV ditunjukkan pada Gambar 15.16. Kendaraan didorong oleh motor traksi, yang ditenagai oleh baterai dan/atau unit mesin/generator. Unit mesin/generator membantu daya baterai motor traksi saat permintaan daya beban tinggi, atau mengisi baterai saat permintaan beban rendah. Motor listrik juga dapat digunakan sebagai generator untuk mengisi baterai selama pengereman regeneratif. Pengendali motor adalah untuk mengendalikan motor traksi untuk menghasilkan daya yang dibutuhkan oleh kendaraan.

Strategi kontrol termostat seri menggunakan generator dan mesin untuk menghasilkan energi listrik untuk digunakan oleh kendaraan. Strategi kontrol powertrain dijelaskan sebagai berikut:

- Untuk menjaga daya di baterai, mesin menyala saat SOC mencapai batas bawah.
- Mesin mati saat SOC mencapai batas yang lebih tinggi.
- Mesin beroperasi pada tingkat kecepatan dan torsi yang paling efisien.

Parameter kendaraan utama dan komponen utama dari seri HEV diberikan pada Tabel 15.8 dan 15.9.

Optimasi Parameter Seri HEV

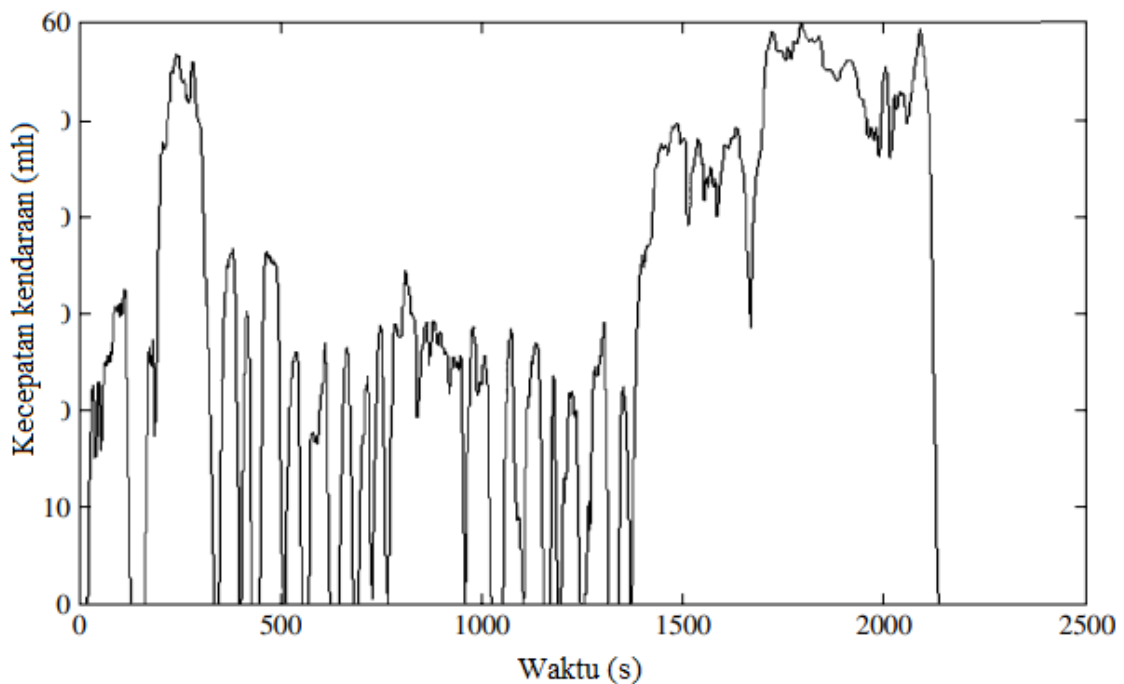
ADVISOR digunakan untuk ADVISOR adalah paket simulasi kendaraan yang dikembangkan pada platform perangkat lunak MATLAB/Simulink, yang mengadopsi metode pemodelan maju dan mundur. Gambar 15.17 menunjukkan siklus uji coba yang digunakan dalam simulasi. Siklus test drive terdiri dari mengemudi di kota yang diwakili oleh UDDS dan mengemudi di jalan raya diwakili oleh HWFET. Tabel 15.10 menunjukkan bahwa pengoptimalan awalnya terbatas pada delapan variabel desain, tiga parameter komponen, dan lima parameter strategi kontrol. Nilai default awal dan batas parameter desain juga diberikan dalam tabel.

Tabel 15.8 Parameter kendaraan.

Massa kotor (kg)	Massa muatan penuh (kg)	Jarak sumbu roda (m)
1373	1659	2.6
Daerah angin (m ²)	Koefisien bergulir	Koefisien aerodinamis
2.0	0.015	0.335

Tabel 15.9 Seri komponen utama HEV.

Komponen	Deskripsi
Konverter bahan bakar	Geo 1.0 ISI 41 kW
Motor	Motor induksi AC Westinghouse 75 kW
Baterai	Baterai Hawker Genesis 12 V, 26 Ah, 10EP disegel valve-regulated lead acid (VRLA)



Gambar 15.17 Gabungan siklus penggerak UDDS dan HWFET.

Sebelum optimasi, model kendaraan memiliki kinerja dinamis sebagai berikut:

- 0–60 mph: 10,5 detik
- 40–60 mph: 5,6 detik
- 0–85 mph: 24,6 detik
- Gradabilitas: kemiringan 6,8% pada kecepatan 55 mph (88 km/jam)

Tabel 15.10 Variabel desain.

Variabel desain	Deskripsi	Nilai default	Batas bawah	Batas atas
ind_pwr	Tenaga mesin	41 kW	25 kW	53 kW
mc_pwr	Tenaga motor	75 kW	38 kW	112 kW
ess_cap	Kapasitas baterai	26 Ah	13 Ah	39 Ah
cs_high_soc	SOC tertinggi yang diizinkan	0.8	0.7	0.85
cs_low_soc	SOC terendah yang diizinkan	0.6	0.3	0.5
cs_max_pwr	Daya maksimum yang diperintahkan dari konverter bahan bakar	30 kW	25 kW	40 kW
cs_low_pwr	Daya minimum yang diperintahkan konverter bahan bakar	20 kW	5 kW	20 kW
cs_off_time	Periode terpendek yang diizinkan dari konverter bahan bakar mati	Inf.	10 s	1000 s

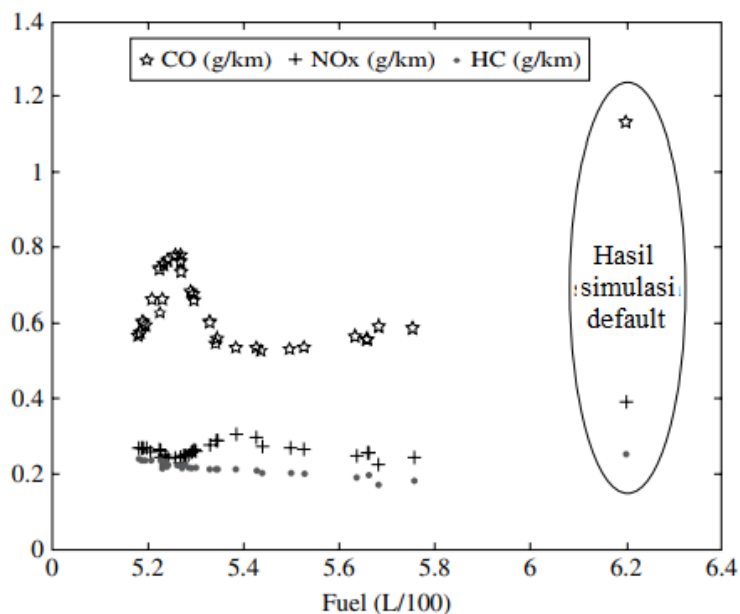
Karena kinerja dinamis harus dipertahankan selama optimasi, kinerja di atas dikenakan kendala dalam proses optimasi. Pada saat yang sama, untuk menghilangkan pengaruh energi baterai awal pada konsumsi bahan bakar dan emisi, koreksi SOC harus dipilih, sehingga nilai awal dan SOC akhir dapat diatur pada level yang hampir sama, dan toleransi delta SOC berada

di dalam $[-0,5\%, +0,5\%]$. Kita dapat menganggap bahwa seluruh energi output untuk siklus tersebut berasal dari mesin saja.

Untuk setiap solusi dalam populasi, yang berisi delapan variabel desain, algoritme memanggil ADVISOR untuk menjalankan simulasi menggunakan parameter yang ditentukan untuk siklus uji coba guna memperoleh data konsumsi bahan bakar dan emisi. Algoritma optimasi menghitung nilai fitness untuk setiap solusi, dan kemudian menghasilkan satu set solusi baru dengan operasi crossover dan mutasi. Penyortiran yang tidak didominasi sebuah algoritma diterapkan pada solusi yang baru dibuat untuk memilih populasi berikutnya. Proses berulang ini berlanjut sampai kondisi terminasi (seperti jumlah maksimum generasi) terpenuhi.

Hasil Optimasi

Algoritme NSGA-II yang ditunjukkan pada Gambar 15.15 diimplementasikan di ADVISOR. Populasi awal adalah 40 individu yang dipilih secara acak dari parameter desain yang diberikan pada Tabel 15.10 dari ruang solusi. Kondisi penghentian diatur ke 80 generasi. Untuk setiap individu, simulasi siklus penggerak untuk evaluasi termasuk fungsi tujuan dan kendala membutuhkan waktu rata-rata sekitar 1 menit pada komputer Pentium 3,4 GHz, dan dibutuhkan sekitar empat hari untuk menjalankan seluruh program. Gambar 15.18 menunjukkan data konsumsi bahan bakar dan emisi yang dihasilkan oleh 40 solusi setelah 80 generasi pengoptimalan, bersama dengan hasil yang dihasilkan oleh pengontrol default di ADVISOR. Semua 40 solusi mengkonsumsi bahan bakar lebih sedikit daripada pengontrol default, dan semuanya menghasilkan emisi CO, NOx, dan HC yang lebih sedikit daripada pengontrol default.

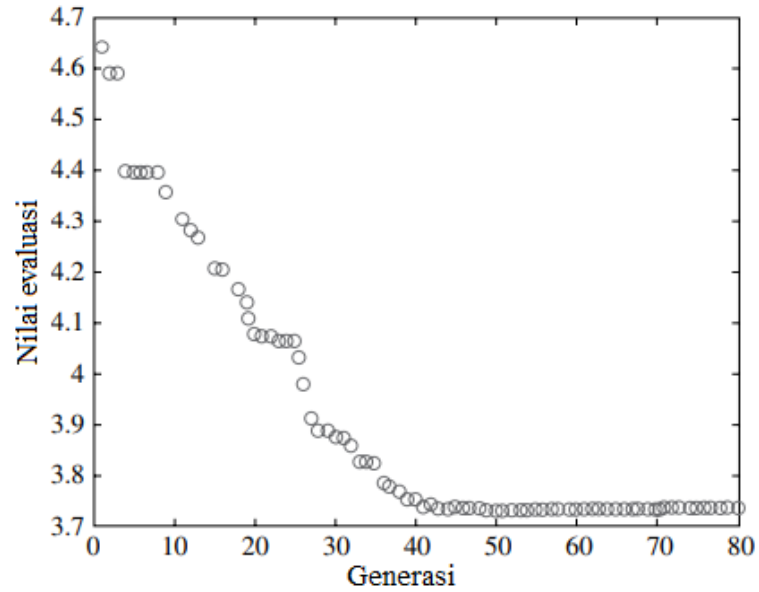


Gambar 15.18 Data konsumsi bahan bakar dan emisi yang dihasilkan oleh solusi tradeoff yang dihasilkan oleh algoritma optimasi.

Untuk mengilustrasikan kemajuan melalui generasi selama optimasi, kita menggunakan persamaan berikut sebagai fungsi evaluasi untuk memilih yang terbaik dari 40 solusi pada setiap generasi:

$$F = \text{bahan bakar} \cdot 0.7 + 0.1 \cdot \text{HC} + 0.1 \cdot \text{CO} + 0.1 \cdot \text{NO}_x$$

Hasilnya diilustrasikan pada Gambar 15.19. Data pada gambar menunjukkan bahwa algoritma konvergen ke nilai evaluasi 3,72 setelah 50 generasi.



Gambar 15.19 Evaluasi kemajuan pembangkitan selama optimasi.

Tabel 15.11 mencantumkan hasil pengoptimalan yang dihasilkan oleh lima solusi berperingkat teratas dalam populasi akhir berdasarkan metode penyortiran yang tidak didominasi. Ambil solusi 1, misalnya: konsumsi bahan bakar dan ketiga emisi berkurang masing-masing sebesar 15, 14, 31, dan 40%, dibandingkan dengan kinerja yang dihasilkan oleh pengontrol default.

Tabel 15.11 Hasil optimasi yang dihasilkan oleh lima solusi teratas yang dipilih oleh penyortiran yang tidak didominasi

No.	Fuel (l/100 km)	HC (g/km)	CO (g/km)	NO _x (g/km)
1	5.268	0.213	0.779	0.231
2	5.681	0.170	0.593	0.223
3	5.439	0.201	0.526	0.272
4	5.183	0.238	0.568	0.270
5	5.758	0.184	0.589	0.242

Tabel 15.12 Nilai variabel desain dan kinerja setelah optimasi

No.	1	2	3	4	5
eng_pwr	25 kW	25.1 kW	25 kW	25.1 kW	25 kW
mc_pwr	82.8 kW	81.4 kW	86.7 kW	80.9 kW	82.9 kW
ess_cap	39 Ah	38.2 Ah	38.9 Ah	38.3 Ah	38 Ah
cs_high_soc	0.73	0.75	0.75	0.74	0.74
cs_low_soc	0.49	0.48	0.50	0.48	0.49
cs_max_pwr	33.1 kW	33.5 kW	32.2 kW	33 kW	31.9 kW
cs_low_pwr	13.2 kW	6.7 kW	9.8 kW	5.6 kW	12.4 kW
cs_off_time	750 s	538 s	598 s	519 s	711 s
0–60 mph	10.2 s	10 s	10 s	10.3 s	9.9 s
40–60 mph	5.4 s	5.3 s	5.3 s	5.5 s	5.2 s
0–85 mph	23.8 s	23.4 s	23.4 s	24 s	22.8 s
Gradability at 55 mph	8.1%	7.9%	7.9%	8.0%	7.2%
Delta SOC	0.21%	0.26%	0.31%	-0.17%	-0.24%

Ini menunjukkan bahwa jika parameter desain yang disarankan oleh solusi ini digunakan dalam desain seri HEV, pengontrol online dapat dioptimalkan untuk mencapai kinerja yang sama atau lebih baik daripada yang dihasilkan oleh solusi optimal ini.

Sesuai dengan lima solusi pada Tabel 15.11, Tabel 15.12 menunjukkan nilai variabel desain dan performa setelah pengoptimalan. Meskipun tenaga mesin diperkecil, dengan meningkatkan daya motor dan kapasitas baterai, akselerasi kemampuan dan gradabilitas performa kendaraan masih ditingkatkan.

Tabel 15.13 menunjukkan hasil pengoptimalan yang dihasilkan oleh lima solusi teratas yang dipilih oleh fungsi evaluasi dari populasi akhir. Kita dapat melihat bahwa solusi pada Tabel 15.13 berbeda dengan solusi yang ditunjukkan pada Tabel 15.10. Kita menggunakan contoh ini untuk menunjukkan pentingnya algoritme pengoptimalan yang diusulkan: ini menghasilkan populasi beberapa solusi optimal tradeoff. Perancang kendaraan dan insinyur kontrol dapat menggunakan kriteria evaluasi mereka sendiri untuk memilih solusi optimal dari populasi solusi tradeoff ini.

Tabel 15.13 Hasil optimasi yang dihasilkan oleh lima solusi teratas yang dipilih oleh fungsi evaluasi.

No.	Bahan bakar				Nilai Evaluasi
	(l/100 km)	HC (g/km)	CO (g/km)	NO _x (g/km)	
1	5.183	0.238	0.568	0.270	3.7357
2	5.188	0.234	0.578	0.268	3.7396
3	5.193	0.238	0.582	0.268	3.7439
4	5.194	0.237	0.601	0.266	3.7462
5	5.199	0.238	0.592	0.267	3.7490

15.6 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil optimasi dari contoh HEV paralel, pengamatan berikut dapat dilakukan. Ekonomi bahan bakar HEV paralel meningkat dari 35,1 menjadi 39,64 MPG dengan

algoritma DIRECT, dan dari 35,1 menjadi 40,37 MPG dengan algoritma SA. Performa HEV yang dioptimalkan menunjukkan peningkatan yang luar biasa. Peringkat daya motor traksi berkurang secara signifikan. Contoh kedua menggunakan algoritma evolusioner, NSGA-II, untuk masalah optimasi multiobjektif dalam rangkaian HEV. Algoritme ini memiliki kemampuan untuk mengoptimalkan penghematan bahan bakar secara bersamaan serta tiga emisi. Pada akhir proses optimasi, algoritme menghasilkan 40 solusi dan kinerja tradeoff yang optimal. Semua solusi ini lebih baik, dalam keempat kategori, daripada kinerja yang dihasilkan oleh pengontrol default di ADVISOR. Kita juga melihat bahwa perancang kendaraan dan insinyur kontrol dapat memperoleh kriteria tradeoff mereka sendiri untuk memilih solusi yang paling sesuai dengan kebutuhan spesifik mereka.

Dalam studi ini, hanya algoritma optimasi global yang diuji untuk desain kendaraan hibrida, yang umumnya memiliki konvergensi yang lebih lambat. Di sisi lain, algoritma berbasis turunan dikenal karena konvergensinya yang lebih cepat. Faktanya, algoritma optimasi hybrid dapat digunakan yang menggabungkan manfaat dari algoritma global dan lokal. Algoritme global dapat mencapai titik desain di dekat wilayah optimum global setelah sejumlah langkah optimasi tertentu. Kemudian algoritme lokal dimulai dan proses dilanjutkan sampai optimal global ditemukan. Untuk contoh HEV paralel, optimasi desain membutuhkan waktu sekitar 100 jam menjalankan PSAT pada satu PC. Waktu desain yang lama ini memerlukan pengembangan metodologi optimasi yang lebih efisien seperti menggunakan komputasi paralel dan terdistribusi.

BAB 16

TRANSFER DAYA NIRKABEL UNTUK APLIKASI KENDARAAN LISTRIK

WPT (*Wireless power transfer*) adalah teknologi yang dapat membebaskan orang dari kabel yang tidak fleksibel. WPT mengadopsi teori dasar yang telah dikembangkan setidaknya selama 30 tahun di bawah istilah IPT (*inductive power transfer*). Teknologi WPT telah berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir. Pada tingkat daya kilowatt, jarak transfer meningkat dari beberapa milimeter menjadi beberapa ratus milimeter dengan grid untuk memuat efisiensi di atas 90%. Kemajuan ini membuat WPT sangat menarik untuk digunakan dalam aplikasi pengisian daya EV (*Electric Vehicle*) baik dalam skenario pengisian stasioner maupun dinamis. Bab ini mengulas teknologi di area WPT yang berlaku untuk pengisian daya nirkabel EV. Dengan memperkenalkan WPT di EV, hambatan waktu pengisian, jangkauan, dan biaya dapat dengan mudah dikurangi. Selain itu, teknologi baterai tidak lagi relevan dalam penetrasi pasar massal kendaraan listrik. Diharapkan para peneliti, didorong oleh pencapaian state-of-the-art, akan terus mendorong dan memajukan pengembangan WPT, serta perluasan EV.

16.1 PENGANTAR

Elektrifikasi transportasi telah dilakukan selama bertahun-tahun sejak munculnya berbagai masalah energi dan lingkungan. Dalam sistem perkeretaapian, sejak lama lokomotif listrik telah berkembang dengan baik. Kereta api berjalan di jalur tetap, dan mudah untuk mendapatkan tenaga listrik dari rel konduktor menggunakan penggeser pantograf. Sedangkan, untuk kendaraan listrik, fleksibilitasnya yang tinggi justru menyulitkan dalam mendapatkan tenaga dengan cara yang sama. Sebagai gantinya, baterai berkapasitas besar dan berdaya tinggi biasanya digunakan sebagai unit penyimpanan energi untuk membuat EV beroperasi pada jarak yang memuaskan.

Hingga saat ini, EV belum begitu menarik bagi konsumen, bahkan dengan adanya program insentif pemerintah yang banyak. Padahal, kunci untuk meningkatkan pangsa pasar untuk EV saat ini adalah dengan subsidi pemerintah dan insentif. Akan tetapi, ada satu masalah dalam kendaraan listrik ini, teknologi penyimpanan listriknya memerlukan baterai, dan ini menjadi merupakan hambatan karena kepadatan energinya yang tidak memuaskan, masa pakai yang terbatas, dan biaya yang tinggi.

Dalam sebuah EV, baterai tidak mudah untuk dirancang karena semua persyaratan berikut:

- kepadatan energi tinggi
- kepadatan daya tinggi
- biaya yang terjangkau
- masa pakai siklus yang panjang
- keamanan
- keandalan

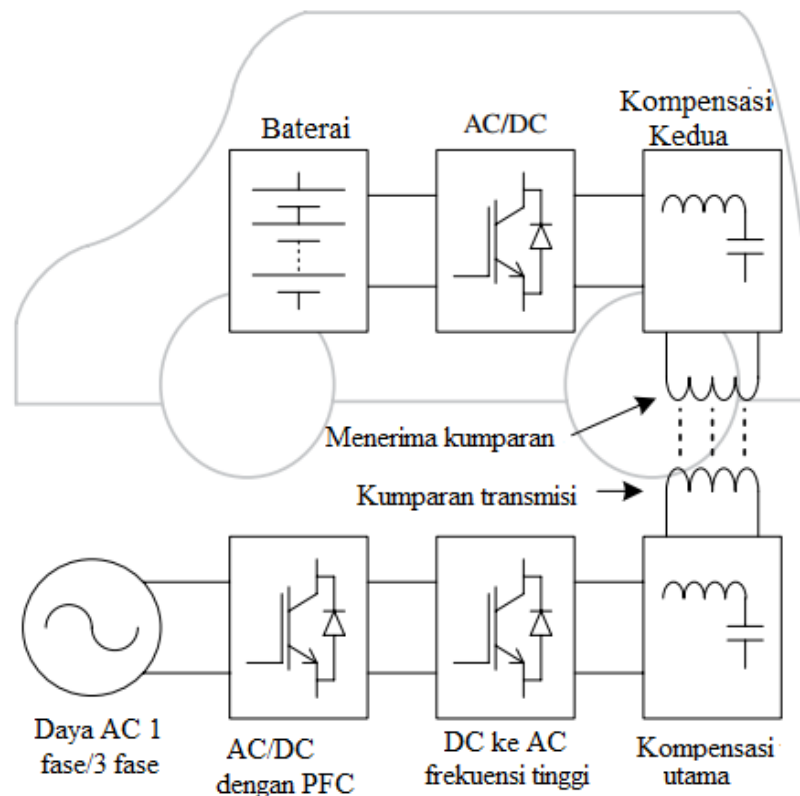
Ini semua harus dipenuhi secara bersamaan. Baterai lithium-ion diakui sebagai solusi paling kompetitif untuk digunakan pada kendaraan listrik. Namun untuk paket jadi, kepadatan energi baterai lithium-ion yang dikomersialkan dalam EV hanya 90~100 Wh/Kg padahal jika dibandingkan bensin adalah sekitar 12.000 Wh/Kg. Untuk jarak tempuh 600km dari pembakaran internal kendaraan bertenaga mesin, EV murni membutuhkan sejumlah besar baterai yang sangat berat dan sangat mahal. Saat ini, biaya baterai lithium-ion adalah 7,5 juta/kWh.

Dengan memiliki kendaraan listrik bertenaga baterai ini konsumen harus mengeluarkan tambahan biaya rata-rata sekita 18 juta per tahun untuk perawatan dan biaya energi, padahal jika dibandingkan dengan kendaraan bertenaga bensin akan jauh lebih hemat. Selain biaya, pengisian daya baterai EV juga memakan waktu yang cukup lama, sehingga membuat konsumen enggan untuk membelinya. Selain masalah ini, masih ada beberapa masalah lain dalam hal plug-in, yang awalnya akan dijadikan sebuah solusi pengisian daya EV yang lebih cepat. Plug ini justru sangat tidak fleksibel dan tidak kompakibel. Kabel plug-in pengisi daya yang berada dilantai dapat menyebabkan orang tersandung, kebocoran kabel lama yang retak khususnya di zona dingin (hujan) memerikan resiko sengatan listrik yang sangat berbahaya, belum lagijika ada angin kencang ataupun banjir.

Untuk mengatasi masalah ini, teknologi WPT akan digunakan. Teknologi WPT dapat menghilangkan semua masalah pengisian yang disebutkan di atas. Dengan mentransfer energi secara nirkabel ke EV, pengisian menjadi tugas sederhana. Untuk sistem WPT stasioner, pengemudi hanya perlu memarkir mobilnya. Akan tetapi, masih ada 1 hal yang dipertanyakan disini, apakah WPT dapat direalisasikan secara efisien dengan biaya yang wajar. Sebuah tim peneliti dari Massachusetts Institute of Technology (MIT) menerbitkan sebuah makalah di *Science*, di mana daya 60 W ditransfer pada jarak 2 meter menggunakan teori resonansi magnetik berpasangan kuat. Hasilnya mengejutkan hingga membuat WPT menjadi area penelitian yang panas dengan cepat. Banyak pekerjaan menarik telah dicapai dengan berbagai jenis inovasi sirkuit c, serta analisis dan kontrol sistem. Jalur transfer daya bahkan bisa dipandu menggunakan repeater bentuk domino. Untuk mentransfer daya lebih efisien pada jarak yang lebih jauh, frekuensi resonansi biasanya dipilih pada tingkat MHz, dan kumparan inti udara yang digunakan.

Ketika WPT digunakan dalam pengisian EV, efisiensi dan kriteria daya operasi frekuensi MHz sulit untuk dipenuhi. Tidak efisien untuk mengubah daya beberapa watt menjadi beberapa ratus kilowatt pada tingkat frekuensi MHz menggunakan perangkat elektronik daya canggih. Selain itu, kumparan inti udara terlalu sensitif terhadap benda-benda feromagnetik di sekitarnya. Ketika sebuah kumparan inti-udara dipasang pada sebuah mobil, fluks magnet akan masuk ke dalam sasis, menyebabkan kehilangan arus eddy yang tinggi serta perubahan signifikan dalam parameter koil. Agar lebih praktis dalam pengisian EV, ferit sebagai pemandu fluks magnet dan pelat aluminium sebagai pelindung biasanya diadopsi dalam desain koil. Frekuensi diturunkan menjadi kurang dari 100 kHz, dan menggunakan ferit, sistem WPT tidak berbeda dengan inductive power transfer (IPT) yang telah dikembangkan selama bertahun-tahun. Faktanya, karena WPT didasarkan pada elektromagnetik non-radiatif dan medan dekat, tidak ada perbedaan dengan IPT tradisional, yang didasarkan pada kopling medan magnet antara koil pemancar dan penerima. Sistem IPT telah diusulkan dan diterapkan pada berbagai aplikasi, seperti sistem penambangan kendaraan bawah air, robot nirkabel di jalur produksi otomatisasi dan pengisian kendaraan listrik.

Jarak transfer daya telah meningkat dari beberapa milimeter hingga beberapa ratus milimeter pada tingkat daya kilowatt. Sebagai bukti konsep jalan raya secara induktif EV bertenaga, program PATH (Partners for Advance Transit and Highways) dilakukan di UC Berkeley pada akhir 1970-an. Sebuah bus 60 kW dengan muatan 35 penumpang diuji di jalur sepanjang 213 m dengan tenaga dua bagian. Jalur utama bipolar disuplai dengan arus 1200 A, 400 Hz AC. Jarak pikap dari lintasan utama adalah 7,6 cm. Efisiensi yang dicapai sekitar 60%, karena teknologi semikonduktor masih sangat terbatas.



Gambar 16.1 Sistem pengisian EV nirkabel biasa

Perusahaan WiTricity, dengan teknologi dari MIT, merilis kit pengembangan WiT-3300 mereka, yang mencapai efisiensi 90% melalui celah 180 mm pada output 3,3 kW. Baru-baru ini, prototipe sistem pengisian nirkabel untuk EV dikembangkan di Laboratorium Nasional Oak Ridge. Efisiensi yang diuji hampir 90% untuk pengiriman daya 3 kW. Para peneliti di University of Michigan-Dearborn mencapai jarak 200 mm, Sistem WPT 8 kW dengan efisiensi DC-DC setinggi 95,7%. Dari aspek fungsional, terlihat bahwa WPT untuk EV sudah siap baik dalam aplikasi stasioner maupun dinamis. Namun, untuk membuatnya tersedia untuk komersialisasi skala besar, masih terdapat banyak hal yang harus dilakukan pada optimasi kinerja, pengaturan standar industri, efektivitas biaya, dan sebagainya.

16.2 TEORI DASAR

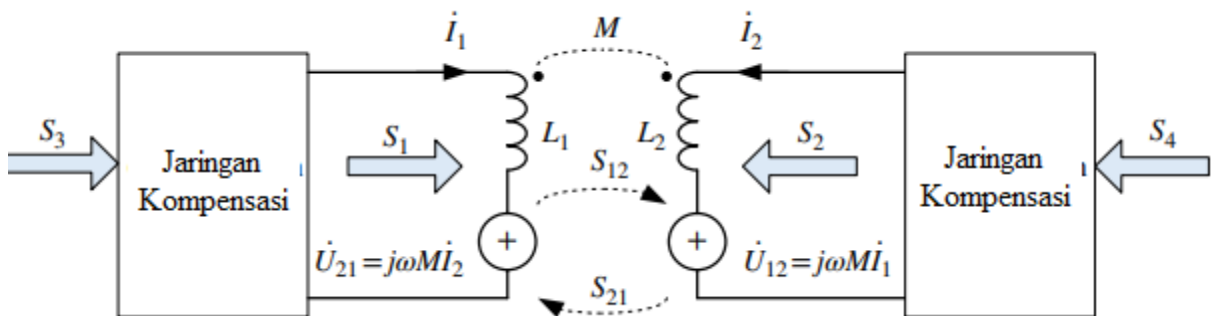
Sistem pengisian EV nirkabel tipikal ditunjukkan pada Gambar 16.1. Ini mencakup beberapa tahap untuk mengisi daya EV secara nirkabel. Pertama, daya utilitas *alternating current* (AC) diubah menjadi sumber daya *direct current* (DC) oleh konverter AC-DC dengan *powerfactor correction* (PFC). Kemudian, daya DC diubah menjadi AC frekuensi tinggi untuk menggerakkan koil transmisi melalui jaringan kompensasi. Mengingat potensi kegagalan isolasi kumparan sisi primer, transformator terisolasi frekuensi tinggi dapat dimasukkan diantara inverter DC-AC dan kumparan sisi primer untuk keamanan dan perlindungan ekstra. Arus frekuensi tinggi dalam koil pemancar menghasilkan medan magnet bolak-balik, yang menginduksi tegangan AC pada koil penerima. Dengan beresonansi jaringan kompensasi sekunder, daya dan efisiensi yang ditransfer meningkat secara signifikan. Akhirnya, untuk mengisi daya baterai daya AC diperbaiki. Gambar 16.1 menunjukkan bahwa nirkabel Pengisi daya EV terdiri dari bagian berikut:

1. koil pemancar dan penerima terpisah (atau terpisah, digabungkan secara longgar). Biasanya, kumparan dibangun dengan ferit dan struktur pelindung. Di bagian-bagian

selanjutnya, istilah coupler magnetik digunakan untuk mewakili keseluruhan, termasuk koil, ferit, dan pelindung

2. jaringan kompensasi
3. konverter daya listrik.

Perbedaan utama antara pengisi daya nirkabel dan pengisi daya konduktif atau kabel konvensional terletak pada transformatornya yang diganti dengan satu set kumparan dan digabungkan secara longgar.



Gambar 16.2 Sistem transfer daya nirkabel dua kumparan umum.

Untuk memberikan gambaran singkat tentang prinsip transfer daya nirkabel, koil dan jaringan kompensasi ditarik keluar secara terpisah ini ditunjukkan oleh Gambar 16.2, di mana L_1 mewakili induktansi diri dari kumparan transmisi sisi primer dan L_2 mewakili induktansi diri dari kumparan penerima; i_1 dan i_2 adalah arus dalam dua kumparan; U_{12} tegangan pada kumparan sekunder yang diinduksi oleh arus pada kumparan sisi primer. U_{21} adalah tegangan pada kumparan primer yang diinduksi oleh arus pada kumparan samping sekunder akibat untuk kopling, atau induktansi timbal balik, antara kumparan primer dan sekunder. S_1 dan S_2 adalah daya semu yang masuk ke L_1 dan L_2 masing-masing. S_3 dan S_4 adalah daya nyata yang disediakan oleh konverter daya. S_{12} dan S_{21} mewakili pertukaran daya nyata antara kedua kumparan. Bentuk ganti rugi jaringan tidak ditentukan. Karakternya jaringan kompensasi akan dibahas kemudian.

Dari Gambar 16.2, dengan mengabaikan resistansi kumparan dan rugi-rugi magnet, kita dapat menghitung bentuk sederhana dari daya kompleks yang dipertukarkan dari L_1 ke L_2 :

Persamaan 16.1

$$\begin{aligned} S_{12} &= -\dot{U}_{12} c \dot{I}_2^* = j\omega M I_1 \dot{I}_2^* \\ &= \omega M I_1 I_2 \sin \phi_{12} - j\omega M I_1 I_2 \cos \phi_{12} \end{aligned}$$

Persamaan 16.2

$$\begin{aligned} S_{21} &= -\dot{U}_{21} c \dot{I}_1^* = j\omega M I_1 \dot{I}_2^* \\ &= \omega M I_1 I_2 \sin \phi_{12} - j\omega M I_1 I_2 \cos \phi_{12} \end{aligned}$$

di mana I_1 dan I_2 adalah nilai *root mean square* (RMS), ϕ_{12} adalah perbedaan fase di antara L_1 ke L_2 . Transfer daya aktif dari sisi primer ke sekunder sisi dapat dinyatakan sebagai:

Persamaan 16.3

$$P_{12} = \omega M I_1 I_2 \sin \phi_{12}$$

Sistem yang ditunjukkan pada Gambar 16.2 dapat mentransfer daya aktif di kedua arah. Dalam analisis di bawah ini, kita asumsikan bahwa daya ditransfer dari L_1 ke L_2 . Ketika $\phi_{12} = \pi/2$ yang

berarti I_1 memimpin I_2 dengan seperempat siklus, daya maksimum dapat ditransfer dari L_1 ke L_2 . Total kekuatan kompleks yang masuk ke sistem dua kumparan adalah:

Persamaan 16.4

$$\begin{aligned}\dot{S} &= \dot{S}_1 + \dot{S}_2 \\ &= j(\omega L_1 I_1 + \omega M I_2) I_1^* + j(\omega L_2 I_2 + \omega M I_1) I_2^* \\ &= j\omega(L_1 I_1^2 + L_2 I_2^2 + 2ML_1 I_1^2 \cos \varphi_{12})\end{aligned}$$

Oleh karena itu, daya reaktif total yang masuk ke sistem dua kumparan adalah:

Persamaan 16.5

$$Q = \omega(L_1 I_1^2 + L_2 I_2^2 + 2ML_1 I_1 \cos \varphi_{12})$$

Untuk transformator tradisional, daya reaktif mewakili daya magnetisasi. Daya magnetisasi yang lebih tinggi membawa kehilangan tembaga dan inti yang lebih tinggi. Untuk meningkatkan efisiensi transformator, rasio antara daya aktif dan daya reaktif harus dimaksimalkan. Rasio ditentukan oleh:

Persamaan 16.6

$$\begin{aligned}f(\varphi_{12}) &= \frac{|P_{12}|}{|Q|} = \left| \frac{\omega M L_1 I_1 \sin \varphi_{12}}{\omega L_1 I_1^2 + \omega L_2 I_2^2 + 2\omega M L_1 I_1 \cos \varphi_{12}} \right| \\ &= \frac{k\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{12}}}{\sqrt{\frac{L_1 I_1}{L_2 I_2} + \sqrt{\frac{L_2 I_2}{L_1 I_1}} + 2k \cos \varphi_{12}}} = \frac{k\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{12}}}{x + \frac{1}{x} + 2k \cos \varphi_{12}}\end{aligned}$$

Dimana $\pi/2 < \varphi_{12} < \pi$, $x = \sqrt{\frac{L_1 I_1}{L_2 I_2}} > 0$, dan k adalah koefisien kopling diantara L_1 dan L_2 . Untuk mencapai nilai maksimum $f(\varphi_{12})$, kita selesaikan persamaan berikut:

Persamaan 16.7

$$\frac{\partial}{\partial \varphi_{12}} f(\varphi_{12}) = 0, \frac{\partial^2}{\partial^2 \varphi_{12}} f(\varphi_{12}) < 0$$

Dan solusinya adalah:

$$\cos \varphi_{12} = \frac{2k}{x + \frac{1}{x}}, \sin \varphi_{12} = \sqrt{1 - \frac{4k^2}{\left(x + \frac{1}{x}\right)^2}}$$

Ketika k mendekati 1, itu adalah transformator tradisional. Dalam hal ini, jika I_2 adalah arus yang diinduksi oleh I_1 , x akan mendekati 1. Jadi, $\cos \varphi_{12} = -1$, dan beda fasa antara I_1 dan I_2 hampir 180° . Sedangkan untuk transfer daya nirkabel, k mendekati 0. $f(\varphi_{12})$ dimaksimalkan pada $\sin \varphi_{12} = 1$, pada titik mana daya yang ditransfer juga dimaksimalkan, dan fase antara I_1 dan I_2 , adalah sekitar 90° bukan 180° . Oleh karena itu kita dapat melihat perbedaan antara kumparan erat dan kumparan longgar.

Selain itu, tingkat kopling mempengaruhi desain jaringan kompensasi. Mengambil topologi seri-seri sebagai contoh, ada dua cara untuk merancang kapasitor resonansi. Salah satu caranya adalah merancang kapasitor agar beresonansi dengan induktansi kebocoran, yang dapat mencapai $f(\varphi_{12})$ yang lebih tinggi. Cara lain adalah beresonansi dengan kumparan

induktansi diri yang dapat memaksimalkan daya yang ditransfer pada arus kumparan tertentu. Ketika kopling erat dengan ferit, katakanlah $k > 0,5$, penting untuk meningkatkan $f_{(\varphi_{12})}$ untuk mencapai efisiensi yang lebih baik. Dalam hal ini, beresonansi dengan induktansi diri koil – yang menghasilkan $\phi_{12} = \pi/2$ dan menurunkan $f_{(\varphi_{12})}$ – tidak direkomendasikan. Jika tidak merugikan magnetisasi dapat meningkat secara signifikan.

Ketika kapasitor beresonansi dengan induktansi kebocoran, seolah-olah induktansi kebocoran sedang dikompensasi. Hal ini membuat transformator bekerja sebagai transformator tradisional dan meningkatkan $f_{(\varphi_{12})}$. Namun, sistem secara keseluruhan tidak berfungsi pada mode resonansi. Saat kopling kendur, katakanlah $k < 0,5$, yang merupakan kasus untuk pengisian nirkabel EV, biasanya kapasitor disetel dengan induktansi diri untuk membuat sistem bekerja pada mode resonansi untuk mencapai daya maksimum yang ditransfer pada arus kumparan tertentu. Pada kasus ini, sebagian besar energi medan magnet disimpan di celah udara besar antara dua kumparan. Kerugian histeresis di ferit tidak terlalu tinggi dibandingkan dengan beberapa bahan magnetik lainnya. Namun, kerugiannya dalam kawat tembaga sebanding dengan kuadrat arus penghantar. Untuk mentransfer lebih banyak daya secara efisien pada arus kumparan tertentu, arus induksi I_2 harus tertinggal I_1 sebesar 90° . Karena tegangan induksi U_{12} pada kumparan penerima tertinggal I_1 sebesar 90° , U_{12} dan I_2 harus dalam fase. Sisi sekunder harus memiliki karakteristik resistif murni dilihat dari U_{12} pada frekuensi bentuk gelombang arus I_1 . Sementara itu, input sisi utama daya nyata S_3 harus diminimalkan. Pada $\cos\phi_{12} = 0$, kekuatan kompleks kekuatan kompleks S_1 adalah:

Persamaan 16.9

$$S_1 = j\omega L_1 I_1^2 + j\omega L_1$$

Idealnya, jaringan kompensasi sisi primer harus membatalkan daya reaktif dan membuat $S_3 = \omega_0 M I_1 I_2$ di mana ω_0 adalah frekuensi resonansi. Dari analisis di atas, kita melihat bahwa untuk daya yang ditransfer tertentu, perlu untuk membuat resonansi sisi sekunder untuk mengurangi peringkat VA koil, yang mengurangi kerugian pada koil, dan membuat sisi primer resonansi untuk mengurangi elektronika daya. konverter VA rating, yang pada gilirannya mengurangi kerugian pada konverter daya. Inilah sebabnya kita mentransfer kekuatan diresonansi magnetik.

Berdasarkan analisis di atas, kita dapat menghitung efisiensi transfer daya antara dua kumparan pada frekuensi resonansi. Kita punya;

Persamaan 16.10

$$U_{12} = I_2(R_2 + R_{Le}) = \omega M I_1 = \omega k \sqrt{L_1 L_2} I_1$$

di mana R_2 adalah resistansi belitan sekunder dan R_{Le} adalah resistansi beban ekuivalen.

Dengan mendefinisikan faktor kualitas dari dua kumparan, $Q_1 = \omega L_1 / R_1$, $Q_2 = \omega L_2 / R_2$, efisiensi yang ditransfer dapat dinyatakan sebagai

Persamaan 16.11

$$\eta = \frac{I_2^2 R_{Le}}{I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_2^2 R_{Le}} = \frac{R_{Le}}{\frac{(R_2 + R_{Le})^2}{k^2 Q_1 Q_2 R_2} + R_2 + R_{Le}}$$

Dengan mendefinisikan R_{Le}/R_2 , kita memperoleh ekspresi efisiensi sebagai fungsi dari a :

Persamaan 16.12

$$\eta(a) = \frac{1}{a + \frac{1}{a} + 2 + \frac{1}{k^2 Q_1 Q_2} + \frac{1}{a} + 1}$$

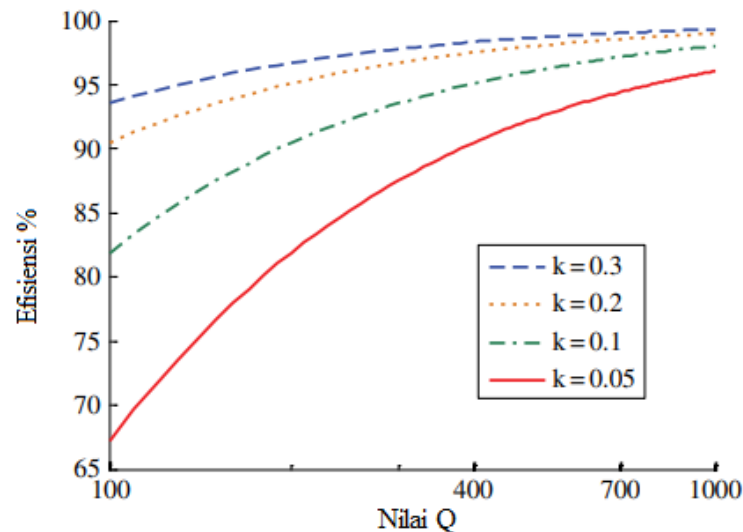
Efisiensi maksimum diperoleh dengan menyelesaikan persamaan berikut:

Persamaan 16.13

$$\frac{\partial}{\partial a} \eta(a) = 0, \frac{\partial^2}{\partial^2 a} \eta(a) < 0$$

Efisiensi maksimum $\eta_{max} = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2})^2}$ diterima pada $a_{\eta_{max}} = \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2}$

Efisiensi maksimum juga diturunkan berdasarkan beberapa jenis jaringan kompensasi yang berbeda. Hasilnya identik dan sesuai dengan hasil di atas.



Gambar 16.3 Efisiensi transfer maksimum teoritis antara dua kumparan

Analisis di sini tidak menentukan bentuk kompensasi tertentu. Sebaliknya, itu bisa dianggap sebagai rumus umum untuk mengevaluasi kinerja kumparan dan untuk memperkirakan efisiensi transfer daya setinggi mungkin. Dalam aplikasi pengisian nirkabel EV, baterai biasanya terhubung ke koil melalui penyearah jembatan dioda. Sebagian besar waktu, ada beberapa daya reaktif yang diperlukan. Daya reaktif dapat disediakan oleh koil atau jaringan kompensasi seperti pickup faktor daya unit. Baterai bisa setara dengan resistansi $R_b = U_b/I_b$, dimana U_b dan I_b masing-masing adalah tegangan dan arus baterai. Jika baterai dihubungkan langsung ke penyearah dalam bentuk kompensasi seri-seri, resistansi sisi AC ekivalen dapat dihitung dengan $R_{ac} = 8/\pi^2 \cdot R_b$. Dengan demikian, beban baterai dapat diubah menjadi beban resistif. Persamaan R_{ac} berbeda untuk gaya sambungan baterai yang berbeda, seperti dengan atau tanpa konverter DC/DC, kompensasi paralel atau seri. Sebagian besar waktu, R_{ac} yang setara dapat diturunkan. Beberapa impedansi setara khas pada sisi primer diberikan dalam. Dengan menghitung resistansi AC ekivalen, persamaan di atas juga dapat diterapkan ke beban baterai dengan penyearah.

Untuk pengisian nirkabel EV stasioner, sambungan antara dua kumparan biasanya sekitar 0,2. Jika kumparan pengirim dan penerima memiliki faktor kualitas 300, efisiensi transfer daya maksimum teoritis adalah sekitar 96,7%. Perhitungan efisiensi lainnya di bawah faktor kopling dan kualitas yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 16.3.

16.3 DESAIN COUPLER MAGNETIK

Untuk mentransfer daya secara nirkabel, harus ada setidaknya dua skrup magnetik dalam sistem WPT. Salah satunya adalah di sisi pengirim – coupler utama. Yang lainnya ada di sisi penerima – coupler pickup. Tergantung pada skenario aplikasi, coupler magnetik dalam WPT untuk EV dapat berbentuk pad atau track. Untuk efisiensi yang lebih tinggi, penting untuk memiliki koefisien kopling k yang tinggi dan faktor kualitas Q yang tinggi. Umumnya, untuk struktur tertentu, semakin besar rasio size-to-gap dari coupler, semakin tinggi k ; semakin tebal kawat dan semakin besar area bagian ferit, semakin tinggi Q . Dengan meningkatkan dimensi dan memperbaiki bahan, efisiensi yang lebih tinggi dapat dicapai, tetapi ini bukan pendekatan rekayasa yang baik. Lebih disukai memiliki k dan Q yang lebih tinggi dengan dimensi dan biaya minimum. Karena Q sama dengan $\omega L/R$, frekuensi tinggi biasanya diadopsi untuk meningkatkan nilai Q .

