

REKAYASA DAN PENGKODISIAN ENERGI TERBARUKAN

Penulis: DR. RAMADONI SYAHPUTRA

REKAYASA DAN PENGKODISIAN
ENERGI TERBARUKAN

DR. RAMADONI SYAHPUTRA



Penerbit LP3M UMY



REKAYASA DAN PENGKODISIAN ENERGI TERBARUKAN

DR. RAMADONI SYAHPUTRA



Penerbit LP3M UMY

REKAYASA DAN PENGKONDISIAN ENERGI TERBARUKAN

DR. RAMADONI SYAHPUTRA



Penerbit LP3M UMY

ISBN 978-602-5450-08-2



REKAYASA DAN PENGKONDISIAN ENERGI TERBARUKAN

Penulis : Dr. Ramadoni Syahputra

Editor : Dr. Indah Soesanti

@2019 LP3M UMY Yogyakarta

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

Diterbitkan pertama kali oleh

Penerbit LP3M UMY Yogyakarta

2019



Anggota IKAPI

UNDANG-UNDANG REPUBLIK INDONESIA
NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA
Pasal 72:

1. Barangsiapa dengan sengaja dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 ayat (1) atau Pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana dengan pidana penjara masing-masing paling singkat 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp 1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).
2. Barangsiapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu Ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit.

PRAKATA

Bismillaahirrahmaanirrahiim

Syukur alhamdulillah penulis panjatkan ke hadirat ALLAH SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan naskah buku ajar berjudul “Rekayasa dan Pengkondisian Energi Terbarukan”. Dengan penulisan buku ajar ini diharapkan dapat membantu para pembaca khususnya mahasiswa Program Studi Teknik Elektro untuk lebih mengenal dan memahami konsep elektromagnetik dan aplikasinya dalam berbagai bidang. Buku ajar ini dapat digunakan sebagai acuan utama oleh mahasiswa dan dosen khususnya Program Studi Teknik Elektro dalam proses pembelajaran matakuliah Rekayasa dan Pengkondisian Energi Terbarukan. Buku ajar ini dapat juga digunakan sebagai acuan tambahan untuk mata-mata kuliah yang berhubungan dengan aplikasi pembangkit tenaga listrik dan energi terbarukan seperti mata kuliah Sistem Tenaga Listrik, Mesin-mesin Listrik, Teknologi Pembangkit Tenaga listrik, dan lain-lain.

Pada bagian awal buku ini diuraikan tentang sistem tenaga listrik beserta perkembangannya diantaranya tentang kehadiran pembangkit tersebar. Pembangkitan tersebar telah menjadi isu penting dalam sistem tenaga listrik modern dalam dekade terakhir. Selanjutnya diuraikan juga tentang sistem transmisi dan distribusi daya listrik, karena merupakan sistem yang terhubung dengan pembangkitan tersebar. Pada bagian berikutnya diuraikan sistem-sistem pembangkit energi terbarukan yang merupakan bagian dari pembangkitan tersebar yang diinjeksikan ke grid sistem transmisi atau distribusi, di antaranya PLTMH, PLTAngin, PLTS, dan Fuel Cell. Dalam bagian ini juga diuraikan hasil-hasil penelitian penulis beserta mahasiswa bimbingan penulis yaitu aplikasi solar home system (SHS) dalam membantu UMKM dan simulasi pembangkit listrik tenaga angin dengan sistem pengendaliannya. Pada bagian akhir buku ini dilengkapi dengan pengendalian berbasis elektronika daya yang umum digunakan dalam sistem tenaga listrik.

Penyelesaian buku ajar ini tidak lepas dari banyak pihak yang telah membantu. Oleh karena itu bersama ini penulis menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. Dr. Ir. H. Gunawan Budiyo, M.P., sebagai Rektor Universitas Muhammadiyah Yogyakarta,

2. Dr. Ir. Gatot Supangkat, M.P., sebagai Kepala LP3M UMY,
3. Jazaul Ikhsan, ST., MT., Ph.D., sebagai Dekan Fakultas Teknik UMY,
4. Budi Nugroho, S.Sos., selaku Kepala Divisi Publikasi LP3M UMY yang telah banyak membantu sehingga ISBN buku ini dapat diperoleh,
5. Seluruh dosen, karyawan, dan mahasiswa Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik UMY, yang telah banyak membantu dan memberikan masukan kepada penulis dan dalam mengemban tugas-tugas yang diamanahkan kepada penulis,
6. Almarhumah Ibunda dan Almarhum Ayahanda, semoga Allah SWT mengampuni dosa-dosamu, senantiasa melimpahkan kasih sayang-Nya sebagaimana kasih sayangmu, juga pahit getir perjuanganmu dalam mendidik dan membesarkan putramu ini.
7. Isteriku tercinta Dr. Indah Soesanti, S.T., M.T., yang telah banyak membantu dan memberikan masukan yang sangat berguna dalam penyelesaian buku ajar ini,
8. Semua pihak yang telah membantu yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Semoga semuanya tercatat sebagai amal shalih yang mendapatkan balasan di dunia dan akhirat kelak, amin ya robbal 'alamin.

Penulis menyadari bahwa buku ajar ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu segala kritik dan saran yang bersifat membangun akan penulis terima dengan lapang dada. Akhirnya, semoga buku ajar ini dapat bermanfaat dalam proses pembelajaran khususnya pada Program Studi Teknik Elektro.

Yogyakarta, Juli 2019

Penulis,

Dr. Ramadoni Syahputra

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMBUNG	.....	i
HALAMAN INFORMASI PENERBITAN	.....	ii
PRAKATA	.....	iii
DAFTAR ISI	.....	iv
1. PENGANTAR SISTEM TENAGA LISTRIK	.....	1
1.1. Sistem Tenaga Listrik	.....	1
1.2. Pembangkit Tersebar	.....	5
2. KARAKTERISTIK SISTEM TRANSMISI DAYA LISTRIK	.....	17
2.1. Pendahuluan	.....	17
2.2. Tegangan Saluran Transmisi	.....	19
2.3. Komponen Utama Saluran Transmisi	.....	20
2.4. Parameter Saluran Transmisi	.....	22
3. REPRESENTASI SALURAN TRANSMISI	.....	39
3.1. Pendahuluan	.....	39
3.2. Klasifikasi Saluran Transmisi	.....	41
3.3. Diagram Pengganti Saluran Transmisi	.....	43
3.4. Rangkaian Kutub Empat	.....	52
3.5. Saluran Transmisi sebagai Kutub Empat	.....	53
3.6. Kompensasi pada Saluran Transmisi	.....	57
4. SISTEM DISTRIBUSI DAYA LISTRIK	.....	69
4.1. Pendahuluan	.....	69
4.2. Subtransmisi	.....	72
4.3. Gardu Induk Distribusi	.....	75
4.4. Sistem Distribusi Primer dan Sekunder	.....	77
4.5. Transformator Distribusi	.....	83

5. FUEL CELL	89
5.1. Pendahuluan	89
5.2. Produksi Hidrogen	91
5.3. Konsep Fuel Cell	94
5.4. Aplikasi Hidrogen	99
5.5. Penetrasi Pasar Hidrogen	105
6. PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO	113
6.1. Pendahuluan	113
6.2. Sejarah dan Prinsip Kerja PLTMH	116
7. PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA	122
7.1. Pendahuluan	122
7.2. Implementasi Solar Sel	129
8. PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN	139
8.1. Pendahuluan	139
8.2. Konsep Dasar PLT Angin	140
8.3. Doubly-Fed Induction Generator	145
8.4. Simulasi PLT Angin	147
9. KENDALI SISTEM PEMBANGKIT TERSEBAR: KOMPONEN DASAR ELEKTRONIKA DAYA	159
9.1. Pendahuluan	159
9.2. Piranti Semikonduktor Daya	161
9.3. Karakteristik Umum Dioda	168
9.4. Efek Zener dan Avalance	170
9.5. Transistor Daya	171
9.6. Pabrikasi BJT	172
9.7. Perkembangan Pabrikasi Penyakelar Daya.....	173

10. KENDALI SISTEM PEMBANGKITAN TERSEBAR:	
RANGKAIAN ELEKTRONIKA DAYA	191
10.1. Penyearah Dioda	191
10.2. Penyearah Gelombang-Setengah Fase Tunggal	191
10.3. Penyearah Gelombang-Penuh Fase Tunggal	195
10.4. Penyearah Fase Jamak	196
10.5. Konverter DC-DC	198
10.6. Prinsip Operasi Penurun Tegangan	198
10.7. Konverter Penurun Tegangan dengan Beban RL	200
10.8. Konverter Penaik Tegangan dengan Beban RL.....	202
10.9. Inverter PWM	203
10.10. Penyearah Terkontrol	210
 DAFTAR PUSTAKA	 219
GLOSARIUM	223
INDEKS	227

« *halaman ini sengaja dikosongkan* »

BAB I

PENGANTAR SISTEM TENAGA LISTRIK

Tujuan Instruksional Umum:

Memberikan wawasan tentang sistem tenaga listrik disertai perkembangan dan teknologinya dalam dekade terakhir.

Tujuan Instruksional Khusus:

1. Memberikan pengetahuan tentang pengertian sistem tenaga listrik.
2. Memberikan pengetahuan tentang prinsip dan konfigurasi sistem tenaga listrik .
3. Memberikan pengetahuan tentang komponen sistem tenaga listrik.
4. Memberikan pengetahuan tentang pembangkitan tersebar dalam sistem tenaga listrik.
5. Memberikan pengetahuan tentang prospek sistem tenaga listrik.

1.1 SISTEM TENAGA LISTRIK

Salah satu cara paling ekonomis, mudah dan aman untuk mengirimkan energi adalah melalui bentuk energi listrik. Energi listrik dapat secara kontinyu dikirimkan dari satu tempat ke tempat lain yang jaraknya berjauhan dalam suatu sistem tenaga listrik. Sistem tenaga listrik merupakan kumpulan dari komponen-komponen atau alat-alat listrik seperti generator, transformator, saluran transmisi, saluran distribusi, dan beban, yang dihubungkan-hubungkan dan membentuk suatu sistem.

Industri tenaga listrik telah dimulai sejak tahun 1882 ketika pusat pembangkit daya listrik pertama yang bernama *Pearl Street Electric Station* mulai beroperasi di kota New York, Amerika Serikat. Selanjutnya industri tenaga listrik sangat pesat perkembangannya, dan stasiun-stasiun pembangkitan dan jaringan transmisi dan distribusi telah bermunculan di berbagai negara.

Energi listrik merupakan energi yang sangat bermanfaat. Tidak dapat dipungkiri lagi bahwa manusia dewasa ini sudah demikian besar tingkat

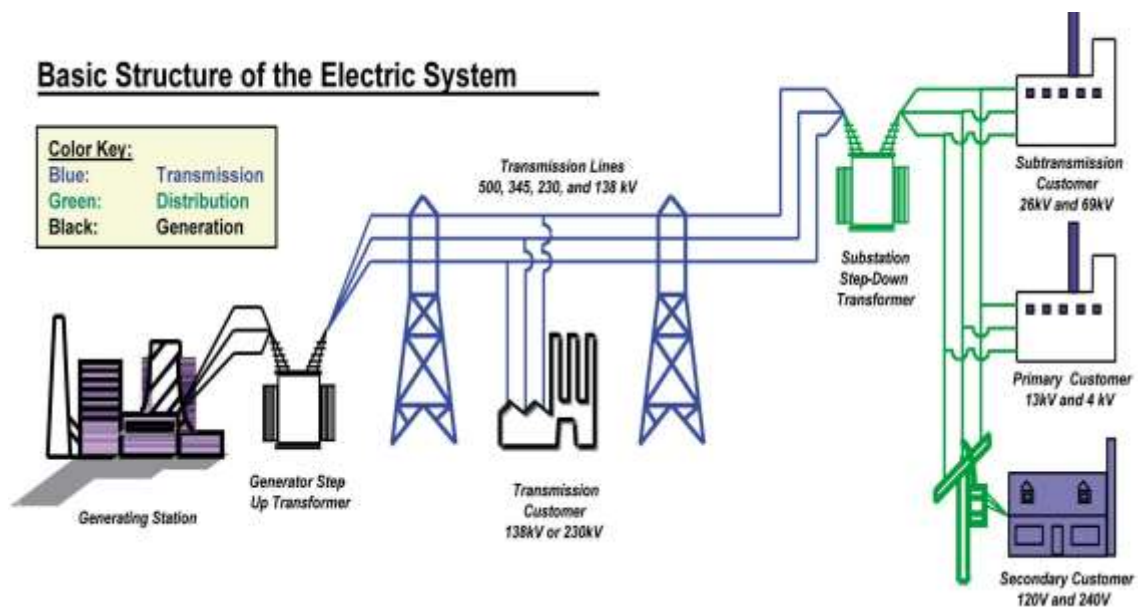
ketergantungannya terhadap energi listrik. Sehingga energi listrik bagi kebutuhan hidup manusia dewasa ini sudah hampir "setara" dengan oksigen. Bahkan ukuran kemajuan suatu negara dapat diukur dari tingkat konsumsi energi listriknya. Sebagai contoh Amerika Serikat yang merupakan negara sebagai negara yang sangat maju pada tahun 2000 mempunyai kapasitas terpasang pembangkit listrik total sekitar 1200 GW atau $1,2 \times 10^{12}$ Watt. Dapat dibandingkan dengan negara kita tercinta, Indonesia, yang masih merupakan negara berkembang pada akhir tahun 2004 untuk sistem Jawa-Bali mempunyai kapasitas terpasang pembangkit listrik sekitar 20 GW. Konsumen listrik di Indonesia sebagian besar berada di Jawa-Bali, sehingga sebagian besar pembangkit listriknya terpusat di pulau Jawa dan Bali.

Berdasarkan data statistik PT PLN (Persero) tahun 2013, pencapaian rasio elektrifikasi seluruh Indonesia baru mencapai 78,06 % pada tahun 2013. Rasio ini Dengan pertumbuhan jumlah pelanggan rumah tangga dari 46.219.780 pelanggan pada akhir tahun 2012 menjadi 50.116.127 pelanggan pada akhir tahun 2013. Selanjutnya pada akhir Desember 2013, total kapasitas terpasang dan jumlah unit pembangkit PLN mencapai 34.206 MW dan 4.925 unit, dengan 26.768 MW (78,26%) berada di Jawa. Total kapasitas terpasang meningkat 3,96% dibandingkan dengan akhir Desember 2012. Prosentase kapasitas terpasang per jenis pembangkit sebagai berikut : PLTU 15.554 MW (45,47%), PLTGU 8.814 MW (25,77%), PLTD 2.848 MW (8,33%), PLTA 3.520 MW (10,29%), PLTG 2.894 MW (8,46%), PLTP 568 MW (1,67%), PLT Surya dan PLT Bayu 8,37 MW (0,02%). Beban puncak pada tahun 2013 mencapai 30.834 MW, meningkat 6,76% dibandingkan tahun sebelumnya. Beban puncak sistem interkoneksi Jawa - Bali mencapai 22.575 MW, atau naik 6,30% dari tahun sebelumnya.

Secara umum, definisi sistem tenaga listrik meliputi sistem pembangkitan, sistem transmisi, dan sistem distribusi, yang secara garis besar ditunjukkan pada Gambar 1.1. Belakangan ini sistem distribusi jika dilihat dari skala nasional, diperkirakan sama dengan biaya investasi fasilitas pembangkitan. Sistem distribusi bersama-sama dengan sistem pembangkitan berdasarkan pengalaman biasanya

menelan biaya investasi hingga 80% dari total investasi yang dikeluarkan untuk sistem tenaga listrik.

Siklus aliran energi listrik pada sistem tenaga listrik dapat dijelaskan sebagai berikut. Pada pusat pembangkit, sumber daya energi primer seperti bahan bakar fosil (minyak, gas alam, dan batubara), hidro, panas bumi, dan nuklir diubah menjadi energi listrik. Generator sinkron mengubah energi mekanis yang dihasilkan pada poros turbin menjadi energi listrik tiga fasa. Melalui transformator *step-up*, energi listrik ini kemudian dikirimkan melalui saluran transmisi bertegangan tinggi menuju pusat-pusat beban.



Gambar 1.1. Komponen utama sistem tenaga listrik.

Peningkatan tegangan dimaksudkan untuk mengurangi jumlah arus yang mengalir pada saluran transmisi. Dengan demikian saluran transmisi bertegangan tinggi akan membawa aliran arus yang rendah dan berarti mengurangi rugi panas (*heat loss*) I^2R yang menyertainya. Ketika saluran transmisi mencapai pusat beban, tegangan tersebut kembali diturunkan menjadi tegangan menengah melalui transformator *step-down*. Di pusat-pusat beban yang terhubung dengan saluran

distribusi, energi listrik ini diubah menjadi bentuk-bentuk energi terpakai lainnya seperti energi mekanis (motor), penerangan, pemanas, pendingin, dan sebagainya.

Energi listrik merupakan bentuk energi yang sangat bermanfaat. Kemajuan suatu negara dapat diukur berdasarkan konsumsi energi listrik pada negara tersebut. Energi listrik merupakan bentuk energi yang “menyenangkan”, karena dapat dengan mudah disalurkan serta dikonversikan ke berbagai bentuk energi lain. Energi listrik dibangkitkan pada pusat-pusat pembangkit tenaga listrik seperti pembangkit listrik tenaga air (PLTA), pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), pembangkit listrik tenaga gas (PLTG), pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN), dan lain-lain. Pusat-pusat pembangkit listrik tersebut umumnya jauh dari daerah-daerah dimana energi listrik itu digunakan, yang disebut sebagai pusat-pusat beban (*load centres*). Oleh karena itu energi listrik yang dibangkitkan harus disalurkan melalui suatu saluran transmisi. Karena tegangan yang dihasilkan generator umumnya relatif rendah (berkisar 6 kV hingga 24 kV), maka tegangan ini biasanya dinaikkan dengan bantuan transformator daya ke tingkat tegangan yang lebih tinggi antara 30 kV sampai 500 kV (di beberapa negara maju bahkan sudah sampai 1000 kV).

Tingkat tegangan yang lebih tinggi ini selain untuk memperbesar daya hantar saluran yang berbanding lurus dengan kuadrat tegangan, juga untuk memperkecil rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada saluran. Dengan mempertinggi tegangan, maka timbul suatu persoalan lain yaitu tingkat isolasi yang harus lebih tinggi, dengan demikian biaya peralatan juga semakin tinggi.

Penurunan tegangan dari tingkat tegangan transmisi pertama-tama dilakukan di gardu induk (GI), dimana tegangan diturunkan ke tegangan yang lebih rendah misalnya dari 500 kV ke 150 kV, atau dari 150 kV ke 70 kV, dan sebagainya. Kemudian penurunan kedua dilakukan di gardu induk distribusi dari 150 kV ke 20 kV atau dari 70 kV ke 20 kV. Tegangan 20 kV ini disebut tegangan distribusi primer.

1.2 PEMBANGKIT TERSEBAR

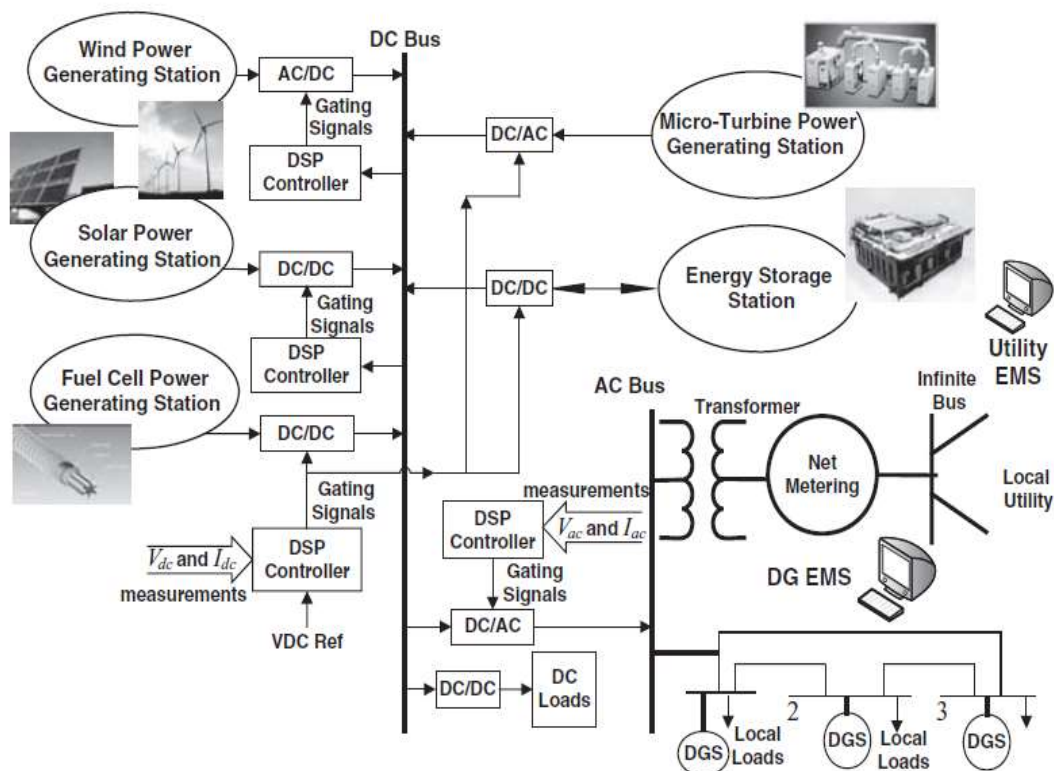
Dewasa ini energi listrik telah menjadi kebutuhan pokok umat manusia, sejalan dengan perkembangan ekonomi, sosial, dan budaya. Sementara itu kemampuan PLN dalam menyediakan tenaga listrik kepada masyarakat Indonesia sangat terbatas. Berdasarkan data Direktorat Jenderal Listrik dan Pemanfaatan Energi (DJLPE) Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral RI, pencapaian rasio elektrifikasi baru mencapai 64 % dan rasio desa berlistrik mencapai 88 % dari total sekitar 66.000 desa pada tahun 2008. Di sisi lain Indonesia memiliki begitu banyak potensi air yang belum dimanfaatkan secara optimal, yaitu sekitar 75,67 GW, namun baru sekitar 4.2 GW termanfaatkan dan diantaranya potensi untuk mini/mikrohidro sekitar 450 MW yang baru termanfaatkan sekitar 230 MW terpasang sampai pada tahun 2008.

Teknologi pengembangan dan pemanfaatan energi telah memegang peranan penting dalam aspek sosial dan ekonomi baik skala kecil hingga besar, dari skala rumah tangga hingga taraf nasional dan internasional. Akan tetapi persoalan energi tidak berdiri sendiri, karena selalu terkait dengan persoalan lingkungan dan dampak ikutannya. Hingga saat ini baik Negara Indonesia maupun negara-negara lain di dunia masih tergantung kepada bahan bakar fosil untuk menghasilkan energi listrik, terutama bahan bakar minyak dan batubara. Selain persoalan lingkungan yang diakibatkan pembangkit listrik dengan bahan bakar fosil ini, juga masalah ketersediaannya. Bahan bakar fosil merupakan jenis sumber energi yang tak-terbarukan (*non-renewable energy*), sehingga lambat laun persediaan semakin menipis dan berakibat pada kecenderungan harga yang semakin tinggi.

Karena persoalan energi dengan bahan bakar fosil semakin lama menimbulkan persoalan yang menyulitkan, maka para ahli dari berbagai Negara telah melakukan terobosan-terobosan baru dengan menggiatkan pengelolaan sumber energi terbarukan untuk membangkitkan energi listrik, di antaranya energi air, angin, surya, ombak laut, biomassa, dan lain-lain.

