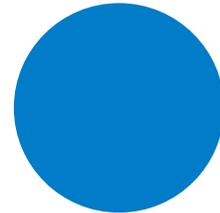


Bagian awal buku ini menguraikan tentang sistem tenaga listrik beserta perkembangannya, diantaranya tentang kehadiran pembangkit tersebar. Pembangkitan tersebar telah menjadi isu penting dalam sistem tenaga listrik modern dalam dekade terakhir. Bagian selanjutnya menguraikan tentang sistem transmisi dan distribusi daya listrik karena terhubung dengan pembangkitan tersebar. Bagian berikutnya menjelaskan tentang 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. Bagian ini juga menguraikan hasil-hasil penelitian penulis bersama mahasiswa bimbingan penulis, yaitu aplikasi solar home system (SHS) dalam membantu UMKM dan simulasi pembangkit listrik tenaga angin dengan sistem pengendaliannya. Bagian akhir buku memaparkan tentang pengendalian berbasis elektronika daya yang umum digunakan dalam sistem tenaga listrik.



UMY Press

Kampus Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Jl. Brawijaya, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Yogyakarta 55183
Tel. (0274) 387656 ext 159
Fax. (0274) 387646
email: umypress@gmail.com

☎ 085157715504
📷 @umypress
📖 umy press book



Anggota IKAPI (Ikatan Penerbit Indonesia), APPTI (Asosiasi Penerbit Perguruan Tinggi Indonesia), dan APPTIMA (Asosiasi Penerbit Perguruan Tinggi Muhammadiyah - 'Aisyiyah)

Ilustrasi sampul depan:
Artbalitsky

ISBN 978-623-6299-24-1



RAMADONI SYAHPUTRA
Rekayasa dan Pengondisian Energi Terbarukan

RAMADONI SYAHPUTRA



Rekayasa dan Pengondisian Energi Terbarukan

RAMADONI SYAHPUTRA REKAYASA DAN PENGONDISIAN ENERGI TERBARUKAN



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Terima kasih buat Ibunda Tunem (alm), Ayahanda
Kardan (alm), dan Istri Tercinta Indah Soesanti
atas segala doa dan dukungannya

Rekayasa dan Pengondisian Energi Terbarukan

Dr. Ramadoni Syahputra

Undang-Undang Republik Indonesia no. 19/2002 tentang Hak Cipta

Lingkup Hak Cipta

Pasal 2:

1. Hak Cipta merupakan hak eksklusif bagi Pencipta atau Pemegang Hak Cipta untuk mengumumkan atau memperbanyak ciptaannya, yang timbul secara otomatis setelah suatu ciptaan dilahirkan tanpa mengurangi pembatasan menurut peraturan perundangan-undangan yang telah berlaku.

Ketentuan Pidana

Pasal 72:

1. Barangsiapa dengan sengaja atau tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam pasal 2 ayat (1) atau pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana penjara masing-masing paling singkat 1 (satu) bulan dan / atau denda paling sedikit Rp. 1.000.000 (satu juta rupiah) atau pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan / atau denda paling banyak Rp. 5.000.000.000 (lima milyar 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 (lima ratus juta rupiah).

Rekayasa dan Pengondisian Energi Terbarukan

Dr. Ramadoni Syahputra

UMY
Press

REKAYASA DAN PENGONDISIAN ENERGI TERBARUKAN

PENULIS: **Dr. Ramadoni Syahputra**

PENYUNTING: **Dr. Indah Soesanti**

PENYELARAS AKHIR: **Budi Nugroho**

LAY OUT: **Kawans_srowot**

DISAIN SAMPUL: **Joko Supriyono**

ILUSTRASI SAMPUL DEPAN: **CSA Images**

CETAKAN PERTAMA, **UMY Press, November 2021**

Dedung Perpustakaan Lt. 2. Kampus Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

Jalan Brawijaya, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Yogyakarta 55183

Telpon: 0274 387656 pesawat 159

Perpustakaan Nasional RI: katalog Dalam Terbitan (KDT)

REKAYASA DAN PENGONDISIAN

ENERGI TERBARUKAN

Ramadoni Syahputra

16,5 x 24 cm, xxx + 000

Yogyakarta UMY Press 2021

ISBN 978-602-5450-08-2

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 Pengondisian Energi Terbarukan”. 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 mata kuliah Rekayasa dan Pengondisian Energi Terbarukan. Buku ajar ini dapat juga digunakan sebagai acuan tambahan untuk 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.

Bagian awal buku ini menguraikan 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. Bagian selanjutnya menguraikan tentang sistem transmisi dan distribusi daya listrik karena ter-

hubung dengan pembangkitan tersebar. Bagian berikutnya menjelaskan tentang sistem-sistem pembangkit energi terbarukan yang merupakan bagian dari pembangkitan tersebar yang diinjeksikan ke *grid* sistem transmisi atau distribusi, di antaranya PLTMH, PLTA Angin, PLTS, dan *Fuel Cell*. Bagian ini juga menguraikan hasil-hasil penelitian penulis bersama mahasiswa bimbingan penulis, yaitu aplikasi *solar home system* (SHS) dalam membantu UMKM dan simulasi pembangkit listrik tenaga angin dengan sistem pengendaliannya. Bagian akhir buku memaparkan tentang pengendalian berbasis elektronika daya yang umum digunakan dalam sistem tenaga listrik.

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

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

Dr. Dyah Mutiarin, M.Si., sebagai Kepala LRI UMY,

Ir. Aris Widyo Nugroho, ST., MT., Ph.D., sebagai Dekan Fakultas Teknik UMY,

Budi Nugroho, S.Sos., selaku Kepala Divisi Publikasi LP3M UMY yang telah banyak membantu sehingga ISBN buku ini dapat diperoleh,

Seluruh dosen, karyawan, dan mahasiswa Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik UMY, yang telah banyak membantu dan memberikan masukan kepada penulis, serta dalam mengemban tugas-tugas yang diamanahkan kepada penulis,

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,

Istriku tercinta Dr. Indah Soesanti, S.T., M.T., yang telah banyak mem-

bantu dan memberikan masukan yang sangat berguna dalam penyelesaian buku ajar ini,

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 rabbal 'alamin*.

Penulis menyadari bahwa buku ajar ini masih jauh dari sempurna. Oleh karenanya, 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, September 2021

Penulis,

Dr. Ramadoni Syahputra

Daftar Isi

Halaman Judul — iii

Prakata — vii

Daftar Isi — xi

BAB I

Pengantar Sistem Tenaga Listrik

A. Sistem Tenaga Listrik — 1

B. Pembangkit Tersebar — 5

Latihan: — 16

BAB II

Karakteristik Sistem Transmisi Daya Listrik

A. Pendahuluan — 17

B. Tegangan Saluran Transmisi — 19

C. Komponen Utama Saluran Transmisi — 20

D. Parameter Saluran Transmisi — 22

BAB III

Representasi Saluran Transmisi

A. Pendahuluan — 41

- B. Klasifikasi Saluran Transmisi — 43
- C. Diagram Pengganti Saluran Transmisi — 45
- D. Rangkaian Kutub Empat Saluran Transmisi — 54
- E. Saluran Transmisi Sebagai Kutub Empat — 56
- F. Kompensasi Pada Saluran Transmisi — 59

BAB IV

Sistem Distribusi Daya Listrik

- A. Pendahuluan — 73
- B. Subtransmisi — 76
- C. Gardu Induk Distribusi — 78
- D. Sistem Distribusi Primer dan Sekunder — 81
- E. Transformator Distribusi — 87

BAB V

Fuel Cell

- A. Pendahuluan — 93
- B. Produksi Hidrogen — 95
- C. **Konsep Fuel Cell** — 98
- D. Aplikasi Hidrogen — 104
- E. Penetrasi Pasar Hidrogen — 110

BAB VI

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro

- A. Pendahuluan — 119
- B. Sejarah dan Prinsip Kerja PLTMH — 123

BAB VII

Pembangkit Listrik Tenaga Surya

- A. Pendahuluan — 129
- B. Implementasi Sel Surya — 137

BAB VIII

Pembangkit Listrik Tenaga Angin

- A. Pendahuluan — 147
- B. Komponen Dasar PLTA Angin — 148
- C. *Doubly-Fed Induction Generator* — 154
- D. Simulasi PLTA Angin — 156

BAB IX

Kendali Sistem Pembangkitan Tersebar: Komponen Dasar Elektronika Daya

- A. Pendahuluan — 167
- B. Piranti Semikonduktor Daya — 169
- C. Karakteristik Umum Dioda — 177
- D. Efek Zener dan Avalanche — 179
- E. Transistor Daya — 180
- F. Pabrikasi BJT — 181
- G. Perkembangan Pabrikasi Penyakelar Daya — 182
- H. Persyaratan Dalam Pengemudian Piranti — 192
- I. Tiristor — 193

BAB X

Kendali Sistem Pembangkitan Tersebar: Rangkaian Elektronika Daya

- A. Penyearah Dioda — 201
- B. Penyearah Gelombang Setengah Fase Tunggal — 202
- C. Penyearah Gelombang Penuh Fase Tunggal — 204
- D. Penyearah Fase Jamak — 207
- E. Konverter DC-DC — 208
- F. Prinsip Operasi Penurun Tegangan — 209
- G. Konverter Penurun Tegangan dengan Beban RL — 210

H. Konverter Penaik Tegangan dengan Beban RL — 212

I. Inverter PWM — 214

J. Penyearah Terkontrol — 221

Daftar Pustaka — 231

Glosarium — 235

Indeks — 241

Biodata Penulis — 245

BAB I

Pengantar Sistem Tenaga Listrik

TUJUAN Instruksional Umum:

Memberikan wawasan tentang sistem tenaga listrik serta 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

A. 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 dihubung-hubungkan dan membentuk suatu sistem.

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

Energi listrik merupakan energi yang sangat bermanfaat. Tidak dapat dipungkiri bahwa dewasa ini, manusia sudah demikian besar tingkat ketergantungannya terhadap energi listrik. Oleh sebab itu, 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 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, sistem Jawa-Bali mempunyai kapasitas terpasang pembangkit listrik sekitar 20 GW. Konsumen listrik di Indonesia sebagian besar berada di Jawa-Bali sehingga pembangkit listriknya juga terpusat di kedua pulau tersebut.

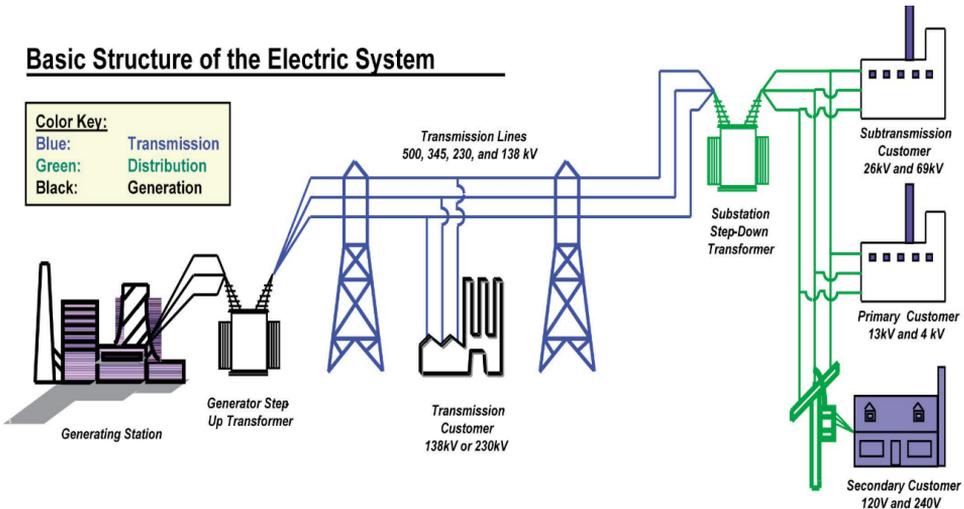
Berdasarkan data statistik PT PLN (Persero) tahun 2013, rasio elektrifikasi seluruh Indonesia mencapai 78,06%. Rasio ini diperoleh dari pertumbuhan jumlah pelanggan rumah tangga dari 46.219.780 pada akhir tahun 2012 menjadi 50.116.127 pada akhir tahun 2013. Selanjutnya, pada akhir Desember 2013, total 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. Persentase kapasitas terpasang per jenis pembangkit sebagai adalah 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%), serta 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 dan 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.

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 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



Gambar 1.1. Komponen utama sistem tenaga listrik

mekanis (motor), penerangan, pemanas, pendingin, dan sebagainya.

Energi listrik merupakan bentuk energi yang sangat bermanfaat. Kemajuan suatu negara dapat diukur berdasarkan konsumsi energi listriknya. 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 tempat 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–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 mencapai 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 sehingga biaya peralatan juga semakin tinggi.

Penurunan tegangan dari tingkat tegangan transmisi pertama-tama dilakukan di gardu induk (GI), tempat 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.

B. 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, 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. Sementara itu, potensi untuk mini/mikrohidro sekitar 450 MW termanfaatkan sekitar 230 MW yang terpasang sampai pada tahun 2008.

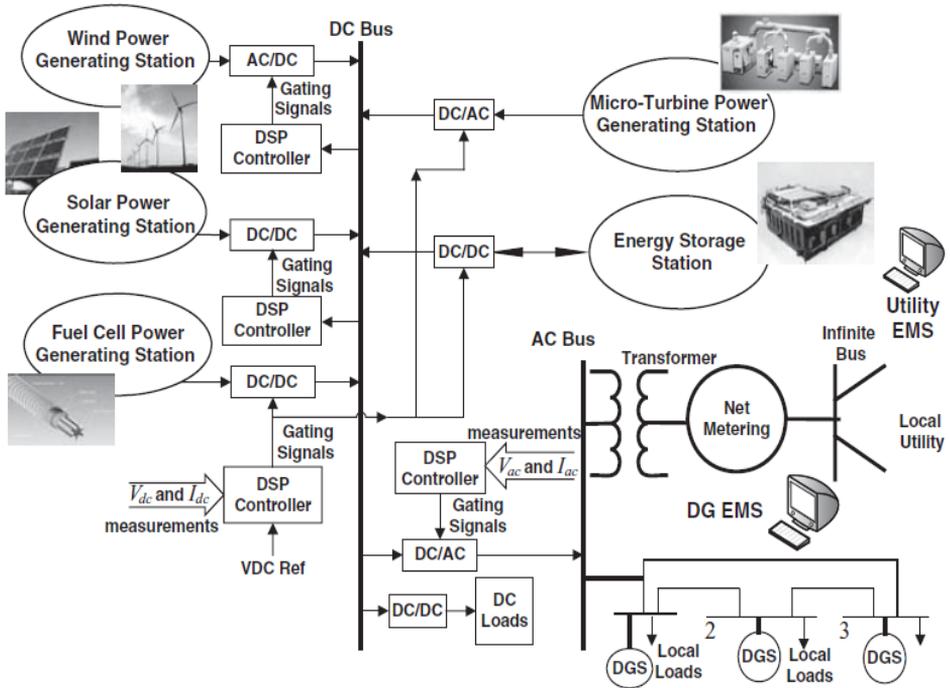
Teknologi pengembangan dan pemanfaatan energi telah memegang peranan penting dalam aspek sosial dan ekonomi, baik skala kecil hingga

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 Indonesia maupun negara-negara lain di dunia masih bergantung pada bahan bakar fosil untuk menghasilkan energi listrik, terutama bahan bakar minyak dan batubara. Selain persoalan lingkungan yang diakibatkan pembangkit listrik dengan bahan bakar fosil, terdapat juga masalah terkait 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.

Persoalan energi dengan bahan bakar fosil semakin lama menimbulkan persoalan yang menyulitkan sehingga para ahli dari berbagai negara melakukan terobosan-terobosan baru dengan menggiatkan pengelolaan sumber energi terbarukan untuk membangkitkan energi listrik, di antaranya energi air, angin, surya, ombak laut, *biomass*, dan lain-lain.

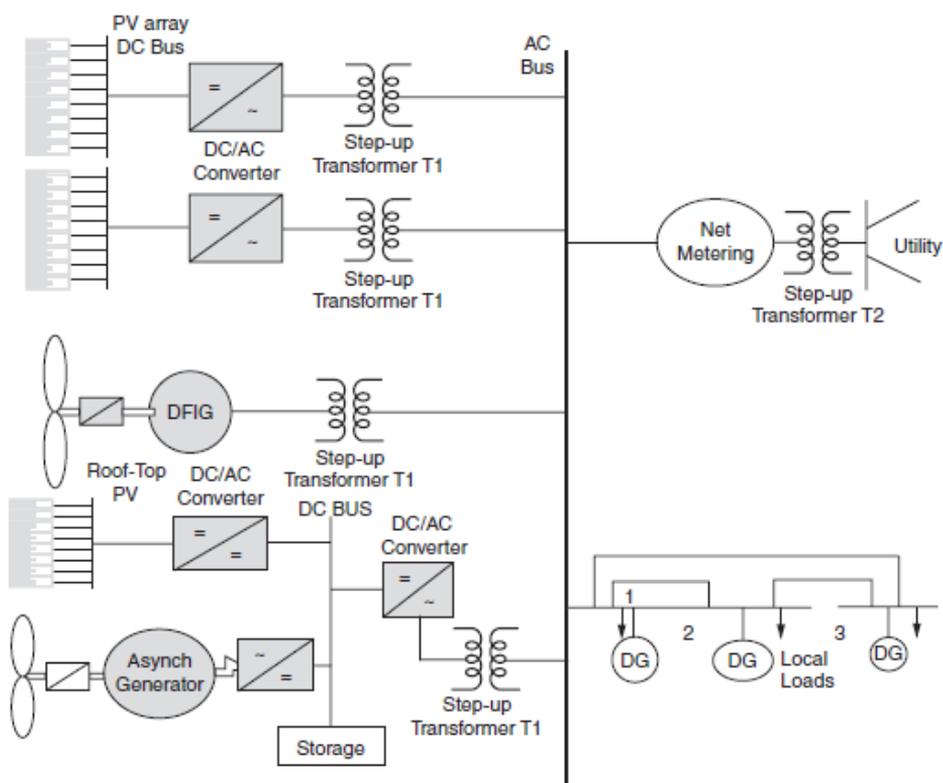
Pada awal perkembangannya, teknologi energi listrik dari sumber energi terbarukan masih bersifat parsial. Baik energi air, angin, surya, ombak laut, *biomass*, dan lain-lain masih dirancang-bangun untuk menghasilkan listrik guna mengatasi persoalan kekurangan listrik pada daerah tertentu saja. Kapasitas pembangkitan energi listriknya juga bervariasi dari ukuran kecil berukuran beberapa puluh watt hingga berukuran sedang, yaitu hingga mega watt. Akan tetapi, sejak awal abad ke-21 ini telah dilakukan berbagai perkembangan melalui penelitian-penelitian yang komprehensif tentang cara 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 terse-

bar (*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 merupakan pembangkitan tersebar. Akan tetapi, istilah pembangkitan tersebar baru muncul belakangan ini karena lebih ditekankan pada pembangkit listrik yang berkapasitas relatif lebih kecil. Pembangkit listrik tersebut umumnya berasal dari sumber energi terbarukan untuk diinterkoneksi dengan jaringan listrik yang sudah ada yang dipasok oleh pembangkit listrik berkapasitas besar. Gambar 1.3 menunjukkan arsitektur DC pembangkit listrik tenaga surya 2 MVA, sedangkan Gambar



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

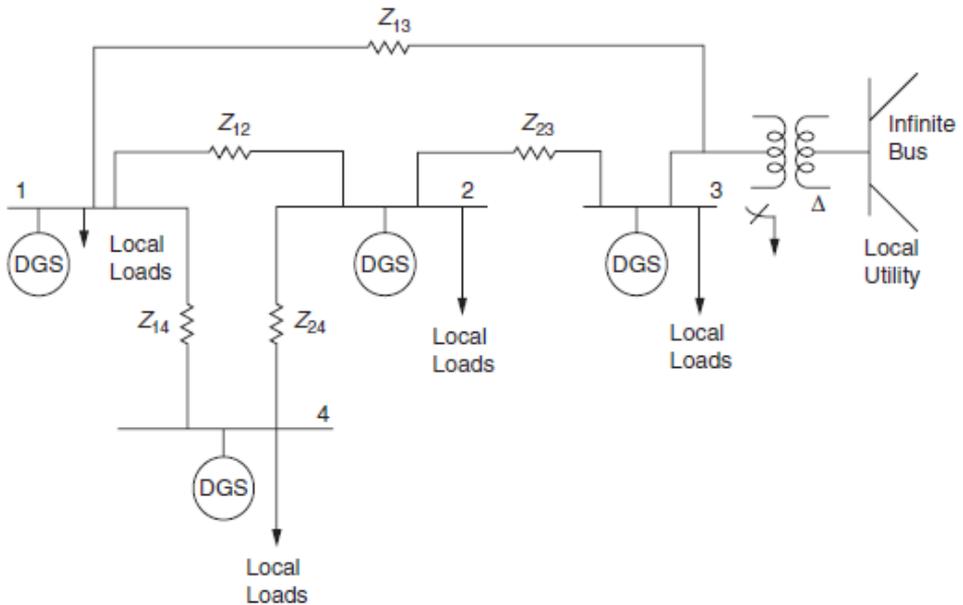
Upaya mengintegrasikan berbagai pembangkit energi terbarukan ke dalam jaringan interkoneksi bukanlah persoalan yang sederhana. Sebagai contoh, Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). Energi listrik yang dihasilkan PLTS berbentuk arus searah (*direct current*, dc). Tegangan listrik DC yang dihasilkan juga bervariasi karena tergantung pada banyaknya sel surya yang dipasang dan intensitas cahaya matahari yang menerpanya. Pertama-tama, tegangan listrik DC yang dihasilkan sel surya harus dinaikkan tegangannya menggunakan konverter DC karena arus 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. Oleh karenanya, 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 cara menanggulangnya berdasarkan hasil-hasil penelitian dari para pakar di dunia yang dapat dibaca pada jurnal-jurnal internasional bereputasi tinggi.

Jaringan listrik sistem energi cerdas yang didistribusikan akan menyediakan platform untuk penggunaan sumber terbarukan dan kekuasaan darurat yang memadai, terutama untuk pusat-pusat beban metropolitan. Selain itu, hal tersebut juga akan mencegah pemadaman total sistem tenaga yang saling berhubungan karena efek buatan manusia dan bencana lingkungan serta memberikan kemampuan untuk memecah sistem tenaga yang saling berhubungan ke daerah klaster 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 sel surya (*array PV*) 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 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]

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 sehingga harus diputuskan. Setelah unit FC terhubung kembali, unit MTG mungkin mengalami ketidakstabilan. Oleh karena itu, tindakan kontrol

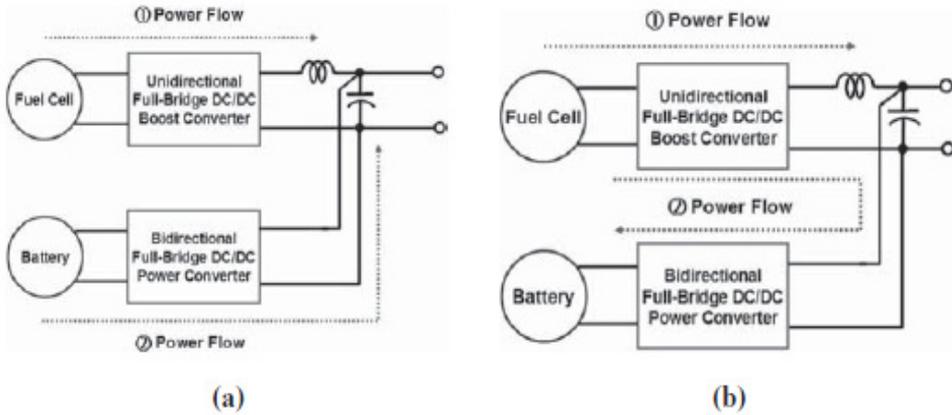
yang tepat perlu diambil untuk menstabilkan sistem DG.

Kebutuhan untuk perangkat penyimpanan energi tidak bisa dihindari karena sifat intermiten sumber energi terbarukan dan reaksi elektrokimia lambat dari sel bahan bakar. Perangkat penyimpanan energi ini menyediakan cadangan agar cepat bertindak ketika sumber energi tenaga listrik 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, 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 berbagai gangguan, baik alami maupun buatan manusia. Setelah gangguan besar, permintaan energi dinamis dapat melebihi cadangan bus daya DC yang tersimpan sehingga daya menjadi parah, terjadi osilasi tegangan, dan runtuh. Margin stabilitas menjadi relatif dekat dengan titik operasi stabil karena sebagian besar beban elektronika daya dan industri. Dengan demikian, jumlah energi yang tersimpan dalam bus DC (lihat Gb. 1.2) yang tersedia dalam sistem DG hanya terbatas. Perhatian yang mendalam telah diberikan pada 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 sehingga konstanta H berkisar antara 0.3–1.2. Namun, dimungkinkan ada nilai-nilai H lainnya di luar jangkauan ini. Untuk MTG menengah dan kecepatan rendah (12.000-50.000 rpm),

konstanta H dapat berada pada kisaran 0.5-1.5. MTG tanaman biasanya menggunakan mesin sinkron magnet permanen sehingga tidak ada waktu konstan lapangan yang terkait. Tanaman FC memiliki respon dinamik pada urutan 5-10 menit.

Selanjutnya, daya yang dihasilkan oleh sumber daya generasi terbarukan dapat bervariasi, dan operasinya harus dikoordinasikan dengan jumlah perangkat penyimpanan daya DC, dengan FC dan unit MTG yang dapat menyesuaikan daya yang dihasilkan sebagai respon terhadap gangguan. Koordinasi ini sangat penting untuk menjaga tegangan agar tetap stabil dan mengurangi osilasi daya. Gambar 1.5a dan 1.5b mengilustrasikan operasi paralel unit FC. Gambar 1.6 menggambarkan arsitektur kontrol sel bahan bakar yang 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 point* dari MTG dan tanaman FC segera setelah tegangan bus DC mulai turun. Selain itu, penggunaan kontrol muka prediktif dapat diselidiki menggunakan prediksi beban satu langkah ke depan untuk mengubah daya keluaran FC dan unit MTG, membersihkan gangguan, dan menstabilkan sistem DG. Studi semacam ini juga akan meningkatkan pemahaman potensi yang mengatur sistem DG serta 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 karena ketika klaster 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.

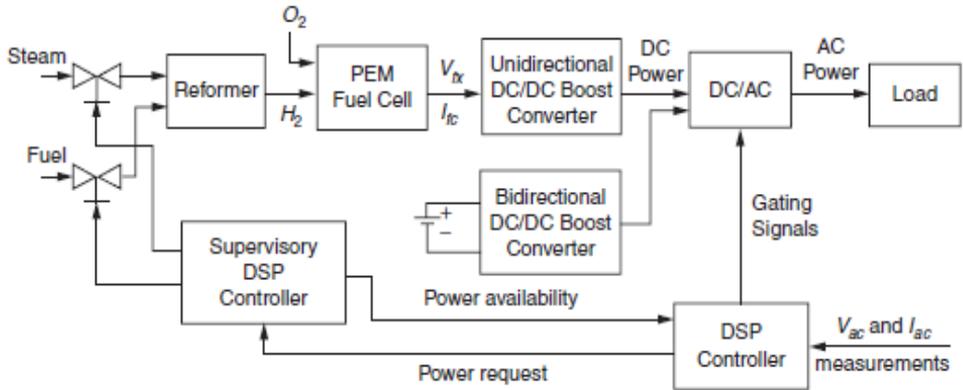


Gambar 1.6. Diagram blok sumber FC yang terhubung secara paralel
 (a) pelepasan baterai (b) pemuatan baterai [3]

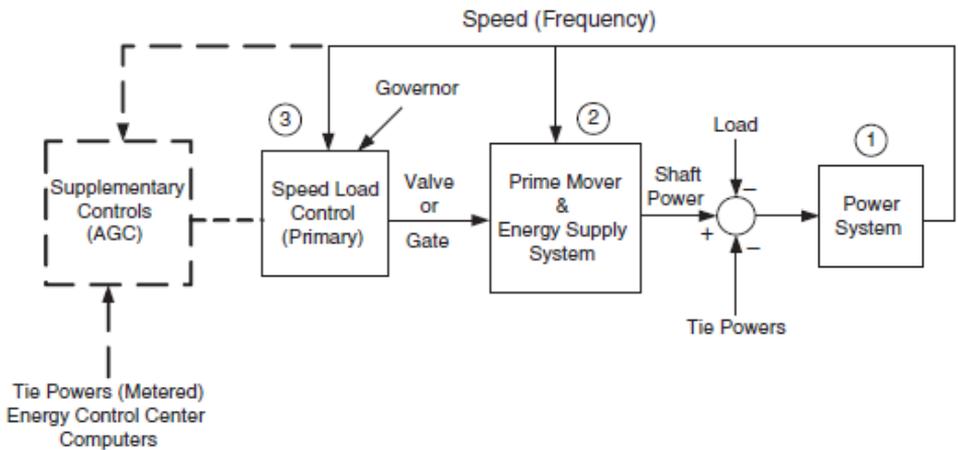
Perkembangan teknologi sistem kontrol sangat penting untuk memastikan jaringan yang berkelanjutan dengan kontribusi signifikan pasokan energi terbarukan. Metode *Robust Servo Perfectly* (RSP) belum diterapkan untuk masalah praktis karena membutuhkan aplikasi perhitungan yang *real-time*. Akan tetapi, dengan menggunakan pengolah sinyal digital (*digital signal processor*, DSP), masalah ini 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* saat terjadi gangguan yang besar dan beban daya faktor terkoreksi (PFC) untuk memastikan operasi yang tepat dari konverter selama rentang operasi yang dimaksudkan.

Kekokohan stabilitas sistem dengan pengendali elektronika daya akan dibahas menggunakan nilai tunggal terstruktur di bawah beban PFC non-linear. 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 disajikan dalam Gambar 1.6 dan 1.7. Sementara itu, Gambar 1.8 menunjukkan arsitektur untuk mengatur dan mengendalikan gangguan dalam sistem tenaga listrik.



Gambar 1.7. Pengendalian koordinat sel surya [3]



Gambar 1.8. Kendali pembangkitan otomatis sistem tenaga (AGC)

Dalam arsitektur ini, tujuan utamanya adalah untuk mengontrol tegangan bus DC dengan tegangan jatuh bus DC yang meningkat sebagai

tanggapan terhadap permintaan listrik yang berfluktuasi. Fluktuasi tersebut disebabkan 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 dan
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 diperoleh dari berbagai sumber, misalnya jurnal ilmiah, majalah, atau internet. •

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

A. 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 menyalurkan energi listrik melalui penghantar yang digantungkan pada menara atau tiang transmisi dengan perantara isolator, sedangkan saluran bawah tanah menyalurkan energi listrik melalui kabel-kabel yang ditanam di bawah permukaan tanah. Kedua jenis saluran transmisi tersebut mempunyai kelebihan dan kekurangan masing-masing. Dibandingkan dengan saluran udara, saluran bawah tanah tidak terpengaruh oleh cuaca buruk, misalnya topan, hujan deras, angin kencang, petir, dan gangguan alam lainnya. Selain itu, saluran bawah tanah lebih estetik karena tidak mengganggu pemandangan sehingga tampak lebih rapi. Oleh sebab itu, saluran bawah tanah lebih disukai, terutama untuk daerah padat penduduk seperti 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, penaikan dan penurunan tegangan transmisi dapat dilakukan dengan mudah menggunakan transformator. Oleh karena itu, sebagian besar saluran transmisi di dunia dewasa ini 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 dun-

ia dilakukan menggunakan arus bolak-balik karena 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 relatif sederhana,
2. daya guna (efisiensi) lebih tinggi (karena faktor dayanya 1), dan
3. stabilitas sistem 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 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 (konverter dan inverter) sangat mahal.

B. 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 juga berarti kenaikan isolasi, 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. Selain 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 yang tidak menggunakan tegangan distribusi 20 kV. Penentuan tegangan di atas disesuaikan dengan rekomendasi *International Electrotechnical Commission* (IEC).

C. 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*).

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), sedangkan 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. Isolator

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

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

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*). Saluran-saluran transmisi tegangan tinggi dengan jarak antar menara sangat jauh membutuhkan kuat tarik yang lebih tinggi sehingga digunakan kawat penghantar ACSR.

4. Kawat Tanah

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

D. Parameter Saluran Transmisi

Parameter-parameter saluran transmisi adalah konstanta-konstanta saluran transmisi, yaitu resistansi (R), induktans (L), konduktans (G), dan kapasitans (C). Pada saluran transmisi udara, nilai konduktansi (G) sangat kecil sehingga sering diabaikan. Dengan mengabaikan nilai konduktansi tersebut, maka perhitungan-perhitungan dalam saluran trans-

misi menjadi lebih sederhana.

1. Resistansi

Resistansi dari suatu konduktor (kawat penghantar) dihitung menggunakan persamaan:

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

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. Untuk sistem lain (CGS), resistivitas diberikan dalam mikro ohm sentimeter, panjang dalam sentimeter, dan luas dalam sentimeter kuadrat.

Secara umum, kawat-kawat penghantar terdiri dari kawat pilin (*stranded conductors*). Oleh sebab itu, sebagai faktor koreksi untuk memperhitungkan pengaruh pilin, panjang kawat dikalikan dengan 1,02 (2% untuk faktor koreksi).

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

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

dengan R_{t2} = resistansi pada temperatur t_2

R_{t1} = resistansi pada temperatur t_1

α_{t1} = koefisien temperatur dari resistansi penghantar pada temperatur $t_1^\circ\text{C}$.

Dari persamaan (2.2), dapat dibuat persamaan

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

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

dengan

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

atau

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

Dari persamaan di atas, dapat dilihat bahwa $-T_0$ ialah temperatur saat resistansi penghantar akan menjadi nol jika persamaan linear yang sama berlaku untuk daerah temperatur tersebut. 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

$$T_0 = (1/0,00393) - 20 = 234,5^\circ\text{C}$$

Untuk tembaga dengan konduktivitas 97,5%,

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

atau

$$T_0 = (1/0,00383) - 20 = 241,0^\circ\text{C}$$

Untuk Aluminium dengan konduktivitas 61%,

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

atau

$$T_0 = (1/0,00403) - 20 = 228,1^\circ\text{C}$$

Tabel 2.2. Koefisien temperatur dari material konduktor standar

Material	T_0 °C	Koefisien temperatur resistansi $\times 10^{-3}$						
		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*), dan
- 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

$$\begin{aligned} Q_{25} &= 1,8 \text{ mikro ohm/cm,} \\ l &= 1 \text{ km} = 10^5 \text{ cm, dan} \\ A &= 253 \text{ mm}^2 = 253 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Dengan demikian,

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

Dengan memperhitungkan pengaruh lapisan (umumnya konduktor-konduktor terdiri dari 3 lapis) diperoleh

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

2. Induktans dan Reaktans Induktif

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

- 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. Namun, 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. Akan tetapi, jika radius konduktor terhadap jarak antara kedua kawat relatif kecil, maka efek sekitar ini sangat kecil dan dapat diabaikan.

a. Fluks Magnetik pada Suatu Kawat Penghantar Panjang

Pandanglah suatu kawat penghantar yang panjang, lurus, bulat, dan uniform, dengan kawat balik berada di tempat yang sangat jauh, seperti terlihat pada Gambar 3.1, maka gaya gerak magnetiknya (*magneto motive force*) adalah:

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

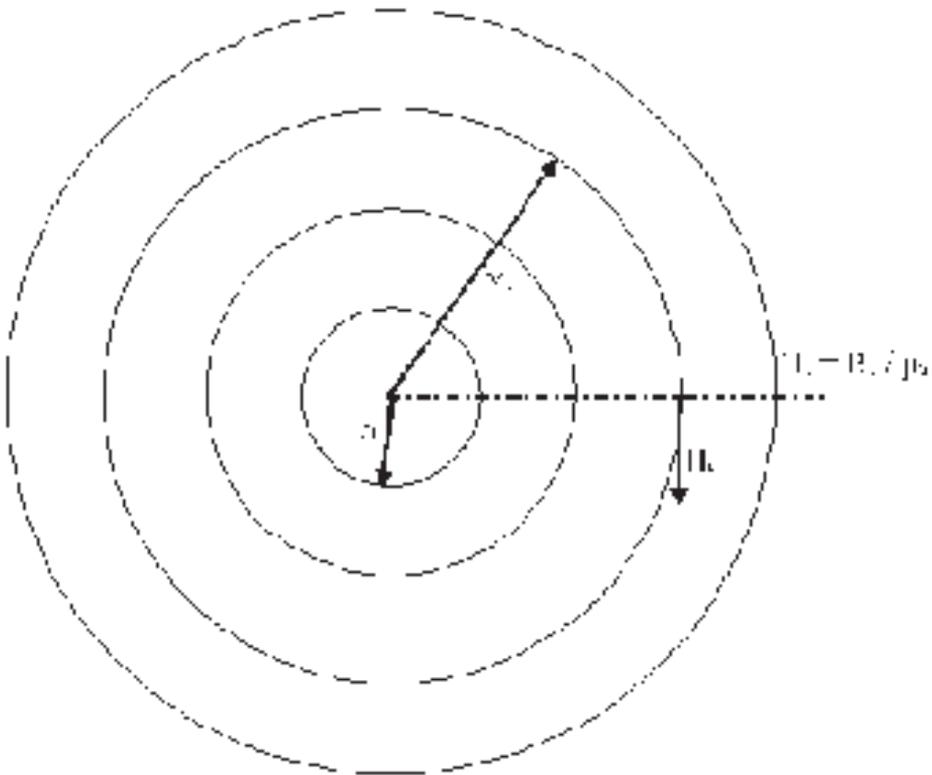
dengan

\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 dan jejari kawat r_1

Hanya satu kawat penghantar yang dikelilingi oleh medan magnetik sehingga hanya ada satu lilitan (*turn*). Oleh karenanya, ggm dalam ampere-lilit sama dengan besar arus pada kawat penghantar tersebut. Selain itu, kawat balik sangat jauh sehingga intensitas medan magnetik sepanjang jalan yang dipilih menjadi konstan (tidak ada *proximity effect*). Jadi,

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

Jika jalan yang dipilihnya itu berjejer y_1 ,

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

dan

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

atau

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

Misalkan diberikan notasi baru, yaitu $|B_e|$ = kerapatan fluks magnetik. Dengan demikian,

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

dengan

μ_a = permeabilitas absolut dari media di sekeliling kawat penghantar

$$\begin{aligned} \mu_v &= \text{permeabilitas ruang hampa} \\ &= 4\pi \times 10^{-7} \text{ henry/meter} \\ &= 1 \text{ (sistem CGS)} \end{aligned}$$

Agar terhindar dari keperluan untuk mengubah harga-harga perme-

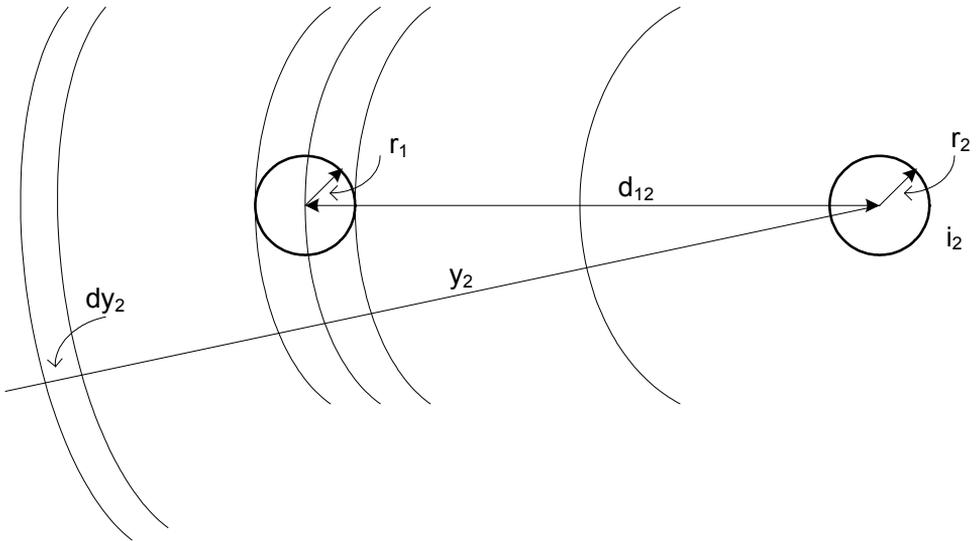
abilitas dari tiap-tiap material (bahan), permeabilitas dari material-material tersebut dinyatakan sebagai perkalian 2 faktor, yaitu

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

dengan μ_e = permeabilitas relatif dari media sekeliling.

b. Fluks Lingkup pada Posisi Kawat Balik Berdekatan

Pandanglah jika terdapat kawat kedua yang berada dekat dan paralel dengan pertama seperti terlihat pada Gambar 2.2!



Gambar 2.2. Kawat penghantar balik berdekatan dengan kawat pertama

Misalkan kedua kawat penghantar tersebut mempunyai kawat balik yang sangat jauh. Jika kawat 2 nonmagnet dan $i_2 = 0$, serta i_1 mantap, 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

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

dan

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

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

Misalkan λ_{12} adalah fluks lingkup pada kawat 1 yang ditimbulkan oleh arus i_2 pada kawat 2. Dengan demikian,

$$\lambda_{12} = \int_{d_2}^{D_2} d\phi_2 = \frac{\mu_e \mu_v h i_2}{2\pi} \int_{d_2}^{D_2} \frac{dy_2}{y_2}$$

$$\lambda_{12} = \frac{\mu_e \mu_v h i_2}{2\pi} h \frac{D_2}{d_2} \quad \text{lilitan-weber} \quad \dots\dots\dots(2.12)$$

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

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

$$\lambda_1 = \frac{\mu_v h}{2\pi} \left[i_1 \left(\mu_e h \frac{D_1}{r_1} + \frac{\mu_i}{4} \right) + i_2 \mu_e h \frac{D_2}{d_2} \right] \quad \dots\dots\dots(2.13)$$

Tinjaulah 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

$$\lambda_1 = 2\pi \times 10^{-7} h i_1 \left[h \frac{1}{r_1} + \frac{\mu_i}{4} + h \frac{D_2}{d_2} + h \frac{D_1}{D_2} \right] \quad \dots\dots\dots(2.14)$$

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

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

Dengan demikian, persamaan (3.14) menjadi

$$\lambda_1 = 2\pi \times 10^{-7} h_1 \left[h \frac{1}{r_1} + \frac{\mu_i}{4} + h d_2 \right] \text{ lilitan-weber} \dots\dots\dots(2.15)$$

c. Induktans Diri

Induktans diri (L) dari suatu rangkaian dapat didefinisikan sesuai dengan persamaan berikut.

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

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

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

atau

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

Jadi, untuk kawat 1,

$$L_1 = \frac{\lambda_1}{i_1} = 2\pi \times 10^{-7} h \left[h \frac{1}{r_1} + \frac{\mu_i}{4} + h d_2 \right] \text{ henry} \dots\dots\dots(2.17)$$

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

$$L_1 = \frac{\lambda_1}{i_1} = 2\pi \times 10^{-7} h \left[h \frac{1}{r_1} + \frac{1}{4} + h d_2 \right] \text{ henry} \dots\dots\dots(2.18)$$

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

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

Jika harga-harga tersebut disubstitusikan ke dalam persamaan (2.18), diperoleh persamaan berikut.

$$L_1 = 0,4605 \times 10^{-3} \left[\log \frac{1}{r_1} + 0,10857 + \log d_2 \right] \text{ henry/km(2.19)}$$

$$= L_a + L_d$$

dengan

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

pada jarak 1 m, dan

$$L_d = 0,4605 \times 10^{-3} \log d_2 \text{ henry/km(2.21)}$$

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, mengubah induktans menjadi reaktans sesuai dengan relasi berikut akan lebih berguna.

$$X = 2\pi f L$$

Jadi,

$$X_1 = 2,8934 \times 10^{-3} f \left[\log \frac{1}{r_1} + 0,10857 + \log d_2 \right] \text{ ohm/km (2.22)}$$

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

$$X_d = 2,8934 \times 10^{-3} f \log d_2 \text{ ohm/km} \dots\dots\dots(2.24)$$

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

$$X_1 = 0,14467 \left[\log \frac{1}{r_1} + 0,10857 + \log d_2 \right] \text{ ohm/km} \dots\dots\dots (2.25)$$

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

$$X_d = 0,14467 \times 10^{-3} f \log d_2 \text{ ohm/km} \dots\dots\dots(2.27)$$

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 mempunyai konduktor tembaga dengan konduktivitas 97,3%; 107,2 mm² (4/10 atau 211.600 CM), 19 kawat elemen, dan jejari efektif 0,6706 cm. Jarak antara kedua kawat adalah 1,5 m. Dengan frekuensi kerja sebesar 50 Hz, tentukanlah reaktans induktif saluran transmisi tersebut dalam ohm per km per kawat!

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

$$X_1 = 0,14467 \left[\log \frac{1}{r_1} + 0,10857 + \log d_2 \right] \text{ ohm/km}$$

dengan

r_1 = jejari konduktor dalam meter

= 0,006706

d_{12} = jarak antar kawat

= 1,5 meter

Dengan demikian,

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

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

d. 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, tahanan AC, reaktans induktif, dan reaktans kapasitif. Dengan bantuan tabel-tabel tersebut, berbagai perhitungan untuk mendapatkan parameter saluran dapat dilakukan dengan lebih cepat karena tidak perlu menggunakan rumus-rumus.