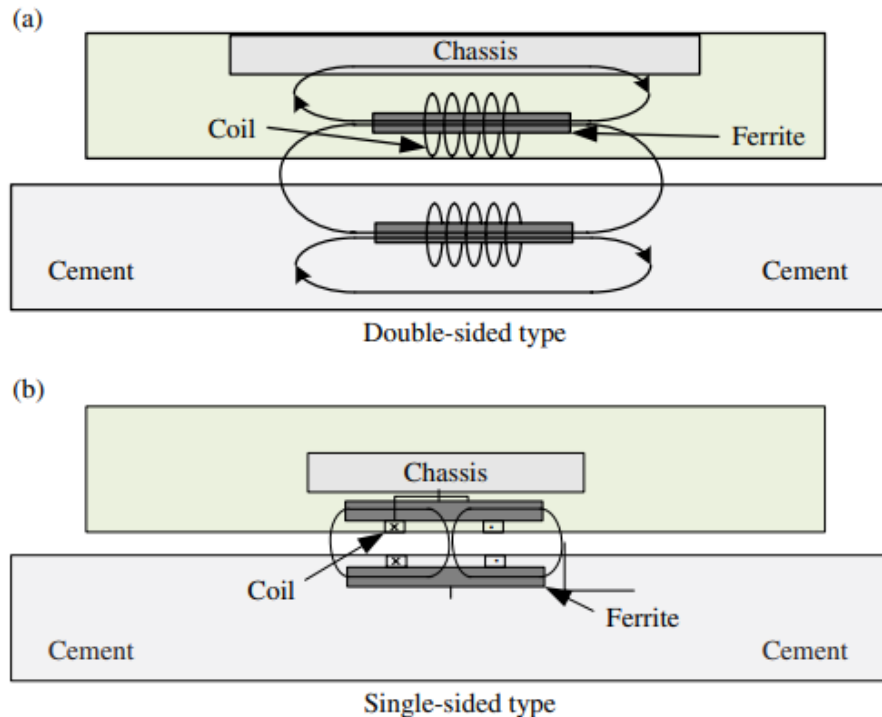
Peneliti di MIT menggunakan frekuensi sekitar 10 MHz dan nilai Q koil mencapai hampir 1000. Dalam aplikasi EV WPT berdaya tinggi, frekuensi juga ditingkatkan untuk mendapatkan manfaat ini. Dalam desain awal Bolger, frekuensinya hanya 180 Hz. Beberapa tahun kemudian, frekuensi 400 Hz. Sistem EV WPT dirancang oleh *System Control Technology*. Baik 180 Hz maupun 400 Hz cukup tinggi untuk sistem yang digabungkan secara longgar, dan skrup besar digunakan dalam dua desain. Sistem WPT modern menggunakan frekuensi minimal 10 kHz, dan 100 kHz dapat dicapai pada tingkat daya tinggi. Perusahaan WiTricity, dengan teknologi dari MIT, menggunakan frekuensi 145 kHz dalam desainnya. Dalam penelitian dan aplikasi terbaru, frekuensi yang diadopsi dalam sistem EV WPT adalah antara 20 kHz dan 150 kHz untuk menyeimbangkan efisiensi dan biaya. Dalam rentang frekuensi ini, untuk mengurangi kerugian AC kumparan tembaga, kawat Litz biasanya diadopsi.

Selain frekuensi, koefisien kopling k dipengaruhi secara signifikan oleh desain skrup magnetik, yang dianggap sebagai salah satu faktor terpenting dalam sistem WPT. Dengan dimensi dan bahan yang sama, geometri dan konfigurasi coupler yang berbeda akan berdampak signifikan pada koefisien kopling. Desain coupler yang lebih baik dapat menghasilkan peningkatan 50~100% dibandingkan dengan beberapa desain yang tidak optimal.

Coupler untuk Pengisian Stasioner

Dalam pengisian stasioner, coupler biasanya dirancang dalam bentuk bantalan. Skrup yang sangat awal seperti transformator split-core sederhana. Biasanya desain semacam ini hanya dapat mentransfer daya melalui celah yang sangat kecil. Untuk memenuhi persyaratan pengisian EV, deformasi dari trafo split-core dan bentuk coupler magnetik baru disajikan untuk transfer daya celah besar. Menurut ke area distribusi fluks magnet, skrup dapat diklasifikasikan sebagai tipe dua sisi atau satu sisi. Untuk tipe dua sisi, fluks mengalir ke kedua sisi coupler. Bentuk induktor solenoida pipih diusulkan. Karena fluks melewati ferit seperti melalui pipa, itu juga disebut coupler pipa fluks. Untuk mencegah hilangnya arus eddy di sasis EV, pelindung aluminium biasanya ditambahkan, yang membawa kerugian 1~2%. Ketika perisai ditambahkan, faktor kualitas dari coupler fluks-pipa berkurang dari 260 menjadi 86. Kehilangan pelindung yang tinggi membuat dua sisi coupler pilihan yang tidak optimal. Untuk coupler satu sisi, sebagian besar fluks hanya ada di satu sisi coupler. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16.4, jalur fluks utama mengalir melalui ferit dalam coupler satu sisi. Berbeda dengan coupler dua sisi, yang memiliki setengah dari fluks utama di belakang, coupler satu sisi hanya memiliki fluks bocor di bagian belakang. Ini membuat upaya perlindungan dari tipe satu sisi jauh lebih sedikit.

Dua bantalan tipe fluks satu sisi yang khas ditunjukkan pada Gambar 16.5. Salah satunya adalah pad unipolar melingkar. Yang lainnya adalah bantalan bipolar persegi panjang yang diusulkan oleh University of Auckland, yang juga disebut bantalan DD. Selain dukungan mekanis bahan, pad satu sisi terdiri dari tiga lapisan. Lapisan atas adalah kumparan. Di bawah kumparan, lapisan ferit dimasukkan untuk tujuan meningkatkan dan membimbing fluks.

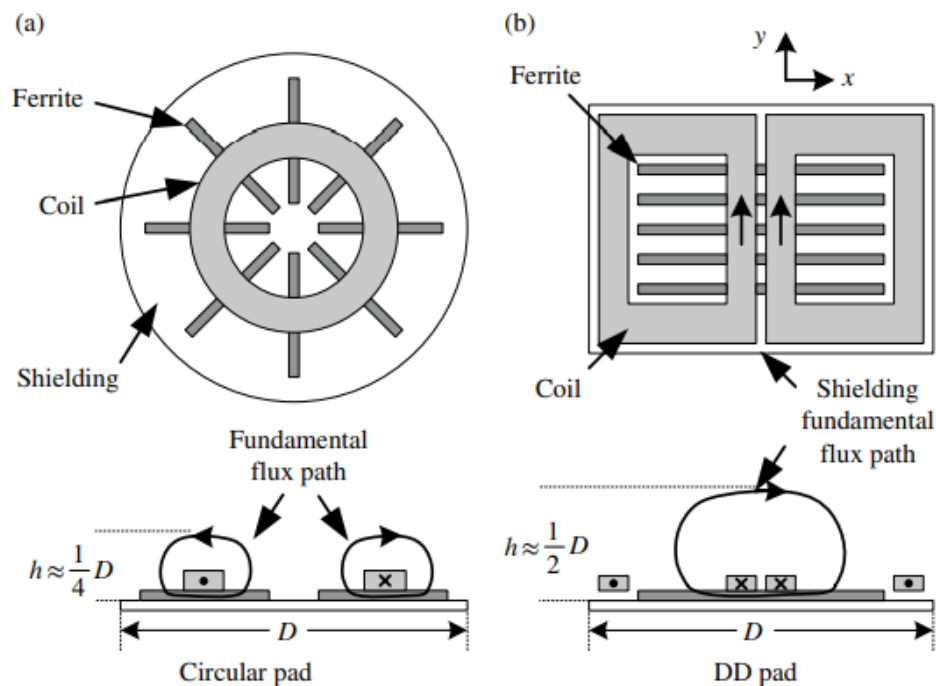


Gambar 16.4 Jalur fluks utama dari skrup dua sisi dan satu sisi

Di bagian bawah adalah lapisan pelindung. Untuk mentransfer daya, kedua bantalan diletakkan berdekatan, koil ke koil. Dengan lapisan pelindung, sebagian besar fluks magnet bolak-balik frekuensi tinggi dapat dibatasi di ruang antara dua bantalan. Konsep jalur fluks mendasar diusulkan dalam makalah pipa fluks. Tinggi jalur fluks bantalan melingkar adalah sekitar $\frac{1}{4}$ diameter bantalan, sedangkan untuk bantalan DD, tingginya sekitar $\frac{1}{2}$ dari panjang bantalan. Untuk ukuran yang sama, pad DD memiliki peningkatan yang signifikan dalam kopling. Zona pengisian daya untuk bantalan DD bisa sekitar dua kali luas bantalan melingkar dengan yang serupa biaya bahan. DD pad memiliki toleransi yang baik dalam arah y, menjadikan bantalan DD sebagai solusi potensial untuk pengisian dinamis ketika arah mengemudi sepanjang sumbu y. Namun, ada titik nol untuk bantalan DD di arah x sekitar 34% misalignment.

Untuk meningkatkan toleransi dalam arah x, kumparan quadrature tambahan, bernama kumparan Q, diusulkan untuk bekerja sama dengan pad DD, yang disebut bantalan DDQ. Dengan bantalan penerima DDQ pada bantalan pengirim DD, zona pengisian daya ditingkatkan menjadi lima kali lipat dari konfigurasi melingkar. Karena koil Q tambahan di sisi penerima, konfigurasi DDQ over DD menggunakan hampir dua kali tembaga dibandingkan dengan yang melingkar. Varian dari pad DDQ, yang disebut baru bipolar pad, juga diusulkan oleh University of Auckland. Dengan meningkatkan ukuran setiap bantalan D dan memiliki beberapa tumpang tindih antara dua gulungan D, pad bipolar baru dapat memiliki kinerja yang mirip dengan pad DDQ dengan tembaga 25% lebih sedikit. Dengan semua upaya ini, pada celah 200 mm, sambungan antara bantalan primer dan sekunder bisa mencapai 0,15~0,3

dengan ukuran yang dapat diterima untuk sebuah EV. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16.3, pada tingkat kopling ini, efisiensi di atas 90% mungkin dapat dicapai.

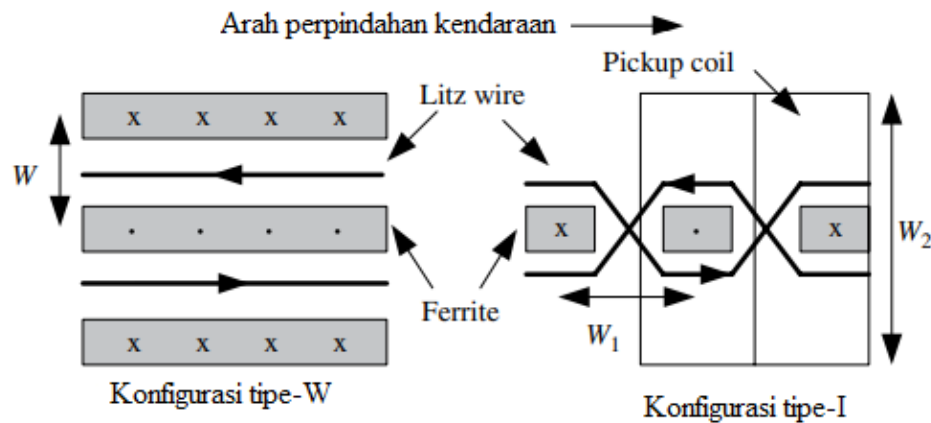


Gambar 16.4 Jalur fluks utama dari skrup dua sisi dan satu sisi

Coupler untuk Pengisian Dinamis

Pengisian dinamis, juga disebut online electric vehicles (OLEV) atau roadway powered electric vehicles (RPEV), adalah cara untuk mengisi EV saat sedang mengemudi. Dia percaya bahwa pengisian dinamis dapat mengatasi kecemasan rentang EV, yang merupakan faktor utama membatasi penetrasi pasar EV. Dalam sistem pengisian dinamis, magnet komponen terdiri dari coupler magnetik sisi primer, yang biasanya terkubur di bawah jalan, dan koil pickup sisi sekunder, yang dipasang di bawah sasis EV. Ada dua jenis utama skrup magnetik utama dalam pengisian dinamis, pertama adalah long track coupler. Ketika EV dengan koil pickup berjalan di sepanjang trek, daya terus menerus dapat ditransfer. Trek bisa sesederhana hanya dua kabel, atau adopsi ferit dengan tipe-U atau tipe-W untuk meningkatkan jarak kopling dan transfer daya. Selanjutnya, desain jalur lebar sempit dengan ferit tipe-I diusulkan oleh KAIST.

Perbedaan antara tipe-W dan tipe-I ditunjukkan pada Gambar 16.6. Untuk konfigurasi tipe-W, area distribusi ferit W menentukan: jarak transfer daya, serta perpindahan lateral. Lebar total tipe-W seharusnya sekitar empat kali jaraknya antara track dan pickup coil. Untuk konfigurasi tipe-I, kutub magnet bergantian mengikuti jalan. Jarak tiang W_1 dioptimalkan untuk mencapai kopling yang lebih baik pada jarak yang diperlukan. Lebar koil pickup W_2 dirancang untuk memenuhi persyaratan misalignment lateral. Hubungan antara lebar lintasan dan jarak transfer dipisahkan, dan lintasan dapat dibuat sangat sempit. Lebar untuk tipe U dan tipe-W masing-masing adalah 140 cm dan 80 cm. Untuk tipe-I, itu dapat dikurangi menjadi hanya 10 cm dengan jarak transfer daya dan kapasitas misalignment yang serupa.



Gambar 16.6 Tampilan atas konfigurasi track tipe-W dan tipe-I.

Daya 35 kW ditransfer pada celah 200 mm dan perpindahan 240 mm menggunakan konfigurasi tipe-I. Dengan desain yang menyempit, biaya konstruksi dapat ditekan. Selain itu, karena lintasannya jauh dari pinggir jalan, kekuatan medan elektromagnetik yang dialami pejalan kaki juga dapat dikurangi. Masalah dengan desain trek adalah koil pickup hanya menutupi sebagian kecil trek, yang membuat koefisien kopling sangat kecil. Kopling yang buruk menghasilkan masalah efisiensi dan electromagnetic interference (EMI). Untuk mengurangi masalah EMI, trek dibangun dalam segmen dengan konverter daya tunggal dan satu set sakelar untuk memberi daya pada trek. Eksitasi setiap segmen dapat dikontrol oleh sakelar on-off menyatakan, sehingga medan elektromagnetik di atas segmen yang tidak aktif berkurang secara signifikan atau dihilangkan. Namun, selalu ada arus frekuensi tinggi yang mengalir melalui kabel suplai umum, yang menurunkan efisiensi sistem. Efisiensi sistem yang dipublikasikan adalah sekitar 70~80%, yang jauh lebih rendah daripada efisiensi yang dicapai dalam pengisian daya stasioner.

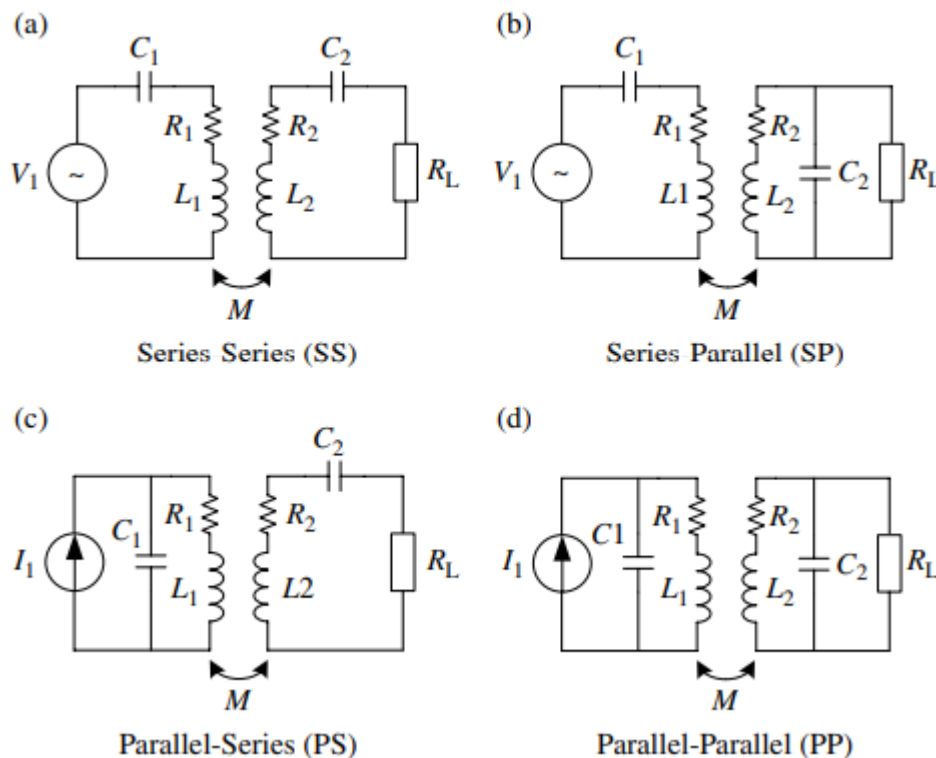
Jika setiap segmen cukup pendek, trek menjadi seperti bantalan dalam pengisian stasioner, yang merupakan jenis lain dari coupler magnetik primer. Setiap pad dapat digerakkan oleh konverter daya independen. Dengan cara ini, bantalan primer dapat dieksitasi secara selektif tanpa arus bersama frekuensi tinggi. Juga, pad utama yang diberi energi tertutup oleh kendaraan. Medan elektromagnetik terlindung untuk memiliki dampak minimum pada lingkungan sekitarnya. Efisiensi dan kinerja EMI bisa sama baiknya dengan aplikasi pengisian daya stasioner, tetapi biaya untuk membangun konverter daya untuk setiap pad terlalu tinggi. Sebaiknya hanya menggunakan satu konverter untuk menggerakkan beberapa bantalan, agar arus di setiap bantalan dapat dikontrol. Metode berpasangan ganda diusulkan dengan masing-masing pad dikonfigurasi dengan coupler perantara dan sakelar dua arah. Skrup perantara digabungkan ke satu koil primer di sisi konverter dan bekerja seperti sumber arus frekuensi tinggi. Dengan mengontrol waktu on-off sakelar, arus di setiap pad dapat dikontrol. Namun, bahkan jika pad yang sesuai dimatikan oleh sakelar, arus frekuensi tinggi selalu bersirkulasi di semua skrup perantara, yang dapat menurunkan efisiensi.

Sebuah ide penahanan bidang refleksif oleh North Carolina State University juga telah diusulkan, di mana tiga bantalan digerakkan hanya dari satu konverter daya. Dengan hati-hati merancang parameter primer dan pickup, bidang refleksif pad pickup dapat meningkatkan arus di pad utama. Arus di masing-masing pad utama peka terhadap kondisi kopling dan dapat meningkat secara otomatis ketika bantalan pickup digabungkan. Lebih-lebih lagi, arus berkurang sangat cepat ketika bantalan pickup bergerak menjauh. Hubungan antara arus pad primer dan koefisien kopling harus dirancang dengan hati-hati. Untuk pengisian daya dinamis,

EV berjalan bebas di jalan, yang membuat kopling bervariasi dalam rentang yang luas. Untuk membuat metode ini lebih praktis, karakteristik sistem di bawah variasi kopling yang disebabkan oleh misalignment lateral, gerakan maju kendaraan, dan jenis kendaraan perlu dipelajari lebih lanjut.

16.4 JARINGAN KOMPENSASI

Dalam sistem WPT, bantalan digabungkan secara longgar dengan induktansi kebocoran yang besar. Analisis di Bagian 16.2 menunjukkan bahwa perlu menggunakan jaringan kompensasi untuk mengurangi peringkat VA di koil dan catu daya. Dalam desain pengisian induktif awal, kompensasi ditetapkan pada sisi primer atau sekunder saja. Ketika kopling koefisien dikurangi menjadi kurang dari 0,3 di EV WPT, kompensasi pada kedua primer dan sisi sekunder direkomendasikan untuk memiliki karakteristik yang lebih fleksibel dan maju. Untuk mengkompensasi kebocoran induktansi, cara paling sederhana adalah dengan menambahkan kapasitor pada setiap sisi. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16.7, tergantung pada bagaimana kapasitor terhubung ke kumparan, ada empat topologi kompensasi dasar, yaitu seri-seri (SS), seri-paralel (SP), paralel-paralel (PP), dan paralel-seri (PS).



Gambar 16.7 Empat topologi kompensasi dasar.

Jika sisi primer dikompensasi seri, konverter sumber tegangan dapat dihubungkan langsung ke kumparan. Jika sisi primer dikompensasi paralel, biasanya sebuah induktor dimasukkan untuk mengubah konverter menjadi sumber arus. Kapasitor sisi sekunder C_2 biasanya dirancang untuk beresonansi dengan L_2 untuk mengurangi kapasitas VA kumparan. Ketika kumparan sisi primer memiliki arus konstan, kompensasi seri di sisi sekunder membuat output berperilaku seperti sumber tegangan, sedangkan kompensasi paralel membuat output berperilaku seperti sumber arus. Namun, tidak semua desain memiliki arus sisi primer yang

konstan, dan karakteristik output yang berbeda dapat terjadi untuk kompensasi seri atau paralel di sisi sekunder.

Tabel 16.1 Kapasitansi kompensasi primer.

Topology	Primary capacitance C_1
SS	$\frac{C_2 L_2}{L_1}$
SP	$\frac{C_2 L_2}{L_1} \cdot \frac{1}{1-k^2}$
PS	$\frac{C_2 L_2}{L_1} \cdot \frac{1}{Q_s^2 k^4 + 1}$
PP	$\frac{C_2 L_2}{L_1} \cdot \frac{1-k^2}{Q_s^2 k^4 + (1-k^2)^2}$

Untuk mengurangi peringkat VA konverter daya, kapasitor sisi primer biasanya disetel untuk membuat tegangan dan arus input berada dalam fase di bawah kondisi kopling dan beban tertentu, yang disebut metode *zero-phase-angle* (ZPA). Untuk mewujudkan soft-switching untuk konverter elektronika daya, jaringan kompensasi sisi primer sering disetel untuk membuat sisi primer memiliki sebagian kecil daya reaktif untuk mencapai kondisi *zero voltage switching* (ZVS) atau *zero current switching* (ZCS). Karena daya reaktif yang disetel relatif kecil, parameter untuk merealisasikan ZVS dan ZCS mendekati parameter yang dirancang dengan metode ZPA.

Untuk mencapai ZPA di sisi utama, kapasitansi utama untuk berbagai jenis kompensasi tercantum dalam Tabel 16.1. Dari tabel ini kita dapat melihat kapasitansi kompensasi utama adalah nilai konstan untuk metode SS, terlepas dari kondisi kopling dan beban. Untuk metode SP, kapasitansi bervariasi ketika kopling berubah. Untuk PS dan PP, kapasitansi dipengaruhi oleh kondisi kopling dan beban. Ketika sisi sekunder berada pada frekuensi resonansi, beban yang dipantulkan pada sisi primer sisi dapat dihitung dari:

Persamaan 16.14

$$R_{r_{ss}} = R_{r_{ps}} = \frac{\omega_0^2 M^2}{R_L}$$

Persamaan 16.15

$$R_{r_{sp}} = R_{r_{pp}} = \frac{M^2 R_L}{L_2^2}$$

Untuk struktur SS, dari (16.14) kita melihat bahwa ketika kopling berkurang, resistansi yang dipantulkan di sisi primer juga berkurang. Ini akan meningkatkan daya output ketika sisi primer dihubungkan ke sumber tegangan. Untuk struktur PS, resistansi yang dipantulkan berubah

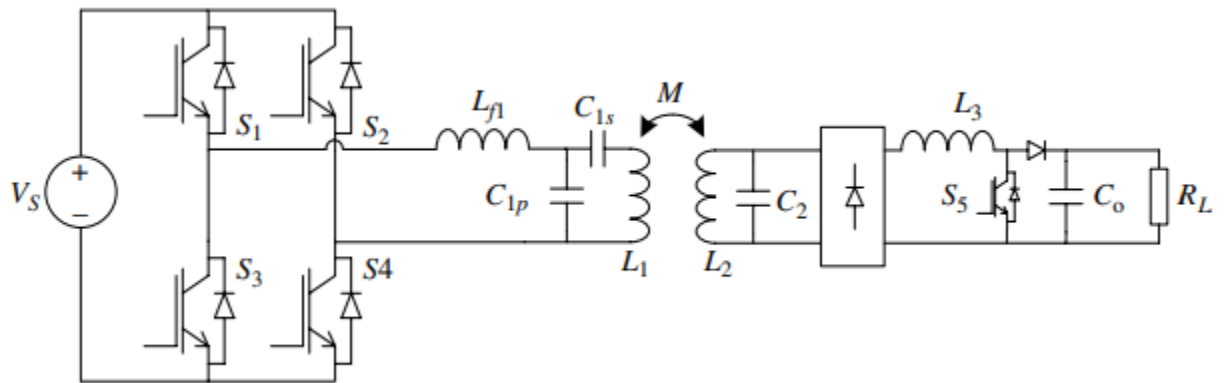
dengan cara yang sama seperti perubahan kopling. Namun, struktur PS harus dihubungkan ke sumber arus. Daya output akan berkurang ketika kopling berkurang. Untuk mempertahankan daya output konstan ketika kopling berubah, metode kompensasi SPS diusulkan di. Ini dapat dianggap sebagai kombinasi dari SS dan PS. Dengan merancang rasio yang tepat antara dua kapasitor sisi primer, karakteristik SS dan PS dicampur. Dengan demikian, daya output konstan tercapai pada toleransi misalignment yang tinggi tanpa menyesuaikan catu daya utama.

Dengan memperkenalkan jaringan kompensasi LC, struktur sumber arus LCL sisi utama banyak digunakan dalam pemanasan induktif dan aplikasi transfer daya nirkabel. Keuntungan dari struktur LCL sudah jelas. Pada frekuensi resonansi, jaringan LCL bekerja seperti sumber arus. Arus pada kumparan sisi primer dikendalikan oleh tegangan gelombang persegi frekuensi tinggi dari konverter daya, terlepas dari kondisi kopling dan beban. Ini membuat kontrol di sisi utama jauh lebih mudah. Selain itu, dengan menyetel parameter LCL, daya reaktif dapat sepenuhnya kompensasi. Konverter daya menyediakan: daya aktif saja, jadi VA yang dibutuhkan rating untuk konverter daya juga dapat diminimalkan.

Bersama dengan kompensasi utama LCL, kompensasi menggunakan bentuk paralel pada sisi sekunder diadopsi dalam banyak desain. Kontrol daya dan metode decoupling untuk struktur paralel telah dikembangkan dengan baik. Namun, sistem kompensasi paralel memiliki arus reaktif yang besar di koil pickup dan arus reaktif daya dipantulkan ke sisi primer. Untuk mengatasi kelemahan kompensasi pickup paralel, pickup faktor daya kesatuan telah diusulkan oleh University of Auckland. Dengan memperkenalkan koil pickup bentuk LCL, arus yang bersirkulasi dalam koil pickup dapat diminimalkan dan hanya beban aktif yang dipantulkan ke sisi primer. Untuk menghilangkan efek nonlinier dari dioda penyearah, kapasitor lain adalah: diperkenalkan untuk membentuk bentuk kompensasi LCLC, yang dapat mencapai kesatuan yang tepat faktor daya di bawah kondisi beban yang telah ditentukan. Dari perbandingan, perbedaan antara LCL dan LCLC tidak signifikan. Baik struktur LCL dan LCLC mencapai peningkatan efisiensi yang signifikan dibandingkan dengan struktur tradisional struktur paralel LC.

16.5 KONVERTER ELEKTRONIK DAYA DAN KONTROL DAYA

Dalam sistem WPT, fungsi konverter elektronika daya sisi primer adalah untuk membangkitkan arus frekuensi tinggi pada koil pengirim. Untuk meningkatkan frekuensi dan efisiensi switching, biasanya topologi resonansi diadopsi. Di sisi sekunder, penyearah diadopsi untuk mengubah arus AC frekuensi tinggi menjadi arus DC. Tergantung pada apakah kontrol samping sekunder diperlukan, konverter tambahan dapat digunakan. Konverter sisi primer dapat berupa tegangan atau konverter sumber arus. Karena induktor besar diperlukan untuk konverter sumber arus, pilihan paling umum di sisi primer adalah konverter resonansi sumber tegangan jembatan penuh. Skema rangkaian daya nirkabel tipikal ditunjukkan pada Gambar 16.8. Di sisi primer, konverter jembatan penuh mengeluarkan tegangan gelombang persegi frekuensi tinggi.



Gambar 16.8 Skema rangkaian konfigurasi WPT tipikal.

Dengan mengadopsi jaringan kompensasi LC, arus frekuensi tinggi yang konstan dapat dipertahankan di L_1 . Kapasitor tambahan C_{1s} diperkenalkan di sini untuk mengkompensasi bagian dari daya reaktif L_1 . Dengan demikian, peringkat daya pada L_{f1} dapat dikurangi. Fleksibilitas desain sistem juga dapat ditingkatkan. Di sisi sekunder, kompensasi paralel diadopsi. Dengan arus kumparan primer konstan dan kompensasi sisi sekunder paralel, output berperilaku seperti sumber arus. Pada kopling tertentu, arus di L_3 hampir konstan. Dengan mengubah rasio tugas sakelar S_5 , daya output juga dapat dikontrol.

Banyak metode kontrol yang berbeda telah diusulkan untuk mengontrol daya yang ditransfer. Tergantung di mana tindakan kontrol diterapkan, metode kontrol dapat diklasifikasikan sebagai kontrol sisi primer, kontrol sisi sekunder atau kontrol sisi ganda. Dalam kebanyakan kasus, kontrol sisi primer dan sisi ganda hanya cocok untuk transfer daya dari satu pad utama ke satu pad pickup. Kontrol samping sekunder dapat digunakan dalam skenario di mana beberapa bantalan pickup ditenagai oleh satu bantalan atau track utama.

Kontrol pada sisi primer dapat diwujudkan dengan mengubah frekuensi, duty cycle, dan fase antara kedua kaki. Karena karakteristik dari konverter resonansi terkait dengan frekuensi operasi, kontrol frekuensi di sisi primer diadopsi dalam beberapa desain. Saat menyesuaikan frekuensi, fenomena bifurkasi dalam sistem yang digabungkan secara longgar harus diperhatikan. Daya vs frekuensi tidak selalu merupakan fungsi monoton. Selain itu, metode kontrol frekuensi membutuhkan bandwidth frekuensi radio yang lebih luas, yang dapat meningkatkan risiko interferensi elektromagnetik. Ketika frekuensi switching tetap, kontrol dapat dilakukan dengan siklus kerja atau pergeseran fasa. Masalah dengan siklus tugas atau kontrol pergeseran fasa, bagaimanapun, adalah ada tegangan tinggi arus yang bersirkulasi dalam konverter. Juga, kondisi peralihan ZVS atau ZCS mungkin hilang. Untuk memastikan ZVS, cara alternatif untuk mengontrol daya output sistem adalah dengan mengatur tegangan DC input V_S . Metode pembatalan tegangan asimetris, yang menggunakan cara alternatif untuk mengubah siklus kerja, diusulkan untuk meningkatkan wilayah ZVS. Sebuah metode injeksi energi diskrit, yang dapat mencapai ZCS dan menurunkan frekuensi switching di bawah kondisi beban ringan.

Di sisi sekunder, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16.8, dengan kompensasi paralel, dorongan konverter dimasukkan setelah penyearah untuk kontrol. Sejalan dengan itu, dengan kompensasi seri, konverter uang dapat digunakan. Ketika kontrol setelah penyearah, induktor DC tambahan, serta dioda pada jalur aliran arus, harus diperkenalkan. University of Auckland mengusulkan metode kontrol pada sisi AC sebelum penyearah. Dengan demikian, induktor DC dan dioda tambahan dapat disimpan. Karena resonansi di sisi AC, ZVS dan ZCS

dapat dicapai. Desain rinci untuk kompensasi seri, serta jaringan kompensasi LC. Kontrol sisi ganda adalah kombinasi dari kontrol sisi primer dan sekunder. Kompleksitas dan biaya sistem dapat meningkat, tetapi efisiensi dapat dioptimalkan dengan kontrol dua sisi.

16.6 METODE STUDI

Transfer daya nirkabel melibatkan berbagai disiplin ilmu, termasuk magnet, elektronika daya, komunikasi, teknik mesin dan listrik. Studi tentang sistem WPT bisa sangat kompleks karena sifat multidisiplin dan ketidakpastiannya. Misalnya, medan magnet berada pada frekuensi tinggi dan kerapatan rendah, dan bervariasi dengan jarak kesenjangan, misalignment, dan tingkat daya. Resonansi dalam sistem adalah kunci untuk transfer daya efisiensi tinggi, tetapi itu juga dapat dipengaruhi oleh sambungan antara dua kumparan, dan media sekitarnya (yaitu, lingkungan basah atau kering). Biasanya, studi tentang sistem WPT melibatkan:

- 1) metode analitik, termasuk analisis rangkaian dan perhitungan induktansi timbal balik melalui pendekatan analitis
- 2) analisis lapangan menggunakan alat numerik seperti metode elemen hingga, batas hingga metode, analisis sistem terstruktur frekuensi tinggi, dll.
- 3) simulasi model lumped yang melibatkan analisis parametrik, yaitu koefisien kopling perubahan versus efisiensi, dll.
- 4) studi eksperimental yang melibatkan penggunaan penganalisis jaringan dan pengukuran lapangan dan identifikasi parameter sistem WPT dan karakteristik resonansinya
- 5) soft switching dari konverter daya dalam sistem WPT yang melibatkan berbagai metode untuk mempelajari rangkaian elektronika daya.

Secara khusus, teori jaringan dua port dapat menjadi alat yang efisien untuk mempelajari sistem WPT. Gambar 16.9 menunjukkan sistem WPT dengan topologi resonansi SP dan representasi jaringan dua port generiknya. Matriks impedansi, matriks transfer, dan matriks hamburan dapat didefinisikan sebagai: Matriks Impedansi – Z

Persamaan 16.16

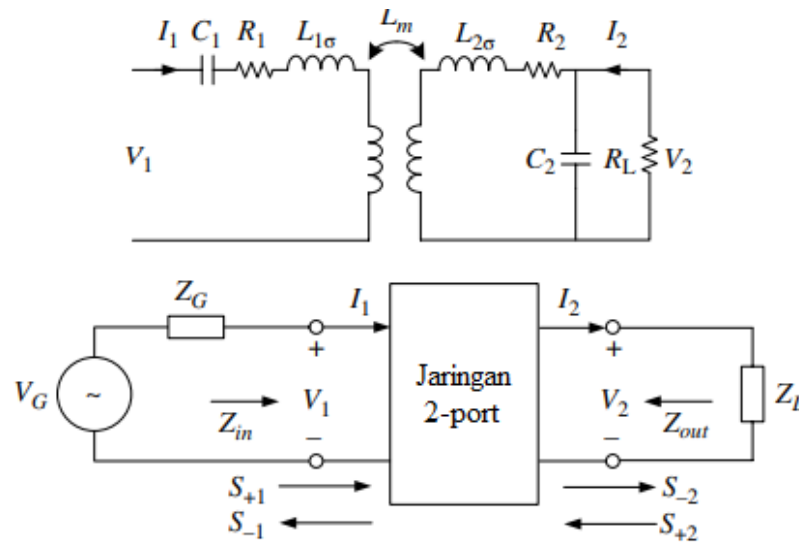
$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ -I_2 \end{bmatrix}$$

Persamaan 16.17

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ -I_2 \end{bmatrix}$$

Persamaan 16.18

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$



Gambar 16.9 Sistem WPT dengan topologi resonansi SP dan representasinya sebagai jaringan dua port: top – topologi SP; bawah – jaringan dua port dari sistem WPT

Dengan menyusun kembali persamaan di atas, kita dapat memperoleh hubungan berikut antara matriks impedansi dan matriks transfer:

Persamaan 16.19

$$Z = \frac{1}{C} \begin{bmatrix} a & -(ad - bc) \\ 1 & -d \end{bmatrix}; T = \frac{1}{Z_{21}} \begin{bmatrix} Z_{11} & -(Z_{11}Z_{12}Z_{21}) \\ 1 & -Z_{22} \end{bmatrix}$$

Demikian pula, kita dapat memperoleh hubungan berikut antara matriks impedansi dan matriks hamburan:

Persamaan 16.20

$$Z = \frac{Z_0}{D_Z} \begin{bmatrix} (1 + S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12}S_{21} & 2S_{12} \\ 2S_{21} & (1 + S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12}S_{21} \end{bmatrix}$$

Persamaan 16.21

$$S = \frac{1}{D_Z} \begin{bmatrix} (Z_{11} - Z_0)(Z_{22} + Z_0) - Z_{12}Z_{21} & 2Z_{12}Z_0 \\ 2Z_{21}Z_0 & (Z_{11} - Z_0)(Z_{22} + Z_0) - Z_{12}Z_{21} \end{bmatrix}$$

Dimana

Persamaan 16.22

$$D_Z = (Z_{11} + Z_0)(Z_{22} + Z_0) - Z_{12}Z_{21}$$

$$D_S = (1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}$$

Input power pada jaringan

Persamaan 16.22

$$P_1 = \frac{|V_s|^2}{|Z_s + Z_{in}|^2} R_{in} = \frac{|V_s|^2 (1 - |\Gamma_{in}|^2) 1 - |\Gamma_s|^2}{4Z_0 (1 - |\Gamma_{in}\Gamma_s|^2)} R_{in}$$

Output power:

Persamaan 16.24

$$P_2 = \frac{|Z_{21}|^2 |V_s|^2}{|(Z_{in} + Z_s)(Z_{22} + Z_L)|^2} R_L = \frac{|V_s|^2 (1 - |\Gamma_{in}|^2) 1 - |\Gamma_s|^2 |S_{21}|^2}{4Z_0 |1 - S_{11}\Gamma_s| (1 - S_{22}\Gamma_s) - S_{12}S_{21}\Gamma_s\Gamma_L|^2}$$

Efisiensi :

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{L_m} \left(L_1 - \frac{1}{\omega^2 C_1} + R_1 C_2 R_2 + \frac{L_2 C_2}{C_1} \right) + \frac{1}{L_m} (-\omega^2 C_2 (L_1 L_2 - L_m^2)) \\ &\quad + \frac{j}{L_m} \left(-\frac{R_1}{\omega} \right) + \frac{j}{L_m} \left(\omega C_2 R_2 L_1 - \frac{C_2 R_2}{\omega C_1} + \omega C_2 R_1 L_2 \right) \\ b &= \frac{1}{L_m} \left(L_1 R_2 - \frac{R_2}{\omega^2 C_1} + R_1 L_2 \right) + \frac{j}{L_m} \left(-\frac{R_1 R_2}{\omega} + \omega (L_1 L_2 - L_m^2) - \frac{L_2}{\omega C_1} \right) \\ c &= \frac{1}{L_m} \left(C_2 R_2 + j \left(\frac{-1}{\omega} + \omega C_2 L_2 \right) \right) \\ d &= \frac{1}{L_m} \left(L_2 + j \left(-\frac{R_2}{\omega} \right) \right) \end{aligned}$$

Dari persamaan di atas, kita dapat dengan mudah mempelajari kinerja sistem dengan menyesuaikan parameter sistem.

Diskusi Tambahan

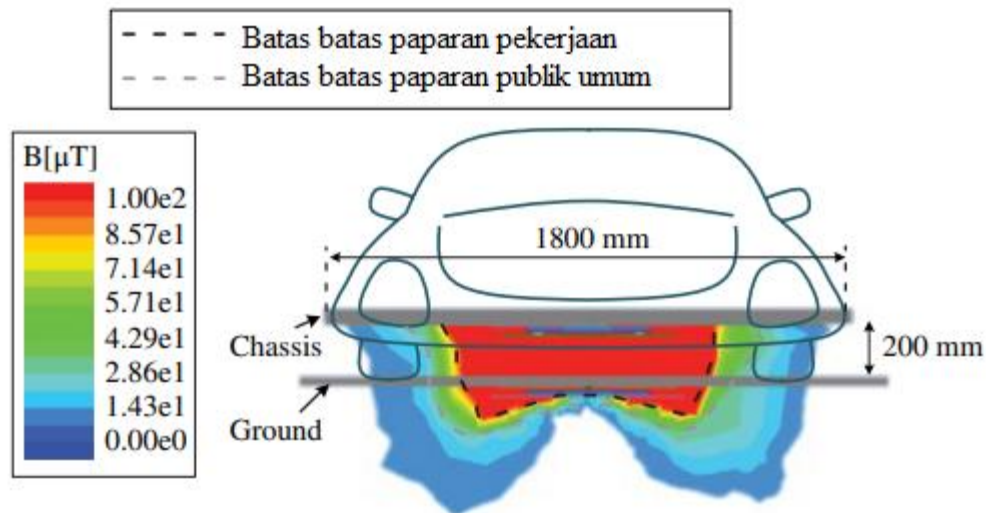
Masalah Keamanan

Transfer daya nirkabel menghindari risiko dari sengatan listrik yang terkait dengan tradisional metode pengisian kontak, tetapi saat mengisi baterai EV secara nirkabel, ada medan magnet frekuensi tinggi antara koil pemancar dan penerima. Celah udara yang besar antara dua kumparan menyebabkan medan kebocoran yang tinggi, tetapi fluks magnet yang digabungkan antara dua kumparan adalah dasar untuk transfer daya nirkabel, yang tidak dapat dilindungi. Frekuensi dan amplitudo medan magnet kebocoran harus dikontrol secara rumit untuk memenuhi peraturan keselamatan.

Wilayah aman harus selalu ditentukan untuk EV pengisian nirkabel. Kita harus memastikan bahwa kerapatan fluks magnet memenuhi pedoman keselamatan saat orang berada dalam posisi normal, seperti berdiri di luar mobil atau duduk di dalam mobil. Untungnya, mobil biasanya terbuat dari baja, yang merupakan bahan pelindung yang sangat baik.

Pedoman yang diterbitkan oleh International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) adalah standar yang paling direferensikan untuk memastikan manusia keamanan. Ada dua versi standar ICNIRP, pertama diterbitkan di 1998. Dalam ICNIRP 1998, ada dua tingkat referensi untuk pekerjaan dan umum paparan publik masing-masing. Pada

frekuensi 0,8–150 kHz, yang mencakup sebagian besar frekuensi EV WPT, batas paparan publik umum adalah 6,25 μT . Untuk paparan pekerjaan, itu sedikit berbeda. Pada frekuensi 0,82–65 kHz, batasnya adalah 30,7 μT , sedangkan pada 65 kHz–1 MHz, batasnya adalah $2,0/f$, di mana f adalah frekuensi yang diukur dalam MHz. Di bawah pedoman ICNIRP 1998, evaluasi keselamatan untuk 5 kW sistem EV WPT stasioner dilakukan. Paparan medan magnet rata-rata hingga benda setinggi 1500 mm adalah 4,36 μT . Untuk sistem EV WPT dinamis 35 kW, kerapatan fluks magnet pada 1 meter dari pusat jalan adalah 2,8 μT .



Gambar 16.10 Batas batas paparan untuk sistem WPT 8 kW.

Baik desain sistem WPT stasioner maupun dinamis memenuhi pedoman keselamatan ICNIRP 1998. Hal yang baik untuk EV WPT adalah, setelah sepuluh tahun penelitian tentang efek kesehatan dari medan elektromagnetik yang bervariasi waktu, ICNIRP merevisi pedomannya pada tahun 2010 dan meningkatkan tingkat referensi secara signifikan. Untuk paparan kerja, tingkat referensi dilonggarkan hingga 100 μT . Untuk masyarakat umum, nilainya berubah dari 6,25 μT menjadi 27 μT . Kenaikan level referensi adalah karena pedoman sebelumnya terlalu konservatif. Ada standar lain tentang masalah keamanan medan elektromagnetik, IEEE Std. C95.1-2005, dipresentasikan oleh Komite Internasional IEEE tentang Keamanan Elektromagnetik. Dalam standar ini, paparan maksimum yang diizinkan untuk kepala dan dada adalah 205 μT untuk masyarakat umum, dan 615 μT untuk okupasi. Eksposur maksimum yang diizinkan untuk anggota badan bahkan lebih tinggi, yaitu 1130 μT baik untuk masyarakat umum maupun pekerjaan. Dibandingkan dengan IEEE Std., standar ICNIRP 2010 masih konservatif. Menurut ICNIRP 2010, batas keselamatan paparan dari sistem EV WPT 8 kW kita untuk paparan pekerjaan dan publik umum ditunjukkan pada Gambar 16.10. Bersama sasis, zona amannya cukup memuaskan. Atas dasar keselamatan, sistem WPT daya yang lebih tinggi dapat dikembangkan sesuai dengan ICNIRP 2010.

Selain masalah keamanan, batas emisi untuk peralatan industrial, scientific, and medical (ISM) juga diatur oleh Federal Communications Commission (FCC) dalam Judul 47 dari Code of Federal Regulations (CFR 47) di bagian 18 di AS. Menurut FCC bagian 18, peralatan ISM yang beroperasi di pita frekuensi ISM tertentu diizinkan energi radiasi tak terbatas. Namun frekuensi ISM terendah berada pada 6,78 MHz, yang terlalu tinggi untuk EV WPT. Ketika WPT beroperasi pada frekuensi non-ISM, batas kekuatan medan harus dikenakan ke §18.305. Society of Automotive Engineers (SAE) sudah membentuk panitia, J2954, untuk melihat banyak masalah yang terkait dengan sistem EV WPT. Salah satu tujuan mereka adalah menciptakan standar keselamatan. Diharapkan standar J2954 SAE pada sistem EV WPT akan

segera dirilis oleh komite ini. Lebih banyak standar dan peraturan dari berbagai daerah dirangkum dalam sebuah makalah dari Qualcomm Incorporated.

Manfaat Kendaraan ke Jaringan

Seiring perkembangan EV, konsep vehicle to grid (V2G), yang mempelajari interaksi antara pengisian EV massal dan jaringan listrik, juga menjadi topik penelitian hangat di area smart grid dan EV. Diakui bahwa jika pengisian EV prosedur dapat dioptimalkan, itu bisa memiliki banyak manfaat untuk grid. EV dapat menyeimbangkan beban dengan pengisian lembah dan pencukuran puncak. Baterai di EV seperti bank energi, sehingga beberapa catu daya energi baru yang tidak stabil, seperti tenaga angin, dapat terhubung ke jaringan dengan lebih mudah. Ketika dioda penyearah sekunder diganti oleh sakelar aktif, fungsi WPT dua arah direalisasikan. WPT dua arah dapat memberikan kinerja tingkat lanjut dalam aplikasi V2G. Studi menunjukkan bahwa dengan memperkenalkan teknologi WPT, pengemudi lebih bersedia untuk menghubungkan EV mereka ke jaringan, yang dapat memaksimalkan manfaat V2G.

16.7 KOMUNIKASI NIRKABEL

Dalam sistem WPT, penting untuk bertukar informasi antara sisi grid dan sisi kendaraan secara nirkabel untuk memberikan umpan balik. Dengan demikian, aliran daya dapat dikontrol dengan metode yang disebutkan dalam Bagian 16.5. Desain komunikasi dapat diklasifikasikan oleh apakah sinyal dimodulasi pada pembawa daya atau menggunakan pita frekuensi terpisah. Standar Qi untuk transfer daya rendah nirkabel memodulasi komunikasi 2 kHz sinyal ke frekuensi pembawa daya, oleh karena itu sinyal komunikasi ditransmisikan melalui kumparan listrik. Sinyal 2 kHz sangat mudah diproses bahkan dengan menggunakan mikrokontroler yang ada di perangkat. Dengan cara ini, antena ekstra dan chip kontrol yang digunakan untuk sinyal komunikasi dapat dihilangkan. Dalam EV WPT sistem, karena tegangan tinggi di kumparan daya, isolasi diperlukan untuk sirkuit kontrol komunikasi, yang dapat meningkatkan biaya.

Untuk pertukaran informasi tingkat lanjut, protokol komunikasi nirkabel umum, seperti Bluetooth dan *near field communication* (NFC), dapat diadopsi. Dalam prototipe EV WPT dari *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL), *Link dedicated short range communications* (DSRC) digunakan. DSRC adalah teknologi berbasis *global position system* (GPS) dan IEEE 802.11p *wireless fidelity* (Wi-Fi), yang bisa mewujudkan hubungan antara kendaraan-ke-kendaraan (V2V) dan kendaraan-ke-infrastruktur (V2I). FCC sudah mengalokasikan pita 75 MHz pada 5,9 GHz untuk DSRC, yang akan digunakan oleh Departemen Transportasi S dalam Intelligent Transportation System (ITS). Karena standar IEEE dan SAE telah diterbitkan, DSRC dapat menyediakan: cara yang lebih mudah untuk menerapkan fungsi jaringan pintar dan memaksimalkan kendaraan untuk manfaat jaringan.