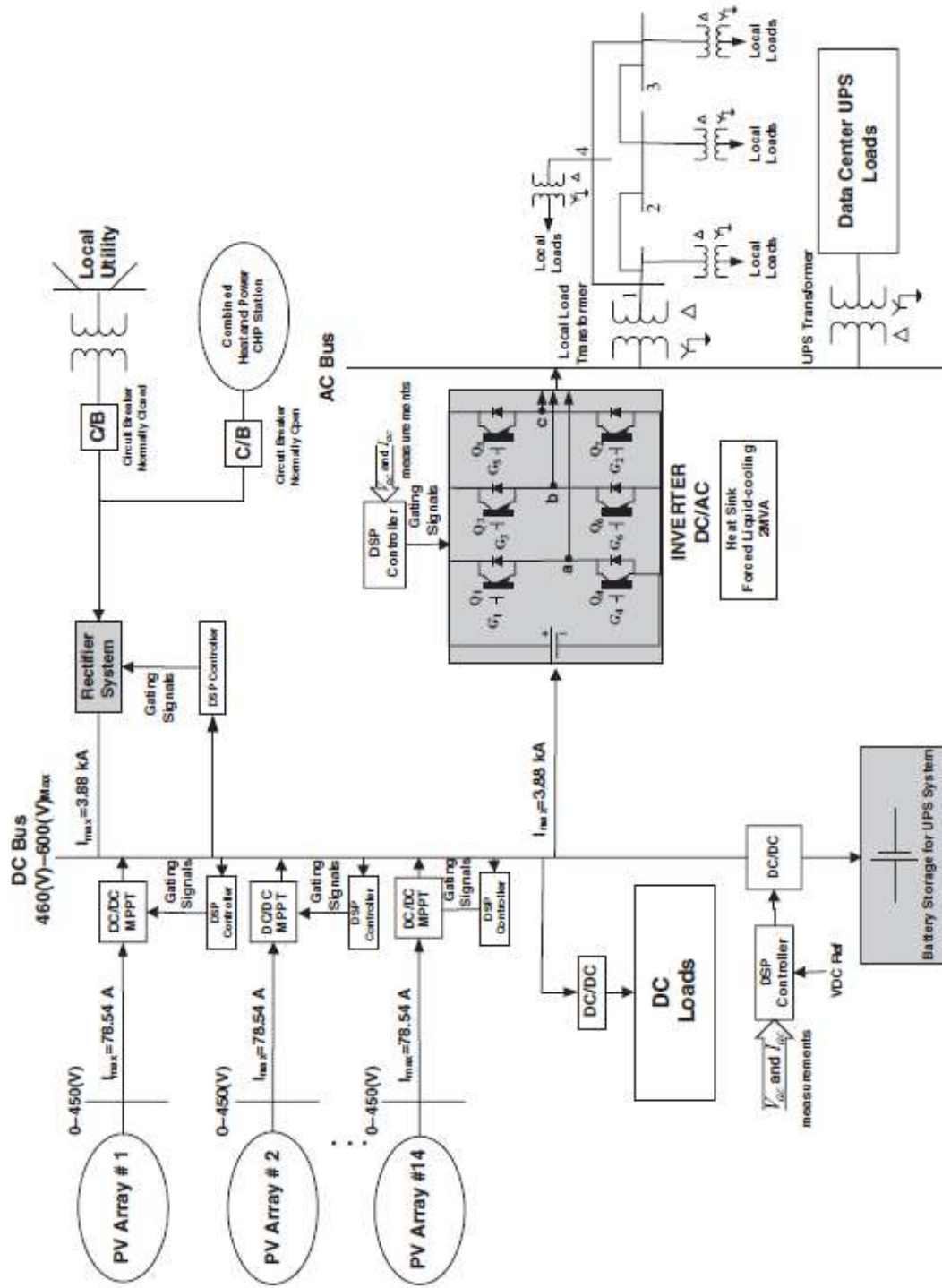
Pada awal perkembangannya, teknologi energi listrik dari sumber energi terbarukan masih bersifat parsial. Baik energi air, angin, surya, ombak laut,

biomassa, dan lain-lain masih dirancang-bangun untuk menghasilkan listrik guna mengatasi persoalan kekurangan listrik pada daerah tertentu saja. Kapasitas pembangkitan energi listriknya juga bervariasi dari ukuran kecil berukuran beberapa puluh watt hingga berukuran sedang, yaitu hingga mega watt. Akan tetapi, perkembangan selanjutnya sejak awal abad ke-21 ini telah dilakukan berbagai upaya melalui penelitian-penelitian yang komprehensif tentang bagaimana mengintegrasikan pembangkit-pembangkit listrik energi terbarukan dengan jaringan listrik yang sudah ada, yang dikenal dengan istilah interkoneksi sistem tenaga listrik. Integrasi pembangkit-pembangkit listrik energi terbarukan dengan jaringan listrik terinterkoneksi inilah yang dikenal dengan istilah “pembangkitan tersebar (*distributed generation, DG*)”. Gambar 1.2 menunjukkan arsitektur dc sistem pembangkitan tersebar dengan sumber energi terbarukan.



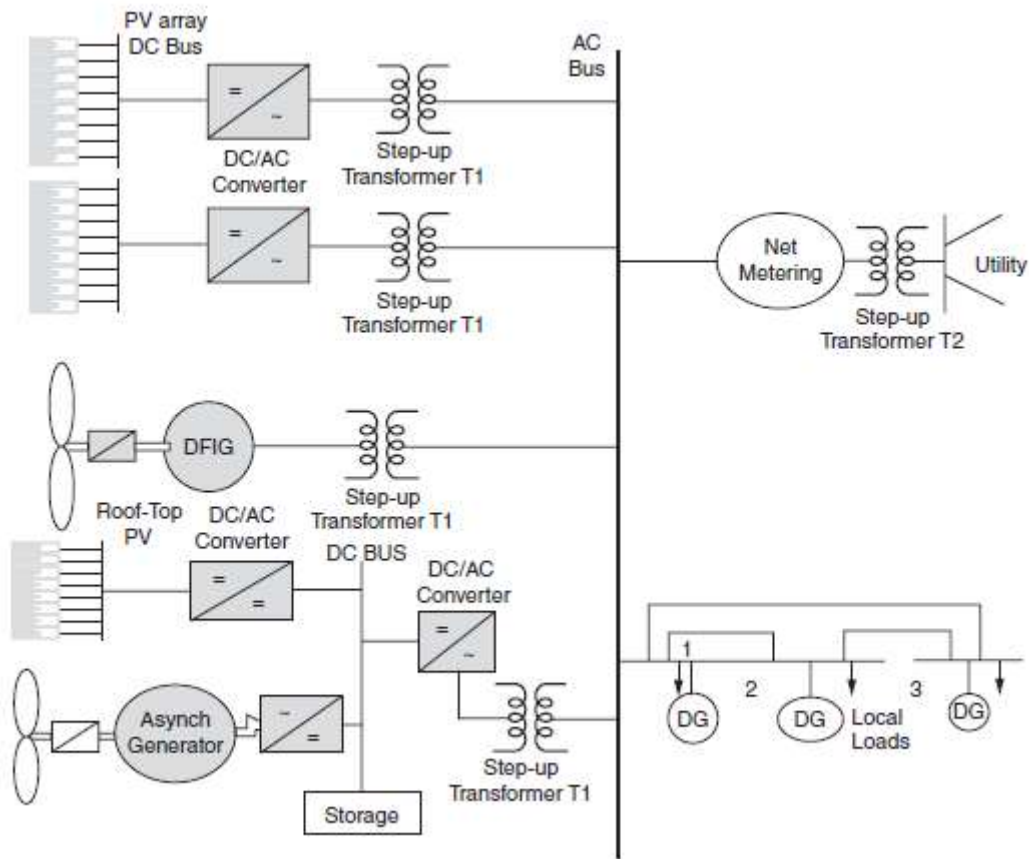
Gambar 1.2 Arsitektur dc sistem pembangkitan tersebar dengan sumber energi terbarukan [3].

Istilah pembangkitan tersebar (*distributed generation*) sejatinya bukan sesuatu yang baru, karena sistem interkoneksi jaringan listrik saat ini pada dasarnya adalah sistem yang merupakan pembangkitan tersebar. Akan tetapi istilah pembangkitan tersebar baru muncul belakangan ini karena lebih dilekatkan kepada pembangkit listrik yang berkapasitas relative lebih kecil yang umumnya berasal dari sumber energi terbarukan untuk diinterkoneksi dengan jaringan listrik yang sudah ada dimana selama ini dipasok oleh pembangkit listrik berkapasitas besar. Gambar 1.3 menunjukkan arsitektur dc pembangkit listrik tenaga surya 2 MVA, sedangkan Gambar 1.4 menunjukkan komponen utama sistem pembangkitan tersebar dengan sumber energi terbarukan.



Gambar 1.3 Arsitektur dc pembangkit listrik tenaga surya 2 MVA [3].





Gambar 1.4 Komponen utama sistem pembangkitan tersebar dengan sumber energi terbarukan [3].

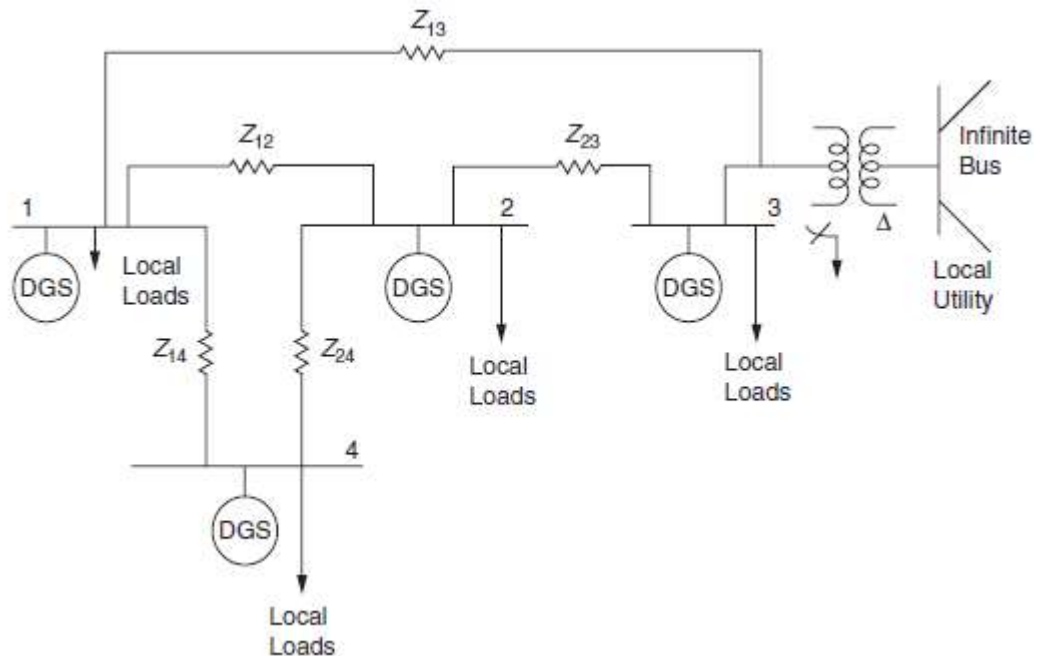
Upaya mengintegrasikan berbagai pembangkit energi terbarukan ke dalam jaringan interkoneksi bukanlah persoalan yang sederhana. Sebagai contoh adalah pembangkit listrik tenaga surya (*solar cell*). Energi listrik yang dihasilkan pembangkit listrik tenaga surya adalah dalam bentuk arus searah (*direct current*, dc). Tegangan listrik dc yang dihasilkan juga bervariasi, selain tergantung kepada banyaknya sel surya yang dipasang, juga tergantung pada intensitas cahaya matahari yang menerpanya. Pertama-tama tegangan listrik dc yang dihasilkan sel surya harus dinaikkan tegangannya menggunakan konverter dc, karena aras tegangan jaringan listrik interkoneksi umumnya jauh lebih tinggi. Selanjutnya tegangan dc yang sudah ditinggikan tersebut diubah menjadi tegangan listrik bolak-balik pada frekuensi yang sama dengan frekuensi sistem (50 atau 60 Hz), menggunakan inverter. Demikian juga untuk jenis pembangkit listrik lain yang

memiliki keunikan tersendiri, misalnya pembangkit listrik tenaga angin yang menghasilkan putaran turbin yang sangat bervariasi dari waktu ke waktu dalam sehari, karena kecepatan angin yang berubah-ubah. Untuk keperluan ini maka dibutuhkan sistem pengendalian yang andal agar putaran turbin angin yang rendah dan berubah-ubah dapat memutar generator dengan putaran yang tinggi dan stabil. Persoalan-persoalan seperti inilah yang penulis anggap menarik untuk diangkat dan dibahas di dalam buku ini, dan tentu saja bagaimana cara menanggulungnya berdasarkan hasil-hasil penelitian dari para pakar di dunia yang hasil-hasil penelitiannya dapat dibaca pada jurnal-jurnal internasional bereputasi tinggi.

Jaringan listrik sistem energi cerdas didistribusikan akan menyediakan *platform* untuk penggunaan sumber terbarukan dan kekuasaan darurat yang memadai terutama untuk pusat-pusat beban metropolitan dan mencegah pemadaman total sistem tenaga yang saling berhubungan karena efek buatan manusia dan bencana lingkungan dan akan memberikan kemampuan untuk memecah sistem tenaga saling berhubungan ke daerah cluster yang lebih kecil.

Gambar 1.4 mewakili sebuah arsitektur sistem AC untuk DG. Sebagai contoh, sistem PV dengan kapasitas 2-MW tidak ekonomis untuk diproses pada tegangan rendah DC karena kerugian daya yang relatif tinggi. Sistem DC dapat digunakan jika konverter DC difungsikan untuk meningkatkan tegangan DC dari sistem PV untuk tegangan yang lebih tinggi guna mengurangi kerugian daya. Namun, saat ini lebih ekonomis untuk meningkatkan tegangan AC ke tegangan yang lebih tinggi untuk diinjeksi ke grid sistem tenaga listrik (utilitas). Seperti ditunjukkan pada Gambar. 1.4, transformator penaik-tegangan (*step-up*) T_1 akan menaikkan tegangan dari konverter DC/AC ke tegangan yang lebih tinggi. Semua kumpulan solar sel (*array PV*) yang terhubung secara paralel untuk sistem bus PV AC. Selain itu, untuk menyediakan kemampuan mengatur pada stasiun PV, sejumlah *array PV* dan energi tenaga angin diproses di DC dan energi disimpan dalam baterai. Daya DC dari sistem penyimpanan ini digunakan untuk mengatur tegangan beban dan kontrol beban frekuensi. Ukuran sistem penyimpanan yang ditentukan oleh persyaratan yang mengatur dari stasiun PV ketika telah beroperasi

sebagai sebuah sistem. Tegangan stasiun PV melangkah dengan transformator T_2 untuk operasi paralel dari stasiun PV sebagai bagian dari sistem utilitas.



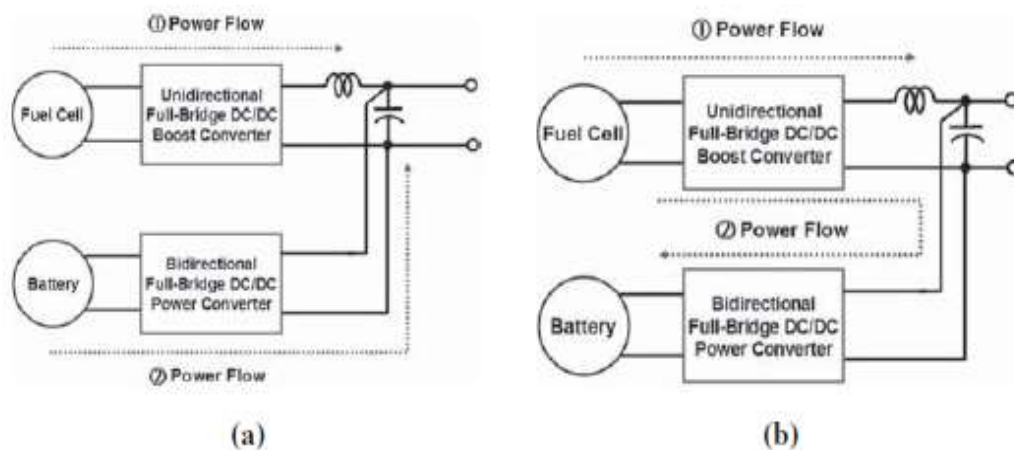
Gambar 1.5. Sistem pembangkitan tersebar tegangan rendah [3].

Gangguan akibat pemadaman tiba-tiba sistem tenaga listrik dapat menyebabkan gangguan stabilitas daya sistem DG. Selanjutnya, atas terjadinya kesalahan, FC dan MTG tanaman arus gangguan bisa mencapai tingkat tinggi, dan karenanya mereka harus diputuskan. Juga, setelah unit FC adalah menghubungkan kembali, unit MTG mungkin mengalami ketidakstabilan. Oleh karena itu, tindakan kontrol yang tepat perlu diambil untuk menstabilkan sistem DG.

Karena sifat intermiten sumber energi terbarukan dan reaksi elektrokimia lambat dari sel bahan bakar, kebutuhan untuk perangkat penyimpanan energi tidak bisa dihindari. Perangkat penyimpanan energi ini akan menyediakan cadangan beroperasi sebagai cepat bertindak ketika sumber energi tenaga listrik yang cukup tidak dapat diberikan selama transien beban dan gangguan. Gambar 1.5 menggambarkan pengoperasian sistem DG yang terhubung secara paralel dalam satu jaringan lokal, dengan jaringan lokal terhubung ke sistem utilitas lokal.

Untuk menguraikan metodologi kontrol, adalah penting untuk mengenali bahwa sumber DG, perangkat penyimpanan energi, dan jaringan tegangan rendah yang melayani beban mewakili beberapa entitas dengan kepentingan yang bertentangan. Sumber Ditjen dibatasi oleh respon dinamik mereka untuk gangguan, baik alami atau buatan manusia. Setelah gangguan besar, permintaan energi dinamis dapat melebihi cadangan bus daya DC yang tersimpan, sehingga daya parah dan osilasi tegangan dan runtuh. Karena sebagian besar beban elektronika daya dan industri, margin stabilitas mereka relatif dekat dengan titik operasi stabil mereka. Dengan demikian, hanya sejumlah terbatas dari energi yang tersimpan dalam bus DC (lihat Gb. 1.2) tersedia dalam sistem DG. Mendalam perhatian telah diberikan kepada kebutuhan untuk perangkat penyimpanan. Masalah ini dapat diatasi dengan mempelajari hubungan antara sistem penyimpanan energi cadangan, permintaan pihak manajemen, dan respon dinamis dari campuran sumber DG dalam menjaga stabilitas sistem DG. Tanaman MTG cukup cepat, dan respon waktu mereka dapat berubah dalam rentang yang cukup lebar. Untuk kecepatan tinggi MTG massa rotor sangat kecil, namun karena kecepatan sangat tinggi, konstanta H adalah di kisaran 0.3-1.2. Namun dimungkinkan ada nilai-nilai H lainnya di luar jangkauan ini juga. Untuk MTG menengah dan kecepatan rendah (12.000-50.000 rpm), konstanta H dapat di kisaran 0.5-1.5. MTG tanaman biasanya menggunakan mesin sinkron magnet permanen sehingga tidak ada waktu konstan lapangan dikaitkan dengan mereka baik. Tanaman FC memiliki respon dinamik pada urutan 5-10 menit. Selanjutnya, daya yang dihasilkan oleh sumber daya generasi terbarukan dapat sangat bervariasi, dan operasi mereka harus dikoordinasikan dengan jumlah perangkat penyimpanan daya DC dengan FC dan unit MTG yang dapat menyesuaikan daya yang dihasilkan mereka sebagai respons terhadap gangguan. Koordinasi ini sangat penting untuk menjaga tegangan yang stabil dan mengurangi osilasi daya. Angka 1.5a dan 1.5b menggambarkan operasi paralel unit FC. Gambar 1.6 menggambarkan arsitektur kontrol sel bahan bakar dipasok dari tangki hidrogen. Untuk memahami beban kontrol frekuensi dan koordinasi kontrol tegangan antara berbagai sumber masalah DG, kita perlu menentukan seberapa cepat kita dapat mengontrol set poin dari MTG dan tanaman

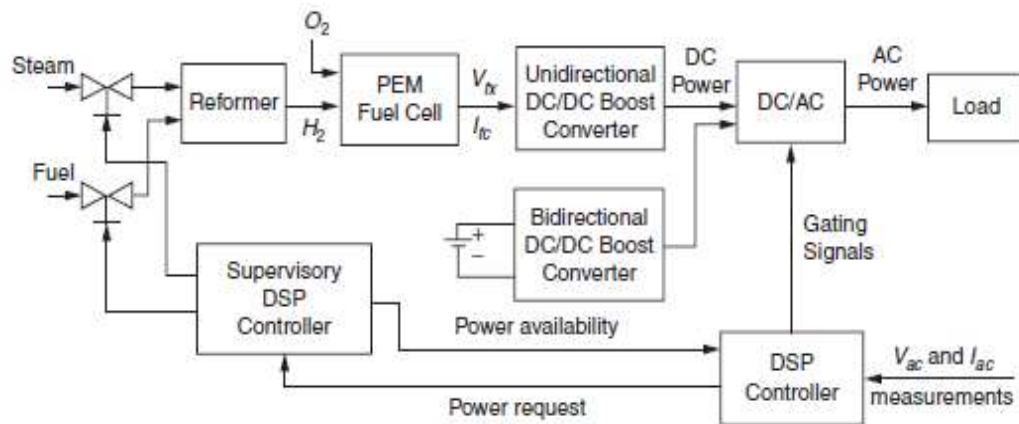
FC segera setelah tegangan DC bus mulai turun. Selain itu, penggunaan dari kontrol muka prediktif dapat diselidiki dengan menggunakan prediksi beban satu langkah ke depan untuk mengubah daya keluaran FC dan unit MTG dan untuk membersihkan melalui gangguan dan menstabilkan sistem DG. Studi semacam juga akan meningkatkan pemahaman potensi yang mengatur sistem DG dan akan meminimalkan ukuran sistem penyimpanan DC dan sisi permintaan dinamis load-shedding persyaratan atas gangguan. Bahkan, kami juga berusaha untuk menentukan bauran sumber DG dan energi cadangan yang tersimpan. Masalah yang sama perlu diselidiki ketika cluster didistribusikan DG sumber kehilangan hubungannya dengan sistem yang saling berhubungan seperti yang digambarkan oleh Gambar 1.6. Di sini sekali lagi, kita perlu mengembangkan strategi pengendalian untuk mengurangi osilasi daya dan menjaga stabilitas.