3. *Geometric Mean Radius (GMR) dan Geometric Mean Distance (GMD)*

a. *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 berdinding yang sangat tipis mendekati nol sehingga induktans dari silinder itu sama dengan induktans kawat asli.

Berdasarkan persamaan (3.17) diperoleh

$$L_1 = 2\pi \times 10^{-7} h \left[h \frac{1}{r_1} + \frac{1}{4} + h d_2 \right] \quad \text{henry}$$

$$L_1 = 2\pi \times 10^{-7} h \left[h \frac{1}{r_1} + h e^{\frac{1}{4}} + h d_2 \right] \quad \text{henry}$$

$$L_1 = 2\pi \times 10^{-7} h \left[h \frac{1}{r_1 e^{-\frac{1}{4}}} + h d_2 \right] \quad \text{henry}$$

atau

$$L_1 = L_a + L_d$$

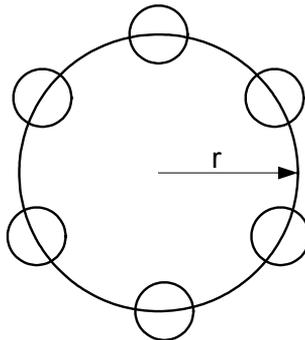
L_a adalah komponen kawat dan tergantung dari $\frac{1}{r_1 e^{-\frac{1}{4}}}$ sehingga $r_1 e^{-\frac{1}{4}} = r_1'$ yang kemudian disebut jari rata-rata geometris atau GMR dari kawat bundar dengan jari r_1 .

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

b. Geometric Mean Distance (GMD)

Jika suatu lingkaran pada jari r terdapat n titik yang jaraknya satu sama lain sama besar, GMD antara titik-titik itu adalah

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



Gambar 2.3. Penampang kawat penghantar untuk mendapatkan perhitungan GMD

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

4. Kapasitans dan Reaktans Kapasitif

Dua kawat paralel yang dipisahkan oleh media isolasi akan membentuk kapasitor sehingga mempunyai sifat untuk menyimpan muatan listrik. Jika suatu perbedaan tegangan dipertahankan antara kedua kawat, 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.

$$e_2 = e_1 - e_2 = \frac{q_1}{2\pi_v h} \left[h \frac{1}{r_1} + h \frac{1}{r_2} + 2h d_2 \right] \dots\dots\dots(2.29)$$

dengan

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

a. Kapasitans

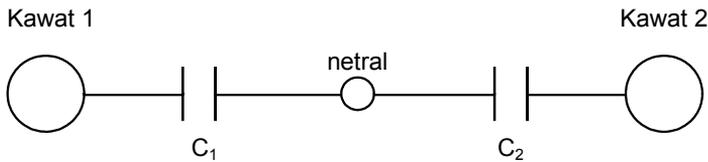
Kapasitans (C) diberikan menurut persamaan berikut

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

maka,

$$C_2 = \frac{q_1}{e_2} = \frac{2\pi_v h}{h \frac{1}{r_1} + h \frac{1}{r_2} + 2h d_2} \dots\dots\dots(2.30)$$

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



Gambar 2.4. Kapasitans antara dua kawat penghantar

Titik dengan potensial nol disebut titik netral kapasitans. Jika suatu sistem simetris, titik netral berada tepat di tengah-tengah kedua kawat tersebut sehingga diperoleh persamaan berikut.

$$C_1 = \frac{q_1}{e_1} = \frac{2\pi v h}{h \frac{1}{r_1} + h d_2} \dots\dots\dots(2.31)$$

dan,

$$C_2 = \frac{q_2}{e_2} = \frac{2\pi v h}{h \frac{1}{r_2} + h d_1} \dots\dots\dots(2.32)$$

dengan

C_1 = kapasitans kawat 1 terhadap netral

C_2 = kapasitans kawat 2 terhadap netral

Jumlah kapasitans antara kawat 1 dan kawat 2 terhubung seri sehingga

$$C_p = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}$$

$$C_2 = \frac{2\epsilon_v h}{h \frac{1}{r_1} + h \frac{1}{r_2} + h d_2} \quad \text{farad} \quad \dots\dots\dots(2.33)$$

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

$$C_1 = C_2 = \frac{2\epsilon_v h}{h \frac{1}{r_1} + h d_2} \quad \text{farad} \quad \dots\dots\dots(2.34)$$

Di dalam satuan praktis, lebih berguna untuk menghitung kapasitans 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 menggunakan persamaan (2.33) akan memperoleh persamaan berikut.

$$C_1 = \frac{2,417 \times 10^{-8}}{h \frac{1}{r_1} + h d_2} \quad \text{farad} \quad \dots\dots\dots(2.35)$$

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

b. Reaktans Kapasitif

Jika gelombang berbentuk sinus, reaktans kapasitif kawat penghantar 1 dapat diperoleh

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

$$\text{atau} \quad X_1' = \frac{-6,5856 \times 10^{-6}}{f} \left(\log \frac{1}{r_1} + \log d_2 \right) \text{ ohm km} \quad \dots\dots\dots(2.36)$$

$$\text{atau} \quad X_1' = X_a' + X_d' \quad \dots\dots\dots(2.37)$$

dengan

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

$$X_d' = \frac{-6,5856 \times 10^{-6}}{f} \log d_2 \text{ ohm km(2.39)}$$

(r dan d dalam meter)

Jika f = 50 Hz,

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

$$X_d' = -0,1317 \times 10^{-6} \log d_2 \text{ ohm km(2.41)}$$

Latihan:

1. Jelaskan klasifikasi saluran transmisi berdasarkan konstruksi dan jenis arus yang digunakan, serta jelaskan kelebihan dan kekurangannya!
2. Jelaskan komponen pokok saluran transmisi udara!
3. Jelaskanlah mengapa untuk pengiriman daya yang sama pada sistem transmisi lebih menguntungkan menggunakan tegangan transmisi yang ditinggikan dibandingkan 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. Reaktans induktif per fase suatu saluran transmisi tiga fase simetris yang menggunakan kawat penghantar 157 mm² (300.000 CM) dan 12 strands adalah 0,402 ohm per km pada frekuensi 50 Hz. Tentukanlah jarak dari kawat-kawat penghantar tersebut!
6. Suatu saluran udara fase tunggal memiliki konduktor tembaga den-

gan konduktivitas 100%; $107,2 \text{ mm}^2$ (4/10 atau 211.600 CM), 19 kawat elemen, dan jejari efektif 0,6706 cm. Jarak antara kedua kawat 1 m. Dengan frekuensi kerja sebesar 50 Hz, tentukanlah reaktans induktif saluran transmisi tersebut dalam ohm per km per kawat! •

BAB III

Representasi Saluran Transmisi

TUJUAN Instruksional Umum:

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

Tujuan Instruksional Khusus:

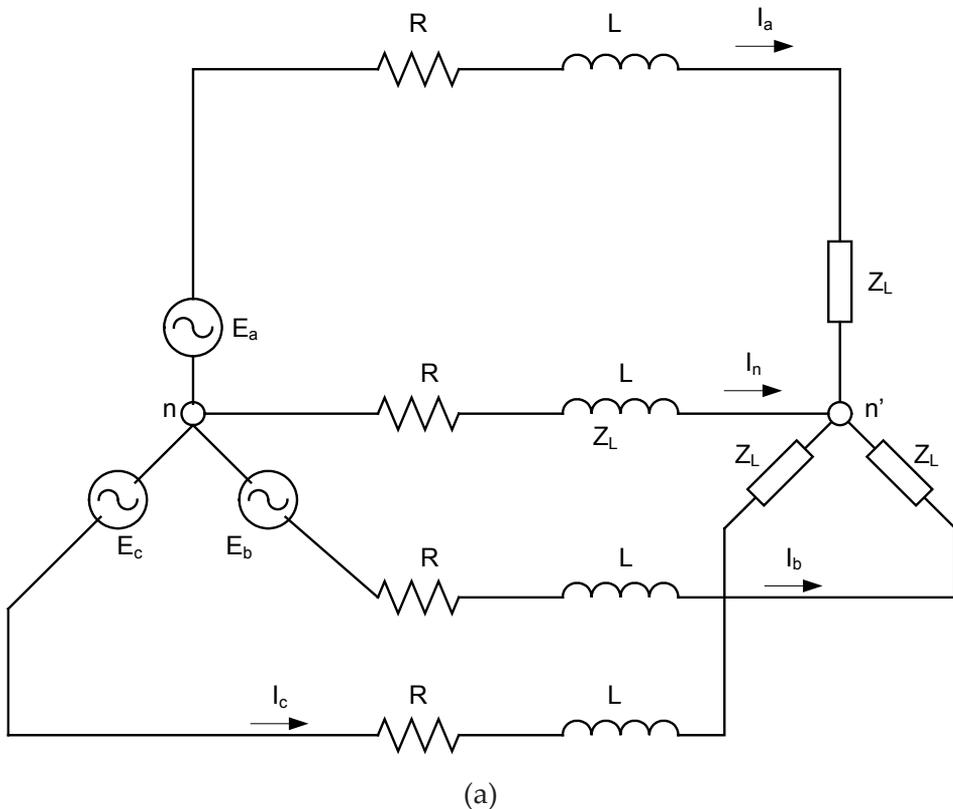
1. Memberikan pengetahuan tentang gambaran umum saluran transmisi daya listrik
2. Memberikan pengetahuan tentang klasifikasi saluran transmisi daya listrik
3. Memberikan pengetahuan tentang rangkaian kutub empat saluran transmisi daya listrik
4. Memberikan pengetahuan tentang kompensasi pada saluran transmisi daya listrik

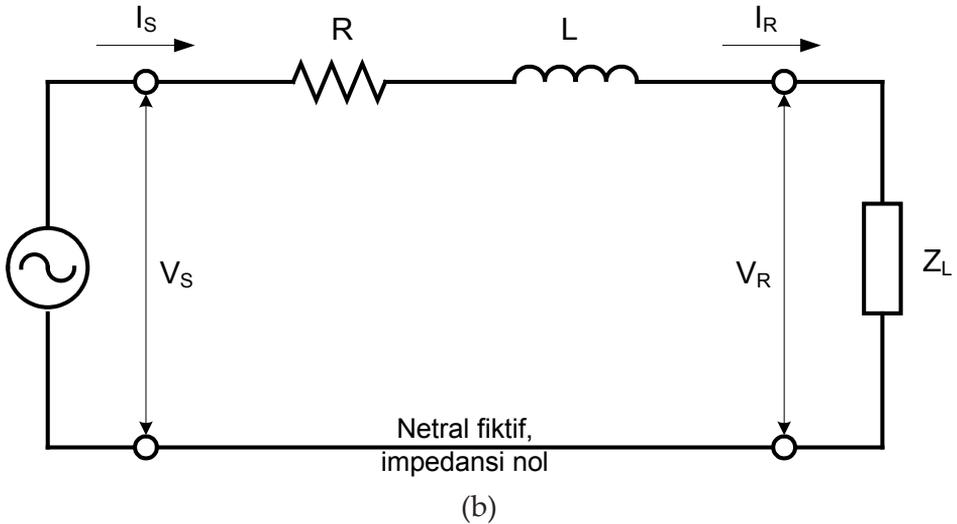
A. Pendahuluan

Persoalan tegangan listrik dalam saluran transmisi sangatlah penting. Salah satu ukuran kualitas layanan daya listrik kepada konsumen bagi suatu perusahaan penyedia tenaga listrik adalah tegangan listrik-

nya. Baik dalam keadaan operasi maupun dalam perancangan, tegangan pada setiap titik dalam saluran transmisi harus selalu diperhatikan. Tegangan listrik yang baik berada pada nilai nominalnya atau mendekati nilai nominalnya pada batas toleransi dan selalu dalam keadaan stabil. Besar perubahan tegangan yang diperbolehkan biasanya berkisar antara -10% sampai dengan 5%.

Saluran transmisi daya listrik yang dibahas dalam buku ini ditekankan pada saluran udara yang sebagian besar menggunakan saluran tiga fase, sebagaimana terlihat pada Gambar 3.1.





Gambar 3.1 Representasi saluran transmisi tiga fase

Dalam gambar 3.1(a), diperlihatkan saluran transmisi tiga fase dengan kawat netral n . Dalam keadaan tegangan dan arus yang simetris, tidak ada arus yang mengalir pada kawat netral $n-n'$. Ketiga fasenya simetris, artinya ketiga fasenya tergeser -120° dan $+120^\circ$ terhadap fase referensi. Oleh sebab itu, analisisnya cukup dilakukan berdasarkan satu fase dan biasanya dipilih fase a sebagai fase referensi, dengan jalan balik arus yang fiktif tanpa impedansi seperti terlihat pada Gambar 3.1(b). Besaran-besaran untuk fase b dan fase c diperoleh dengan memutar besaran fase a dengan sudut -120° dan $+120^\circ$.

B. Klasifikasi Saluran Transmisi

1. Klasifikasi Saluran Transmisi untuk Keperluan Diagram Pengganti

Untuk keperluan analisis dan perhitungan, diagram pengganti biasanya diklasifikasikan dalam tiga kelas, yaitu:

- a. saluran transmisi jarak pendek (< 80 km),

- b. saluran transmisi jarak menengah (80 s.d. 250 km), dan
- c. saluran transmisi jarak panjang (> 250 km).

Sebenarnya klasifikasi di atas sangat relatif. Klasifikasi saluran transmisi harus didasarkan atas besar kecilnya kapasitans ke tanah. Jika kapasitans kecil, arus bocor ke tanah terhadap arus beban juga kecil sehingga kapasitans ke tanah dapat diabaikan. Hal tersebut dinamakan saluran transmisi jarak pendek. Jika kapasitans sudah mulai besar sehingga tidak dapat diabaikan, tetapi belum begitu besar sehingga masih dapat dianggap sebagai kapasitans terpusat (*lumped capacitance*), hal itu dinamakan saluran transmisi jarak menengah. Namun, jika kapasitans besar sekali sehingga tidak mungkin lagi dianggap sebagai kapasitans terpusat dan harus dianggap terbagi rata sepanjang saluran, hal ini dinamakan saluran transmisi jarak panjang.

Seperti disebutkan di atas, klasifikasi saluran transmisi berdasarkan jarak sangatlah relatif. Semakin tinggi tegangan operasi saluran transmisi, kemungkinan timbulnya korona juga sangat besar. Korona ini akan memperbesar kapasitans saluran sehingga memperbesar arus bocor. Jadi, ada kalanya walaupun panjang saluran transmisi hanya 50 km, tetapi jika tegangan kerjanya sangat tinggi (Tegangan Ekstra Tinggi, EHV, apalagi Tegangan Ultra Tinggi, UHV), kapasitans saluran akan relatif besar sehingga tidak mungkin lagi diabaikan.

Dengan demikian, untuk mendapatkan hasil yang teliti, sebelum kita dapat menggambarkan diagram pengganti saluran transmisi, sebaiknya dihitung terlebih dahulu kapasitans saluran transmisi dan pengaruh korona terhadap saluran transmisi. Akan tetapi, dalam praktiknya, klasifikasi saluran transmisi berdasarkan panjang saluran seperti disebutkan di atas sudah dapat memadai dan diterapkan.

2. Klasifikasi Saluran Transmisi Menurut Tegangan Kerja

Standar tegangan transmisi di Indonesia adalah 66 kV, 150 kV, 380 kV, dan 500 kV. Namun, klasifikasi saluran transmisi menurut tegangan kerja ini masih belum nyata. Sebaliknya, di negara-negara maju seperti Amerika Serikat, Rusia, Kanada, dan lain-lain, tegangan transmisi telah mencapai 1000 kV sehingga klasifikasi tegangan transmisi pada negara-negara tersebut adalah:

- a. Tegangan Tinggi (*High Voltage*): sampai 138 kV,
- b. Tegangan Ekstra Tinggi (*Extra High Voltage*): 220 kV sampai 765 kV, dan
- c. Tegangan Ultra Tinggi (*Ultra High Voltage*): di atas 765 kV.

3. Klasifikasi Saluran Transmisi Berdasarkan Fungsinya dalam Operasi

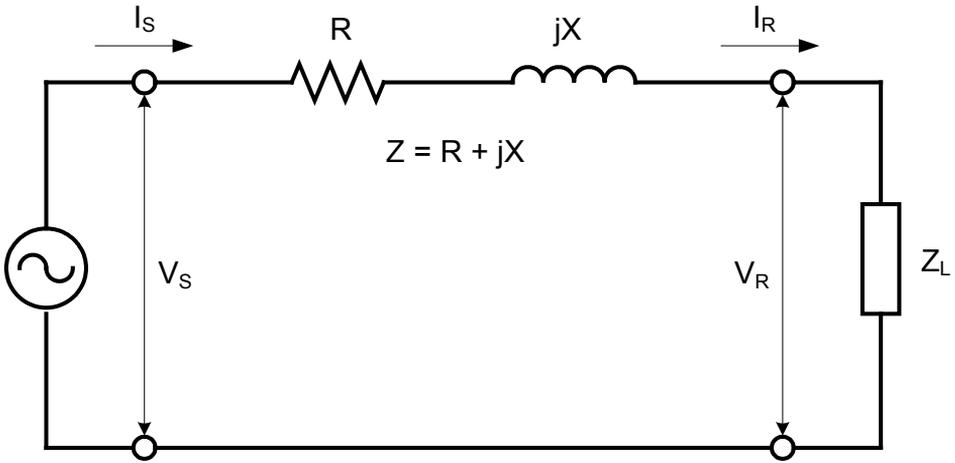
Berdasarkan fungsinya dalam operasi, saluran transmisi sering diberi nama sebagai berikut:

- a. Transmisi: saluran untuk menyalurkan daya yang besar dari pusat-pusat pembangkit ke daerah-daerah beban atau antara dua atau lebih sistem. Penyaluran antara dua atau lebih sistem disebut saluran interkoneksi atau *tie line*.
- b. Sub transmisi: saluran sub transmisi ini biasanya adalah percabangan dari saluran yang tinggi ke saluran yang lebih rendah.
- c. Distribusi: di Indonesia telah ditetapkan bahwa tegangan distribusi adalah 20 kV.

C. Diagram Pengganti Saluran Transmisi

1. Saluran Transmisi Jarak Pendek

Gambar 3.2 menunjukkan diagram pengganti dari saluran transmisi jarak pendek. Di sini, kapasitans saluran diabaikan.



Gambar 3.2 Diagram pengganti saluran transmisi jarak pendek

Berdasarkan Gambar 3.2, notasi-notasi yang diberikan dapat dijelaskan sebagai berikut.

V_s = tegangan pada ujung pengirim atau ujung generator

I_s = arus pada ujung pengirim atau ujung generator

V_R = tegangan pada ujung penerima atau ujung beban

I_R = arus pada ujung penerima atau ujung beban

$Z = R + jX$

= impedansi saluran

Dengan demikian, relasi tegangan dan arusnya adalah

$$V_s = V_R + Z I_R \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

$$I_s = I_R \quad \dots\dots\dots(3.2)$$

Pengaturan tegangan atau “*Voltage Regulation (VR)*” didefinisikan sebagai berikut.

$$R (\%) = \frac{|V_{R(N)}| - |V_{R(E)}|}{|V_{R(E)}|} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(3.3)$$

dengan

$|V_{R(NL)}|$ = tegangan sakelar ujung beban pada beban nol (*No Load*)
 $|V_{R(FL)}|$ = tegangan sakelar ujung beban pada beban penuh (*Full Load*)

Untuk saluran transmisi jarak pendek, berlaku:

$$|V_{R(NL)}| = |V_S|$$

$$|V_{R(FL)}| = |V_R|$$

maka,

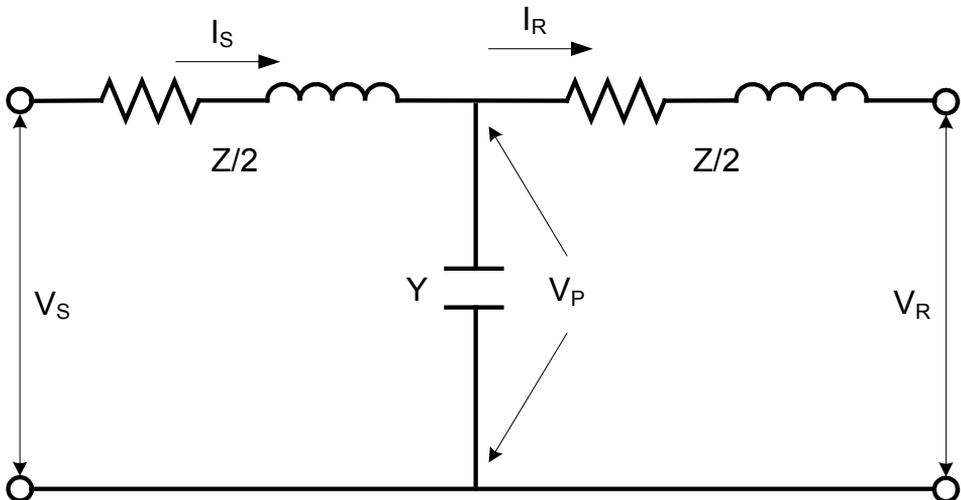
$$R (\%) = \frac{|V_S| - |V_R|}{|V_R|} \times 100\% \dots\dots\dots(3.4)$$

2. Saluran Transmisi Jarak Menengah

Pada saluran transmisi jarak menengah, kapasitans saluran dapat dipusatkan pada satu titik (nominal T) atau pada dua titik (nominal π).

a. Nominal T

Diagram pengganti saluran transmisi jarak menengah dengan pendekatan nominal T diperlihatkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Diagram pengganti saluran transmisi jarak menengah dengan pendekatan nominal T

Hubungan tegangan dan arus diberikan oleh

$$V_S = V_R + I_R Z/2 + I_S Z/2$$

Akan tetapi,

$$\begin{aligned} I_S &= I_R + V_P Y \\ &= I_R + (V_R + I_R Z/2)Y \end{aligned}$$

$$I_S = Y V_R + (1 + ZY/2) I_R$$

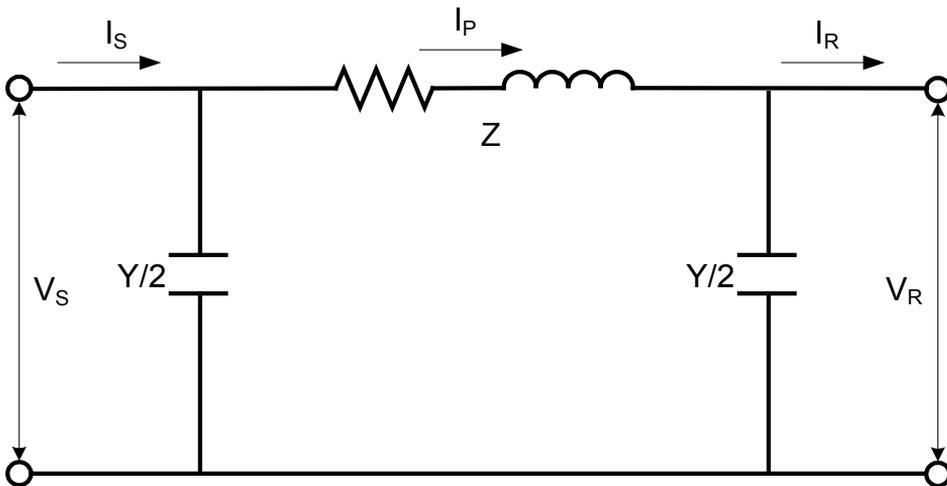
maka,

$$V_S = (1 + ZY/2) V_R + (Z + Z^2Y/4) I_R$$

$$I_S = Y V_R + \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) I_R \quad \dots\dots\dots(3.5)$$

b. Nominal π

Diagram pengganti saluran transmisi jarak menengah dengan pendekatan nominal π ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Diagram pengganti saluran transmisi jarak menengah dengan pendekatan nominal π

Hubungan tegangan dan arus diberikan oleh

$$V_S = V_R + I_P Z$$

Akan tetapi,

$$I_P = I_R + V_R Y/2$$

Jadi,

$$V_S = V_R + (I_R + V_R Y/2) Z$$

$$V_S = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) V_R + Z I_R$$

Arus

$$I_S = I_P + V_S Y/2$$

$$I_S = I_R + V_R Y/2 + (1 + ZY/2) V_R + Z I_R Y/2$$

$$I_S = (Y + ZY^2/4) V_R + (1 + ZY/2) I_R \dots\dots\dots(3.6)$$

Pengaturan tegangan untuk nominal T atau nominal π diberikan oleh persamaan berikut.

$$V_{R(N)} = \frac{V_S}{1 + \frac{ZY}{2}}, \text{ dan}$$

$$V_{R(FL)} = V_R$$

maka,

$$R (\%) = \frac{|V_{R(N)}| - |V_{R(E)}|}{|V_{R(E)}|} \times 100\%$$

$$R (\%) = \frac{\left| \frac{V_S}{1 + \frac{ZY}{2}} \right| - |V_R|}{|V_R|} \times 100\% \dots\dots\dots(3.7)$$

Contoh 3.1 Suatu saluran transmisi udara tiga fase, 50 km, dan 70 kV mempunyai konstanta: R=0,20 ohm per km, X=0,608 ohm per km, dan Y=j4,0x10⁻⁶ mho per km. Saluran transmisi tersebut menyuplai beban 30 MW dan

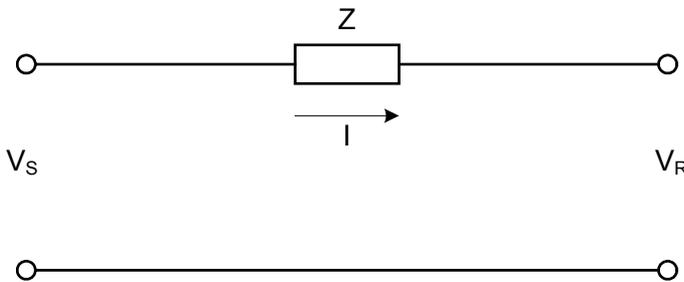
faktor daya $\text{pf} = 0,9$ terbelakang. Tegangan pada ujung beban 70 kV. Hitunglah (a) tegangan pada ujung pengirim, (b) daya pada ujung pengirim, (c) efisiensi transmisi, dan (d) pengaturan tegangan!

Jawab: (a) Panjang saluran adalah 50 km. Oleh karenanya, saluran ini adalah saluran transmisi jarak pendek.

Jadi,

$$I_S = I_R = I$$

$$V_S = V_R + I Z$$



$$P_R = 30 \text{ MW}$$

$\text{pf} = 0,9$ terbelakang (*lagging*)

$$V_R = 70 \text{ kV (L-L)}$$

$$= 70 / \sqrt{3} \text{ kV (L-N)}$$

$$= 40,416 \text{ volt (L-N)}$$

$$|I_R| = \frac{P_R}{\sqrt{3} V_{R(L-L)} \text{pf}}$$

Jadi,

$$I_R = \frac{30000 \text{ kW} \angle -25,84^\circ}{\sqrt{3} \times 70 \text{ kV} \times 0,9} \text{ A}$$

$$= 274,94 \angle -25,84^\circ \text{ A}$$

$$\begin{aligned} Z &= (0,2 + j0,608) 50 \text{ ohm} \\ &= 10 + j30,4 \text{ ohm} \\ &= 32 \angle 71,8^\circ \text{ ohm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_S &= V_R + IZ \\ &= 40,416 + 274,94 \angle -25,84^\circ \times 32 \angle 71,8^\circ \\ &= 40,416 + 8,798 \angle 45,96^\circ \\ &= 40,416 + 6,116 + j6,324 \\ &= 46,532 + j6,324 \text{ volt} \\ &= 46,93 \angle 7,49^\circ \text{ kV (L-N)} \end{aligned}$$

atau

$$\begin{aligned} |V_S| &= 46,93 \text{ kV (L-N)} \\ &= 81,28 \text{ kV (L-L)} \end{aligned}$$

(b) Daya pada ujung pengirim

$$\begin{aligned} P_S &= \sqrt{3} |V_S| |I| \cos \varphi_S \\ \varphi_S &= 7,49 - (-25,84) \\ &= 33,33^\circ \\ P_S &= \sqrt{3} \times 81,28 \times 274,94 \times \cos 33,33^\circ \\ &= 32,339 \text{ kW} \\ &= 32,34 \text{ MW} \end{aligned}$$

(c) Efisiensi transmisi

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_R}{P_S} = \frac{30}{32,34} \times 100\% \\ &= 92,6\% \end{aligned}$$

(d) Pengaturan tegangan

$$\begin{aligned} R (\%) &= \frac{|V_{R(N)}| - |V_{R(E)}|}{|V_{R(E)}|} \times 100\% \\ V_{R(NL)} &= |V_S| = 81,28 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$V_{R(FL)} = |V_R| = 70 \text{ kV}$$

$$R (\%) = \frac{8,8 - 0}{0} \times 100\% = 16,11\%$$

3. Saluran Transmisi Jarak Panjang

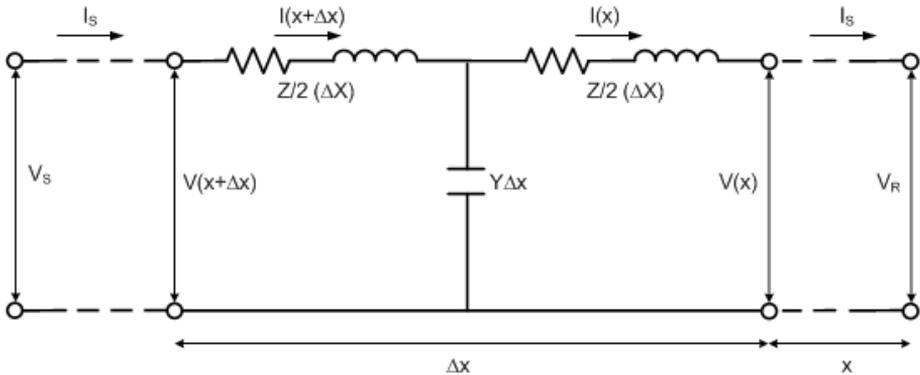
Diagram pengganti saluran transmisi jarak panjang diperlihatkan seperti pada Gambar 3.5.

Misalkan Z = impedansi per satuan panjang

Y = admitans shunt per satuan panjang

Pandanglah bagian kecil, Δx , dari kawat transmisi itu yang jaraknya x dari ujung penerima.

$$V(x + \Delta x) = \left[1 + \frac{Y}{2}(\Delta x)^2 \right] V(x) + Z\Delta x \left[1 + \frac{Y}{4}(\Delta x)^2 \right] I(x) \dots (3.8)$$



Gambar 3.5 Diagram pengganti saluran transmisi jarak panjang

$$I(x + \Delta x) = Y\Delta V(x) + \left[1 + \frac{Y}{2}(\Delta x)^2 \right] I(x) \dots (3.9)$$

atau

$$V(x + \Delta x) - V(x) = \Delta V(x)$$

$$= \frac{Z}{2}(\Delta x)^2 V(x) + Z\Delta x \left[1 + \frac{Z}{4}(\Delta x)^2 \right] I(x) \dots\dots\dots (3.10)$$

$$I(x + \Delta x) - I(x) = \Delta I(x) \\ = Y\Delta V(x) + \frac{Z}{2}(\Delta x)^2 I(x) \dots\dots\dots (3.11)$$

$$\frac{\Delta V(x)}{\Delta x} = \frac{Z}{2} V(x)\Delta x + Z \left[1 + \frac{Z}{4}(\Delta x)^2 \right] I(x) \dots\dots\dots (3.12)$$

$$\frac{\Delta I(x)}{\Delta x} = Y(x) + \frac{Z}{2} I(x)\Delta x \dots\dots\dots (3.13)$$

$\Delta V(x)$ dan $\Delta I(x)$ adalah kenaikan tegangan dan arus jika bergerak dari titik x ke titik $(x + \Delta x)$, yaitu sejauh Δx .

Jika Δx dibiarkan menjadi kecil sekali sehingga mendekati nol,

$$\frac{\Delta V(x)}{\Delta x} \text{mendekati } \frac{dV(x)}{dx}$$

$$\frac{\Delta I(x)}{\Delta x} \text{mendekati } \frac{dI(x)}{dx}$$

Selain itu, suku-suku yang mengandung Δx akan hilang. Jadi, persamaan (3.12) dan (3.13) menjadi sebagai berikut.

$$\frac{dV}{dx} = Z \dots\dots\dots (3.14)$$

$$\frac{dI}{dx} = Y \dots\dots\dots (3.15)$$

Subskrip x tidak diperlukan lagi untuk V dan I karena relasi di atas berlaku untuk setiap titik. Semua suku-suku yang berbeda pada representasi T dan π mengandung Δx sehingga hasil yang sama akan diperoleh juga seandainya kita memulai dengan representasi π .

Jika persamaan (3.14) dan (3.15) dideferiansiasi sekali lagi, akan di-

peroleh persamaan berikut.

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = Z \frac{dI}{dx}$$

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = ZYV \quad \dots\dots (3.16)$$

$$\frac{d^2 I}{dx^2} = Y \frac{dV}{dx}$$

$$\frac{d^2 I}{dx^2} = ZYI \quad \dots\dots (3.17)$$

Bentuk umum persamaan tegangan dan arus untuk saluran transmisi jarak panjang adalah

$$V = V_R \cosh \sqrt{ZY} x + \sqrt{\frac{Z}{Y}} I_R \sinh \sqrt{ZY} x \quad \dots\dots\dots(3.18)$$

$$I = I_R \cosh \sqrt{ZY} x + \sqrt{\frac{Z}{Y}} V_R \sinh \sqrt{ZY} x \quad \dots\dots\dots(3.19)$$

D. Rangkaian Kutub Empat Saluran Transmisi

Dalam banyak keperluan di dalam teknik transmisi daya listrik, misalnya diagram-diagram lingkaran saluran transmisi, perencanaan saluran transmisi, dan lain-lain, sering perlu menyatakan konstanta-konstanta saluran transmisi ke dalam konstanta-konstanta umum saluran transmisi.

Saluran transmisi tersebut selalu dapat digambarkan sebagai kotak dengan dua jepitan masuk dan dua jepitan keluar. Hal tersebut memenuhi persyaratan dari kutub empat sehingga saluran transmisi dapat dinyatakan sebagai kutub empat.

Suatu rangkain listrik yang pasif, linear, dan bilateral selalu dapat

direpresentasikan sebagai kutub empat. Pasif berarti tidak ada sumber (*internal voltage*). Linear berarti impedansinya tidak tergantung dari besar arus. Bilateral berarti impedansi akan sama jika dilihat dari kedua sisi atau tidak tergantung dari arah arus.

Pada dasarnya, saluran transmisi tidaklah linear karena, bagaimanapun juga, impedansinya tergantung dari temperatur. Dengan kata lain, hal itu tergantung dari arus. Namun, dalam perhitungan kita selalu menentukan temperatur kerja tertentu sehingga pada temperatur itu, konstanta kawat penghantar adalah konstan.

Saluran transmisi (termasuk transformator) memenuhi ketiga syarat-syarat di atas sehingga dapat direpresentasikan sebagai kutub empat seperti terlihat pada Gambar 3.6.

Dalam Gambar 3.6, terlihat bahwa A, B, C, dan D adalah konstanta-konstanta umum dari rangkaian itu yang merepresentasikan saluran transmisi. Relasi tegangan dan arus untuk suatu kutub empat adalah

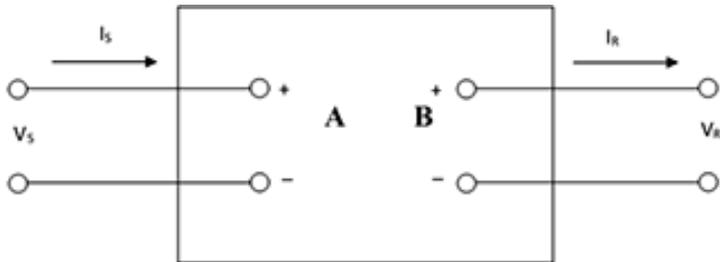
$$V_S = A V_R + B I_R \quad \dots\dots\dots(3.20)$$

$$I_S = C V_R + D I_R \quad \dots\dots\dots(3.21)$$

dan,

$$V_R = D V_S - B I_S \quad \dots\dots\dots(3.22)$$

$$I_R = -C V_S + A I_S \quad \dots\dots\dots(3.23)$$



Gambar 3.6 Rangkaian kutub empat saluran transmisi

E. Saluran Transmisi Sebagai Kutub Empat

1. Saluran Transmisi Jarak Pendek

Gambar 3.7 menunjukkan saluran transmisi jarak pendek berdasarkan rangkaian kutub empat.

Hubungan tegangan dan arus untuk saluran jarak pendek adalah

$$V_S = V_R + Z I_R \dots\dots\dots(3.24)$$

$$I_S = 0 + I_R \dots\dots\dots(3.25)$$

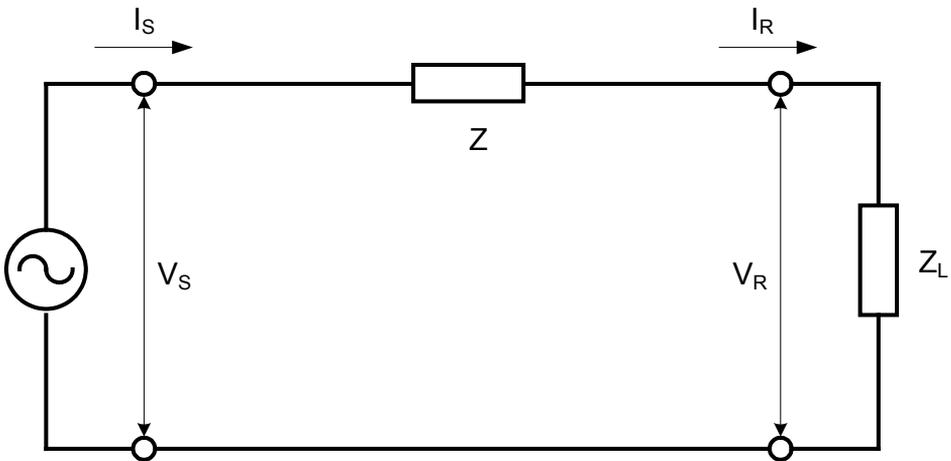
Dengan membandingkan persamaan (3.24) sampai persamaan (3.25), didapatkan relasi-relasi sebagai berikut.

$$A = 1 \dots\dots\dots(3.26)$$

$$B = Z \dots\dots\dots(3.27)$$

$$C = 0 \dots\dots\dots(3.28)$$

$$D = 1 \dots\dots\dots(3.29)$$



Gambar 3.7 Rangkaian saluran transmisi jarak pendek

2. Saluran Transmisi Jarak Menengah

a. Nominal T

Saluran transmisi jarak menengah dengan representasi nominal T di-

tunjukkan pada Gambar 3.8.

Untuk representasi nominal T, berdasarkan Gambar 3.8, diperoleh relasi tegangan dan arus sebagai berikut.

$$V_S = (1 + YZ_S/2) V_R + (Z_S + Z_R + Z_S Y Z_R) I_R$$

$$I_S = Y V_R + (1 + Y Z_R) I_R$$

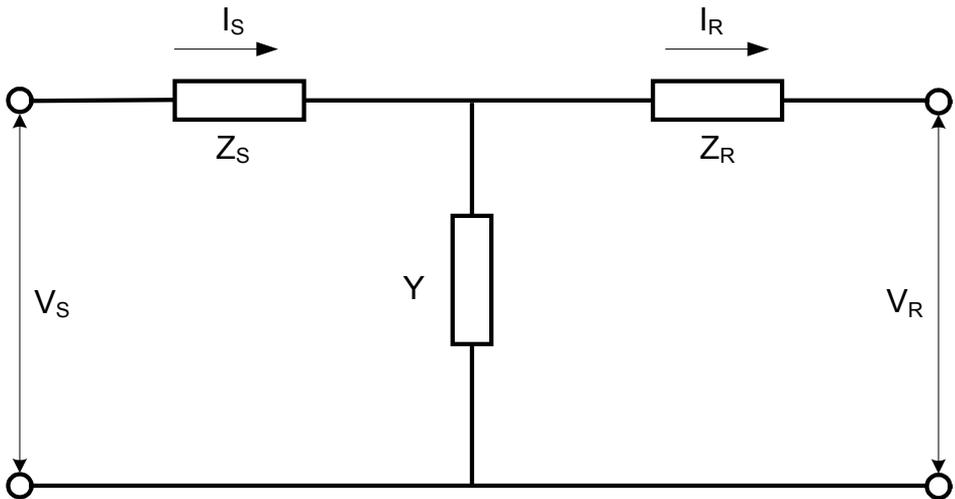
Jadi,

$$A = 1 + Y Z_S \dots\dots\dots(3.30)$$

$$B = Z_S + Z_R + Z_S Y Z_R \dots\dots\dots(3.31)$$

$$C = Y \dots\dots\dots(3.32)$$

$$D = 1 + Y Z_R \dots\dots\dots(3.33)$$



Gambar 3.8 Rangkaian saluran transmisi jarak menengah dengan representasi nominal T

Misalkan $Z_S = Z_R = Z/2$

maka,

$$A = 1 + ZY/2 \dots\dots\dots(3.34)$$

$$B = Z + Z^2Y/4 \quad \dots\dots\dots(3.35)$$

$$C = Y \quad \dots\dots\dots(3.36)$$

$$D = A \quad \dots\dots\dots(3.37)$$

b. Nominal π

Saluran transmisi jarak menengah dengan representasi nominal π ditunjukkan pada Gambar 3.9.

Hubungan tegangan dan arusnya diperoleh sebagai berikut.

$$V_S = (1 + Y_R Z) V_R + Z I_R$$

$$I_S = (Y_S + Y_R + Y_S Z Y_R) V_R + (1 + Y_S Z) I_R$$

Jadi,

$$A = 1 + Y_R Z \quad \dots\dots\dots(3.38)$$

$$B = Z \quad \dots\dots\dots(3.38)$$

$$C = Y_S + Y_R + Y_S Z Y_R \quad \dots\dots\dots(3.40)$$

$$D = 1 + Y_S Z \quad \dots\dots\dots(3.41)$$

Misalkan $Y_S = Y_R = Y/2$

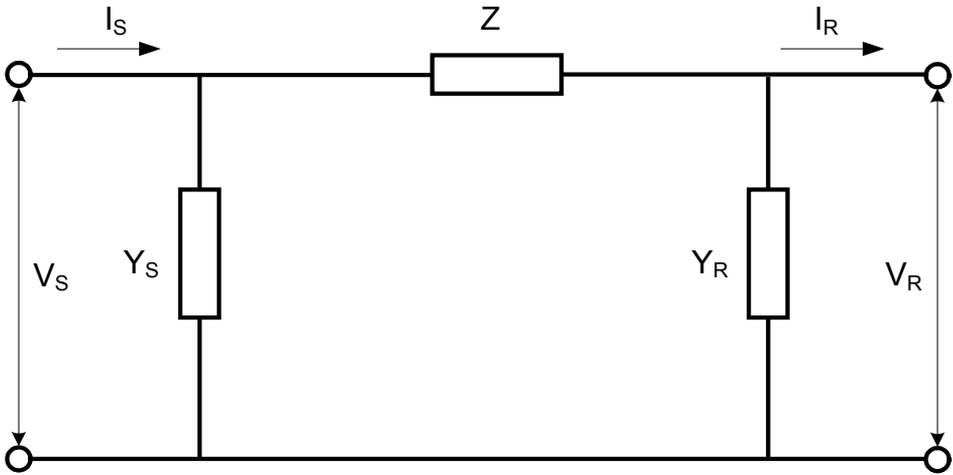
maka,

$$A = 1 + ZY/2 \quad \dots\dots\dots(3.42)$$

$$B = Z \quad \dots\dots\dots(3.43)$$

$$C = Y + Y^2Z/4 \quad \dots\dots\dots(3.44)$$

$$D = A \quad \dots\dots\dots(3.45)$$



Gambar 3.9 Rangkaian saluran transmisi jarak menengah dengan representasi nominal π

3. Saluran Transmisi Jarak Panjang

Berdasarkan uraian tentang saluran transmisi jarak panjang pada bagian sebelumnya, hubungan arus dan tegangan untuk mendapatkan konstanta-konstanta umumnya sebagai berikut.

$$V_S = (\cosh \gamma l) V_R + (Z_k \sinh \gamma l) I_R$$

$$V_R = \left(\frac{\sinh \gamma l}{Z_k} \right) V_S + (\cosh \gamma l) I_S$$

Jadi,

$$A = \cosh \gamma l \quad \dots\dots\dots (3.43)$$

$$B = Z_k \sinh \gamma l \quad \dots\dots\dots (3.44)$$

$$C = \frac{\sinh \gamma l}{Z_k} \quad \dots\dots\dots (3.45)$$

$$D = A \quad \dots\dots\dots (3.46)$$

F. Kompensasi Pada Saluran Transmisi

Dalam pembahasan pada bagian sebelumnya, telah disebutkan bah-

wa saluran transmisi jarak jauh dengan tegangan ekstra tinggi atau ultra tinggi membutuhkan peralatan kompensasi. Hal ini dimaksudkan terutama untuk mengontrol tegangan kerja di setiap titik sepanjang saluran dan memperkecil panjang elektrik φ dari saluran sehingga menaikkan batas stabilitas statis saluran dan kapasitas penyaluran.