Biaya

Faktor penting yang mempengaruhi masa depan WPT adalah biayanya. Sebenarnya, dari Gambar 16.8, kita melihat bahwa pengisi daya WPT hanya sedikit berbeda dari pengisi daya berkabel. Biaya tambahan pengisi daya WPT terutama disebabkan oleh coupler magnetik. Untuk desain WPT stasioner 8 kW, biaya material dari dua skrup magnetik adalah sekitar 400. Ini adalah kenaikan biaya kasar pengisi daya nirkabel 8 kW dibandingkan dengan pengisi daya kabel, yang cukup dapat diterima, mengingat semua kenyamanan yang dibawa oleh WPT dan penghematan biaya operasi jangka panjang serta pengurangan ukuran baterai. Untuk desain WPT dinamis, biaya infrastruktur, termasuk konverter dan trek untuk jalan satu

arah 1 km, kurang dari 400.000. Investasi elektrifikasi jauh lebih rendah daripada biaya pembangunan jalan itu sendiri. Dengan elektrifikasi jalan raya, baterai onboard EV dapat dikurangi hingga 80%. Penghematan baterai mungkin lebih dari investasi pada infrastruktur. Studi juga menunjukkan bahwa dengan hanya 1% elektrifikasi jalan perkotaan, kebanyakan EV bisa mencapai jarak 480 km dengan mudah.

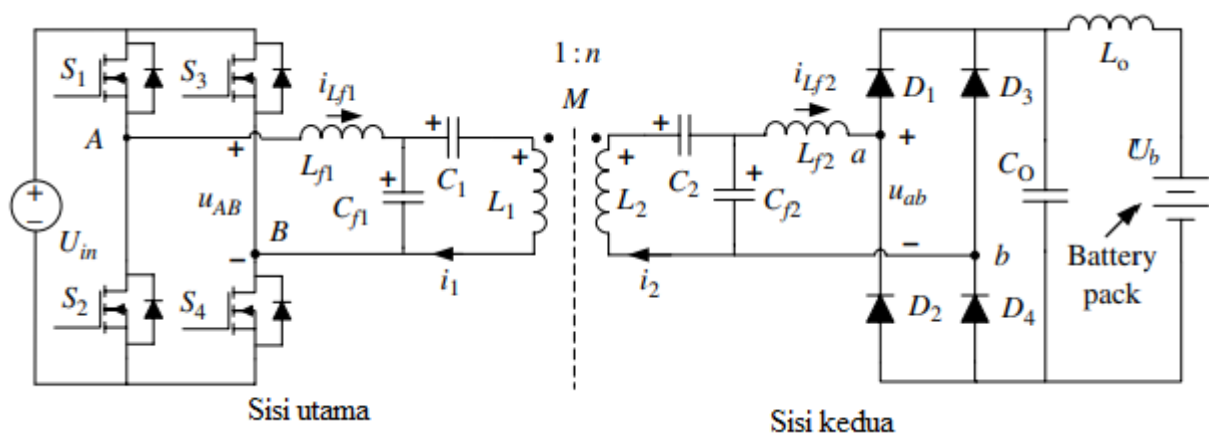
16.8 TOPOLOGI KOMPENSASI LCC DUA SISI DAN DESAIN PARAMETERNYA

Jaringan kompensasi dan metode kontrol yang sesuai adalah aspek yang paling penting dan sulit dalam desain sistem pengisian nirkabel. Di bagian ini, desain jaringan kompensasi difokuskan pada topologi kompensasi LCC dua sisi dan desain parameternya. Topologi terdiri dari satu induktor dan dua kapasitor pada kedua sisi primer dan sekunder. Dengan metode yang diusulkan, frekuensi resonansi kumparan kompensasi tidak tergantung pada koefisien kopling dan kondisi beban. Selain itu, sistem transfer daya nirkabel dapat bekerja pada frekuensi yang konstan, yang memudahkan kontrol dan mempersempit bandwidth frekuensi yang ditempati.

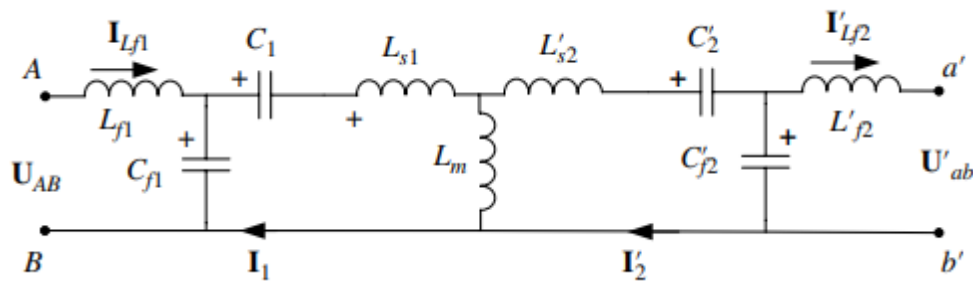
Faktor daya hampir kesatuan dapat dicapai untuk kedua sisi primer dan konverter sisi sekunder secara keseluruhan kisaran kopling dan kondisi beban, sehingga efisiensi tinggi untuk keseluruhan WPT sistem mudah dicapai. Metode penyetelan parameter juga diusulkan dan dianalisis untuk mencapai operasi ZVS untuk inverter berbasis MOSFET. Metode yang diusulkan lebih menarik di lingkungan di mana koefisien kopling terus berubah, seperti aplikasi pengisian kendaraan listrik. Juga, karena strukturnya yang simetris, metode yang diusulkan dapat digunakan dalam sistem WPT dua arah. Hasil simulasi dan eksperimen memverifikasi analisis dan validitas jaringan kompensasi yang diusulkan dan metode penyetelan. Sebuah prototipe dengan daya output 7,7 kW untuk kendaraan listrik dibangun, dan efisiensi 96% dari sumber daya DC ke beban baterai tercapai.

Topologi Kompensasi LCC Dua Sisi

Jaringan kompensasi LCC dua sisi yang diusulkan dan komponen rangkaian elektronika daya yang sesuai ditunjukkan pada Gambar 16.11. $S_1 \sim S_4$ adalah empat MOSFET daya di sisi primer. $D_1 \sim D_4$ adalah dioda penyearah sisi sekunder. L_1 dan L_2 masing-masing adalah induktansi diri dari koil pengirim dan penerima. L_{f1} , C_{f1} , dan C_1 adalah induktor dan kapasitor kompensasi sisi primer. L_{f2} , C_{f2} , dan C_2 adalah komponen kompensasi sisi sekunder. M adalah induktansi timbal balik antara dua kumparan. Di sini, u_{AB} adalah tegangan input yang diterapkan ke koil kompensasi dan u_{ab} adalah tegangan output sebelum dioda penyearah.



Gambar 16.11 Topologi kompensasi LCC dua sisi untuk transfer daya nirkabel.



Gambar 16.12 Rangkaian ekuivalen mengacu pada sisi utama dari topologi yang diusulkan

Variabel i_1 , i_2 , i_{Lf1} , i_{Lf2} berturut-turut adalah arus pada L_1 , L_2 , L_{f1} , dan L_{f2} . Pada analisis berikut, U_{AB} , U_{ab} , i_1 , i_2 , i_{Lf1} , i_{Lf2} adalah diadopsi untuk mewakili bentuk fasor dari variabel yang sesuai. Untuk langkah pertama, karakteristik singkat dari jaringan kompensasi yang diusulkan akan diberikan dengan menganalisis harmonik orde pertama dari bentuk gelombang tegangan persegi pada frekuensi switching. Resistansi pada semua induktor dan kapasitor diabaikan untuk kesederhanaan analisis. Keakuratan perkiraan akan diverifikasi oleh simulasi sirkuit dan percobaan di bagian selanjutnya dari bab ini. Rangkaian ekuivalen dari Gambar 16.11 yang dirujuk ke sisi primer diturunkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16.12. Kita mendefinisikan rasio putaran dari sisi sekunder ke primer sebagai

Persamaan 16.27

$$n = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}$$

Variabel pada Gambar 16.12 dapat dinyatakan sebagai

Persamaan 16.28

$$\begin{aligned} L_m &= k * L_1 \\ L_{s1} &= (1 - k) * L_1 \\ L'_{s2} &= (1 - k) * \frac{L_2}{n^2} \\ L'_{f2} &= \frac{L_{f2}}{n^2} \\ C'_2 &= n^2 * C_2 \\ C'_{f2} &= n^2 * C_{f2} \\ U'_{ab} &= \frac{U_{ab}}{n} \end{aligned}$$

di mana L_m adalah induktansi magnetisasi mengacu pada sisi primer. Simbol prima, yang juga muncul dalam persamaan berikut, berarti nilai yang dikonversi mengacu pada sisi primer. Untuk sistem orde tinggi pada Gambar 16.11, ada beberapa frekuensi resonansi. Pada bagian

ini, kita tidak fokus pada karakteristik domain frekuensi secara keseluruhan. Sebaliknya, hanya satu titik frekuensi, yang dapat disetel ke frekuensi resonansi konstan, yang dipelajari. Di sini, resonansi berarti bahwa tegangan input \mathbf{U}_{AB} dan arus \mathbf{I}_{f1} dari sistem koil terkompensasi berada dalam fase. Parameter rangkaian dirancang menggunakan persamaan berikut untuk mencapai frekuensi resonansi konstan untuk topologi:

Persamaan 16.29

$$\begin{aligned}L_{f1} * C_{f1} &= \frac{1}{\omega_0^2} \\L_{f2} * C_{f2} &= \frac{1}{\omega_0^2} \\L_1 - L_{f1} &= \frac{1}{\omega_0^2 C_1} \\L_2 - L_{f2} &= \frac{1}{\omega_0^2 C_2}\end{aligned}$$

di mana ω_0 adalah frekuensi sudut resonansi konstan, yang hanya relevan untuk induktor dan kapasitor dalam sistem, tidak tergantung pada koefisien kopling k dan beban kondisi. Berdasarkan aturan di atas, karakteristik rangkaian akan dianalisis pada frekuensi resonansi ω_0 . Menurut teori superposisi, efek dari \mathbf{U}_{AB} dan \mathbf{U}'_{ab} dapat dianalisis secara terpisah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16.13. Garis putus-putus berarti tidak ada arus di jalan itu. Gambar 16.13a digunakan untuk menganalisis efek \mathbf{U}_{AB} . Subskrip tambahan AB menunjukkan bahwa arus disumbangkan oleh \mathbf{U}_{AB} . Untuk memperjelas analisis, cabang kapasitor dan induktor yang terhubung seri, C_1, L_{s1} dan C'_2, L'_{s2} dinyatakan menggunakan induktansi setara L_{e1} dan L_{e2} , di mana

Persamaan 16.30

$$L_{e1} = \frac{1}{j\omega_0} * \left(\frac{1}{j\omega_0 C_1} + j\omega_0 L_{s1} \right) = L_{f1} - k * L_1$$

Persamaan 16.31

$$L'_{e1} = \frac{1}{j\omega_0} * \left(\frac{1}{j\omega_0 C'_1} + j\omega_0 L'_{s1} \right) = L'_{f1} - k * L_1$$

L'_{f2} dan C'_{f2} membentuk rangkaian resonansi paralel, yang dapat dianggap sebagai rangkaian terbuka pada frekuensi resonansi ω_0 . Jadi, $I'_{2AB} = 0$. Di bagian kiri sirkuit, L_{e1}, L_m adalah dihubungkan secara seri, dan

Persamaan 16.32

$$L_{e1} + L_m = L_{f1} - k * L_1 + k * L_1 = L_{f1}$$

L_{f1} membentuk rangkaian resonansi paralel lain dengan C_{f1} pada frekuensi resonansi yang sama ω_0 . Jadi, $I_{LfAB} = 0$. Karena tidak ada arus yang melalui L_{f1} dan L'_{e2} , tegangan pada C_{f1} sama dengan U_{AB} , dan tegangan pada C_{f2} sama dengan tegangan pada L_m . I_{1AB} dan I'_{LFAB} dapat dengan mudah diselesaikan:

Persamaan 16.33

$$I_{1AB} = \frac{U_{1AB}}{j\omega_0 L_{f1}}$$

Persamaan 16.34

$$I'_{Lf2AB} = \frac{kU_{AB}L_1}{j\omega_0 L_{f1}L'_{f2}}$$

Ketika U'_{AB} diterapkan, analisisnya mirip dengan ketika U_{AB} diterapkan. Subskrip tambahan ab ditambahkan untuk menunjukkan bahwa arus disumbangkan oleh U_{ab} .

Solusinya adalah $I'_{LF2ab} = 0$, $I_{1ab} = 0$ dan

Persamaan 16.35

$$I'_{2ab} = \frac{U'_{ab}}{j\omega_0 L'_{f2}}$$

Persamaan 16.36

$$I'_{Lf1ab} = \frac{U'_{ab}L_1}{j\omega_0 L_{f1}L'_{f2}}$$

U'_{ab} adalah tegangan pasif yang dihasilkan menurut ke mode konduksi dioda $D1 \sim D4$. Seharusnya sefase dengan I'_{Lf2} . Karena $I'_{Lf2ab} = 0$, U'_{ab} sefase dengan I'_{LfAB} . Jika kita ambil U_{AB} sebagai referensi, U_{AB} dan U_{ab} dapat dinyatakan sebagai

Persamaan 16.37

$$U_{AB} = U_{ab} < 0^\circ$$

Persamaan 16.38

$$U'_{ab} = \frac{U'_{ab}}{j} = U'_{ab} < \varphi = U'_{ab} < -90^\circ$$

di mana ϕ adalah fase di mana \mathbf{U}_{ab} memimpin \mathbf{U}_{AB} . Dari (16.37) dan (16.38), kita dapat melihat bahwa \mathbf{U}'_{ab} tertinggal dari \mathbf{U}_{AB} sebesar 90° . Kita mengganti (16,28), (16,37), (16,38) menjadi (16,33–16,36), dan jumlahkan arus yang dihasilkan oleh \mathbf{U}_{AB} dan \mathbf{U}'_{ab} untuk mendapatkan:

Persamaan 16.39

$$I_{Lf1} = I_{Lf1ab} = \frac{kL_1 U'_{ab}}{\omega_0 L_{f1} L'_{f2}} < 0^\circ = \frac{k\sqrt{L_1 L_2} U_{ab}}{\omega_0 L_{f1} L'_{f2}} = < 0^\circ$$

Persamaan 16.40

$$I_1 = I_{1AB} = \frac{U_{AB}}{j\omega_0 L_{f1}} = \frac{U_{AB}}{\omega_0 L_{f1}} = < -90^\circ$$

Persamaan 16.41

$$I_2 = \frac{I'_2}{n} = \frac{I'_{2ab}}{n} = \frac{U'_{ab}}{n * \omega_0 L'_{f2}} < 0^\circ = \frac{U_{ab}}{\omega_0 L_{f2}} = 0^\circ$$

Persamaan 16.42

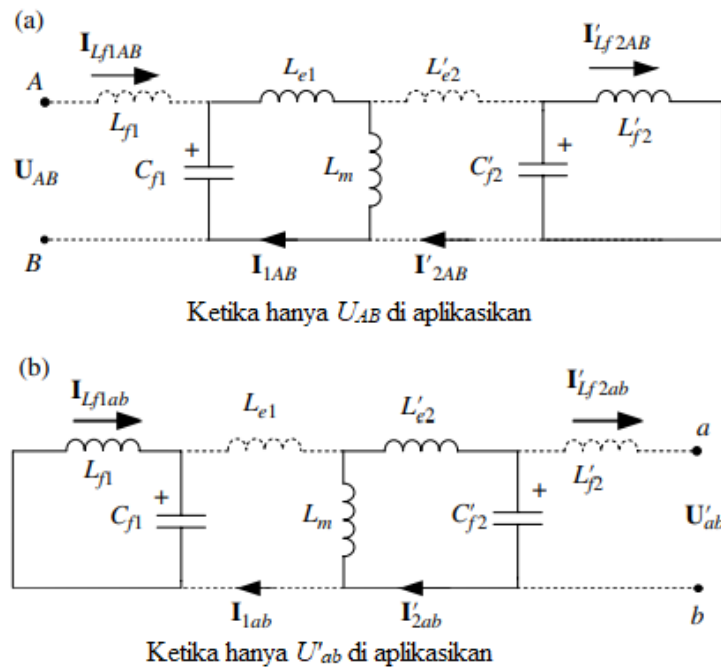
$$I_{Lf2} = \frac{I' L_{f2}}{n} = \frac{I'_{Lf2AB}}{n} = \frac{k\sqrt{L_1 L_2} * U_{AB}}{\omega_0 L_{f1} L_{f2}} = < -90^\circ$$

Dari (persamaan 16.37) dan (persamaan 16.39), kita dapat melihat bahwa tegangan dan arus input sefasa, dan dengan demikian faktor daya persatuan untuk konverter tercapai. Dari persamaan 16.38 dan Persamaan 16.42, kita dapat melihat bahwa tegangan dan arus output sefasa, sehingga faktor daya kesatuan untuk penyearah output juga tercapai. Sebagai tambahan, hubungan fase tidak bergantung pada koefisien kopling dan tegangan baterai. Dengan demikian, kondisi resonansi dapat dicapai terlepas dari kopling dan kondisi beban. Daya yang ditransfer dapat dihitung dengan:

Persamaan 16.43

$$P = U_{AB} * I_{Lf1} = \frac{\sqrt{L_1 L_2}}{\omega_0 L_{f1} L_{f2}} * k U_{AB} U_{ab}$$

Dapat dilihat bahwa daya output sebanding dengan koefisien kopling k , dan tegangan input U_{AB} , dan tegangan output U_{ab} . Dengan demikian, konverter buck atau boost dapat dimasukkan sebelum inverter sisi primer atau setelah penyearah sisi sekunder untuk mengontrol daya keluaran. Untuk beberapa aplikasi, seperti pengisian peluang atau pengisian dinamis untuk kendaraan listrik, daya kontinu yang akurat tidak diperlukan. Dalam hal ini, daya pengisian dapat: dikendalikan dengan mengalihkan sistem antara daya output maksimum dan nol. Dengan demikian, konverter buck atau boost dapat dihilangkan.

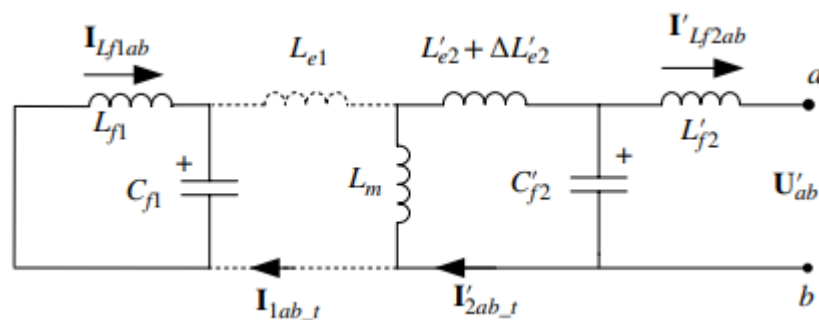


Gambar 16.13 Status sirkuit pada frekuensi resonansi

16.9 PENYETELAN PARAMETER UNTUK PENGALIHAN TEGANGAN NOL

Jika kumpulan dan parameter jaringan kompensasi dirancang persis sesuai dengan aturan di atas, semua MOSFET akan dihidupkan dan dimatikan dalam kondisi zero current switching (ZCS). Namun, ZCS bukanlah kondisi soft switching yang sempurna pada konverter yang mengandung MOSFET dan dioda. Untuk meminimalkan kerugian pensaklaran, sebaiknya semua sakelar dihidupkan dan dimatikan pada kondisi zero voltage switching (ZVS). Kapasitansi output parasit MOSFET menahan tegangan mendekati nol selama turn-off transisi, sehingga turn-off switching loss sangat kecil. Namun, dalam transisi penyalaan, operasi ZVS diperlukan untuk mencegah pemulihan balik dioda tubuh dan kapasitansi output parasit dari menginduksi kerugian switching. Untuk merealisasikan ZVS untuk MOSFET, dioda badan harus berjalan sebelum MOSFET melakukannya. Sangat penting bahwa MOSFET dihidupkan pada arus negatif. Untuk konverter jembatan penuh, ini berarti impedansi input dari jaringan resonansi harus induktif. Dalam hal ini, arus resonansi tertinggal dari tegangan resonansi, yang membentuk kondisi operasi ZVS untuk semua MOSFET.

Di bagian ini, kondisi operasi ZVS mengacu pada memastikan turn-off saat ini positif untuk mewujudkan ZVS turn-on MOSFET lain di lengan yang sama. Ada beberapa cara untuk menyetel parameter sistem untuk memastikan bahwa MOSFET mati pada arus positif. Di sini, satu cara sederhana diperkenalkan dan dianalisis.



Gambar 16.14 Rangkaian ekivalen mengacu pada sisi primer.

Untuk mencapai ZVS, kita hanya sedikit meningkatkan nilai L_{e2} . Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16.14, perubahan L_{e2} adalah $\Delta L'_{e2}$. Selain itu, metode superposisi digunakan untuk menganalisis rangkaian yang disetel. Ketika \mathbf{U}_{AB} diterapkan pada rangkaian, rangkaian ekivalennya sama seperti pada Gambar 16.13a dan \mathbf{I}_{Lf1AB} adalah nol. Ketika \mathbf{U}'_{ab} diterapkan, \mathbf{I}'_{Lf2ab} tidak nol lagi. Kita memecahkan sirkuit lagi dengan variasi $\Delta L'_{e2}$, dan persamaan berikut dapat diturunkan:

Persamaan 16.44

$$I'_{Lf2ab_1} = -j * \frac{U'_{ab}}{\omega_0 * L'_{f2}} * \omega_0 * \frac{\Delta L'_{e2}}{L'_{f2}}$$

Persamaan 16.45

$$\begin{aligned} I'_{Lf2_1} &= I'_{Lf2AB} + I'_{Lf2ab} \\ &= \frac{kU_{AB}L_1}{j\omega_0 * L_{f1}L'_{f2}} - j * \frac{U'_{ab} * (\cos \varphi + j * \sin \varphi) * \Delta L'_{e2}}{\omega_0 * L'_{f2}} * \frac{\Delta L'_{e2}}{L'_{f2}} \\ &= \frac{U'_{ab} * \sin \varphi * \Delta L'_{e2}}{\omega_0 * (L'_{f2})^2} - j \left(\frac{U'_{ab} * \cos \varphi * \Delta L'_{e2}}{\omega_0 * (L'_{f2})^2} + \frac{kU_{AB}L_1}{j\omega_0 * L_{f1}L'_{f2}} \right) \end{aligned}$$

Persamaan 16.46

$$I'_{Lf2_1} = \frac{I'_{Lfb_1}}{n} = \frac{U_{ab} * \sin \varphi * \Delta L_{e2}}{\omega_0 * L_{f2}^2} - j * \frac{U_{ab} * \cos \varphi * \Delta L_{e2}}{\omega_0 * L_{f2}^2}$$

Dalam persamaan ini, subskrip 1st digunakan untuk menunjukkan komponen harmonik pertama dari item yang sesuai. Fasa U_{ab} adalah ϕ . Persamaan (16.38) menunjukkan ϕ bahwa adalah -90° ketika ΔL_{e2} adalah nol. Ketika kita meningkatkan L_{e2} untuk merealisasikan ZVS, perubahan L_{e2} relatif kecil, jadi ϕ masih mendekati 90° . Oleh karena itu, kita memiliki $\sin \phi \approx -1$, dan $\cos \phi \approx 0$, $\Delta L_{e2} < L_{f2}$. Biasanya, induktor tambahan, L_{f1} dan L_{f2} , digunakan sebagai kompensator daya reaktif, dirancang sedemikian rupa sehingga jauh lebih kecil daripada kumparan utama. Perkiraan berikut dapat diperoleh dari (16,46):

Persaman 16.47

$$\cos \varphi_1 \approx -\cot \varphi_1 \approx \frac{U_{ab}}{U_{AR}} * \frac{\Delta L_{e2} * L_{f1}}{L_{f2} * k\sqrt{L_1L_2}}$$

dimana ϕ_1 ($-90^\circ < \phi_1 < -180^\circ$) adalah fase dimana \mathbf{I}_{Lf2_1st} memimpin \mathbf{U}_{AB} .

Untuk mengurangi kerugian switching, kita lebih memilih untuk mencapai kondisi ZVS pada arus turn-off minimum. Ini berarti bahwa pada titik peralihan arus mendekati nol, dan laju perubahan tegangan arus pada titik switching tinggi. Kesalahan fase kecil dalam analisis akan membawa kesalahan arus yang relatif besar. Jika kesalahan fase jatuh ke wilayah induktif, itu berarti arus turn-off yang lebih tinggi dan kerugian switching yang lebih tinggi. Jika

kesalahan fase jatuh ke daerah kapasitif, arus pemutusan mungkin negatif yang berarti bahwa ZVS hilang dan pemulihan terbalik yang parah di dioda MOSFET akan terjadi. Ini akan membawa kerugian switching yang tinggi dan menyebabkan masalah ielectromagnetic interference (EMI). Oleh karena itu, keakuratan analisis arus turn-off sangat penting. Harmoni orde tinggi dari tegangan kuadrat juga harus dipertimbangkan, tetapi jaringan induktor-kapasitor dari sisi primer ke sisi sekunder adalah filter tingkat tinggi. Untuk harmonik orde tinggi, interaksi antara sisi primer dan sisi sekunder dapat diabaikan. Jadi, arus orde tinggi pada L_{f2} secara kasar dapat dihitung sebagai:

Persamaan 16.48

$$I_{L_{f2_3}} \approx \frac{U_{ab_3}}{j * 3\omega_0 L_{f2} + \frac{1}{j * 3\omega_0 C_{f2}}} = j \frac{3U_{ab_3}}{8\omega_0 L_{f2}}$$

$$I_{L_{f2_5}} \approx \frac{U_{ab_5}}{j * 5\omega_0 L_{f2} + \frac{1}{j * 5\omega_0 C_{f2}}} = j \frac{5U_{ab_5}}{24\omega_0 L_{f2}}$$

...

$$I_{L_{f2_2k+1}} \approx \frac{U_{ab_{2k+1}}}{j * (2k + 1)\omega_0 L_{f2} + \frac{1}{j * (2k + 1)\omega_0 C_{f2}}} = j \frac{(2k + 1)U_{ab_{2k+1}}}{((2k + 1)^2 - 1)\omega_0 L_{f2}}$$

Menurut persamaan 16.48, perbedaan fase antara U_{ab_mth} dan $I_{L_{f2_mth}}$ adalah 90° , jadi ketika U_{ab} melompat pada saat $I_{L_{f2_mth}}$ mencapai puncaknya, yang dapat dihitung sebagai:

Persamaan 16.49

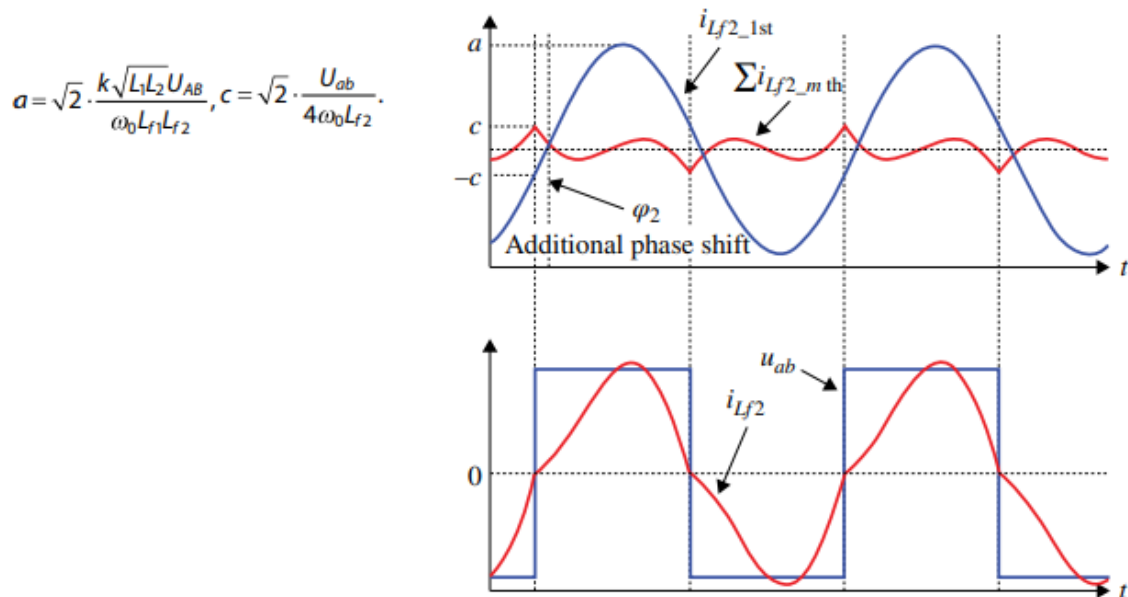
$$\begin{aligned} \max \left\{ \sum i_{L_{f2_mth}} \right\} &= \sqrt{2} * \sum_{k=1}^{\infty} I_{L_{f2_2k+1}} \\ &= \sqrt{2} * \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{((2k + 1)^2 - 1)} \frac{U_{ab}}{\omega_0 L_{f2}} \\ &= \frac{\sqrt{2}}{4} * \frac{U_{ab}}{\omega_0 L_{f2}} \end{aligned}$$

Fase ϕ_2 , di mana U_{ab} memimpin $I_{L_{f2_1st}}$ mendekati 0 ($0 < \phi_2 \ll 90^\circ$) dan dapat diperoleh dengan mudah dari:

Persamaan 16.50

$$\sin \phi_2 = \frac{\sqrt{2} * \sum_{k=1}^{\infty} I_{L_{f2_2k+1}}}{\sqrt{2} * I_{L_{f2_1}}} \approx \frac{1}{4} * \frac{U_{ab}}{U_{AB}} * \frac{L_{f1}}{k\sqrt{L_1 L_2}}$$

Gambar 16.15 menunjukkan pengaruh arus harmonik orde tinggi. Tanda u_{ab} adalah ditentukan oleh i_{Lf2} , yang merupakan komposisi arus harmonik orde pertama dan tinggi



Gambar 16.15 Pengaruh semua arus orde tinggi.

Dari (16,47) dan (16,50) kita dapat memperoleh:

Persamaan 16.51

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= \cos(\varphi_1 + \varphi_2) = \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 - \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \approx \sin \varphi_1 + \sin \varphi_2 \\ &\approx \frac{U_{ab}}{U_{AB}} * \frac{L_{f1}}{k\sqrt{L_1 L_2}} * \left(\frac{\Delta L_{e2}}{L_{f2}} - \frac{1}{4} \right) \end{aligned}$$

Persamaan 16.52

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{Lf1_1st} &= -\frac{kU'_{ab}L_1}{j\omega_0 L_{f1}L'_{f2}} = -\frac{kU'_{ab}(\cos \varphi + j \cdot \sin \varphi)L_1}{j\omega_0 L_{f1}L'_{f2}} \\ &= -\frac{kU'_{ab} \sin \varphi L_1}{\omega_0 L_{f1}L'_{f2}} - \frac{kU'_{ab} \cos \varphi L_1}{j \cdot \omega_0 L_{f1}L'_{f2}} \\ &\approx \frac{kU'_{ab}L_1}{\omega_0 L_{f1}L'_{f2}} + \frac{U_{ab}^2 \left(\frac{\Delta L_{e2}}{L_{f2}} - \frac{1}{4} \right)}{U_{AB} \cdot j \cdot \omega_0 L_{f2}} \\ &= \frac{kU_{ab}\sqrt{L_1 L_2}}{\omega_0 L_{f1}L_{f2}} + \frac{U_{ab}^2 \left(\frac{\Delta L_{e2}}{L_{f2}} - \frac{1}{4} \right)}{j \cdot \omega_0 L_{f2}} \end{aligned}$$

Dari persamaan 16.52, kita dapat melihat bahwa item arus reaktif tambahan diperkenalkan. Arus ini akan meningkatkan arus turn-off MOSFET untuk mencapai ZVS. Untuk sisi primer,

mirip dengan analisis dari sisi sekunder untuk efek harmonik orde tinggi, kita dapat memperoleh:

Persamaan 16.53

$$\begin{aligned} \max \left\{ \sum i_{L_{f1}nth} \right\} &= \sqrt{2} * \sum_{k=1}^{\infty} I_{L_{f1}(2k+1)} \\ &= \sqrt{2} * \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{((2k+1)^2 - 1)} \frac{U_{AB}}{\omega_0 L_{f1}} \\ &= \frac{\sqrt{2}}{4} * \frac{U_{AB}}{\omega_0 L_{f1}} \end{aligned}$$

Arus pemutusan MOSFET adalah komposisi dari kedua orde pertama dan arus harmonik orde tinggi. Dari (16,52) dan (16,53), arus pemutusan MOSFET dapat dihitung sebagai:

Persamaan 16.54

$$I_{OFF} = \sqrt{2} \left(\frac{\frac{U_{ab}^2}{U_{AR}} \left(\frac{\Delta L_{e2}}{L_{f2}} - \frac{1}{4} \right)}{\omega_0 L_{f2}} \right) + \frac{U_{AB}}{4\omega_0 L_{f1}}$$

Menurut parameter MOSFET, arus turn-off minimum untuk mencapai ZVS dapat ditentukan. Kemudian ΔL_{e2} yang sesuai dapat dirancang untuk memastikan bahwa ada arus pemutusan yang cukup untuk mencapai ZVS untuk seluruh rentang operasi. Untuk memastikan bahwa I_{OFF} lebih besar dari nilai positif tertentu, persamaan berikut harus dipenuhi:

Persamaan 16.55

$$\frac{\Delta L_{e2}}{L_{f2}} \geq \frac{1}{4}$$

Menurut (16,54) dan (16,55), semakin rendah tegangan keluaran, semakin kecil arus turn-off. Arus turn-off minimal dapat diturunkan sebagai:

Persamaan 16.56

$$I_{OFF_min} = \frac{\sqrt{2} * U_{ab_min}}{\omega_0 * L_{f2}} \sqrt{\frac{\Delta L_{e2}}{L_{f1}} - \frac{1}{4} + \frac{L_{f2}}{L_{f1}}}$$

di mana U_{ab_min} adalah nilai RMS minimum tegangan output sebelum penyearah. Arus pemutusan minimum tercapai ketika

Persamaan 16.58

$$U_{AB} = U_{AB_min} * \sqrt{4 * \left(\frac{\Delta L_{e2}}{L_{f2}} - \frac{1}{4} \right) * \frac{L_{f1}}{L_{f2}}}$$

Setelah minimum MOSFET turn-off arus diperoleh, ΔL_{e2} dapat dihitung sebagai:

Persamaan 16.59

$$\Delta L_{e2} = \frac{1}{4} L_{f2} + \frac{I_{OFF_min}^2 * \omega_0^2 * L_{f1} * L_{f2}^2}{U_{ab_mi}^2}$$

Ketika parameter disetel untuk ZVS, perubahan daya aktif yang ditransfer sangat terbatas. Kesimpulannya bisa diperoleh dengan menganalisis perubahan I_{LF2_1st} dan fasa antara arus output dan tegangan. Dalam (16.46), suku pertama memiliki satu item yang relatif kecil, yang kontribusinya terhadap amplitudo diabaikan. Suku terakhir adalah hasil kali dua benda yang relatif kecil, yang juga dapat diabaikan. Dibandingkan dengan (16,39), amplitudo I_{LF2_1st} hampir sama. Dari (16.50), kita dapat melihat bahwa fase antara arus output dan tegangan tidak ada hubungannya dengan ΔL_{e2} . Dengan demikian, ΔL_{e2} tidak memiliki dampak yang jelas pada daya aktif yang ditransfer. Namun, jika harmonik dipertimbangkan, daya output pada (16.43) harus direvisi menjadi:

Persamaan 16.59

$$P = \sqrt{\frac{L_1 L_2}{\omega_0 L_{f1} L_{f2}}} * k U_{AB} U_{ab} \cos \phi_2$$

di mana $\cos \phi_2$ dapat dihitung dari (16,50). Jika U_{AB} tidak terlalu rendah, $\cos \phi_2$ akan mendekati 1. Daya output dapat dihitung dengan (16,43) dan (16,59). Dekomposisi harmonik arus yang diadopsi dalam bagian ini merupakan penyempurnaan dari pendekatan serupa yang digunakan dalam analisis konverter resonansi terkompensasi ZCS LCC. Dalam makalah yang dirujuk, beban baterai dianggap sebagai impedansi setara, yang merupakan jenis aproksimasi harmonik pertama. Meskipun harmonik orde tinggi hampir tidak ditransfer antara primer dan kumparan sisi sekunder, mereka mempengaruhi daya reaktif pada sisi sekunder, yang dapat mengubah arus pemutusan sisi primer. Di sini, harmonik arus dipertimbangkan pada kedua primer dan sisi sekunder. Beda fase sisi sekunder antara harmonik fundamental tegangan dan arus dapat diselesaikan, artinya daya reaktif beban baterai dengan penyearah juga dapat diselesaikan. Dengan cara ini, persamaan (16,54) memberikan metode langsung untuk menghitung arus turn-off dengan tegangan input dan output daripada impedansi setara dari beban baterai, yang dapat digunakan untuk mengoptimalkan parameter dengan mudah.

16.10 DESAIN PARAMETER

Di bagian ini, sistem WPT 8 kW dirancang sesuai dengan prinsip di atas. Perbandingan antara hasil simulasi dan hasil analisis akan diberikan dalam bagian selanjutnya untuk

memverifikasi efektivitas analisis di atas. Spesifikasi pengisi daya baterai nirkabel tercantum dalam Tabel 16.2. Karena rasio antara tegangan input dan tegangan output sekitar 1, transmisi dan kumpulan penerima dirancang untuk memiliki ukuran yang sama. Jadi, dari (16.29), kita harus mendesain $L_{f1} = L_{f2}$. Dari Tabel 16.2 dan (16.43), kita dapatkan:

Persamaan 16.60

$$L_{f1} = L_{f2} = \sqrt{\frac{k_{max} U_{AB} U_{ab}}{\omega_0 P_{max}}} * L_1$$

$$= \sqrt{\frac{0.32x \frac{2\sqrt{2}}{\pi} x 425x \frac{2\sqrt{2}}{\pi} x 450}{2\pi x 79x 10^3 x 8x 10^3}} * 360x 10^{-6} H \approx 67 \mu H$$

Nilai C_{f1} dan C_{f2} dapat dihitung dari (16.29),

Persamaan 16.61

$$C_{f1} = C_{f2} = \frac{1}{\omega_0^2 L_{f1}} \approx 60.6 nF$$

C_1 dan C_2 juga dapat mengklakulasikan dari persamaan 16.29

Persamaan 16.62

$$C_{f1} = C_{f2} = \frac{1}{\omega_0^2 (L_1 - L_{f1})} \approx 14 nF$$

Maka, variasi dari ΔL_{e2} seharusnya dirancang untuk meningkatkan turn-off saat ini untuk MOSFET untuk mencapai ZVS. Setelah arus turn-off minimum untuk ZVS diperoleh, ΔL_{e2} dapat dirancang menggunakan (16.58). Arus turn-off minimum bervariasi untuk yang berbeda jenis MOSFET dan pengaturan waktu mati. Untuk sistem 8 kW, biasanya MOSFET dengan 80 Kemampuan konduksi kontinu dapat diadopsi. Fairchild FCH041N60E N-Channel MOSFET dipilih sebagai sakelar utama. Sakelar dinilai pada 600 V, 48 A (75 °C) hingga 77 A (25 °C). Menurut parameter MOSFET, waktu mati yang dihitung adalah 600 ns. Untuk menjamin ZVS dalam mode ini, arus turn-off harus cukup besar untuk melepaskan kapasitor junction dalam waktu mati, yang dapat diwakili oleh:

Persamaan 16.63

$$I_{OFF} \geq \frac{4C_{OSS} U_{AB,max}}{t_d}$$

di mana $U_{AB,max}$ adalah tegangan input maksimum, C_{OSS} adalah kapasitansi persimpangan dan t_d adalah waktu mati. Dengan menggunakan parameter MOSFET, kita dapat menghitung arus

turn-off, yang harus lebih besar dari 2 A untuk mewujudkan ZVS. Jadi, kita merancang turn-off minimum I_{OFF_min} saat ini menjadi 3 A.

Tabel 16.2 Spesifikasi pengisi daya baterai nirkabel

Spec/parameter	Value
Input tegangan DC	<425 V
Output tegangan baterai	300 V~450 V
Nominal gap	200 mm
Koefisien kopling ¹	0.18~0.32
Mengirimkan induktansi koil ²	350~370 μ H
Memancarkan resistansi AC koil	~500 m Ω
Menerima induktansi koil ²	350~370 μ H
Menerima resistansi AC koil	~500 m Ω
Beralih frekuensi	79 kHz
Daya maksimum ³	~8 kW
Efisiensi maksimum ³	~97.1%

¹ Koefisien kopling bervariasi karena ketidaksejajaran. Nilainya terkait dengan desain koil, yang bukan fokus dari bagian ini.

² Induktansi kumparan utama berubah sedikit ketika posisi kedua kumparan berubah. Nilai tengah 360 H dipilih dalam tahap desain.

³ Daya keluaran terukur dirancang sebagai 8 kW dengan efisiensi maksimum 97,1%. Karena variasi parameter, efisiensi maksimum 96% tercapai pada 7,7 kW.

Dengan mensubstitusi (16,60-16,62), dan I_{OFF_min} menjadi (16,58), kita dapat memperoleh

Persamaan 16.64

$$\Delta L_{e2} = \frac{1}{4} L_{f2} + I_{OFF_min}^2 * \omega_0^2 * L_{f2} * L_{f2}^2$$

$$= \left(\frac{67}{4} + \frac{3^2 * (2\pi * 79 \times 10^3)^2 * (67 \times 10^{-6})^2 * 67}{2 * \left(\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \right)^2} \right) \mu H \approx 21 \mu H$$

Tabel 16.3 Parameter jaringan kompensasi.

Parameter	Nilai desain
L_{f1}	67 μ H
L_{f2}	67 μ H
C_{f1}	60.6 nF
C_{f2}	60.6 nF
C_1	14 nF
C_2	15.1 nF

Induktansi ekivalen L_{e2} ditentukan oleh C_2 dan induktansi kebocoran L_{s2} . Karena L_{s2} terkait dengan induktansi diri dan kopling, lebih rumit jika kita menyetel L_{s2} untuk mengubah nilai L_{e1} . Lebih mudah menyetel C_2 daripada ke mengubah nilai L_{e2} . Dari (16.29), kita tahu bahwa

Persamaan 16.65

$$\Delta L_{e2} = \frac{1}{\omega_0^2 C_2} - \frac{1}{\omega_0^2 (C_2 + \Delta C_2)}$$

Kemudian, variasi pada C_2 dapat dikalkulasikan sebagai

Persamaan 16.66

$$\Delta C_2 = \frac{\omega_0^2 * \Delta L_{e2} * C_2^2}{1 - \omega_0^2 * \Delta L_{e2} * C_2} \approx 1.1 \text{ nF}$$

Jadi, untuk mencapai ZVS, nilai C_2 harus disetel sedemikian rupa sehingga 1,1 nF lebih besar dari nilai yang dihitung oleh (16,62). Semua nilai yang dirancang untuk jaringan kompensasi tercantum dalam Tabel 16.3. Karena sistem adalah rangkaian orde tinggi, mungkin ada titik resonansi lain di dekat ω_0 dengan perubahan tajam dari karakteristik sistem. Titik resonansi tambahan dapat secara signifikan mempengaruhi kinerja dalam sistem nyata karena adanya variasi parameter. Karakteristik frekuensi sirkuit ditunjukkan pada Gambar 16.12 diberikan kepada periksa apakah ada titik resonansi yang berubah tajam di sekitar ω_0 .

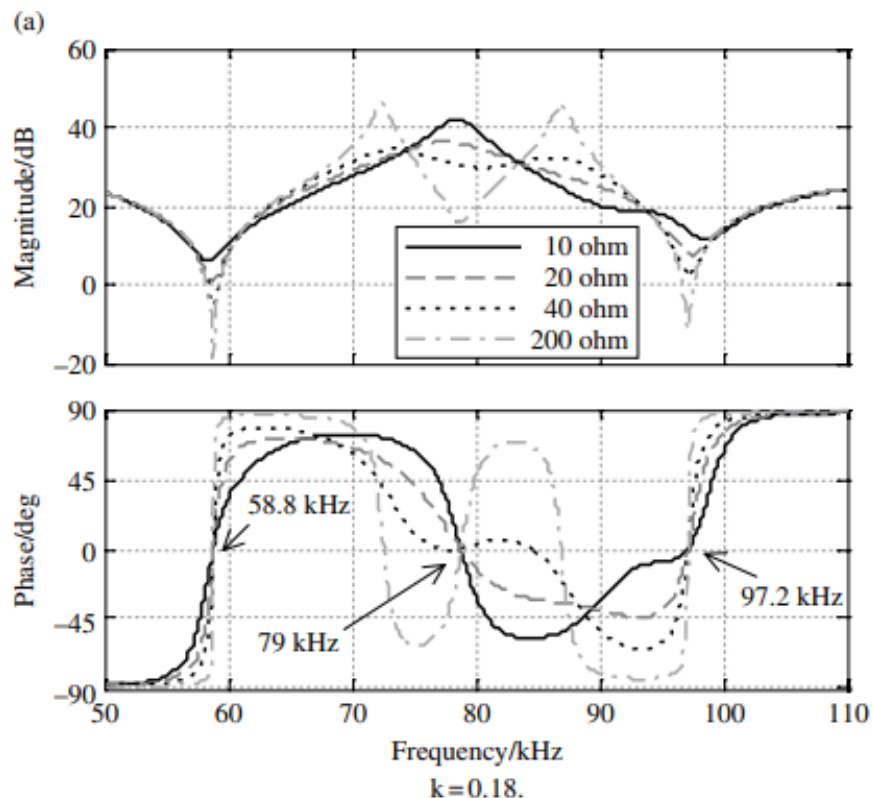
Dalam simulasi, nilai C_2 adalah 14 nF untuk memverifikasi hasil analisis di Bagian 16.2. Untuk menunjukkan pengaruh beban, resistor beban $R_{ac} = 8/\pi \cdot R_b$, di mana R_b adalah hambatan ekuivalen pada saat baterai sedang diisi, dihubungkan antara a' dan b' pada Gambar 16.12. Ketika daya pengisian baterai antara 5% dan 100%, kisaran R_{ac} kira-kira 10~200 Ω . Karakteristik frekuensi dari impedansi input dianalisis dengan koefisien kopling 0,18~0,32. Dua diagram tanda khas ditunjukkan pada Gambar 16.16 dengan kondisi beban yang berbeda pada koefisien kopling 0,18 dan 0,32. Dari Gambar 16.16, kita dapat melihat bahwa ada frekuensi resonansi konstan sekitar 79 kHz. Ada juga beberapa frekuensi resonansi lainnya. Titik resonansi terendah dan tertinggi tidak berubah ketika beban berubah, tetapi berubah dengan koefisien kopling. Perlu diperhatikan bahwa sekitar ω_0 , titik resonansi lain mungkin ada dalam kondisi tertentu. Namun, perubahan dari ω_0 ke titik resonansi tetangga cukup halus, yang berarti tidak akan ada perubahan mendadak ketika frekuensi kerja sedikit menyimpang dari ω_0 .