Gambar 1.6. Diagram blok sumber FC terhubung paralel.
(a) peluahan baterai. (b) pemuatan baterai. [3]

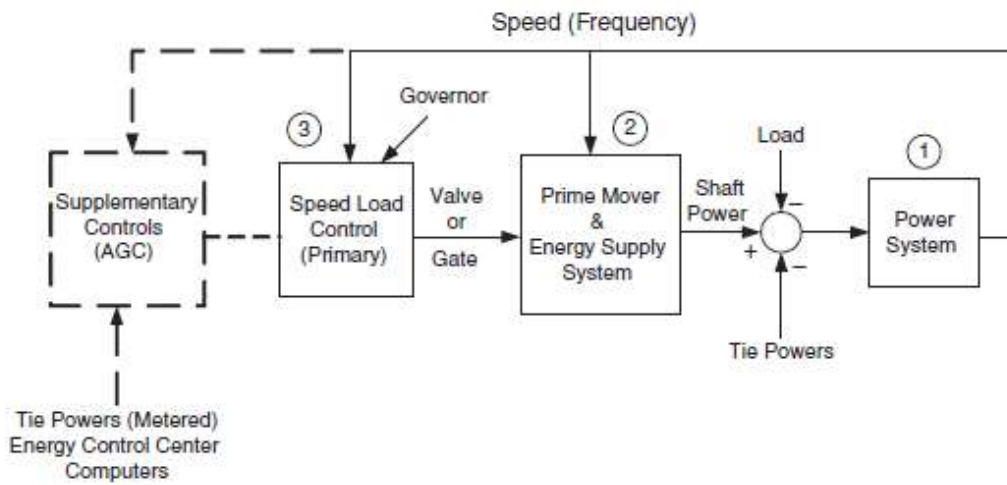
Perkembangan teknologi sistem kontrol sangat penting untuk memastikan jaringan yang berkelanjutan dengan kontribusi signifikan pasokan energi terbarukan. Metode RSP (*Robust Servo Perfectly*) belum diterapkan untuk masalah praktis karena membutuhkan aplikasi perhitungan yang *real-time*. Akan tetapi, dengan menggunakan pengolah sinyal digital (*digital signal processor, DSP*), masalah ini telah dapat diatasi. Kontrol RSP menjamin pelacakan asimtotik yang tepat dari referensi frekuensi dasar dan peraturan kesalahan dari gangguan beban pada masing-masing frekuensi harmonik termasuk dalam *servocompensators*. RSP

mampu menjamin sifat independensi dari setiap gangguan di sistem tenaga listrik selama tidak mengganggu kestabilan sistem. Namun, penting untuk menganalisis sifat stabilitas controller pada saat terjadi gangguan yang besar dan beban daya faktor-terkoreksi (PFC) untuk memastikan operasi yang tepat dari konverter selama rentang operasi yang dimaksudkan.



Gambar 1.7. Pengendalian koordinat solar cell [3].

Kekokohan stabilitas sistem dengan pengendali elektronika daya akan dibahas menggunakan nilai tunggal terstruktur di bawah beban PFC nonlinier. Secara khusus, test bed simulasi akan disajikan untuk mempelajari gangguan karena memuat variasi dan ketidakpastian parameter dari komponen sistem. Stabilitas sistem tenaga listrik dan respon transien sistem kontrol yang dihasilkan akan disajikan untuk sistem diilustrasikan dalam Gambar 1.6 dan 1.7. Gambar 1.8 menunjukkan arsitektur untuk mengatur dan mengendalikan gangguan dalam sistem tenaga listrik.



Gambar 1.8. Kendali pembangkitan otomatis sistem tenaga (AGC).

Dalam arsitektur ini, tujuan utama adalah untuk mengontrol tegangan bus DC dengan tegangan jatuh bus DC yang meningkat sebagai tanggapan terhadap permintaan listrik yang berfluktuasi oleh sinyal kontrol pengiriman ke sumber energi yang mengatur untuk menaikkan/menurunkan daya masukan. Sistem grid cerdas dapat dioperasikan dalam dua mode operasi yaitu:

1. Sinkronisasi operasi dengan sistem utilitas lokal.
2. Mode operasi lokal pada saat hilangnya sistem utilitas.

Latihan:

1. Gambarkan dan jelaskan komponen pokok sistem tenaga listrik serta jelaskan fungsinya masing-masing.
2. Jelaskan arti penting energi listrik bagi umat manusia dewasa ini.
3. Kemajuan suatu negara dapat diukur dari tingkat konsumsi energi listriknya. Analisislah apakah pernyataan tersebut dapat diterima. Buktikan dengan data-data tentang konsumsi energi listrik berbagai negara, baik negara maju maupun negara berkembang. Data-data dapat didapatkan dari berbagai sumber misalnya jurnal ilmiah, majalah, atau internet.

« halaman ini sengaja dikosongkan »

BAB II

KARAKTERISTIK SISTEM TRANSMISI DAYA LISTRIK

Tujuan Instruksional Umum:

Memberikan wawasan tentang karakteristik sistem transmisi daya listrik yang merupakan salah satu komponen pokok dalam sistem tenaga listrik.

Tujuan Instruksional Khusus:

1. Memberikan pengetahuan tentang jenis-jenis saluran transmisi daya listrik.
2. Memberikan pengetahuan tentang tegangan saluran transmisi daya listrik.
3. Memberikan pengetahuan tentang komponen utama saluran transmisi daya listrik.
4. Memberikan pengetahuan tentang parameter dan variabel saluran transmisi daya listrik.

2.1 PENDAHULUAN

Sistem transmisi daya listrik adalah komponen sistem tenaga listrik yang menghubungkan sistem pembangkitan dan sistem distribusi. Berdasarkan konstruksinya, saluran transmisi dibedakan atas saluran udara (*overhead lines*) dan saluran bawah tanah (*underground cable*). Saluran udara menyelurkan energi listrik melalui penghantar yang digantungkan pada menara atau tiang transmisi dengan perantaraan isolator, sedang saluran bawah tanah menyalurkan energi listrik melalui kabel-kabel yang ditanam di bawah permukaan tanah. Kedua jenis saluran transmisi itu masing-masing mempunyai kelebihan dan kekurangan. Dibandingkan dengan saluran udara, saluran bawah tanah tidak terpengaruh oleh cuaca buruk, taufan. Hujan deras, angin kencang, petir, dan gangguan alam lainnya. Selain itu saluran bawah tanah lebih estetik karena tidak mengganggu pemandangan, sehingga tampak lebih rapi. Karena alasan-alasan ini saluran bawah tanah lebih disukai terutama untuk daerah yang padat penduduknya seperti daerah perkotaan. Akan tetapi dari segi investasi saluran bawah tanah lebih besar

dibandingkan dengan saluran udara. Selain itu perbaikannya juga lebih sukar jika terjadi gangguan hubung singkat, kabel putus, dan lain-lain.

Berdasarkan jenis arus yang digunakan, saluran transmisi dibedakan atas saluran transmisi arus bolak-balik (AC: alternating current) dan saluran transmisi arus searah (DC: direct current). Dalam sistem AC, kenaikan dan penurunan tegangan transmisi dapat mudah dilakukan yaitu dengan menggunakan transformator. Karena alasan inilah sehingga dewasa ini saluran transmisi di dunia sebagian besar menggunakan saluran transmisi bolak-balik (AC). Dalam sistem transmisi AC ada yang menggunakan satu fase dan tiga fase. Sistem tiga fase mempunyai beberapa keuntungan diantaranya:

1. daya yang disalurkan lebih besar,
2. nilai sesaatnya (instantaneous value) konstan, dan
3. mempunyai medan magnet putar.

Dewasa ini hampir seluruh penyaluran energi listrik di seluruh dunia dilakukan dengan menggunakan arus bolak-balik, karena penggunaan arus bolak-balik secara umum lebih unggul baik dari segi teknik maupun ekonomi. Namun sejak beberapa tahun terakhir penyaluran menggunakan arus searah mulai dikembangkan di beberapa negara. Penyaluran dengan tegangan searah mempunyai beberapa keuntungan diantaranya:

1. isolasinya yang relatif sederhana,
2. daya guna (efisiensi) yang lebih tinggi (karena faktor dayanya 1), dan
3. stabilitas sistem yang sangat baik, sehingga dapat digunakan untuk jarak yang sangat jauh.

Akan tetapi persoalan ekonominya harus dihitung. Penyaluran tenaga listrik dengan sistem DC baru dapat dianggap ekonomis jika jarak saluran udara yang sangat jauh (di atas 400 km) atau untuk saluran bawah tanah yang lebih dari 50 km. Hal ini disebabkan biaya peralatan pengubah AC ke DC atau sebaliknya (yaitu *converter* dan *inverter equipment*) sangat mahal.

2.2 TEGANGAN SALURAN TRANSMISI

Untuk daya yang sama, jika tegangan transmisi ditinggikan maka rugi-rugi transmisi dapat diperkecil sehingga efisiensi transmisi akan naik. Akan tetapi peninggian tegangan transmisi berarti juga kenaikan isolasi dan biaya peralatan dan gardu induk. Oleh karena itu pemilihan tegangan dilakukan dengan memperhitungkan daya yang disalurkan, jumlah rangkaian, jenis penyaluran, keandalan (*reliability*), biaya peralatan untuk tegangan tertentu, serta tegangan-tegangan yang sekarang ada dan yang direncanakan. Kecuali itu, penentuan tegangan merupakan bagian dari perancangan sistem secara keseluruhan.

Meskipun masih belum jelas menyebutkan keperluannya sebagai tegangan transmisi di Indonesia, pemerintah telah menyeragamkan deretan tegangan tinggi seperti terlihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1. Tegangan tinggi yang berlaku di Indonesia

Tegangan Nominal (kV)	Tegangan Tertinggi untuk Peralatan (kV)
30	36
66	72,5
150	170
220	245
380	420
500	525

Tegangan nominal 30 kV hanya diperkenankan untuk daerah asuhan dimana tegangan distribusi 20 kV tidak dipergunakan. Penentuan tegangan di atas disesuaikan dengan rekomendasi International Electrotechnical Commission (IEC).

2.3 KOMPONEN UTAMA SALURAN TRANSMISI

Komponen-komponen utama saluran transmisi terdiri dari,

1. Menara transmisi atau tiang transmisi beserta fondasinya,
2. Isolator,
3. Kawat penghantar (*conductors*), dan
4. Kawat tanah (*ground wires*).

2.3.1 Menara Transmisi

Menara transmisi adalah suatu bangunan penopang saluran transmisi yang dapat berupa menara baja, tiang baja, tiang beton bertulang, atau tiang kayu. Tiang-tiang baja, beton, dan kayu umumnya digunakan pada saluran-saluran dengan tegangan kerja relatif rendah (di bawah 70 kV) sedang untuk saluran transmisi tegangan tinggi dan ekstra tinggi digunakan menara baja.

Menara baja diklasifikasikan berdasarkan fungsinya yaitu menara dukung, menara sudut, menara percabangan, dan menara transposisi.

2.3.2 Isolator

Isolator digunakan untuk mencegah hubung singkat antara kawat penghantar dengan menara. Jenis isolator yang digunakan pada saluran transmisi adalah jenis porselin atau gelas. Akhir-akhir ini telah banyak dikembangkan jenis-jenis isolator yang baru diantaranya polimer, epoksi resin, dan lain-lain.

Berdasarkan penggunaan dan konstruksinya, dikenal tiga jenis isolator yaitu isolator jenis pasak, isolator jenis pos saluran, dan isolator gantung. Isolator jenis pasak dan pos saluran digunakan untuk saluran transmisi dengan tegangan kerja relatif rendah (kurang dari 33 kV), sedang isolator gantung dapat digandeng menjadi rentengan isolator yang jumlahnya disesuaikan dengan kebutuhan.

2.3.3 Kawat Penghantar

Jenis-jenis kawat penghantar yang biasa digunakan pada saluran transmisi adalah tembaga dengan konduktivitas 100% (Cu 100%), tembaga dengan konduktivitas 97,5 % (Cu 97,5%), dan aluminium dengan konduktivitas 61% (Al

61%). Kawat penghantar aluminium terdiri dari berbagai jenis dengan lembang sebagai berikut:

AAC = All Aluminium Conductor, yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium.

AAAC = All Aluminium Alloy Conductor, yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari campuran aluminium.

ACSR = Aluminium Conductor Steel Reinforced, yaitu kawat penghantar aluminium berinti kawat baja.

ACAR = Aluminium Conductor Alloy Reinforced, yaitu kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan campuran logam.

Kawat penghantar tembaga mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan dengan kawat penghantar aluminium karena konduktivitas dan kuat tariknya lebih tinggi. Akan tetapi kelemahannya ialah untuk besar tahanan yang sama, tembaga lebih berat dari aluminium dan juga lebih mahal. Oleh karena itu kawat penghantar aluminium telah menggantikan kawat tembaga.

Untuk memperbesar kuat tarik kawat aluminium digunakan campuran aluminium (aluminium alloy). Untuk saluran-saluran transmisi tegangan tinggi, dimana jarak antar menara sangat jauh, maka dibutuhkan kuat tarik yang lebih tinggi. Untuk itu digunakan kawat penghantar ACSR.

2.3.4 Kawat Tanah

Kawat tanah atau ground wires disebut juga kawat pelindung (*shield wires*). Kawat tanah berfungsi untuk melindungi kawat-kawat penghantar atau kawat fase terhadap sambaran petir. Dengan demikian kawat tanah dipasang di atas kawat fase. Bahan untuk kawat tanah umumnya dipakai baja (*steel wires*) yang lebih murah, tetapi sering juga digunakan kawat ACSR.

2.4 PARAMETER SALURAN TRANSMISI

Parameter-parameter saluran transmisi adalah konstanta-konstanta saluran transmisi yaitu resistansi (R), induktansi (L), konduktansi (G), dan kapasitansi (C). Pada saluran transmisi udara, nilai konduktansi (G) sangat kecil sehingga sering diabaikan. Dengan mengabaikan nilai konduktansi tersebut, maka perhitungan-perhitungan dalam saluran transmisi menjadi lebih sederhana.

2.4.1 Resistansi

Resistansi dari suatu konduktor (kawat penghantar) diberikan oleh persamaan berikut:

$$R = \rho l/A \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

dengan, ρ = resistivitas (Ωm)

l = panjang penghantar (m)

A = luas penampang penghantar (mm^2)

Dalam tabel-tabel mengenai penghantar transmisi daya listrik, sering dijumpai penampang penghantar dalam satuan CM (Circular Mil). Circular Mil ialah penampang kawat yang mempunyai diameter 1 mil (=1/1000 inch). Jika penampang kawat diberikan dalam mm^2 , maka penampang kawat dalam CM adalah:

$$\text{CM} = 1973 \times \text{Penampang dalam } \text{mm}^2$$

atau,

$$\text{mm}^2 = 5,067 \times 10^{-4} \times \text{Penampang dalam CM}$$

Dalam sistem MKS satuan untuk resistivitas ρ diberikan dalam ohm meter, panjang dalam meter, dan luas dalam meter kuadrat. Sistem yang lain (CGS), resistivitas dalam mikro ohm centimeter, panjang dalam centimeter, dan luas dalam centimeter kuadrat.

Karena umumnya kawat-kawat penghantar terdiri dari kawat pilin (stranded conductors), maka sebagai faktor koreksi untuk memperhitungkan pengaruh dari pilin itu, panjang kawat dikalikan dengan 1,02 (2% untuk faktor koreksi).

Resistansi penghantar berubah oleh temperatur. Dalam batas temperatur 10°C hingga 100°C , maka untuk penghantar tembaga dan aluminium berlaku:

$$R_{t2} = R_{t1} [1 + \alpha_{t1} (t_2 - t_1)] \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

dengan, R_{t2} = resistansi pada temperatur t_2

R_{t1} = resistansi pada temperatur t_1

α_{t1} = koefisien temperatur dari resistansi penghantar pada temperatur t_1 °C.

Dari persamaan (2.2) dapat dibuat persamaan:

$$R_{t2} / R_{t1} = [1 + \alpha_{t1} (t_2 - t_1)] \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

$$R_{t2} / R_{t1} = (T_0 + t_2) / (T_0 + t_1)$$

dengan,

$$\alpha_{t1} = 1 / (T_0 + t_1)$$

atau,

$$T_0 = (1 / \alpha_{t1}) - t_1 \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

Dari persamaan di atas dapat dilihat bahwa $-T_0$ ialah temperatur dimana resistansi penghantar akan menjadi nol, jika persamaan linier yang sama berlaku untuk daerah temperatur itu. Dan jika ini benar maka $-T_0$ adalah sama dengan temperatur absolut -273 °C. Untuk tembaga (Cu) dengan konduktivitas 100%, koefisien temperatur dari resistansi pada 20 °C adalah:

$$\alpha_{t1} = 0,00393$$

atau,

$$T_0 = (1 / 0,00393) - 20 = 234,5$$
°C

Untuk tembaga dengan konduktivitas 97,5%,

$$\alpha_{t1} = 0,00383$$

atau,

$$T_0 = (1 / 0,00383) - 20 = 241,0$$
°C

Untuk Aluminium dengan konduktivitas 61%,

$$\alpha_{t1} = 0,00403$$

atau,

$$T_0 = (1 / 0,00403) - 20 = 228,1$$
°C

Tabel 2.2. Koefisien temperatur dari material konduktor standar

Material	T ₀ °C	Koefisien temperatur resistansi x 10 ⁻³						
		α ₀	α ₂₀	α ₂₅	α ₅₀	α ₇₅	α ₈₀	α ₁₀₀
Cu 100%	234,5	4,27	3,93	3,85	3,52	3,25	3,18	2,99
Cu 97,5%	241,0	4,15	3,83	3,76	3,44	3,16	3,12	2,93
Al 61%	228,1	4,38	4,03	3,95	3,60	3,30	3,25	3,05

Tabel 2.3. Resistivitas bahan penghantar standar

Material	Resistivitas (mikro-Ohm-meter)						
	ρ ₀	ρ ₂₀	ρ ₂₅	ρ ₅₀	ρ ₇₅	ρ ₈₀	ρ ₁₀₀
Cu 100%	1,58	1,72	1,75	1,92	2,09	2,12	2,26
Cu 97,5%	1,63	1,77	1,80	1,97	2,14	2,18	2,31
Al 61%	2,60	2,83	2,89	3,17	3,46	3,51	3,74

Resistansi DC untuk perhitungan-perhitungan berdasarkan tabel di atas harus dikalikan dengan faktor:

- 1,0 untuk konduktor padat (*solid wire*)
- 1,01 untuk konduktor pilin (berkas) yang terdiri dari 2 lapis (*strand*)
- 1,02 untuk konduktor pilin lebih dari dua lapis.

Contoh 2.1 Tentukan besar resistansi DC untuk konduktor 253 mm² dalam Ohm/km pada suhu 25°C. Misalkan penghantar yang digunakan adalah CU 97,5%.

Jawab: Berdasarkan tabel 2.3 diperoleh:

$$\rho_{25} = 1,8 \text{ mikro ohm cm}$$

$$l = 1 \text{ km} = 10^5 \text{ cm}$$

$$A = 253 \text{ mm}^2 = 253 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$$

Maka,

$$\begin{aligned} R_{25} &= \rho_{25} l/A \\ &= 1,8 \times 10^{-6} \times 10^5 / (253 \times 10^{-2}) \\ &= 0,0711 \text{ ohm/km} \end{aligned}$$

Dengan memperhitungkan pengaruh lapisan (umumnya konduktor-konduktor terdiri ndari 3 lapis),

$$\begin{aligned} R_{25} &= 1,02 \times 0,0711 \text{ ohm/km} \\ &= 0,0726 \text{ ohm/km.} \end{aligned}$$

2.4.2 Induktansi dan Reaktansi Induktif

Dalam penurunan rumus-rumus untuk induksi dan reaktansi induktif dari suatu konduktor biasanya diabaikan dua faktor, yaitu:

- a. efek kulit (skin effect), dan
- b. efek sekitar (proximity effect).

Efek kulit adalah gejala pada arus bolak-balik bahwa kerapatan arus dalam penampang konduktor tersebut makin besar ke arah permukaan kawat. Tetapi jika kita hanya meninjau frekuensi kerja (50 Hz atau 60 Hz) maka pengaruh efek kulit itu sangat kecil dan dapat diabaikan.

Efek sekitar adalah pengaruh dari kawat lain yang berada di samping kawat yang ditinjau sehingga distribusi fluks tidak simetris lagi. Tetapi jika radius konduktor relaif kecl terhadap jarak antara kedua kawat maka efek sekitar ini sangat kecil dan dapat diabaikan.

2.4.2.1 Fluks Magnetik pada Suatu Kawat Penghantar Panjang

Pandanglah suatu kawat penghantar yang panjang, lurus, bulat, uniform, dengan kawat balik berada di tempat yang sangat jauh, seperti terlihat pada gambar 3.1. Maka gaya gerak magnetiknya (magneto motive force):

$$i_1 = \int_c |H_e| ds \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

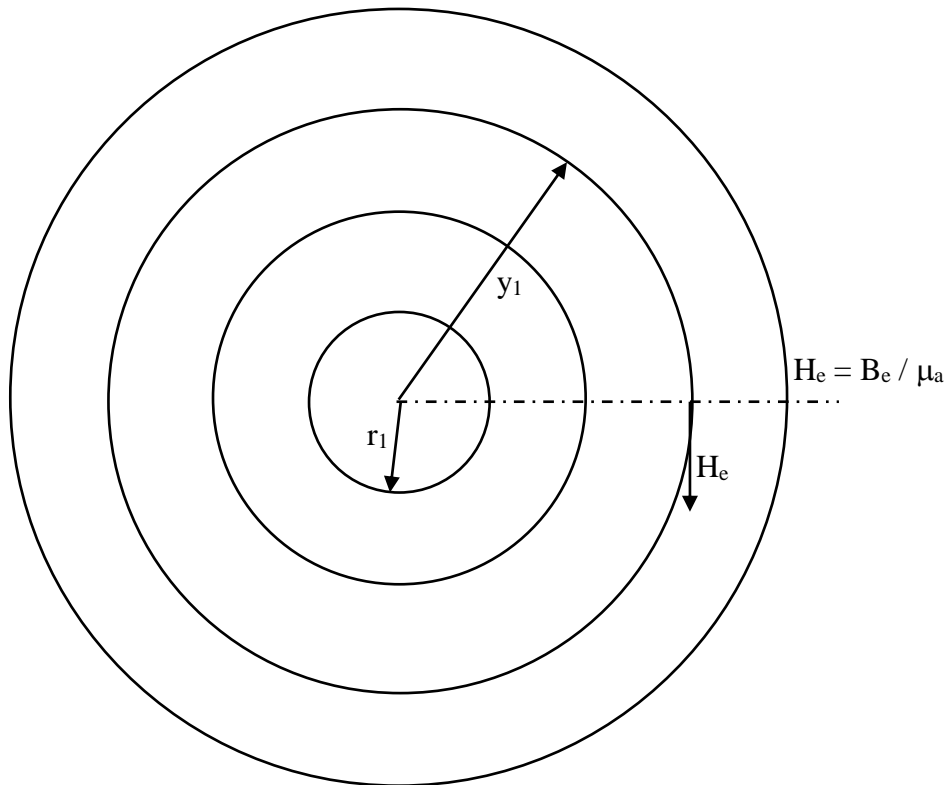
dengan,

\int_c = integral tertutup

H_e = intensitas medan magnetik, Ampere-lilit per meter.

ds = panjang elemen sepanjang konduktor, meter.

i_1 = gaya gerak magnetik, ampere-lilit.



Gambar 2.1. Penampang kawat penghantar dengan kawat balik yang sangat jauh, dengan jejari kawat r_1 .