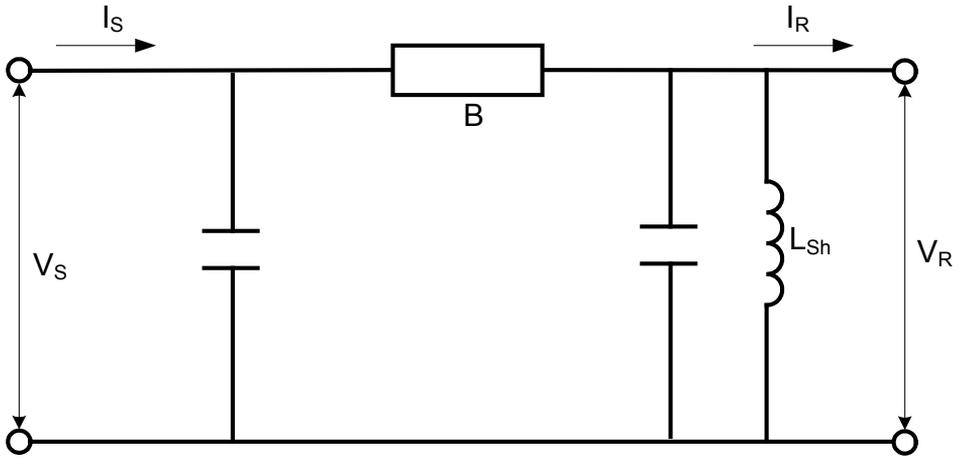
Alat-alat kompensasi pada saluran-saluran transmisi adalah reaktor shunt, kapasitor seri, atau kombinasi dari keduanya. Kompensasi dengan reaktor shunt biasanya digunakan pada saluran transmisi jarak menengah, sedangkan kompensasi dengan kapasitor seri atau kombinasi keduanya digunakan pada saluran yang lebih panjang.

Pada kompensasi dengan kapasitor seri, jika yang dipentingkan hanya keadaan saluran pada ujung-ujungnya, saluran transmisi dan kapasitor seri itu cukup direpresentasikan dengan rangkaian nominal π tanpa menimbulkan kesalahan yang berarti. Dalam hal ini, penempatan fisik dari kapasitor seri sepanjang saluran tidak termasuk dalam perhitungan. Akan tetapi, jika kondisi kerja sepanjang saluran perlu diperhatikan, letak fisik kapasitor harus diperhatikan. Hal ini dapat diperoleh dengan menentukan konstanta umum ABCD dari bagian saluran di masing-masing sisi dari kapasitor dan merepresentasikan kapasitor itu dengan konstanta ABCD-nya.

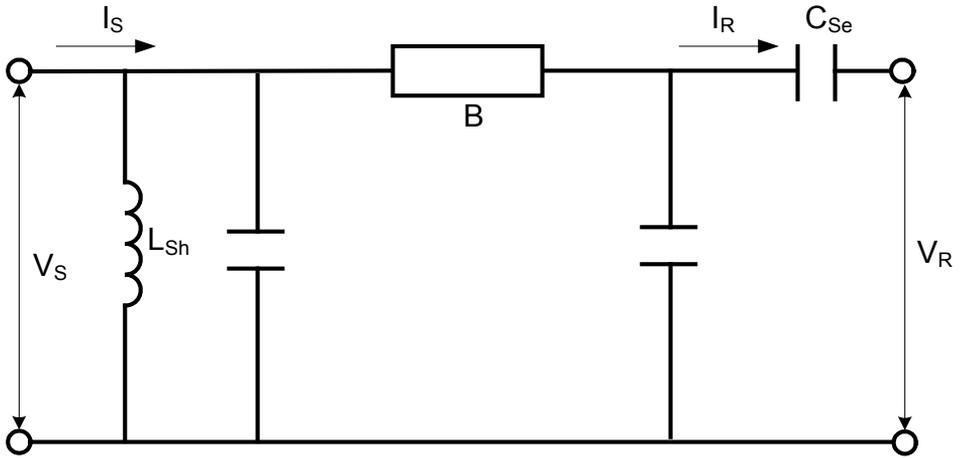
Pada kompensasi dengan reaktor shunt, saluran transmisi dan reaktor shunt terhubung seri, demikian juga dengan kompensasi kapasitor seri. Oleh karenanya, saluran transmisi dan kapasitor seri terhubung seri.

Berdasarkan pembahasan mengenai konstanta umum saluran transmisi, jika dua atau lebih kutub empat terhubung seri, konstanta umum dari gabungan seri tersebut adalah

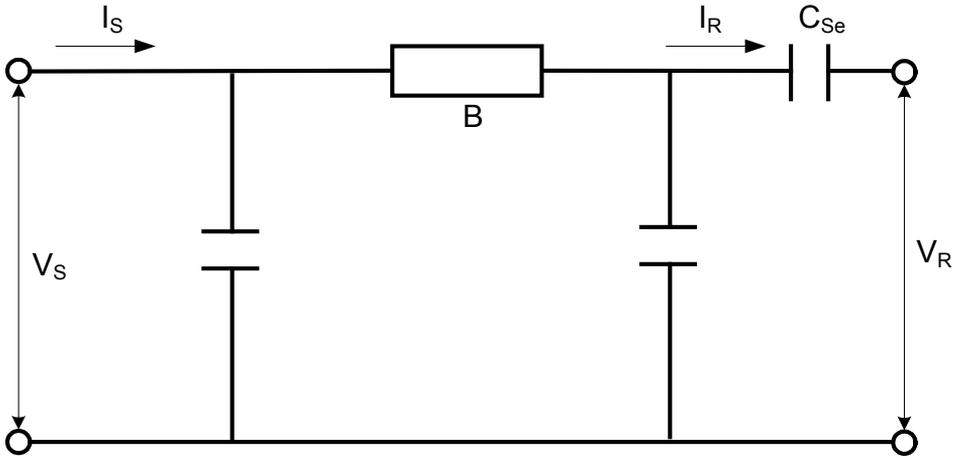
$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(3.47)$$



Gambar 3.10 Saluran transmisi yang dikompensasi menggunakan reaktor shunt pada ujung beban

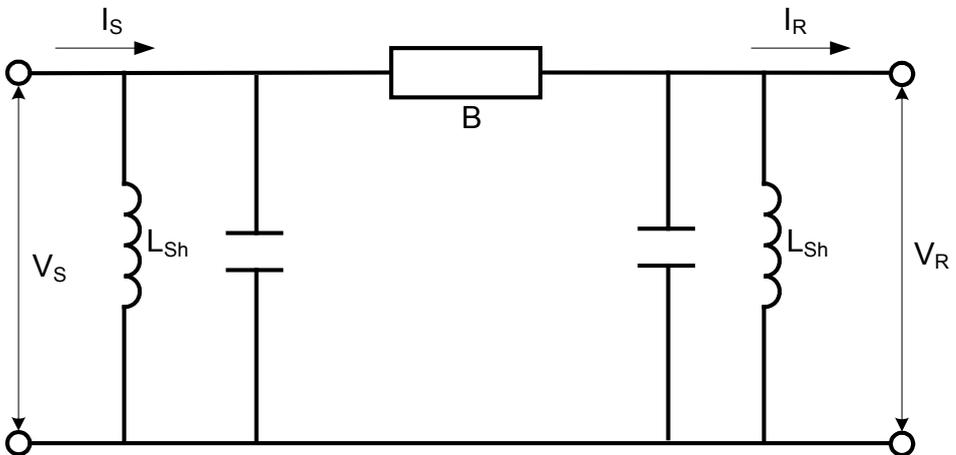


Gambar 3.11 Saluran transmisi yang dikompensasi menggunakan reaktor shunt pada kedua ujung



Gambar 3.12 Saluran transmisi yang dikompensasi menggunakan kapasitor seri pada ujung beban

Dengan menggunakan contoh-contoh berikut ini, akan terlihat jelas bagaimana pengaruh-pengaruh dari reaktor shunt atau kapasitor seri terhadap pengaturan tegangan, kapasitas penyaluran, dan panjang elektrik saluran.



Gambar 3.13 Saluran transmisi yang dikompensasi menggunakan kombinasi reaktor shunt dan kapasitor seri

Derajat kompensasi pada kompensasi dengan reaktor shunt adalah

B_L/B_C . B_L adalah suseptansi induktif dari reaktor shunt, sedangkan B_C adalah suseptansi kapasitif total dari saluran.

Derajat kompensasi pada kompensasi dengan reaktor shunt adalah X_C/X_L . X_C merupakan reaktans kapasitif dari kapasitor seri, sedangkan X_L merupakan reaktans induktif total dari saluran per fase.

1. Kompensasi dengan Reaktor Shunt

Kompensasi dengan reaktor shunt pada saluran transmisi dilakukan dengan memasang reaktor shunt pada salah satu ujung atau pada kedua ujung saluran. Jika saluran itu panjang sekali, saluran dibagi dalam beberapa bagian dan setiap bagian dikompensasi.

Sebagaimana disebutkan sebelumnya, tujuan kompensasi adalah mengontrol tegangan kerja di setiap titik sepanjang saluran dan memperkecil panjang elektrik saluran.

Guna memperoleh operasi praktis yang berguna bagi saluran transmisi udara di daerah seperempat sampai setengah panjang gelombang, perlu dipasang reaktor shunt untuk mengontrol karakteristik dari saluran tersebut. Untuk saluran transmisi tanpa rugi-rugi (*lossless line*) dengan panjang kurang dari setengah panjang gelombang, elemen kompensasinya adalah reaktans induktif.

Pengaruh kompensasi shunt terhadap tegangan dan dayanya diberikan dalam contoh berikut ini.

Contoh 3.2 Suatu saluran transmisi tunggal, tiga fase, 50 km, 500 kV, 250 km mempunyai konstanta saluran sebagai berikut.

$$Z = j0,65 \text{ ohm/km}$$

$$Y = j5,1 \times 10^{-6} \text{ mho/km}$$

Resistansi saluran diabaikan.

Untuk mengurangi panjang elektrik dan memperbaiki pengaturan

tegangan dari saluran, dipasang reaktor shunt yang sama besarnya pada kedua ujung saluran. Misalkan $|V_S| = |V_R| = 500$ kV.

- (a) Tentukanlah panjang elektrik saluran sebelum pemasangan reaktor *shunt*!
- (b) Tentukanlah induktans dari reaktor shunt dalam henry agar panjang elektrik saluran berkurang menjadi 20° !
- (c) Tentukanlah daya natural sebelum dan setelah pemasangan reaktor *shunt*!
- (d) Jika $V_R = 500$ kV dan beban $P_R = 200$ MW pada faktor daya 0,9 terbelakang, tentukanlah pengaturan tegangan sebelum dan sesudah pemasangan kompensasi reaktor shunt tersebut!

Jawab: (a) Panjang elektrik saluran adalah

$$\varphi = \beta l$$

$$\beta = \sqrt{(0,65 \times 5,1 \times 10^{-6})} \text{ radian per km}$$

$$= 1,8207 \times 10^{-3} \text{ radian per km}$$

$$\varphi = 1,8207 \times 10^{-3} \times 250$$

$$= 0,4552 \text{ radian}$$

$$\varphi' = 0,4552 \times 57,3^\circ\text{S}$$

$$= 26,1^\circ$$

- (b) Misalkan saluran itu direpresentasikan dengan rangkaian nominal π . Setelah pemasangan reaktor shunt, konstanta umum ekuivalen A dan B dari ketiga rangkaian terhubung seri.

$$A = 1 + \left(\frac{Y}{2} = \frac{j}{\mathbf{W} \ \mathbf{\&}} \right) Z \text{ dan}$$

$$B = Z$$

Misalkan kombinasi saluran dan reaktor shunt itu merupakan saluran baru dengan admitans shunt yang baru,

$$\frac{Y'}{2} = \frac{Y}{2} + \frac{j}{j\omega L_B}$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{Y}{2} - \frac{j}{X_B}$$

dan B tidak mengalami perubahan.

Jika

φ = panjang elektrik sebelum pemasangan reaktor shunt = $26,1^\circ$

φ' = panjang elektrik setelah pemasangan reaktor shunt = 20°

Maka,

$$\frac{\varphi}{\varphi'} = \frac{\beta' l}{\beta l} = \frac{\sqrt{Z'}}{\sqrt{Z}} = \frac{D}{B,1}$$

$$= 0,7663$$

$$\text{Jadi, } Y' = (0,7663)^2 \times Y$$

$$Y = j5,1 \times 10^{-6} \times 250$$

$$= j1,275 \times 10^{-3} \text{ mho}$$

$$Y' = j0,000749 \text{ mho}$$

Dengan demikian,

$$Y/2 - j/X_{sh} = j0,3745 \times 10^{-3}$$

$$1/X_{sh} = 0,6375 \times 10^{-3} - 0,3745 \times 10^{-3}$$

$$= 0,263 \times 10^{-3} \text{ mho}$$

$$X_{sh} = 3,802 \times 10^3 \text{ ohm}$$

Jadi,

$$L_B = \frac{3,802 \times 10^3}{314}$$

$$= 12,11 \text{ henry/fase}$$

(c) Daya natural sebelum dan sesudah pemasangan reaktor shunt.

Misalkan

P_0, Z_0 = daya natural dan impedansi surja sebelum pemasangan reaktor shunt.

P'_0, Z'_0 = daya natural dan impedansi surja setelah pemasangan reaktor shunt.

Untuk panjang saluran 250 km,

$$Z = j162,5 \text{ ohm}$$

$$Y = j1,275 \times 10^{-3} \text{ mho}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{162,5}{1,275 \times 10^{-3}}} = 357 \text{ ohm}$$

$$Z'_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y'}} = \sqrt{\frac{162,5}{0,749 \times 10^{-3}}} = 466 \text{ ohm}$$

Dengan demikian,

$$P_0 = \frac{500 \times 500}{357} = 700 \text{ MW}$$

$$P'_0 = \frac{500 \times 500}{466} = 536 \text{ MW}$$

Jadi, dengan pemasangan reaktor shunt tersebut, daya natural berkurang dari 700 MW menjadi 536 MW. Ini berarti bahwa kemampuan menyalurkan daya setelah kompensasi dengan reaktor shunt tersebut berkurang.

(d) $V_R = 500 \text{ kV (L-L)}$ atau $288,68 \text{ kV (L-N)}$

$P_R = 200 \text{ MW}$, faktor daya = 0,90 terbelakang

maka,

$$I_R = \frac{200 \times 1000}{\sqrt{3} \times 500 \times 0,9} \angle -31,8^\circ \text{ A}$$

$$I_R = 256,6 \angle -3,8^\circ \text{ A}$$

$$V_s = A V_R + B I_R$$

Sebelum kompensasi

$$A = 1 + ZY/2$$

$$Z = j162,5 \text{ ohm}$$

$$Y = j1,275 \times 10^{-3} \text{ mho}$$

$$A = 1 + \frac{j162,5 \times j1,275 \times 10^{-3}}{2} = 0,8964$$

$$B = Z$$

$$B = j162,5 \text{ ohm}$$

$$\begin{aligned} V_s &= 0,8964 \times 288,68 + 162,5 \angle 90^\circ \times 256,6 \angle -25,84^\circ \times 10^{-3} \\ &= 258,8 + 41,7 \angle 64,16^\circ \\ &= 277 + j37,5 \text{ kV (L-N)} \end{aligned}$$

$$|V_s| = 279,5 \text{ kV (L-N)}$$

$$= 484,1 \text{ kV (L-L)}$$

$$\frac{|V_s|}{|A|} = \frac{484,1}{0,8964} = 540 \text{ kV (L-L)}$$

$$R (\%) = \frac{540 - 500}{500} \times 100\% = 8\%$$

Setelah kompensasi

$$A = 1 + ZY'/2$$

$$Z = j162,5 \text{ ohm}$$

$$Y = j0,749 \times 10^{-3} \text{ mho}$$

$$A = 1 + \frac{j162,5 \times j0,749 \times 10^{-3}}{2} = 0,9391$$

$$B = Z = j162,5 \text{ ohm}$$

$$V_s = 0,9391 \times 288,68 + 41,7 \angle 64,16^\circ$$

$$\begin{aligned}
 &= 271,1 + 18,2 + j37,5 \\
 &= 289,3 + j37,5 \text{ kV (L-N)} \\
 |V_s| &= 291,7 \text{ kV (L-N)} \\
 &= 505 \text{ kV (L-L)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{|V_s|}{|A|} &= \frac{505}{0,9391} \\
 &= 538 \text{ W (L-L)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R (\%) &= \frac{538 - 500}{500} \times 100\% \\
 &= 7,6\%
 \end{aligned}$$

Jadi, dari hasil-hasil di atas, dapat dilihat bahwa dengan kompensasi reaktor shunt, pengaturan tegangan diperbaiki dari 8% menjadi 7,6%. Namun, jika reaktor shunt dipasang hanya selama keadaan tanpa beban,

$$\begin{aligned}
 R (\%) &= \frac{\frac{484,1}{0,9391} - 500}{500} \times 100\% \\
 &= 3,1\%
 \end{aligned}$$

2. Kompensasi dengan Kapasitor Seri

Kompensasi seri dilakukan dengan memasang kapasitor seri pada salah satu ujung saluran. Jika saluran lebih panjang, kapasitor dipasang pada kedua ujung saluran. Pemasangan kapasitor seri ditengah-tengah saluran lebih baik, tetapi lebih mahal karena harus menambah gardu khusus untuk instalasi kapasitor tersebut.

Kapasitor seri lebih efektif untuk mengompensasi reaktans seri sehingga menaikkan limit daya statis atau stabilitas saluran.

Kompensasi seri ini dilengkapi dengan *spark gap* untuk melindungi kapasitor terhadap arus hubung singkat.

Salah satu faktor yang perlu diperhatikan dalam kompensasi seri

adalah derajat kompensasi. Derajat kompensasi tidak boleh terlalu besar. Kompensasi 100% jelas tidak diperbolehkan karena menimbulkan resonansi seri. Derajat kompensasi yang dekat dengan kompensasi 100% juga berbahaya. Misalnya, jika frekuensi turun dan pembangkitan kurang, derajat kompensasi akan mendekati 100% sehingga terjadi resonansi. Resonansi ini disebut juga dengan resonansi sub sinkron.

Misalkan

$X = \omega L$ = reaktans seri total saluran

C = kapasitans dari kapasitor seri
dan derajat kompensasi 90%

maka,

$$1/\omega C = 0,9 \omega L$$

$$\text{atau } \frac{1}{\omega C \cdot \omega L} = 0,9$$

Sekarang, jika frekuensi turun dari 50 Hz menjadi 48,5 Hz, pengurangannya 3%. Dengan demikian, derajat kompensasinya menjadi

$$\frac{1}{0,9 \omega C \cdot 0,9 \omega L} = \frac{0,9 \%}{(0,9)^2} = 9,6 \%$$

Jika frekuensi turun menjadi 47,5 Hz, pengurangan frekuensi 5%. Dengan demikian, derajat kompensasinya menjadi

$$\frac{1}{0,9 \omega C \cdot 0,9 \omega L} = \frac{0,9 \%}{(0,9)^2} = 9,2 \%$$

dan ini sudah hampir mencapai resonansi dan berbahaya.

Besar derajat kompensasi dalam praktik biasanya berkisar antara 40% sampai dengan 60%.

Dengan pemasangan kapasitor seri, reaktans ekivalen berkurang sehingga jatuh tegangan juga berkurang. Bahkan, dengan pemasangan ka-

pasitor seri ini, reaktans seri juga berkurang sehingga limit daya statis menjadi bertambah besar. Dengan demikian, kapasitas saluran transmisi udara dalam melakukan transfer daya menjadi lebih besar.

Latihan:

1. Suatu saluran transmisi udara tiga fase, 70 km, dan 70 kV mempunyai konstanta: $R = 0,20$ ohm per km, $X = 0,608$ ohm per km, dan $Y = j 4,0 \times 10^{-6}$ mho per km. Saluran transmisi tersebut menyuplai beban 30 MW dan faktor daya $pf = 0,9$ terbelakang. Tegangan pada ujung beban 70 kV.

Hitunglah: (a) tegangan pada ujung pengirim
(b) daya pada ujung pengirim
(c) efisiensi transmisi
(d) pengaturan tegangan

2. Suatu saluran tunggal tiga fase, 275 kV, 400 km, dan 50 Hz mempunyai konstanta-konstanta sebagai berikut.

$$R_a = 0,035 \text{ ohm/km}$$

$$L_1 = 1,0 \text{ mH/km}$$

$$C = 0,01 \text{ mikrofarad/km}$$

Jika tegangan kerja adalah 275 kV, tentukanlah rating MVA dari reaktor shunt yang diperlukan untuk mempertahankan tegangan 275 kV pada ujung beban pada keadaan tanpa beban! Pergunakanlah representasi nominal π !

3. Suatu saluran transmisi mempunyai konstanta umum saluran sebagai berikut.

$$A = D = 0,8940 + j 0,0202 \text{ ohm}$$

$$B = 32,2 + j 172,1 \text{ ohm}$$

$$C = (-0,008 + j 1,168) \times 10^{-3} \text{ mho}$$

- (a) Periksalah apakah konstanta umum di atas memenuhi $AD - BC = 1$!
- (b) Tegangan pada ujung penerima adalah 220 kV jala-jala dan arus pada ujung penerima adalah 325 ampere. Vektor arus mendahului vektor tegangan dengan sudut $5,75^\circ$. Tentukanlah tegangan dan arus pada ujung pengirim!
- (c) Jika tegangan dan arus pada ujung pengirim adalah 230 kV jala-jala dan 340 ampere, serta arus mendahului tegangan dengan sudut $5,75^\circ$, tentukanlah tegangan dan arus pada ujung penerima!
4. Untuk soal nomor 3, apabila sebuah impedansi sebesar $Z = 3,185 + j 39,82$ terhubung seri, tentukanlah konstanta umum dari gabungan itu! Periksa juga apakah memenuhi $AD - BC = 1$!
5. Suatu saluran transmisi tunggal, tiga fase, 50 km, 750 kV, dan 400 km mempunyai konstanta saluran sebagai berikut.
- $$Z = j0,85 \text{ ohm/km}$$
- $$Y = j7,1 \times 10^{-6} \text{ mho/km}$$
- Resistansi saluran diabaikan.

Untuk mengurangi panjang elektrik dan memperbaiki pengaturan tegangan dari saluran, dipasang reaktor shunt yang sama besarnya pada kedua ujung saluran. Misalkan $|V_S| = |V_R| = 750 \text{ kV}$.

- (a) Tentukanlah panjang elektrik saluran sebelum pemasangan reaktor shunt!
- (b) Tentukanlah induktans dari reaktor shunt dalam henry agar panjang elektrik saluran berkurang menjadi 20° !

- (c) Tentukanlah daya natural sebelum dan setelah pemasangan reaktor shunt!
- (d) Jika $V_R = 750$ kV dan beban $P_R = 300$ MW pada faktor daya 0,9 terbelakang, tentukanlah pengaturan tegangan sebelum dan sesudah pemasangan kompensasi reaktor shunt tersebut!
6. Selesaikanlah soal nomor 5 di atas apabila saluran transmisi tersebut akan dikompensasi seri!•

BAB IV

Sistem Distribusi Daya Listrik

TUJUAN Instruksional Umum:

Memberikan wawasan tentang sistem distribusi daya listrik yang merupakan salah satu komponen pokok dalam sistem tenaga listrik

Tujuan Instruksional Khusus:

1. Memberikan pengetahuan tentang gambaran umum sistem distribusi daya listrik dan sistem subtransmisi
2. Memberikan pengetahuan tentang klasifikasi sistem distribusi daya listrik
3. Memberikan pengetahuan tentang Gardu Induk Distribusi
4. Memberikan pengetahuan tentang sistem distribusi daya listrik primer dan sekunder
5. Memberikan pengetahuan tentang transformator pada sistem distribusi daya listrik

A. Pendahuluan

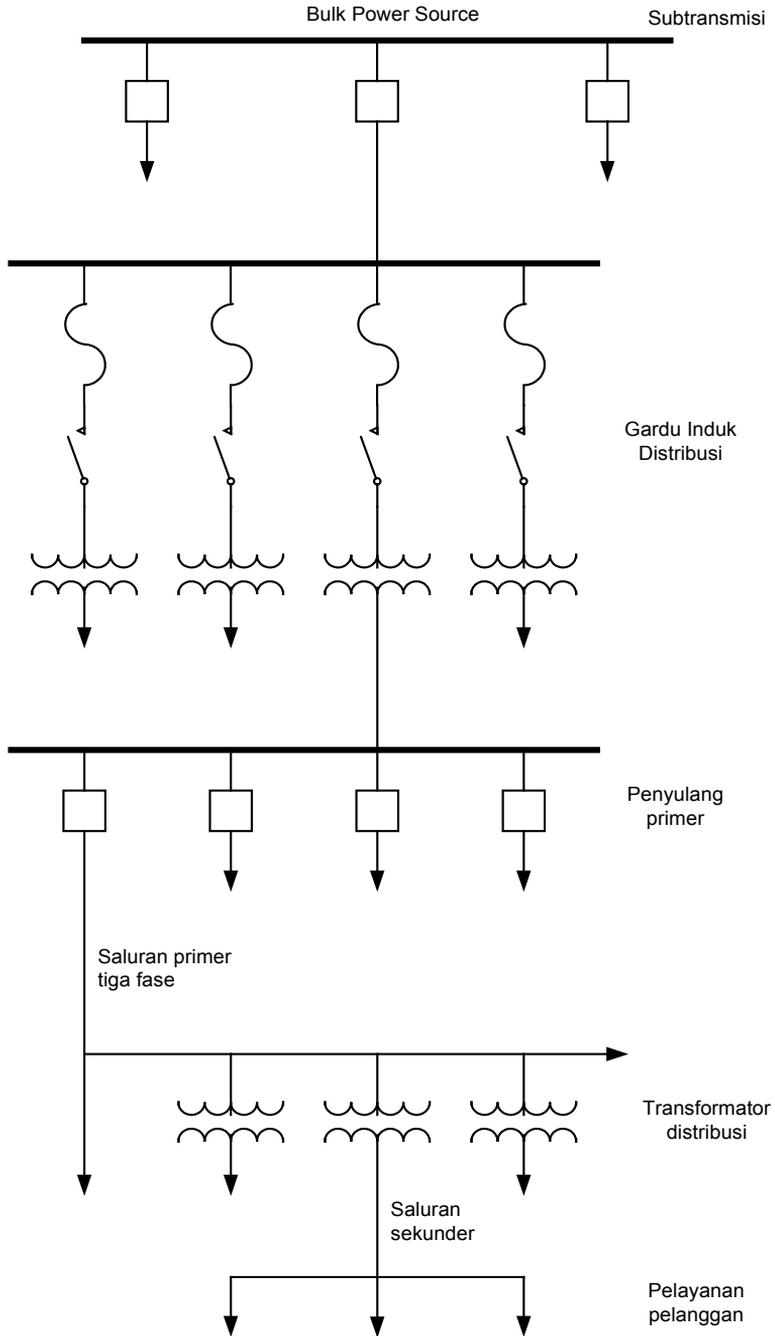
Dalam definisi secara umum, sistem distribusi adalah bagian dari sistem perlengkapan elektrik antara sumber daya besar (*bulk power source*,

BPS) dan peralatan hubung pelanggan (*customers service switches*). Berdasarkan definisi ini, sistem distribusi meliputi komponen-komponen

1. sistem subtransmisi,
2. gardu induk distribusi,
3. penyulang distribusi atau penyulang primer,
4. transformator distribusi,
5. untai sekunder, dan
6. pelayanan pelanggan (*service drops*).

Akan tetapi, beberapa *engineer* sistem distribusi lebih suka mendefinisikan sistem distribusi sebagai bagian dari sistem perlengkapan elektrik antara gardu induk dan pelanggan.

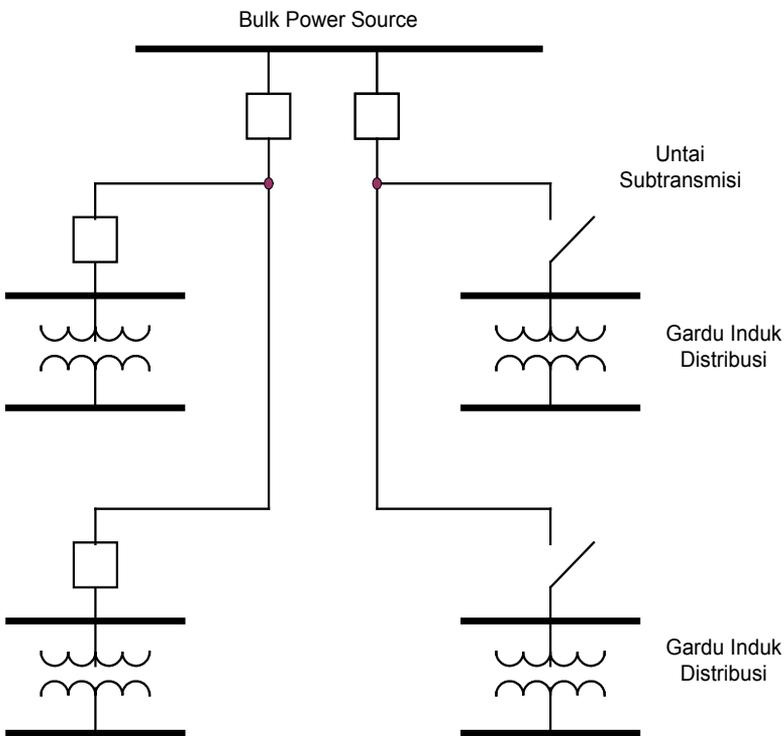
Gambar 4.1 menunjukkan diagram satu garis dari sistem distribusi yang khas. Rangkaian subtransmisi mengirimkan energi dari BPS ke gardu induk distribusi. Tegangan subtransmisi berkisar antara 12,47 kV dan 245 kV. Gardu induk distribusi tempat menjadikan transformator daya bersama-sama dengan peralatan pengatur tegangan, bus-bus, dan peralatan hubung (*switchgear*) menurunkan tegangan subtransmisi ke tegangan sistem primer yang lebih rendah untuk distribusi lokal. Penyulang primer tiga fase, yang biasanya beroperasi pada rentang tegangan 4,16 kV–34,5 kV, mendistribusikan energi listrik dari bus tegangan rendah pada gardu induk ke pusat-pusat beban. Pusat-pusat beban tersebut kemudian dibagi-bagikan menuju sub penyulang dan cabang tunggal tiga fase. Transformator distribusi yang mempunyai rating dari 10 kVA–500 kVA biasanya terhubung ke penyulang utama, sub penyulang, dan cabang (*lateral*). Transformator distribusi menurunkan tegangan distribusi ke tegangan pelayanan. Sistem sekunder ini berfungsi mendistribusikan energi dari transformator distribusi ke pelanggan melalui layanan pelanggan (*service drops*).



Gambar 4.1 Diagram satu garis sistem distribusi

B. Subtransmisi

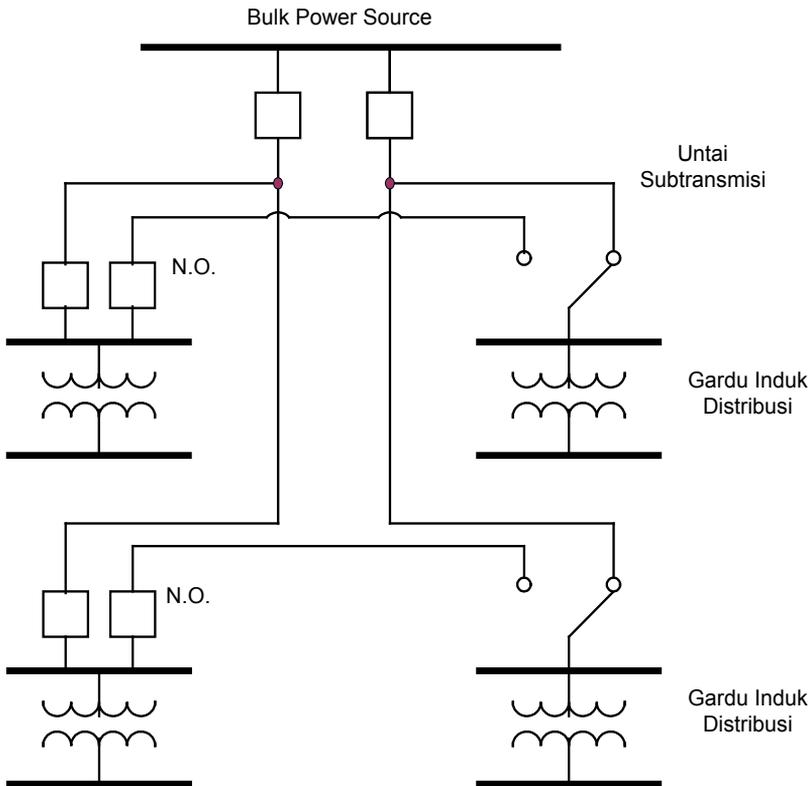
Sistem subtransmisi adalah bagian dari sistem perlengkapan elektrik yang mengirimkan daya dari *bulk power source*, sebagaimana halnya gardu induk transmisi yang besar. Konstruksi untai subtransmisi dapat berupa saluran udara terbuka (*overhead open-wire construction*) atau kabel bawah tanah. Tegangan untai tersebut bervariasi dari 12,47 kV–245 kV. Sebagian besar sistem subtransmisi menggunakan tingkat tegangan 69 kV, 115 kV, dan 138 kV.



Gambar 4.2 Diagram satu garis subtransmisi tipe radial

Desain sistem subtransmisi bervariasi dari sistem radial sederhana hingga jaringan subtransmisi yang luas. Pertimbangan utama yang memengaruhi desain sistem subtransmisi adalah faktor biaya dan keandalannya.

Gambar 4.2 menunjukkan sistem subtransmisi radial. Dalam sistem radial, sebagaimana namanya, untai tersebut menyebar dari *bulk power source* ke gardu induk distribusi. Sistem radial adalah sistem sederhana dan biayanya paling murah dibanding sistem lain, tetapi mempunyai tingkat kontinuitas yang rendah. Oleh karenanya, sistem subtransmisi radial sudah tidak digunakan lagi dalam sistem tenaga listrik modern.



Gambar 4.3 Diagram satu garis subtransmisi tipe radial yang dimodifikasi

Bentuk yang dimodifikasi dari subtransmisi tipe radial, yang merupakan usaha peningkatan unjuk kerjanya, telah diperkenalkan seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.3. Dengan bentuk jaringan seperti itu, jika ada gangguan pada untai subtransmisi, pemulihan pelayanannya relatif lebih cepat.

suaikan dengan keadaan terkini.

Perlengkapan yang terdapat dalam gardu induk meliputi:

1. transformator daya,
2. pemutus tenaga (*circuit breakers*),
3. sakelar pemisah (*disconnecting switch*),
4. bus-bus stasiun dan isolator,
5. reaktor pembatas arus (*current-limiting reactors*),
6. reaktor shunt (*shunt reactors*),
7. transformator arus,
8. transformator tegangan,
9. transformator tegangan kapasitor,
10. kapasitor kopling,
11. kapasitor seri,
12. kapasitor shunt,
13. sistem pembumian (*grounding system*),
14. *lightning arrester* dan/atau celah (*gaps*),
15. *line traps*,
16. rele proteksi,
17. baterai, dan
18. peralatan pendukung lainnya.

Transformator daya merupakan peralatan utama dan terpenting dalam gardu induk distribusi. Kapasitas suatu gardu induk terletak pada kapasitas daya terpasang pada transformator daya yang digunakan.

Selain transformator daya, pada gardu induk juga terdapat peralatan penting lainnya: transformator arus, transformator tegangan, pemutus tenaga (CB), sakelar pemisah (DS), dan lain-lain. Transformator arus dan transformator tegangan digunakan untuk keperluan proteksi dan alat-alat ukur.



▲World's largest capacity three phase 1450MVA-500kV transformer for power stations and isolated phase bus which connects a power generator and transformer

Gambar 4.5 Transformator daya



Gambar 4.6 Transformator arus bertegangan tinggi (72,5-550kV) yang menggunakan media isolasi gas



Gambar 4.7 Transformator daya berisolasi gas (300 MVA, 275 kV) untuk gardu induk bawah tanah

D. Sistem Distribusi Primer dan Sekunder

1. Sistem Distribusi Primer

Bagian dari sistem perlengkapan elektrik antara gardu induk distribusi dan transformator distribusi disebut sistem distribusi primer atau kadang-kadang disebut “sistem primer” saja. Dalam rangkaianannya, sistem primer dikenal sebagai penyulang primer atau penyulang distribusi primer.

Sebuah penyulang (*feeder*) terdiri dari penyulang utama yang biasanya untai tiga fase empat kawat dan percabangan atau *lateral* yang biasanya berupa untai fase tunggal atau tiga fase yang ditambatkan pada penyulang utama. Selain itu, terdapat sublateral yang ditambatkan ke lateral. Umumnya, lateral dan sublateral yang berlokasi dalam daerah pe-

rumahan perkotaan dan pedesaan adalah berfase tunggal dan terdiri dari satu konduktor fase dan konduktor netral. Sebagian besar transformator distribusi merupakan fase tunggal dan terhubung antara fase dan netral melalui pemutus sekring.

Penyulang dalam sistem distribusi primer dipisahkan oleh piranti *re-closing* pada berbagai lokasi yang berguna untuk memutuskan rangkaian secepat mungkin apabila terjadi gangguan. Hal ini dapat dicapai melalui koordinasi operasi dari seluruh sekring dan *recloser*.

Terdapat tuntutan akan peningkatan dalam hal keandalan pelayanan. Oleh karena itu, skema proteksi untuk masa mendatang harus lebih canggih dan kompleks, mulai dari piranti yang beroperasi secara manual hingga piranti yang dapat secara otomatis terkendali dari jarak jauh berbasis kendali terbimbing (*supervisory controlled*) atau sistem terkendali komputer (*computer-controlled systems*).

Daerah di kota-kota besar dengan tingkat kemacetan jalan yang sangat tinggi dan beban-beban listrik yang besar biasanya dilayani menggunakan penyulang utama sistem bawah tanah. Sistem ini biasanya menggunakan kabel tiga konduktor tipe radial. Keuntungan dari sistem ini adalah kerapian dan keindahan kota menjadi terjaga serta kerusakan yang jarang terjadi karena instalasinya berada di bawah tanah yang jauh dari gangguan-gangguan, terutama gangguan yang sifatnya mekanis. Akan tetapi, sistem ini relatif lebih mahal. Terlebih jika terjadi gangguan, waktu yang dibutuhkan untuk memperbaikinya relatif lebih lama dibanding penyulang yang menggunakan saluran udara.

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi pemilihan rating penyulang utama, di antaranya:

1. sifat beban yang tersambung,
2. kerapatan/kepadatan beban pada daerah yang dilayani,
3. pesat pertumbuhan beban,

4. kebutuhan akan kapasitas cadangan untuk operasi keadaan darurat,
5. tipe dan biaya dari konstruksi rangkaian,
6. desain dan kapasitas gardu induk,
7. tipe perlengkapan regulasi yang digunakan,
8. kualitas pelayanan yang dibutuhkan, dan
9. tingkat kontinuitas pelayanan yang dibutuhkan.

Kondisi tegangan pada sistem distribusi dapat diperbaiki menggunakan kapasitor shunt yang terhubung sedekat mungkin dengan beban untuk memberikan perbaikan tegangan pelayanan yang baik. Penggunaan kapasitor shunt, selain untuk memperbaiki tegangan, juga berfungsi untuk memperbaiki faktor daya. Dengan diperbaikinya faktor daya pada sistem distribusi, rugi-rugi sistem distribusi dapat diperkecil. Rating kapasitor harus ditentukan dengan hati-hati untuk mencegah terjadinya tegangan lebih pada saat beban yang dilayani sedikit karena peningkatan tegangan yang dihasilkan dari arus kapasitor.

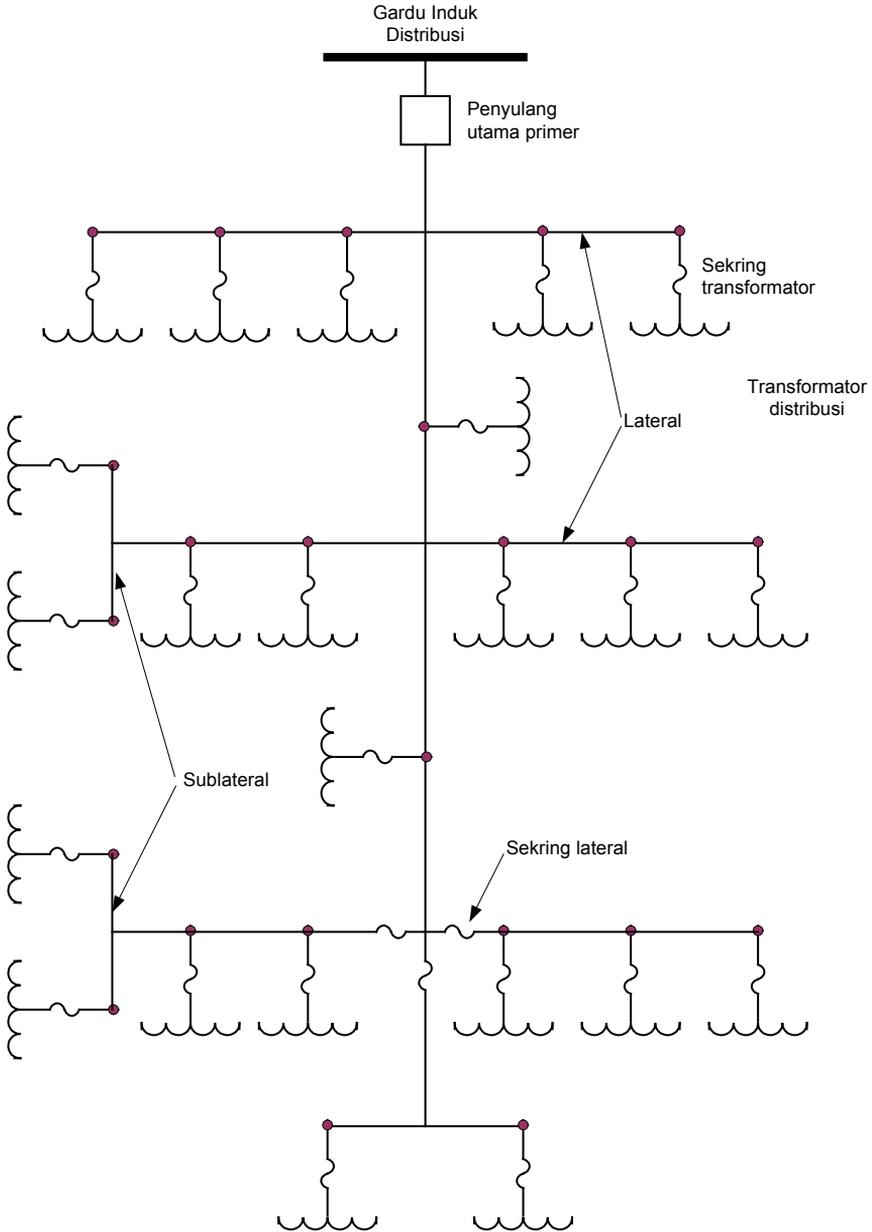
Kondisi tegangan pada sistem distribusi juga dapat diperbaiki menggunakan kapasitor seri. Akan tetapi, penerapan kapasitor seri tidak dapat mengurangi arus dan rugi-rugi dalam sistem sehingga jarang digunakan.

Sebagaimana halnya dalam sistem distribusi secara umum, dalam sistem primer juga terdapat tipe-tipe konfigurasinya, diantaranya tipe radial, tipe *loop*, dan jaringan (*network*).

Penyulang primer tipe radial merupakan bentuk yang paling sederhana dan berbiaya paling murah. Penyulang primer tipe radial secara skematis diperlihatkan pada Gambar 4.8.

Dalam Gambar 4.8 tersebut terlihat bahwa penyulang primer utama kemudian bercabang-cabang menuju berbagai lateral primer dan selanjutnya menuju beberapa sublateral untuk melayani transformator distribusi. Umumnya, penyulang utama dan subpenyulang merupakan untai

tiga fase dengan tiga atau empat kawat dan lateral menggunakan untai tiga fase atau satu fase.