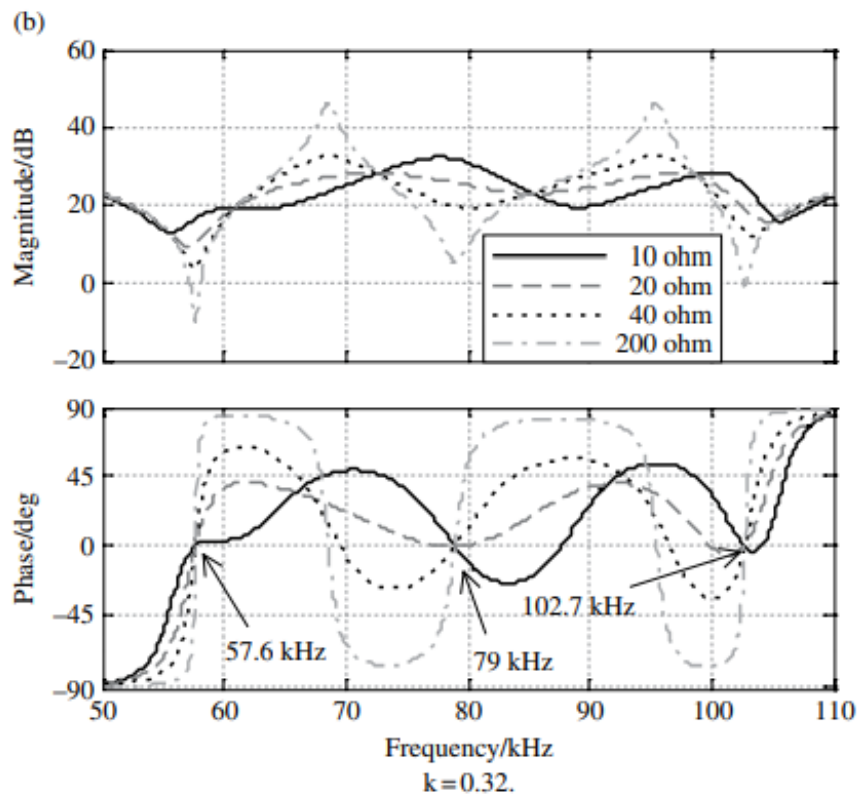
16.11 HASIL SIMULASI DAN EKSPERIMEN

Baik simulasi dan eksperimen dilakukan untuk memverifikasi jaringan kompensasi LLC dua sisi yang diusulkan dan metode penyetelannya. Parameter rangkaian telah ditunjukkan pada Tabel 16.1 dan Tabel 16.2. Kita mendefinisikan dua jenis misalignment, yaitu X-misalignment (door-to-door atau right-to-left), dan Y-misalignment (depan-ke-belakang), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16.17. Saat memarkir mobil, ketidaksejajaran X adalah jauh lebih sulit bagi pengemudi untuk menyesuaikan, jadi kita memilih X-misalignments untuk simulasi dan eksperimen. Berbagai ketidaksejajaran dicerminkan oleh koefisien kopling yang berbeda. Pada bagian ini, tiga koefisien kopling, yaitu, $k = 0,18, 0,24, 0,32$, sesuai dengan $X = 310 \text{ mm}, 230 \text{ mm}, \text{ dan } 0 \text{ mm}$ masing-masing, serta tiga output tegangan, $U_b = 300 \text{ V}, 400 \text{ V}, 450 \text{ V}$, dipilih sebagai studi kasus. Frekuensi switching ditetapkan pada 79 kHz untuk semua kasus.

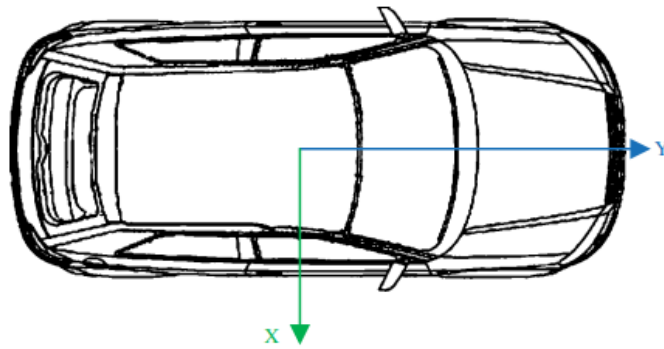
Hasil Simulasi

Sebuah model dibangun di LTspice untuk mensimulasikan kinerja topologi yang diusulkan. Hasil simulasi untuk koefisien kopling yang berbeda, tegangan input, dan output tegangan diperoleh. Gambar 16.18 menunjukkan perbandingan antara simulasi dan menghitung daya output untuk berbagai kondisi. Seperti dapat dilihat dari Gambar 16.18, daya output bervariasi secara linier dengan tegangan input untuk koefisien kopling yang berbeda dan tegangan keluaran.

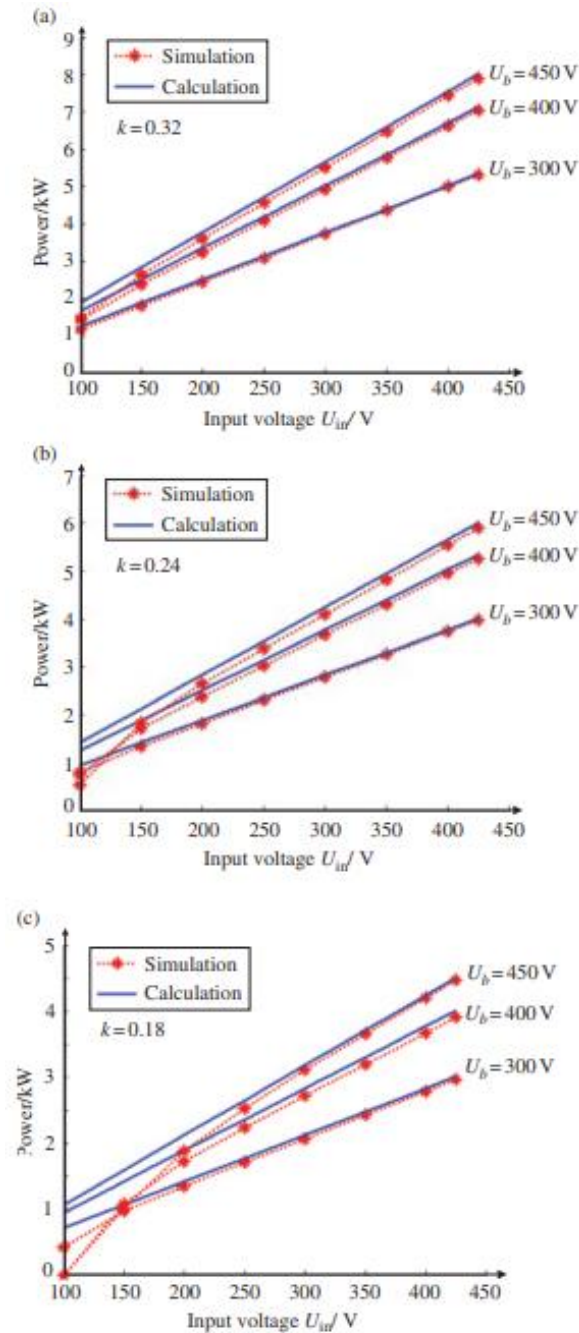




Gambar 16.16 Karakteristik frekuensi dari impedansi input

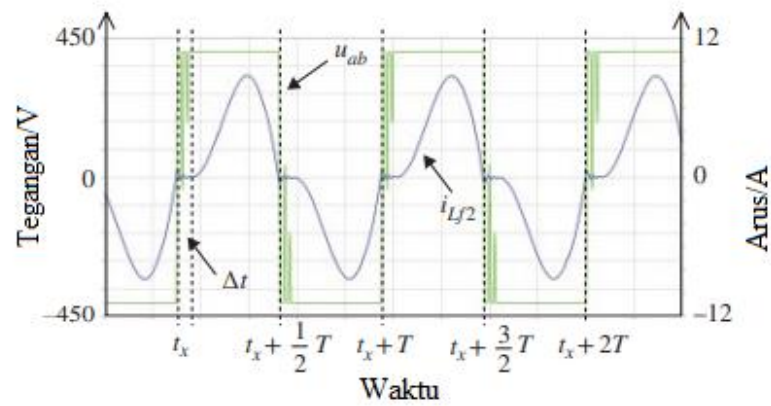


Gambar 16.17 Dua definisi misalignment: X-misalignment adalah penyelarasan door-to-door atau kanan ke kiri, dan misalignment Y adalah penyelarasan depan-ke-belakang.

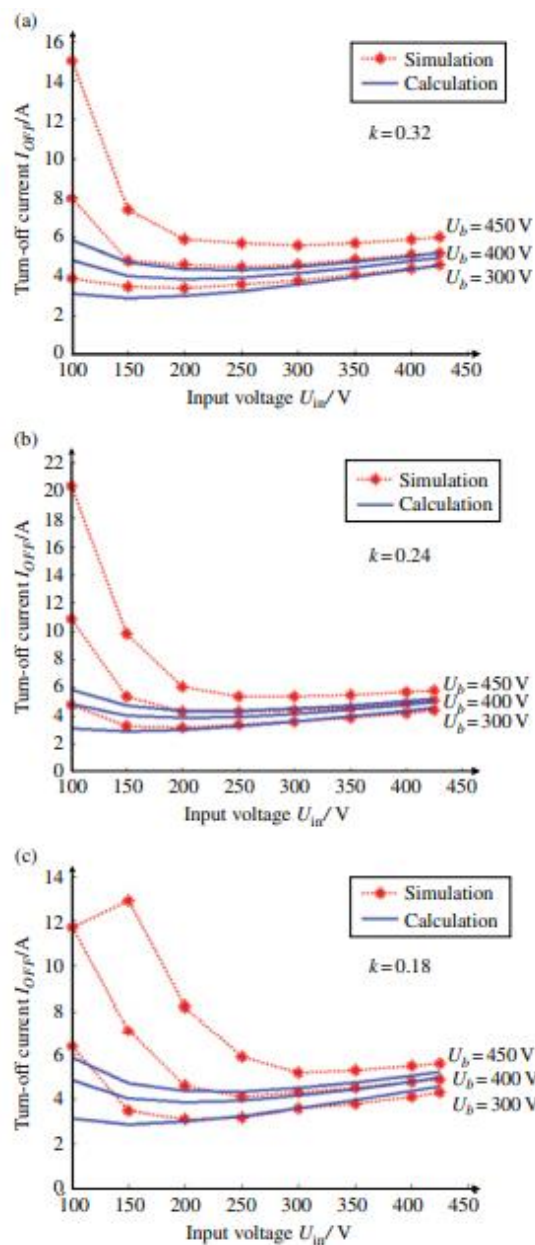


Gambar 16.18 Hasil simulasi dan perhitungan teoritis tingkat daya untuk sistem yang dirancang. (a) $k = 0,32$. (b) $k = 0,24$. (c) $k = 0,18$.

Untuk tegangan input tinggi dan koefisien kopling tinggi, simulasi dan analisis teoritis cocok satu sama lain, tetapi untuk tegangan input rendah dan koefisien kopling rendah, simulasi tidak sesuai dengan hasil analisis. Inkonsistensi ini karena pada tegangan input rendah dan koefisien kopling rendah, dioda pada sisi sekunder tidak konduksi sepanjang waktu antara $t_x + n.T/2$ dan $t_x (n+1).T/2$, yang ditunjukkan pada Gambar 16.19. Situasi serupa juga dapat ditemukan dalam hasil perbandingan arus turn-off, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16.20.



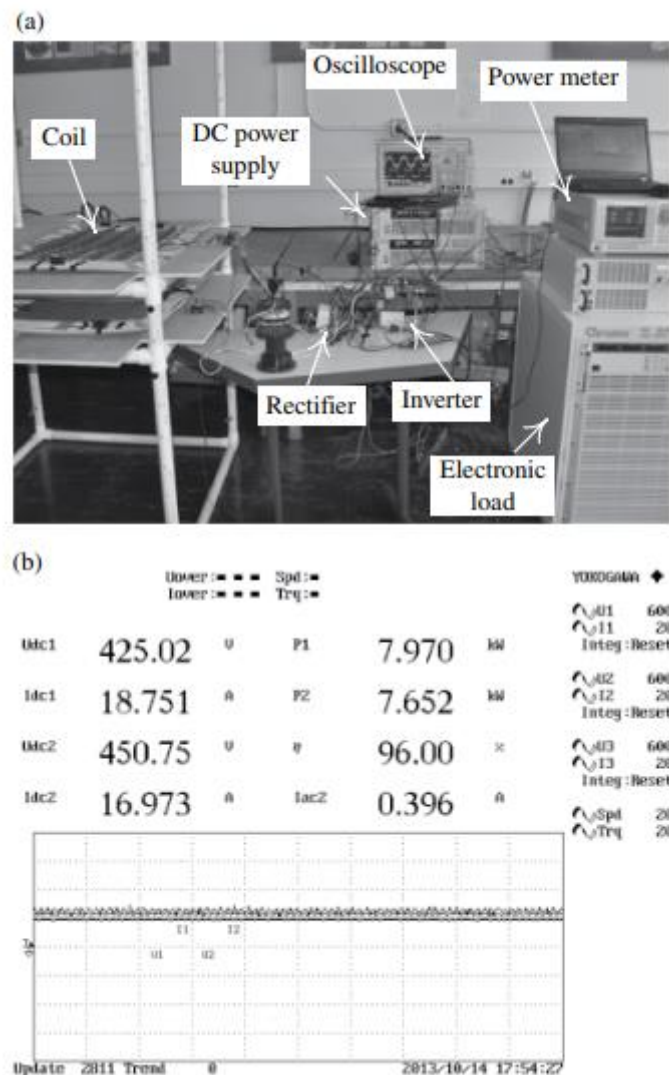
Gambar 16.19 Simulasi bentuk gelombang tegangan output u_{ab} dan arus yang melalui dioda i_{Lf2} saat $U_{in} = 150 \text{ V}$, $U_b = 450 \text{ V}$.



Gambar 16.20 Simulasi dan hasil teoritis arus turn-off MOSFET OF. (a) $k = 0,32$. (b) $k = 0,24$. (c) $k = 0,1$

Hasil Eksperimen

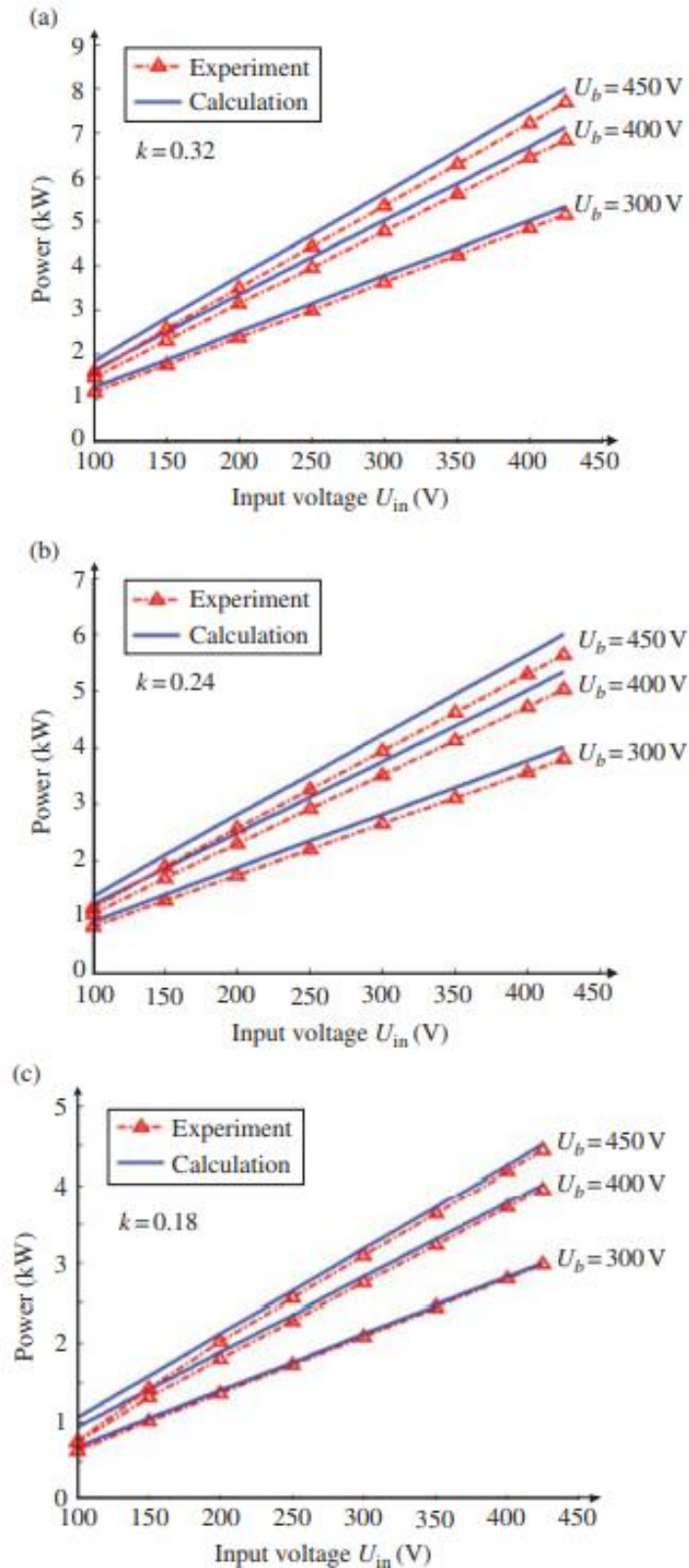
Gambar 16.21a menunjukkan pengaturan eksperimental. Dimensi kumparan panjangnya 800 mm dan lebar 600mm. Kesenjangan antara dua kumparan adalah 200mm. Sebuah kapasitor $10 \mu\text{F}$ (C_o) dan $10 \mu\text{H}$ induktor (L_o) dipilih sebagai filter keluaran. Kumparan terhubung ke inverter input dan penyearah output melalui jaringan kompensasi LCC. Beban elektronik dalam mode tegangan konstan diadopsi untuk mengambil posisi baterai nyata untuk penyesuaian tegangan yang mudah. Gambar 16.21b menunjukkan screen shot efisiensi dari meteran listrik, Yokogawa WT1600, pada daya output 7,7 kW. U_{dc1} dan I_{dc1} adalah tegangan input DC dan arus, sedangkan U_{dc2} dan I_{dc2} adalah output tegangan dan arus DC. P_1 dan P_2 adalah daya input dan output, dan η adalah efisiensi dari catu daya DC ke beban elektronik. I_{ac2} adalah riak arus output ke beban elektronik.



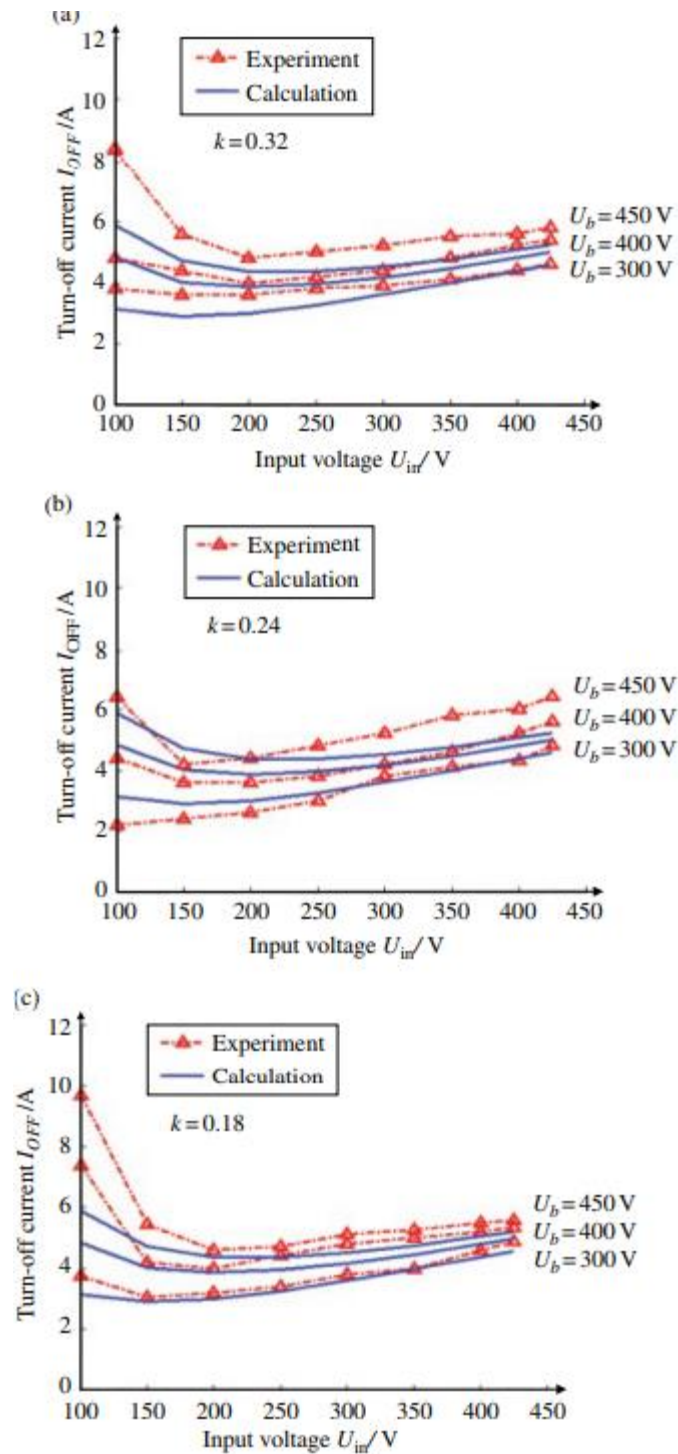
Gambar 16.21 Pengaturan percobaan: (a) Pengaturan fisik sistem WPT. (b) Menangkap efisiensi dari meteran listrik pada output 7,7 kW.

Gambar 16.22 menunjukkan perbandingan daya output eksperimen dan simulasi sebagai fungsi tegangan input untuk tiga koefisien kopling dan tiga tegangan keluaran. Koefisien kopling yang berbeda diperoleh dengan menyesuaikan celah dan ketidaksejajaran antara koil pemancar dan penerima. Daya output sangat cocok antara hasil simulasi dan eksperimen, dan bervariasi secara linier dengan tegangan masukan. Fenomena inkonsistensi

yang sama terjadi di bawah tegangan input rendah dan kondisi kopling rendah, seperti yang disebutkan sebelumnya. Efisiensi maksimum yang dihitung dan disimulasikan adalah 97,1%. Karena resistensi dan variasi parameter dalam sistem nyata, efisiensi maksimum 96% tercapai pada daya output 7,7 kW, yang sedikit lebih rendah dari hasil simulasi.



Gambar 16.22 Hasil perhitungan eksperimental dan teoritis tingkat daya untuk sistem pengisi daya nirkabel. (a) $k = 0,32$. (b) $k = 0,24$. (c) $k = 0,18$



Gambar 16.23 Hasil perhitungan eksperimental dan teoritis dari arus turn-off MOSFET IOFF. (a) $k = 0,32$. (b) $k = 0,24$. (c) $k = 0,18$.

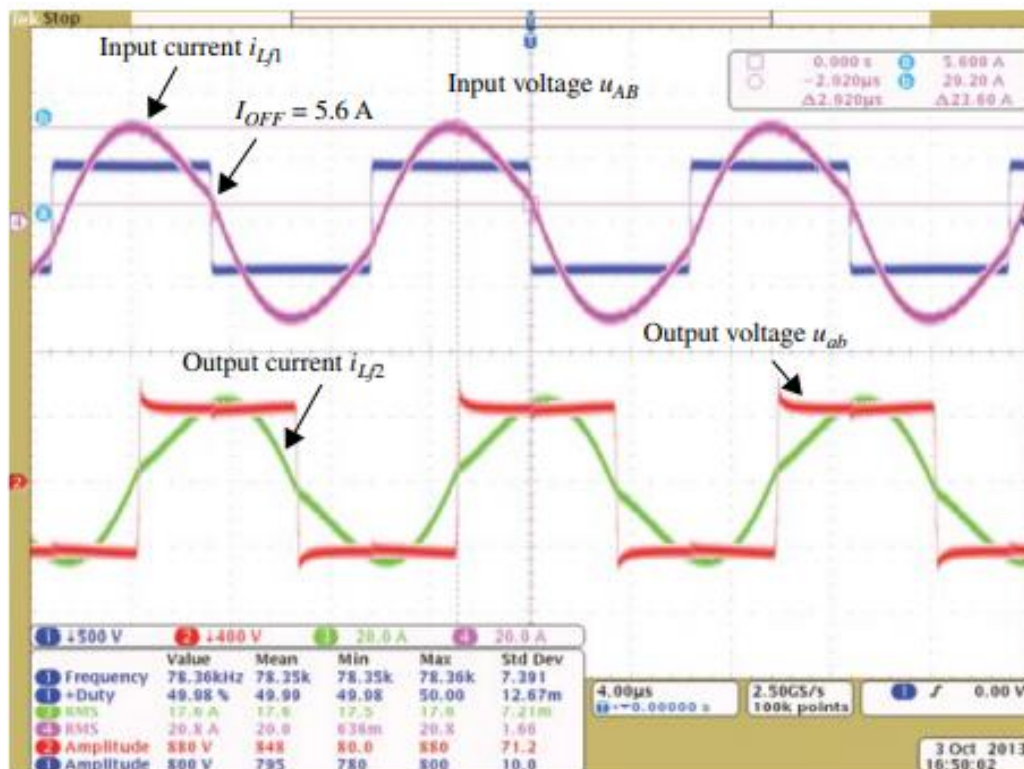
Gambar 16.23 menunjukkan perbandingan arus mati yang dihitung secara eksperimental dan teoritis dari MOSFET. Hasil eksperimen sangat sesuai dengan hasil analisis. Gambar 16.23 juga memverifikasi karakteristik yang baik dari metode penyetelan yang diusulkan. Dari (16.54), kita dapat melihat arus turn-off bukan merupakan fungsi dari koefisien kopling k . Setelah parameter dirancang dan disetel, kondisi ZVS dapat dicapai untuk semua kondisi kopling dengan mudah. Bentuk gelombang sisi primer dan bentuk gelombang sisi sekunder ditunjukkan pada Gambar 16.24 ketika sistem beroperasi pada kondisi tunak,

menyalurkan 7,2 kW ke beban. Pada titik operasi ini, tegangan input $U_{in} = 400$ V, tegangan output $U_b = 450$ V, koefisien kopling $k = 0,32$. Hasilnya menunjukkan kondisi ZVS yang baik dengan $I_{OFF} = 5.6$ A. Arus turn-off ditahan lebih tinggi dari yang dibutuhkan, sementara itu cukup kecil dibandingkan dengan arus puncak.

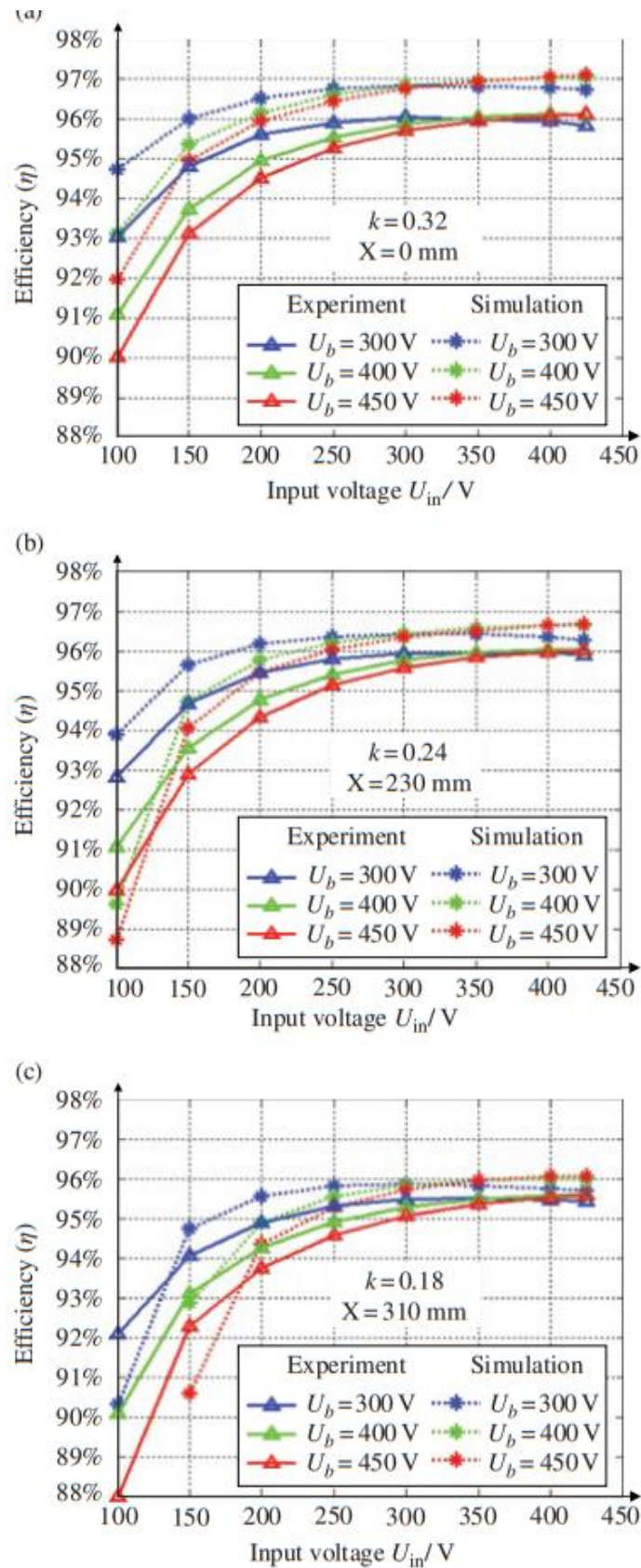
Gambar 16.25 menunjukkan simulasi dan efisiensi eksperimental dari sumber daya DC ke beban baterai untuk jaringan kompensasi LCC dua sisi yang diusulkan untuk sistem transfer daya nirkabel. Eksperimen menggunakan beban elektronik mode tegangan konstan untuk mewakili paket baterai untuk penyesuaian tegangan fleksibel. Pengukur daya, WT1600 dari Yokogawa, terhubung ke sistem untuk menghitung efisiensi dengan mengukur daya output dari sumber DC dan daya input ke beban elektronik.

Dari Gambar 16.25c, kita menemukan bahwa efisiensinya sangat tinggi bahkan di bawah kondisi X-misalignment yang besar. Efisiensi simulasi maksimum adalah 97,1%, sedangkan efisiensi terukur maksimum adalah sekitar 96% ketika $U_{in} = 425$ V, $U_b = 450$ V dan $k = 0,32$ sebagai ditunjukkan pada Gambar 16.25a. Tabel 16.4 memberikan distribusi kerugian kasar pada daya output 7,7 kW melalui berbagai bagian dalam sistem. Rentang dinamis tegangan dan arus yang besar, serta prosedur peralihan transien yang cepat, membuatnya sulit untuk diukur hilangnya MOSFET dan dioda secara akurat. Kehilangan MOSFET dan dioda diperkirakan dengan simulasi berbasis model SPICE, sedangkan kerugian dari semua pasif lainnya komponen dihitung dengan nilai rms arus dan hambatan AC dari percobaan. Dari Tabel 16.6, kita dapat melihat hampir setengah dari kerugian dibawa oleh kumparan utama, yang berarti jika kita ingin meningkatkan efisiensi lebih lanjut, optimalisasi kumparan masih merupakan pendekatan yang paling penting.

Metode topologi dan penyetelan yang dibahas di atas dapat memastikan bahwa frekuensi resonansi adalah independen dari koefisien kopling dan kondisi beban, serta kondisi ZVS untuk MOSFET direalisasikan.



Gambar 16.24 Bentuk gelombang tegangan input u_{AB} dan arus i_{Lf1} dan tegangan output u_{ab} dan arus i_{Lf2} saat daya 7,2 kW disalurkan. $U_{in} = 400$. $U_b = 450$ V



Gambar 16.25 Simulasi dan efisiensi eksperimental sistem ketika tegangan output 300 V, 400 V, dan 450 V pada ketidaksejajaran X yang berbeda: (a) $X = 0 \text{ mm}$. (b) $X = 230 \text{ mm}$. (c) $X = 310 \text{ mm}$ sudah banyak digunakan di banyak aplikasi, seperti perangkat elektronik portabel, perangkat biomedis, dan pengisian kendaraan listrik.

16.12 PENGISI DAYA NIRKABEL BERBASIS LCLC DENGAN PRINSIP TRANSFER DAYA KAPASITIF

CPT (*Capacitive Power Transfer*) adalah metode lain yang efektif untuk mentransfer daya nirkabel. Teknologi CPT menggunakan medan listrik bolak-balik frekuensi tinggi untuk mentransfer daya tanpa sambungan listrik langsung, sedangkan sistem IPT yang dibahas pada bagian sebelumnya menggunakan medan magnet untuk mentransfer daya. Teknologi IPT memiliki:

Tabel 16.4 Distribusi kerugian kasar dalam sistem.

Bagian	Rasio kerugian
MOSFET daya	11.9%
kumparan utama	52.3%
Jaringan kompensasi LCC	16.7%
Dioda penyearah	16.8%
Filter output	2.2%

Dibandingkan dengan sistem IPT, sistem CPT memiliki banyak keunggulan. Misalnya, medan magnet sensitif terhadap benda logam di dekatnya dan efisiensi sistem turun dengan cepat dengan gangguan ini. Ini dapat menghasilkan kerugian arus eddy, dan karenanya menghasilkan panas dalam objek konduktif – potensi bahaya kebakaran. Namun, medan listrik dalam sistem CPT tidak menghasilkan kerugian yang signifikan dalam benda logam.

Sistem CPT baru-baru ini dapat diklasifikasikan oleh topologi jaringan yang cocok. Topologi yang paling populer adalah induktor tunggal beresonansi dengan kapasitor untuk membentuk sederhana rangkaian resonansi seri. Topologi kedua adalah struktur LCL di front-end untuk ditingkatkan tegangan untuk kapasitor kopling. Namun, ada juga induktor yang terhubung langsung dengan kapasitor untuk membentuk resonansi seri. Pada kedua topologi ini induktansi seri terlalu besar, karena nilai kapasitansi yang kecil. Tekanan tegangan pada kapasitor juga terlalu besar. Topologi ketiga adalah resonansi konverter kelas E atau konverter PWM non-resonansi yang digunakan untuk menggantikan kompensasi induktor. Semua sistem ini membutuhkan nilai kapasitansi yang sangat tinggi, pada rentang puluhan atau ratusan nF. Jadi jarak yang ditransfer biasanya sekitar 1 mm.

Dibandingkan dengan pekerjaan sebelumnya, bagian ini berfokus pada transfer daya jarak 150 mm dengan kopling kapasitif. Ini pada dasarnya dirancang untuk digunakan dalam pengisian kendaraan listrik. Pada jarak yang besar ini, kapasitansi kopling biasanya dalam kisaran pF. Topologi resonansi seri tidak lagi cocok. Bagian ini mengusulkan topologi kompensasi LCLC dua sisi (Gambar 16.26), dan proses desainnya dibahas. Prosedur desain sirkuit, simulasi kapasitansi oleh Maxwell, desain prototipe 2,4 kW, dan eksperimen sistem dibahas secara rinci.

16.13 DESAIN TOPOLOGI SIRKUIT

Topologi Kompensasi LCLC: Karena tantangan dalam sistem CPT adalah nilai kapasitansi kopling yang kecil, solusi terbaik adalah menghubungkan kapasitor tambahan secara paralel dengan kapasitor kopling. Jaringan LCLC dapat membantu mencapai faktor daya

kesatuan pada input dan output. Oleh karena itu, daya reaktif dalam rangkaian dihilangkan, sehingga efisiensi sistem menjadi tinggi.

Prinsip kerja rangkaian: Metode pendekatan harmonik dasar (FHA) dapat digunakan untuk menyederhanakan sistem, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16.27. Teori superposisi dapat digunakan untuk menganalisis sirkuit. Gambar 16.27b menunjukkan komponen yang dieksitasi oleh tegangan input pada resonansi. Parameter sirkuit dirancang untuk mencapai resonansi pada frekuensi yang sama. Ini menunjukkan bahwa arus input tidak tergantung pada tegangan masukan. Gambar 16.27c menunjukkan komponen tereksitasi oleh tegangan keluaran. Demikian pula, arus output tidak bergantung pada tegangan keluaran. Parameternya nilai harus memenuhi (16,67), di mana f_{sw} adalah frekuensi switching.

Persamaan 16.67

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{f1} = \frac{1}{\omega_0^2 C_{f1}}, L_{f2} = \frac{1}{(\omega_0^2 C_{f1})} \\ L_1 = \frac{1}{(\omega_0^2 C_{p1})} + L_{f1}, L_2 = \frac{1}{(\omega_0^2 C_{p1})} + L_{f2} \\ C_{p1} = C_1 + C_s * \frac{C_2}{(C_s + C_2)}, C_{p2} = C_s + C_2 * \frac{C_1}{(C_s + C_1)} \\ C_s = C_{s1} * \frac{C_{s1}}{(C_{s1} + C_{s2})}, \omega_0 = 2\pi * f_{sw} \end{array} \right.$$

Gambar 16.27b menunjukkan bahwa arus output mendahului tegangan input sebesar 90° , dan Gambar 16.27c menunjukkan bahwa arus input tertinggal dari tegangan output sebesar 90° . Karena penyearah jembatan-H digunakan pada sisi keluaran, tegangan dan arus output sefasa. Oleh karena itu, arus dan tegangan juga sefasa di sisi input. Akibatnya, input kekuatan adalah:

Persamaan 16.68

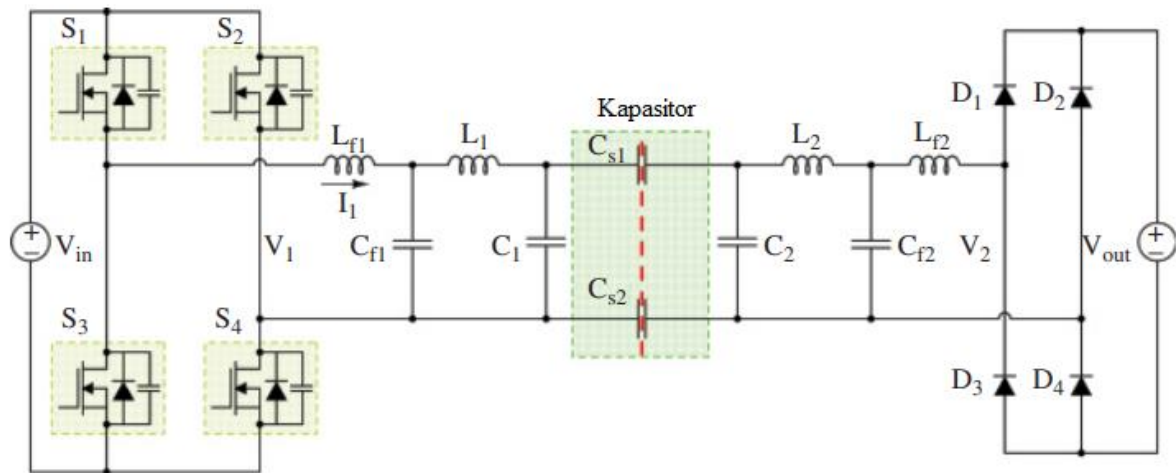
$$P_{in} = V_1 * I_1 = \omega_0 C_s * \frac{C_{f1} C_{f2}}{C_1 C_2} * V_1 * V_2$$

Karena C_1 dan C_2 jauh lebih besar dari C_s , persamaan (16.68) dapat didekati seperti pada (16.69):

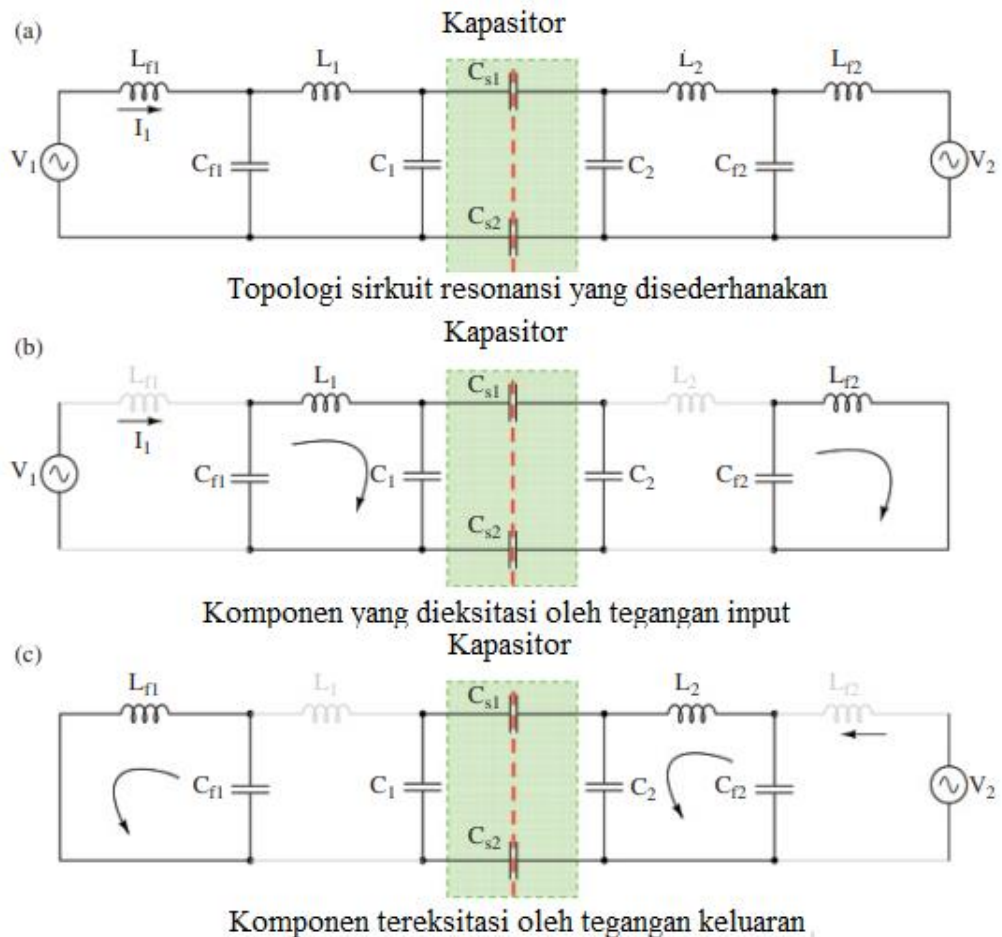
Persamaan 16.69

$$P_{in} = V_1 * I_1 \approx \omega_0 C_s * \frac{C_{f1} C_{f2}}{C_1 C_2 + C_1 C_s + C_2 C_s} * V_1 * V_2$$

Dapat dilihat dari (16.69) bahwa daya keluar sebanding dengan frekuensi, tegangan input, tegangan keluar, kapasitansi kopling, serta sebanding dengan C_{f1} , C_{f2} , dan berbanding terbalik dengan C_1 dan C_2 . Oleh karena itu, sangat penting untuk mencapai yang diinginkan daya output dengan mengatur C_{f1} , C_{f2} , C_1 dan C_2 .



Gambar 16.26 Topologi sirkuit dari sistem transfer daya kapasitif yang diusulkan.



Gambar 16.27 Analisis aproksimasi harmonik dasar.

Analisis Kapasitansi

Empat pelat logam digunakan untuk membentuk dua kapasitor kopling untuk mentransfer daya. Setiap ukuran pelat dipilih ukuran 610 × 610 mm. Jarak nominal d adalah 150 mm. Perpindahan d_1 diatur menjadi 500 mm untuk menghilangkan inter-coupling antara

dua pasang pelat. Itu dimensi kapasitor kopling disediakan pada Gambar 16.28a,b. Mempertimbangkan efek tepi, kapasitor tunggal dapat dihitung seperti pada (16.70),

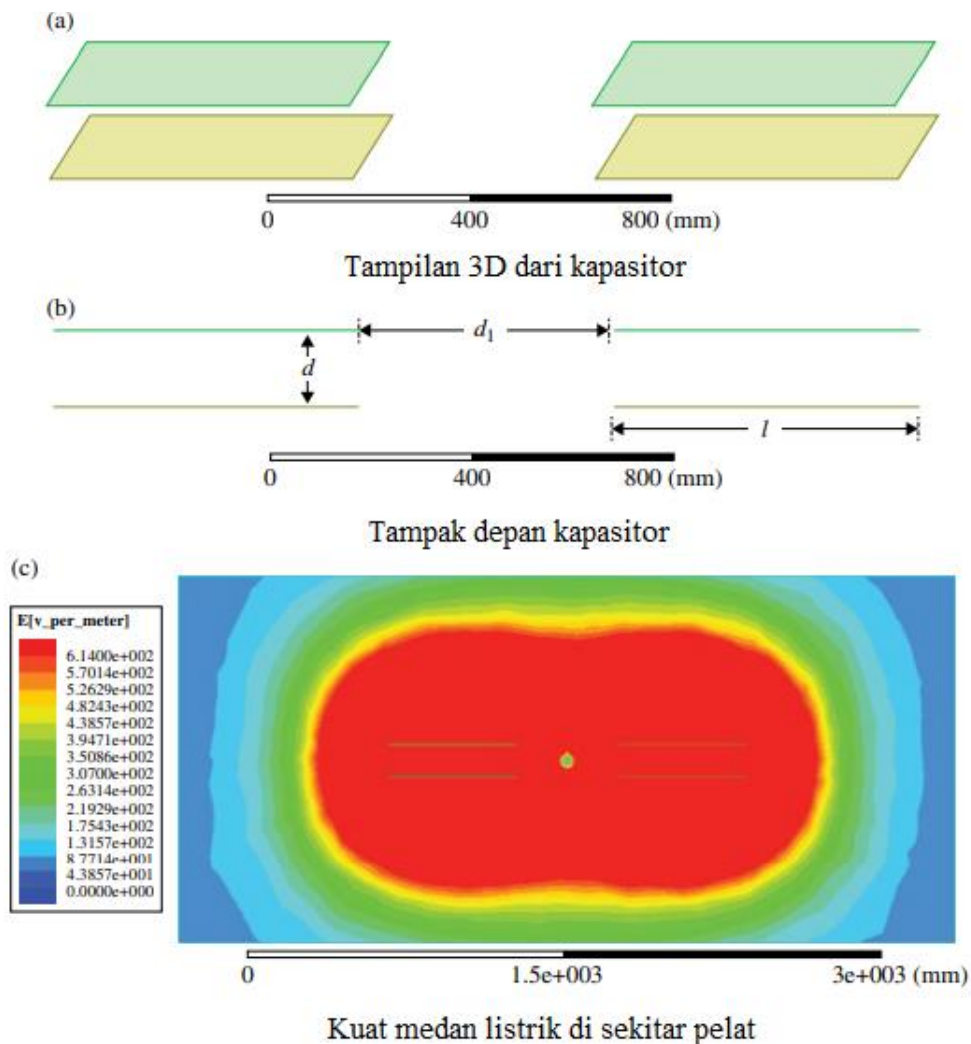
Persamaan 16.70

$$C_{S1} = \left[1 + 2.343 * \left(\frac{d}{l} \right)^{0.891} \right] * \left(\epsilon * \frac{l^2}{d} \right) = 36.7pF$$

di mana $\epsilon = 8,85 \times 10^{-12}$ F/m adalah permitivitas ruang bebas. Perangkat lunak Maxwell dari ANSYS digunakan untuk mensimulasikan kapasitor tunggal di berbagai misalignment dan kondisi jarak. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16.29, kapasitansi tidak terlalu sensitif terhadap misalignment dan variasi jarak.

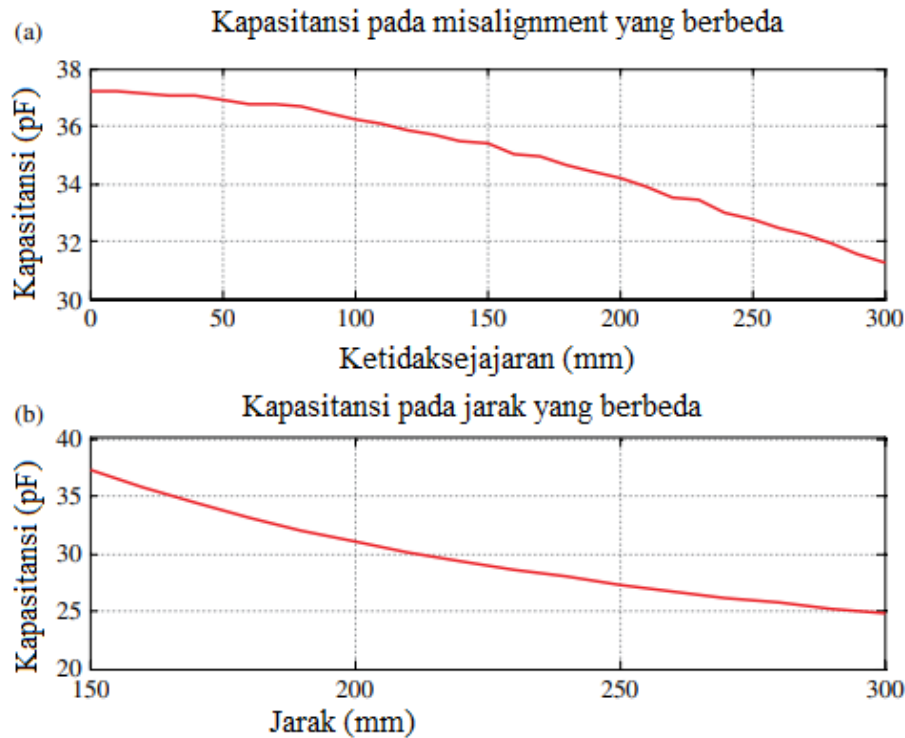
Desain Sistem CPT 2,4 kW

Sistem CPT 2,4 kW dirancang menggunakan prosedur di Bagian 16.2. Parameter sistem ditunjukkan pada Tabel 16.5. Perlu ditekankan bahwa induktor L2 dirancang untuk menjadi 5% lebih besar dari L1 untuk mencapai penyalaan tegangan nol untuk inverter input. Gambar 16.30 menunjukkan simulasi bentuk gelombang input dan keluaran.