Oleh kerana hanya satu kawat penghantar yang dikelilingi oleh medan magnetik, jadi hanya ada satu lilitan (turn). Maka ggm dalam ampere-lilit sama dengan besar arus pada kawat penghantar tersebut. Karena kawat balik sangat jauh, maka intensitas medan magnetik sepanjang jalan yang dipilih konstan (tidak ada proximity effect). Jadi,

$$i_1 = |H_e| \int_c ds \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

Jika jalan yang dipilihnya itu berjejari y_1 , maka:

$$\int_c ds = 2\pi y_1 \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

dan,

$$i_1 = 2\pi y_1 |H_e| \dots\dots\dots(2.8)$$

atau,

$$|H_e| = i_1 / (2\pi y_1) \dots\dots\dots(2.9)$$

Misalkan diberikan notasi baru, $|B_e|$ = kerapatan fluks magnetik, maka:

$$|B_e| = \mu_a |H_e| = \mu_a i_1 / (2\pi y_1) \text{ weber/m}^2 \dots\dots\dots(2.10)$$

dengan,

μ_a = permeabilitas absolut dari media di sekeliling kawat penghantar.

μ_v = permeabilitas ruang hampa

$$= 4\pi \times 10^{-7} \text{ henry/meter}$$

$$= 1 \text{ (sistem CGS).}$$

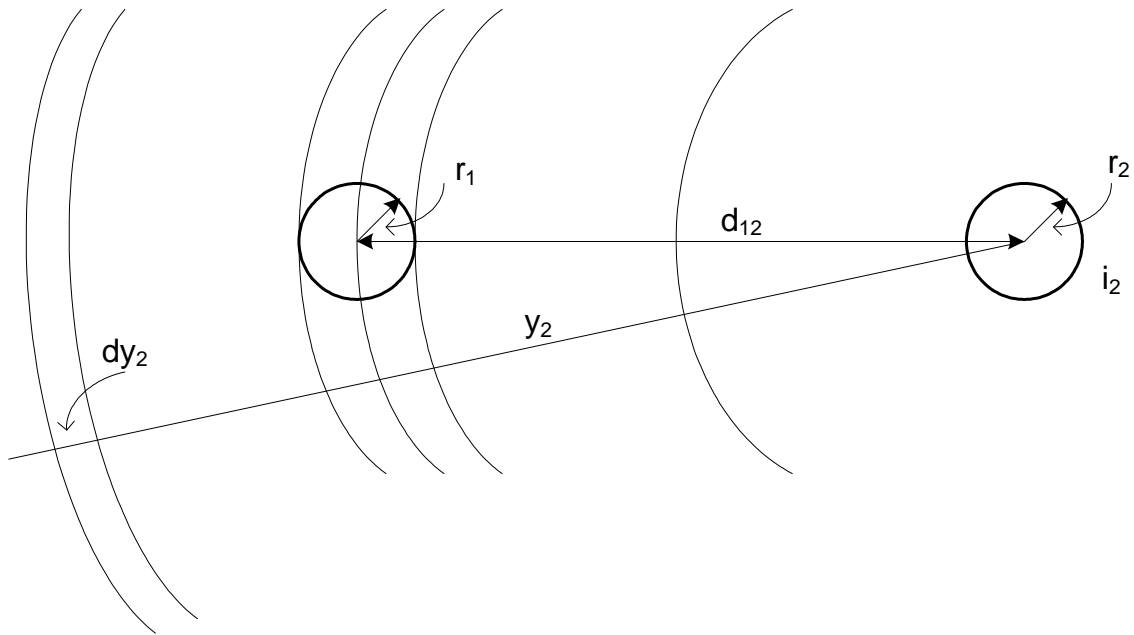
Untuk menghindarkan keperluan untuk mengubah harga-harga permeabilitas dari tiap-tiap material (bahan), permeabilitas dari material-material itu dinyatakan sebagai perkalian 2 faktor, yaitu:

$$\mu_a = \mu_e \times \mu_v \dots\dots\dots(2.11)$$

dengan, μ_e = permeabilitas relatif dari media sekeliling.

2.4.2.2 Fluks Lingkup pada Posisi Kawat Balik Berdekatan

Pandanglah jika terdapat kawat kedua berada dekat dan paralel dengan pertama seperti terlihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2. Kawat penghantar balik berdekatan dengan kawat pertama.

Misalkan bahwa kedua kawat penghantar tersebut mempunyai kawat balik yang sangat jauh. Jika kawat 2 nonmagnet dan $i_2 = 0$, dan i_1 mantap, maka gambaran fluks (flux pattern) yang dihasilkan oleh arus i_1 tidak berubah.

Sekarang misalkan $i_1 = 0$, dan arus pada kawat 2 = i_2 . Kerapatan fluks pada jejari y_2 ialah:

$$|B_e| = \frac{\mu_e \mu_v i_2}{2\pi y_2}$$

dan

$$d\phi_e = |B_e| h dy_2$$

$$d\phi_e = \frac{\mu_e \mu_v h i_2}{2\pi y_2} dy_2$$

Jika dimisalkan λ_{12} adalah fluks lingkup pada kawat 1 yang ditimbulkan oleh arus i_2 pada kawat 2, maka:

$$\lambda_{12} = \int_{d_{12}}^{D_2} d\phi_2 = \frac{\mu_e \mu_v h i_2}{2\pi} \int_{d_{12}}^{D_2} \frac{dy_2}{y_2}$$

$$\lambda_{12} = \frac{\mu_e \mu_v h i_2}{2\pi} \ln \frac{D_2}{d_{12}} \text{ lilitan-weber} \dots\dots\dots(2.12)$$

Jika kawat 1 dan kawat 2 sama-sama mengandung arus, masing-masing i_1 dan i_2 , maka jumlah fluks lingkup kawat 1 adalah:

$$\lambda_1 = \lambda_{11} + \lambda_{12}$$

$$\lambda_1 = \frac{\mu_v h}{2\pi} \left[i_1 \left(\mu_e \ln \frac{D_1}{r_1} + \frac{\mu_i}{4} \right) + i_2 \mu_e \ln \frac{D_2}{d_{12}} \right] \dots\dots\dots(2.13)$$

Tinjau keadaan khusus jika kawat 2 merupakan kawat balik bagi kawat 1. Dalam hal ini,

$$i_2 = -i_1$$

Kita juga membatasi permasalahan pada saluran transmisi udara, jadi,

$$\mu_e = 1$$

$$\mu_v = 4\pi \times 10^{-7} \text{ henry/meter}$$

Maka persamaan (2.13) menjadi:

$$\lambda_1 = 2\pi \times 10^{-7} h i_1 \left[\ln \frac{1}{r_1} + \frac{\mu_i}{4} + \ln d_{12} + \ln \frac{D_1}{D_2} \right] \dots\dots\dots(2.14)$$

D_1 dan D_2 adalah jarak-jarak yang harganya dapat diatur mencapai tak terhingga, sehingga:

$$\lim_{D \rightarrow \infty} \left(\ln \frac{D_1}{D_2} \right) = 0$$

Maka persamaan (3.14) menjadi:

$$\lambda_1 = 2\pi \times 10^{-7} h i_1 \left[\ln \frac{1}{r_1} + \frac{\mu_i}{4} + \ln d_{12} \right] \text{ lilitan-weber} \dots\dots\dots(2.15)$$

2.4.2.3 Induktansi Diri

Induktansi diri (L) dari suatu rangkaian dapat didefinisikan sesuai dengan persamaan berikut ini:

$$L = \frac{\text{jatuh tegangan yang ditimbulkan oleh perubahan arus}}{\text{perubahan arus}}$$

Jika permeabilitas dari medan magnet konstan, maka definisi di atas sama dengan pernyataan berikut ini:

$$L = \frac{\text{fluks lingkup yang ditimbulkan oleh arus}}{\text{arus}}$$

atau,

$$L = \frac{\lambda}{i} \quad \dots\dots\dots(2.16)$$

Jadi, untuk kawat 1:

$$L_1 = \frac{\lambda_1}{i_1} = 2\pi \times 10^{-7} h \left[\ln \frac{1}{r_1} + \frac{\mu_i}{4} + \ln d_{12} \right] \text{ henry} \quad \dots\dots\dots(2.17)$$

Untuk kawat nonmagnet seperti tembaga dan aluminium, harga $\mu_i = 1$, sehingga diperoleh:

$$L_1 = \frac{\lambda_1}{i_1} = 2\pi \times 10^{-7} h \left[\ln \frac{1}{r_1} + \frac{1}{4} + \ln d_{12} \right] \text{ henry} \quad \dots\dots\dots(2.18)$$

Dalam persamaan (2.18) terdapat 3 suku persamaan. Suku pertama dan kedua tergantung dari sifat-sifat kawat, sedang suku ketiga tergantung dari jarak kawat-kawat. Hal ini mengusulkan kepada kita untuk membagi persamaan (2.18) menjadi dua bagian persamaan, yaitu bagian pertama disebut komponen kawat, dan bagian kedua disebut komponen jarak.

Jika panjang kawat 1 km (= 1000 m), jejari kawat dan jarak antara kawat dalam meter, dan ln diganti dengan log, maka:

$$\ln = 2,3026 \log$$

dan jika harga-harga tersebut kita substitusikan ke dalam persamaan (2.18) diperoleh persamaan berikut:

$$L_1 = 0,4605 \times 10^{-3} \left[\log \frac{1}{r_1} + 0,10857 + \log d_{12} \right] \text{ henry/km} \quad \dots\dots\dots(2.19)$$

$$= L_a + L_d$$

dengan,

$$L_a = 0,4605 \times 10^{-3} \left[\log \frac{1}{r_1} + 0,10857 \right] \text{ henry/km} \quad \dots\dots\dots(2.20)$$

pada jarak 1 m, dan

$$L_d = 0,4605 \times 10^{-3} \log d_{12} \quad \text{henry/km} \quad \dots\dots\dots(2.21)$$

Dalam persamaan (2.19) dan (2.21) satuan panjang dari jejari r_1 dan jarak d_{12} diberikan dalam meter.

Jika bentuk gelombang arus dan tegangan adalah sinus, maka lebih berguna mengubah induktansi menjadi reaktansi sesuai dengan relasi:

$$X = 2\pi f L$$

Jadi,

$$X_1 = 2,8934 \times 10^{-3} f \left[\log \frac{1}{r_1} + 0,10857 + \log d_{12} \right] \text{ ohm/km} \quad \dots\dots\dots(2.22)$$

$$X_a = 2,8934 \times 10^{-3} f \left[\log \frac{1}{r_1} + 0,10857 \right] \quad \text{ohm/km} \quad \dots\dots\dots(2.23)$$

$$X_d = 2,8934 \times 10^{-3} f \log d_{12} \quad \text{ohm/km} \quad \dots\dots\dots(2.24)$$

Jika $f = 50$ Hz, maka persamaan-persamaan (2.22), (2.23), dan persamaan (2.24) menjadi:

$$X_1 = 0,14467 \left[\log \frac{1}{r_1} + 0,10857 + \log d_{12} \right] \quad \text{ohm/km} \quad \dots\dots\dots(2.25)$$

$$X_a = 0,14467 \left[\log \frac{1}{r_1} + 0,10857 \right] \quad \text{ohm/km} \quad \dots\dots\dots(2.26)$$

$$X_d = 0,14467 \times 10^{-3} f \log d_{12} \quad \text{ohm/km} \quad \dots\dots\dots(2.27)$$

Persamaan (2.25) sampai (2.27) berlaku juga untuk 2 kawat dengan mengganti r_1 menjadi r_2 .

Contoh 2.2 Suatu saluran udara fase tunggal dengan konduktor tembaga dengan konduktivitas 97,3%; 107,2 mm² (4/10 atau 211.600 CM), 19 kawat elemen, dengan jejari efektif 0,6706 cm. Jarak antara kedua kawat 1,5 m. Tentukanlah reaktansi induktif saluran transmisi tersebut dalam ohm per km per kawat. Frekuensi kerja adalah 50 Hz.

Jawab: Berdasarkan persamaan (2.25) sampai (2.27) diperoleh:

$$X_1 = 0,14467 \left[\log \frac{1}{r_1} + 0,10857 + \log d_{12} \right] \quad \text{ohm/km}$$

dengan,

$$\begin{aligned} r_1 &= \text{jejari konduktor dalam meter} \\ &= 0,006706 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_{12} &= \text{jarak antar kawat} \\ &= 1,5 \text{ meter} \end{aligned}$$

maka,

$$X_1 = 0,14467 \left[\log \frac{1}{0,006706} + 0,10857 + \log 1,5 \right]$$

$$\begin{aligned} X_1 &= 0,14467 [2,17354 + 0,10857 + 0,17609] \\ &= 0,3556 \text{ ohm/km untuk satu kawat} \end{aligned}$$

2.4.2.4 Penggunaan Tabel untuk Konstanta Saluran

Pabrik pembuat kawat-kawat penghantar sudah menyediakan tabel-tabel yang memberikan besaran-besaran elektrik dan mekanik dari setiap jenis dan ukuran kawat, antara lain penampang kawat, diameter luar kawat, GMR, kapasitas hantar arus, tahanan DC, dan tahanan AC, reaktansi induktif, dan reaktansi kapasitif. Dengan bantuan tabel-tabel ini perhitungan-perhitungan dapat dilakukan dengan lebih cepat, karena perhitungan untuk mendapatkan parameter saluran menggunakan rumus-rumus dapat dihindarkan.

2.4.3 Geometric Mean Radius (GMR) dan Geometric Mean Distance (GMD)

2.4.3.1 Geometric Mean Radius (GMR)

Geometric Mean Radius (GMR) atau jejari rata-rata geometris dari suatu luas (area) adalah limit dari jarak rata-rata geometris (GMD) antara pasangan-pasangan elemen dalam luas itu sendiri jika jumlah elemen itu diperbesar sampai tak berhingga. Khusus untuk kawat bundar, GMR untuk satu kawat ialah jejari dari

suatu silinder berding yang sangat tipis mendekati nol sehingga induktansi dari silinder itu sama dengan induktansi kawat asli.

Berdasarkan persamaan (3.17) diperoleh:

$$L_1 = 2\pi \times 10^{-7} h \left[\ln \frac{1}{r_1} + \frac{1}{4} + \ln d_{12} \right] \text{ henry}$$

$$L_1 = 2\pi \times 10^{-7} h \left[\ln \frac{1}{r_1} + \ln e^{\frac{1}{4}} + \ln d_{12} \right] \text{ henry}$$

$$L_1 = 2\pi \times 10^{-7} h \left[\ln \frac{1}{r_1 e^{-\frac{1}{4}}} + \ln d_{12} \right] \text{ henry}$$

atau,

$$L_1 = L_a + L_d$$

Karena L_a adalah komponen kawat dan tergantung dari $\frac{1}{r_1 e^{-\frac{1}{4}}}$ maka

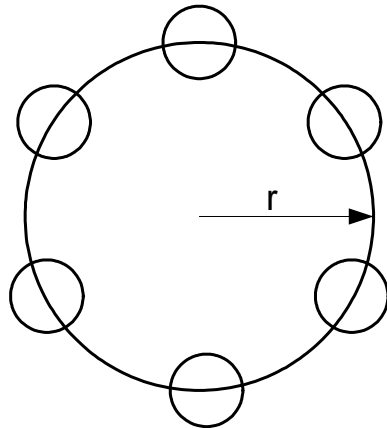
$r_1 e^{-\frac{1}{4}} = r_1'$, disebut jejari rata-rata geometris atau GMR dari kawat bundar dengan jejari r_1 .

Pemakaian GMR ini membutuhkan distribusi arus yang uniform dan tidak ada bahan-bahan magnetik. Jika yang dibahas adalah penghantar ACSR dimana berinti baja yang merupakan bahan magnetik, maka dalam hal ini biasanya diasumsikan arus mengalir dalam kawat-kawat penghantar, dan arus yang sangat kecil pada inti baja diabaikan. Dengan demikian pengertian GMR pada ACSR dapat dipergunakan.

2.4.3.2 Geometric Mean Distance (GMD)

Jika suatu lingkaran pada jejari r terdapat n titik yang jaraknya satu sama lain sama besar maka GMD antara titik-titik itu adalah:

$$GMD = r^n \sqrt[n]{n} \dots\dots\dots(2.28)$$



Gambar 2.3. Penampang kawat penghantar untuk mendapatkan perhitungan GMD.

Jarak-jarak bersama antara pasangan-pasangan titik itu adalah sama dengan $n \times (n - 1)$ jarak-jarak, dan hasil perkalian dari semua jarak-jarak itu adalah sama dengan pangkat $n(n - 1)$ dari GMD-nya.

2.4.4 Kapasitansi dan Reaktansi Kapasitif

Jika ada dua kawat paralel dipisahkan oleh media isolasi akan terbentuk kapasitor, jadi mempunyai sifat untuk menyimpan muatan listrik. Jika suatu perbedaan tegangan dipertahankan antara kedua kawat maka muatan-muatan listrik pada kawat-kawat tersebut mempunyai tanda-tanda yang berlawanan. Sebaliknya jika kita mempertahankan muatan listrik pada kedua kawat dengan tanda yang berlawanan, perbedaan tegangan akan timbul antara kedua kawat tersebut.

Jika kita memandang dua kawat penghantar, yaitu kawat 1 dan kawat 2, masing-masing memiliki potensial e_1 dan e_2 . Perbedaan potensial antara kawat 1 dan kawat 2 diberikan oleh persamaan berikut.

$$e_{12} = e_1 - e_2 = \frac{q_1}{2\pi\epsilon_v h} \left[\ln \frac{1}{r_1} + \ln \frac{1}{r_2} + 2 \ln d_{12} \right] \dots\dots\dots(2.29)$$

dengan,

$$\begin{aligned} \epsilon_v &= \text{konstanta dielektrik ruang hampa} \\ &= 8,854 \times 10^{-12} \text{ farad per meter} \end{aligned}$$

2.4.4.1 Kapasitansi

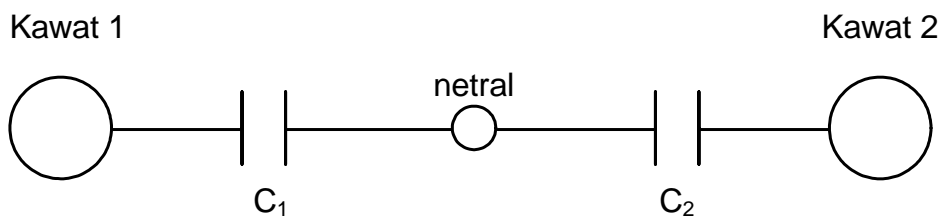
Kapasitansi (C) diberikan menurut persamaan berikut:

$$C = \frac{q}{e} \text{ farad}$$

maka,

$$C_{12} = \frac{q_1}{e_{12}} = \frac{2\pi\epsilon_v h}{\ln \frac{1}{r_1} + \ln \frac{1}{r_2} + 2 \ln d_{12}} \dots\dots\dots(2.30)$$

Prosedur lain yang berguna bagi keperluan kita adalah memandang titik yang jauh itu (potensial nol) sebagai suatu elektroda kapasitor dan kemudian menghitung kapasitansi antara tiap kawat dengan titik tersebut. Maka akan diperoleh dua kapasitor antara tiap kawat dan titik yang mempunyai potensial nol. Tetapi antara kedua kawat, kedua kapasitor itu terhubung seri.



Gambar 2.4. Kapasitansi antara dua kawat penghantar.

Titik dengan potensial nol kita sebut titik netral kapasitansi. Jika suatu sistem tersebut simetris, titik netral berada tepat di tengah-tengah kedua kawat tersebut. Maka diperoleh persamaan:

$$C_1 = \frac{q_1}{e_1} = \frac{2\pi\epsilon_v h}{\ln \frac{1}{r_1} + \ln d_{12}} \dots\dots\dots(2.31)$$

dan,

$$C_2 = -\frac{q_1}{e_2} = \frac{2\pi\epsilon_v h}{\ln \frac{1}{r_2} + \ln d_{12}} \dots\dots\dots(2.32)$$

dengan,

C_1 = kapasitansi kawat 1 terhadap netral.

C_2 = kapasitansi kawat 2 terhadap netral.

Jumlah kapasitansi antara kawat 1 dan kawat 2 terhubung seri,

$$C_{12} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}$$

dan,

$$C_{12} = \frac{2\pi\epsilon_v h}{\ln \frac{1}{r_1} + \ln \frac{1}{r_2} + \ln d_{12}} \quad \text{farad} \quad \dots\dots\dots(2.33)$$

Jika $r_1 = r_2$, sebagaimana biasanya dalam saluran-saluran tenaga listrik, maka:

$$C_1 = C_2 = \frac{2\pi\epsilon_v h}{\ln \frac{1}{r_1} + \ln d_{12}} \quad \text{farad} \quad \dots\dots\dots(2.34)$$

Di dalam satuan praktis, lebih berguna untuk menghitung kapasitansi per km, atau $h = 1000$ meter dan \ln diganti menjadi \log . Untuk kawat udara:

$$\epsilon_v = 8,854 \times 10^{-12} \text{ farad per meter}$$

Substitusi harga-harga di atas ke dalam persamaan (2.33) akan diperoleh persamaan:

$$C_1 = \frac{2,417 \times 10^{-8}}{\ln \frac{1}{r_1} + \ln d_{12}} \quad \text{farad} \quad \dots\dots\dots(2.35)$$

Dalam persamaan (2.35), r_1 dan d_{12} dapat dalam semua unit asal keduanya sama. Tetapi untuk praktisnya, dalam diktat ini r_1 dan d_{12} diberikan dalam meter.

2.4.4.2 Reaktansi Kapasitif

Jika gelombang berbentuk sinus, maka reaktansi kapasitif kawat penghantar 1 dapat diperoleh:

$$X_1' = \frac{-1}{2\pi f C_1} \quad \text{ohm}$$

atau,

$$X_1' = \frac{-6,5856 \times 10^6}{f} \left(\log \frac{1}{r_1} + \log d_{12} \right) \text{ ohm km} \dots\dots\dots(2.36)$$

atau,

$$X_1' = X_a' + X_d' \dots\dots\dots(2.37)$$

dengan,

$$X_a' = \frac{-6,5856 \times 10^6}{f} \log \frac{1}{r_1} \text{ ohm km (pada jarak 1 m)} \dots\dots\dots(2.38)$$

$$X_d' = \frac{-6,5856 \times 10^6}{f} \log d_{12} \text{ ohm km} \dots\dots\dots(2.39)$$

(r dan d dalam meter)

Jika $f = 50$ Hz, maka

$$X_a' = -0,1317 \times 10^6 \log \frac{1}{r_1} \text{ ohm km (pada jarak 1 m)} \dots\dots\dots(2.40)$$

$$X_d' = -0,1317 \times 10^6 \log d_{12} \text{ ohm km} \dots\dots\dots(2.41)$$

Latihan:

1. Jelaskan klasifikasi saluran transmisi berdasarkan konstruksinya dan berdasarkan jenis arus yang digunakan, seraf jelaskan kelebihan dan kekurangannya.
2. Jelaskan komponen pokok saluran transmisi udara.
3. Jelaskanlah mengapa pada sistem transmisi bahwa untuk pengiriman daya yang sama lebih menguntungkan menggunakan tegangan transmisi yang ditinggikan dibandingkan dengan arus yang ditinggikan.
4. Tentukan besar resistansi DC untuk konduktor ACSR 403 mm² dalam Ohm/km pada suhu 25°C. Penampang konduktor itu (403 mm²) tidak termasuk penampang baja, jadi hanya penampang Al saja. Misalkan penghantar yang digunakan adalah Al 61%.

5. Reaktansi induktif per fase suatu saluran transmisi tiga fase simetris yang menggunakan kawat penghantar 157 mm^2 (300.000 CM), 12 strands, ialah 0,402 ohm per km pada frekuensi 50 Hz. Tentukanlah jarak dari kawat-kawat penghantar tersebut.