Gambar 4.8 Diagram satu garis sistem distribusi primer tipe radial

2. Sistem Distribusi Sekunder

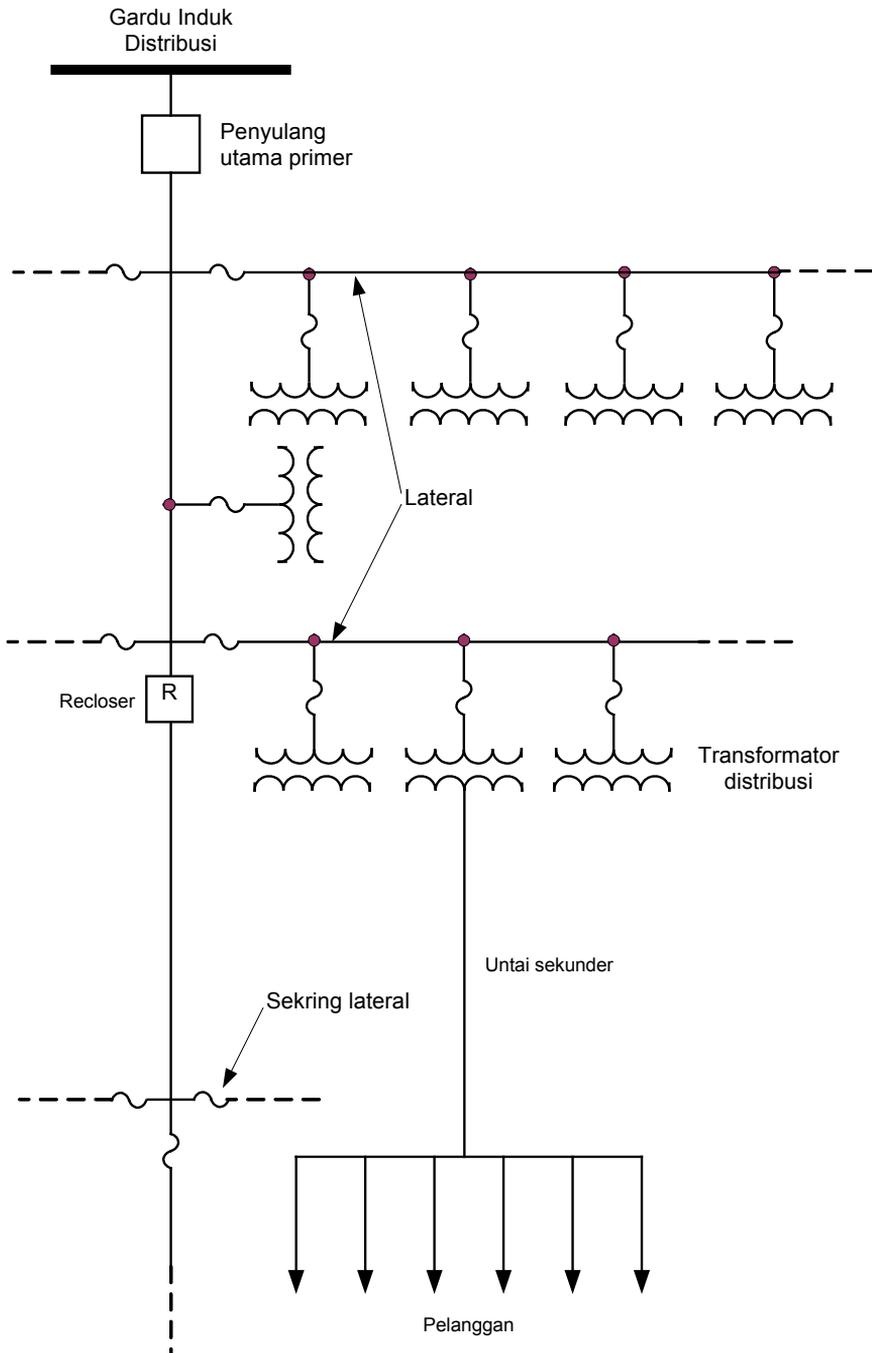
Sistem distribusi sekunder adalah bagian dari sistem perlengkapan elektrik antara sistem distribusi primer dan beban. Sistem distribusi sekunder sering disebut dengan sistem sekunder saja. Sistem distribusi sekunder meliputi transformator distribusi yang bersifat penurun tegangan (*step-down*), untai sekunder (*secondary main*), pelayanan pelanggan (*service drops*), dan peralatan kWh meter yang mengukur konsumsi energi listrik pada pelanggan.

Umumnya, sistem distribusi sekunder dirancang menggunakan fase tunggal untuk daerah pelanggan perumahan dan tiga fase untuk pelanggan daerah industri atau komersial yang mempunyai kerapatan beban tinggi.

Jenis-jenis sistem distribusi sekunder meliputi

1. sistem pelayanan terpisah untuk masing-masing pelanggan dengan transformator distribusi yang terpisah dan hubungan sekunder,
2. sistem radial dengan penyulang sekunder yang disuplai oleh transformator distribusi dan mencatu sekelompok pelanggan,
3. sistem bank sekunder dengan penyulang sekunder yang disuplai oleh beberapa transformator distribusi yang seluruhnya dicatu oleh penyulang primer yang sama, dan
4. sistem jaringan sekunder dengan penyulang utama tipe *grid* yang disuplai oleh banyak transformator distribusi yang terhubung ke berbagai penyulang untuk mendapatkan catu daya listriknya.

Sistem pelayanan terpisah kadang-kadang digunakan untuk area pelayanan industri atau daerah pedesaan. Umumnya, sebagian besar sistem sekunder digunakan untuk melayani beban perumahan perkotaan dan pedesaan, sedangkan sistem distribusi sekunder tipe radial digunakan untuk beban komersial yang kecil.



Gambar 4.9 Diagram satu garis sistem distribusi sekunder tipe radial

Gambar 4.9 menunjukkan diagram satu garis sistem distribusi sekunder tipe radial. Sistem distribusi ini relatif murah dan sederhana dalam pengoperasiannya.

E. Transformator Distribusi

Umumnya, transformator distribusi digunakan untuk menurunkan tegangan sistem primer (2,4 s.d. 34,5 kV) menjadi tegangan pelayanan (120 s.d. 600 V). Transformator distribusi yang digunakan pada saluran distribusi udara dapat diklasifikasikan ke dalam tiga golongan: transformator konvensional, transformator swa-proteksi lengkap (*Completely Self-Protecting*, CSP), dan transformator banking sekunder swa-proteksi lengkap (*Completely Self-Protecting Banking*, CSPB).

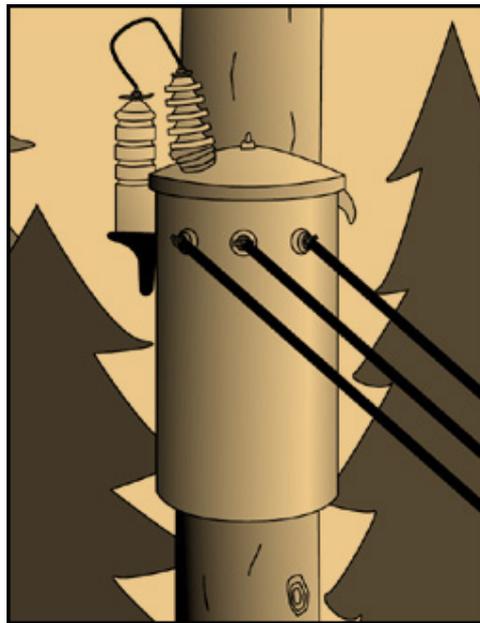
Transformator distribusi merupakan ujung tombak sebuah sistem distribusi karena transformator inilah yang menyediakan daya dari saluran distribusi kepada konsumen. Di Indonesia, untuk sistem distribusi 20 kV, transformator distribusi digunakan untuk menurunkan tegangan 20 kV menjadi tegangan 380 V (fase ke fase) atau 220 V (fase ke netral). Pada umumnya, transformator distribusi dilengkapi dengan peralatan-peralatan pendukung seperti *arrester*, pemutus tenaga (CB), jalur pengaman (*protective link*), dan *tap changer*. Transformator distribusi biasanya ditempatkan di tiang distribusi (*over head*) sehingga disebut trafo tipe *pole*.

1. Konstruksi Transformator Distribusi

Secara umum, transformator dapat didefinisikan sebagai suatu peralatan listrik yang digunakan untuk mentransfer energi listrik dari satu rangkaian ke rangkaian listrik yang lain tanpa mengubah frekuensi dan berdasar atas prinsip induksi elektromagnetik. Berdasarkan pengertian tersebut, transformator tidak memunculkan energi listrik, tetapi hanya mentransfer energi listrik dari satu rangkaian AC ke rangkaian AC yang

lain melalui kopling magnetik (*magnetic coupling*). Secara umum, bagian-bagian transformator terdiri dari

1. Bagian masukan yang disebut juga sebagai bagian primer trafo
Bagian inilah yang dihubungkan dengan sumber energi listrik yang akan diubah.
2. Bagian keluaran yang disebut juga sebagai sekunder trafo
Bagian inilah yang dihubungkan dengan beban.
3. Bagian belitan atau koil
Transformator memiliki dua macam belitan, yaitu belitan primer dan belitan sekunder. Belitan primer menarik energi listrik dari sumber untuk kemudian ditransformasikan (diubah tegangannya) ke beban.

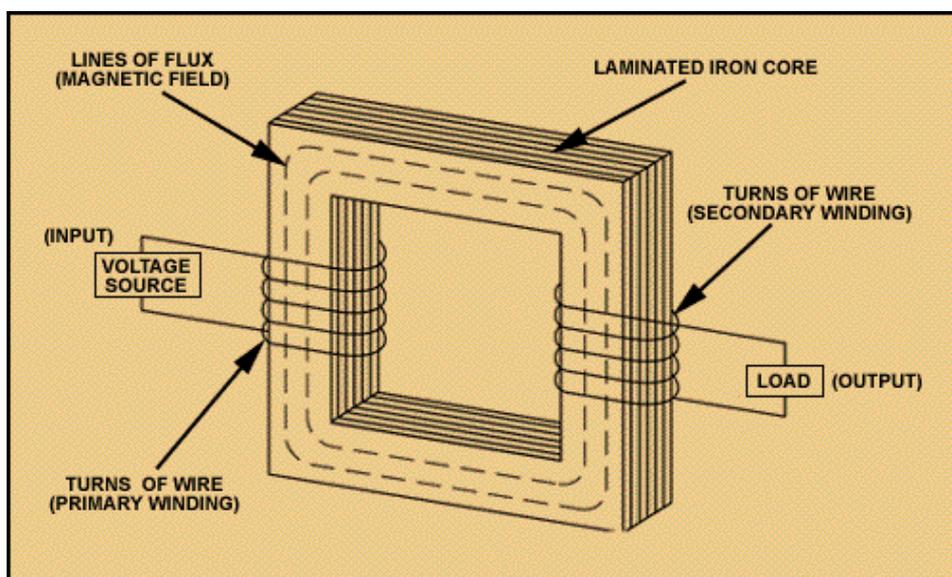


Gambar 4.10 Transformator distribusi

Pada umumnya, bagian primer dan sekunder transformator dipisahkan menjadi beberapa koil (belitan). Hal ini dimaksudkan untuk mengu-

rangi pembentukan fluks yang tidak menghubungkan bagian primer dan sekunder. *Pentransformasian*/pengubahan hanya akan terjadi saat fluks (*mutual flux*) menghubungkan bagian primer dan sekunder transformator. Sementara itu, fluks yang tidak menghubungkan bagian primer dan sekunder disebut fluks bocor (*leakage flux*).

Belitannya pun biasanya dibagi-bagi untuk menurunkan besar tegangan per koil. Hal ini sangat penting pada penggunaan untuk transformator tegangan tinggi karena ketebalan isolasi antarbelitan akan memengaruhi konstruksi transformator. Secara umum, pembagi-bagian belitan ini dilakukan agar tegangan antar belitan tidak melampaui tegangan 5 kV.



Gambar 4.11 Konstruksi transformator secara umum

4. Bagian inti (*core*)

Bagian ini digunakan agar fluks magnetisasi yang terbentuk lebih terarah. Inti transformator tidak berupa suatu besi yang padat, tetapi lapisan-lapisan besi tipis yang ditumpuk. Hal ini dimaksudkan untuk

mengurangi panas yang terbentuk sehingga mengurangi rugi-rugi daya trafo. Rangkaian primer dengan rangkaian sekunder tidak terhubung secara elektronis sehingga inti besi ini memiliki peranan penting dalam pengiriman tenaga listrik dari primer ke sekunder melalui induksi magnetik. Bentuk inti biasanya kotak atau lingkaran (cincin).

2. Jenis Transformator

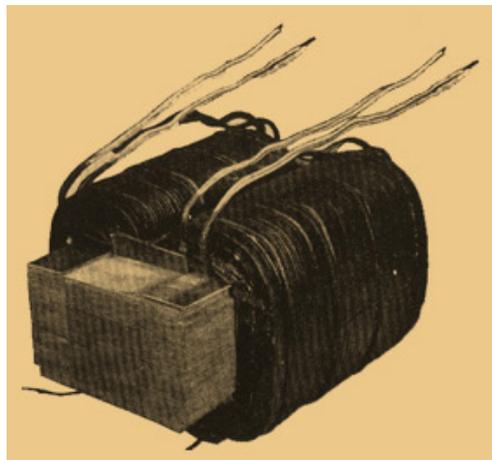
Secara umum, terdapat dua jenis tipe inti trafo, yaitu tipe inti (*core*) dan tipe *shell*. Hal ini didasarkan pada cara belitan primer dan belitan sekunder pada inti.

1. Transformator Tipe Inti

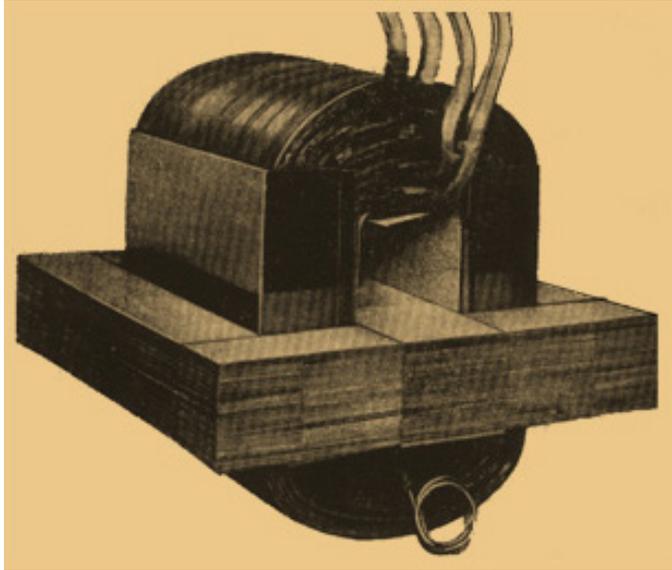
Pada tipe ini, belitan primer dan sekunder mengitari bagian samping inti (kaki). Tipe ini biasa digunakan pada trafo distribusi.

2. Transformator Tipe *Shell*

Pada jenis ini, inti mengitari belitan primer dan sekunder. Tipe ini biasa digunakan pada transformator berukuran besar dengan tegangan yang tinggi. Apabila inti transformator digunakan untuk aplikasi tegangan yang sangat tinggi, jumlah fluks bocor akan meningkat.



Gambar 4.12 Transformator tipe inti



Gambar 4.13 Transformator tipe *shell*

Latihan:

1. Gambarkan diagram satu garis sistem distribusi secara umum!
2. Jelaskan fungsi masing-masing komponen dalam sistem distribusi!
3. Sebutkan dan gambarkan diagram satu garis jenis-jenis untai sub-transmisi serta jelaskan keuntungan dan kerugiannya!
4. Gambarkan diagram satu garis sistem distribusi primer dan sekunder secara umum!
5. Jelaskan jenis-jenis konfigurasi sistem distribusi primer dan sekunder!
6. Analisislah mengapa konfigurasi sistem distribusi baik primer maupun sekunder menggunakan berbagai jenis konfigurasi! •

BAB V

Fuel Cell

TUJUAN Instruksional Umum:

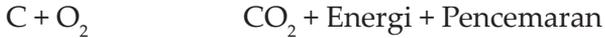
Memberikan wawasan tentang *fuel cell* yang merupakan salah satu sumber daya listrik energi terbarukan yang ramah lingkungan

Tujuan Instruksional Khusus:

1. Memberikan pengetahuan tentang proses produksi hidrogen sebagai bahan bakar *fuel cell*
2. Memberikan pengetahuan tentang konsep dasar *fuel cell*
3. Memberikan pengetahuan tentang aplikasi hidrogen
4. Memberikan pengetahuan tentang penetrasi pasar hidrogen
5. Memberikan pengetahuan tentang prospek perkembangan teknologi *fuel cell*

A. Pendahuluan

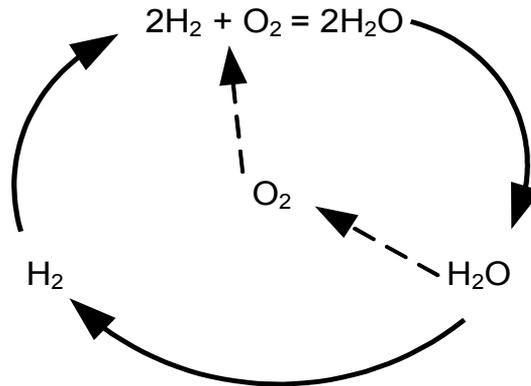
Pada dasarnya, pembakaran merupakan proses oksidasi. Pada proses pembakaran terdapat pula energi yang dibebaskan berupa panas. Pada pembakaran hidrokarbon, unsur zat arang (*Carbon*, C) bersenyawa dengan unsur zat asam (Oksigen, O) sehingga membentuk karbondioksida (CO_2) dengan membebaskan energi.



Pada prinsipnya, hal serupa dapat terjadi jika unsur zat air hidrogen (H) bersenyawa dengan unsur zat asam (O) sehingga akan terbentuk apa yang kita kenal sebagai air (H₂O) dengan membebaskan energi.



Dapat diperhatikan bahwa reaksi di atas adalah reaksi yang timbal balik. Rumus-rumus reaksi di atas, pada dasarnya, merupakan suatu perputaran (suatu siklus), yaitu air (H₂O) dipisah menjadi H₂ dan O untuk kemudian membentuk air (H₂O) kembali. Gambar 5.1 memperlihatkan secara grafis siklus hidrogen tersebut.



Gambar 5.1 Siklus hidrogen

Pada pembakaran batu bara, misalnya, terbentuk CO₂ dan produk lain yang mengganggu kelestarian alam. Pada oksidasi zat air hanya terjadi air dengan rumus kimia H₂O dan bukan merupakan suatu polutan atau pengotor lingkungan. Bahkan, H₂O merupakan bagian alamiah dari lingkungan. Pembakaran 1 kg minyak bumi akan menghasilkan energi kira-kira sebanyak 10.000 kCal. Pembakaran 1 kg bahan bakar terbaik, yaitu metan, akan menghasilkan panas kira-kira sebanyak 12.000 kCal.

Sementara itu, jika hidrogen dibakar, 1 kg hidrogen akan melepaskan energi sebanyak 28.600 kCal. Dengan demikian, ini jauh lebih banyak dari bahan bakar favorit lainnya. Mengingat unsur hidrogen dalam bentuk air banyak terdapat di alam dan proses pembakaran kembali menghasilkan air, sumber daya energi ini seolah-olah tidak terbatas persediaanya.

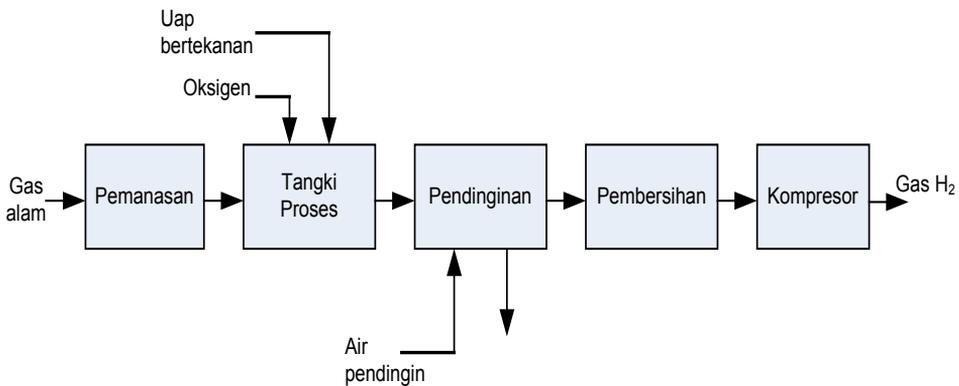
Hidrogen secara potensial cukup ideal sebagai bahan bakar karena mudah disimpan dan dikonversi menjadi energi listrik dan sebaliknya. Selain itu, faktor lain yang cukup penting adalah bahwa hidrogen mudah diangkut. Diperkirakan bahwa pusat pembangkit listrik yang letaknya jauh dari pusat pemakaian, misalnya di tengah padang pasir seperti pusat listrik tenaga surya, di tengah laut seperti pusat listrik tenaga laut, atau di tengah pegunungan seperti pusat listrik tenaga air, akan mentransmisikan hidrogen melalui pipa dan bukan energi listrik melalui saluran transmisi. Pada pusat pembangkit tenaga listrik, konversi listrik menjadi hidrogen dapat dilakukan melalui elektrolisis. Dengan demikian, pusat-pusat pembangkit listrik yang letaknya sangat jauh dari pusat beban dapat bekerja dengan efisiensi yang cukup tinggi.

Sudah sejak tahun 1933, Rudolf Erren, seorang ilmuwan Jerman, telah menyarankan pembuatan hidrogen dari tenaga listrik di luar waktu beban puncak. Akan tetapi, kemajuan yang besar dalam pengembangannya baru tercapai setelah tahun 1960-an. Perusahaan-perusahaan dan lembaga-lembaga besar, terutama di Amerika Serikat seperti Institute of Gas Technology di Chicago, General Electric, dan General Atomic, turut aktif berusaha untuk mengembangkan teknologi hidrogen ini. Perlu dicatat bahwa, saat ini, harga hidrogen masih sangat tinggi sehingga hanya dapat dipakai untuk keperluan-keperluan yang terbatas.

B. Produksi Hidrogen

Salah satu metode pembuatan hidrogen adalah ekstraksi dari gas

alam dengan suatu proses yang dinamakan oksidasi parsial. Dalam proses ini, gas alam, setelah dipanaskan lalu dimasukkan dalam suatu tangki besar. Dalam tangki ini, dimasukkan juga uap bertekanan tinggi dan oksigen. Suhu dalam tangki sangat tinggi. Melalui pengaturan tekanan dan aliran gas alam, uap, dan oksigen, terjadilah reaksi. Hasilnya adalah terjadinya gas hidrogen. Hidrogen tersebut didinginkan, kemudian dibersihkan dari berbagai bahan kimia seperti CO_2 , CO , dan H_2S . Setelah dikompres, didapat gas H_2 yang diperlukan yang mempunyai kemurnian yang tinggi dan siap untuk dipakai. Proses tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.2.



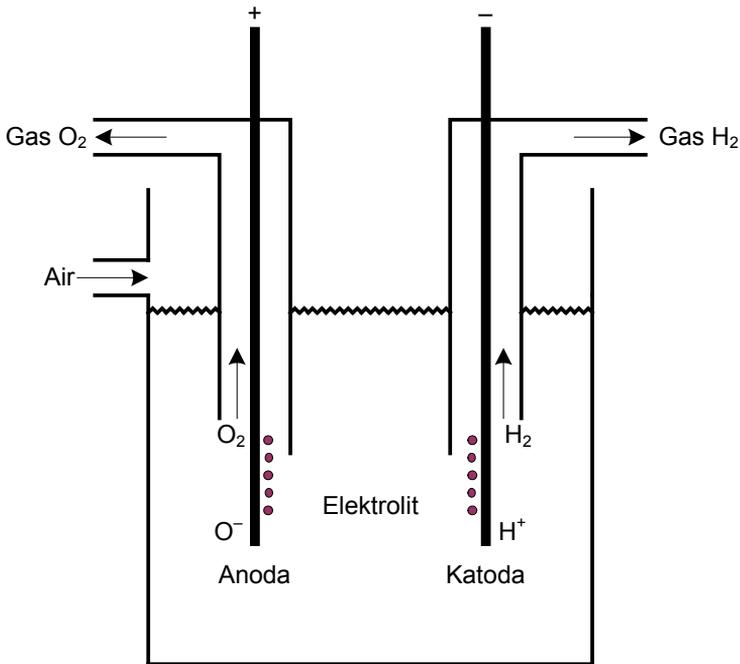
Gambar 5.2 Skema prinsip pembuatan gas hidrogen dengan proses oksidasi parsial.

Persoalan yang timbul pada proses ini adalah bahwa sebagai bahan baku, diperlukan gas alam yang merupakan suatu bentuk bahan bakar yang sudah mulia. Selain itu, cadangan gas alam di bumi ini juga terbatas. Dengan demikian, proses ini kurang tepat untuk dipertimbangkan penggunaannya pada proses produksi hidrogen secara besar-besaran di kemudian hari.

Suatu cara yang tampaknya memberikan harapan baik untuk produksi hidrogen di kemudian hari adalah elektrolisis yang memerlukan ener-

gi listrik. Pertimbangannya adalah memakai energi listrik di luar beban puncak dan pada lokasi pusat listrik yang jauh. Pusat-pusat pembangkit listrik tenaga nuklir diperkirakan merupakan calon-calon yang kuat bagi proses elektrolisis dalam pembuatan hidrogen.

Gambar 5.3 memperlihatkan skema prinsip elektrolisis. Sebuah tangki diisi dengan air yang dicampur dengan suatu asam sehingga air tersebut dapat bertindak sebagai konduktor untuk menghantarkan aliran listrik.



Gambar 5.3 Skema prinsip pembuatan hidrogen dengan elektrolisis

Campuran air dan asam itu dinamakan elektrolit. Dalam elektrolit, dipasang dua elektrode: elektrode positif atau anode dan elektrode negatif atau katode. Anode dihubungkan dengan sisi positif listrik arus searah, sedangkan katode pada sisi negatif. Jika arus searah mengalir, terjadilah elektrolisis sehingga atom hidrogen dari air kehilangan elektronnya, sedangkan atom oksigen mendapat tambahan elektron. Dengan

demikian, atom oksigen menjadi sebuah ion bermuatan negatif (O^-) dan atom hidrogen menjadi sebuah ion bermuatan positif (H^+).

Ion-ion H^+ akan tertarik pada katode yang bermuatan negatif. Ion-ion H^+ ini akan berkumpul pada katode. Pada saat menyentuh katode, ion H^+ akan menerima sebuah elektron dan kembali menjadi sebuah atom H biasa tanpa mempunyai muatan. Atom hidrogen ini bergabung menjadi gas H_2 dalam bentuk gelembung dan, saat melalui katode, akan mengembang ke atas untuk dikumpulkan melalui sebuah pipa dan kemudian dikompres. Hal serupa juga terjadi pada ion O yang berkumpul ke anode untuk kemudian menjelma menjadi gas O_2 . Pada proses ini, elektrolit harus senantiasa ditambah air karena H_2O terus-menerus terurai. Dengan demikian, air bertindak sebagai bahan baku. Sementara itu, elektrolisis menghasilkan gas H_2 dan gas O_2 . Dapat dicatat bahwa gas O_2 juga mempunyai harga yang baik dan dapat dijual.

Suatu metode untuk meningkatkan efisiensi elektrolisis adalah bila mana proses itu dilakukan pada suhu tinggi. Dengan menggunakan suhu tinggi, antara $800^\circ C$ – $1000^\circ C$, kecepatan reaksi elektrokimia pada elektrolisis menjadi lebih besar. Di samping itu, kerugian tegangan dapat diperkecil dan kepadatan arus yang lebih besar dapat digunakan. Elektrolisis suhu tinggi ini baru mencapai taraf operasional sekitar tahun 1990-an.

C. Konsep Fuel Cell

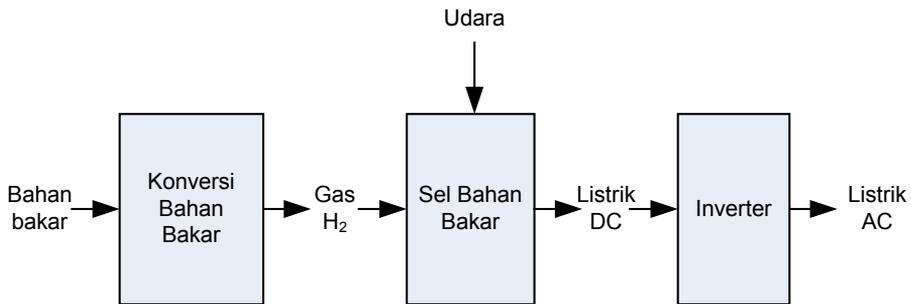
Pada dasarnya, sebuah sel bahan bakar (*fuel cell*) adalah sebuah baterai ukuran besar. Prinsip kerja sel ini berlandaskan reaksi kimia, bahwa pada penggabungan hidrogen dan oksigen, terjadi air dan energi. Dalam hal ini, energi listrik.



Pada dasarnya, sel bahan bakar terdiri dari tiga bagian seperti yang

terlihat secara skematis pada Gambar 6.4, yaitu

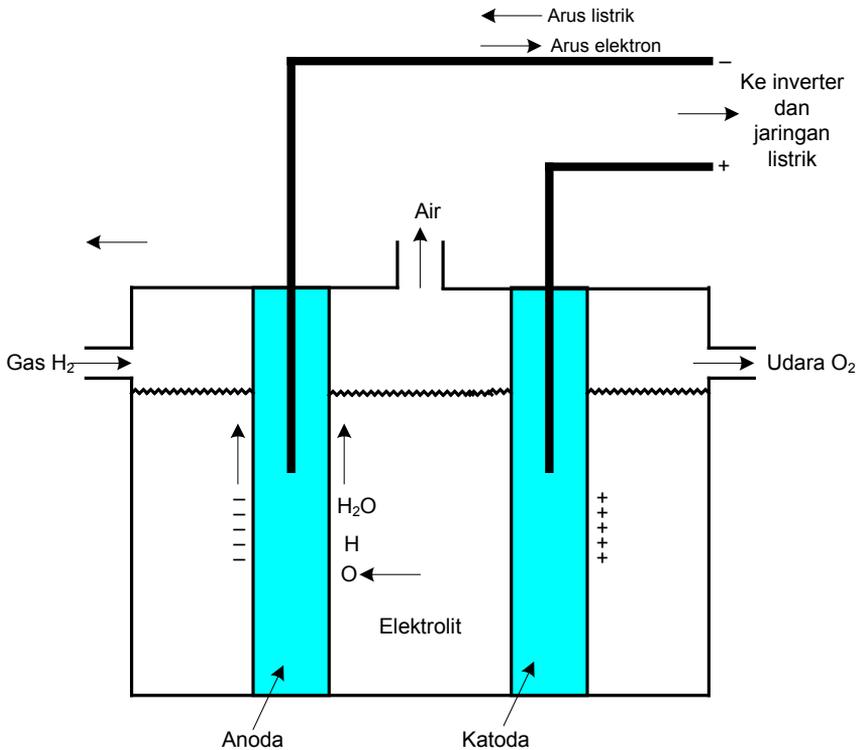
1. peubah bahan bakar yang menghasilkan suatu gas yang mengandung bahan hidrogen (H_2),
2. sel bahan bakar yang menghasilkan energi listrik arus searah, dan
3. inverter yang mengubah energi listrik arus searah menjadi arus bolak-balik.



Gambar 5.4 Diagram blok pembuatan energi listrik dengan sel bahan bakar

Sel bahan bakar, pada prinsipnya, bekerja sebagai kebalikan dari proses elektrolisis. Gambar 5.5 memperlihatkan prinsip kerja sebuah sel bahan bakar. Sel tersebut terdiri dari sebuah tangki. Dalam tangki tersebut, terdapat dua dinding berupa elektrode. Satu dinding bekerja sebagai elektrode bahan bakar dan dinding lainnya berfungsi sebagai elektrode udara. Di tengah kedua dinding itu, terdapat elektrolit, yaitu air yang dicampur asam. Bahan bakar berupa hidrogen H_2 memasuki sel bahan bakar dan ditampung dalam ruangan sebelah kiri dinding bahan bakar. Sementara itu, oksigen O_2 dalam bentuk udara memasuki sel bahan bakar dari sebelah kanan dan ditampung dalam ruang sebelah kanan elektrode udara. Kedua elektrode dihubungkan pada jaringan listrik melalui inverter. Elektrode bahan bakar disambung pada sisi negatif, sedangkan elektrode udara pada sisi positif jaringan. Perlu dikemukakan bahwa elektrode udara adalah katode, sedangkan elektrode bahan bakar adalah anode.

Bilamana oksigen memasuki sel bahan bakar, terdapat reaksi dan atom oksigen itu menerima dua elektron dari elektrode. Kemudian, oksigen ini memasuki elektrolit dan mencapai tempat yang berdekatan dengan elektrode bahan bakar. Pada saat ini terjadi dua hal. Pertama, oksigen tersebut bergabung dengan hidrogen dan menjadi air (H_2O). Pada saat itu, oksigen tersebut melepaskan muatan negatifnya berupa dua elektron pada elektrode bahan bakar. Jika elektron udara pada tiap atom oksigen melepaskan dua elektron, elektron bahan bakar menerima dua elektron.

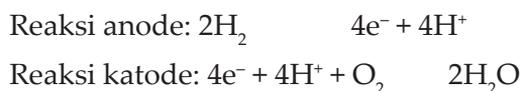


Gambar 5.5 Skema prinsip kerja sel bahan bakar

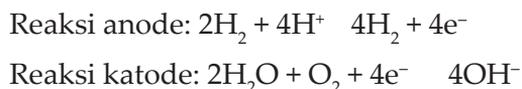
Dengan demikian, elektron ini berpindah dari elektrode udara ke elektrode bahan bakar dan terjadi arus elektron yang merupakan energi listrik arus searah. Listrik arus searah ini dibawa ke sebuah inverter

untuk diubah menjadi arus bolak-balik dan dihubungkan pada jaringan. Suatu kekhususan pada sel bahan bakar adalah bahwa tidak terdapat bagian-bagian mekanis yang bergerak. Dengan demikian, pada perubahan energi ini, terdapat potensi untuk mempunyai efisiensi yang tinggi. Keuntungan lainnya adalah bahwa polusi terhadap lingkungan sangat rendah. Selain itu, ukuran sebuah sel bahan bakar dibanding dengan pusat-pusat listrik lainnya relatif sangat kecil.

Pada contoh di atas, digunakan elektrolit asam dengan ion pengantar berupa H^+ . Dalam hal ini, reaksi-reaksi elektrode meliputi



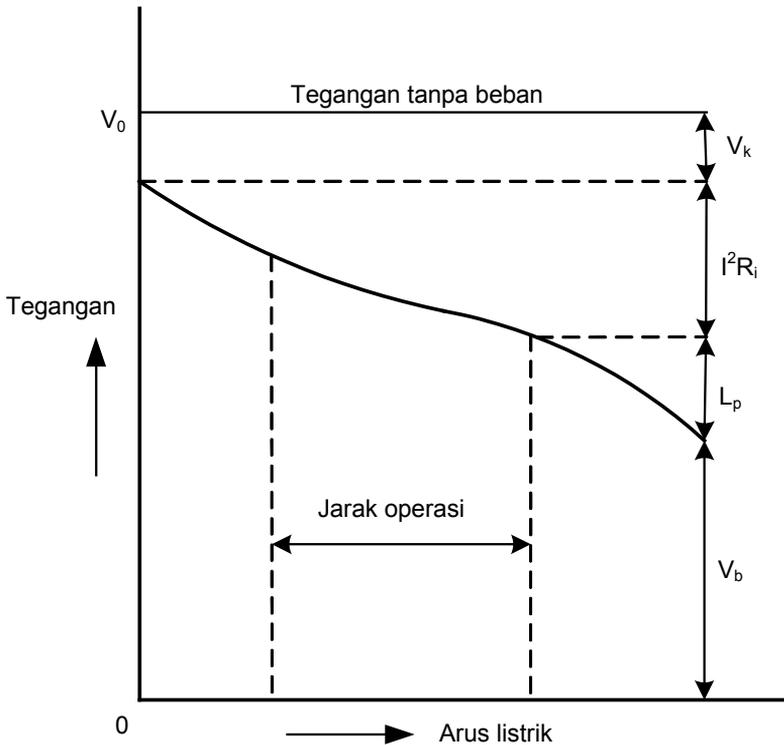
Jika digunakan elektrolit alkalin, misalnya hidroksida potasium, ion penghantar merupakan OH^- dan reaksi-reaksi elektrode meliputi



Beberapa jenis sel bahan bakar menggunakan elektrolit berupa bahan padat yang pada dasarnya merupakan suatu membran penukar ion. Membran tersebut harus fleksibel, memiliki kekuatan mekanikal yang besar, stabil secara kimiawi, serta tahan terhadap berbagai jenis gas yang agresif. Meskipun membran itu tembus ion, ia memiliki tahanan listrik yang tinggi, walaupun tebalnya hanya kira-kira 3 mm. Sel bahan bakar jenis ini pernah digunakan sebagai sumber energi listrik pada beberapa satelit ruang angkasa Gemini.

Gambar 5.6 memperlihatkan karakteristik kerja sebuah sel bahan bakar berupa lengkung arus-tegangan. Dalam grafik tersebut, V_0 merupakan tegangan sel bahan bakar ketika tidak ada beban. Pada saat diberi beban, tegangan akan jatuh karena terjadi polarisasi kimiawi sehingga

tegangan tanpa beban yang sebenarnya adalah di bawah nilai V_0 . Jika ditingkatkan, terjadi jatuh tegangan yang disebabkan oleh kerugian tahanan intern. Pada beban yang agak tinggi, terjadi tambahan tegangan jatuh karena terjadi proses polarisasi konsentrasi pada elektrolit. Sebagaimana terlihat pada Gambar 5.6, karakteristik kerja ini banyak persamaannya dengan sebuah lengkung tegangan arus sebuah baterai.



- Keterangan:
- V_k = jatuh tegangan karena polarisasi kimia
 - $I^2 R_i$ = kerugian tahanan intern
 - L_p = kerugian polarisasi
 - V_b = jatuh tegangan pada beban luar

Gambar 5.6 Lengkung tegangan-arus sel bahan bakar

Sebagaimana dikemukakan sebelumnya, sel bahan bakar telah digu-

nakan pada Gemini. Aplikasi lain dari sel bahan bakar di ruang angkasa adalah pada satelit Apollo, Skylab, serta pada pesawat ulang-alik Columbia. Hal ini disebabkan oleh sebuah sel bahan bakar yang sangat ringan sebagai sumber energi listrik. Oleh sebab itu, penelitian juga dilakukan untuk memanfaatkannya pada sebuah pesawat terbang yang menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar. Negara Rusia kini telah memiliki sebuah kapal terbang yang demikian sebagai proyek percobaan. Teknologi sel bahan bakar ini masih berada pada taraf pengembangan yang dilakukan oleh perusahaan-perusahaan besar di negara-negara maju secara intensif. Diperkirakan bahwa pada akhir tahun 1990-an telah tercapai kematangan teknis dan pada abad ke 21 ini telah diperoleh taraf komersial yang penuh.

Dapat disimpulkan bahwa kombinasi bahan bakar hidrogen dan sel bahan bakar merupakan harapan yang besar untuk penyediaan energi listrik di waktu yang akan datang. Sangat menarik untuk dicatat bahwa sebuah sel bahan bakar percobaan dibangun pada tahun 1981 di New York dengan daya terpasang sebesar 4,8 MW. Biaya proyek percobaan ini dipikul bersama oleh US Department of Energy, Electric Power Research Institute, dan sejumlah perusahaan listrik termasuk Consolidated Edison Company of New York. Proyek ini sengaja dipasang di tengah kota untuk mendemonstrasikan bahwa sebuah sel bahan bakar mengakibatkan polusi yang sangat kecil. Selain itu, Tokyo Electric Power Company di Jepang juga mengoperasikan sebuah sel bahan bakar yang lebih besar yaitu 11 MW buatan Toshiba. Sementara itu, di Southern California, Edison Company merencanakan membangun sel bahan bakar sebesar 130 MW.

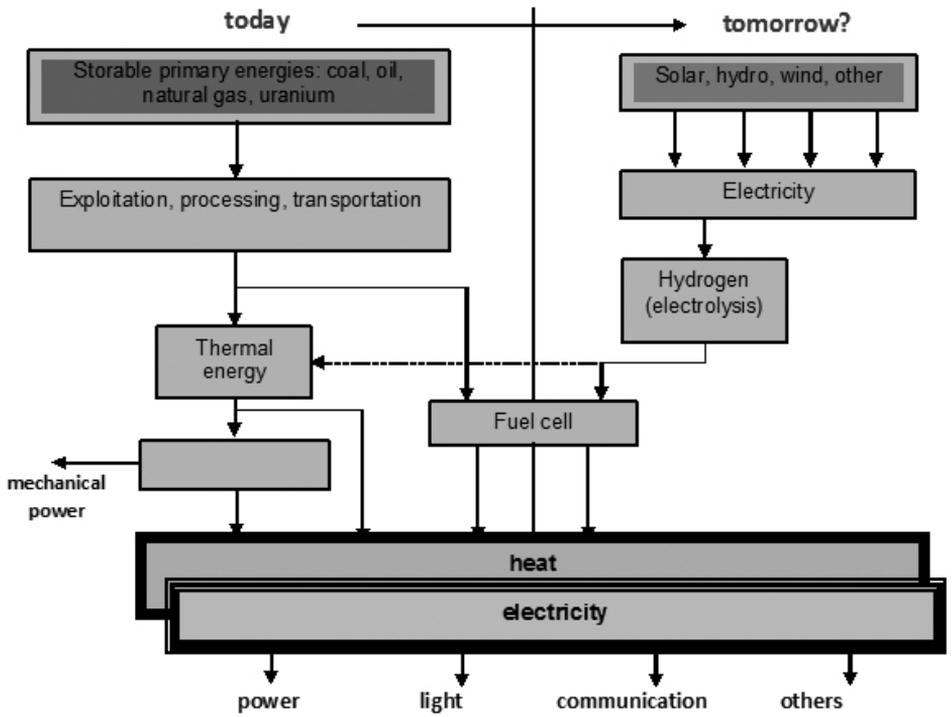
Pengembangannya sedang dilakukan oleh the Swedish National Development Company di Akersburgen, sebuah perusahaan di Swedia, untuk membuat sel bahan bakar yang diperuntukkan bagi kendaraan. Riset dan pengembangan serupa juga dilakukan oleh Energy Research Corpo-

ration serta beberapa lembaga lain di Amerika Serikat. Pengembangan ini telah mencapai taraf kematangan teknis yang cukup tinggi, tetapi masih belum mencapai kematangan ekonomis.

Juga menarik untuk dikemukakan bahwa suatu lembaga penelitian di Jerman, yaitu Solar Wasserstoff Bayern, telah membuat suatu hibrida atau gabungan antara pembangkit listrik dengan bahan bakar hidrogen serta sel surya fotovoltaik. Penelitian serupa dilakukan juga oleh Siemens, suatu perusahaan besar dalam bidang ketenagaan di Jerman.

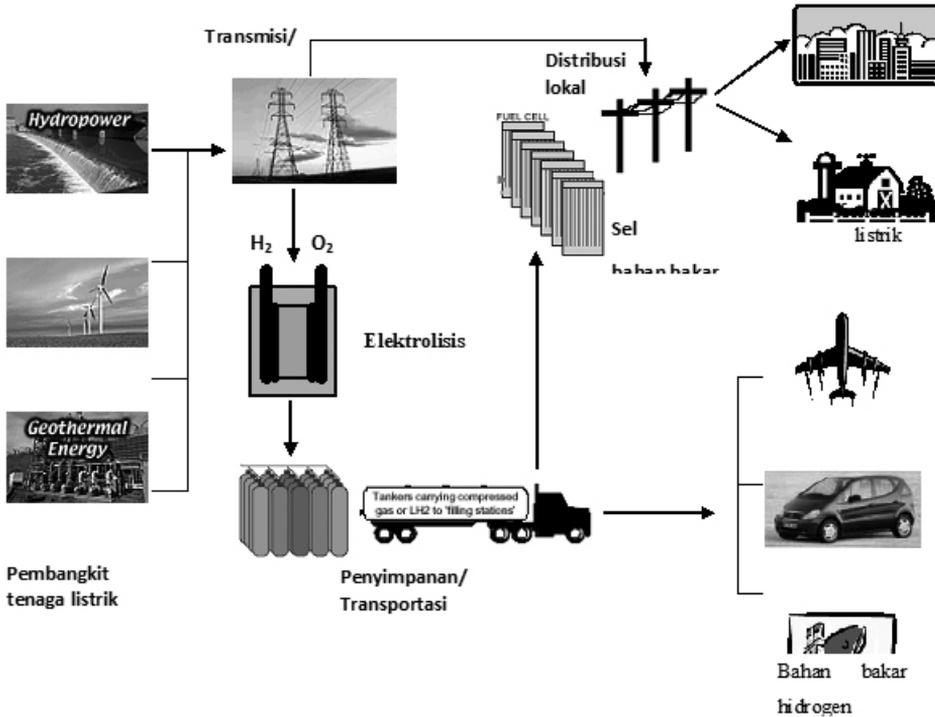
D. Aplikasi Hidrogen

Hidrogen adalah unsur paling sederhana yang tersusun dari satu proton dan satu elektron. Hidrogen mencakup lebih dari 90% komposisi alam semesta. Lebih dari 30% massa matahari adalah atom-atom hidrogen. Hidrogen adalah unsur paling melimpah ketiga pada permukaan bumi dan kebanyakan terdapat dalam air. Pada kondisi normal, hidrogen tidak berwarna, tidak berbau, tidak memiliki rasa, dan merupakan gas yang tidak beracun yang tersusun dari molekul-molekul diatomik (H_2). Sifat-sifat ini mendorong para ahli untuk memanfaatkan hidrogen dalam penyediaan energi.