Gambar 16.28 Tiga dimensi kapasitor kopling.

Daya output simulasi LTSpice adalah 2,4 kW, yang merupakan nilai yang diinginkan. Gambar 16.30 menunjukkan bahwa arus input positif pada transien turn-on, yang berarti dioda anti-bodi menghantarkan arus. Oleh karena itu, kerugian switching berkurang. Tabel 16.6 menunjukkan tegangan puncak/tegangan arus komponen.



Gambar 16.29 Variasi kapasitansi dengan misalignment dan jarak.

Gambar 16.3c menunjukkan hasil simulasi Maxwell terhadap kuat medan listrik. Menurut standar IEEE, area aman untuk sistem ini berjarak sekitar 0,6 m dari pelat, yang memiliki kekuatan medan lebih rendah dari 614 V/m.

Percobaan

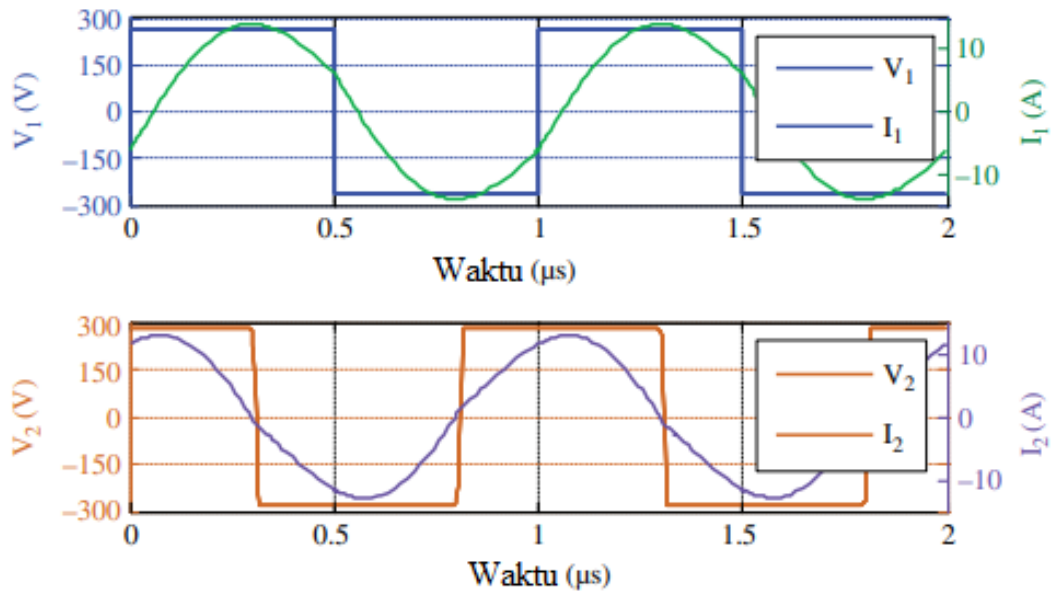
Menggunakan parameter pada Tabel 16.1, prototipe 2,4 kW dibangun seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16.31. Empat pelat aluminium 610 × 610 mm digunakan untuk membentuk dua kapasitor, dan jarak nominalnya adalah 150 mm. Tabel 16.2 menunjukkan bahwa tegangan puncak adalah 3,2 kV. Karena tegangan tembus udara adalah 3 kV/mm, tidak ada masalah dengan busur. Untuk kapasitor C_1 dan C_2 , 10 kapasitor film dengan rating tegangan DC 2000 V dihubungkan secara seri.

Tabel 16.5 Spesifikasi sistem dan nilai parameter

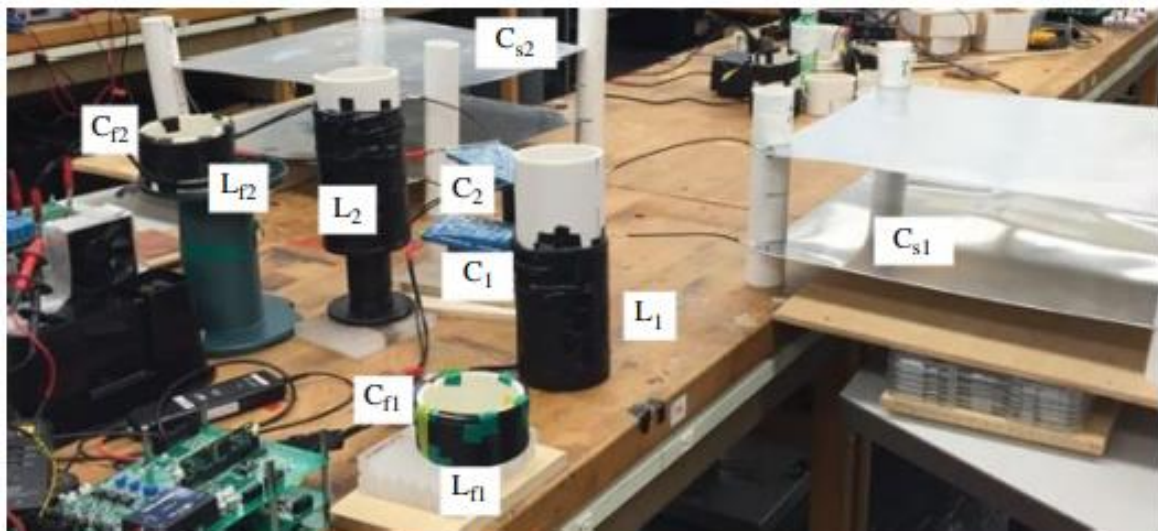
V_{in}	V_{out}	f_{sw}	L_1 (L_2)	C_1 (C_2)	C_1 (C_2)	L_1	L_2
265 V	280 V	1 MHz	11.6 μ H	2.18 nF	100 pF	231 μ H	242 μ H

Tabel 16.5 Spesifikasi sistem dan nilai parameter.

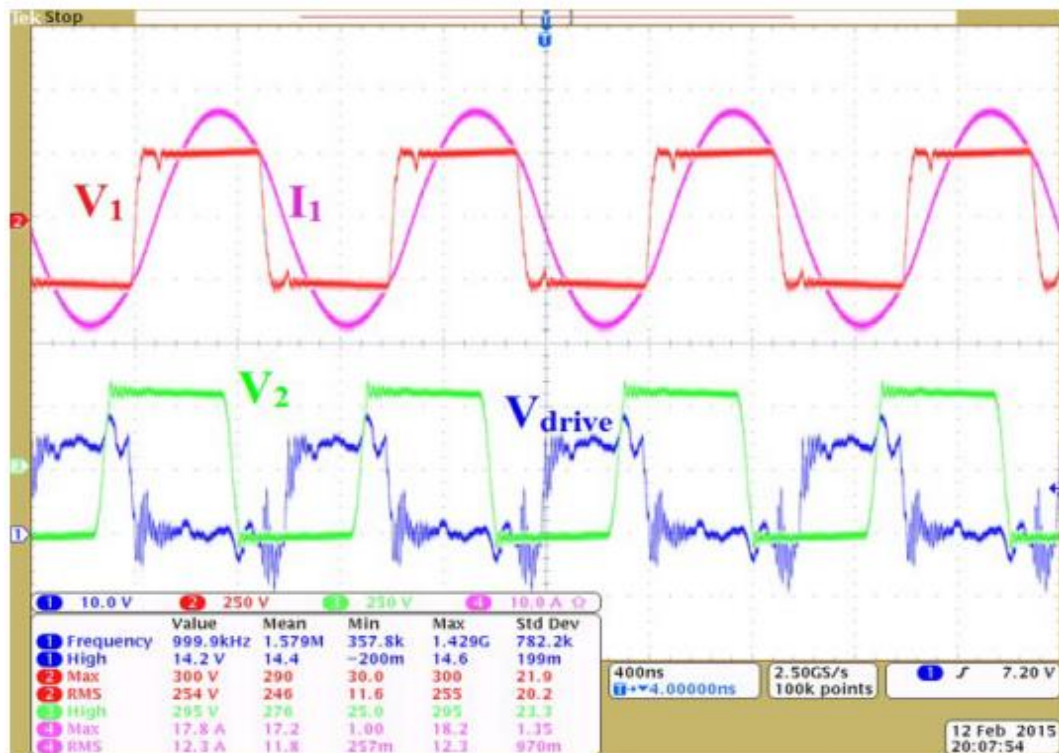
V_{in}	V_{out}	f_{sw}	$L_{f1} (L_{f2})$	$C_{f1} (C_{f2})$	$C_1 (C_2)$	L_1	L_2
265 V	280 V	1 MHz	11.6 μ H	2.18 nF	100 pF	231 μ H	242 μ H



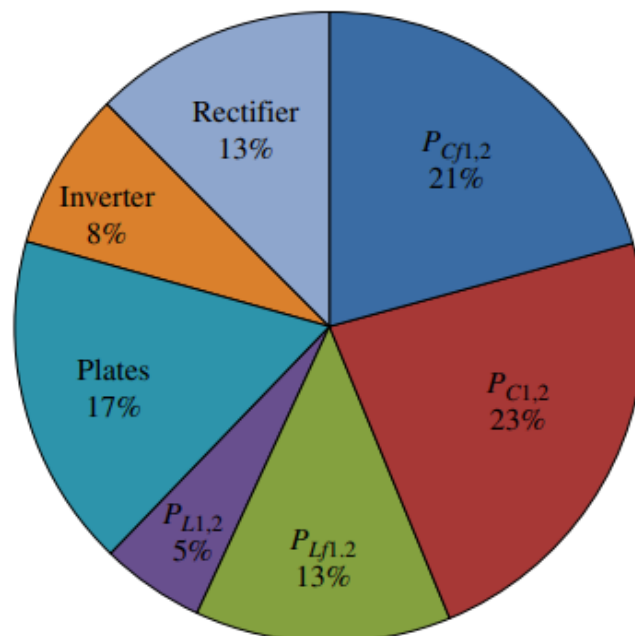
Gambar 16.30 Simulasi LTSpice Bentuk Gelombang Input dan Output



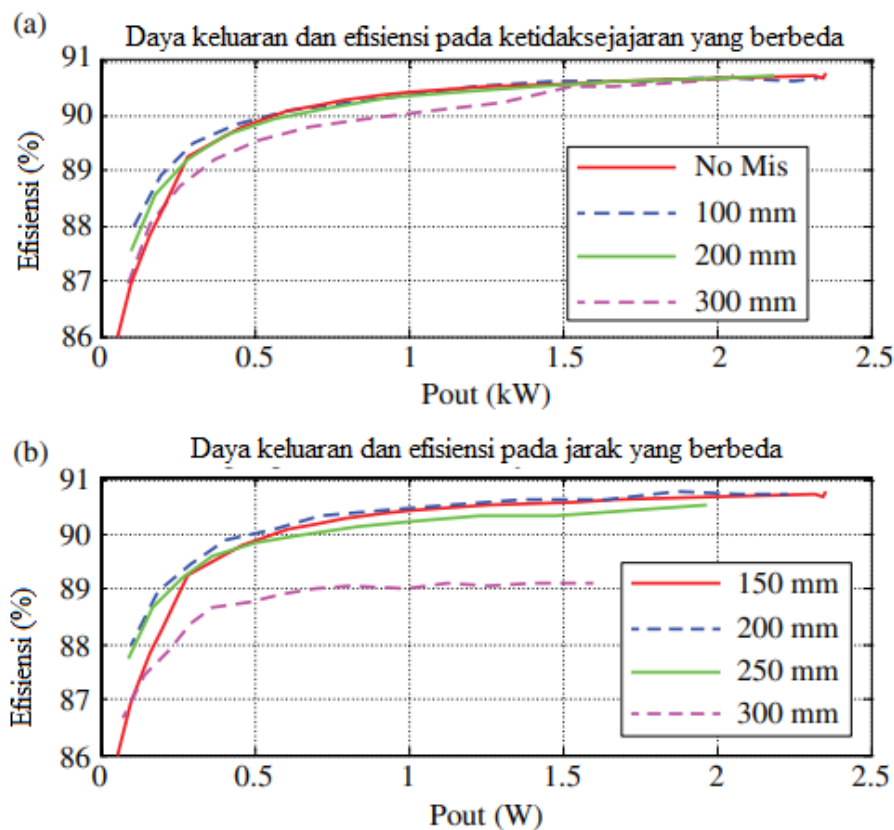
Gambar 16.31 Prototipe sistem CPT 2,4 kW.



Gambar 16.32 Bentuk gelombang percobaan sistem CPT



Gambar 16.33 Distribusi rugi daya masing-masing komponen.



Gambar 16.34 Kinerja sistem dalam kondisi yang berbeda

Induktor dililit dalam bentuk multi-putaran, sehingga tekanan tegangan antara belokan terbatas dan isolasi antara belokan dapat mencegah lengkung. Hasil eksperimen ditunjukkan pada Gambar 16.32. Pengaktifan tegangan nol dicapai pada sisi input, dan bentuk gelombangnya mirip dengan simulasi pada Gambar 16.30. Daya keluarannya adalah 2,4 kW dengan efisiensi 90,8% pada jarak 150 mm dan tidak ada misalignment. Rugi daya pada komponen dapat diperkirakan dengan resistensi parasit komponen dan juga tegangan arus pada Tabel 16.2. Distribusi rugi daya ditunjukkan pada Gambar 16.33.

Kinerja sistem di bawah kondisi yang berbeda disediakan pada Gambar 16.34, yang menunjukkan bahwa sistem CPT dapat mempertahankan output 2,1 kW dengan efisiensi 90,7% pada misalignment 300 mm. Selain itu, dapat mempertahankan output 1,6 kW dengan efisiensi 89,1% pada jarak 300 mm. Sehingga sistem CPT tahan terhadap misalignment dan variasi jarak dibandingkan dengan sistem IPT. Banyak kemajuan dalam transfer daya nirkabel kapasitif telah dibuat sejak penulisan buku ini.

16.14 RINGKASAN

Bab ini telah menyajikan ikhtisar tentang pengisian nirkabel kendaraan listrik. Jelas bahwa elektrifikasi kendaraan tidak dapat dihindari karena masalah lingkungan dan energi. Pengisian nirkabel akan memberikan banyak manfaat dibandingkan dengan pengisian kabel. Khususnya, ketika jalan dialiri listrik dengan kemampuan pengisian daya nirkabel, jalan tersebut akan memberikan dasar untuk penetrasi pasar massal untuk EV terlepas dari baterai teknologi. Seiring perkembangan teknologi, pengisian nirkabel EV dapat membuahkan hasil.

BAB 17

STRATEGI KONTROL DAYA KENDARAANDAN MANAJEMEN ENERGI

17.1 KERANGKA, DEFINISI, DAN KEBUTUHAN UMUM

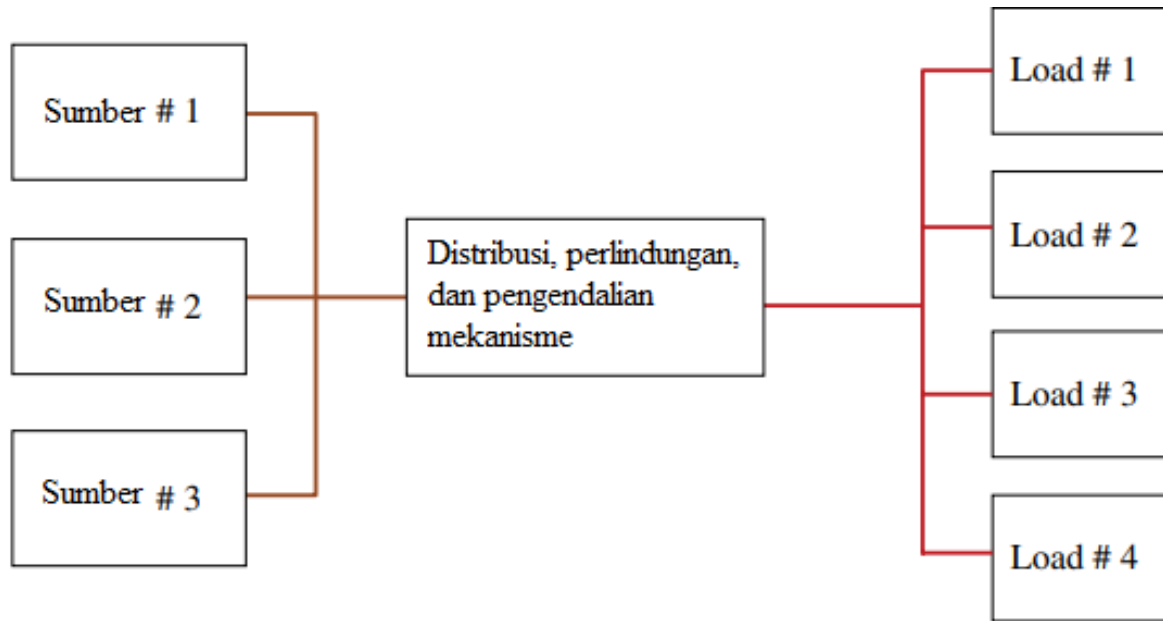
Istilah manajemen daya dan energi adalah "hampir" sinonim ketika digunakan dalam konteks sistem kendaraan. Untuk lebih tepatnya, daya adalah kuantitas sesaat, sedangkan energi melibatkan periode waktu di mana daya diterapkan. Meskipun maknanya akan menjadi lebih jelas saat kita melanjutkan bab ini, biasanya ketika kekuatan "dikelola" secara umum, energi juga akan dikelola. Pertanyaan tentang pengelolaan tenaga atau energi muncul terutama karena alasan berikut: (walaupun istilah "pengelolaan" memiliki beberapa implikasi tambahan, yang akan dijelaskan nanti). Perhatikan Gambar 17.1 yang mewakili sistem yang sangat umum yang melibatkan beberapa sumber daya/energi dan beban, termasuk distribusi daya ke beban.

Dalam diagram ini kita memiliki beberapa sumber. Masing-masing sumber ini bisa dari mana saja jenis tertentu. Misalnya, itu bisa berupa ICE, yang merupakan konverter daya yang menyiratkan bahwa itu adalah konverter energi yang menerjemahkan energi kimia menjadi tenaga mekanik. Bisa juga baterai, yang merupakan alat penyimpanan energi listrik, atau bisa juga sel bahan bakar, yang mengubah energi kimia menjadi tenaga listrik, atau bisa juga flywheel, yang menyimpan energi kinetik dalam bentuk mekanis. Dalam kasus flywheel, energi bisa disuntikkan ke flywheel dengan menjalankan motor listrik dan mempercepatnya. Sumbernya juga bisa berupa sumber daya hidrolik atau pneumatik.

Dari pembahasan di atas terlihat bahwa sumbernya bisa berbeda-beda, tetapi itu bisa serupa juga, atau bahkan identik. Misalnya, sumber 1 dan 2 di Gambar 17.1 keduanya bisa menjadi ICE. Atau, yang satu bisa menjadi diesel dan yang lainnya adalah mesin bensin. Demikian pula, satu sumber bisa berupa baterai, yang lain adalah sel bahan bakar.

Beban juga bisa dari jenis yang berbeda. Misalnya, dalam kendaraan hibrida atau listrik beban bisa menjadi motor penggerak jenis beban listrik (atau lebih tepatnya elektromekanis), atau bisa berupa lampu listrik atau pemanas, yaitu semacam beban resistif. Itu juga bisa termasuk motor bantu seperti pompa, AC, dan sebagainya. Dengan demikian jelaslah bahwa dalam sebuah kendaraan terdapat berbagai jenis muatan tergantung kebutuhan. Tetapi pertanyaannya adalah: mengapa seseorang harus memiliki banyak sumber dalam sistem kendaraan?

Bahkan dalam kendaraan non-hibrida konvensional kita memiliki ICE dan juga baterai (dan tentu saja, baterai diisi melalui generator yang digerakkan oleh ICE). Di sini kita memiliki setidaknya dua sumber terpisah untuk memenuhi dua jenis beban yang berbeda, yaitu mekanis penggerak dan beban listrik. Dalam HEV kita juga memiliki setidaknya dua sumber. Satu-satunya perbedaan adalah dalam HEV baterai bisa jauh lebih besar (sebenarnya terdiri dari sejumlah modul baterai terpisah yang digabungkan bersama) daripada di kendaraan non-hibrida biasa.



Gambar 17.1 Skema diagram blok yang menunjukkan sistem distribusi sumber dan beban.

Jawaban sederhana mengapa kita memiliki berbagai jenis sumber adalah dalam kendaraan konvensional kita memiliki beban propulsi mekanis yang berat yang dapat dipenuhi melalui ICE. Maka tentu saja kita dapat menggunakan baterai untuk mengirimkan beban yang lebih kecil seperti lampu listrik atau pompa. Tetapi jawaban yang lebih kompleks mengenai kebutuhan untuk berbagai sumber adalah permintaan beban (jumlah daya) bervariasi dengan waktu, dan karakteristik beban (yaitu karakteristik torsi-kecepatan dari beban mekanis seperti propulsi) juga berubah seiring waktu.

Sumber juga memiliki karakteristik dalam hal profil pengiriman daya, dan efisiensi. Dengan kata lain, untuk mengirimkan beban tertentu pada saat tertentu, jika ditemukan bahwa sumber tertentu mampu melakukannya dengan efisiensi terbaik dibandingkan dengan beberapa pilihan sumber, maka jelas kita harus memilih sumber terbaik. Di sini kita harus terlebih dahulu melihat apakah satu atau lebih sumber (secara individu atau kolektif) dapat memenuhi permintaan beban tertentu dalam hal kinerja beban. Jika ada lebih dari satu sumber yang dapat melakukan pekerjaan itu, maka kita harus memilih yang paling efisien sumber (atau kombinasi dari yang paling efisien) untuk melakukan pekerjaan tersebut.

Alasan mengapa situasi di atas muncul adalah karena ICE memiliki efisiensi yang lebih baik di wilayah kecepatan torsi tertentu dari peta efisiensi mesinnya. Hal yang sama berlaku untuk motor listrik, tetapi mesin listrik memiliki efisiensi yang jauh lebih tinggi pada rentang torsi dan kecepatan yang lebih luas, daripada ICE. Demikian pula, jika, untuk kepentingan diskusi, kita asumsikan bahwa suatu sistem memiliki diesel dan mesin bensin (multiengine, multifuel system), maka karakteristik efisiensinya akan berbeda, dan pada titik kecepatan torsi tertentu mesin diesel akan lebih baik daripada mesin bensin, dan sebaliknya. Ide ini membentuk alasan utama di balik manajemen daya dari sudut pandang kinerja dan efisiensi. Ini juga dapat disebut manajemen energi karena alasan ini juga meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan dan mengurangi konsumsi energi.

Selain itu, hal-hal lain yang termasuk dalam ruang lingkup manajemen daya melibatkan keseluruhan cara di mana daya didistribusikan ke berbagai beban. Misalnya, mekanisme yang digunakan untuk menghubungkan beban ke sumber dan mekanisme perlindungan yang digunakan untuk masalah seperti kelebihan beban, hubung singkat, dan tegangan lebih, dalam

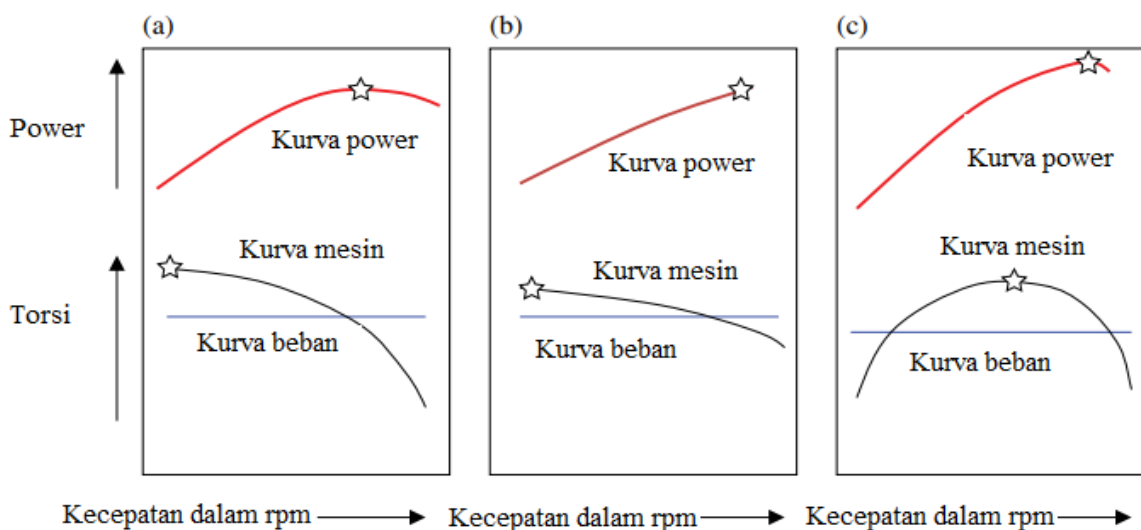
sistem kelistrikan juga berada dalam lingkup manajemen daya. Juga dalam lingkup manajemen daya adalah beberapa item tambahan, seperti mengendalikan dan mengoordinasikan keseluruhan sistem tenaga dan berbagai subsistem dan komponen sedemikian rupa sehingga pengisian dan pengosongan baterai yang dikendalikan dengan tujuan meningkatkan masa pakai baterai.

17.2 METODOLOGI UNTUK DIIMPLEMENTASIKAN

Kita akan memperlakukan manajemen dan kontrol daya dari dua perspektif berbeda: pengoptimalan, serta distribusi dan kontrol. Pengoptimalan berkaitan dengan hal-hal seperti efisiensi energi dan pemeliharaan state of charge (SOC) dalam beberapa nilai ambang, dan ini lebih berkaitan dengan kontrol dan manajemen pembangkitan, berdasarkan beban tuntutan. Meskipun perspektif kedua berkaitan dengan distribusi dan kontrol, ada hubungan timbal balik yang baik antara keduanya seperti yang akan terlihat berikut ini. Pertama mari kita pertimbangkan ciri-ciri sumber tenaga/energi dan perhatikan ciri-ciri : ICE bensin, mesin diesel, alternator, baterai, dan sel bahan bakar.

Untuk mesin ini, kurva yang ditunjukkan pada Gambar 17.2 harus: sebenarnya berisi keluarga kurva yang sesuai dengan posisi throttle atau input bahan bakar yang berbeda (diskusi tambahan dapat ditemukan di artikel web yang dikutip di bawah bagian bacaan lebih lanjut di akhir artikel bab ini). Kita juga dapat memiliki serangkaian kurva lain yang menunjukkan hubungan antara kecepatan dan efisiensi pada posisi throttle yang berbeda (atau setara dengan jumlah input bahan bakar, atau bentuk lain dari jumlah input energi) untuk masing-masing sumber. Kedua set ini – kurva kecepatan-torsi dan kecepatan-efisiensi – bersama-sama membentuk peta mesin.

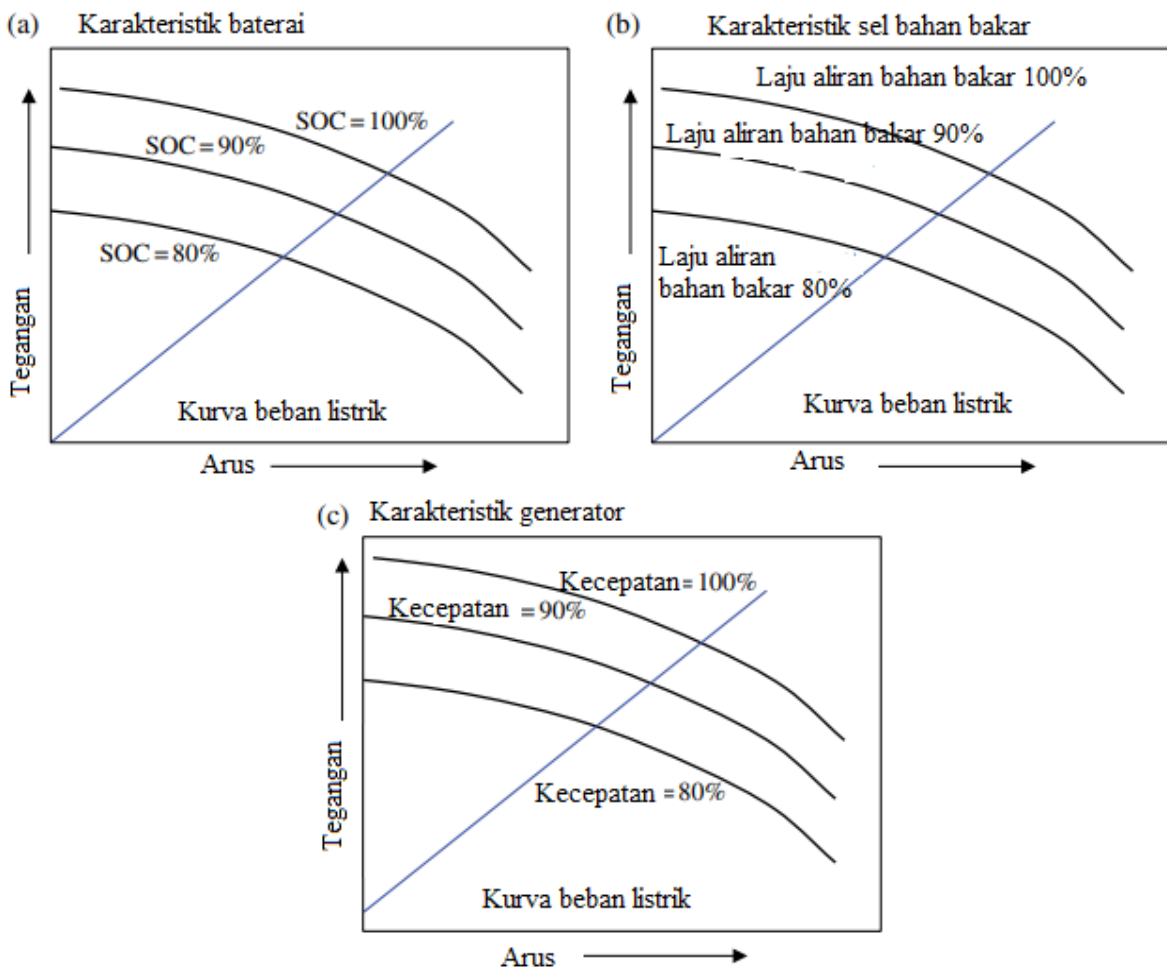
Demikian pula untuk komponen kelistrikan, seperti motor dan generator, kita bisa memiliki set kurva lain yang ditampilkan hubungan antara kecepatan dan efisiensi untuk output daya yang diberikan (atau ekuivalen kecepatan versus input daya pada efisiensi tertentu). Untuk komponen statis seperti baterai dan sel bahan bakar, kita bisa memplot tegangan versus arus pada SOC yang diberikan (atau setara dengan input daya versus arus). Karakteristik ini untuk komponen seperti generator dan baterai dapat merupakan informasi yang diperlukan dalam hal titik operasi perangkat ini.



Gambar 17.2 (a) Mesin diesel dengan kenaikan torsi (kemiringan) yang relatif tinggi; (b) mesin diesel dengan kenaikan torsi (kemiringan) yang relatif rendah; c. mesin bensin. (Torsi maksimum dan titik daya ditunjukkan oleh bintang lima titik.)

Untuk kurva karakteristik pada Gambar 17.2, kurva mesin dan kurva beban ditunjukkan. Seperti disebutkan sebelumnya, kurva yang melibatkan ICE adalah untuk throttle tertentu posisi yang sesuai dengan asupan bahan bakar mesin. Titik potong antara beban kurva dan sumber (misalnya mesin, baterai, dll) menentukan titik operasi yang tepat dari beban dan sumber. Saat kita ingin menggerakkan beban, ini berarti kita ingin menghasilkan kecepatan tertentu pada torsi tertentu. Beban dan karakteristiknya tergantung pada hal-hal di luar mesin (atau sumber). Untuk memenuhi persyaratan kecepatan dan torsi beban, biasanya diperlukan untuk memasukkan rangkaian roda gigi ke dalam sistem, karena mesin pada umumnya tidak dapat menangani berbagai permintaan beban, bahkan setelah mengendalikan throttle. Setelah posisi throttle dan rasio gigi dipilih, itu menentukan titik operasi mesin yang tepat. Pada saat itu, mesin beroperasi pada efisiensi atau penghematan bahan bakar tertentu.

Karakteristik sistem kelistrikan dan sifatnya ditunjukkan pada Gambar 17.3. Untuk kenyamanan perbandingan yang telah kita buat kurva identik dalam bentuk untuk menunjukkan variabel apa yang berubah dalam setiap kasus. Variabelnya adalah tegangan dan arus masing-masing pada sumbu y dan x. Parameter yang ditetapkan adalah SOC dalam kasus baterai, dan laju aliran bahan bakar (bisa hidrogen) dalam kasus sel bahan bakar. Untuk kurva generator, kecepatan dipertahankan konstan sementara beban berubah. Beberapa beban listrik dapat diterapkan pada masing-masing sumber listrik ini, seperti yang digambarkan oleh kurva beban masing-masing.



Gambar 17.3 Kurva karakteristik untuk (a) baterai, (b) sel bahan bakar, dan (c) generator.

Misalnya, karakteristik hambatan listrik (yang bisa berupa lampu) bisa berupa garis lurus ditunjukkan dalam gambar. Pada masing-masing grafik tersebut, titik operasi ditentukan oleh titik potong antara kurva. Sesuai dengan masing-masing diagram ini, diagram pendamping menunjukkan input daya aktual yang diperlukan pada titik operasi dapat ditarik, yang dapat digunakan untuk menghitung energi yang digunakan dan akan bergantung pada efisiensi pada setiap titik operasi. Itu (efisiensi) mungkin salah satu bahannya dalam menentukan biaya produksi daya di setiap titik. Pada titik ini kita dapat mendefinisikan situasi di atas secara matematis sebagai:

Persamaan 17.1

$$\text{Mesin: } T_{e1} = f_{e1}(\omega_{e1}, \Gamma_{e1})$$

yang merupakan torsi yang sesuai dengan mesin tertentu $e1$, di mana ω_{e1} , Γ_{e1} adalah kecepatan dan posisi throttle. Seperti dicatat sebelumnya, mesin juga akan memiliki persamaan lain yang melibatkan daya (atau konsumsi energi), atau setara efisiensi, yang dapat ditulis sebagai:

Persamaan 17.2

$$\eta_{e1} = \xi_{e1}(\omega_{e1}, \Gamma_{e1})$$

Demikian pula kita dapat menulis persamaan untuk mesin lain:

Persamaan 17.3

$$T_{e2} = \xi_{e2}(\omega_{e2}, \Gamma_{e2})$$

yang dapat memiliki karakteristik yang berbeda dari $e1$. Bersama-sama, mesin dapat mengirimkan beban total. Mesin kedua dapat memiliki efisiensi yang ditentukan oleh:

Persamaan 17.4

$$\eta_{e2} = \xi_{e2}(\omega_{e2}, \Gamma_{e2})$$

dan beban diasumsikan memiliki karakteristik

Persamaan 17.5

$$T_L = F_L(\omega_L, \Gamma_L)$$

di mana T_L adalah torsi, ω_L adalah kecepatan beban, dan Γ_L tergantung pada profil jalan dan masalah lingkungan eksternal dan permintaan pendorong. Γ_L juga tergantung pada beban tambahan apa pun permintaan di dalam kendaraan karena tindakan langsung pengemudi

(misalnya peningkatan beban listrik, yang dapat menyebabkan torsi yang lebih tinggi pada generator), atau karena tindakan kontrol tidak langsung yang dilakukan di dalam kendaraan secara otomatis, misalnya, beberapa pompa mekanis atau elektrik sedang diaktifkan.

Bahkan jika kuantitas T_L hanya bergantung pada input pengemudi dalam hal keinginan untuk berakselerasi, sifat fungsional torsi, yaitu f_L , akan tergantung pada karakteristik jalan dan faktor lain di luar kendaraan. Oleh karena itu fungsi f_L ini akan berubah dari satu jalan ke jalan lain atau dari satu siklus berkendara ke siklus lainnya. Mungkin ada rasio roda gigi antara beban dan mesin individu. Dengan kata lain,

Persamaan 17.6

$$\frac{\omega_L}{\omega_{e1}} = g_1$$

Asumsikan, demi diskusi, bahwa roda gigi ideal dan tanpa kerugian. Di bawah skenario di atas, jika beban digerakkan oleh dua mesin bersama-sama, dan dengan asumsi konservasi daya, persamaan daya akan:

Persamaan 17.7

$$\frac{\omega_L}{\omega_{e2}} = g_2$$

Jadi, konsumsi bahan bakar total dalam hal ini akan sesuai dengan daya input total ke dua mesin diambil bersama-sama:

Persamaan 17.8

$$T_L \omega_L = T_{e1} \omega_{e1} + T_{e2} \omega_{e2}$$

dan tentu saja

Persamaan 17.9

$$\begin{aligned} P_{in} &= \left\{ \frac{\text{Power kendaraan 1}}{\text{Efisiensi kendaraan 1}} \right\} + \left\{ \frac{\text{Power kendaraan 2}}{\text{Efisiensi kendaraan 2}} \right\} \\ &= \frac{T_{e1} \omega_{e1}}{\eta_{e1}} + \frac{T_{e2} \omega_{e2}}{\eta_{e2}} = \frac{\left\{ f_{e1} \left(\frac{\omega_L}{g_1, \Gamma_{e1}} \right) x \left(\frac{\omega_L}{g_1} \right) \right\}}{\left\{ \xi_{e1} \left(\frac{\omega_L}{g_1, \Gamma_{e1}} \right) \right\}} + \frac{\left\{ f_{e2} \left(\frac{\omega_L}{g_2, \Gamma_{e2}} \right) x \left(\frac{\omega_L}{g_2} \right) \right\}}{\left\{ \xi_{e2} \left(\frac{\omega_L}{g_2, \Gamma_{e2}} \right) \right\}} \end{aligned}$$

Dapat segera dilihat dari persamaan ini bahwa input bahan bakar hanya bergantung pada rasio gigi dan posisi throttle. Strategi dalam hal ini adalah: mengingat torsi beban T_L dan kecepatan beban ω_L , pilih rasio gigi g_1, g_2 , dan posisi Γ_{e1}, Γ_{e2} , sehingga tingkat konsumsi bahan bakar yang sesuai dengan P_{in} adalah minimum, sambil memuaskan permintaan torsi dan

kecepatan. Tentu saja dipahami bahwa berbagai ekspresi fungsi untuk torsi dan efisiensi tersedia dari spesifikasi mesin atau data pabrikan. Jika tujuan ini dapat dipenuhi, itu akan memberikan torsi dan kecepatan yang tepat ke beban pada asupan bahan bakar minimum, yang sangat diinginkan. Dalam sistem nyata, tindakan ini dikoordinasikan melalui pengontrol bahan bakar/throttle dan transmisi pengontrol. Jika transmisi bukan tipe variabel kontinu, maka pilihan untuk g_1 dan g_2 akan dibatasi. Sebagai tambahan, pengontrol mesin dan informasi sensor lainnya di kendaraan akan terlibat dalam proses pengambilan keputusan di atas. Tapi intinya di sini adalah, pada prinsipnya, strategi terbaik dapat diwujudkan untuk memenuhi permintaan beban dengan konsumsi bahan bakar minimum.

Di atas persamaan yang ditunjukkan di atas, mungkin perlu untuk memaksakan kendala tertentu. Misalnya, kita dapat memaksakan persyaratan bahwa kecepatan mesin, baik untuk e_1 atau e_2 , tidak boleh melebihi batas tertentu, karena desain struktural mesin, ukuran fisik, dan faktor lainnya. Ini dapat ditulis dalam bentuk:

Persamaan 17.11

$$\omega_{e1} \leq \omega_{threshold1}$$

Persamaan 17.12

$$\omega_{e2} \leq \omega_{threshold2}$$

dan demikian pula untuk torsi,

Persamaan 17.13

$$T_{e1} \leq T_{threshold1}$$

Persamaan 17.14

$$T_{e2} \leq T_{threshold2}$$

Dengan kata lain, kita tidak hanya harus mengamati karakteristik mesin tertentu yang didefinisikan sebelumnya melalui peta mesin atau informasi yang setara, tetapi juga untuk memastikan bahwa kita berada dalam batas ambang batas maksimum perangkat, berdasarkan spesifikasi pabrikan. Oleh karena itu, masalah optimasi kita harus memperhitungkan kendala ini, dan kemudian mencoba meminimalkan penghematan bahan bakar, dan seterusnya. Melanjutkan plot sebelumnya (torsi vs kecepatan dll) yang menunjukkan karakteristik dari berbagai sumber, idenya dapat diperluas sebagai berikut. Seperti yang telah kita lakukan untuk mesin, kita dapat menulis persamaan serupa untuk sumber lain. Misalnya, untuk sumber listrik atau elemen penyimpan seperti genset, baterai, sel bahan bakar, dan sebagainya, berikut ini dapat kita tuliskan karakteristik kelistrikan berdasarkan diagram sebelumnya yang menunjukkan karakteristiknya masing-masing:

Persamaan 17.15

$$I_{G1} = f_{G1}(V_{G1}, \omega_{G1})$$

(hubungan yang menunjukkan arus sebagai fungsi dari tegangan dan kecepatan generator)

Persamaan 17.16

$$\eta_{G1} = \xi_{G1}(V_{G1}, \omega_{G1})$$

(hubungan yang menunjukkan efisiensi sebagai fungsi dari tegangan dan kecepatan generator)

Persamaan 17.17

$$I_{B1} = f_{B1}(V_{B1}, SOC_{B1})$$

(hubungan yang menunjukkan arus sebagai fungsi tegangan dan SOC untuk baterai)

Persamaan 17.18

$$\eta_{B1} = \xi_{G1}(V_{B1}, SOC_{B1})$$

(hubungan yang menunjukkan efisiensi sebagai fungsi tegangan dan SOC untuk baterai)

$$I_{FC1} = f_{FC1}(V_{FC1}, FR_{FC1})$$

(hubungan yang menunjukkan arus sebagai fungsi dari tegangan dan laju bahan bakar untuk sel bahan bakar)

Persamaan 17.20

$$\eta_{FC1} = \xi_{FC1}(V_{FC1}, FR_{FC1})$$

(hubungan yang menunjukkan efisiensi sebagai fungsi dari tegangan dan laju bahan bakar untuk sel bahan bakar). Dalam persamaan di atas, subskrip G, B, dan FC masing-masing mewakili generator, baterai, dan sel bahan bakar. SOC menunjukkan status pengisian, dan FR menunjukkan laju bahan bakar. Persamaan menyiratkan bahwa arus dalam generator tergantung pada kecepatan dan tegangan output. Demikian pula arus baterai tergantung pada tegangan baterai untuk SOC tertentu, dan arus sel bahan bakar bergantung pada tegangan sel bahan bakar untuk laju bahan bakar tertentu. Efisiensi masing-masing perangkat ini tergantung pada tegangan (atau setara dengan arus) dan parameter lain seperti kecepatan,

SOC, atau FR, yang juga disertakan di atas. Sekali lagi, kita mungkin memiliki beberapa batasan yang dikenakan pada perangkat ini:

Persamaan 17.21

$$I_{G1} \leq I_{G1threshold}$$

Persamaan 17.22

$$I_{B1} \leq I_{B1threshold}$$

Persamaan 17.23

$$I_{FC1} \leq I_{FC1threshold}$$

Persamaan 17.24

$$SOC_{B1} \leq SOC_{B1_high_threshold}$$

Persamaan 17.25

$$SOC_{B1} \leq SOC_{B1_low_threshold}$$

Di sini batas atas batas saat ini di perangkat, dan batas atas dan bawah untuk SOC baterai, ditampilkan sebagai batasan. Demi kesederhanaan kita bisa menulis

Persamaan 17.26

$$SOC_{B1} = f_{SOC_{B1}}(V_{B1})$$

yang menunjukkan bahwa SOC terkait dengan tegangan. Ini adalah persamaan sederhana hanya untuk ilustrasi, karena persamaan SOC bisa sangat kompleks dan metode untuk mengevaluasinya dapat mencakup berbagai nonlinier, dan juga melibatkan variabel lain seperti suhu.

Kita juga dapat mengasumsikan bahwa ada arus beban listrik total dan tegangan beban dalam sistem, yang dapat ditulis sebagai:

Persamaan 17.27

$$I_L = f_L(V_L)$$

Persamaan 17.28

$$I_L = I_{G1} + I_{B1} + I_{FC1}$$

Ini hanya contoh. Dengan cara yang sama, kendala tambahan, tergantung pada kebutuhan dan spesifikasi, dapat dimasukkan. Setelah semua kendala dan persamaan ini ada, yang dapat melibatkan sejumlah besar persamaan, untuk menanganinya, beberapa metode formal harus diperkenalkan secara singkat untuk menyentuh beberapa metode ini, karena ada cukup banyak metodologi yang tersedia saat ini, serta pemodelan, desain, dan pengembangan berbasis komputer, yang seringkali diperlukan dan efektif.

17.3 METODOLOGI UNTUK OPTIMASI

Satu tahap dalam proses menangani hal di atas adalah pengembangan "fungsi biaya" di mana satu fungsi dikembangkan, sehingga persamaan dan kendala disertakan sehingga jika konsumsi energi di perangkat tertentu meningkat, fungsi biaya meningkat. Demikian pula, jika kendala dilanggar, fungsi biaya meningkat. Kata "biaya" dalam konteks ini menyiratkan bahwa beberapa hal yang "tidak diinginkan" terjadi di suatu tempat dalam sistem ketika "biaya" meningkat. Ini bisa berarti lebih banyak asupan bahan bakar yang menunjukkan biaya bahan bakar, atau itu bisa berupa arus lebih atau tegangan lebih dalam suatu komponen, atau melebihi SOC dalam baterai, dan sebagainya, semua pada akhirnya entah bagaimana terkait dengan sesuatu yang tidak diinginkan dan dalam arti tertentu memiliki konotasi biaya aktual dalam hal biaya atau uang .

Sebagai contoh, kita dapat mengembangkan fungsi biaya dengan filosofi berikut. Kita dapat langsung menyertakan angka $1 - \eta$ (yaitu ketidakefisienan perangkat) sebagai "biaya". Demikian pula, kita dapat mengatakan bahwa jika arus I di perangkat melebihi ambang batas, maka $(|I| - |I_{threshold}|)$, yaitu, nilai mutlak dari jumlah yang terlampaui, dikalikan dengan beberapa konstan, dapat membentuk bagian dari fungsi biaya. Pengganda konstan dapat berfungsi sebagai fungsi pembobot, yaitu seberapa penting item ambang ini, dan diperhitungkan melalui pengganda ini. Katakanlah, misalnya, bahwa "biaya" melebihi SOC dalam baterai sebesar 5% mungkin jauh lebih tinggi daripada "biaya" untuk turun di bawah ambang batas.

Arti fisik dari ini adalah "biaya" atau kerusakan baterai akan jauh lebih tinggi jika batas SOC atas terlampaui dibandingkan dengan yang lebih rendah. Penghakiman serupa harus dilakukan dalam mengembangkan bahan individu dari fungsi biaya yang sesuai dengan perangkat lain. Seperti yang kita tunjukkan sebelumnya, jelas bahwa kata "biaya" dalam fungsi biaya dapat ditafsirkan sebagai inefisiensi sistem (yang sama dengan biaya bahan bakar yang sebenarnya), atau kerusakan yang dilakukan dalam hal biaya, atau bisa juga dalam hal buruknya sistem. Kinerja perangkat yang dapat menyebabkan konsekuensi yang tidak diinginkan dan karenanya mahal dalam beberapa hal. Dengan demikian, pengembangan yang tepat dari fungsi biaya sangat penting dalam hal optimasi sistem.