6. Suatu saluran udara fase tunggal dengan konduktor tembaga dengan konduktivitas 100%; $107,2 \text{ mm}^2$ (4/10 atau 211.600 CM), 19 kawat elemen, dengan jejari efektif 0,6706 cm. Jarak antara kedua kawat 1 m. Tentukanlah reaktansi induktif saluran transmisi tersebut dalam ohm per km per kawat. Frekuensi kerja adalah 50 Hz.

BAB X

KENDALI SISTEM PEMBANGKITAN TERSEBAR: RANGKAIAN ELEKTRONIKA DAYA

Tujuan Instruksional Umum:

Memberikan wawasan tentang rangkaian elektronika daya dalam pengendalian sistem pembangkitan tersebar.

Tujuan Instruksional Khusus:

1. Memberikan pengetahuan tentang prinsip dasar penyearah dalam sistem pengendalian.
2. Memberikan pengetahuan tentang jenis-jenis penyearah dalam rangkaian elektronika daya.
3. Memberikan pengetahuan tentang konverter DC-DC.
4. Memberikan pengetahuan tentang penurun tegangan DC dalam sistem pengendalian.
5. Memberikan pengetahuan tentang inverter PWM.
6. Memberikan pengetahuan tentang penyearah terkontrol.

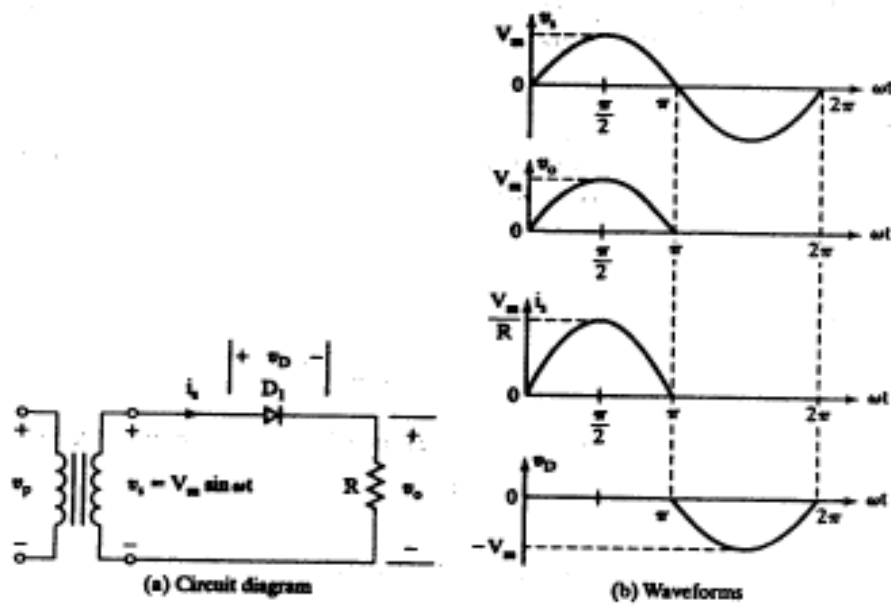
10.1 PENYEARAH DIODA

Dioda secara luas digunakan sebagai penyearah (*rectifier*) . Sebuah penyearah merupakan rangkaian yang mengubah sinyal ac menjadi sinyal satu arah. Sebuah penyearah adalah suatu jenis konverter dc – ac. Berdasarkan jenis catu daya masukannya, penyearah diklasifikasikan ke dalam dua jenis yaitu:

1. Penyearah fase tunggal, dan
2. Penyearah tiga fase.

10.2 PENYEARAH GELOMBANG-SETENGAH FASE-TUNGGAL

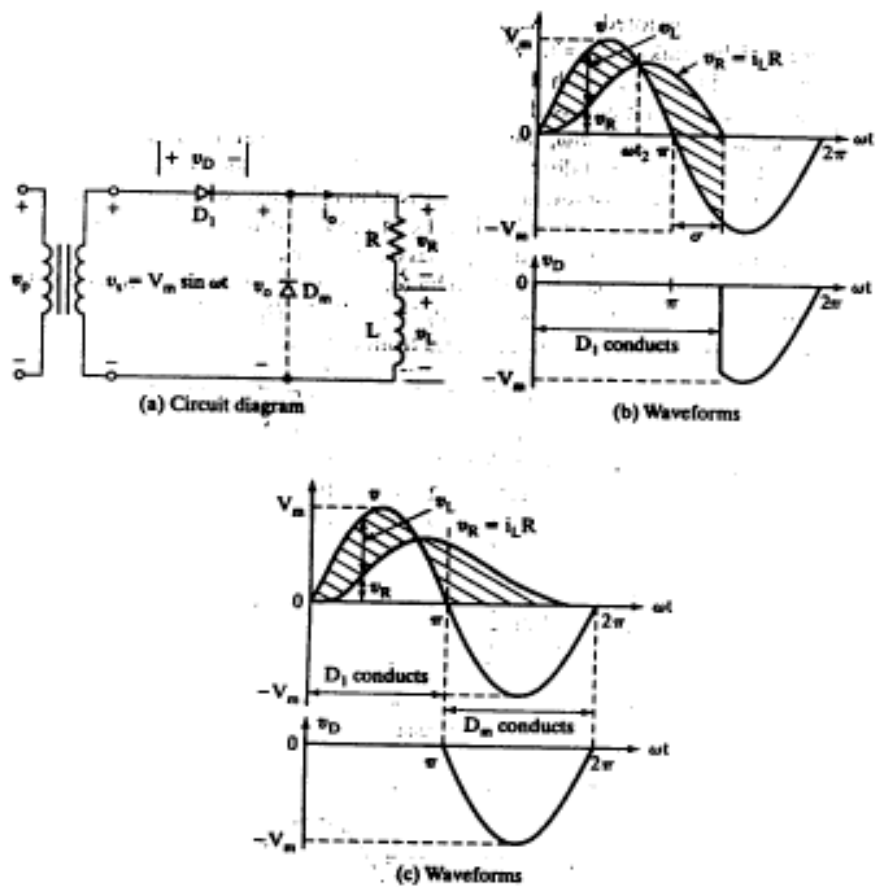
Penyearah gelombang-setengah fase-tunggal merupakan penyearah paling sederhana, tetapi tidak umum digunakan dalam aplikasi industri. Akan tetapi sangat berguna untuk memahami prinsip dasar operasi penyearah.



Gambar 10.1 Penyearah gelombang-setengah fase-tunggal

Diagram rangkaian penyearah gelombang-setengah fase-tunggal dengan beban resistif ditunjukkan pada Gambar 10.1a. Pada saat setengah siklus positif tegangan masukan, dioda D1 konduksi dan tegangan masukan melayani beban. Pada saat setengah siklus negatif tegangan masukan, dioda D1 berada pada kondisi *blocking*, dan tegangan keluarannya adalah nol. Bentuk gelombang tegangan masukan dan keluarannya ditunjukkan pada Gambar 10.1b.

Tinjau rangkaian pada Gambar 10.1a dengan diberi beban RL seperti terlihat pada Gambar 10.2a. karena bebannya adalah induktif, periode konduksi dioda D1 akan diperpanjang melewati 180° hingga arus menjadi nol pada saat $\omega t = \pi + \sigma$. Bentuk gelombang arus dan tegangannya ditunjukkan pada Gambar 10.2b.



Gambar 10.2 Penyearah setengah gelombang dengan beban RL.

Jika keluaran penyearah dihubungkan dengan baterai, penyearah dapat digunakan sebagai pengisi baterai (*battery charger*). Hal ini dapat dilihat pada Gambar 10.3a. untuk $v_s > E$, dioda D1 konduksi. Sudut α pada saat dioda mulai konduksi dapat dicari dari kondisi:

$$V_m \sin \alpha = E$$

Maka

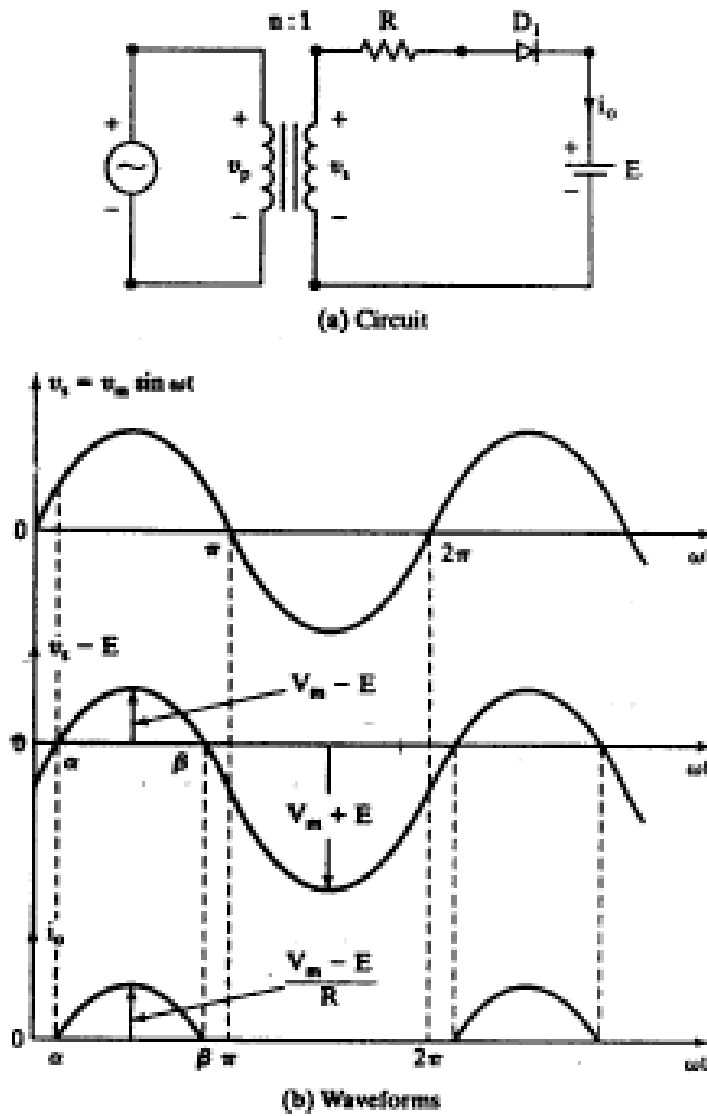
$$\alpha = \sin^{-1} \frac{E}{V_m}$$

Dioda D₁ akan mati bilamana $v_s < E$ pada saat

$$\beta = \pi - \alpha$$

Arus pemuatan i_L seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3b dapat dicari melalui persamaan:

$$i_0 = \frac{v_s - E}{R} = \frac{v_m \sin \omega t - E}{R}, \text{ untuk } \alpha < \omega t < \beta$$



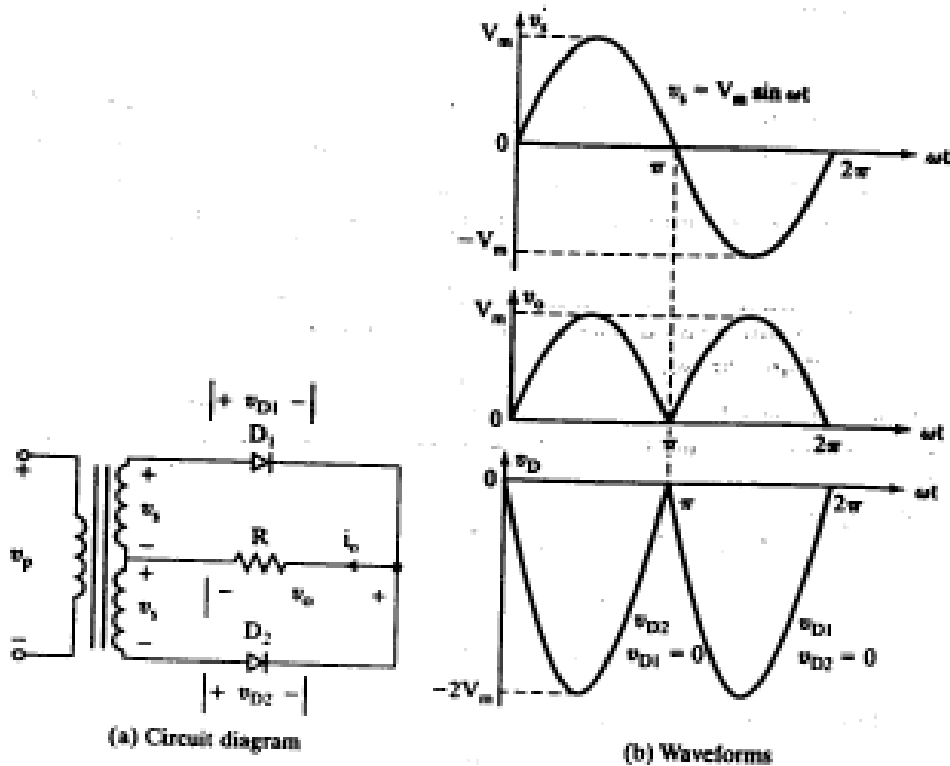
Gambar 10.3 Pengisi baterai

10.3 PENYEARAH GELOMBANG-PENUH FASE-TUNGGAL

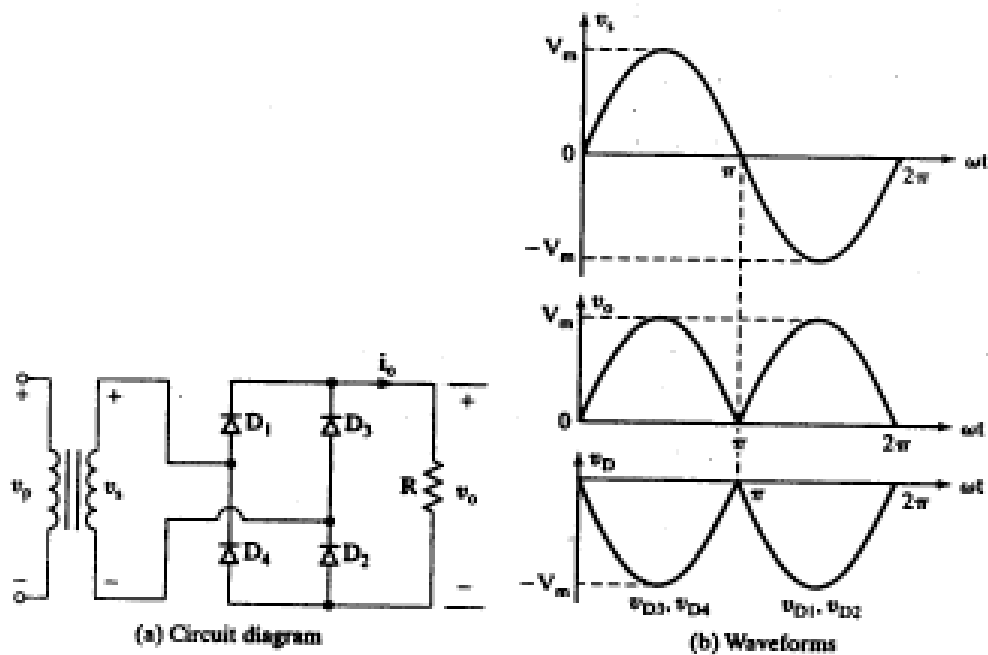
Rangkaian penyearah dengan trafo *center-tapped* diperlihatkan pada Gambar 10.4a. Setiap setengah bagian dari transformator berhubungan dengan dioda yang berfungsi sebagai penyearah gelombang setengah dan keluaran penyearah gelombang penuhnya ditunjukkan pada Gambar 10.4b. karena tanpa arus dc yang melalui trafo, maka tidak ada masalah penjenuhan inti trafo. Tegangan keluaran rerata adalah:

$$V_{dc} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} V_m \sin \omega t dt = \frac{2V_m}{\pi} = 0,6366V_m$$

Dari pada menggunakan Penyearah gelombang-penuh dengan trafo *center-tapped*, maka lebih baik digunakan rangkaian penyearah dengan empat buah dioda seperti ditunjukkan pada Gambar 3.5a.



Gambar 10.4 Penyearah gelombang-penuh dengan trafo *center-tapped*



Gambar 10.5 Penyearah jembatan gelombang-penuh.

Pada saat setengah siklus positif tegangan masukan, daya dicatu ke beban melalui dioda D1 dan D2. pada sat siklus negatif, dioda D3 dan D4 konduksi. Bentuk gelombang tegangan keluarannya ditunjukkan pada Gambar 10.5b, dan kelihatan sama dengan keluaran pada Gambar 10.4b. Tegangan inverse puncak dioda hanya V_m . Rangkaian seperti ini dikenal sebagai penyearah jembatan, yang banyak digunakan dalam aplikasi di industri.

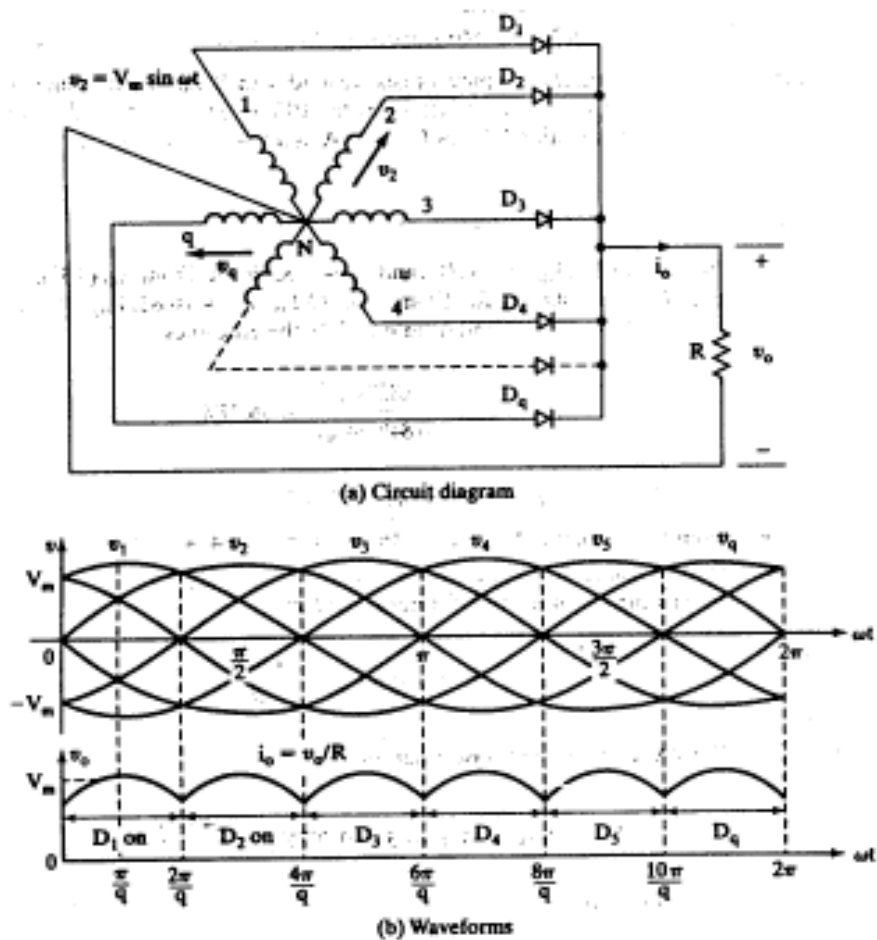
10.4 PENYEARAH FASE-JAMAK

Berdasarkan pembahasan sebelumnya diperoleh bahwa tegangan keluaran merata yang diperoleh dari penyearah fase-tunggal gelombang penuh adalah $0,6366V_m$ dan penyearah ini digunakan dalam aplikasi hingga aras daya 15 kW. Untuk keluaran daya yang lebih besar, digunakan penyearah tiga fase dan penyearah multifase.

Rangkaian penyearah seperti terlihat pada Gambar 10.4a dapat diperluas menjadi berlipat ganda dengan menggunakan belitan multifase pada sisi sekunder trafo, seperti diperlihatkan pada Gambar 10.6a.

Rangkaian ini dapat dianggap sebagai rangkaian penyearah fase-tunggal setengah gelombang dan dapat dianggap sebagai jenis gelombang setengah. Dioda ke-k konduksi pada saat periode bilamana tegangan fase ke-k lebih tinggi dari fase yang lain. Bentuk gelombang tegangan dan arusnya diperlihatkan pada Gambar 10.6b. Periode konduksi masing-masing dioda adalah $2\pi/q$.

Berdasarkan Gambar 10.6 dapat dicatat bahwa arus yang melalui belitan sekunder adalah satu arah dan mengandung komponen dc. Hanya satu belitan sekunder yang membawa arus pada waktu tertentu, dan hasilnya adalah sisi primer trafo harus terhubung delta untuk mengeliminasi komponen dc pada sisi masukan transformator. Hal ini akan meminimalkan kandungan harmonik arus saluran primer.



Gambar 10.6 Penyearah fase-jamak

10.5 KONVERTER DC-DC

Dalam banyak aplikasi di industri, dibutuhkan untuk mengubah sumber dc tegangan-tetap menjadi sumber dc tegangan-variabel. Konverter dc-dc mengubah secara langsung dari dc ke dc sehingga disebut juga sebagai konverter dc. Konverter dc dapat dianggap sebagai ekivalen dc dengan transformator ac dengan rasio lilitan variabel kontinu. Seperti halnya transformator, konverter dc dapat juga digunakan sebagai penaik (*step-up*) atau penurun (*step-down*) sumber tegangan dc.

Konverter dc banyak digunakan untuk kontrol motor traksi pada automobil elektrik, mobil trolley, pesawat pengangkat di pelabuhan (*marine hoists*), truk (*forklift*), dan mine hauler. Konverter dc mampu memberikan kontrol akselerasi yang halus, efisiensi tinggi, dan tanggapan dinamik yang cepat.

Konverter dc dapat juga digunakan dalam pengereman regeneratif motod dc untuk mengembalikan energi ke catu daya, dan keunggulan ini dapat menghemat energi untuk sistem transportasi yang sering berhenti mendadak. Konverter dc dapat digunakan dalam regulator tegangan dc, dan juga digunakan sebagai konjungsi dengan sebuah induktor, untuk membangkitkan sumber arus dc, khususnya untuk inverter sumber arus.