Gambar 5.7 Struktur suplai energi

Sebuah sistem energi didominasi oleh daya listrik yang harus *seluwes* sistem bahan bakar fosil seperti sekarang ini (Gambar 5.7). Kebutuhan akan sistem penyimpanan dan transportasi harus disesuaikan dengan kebutuhan konsumen. Hidrogen merupakan pembawa energi yang cocok dalam sistem ini. Oleh sebab itu, hidrogen dapat digunakan dalam hampir semua jalur sistem energi kita (Gambar 5.8), yakni untuk aplikasi diam dan aplikasi bergerak.



Gambar 5.8. Jalur hidrogen

Produksi hidrogen melalui elektrolisis memberikan beberapa keuntungan untuk pembangkitan daya. Pengelektrolisis sebagai sebuah beban dalam jaringan listrik dapat dimanfaatkan sebagai pengendali frekuensi atau manajemen beban. Hal itu akan menghemat kapasitas cadangan sehingga pembangkit daya dapat dioperasikan pada rating daya dengan efisiensi terbaik dan keuntungan terbesar. Sebagai contoh, hidrogen dapat dimanfaatkan di dalam sel bahan bakar untuk memproduksi daya dengan efisiensi yang tinggi. Di dalam jaringan-jaringan pulau atau area-area dengan *grid* yang lemah dan permintaan daya yang semakin banyak, sebuah sistem hidrogen dengan pengelektrolisis penyimpanan dan sel bahan bakar atau mesin bakar dapat digunakan untuk mencatu daya kepada konsumen dengan sebuah catu daya yang andal. Hidrogen

dapat diproduksi pada pencatu melalui elektrolisis selama periode beban rendah dan diubah kembali menjadi daya dalam periode beban puncak. Terlebih dalam penggunaan energi terbarukan seperti angin atau daya matahari, adanya kesenjangan sementara antara produksi dan permintaan energi dapat dikompensasi.

Selanjutnya, penggunaan hidrogen tidak terbatas pada pembangkit listrik saja. Hidrogen sebagai pembawa energi yang luwes dapat juga digunakan sebagai bahan bakar mobil, bus, truk, kapal laut, dan pesawat terbang. Dengan demikian, emisi lokal maupun global yang disebabkan oleh lalu lintas dapat dikurangi. Perusahaan daya dapat melakukan bisnis sebagai pencatu bahan bakar dengan membuat hidrogen melalui elektrolisis. Pengembangan hidrogen sebagai sebuah bahan bakar akan didukung oleh pengembangan sel bahan bakar untuk aplikasi bergerak yang diperkirakan akan berjalan dengan cepat dalam waktu dekat. Hidrogen sebagai bahan bakar optimum untuk kendaraan yang digerakkan oleh sel bahan bakar memberikan efisiensi tertinggi dan teknologi yang mudah karena tidak memerlukan pengubah bahan bakar.

Untuk realisasi sebuah infrastruktur hidrogen, diperlukan kelompok teknologi yang berbeda-beda seperti berikut (daftar teknologi ini tidak mencakup semua teknologi).

- Produksi hidrogen
 1. elektrolisis
 2. pembentukan bahan bakar fosil
 3. *biomass*

- Sistem-sistem penyimpanan
 1. tabung-tabung tekanan tinggi
 2. LH_2 (*liquid hydrogen*)
 3. *metal-hybrid*

4. yang akan datang: *nano-graphite*?

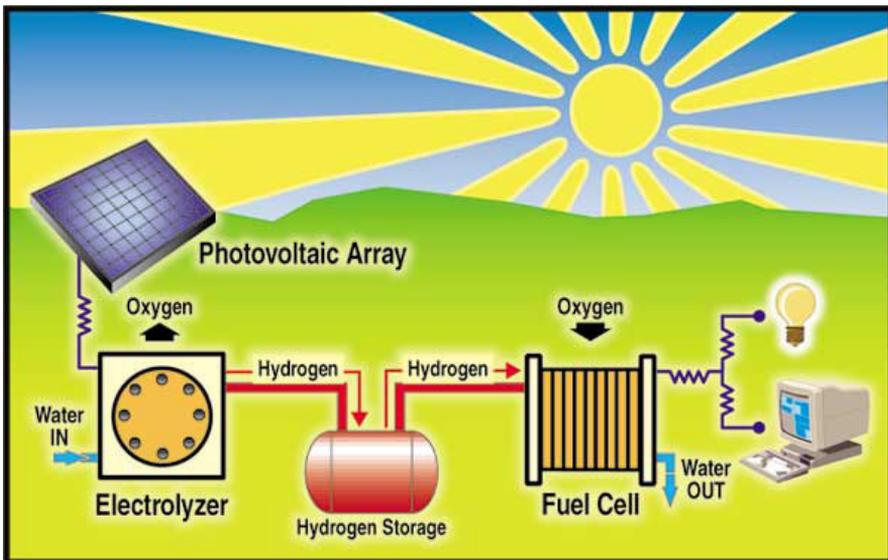
- Transportasi
 1. pipa
 2. bergerak dengan truk, kereta api, dan tangki

- Teknologi-teknologi aplikasi
 1. sel-sel bahan bakar
 2. mesin-mesin bakar
 3. turbin

Berbagai teknologi yang dibutuhkan untuk keperluan komersial dan industri seperti penyesuaian bentuk, penyimpanan, dan transportasi sudah dikenal dengan baik dan merupakan *state of the art*. Teknologi-teknologi yang berhubungan dengan pemanfaatan hidrogen sebagai sebuah pembawa energi memerlukan pengembangan lebih lanjut. Misalnya, untuk produksi pengektrolisasi berdaya guna tinggi dengan berbagai kapasitas atau pabrik pengubah *biomass* ke hidrogen. Sistem penyimpan harus dikembangkan dengan kerapatan energi tinggi dan pengisian bahan bakar yang mudah. Untuk pemanfaatan hidrogen, teknologi-teknologi yang sekarang ini seperti mesin-mesin bakar atau turbin-turbin harus didesain kembali untuk hidrogen. Teknologi sel bahan bakar mendatang memerlukan pengembangan lebih lanjut untuk memenuhi target biaya dan persyaratan-persyaratan keandalan. Meskipun demikian, sel-sel bahan bakar tampaknya akan menjadi teknologi untuk hidrogen yang menjanjikan karena efisiensinya yang tinggi dan rendahnya biaya perawatan.

Penggunaan energi surya untuk kebutuhan listrik sehari-hari mempunyai keuntungan nyata. Dalam hal ini, kita menghindari sumber-sumber energi yang tidak terbarukan dan berusaha menurunkan dampak

lingkungan melalui pengotoran emisi, tumpahan minyak, dan hasil samping berupa racun. Sumber-sumber energi terbarukan membuat negara-negara besar seperti Amerika tidak tergantung kepada negara-negara penghasil minyak yang tidak stabil kondisi politik dan sosialnya yang saat ini menyediakan 50% minyak dunia. Sebagai tambahan, hidrogen surya secara ekonomi dapat melindungi negara bukan penghasil minyak dari pengaruh negatif perubahan drastis dalam suplai dan harga energi. Salah satu kelemahan dari energi surya adalah bahwa matahari tidak selalu bersinar. Kita membutuhkan sebuah cara untuk menyimpan energi surya untuk sewaktu-waktu digunakan apabila matahari tidak bersinar. Dalam hal ini, hidrogen memberikan cara yang aman, efisien, dan bersih untuk menyimpan energi surya.



Gambar 5.9 Siklus hidrogen surya

Pada siklus hidrogen surya, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 5.9, energi listrik dari panel-panel fotovoltaik dapat digunakan untuk menjalankan *electrolyzer*, sebuah piranti yang membelah air (H_2O) ke

dalam unsur-unsur dasarnya: hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2). Oksigen dibebaskan ke udara dan hidrogen dipompa ke dalam tangki penyimpan yang dapat disimpan pada suatu tempat atau diangkut ke daerah dengan sedikit sinar matahari. Pada malam hari, ketika energi surya tidak tersedia, hidrogen digabungkan kembali dengan oksigen dari udara dalam sebuah sel bahan bakar (*fuel cell*), sebuah pembangkit daya elektrokimia yang secara langsung mengubah energi kimia dalam hidrogen ke energi listrik. Hasil samping dari proses ini hanyalah air bersih.

Dengan cara yang sama, energi listrik dari sel bahan bakar dapat digunakan untuk jaringan daya, yakni untuk alat-alat rumah tangga, lampu penerangan, dan menjalankan mobil. Hidrogen surya memperkenankan kita untuk menggunakan daya dari matahari selama 24 jam sehari. Bahkan, hal tersebut dinilai lebih bersih dan efisien karena sumber energi yang dihasilkan di tempat sendiri.

E. Penetrasi Pasar Hidrogen

Saat ini, penggantian langsung bahan bakar fosil dengan konversi energi langsung melalui energi sekunder dalam bentuk hidrogen merupakan sebuah ilusi. Untuk menghadapi perubahan jangka panjang, perlu mencari jalur-jalur guna menemukan teknik membuat hidrogen yang sesuai dengan kondisi saat ini. Dengan kata lain,

- Pengembangan dilakukan dalam kondisi pasar bebas dengan batasan-batasannya menggunakan pengembangan kekuatan kompetisi yang ketat.
- Hidrogen adalah energi sekunder (dibutuhkan energi untuk memproduksi hidrogen). Oleh karenanya, semua proyek hidrogen membutuhkan pendanaan dalam masa sekarang ini. Program-program harus disusun sedemikain rupa untuk menciptakan situasi pasar buatan untuk digunakan dalam kompetisi.

- Konstanta waktu perubahan dikendalikan oleh kemampuan keuangan negara-negara maju atau lebih baik dikatakan oleh kemauan masyarakat mereka dalam mengalokasikan dana demi keuntungan generasi mendatang.
- Selama proses perubahan tidak ditentukan oleh kekurangan energi atau tekanan meta listrik yang kuat, adanya visi tentang kerugian lingkungan di masa mendatang akan membuat tindakan yang cukup memadai. Dalam situasi seperti ini, “rekayasa politis” untuk melibatkan semua pelaku yang relevan hampir sama pentingnya dengan penemuan solusi teknis.

Akan tetapi, pengintegrasian komponen sistem energi baru ke dalam sistem yang berlaku saat ini membutuhkan waktu, apalagi prosedur transisinya masih belum diketahui. Kekuatan pendorong untuk mempertahankan pengembangan relatif cukup lemah, tetapi masih tetap aktif di Eropa dan Jerman, meskipun mengalami peningkatan level yang lambat selama bertahun-tahun. Sebuah perusahaan daya di kota Hamburg, Jerman, yakni Hamburgische Electricitats-Werke AG (HEW), terlibat dalam proses ini dengan melaksanakan beberapa proyek hidrogen untuk mendukung pengembangan lebih lanjut energi hidrogen.

Untuk menunjukkan kemampuan hidrogen sebagai pembawa energi yang fleksibel dan dapat disimpan, HEW telah terlibat dalam proyek-proyek hidrogen selama hampir 10 tahun. Aktivitas pertamanya adalah berpartisipasi dalam studi bersama dengan sekitar 30 perusahaan di Eropa dan Kanada dalam proyek European Quebec Hydro Hydrogen Pilot Project (EQHHP) dalam usaha mengapalkan hidrogen cair yang diproduksi di Kanada dengan sebuah fasilitas daya air 100 MW ke kota Hamburg. HEW dan Hamburger Gaswerke GmbH (HGW) mengembangkan konsep pemanfaatan hidrogen dalam pembangkit daya sel bahan bakar

10 MW untuk catu panas dan listrik daerah perkotaan. Studi lain yang dikerjakan bersama CONSULECTRA, sub konsultannya HEW, meliputi

- Konversi energi angin Jerman Utara ke hidrogen yang digunakan untuk bahan bakar kapal feri, mobil, dan bus
- Perkiraan penetrasi pasar yang mungkin dari hidrogen yang diproduksi melalui kombinasi kelebihan listrik dari *grid* dan yang terbaru
- Proyek-proyek bus hidrogen untuk alat transportasi perkotaan

1. Pembangkit Sel Bahan Bakar untuk *Kogenerasi* Panas dan Listrik

Dalam bentuk sebuah kerjasama, dua perusahaan besar di Hamburg, HEW dan HGW, mengoperasikan dua buah sel bahan bakar *phosporic-acid* (PAFC) di daerah perkotaan yang mengelilingi Hamburg. Sebuah sel bahan bakar dalam proyek ini diberi bahan bakar gas dan alam, sedangkan yang lainnya hidrogen. Bahan bakar output setiap sel adalah energi listrik dengan daya 200 kW yang disambungkan ke *grid* HEW 10 kV menggunakan daya termal 220 kW dalam kombinasi dengan sistem pompa panas yang telah ada. Hal tersebut digunakan untuk pemanasan daerah dengan suhu rendah, yakni ke 680 bangunan perusahaan yang berdekatan. Dalam kondisi iklim di kota Hamburg, kapasitas catu kedua buah sel bahan bakar digunakan sebagai pemanas untuk 40 apartemen dan listrik untuk 200 apartemen. Sel bahan bakar gas alam standar dari CLC ONSI (PC25 A) dioperasikan pada Juni 1995.

2. Armada Van Hidrogen

Enam buah perusahaan yang ada di Hamburg, termasuk HEW, telah menyetujui kerjasama untuk mengoperasikan sebuah van berbahan bakar hidrogen dalam armada kendaraannya. Kendaraan-kendaraan armada cocok untuk demonstrasi bahan bakar hidrogen karena daerah op-

erasinya yang terbatas dan dikenal baik.



(a)



(b)

Gambar 5.10 Stasiun-stasiun pengisian bahan bakar hidrogen

Sampai saat ini, infrastruktur yang kurang dalam mencatu hidrogen telah teratasi dengan membangun sebuah stasiun bahan bakar hidrogen pada suatu lokasi yang cocok dan terbuka bagi perusahaan yang berpartisipasi baik sekarang maupun yang akan datang. Sasaran proyek ini adalah untuk mengurangi emisi, penerimaan publik pada hidrogen sebagai

bahan bakar yang digunakan sehari-hari, merealisasikan sebagian infrastruktur untuk bahan bakar hidrogen, menunjukkan rantai hubungan energi dari produksi hidrogen oleh pembangkit daya hidro yang dapat diperbaharui di Iceland, serta transportasi dan pemanfaatan di Hamburg. Operasi kendaraan armada pertama dan stasiun bahan bakar dimulai pada akhir 1998.

3. Pengembangan Pengelektrolisis Berdaya Guna Tinggi

Gesellschaft fur Hochleistungselektrolyseure zur WasserstoffherzeugungmbH (GHW) — sebuah perusahaan patungan Jerman, HEW, dan Norsk Hydro Electrolyser dan Motorenund Turbinen-Union Friedrichshafen GmbH (MTU) telah mengembangkan sebuah pengelektrolisis dengan ciri-ciri istimewa yang beradaptasi dengan produksi hidrogen dari sumber listrik yang mempunyai pembangkitan daya yang bervariasi.

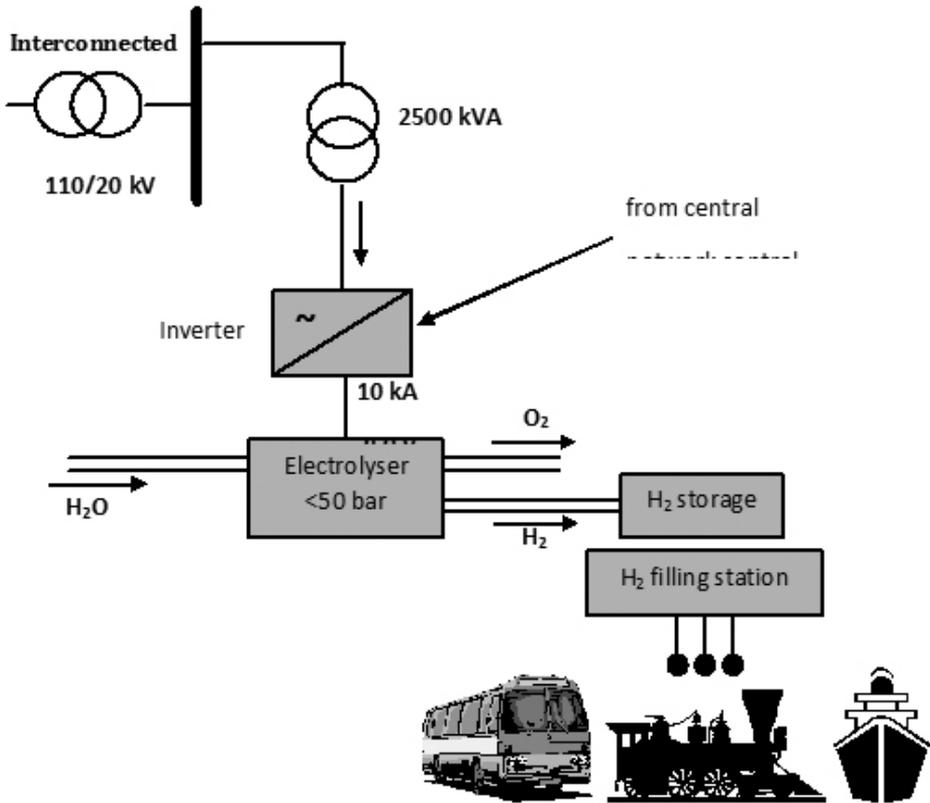
Pengelektrolisis ini mempunyai tingkat efisiensi yang tinggi, watak sebagai beban yang baik, dan tingkat kemurnian gas yang tinggi dengan operasi *intermiten* yang tinggi. Teknologi pengelektrolisis GHW meliputi

- diafragma elektrode PSU biaya rendah,
- tekanan operasi 30 bar,
- efisiensi : rating beban 80% sampai dengan 90% (beban 20%),
- variasi beban 20% - 110%, dan
- unit daya tipikal: 0,5 sampai 2,5 MW dan lebih.

Sebuah pengelektrolisis yang berdaya guna tinggi merupakan komponen kunci dalam sistem energi hidrogen. Proyek dan studi dengan pengelektrolisis baru di GHW, HEW atau CONSULECTRA meliputi bidang-bidang berikut.

- Memanfaatkan energi matahari PV dalam proyek Solar-Wasserstoff Bayern

- Memanfaatkan energi angin yang berfluktuasi di dalam sistem *grid* lemah dengan pembangkit daya angin yang relatif besar
- Pengendalian beban *grid* daya, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.11. Oleh karena sifat regulasinya yang sedemikian cepat, pengektrrolisis dapat digunakan sebagai beban variabel.



Gambar 5.11 Jaringan stasiun pengisian hidrogen dengan *electrolyser* sebagai “controllable load”

4. Proyek Hidrogen Lanuma Munich

Pada tempat parkir pesawat terbang di Lanuma Munich, bus-bus dan mobil-mobil VIP diisi dengan bahan bakar hidrogen. Hidrogen disediakan melalui proses elektrolisis atau secara langsung dalam bentuk cair

oleh truk-truk. Proyek ini, yang dimulai pada Januari 1997, melibatkan sebuah pengelektrolisis GHW untuk produksi hidrogen sebagai bahan bakar *otobis*. Sebuah pengelektrolisis GHW 450 kW dalam konstruksi gelincir yang dibiayai oleh Bavaria telah menghasilkan hidrogen untuk periode operasi yang dimulai sejak Mei 1999 sampai EXPO 2000.

5. **Proyek Hidrogen Terpadu Eropa (EIHP)**

Tujuan utama European Integrated Hydrogen Project (EIHP) adalah membuat landasan untuk sebuah pengembangan yang berkelanjutan tentang integrasi sistem dan penyebarluasan hidrogen sebagai pembawa energi. Proyek ini memfokuskan pada suatu pendekatan harmonis untuk perolehan lisensi dan persetujuan kendaraan yang berkaitan dengan hidrogen dan infrastruktur di Eropa. Dalam studi yang dilakukan oleh perusahaan-perusahaan industri terkait, termasuk perusahaan HEW, akan diadakan survei tentang peraturan yang mencakup identifikasi kebutuhan pengharmonisan, defisiensi dalam praktik lisensi, kebutuhan-kebutuhan untuk penelitian, dan studi keselamatan sebagai persiapan pembuatan standar. Proposal-proposal untuk program pengujian dan analisis pasar untuk kendaraan-kendaraan armada sedang dievaluasi dalam suatu proyek 2 tahun yang dimulai pada awal tahun 1998.

6. **Aspek Keamanan**

Aspek-aspek keamanan piranti-piranti hidrogen meliputi banyak hal, dimulai dari produksi sampai ke pemanfaatannya. Secara ringkas, berikut diuraikan aspek-aspek keamanan untuk proyek-proyek aplikasi di atas.

1. Sistem penyimpanan hidrogen cair sel bahan bakar hidrogen telah disetujui oleh Undang-Undang Emisi Jerman Federal.
2. Mobil van dari armada van hidrogen telah disetujui TUV Jerman,

mencakup isu keselamatan juga penyesuaian dengan desain terkini dan standar rekayasa.

3. European Integrated Hydrogen Project (EIHP) dimaksudkan untuk membuat watak koordinasi dan standar desain, termasuk isu keselamatan.

Latihan:

1. Jelaskan bahan-bahan bakar kimia yang dapat digunakan untuk keperluan pembangkitan energi listrik!
2. Jelaskan pengertian *fuel cell*!
3. Jelaskan prinsip kerja *fuel cell*!
4. Jelaskan prinsip kerja penerapan hidrogen sebagai sumber energi listrik!
5. Berikan pendapat Anda tentang prospek *fuel cell* dan hidrogen untuk penerapan di masa mendatang!
6. Jelaskan sifat-sifat gas hidrogen!
7. Jelaskan fungsi dan manfaat hidrogen dalam bidang energi listrik!
8. Jelaskan prinsip dasar untuk mendapatkan gas hidrogen!
9. Jelaskan prinsip kerja penggunaan hidrogen sebagai pengganti bahan bakar minyak!
10. Berikan pendapat Anda tentang prospek hidrogen dalam bidang energi di masa mendatang!•

BAB VI

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro

TUJUAN Instruksional Umum:

Memberikan wawasan tentang pembangkit listrik tenaga mikrohidro yang merupakan salah satu sumber daya listrik energi terbarukan yang ramah lingkungan

Tujuan Instruksional Khusus:

1. Memberikan pengetahuan tentang latar belakang pembangkit listrik tenaga mikrohidro
2. Memberikan pengetahuan tentang prinsip kerja pembangkit listrik tenaga mikrohidro
3. Memberikan pengetahuan tentang sejarah dan perkembangan pembangkit listrik tenaga mikrohidro

A. Pendahuluan

Untuk memenuhi kebutuhan energi nasional dan sejalan dengan maraknya isu perubahan iklim dunia, Pemerintah Indonesia kian gencar mempromosikan penggunaan energi baru dan terbarukan. Sumber ener-

gi yang ramah lingkungan menjadi prioritas dalam pengembangan energi tersebut. Berbagai jenis sumber energi baru terbarukan menjadi target eksplorasi seperti panas bumi, tenaga bayu, tenaga surya, *biomass*, *biofuel*, serta tenaga air. Dari berbagai sumber energi baru terbarukan tersebut, tenaga air merupakan pilihan utama baik karena kelemahan jenis EBT yang lain maupun karena keunggulan tenaga air sendiri. Energi panas bumi merupakan jenis EBT dengan biaya eksplorasi tertinggi. Energi bayu mengalami kendala karena kualitas angin dengan dua variabel utama, yaitu kecepatan angin dan kontinuitasnya yang hanya memenuhi syarat di beberapa provinsi saja. Energi surya memiliki kendala teknologi karena ketergantungan kita pada komponen komponen sel surya dari luar negeri. Sementara itu, *biomass* dan *biofuel* masih menyimpan debat tentang dampaknya pada lingkungan karena pengembangan lahan-lahan dengan tanaman penghasil *biofuel* sering mengorbankan hamparan-hamparan hutan tertutup yang alamiah yang merupakan penyerap karbon utama di daerah tropis. Sebaliknya, pembangkit listrik tenaga mikro dan mini hidro memiliki beberapa keunggulan dalam aspek teknologi maupun dalam aspek lingkungan.

Dari aspek teknologi, terdapat keuntungan dan kemudahan pada pembangunan dan pengelolaan pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) dibandingkan jenis-jenis pembangkit listrik, yaitu

1. konstruksinya relatif sederhana,
2. mudah dalam perawatan dan penyediaan suku cadang,
3. dapat dioperasikan dan dirawat oleh masyarakat desa,
4. biaya operasi dan perawatan rendah, dan
5. kesiapan industri nasional dalam memasok peralatan pembangkit skala kecil dan menengah.

Dari aspek lingkungan, PLTMH ramah terhadap lingkungan, karena

tidak menghasilkan polusi udara atau limbah lainnya serta tidak merusak ekosistem sungai. Penyediaan listrik menggunakan PLTMH akan mengurangi pemakaian bahan bakar fosil (misalnya, minyak tanah dan solar) untuk penerangan dan kegiatan rumah tangga lainnya. Selain itu, tambahan manfaat langsung yang dirasakan oleh masyarakat dari sumberdaya air diharapkan dapat mendorong mereka untuk memelihara daerah tangkapan air demi menjamin suplai air bagi kelangsungan operasi PLTMH. Instalasi dengan skala mikro dan minihidro tidak membutuhkan bendungan yang besar yang dapat mengorbankan lahan pemukiman atau wilayah hutan yang besar, sebagaimana PLTA atau pembangkit listrik tenaga air diatas 10 MW. Mengingat PLTMH dan PLTM adalah pembangkit dengan skala yang relatif kecil, akan lebih mudah mengorganisasi partisipasi masyarakat dalam melestarikan sumber air dengan merawat daerah tangkapan air di hulu dibandingkan pembangkit skala besar yang mencakup suatu hamparan wilayah serta pemukiman yang lebih luas. Jika dikelola serta dimanfaatkan secara khusus oleh masyarakat lokal dengan suatu jaringan yang terisolasi, PLTMH ini akan membawa manfaat sosial serta ekonomi yang signifikan. Selain dapat menyediakan listrik untuk kebutuhan rumah tangga, kehadiran PLTMH juga dapat menyediakan energi yang cukup besar yang dapat dimanfaatkan untuk kegiatan-kegiatan produktif, terutama pada siang hari ketika beban listrik rendah. Dari sudut pandang ini, kelebihan PLTMH adalah:

1. meningkatkan produktivitas dan aktivitas ekonomi masyarakat melalui munculnya atau meningkatnya produktivitas industri kecil rumah tangga, dan
2. terciptanya lapangan-lapangan kerja baru di desa.

Dari aspek pengembangan kelembagaan masyarakat, pengoperasian PLTMH yang menuntut adanya suatu lembaga tersendiri yang menjalan-

kan fungsi pengelolaan dan perawatan, akan menambah keberadaan lembaga yang sudah ada di desa dan secara tidak langsung dapat menjadi media pengembangan kapasitas masyarakat dalam pengelolaan kelembagaan dan pelayanan publik.

Disamping keunggulan-keunggulan tersebut, hal yang juga sangat penting adalah besarnya potensi tenaga mikrohidro yang cukup besar di Indonesia. Potensi yang tercatat saat ini adalah sekitar 500 MW yang tersebar di seluruh wilayah Republik Indonesia dan sangat diyakini bahwa potensi yang konkret jauh diatas angka tersebut.

Pembangunan PLTMH dilakukan oleh berbagai pihak, mulai dari pemerintah, lembaga donor, hingga pihak swasta. Tidak hanya pada wilayah-wilayah yang belum teraliri listrik, pembangunan PLTMH juga dilakukan di wilayah-wilayah yang dekat atau sudah dilewati jaringan PLN dengan tujuan menambah daya PLN yang saat ini belum mampu memenuhi kebutuhan listrik secara nasional, mengingat bahwa rasio elektrifikasi nasional saat ini baru mencapai 64%. Melalui Permen 31/2009, PT PLN (Persero) memiliki kewajiban untuk membeli tenaga listrik yang bersumber dari energi baru terbarukan sampai dengan kapasitas 10MW. Dalam beberapa kesempatan, ditemukan bahwa pembangunan PLTMH dengan pendekatan komersial ini ternyata tidak hanya dilakukan oleh PLTMH yang dibangun pihak swasta, tetapi juga oleh PLTMH yang dibangun pemerintah dan lembaga donor dengan menggunakan dana-dana hibah.

Berdasarkan data dalam Energi Nasional, potensi tenaga air di Indonesia adalah 75.6 GW, termasuk diantaranya adalah potensi mikrohidro sebesar 500MW. Dari 500 MW potensi yang sudah teridentifikasi, sebanyak 46 MW telah dimanfaatkan. Ini berarti, dari potensi yang telah diidentifikasi, masih terdapat sekitar 454 MW yang belum dimanfaatkan. Jika diasumsikan bahwa biaya pembangunan daya 1 KW adalah sebesar

Rp 25 juta, dibutuhkan investasi sebesar Rp 11.35 triliun. Perlu dicatat bahwa potensi sesungguhnya jauh diatas angka tersebut, mengingat masih banyak wilayah di tanah air yang tidak memiliki data potensi energi. Masuknya pihak swasta dalam memanfaatkan potensi usaha di bidang ini akan sangat membantu usaha peningkatan elektrifikasi nasional, sekaligus usaha untuk meningkatkan kesejahteraan rakyat di perdesaan.

B. Sejarah dan Prinsip Kerja PLTMH

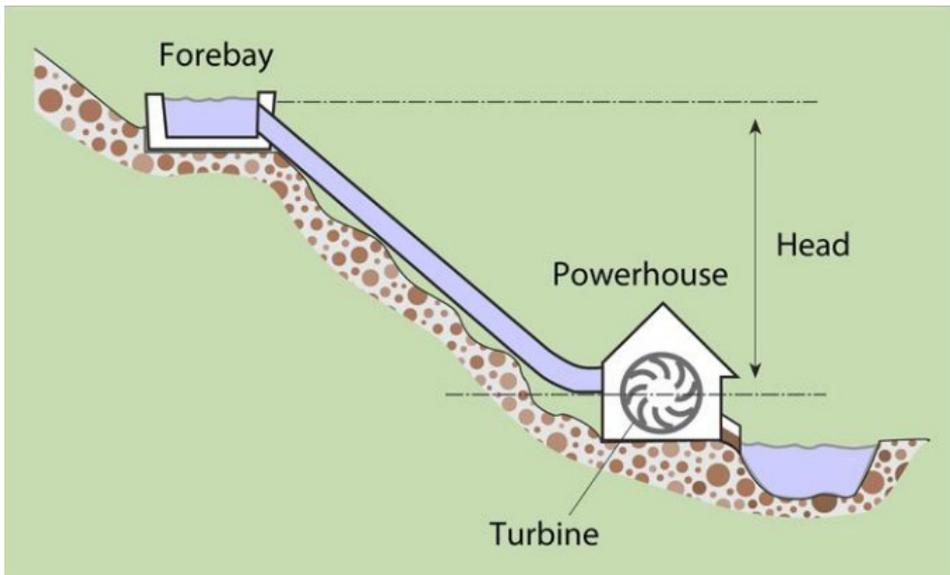
Dalam sejarahnya, Yunani tercatat sebagai negara pertama yang memanfaatkan tenaga air untuk memenuhi kebutuhan energi listriknya. Pada akhir tahun 1999, tenaga air yang sudah berhasil dimanfaatkan di dunia adalah sebesar 2650 TWh atau 19% energi listrik telah terpasang. Kemajuan-kemajuan yang terjadi dalam teknologi komputer dan komunikasi merupakan daya dorong utama untuk perkembangan otomatisasi pada pembangkit listrik tenaga Air (PLTA). Sumber energi yang mengandalkan debit air dan ketinggian jatuhnya air ini diharapkan bisa menjawab ketersediaan energi terutama di daerah yang hingga kini belum teraliri oleh perusahaan listrik negara.

Indonesia mempunyai potensi PLTA sebesar 70.000 mega watt (MW). Potensi ini baru dimanfaatkan sekitar 6% atau 3.529 MW atau 14,2% dari jumlah energi pembangkitan PT PLN. Berdasarkan konstruksinya, ada dua cara pemanfaatan tenaga air untuk pembangkit listrik: (i) membangun bendungan dan membuat reservoir untuk mengalirkan air ke turbin, (ii) memanfaatkan aliran air sungai tanpa membangun bendungan dan reservoir atau yang sering disebut dengan *Run-of-river Hydropower*.

PLTMH atau *Micro Hydro Power* (MHP) merupakan suatu sistem pembangkit listrik menggunakan sumber energi dari tenaga air. Mikro menunjukkan ukuran kapasitas pembangkit, yaitu antara 500 – 100 kilowatt (menurut UNIDO), sedangkan menurut Peraturan Menteri (Permen)

ESDM tahun 2002, berkapasitas <1 MW.

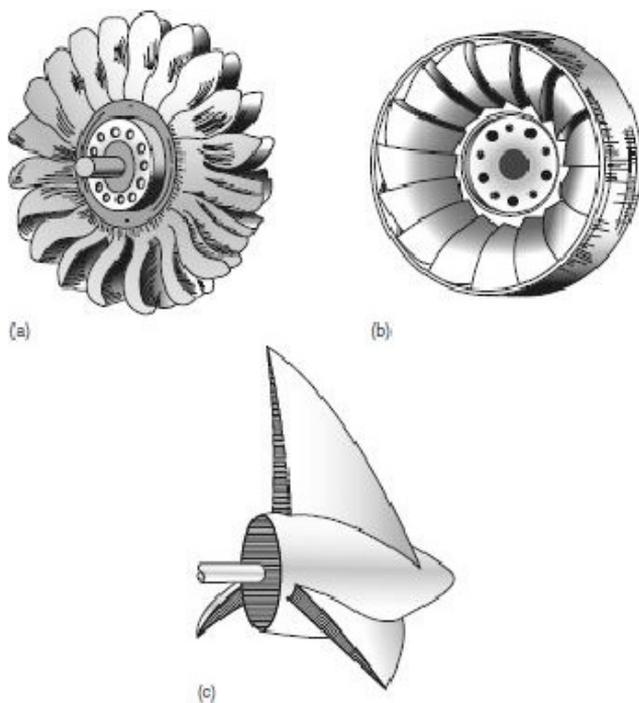
Secara umum, cara kerja PLTMH adalah dengan mengambil air dalam jumlah debit tertentu dari sumber air (sungai, danau, atau waduk) melalui *intake*, kemudian dengan menggunakan pipa pembawa (*headrace*), air diarahkan menuju turbin. Namun, sebelum menabrak turbin, air dilewatkan ke pipa pesat (*penstock*). Tujuannya adalah meningkatkan energi dalam air dengan memanfaatkan gravitasi. Selain itu, pipa pesat juga mempertahankan tekanan air jatuh. Oleh karena itu, pipa pesat tidak boleh bocor. Turbin yang tertabrak air akan memutar generator dalam kecepatan tertentu sehingga terjadilah proses konversi energi dari gerak ke listrik. Sementara itu, air yang digunakan untuk memutar turbin dikembalikan ke alirannya. Besarnya energi yang dapat dikonversi menjadi energi listrik bergantung pada ketinggian jatuh air (*head*) dan pemilihan turbin untuk PLTMH, seperti terlihat pada Gambar 6.1.



Gambar 6.1. Tinggi jatuh (*head*) pada PLTMH

Keunggulan PLTMH umumnya terlihat jelas dari sisi ekonomi dan

lingkungan. Secara ekonomis, walaupun memerlukan bendungan, ternyata PLTMH memiliki biaya produksi yang relatif rendah. Selain itu, PLTMH umumnya juga memiliki umur yang panjang, yaitu 50-100 tahun. Bendungan yang digunakan pun biasanya dapat sekaligus digunakan untuk kegiatan lain seperti irigasi atau sebagai cadangan air dan pariwisata. Dari segi lingkungan, berkurangnya emisi karbon akibat digunakannya sumber energi bersih seperti air jelas merupakan kontribusi berharga bagi lingkungan.



Gambar 6.2. Turbin air (a) Pelton, (b) Francis, dan (c) Propeller

Di balik keunggulan yang dimilikinya, terdapat juga dampak negatif terhadap lingkungan akibat dibangunnya PLTMH, yaitu mengganggu keseimbangan ekosistem sungai atau danau tempat dibangunnya bendungan untuk PLTMH. Selain itu, pembangunan bendungan juga memakan

biaya yang lumayan tinggi dan waktu yang cukup lama. Terkadang, walaupun sangat jarang, kerusakan pada bendungan dapat menyebabkan resiko kerugian yang sangat besar. Belakangan ini, semakin marak digunakannya mikrohidro, pembangkit listrik tenaga air skala kecil (dibawah 100 kW), sebagai sumber pasokan listrik di desa-desa kecil dan terpencil. PLTMH semakin dipilih mengingat banyaknya sungai kecil yang ada di Indonesia. Potensi mikrohidro di Indonesia ada 458,75 MW dan baru terpasang 84 MW. Selain itu, teknologinya yang mudah pun menjadi suatu nilai tambah bagi penduduk desa dalam memanfaatkan aliran sungai sebagai sumber energi primer untuk pembangkit listrik.

Tenaga air merupakan salah satu cara untuk membangkitkan listrik yang telah dimanfaatkan sejak zaman dulu oleh penduduk Indonesia yang dikenal dengan istilah kincir. Kincir dan PLTMH memiliki prinsip kerja yang sama, tetapi secara teknologi, PLTMH jauh lebih modern dan efisien. Adapun beberapa keunggulan pemanfaatan PLTMH dibandingkan dengan teknologi lain adalah sebagai berikut.

1. Kondisi geografis sebagian besar wilayah Indonesia yang berbukit dan curah hujan yang memadai sepanjang tahun merupakan potensi yang luar biasa untuk pengembangan PLTMH.
2. PLTMH tidak menyebabkan polusi dan kerusakan lingkungan. Bahkan, masyarakat sekitar akan diajak turut serta menjaga hutan sebagai sumber air.
3. PLTMH dapat beroperasi penuh selama 24 jam setiap hari karena air tidak tergantung siang atau malam.
4. Lebih dari 80% komponen PLTMH telah dapat dibuat oleh industri-industri kecil dan menengah yang tersebar di seluruh negeri.
5. PLTMH dapat lebih panjang umur dibandingkan dengan pembangkit listrik lainnya jika dipelihara dengan baik.
6. PLTMH sangat cocok untuk melayani kebutuhan listrik masya-

rakat perdesaan dan daerah terpencil sehingga mampu meningkatkan kualitas hidup dan ekonomi masyarakat desa.

7. Pengoperasian dan perawatan PLTMH sangat mudah dan murah dibandingkan dengan generator diesel atau pembangkit lainnya.
8. Energi listrik atau energi mekanik yang dihasilkan dapat digunakan untuk usaha produktif guna meningkatkan produktivitas ekonomi di daerah terpencil.

Meskipun demikian, ada juga sejumlah kekurangan yang harus dipertimbangkan ketika membandingkan PLTMH dengan sumber energi lain. Pembangkit listrik air skala kecil identik dengan hal berikut.

1. Biaya investasi yang relatif besar untuk pembangunan PLTMH, meskipun biaya operasinya rendah.
2. Memerlukan penguasaan pengetahuan khusus yang kadang tidak tersedia di masyarakat setempat. Perlu diperhatikan bahwa PLTMH bukan merupakan pembangkit listrik tenaga air (PLTA) yang dikecilkan, tetapi sebuah pembangkit yang memerlukan perencanaan dan pembangunan yang unik dan berbeda dengan PLTA.
3. Meskipun PLTMH memerlukan perhatian yang sederhana, tetapi harus dilakukan secara terus menerus, terutama dalam operasional dan perawatannya. Kadang-kadang, masyarakat desa tidak dipersiapkan untuk melakukannya sehingga mereka kurang terorganisasi, kurang sadar, dan kurang rasa memiliki. Akibatnya, PLTMH kurang mampu bertahan lama. Hal ini merupakan aspek yang harus diperhatikan dengan teliti dalam merencanakan sebuah PLTMH.

Latihan:

1. Jelaskan prinsip kerja pembangkit listrik tenaga mikrohidro!

2. Jelaskan perbedaan pembangkit listrik tenaga mikrohidro, pembangkit listrik tenaga minihidro, dan pembangkit listrik tenaga air!
3. Jelaskan klasifikasi turbin yang digunakan untuk pembangkit listrik tenaga mikrohidro!
4. Jelaskan potensi pembangkit listrik tenaga mikrohidro di Indonesia dan dunia!
5. Berikan pendapat Anda tentang prospek pembangkit listrik tenaga mikrohidro di masa mendatang! •

BAB VII

Pembangkit Listrik Tenaga Surya

TUJUAN Instruksional Umum:

Memberikan wawasan tentang pembangkit listrik tenaga surya yang merupakan salah satu sumber daya listrik energi terbarukan yang ramah lingkungan

Tujuan Instruksional Khusus:

1. Memberikan pengetahuan tentang latar belakang pembangkit listrik tenaga surya
2. Memberikan pengetahuan tentang prinsip kerja pembangkit listrik tenaga surya
3. Memberikan pengetahuan tentang sejarah dan perkembangan pembangkit listrik tenaga surya
4. Memberikan pengetahuan tentang contoh aplikasi pembangkit listrik tenaga surya

A. Pendahuluan

Di antara sumber-sumber energi alternatif yang saat ini banyak dikembangkan, selain pembangkit listrik tenaga angin, pembangkit listrik

tenaga air (*hydro power*) dan lain-lain, pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) atau *solar cell* merupakan salah satu sumber energi yang cukup menjanjikan di Indonesia. Energi yang dikeluarkan oleh sinar matahari sebenarnya hanya diterima oleh permukaan bumi sebesar 69% dari total energi pancaran matahari. Suplai energi surya dari sinar matahari yang diterima oleh permukaan bumi sangat luar biasa besarnya, yaitu mencapai 3×10^{24} joule pertahun. Energi ini setara dengan 2×10^{17} Watt. Jumlah energi sebesar itu setara dengan 10.000 kali konsumsi energi di seluruh dunia saat ini. Dengan kata lain, dengan menutup 0,1% permukaan bumi dengan *solar cell device* yang memiliki efisiensi 10% sudah mampu untuk menutupi kebutuhan energi di seluruh dunia saat ini.

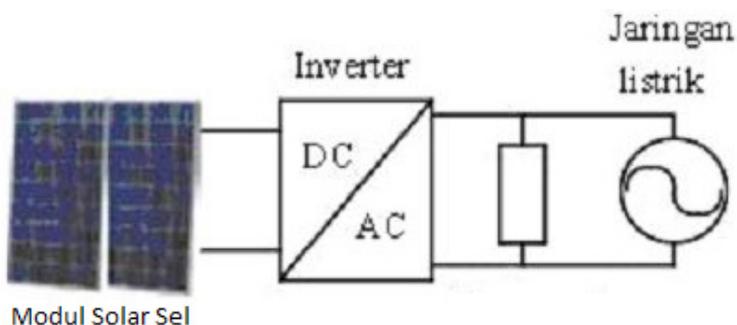
Pada tengah hari yang cerah, radiasi sinar matahari mampu mencapai 1000 Watt/m². Jika sebuah *semiconductor device* seluas 1 m² memiliki efisiensi 10%, modul sel surya ini mampu memberikan tenaga listrik sebesar 100 Watt. Saat ini, efisiensi modul sel surya komersial berkisar antara 5 – 15%, tergantung material penyusunnya.

Sel surya yang dihasilkan bisa dibentuk seperti genteng, jendela, atau bentuk bagian bangunan lainnya karena fleksibel. Hambatan utama dari penerapan teknologi ini adalah mahalnya teknologi peralatan yang dipakai untuk memproduksinya. Teknologi terbaru yang masih dalam tahap pengembangan adalah sel surya berbasis bahan organik. Teknologi yang digunakan berbeda jauh dengan teknologi sel surya konvensional. Jika teknologi manufaktur yang murah bisa diciptakan, sel surya organik semacam ini bisa jauh lebih murah dibanding sel surya konvensional.

Masalah utama penggunaan energi surya untuk PLTS adalah ketersediannya. Energi matahari hanya tersedia di siang hari. Oleh sebab itu, PLTS harus bekerjasama dengan pembangkit lain untuk meningkatkan keandalannya. Untuk itu, tegangan DC yang dihasilkan oleh modul fotovoltaik harus diubah menjadi tegangan AC dengan menggunakan in-

verter. Tegangan bolak-balik yang dihasilkan inverter harus mempunyai bentuk dan frekuensi yang baik agar bisa diparalelkan dengan jaringan listrik yang ada.

Gambar 7.1 memperlihatkan skema PLTS skala kecil yang dipakai untuk skala rumah tangga. Tegangan DC yang dihasilkan sel surya diubah menjadi tegangan AC dengan menggunakan inverter. Inverter diparalelkan dengan tegangan jala-jala (misal PLN). Sebagian energi listrik yang dihasilkan sel surya akan dikonsumsi sendiri. Jika berlebih, energi listrik yang dihasilkan bisa dijual ke jaringan PLN. Pembangkit listrik semacam ini tidak memerlukan baterai sebagai penyimpan energi.