Dalam sistem nyata mungkin perlu untuk mengimplementasikan hal di atas secara real time. Oleh karena itu, tergantung pada kompleksitas sistem, sejumlah besar daya komputasi mungkin diperlukan. Oleh karena itu bermanfaat untuk mengembangkan fungsi biaya yang melayani kebutuhan optimasi dan pada saat yang sama tidak terlalu rumit.

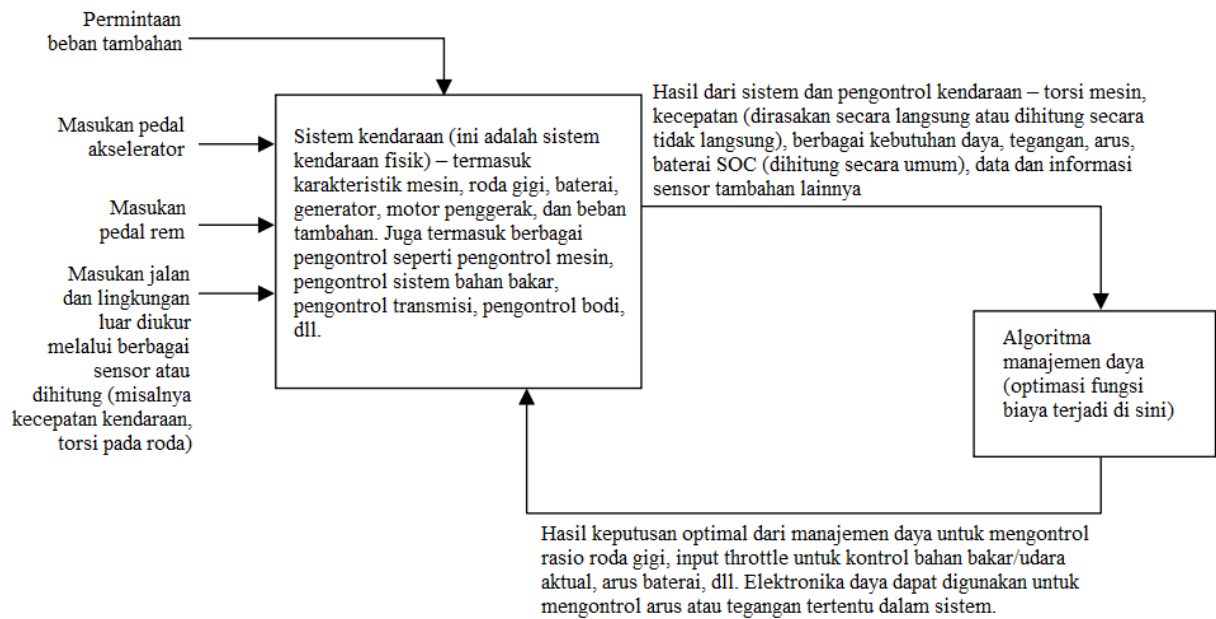
Mempertimbangkan sistem di atas, dengan dua mesin (untuk kepentingan umum), yang tidak harus berupa ICE (satu dapat berupa ICE dan yang lainnya merupakan sistem propulsi listrik), dan dengan satu baterai, satu sel bahan bakar, dan satu generator, kita dapat mengatur fungsi biaya keseluruhan sebagai

$$\begin{aligned}
C = & P_{in} + K_{prop}x|P_{prop_{aktual}} - P_{prop_{demand}}| + \eta_{G1}x(V_{G1}xI_{G1}) + \eta_{B1}x(V_{B1}xI_{B1}) \\
& + \eta_{FC1}x(V_{FC1}xI_{FC1}) \\
& + K_{B_{high}}x|SOC_{B1} - SOC_{B1_{high_threshold}}| + K_{B_{low}}x|SOC_{B1} - SOC_{B1_{low_threshold}}| \\
& + K_{FC_high}x|I_{FC1} - I_{FC1_{threshold}}| + K_{G1}x(|I_{G1}| - |I_{G1_{threshold1}}|) \\
& + K_{B1}x(|I_{B1}| - |I_{B1_{threshold1}}|)
\end{aligned}$$

Dalam persamaan ini input daya ke mesin, P_{in} , tergantung pada permintaan daya propulsi dan juga daya tambahan apa pun, seperti daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan generator atau pompa. Istilah lain dalam C melibatkan efisiensi masing-masing item seperti generator, baterai, dan sel bahan bakar apa pun. Istilah yang tersisa melibatkan melebihi ambang batas saat ini dan SOC, yang dihukum. Karena P_{in} adalah total input bahan bakar ke mesin, maka jelas bahwa semakin tinggi nilainya, semakin tinggi pula nilai C. Istilah $K_{prop} \times |P_{prop_aktual} - P_{prop_demand}|$ memberitahu kita bahwa jika output daya aktual dari mesin tidak memenuhi permintaan karena suatu alasan, maka kita memasukkan penalti dalam C. Di sini perbedaan dalam output daya aktual dari permintaan ini dapat menjadi indikator kurangnya kinerja mesin, dan belum tentu sebagai inefisiensi. Nilai dari berbagai pengali konstan dapat dipilih tergantung pada kepentingannya. Misalnya, jika kinerja mesin sangat penting, kita harus menggunakan nilai yang relatif tinggi untuk K_{prop} multiplier. Demikian pula, jika suatu item kurang penting, itu harus diberikan nilai yang lebih rendah.

Sekali lagi, item-item di atas semuanya dimasukkan demi diskusi umum dan hanya untuk memberikan gambaran tentang apa yang dapat disiratkan oleh fungsi biaya. Sistem nyata mungkin mencakup lebih banyak item ini atau lebih sedikit, tergantung pada situasinya. Dengan kata lain, fungsi biaya merupakan indikasi dari "kebaikan" (atau lebih tepatnya kekurangannya) dari sistem. Meskipun fungsi C di atas sudah cukup terlibat, perlu dicatat bahwa ekspresi penuh untuk masing-masing fungsi individu, berdasarkan semua persamaan sebelumnya, harus dimasukkan untuk melengkapinya. Setelah selesai, masalahnya adalah meminimalkan fungsi biaya C ini, dalam contoh ilustrasi, telah memperhitungkan berbagai kendala.

Seperti disebutkan di atas, input dari pengemudi diberikan ke sistem kendaraan melalui posisi pedal akselerator dan pedal rem. Input pada dasarnya berfungsi sebagai keinginan pengemudi untuk menambah atau mengurangi kecepatan, yang diimplementasikan melalui pedal gas dan rem. Ini dibandingkan dengan kecepatan sebenarnya, dan tindakan kontrol dipanggil. Situasi di jalan dan lingkungan di luar kendaraan juga diperhitungkan melalui berbagai sensor. Algoritme manajemen daya mencakup semua ini dan mengintegrasikannya bersama-sama untuk menghasilkan tindakan kontrol. Mekanisme ini ditunjukkan pada Gambar 17.4.



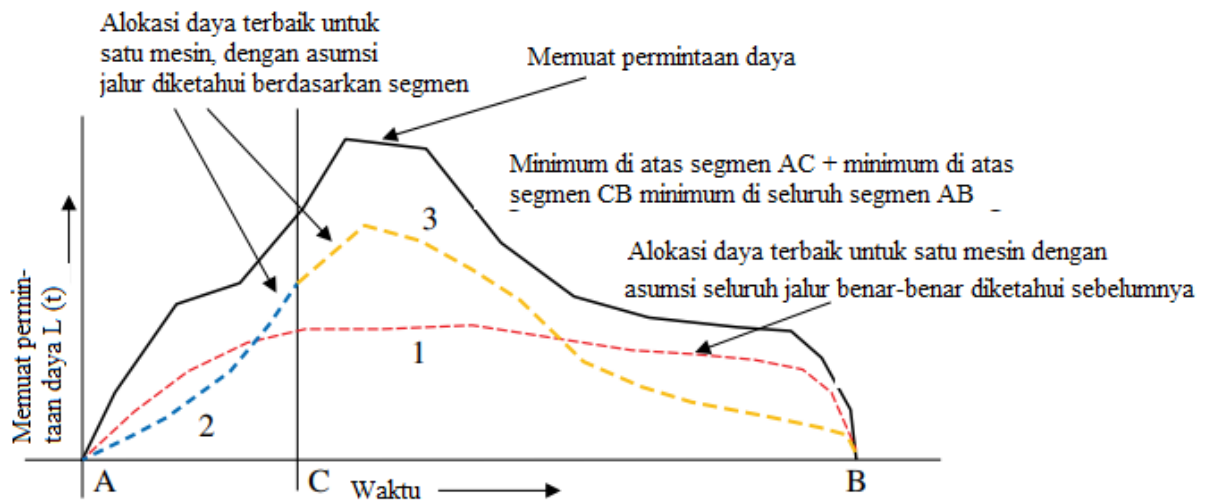
Gambar 17.4 Diagram skema dari antarmuka implementasi kontrol manajemen daya secara keseluruhan untuk sistem kendaraan.

Diagram sudah cukup jelas. Satu-satunya input ke sistem datang melalui pedal akselerator dan rem. Selain itu, tergantung pada tindakan tertentu oleh pengemudi atau melalui berbagai pengontrol, beban listrik atau mekanis yang berbeda mungkin terlibat. Contohnya adalah motor pengangkat jendela, yang disebabkan oleh tindakan pengemudi; atau aktivasi AC, tergantung pada suhu kabin; atau mungkin motor pompa air, tergantung suhu mesin. Semua input ini, bersama dengan kondisi lingkungan dan jalan, tentukan berapa asupan bahan bakar yang sebenarnya atau arus baterai. Hasil dari situasi di atas (karena tindakan pengemudi dll.) akan ditransmisikan melalui berbagai data sensor, atau informasi tertentu yang dihitung secara tidak langsung seperti SOC baterai akan dihasilkan, yang kemudian akan dimasukkan ke dalam algoritma manajemen daya. Algoritme melihat fungsi biaya (seperti dalam persamaan untuk C di atas), yang dibuat melalui penggunaan semua informasi ini. Algoritme kemudian mencoba mengoptimalkan C , dan hasil akhirnya dapat berupa pilihan yang diperbarui dari rasio roda gigi tertentu, posisi throttle, atau nilai arus baterai. Nilai-nilai yang diperbarui ini akan digunakan untuk memberi tahu berbagai pengontrol untuk memerintahkan status baru untuk kuantitas masing-masing. Oleh karena itu, informasi tentang permintaan torsi dan kecepatan ke mesin, dan entitas lain seperti sistem propulsi listrik juga diperbarui – yang bergantung pada kondisi jalan dan lingkungan serta tindakan kontrol. Perhatikan bahwa jalan dan lingkungan luar berada di luar kendaraan, jadi informasi tentang itu harus diperoleh melalui berbagai sensor, atau diperoleh melalui perhitungan. Oleh karena itu, terlihat jelas bahwa hasil akhir pada Gambar 17.4 pada kontrol manajemen daya adalah karena optimasi fungsi biaya dalam blok algoritma manajemen daya. Optimisasi ini dapat dilakukan sebagai berikut.

17.4 OPTIMALISASI FUNGSI BIAYA

Dalam contoh kita di atas, berkaitan dengan Persamaan (17.29), satu-satunya hal yang dapat dikontrol adalah throttle, rasio roda gigi di kedua mesin, dan kontrol arus di alternator atau baterai melalui beberapa elektronika daya. Diasumsikan bahwa kekuatan beban propulsi dan non-propulsi telah ditentukan, berdasarkan permintaan driver dan kondisi eksternal. Oleh

karena itu optimasi terlibat dengan mencoba meminimalkan fungsi C sambil mengamati berbagai kendala. Idanya di sini adalah untuk mencapai optimasi global (minimalisasi dalam kasus) sehingga biaya C diminimalkan. Intinya, ini melibatkan identifikasi berbagai minimum lokal dalam sistem, dan kemudian mencoba menemukan yang memberikan minimum global. Ada teknik numerik tertentu yang tersedia untuk melakukan ini.



Gambar 17.5 Memuat segmen siklus permintaan sebagai fungsi waktu.

Asumsikan situasi yang ditunjukkan pada Gambar 17.5, dengan dua mesin di dalam kendaraan. Misalkan kendaraan berada di titik A dan bermaksud menuju titik B, di mana A dan B ditentukan dalam waktu. Di antara dua titik ini, jalur atau siklus penggerak ditentukan oleh daya beban permintaan kendaraan $L(t)$, yang bergantung pada kecepatan antara A dan B, permukaan jalan aktual, dan input lingkungan eksternal lainnya. Terkadang cara alternatif untuk menentukan siklus berkendara adalah dengan menggunakan kecepatan kendaraan sebagai fungsi waktu, bersama dengan informasi tentang jenis jalan (di mana "jenis" dapat menyiratkan kemampuan menanjak). Namun pada akhirnya, hasil akhir dari drive cycle akan dipetakan ke beberapa permintaan daya $L(t)$ yang akan digunakan oleh proses manajemen daya untuk menghasilkan keputusan optimasi. Rumusan masalahnya adalah sebagai berikut: diberikan $L(t)$, kita harus mencari alokasi daya individual antara kedua mesin, seperti yang dibahas secara lebih rinci di bawah ini. Dalam contoh, kita memiliki dua mesin, tujuannya adalah untuk memilih torsi dan kecepatan mesin, dan juga rasio roda gigi sebagai fungsi waktu, sedemikian rupa sehingga "biaya" C (yang dapat setara dengan biaya bahan bakar, tetapi tidak harus demikian) diminimalkan.

Selama permintaan daya total terpenuhi, kita memiliki kebebasan untuk memilih kombinasi torsi dan kecepatan mesin individual apa pun bersama dengan rasio roda gigi yang sesuai. Dalam memenuhi permintaan daya, kita mungkin menghadapi berbagai kendala dalam hal kuantitas tertentu yang kurang dari atau sama dengan beberapa ambang batas. Jadi sangat mungkin bahwa dalam berpindah dari A ke B, kita memiliki beberapa profil unik (kecepatan torsi) untuk masing-masing mesin yang memberikan C minimum. Mari kita sebut C minimum ini sama dengan C_{AB} demi kekhususan, dengan subskrip AB menunjukkan jalurnya. Kemudian mari kita pisahkan bentang AB menjadi AC dan CB . Jika kita hanya fokus pada AC dan membuat urutan profil mesin (kecepatan torsi) untuk menjaga agar biaya C_{AC} tetap minimum, maka lakukan hal yang sama untuk segmen CB . Lalu pertanyaannya adalah apakah atau tidak

Persamaan 17.30

$$C_{AC|min} + C_{CB|min} = C_{AB|min}$$

Jawabannya adalah: belum tentu secara umum.

Pada Gambar 17.5, garis putus-putus berlabel (1) menunjukkan jalur $C_{AB|min}$, dengan asumsi seluruh jalur diketahui sebelumnya; garis putus-putus berlabel (2) menunjukkan jalur $C_{AC|min}$ tanpa mengetahui apa pun setelah AC; dan demikian pula garis putus-putus berlabel (3) menunjukkan $C_{CB|min}$ dalam segmen CB tanpa mengetahui apa pun sebelum CB. Sebelum kita memperkenalkan terminologi matematika tambahan, alasan mengapa pengetahuan preemptive dari seluruh jalur dapat menyebabkan hasil yang berbeda ketika meminimalkan, dibandingkan dengan minimisasi tersegmentasi, dapat dipahami melalui contoh numerik sederhana, yang sangat hipotetis tetapi memberikan ilustrasi yang sesuai. Pertimbangkan bahwa pada Gambar 17.5 kita memiliki dua mesin berbeda yang berjalan dengan dua bahan bakar yang berbeda. Mari kita perhatikan gambar-gambar berikut.

Asumsikan bahwa jalur AC membutuhkan 40 galon (151 l) bahan bakar terlepas dari mesin mana, 1 atau 2, yang digunakan. Juga asumsikan bahwa jalur CB membutuhkan 80 galon (303 l) bahan bakar terlepas dari mesin mana yang digunakan. Selain itu, asumsikan bahwa kita memiliki 42 galon (159 l) bahan bakar di mesin 1 dan 80 galon di mesin 2 untuk memulai. Mari kita juga mengasumsikan beberapa numerik nilai untuk biaya bahan bakar seperti yang ditunjukkan di bawah ini. Nilai numerik ini akan memberikan gambaran sederhana dari ilustrasi untuk kemudahan memahami ide.

Katakanlah C_{AC1} adalah biaya bahan bakar di atas segmen AC untuk mesin 1 = 2/gal untuk mesin 1 dan, seperti yang ditunjukkan di atas, kita memiliki 42 galon bahan bakar untuk mesin 1. Demikian pula, katakanlah C_{AC2} adalah biaya bahan bakar di atas segmen AC untuk mesin 2 = 5/gal untuk mesin 2 dan kita memiliki 80 galon bahan bakar untuk mesin 2. Nilai yang berbeda untuk bahan bakar ini dapat disebabkan oleh jenis mesin dan alasan lainnya, yaitu pada prinsipnya nilainya dapat berbeda.

Asumsikan bahwa untuk segmen kedua CB, untuk alasan apa pun, hipotetis mesin memerlukan beberapa aditif khusus atau apa pun untuk membuatnya bekerja, mungkin karena beberapa kondisi kemiringan dll, dan bahwa biaya bahan bakar meningkat sebagai berikut: $C_{CB1} = 5$ ribu/gal untuk mesin 1 dan $C_{CB2} = 20$ ribu/galon untuk mesin 2. (Angka-angka ini dipilih untuk kemudahan menunjukkan perbedaan dengan jelas.) Katakanlah kita tidak tahu apa-apa tentang segmen CB dan kita diminta untuk menemukan biaya minimum di atas AC. Jelas kita akan (atau, lebih tepatnya, akan tergoda untuk) menggunakan hanya mesin 1, karena biaya bahan bakar mesin 1 lebih murah daripada AC, dan menggunakan 40 galon dengan biaya:

$$\text{IDR}2 \times 40 = \text{IDR}80$$

Nah, setelah kita menyelesaikan perjalanan melalui AC, anggap saja kita disuruh pergi ke segmen lain, CB. Mesin 1 kita sudah menggunakan 40 galon dan hanya tersisa 2 galon, jadi kita tidak punya pilihan, dan biaya kita untuk segmen CB adalah:

$$5 \times 2 = 10$$

karena kita hanya memiliki 2 galon bahan bakar untuk mesin 1, dan dari mesin 2 kita memiliki:

$$20 \times 78 = 1560$$

Oleh karena itu total biaya untuk melintasi jarak AC + CB, atau AB, adalah:

$$80 + 10 + 1560 = 1650$$

Sekarang, pertimbangkan bahwa kita diberitahu sebelumnya bahwa kita harus melintasi seluruh jalur AB dan bahwa harga bahan bakar akan bervariasi antara AC dan CB untuk alasan khusus seperti yang ditunjukkan sebelumnya. Kemudian kita dapat memutuskan sebagai berikut:

Untuk AC, kita menggunakan mesin 2 sepenuhnya, dan biayanya adalah:

$$5 \times 40 = 200$$

Perhatikan di sini bahwa meskipun menggunakan mesin 1 lebih murah, kita memutuskan untuk menahan penggunaannya. Jadi, mesin 2 akan tersisa 40 galon di ujung AC. Selama segmen CB kita dapat menggunakan mesin 1 sepenuhnya dengan biaya $5 \times 42 = 210$. Untuk sisa 38 galon kita menggunakan mesin 2 dengan biaya :

$$20 \times 38 = 760.$$

Oleh karena itu total biaya jalur AC + CB atau AB sekarang menjadi:

$$200 + 210 + 760 = 1170.$$

Contoh numerik artifisial ini mengilustrasikan poin bahwa pengetahuan ke depan dari jalur, yaitu pengetahuan tentang beban dan berbagai item biaya di depan selama keseluruhan jalur, memungkinkan kita untuk membuat keputusan dengan cara yang lebih bijaksana sehingga minimum absolut tidak harus sama dengan minimum individu atas segmen yang berbeda ditambahkan bersama-sama. Jika kita mengetahui beban $L(t)$ di seluruh jalur untuk periode waktu t , bersama dengan nilai biaya yang berbeda dari entitas yang berbeda seperti mesin, maka dengan sistem yang hanya melibatkan dua entitas (mesin dalam kasus), ini dapat menjadi dituliskan secara matematis sebagai berikut. Min J = minimum fungsi biaya terintegrasi atas segmen individu t_1 dan t_2 akan menjadi:

$$\underbrace{\int_0^{t_1} \{C_1(p_1(t)) + C_2(L(t) - p_1(t))\} dt}_{\min} + \underbrace{\int_{t_1}^2 \{C_1(p_1(t)) + C_2(L(t) - p_1(t))\} dt}_{\min}$$

yang belum tentu sama dengan

Persamaan 17.31

$$\underbrace{\int_0^t \{C_1(p_1(t)) + C_2(L(t) - p_1(t))\} dt}_{min}$$

di mana $t_1 + t_2 = t$, $p_1(t)$ adalah alokasi daya untuk mesin 1 sebagai fungsi waktu t , dan minimalisasi dilakukan dengan batasan tertentu. Kendala, dalam kasus entitas seperti mesin, dapat dalam bentuk ekspresi yang menunjukkan bahwa torsi dan/atau kecepatan mesin tidak dapat melebihi ambang batas yang diberikan. Jika item tertentu yang terkait dengan kendala melibatkan sumber seperti baterai atau generator, maka ambang batas tersebut dapat berupa arus lebih, tegangan lebih, SOC, dan sebagainya. Untuk persamaan di atas, $C_1(p_1(t))$ adalah fungsi biaya yang sesuai dengan entitas 1 (yang dapat berupa mesin atau apa pun) dan serupa untuk entitas 2. Dalam hal ini diasumsikan bahwa fungsi biaya C_1 untuk entitas 1 bergantung pada berapa banyak unit $p_1(t)$ dari beberapa item (yang dapat berupa energi atau daya, atau atribut lainnya juga) yang disampaikan oleh entitas ini 1.

Sekali lagi penting untuk ditekankan bahwa, meskipun kita memberikan contoh numerik menggunakan angka untuk mengilustrasikan poin, istilah "biaya" dapat menyiratkan apa saja dalam arti penalti karena pelanggaran beberapa kendala seperti arus lebih dan sebagainya, dan karenanya biaya tidak harus ditafsirkan sebagai sesuatu hanya dalam arti ekonomi bahan bakar dan sejenisnya. Proses minimalisasi fungsi biaya biasanya akan menghukum fungsi biaya jika kendala dilanggar dalam beberapa cara. Misalnya, dalam kasus mesin, melebihi torsi di atas peringkatnya 100% ke nilai 110% dapat diberikan beberapa peningkatan numerik dalam biaya melalui beberapa nilai penalti, dan jika itu antara 110 dan 120%, penalti nilainya mungkin jauh lebih tinggi. Demikian pula untuk SOC baterai, jika diisi daya berlebih, hukumannya mungkin sedikit lebih tinggi dibandingkan jika baterai kekurangan daya; ini karena kerusakan yang terjadi pada baterai selama pengisian daya yang berlebihan.

Poin di atas juga dapat dijelaskan dengan memperkenalkan istilah "biaya tambahan" yang merupakan biaya tambahan dari fungsi biaya C untuk memproduksi satu unit daya tambahan (dalam kasus), di mana C bergantung pada daya operasi berbagai entitas (ICE, motor, dll.) terlibat dalam memproduksinya. Selain itu, C bergantung pada berbagai item atau parameter lain yang dapat berupa rasio roda gigi, posisi throttle, atau lainnya. Oleh karena itu, biaya tambahan akhir akan tergantung pada daya operasi dan parameter. Ini dapat dinyatakan secara matematis sebagai berikut, di mana i adalah indeks yang menunjukkan berbagai variabel yang dapat dikontrol sesuai dengan sumber daya yang berbeda:

Persamaan 17.32

$$\begin{aligned} \text{Total biaya incremental} &= \Delta C \\ &= \sum_{i=1,n} \left[\frac{\partial C}{\partial (\text{parameter } i)} \right] x [\text{nilai erubahan pada parameter } i] \end{aligned}$$

Untuk meminimalkan ΔC pada saat tertentu, perlu untuk memilih set parameter terbaik dalam persamaan di atas untuk mencapai ini. Daya operasi itu sendiri dapat dianggap sebagai parameter, dan karenanya biaya tambahan ΔC akan tergantung, dalam contoh, pada alokasi daya ke berbagai mesin atau perangkat yang mengirimkannya.

Secara umum, biaya tambahan akan berubah seiring waktu, tergantung pada berbagai faktor, termasuk, tetapi tidak terbatas pada, kemungkinan kehabisan bahan bakar, SOC baterai terlalu rendah, dan sebagainya. Jika biaya tambahan tetap konstan untuk setiap sumber daya yang terlibat, terlepas dari kondisi operasi, dan terlepas dari zona operasi mana mereka berada, dan jika kuantitas sumber daya tidak terbatas, maka jawaban atas pertanyaan yang diajukan sebelumnya (yaitu apakah minimalisasi fungsi biaya C atas segmen individu mengarah ke hasil yang sama seperti minimalisasi atas jumlah total semua segmen) akan afirmatif. Dengan kata lain, jika kita mengetahui jalur lengkap AB sebelumnya, kita dapat memutuskan dengan tepat seperti apa pembangkit listrik individu (atau yang lainnya) sepanjang perjalanan, untuk membuat total C minimum di akhir perjalanan. Ini dapat dianggap sebagai upaya minimalisasi preemptive. Diskusi memberi tahu kita bahwa mengetahui seluruh jalan di depan sebelumnya memungkinkan kita memilih kombinasi sumber daya terbaik untuk membuat C minimum di akhir perjalanan.

Dalam sistem yang kompleks, dengan banyak sumber daya dan kendala, masalah minimalisasi fungsi kompleks di atas bisa sangat melelahkan. Metode numerik dan matematika seperti *dynamic programming* (DP) dapat membantu dalam situasi seperti itu (detail berlimpah dalam literatur). Perlu dicatat bahwa DP tergantung pada mengetahui sebelumnya “biaya” penyeberangan dari bagian ke bagian saat melintasi jalur dari asal ke tujuan. Ada metode rekursif (misalnya metode induksi mundur dan maju) yang dapat digunakan untuk menemukan “biaya” yang paling optimal, yang tergantung pada kondisi optimalitas yang dikembangkan oleh Bellman.

Namun, dalam sistem nyata, seringkali sulit untuk mengetahui jalur (dan biaya setiap bagian dalam perjalanan) ke depan. Oleh karena itu orang harus menggunakan cara meminimalkan biaya berdasarkan apa yang diketahui sekarang, yaitu, meminimalkan seketika secara real time. Dalam skenario waktu nyata, ini bisa berarti bergerak maju secara bertahap dalam segmen-segmen kecil. Khususnya, untuk persamaan yang terkait dengan ΔC di atas, seiring berjalannya waktu, kita akan melihat parameter tertentu i , bila disesuaikan, membantu meminimalkan ΔC dari fungsi biaya. Secara intuitif, algoritme mungkin hanya mengambil satu parameter pada satu waktu dan meminimalkannya sebanyak mungkin, lalu mengambil yang berikutnya, dan seterusnya, lalu kembali dan mengulangi proses sampai tidak ada manfaat lebih lanjut. Tetapi tidak ada jaminan bahwa proses ini akan menghasilkan yang terbaik atau minimum absolut untuk fungsi biaya, juga tidak akan memastikan bahwa metode ini akan membantu mencapai minimum absolut untuk jalur lengkap, jika kita telah mengetahui jalur di depan sebelumnya. Beberapa metode juga cenderung memprediksi jalan ke depan untuk menghasilkan sesuatu yang diharapkan lebih baik daripada tidak mengetahui sama sekali tentang jalan di depan. Selain itu, ada metode seperti jaringan saraf tiruan dan algoritma fuzzy yang telah digunakan untuk menghasilkan solusi yang lebih optimal untuk masalah minimisasi fungsi biaya.

Ada beberapa detail praktis yang dapat kita nyatakan, terkait dengan paragraf sebelumnya: Dalam skenario waktu nyata, kita dapat membuat tabel yang dapat disimpan dalam memori mikroprosesor, berdasarkan informasi sumber daya yang berbeda sebagai fungsi dari titik operasi, yang dapat berupa peta torsi-kecepatan dan efisiensi-kecepatan pada posisi throttle yang berbeda, atau informasi tentang tegangan generator sebagai fungsi dari kecepatan dan arus yang ditarik, atau tegangan baterai vs arus pada SOC yang berbeda. Pada titik operasi yang berbeda, data dapat diekstraksi dari memori pada titik terdekat untuk menghitung $\partial C / \partial (\text{parameter } i) \times [\text{perubahan parameter } i]$, dan dengan demikian menemukan ΔC , biaya tambahan C pada titik operasi. Dengan demikian, kita dapat menemukan sumber daya mana yang memiliki kenaikan biaya minimum dan memilih salah satu untuk mengirimkan

unit daya atau energi berikutnya. Jika satu sumber daya tertentu tidak dapat menyediakan semuanya, maka sumber daya terbaik berikutnya tambahan harus dibawa.

Karena biaya tambahan berubah seiring waktu, daftar prioritas yang menunjukkan sumber daya mana yang harus memberikan berapa banyak daya pada saat tertentu juga akan berubah. Seperti yang telah dibahas sebelumnya, jika kebutuhan beban sistem di masa depan dapat diprediksi sebelumnya, maka kita dapat mengambil keputusan secara berbeda. Jadi, bahkan jika biaya satu sumber daya dalam hal biaya langsungnya lebih tinggi daripada yang lain pada saat tertentu, sumber daya yang lebih mahal masih dapat digunakan untuk mengirimkan beban, terlepas dari kenyataan bahwa itu bukan pilihan terbaik pada saat itu. Dalam hal ini, keputusan yang tampaknya lebih mahal ini diambil untuk mengantisipasi bahwa pengurangan biaya karena "tidak ada keterlibatan" dari perangkat biaya "saat ini lebih tinggi" ini pada titik operasi masa depan akan lebih dari mengimbangi kerugian yang dihadapi sekarang.

Dari uraian di atas dapat dilihat bahwa untuk mendapatkan solusi numerik yang optimal untuk masalah minimasi fungsi biaya, diperlukan manipulasi dan komputasi matematis. Biasanya ini membutuhkan penggabungan prosesor dengan jumlah daya komputasi yang signifikan, terutama jika perhitungan harus dilakukan secara real time. Dengan metode jaringan saraf tiruan, dimungkinkan untuk melatih sistem melalui berbagai skenario drive dan kemudian menggunakan jaringan terlatih untuk menghasilkan solusi waktu nyata berdasarkan berbagai input dari sinyal sensor yang berbeda. Ini mungkin bukan solusi terbaik dalam arti matematis yang ketat, tetapi secara praktis bisa sangat bagus dengan manfaat yang signifikan. Dengan melatih jaringan saraf dengan benar, kita dapat memperoleh matriks sederhana dari bilangan konstan, yang biasanya digunakan untuk mengalikan variabel yang berbeda, sehingga permintaan komputasi tidak terlalu tinggi setelah jaringan dilatih. Penalaran serupa juga berlaku untuk algoritma fuzzy.

Pembahasan di atas pada akhirnya berkaitan dengan blok manajemen daya yang ditunjukkan pada Gambar 17.4, di mana tujuannya adalah untuk memberikan beban yang diinginkan di bawah kendala yang berbeda sambil meminimalkan beberapa biaya, yang dapat menjadi biaya nyata dalam arti ekonomi bahan bakar, atau faktor penalti yang sesuai melanggar beberapa SOC atau ambang batas saat ini, yang diminimalkan.

17.5 MANFAAT MANAJEMEN ENERGI

Berdasarkan diskusi sebelumnya, mudah dipahami bahwa manajemen energi memiliki banyak tujuan. Ini jelas melibatkan distribusi energi (menyiratkan daya sesaat juga) tergantung pada permintaan beban. Ini juga menyiratkan perlindungan sistem jika beberapa ambang terlampaui, misalnya, tegangan, arus, atau SOC. Selanjutnya, sejak sumber daya tidak terbatas, itu melibatkan alokasi sumber daya terbaik, dengan tujuan meminimalkan konsumsi bahan bakar sambil mengamati berbagai kendala. Dengan demikian, manajemen energi yang baik menghasilkan penghematan bahan bakar yang lebih baik dan/atau emisi yang lebih rendah, dan juga meningkatkan masa pakai perangkat. Misalnya, dengan mengontrol SOC dengan benar, dimungkinkan untuk menjaga kesehatan baterai dengan lebih baik, sehingga membutuhkan penggantian yang lebih sedikit. Lebih tepatnya, manajemen daya memiliki tujuan untuk mengambil pandangan holistik dari sistem, tidak hanya dari sudut pandang ekonomi bahan bakar; atau lebih tepatnya, ini adalah untuk mencapai biaya siklus hidup minimum sistem, dari sudut pandang operasi, pemeliharaan, dan umur panjang, semuanya diambil bersama-sama.

Perhatikan juga bahwa manajemen daya dan energi adalah situasi pasca-desain. Ini adalah strategi tingkat operasional setelah sistem dibangun dan digunakan. Sedangkan optimasi desain dan ukuran komponen dilakukan sebelum kendaraan dibuat, seperti yang dibahas pada Bab 14 dan 15. Mengetahui sebelumnya strategi dan algoritma manajemen daya seperti apa yang akan digunakan dapat membantu seseorang membuat pilihan perangkat yang lebih baik dalam hal ukuran mesin, baterai, dan sebagainya, selama fase desain, sehingga kinerja yang sama dapat dicapai dengan menggunakan peralatan yang lebih kecil dan memanfaatkannya sebaik atau seoptimal mungkin. Perhatikan juga bahwa manajemen daya dan energi adalah situasi pasca-desain. Ini adalah strategi tingkat operasional setelah sistem dibangun dan digunakan. Sedangkan optimasi desain dan ukuran komponen dilakukan sebelum kendaraan dibuat, seperti yang dibahas pada Bab 14 dan 15. Mengetahui sebelumnya kekuatan seperti apa strategi dan algoritma manajemen yang akan digunakan dapat membantu seseorang membuat pilihan perangkat yang lebih baik dalam hal ukuran mesin, baterai, dan sebagainya, selama fase desain, sehingga kinerja yang sama dapat dicapai dengan menggunakan peralatan yang lebih kecil dan memanfaatkannya dengan sebaik-baiknya atau secara optimal.

BAB 18

KOMERSIAL, STANDARDISASI TEKNOLOGI HEV DAN TRANSPORTASI MASA DEPAN

18.1 APA ITU KOMERSIALISASI DAN MENGAPA PENTING UNTUK HEV?

Komersialisasi biasanya berarti bahwa suatu produk diproduksi dalam jumlah volume dan teknologinya telah dikembangkan hingga tingkat kematangan yang wajar sehingga produksi skala besar yang sistematis dapat bertahan dan berkelanjutan. Salah satu alasan penting di balik komersialisasi adalah memungkinkan produksi massal, sehingga harganya bisa turun, dan lebih banyak orang yang mampu membeli produk tersebut. Tanpa komersialisasi, sebuah teknologi mungkin bagus namun tetap tidak digunakan. Sehubungan dengan HEV, situasinya tidak berbeda. Ini melibatkan berbagai teknologi dan dengan komersialisasi HEV, semua teknologi ini akan mendapat manfaat.

Keuntungan, Kerugian, dan Pemicu Komersialisasi

Ada beberapa manfaat komersialisasi. Seperti disebutkan di atas, ini memungkinkan produksi massal produk di mana seluruh proses manufaktur dapat disederhanakan. Hal ini menyebabkan penurunan harga, dan lebih banyak orang kemudian dapat membeli produk tersebut. Karena semakin banyak orang yang menggunakannya, harganya bisa turun lebih jauh – tetapi tentu saja, hanya sampai titik tertentu. Dalam HEV, berbagai teknologi terlibat, seperti teknologi motor listrik, elektronika daya, teknologi sistem kontrol, teknologi mikrokomputer, kabel daya tinggi, dan electromagnetic interference (EMI), untuk menyebutkan beberapa, yang harus ditangani. Oleh karena itu untuk mengkomersialkan HEV, untuk produksi massal, semua bahan penyusun dan teknologi yang sesuai harus matang juga. Setelah produk dikomersialkan, insentif tambahan muncul bagi produsen dan perancang untuk meningkatkan berbagai teknologi lebih lanjut dan berinvestasi sesuai dengan itu. Sambil mendiskusikan manfaat, juga instruktif untuk melihat apakah ada kerugian komersialisasi. Sebenarnya, ada.

Ketika sesuatu dikomersialkan, ada potensi bahwa pengembang individu dari suatu teknologi akan mencoba menyimpannya sebagai barang milik sendiri dan tidak membagikannya. Dengan demikian, pihak luar mungkin tidak memiliki kesempatan untuk memberikan input berharga apa pun terhadap teknologi yang dapat bermanfaat. Situasi ini sebanding dengan perangkat lunak komersial versus perangkat lunak sumber terbuka. Terakhir, setiap orang dapat memberikan input dan dengan demikian memperkaya perangkat lunak, meskipun secara finansial tidak menguntungkan bagi perusahaan atau entitas tertentu. Hal yang sama berlaku untuk teknologi terkait HEV.

Dengan demikian komersialisasi dapat menghilangkan komunitas teknis dan masyarakat dari pengayaan lebih lanjut sebuah teknologi, beberapa di antaranya bahkan mungkin tidak bisa dibayangkan sampai seseorang mengusulkannya. Kerugian lain dari komersialisasi adalah fakta bahwa produsen tertentu dapat membuat hal-hal sedemikian rupa sehingga pemeliharaan sangat sulit tanpa suku cadang OEM berpemilik, dan tidak ada penggantian generik yang dapat digunakan. Sementara komersialisasi dapat menyebabkan jatuhnya harga komoditas, itu juga dapat menyebabkan monopoli oleh produsen, terutama jika teknologinya dimiliki dan tidak dibagikan, yang mengarah ke harga yang lebih tinggi. Masalah lain yang terkait dengan komersialisasi, terutama dalam kasus HEV, adalah banyak industri dan bisnis kecil tidak dapat berpartisipasi dalam keseluruhan proses kecuali sebagai

pemasok. Meskipun terkadang bisnis kecil dapat berpartisipasi sebagai pemasok, bisnis besar biasanya tidak dapat menggunakan terlalu banyak pemasok yang relatif lebih kecil untuk mendapatkan produk yang sama. Kerugian lain dari komersialisasi adalah bahkan jika teknologi baru yang sangat menjanjikan tiba-tiba tersedia, mungkin sangat sulit untuk memasukkannya ke dalam produk yang sudah ada; ini karena perubahan mahal yang diperlukan dalam basis manufaktur komponen yang ada dan OEM mungkin sangat enggan mengambil risiko mencoba teknologi baru. Jadi kita melihat bahwa ada keuntungan dan kerugian dari komersialisasi, dan kita perlu memperhitungkannya.

Beberapa faktor pendorong komersialisasi dapat berupa investasi untuk pengembangan teknologi. Selain itu, kemitraan antara berbagai industri dapat mengarah pada pengembangan teknologi yang lebih baik dengan biaya yang lebih rendah. Salah satu contoh kerjasama tersebut adalah antara GM, BMW, dan (sebelumnya) Daimler-Chrysler, yang membentuk konsorsium untuk mengembangkan teknologi HEV dan meningkatkannya. Setelah pekerjaan selesai, kemitraan tidak perlu ada lagi, dan mitra melanjutkan dengan produk mereka sendiri. Dalam kasus HEV, dapat dikatakan bahwa Departemen Energi memainkan peran utama dalam mendanai berbagai proyek bersama dengan industri. Ini telah membuka jalan menuju tujuan yang sangat terpuji untuk mengembangkan produk HEV yang layak.

Salah satu item penting dalam proses komersialisasi HEV dan EV berkaitan dengan insentif dan undang-undang pemerintah. Ini berlaku secara global dan harus dikoordinasikan dengan berbagai negara yang terlibat dalam produksi dan penggunaan kendaraan tersebut. Proaktifitas tingkat pemerintah di berbagai negara dapat menyebabkan lebih banyak minat di antara orang-orang untuk memiliki kendaraan tersebut, yang kemudian dapat mempengaruhi volume produksi, sehingga mengarah pada komersialisasi yang lebih baik dengan harga yang terjangkau. Salah satu contohnya adalah penurunan harga baterai lithium ion dalam beberapa tahun terakhir karena penyebaran besar EV di Cina. Harga baterai lithium ion mendekati 1 juta/kWh pada tahun 2011 dan berada di bawah 300 ribu/kWh pada tahun 2017.

18.2 STANDARDISASI DAN KOMERSIALISASI

Komersialisasi HEV jelas membutuhkan kerja sama antara berbagai produsen, karena ada banyak teknologi yang terlibat. Teknologi ini – baterai, elektronika daya, motor, mekanisme pengisian baterai untuk kendaraan hybrid plug-in semuanya harus memenuhi standar tertentu. Standar-standar ini dapat menyangkut keselamatan, tetapi juga kebutuhan untuk menyesuaikan dengan beberapa kesamaan antara apa yang dapat diberikan oleh satu teknologi, dan apa yang dapat diterima oleh yang lain. Terlepas dari produsennya, sangat mungkin bahwa elektronika daya dibeli dari hanya segelintir pemasok, jadi desain terkait baterai dan motor harus sesuai dengan dasar dari apa yang tersedia dari elektronika daya, karena satu teknologi memberi makan yang lain. Lalu ada masalah EMI, yang memiliki berbagai standar.

Sangat penting untuk mematuhi standar ini untuk memastikan tidak ada masalah dengan sistem mikrokontroler karena EMI, dan tidak mengganggu apa pun di kendaraan terdekat. Sehubungan dengan infrastruktur kendaraan plug-in, meskipun ada stasiun pengisian baterai di negara-negara tertentu, stasiun tersebut masih belum melimpah seperti stasiun gas biasa (yaitu pengisian bahan bakar bensin atau solar). Sangat penting bahwa antarmuka pengisian daya antara kendaraan dari merek yang berbeda dan stasiun pengisian mengikuti rekomendasi standar. Masalah standarisasi lainnya berkaitan dengan perawatan kendaraan. Sama seperti rekan-rekan ICE mereka, HEV akan membutuhkan peralatan

pengujian yang sesuai, yang tidak perlu harus dibeli dari produsen kendaraan. Secara umum, kemungkinan instrumen diagnostik dari produsen HEV akan lebih mahal daripada yang generik.

Oleh karena itu beberapa standardisasi, seperti OBD II, akan diperlukan. Dari sudut pandang pelanggan, mungkin standarisasi yang sempurna adalah di mana komponen untuk kendaraan, termasuk motor, baterai, dan elektronika daya, dapat digantikan oleh rekan-rekan generik yang tersedia di pasar. Untuk mewujudkannya, komponen generik harus mematuhi beberapa keselamatan minimum dan standar lainnya. Selain itu, harus ada semacam standar pengemasan (analog, misalnya, untuk motherboard komputer dengan berbagai jejak kaki saat dipasang ke casing komputer) yaitu, dalam hal bagaimana berbagai item dipasang ke dalam kendaraan. Ini berarti bahwa jika kotak elektronik daya dari sumber generik akan dipasang di kendaraan, ini hanya dapat terwujud jika OEM dan produsen generik mengikuti beberapa standar dalam hal jejak kemasan. Semua masalah di atas juga berpotensi menyebabkan kesulitan dalam hal garansi. Pabrikan mungkin mengatakan bahwa jika bagian tertentu diganti di dalam kendaraan menggunakan komponen generik, maka garansi akan batal. Semua hal di atas adalah kekhawatiran yang sah, dan memerlukan partisipasi dari produsen, konsumen, berbagai masyarakat profesional, organisasi seperti ISO, IEEE, SAE, dan pemerintah, untuk mencapai standardisasi yang sukses.

18.3 MASALAH DAN DAMPAK KOMERSIALISASI PADA BERBAGAI JENIS KENDARAAN

Komersialisasi mungkin tidak memiliki efek yang sama pada semua jenis kendaraan. Artinya, efeknya mungkin berbeda untuk kendaraan penumpang kecil biasa dibandingkan dengan truk berat, kendaraan militer, truk pengiriman, truk sampah/sampah, kendaraan utilitas, kendaraan dan peralatan konstruksi, lokomotif, kapal, dan sebagainya. Komersialisasi pada akhirnya berkaitan dengan keuntungan dan uang. Jadi itu tergantung pada biaya per unit dan volume yang diproduksi. Dampak komersialisasi dan implementasinya perlu mempertimbangkan semua hal di atas.

Tampaknya efek komersialisasi saat ini lebih penting untuk kendaraan yang lebih kecil, karena jumlah penduduk yang lebih besar terpengaruh dalam hal itu, dalam hal biaya kendaraan per unit. Kendaraan yang lebih berat, terutama yang memiliki volume produksi lebih sedikit, terkadang dapat dikembangkan berdasarkan kebutuhan (atau disesuaikan) dan menggunakan desain yang sangat khusus yang dikembangkan oleh beberapa industri khusus. Beberapa industri ini mungkin memerlukan proses manufaktur yang fleksibel untuk memenuhi produksi volume rendah yang dapat dengan cepat diadaptasi untuk menghasilkan barang dengan spesifikasi yang berbeda. Kendaraan militer khususnya mungkin kurang terpengaruh oleh komersialisasi dalam arti bahwa militer mampu memilih beberapa pemasok untuk hal yang sama. Namun, mereka juga bisa mendapatkan keuntungan dari komersialisasi, karena selalu lebih hemat biaya untuk menggunakan item *commercial-off-the-shelf* (COTS) untuk membantu memudahkan perawatan dan memberikan manfaat siklus hidup secara keseluruhan. Lokomotif, kapal, dan kendaraan sejenis, yang merupakan barang yang sangat mahal dan diproduksi dalam volume yang relatif rendah, dan terkadang dipesan dan dibuat sesuai kebutuhan, dapat memperoleh manfaat dari komersialisasi berbagai komponen penyusun yang digunakan untuk membuat kendaraan, daripada komersialisasi produk jadi, yang tidak terjadi dalam arti sebenarnya untuk barang berbiaya tinggi dan bervolume rendah.

18.4 KOMERSIALISASI HEV UNTUK TRUK DAN APLIKASI OFF-ROAD

Seperti yang ditunjukkan sebelumnya, HEV dan EV untuk truk dan off-road lainnya, dan aplikasi militer melibatkan volume yang relatif lebih kecil. Namun, aplikasi ini dapat menghemat bahan bakar dalam jumlah yang cukup besar jika teknologi HEV dan EV disertakan untuk tujuan tersebut. Menurut Laporan Kendaraan Komersial Hibrida, produsen truk besar dan pengembang sistem adalah peserta dalam penggunaan teknologi tersebut. DOE juga mendukung berbagai upaya terkait hal ini. Laporan di atas menunjukkan bahwa industri truk hibrida dimulai dengan hanya 200 kendaraan pada tahun 2006 dan diperkirakan akan tumbuh menjadi sekitar 5.000 pada tahun 2010. Hal ini tampaknya cukup realistis.

Menurut laporan Pike Research, pasar dunia untuk truk dan bus HEV medium dan heavy-duty akan tumbuh dari sekitar 9000 kendaraan yang terjual pada tahun 2010 menjadi lebih dari 100.000 kendaraan pada tahun 2015. Terlepas dari angka spesifik ini, tampaknya minat keseluruhan antara berbagai industri truk cukup positif. Itu dapat mengarah pada komersialisasi berbagai sistem, subsistem, dan komponen penyusunnya. Dalam hal motor dan elektronika daya, jika komponen yang diperlukan untuk truk dapat diproduksi oleh pemasok yang sama yang telah melayani industri otomotif biasa, mungkin risikonya dapat dikurangi, sehingga mengarah ke jalur yang lebih cepat dan mudah menuju komersialisasi di industri truk.