10.6 PRINSIP OPERASI PENURUN TEGANGAN

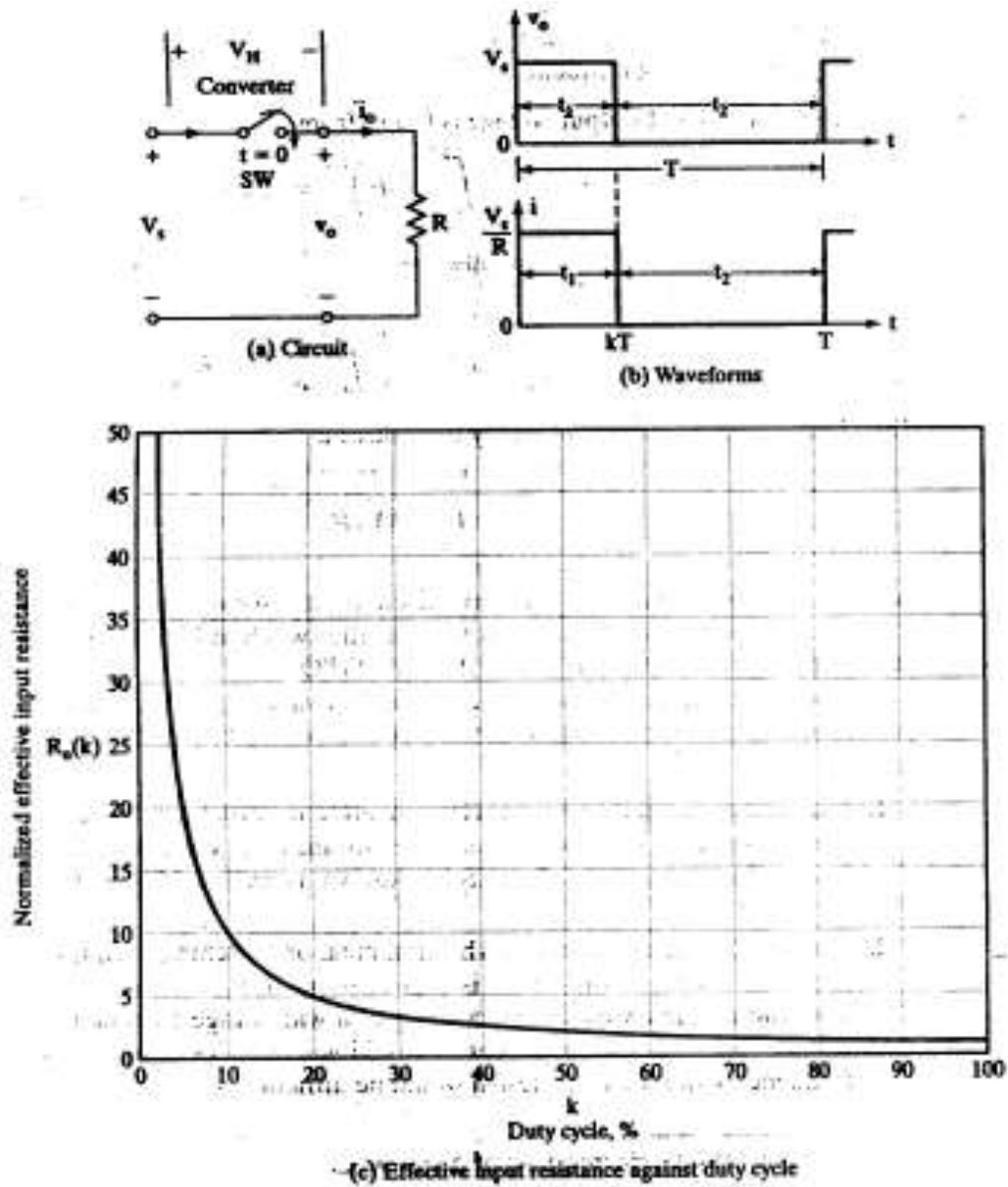
Prinsip operasi penurun tegangan (*step-down*) dapat dijelaskan menggunakan Gambar 10.7a. Bilamana saklar SW, yang dikenal sebagai chopper, ditutup pada saat t_1 , maka akan timbul tegangan masukan v_s pada beban. Jika saklar dibuka pada saat t_2 , tegangan pada beban menjadi nol. Bentuk gelombang tegangan untuk tegangan keluaran dan arus beban dapat dilihat pada Gambar 10.7b.

Saklar konverter dapat diimplementasikan dengan menggunakan:

1. power bipolar junction transistor (BJT daya).
2. power metal oxide semiconductor field-effect transistor (MOSFET daya).
3. gate-turn-off thyristor (GTO), atau

4. insulated-gate bipolar transistor (IGBT).

Piranti konverter dc dalam prakteknya terbatas hanya untuk jatuh tegangan pada rentang 0,5 hingga 2 V, dan untuk kepentingan penyederhanaan, maka jatuh tegangan tersebut diabaikan untuk piranti semikonduktor daya tersebut.

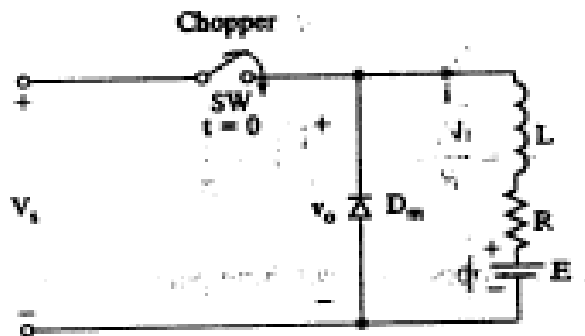


Gambar 10.8 Konverter penurun tegangan dengan beban resistif.

10.7 KONVERTER PENURUN TEGANGAN DENGAN BEBAN RL

Sebuah konverter dengan beban RL ditunjukkan pada Gambar 10.9 operasi konverter dapat dibagi menjadi dua mode. Pada saat mode 1, konverter ditutup dan arus mengalir dari catu daya ke beban. Pada saat mode 2, konverter dibuka dan arus beban terus mengalir berputar melalui dioda D_m . Rangkaian ekivalen untuk mode ini ditunjukkan pada Gambar 10.10a. bentuk gelombang arus beban dan tegangan keluarannya ditunjukkan pada Gambar 10.10b dengan asumsi bahwa arus beban meningkat secara linear.

Akan tetapi arus yang melalui beban RL meningkat atau turun secara eksponensial dengan konstanta waktu. Konstanta waktu beban ($\tau = L/R$) umumnya jauh lebih besar dari periode switching T . Jadi, pendekatan linear dapat dianggap valid untuk kondisi rangkaian yang banyak dan penyederhanaannya dapat diturunkan dengan keakuratan yang mungkin.



Gambar 10.9 Konverter dc dengan beban RL

Arus beban untuk mode 1 dapat dicari berdasarkan persamaan

$$V_s = Ri_1 + L \frac{di_1}{dt} + E$$

dengan arus inisial $i_1(t=0) = I_1$ memberikan arus beban,

$$i_1(t) = I_1 e^{-tR/L} + \frac{V_s - E}{R} (1 - e^{-tR/L})$$

Mode ini valid $0 \leq t \leq t_1 (= kT)$; dan pada akhir mode ini, arus beban menjadi

$$I_1(t = t_1 = kT) = I_2$$

Arus beban pada mode 2 dapat dicari dari persamaan

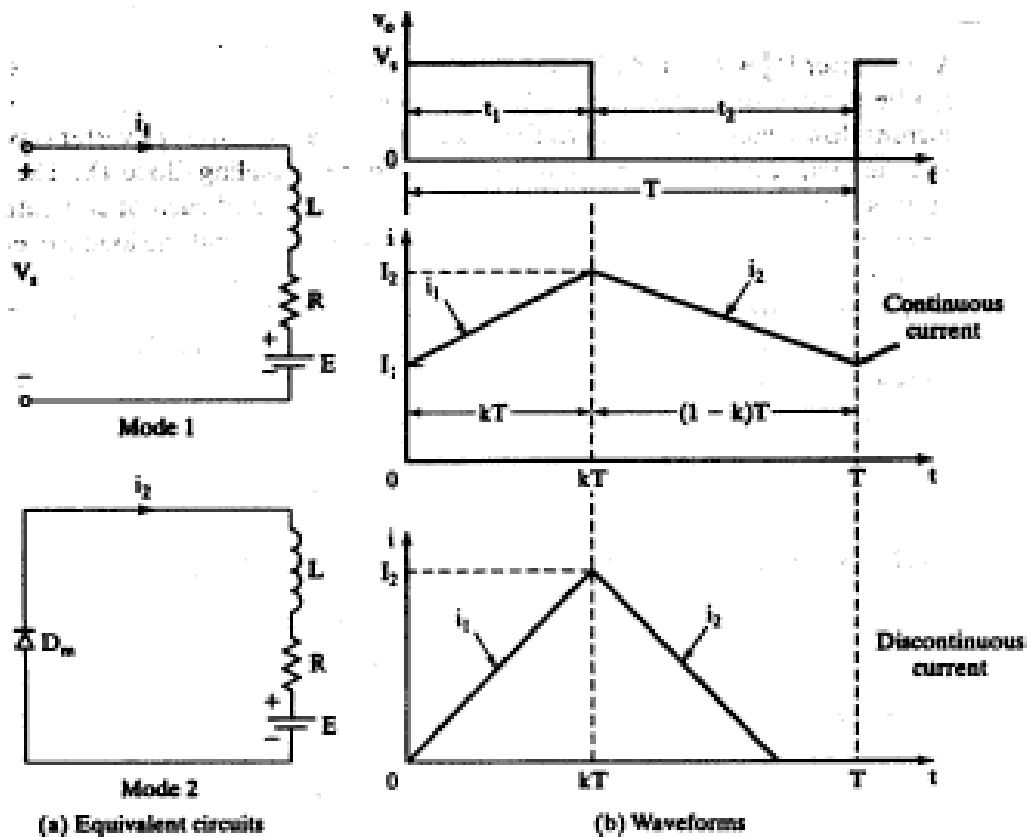
$$0 = Ri_2 + L \frac{di_2}{dt} + E$$

dengan arus inisial $i_2(t = 0) = I_2$ memberikan sumbu asal waktu (yakni $t = 0$) pada permulaan mode 2, dan diperoleh,

$$i_2(t) = I_2 e^{-tR/L} - \frac{E}{R} (1 - e^{-tR/L})$$

Mode ini valid $0 \leq t \leq t_2 [(1 - k)T]$. Pada akhir mode ini, arus beban menjadi

$$I_2(t = t_2) = I_3$$



Gambar 10.10 Rangkaian ekuivalen dan bentuk gelombang beban RL.

10.8 KONVERTER PENAIK TEGANGAN DENGAN BEBAN RL

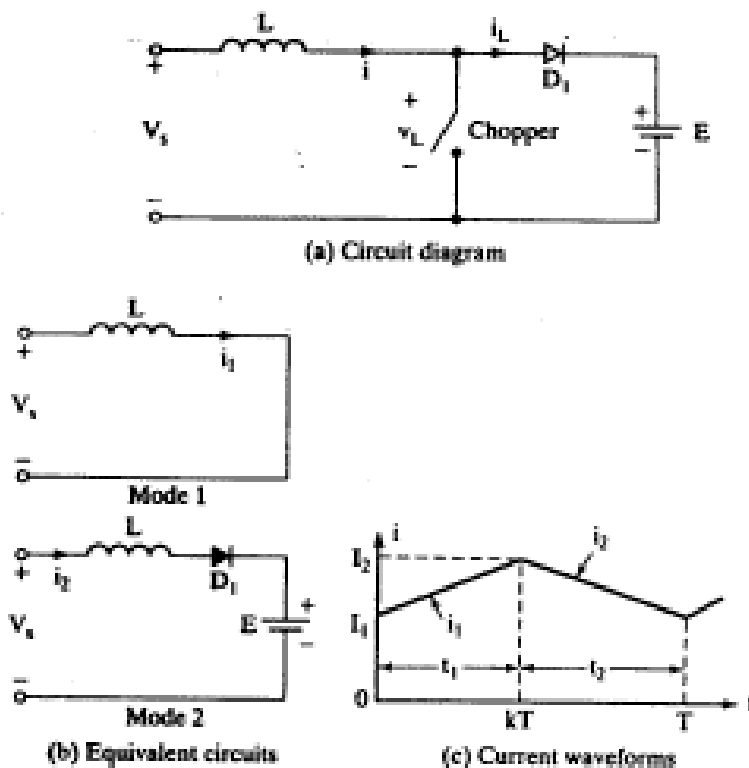
Pada konverter untuk operasi penaik tegangan, prinsip operasinya dapat diaplikasikan untuk mentransfer energi dari suatu sumber tegangan ke sumber tegangan yang lain, seperti terlihat pada Gambar 10.11a. rangkaian ekivalen untuk mode operasinya ditunjukkan pada Gambar 10.11b dan bentuk gelombang arusnya ditunjukkan pada Gambar 10.11c. Arus induktor pada mode 1 diberikan oleh persamaan

$$V_s = L \frac{di_1}{dt}$$

dan dinyatakan juga sebagai

$$i_1(t) = \frac{V_s}{L} t + I_1$$

dengan I_1 adalah arus inisial untuk mode 1.



Gambar 10.11 Rangkaian konverter dc untuk transfer energi.

Pada saat mode 1, arus pasti meningkat dan kondisi yang dibutuhkan adalah

$$\frac{di_1}{dt} > 0 \quad \text{atau} \quad V_s > 0$$

Arus untuk mode 2 diberikan oleh

$$V_s = L \frac{di_2}{dt} + E$$

dan dinyatakan juga sebagai

$$i_2(t) = \frac{V_s - E}{L} t + I_2$$

dengan I_2 adalah arus inisial untuk mode 2. Untuk sistem stabil, arus pasti akan jatuh dan kondisinya adalah

$$\frac{di_2}{dt} < 0 \quad \text{atau} \quad V_s < E$$

Jika kondisi ini tidak terpenuhi, arus induktor terus naik dan terjadi ketidakstabilan sistem. Oleh karenanya, kondisi transfer daya terkontrol adalah

$$0 < V_s < E.$$

10.9 INVERTER PWM

Konverter dc ke ac dikenal sebagai inverter. Fungsi inverter adalah mengubah tegangan masukan dc ke tegangan keluaran ac simetris pada magnitudo dan frekuensi yang diinginkan. Tegangan keluaran dapat ditetapkan atau frekuensi variabel. Tegangan keluaran variabel dapat diperoleh dengan memvariasikan tegangan dc masukan dan menjaga gain konstanta inverter. Pada sisi lain, jika tegangan masukan dc adalah tetap dan tidak dapat dikontrol, tegangan keluaran variabel dapat diperoleh dengan memvariasikan gain inverter, yang mana secara normal dikerjakan oleh kontrol PWM (pulse-width-modulation) di dalam inverter. Gain inverter dapat didefinisikan sebagai rasio tegangan keluaran ac terhadap tegangan masukan dc.

Bentuk gelombang tegangan keluaran inverter ideal seharusnya sinusoidal. Akan tetapi, bentuk gelombang inverter dalam prakteknya nonsinusoidal dan mengandung harmonik. Untuk aplikasi daya rendah dan menengah, gelombang tegangan persegi atau gelombang hampir-persegi dapat diterima, akan tetapi untuk aplikasi daya tinggi, diinginkan bentuk gelombang sinusoidal yang distorsinya kecil. Dengan ketersediaan piranti semikonduktor daya kecepatan tinggi, muatan harmonik tegangan keluaran dapat diminimalkan atau direduksi secara signifikan dengan teknik switching.

Inverter secara luas digunakan dalam aplikasi industri misalnya pada pengemudi motor ac kecepatan variabel, pemanasan induksi, catu daya standby, dan UPS (uninterruptible power supplies). Masukan daya dapat berupa baterai, fuel cell, solar cell, atau sumber dc yang lain. Keluaran satu fase yang biasa digunakan adalah:

1. 120 V pada 60 Hz,
2. 220 V pada 50 Hz, dan
3. 115 V pada 400 Hz.

Untuk sistem tiga fase berdaya tinggi, tegangan keluaran yang biasa digunakan adalah:

1. 220 hingga 380 V pada 50 Hz
2. 120 hingga 208 V pada 60 Hz
3. 115 hingga 200 V pada 400 Hz

Inverter dapat diklasifikasikan ke dalam dua jenis yaitu:

1. Inverter satu fase
2. Inverter tiga fase.

Masing-masing jenis dapat dikontrol oleh piranti turn-on dan turn-off misalnya menggunakan BJT, MOSFET, IGBT, MCT, SIT, dan GTO. Inverter-inverter tersebut umumnya menggunakan sinyal kontrol PWM untuk menghasilkan tegangan keluaran ac.

Sebuah inverter dikatakan *voltage-fed inverter* (VFI) jika tegangan masukannya dibuat konstan, *current-fed inverter* (CFI) jika arus masukannya dijaga konstan, dan *variable dc linked inverter* jika tegangan masukannya

terkontrol. Jika tegangan atau arus keluaran inverter dipaksa nol oleh rangkaian resonan LC, inverter jenis ini disebut *resonant-pulse inverter* yang banyak digunakan dalam aplikasi elektronika daya.

10.9.1 Prinsip Operasi

Prinsip operasi inverter satu fase dapat dijelaskan menggunakan Gambar 6.1a. Rangkaian inverter terdiri dari dua chopper. Bilamana hanya transistor Q_1 yang dihidupkan untuk waktu $T_0/2$, tegangan sesaat pada beban yaitu v_0 adalah $V_S/2$. Jika transistor Q_2 hanya dihidupkan untuk waktu $T_0/2$, timbul $-V_S/2$ pada beban. Rangkaian logika harus dirancang sehingga Q_1 dan Q_2 tidak hidup dalam waktu yang bersamaan.

Gambar 6.1b menunjukkan bentuk gelombang tegangan masukan dan arus transistor dengan beban resistif. Inverter ini membutuhkan sumber dc tiga kawat, dan bilamana transistor off, tegangan baliknya adalah V_S , dan bukan $V_S/2$. inverter jenis ini dikenal sebagai *half-bridge inverter*.

Tegangan keluaran rms (root-mean-square) dapat dicari dari

$$V_0 = \left(\frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} \frac{V_S^2}{4} dt \right)^{1/2} = \frac{V_S}{2}$$

Tegangan keluaran seketika dapat dinyatakan dalam deret Fourier sebagai berikut

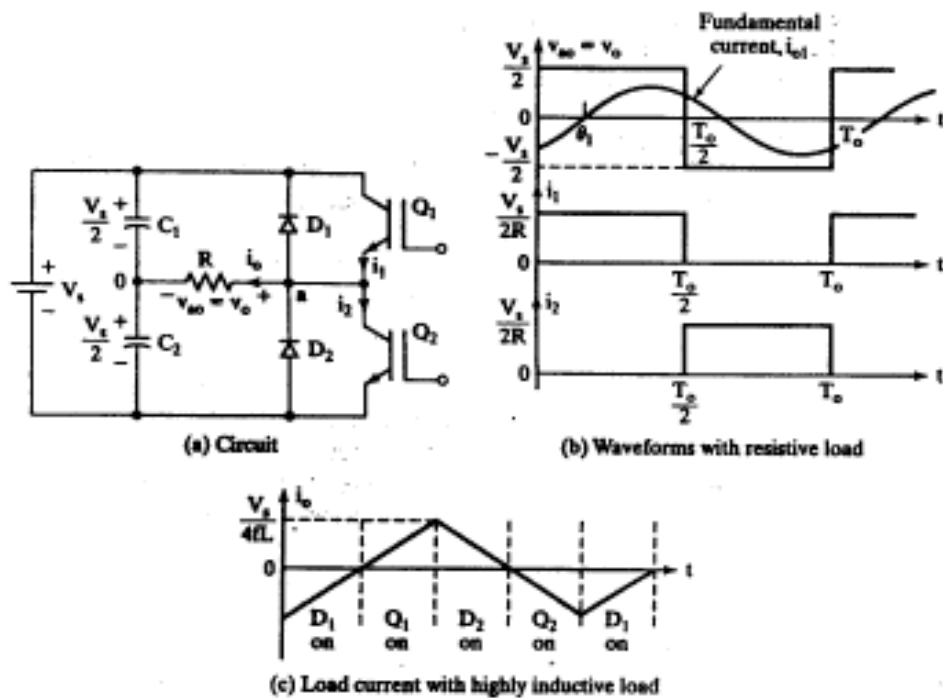
$$v_0 = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t))$$

dengan

$$b_n = \frac{4V_S}{n\pi}$$

yang akan memberikan tegangan keluaran v_0

$$\begin{aligned} v_0 &= \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_S}{n\pi} \sin n\omega t \\ &= 0 \quad \text{untuk } n = 2,4,\dots \end{aligned}$$



Gambar 10.12 Inverter jembatan-setengah satu-fase

10.9.2 Inverter Jembatan Satu Fase

Inverter sumber tegangan jembatan satu fase (VSI) ditunjukkan pada Gambar 10.13a. Inverter ini terdiri dari empat chopper. Bilamana transistor Q1 dan Q2 dihidupkan secara simultan, tegangan masukan V_s akan masuk ke beban. Jika transistor Q3 dan Q4 dihidupkan pada waktu yang sama, tegangan yang pada beban menjadi kebalikannya yaitu $-V_s$. Bentuk gelombang untuk tegangan keluaran ditunjukkan pada Gambar 10.13b.

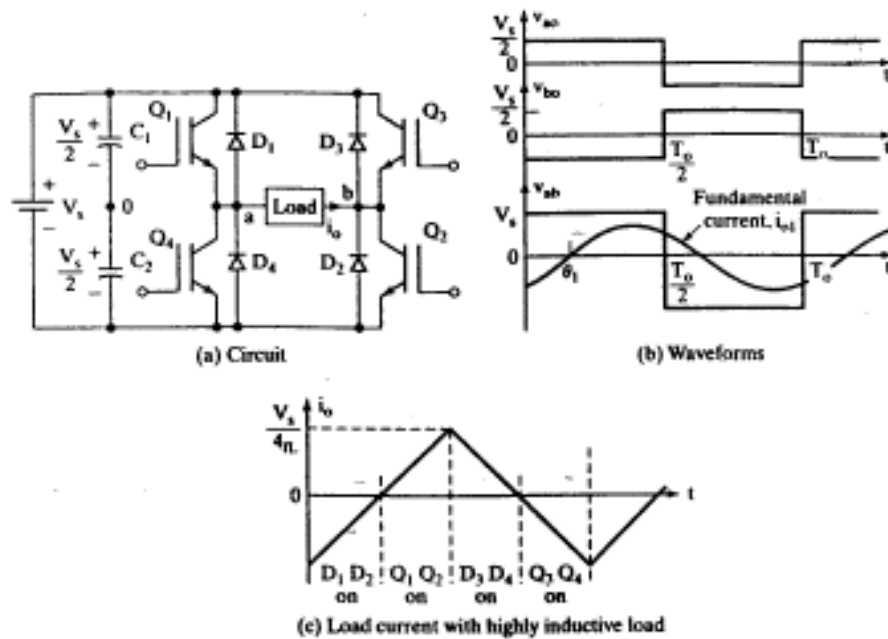
Tegangan keluaran rms (root-mean-square) dapat dicari dari

$$V_0 = \left(\frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} V_s^2 dt \right)^{1/2} = V_s$$

Tegangan keluaran sesaat v_0

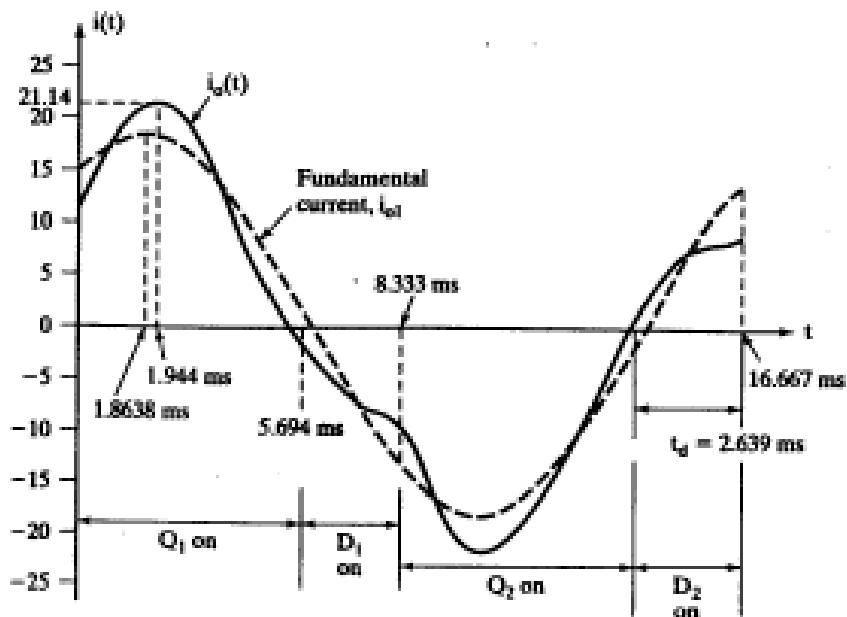
$$v_0 = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \sin n\omega t$$

$$= 0 \quad \text{untuk } n = 2,4,\dots$$



Gambar 10.13 Inverter jembatan-penuh satu fase.