Gambar 7.1 Pembangkit listrik tenaga surya

PLTS tidak hanya berguna bagi rakyat Indonesia yang tinggal di daerah kepulauan untuk meningkatkan kemandirian di bidang energy, tetapi juga berguna bagi penduduk pulau Jawa yang ingin mengurangi beban PLN atau mengurangi emisi CO₂. Di banding pembangkit batu bara, PLTS mempunyai peluang mengurangi lebih dari 1 kg CO₂ untuk setiap kWh energi listrik yang dibangkitkannya. Pemasangan PLTS bisa digunakan untuk meningkatkan *image* perusahaan dalam memperoleh sertifikat ramah lingkungan. Di banyak negara maju, memiliki sertifikat ramah lingkungan terbukti sangat berguna dalam menarik investor dan menaikkan harga saham.

Sampai tahun 2025, Pemerintah Indonesia berencana memasang PLTS sampai 1000 MW. Jika melihat kebutuhan akan PLTS dunia, peluang bisnis PLTS sangatlah besar. Sayangnya, hanya sedikit orang Indonesia yang menguasai teknologi ini. Tidak ada industri di Indonesia yang memproduksi sel surya, biasanya baru terbatas merakitnya. Seperti halnya pembangkit listrik energi terbarukan lainnya, hanya sedikit orang atau industri di Indonesia yang menguasai teknologi elektronika daya yang diperlukan dalam PLTS. *Terus naiknya pasar pembangkit listrik berbasis PLTS harus digunakan sebagai momentum untuk mempersiapkan diri sehingga rakyat Indonesia tidak hanya menjadi konsumen dan penonton. Persiapan ini harus mencakup persiapan sumber daya manusia, industri, dan peraturannya. Hambatan subsidi yang menyebabkan penerapan PLTS kurang ekonomis harus secara bertahap diatasi.*

Suplai energi surya dari sinar matahari yang diterima oleh permukaan bumi sebenarnya sangat luar biasa besarnya, yaitu mencapai 3×10^{24} joule pertahun. Jumlah energi sebesar itu setara dengan 10.000 kali konsumsi energi di seluruh dunia saat ini. Dengan kata lain, menutup 0,1% permukaan bumi dengan *solar cell device* yang memiliki efisiensi 10% mampu menutupi kebutuhan energi di seluruh dunia saat ini. Perkembangan yang pesat dari industri sel surya (*solar cell*) telah menyentuh level 1000 MW pada tahun 2004 sehingga membuat banyak kalangan semakin melirik sumber energi masa depan yang sangat menjanjikan ini. Cara kerja sel surya adalah dengan memanfaatkan teori cahaya sebagai partikel. Sebagaimana diketahui, cahaya baik yang tampak maupun yang tidak tampak memiliki dua buah sifat, yaitu dapat sebagai gelombang dan sebagai partikel yang disebut dengan *photon*. Penemuan ini pertama kali diungkapkan oleh Einstein pada tahun 1905. Frekuensi λ dipancarkan oleh sebuah cahaya dengan panjang gelombang *photon* V yang dirumuskan dengan persamaan berikut.

$$E = h.c/\lambda \quad (7.1)$$

Dengan h adalah konstanta *Plancks* (6.62×10^{-34} J.s) dan c adalah kecepatan cahaya dalam vakum (3.00×10^8 m/s). Persamaan di atas juga menunjukkan bahwa *photon* dapat dilihat sebagai sebuah partikel energi atau sebagai gelombang dengan panjang gelombang dan frekuensi tertentu [3]. Dengan menggunakan sebuah *semiconductor device* yang memiliki permukaan yang luas dan terdiri dari rangkaian dioda tipe p dan n, cahaya yang datang akan mampu dirubah menjadi energi listrik.

Hingga saat ini, terdapat beberapa jenis sel surya yang berhasil dikembangkan oleh para peneliti. Pengembangan tersebut bertujuan mendapatkan *solar cell device* yang memiliki efisiensi yang tinggi, biaya yang murah, dan mudah dalam pembuatannya. Berikut jenis-jenis sel surya yang telah dikembangkan.

1. Tipe pertama yang berhasil dikembangkan oleh para peneliti adalah jenis wafer (berlapis) silikon kristal tunggal. Tipe ini, dalam perkembangannya, mampu menghasilkan efisiensi yang sangat tinggi. Masalah terbesar yang dihadapi dalam pengembangan silikon kristal tunggal untuk dapat diproduksi secara komersial adalah harga yang sangat tinggi sehingga membuat panel sel surya yang dihasilkan menjadi tidak efisien sebagai sumber energi alternatif. Sebagian besar silikon kristal tunggal komersial memiliki efisiensi pada kisaran 16% @ 17%. Bahkan, silikon sel surya hasil produksi SunPower memiliki efisiensi hingga 20%. Bersama perusahaan Shell Solar, SunPower menjadi perusahaan yang menguasai pasar silikon kristal tunggal untuk sel surya.
2. Tipe sel surya kedua adalah tipe wafer silikon poli kristal. Saat ini, hampir sebagian besar panel sel surya yang beredar di pasar komersial berasal dari *screen printing* jenis silikon poli kristal ini.

Wafer silikon poli kristal dibuat dengan cara membuat lapisan lapisan tipis dari batang silikon dengan metode *wire-sawing*. Masing-masing lapisan memiliki ketebalan sekitar 250350 mikrometer. Jenis sel surya tipe ini memiliki harga pembuatan yang lebih murah, meskipun tingkat efisiensinya lebih rendah jika dibandingkan dengan silikon kristal tunggal. Perusahaan yang aktif memproduksi tipe sel surya ini adalah GT Solar, BP, Sharp, dan Kyocera Solar.

Kedua jenis silikon wafer di atas dikenal sabagai generasi pertama dari sel surya yang memiliki ketebalan pada kisaran 180-240 mikrometer. Penelitian yang lebih dulu dan telah lama dilakukan oleh para peneliti menjadikan sel surya berbasis silikon ini menjadi teknologi yang berkembang dan banyak dikuasai oleh peneliti maupun dunia industri. *Solar cell device* ini, dalam perkembangannya, telah mampu mencapai usia aktif 25 tahun. Modifikasi untuk membuat biaya pembuatan lebih rendah juga dilakukan dengan membuat pita silikon, yaitu dengan membuat lapisan dari cairan silikon dan membentuknya dalam struktur multi kristal. Meskipun tipe sel surya pita silikon ini memiliki efisiensi yang lebih rendah (13–15%), tetapi biaya produksinya bisa lebih dihemat, mengingat silikon yang terbuang dengan menggunakan cairan silikon akan lebih sedikit.

Generasi kedua sel surya adalah tipe lapisan tipis (*thin film*). Ide pembuatan jenis sel surya lapisan tipis adalah untuk mengurangi biaya pembuatan sel surya, mengingat tipe ini hanya menggunakan kurang dari 1% dari bahan baku silikon jika dibandingkan dengan bahan baku untuk tipe silikon wafer. Dengan penghematan yang tinggi pada bahun baku, harga per Kwh energi yang dibangkitkan menjadi lebih murah.

Metode yang paling sering dipakai dalam pembuatan silikon jenis

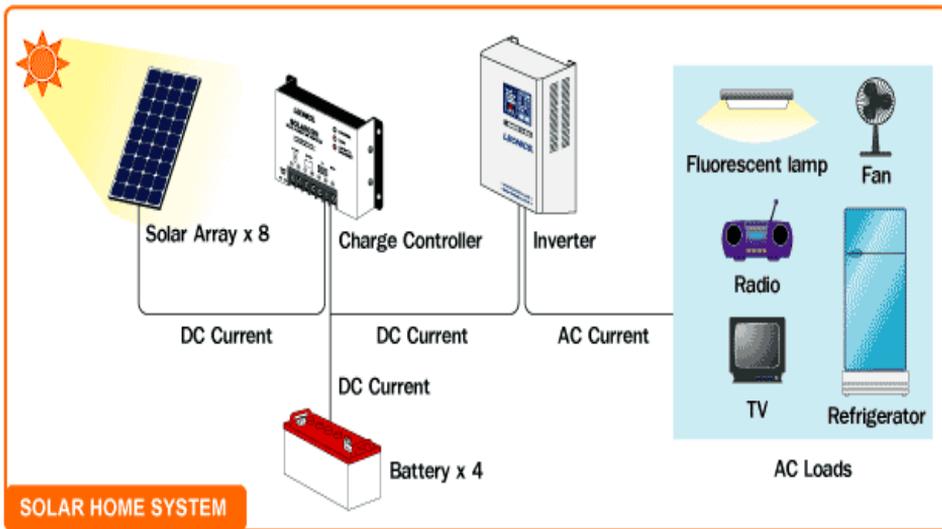
lapisan tipis ini adalah dengan PECVD dari gas *silane* dan hidrogen. Lapisan yang dibuat dengan metode ini menghasilkan silikon yang tidak memiliki arah orientasi kristal atau yang dikenal sebagai *amorphous* silikon (non kristal). Selain menggunakan material dari silikon, sel surya lapisan tipis juga dibuat dari bahan semikonduktor lainnya yang memiliki efisiensi sel surya tinggi seperti *Cadmium Telluride* (Cd Te) dan *Copper Indium Gallium Selenide* (CIGS).

Saat ini, efisiensi tertinggi yang bisa dihasilkan oleh jenis sel surya lapisan tipis ini adalah sebesar 19,5% yang berasal dari sel surya CIGS. Keunggulan lain dari tipe lapisan tipis adalah semikonduktor sebagai lapisan sel surya bisa dideposisi pada substrat yang lentur sehingga menghasilkan *solar cell device* yang fleksibel. Kedua generasi sel surya ini masih mendominasi pasaran sel surya di seluruh dunia dengan silikon kristal tunggal dan multi kristal memiliki lebih dari 84% sel surya yang ada di pasaran.

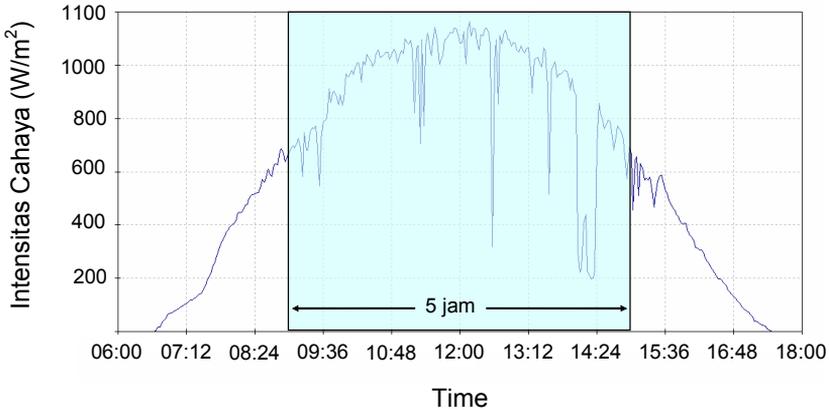
Penelitian agar harga sel surya menjadi lebih murah selanjutnya memunculkan generasi ketiga dari jenis sel surya ini, yaitu tipe sel surya polimer atau disebut juga dengan sel surya organik dan tipe sel surya foto elektrokimia. Sel surya organik dibuat dari bahan semikonduktor organik seperti *polyphenylene vinylene* dan *fullerene*.

Berbeda dengan tipe sel surya generasi pertama dan kedua yang menjadikan pembangkitan pasangan elektron dan *hole* dengan photon dari sinar matahari sebagai proses utamanya, pada sel surya generasi ketiga ini, photon tidak harus menghasilkan pasangan muatan tersebut, melainkan membangkitkan *exciton*. *Exciton* inilah yang kemudian berdifusi pada dua permukaan bahan konduktor (yang biasanya direkatkan dengan organik semikonduktor yang berada di antara dua keping konduktor) untuk menghasilkan pasangan muatan dan efek arus foto (*photo-current*). Tipe sel surya fotokimia merupakan jenis sel surya *exciton* yang

terdiri dari sebuah lapisan partikel nano (biasanya titanium dioksida) yang diendapkan dalam sebuah perendam (*dye*). Jenis ini pertama kali diperkenalkan oleh Profesor Graetzel pada tahun 1991 sehingga sering juga disebut dengan *Graetzel cell* atau *dye-sensitized solar cell* (DSSC). *Graetzel cell* ini dilengkapi dengan pasangan *redok* yang diletakkan dalam sebuah elektrolit (bisa berupa padat atau cairan). Komposisi penyusun sel surya seperti ini memungkinkan bahan baku pembuat *Graetzel cell* lebih fleksibel dan bisa dibuat dengan metode yang sangat sederhana seperti *screen printing*. Meskipun sel surya generasi ketiga ini masih memiliki masalah besar dalam hal efisiensi dan usia aktif sel yang masih terlalu singkat, jenis ini akan mampu memberi pengaruh besar dalam sepuluh tahun ke depan, mengingat harga dan proses pembuatannya yang sangat murah.



Gambar 7.2. Sistem pembangkit listrik tenaga surya untuk keperluan rumah tangga (*solar home system*)



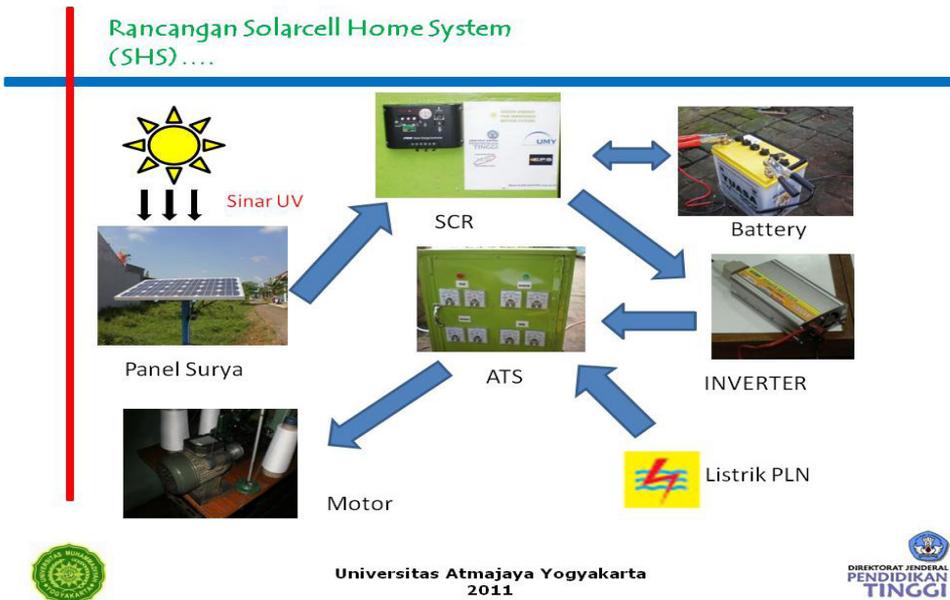
Gambar 7.3. Insulasi harian matahari

Insulasi matahari (Gambar 7.3) dapat ditentukan sebagai berikut.

1. Insulasi sinar matahari dapat diperkirakan keadaannya dengan meramalkan kondisi cuaca.
2. Data prakiraan cuaca berupa lama matahari memancarkan sinarnya bisa kita peroleh dari badan meteorologi dan geofisika.
3. Waktu lamanya matahari memancarkan sinarnya dikonversi ke dalam *peak sun hours*.

B. Implementasi Sel Surya

Pada subbab berikut ini ditampilkan hasil penelitian Ilham Lutfil Anam dan kawan-kawan, mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta (UMY). Dalam hal ini, penulis berperan sebagai dosen pembimbing penelitian. Penelitian dilakukan dalam rangka Program Kreativitas Mahasiswa (PKM) tahun 2011 dan berhasil lolos ke PIMNAS XXIV di Makassar, Sulawesi Selatan. Penelitian yang dimaksud adalah implementasi *Solar Home System* (SHS) guna membantu UKM konveksi di Kabupaten Jepara. Rancangan SHS dapat dilihat pada Gambar 7.4.



Gambar 7.4. Skema rancangan SHS

Sakelar otomatis (*Automatic Transfer Switch*) berfungsi untuk memindahkan sakelar ON listrik SHS ketika listrik PLN padam (SHS sebagai energi cadangan) dan ke OFF ketika listrik PLN kembali menyala.

Hasil-hasil uji dan analisis SHS adalah sebagai berikut.

1. Pengujian dengan spesifikasi motor 1:

Jenis motor	: Motor AC
Daya	: 1/16 Hp atau 46.63 watt
Tegangan	: 220 volt
Arus	: 0.2 A
Frekuensi	: 50 Hz
Tempat Pengujian	: Laboratorium Teknik Elektro UMY



a. ATS tampak depan



b. ATS bagian dalam



c. ATS tampak belakang

Gambar 7.5. *Automatic Transfer Switch (ATS)*

Tabel 7.1. Beban dihubungkan ke sumber listrik PLN

Jam	Sel Surya		Baterai		PLN		Inverter		Keterangan
	V	A	V	A	V	A	V	A	
07.00	15,73	0,30	11,75	0,44	212	0,23	212	-	
07.30	15,65	0,67	11,74	0,44	208	0,21	213	-	
08.00	16,25	1,02	11,76	0,44	197	0,21	215	-	
08.30	16,40	1,73	11,78	0,44	196	0,22	216	-	
09.00	17,80	1,85	11,80	0,44	198	0,2	216	-	
09.30	18,50	2,00	12,00	0,44	197	0,18	216	-	
10.00	19,01	2,10	12,04	0,44	194	0,18	217	-	
10.30	19,01	2,15	12,21	0,44	187	0,19	218	-	
11.00	19,08	2,30	12,25	0,44	186	0,17	218	-	
11.30	19,11	2,23	12,30	0,44	186	0,18	220	-	
12.00	19,13	2,28	12,39	0,44	200	0,2	218	-	
12.30	19,17	2,34	12,45	0,44	204	0,19	219	-	
13.00	19,22	2,38	12,55	0,44	198	0,18	220	-	
13.30	19,10	2,44	13,04	0,44	196	0,18	218	-	
14.00	19,00	2,21	13,24	0,44	187	0,18	218	-	
14.30	18,40	2,10	13,34	0,44	189	0,17	217	-	
15.00	18,10	1,98	13,49	0,44	188	0,18	217	-	
15.30	18,03	1,76	13,54	0,44	188	0,18	217	-	
16.00	18,00	1,34	13,60	0,44	189	0,18	216	-	
16.30	17,25	1,21	13,64	0,44	197	0,18	217	-	
17.00	17,04	0,87	13,70	0,44	198	0,18	216	-	

Tabel 7.2. Beban dihubungkan ke sumber listrik SHS

Jam	Baterai		PLN		Inverter		Keterangan
	V	A	V	A	V	A	
19.30	13,68	0,38	187	-	210	0,23	
20.00	12,74	0,36	189	-	212	0,2	
20.30	12,66	0,37	185	-	215	0,21	
21.00	12,48	0,38	198	-	217	0,22	
21.30	12,40	0,38	198	-	218	0,19	
22.00	12,34	0,38	197	-	219	0,18	
22.30	12,05	0,37	194	-	209	0,18	
23.00	11,88	0,35	200	-	198	0,19	
23.30	11,78	0,37	211	-	200	0,18	
00.00	11,65	0,36	212	-	197	0,17	

Dari Tabel 7.1 dan 7.2, dapat dilihat bahwa setelah sel surya disinari cahaya matahari selama 10 jam, sel surya dapat digunakan dengan beban daya 46,6 watt selama 4,5 jam. Dalam hal ini, dapat dijabarkan sebagai berikut.

- Spesifikasi sel surya : 50 Wp
- Lama penjemuran maksimal : 4 Jam
- Daya yang dihasilkan 50 x 4 : 200 Wp
- Lama pemakaian : $200/46,6 = 4,3$ jam.

2. Pengujian dengan spesifikasi motor 2:

- Jenis motor : Motor AC
- Daya : 0,17 HP atau 125 watt
- Tegangan : 220 volt

Arus : 0,6 A
 Putaran motor : 2850 rpm
 Frekuensi : 50 Hz
 Tempat pengujian : UMKM (Hari Pertama)

Tabel 7.3 Beban dihubungkan ke sumber listrik PLN

Jam	Sel Surya		Baterai		PLN		Inverter		Keterangan
	V	A	V	A	V	A	V	A	
07.00	14,45	0,42	11,68	0,42	210	-	220	-	Belum ada beban
07.30	14,46	0,40	11,67	0,42	210	-	218	-	Belum ada beban
08.00	15,55	1,64	11,77	0,42	197	0,58	218	-	
08.30	16,40	1,66	11,74	0,42	196	0,52	219	-	
09.00	18,74	2,00	11,87	0,42	198	0,52	221	-	
09.30	18,80	2,21	12,00	0,42	197	0,47	218	-	
10.00	19,38	2,23	12,24	0,42	194	0,47	220	-	
10.30	19,24	2,44	12,23	0,42	187	0,48	220	-	
11.00	19,50	2,44	12,34	0,42	186	0,47	220	-	
11.30	19,87	2,54	12,31	0,42	186	0,48	218	-	
12.00	19,80	2,54	12,34	0,42	200	-	218	-	Belum ada beban
12.30	19,88	2,55	12,34	0,42	204	-	218	-	Belum ada beban
13.00	19,87	2,55	12,45	0,42	198	0,47	217	-	
13.30	19,78	2,53	13,00	0,42	196	0,48	215	-	
14.00	19,83	2,54	13,41	0,42	187	0,48	214	-	
14.30	18,86	2,44	13,41	0,42	189	0,46	213	-	
15.00	18,20	2,2	13,42	0,42	188	0,42	215	-	

15.30	18,24	1,95	13,43	0,42	188	0,43	216	-	
16.00	18,07	1,94	13,44	0,42	189	0,44	217	-	
16.30	17,57	1,84	13,48	0,42	197	0,45	217	-	
17.00	17,04	1,83	13,68	0,42	198	0,4	217	-	

Tabel 7.4 Beban dihubungkan ke sumber listrik SHS

Jam	Baterai		PLN		Inverter		Keterangan
	V	A	V	A	V	A	
19.30	13,68	0,42	187	-	212	0,53	
20.00	13,74	0,43	189	-	208	0,50	
20.30	12,65	0,43	185	-	210	0,48	
21.00	12,49	0,42	198	-	215	0,47	
21.30	12,22	0,42	198	-	214	0,48	
21.45	11,67	0,43	197	-	196	0,46	

Dari tabel di atas, dapat dilihat bahwa setelah sel surya disinari cahaya matahari selama 10 jam, sel surya dapat digunakan dengan beban berdaya 125 watt selama 2 jam 15 menit. Dalam hal ini, dapat dijabarkan sebagai berikut.

- Spesifikasi sel surya : 50 Wp
- Lama penjemuran maksimal : 5 Jam
- Daya yang dihasilkan 50 x 5 : 250 Wp
- Lama pemakaian : $250/125 = 2$ jam

3. Pengujian dengan spesifikasi motor

- Jenis motor : Motor AC
- Daya : 200 watt

Tegangan : 220 volt
 Arus : 0.8 A
 Putaran motor : -
 Frekuensi : 50 Hz
 Tempat pengujian : UMKM (Hari Kedua)

Tabel 7.5. Beban dihubungkan ke sumber listrik PLN

Jam	Sel Surya		Baterai		PLN		Inverter		Keterangan
	V	A	V	A	V	A	V	A	
07.00	15,44	0,44	11,66	0,43	209	-	222	-	Belum ada beban
07.30	15,46	0,41	11,68	0,43	207	-	217	-	Belum ada beban
08.00	15,55	1,60	11,72	0,43	187	1,58	217	-	
08.30	15,40	1,58	11,73	0,43	185	1,2	218	-	
09.00	16,74	2,02	11,75	0,43	188	1	219	-	
09.30	17,50	2,03	11,84	0,43	190	1	217	-	
10.00	18,59	2,24	12,21	0,43	194	1	216	-	
10.30	19,24	2,33	12,32	0,43	189	1	217	-	
11.00	19,50	2,35	12,44	0,43	190	0,87	217	-	
11.30	19,77	2,34	12,48	0,43	187	1	218	-	
12.00	19,78	2,35	12,49	0,43	208	-	217	-	Belum ada beban
12.30	19,88	2,45	12,54	0,43	205	-	217	-	Belum ada beban
13.00	19,86	2,44	12,52	0,43	178	1	216	-	
13.30	19,80	2,50	13,02	0,43	177	1	214	-	
14.00	19,80	2,52	13,26	0,43	180	1	213	-	
14.30	18,87	2,51	13,45	0,43	184	1	214	-	

15.00	18,98	2,32	13,43	0,43	185	1	214	-	
15.30	18,80	2,30	13,49	0,43	184	0,97	214	-	
16.00	18,30	1,98	13,54	0,43	185	0,95	215	-	
16.30	17,67	1,94	13,52	0,43	185	0,96	214	-	
17.00	17,65	1,92	13,58	0,43	185	1	213	-	

Tabel 7.6. Beban dihubungkan ke sumber listrik SHS

Jam	Baterai		PLN		Inverter		Keterangan
	V	A	V	A	V	A	
19.30	13,60	0,47	189	-	220	1,53	
20.00	12,45	0,46	188	-	217	1	
20.51	11,64	0,44	190	-	215	0,8	

Dari Tabel 7.3 sampai 7.6, dapat dilihat bahwa setelah sel surya disinari cahaya matahari selama 10 jam, sel surya dapat digunakan dengan beban daya 200 watt selama 1 jam 21 menit. Dalam hal ini, dapat dijabarkan sebagai berikut.

- Spesifikasi sel surya : 50 Wp
- Lama penjemuran maksimal : 5,5 Jam
- Daya yang dihasilkan 50 x 5 : 275 Wp
- Lama pemakaian : $275/200 = 1 \text{ jam } 30 \text{ menit}$

Beban yang ada di UMKM

1. 2 motor mesin pemotong @ 50 watt : 100 watt
2. 1 motor mesin jahit : 120 watt
3. 1 motor mesin obras : 125 watt
4. 1 mesin karet atau kolor : 200 watt

5. Lampu penerangan	:	80 watt
Total Daya	:	625 watt
Rata- rata daya perhari	:	250 Wp
1 bulan 250 x 30 hari	:	7500 Wp

Perkiraan listrik mati dalam 1 bulan adalah 4 jam. Dengan demikian,

$$4 \times 625 \text{ watt} = 2500 \text{ Watt}$$

$$\text{Jadi, sisa energi} = 7500 - 2500 = 5000 \text{ Wp}$$

$$\text{Sisa energi (waktu)} = 5000/625 = 8 \text{ Jam}$$

Latihan:

1. Jelaskan prinsip kerja pembangkit listrik tenaga surya!
2. Jelaskan klasifikasi-klasifikasi sel surya!
3. Jelaskanlah besarnya energi listrik yang dihasilkan dari matahari di bumi pada daerah tropis!
4. Jelaskan potensi pembangkit listrik tenaga surya di Indonesia dan dunia!
5. Berikan pendapat Anda tentang prospek pembangkit listrik tenaga surya di masa mendatang!•

BAB VIII

Pembangkit Listrik Tenaga Angin

TUJUAN Instruksional Umum:

Memberikan wawasan tentang pembangkit listrik tenaga angin yang merupakan salah satu sumber daya listrik energi terbarukan yang ramah lingkungan

Tujuan Instruksional Khusus:

1. Memberikan pengetahuan tentang latar belakang pembangkit listrik tenaga angin
2. Memberikan pengetahuan tentang prinsip kerja pembangkit listrik tenaga angin
3. Memberikan pengetahuan tentang sejarah dan perkembangan pembangkit listrik tenaga angin
4. Memberikan pengetahuan tentang contoh simulasi dan pengendalian pembangkit listrik tenaga angin

A. Pendahuluan

Pembangkit listrik tenaga angin (PLTAngin) mengalami perkembangan yang sangat pesat dalam 20 tahun terakhir, terutama di belahan Eropa

utara. Jerman dan Denmark telah menggunakan tenaga angin untuk membangkitkan hampir 20% kebutuhan energi listriknya. Pada akhir tahun 2010, diperkirakan PLTAngin terpasang di dunia mencapai lebih dari 150 GW.

Sebagai negara yang berada di ekuator, potensi PLTAngin di Indonesia memang tidak terlalu besar. Akan tetapi, berdasarkan data yang ada, ada beberapa daerah di Indonesia, misal NTB dan NTT, yang mempunyai potensi bagus. Sebagian besar daerah di Indonesia mempunyai kecepatan angin rata-rata sekitar 4 m/s, kecuali di dua provinsi tersebut. Oleh sebab itu, PLTAngin yang cocok dikembangkan di Indonesia adalah pembangkit dengan kapasitas di bawah 100 kW. Tentu saja ini berbeda dengan Eropa yang berkonsentrasi untuk mengembangkan PLTAngin dengan kapasitas di atas 1 MW atau lebih besar lagi untuk dibangun di lepas pantai.

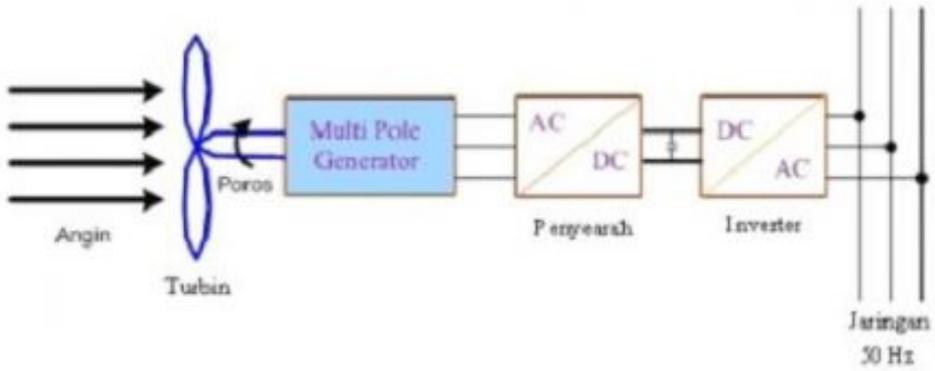
Masalah utama dari penggunaan PLTAngin adalah ketersediaannya yang rendah. Untuk mengatasi masalah ini, PLTAngin harus diope-rasikan secara paralel dengan pembangkit listrik lainnya. Pembangkit listrik lainnya bisa berbasis Sumber Energi Alternatif (SEA) atau pembangkit konvensional. Walaupun sebuah PLTAngin hanya membangkitkan daya kurang dari 100 kW, kita bisa membangun puluhan PLTAngin dalam satu daerah. Dengan memanfaatkan PLTAngin, kebutuhan akan bahan bakar fosil akan jauh berkurang. Selain mengurangi biaya operasi, penggunaan PLTAngin akan meningkatkan jaminan pasokan energi suatu daerah. Di daerah kepulauan seperti NTB dan NTT yang semua kebutuhan energinya harus didatangkan dari daerah lain, keberadaan PLTAngin akan membantu meningkatkan kemandiriannya. Di banding dengan diesel, PLTAngin mempunyai potensi mengurangi emisi CO₂ sebesar 700 gram untuk setiap kWh energi listrik yang dibangkitkan.

B. Komponen Dasar PLTAngin

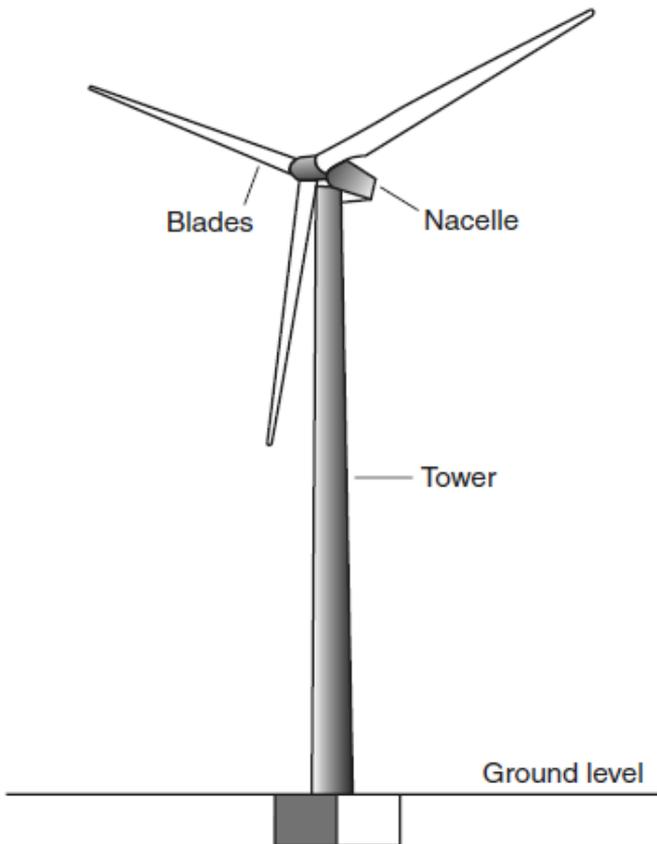
Gambar 8.1 memperlihatkan skema PLTAngin yang cocok untuk

daya kurang dari 100 kW. Turbin angin memutar generator tegangan bolak-balik. Kecepatan angin berubah-ubah sehingga tegangan AC yang dihasilkan generator juga mempunyai frekuensi yang berubah-ubah. Tegangan AC yang frekuensinya berubah-ubah ini harus diubah menjadi tegangan DC yang tetap menggunakan penyearah. Tegangan DC ini selanjutnya diubah menjadi tegangan AC frekuensi 50 Hz menggunakan inverter. Keluaran inverter diparalel dengan jaringan listrik yang ada. Dengan menggunakan konsep ini, semua energi listrik yang dibangkitkan oleh PLT Angin bisa dikirim ke jaringan untuk dimanfaatkan. Pembangkit semacam ini juga tidak memerlukan baterai yang mahal dan pemeliharaan rutin.

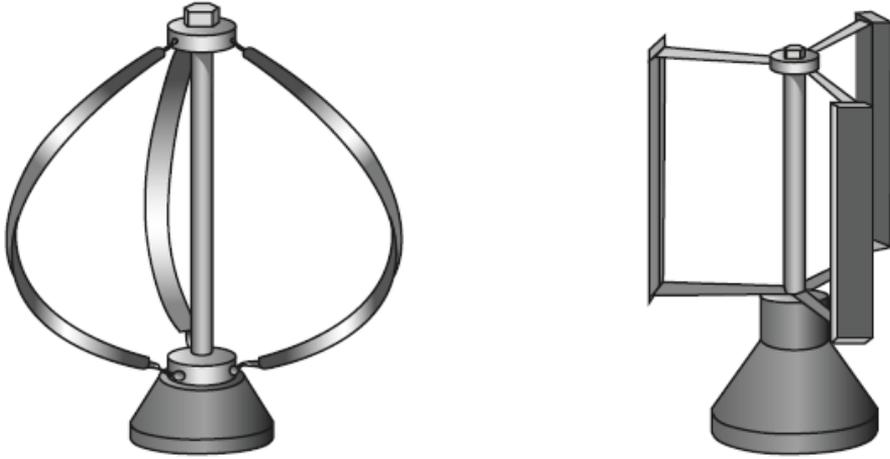
Teknologi turbin atau kincir angin yang diperlukan dalam PLT Angin telah dikuasai oleh SDM di Indonesia. Bahkan, beberapa industri lokal telah mampu membuatnya dengan baik. Dalam hal ini, generator induksi (yang murah dan kokoh) atau generator magnet permanen yang efisien dapat digunakan. Kedua teknologi generator ini telah dikuasai oleh orang Indonesia dan beberapa industri telah mampu membuatnya. Namun, bahan baku yang sebagian besar harus didatangkan dari luar negeri menjadi masalah. Teknologi penyearah dan inverter juga dikuasai oleh orang Indonesia, walaupun industri yang mampu membuatnya masih terbatas. Selain itu, orang yang menguasai teknologi komponen elektronika daya dan industrinya belum ada di Indonesia. Semua komponen elektronika daya harus didatangkan dari luar negeri. Terlebih, peneliti yang mendalami teknologi elektronika daya di Indonesia juga sangat terbatas. Perkembangan kebutuhan akan pembangkit listrik berbasis SEA ini sebaiknya diambil oleh Pemerintah Indonesia untuk mengembangkan industri elektronika daya berserta SDM-nya.



Gambar 8.1. Skema pembangkit listrik tenaga angin



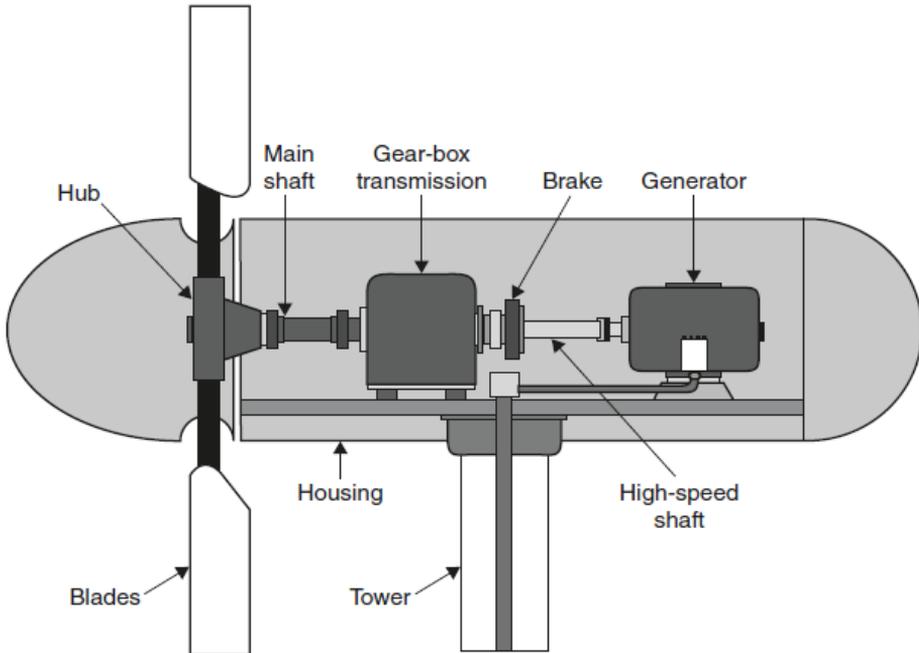
Gambar 8.2. Turbin angin jenis vertikal



Gambar 8.3. Turbin angin jenis horizontal

Pada turbin angin jenis vertikal, seperti ditunjukkan pada Gambar 8.2, seluruh bobot konstruksi turbin ditopang oleh tanah. Perlengkapan transmisi roda gigi (*gear box*) dan generator juga dapat ditempatkan di tanah guna memudahkan perawatan dan meminimalkan biaya *invertasi*. Sebagian besar rancangan turbin angin jenis vertikal akan dioperasikan untuk arah angin yang dapat datang dari beberapa arah sehingga rancangan turbinnya dibuat fleksibel. Selain turbin angin jenis vertikal, dalam aplikasinya juga terdapat turbin angin jenis horizontal, seperti ditunjukkan pada Gambar 8.4.

Turbin angin modern dapat beroperasi dengan putaran 5–20 rpm, sementara generator listrik sebagai pembangkit energi listrik harus beroperasi pada putaran 800–3600 rpm. Oleh karenanya, diperlukan perlengkapan transmisi roda gigi (*gear box*) guna menyesuaikan putaran turbin yang rendah untuk dikonversi sehingga didapatkan putaran generator yang diinginkan pada putaran yang jauh lebih tinggi. Roda gigi ini merupakan bagian penting dalam sistem PLTAngin, seperti diperlihatkan pada Gambar 8.4.



Gambar 8.4. Sistem penggerak turbin angin

Turbin angin mengubah energi kinetik yang terdapat pada angin menjadi energi mekanik guna menghasilkan torsi. Energi yang terkandung dalam angin berupa energi kinetik sehingga besarnya tergantung pada kerapatan udara dan kecepatan angin. Daya angin yang dibangkitkan oleh turbin ditentukan berdasarkan persamaan berikut.

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \quad (8.1)$$

C_p adalah koefisien daya (*Power Co-efficient*), ρ adalah kerapatan udara dalam kg/m^3 , A adalah luas area sudu turbin dalam m^2 , dan V adalah kecepatan angin dalam m/sec . Koefisien daya C_p menghasilkan fraksi energi kinetik yang diubah menjadi energi mekanik oleh turbin angin. Koefisien daya merupakan fungsi rasio kecepatan λ dan tergantung pada sudut sudu turbin untuk turbin terkontrol baling-baling. Rasio kecepatan tersebut dapat didefinisikan sebagai perbandingan kecepatan linear sudu

turbin dan kecepatan angin.

$$\lambda = \frac{R\omega}{v} \quad (8.2)$$

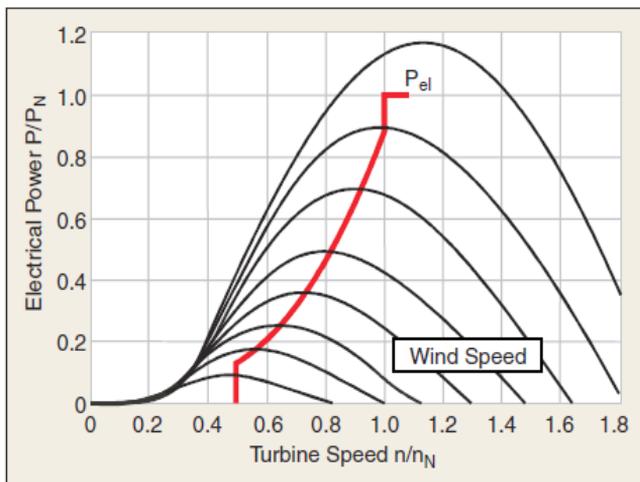
Dengan men-substitusi persamaan (8.1) ke dalam persamaan (8.2), akan diperoleh persamaan yang baru sebagai berikut.

$$P = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho A \left(\frac{R}{\lambda}\right)^3 (\omega)^3 \quad (8.3)$$

Torsi keluaran turbin angin T_{turbin} dapat dihitung menggunakan persamaan

$$P = \frac{1}{2} \rho A C_p \left(\frac{v}{\lambda}\right) \quad (8.4)$$

dengan R adalah jari-jari rotor turbin (m). Turbin kecepatan variabel dapat dibuat untuk menangkap energi yang maksimum pada angin dengan mengoperasikannya secara maksimal. Kondisi ini dapat dicapai dengan mengubah kecepatan turbin proporsional dengan kecepatan angin. Gambar 8.5 menunjukkan bagaimana operasi kecepatan variabel akan membuat turbin menghasilkan energi yang berasal dari angin.



Gambar 8.5. Karakteristik turbin angin

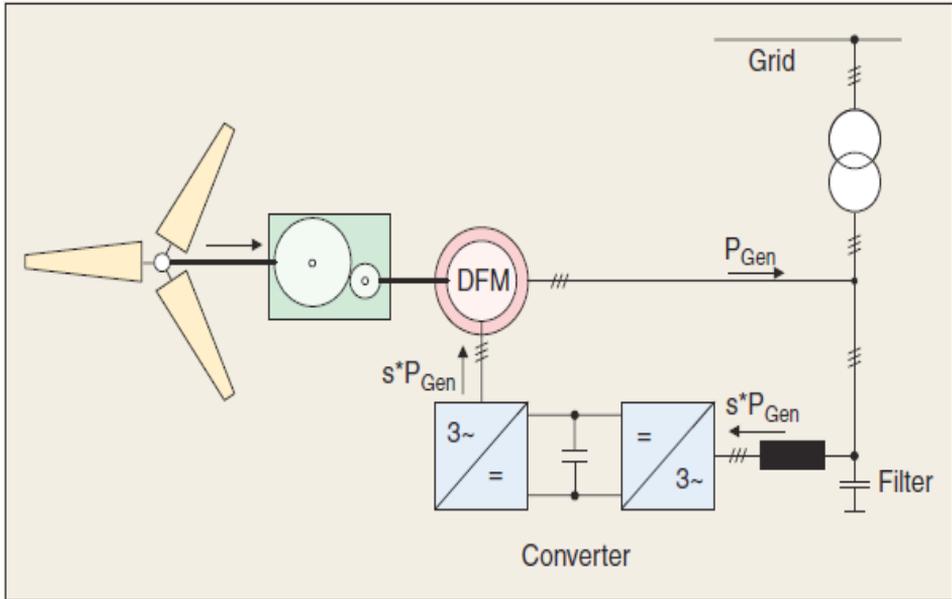
Sebagaimana terlihat pada Gambar 8.5, aliran daya maksimum mengikuti suatu hubungan kubik. Untuk pembangkitan kecepatan variabel, generator induksi harus dibuat atraktif guna mendapatkan karakteristik kecepatan rotor yang fleksibel pada generator sinkronnya.

C. *Doubly-Fed Induction Generator*

Mesin induksi telah digunakan secara luas pada sistem tenaga listrik sebagai motor induksi, tetapi masih jarang digunakan sebagai generator induksi. Walaupun mempunyai keunggulannya dalam hal kesederhanaan konstruksinya, mesin induksi masih sangat jarang digunakan sebagai generator induksi. Hal ini disebabkan terutama karena hubungan antara daya yang dihasilkan P dengan daya yang diserap Q . Akan tetapi, generator induksi mempunyai keuntungan dalam hal memberikan torsi redaman (*damping torque*) pada penggerak mulanya (*prime mover*) sehingga membuatnya dapat diaplikasikan dalam turbin angin berkecepatan tetap. Turbin angin berkecepatan tetap menggunakan mesin induksi rotor jenis sangkar tupai yang digandeng dengan sistem tenaga melalui transformator. Terdapat perbedaan kecepatan putaran rotor turbin angin dan rotor generator sehingga dibutuhkan roda gigi untuk menyesuaikan kedua putaran yang berbeda tersebut. Slip generator berubah-ubah sesuai daya yang dihasilkan dan umumnya tidak konstan.