Selain truk, berbagai kendaraan off-road dan peralatan konstruksi yang menggunakan teknologi HEV, mungkin lebih baik dikomersialkan jika dikoordinasikan dengan pengembang sistem untuk industri otomotif reguler. Cukup banyak produsen kendaraan konstruksi dan off-road yang benar-benar menggunakan peralatan tersebut, mis. di kendaraan pertambangan dan ekskavator. Meskipun yang terakhir (ekskavator) tidak termasuk dalam kategori kendaraan yang layak, teknologi yang digunakan mirip dengan HEV. Kendaraan militer juga termasuk dalam kategori serupa. Namun, masalah ruggedization unik untuk militer dan harus ditangani, baik untuk adopsi teknologi dan juga komersialisasi. Tidak seperti aplikasi komersial biasa, aplikasi militer melibatkan kondisi operasional yang sangat sulit dan sering kali melibatkan masalah hidup dan mati. Oleh karena itu, komponen dan sistem yang sangat andal harus digunakan. Juga, masalah aplikasi volume rendah dapat menjadi penghalang komersialisasi sistem tersebut. Namun seperti yang telah dibahas sebelumnya, pemanfaatan teknologi HEV dan EV dapat menghasilkan penghematan bahan bakar yang signifikan pada kendaraan militer dan dapat memiliki konsekuensi besar dalam hal pengurangan biaya tidak langsung melalui biaya dukungan logistik yang lebih rendah.

18.5 KOMERSIALISASI DAN MASA DEPAN HEV DAN TRANSPORTASI

Jelas dari diskusi sebelumnya bahwa komersialisasi secara umum dapat menghasilkan nilai yang lebih baik bagi pelanggan yang menginginkan HEV. Dengan komersialisasi dan standardisasi, harga kemungkinan besar akan lebih murah, karena komersialisasi dapat menyebabkan persaingan yang lebih baik dan memberikan lebih banyak pilihan kepada pengguna. Hal yang sama berlaku untuk pemasok berbagai komponen. Jika komersialisasi barang vital tertentu seperti baterai menjadi lebih luas, itu akan menyebabkan penurunan biaya baterai. Seperti diketahui, biaya, ukuran, dan berat baterai kini menjadi tantangan nyata yang menghalangi popularitas HEV secara keseluruhan. Masalah biaya adalah satu item, tetapi ukuran dan beratnya juga akan tergantung pada teknologinya. Dengan adanya persaingan di industri, berbagai produsen mungkin berinvestasi dalam mengembangkan teknologi baru dan lebih baik yang pada dasarnya dapat menjadi faktor penentu dalam keberhasilan atau

kegagalan suatu barang yang pada akhirnya menyebabkan orang ingin memiliki HEV daripada kendaraan ICE biasa.

Saat ini masalah mendasar pada baterai, yang berkaitan dengan kimianya, tetap menjadi tantangan besar dan tidak dapat mengklaim telah sepenuhnya ditangani. Di masa depan, jika teknologi baterai benar-benar dapat ditingkatkan melalui beberapa lompatan kuantum, maka itu dapat mengarah pada tahap pengembangan kendaraan listrik murni (EV) berikutnya. Selain itu, penelitian serius saat ini sedang dilakukan pada sel bahan bakar. Teknologi sel bahan bakar ada dalam bentuk yang relatif matang untuk sel bahan bakar berdaya sangat tinggi, tetapi untuk aplikasi kendaraan portabel masih memiliki beberapa cara lagi. Jika bahan bakar yang digunakan dalam sel bahan bakar dapat secara langsung mengubah bahan bakar dengan kandungan energi spesifik tinggi menjadi hidrogen (daripada membawa hidrogen dalam silinder), maka ini akan membantu secara signifikan untuk meningkatkan jangkauan EV murni. Dalam HEV, memiliki ICE dan propulsi listrik mengarah ke kompleksitas manufaktur, kontrol, dan pemeliharaan. Dalam EV murni, ini dapat disederhanakan secara signifikan. Oleh karena itu, tujuan komersialisasi di masa depan harus memiliki tujuan untuk mencapai EV murni. Ini berlaku sama bahkan untuk peralatan konstruksi berdaya tinggi. Pada beberapa kendaraan ini, dimungkinkan untuk memiliki perangkat berdaya spesifik tinggi tipe ultrakapasitor untuk melengkapi sel bahan bakar.

Menggabungkan sel bahan bakar dan ultrakapasitor dapat menghasilkan jangkauan yang lebih panjang dan umur panjang keseluruhan item yang dapat dibuang, yaitu ultrakapasitor alih-alih baterai. Jadi tampaknya HEV merupakan langkah perantara antara ICE dan EV murni, dan akan sangat bergantung pada teknologi sel bahan bakar, ultrakapasitor, dan baterai. Teknologi lain seperti elektronika daya dan motor akan mendapat manfaat dari komersialisasi dalam hal pengurangan biaya karena mereka sudah merupakan perangkat yang sangat efisien. Tetapi manajemen termal masih tetap menjadi tantangan untuk elektronika daya, dan perangkat suhu tinggi berbasis silikon karbida, dan mungkin sesuatu yang lain di masa depan dapat menjadi faktor penting menuju transportasi EV di masa depan.

BAB 19

PERSPEKTIF HOLISTIK TENTANG ELEKTRIFIKASI KENDARAAN

19.1 ELEKTRIFIKASI KENDARAAN – APA YANG TERLIBAT?

Menjelang akhir buku ini, masuk akal untuk bertanya tentang keseluruhan tujuan pengembangan kendaraan hibrida dan kendaraan listrik, atau dalam arti yang lebih luas tentang elektrifikasi kendaraan. Kita perlu mengambil pandangan yang tidak bias dalam mempertimbangkan pertanyaan-pertanyaan ini dan bersikap realistis dan mengambil sikap ilmiah, daripada mengikuti tren tertentu, yang bisa bersifat jangka pendek. Kita juga harus melihat gambaran lengkap dalam hubungan ini. Ini melibatkan apakah kendaraan harus sepenuhnya dialiri listrik dalam hal propulsinya - mengarah ke EV murni - atau haruskah kendaraan dialiri listrik sebagian, mengarah ke HEV, atau HEV ringan, atau haruskah kita hanya menyetrum beberapa komponen terkait non-propulsi atau sistem di dalam kendaraan? Seperti yang terlihat jelas dari bab-bab sebelumnya dalam buku ini, masalah ini berkaitan dengan siklus penggerak dan aplikasi yang terlibat. Mereka juga berhubungan dengan berapa banyak kendaraan yang kita bicarakan dan apakah penghematan bahan bakar dan pengendalian polusi adalah masalah utama, atau adakah hal lain yang harus kita pertimbangkan? Selain itu, kita perlu melihat sudut pandang sistem global yang lengkap daripada hanya kendaraan: jika kita memecahkan satu masalah penghematan bahan bakar atau polusi, lalu apakah kita menciptakan beberapa masalah di tempat lain?

Intinya adalah pengembangan HEV, EV, dll. Tidak hanya melibatkan industri otomotif, tetapi juga industri lain yang terkait dengan elektronika daya, mesin listrik, dan baterai untuk beberapa nama, yang pada gilirannya terkait dengan industri lain yang terlibat dalam pengembangan item konstituen, seperti industri pertambangan, berbagai industri kimia dan sebagainya. Dari sudut pandang sosial-politik, itu dapat memiliki konsekuensi lain. Misalnya, dalam mengembangkan kendaraan berlistrik, apakah kita menciptakan peluang (misalnya lapangan kerja) di satu area dan kemudian menciptakan masalah di beberapa area lain? Ini bukan pertanyaan yang mudah untuk dijawab, tetapi kita harus menghadapinya cepat atau lambat. Jika sudut pandang yang sangat rabun diadopsi di atas, maka dalam jangka panjang mereka akan menyebabkan konsekuensi yang tidak terduga, dan dalam beberapa kasus tidak menyenangkan. Oleh karena itu bab ini akan mencoba membahas masalah ini sampai batas tertentu.

19.2 SEJAUH MANA KENDARAAN HARUS DIALIRI LISTRIK?

Bagian sebelumnya telah mengatur nada pada isu-isu yang berkaitan dengan elektrifikasi kendaraan. Sekarang mari kita lihat sejauh mana kendaraan harus dialiri listrik. Dalam kendaraan warisan, ada berbagai item, seperti ICE dan transmisi, yang berkaitan dengan propulsi. Namun untuk mendukung sistem tersebut terdapat item lain seperti berbagai pompa dan kipas, selain item yang tidak terhubung langsung dengan tenaga penggerak. Misalnya, AC adalah barang yang nyaman, tetapi penyertaannya menuntut daya dan karenanya memengaruhi permintaan daya dari mesin dan pada gilirannya memengaruhi sistem propulsi, meskipun secara tidak langsung. Juga, tergantung pada jenis kendaraan – penumpang biasa, truk berat, kendaraan militer, peralatan konstruksi, truk sampah, kendaraan segala medan, atau kendaraan utilitas industri – kita harus memutuskan apakah

harus dialiri listrik atau tidak, dan jika demikian untuk sejauh mana. Di sini kita juga perlu memikirkan volume pasar dan biaya yang terlibat dalam pembuatan dan juga biaya untuk pelanggan akhir.

Mari kita ambil kasus kendaraan penumpang komersial biasa – mobil biasa yang kitaendarai. Karena ini adalah barang bervolume tinggi dengan jumlah siklus mengemudi kota yang signifikan, ini tampaknya memiliki dampak yang lebih tinggi pada ekonomi bahan bakar secara keseluruhan, dan pengendalian pencemaran lingkungan. Jadi, untuk pertimbangan elektrifikasi penuh atau hibrida penuh, kendaraan ini tampaknya menjadi kandidat potensial yang paling penting, dan itulah arah yang diambil industri saat ini.

Berikutnya adalah truk-truk besar. Ini umumnya kendaraan diesel yang berjalan jarak jauh. Contoh elektrifikasi kendaraan tersebut adalah upaya DOE pada Super Truck. Menurut DOE (<http://energy.gov/eere/articles/supertruck-making-leaps-fuel-efficiency>) Truk Super ini dapat berjalan sekitar 10,7 mpg dibandingkan dengan rekan lama yang setara dengan sekitar 5,8 mpg. Ini bisa memberikan manfaat besar dalam hal penghematan bahan bakar dan pengurangan polusi. Perlu dicatat, bagaimanapun, bahwa Truk Super tidak hanya melibatkan hibridisasi propulsi, tetapi juga mengambil pandangan holistik dari banyak detail lain di dalam kendaraan dalam hal kipas pendingin, desain aerodinamis, penyesuaian kisi radiator berdasarkan kecepatan dan memungkinkan lebih baik pendinginan, ditambah banyak detail kecil lainnya. Secara bersama-sama ini membawa manfaat yang disebutkan sebelumnya. Jadi cukup aman untuk mengatakan bahwa hibridisasi truk semacam itu mungkin merupakan hal yang dapat dibenarkan untuk dilakukan. Namun, elektrifikasi penuh truk tersebut mungkin tidak dibenarkan atau bahkan layak, karena jarak tempuh yang sangat panjang yang diperlukan, dan juga karena jarak tempuh siklus hidup yang sangat tinggi yang terlibat dalam kendaraan tersebut. Memiliki sistem baterai dan infrastruktur pengisian daya untuk itu juga bisa menjadi tantangan.

Penggunaan elektrifikasi untuk kendaraan militer sedang dipertimbangkan secara serius di berbagai negara. Di sini sekali lagi, karena jenis siklus penggerak operasi, elektrifikasi penuh tampaknya tidak masuk akal. Namun, hibridisasi penuh, atau hibridisasi sebagian, dapat dibenarkan.

Di bidang kendaraan konstruksi beberapa elektrifikasi sudah dilakukan. Pada kendaraan pertambangan, elektrifikasi propulsi telah dilakukan seperti yang ditunjukkan pada bab-bab sebelumnya. Dalam aplikasi seperti itu, kendaraan pada dasarnya telah diubah dengan kereta tenaga listrik – ICE menghasilkan tenaga mekanik, yang kemudian diubah menjadi tenaga listrik dengan menggunakan generator listrik, yang pada gilirannya menggerakkan motor listrik untuk menjalankan roda. Tanpa sumber baterai, itu tidak dapat disebut kendaraan hibrida dalam arti yang ketat; melainkan itu adalah kendaraan listrik. Di bidang ekskavator Komatsu telah mendemonstrasikan hibridisasi sistem ekskavatornya, di mana gerakan utama digerakkan dengan menggunakan motor listrik. Penangkapan energi regeneratif dilakukan dengan menggunakan sistem ultrakapasitor. Kendaraan konstruksi seperti ekskavator memiliki jenis siklus aplikasi yang berbeda dan tidak dapat secara langsung dibandingkan atau diklasifikasikan di samping siklus penggerak kendaraan penumpang biasa. Namun, elektrifikasi tersebut telah terbukti telah meningkatkan penghematan bahan bakar secara signifikan, seperti yang disebutkan dalam bab-bab sebelumnya.

Karena daya tinggi yang terlibat dalam ekskavator dan kendaraan konstruksi lainnya, terkadang sistem hidraulik sebagian digunakan; dalam aplikasi ini elektrifikasi penuh atau metode hibrid penuh (tanpa hidraulik) mungkin sulit dilakukan dalam ukuran dan berat kemasan yang terbatas. Alasan serupa juga berlaku dalam kasus kendaraan pengumpul

sampah. Dalam kasus jenis aplikasi layanan kurir, seperti surat pos, siklus drive adalah siklus berulang pendek, di mana penangkapan energi regeneratif dapat menjadi penting, tetapi mungkin lebih bijaksana untuk menggunakan sistem hybrid parsial daripada hybrid penuh. Untuk kendaraan utilitas industri dengan aplikasi dalam ruangan, mungkin tidak ada banyak pilihan selain menggunakan kendaraan listrik sepenuhnya karena pertimbangan polusi. Namun, untuk aplikasi dalam ruangan, karena pengisian daya listrik lebih mudah diperoleh dibandingkan dengan aplikasi luar ruangan, masuk akal untuk menggunakan kendaraan listrik penuh, mengingat jenis kendaraan aplikasi dalam ruangan bukanlah kendaraan yang terlalu besar.

Jadi jelas bahwa tingkat elektrifikasi kendaraan akan tergantung pada siklus penggerak dan pertimbangan lain, seperti yang ditunjukkan di atas. Tapi itu juga akan tergantung pada jumlah volume yang terlibat. Untuk aplikasi volume rendah, upaya dan biaya yang diperlukan untuk melistriki mungkin tidak membenarkan transisi tersebut.

Industri Lain Apa yang Terlibat atau Terpengaruh dalam Elektrifikasi Kendaraan?

Baik HEV dan EV jelas memerlukan bidang interdisipliner, yang melibatkan disiplin teknik listrik, mekanik, kontrol, komputer dan mikroelektronika, dan kimia pada khususnya. Oleh karena itu, situasi ini membutuhkan kerja sama antara berbagai produsen, karena ada banyak teknologi yang terlibat. Seperti yang telah disebutkan di bab sebelumnya, teknologi ini, seperti baterai, elektronika daya, motor, mekanisme pengisian baterai untuk kendaraan hibrida plug-in, semuanya harus memenuhi standar tertentu. Standar-standar ini dapat menyangkut perspektif keselamatan, tetapi juga perspektif kesesuaian dengan beberapa kesamaan antara apa yang dapat diberikan oleh satu teknologi, dan apa yang dapat diterima oleh teknologi lain. Misalnya, barang elektronik daya dibeli dari hanya beberapa pemasok terpilih; teknologi antarmuka seperti baterai dan desain terkait motor harus sesuai dengan elektronika daya, dan juga untuk antarmuka lainnya.

Masalah EMI, yang sangat penting dalam HEV dan EV, tidak hanya terkait dengan berfungsinya sistem mikrokontroler, tetapi pada akhirnya dapat mempengaruhi elektronika daya, dan bahkan sistem kelistrikan dan sistem kontrol berdaya rendah, dan juga dapat mengganggu fungsi kendaraan terdekat. Jadi, standar yang tepat dan mitigasi masalah ini melibatkan industri material yang sesuai dan juga proses pengemasan. Sehubungan dengan infrastruktur kendaraan listrik plug-in, saat ini topik yang sangat penting berkaitan dengan transfer daya nirkabel. Industri itu mungkin juga memainkan peran penting di masa depan sehubungan dengan EV dan HEV. Beberapa industri tambahan, meskipun mungkin merupakan bagian dari yang ditunjukkan di atas, adalah sel bahan bakar (termasuk sistem bahan bakar dalam paket sistem sel bahan bakar lengkap), flywheel, dan industri terkait ultrakapasitor. Teknologi dalam hal ini belum sepenuhnya matang dalam hal energi spesifik dan berat spesifik. Namun, kemajuan substansial telah terlihat, dan diharapkan teknologi yang layak akan tersedia dalam waktu dekat untuk semua ini, yang dapat berdampak signifikan pada elektrifikasi kendaraan.

Dalam hal perawatan kendaraan, industri yang memproduksi peralatan pengujian yang sesuai juga akan dilibatkan. Seperti disebutkan dalam bab sebelumnya, secara umum kemungkinan instrumen diagnostik dari produsen HEV atau EV akan lebih mahal daripada yang generik. Oleh karena itu beberapa standardisasi, mirip dengan OBD II, akan diperlukan. Oleh karena itu terlihat dari beberapa industri yang terlibat dalam elektrifikasi kendaraan. Akhirnya, jika deregulasi kelistrikan terjadi di industri utilitas, maka itu akan membawa pemain lain seperti berbagai industri utilitas ke dalam skenario, bersama dengan standarisasi yang tepat terkait dengan antarmuka kendaraan ke jaringan.

19.3 GAMBARAN LEBIH LENGKAP MENUJU ELEKTRIFIKASI KENDARAAN

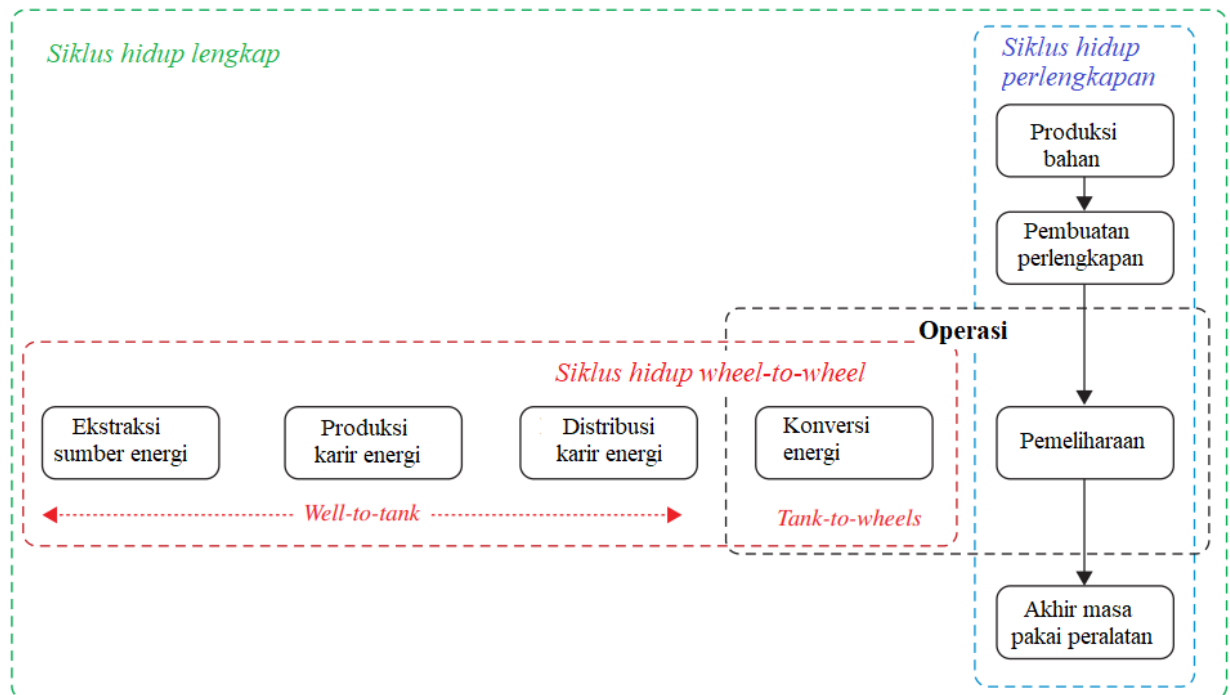
Untuk mendapatkan gambaran yang lebih objektif dan lengkap terkait kendaraan berlistrik, baik full electric maupun hybrid, penting untuk melihat sisi positif dan negatif dari kendaraan tersebut. Ini melibatkan melihat ke dalam siklus hidup penuh kendaraan dari beberapa sudut pandang – biaya (baik dari perspektif manufaktur dan pengguna akhir), ekonomi bahan bakar, polusi dan aspek lingkungan – tidak hanya dari perspektif langsung dari kendaraan itu sendiri, tetapi juga dari sudut pandang yang lebih luas, termasuk sudut pandang proses pembuatan kendaraan tersebut, bersama dengan konsekuensi tidak langsung, baik positif maupun negatif.

Pada isu-isu seperti itu, beberapa tinjauan literatur dan diskusi dapat membantu. Nordelof dkk. (lihat bagian Bacaan Lebih Lanjut) dan lainnya (khususnya studi oleh Universitas Sains dan Teknologi Norwegia) telah menunjukkan bahwa untuk kendaraan listrik murni dan hibrida plug-in yang memerlukan pengisian dari entitas eksternal, seperti industri utilitas, lingkungan manfaat akan tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan industri utilitas. Misalnya, jika industri utilitas menggunakan batu bara atau bahan bakar lain dengan emisi karbon tinggi, maka manfaat menggunakan kendaraan listrik mungkin sebenarnya lebih buruk daripada rekan konvensional. Studi ini menunjukkan bahwa manfaat dari elektrifikasi kendaraan dapat terwujud lebih baik dalam hal polusi dan dampak lingkungan jika energi yang digunakan untuk mengisi kendaraan berasal dari energi terbarukan atau bentuk energi lain dengan jejak karbon rendah. Karena kendaraan listrik dan hibrida lebih hemat bahan bakar, dari sudut pandang itu secara keseluruhan akan mengurangi polusi, tetapi jika kita mempertimbangkan metode pengisian kendaraan maka skenario di atas dalam hal perspektif yang lengkap mungkin belum tentu bermanfaat.

Sekarang mari kita lihat masalah pembuatan kendaraan listrik, sepenuhnya listrik atau hibrida. Kendaraan berlistrik membutuhkan beberapa item seperti baterai, elektronika daya, motor listrik, dan ultrakapasitor (jika digunakan). Tergantung pada jenis kendaraannya, beberapa pengurangan pada item tertentu dapat terjadi pada kendaraan yang dialiri listrik. Sebuah ringkasan (tidak harus lengkap) diberikan pada Tabel 19.1.

Tabel 19.1 Perbandingan kebutuhan komponen dan manufaktur pada kendaraan listrik.

Jenis Kendaraan	Item yang digunakan					
	ICE	Baterai Propulsi	Motor Propulsi	Elektronik Power	Ultrakapasitor	Item Tambahan
Konvensional	Nilai daya penuh	Kosong	Kosong	Tidak ada untuk tenaga penggerak	Kosong	A/C mekanis, pompa air, pompa bahan bakar, pompa oli, rem, kemudi
Sepenuhnya listrik	Kosong	Nilai daya penuh	Nilai daya penuh	Nilai daya penuh	Nilai daya berkurang mungkin, jika sama sekali digunakan	Alat bantu mekanis tidak diperlukan – A/C yang dialiri listrik
Plug-in hybrid (paralel)	Nilai daya berkurang	Nilai daya berkurang	Nilai daya berkurang	Pengurangan daya dinilai mungkin	Nilai daya berkurang mungkin, jika sama sekali digunakan	Alat bantu mekanis dapat dikurangi ukurannya atau dihilangkan, A/C yang dialiri listrik.
Hibrida penuh (paralel)	Nilai daya berkurang	Nilai daya berkurang	Nilai daya berkurang	Pengurangan daya dinilai mungkin	Nilai daya berkurang mungkin, jika sama sekali digunakan	Alat bantu mekanis dapat dikurangi ukurannya atau dihilangkan, A/C yang dialiri listrik.
Seri HEV	Nilai daya penuh (jika tidak ada baterai propulsi yang digunakan)	Nilai daya yang dikurangi dapat digunakan	Nilai daya yang dikurangi dapat digunakan	Nilai daya penuh	Nilai daya berkurang mungkin, jika sama sekali digunakan	Alat bantu mekanis dapat dikurangi ukurannya atau dihilangkan, A/C yang dialiri listrik.



Gambar 19.1 Tampilan sederhana dari well-to-wheels dan aliran peralatan (tampilan yang lebih rinci akan mencakup, misalnya, opsi daur ulang). Sumber: Courtesy Anders Nordelöf dkk.

Tabel tersebut memberikan gambaran dasar tentang item-item tertentu yang dapat dihilangkan pada kendaraan berlistrik, dan beberapa item yang akan ditambahkan, ditambah beberapa item yang dapat diturunkan. Dalam kendaraan listrik, pembuatan barang tambahan (misalnya baterai, dan magnet permanen di motor) kadang-kadang bisa sangat intensif dalam hal kepekaan lingkungan. Telah disarankan dalam berbagai makalah (misalnya Nordelöf et al.) bahwa pembuatan baterai berbasis lithium sangat ramah lingkungan. Tampilan yang disederhanakan dari proses manufaktur dan siklus hidup well-to-wheels telah disediakan oleh Nordelöf et al. ditunjukkan dalam kertas mereka dan ditunjukkan pada Gambar 19.1

Dengan skenario di atas, dapat disimpulkan bahwa menggunakan kendaraan listrik akan menghasilkan penghematan bahan bakar yang lebih baik dari perspektif pengguna. Dalam prosesnya, pengereman regeneratif akan memperpanjang umur rem. Pemeliharaan dapat dilakukan pada interval yang lebih lama untuk ICE di HEV. Semua ini adalah masalah terkait pengguna. Sementara item tertentu ditambahkan dalam EV atau HEV, item tertentu seperti berbagai pompa atau kipas mungkin dapat dihilangkan dalam beberapa kasus, atau dialiri listrik, dan mungkin diturunkan dalam situasi tertentu.

Selama siklus hidup total kendaraan berlistrik, penting untuk memperkenalkan daur ulang berbagai item, baik di akhir siklus hidup, dan juga selama masa pakai ketika pemeliharaan atau penggantian komponen dilakukan. Jelas daur ulang 100% tidak akan pernah bisa diwujudkan, dan karenanya akan selalu ada beberapa item yang akan berakhir sebagai pencemaran lingkungan, dan juga beberapa proses konsumsi energi selama pembuatan yang tidak dapat dibalik.

Studi Norwegia yang ditunjukkan sebelumnya (juga makalah oleh Hawkins et al.) menunjukkan bahwa fase produksi kendaraan listrik sangat ramah lingkungan, dibandingkan dengan proses manufaktur yang melibatkan kendaraan bensin dan diesel konvensional. Ini juga menunjukkan bahwa potensi pemanasan global dari produksi kendaraan listrik sekitar

dua kali lipat dari kendaraan konvensional. Selain itu, pembuatan baterai dan motor listrik (termasuk yang menggunakan magnet permanen dan bahan tanah jarang) dapat menggunakan sejumlah besar mineral beracun seperti nikel, tembaga, dan aluminium. Semua ini juga dapat menyebabkan pengasaman lingkungan, yang bisa lebih dari produksi otomotif konvensional.

Masalah lain yang terkait dengan kendaraan listrik adalah manfaatnya dapat sedikit berkurang, tergantung pada jarak tempuh yang dipertimbangkan dan juga apakah dibandingkan dengan kendaraan bensin atau diesel konvensional. Misalnya, jika kendaraan memiliki masa pakai 200.000 km maka manfaat dalam hal pemanasan global dapat sekitar 27-29% untuk kendaraan listrik dibandingkan dengan kendaraan berbahan bakar bensin, dan 17-20% dibandingkan dengan kendaraan berbahan bakar diesel. Jika kendaraan diasumsikan memiliki umur pakai hanya 100.000 km, manfaatnya akan berkurang untuk kendaraan listrik menjadi hanya 9-14% jika dibandingkan dengan kendaraan bensin dan hampir tidak ada manfaat jika dibandingkan dengan kendaraan diesel. Hal ini didasarkan pada berbagai referensi di akhir bab ini. Telah ditunjukkan oleh pejabat tinggi Daimler bahwa kendaraan listrik baterai, dengan campuran pembangkit listrik industri utilitas yang saat ini digunakan di Eropa, memberikan manfaat sekitar 10% atau lebih, dibandingkan dengan kendaraan diesel konvensional yang setara. Rupanya manfaat ini dalam hal jejak karbon lingkungan secara keseluruhan, terlepas dari manfaat ekonomi bahan bakar pengguna.

Keuntungan dan kerugian dari EV dan HEV dapat diringkas sebagai berikut: Keuntungan – (a) tidak ada bensin untuk EV dan jumlah bensin yang lebih rendah dalam HEV yang dibutuhkan, (b) tidak ada atau jejak karbon yang lebih rendah, (c) dengan popularitas yang lebih besar dan volume yang lebih tinggi produksi, biaya dapat turun secara signifikan, (d) kebutuhan perawatan lebih rendah tanpa perlu mengganti oli untuk EV, dan lebih jarang mengganti HEV, (e) mengurangi kebisingan yang dapat didengar.

Kekurangan – (a) Infrastruktur pengisian daya yang dibutuhkan, (b) listrik tidak gratis dan jika permintaan listrik menjadi sangat tinggi, industri utilitas mungkin harus menaikkan tarifnya untuk memenuhi permintaan yang lebih tinggi, (c) jarak tempuh yang rendah untuk EV murni, (d) waktu pengisian yang lama, dengan asumsi bahwa fasilitas pengisian daya tersedia, (e) baterai akan memerlukan penggantian sekitar 3–10 tahun dan ini sangat mahal, (f) fasilitas pemeliharaan mungkin tidak tersedia di mana-mana dan kemungkinan besar di dealer akan menjadi tempat untuk itu, setidaknya pada awalnya, (g) komponen generik mungkin tidak dapat digunakan, kecuali ada standarisasi yang tepat, (h) volume rendah akan menyebabkan biaya yang lebih tinggi di masa mendatang, sehingga akan memakan waktu beberapa tahun sebelum pengguna akhir dapat memulihkan biaya tambahan dari kendaraan tersebut, sehingga membuat pengguna enggan untuk membeli kendaraan tersebut.

Secara keseluruhan, tampaknya tidak setiap detail dan manfaat, atau kekurangannya, dari kendaraan listrik dan hibrida, akan sangat jelas baik dari perspektif pengguna atau dalam hal manfaat lingkungan, yaitu dari perspektif holistik lengkap, hingga mungkin mendekati a beberapa dekade telah berlalu dan penggunaan volume telah meningkat secara substansial dan menjadi sebanding dengan kendaraan konvensional. Hal ini berlaku untuk teknologi apa pun dan bukan hanya kendaraan, tetapi dengan melihat dengan cermat dan perspektif yang tidak memihak baik dari sudut pandang pengguna maupun lingkungan, industri secara keseluruhan dan masyarakat umum akan mendapat manfaat dan dapat mengatasi berbagai masalah secara lebih realistis.

19.4 ISU PAMUNGKAS: UNTUK MENGELEKKAN KENDARAAN ATAU TIDAK?

Berdasarkan diskusi di bagian sebelumnya, kita dapat mempertimbangkan masalah utama apakah akan bekerja menuju elektrifikasi kendaraan atau tidak. Seperti yang kita lihat, jawabannya tidak langsung dan ada dua sisi cerita. Item apa yang harus kita pertimbangkan dalam menjawab ini? Dari sudut pandang pengguna, ini adalah penghematan bahan bakar dan biaya siklus hidup, termasuk perawatan dan pembuangan. Dari perspektif lingkungan, itu adalah keseluruhan polusi dan jejak karbon dan barang-barang serupa, mengingat proses manufaktur yang terlibat dalam kendaraan listrik ini, termasuk berbagai komponen yang terkait dengan kendaraan tersebut. Selain itu, kita perlu mempertimbangkan volume penggunaan kendaraan secara keseluruhan. Pertimbangan serupa juga diperlukan untuk kendaraan yang digunakan untuk aplikasi off-highway, seperti kendaraan konstruksi, aplikasi militer, kapal, dan lokomotif.

Memang benar bahwa kendaraan listrik akan lebih ekonomis dalam hal efisiensi energi, terutama karena ICE pada dasarnya terbatas dalam efisiensi dan angka persentase efisiensi agak rendah, di urutan dua puluhan menengah untuk kendaraan bensin dan mungkin empat puluhan menengah di kendaraan diesel. Di sisi lain, elektronika daya dan efisiensi mesin listrik bisa berada di tengah hingga tinggi tahun sembilan puluhan, tentu saja tinggi tahun delapan puluhan. Efisiensi baterai juga bisa berada di tahun delapan puluhan menengah hingga tinggi. Dengan semua komponen listrik disatukan, efisiensi sistem secara keseluruhan masih bisa mencapai tujuh puluh persen untuk kendaraan listrik, ini sangat signifikan.

Jadi, dari sudut pandang pengguna pasti ada keuntungan dalam penghematan bahan bakar jika kendaraan listrik digunakan. Biaya tambahan kendaraan listrik mungkin memakan waktu beberapa tahun untuk pulih. Ekonomi terkadang – mungkin dalam banyak kasus – menjadi faktor penentu dalam penggunaan kendaraan ini. Faktor lainnya adalah jarak tempuh, yang, untuk kendaraan listrik sepenuhnya, masih sangat terbatas dan menghalangi popularitas. Untuk HEV yang berdiri sendiri, masalah atau jangkauan ini agak dikurangi, tetapi kemudian sistem menjadi lebih kompleks. Dari segi perawatan, memang benar juga bahwa kendaraan berlistrik cukup menguntungkan dibandingkan dengan kendaraan konvensional.

Kita telah membahas masalah lingkungan yang berkaitan dengan EV dan HEV di bagian sebelumnya. Masalah ini cukup kompleks, karena situasi manufaktur. Untuk PHEV dan EV, manfaat bagi lingkungan dapat sedikit bergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan oleh industri utilitas yang menyediakan energi untuk pengisian kendaraan. Untuk HEV yang benar-benar mandiri, ada peningkatan penghematan bahan bakar dan begitu ada penghematan bahan bakar, ada manfaat bagi lingkungan dari perspektif itu saja. Tetapi jika kita mempertimbangkan proses pembuatannya, maka beberapa manfaat dari HEV mandiri dapat berkurang sampai batas tertentu.

Oleh karena itu, untuk menjawab pertanyaan terakhir, apakah dunia harus mengejar elektrifikasi kendaraan atau tidak, tidaklah mudah. Ada banyak penelitian tentang ini, dan beberapa dicatat di bagian referensi di akhir bab ini. Tetapi sekali lagi, studi-studi ini sering bergantung pada berbagai asumsi, dan beberapa asumsi mungkin benar, dan yang lain mungkin tidak. Selain aplikasi otomotif, ada aplikasi lain seperti kapal dan lokomotif, di mana elektrifikasi kemungkinan akan lebih bermanfaat. Di lokomotif, elektrifikasi telah ada selama bertahun-tahun, dan pengalamannya positif. Untuk kapal, meski belum dilakukan secara besar-besaran, tampaknya akan ada manfaatnya. Kapal dan lokomotif memiliki siklus penggerak yang dapat diprediksi dan oleh karena itu desain kendaraan dapat dioptimalkan sejak awal. Komentar yang sama berlaku untuk konstruksi dan kendaraan off-road serupa. Bahkan, saat ini kendaraan konstruksi ini sedang dialiri listrik sampai batas tertentu.

Kendaraan ini, seperti kapal dan lokomotif, termasuk dalam kategori elektrifikasi power train tanpa penyimpanan (yaitu tanpa baterai) dalam banyak kasus. Untuk kendaraan konstruksi ada keduanya – power train berlistrik dengan dan tanpa penyimpanan – dan beberapa manfaat dalam hal penghematan bahan bakar telah dicapai dalam kedua kasus tersebut. Tetapi informasi tentang beban manufaktur tambahan belum dipelajari secara menyeluruh, dalam hal konsekuensinya terhadap lingkungan. Ini perlu dilakukan.

Menurut pendapat penulis buku ini, mungkin cara terbaik untuk menjawab pertanyaan yang diajukan sebelumnya adalah dengan memperkenalkan elektrifikasi pada kendaraan secara bertahap, dan itulah yang terjadi sekarang. Penerimaan rakyat secara otomatis akan mendikte masa depan, dipandu oleh ekonomi. Pelanggan mungkin tidak selalu dipandu oleh pertimbangan lingkungan, melainkan oleh ekonomi, dalam jangka panjang. Pasar volume kendaraan listrik murni mungkin tidak ada kecuali ada insentif yang memadai, terutama karena fakta bahwa jangkauan kendaraan ini agak rendah. Untuk standalone atau PHEV, jangkauan mungkin tidak menjadi masalah, tetapi total biaya siklus hidup pasti akan menjadi masalah. Hal lain yang harus dilakukan adalah berbagai organisasi profesional harus memulai pengumpulan data lingkungan dengan cara yang sangat terorganisir dan ilmiah dan kemudian menggunakannya untuk memberi saran yang sesuai kepada produsen. Pengambilan keputusan elektrifikasi kendaraan seharusnya tidak menjadi masalah emosional, melainkan dipandu oleh penalaran ilmiah dan pertimbangan ekonomi yang menyeluruh, dan kemudian titik optimal akan secara otomatis tercapai di mana komunitas teknis akan mengetahui atau lebih tepatnya mendapatkan ide yang masuk akal untuk campuran kendaraan EV terbaik dari konvensional, dan HEV yang harus diproduksi. Untuk saat ini tampaknya dari perspektif pengguna HEV adalah solusi sementara yang baik, asalkan biaya dapat dikurangi. EV murni mungkin masih memiliki beberapa cara untuk pergi, baik dari perspektif biaya dan lingkungan, karena masalah manufaktur.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Dardanelli, M. Tanelli, B. Picasso, S.M. Savaresi, O. di Tanna, and M.D. Santucci, "A Smartphone-in-the-Loop Active State-of-Charge Manager for Electric Vehicles," *Mechatronics*, IEEE/ASME Transactions on, vol. 17, pp. 454–463, 2012.
- A. Khaligh and S. Dusmez, "Comprehensive Topological Analysis of Conductive and Inductive Charging Solutions for Plug-In Electric Vehicles," *Vehicular Technology*, IEEE Transactions on, vol. 61, pp. 3475–3489, 2012.
- A. Pawellek, C. Oeder, J. Stahl, and T. Duerbaum, "The resonant LLC vs. LCC converter – comparing two optimized prototypes," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2011 IEEE, 2011, pp. 2229–2235.
- ABB, The World's First Azimuthing Electric Propulsion Drive, <http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/589ea2a5cd61753ec12570c002ab1d1/file/AzipodNew.pdf> (accessed February 2011).
- ADVISOR 2004 Documentation, <http://www.avl.com>.
- Ai, X., Mohr, T., and Anderson, S. (2004) An electro-mechanical infinitely variable speed transmission. *Proceedings of the SAE Congress Expo*, March 8–11, Detroit, MI.
- Akin, B., Ozturk, S.B., Toliyat, H.A., and Rayner, M. (2009) DSP-based sensorless electric motor fault-diagnosis tools for electric and hybrid electric vehicle powertrain applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58 (6), 2679–2688.
- Alaoui, C. and Salameh, Z.M. (2005) A novel thermal management for electric and hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54, 468–476.
- Amend, J.M. (2010) Charge up, Chevy Volt rises above sound, fury of introduction. *Ward's AutoWorld*, November
- Amrhein, M. and Krein, P.T. (2005) Dynamic simulation for analysis of hybrid electric vehicle system and subsystem interactions, including power electronics. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54, 825–836.
- Annual Update on the Automotive Fuel Economy Program, <http://www.nhtsa.gov/cars/rules/CAFE/updates.htm> (accessed June 11, 2016).
- ANSYS (2005) <http://www.ansoft.com> (accessed April 2005).
- Asano, K., Okada, S., and Iwamam, N. (1992) Vibration suppression of induction-motor-driven hybrid vehicle using wheel torque observer. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28 (2), 441–447.
- ASTM E 1049–85 (2005) Rainflow Counting Method, 1987.

- Atwater, T., Cygan, P.J., dan Leung, F. (2000) Kebutuhan daya portabel manusia abad ke-21 – I. Aplikasi untuk prajurit yang diturunkan. II. Peningkatan kemampuan melalui penggunaan sumber daya hybrid. *Jurnal Sumber Daya*, 91, 27-36.
- Bakker, E., Nyborg, L., and Pacejka, H. (1987) Tyre Modeling for Use in Vehicle Dynamics Studies. SAE Paper no. 870421, pp. 190–204.
- Bakker, E., Pacejka, H., and Lidner, L. (1989) A New Tire Model with an Application in Vehicle Dynamics Studies. SAE Paper no. 890087, pp. 101–113.
- Balagurov, V.A., Galtieev, F.F., and Larionov, A.N. (1964) Permanent Magnet Electrical Machines, *Energia, Moscow* (in Russian, and translation in Chinese).
- Benbouzid, M.E.H., Diallo, D., and Zeraoulia, M. (2007) Advanced fault-tolerant control of induction-motor drives for EV/HEV traction applications: from conventional to modern and intelligent control techniques. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56 (2), 519–528.
- Binns, K.J., Jabbar, M.A., and Parry, G.E. (1979) Choice of parameters in hybrid permanent magnet synchronous motor. *Proceedings of the IEE*, 126 (8), 741–744.
- Blaabjerg, F., Pedersen, J.K., Neilsen, P., et al. (1994) Investigation and reduction of acoustic noise from switched reluctance drives in current and voltage control. *Proceedings of*
- Boglietti, A., Cavagnino, A., Lazzari, M., and Pastorelli, A. (2002) A simplified thermal model for variable speed self cooled industrial induction motor. *Industry Applications Conference, 37th IAS Annual Meeting, October 13–17, vol. 2, pp. 723–730.*
- Borghi, C.A., Casadei, D., Cristofolini, A., et al. (1999) Application of multi objective minimization technique for reducing the torque ripple in permanent magnet motors.
- Bose, B.K. (1988) A high-performance inverter-fed drive system of an interior permanent magnet synchronous machine. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 24 (6), 987–997.
- Bose, B.K. (1988) A microcomputer-based control and simulation of an advanced IPM
- Bose, B.K. (1997) *Power Electronics and Variable Frequency Drives – Technology and Applications*, IEEE Press, Piscataway, NJ.
- Bose, B.K. (2000) Energy, environment, and advances in power electronics. *Proceedings of the International Symposium on Industrial Electronics, December, vol. 1, pp. TU1–T14.*
- Boules, N. (1990) Design optimization of permanent magnet DC motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 26 (4), 786–792.
- Brooker, A., Haraldsson, K., Hendricks, T., et al. (2002) *ADVISOR Documentation, Version 2002*, National Renewable Energy Laboratory.

- Butler, K.L., Ehsani, M., and Kamath, P. (1999) A MATLAB-based modeling and simulation package for electric and hybrid electric vehicle design. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 48 (6), 1770–1778.
- C. Adragna, S. De Simone, and C. Spini, “A design methodology for LLC resonant converters based on inspection of resonant tank currents,” in *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2008. APEC 2008. Twenty-Third Annual IEEE, 2008, pp. 1361–1367.
- C. Adragna, S. De Simone, and C. Spini, “Designing LLC resonant converters for optimum efficiency,” in *Power Electronics and Applications*, 2009. EPE '09. 13th European Conference on, 2009, pp. 1–10.
- C. Mi, M. A. Masrur, and D. W. Gao, *Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with Practical Perspectives*: Wiley, 2011.
- Cameron, D.H., Lang, J.H., and Umans, S.D. (1992) The origin and reduction of acoustic noise in doubly salient variable-reluctance motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 26 (6), 1250–1255
- Cassat, A., Espanet, C., and Wavre, N. (2003) BLDC motor stator and rotor iron losses and thermal behavior based on lumped schemes and 3-D FEM analysis. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 39 (5), 1314–1322.
- Chaaban, F.B., Birch, T.S., Howe, D., and Mellor, P.H. (1991) Topologies for a permanent magnet generator/speed sensor for the ABS on railway freight vehicles. *Proceedings of the IEE International Conference on Electrical Machines and Drives*, September 11–13, pp. 31–35.
- Chan, C.C. (2002) The state of the art of electric and hybrid vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 90 (2), 247–275.
- Chan, C.C. and Chau, K.T. (2001) *Modern Electric Vehicle Technology*, Oxford University Press, Oxford.
- Chan, C.C., Chau, K.T., Jiang, J.Z., et al. (1996) Novel permanent magnet motor drives for electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 43, 331–339.
- Chan, C.C., Jiang, K.T., Xia, J.Z., et al. (1996) Novel permanent magnet motor drive for electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 43 (2), 331–339.
- Chau, K.T., Sun, Q., Fan, Y., and Cheng, M. (2005) Torque ripple minimization of doubly salient permanent-magnet motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20 (2), 352–358.
- Chen, C. and Xu, X. (1998) Modeling the conducted EMI emission of an electric vehicle (EV) traction drive. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, August, vol. 2, pp. 796–801.
- Cheng, M., Chau, K.T., and Chan, C.C. (2000) Nonlinear varying-network magnetic circuit analysis for DSPM motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 36 (1), 339–348.

- Cheng, M., Chau, K.T., and Chan, C.C. (2001) Design and analysis of a new doubly salient permanent magnet motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 37 (4), 3012–3020.
- Cheng, M., Chau, K.T., and Chan, C.C. (2001) Static characteristics of a new doubly salient permanent magnet motor. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 16 (1), 20–25.
- Cheng, M., Chau, K.T., Chan, C.C., and Sun, Q. (2003) Control and operation of a new 8/6-pole doubly salient permanent-magnet motor drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 39 (5), 1363–1371.
- China's Auto Sales Rebound in August after July's Monthly Decline, http://news.xinhuanet.com/english2010/business/2010-09/09/c_13487102.htm (accessed June 11, 2016).
- Cho, D.H., Jung, H.K., and Sim, D.J. (1999) Multiobjective optimal design of interior permanent magnet synchronous motors considering improved core loss formula. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 14 (4), 1347–1352.
- Chowdhury, S.K. (2005) A distributed parameter thermal model for induction motors. *International Conference on Power Electronics and Drives Systems, PEDS 2005*, November 28–December 1, vol. 1, pp. 739–744.
- Colby, R.S., Mottier, F., and Miller, T.J.E. (1996) Vibration modes and acoustic noise in a four-phase switched reluctance motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 32 (6), 1357–1364.
- Conlon, B.M., Savagian, P.J., Holmes, A.G., and Harpster, M.O. Jr. (2007) Output split electrically-variable transmission with electric propulsion using one or two motors. US Patent US2009/0082171 A1, filed September 10, 2007, and published March 26, 2009.
- Cortese, S. (2004) EMI in a Hybrid Electric World, www.dtic.mil/ndia/2004tactical/Cortese.ppt (accessed February 2011).
- Degner, M.W., Guerrero, J.M., and Briz, F. (2006) Slip-gain estimation in field-orientation-controlled induction machines using the system transient response. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 42 (3), 702–711.
- Deodhar, R.P., Staton, D.A., and Miller, T.J.E. (1996) Prediction of cogging torque using the flux-MMF diagram technique. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 32 (6), 569–576.
- Di Napoli, A., Crescimbeni, F., Rodo, S. et al. (2002) Multiple input DC-DC power converter for fuel-cell powered hybrid vehicles. *33rd Power Electronics Specialists Conference*, June, pp. 1685–1690.
- Diallo, D., Benbouzid, M.E.H., and Makouf, A. (2004) A fault-tolerant control architecture for induction motor drives in automotive applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 53 (6), 1847–1855.