Berdasarkan Gambar 10.13a, jika diimplementasikan dengan beban RLC dengan $R = 10 \text{ ohm}$, $L = 31,5 \text{ mH}$, dan $C = 112 \text{ }\mu\text{F}$, pada frekuensi 60 Hz dan tegangan masukan dc-nya adalah 220 V , maka bentuk gelombang arus dasarnya yaitu $i_1(t)$ dapat ditunjukkan pada Gambar 10.14.



Gambar 10.14 Bentuk gelombang $i_1(t)$ untuk contoh aplikasi inverter.

10.9.3 Inverter Tiga Fase

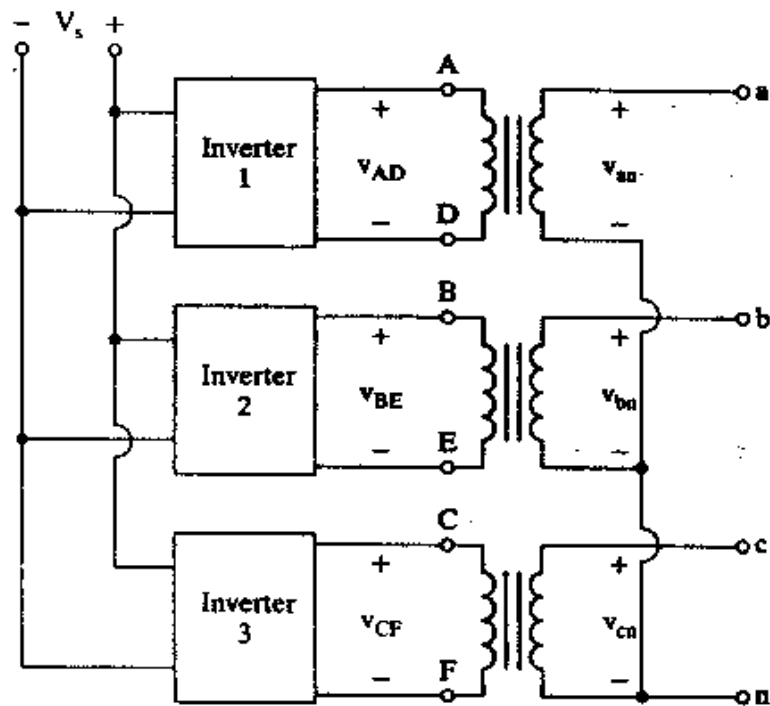
Inverter tiga fase biasanya digunakan untuk aplikasi daya-tinggi. Tiga inverter jembatan setengah (atau full) satu fase dapat dihubungkan paralel seperti ditunjukkan pada Gambar 10.15a. untuk membentuk konfigurasi inverter tiga fase. Sinyal pencetus (*gating*) inverter satu fase harus dimajukan atau ditunda 120° satu sama lain guna memperoleh tegangan (dasar) tiga fase seimbang.

Belitan primer transformator harus diisolasi satu sama lain, sedang belitan sekunder dapat dihubungkan wye atau delta. Sekunder transformator biasanya dihubungkan delta untuk mengeliminasi harmonik triplen ($n = 3, 6, 9, \dots$) yang muncul pada tegangan keluaran dan susunan rangkaiannya diperlihatkan pada Gambar 10.15b. Susunan ini membutuhkan tiga transformator satu fase, 12 transistor, dan 12 dioda. Jika tegangan keluaran inverter satu fase tidak seimbang dengan sempurna baik magnitudo maupun fasenya, maka tegangan keluaran tiga fasenya tidak seimbang.

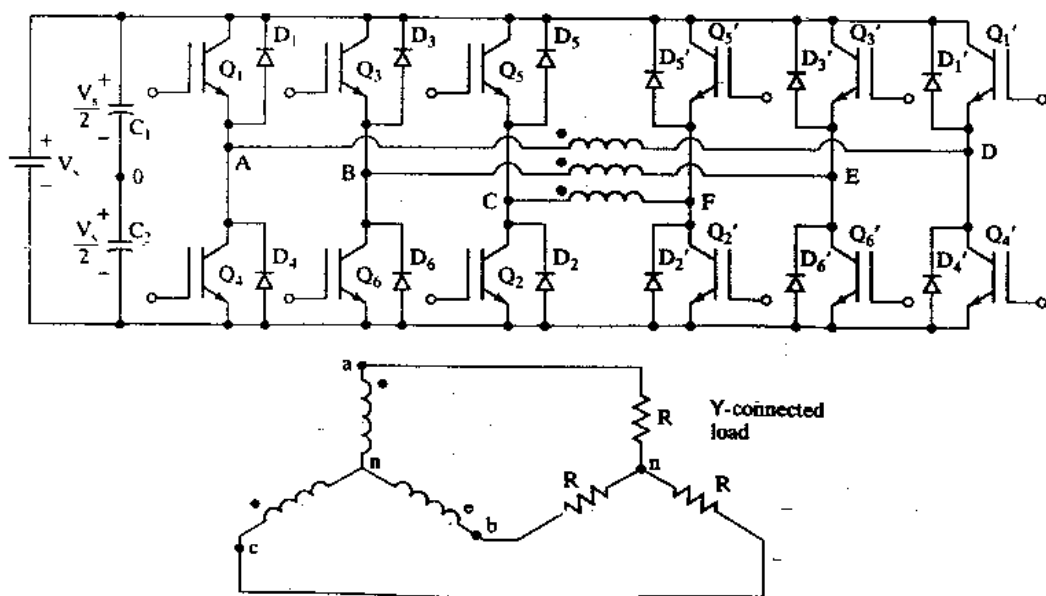
Keluaran tiga fase dapat diperoleh dari konfigurasi enam transistor dan enam dioda. Dua jenis kontrol sinyalnya dapat diterapkan untuk transistor: konduksi 180° atau konduksi 120° . Konduksi 180° pemanfaatannya lebih baik untuk pensaklaran sehingga lebih disukai.

Penentuan rating tegangan dan arus piranti semikonduktor daya dalam rangkaian inverter tergantung pada jenis inverter, beban, dan metode kontrol tegangan dan arus. Guna untuk keperluan perancangannya, maka dibutuhkan beberapa hal sebagai berikut:

1. ekspresi arus beban sesaat
2. plotting bentuk gelombang arus untuk masing-masing piranti dan komponen.



(a) Schematic



(b) Circuit diagram

Gambar 10.15 Inverter tiga fase yang dibentuk dari tiga inverter satu fase

Jika bentuk gelombang arus diketahui, maka rating piranti semikonduktor daya dapat ditentukan. Evaluasi rating tegangan membutuhkan penetapan tegangan balik masing-masing piranti.

10.10 PENYEARAH TERKONTROL

Pada pembahasan sebelumnya diperoleh pengetahuan bahwa penyearah dioda hanya memberikan tegangan keluaran yang tetap. Untuk memperoleh tegangan keluaran yang terkontrol, maka digunakan thyristor kontrol fase sebagai pengganti dioda. tegangan keluaran penyearah tiristor bervariasi dengan mengontrol tunda sudut penyalaan tiristor. Tiristor kontrol fase diposisikan turn-on dengan menerapkan pulsa singkat ke gate-nya dan di-turn-off-kan secara alamiah atau komunikasi saluran, dan dalam kasus beban induktif, maka tiristor di-turn-off-kan dengan menyalakan tiristor lain dari penyearah tersebut pada saat siklus-setengah negatif tegangan masukan.

Penyearah terkontrol fase lebih sederhana dan lebih murah, dan efisiensi penyearahannya umumnya di atas 95%. Karena penyearah tersebut mengubah dari ac ke dc, maka penyearah terkontrol sering juga disebut konverter ac – dc dan digunakan secara luas pada aplikasi di industri, khususnya pengemudi kecepatan variabel, bervariasi dari ukuran dengan dayakuda (*horsepower*) kecil hingga tingkat daya megawatt.

Konverter kontrol-fase dapat diklasifikasikan ke dalam dua jenis tergantung pada catu daya inputnya, yaitu:

1. Konverter satu-fase, dan
2. Konverter tiga-fase.

Masing-masing jenis dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

- a. Semiconverter
- b. Full converter
- c. Dual converter

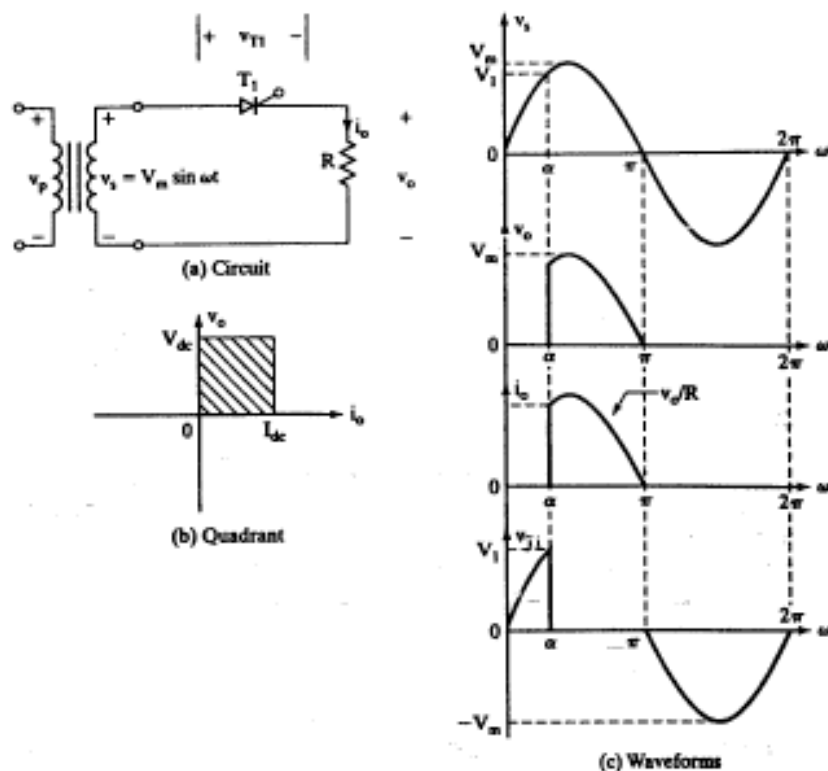
Semikonverter adalah konverter kuadran-satu dan mempunyai satu polaritas tegangan dan arus keluaran. Full konverter adalah konverter kuadran-dua

dan polaritas tegangan keluarannya dapat positif atau negatif. Akan tetapi, arus keluaran full konverter hanya mempunyai satu polaritas. Dual konverter dapat beroperasi dalam empat kuadran; dan tegangan dan arus keluarannya dapat positif atau negatif. Dalam beberapa aplikasi, konverter terhubung seri untuk beroperasi dalam tegangan yang lebih tinggi dan untuk memperbaiki faktor daya (PF) masukan.

Metode deret Fourier yang serupa dengan penyearah dioda dapat diterapkan untuk menganalisis unjukkerja konverter terkontrol-fase dengan beban RL. Akan tetapi, untuk menyederhanakan analisis, beban induktans dapat diasumsikan sangat tinggi sehingga arus beban kontinyu dan mempunyai riak yang dapat diabaikan.

10.10.1 Prinsip Operasi Konverter Terkontrol-Fase

Sekarang tinjau rangkaian dalam Gambar 10.16a yang mempunyai beban resistif.



Gambar 10.16 Konverter tiristor satu fase dengan beban resistif.

Pada saat siklus-setengah positif tegangan masukan, anoda tiristor adalah positif dengan mengacu pada katoda dan tiristor dikatakan bias maju (*forward biased*). Bilamana tiristor T1 dinyalakan pada $\omega t = \alpha$, tiristor T1 konduksi dan tegangan masukan muncul pada beban. Bilamana tegangan masukan mulai menuju negatif pada $\omega t = \pi$, anoda tiristor adalah negatif mengacu pada katodanya dan tiristor T1 dikatakan bias balik (*reverse biased*), dan terjadi turned-off. Waktu setelah tegangan masukan mulai positif hingga tiristor dinyalakan pada negatif $\omega t = \alpha$ dikenal sebagai tunda (*delay*) atau sudut penyalaan (*firing angle*) α .

Gambar 10.16b menunjukkan daerah operasi konverter, dimana tegangan dan arus keluaran mempunyai satu polaritas.

Gambar 10.16c menunjukkan bentuk gelombang tegangan masukan, tegangan keluaran, arus beban, dan tegangan pada T1. konverter ini biasanya digunakan dalam aplikasi industri karena keluarannya mempunyai konten riak yang tinggi dan frekuensi riak yang rendah. Akan tetapi, Gambar itu menjelaskan prinsip operasi konverter tiristor fase-tunggal. Jika f_s adalah frekuensi catu masukan, frekuensi terendah tegangan riak keluaran adalah f_s .

Jika V_m adalah tegangan masukan puncak, tegangan keluaran rerata V_{dc} dapat dicari dari,

$$\begin{aligned} V_{dc} &= \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin \omega t d(\omega t) \\ &= \frac{V_m}{2\pi} [-\cos \omega t]_{\alpha}^{\pi} \\ &= \frac{V_m}{2\pi} [1 + \cos \alpha] \end{aligned}$$

dan V_{dc} bervariasi dari V_m/π sampai dengan 0 dengan variasi α dari 0 ke π . Tegangan keluaran rata-rata menjadi maksimum bilamana $\alpha = 0$ dan tegangan keluaran maksimum V_{dm} adalah

$$V_{dm} = \frac{V_m}{\pi}$$

Normalisasi tegangan keluaran dengan mengacu V_{dm} , tegangan keluaran ternormalisasi adalah

$$V_n = \frac{V_{dc}}{V_{dm}}$$

$$= 0,5(1 + \cos \alpha)$$

Tegangan keluaran rmsnya diberikan oleh

$$V_{rms} = \left[\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) \right]^{1/2}$$

$$= \left[\frac{V_m^2}{4\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (1 - \cos 2\omega t) d(\omega t) \right]^{1/2}$$

$$= \frac{V_m}{2} \left[\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]^{1/2}$$

Runtun gerbang untuk switch tiristor adalah sebagai berikut:

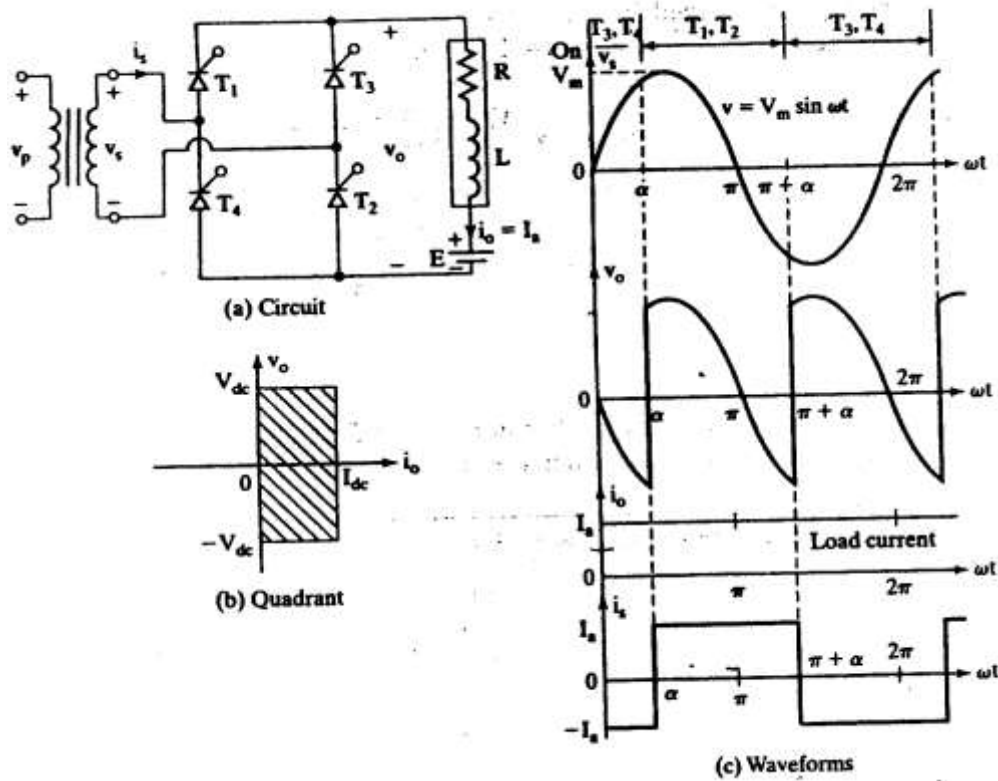
1. Membangkitkan sinyal-pulsa pada persilangan nol positif catu daya v_s .
2. Tunda pulsa dengan sudut α yang diinginkan dan terapkan antara gerbang dan terminal katoda T_1 melalui rangkaian terisolasi-gerbang.

10.10.2 Full Konverter Fase-Tunggal

Susunan rangkaian full konverter fase-tunggal ditunjukkan pada Gambar 10.17a dengan beban induktif yang tinggi sehingga arus beban kontinu dan tanpa riak. Pada saat siklus-setengah positif, tiristor T_1 dan T_2 terbias maju; dan bilamana kedua tiristor secara simultan dinyalakan pada $\omega t = \alpha$, beban terhubung ke catu daya melalui T_1 dan T_2 . Disebabkan oleh beban induktif, tiristor T_1 dan T_2 kontinu konduksi melampaui $\omega t = \pi$, sementara tegangan masukan senantiasa negatif.

Pada saat tegangan masukan siklus-setengah negatif, tiristor T_3 dan T_4 memakai tegangan catu pada tiristor T_1 dan T_2 sebagai tegangan blocking balik. T_1 dan T_2 di-turn-off-kan karena saluran (line) atau komunikasi alami dan arus beban dikirim dari T_1 dan T_2 ke T_3 dan T_4 .

Gambar 10.17b menunjukkan daerah operasi konverter dan Gambar 10.17c menunjukkan bentuk gelombang untuk tegangan masukan, tegangan keluaran, dan arus masukan dan keluaran.



Gambar 10.17 Full konverter fase-tunggal

Pada saat periode dari α ke π , tegangan masukan v_s dan arus masukan i_s adalah positif, dan daya mengalir dari catu daya ke beban. Konverter dalam hal ini dikatakan beroperasi dalam mode penyearahan (rectification). Pada saat periode dari π ke $\pi + \alpha$, tegangan masukan v_s adalah negatif dan arus masukan i_s adalah positif; dan daya balik mengalir dari beban ke catu daya. Konverter dalam hal ini dikatakan beroperasi dalam mode inversi. Konverter ini secara luas digunakan dalam aplikasi industri hingga daya 15 kW. Tergantung pada nilai α , tegangan keluaran rerata dapat positif atau negatif dan memberikan operasi dua-kuadran.

Tegangan keluaran rerata V_{dc} dapat dicari dari,

$$\begin{aligned} V_{dc} &= \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m \sin \omega t d(\omega t) \\ &= \frac{2V_m}{2\pi} [-\cos \omega t]_{\alpha}^{\pi+\alpha} \\ &= \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha \end{aligned}$$

dan V_{dc} bervariasi dari $2V_m/\pi$ hingga $-2V_m/\pi$ dengan variasi α dari 0 ke π . Tegangan keluaran rata-rata maksimum adalah $V_{dm} = 2V_m/\pi$ dan tegangan keluaran rerata ternormalisasi adalah

$$V_n = \frac{V_{dc}}{V_{dm}} = \cos \alpha$$

Tegangan keluaran rmsnya diberikan oleh

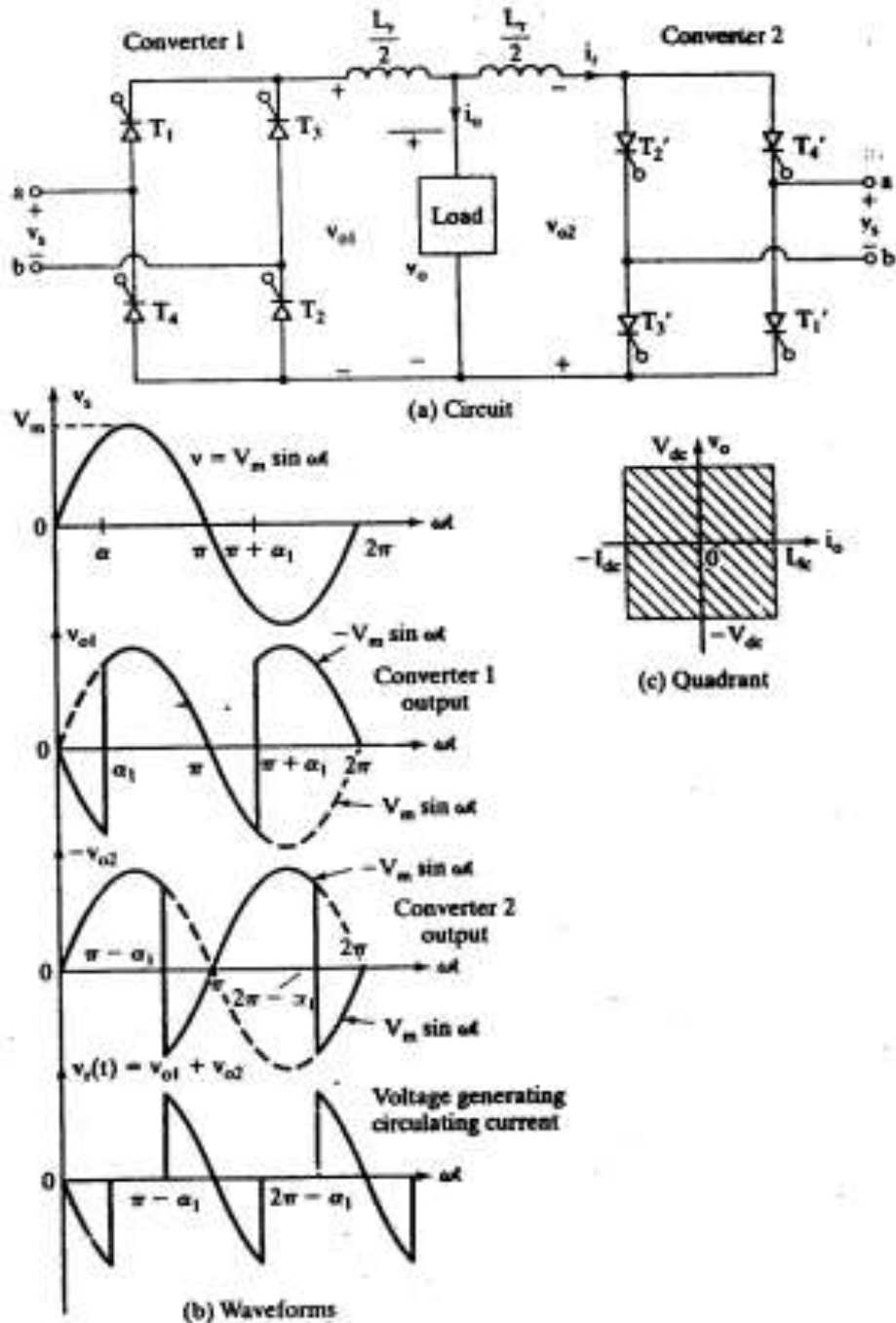
$$\begin{aligned} V_{rms} &= \left[\frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) \right]^{1/2} \\ &= \left[\frac{V_m^2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} (1 - \cos 2\omega t) d(\omega t) \right]^{1/2} \\ &= \frac{V_m}{\sqrt{2}} = V_s \end{aligned}$$

Dengan beban resistif murni, tiristor T_1 dan T_2 dapat konduksi dari α ke π , dan tiristor T_3 dan T_4 dapat konduksi dari $\alpha + \pi$ ke 2π .