Konsep dasar *doubly-fed induction generator* (DFIG) ditunjukkan pada Gambar 8.6. Daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin diubah ke dalam bentuk daya listrik oleh generator induksi dan diumpankan ke jaringan listrik (*grid*) melalui belitan stator dan rotor. Belitan rotor terhubung dengan jaringan utama melalui *konverter AC/DC swa-komutasi* (*self-commutated AC/DC converters*) guna mengendalikan *magnitude* dan sudut fase tegangan *slip ring* generator induksi. Berbeda dengan sistem PLT Angin konvensional yang menggunakan *singly-fed induction generator*

(SFIG), daya listrik yang dihasilkan oleh DFIG tidak tergantung pada kecepatan. Akan tetapi, sangat dimungkinkan untuk merealisasikan generator dengan kecepatan angin yang berubah-ubah.



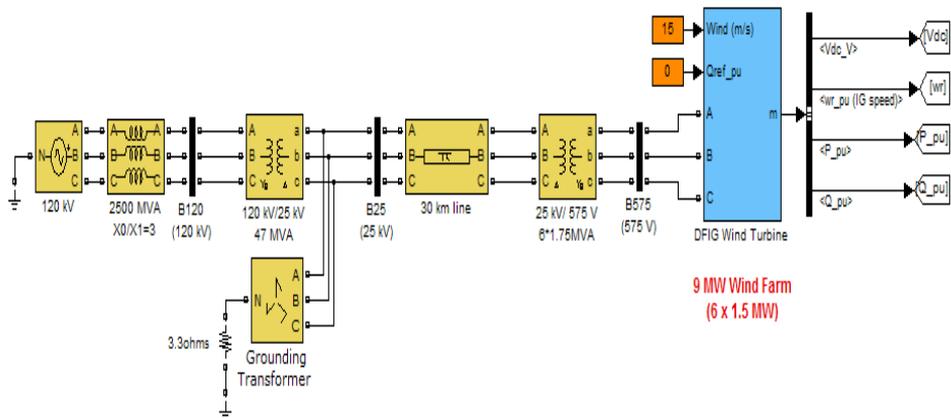
Gambar 8.6. Konsep dasar *doubly-fed induction generator*

Sepuluh dari produsen pembangkit listrik tenaga angin memfokuskan dirinya pada sistem DFIG. Hal ini disebabkan oleh konverter elektronika daya yang hanya dapat menangani sekitar 20%–30% dari total dayanya yang dikenal sebagai daya slip (*slip power*). Dengan kata lain, jika kecepatan berada pada rentang $\pm 30\%$ pada kecepatan sinkronnya, konverternya harus mempunyai kapasitas 30% dari kapasitas daya turbin, mengurangi rugi-rugi (*losses*) pada konverter elektronika daya, dan membandingkan dengan sistem yang konverternya dapat menangani daya total. DFIG telah digunakan dalam turbin angin untuk waktu yang lama. Dalam perkembangan terakhir, konverter AC/AC dihubungkan ke rotor dengan memanfaatkan penyearah dan inverter yang berbasis jembatan

tiristor (*thyristor bridges*). Saat ini, konverter AC/AC telah dilengkapi dengan *bidirectional* IGBT yang menghubungkan rotor kecepatan variabel DFIG ke jaringan listrik ter-interkoneksi.

D. Simulasi PLTAngin

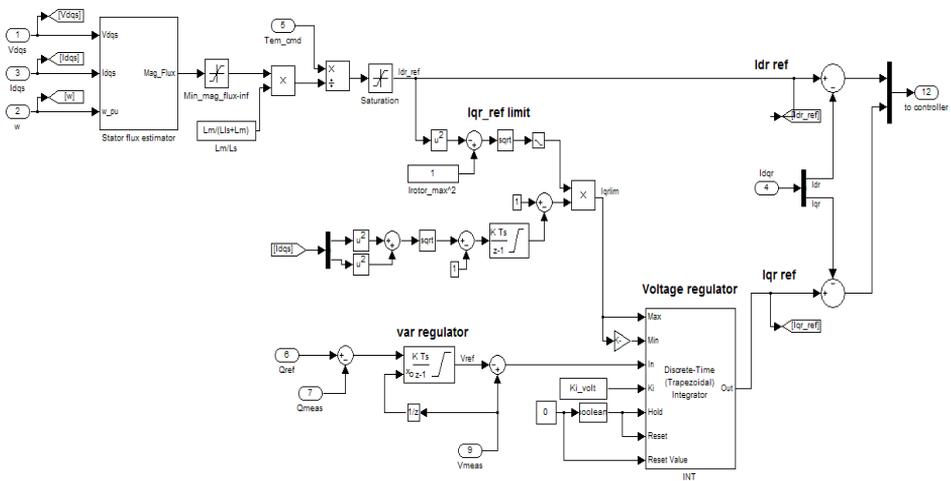
Guna membahas lebih lanjut tentang pembangkit listrik tenaga angin, pada subbab berikut ini akan diuraikan hasil penelitian berupa simulasi PLTAngin dan analisis hasil-hasilnya. Simulasi dilakukan dalam perangkat lunak Simulink-Matlab. Sistem tenaga listrik dengan PLTAngin terdiri dari sebuah PLTAngin 9 MW yang terhubung ke jaringan distribusi. PLTAngin tersebut terdiri dari enam buah turbin, masing-masing berkapasitas 1,5 MW, yang terhubung ke sistem distribusi 25 kV guna mencatu daya listrik untuk diumpankan ke sistem tenaga 120 kV melalui jaringan sepanjang 30 km seperti ditunjukkan pada Gambar 8.7. Suatu beban 500 kW juga dihubungkan ke bus 575 V PLTAngin, sebagaimana diilustrasikan secara lengkap pada Gambar 8.7 di bawah ini.



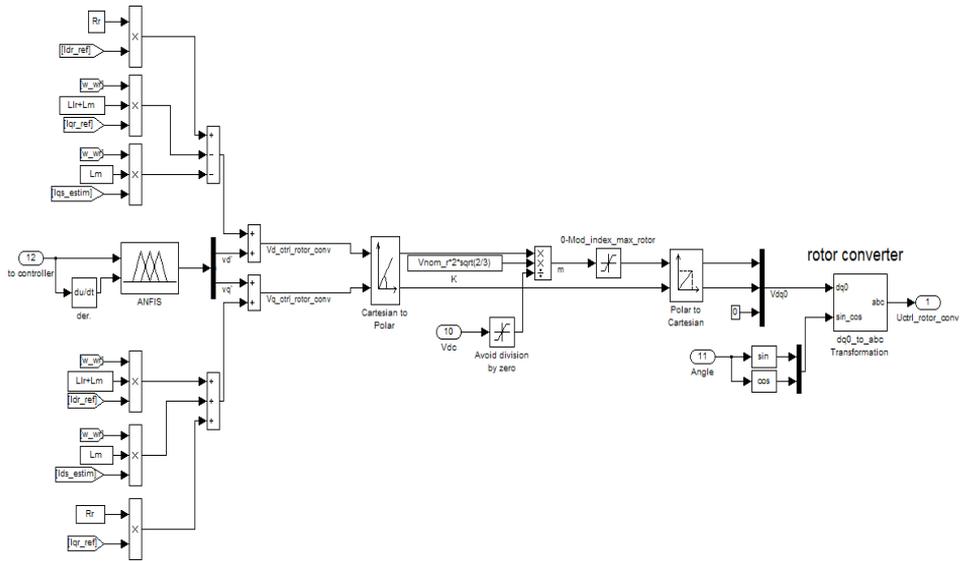
Gambar 8.7. PLTAngin yang terhubung ke jaringan interkoneksi

Pada Gambar 8.8 ditunjukkan kendali DFIG pada sistem konversi energi angin. Turbin angin dan juga beban motor mempunyai sistem

proteksi yang memonitor tegangan, arus, dan kecepatan mesin. Tegangan *link* DC dari DFIG juga dimonitor guna keperluan pengendalian dan proteksi. Turbin angin menggunakan DFIG yang terdiri dari generator induksi rotor belitan dan konverter PWM berbasis IGBT AC/DC/AC. Belitan stator dihubungkan langsung ke sistem tenaga listrik 60 Hz, sedangkan rotor dicatu pada frekuensi variabel melalui konverter AC/DC/AC. Teknologi DFIG menghasilkan PLTAngin untuk kecepatan angin yang rendah dengan mengoptimalkan kecepatan turbin. Kecepatan turbin yang optimal menghasilkan energi mekanik yang maksimal untuk kecepatan angin yang diberikan. Keuntungan lain teknologi DFIG adalah kemampuannya untuk memberdayakan konverter elektronika daya untuk menghasilkan *Turbine Data Menu* dan *Turbine Power Characteristics* untuk menyerap daya reaktif dan mengeliminasi kebutuhan bank kapasitor, sebagaimana diperlukan oleh generator induksi tipe sangkar tupai. Tegangan terminal akan dikendalikan ke nilai paksa tegangan acuan ($V_{ref} = 1$ pu) dan tegangan jatuh ($X_s = 0.02$ pu).



(a) Sisi regulasi tegangan

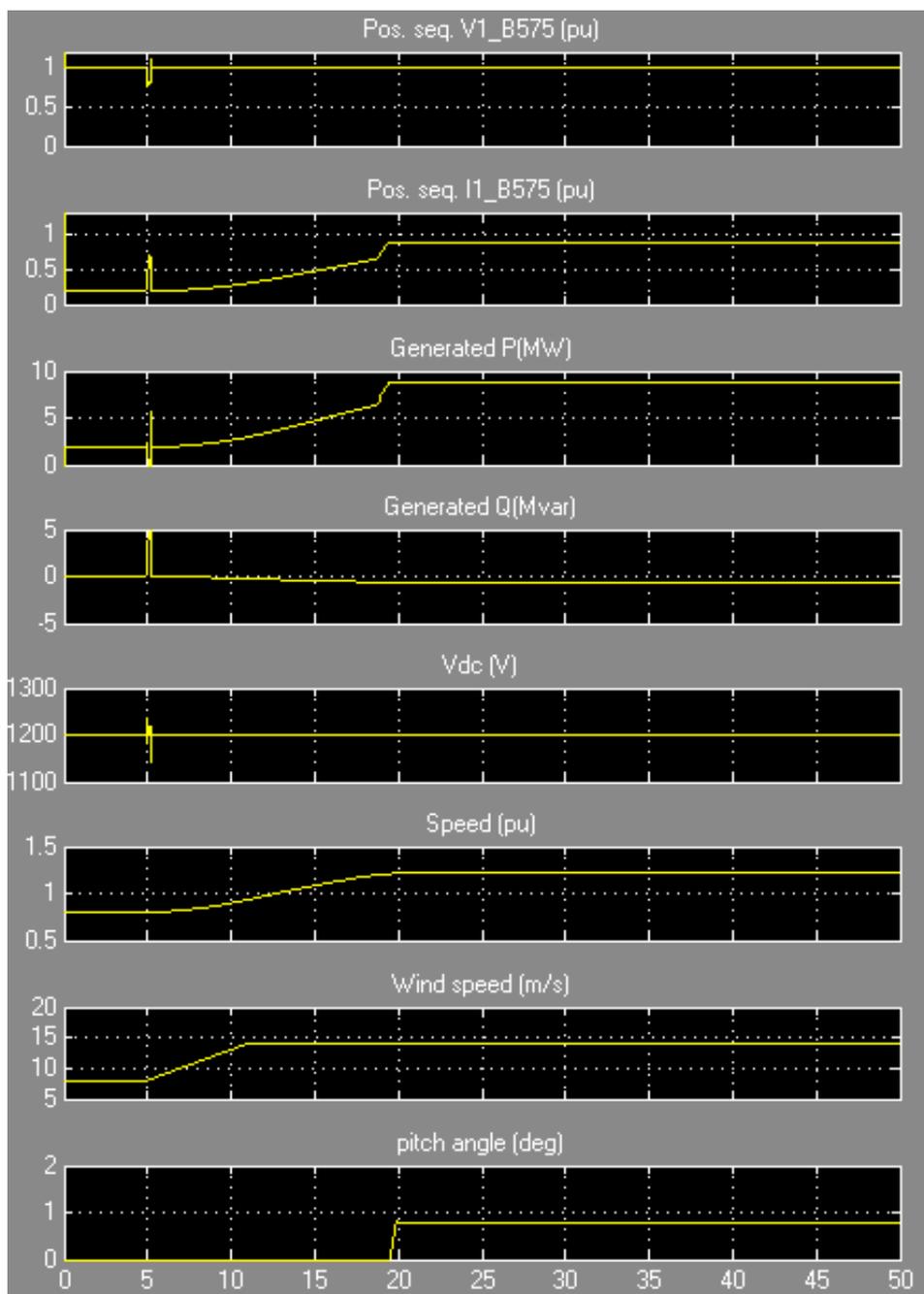


(b) Sisi rotor

Gambar 8.8. Kendali DFIG pada sistem konversi energi angin

1. Simulasi Tanggapan Turbin Terhadap Kecepatan Angin

Pada bagian ini, dilakukan observasi tanggapan turbin angin terhadap perubahan kecepatan angin. Mula-mula, kecepatan angin diset pada kecepatan 8 m/s. Selanjutnya, pada saat $t = 5s$, kecepatan angin meningkat menjadi 14 m/s.



Gambar 8.9. Bentuk-bentuk gelombang terkait regulasi tegangan pada PLTAngin.

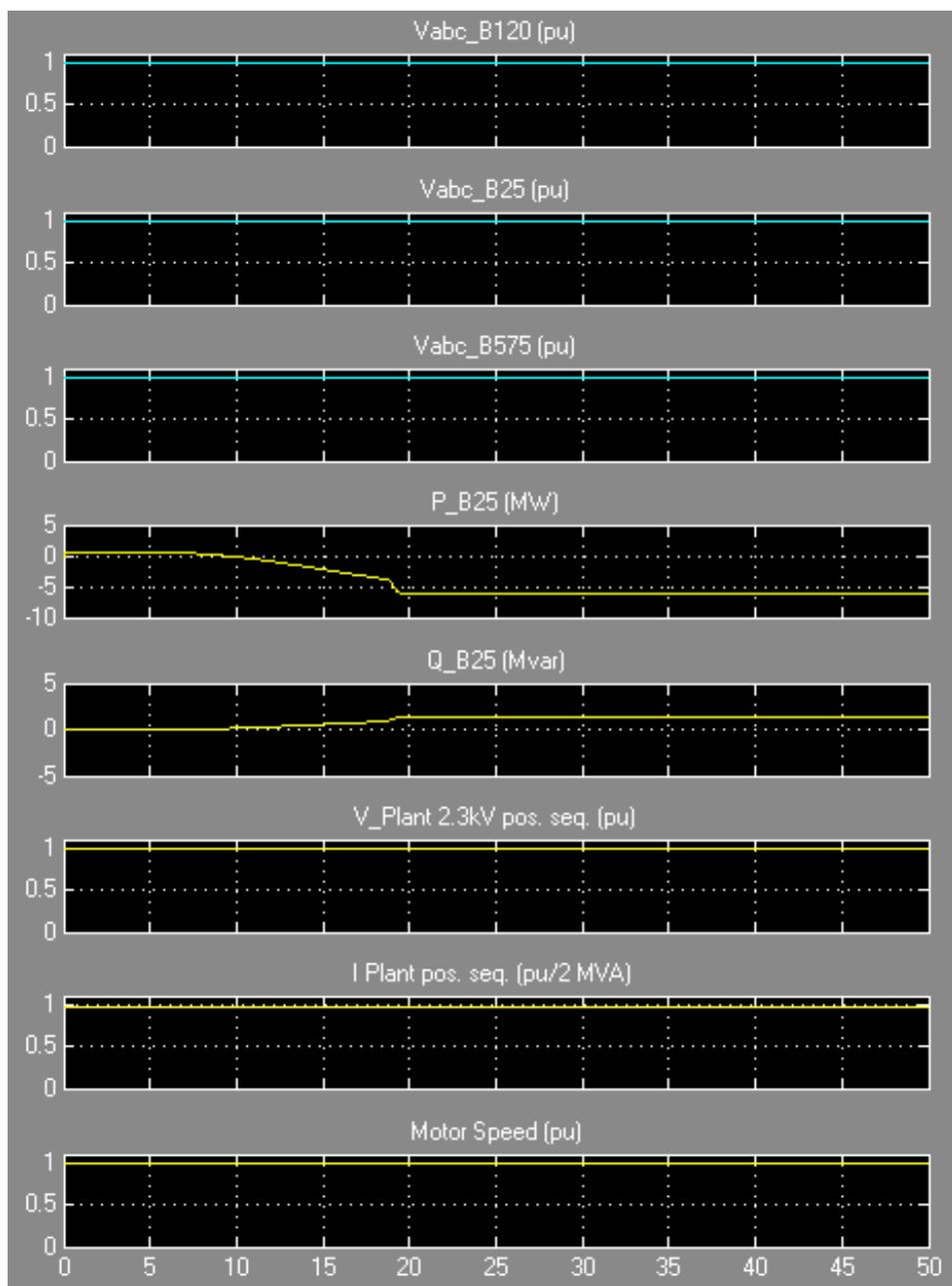
Gambar 8.9 menunjukkan bentuk-bentuk gelombang yang terkait dengan simulasi ini. Pada $t = 5s$, daya aktif yang dihasilkan bergerak meningkat perlahan-lahan (bersamaan dengan meningkatnya kecepatan turbin) untuk mencapai nilai *rated*-nya, yaitu 9 MW dalam waktu sekitar 15 detik. Setelah itu, kecepatan turbin meningkat dari 0.8 pu ke 1.21 pu.

Mula-mula, sudut ruang (*pitch angle*) sudu turbin adalah 0° dan titik operasi turbin mengikuti kurva karakteristik turbin pada titik D. Selanjutnya, sudut tersebut meningkat dari 0° menjadi 0.76° untuk membatasi daya mekanik.

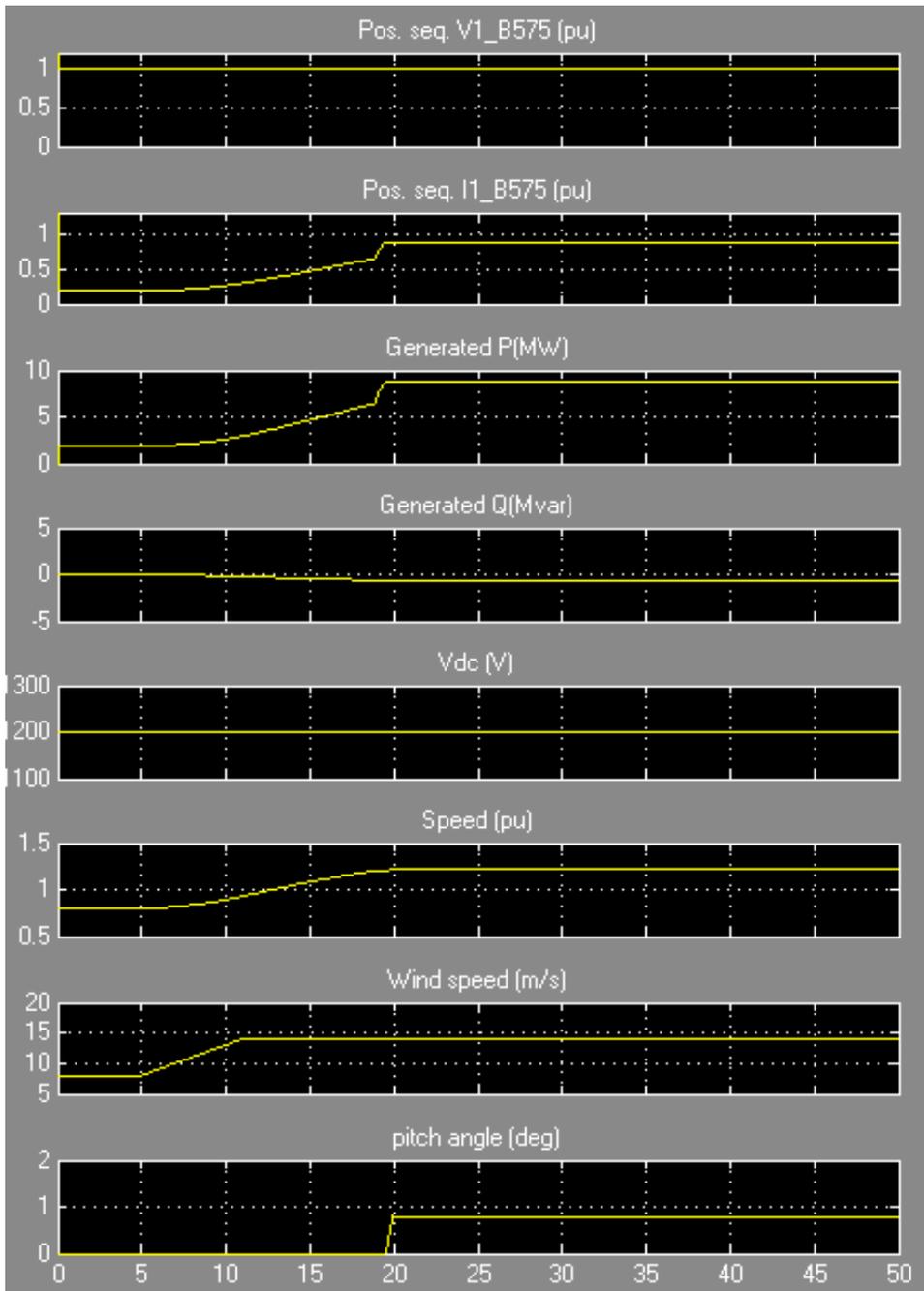
Tegangan dan daya reaktif yang dibangkitkan juga diobservasi. Daya reaktif dikendalikan untuk menjaga pada nilai tegangan 1 pu. Pada daya nominal, turbin angin menyerap 0.68 MVar (menghasilkan $Q=-0.68$ MVar) untuk mengendalikan tegangan pada 1 pu. Jika mode operasi diubah ke mode *VAR Regulation* dengan daya reaktif diset ke 0, tegangan meningkat menjadi 1.021 pu, bilamana generator turbin berada pada daya nominalnya dengan faktor daya satu.

2. Simulasi Gangguan Satu Fase ke Tanah pada Sistem 25 kV

Pada bagian ini, diobservasi dampak kedip tegangan (*voltage sag*) yang dihasilkan dari gangguan pada sistem 25 kV. Dalam simulasi ini, mode operasinya diawali dengan mode *VAR Regulation* dengan $Q_{ref}=0$ dan kecepatan angin konstan pada 8 m/s. Penurunan tegangan 0.15 pu pada akhir 0.5 s diprogram dalam menu sumber tegangan 25 kV agar terjadi pada $t=5$ s. Hasil simulasi diilustrasikan pada Gambar 8.11 untuk mode *VAR Regulation* dan Gambar 8.12 untuk mode *Voltage Regulation*.



Gambar 8.10. Bentuk-bentuk gelombang terkait regulasi tegangan pada PLTAngin.

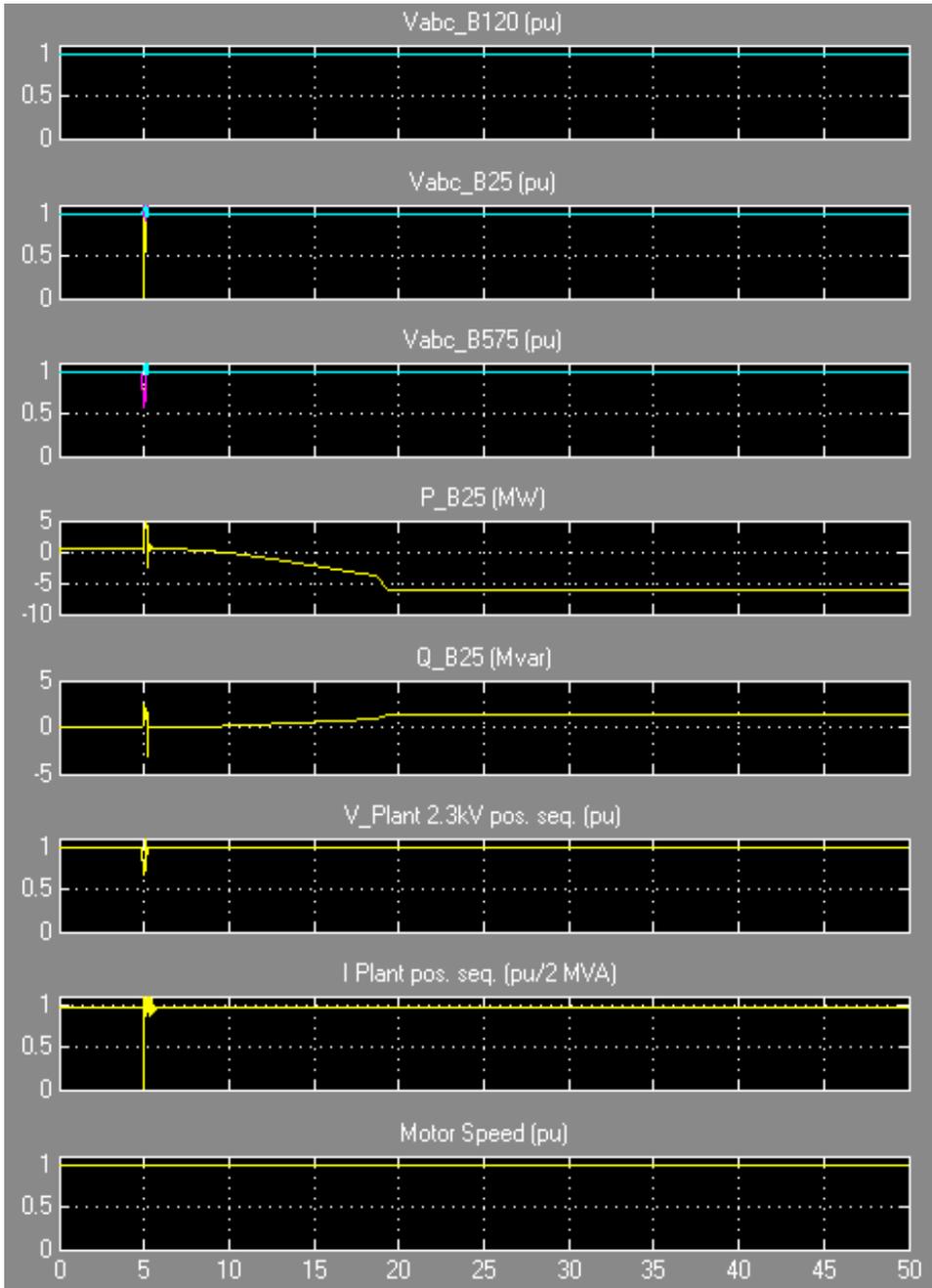


Gambar 8.11. Bentuk-bentuk gelombang terkait regulasi tegangan pada PLT Angin saat gangguan hubung singkat untuk mode *Voltage Regulation*

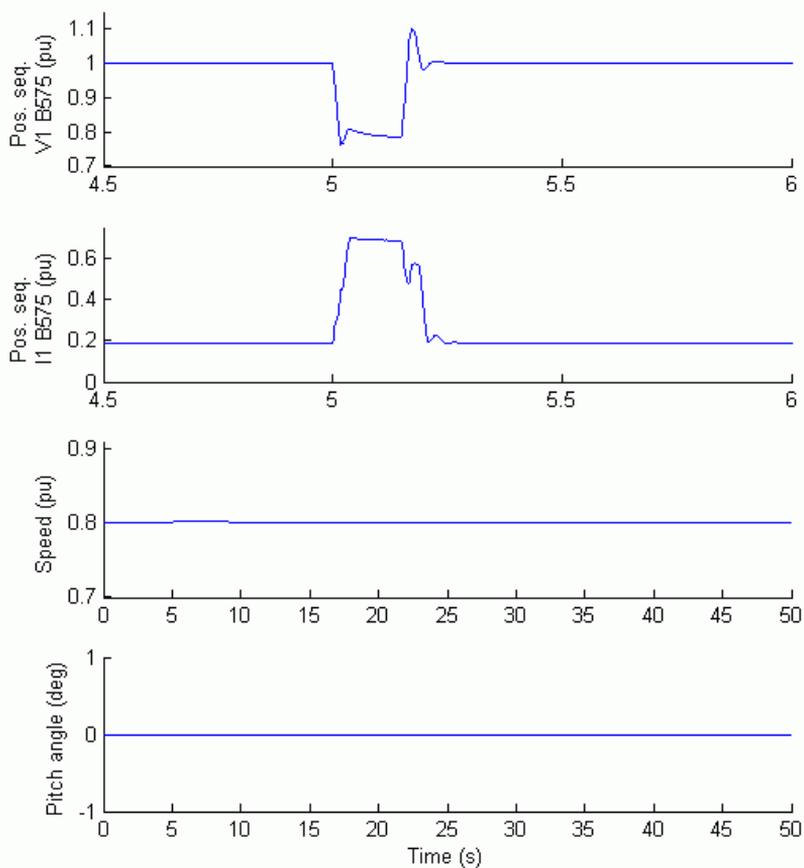
Tegangan, arus sistem, dan kecepatan motor juga diobservasi. Dapat dilihat bahwa PLTAngin menghasilkan 1.87 MW. Pada $t=5$ s, tegangan menjadi turun di bawah 0.9 pu dan pada $t=5.22$ s, sistem proteksi mentripkan sistem karena tegangannya turun lebih dari 0.2 s (melebihi *setting* proteksi untuk sistem). Arus sistem jatuh menjadi 0 dan kecepatan motor menurun secara perlahan, sementara PLTAngin terus menghasilkan level daya 1.87 MW. Setelah mengalami trip, daya 1.25 MW (P_B25 terukur pada bus B25) dikirimkan ke *grid*.

Sebagaimana terlihat pada Gambar 8.12, sistem tidak trip lagi. Hal ini dikarenakan tegangan yang diberikan oleh daya reaktif 5 MVar yang dihasilkan PLTAngin pada saat kedip tegangan tetap dipertahankan hingga tegangan di atas ambang poteksi 0.9 pu. Tegangan sistem saat kedip tegangan kini menjadi 0.93 pu.

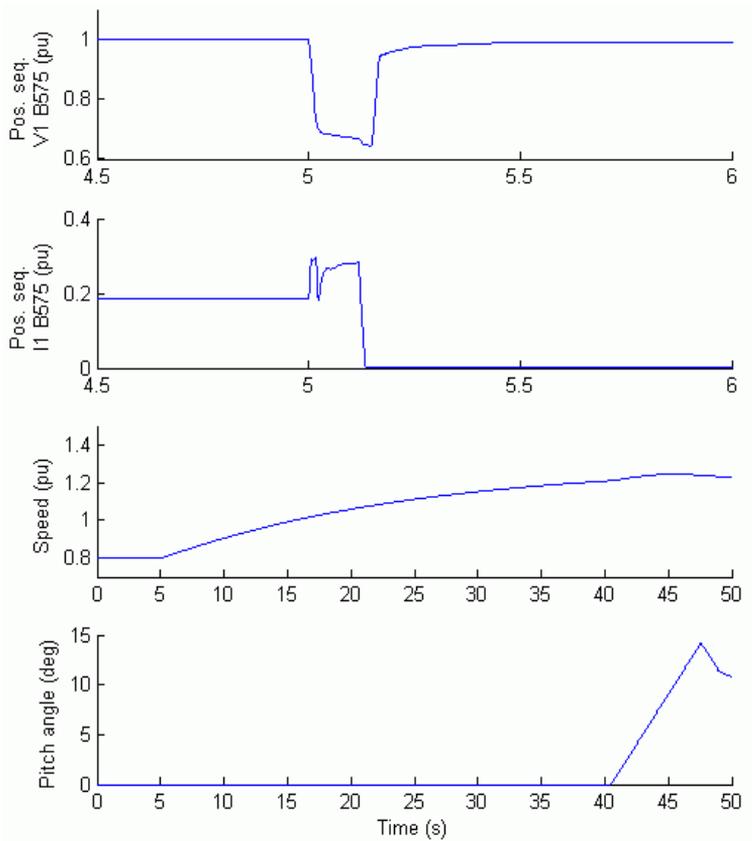
Pada bagian ini, dilakukan observasi dampak gangguan satu fase ke tanah yang terjadi pada saluran 25 kV. Pada $t=5$ s, suatu siklus 9 (0.15 s) gangguan satu fase ke tanah diterapkan pada fase A bus B25. Pada saat turbin angin berada pada mode *voltage regulation*, tegangan urutan positif pada terminal turbin angin (V1_B575) jatuh menjadi 0.8 pu pada saat gangguan, tetapi masih di atas ambang proteksi tegangan jatuh (*under-voltage protection*) (yaitu 0.75 pu untuk $t>0.1$ s). Oleh karenanya, PLTAngin masih dapat beroperasi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8.13. Akan tetapi, jika mode *Var regulation* digunakan dengan $Q_{ref}=0$, tegangan jatuh menjadi di bawah 0.7 pu dan proteksi tegangan jatuh mentripkan PLTAngin. Kini, dapat diobservasi bahwa kecepatan turbin meningkat. Pada $t=40$ s, sudut pitch mulai meningkat hingga batas kecepatannya, sebagaimana terlihat pada Gambar 8.14.



Gambar 8.12. Bentuk-bentuk gelombang terkait regulasi tegangan pada PLTAngin saat gangguan hubung singkat untuk mode *VAR Regulation*



Gambar 8.13. Bentuk-bentuk gelombang yang dihasilkan PLT Angin saat gangguan pada Bus B25 (mode *voltage regulation*)



Gambar 8.14. Bentuk-bentuk gelombang yang dihasilkan PLTAngin saat gangguan pada Bus B25 (mode *Var regulation*)

Latihan:

1. Jelaskan prinsip kerja pembangkit listrik tenaga angin!
2. Jelaskan klasifikasi-klasifikasi turbin angin!
3. Jelaskanlah besarnya energi angin yang dapat dihasilkan pada daerah tropis!
4. Jelaskanlah prinsip kerja DFIG!
5. Jelaskan potensi pembangkit listrik tenaga angin di Indonesia dan dunia!
6. Berikan pendapat Anda tentang prospek pembangkit listrik tenaga angin di masa mendatang!•

BAB IX

Kendali Sistem Pembangkitan Tersebar: Komponen Dasar Elektronika Daya

TUJUAN Instruksional Umum:

Memberikan wawasan tentang komponen dasar elektronika daya dalam pengendalian sistem pembangkitan tersebar

Tujuan Instruksional Khusus:

1. Memberikan pengetahuan tentang pendahuluan komponen dasar elektronika daya dalam sistem pengendalian
2. Memberikan pengetahuan tentang dioda daya
3. Memberikan pengetahuan tentang tiristor daya
4. Memberikan pengetahuan tentang sejarah dan perkembangan piranti elektronika daya dalam sistem pengendalian

A. Pendahuluan

Sebagaimana dibahas pada bagian-bagian sebelumnya, pembangkitan tersebar (*distributed generation*) dalam sistem tenaga listrik pada dasarnya adalah penempatan sumber-sumber energi listrik dalam skala

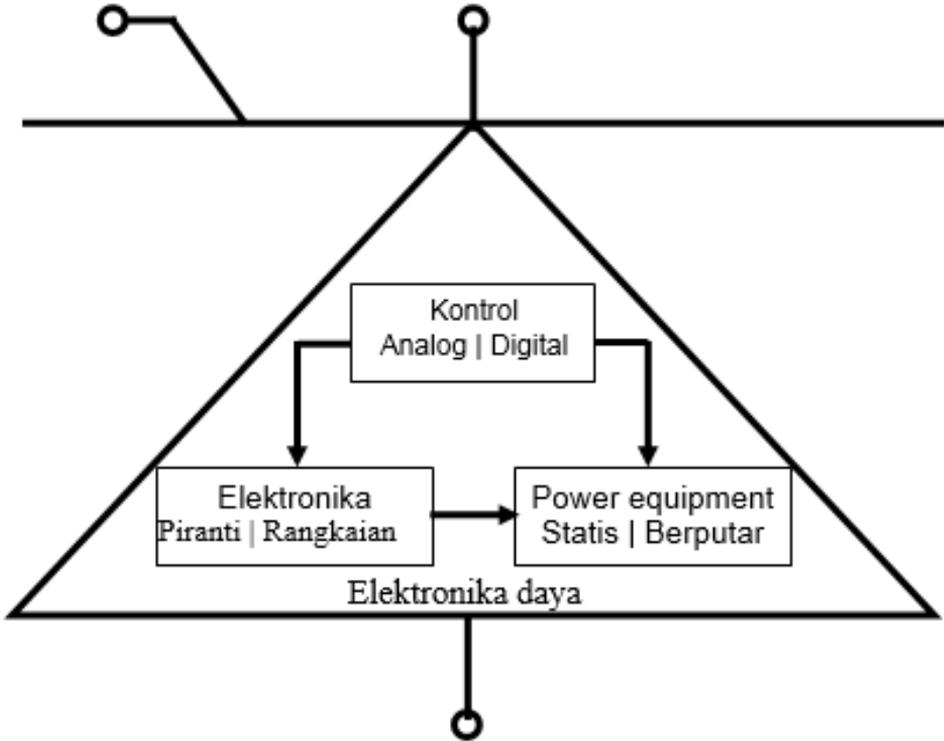
kecil hingga menengah di antaranya sel surya, pembangkit listrik tenaga angin, pembangkit listrik mikrohidro, dan lain-lain yang dicatukan ke jaringan transmisi daya listrik atau jaringan distribusi daya listrik. Kapasitas pembangkit-pembangkit listrik tersebut umumnya tidak besar sehingga biasanya terinterkoneksi dengan sistem distribusi daya listrik.

Dalam operasional sistem tenaga listrik, interkoneksi jaringan transmisi atau distribusi daya listrik sudah lazim diterapkan. Keuntungannya adalah beban listrik yang terletak pada daerah yang tersebar dan umumnya terpusat di kota-kota, baik besar maupun kecil, dapat dipikul oleh pembangkit listrik yang letaknya juga tersebar dan umumnya terletak di luar kota. Sistem kelistrikan yang terinterkoneksi ini memungkinkan pembangkitan tersebar (*distributed generation*) untuk dapat diintegrasikan dengannya. Pengintegrasian pembangkitan tersebar (*distributed generation*) ke jaringan interkoneksi sistem tenaga listrik harus memenuhi kriteria teknis, di antaranya frekuensi yang harus sama, amplitudo tegangan yang harus sama, dan urutan fase tegangan yang harus sama. Guna menyelaraskan pembangkitan terdistribusi agar dapat diintegrasikan dengan jaringan interkoneksi sistem tenaga listrik, diperlukan pengendalian yang andal untuk menjaga kualitas tenaga listrik sesuai yang diinginkan. Sistem pengendalian yang biasa digunakan dalam hal ini dibangun menggunakan piranti elektronika daya.

Elektronika daya merupakan kombinasi dari daya (*power*), elektronika, dan kendali (*control*). Daya (*power*) berkaitan dengan perlengkapan sistem tenaga statik dan berputar untuk sistem pembangkitan, transmisi, dan distribusi energi elektrik. Kendali (*control*) berkaitan dengan karakteristik *steady-state* dan dinamik sistem kalang tertutup. Elektronika berkaitan dengan piranti dan rangkaian *solid-state* untuk pengolahan sinyal guna mengetahui objek kontrol yang diinginkan.

Elektronika daya dapat didefinisikan sebagai aplikasi elektronika *sol-*

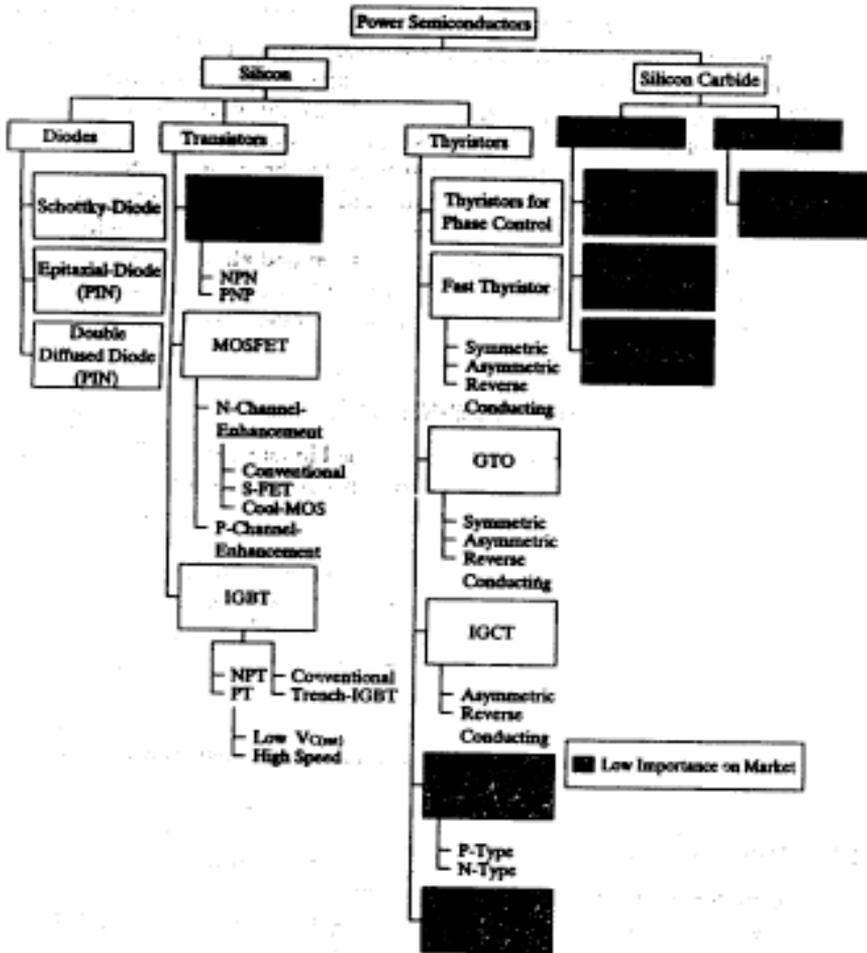
id-state untuk keperluan kontrol konversi daya elektrik. Hubungan antara elektronika dengan daya, elektronika, dan kendali ditunjukkan pada Gambar 9.1.



Gambar 9.1 Hubungan antara elektronika dengan *power*, elektronika, dan *control*

B. Piranti Semikonduktor Daya

Sejak pertama dikembangkan pada akhir tahun 1957, tiristor SCR mengalami kemajuan yang pesat dalam piranti semikonduktor daya. Hingga tahun 1970, tiristor konvensional masih digunakan secara khusus untuk kontrol daya pada aplikasi industri. Sejak tahun 1970, berbagai tipe piranti semikonduktor daya terus dikembangkan dan, pada akhirnya, menjadi komoditas yang tersedia bebas di pasaran.

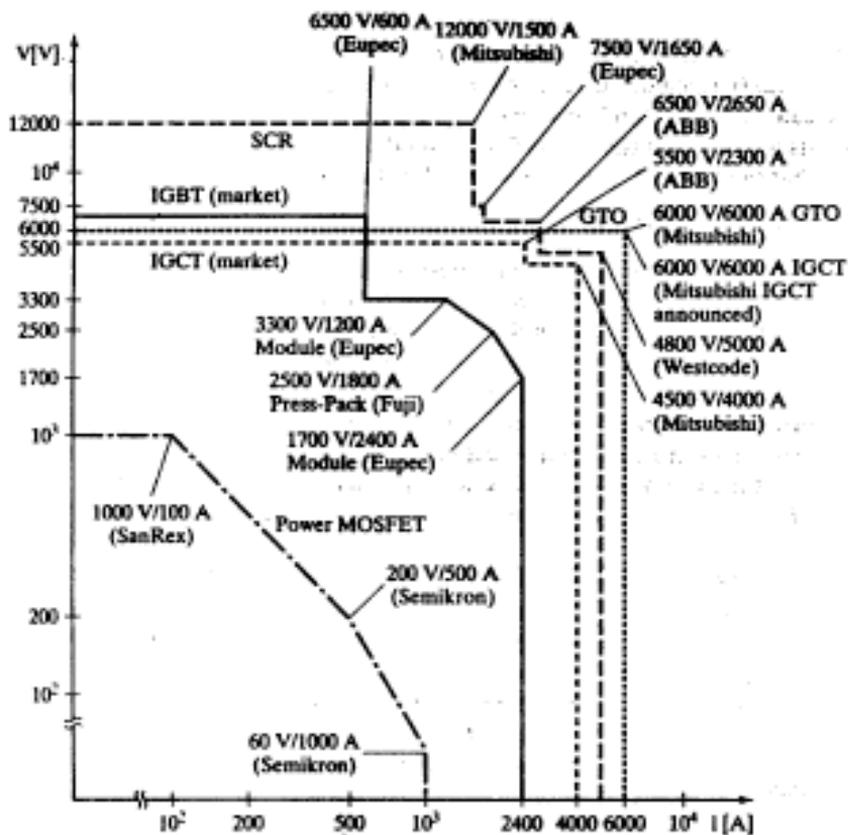


Gambar 9.2. Klasifikasi semikonduktor daya

Gambar 9.2 menunjukkan klasifikasi semikonduktor daya yang terbuat dari silikon atau *silicone carbide*. Mayoritas piranti semikonduktor daya terbuat dari silikon. Di sisi lain, piranti yang terbuat dari *silicone carbide* masih dalam tahap pengembangan lebih lanjut.