- Ding, X. and Mi, C. (2011) Impact of inverter on losses and thermal characteristics of induction motors. *International Journal on Power Electronics*, in press.
- Ding, X. and Mi, C. Modeling of eddy current loss and temperature of the magnets in permanent magnet machines. *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, submitted.
- Ding, X., Bhattacharyal, M., and Mi, C. (2010) Simplified thermal model of PM motors in hybrid vehicle applications taking into account eddy current loss in magnets. *Journal of Asia Electric Vehicles*, 8 (1), 1–7.
- Dixon, S. and Fahimi, B. (2003) Enhancement of output electric power in switched reluctance generators. *Proceedings of IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, June 1–4, pp. 849–856.
- Douglas, J. (2008) Plug-in hybrids on the horizon – building a business case. *Journal of Electric Power Research Institute (EPRI)*, Spring.
- Dreike, P.L., Fleetwood, D.M., King, D.B., et al. (1994) An overview of high-temperature electronic device technologies and potential applications. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A*, 17, 594–609. [see also *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*].
- Edrington, C.S., Krishnamurthy, M., and Fahimi, B. (2005) Bipolar switched reluctance machines: a novel solution for automotive applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54 (3), 795–808.
- Ehsani, M., Gao, Y., and Butler, K.L. (1999) Application of electrically peaking hybrid propulsion system to a full-size passenger car simulation design verification. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 48 (6), 1779–1787.
- Ehsani, M., Gao, Y., and Emadi, A. (2009) *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*, 2nd edn, Power Electronics and Applications Series, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Ehsani, M., Gao, Y., and Gay, S. (2003) Characterization of electric motor drives for traction applications. *Industrial Electronics Society, IECON'03*, November 2–6, vol. 1, pp. 891–896.
- Ehsani, M., Rahman, K.M., and Toliyat, H.A. (1997) Propulsion system design of electric and hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 44, 19–27.
- Ehsani, M., Rahman, K.M., Bellar, M.D., and Severinsky, A.J. (2001) Evaluation of soft switching for EV and HEV motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 48 (1), 82–90.
- Electric Power Annual, <http://www.eia.doe.gov/cneaf/electricity/epa/figes1.html> (accessed February 2, 2011).

- Emadi, A., Ehsani, M., and Miller, J.M. (1999) Advanced silicon rich automotive electrical power systems. Proceedings of the Digital Avionic Systems Conference, October, vol. 2, 8.B.1-1–8.B.1-8.
- Emadi, A., Williamson, S.S., and Khaligh, A. (2006) Power electronics intensive solutions for advanced electric, hybrid electric, and fuel cell vehicular power systems. IEEE Transactions on Power Electronics, 21, 567–577.
- F. Musavi, M. Craciun, M. Edington, W. Eberle, and W. G. Dunford, “Practical design considerations for a LLC multi-resonant DC–DC converter in battery charging applications,” in Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE, 2012, pp. 2596–2602.
- F. Xiang, H. Haibing, F. Chen, U. Somani, E. Auadisian, J. Shen, et al., “Efficiency-Oriented Optimal Design of the LLC Resonant Converter Based on Peak Gain Placement,” Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 28, pp. 2285–2296, 2013.
- Fahimi, B., Emadi, A., and Sepe, R. (2004) A switched reluctance machine-based starter/alternator for more-electric cars. IEEE Transactions on Energy Conversion, 19 (1), 116–124.
- Fair, H. (2003) Revolusi Teknologi Peluncuran Elektromagnetik, Majalah Magnetik, <http://www.magneticmagazine.com/e-prints/UT.pdf> (diakses Februari 2011).
- Filippa, M., Chunting, M., Shen, J., et al. (2005) Modeling of a hybrid electric vehicle powertrain test cell using bond graphs. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 54, 837–845.
- for constant power. IEEE Industry Applications Magazine, pp. 18–24.
- Ford Ranger EV User’s Manual, <http://www.eserviceinfo.com/download.php?fileid=18730> (accessed February 2, 2011).
- Fu, J. and Gao, W. (2009) Principal component analysis based on drive cycles for hybrid electric vehicle. 5th IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference, September 7–11, Dearborn, MI.
- Fujishima, Y., Wakao, S., Kondo, M., and Terauchi, N. (2004) An optimal design of interior permanent magnet synchronous motor for the next generation commuter train. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 14 (2), 1902–1905.
- Funieru, B. and Binder, A. (2008) Thermal design of a permanent magnet motor used for gearless railway traction. Industrial Electronics, IECON 2008, 34th Annual Conference, November 10–13, pp. 2061–2066.
- Gabsi, M., Camus, F., and Besbes, M. (1999) Computation and measurement of magnetically induced vibrations of switched reluctance machine. IEE Proceedings – Electric Power Applications, 146 (5), 463–470.

- Gabsi, M., Camus, F., Loyau, T., and Barbry, J.L. (1999) Noise reduction of switched reluctance machine. Proceedings of IEEE International Electric Machines and Drives Conference, May 12–19, pp. 263–265.
- Gage, T.B. (2003) Development and Evaluation of a Plug-in HEV with Vehicle-to-Grid Power Flow, AC Propulsion, Inc., San Dimas, CA, CARB Grant Number ICAT 01–2, December 17.
- Gao, W. (2005) Performance comparison of a hybrid fuel cell – battery powertrain and a hybrid fuel cell – ultracapacitor powertrain. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 54 (3), 846–855.
- Gao, Y. and Ehsani, M. (2001) Systematic design of fuel-cell powered hybrid vehicle drive train. Future Transportation Technology Conference, August 20–22, Costa Mesa, CA, paper 2001-01-2532.
- Gargies, S., Wu, H., and Mi, C. (2006) Isolated bidirectional DC/DC converter for hybrid electric vehicle applications. 6th Intelligent Vehicle Symposium, June.
- Gazley, C. (1958) Heat transfer characteristics of rotational and axial flow between concentric cylinder. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 80, 79–89.
- Gieras, J.F. and Wing, M. (2002) Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications, 2nd edn, Marcel Dekker, New York.
- Gillespie, T.D. (1992) Fundamentals of Vehicle Dynamics, SAE, Warrendale, PA.
- Global, Regional, and National Fossil Fuel CO₂ Emissions, http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/emis/tre_glob.html (accessed January 27, 2011).
http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/emis/tre_glob.html (accessed January 27, 2011).
<http://web.archive.org/web/20080508060713/>
- Guo, Y.G., Zhu, J.G., and Wu, W. (2005) Thermal analysis of soft magnetic composite motors using a hybrid model with distributed heat sources. IEEE Transactions on Magnetics, 41 (6), 2124–2128.
- Haines, G., McGordon, A., and Jennings, P. (2009) The simulation of vehicle-to-home systems – using electric vehicle battery storage to smooth domestic electricity demand. Ecological Vehicles Renewable Energies, EVER'09, March, Monaco.
- Hak-Geun, J., Bong-Man, J., Soo-Bin, H., et al. (2000) Modeling and performance simulation of power systems in fuel cell vehicle. Proceedings of IPEMC 2000, August, 2, 671–675.
- Hamilton, D.B. (1996) Electric propulsion power system – overview, Power Electronics in Transportation, pp. 21–28.
- Harson, A., Mellor, P.H., and Howe, D. (1995) Design considerations for induction machines for electric vehicle drives. Proceedings of the IEE International Conference on Electrical Machines and Drives, September 11–13, pp. 16–20.

Hayes, J.G. and Egan, M.G. (1999) A comparative study of phase-shift, frequency, and hybrid control of the series resonant converter supplying the electric vehicle inductive charging interface. 14th Applied Power Electronics Conference, March, vol. 1, 450–457.

Hebner, R.E. (2005) Electric ship power system – research at the University of Texas at Austin. IEEE Electric Ship Technology Symposium, July.

Hierholzer, M., Bayerer, R., Porst, A., and Brunner, H. Improved Characteristics of 3.3kV IGBT Modules, http://www.scut-co.com/maindoc/techtrade/pdevice/eupec/documents/techsupport/ed_pcm_97.pdf (accessed February 2011)

Holmes, A.G. and Schmidt, M.R. (2002) Hybrid electric powertrain including a two-mode electrically variable transmission. US Patent US6478705 B1, November 12, 2002.

Honda, Y., Nakamura, T., Higaki, T., and Takeda, Y. (1997) Motor design considerations and test results of an interior permanent magnet synchronous motor for electric vehicles. Proceedings of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, October 5–9, pp. 75–82.

Honsinger, V.P. (1980) Performance of polyphase permanent magnet machines. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 99 (4), 1510–1518.

Hsu, J.S., Nelson, S.C., Jallouk, P.A., et al. (2005) Report on Toyota Prius Motor Thermal Management. <http://www.ornl.gov/~webworks/cppr/y2001/rpt/122586.pdf> (accessed February 2011).

<http://batteryUniversity.com>

<http://Www.Compositesworld.Com/Blog/Post/Composite-Flywheels-Finally-Picking-Up-Speed>.

<http://www.mpoweruk.com>

IEEE Transactions on Magnetics, 35 (5), 4238–4246. Upadhyay, P.R., Rajagopal, K.R., and Singh, B.P. (2004) Effect of armature reaction on the performance of axial field permanent magnet brushless DC motor using FE method. IEEE Transactions on Magnetics, 40 (4), 2023–2025.

Imai, S., Takeda, N., and Horii, Y. (1997) Total efficiency of a hybrid electric vehicle. Proceedings of the Power Conversion Conference, Nagaoka.

International Conference on Electrical Machines, December, pp.589–594.

International Energy Outlook. United States Energy Information Administration (2007) Petroleum and Other Liquid Fuels, May, <http://www.eia.doe.gov/oiaf/archive/ieo07/pdf/oil.pdf> (accessed June 11, 2016).

- Ito, Y., Tomura, S., and Moriya, K. Vibration-reducing motor control for hybrid vehicles. Research Report. R&D Review of Toyota, CRDL, 40 (2).
- J. Deng, S. Li, S. Hu, C.C. Mi, and R. Ma, "Design Methodology of LLC Resonant Converters for Electric Vehicle Battery Chargers," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 63, pp. 1581–1592, 2014.
- J. Mahdavi, M.R. Nasiri, A. Agah, and A. Emadi, "Application of neural networks and State-space averaging to DC/DC PWM converters in sliding-mode operation," *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol. 10, pp. 60–67, 2005.
- Jahns, T.M. (1984) Torque production in permanent magnet synchronous motor drives with rectangular current excitation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 20 (4), 803–813.
- Jahns, T.M. (1987) Flux-weakening regime operation of an interior permanent-magnet synchronous motor drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 23 (4), 681–689.
- Jahns, T.M. and Blasko, V. (2001) Recent advances in power electronics technology for industrial and traction machine drives. *Proceedings of the IEEE*, 89 (6), 963–975.
- Jahns, T.M. and Blasko, V. (2001) Recent advances in power electronics technology for industrial and traction machine drives. *Proceedings of the IEEE*, 89, 963–975.
- Jahns, T.M. and Caliskan, V. (1999) Uncontrolled generator operation of interior PM synchronous machines following high-speed inverter shutdown. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 35 (6), 1347–1357.
- Jefferson, C.M. and Barnard, R.H. (2002) *Hybrid Vehicle Propulsion*, WIT Press, Boston, MA.
- Jefferson, C.M. and Barnard, R.H. (2002) *Hybrid Vehicle Propulsion*, WIT Press, Southampton.
- Johansen, T.A., Petersen, I., Kalkkuhl, J., and Ludemann, J. (2003) Gain-scheduled wheel slip control in automotive brake systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 11 (6), 799–811.
- Johnson, R.W., Evans, J.L., Jacobsen, P., et al. (2004) The changing automotive environment: high-temperature electronics. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 27, 164–176. See also *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Part C: Manufacturing*.
- Joshi, A., Shah, N.P., and Mi, C. (2009) Modeling and simulation of a dual clutch hybrid vehicle powertrain. 5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, September 7–11, Dearborn, MI.
- K. Keun-Wan, K. Dong-Hee, W. Dong-Gyun, and L. Byoung-Kuk, "Topology comparison for 6.6 kW On board charger: Performance, efficiency, and selection guideline," in *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2012 IEEE, 2012, pp. 1520–1524.

- Kagoshima, M. The Development of an 8 tonne Class Hybrid Hydraulic Excavator SK80H, Kobelco Technology Review, no. 31, Jan 2013.
- Kamiya, M. (2005) Development of traction drive motors for the Toyota hybrid system. International Power Electronics Conference, April 4–8.
- Kargul, J.J. (2007) Hydraulic hybrids – demonstration for port yard hostlers. EPA Presentation, July 11, 2007, <http://www.epa.gov/otaq/presentations/diesel/hydraulic-hybrid-hostler.pdf> (accessed February 2011).
- Katsis, D.C. and Lee, F.C. (1996) A single switch buck converter for hybrid electric vehicle generators. Power Electronics in Transportation, pp. 117–124.
- Kelley, R., Mazzola, M.S., and Bondarenko, V. (2006) A Scalable SiC Device for DC/DC Converters in Future Hybrid Electric Vehicles, p. 4.
- Kementerian Pertahanan Inggris (2004) Reducing the Burden on the Dismounted Soldier Capability Vision Tugas 3 – 'Prajurit Hemat Energi', http://www.innovateuk.org/assets/pdf/competition-documents/briefs/energy_efficient_soldier.pdf (diakses Februari 2011).
- Kempton, W. and Tomić, J. (2005) Vehicle-to-grid power fundamentals: calculating capacity and net revenue. Journal of Power Sources, 144, 268–279.
- Kempton, W. and Tomic, J. (2005) Vehicle-to-grid power implementation: from stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy. Journal of Power Sources, 144, 280–294.
- Kenjo, T. and Nagamori, S. (1985) Permanent Magnet and Brushless DC Motors, Clarendon Press, Oxford.
- Kersting, W.H. (1991) Radial distribution test feeders. IEEE Transactions on Power Systems, 6 (3), 975–985.
- Khluabwannarat, P., Thammarat, C., Tadsuan, S., and Bunjongjit, S. (2007) An analysis of iron loss supplied by sinusoidal, square wave, bipolar PWM inverter and unipolar PWM inverter. International Power Engineering Conference, IPEC 2007, December 3–6, pp. 1185–1190.
- Khoucha, F., Lagoun, S.M., Marouani, K., et al. (2010) Hybrid cascaded H-bridge multilevel-inverter induction-motor-drive direct torque control for automotive applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 57 (3), 892–899.
- Kim, J., Jung, J., and Nam, K. (2004) Dual-inverter control strategy for high-speed operation of EV induction motors. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 51 (2), 312–320.
- Kim, W.-G., Lee, J.-I., Kim, K.-W., et al. (2006) The temperature rise characteristic analysis technique of the traction motor for EV application. Strategic Technology, 1st International Forum, October 18–20, pp. 443–446.

- Kou, B., Li, L., Cheng, S., and Meng, F. (2005) Operating control of efficiently generating induction motor for driving hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Magnetics*, 41 (1), 488–491.
- Kramer, B., Chakraborty, S., and Kroposki, B. (2008) A review of plug-in vehicles and vehicle-to-grid capability. *IEEE Industrial Electronics Conference IECON'08*, November, Orlando, FL, pp. 2278–2283.
- Krein, P.T., Roethemeyer, T.G., White, R.A., and Masterson, B.R. (1994) Packaging and performance of an IGBT-based hybrid electric vehicle. *Power Electronics in Transportation*, pp. 47–52.
- Krishnamurthy, M., Edrington, C.S., Emadi, A., et al. (2006) Making the case for applications of switched reluctance motor technology in automotive products. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 21 (3), 659–675.
- Krishnan, R. (1996) Review of flux-weakening in high performance vector controlled induction motor drives. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, June 17–20, pp. 917–922.
- Kulkarni, M., Shim, T., and Zhang, Y. (2007) Shift dynamics and control of dual-clutch transmissions. *Mechanism and Machine Theory*, 42 (2), 168–182.
- L. Bing, L. Wenduo, L. Yan, F. C. Lee, and J.D. van Wyk, “Optimal design methodology for LLC resonant converter,” in *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06. Twenty-First Annual IEEE, 2006; Twenty-Seventh Annual IEEE, 2012*, pp. 1286–1291.
- L. Jun-Young and C. Hyung-Jun, “6.6-kW Onboard Charger Design Using DCM PFC Converter With Harmonic Modulation Technique and Two-Stage DC/DC Converter,” *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 61, pp. 1243–1252, 2014.
- L. Siqi, D. Junjun, and C.C. Mi, “Single-Stage Resonant Battery Charger With Inherent Power Factor Correction for Electric Vehicles,” *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 62, pp. 4336–4344, 2013.
- Larminie, J. and Lowry, J. (2003) *Electric Vehicle Technology Explained*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
- Li, W., Cao, J., and Zhang, X. (2010) Electrothermal analysis of induction motor with compound cage rotor used for PHEV. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57 (2), 660–668.
- Li, Y. and Mi, C. (2007) Doubly salient permanent magnet machines with skewed rotor and six-state communication control. *IEEE Transactions on Magnetics*, 43 (9), 3623–3629.
- Li, Y., Zou, J., and Lu, Y. (2003) Optimum design of magnet shape in permanent magnet synchronous motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 39 (6), 3523–3526.

- Liao, Y. and Lipo, T.A. (1993) Sizing and optimal design of doubly salient permanent magnet motors. Sixth International Conference on Electrical Machines and Drives, September, pp. 452–456.
- Liao, Y., Liang, F., and Lipo, T.A. (1992) A novel permanent magnet motor with doubly salient structure. Industry Applications Society Annual Meeting, October, pp. 308–314.
- Liao, Y., Liang, F., and Lipo, T.A. (1995) A novel permanent magnet machine with doubly salient structure. IEEE Transactions on Industry Applications, 3 (5), 1069–1078.
- Chan, C.C., Jiang, J.Z., Chen, G.H., et al. (1994) A novel polyphase multipole square-wave permanent magnet motor drive for electric vehicles. IEEE Transactions on Industry Applications, 30 (5), 1258–1266.
- Liao, Y., Liang, F., and Lipo, T.A. (1995) A novel permanent magnet motor with doubly salient structure. IEEE Transactions on Industry Applications, 31 (5), 1069–1078.
- Liaw, C.Z., Soong, W.L., Welchko, B.A., and Ertugrul, N. (2005) Uncontrolled generation in interior permanent-magnet machines. IEEE Transactions on Industry Applications, 41 (4), 945–954.
- Lipo, T.A. (1991) Synchronous reluctance machines – a viable alternative for AC drives? Electric Machines and Power Systems, 19, 659–671.
- Liu, R., Mi, C., and Gao, W. (2008) Modeling of iron losses of electrical machines and transformers fed by PWM inverters. IEEE Transactions on Magnetics, 44 (8), 2021–2028.
- Liu, Y., Qin, D., Jiang, H., and Zhang, Y. (2009) A systematic model for dynamics and control of dual clutch transmissions. Journal of Mechanical Design, 131, 061012.
- Long, S.A., Schofield, N., Howe, D., et al. (2003) Design of a switched reluctance machine for extended speed operation. Proceedings of IEEE International Electric Machines and Drives Conference, June 1–4, pp. 235–240.
- Long, S.A., Zhu, Z.Q., and Howe, D. (2001) Vibration behaviour of stators of switched-reluctance machines. IEE Proceedings – Electric Power Applications, 148 (3), 257–264.
- Long, S.A., Zhu, Z.Q., and Howe, D. (2002) Influence of load on noise and vibration of voltage and current controlled switched reluctance machines. Proceedings of IEE International Conference on Power Electronics, Machines, and Drives, April 16–18, pp. 534–539.
- Long, S.A., Zhu, Z.Q., and Howe, D. (2005) Effectiveness of active noise and vibration cancellation for switched reluctance machines operating under alternative control strategies. IEEE Transactions on Energy Conversion, 20 (4), 792–801.
- Lovelace, E.C., Jahns, T.M., Kirtley, J.L. Jr., and Lang, J.H. (1998) An interior PM starter/alternator for automotive applications. Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, December, pp. 1802–1808.

- M. Coleman, Lee, C., Zhu, C., and Hurley, W., "State-of-Charge Determination From EMF Voltage Estimation: Using Impedance, Terminal Voltage, and Current for Lead-Acid and Lithium-Ion Batteries", IEEE Trans. on Ind. Electronics, vol. 54, no. 5, Oct 2007.
- M. Coleman, Lee, C., Zhu, C., and Hurley, W., "State-of-Health Determination: Two Pulse Load Test for a VRLA Battery. From EMF Voltage Estimation: Using Impedance, Terminal Voltage, and Current for Lead-Acid and Lithium-Ion Batteries", IEEE Trans. on Ind. Electronics, vol. 54, no. 5, Oct 2007
- Gregory, B., Ultracapacitor Sizing and Packaging for Cost Effective, IOXUS white paper, <http://www.ioxus.com/wp-content/uploads/2013/08/Cost-Effective-Micro-Hybrids-130711.pdf>
- M. Yilmaz and P.T. Krein, "Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles," Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 28, pp. 2151–2169, 2013.
- Ma, W. and Jing, L. (1997) Distribution modeling and simulation based on MATLAB. 17th Conference of the Electric Power Supply Industry (CEPSi 2008), October, Macau SAR
- Maintenance Mode of the Chevrolet Volt, <http://gm-volt.com/2010/08/17/chevrolet-volt-maintenance-mode/> (accessed February 2, 2011).
- Marei, M.I., Lambert, S., Pick, R. et al. (2005) DC/DC converters for fuel cell powered hybrid electric vehicle. Vehicle Power and Propulsion Conference, September, pp. 126–129.
- Markel, T., Zolot, M., Wipke, K.B., and Pesaran, A.A. (2003) Energy storage requirements for hybrid fuel cell vehicles. Advanced Automotive Battery Conference, June 10–13, Nice, France.
- Masrur, A.M. (2008) Penalty for fuel economy – system level perspectives on the reliability of hybrid electric vehicles during normal and graceful degradation operation. IEEE Systems Journal, 2 (4), 476–483.
- Masrur, A.M., Garg, V.K., Shen, J., and Richardson, P. (2003) Comparison of system availability in an electric vehicle with multiplexed and non-multiplexed wiring harness. IEEE Vehicular Technical Society Conference Proceedings, October, Orlando, FL, pp. 3277–3283.
- Masrur, M.A. (2008) Penalty for fuel economy – system level perspectives on the reliability of hybrid electric vehicles during normal and graceful degradation operation. IEEE Systems Journal, 2 (4), 476–483.
- Masrur, M.A., Chen, Z., and Murphey, Y. (2010) Intelligent diagnosis of open and short circuit faults in electric drive inverters for real-time applications. IET Journal of Power Electronics, 3 (2), 279–291.
- Masrur, M.A., Shen, Z.J., and Richardson, P. (2004) Issues on load availability and reliability in vehicular multiplexed and non-multiplexed wiring harness systems. Society of

- Automotive Engineers (SAE) Transactions, Journal of Commercial Vehicles, 2003–01-1096, 31–39.
- Matsuo, T. and Lipo, T.A. (2004) Rotor design optimization of synchronous reluctance machine. IEEE Transactions on Energy Conversion, 9 (2), 359–365.
- Maxwell Technologies, (2006) Fuel Cells and Ultracapacitors – A Proven Value Proposition Versus Incumbent Technologies, San Diego.
- Maxwell Technologies, (2011) Ultracapacitors Help P21 to Provide Fuel Cell-Based Backup Power for Telecoms, San Diego.
- McCleer, P.J., Miller, J.M., Gale, A.R., et al. (2001) Nonlinear model and momentary performance capability of a cage rotor induction machine used as an automotive combined starter-alternator. IEEE Transactions on Industry Applications, 37 (3), 840–846.
- Mecrow, B.C. (1996) New winding configurations for doubly salient reluctance machines. IEEE Transactions on Industry Applications, 32 (6), 1348–1356.
- Mecrow, B.C., Finch, J.W., El-Kharashi, E.A., and Jack, A.G. (2002) Switched reluctance motors with segmental rotors. IEE Proceedings – Electric Power Applications, 149 (4), 245–254.
- Mellor, P.H., Roberts, D., and Turner, D.R. (1991) Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design. IEE Proceedings – Electric Power Applications, 138 (5), 205–218.
- Merrill, F.W. (1955) Permanent magnet excited synchronous motor. AIEE Transactions, 74, 1754–1760.
- Mi, C. (2006) Analytical design of permanent magnet traction drives. IEEE Transactions on Magnetics, 42 (7), 1861–1866.
- Mi, C., Filippa, M., Liu, W., and Ma, R. (2004) Analytical method for predicting the air-gap flux of interior-type permanent magnet machines. IEEE Transactions on Magnetics, 40 (1), 50–58.
- Mi, C., Hui, L., and Yi, Z. (2005) Iterative learning control of antilock braking of electric and hybrid vehicles. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 54, 486–494.
- Mi, C., Shen, J., and Natarajan, N. (2002) Field-oriented control of induction motors. IEEE Workshop on Power Electronics in Transportation (WPET'02), September.
- Mi, C., Slemon, G.R., and Bonert, R. (2003) Modeling of iron losses of permanent magnet synchronous motors. IEEE Transactions on Industry Applications, 39 (3), 734–742.
- Miller, J.M. (2003) Power electronics in hybrid electric vehicle applications. Proceedings of the 18th Applied Power Electronics Conference, February, vol. 1, pp. 23–29.

- Miller, J.M. (2006) Hybrid electric vehicle propulsion system architectures of the e-CVT type. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 21 (3), 756–767.
- Miller, J.M., Gale, A.R., McCleer, P.J., et al. (1998) Starter/alternator for hybrid electric vehicle: comparison of induction and variable reluctance machines and drives. *Proceedings of the IEEE 1998 Industry Applications Society Annual Meeting*, October 12–15, pp. 513–523.
- Miller, T.J.E. (1989) *Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives*, Oxford Science Publications, Oxford.
- Miller, T.J.E. (1993) *Switched Reluctance Motors and their Control*, Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford.
- Miller, T.J.E. (2001) *Electronic Control of Switched Reluctance Machines*, Reed, New York, pp. 227–245; (b) Williamson, S.S., Emadi, A., and Rajashekara, K. (2007) Comprehensive efficiency modeling of electric traction motor drives for hybrid electric vehicle propulsion applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56 (4), 1561–1572.
- Miller, T.J.E., McGilp, M., and Wearing, A. (1999) Motor design optimization using SPEED CAD software – practical electromagnetic design synthesis. *IEE Seminar*, Ref. no. 1999/014, pp. 1–5.
- Morimoto, S., Sanada, M., and Takeda, Y. (1994) Wide-speed operation of interior permanent magnet synchronous motors with high performance current regulator. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 30 (4), 920–926.
- Morimoto, S., Sanada, M., and Takeda, Y. (1996) *Inverter-driven synchronous motors*
- Murphey, Y.L., Masrur, A., Chen, Z.H., and Zhang, B.F. (2006) Model-based fault diagnosis in electric drives using machine learning. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 11 (3), 290–303.
- Muta, K., Yamazaki, M., and Tokieda, J. (2004) Development of new-generation hybrid system THS II – drastic improvement of power performance and fuel economy. *SAE World Congress*, March 8–11, paper no. 2004-01-0064.
- N.K. Ure, G. Chowdhary, T. Toksoz, J.P. How, M.A. Vavrina, and J. Vian, “An Automated Battery Management System to Enable Persistent Missions With Multiple Aerial Vehicles,” *Mechatronics*, *IEEE/ASME Transactions on*, vol. PP, pp. 1–12, 2014.
- Namuduri, C.S. and Murty, B.V. (1998) High power density electric drive for an hybrid electric vehicle. *Proceedings of the 13th Applied Power Electronics Conference*, February, vol. 1, pp. 34–40.
- Neacsu, D.O. and Rajashekara, K. (2001) Comparative analysis of torque-controlled IM drives with applications in electric and hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 16 (2), 240–247.

- Ohashi, H. (2003) Power electronics innovation with next generation advanced power devices. International Telecommunications Energy Conference, October, pp. 9–13.
- Olson, B.J., Shaw, S.W., and Stépán, G.S. (2003) Nonlinear dynamics of vehicle traction. *Vehicle System Dynamics*, 40 (6), 377–399.
- Onoda, S. and Emadi, A. (2004) PSIM-based modeling of automotive power systems: conventional, electric, and hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 53, 390–400.
- ORNL Review (2000) Power Electronics: Energy Manager for Hybrid Electric Vehicles, http://www.ornl.gov/info/ornlreview/v33_3_00/power.html (accessed February 2011)
- Owen, N.A., Inderwildi, O.R., and King, D.A. (2010) The status of conventional world oil reserves – hype or cause for concern? *Energy Policy*, 38, 4743 <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.enpol.2010.02.026> (accessed June 11, 2011).
- Ozpineci, B., Chinthavali, M.S., and Tolbert, L.M. (2005) A 55 kW three-phase automotive traction inverter with SiC Schottky diodes. *Vehicle Power and Propulsion Conference*, September, p. 6.
- Ozpineci, B., Tolbert, L.M., Islam, S.K., et al. (2001) Effects of silicon carbide (SiC) power devices on HEV PWM inverter losses. 2, 1061–1066.
- Ozpineci, B., Tolbert, L.M., Islam, S.K., et al. (2002) Testing, characterization, and modeling of SiC diodes for transportation applications. *33rd Power Electronics Specialists Conference*, June, pp. 1673–1678.
- Parker, R.J. and Studders, R.J. (1962) *Permanent Magnets and their Application*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Pavlic, D., Garg, V.K., Repp, J.R., and Weiss, J.A. (1988) Finite element technique for calculating the magnet sizes and inductance of permanent magnet machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 3 (1), 116–122. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36
- Priya, S. dan Inman, D. (eds) (2008) *Energy Harvesting Technologies*, 1st edn, Springer.
- Proca, A.B., Keyhani, A., and Miller, J. (2002) Sensorless sliding-mode control of induction motors using operating condition dependent models. *Power Engineering Review*, 22 (7), 50–50.
- Proca, A.B., Keyhani, A., and Miller, J.M. (2003) Sensorless sliding-mode control of induction motors using operating condition dependent models. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 18 (2), 205–212.
- Proca, A.B., Keyhani, A., El-Antably, A., et al. (2003) Analytical model for permanent magnet motors with surface mounted magnets. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 18 (3), 386–391.

- R. Jackey, M. Saginaw, P. Sanghvi, J. Gazzarri, T. Huria, and M. Ceraolo, "Battery Model Parameter Estimation Using a Layered Technique: An Example Using a Lithium Iron Phosphate Cell", SAE Paper # 2013-01-1547.
- R. Sabzehgar and M. Moallem, "A Boost-Type Power Converter for Energy-Regenerative Damping," *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol. 18, pp. 725–732, 2013.
- R. Yu, G.K.Y. Ho, B.M.H. Pong, B.W.K. Ling, and J. Lam, "Computer-Aided Design and Optimization of High-Efficiency LLC Series Resonant Converter," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 27, pp. 3243–3256, 2012.
- Raadschelders, J. dan Jansen, T. (2001) Sumber energi untuk prajurit yang diturunkan di masa depan: integrasi total konsumsi energi dalam sistem prajurit. *Jurnal Sumber Daya*, 96 (7), 160-166.
- Rahman, K.M. and Ehsani, M. (1996) Performance analysis of electric motor drives for electric and hybrid electric vehicle application. *Power Electronics in Transportation*, pp. 49–56.
- Rahman, K.M. and Schulz, S.E. (2002) Design of high-efficiency and high-torque-density switched reluctance motor for vehicle propulsion. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38 (6), 1500–1507.
- Rahman, K.M., Fahimi, B., Suresh, G., et al. (2000) Advantages of switched reluctance motor applications to EV and HEV: design and control issues. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36 (1), 111–121.
- Rahman, M.A. and Little, T.A. (1984) Dynamic performance analysis of permanent magnet synchronous motors. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 103 (6), 1277–1282.
- Rahman, M.A., Little, T.A., and Slemon, G.R. (1985) Analytical models for interior-type permanent magnet synchronous motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 21 (5), 1741–1743.
- Rahman, M.A., Vilathgamuwa, M., Uddin, M.N., and Tseng, K.J. (2003) Non-linear control of interior permanent magnet synchronous motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 39 (2), 408–416.
- Rahman, M.F. (2004) Power electronics and drive applications for the automotive industry, *Proceedings of the Power Electronics Systems and Applications Conference*, November, pp. 156–164.
- Rahman, Z., Butler, K.L., and Ehsani, M. (1999) Design studies of a series hybrid heavy-duty transit bus using V-ELPH 2.01. *Proceedings of the 49th IEEE Vehicular Technology Conference*, May, Houston, TX, vol. 3, pp. 2268–2272.
- Rahman, Z., Butler, K.L., and Ehsani, M. (1999) Designing parallel hybrid electric vehicles using V-ELPH 2.01. *Proceedings of the American Control Conference*, June 2–4, San Diego, CA.

- Rahman, Z., Butler, K.L., and Ehsani, M. (2000) Effect of extended-speed, constant-power operation of electric drives on the design and performance of EV propulsion system. SAE Future Car Congress, April, paper no. 2001-01-0699.
- Rajashekara, K. (2003) Power electronics applications in electric/hybrid vehicles. Proceedings of IECON'03, November, vol. 3, pp. 3029-3030.
- Ramamurthy, S.S. and Balda, J.C. (2001) Sizing a switched reluctance, motor for electric vehicles. IEEE Transactions on Industry Applications, 37 (5), 1256-1263.
- Rasmussen, K.F., Davies, J.H., Miller, T.J.E., et al. (2000) Analytical and numerical computation of air-gap magnetic fields in brushless motors with surface permanent magnets. IEEE Transactions on Industry Applications, 36 (6), 1547-1554.
- Rexroth-Bosch Group, Axial Piston Fixed Displacement Motor AA2FM (A2FM), Bosch product brochure.
- Rousseau, A. and Sharer, P. (2004) Comparing Apples to Apples: Well-to-wheel Analysis of Current ICE and Fuel Cell Vehicle Technologies. Argonne National Laboratory, http://www.autonomie.net/docs/6%20-%20Papers/WTW/apples_to_apples.pdf (accessed June 11, 2016).
- Russenschuck, S. (1990) Mathematical optimization techniques for the design of permanent magnet machines based on numerical field calculation. IEEE Transactions on Magnetics, 26 (2), 638-641.
- Russenschuck, S. (1992) Application of Lagrange multiplier estimation to the design optimization of permanent magnet synchronous machines. IEEE Transactions on Magnetics, 28 (2), 1525-1528.
- S.S. Zhang, "The effect of the charging protocol on the cycle life of a Li-ion battery," Journal of Power Sources, vol. 161, pp. 1385-1391, 10/27/2006.
- SAE International (1999) Surface Vehicle Recommended Practice SAE J1711 – Recommended Practice for Measuring the Exhaust Emissions and Fuel Economy of Hybrid-electric Vehicles, March.
- SAE International (2009) Surface Vehicle Information Report SAE J2841 – Utility Factor Definitions for Plug-in Hybrid Electric Vehicles Using 2001 U.S. DOT National Household Travel Survey Data, March.
- Safi, S.K., Acarnley, P.P., and Jack, A.G. (1995) Analysis and simulation of the high-speed torque performance of brushless DC motor drives. IEE Proceedings – Electric Power Applications, 142 (3), 191-200.
- Salmasi, F.R., Najafabadi, T.A., and Maralani, P.J. (2010) An adaptive flux observer with online estimation of DC-link voltage and rotor resistance for VSI-based induction motors. IEEE Transactions on Power Electronics, 25 (5), 1310-1319.

- Sanna, L. (2005) Driving the Solution – the Plug-in Hybrid Vehicle. http://mydocs.epri.com/docs/CorporateDocuments/EPRI_Journal/2005-Fall/1012885_PHEV.pdf (accessed February 2, 2011).
- Sanna, L. (2005) Driving the Solution – the Plug-in hybrid Vehicle, http://mydocs.epri.com/docs/CorporateDocuments/EPRI_Journal/2005-Fall/1012885_PHEV.pdf (accessed June 11, 2016).
- Schofield, N. and Long, S.A. (2005) Generator operation of a switched reluctance starter/generator at extended speeds. Proceedings of IEEE Conference on Vehicle Power and Propulsion, September 7–9, pp. 453–460.
- Schultz, G.A., Tsai, L.W., Higuchi, N., and Tong, I.C. (2001) Development of a novel parallel hybrid transmission. SAE 2001 World Congress, March, Detroit, MI.
- Serrao, V., Lidozzi, A., Solero, L., and Di Napoli, A. (2007) EMI characterization and communication aspects for power electronics in hybrid vehicles. European Conference on Power Electronics and Applications, September, Aalborg, Denmark, pp. 1–10.
- Shi, Y.F., Zhu, Z.Q., and Howe, D. (2006) Torque-speed characteristics of interior-magnet machines in brushless AC and DC modes, with particular reference to their flux-weakening performance. Proceedings of the International Power Electronics and Motion Control, August 13–16, pp. 1847–1851.
- Siemens Product Information, Diesel-Electric Locomotives.
- Siemens Technical Information, Diesel-Electric Locomotive SD70MAC.
- SINM (Studio di Ingegneria Navale e Meccanica) (2004) Focus on Propulsion Pods. Report 060/2004.
- Slemon, G.R. and Liu, X. (1992) Modeling and design optimization of permanent magnet motors. *Electric Machines and Power Systems*, 20, 71–92.
- Solero, L., Lidozzi, A., and Pomilio, J.A. (2005) Design of multiple-input power converter for hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 20, 1007–1016.
- Soong, W.L. and Ertugrul, N. (2002) Field-weakening performance of interior permanent-magnet motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38 (5), 1251–1258.
- Soong, W.L., Staton, D.A., and Miller, T.J.E. (1995) Design of a new axially-laminated interior permanent magnet motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31 (2), 358–367.
- Sooriyakumar, G., Perryman, R., and Dodds, S.J. (2007) Analytical thermal modelling for permanent magnet synchronous motors. Universities Power Engineering 42nd International Conference, UPEC 2007, September 4–6, pp. 192–196.

- Staton, D., Boglietti, A., and Cavagnino, A. (2005) Solving the more difficult aspects of electric motor thermal analysis in small and medium size industrial induction motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20 (3), 620–628.
- Staton, D.A. and Cavagnino, A. (2008) Convection heat transfer and flow calculations suitable for electric machines thermal models. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55 (10), 3509–3516.
- Steen, H. v., (2006), Real-time Evaluation System for State-of-Charge Estimation, doctoral dissertation, University of Twente, Netherlands.
- Stone, K. (2009) Hybrid vehicle vibration reduction system and method. International Patent WO/2009/134695, May 2009, pp. 516–521.
- Sudhoff, S.D., Corzine, K.A., Glover, S.F., et al. (1998) DC link stabilized field oriented control of electric propulsion systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 13 (1), 27–33.
- synchronous machine drive system for electric vehicle propulsion. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 35 (4), 547–559.
- T. Hu, B. Zanchi, and J. Zhao, “Determining battery parameters by simple algebraic method”, 2011 American Control Conference, San Francisco, CA, USA, June 29–July 01, 2011.
- T. Kim, “A Hybrid Battery Model Capable of Capturing Dynamic Circuit Characteristics and Nonlinear Capacity Effects”, MSc Thesis, University of Nebraska, 2012.
- Table 1060. State Motor Vehicle Registrations: 1990 to 2007, <http://www.statista.com/statistics/183505/number-of-vehicles-in-the-united-states-since-1990/> (accessed June 11, 2016).
- Tang, S.C., Keim, T.A., and Perreault, D.J. (2005) Thermal modeling of Lundell alternators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20 (1), 25–36.
- Tatoh, N., Hirose, Y., Nagai, M., et al. (2000) Thermal management analysis of high-power electronic modules using Cu bonded AlN substrates. International Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, May, vol. 2, pp. 297–302.
- Taylor, G.I. (1935) Distribution of velocity and temperature between concentric cylinders. *Proceedings of the Royal Society*, 159 (Pt A), 546–578.
- The Energy Report, <http://comptroller.texas.gov/specialrpt/energy/> (accessed June 11, 2016).
- The World Factbook, Oil Consumption by Country, http://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.PCAP.KG.OE?order=wbapi_data_value_2_014+wbapi_data_value+wbapi_data_value-last&sort=desc (accessed June 11, 2016).
- Tolbert, L.M., Peng, F.Z., and Habetler, T.G. (1998) Multilevel inverters for electric vehicle applications. *Power Electronics in Transportation*, pp. 79–84.

- Traci, R.M., Acebal, R., and Mohler, T. (1999) Integrated thermal management of a hybrid electric vehicle. *IEEE Transactions on Magnetics*, 35, 479–483.
- Tsai, L.W., Schultz, G.A., and Higuchi, N. (2001) A novel parallel hybrid transmission. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 123, 161–168.
- Ucarol, H., Kaypmaz, A., Tuncay, R., and Tur, O. (n.d.) Sebuah studi perbandingan kinerja antara kendaraan hibrida konvensional, seri hibrida dan paralel, www.emo.org.tr/ekler/c792a8279211dec_ek.pdf (diakses Februari 2011).
- Uddin, M.N., Radwan, T.S., and Rahman, M.A. (2002) Performance of interior permanent magnet motor drive over wide speed range. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 17 (1), 79–84.
- United States Environmental Protection Agency (2006) Fuel Economy Labeling of Motor Vehicles: Revisions to Improve Calculation of Fuel Economy Estimates, Final Rule, 40 CFR Parts 86 and 600, December 27, 2006, <http://www.epa.gov/fedrgstr/EPA-AIR/2006/December/Day-27/a9749.pdf>.
- US EPA (2004) Clean automotive technology – innovation that works. World’s First Full Hydraulic Hybrid SUV, Presented at 2004 SAE World Congress, <http://www.epa.gov/oms/technology/420f04019.pdf> (accessed February 2011).
- US Oil Demand by End-Use Sector (1950–2004), http://www.eia.doe.gov/pub/oil_gas/petroleum/analysis_publications/oil_market_basics/dem_image_us_cons_sector.htm (accessed June 11, 2016).
- Vaez, S., John, V.I., and Rahman, M.A. (1999) An on-line loss minimization controller for interior permanent magnet motor drives. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 14 (4), 1435–1440.
- Vezzini, A. and Reichert, K. (1996) Power electronics layout in a hybrid electric or electric vehicle drive system. *Power Electronics in Transportation*, pp. 57–63.
- Villeneuve, A. (2004) Dual mode electric infinitely variable transmission. *Proceedings of the SAE TOPTECH Meeting on Continuously Variable Transmission*, March 8–11, Detroit, MI, pp. 1–11.
- Walsh, E. (2004) Hybrids on the High Seas: Fuel Cells for Future Ships, http://www.news.navy.mil/search/display.asp?story_id=12221 (diakses Februari 2011).
- Wang, C. and Nehrir, M.N. (2003) A dynamic model for PEM fuel cells using electrical circuit. *Proceedings of 35th North American Power Symposium*, October, Rolla, MO, pp. 30–35.
- Wang, C., Nehrir, M.H., and Gao, H. (2006) Control of PEM fuel cell distributed generation systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21 (2), 586–595.
- Wang, D., Pan, S., Lin, S., and Guan, C. Design of Energy Storage Unit for Hybrid Excavator Power Management, *IEEE VPPC Conf.*, Sep 2008.

- Wang, J.B., Xia, Z.P., and Howe, D. (2005) Three-phase modular permanent magnet brushless machine for torque boosting on a downsized ICE vehicle. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54 (3), 809–816.
- Wang, T., Zheng, P., and Cheng, S. (2005) Design characteristics of the induction motor used for hybrid electric vehicle. *IEEE Transactions on Magnetics*, 41 (1), 505–508.
- Wang, T., Zheng, P., Zhang, Q., and Cheng, S. (2005) Design characteristics of the induction motor used for hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Magnetics*, 41 (1), 505–508.
- Welchko, B.A. and Nagashima, J.M. (2003) The influence of topology selection on the design of EV/HEV propulsion systems. *Power Electronics Letters*, 1 (2), 36–40
- West, J.G.W. (1994) DC, induction, reluctance and PM motors for electric vehicles. *Power Engineering Journal*, 8 (2), 77–88.
- White, S.B., Gallego, N.C., Johnson, D.D., et al. (2004) Graphite foam for cooling of automotive power electronics. *Power Electronics in Transportation*, pp. 61–65.
- Williamson, S., Lukic, M., and Emadi, A. (2006) Comprehensive drive train efficiency analysis of hybrid electric and fuel cell vehicles based on motor-controller efficiency modeling. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 21, 730–740.
- Williamson, S.S. and Emadi, A. (2005) Comparative assessment of hybrid electric and fuel cell vehicles based on comprehensive well-to-wheels efficiency analysis. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54 (3), 856–862.
- Wipke, K.B., Markel, T., and Nelson, D. (2001) Optimizing energy management strategy and degree of hybridization for a hydrogen fuel cell SUV. 18th Electric Vehicle Symposium, EVS 18, Berlin, Germany.
- World Population, http://www.google.com/publicdata?ds=wb-wdi&met=sp_pop_totl&tdim=true&dl=en&hl=en&q=world+population (accessed June 11, 2016).
- Wu, C.Y. and Pollock, C. (1993) Time domain analysis of vibration and acoustic noise in the switched reluctance drive. *Proceedings of International Conference on Electrical Machines and Drives*, October, pp. 558–563.
- Wu, C.Y. and Pollock, C. (1995) Analysis and reduction of acoustic noise in the switched reluctance drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31 (6), 91–98.
- X. Gong, R. Xiong, and C. Mi, “A Data-Driven Bias Correction Method Based Lithium-ion Battery Modeling Approach for Electric Vehicles Application”, 2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC).
- X. Zhang and C. Mi, *Vehicle Power Management: Modeling, Control and Optimization*: Springer, 2011.

- Xingyi, Xu (1999) Automotive power electronics – opportunities and challenges [for electric vehicles]. International Conference on Electric Machines and Drives, May, pp. 260–262.
- Yoo, S., An, S., Park, C., and Kim, N. Design and Control of Hybrid Electric Power System for a Hydraulically Actuated Excavator, SAE Paper #: 2009–0102927.
- Zare, F. (2009) EMI in Modern AC Motor Drive Systems, <https://ewh.ieee.org/soc/emcs/acstrial/newsletters/summer09/EMIinModernAC.pdf> (accessed February 2011).
- Zeraoulia, M., Benbouzid, M.E.H., and Diallo, D. (2006) Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: a comparative study. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 55 (6), 1756–1764.
- Zhang, Y., Lin, H., Zhang, B., and Mi, C. (2006) Performance modeling of a multimode parallel hybrid powertrain. Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 128 (1), 79–80.
- Zhou, P., Rahman, M.A., and Jabbar, M.A. (1994) Field and circuit analysis of permanent magnet machines. IEEE Transactions on Magnetics, 30 (4), 1350–1359.
- Zhu, Z.Q. and Howe, D. (2007) Electrical machines and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles. Proceedings of the IEEE, 95 (4), 746–765.
- Zhu, Z.Q., Chen, Y.S., and Howe, D. (2000) Online optimal field weakening control of
- Zhu, Z.Q., Shen, J.X., and Howe, D. (2006) Flux-weakening characteristics of trapezoidal back-EMF machines in brushless DC and AC modes. Proceedings of the International Power Electronics and Motion Control, August 13–16, pp. 908–912.

Mobil Listrik Hybrid

Dr. Ir. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM

BIO DATA PENULIS



Penulis memiliki berbagai disiplin ilmu yang diperoleh dari Universitas Diponegoro (UNDIP) Semarang. dan dari Universitas Kristen Satya Wacana (UKSW) Salatiga. Disiplin ilmu itu antara lain teknik elektro, komputer, manajemen dan ilmu sosiologi. Penulis memiliki pengalaman kerja pada industri elektronik dan sertifikasi keahlian dalam bidang Jaringan Internet, Telekomunikasi, Artificial Intelligence, Internet Of Things (IoT), Augmented Reality (AR), Technopreneurship, Internet Marketing dan bidang pengolahan dan analisa data (komputer statistik).

Penulis adalah pendiri dari Universitas Sains dan Teknologi Komputer (Universitas STEKOM) dan juga seorang dosen yang memiliki Jabatan Fungsional Akademik Lektor Kepala (Associate Professor) yang telah menghasilkan puluhan Buku Ajar ber ISBN, HAKI dari beberapa karya cipta dan Hak Paten pada produk IPTEK. Penulis juga terlibat dalam berbagai organisasi profesi dan industri yang terkait dengan dunia usaha dan industri, khususnya dalam pengembangan sumber daya manusia yang unggul untuk memenuhi kebutuhan dunia kerja secara nyata.



YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

PENERBIT :

YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

JL. Majapahit No. 605 Semarang
Telp. (024) 6723456. Fax. 024-6710144
Email : penerbit_ypat@stekom.ac.id

Dr. Ir. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM

Mobil Listrik Hybrid



YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

PENERBIT :

YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

JL. Majapahit No. 605 Semarang

Telp. (024) 6723456. Fax. 024-6710144

Email : penerbit_ypat@stekom.ac.id