10.10.3 Konverter Dual Fase-Tunggal

Pada bagian terdahulu telah dijelaskan bahwa full konverter fase-tunggal dengan beban induktif hanya beroperasi kuadran-dua. Jika dua full konverter

dihubungkan saling membelakangi seperti terlihat pada Gambar 8.3a, tegangan keluaran dan aliran arus beban dapat dibalikkan (*reversed*).



Gambar 10.18 Dual konverter fase-tunggal.

Sistem seperti ini beroperasi dengan kuadran-empat dan disebut dual konverter. Dual konverter biasanya digunakan pada penggerak kecepatan-variabel berdaya-tinggi.

Jika α_1 dan α_2 adalah sudut tunda konverter 1 dan konverter 2, tegangan keluaran rerata bersesuaian adalah V_{dc1} dan V_{dc2} . Sudut tunda terkontrol sedemikian rupa sehingga satu konverter beroperasi sebagai penyearah dan konverter lainnya beroperasi sebagai inverter, tetapi kedua konverter menghasilkan tegangan keluaran rerata yang sama.

Gambar 10.18b menunjukkan bentuk gelombang keluaran untuk dua konverter, dimana dua tegangan keluaran rerata adalah sama. Gambar 10.18c menunjukkan karakteristik v-i dari suatu dual konverter.

Latihan:

1. Jelaskan prinsip kerja penyearah setengah gelombang dan gelombang penuh.
2. Jelaskan prinsip kerja inverter.
3. Jelaskanlah prinsip kerja penyearah tiga fase.
4. Sebutkan dan jelaskanlah prinsip kerjanya komponen penaik tegangan DC.
5. Sebutkan dan jelaskanlah prinsip kerjanya komponen penurun tegangan DC.
6. Jelaskanlah karakteristik v-i dari suatu dual konverter.

« halaman ini sengaja dikosongkan »

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abdulkadir dkk (Tim IMIDAP), 2008, “Pedoman Studi Kelayakan PLTMH, Integrated Microhydro Development and Application Program (IMIDAP)”, *Direktorat Jenderal Listrik Dan Pemanfaatan Energi Departemen Energi Dan Sumber Daya Mineral*, Jakarta.
- [2] A. Jamal, R. Syahputra, 2012, “Adaptive Neuro-Fuzzy Approach for the Power System Stabilizer Model in Multi-machine Power System”, *International Journal of Electrical and Computer Science*, Vol. 12, Issue 2.
- [3] A. Keyhani, M.N. Marwali, dan M. Dai, 2010, “Integration of Green and Renewable Energy on Electric Power Systems”, *John Wiley & Sons*, New Jersey.
- [4] A.V. da Rosa, 2005, “Fundamentals of Renewable Energy Processes”, *Elsevier Academic Press*, London.
- [5] A.M. Borbely and J.F. Kreider, 2001, “Distributed Generation: The Power Paradigm for the New Millennium”, *CRC Press, Taylor and Francis Group*, Washington D.C.
- [6] A.R. Jha, 2010, “Solar Cell Technology and Applications”, *CRC Press, Taylor and Francis Group*, New York.
- [7] A. Senoaji dkk (Tim IMIDAP), 2010, “Mikro dan Mini Hidro: Harmoni Alam Dan Peluang Bisnis, Buku Pedoman Pembangunan PLTMH dan PLTM On Grid Sebagai Usaha Bisnis Penyediaan Tenaga Listrik, Integrated Microhydro Development And Application Program (IMIDAP)”, *Direktorat Jenderal Listrik Dan Pemanfaatan Energi Departemen Energi Dan Sumber Daya Mineral*, Jakarta.
- [8] A. Tapia, G. Tapia, J. X. Ostolaza, and J. R. Saenz, 2007, “Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.18, pp. 194-204, 2003. Bent Sørensen, “Renewable Energy Conversion, Transmission, and Storage”, AP Press, New York.
- [9] B.C. Babu and K.B. Mohanty, 2010, “Doubly-Fed Induction Generator for Variable Speed Wind Energy Conversion Systems - Modeling & Simulation”, *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 1793-8163.
- [10] B.H. Chowary and S. Chellapilla, 2006, “Doubly-fed induction generator for variable speed wind power generation” *Transactions on Electric Power System Research*, Vol.76, pp. 786-800.
- [11] D. Pimentel, 2008, “Biofuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems: Benefits and Risks”, *Springer Verlag*, New York.

- [12] H.Li and Z. Chen, 2008, “Overview of generator topologies for wind turbines,” *IET Proc. Renewable Power Generation*, vol. 2, no. 2, pp. 123–138.
- [13] J.G. Slootweg, S. W. H. Haan, H. Polinder, and W.L. Kling. “General Model for Representing Variable Speed Wind Turbines in Power System Dynamics Simulations”. *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 18, No. 1, February, 2003
- [14] J.J. Grainger dan W.D. Stevenson, 1994, “Power System Analysis”, *McGraw-Hill*, Singapore.
- [15] John Twidell and Tony Weir, 2006, “Renewable Energy Resources, Second Edition”, Taylor & Francis, New York.
- [16] L. Mihet-Popa and F. Blaabrierg, 2004, “Wind Turbine Generator Modeling and Simulation Where Rotational Speed is the Controlled Variable”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 40, No.1.
- [17] M.A. Poller, 2003, “Doubly-Fed Induction Machine Models for Stability Assessment of Wind Farms”, [*Power Tech Conference Proceedings of 2003 IEEE Bologna*](#), Vol.3, 6 pp. 23-26 June 2003
- [18] M. Dai, M.N. Marwali, Jin-Woo Jung, and A. Keyhani, 2008, “Power flow control of a single distributed generation unit”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, issue 1, pp. 343–352.
- [19] M. Dai, M.N. Marwali, Jin-Woo Jung, and A. Keyhani, 2008, “A three-phase four-wire inverter control technique for a single distributed generation unit in island mode”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, issue 1, pp. 322–331.
- [20] P. Breeze, 2005, “Power Generation Technologies”, *Elsevier’s Science and Technology*, oxford.
- [21] R. Syahputra, I. Robandi, and M. Ashari, 2011, “Control of Doubly-Fed Induction Generator in Distributed Generation Units Using Adaptive Neuro-Fuzzy Approach”, *Proceedings of International Seminar on Applied Technology, Science, and Arts (3rdAPTECS)*, Surabaya, 6 Dec. 2011.
- [22] R. Syahputra, M. Ashari, and I. Robandi, 2011, “Modeling and Simulation of Wind Energy Conversion System in Distributed Generation Units”, *Proceedings of International Seminar on Applied Technology, Science, and Arts (3rdAPTECS)*, Surabaya, 6 Dec. 2011.
- [23] R. Syahputra, 2012, “Fuzzy Multi-objective Approach for the Improvement of Distribution Network Efficiency by Considering DG”, *International Journal of Computer Science and Information Technology*, Vol. 4, No.2.
- [24] S. Kim and E. Kim, 2007, “PSCAD/EMTDC-based modeling and analysis of a gearless variable speed wind turbine”, *IEEE Trans Energy Conversion*, Vol. 22, No. 2, pp. 421-430.
- [25] S.S. Müller, M. Deicke, and R. W. De Doncker, 2002, “Doubly-fed induction generator system for wind turbines”, *IEEE Industry Applications Magazine*.

- [26] T. T. Chuong, 2008, "Voltage Stability Investigation of Grid Connected Wind Farm", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 42, pp. 532-536.
- [27] T.S. Hutaeruk, 1996, "Transmisi Daya Listrik", *Erlangga*, Jakarta.
- [28] T. Gonen, 1986, "Electric Power Distribution System Engineering", *McGraw-Hill*, New York.
- [29] Y. Lei, A.Mullane, G.Lightbody, and R.Yacamini, 2006, "Modeling of the Wind Turbine With a Doubly Fed Induction Generator for Grid Integration Studies," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 21(1), pp.257-264.
- [30] Zuhail, 1996, "Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya", *Gramedia*, Jakarta.

« halaman ini sengaja dikosongkan »

GLOSARIUM

- AAAC, All Aluminium Alloy Conductor*, yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari campuran aluminium.
- AAC, All Aluminium Conductor*, yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium.
- ACAR, Aluminium Conductor Alloy Reinforced*, yaitu kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan campuran logam.
- ACSR, Aluminium Conductor Steel Reinforced*, yaitu kawat penghantar aluminium berinti kawat baja.
- Bundled conductor*, konduktor berkas atau pilin yang digunakan sebagai penghantar yang umum dalam sistem transmisi daya listrik.
- DC, alternating current*, arus bolak-balik.
- DC, direct current*, arus searah.
- DG, distributed generation*, istilah yang sangat populer guna menjelaskan tentang sumber-sumber energi terbarukan atau yang tidak terbarukan dengan kapasitas kecil hingga menengah yang diinjeksikan ke grid sistem tenaga listrik, dalam istilah Indonesiannya disebut “pembangkitan tersebar”.
- EHV, extra high voltage*, tegangan ekstra tinggi.
- ESDM*, energi dan sumber daya mineral.
- Fuel cell*, sel bahan bakar, suatu piranti elektrik yang berguna membangkitkan energi listrik dengan bahan bakar hidrogen.
- Gardu Induk (GI)*, suatu stasiun pengumpul energi listrik dari sistem pembangkitan atau sistem transmisi yang terdiri dari alat-alat transformator daya, pemutus tenaga, saklar pemisah, bus station, reactor pembatas arus, transformator arus, transformator tegangan, kapasitor kopling, transformator tegangan kapasitor, lightning arrester, rele proteksi, baterai, dan alat pendukung lainnya.
- GMD, Geometric Mean Distance*.
- GMR, Geometric Mean Radius*, atau jejari rata-rata geometris dari suatu luas (area) adalah limit dari jarak rata-rata geometris (GMD) antara pasangan-pasangan elemen dalam luas itu sendiri jika jumlah elemen itu diperbesar sampai tak berhingga..
- Induktansi diri*, perbandingan antara jatuh tegangan yang ditimbulkan oleh perubahan arus terhadap perubahan arusnya sendiri.
- Inverter*, piranti elektrik yang berfungsi untuk mengubah tegangan arus searah (DC) menjadi tegangan arus bolak-balik (AC).
- Isolator*, piranti elektrik digunakan untuk mencegah hubung singkat antara kawat penghantar dengan menara.
- Kawat tanah, ground wires*, atau kawat pelindung (*shield wires*), berfungsi untuk melindungi kawat-kawat penghantar atau kawat fase terhadap sambaran petir *Konverter*, piranti pengubah jenis tegangan listrik.

Kompensasi saluran transmisi, suatu upaya untuk meningkatkan unjukkerja sistem transmisi dengan cara memasang piranti elektrik di antaranya reaktor shunt, kapasitor seri atau kombinasi dari keduanya.

Konverter daya, piranti pengubah jenis tegangan listrik dengan kapasitas daya besar.

Magnetic flux, fluks magnetic, garis gaya magnetik pada suatu medan magnetik.

Menara transmisi, suatu bangunan penopang saluran transmisi yang dapat berupa menara baja, tiang baja, tiang beton bertulang, atau tiang kayu.

MKS, meter-kilogram-sekon, satuan dasar standar baku internasional dalam perhitungan-perhitungan fisika dan bidang-bidang terkait.

overhead lines, saluran transmisi atau distribusi udara.

PLTA, pembangkit listrik tenaga air.

PLT Angin, pembangkit listrik tenaga angin.

PLTG, pembangkit listrik tenaga gas.

PLTMH, pembangkit listrik tenaga mikrohidro.

PLTN, pembangkit listrik tenaga nuklir.

PLTS, pembangkit listrik tenaga surya.

PLTU, pembangkit listrik tenaga uap.

proximity effect, efek sekitar, pengaruh dari kawat lain yang berada di samping kawat yang ditinjau sehingga distribusi fluks tidak simetris lagi. Tetapi jika radius konduktor relatif kecil terhadap jarak antara kedua kawat maka efek sekitar ini sangat kecil dan dapat diabaikan

renewable energy resources, sumber-sumber energi terbarukan seperti angin, air, surya, dan lain-lain.

Saluran transmisi menengah, saluran transmisi jarak menengah pada suatu sistem tenaga listrik (80 s.d. 250 km).

Saluran transmisi pendek, saluran transmisi jarak pendek pada suatu sistem tenaga listrik (< 80 km).

Saluran transmisi panjang, saluran transmisi jarak panjang pada suatu sistem tenaga listrik (> 250 km).

skin effect, efek kulit, gejala pada arus bolak-balik bahwa kerapatan arus dalam penampang konduktor tersebut makin besar ke arah permukaan kawat. Tetapi jika kita hanya meninjau frekuensi kerja (50 Hz atau 60 Hz) maka pengaruh efek kulit itu sangat kecil dan dapat diabaikan.

Sistem Tenaga Listrik, suatu sistem yang terdiri dari komponen utamanya yaitu sistem pembangkitan, sistem transmisi, sistem distribusi, dan beban-beban listrik.

Sistem Distribusi Daya Listrik, suatu sistem yang berfungsi untuk menerima daya listrik dari sistem transmisi dan menyalurkannya ke pusat-pusat beban dalam sistem tenaga listrik, dengan tingkat tegangan menengah menurut standar yang berlaku di suatu negara.

Sistem Pembangkitan Daya Listrik, suatu sistem yang berfungsi untuk membangkitkan daya listrik yang umumnya terdiri dari turbin dan generator, untuk selanjutnya mencatu sistem transmisi daya listrik untuk dikirimkan ke sistem distribusi.

Sistem subtransmisi, bagian dari sistem perlengkapan elektrik yang mengirimkan daya dari bulk power sources (BPS), sebagaimana halnya gardu induk transmisi yang besar.

Sistem Transmisi Daya Listrik, suatu sistem yang berfungsi untuk menghubungkan sistem pembangkitan ke sistem distribusi dalam sistem tenaga listrik, dengan tingkat tegangan tinggi, tegangan ekstra tinggi, dan atau tegangan ultra tinggi menurut standar yang berlaku di suatu negara. Standar tegangan transmisi di Indonesia adalah 66 kV, 150 kV, 380 kV, dan 500 kV.

solar cell, sel surya, piranti elektrik untuk membangkitkan elenrgi listrik dengan sumber energi matahari (surya).

solid wire, konduktor padat atau pejal yang digunakan sebagai penghantar yang umum dalam sistem tenaga listrik.

Transformator, piranti elektrik yang berfungsi untuk menaikkan atau menurunkan tegangan listrik.

Transformator arus, piranti elektrik yang berfungsi untuk menaikkan atau menurunkan arus listrik (umumnya penurun arus) yang digunakan pada sistem proteksi dan pengukuran.

Transformator daya, piranti elektrik yang berfungsi untuk menaikkan atau menurunkan tegangan listrik pada pembangkit listrik dan sistem transmisi daya listrik.

Transformator distribusi, piranti elektrik yang berfungsi untuk menaikkan atau menurunkan tegangan listrik pada pembangkit listrik dan sistem distribusi daya listrik.

UHV, ultra high voltage, tegangan ultra tinggi.

underground cable, saluran transmisi atau distribusi bawah tanah menggunakan kabel daya bawah tanah.

INDEX

- AAAC, 21
AAC, 21
AC, 10, 18, 32, 83, 123, 130, 133,
135, 140, 146, 147, 148
ACAR, 21
ACSR, 21, 33, 37
Aluminium, 21, 23, 223
anoda, 93, 95, 96, 97, 183, 184, 186,
187, 188, 212
Arus, 46, 130, 133, 135, 153, 168,
179, 184, 187, 194, 200, 201, 202,
203
ATS, 131
Bahan bakar fosil, 5
belitan, 84, 85, 86, 146, 148, 196,
197, 208
BiMOSFET, 178, 179
biomassa, 5, 6, 102, 103
Carbon, 89
Circular Mil, 22
CO₂, 89, 90, 91, 124, 140
Completely Self-Protecting, 83
DC, 10, 12, 15, 18, 24, 32, 37, 123,
140, 146, 148, 191, 198
DFIG, 146, 148, 149
DG, 6, 10, 11, 12, 220
diagram pengganti, 41, 43
dioda, 125, 159, 165, 168, 169, 170,
171, 172, 173, 185, 192, 193, 195,
196, 197, 200, 208, 210, 211
distribusi primer, 4, 77, 78, 80, 81, 87
distribusi sekunder, 81, 82, 83
distributed generation, 6, 7, 159, 220
doubly-fed induction generator, 146,
147, 148
DSP, 13
EBT, 113
Efisiensi, 49, 108, 127
EHV, 42
elektroda, 35, 93, 95, 96, 97, 108
elektrokimia, 11, 94, 104, 127
elektrolit asam, 96
elektron, 93, 95, 96, 99, 163, 164,
165, 167, 170, 176, 177, 187
elektronika daya, 12, 14, 124, 141,
147, 148, 159, 160, 181, 182, 191,
205
energi, 1, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12,
13, 15, 17, 18, 70, 81, 83, 84, 89,
90, 92, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100,
102, 103, 104, 105, 106, 108, 110,
111, 113, 115, 116, 117, 118, 120,
122, 123, 124, 125, 126, 127, 139,
140, 143, 144, 148, 149, 159, 160,
164, 165, 167, 168, 170, 177, 198,
202
Energi, 1, 4, 5, 9, 89, 94, 113, 116,
120, 122, 123, 125, 137, 140, 219
energi terbarukan, 5, 7, 103
fluks, 25, 27, 28, 29, 84, 85, 86, 224
fluks bocor, 84
Fourier, 205, 211
Frekuensi, 31, 38, 133, 135
fuel cell, 89, 94, 104, 111, 121, 138,
157, 189, 204, 217
gangguan, 11, 12, 13, 14, 17, 74, 78,
152, 153, 154, 155, 156
Gardu induk, 69, 70, 75
Generator, 3, 140, 219, 220, 221
GMR, 32, 33, 223
GTO, 182, 198, 204
H₂, 90, 91, 93, 94, 95, 100, 104
H₂O, 89, 90, 94, 95
hidrogen, 12, 89, 90, 91, 92, 93, 94,
95, 98, 99, 100, 101, 102, 103,
104, 105, 106, 107, 108, 109, 110,
111, 127
hidrokarbon, 89
IGBT, 147, 148, 175, 176, 177, 178,
179, 180, 181, 182, 199, 204
Insulasi, 129
Inverter, 94, 123, 132, 133, 134, 135,
136, 137, 204, 205, 206, 207, 208,
209

Isolator, 20, 223
 JFET, 173
 kapasitansi, 22, 35, 36, 41, 42, 43, 44, 66, 174, 175, 176, 181
 Kapasitor, 65, 75
 katoda, 93, 95, 97, 183, 184, 187, 212, 213
 Kawat tanah, 20, 21, 223
 keandalan, 19, 74, 78, 103
 kompensasi, 39, 57, 58, 60, 61, 63, 64, 65, 66, 68
 konduktor, 22, 24, 25, 26, 31, 32, 37, 38, 78, 92, 127, 224
 konstanta Plancks, 125
 konverter, 9, 10, 14, 147, 148, 191, 198, 199, 200, 202, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217
 korona, 41, 42
 Lightning arrester, 75
 linier, 23, 52, 169, 176
 manajemen beban, 101
 MOSFET, 173, 174, 175, 176, 178, 179, 181, 198, 204
 O₂, 89, 94, 95, 97, 104
 panjang elektrik, 57, 59, 60, 61, 62, 68
 pembangkit listrik, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 90, 92, 99, 102, 113, 114, 116, 117, 118, 120, 122, 123, 124, 128, 139, 140, 141, 143, 147, 159
 pembangkitan tersebar, 1, 6, 7, 9, 11, 159, 191
 PLN, 5, 115, 116, 123, 124, 130, 132, 133, 134, 135, 136, 137
 PLTA, 4, 114, 116, 120
 PLTA Angin, 139, 140, 146, 147, 148, 150, 151, 153, 154, 155, 156
 PLTMH, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 219
 PLTS, 122, 123, 124
 polarisasi, 97, 98
 protective link, 83
 PV, 10, 108
 PWM, 148, 191, 203, 204
 radiasi, 123
 reaktor, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 65, 67, 68, 224
 reaktor shunt, 57, 58, 60, 63, 65
 RLC, 207
 rpm, 12, 133, 143
 RSP, 13
 rugi panas, 3
 saklar, 44, 76, 130, 162, 176, 182, 198
 saluran transmisi, 3, 17, 18, 20, 22, 39, 41, 42, 52, 58, 60, 224
 sel bahan bakar, 11, 12, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 101, 102, 103, 104, 106, 110
 Sel bahan bakar, 94, 95, 97, 106
 semikonduktor, 125, 127, 128, 161, 162, 163, 164, 165, 171, 172, 176, 177, 178, 182, 183, 199, 204, 208, 210
 SHS, 129, 130, 133, 134, 137
 shunt, 49, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 65, 67, 68, 75, 79, 224
 silikon, 125, 126, 127, 162, 163, 164, 168, 187
 simulasi, 14, 139, 147, 151, 152
 Sistem distribusi, 2, 81, 83
 sistem tenaga listrik, 1, 2, 3, 6, 11, 14, 15, 17, 39, 69, 73, 145, 148, 159
 Solar, 99, 108, 126, 127, 219
 step-down, 3, 81, 198
 step-up, 3, 198
 subtransmisi, 69, 70, 72, 73, 74, 87, 225
 tap changer, 83
 Tegangan, 4, 9, 11, 19, 39, 42, 47, 67, 70, 72, 123, 130, 133, 135, 140, 148, 152, 153, 154, 174, 175, 179, 187, 195, 196, 203, 205, 206, 212, 213, 215
 tegangan jatuh, 15, 97, 149, 155
 teknologi manufaktur, 123
 Tinggi jatuh, 117
 tiristor, 147, 159, 161, 162, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 210, 211, 212, 213, 215

Torsi, *144*
Transformator, *69, 70, 75, 76, 77, 83, 84, 86, 87*
transformator distribusi, *70, 77, 78, 79, 81, 83*
transmisi, *1, 2, 3, 4, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 29, 31, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 66, 67, 68, 72, 91, 143, 159, 160, 224, 225*
turbin, *3, 10, 103, 116, 117, 140, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 152, 155*
UMKM, *133, 135, 137*
utilitas, *10, 11, 15*
Voltage regulation, *152, 153, 155*
Zener, *170*

BIODATA PENULIS



Nama Lengkap	Dr. Ramadoni Syahputra, S.T., M.T.
Jabatan Fungsional	Asisten Ahli
Tempat dan Tanggal Lahir	Galang, Deli Serdang, Sumatera Utara, 10 Oktober 1974
Agama	Islam
Pekerjaan	Staf Pengajar di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Pendidikan	S1: Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Medan, Medan, 1993-1998 S2: Program Studi Ilmu Teknik Elektro Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, 1999-2002 S3: Program Studi Ilmu Teknik Elektro Program Pascasarjana Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2011-2015
Alamat Rumah	Perum Popongan No. AA1, Jl. Magelang Km 5 Sinduadi, Mlati, Sleman, DI Yogyakarta 55284
Nomor HP	081215526565
Alamat Kantor	Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik UMY Jl. Lingkar Barat, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Yogyakarta 55183
Nomor Telepon/Faks	0274-387656/ 0274-387646
Alamat e-mail	ramadoni@umy.ac.id