Gambar 9.3 menunjukkan rentang daya piranti semikonduktor daya yang tersedia di pasaran. Piranti semikonduktor daya dapat dioperasikan sebagai sakelar dengan menerapkan sinyal kontrol ke terminal *gate* tiristor. Keluaran yang dibutuhkan diperoleh dari waktu konduksi yang ber-

variasi dari sakelar-sakelar tersebut. Gambar 9.4 menunjukkan tegangan keluaran dan karakteristik kontrol piranti semikonduktor daya yang biasa digunakan. Pada saat tiristor dalam mode konduksi, sinyal *gate* dari magnitudo positif atau negatif tidak mempunyai pengaruh seperti ditunjukkan pada Gambar 9.4.



Gambar 9.3. Rentang daya piranti semikonduktor daya yang tersedia di pasaran

Action	Device	Quadrants	Restricted Switch Symbol	Device Symbol
Carries current in one direction, blocks in the other (forward-conducting reverse-blocking)	Diode			
Carries or blocks current in one direction (forward-conducting, forward-blocking)	BJT			
Carries in one direction or blocks in both directions (forward-conducting, bidirectional-blocking)	GTO			
Carries in both directions, but blocks only in one direction (bidirectional-carrying, forward-blocking)	FET			
Fully bidirectional	Ideal switch			

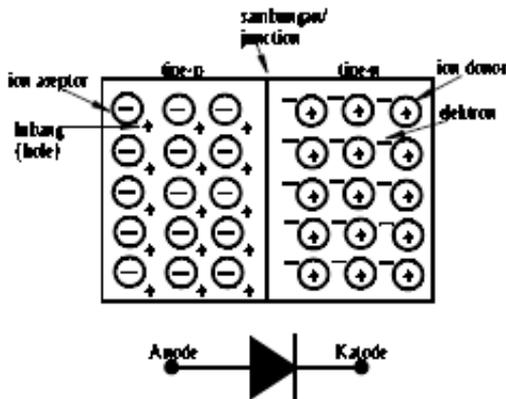
Gambar 9.4. Karakteristik kontrol piranti semikonduktor daya

1. Dioda dan Rangkaian Semikonduktor Daya

Pembuatan piranti semikonduktor daya berdasarkan silikon kristal tunggal dengan tingkat kemurnian yang tinggi. Kristal tunggal sepanjang beberapa meter dengan diameter tertentu (sampai dengan 150 mm) ditumbuhkan dalam tanur zone terapung (*float zone furnaces*). Setiap kristal yang besar diiris menjadi wafer dan selanjutnya melalui beberapa tahapan proses hingga menjadi piranti semikonduktor daya yang diinginkan.

Menurut teori yang lazim mengenai material elektroteknik, berdasarkan tingkat kemurnian atom penyusunnya, terdapat dua kelompok semikonduktor, yaitu intrinsik dan ekstrinsik. Untuk kelompok ekstrinsik terdapat dua jenis/tipe semikonduktor, yaitu semikonduktor tipe-*p* dan semikonduktor tipe-*n*. Bahan, semikonduktor yang banyak dipelajari dan secara luas telah dipakai adalah bahan silikon (Si). Semikonduktor tipe-*n* dibuat dari bahan silikon murni dengan menambahkan sedikit pengotor berupa unsur valensi lima. Empat elektron terluar dari “donor” ini berikatan kovalen dan menyisakan satu elektron lainnya yang dapat

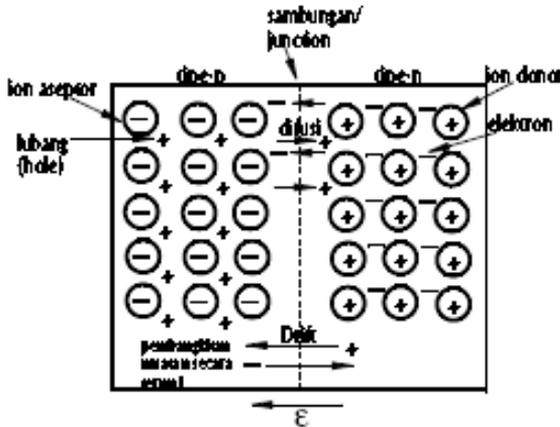
meninggalkan atom induknya sebagai elektron bebas. Dengan demikian, pembawa muatan mayoritas pada bahan ini adalah elektron. Demikian halnya dengan semikonduktor tipe-*p* yang dibuat dengan mengotori silikon murni dengan atom valensi tiga sehingga meninggalkan kemungkinan untuk menarik elektron. Pengotor sebagai “aseptor” menghasilkan proses konduksi dengan lubang (*hole*) sebagai pembawa muatan mayoritas.



Gambar 9.5. Sambungan semikonduktor tipe-*p* dan tipe-*n*

Dioda daya adalah piranti semikonduktor daya yang memiliki dua terminal *pn junction* yang secara normal dibentuk melalui pencampuran, difusi, dan pertumbuhan epitaksi. Misalkan, kita memiliki sepotong silikon tipe-*p* dan sepotong silikon tipe-*n* yang secara sempurna terhubung membentuk sambungan *p-n* seperti pada Gambar 2.1. Sesaat setelah terjadi penyambungan, pada daerah sambungan semikonduktor terjadi perubahan. Daerah tipe-*n* (Gambar 2.1, sebelah kanan) memiliki sejumlah elektron yang akan dengan mudah terlepas dari atom induknya. Pada bagian kiri (tipe-*p*), atom aseptor menarik elektron (atau menghasilkan lubang). Kedua pembawa muatan mayoritas tersebut memiliki cukup energi untuk mencapai material pada sisi lain sambungan. Pada hal ini, terjadi difusi elektron dari tipe-*n* ke tipe-*p* dan difusi lubang dari tipe-*p*

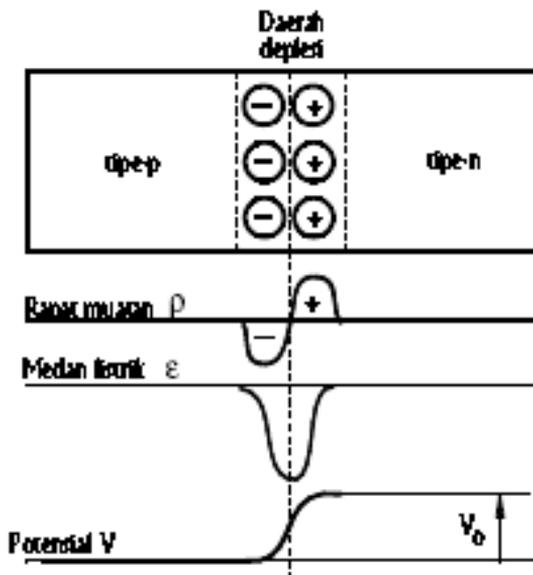
ke tipe-*n*. Proses difusi ini tidak berlangsung selamanya karena elektron yang sudah berada di tempatnya akan menolak elektron yang datang kemudian. Proses difusi berakhir saat tidak ada lagi elektron yang memiliki cukup energi untuk mengalir.



Gambar 9.6. Mekanisme aliran muatan pada daerah sambungan

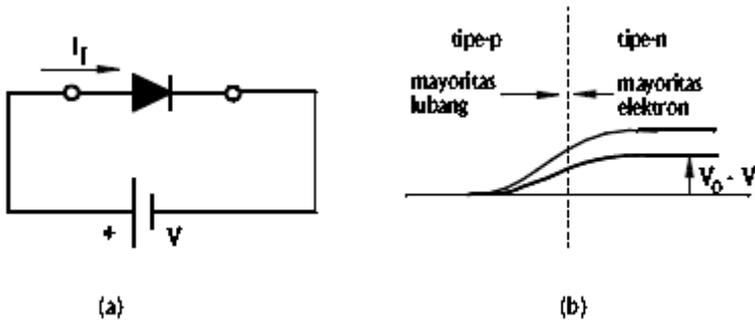
Pada proses selanjutnya, elektron dapat menyeberangi sambungan sehingga harus diperhitungkan. Daerah yang sangat tipis dekat sambungan disebut daerah deplesi (*depletion region*) atau daerah transisi. Daerah ini dapat membangkitkan pembawa muatan minoritas saat terdapat cukup energi termal untuk membangkitkan pasangan lubang-elektron. Salah satu dari pembawa muatan minoritas ini, misalnya elektron pada tipe-*p*, akan mengalami pengaruh dari proses penolakan elektron difusi dari tipe-*n*. Dengan kata lain, elektron minoritas ini akan ikut tertarik ke semikonduktor tipe-*n*. Gerakan pembawa muatan akibat pembangkitan termal ini lebih dikenal sebagai "drift". Situasi akan stabil saat arus difusi sama dengan arus drift. Pada daerah sambungan/daerah diplesi yang sangat tipis, terjadi pengosongan pembawa muatan mayoritas akibat terjadinya difusi ke sisi yang lain. Hilangnya pembawa muatan mayor-

itas di daerah ini meninggalkan lapisan muatan positif di daerah tipe- n dan lapisan muatan negatif di daerah tipe- p . Lapisan muatan pada daerah depleksi ini dapat dibandingkan dengan kapasitor keping sejajar yang termuati. Penumpukan muatan yang berlawanan pada masing-masing keping mengakibatkan terjadinya perbedaan potensial yang disebut sebagai “potensial kontak” atau “potensial penghalang” $o V$ (lihat Gambar 9.7). Keadaan ini disebut dioda dalam keadaan rangkaian terbuka.



Gambar 9.7. Potensial kontak

Dalam keadaan rangkaian terbuka seperti diperlihatkan pada Gambar 9.7, penumpukan muatan terjadi hanya pada daerah depleksi pada masing-masing sisi, sedangkan daerah lainnya dalam keadaan netral. Penumpukan muatan pada daerah depleksi mengakibatkan terjadinya medan listrik dalam arah h . Potensial kontak/potensial penghalang yang terjadi akan menahan terjadinya difusi pembawa muatan mayoritas dan memberi kesempatan terjadinya arus *drift* melalui sambungan seperti telah dijelaskan di atas.



Gambar 9.8. Dioda $p-n$ terbias maju (*forward bias*): a) Rangkaian dasar dan b) Potensial penghalang mengalami penurunan

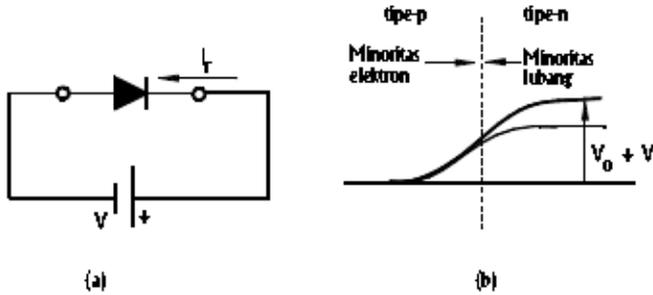
a. Bias Maju (*Forward Bias*)

Besarnya komponen arus difusi sangat sensitif terhadap besarnya potensial penghalang V_0 . Pembawa muatan mayoritas yang memiliki energi lebih besar dari $V_0 + V$ dapat melewati potensial penghalang. Jika keseimbangan potensial terganggu oleh berkurangnya ketinggian potensial penghalang menjadi $V_0 + V$, probabilitas pembawa muatan mayoritas akan mempunyai cukup energi untuk melewati sambungan dan meningkat dengan drastis. Turunnya potensial penghalang mengakibatkan terjadi aliran arus lubang dari material tipe- p ke tipe- n . Demikian sebaliknya untuk elektron. Dengan kata lain, menurunnya potensial penghalang memberi kesempatan pada pembawa muatan untuk mengalir dari daerah mayoritas ke daerah minoritas. Jika potensial penghalang diturunkan dengan pemasangan bias maju eksternal V seperti diperlihatkan pada Gambar 9.8, arus I_f akan mengalir.

b. Bias Mundur (*Reverse Bias*)

Jika potensial penghalang dinaikkan menjadi $V_0 + V$ dengan memasang bias mundur sebesar V (lihat Gambar 9.9), probabilitas pembawa muatan mayoritas akan memiliki cukup energi untuk melewati potensial

penghalang dan turun secara drastis. Jumlah pembawa muatan mayoritas yang melewati sambungan praktis turun ke nol dengan memasang bias mundur sebesar sekitar sepersepuluh volt.



Gambar 9.9. Dioda p - n berbias mundur (*reverse bias*): a) Rangkaian dasar dan b) Potensial penghalang meninggi.

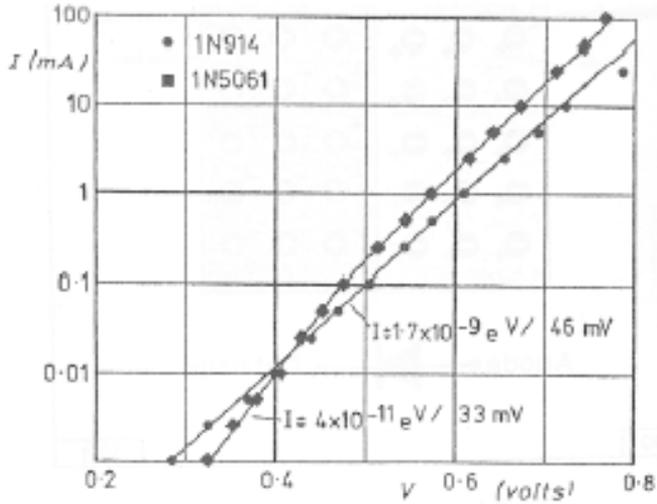
Pada kondisi bias mundur, terjadi aliran arus mundur (I_r) yang sangat kecil dari pembawa muatan minoritas. Pembawa muatan minoritas hasil generasi termal di dekat sambungan akan mengalami “drift” searah medan listrik. Arus mundur akan mencapai harga jenuh $-I_0$ pada harga bias mundur yang rendah. Harga arus mundur dalam keadaan normal cukup rendah dan diukur dalam μA (untuk germanium) dan nA (untuk silikon). Secara ideal, arus mundur seharusnya berharga nol sehingga harga $-I_0$ yang sangat rendah pada silikon merupakan faktor keunggulan silikon dibandingkan germanium. Besarnya I_0 berbanding lurus dengan laju generasi termal karena harganya berubah secara eksponensial terhadap perubahan temperatur.

C. Karakteristik Umum Dioda

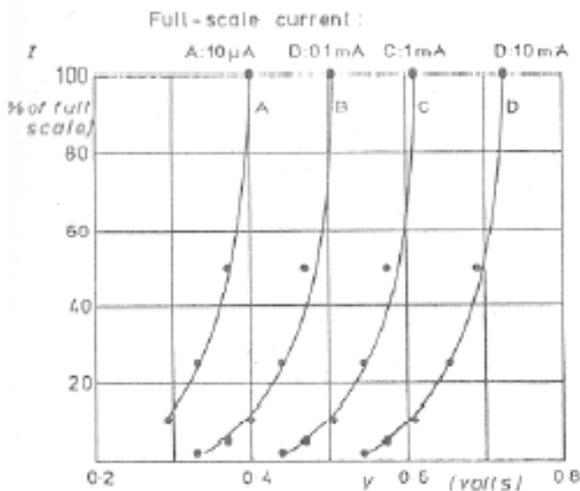
Saat dioda berbias maju, probabilitas pembawa muatan mayoritas yang mempunyai cukup energi untuk melewati potensial penghalang $V_0 + V$ akan tergantung pada faktor

$$e^{-q(V_0 - V)/\eta kT}$$

dengan q adalah muatan eletron,
 η adalah faktor pengali,
 k adalah konstanta Boltzman, dan
 T adalah temperature absolut.



Gambar 9.10. Karakteristik I-V dioda tipe 1N914 dan 1N5061 pada skala semilogaritmik



Gambar 9.11. Karakteristik I-V dioda dalam skala lini

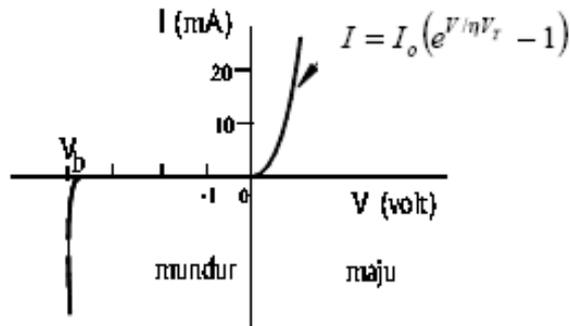
Gambar 9.11 memperlihatkan plot karakteristik I - V dioda dalam skala linear dengan skala I 10mA (A), 1 mA (B), 0,1 mA (C), dan 10 μ A (D). Terlihat bahwa tegangan “*cut-in*” bergeser ke kiri dan juga keseluruhan kurva bergeser ke kiri.

D. Efek Zener dan Avalanche

Di samping terjadinya perubahan ketinggian potensial penghalang pada dioda akibat diberi bias maju atau mundur, terjadi pula perubahan lebar daerah deplesi atau daerah transisi. Pada tegangan bias maju, ketinggian potensial penghalang akan menurun dan daerah deplesi akan menipis. Sebaliknya, saat diberi bias mundur, daerah deplesi akan melebar. Jika bias mundur dinaikkan terus, pada suatu harga tegangan tertentu akan terjadi kenaikan arus mundur secara tiba-tiba (lihat Gambar 9.12). Keadaan ini terjadi akibat efek Zener atau efek Avalanche.

Pada patahan Zener (*Zener breakdown*), medan listrik pada sambungan akan menjadi cukup besar untuk menarik elektron dari ikatan *kovalen* secara langsung. Dengan demikian, akan terjadi peningkatan jumlah pasangan lubang-elektron secara tiba-tiba dan menghasilkan kenaikan arus mundur secara tiba-tiba pula. Efek Avalanche terjadi pada tegangan di atas tegangan patahan Zener. Pada tegangan tinggi ini, pembawa muatan memiliki cukup energi untuk memisahkan elektron dari ikatan *kovalen*.

Pada daerah patahan, arus mundur berharga sangat besar dan hampir tidak tergantung pada besarnya tegangan. Penurunan tegangan bias mundur di bawah b V akan menurunkan arus ke harga $o I$. Dengan mengontrol kerapatan doping, kita dapat mendesain dioda Zener agar memiliki tegangan patahan pada harga dari beberapa volt sampai beberapa ratus volt. Kondisi penting yang dapat dimanfaatkan adalah bagaimana dioda ini dapat memberikan tegangan yang relatif konstan saat arus berubah-ubah.

Gambar 9.12. Karakteristik I - V dioda p - n

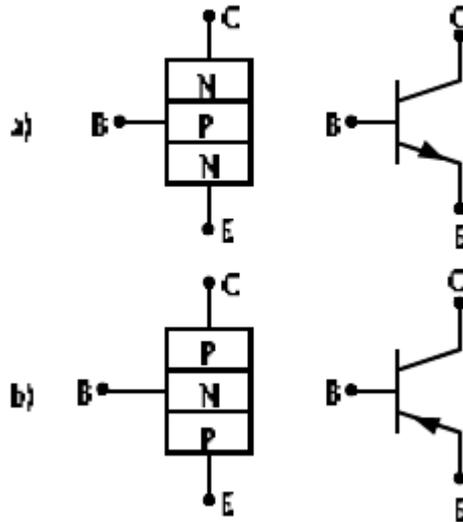
E. Transistor Daya

Pada bagian terdahulu, telah dikenalkan karakteristik dasar dioda, sebuah piranti dua terminal (karenanya disebut di-oda), beserta aplikasinya. Pada bagian ini, akan kita pelajari karakteristik piranti tiga terminal atau lebih dikenal sebagai “transistor”. Pertama-tama, kita akan membahas transistor bipolar atau *bipolar junction transistor* (BJT). Berikutnya, akan kita bahas transistor *unipolar*, misalnya *field-effect transistor* (FET).

Dibandingkan dengan FET, BJT dapat memberikan penguatan yang jauh lebih besar dan tanggapan frekuensi yang lebih baik. Pada BJT, baik pembawa muatan mayoritas maupun minoritas mempunyai peranan yang sama pentingnya.

Terdapat dua jenis konstruksi dasar BJT, yaitu jenis n - p - n dan p - n - p . Untuk jenis n - p - n , BJT terbuat dari lapisan tipis semikonduktor tipe- p dengan tingkat doping yang relatif rendah yang diapit oleh dua lapisan semikonduktor tipe- n . Berdasarkan sejarah pembuatannya, bagian di tengah disebut “basis” (*base*), salah satu bagian tipe- n (biasanya mempunyai dimensi yang kecil) disebut “emitor” (*emitter*), dan yang lainnya sebagai “kolektor” (*collector*). Secara skematik, kedua jenis transistor diperlihatkan pada Gambar 9.13.

Tanda panah pada Gambar 9.13 menunjukkan kaki emitor dan ti-



Gambar 9.13. Diagram BJT: a) Jenis $n-p-n$ dan b) Jenis $p-n-p$

tik dari material tipe- p ke material tipe- n . Perhatikan bahwa untuk jenis $n-p-n$, transistor terdiri dari dua sambungan $p-n$ yang berperilaku seperti dioda. Setiap dioda dapat diberi panjar maju atau berpanjar mundur sehingga transistor dapat memiliki empat modus pengoperasian. Salah satu modus yang banyak digunakan disebut “modus normal”, yaitu sambungan emitor basis berpanjar maju dan sambungan kolektor basis berpanjar mundur. Modus ini juga sering disebut sebagai pengoperasian transistor pada “daerah aktif”.

F. Pabrikasi BJT

Pabrikasi BJT dapat dilakukan dengan dua teknik, yaitu struktur *transistor alloy* melalui difusi dan struktur *transistor planar*. Gambar 9.14a menunjukkan struktur *transistor alloy n-p-n*. Kolektor terbuat dari *chip* semikonduktor tipe- n dengan ketebalan kurang dari 1 mm². Daerah basis dibuat dengan proses difusi, kemudian dibuat kontak logam untuk dihubungkan dengan kaki basis. Daerah emitor dibuat dengan teknik *alloy*

pada daerah basis. Hasilnya berupa sebuah pasangan sambungan $p-n$ yang dipisahkan oleh daerah basis kira-kira setebal kertas. Untuk struktur planar (Gambar 9.14b), suatu lapisan tipe- n dengan tingkat doping rendah ditumbuhkan di atas substrat $n+$ (tanda + menunjukkan tingkat doping sangat tinggi).

Setelah melalui proses oksidasi pada permukaan, sebuah jendela (*window*) dibuka dengan proses penggerusan (*etching*) dan suatu pengotor (p) dimasukkan ke kristal dengan proses difusi untuk membentuk sambungan (*junction*). Sekali lagi, setelah melalui reoksidasi, sebuah jendela kecil dibuka untuk proses difusi pembentukan daerah emitor (n).

G. Perkembangan Pabrikasi Penyakelar Daya

1. Pabrikasi untuk Piranti Power MOSFET

Salah satu cara untuk menaikkan efisiensi adalah mengurangi rugi konduksi dengan mengurangi resistansi dalam kondisi menyambung atau $R_{DS(on)}$. Penyumbang pokok terhadap besarnya nilai resistansi pada MOSFET tegangan tinggi adalah dari tiga variabel, yakni resistansi *epi*, resistansi kanal, dan resistansi JFET. Resistansi *epi* merupakan reaksi penolakan terhadap penerapan tegangan tinggi yang merupakan fungsi langsung dari tegangan dadal. Mengurangi kontribusinya hanya dengan menaikkan luasan *die* FET tidak bisa demikian saja bisa dilakukan karena adanya faktor-faktor lain yang terkait.

Sebagaimana pada power FET tegangan rendah, resistansi kanal dapat dikurangi dengan menaikkan kepadatan kemasan kanal, yakni dengan menambahkan lebih banyak kanal per unit luasan *chip*-nya. Namun demikian, sebagaimana halnya pada piranti-piranti tegangan rendah, dengan membuat penambahan kepadatan kanal berarti difusi body- p pada *die*-nya lebih didekatkan satu sama lain sehingga menaikkan resistansi JFET. Jika kepadatan kanal naik, resistansi JFET akan mulai mendomi-

nasi dan menyebabkan sumbangan kenaikan nilai pada resistansi dalam kondisi menyambung.

APT telah berhasil mewujudkan pembuatan FET tegangan tinggi yang disebut Power MOS V (Power MOS seri atau generasi kelima) yang mampu mengurangi nilai resistansi pada kondisi menyambung (yang berarti memperkecil rugi konduksi) dan menaikkan kecepatan (yang berarti memperkecil rugi penyakelaran). Proses ini dilakukan melalui pengurangan resistansi JFET dengan cara mengurangi kedalaman difusi *body-p*-nya. Di sisi lain, pembuatan *junction* yang lebih sempit memungkinkan untuk meningkatkan kepadatan kemasan kanalnya. Di samping proses Power MOS V yang menggunakan teknik “*bonding* di sepanjang daerah aktifnya”, teknologi yang diterapkan ini mampu memperbesar luasan kanal yang dapat dimanfaatkan pada sebuah dioda.

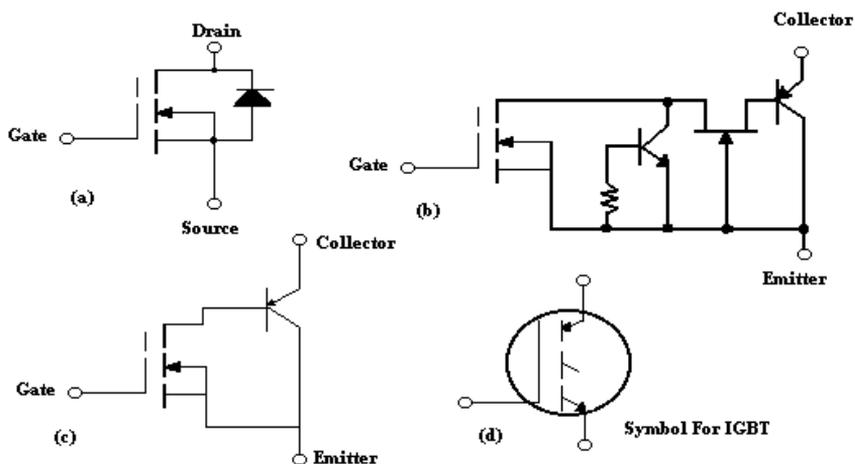
Tabel 9.1 menunjukkan perbandingan resistansi kondisi menyambung pada piranti yang dibuat dengan teknologi lama dan baru. Tabel tersebut juga menunjukkan proses baru FET tegangan tinggi yang ditawarkan APT yang merupakan power FET yang bekerja pada tiga kategori rating tegangan: 800, 1000, dan 1200 volt.

Sifat power MOSFET yang secara keseluruhan memiliki sedikit pembawa muatan minoritas (*hole*) membuatnya memiliki kemampuan untuk beroperasi pada frekuensi dalam orde gigahertz dan waktu penyakelaran dalam orde nano detik. Meskipun demikian, interaksi impedansi *source* dan *gate* dengan kapasitans masukannya secara praktis membatasi kecepatan kerjanya.

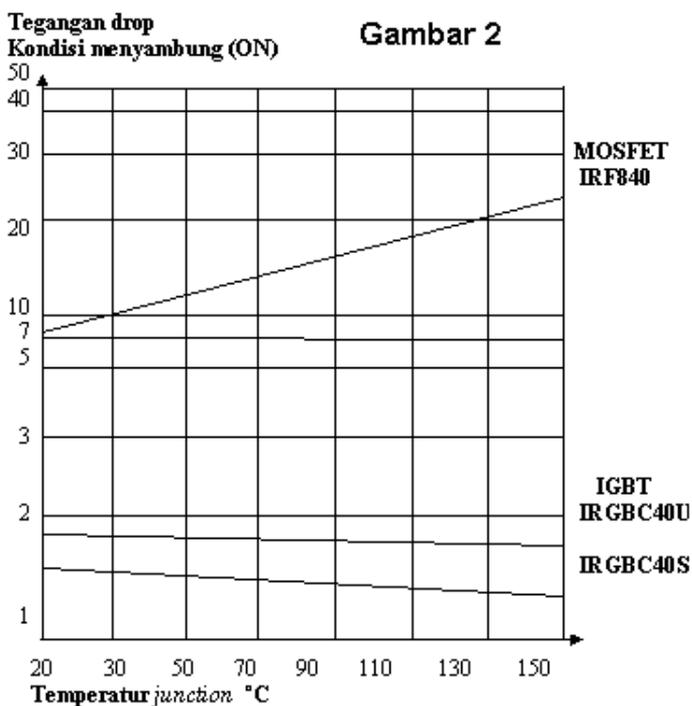
Tabel 9.1. Perbandingan Resistansi Kondisi Menyambung ($R_{DS(on)}$) Produk *APT* antara Power Mos V (generasi baru) dan Power MOS IV (generasi sebelumnya)

Tegangan dadal (Volt)	Power MOS V (miliOhm)	Power MOS IV (miliOhm)	Perbaikan
1200	1500	-	Baru
1000	860	-	Baru
800	560	-	Baru
600	250	300	17%
500	170	200	15%
400	120	160	25%
300	70	85	18%
200	38	45	16%
100	19	25	24%

Analisa model rangkaian dari sebuah power FET menunjukkan bahwa meminimalkan impedansi *gate* ($R_g + L_g$) dan impedansi *source* ($R_s + L_s$) akan mengurangi waktu penyalakan (Gambar 9.14).



Gambar 9.14. (a) Power MOSFET, (b) IGBT



Gambar 9.15. Hubungan tegangan dan temperatur transistor

Dengan demikian, konstanta waktu yang dihasilkan oleh impedansi *gate* dikaitkan dengan kapasitans masukan (C_{gs} dan C_{gd}) dan dapat menentukan tundaan waktu menyambung ($t_{d(on)}$) dan waktu tunda memutus ($t_{d(off)}$). Di samping itu, impedansi *gate* yang dikaitkan dengan kapasitans Miller c_{gd} menciptakan konstanta waktu yang mengatur waktu menyambung (t_r) dan waktu memutus (t_f). Sementara itu, impedansi *source* bertindak sebagai umpan balik negatif pada sinyal *gate* yang berdampak mengurangi penguatan efektif FET dan membuat kerjanya lambat karena menaikkan t_r dan t_f -nya.

Struktur sel yang tertutup diberlakukan pada MOSFET yang paling konvensional dengan cara menghubungkan *gate* dari seluruh sel pada *die* menggunakan *poly-silicon*. Sifat resistansi tinggi yang dimiliki bahan *poly-silicon* tersebut menghasilkan nilai yang besar untuk R_g . Sebaliknya, struktur Power MOS V tipe *open-cell* pada piranti produksi APT yang melapiskan metal pada *gate poly-silicon* berdampak mengurangi resistansi *gate* secara signifikan dan waktu penyakelarannya.

Para perancang di IR juga melakukan usaha untuk memacu power FET yang muncul dengan *low-gate-charge* power MOSFET. Seperti APT, mereka menekan nilai resistansi dan induktans rangkaian *gate parasitic* eksternal bersama-sama dengan kapasitans masukan FET yang cenderung membatasi kecepatan penyakelaran. *Parasitic* ini dapat menimbulkan goncangan (*ringing*) rangkaian yang berlebihan dan osilasi, terutama ketika melewati daerah operasi linear. Harap diingat bahwa ketika penyakelaran berada di antara kondisi memutus dan menyambung, setiap sakelar semikonduktor selalu melalui daerah linear.

2. Pabrikasi Untuk Piranti IGBT

Saat ini, pasar dunia piranti semikonduktor telah melihat beberapa versi IGBT yang telah diperbaiki untuk aplikasi tertentu.

IGBT tradisional memang berbasis pada teknik *punch through* yang memiliki rugi-rugi penyakelaran yang tinggi dan menghasilkan kecepatan yang lebih rendah. Selain itu, tegangan kerjanya yang paling tinggi hanya masuk kategori kelas menengah. Kondisi ini akan menjadi lebih buruk jika tegangan dadalnya dinaikkan. Pasalnya, waktu hidup elektron dan *hole* dalam daerah aliran muatan (*drift*) pada IGBT menyebabkan rugi penyakelaran yang tinggi dan arus bocor.

Beberapa pabrik telah menerapkan iradiasi elektron dosis tinggi untuk meningkatkan pembunahan waktu hidup pembawa muatan sembari meminimalkan ekor arus dan rugi energi penyakelaran. Pabrik lain mengadopsi metode *non-punch through* untuk menjangkau kecepatan yang lebih tinggi dan nilai tegangan kolektor-emitor saat menyambung ($V_{CE(sat)}$) yang lebih rendah. Namun demikian, efisiensi masih merupakan suatu masalah. Beberapa usaha sedang dilakukan untuk mengurangi rugi penyakelaran pada IGBT *non-punch trough*.

Iradiasi dosis tinggi sebenarnya menambah biaya karena memerlukan langkah-langkah pemrosesan tertentu. Di samping itu, iradiasi merupakan proses yang tidak bisa dilakukan secara cermat (teliti) sehingga membahayakan struktur *lattice* pada piranti yang bersangkutan dan menghasilkan variasi parameter yang lebar. Hal ini tentu akan menurunkan karakteristik VCE IGBT.

Beberapa tahun yang lalu, para perancang di Siemens menghadirkan IGBT *non-punch through* yang menggunakan teknik pensubstitusian difusi tipe-*p* yang mendalam pada lapisan epitaksi yang tebal. Lapisan epitaksi ini berfungsi agar piranti tahan terhadap tegangan yang kebanyakan diperuntukkan pada semikonduktor tegangan tinggi. Namun demikian, kondisi ini juga menyebabkan munculnya resistansi kondisi menyambung yang signifikan, sedangkan untuk IGBT, drop tegangan majunya juga akan naik. Lebih jauh lagi, penggunaan lapisan epitaksi akan mem-

buat harga piranti menjadi mahal, kerjanya lebih lambat, dan kesulitan untuk mengukur maupun mengendalikan proses pembuatannya secara seragam karena ia tidak dikontrol dengan teknik litografi.

Baru-baru ini, Motorola bergerak ke “*float zone process*”. Ini merupakan teknologi *non-punch through* versi Motorola dan diterapkan secara ketat untuk IGBT 1200 volt. Teknologi baru ini berhasil menaikkan laju penyakelaran pada piranti-piranti 1200 volt maupun mengurangi biaya pabrikan.

Kini, banyak pabrik semikonduktor mengetahui bahwa IGBT telah mendominasi aplikasi. Misalnya, dalam pengendalian motor-motor AC besar yang derau audio bukan merupakan suatu masalah sehingga laju penyakelaran dapat menjadi sangat jauh di bawah 20kHz. Namun demikian, mereka juga tahu bahwa pasar untuk *switching* regulator jenis *off-line* (bekerja pada frekuensi tinggi) jauh lebih besar daripada yang untuk kendali motor. Oleh sebab itu, IR menempuh dua prosedur yang saling berbeda untuk memperbaiki kinerja penyakelaran daya tegangan tinggi bagi piranti yang diproduksinya dalam rangka memenuhi tuntutan pasar.

Untuk piranti yang bekerja pada frekuensi tinggi, IR mengembangkan WARP-speed IGBT, yakni IGBT seri Warp 400 dan 600 volt yang memiliki kecepatan penyakelaran sampai 150kHz pada rating arus dari 5-50 ampere. Perusahaan lain, IXYS Corp. telah mengklaim kemampuan kecepatan penyakelaran 100 kHz pada IGBT hiperFast 600 volt yang diproduksinya. Sementara itu, Harris *Semiconductor*, memunculkan seri penyakelaran ultra cepat 600-volt dengan laju di atas 50 kHz. Target tim pengembang di Harris adalah melampaui kecepatan 100 kHz dengan kemampuan arus yang lebih besar serta rugi konduksi dan rugi penyakelaran yang lebih rendah.

Dalam aktualisasinya, rugi konduksi pada IGBT tipe cepat sedikit lebih besar daripada MOSFET yang berkemampuan setara. Namun, harga

IGBT yang diproduksi kini secara signifikan lebih rendah karena *die* untuk IGBT 400-600 volt dapat dilakukan pada luasan sekitar 40% saja dari ukuran *die* yang dibutuhkan untuk membuat MOSFET yang berkemampuan setara.

Selain mengembangkan IGBT, IXYS yang berlokasi di Santa Clara, California kini juga membuat piranti yang mereka beri nama biMOSFET. BiMOSFET yang merupakan IGBT basis homogen ini strukturnya memiliki empat terminal: dua buah terminal *gate*, sebuah terminal emitor, dan sebuah terminal kolektor. Ia dapat digunakan sebagai penyakelar daya 600 volt yang bekerja pada frekuensi di antara 8kHz dan 60 kHz. Dari hasil pengujian, ternyata beberapa parameternya dapat melampaui IGBT dan MOSFET yang setara. BiMOSFET yang pertama dibuat, yakni IX-BH40N160, ratingnya adalah 1600 volt 40 ampere. Perbandingan parameter dengan MOSFET maupun IGBT dapat dilihat pada Tabel 9.2.

Di kawasan Asia, para ilmuwan di Samsung (Samsung Electronics Buchun, Korea) juga tidak mau ketinggalan dalam mengembangkan IGBT. Kini, Samsung telah mampu memasarkan hasil produksinya, yakni IGBT seri SGH yang mampu memenuhi karakteristik penyakelaran seperti halnya pada power MOSFET. Namun, dengan kemampuan tegangan yang lebih tinggi, demikian halnya dengan dayanya. Samsung memiliki target untuk menciptakan IGBT dengan tegangan dadal diatas 100 volt yang tidak tanggung-tanggung, yakni 1200 volt dengan kemampuan arus sampai 25 ampere.

Tabel 9.2. Parameter BiMOSFET, IGBT dan MOSFET Produk IXYS yang Dibuat pada Ukuran *Die* yang Sama (7,11 x 8,64 mm)

Parameter	BIMOSFET (IXBH 40N160)	IGBT (IXSH 35N120A)	MOSFET (IXFH 12N100)
Parameter dc:			
BV _{DSS} @ 3 mA	1600 V	1200 V	1000 V
Tegangan ambang V _{GE} @ 4 mA	5-9 V	4-8 V	2-4,5 V
Tegangan jenuh V _{CE(sat)} @ I (125 °C)	7 V @ 25A	4 V @ 35A	13,9V @ 6A
C _{ISS} (25V)	3275 pF	3750 pF	4000 pF
C _{OES} (25V)	210 pF	235 Pf	310 pF
C _{RES} (25V)	28 pF	60 pF	70 pF
Q _g muatan <i>Gate</i>	121 nC	150 nC	122 nC
I _c (Arus Puncak)	110 A	170 A	48 A
Penyakelaran: (T _j = 125 ⁰ C)			
Waktu tanjak (R _g = 22 ohm)	195 ns	150 ns	33 ns
E _{goff} / A (960 V)	0,12mJ/A	0,26mJ/A	0,04mJ/A

Perusahaan elektronika terkemuka Samsung bertekad untuk menerobos pasar UPS, penguat daya, power suplai tegangan, dan daya besar melalui IGBT produk barunya. Produk baru tersebut berkecepatan dan bertegangan tinggi serta terus-menerus memperbaiki efisiensi sistem secara keseluruhan dan kemampuan dayanya dengan sasaran biaya dollar per watt yang lebih rendah.

Untuk mengatasi kekurangan IGBT *punch through* tradisional, sambil melakukan perbaikan sifat-sifat penyakelaran pada aras tegangan 1000 volt atau lebih, para ilmuwan di Samsung mengembangkan suatu

perbaikan terhadap material awal yang berbasis pada proses baru yang disebut *silicon direct bonding* (SDB). Hasilnya adalah perbaikan parameter dalam hal rugi penyakelaran yang berhasil dikurangi dan kecepatan penyakelaran yang juga berhasil dinaikkan untuk IGBT *punch through* tegangan tinggi.

Pemasaran awal produk Samsung dalam keluarga SGH (IGBT kanal n) terdiri dari lima kategori yang merentang dari arus 5-25 ampere dalam selang 5 ampere dengan kecepatan penyakelaran sampai 150 kHz dan tegangan jenuh (saat menyambung) kolektor-emitor sebesar 2,4 volt. Semua IGBT ultra cepat 1200 volt muncul dalam kemasan populer 30-3P plastik. Kategori 5 ampere adalah SGH5N120RU dan 25 ampere adalah SGH25N120RUF.

Pengurangan tegangan drop secara signifikan telah mengurangi rugi konduksi pada piranti 1200 volt yang mereka buat. Rugi penyakelaran yang lebih lambat pada gilirannya akan berdampak pada efisiensi keseluruhan pada transistor dan efisiensi sistem. Waktu tunda putus (*turn off*) dan menyambung (*turn on*) untuk versi 10 ampere umumnya berturut-turut adalah 15 dan 80 nanodetik. Waktu jatuh saat memutus (t_f) dengan beban induktif adalah 100 nanodetik. Sementara itu, rugi-rugi penyakelaran saat memutus dan menyambung berturut-turut adalah 0,3 milijoule dan 0,5 milijoule yang menghasilkan rugi total sekitar 0,8 milijoule.

Walaupun karakteristik ini berlaku pada temperatur 25°C, para perancang di Samsung berpendapat tidak ada kenaikan rugi-rugi pada temperatur yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh sifat yang dibawa pada proses SDB. Namun demikian, temperatur operasi spesifik untuk IGBT Samsung yang baru memiliki rentang -55°C-175°C.

Samsung sedang merencanakan untuk menawarkan IGBT ini dalam modul-modul arus tinggi yang dikonfigurasi dalam bentuk rangkaian-

rangkaian setengah jembatan dan jembatan penuh untuk pengendali motor-motor dan aplikasi-aplikasi industri yang lainnya. Perusahaan ini juga sedang merencanakan migrasi yang arahnya turun ke 1000 volt dan 600 volt dengan proses SDB yang baru. Ini merupakan rencana jangka panjang yang mencakup rencana pengembangan IGBT yang bertegangan kerja 1500 volt dan tegangan dadal lebih tinggi lagi.

H. Persyaratan Dalam Pengemudian Piranti

Setelah mengetahui konstruksi, spesifikasi, dan perkembangan piranti-piranti penyakelar daya ini, para perancang di bidang elektronika daya akan dihadapkan pada cara mengemudikan atau memicu (*triggering*) piranti-piranti tersebut agar dapat bekerja.

Jika ditinjau dari konstruksinya, dalam istilah statis, impedansi masukan baik untuk MOSFET maupun IGBT secara praktis adalah tak terhingga. Rangkaian pengemudinya tidak harus mempunyai kemampuan suplai arus basis yang memadai yang umumnya dibutuhkan oleh piranti-piranti bipolar. Jika beroperasi pada arus bolak balik, impedansinya jauh dari tak terhingga. Sementara itu, kapasitans masukan kedua piranti tersebut dapat merentang dari ratusan atau ribuan pikofarad sampai nanofarad dalam orde dua angka. Oleh karena itu, rangkaian kemudi untuk IGBT dan MOSFET harus dapat mengisi dan membuang muatan kapasitans masukan yang tinggi untuk menjamin kerja penyakelaran yang cepat bagi piranti dayanya.

Persyaratan pengemudian IGBT serupa dengan MOSFET karena kedua piranti tersebut memiliki kapasitans masukan yang bernilai tinggi. Namun demikian, perbedaan IGBT dan MOSFET ditandai dalam hal tegangan ambangnya saat bergulir menyambung. Secara tradisional, MOSFET kanal n membutuhkan tegangan *gate-source* 10 volt untuk menjamin guliran secara penuh. Sekarang ini, aras logika MOSFET memiliki varia-

si yang luas. Resistansi dalam kondisi menyambung telah dibuat sesuai dengan aras tegangan *gate-source* yang sama dengan aras logika 1 (tinggi) pada IC-IC digital pada umumnya.

IGBT membutuhkan tegangan *gate-emiter* 10 volt untuk dapat menyambung secara penuh dan 0 volt untuk membuatnya benar-benar dalam kondisi terputus atau mati (off).

IGBT tegangan tinggi dan arus tinggi, demikian halnya dengan modul-modul IGBT, akan bekerja lebih baik pada aras-aras masukan yang lebih tinggi. Sebagai gambaran, pabrik semikonduktor Powerex merekomendasikan tegangan setinggi +15 volt untuk guliran menyambung dan -10 volt untuk mematikan modul-modul IGBT daya besar yang produksinya. Powerex juga memasarkan sejumlah pengemudi *gate* yang berbentuk *hybrid* yang menyediakan tegangan kemudi bagi modul-modul yang besar.

I. Tiristor

Tiristor merupakan keluarga piranti semikonduktor daya yang digunakan secara luas dalam rangkaian elektronika daya. Tiristor diooperasikan sebagai sakelar *bistabil* yang beroperasi dari keadaan nonkonduksi ke keadaan konduksi. Tiristor dapat diasumsikan sebagai sakelar ideal pada banyak aplikasi, tetapi dalam praktiknya, tiristor mempunyai karakteristik dan batasan tertentu.

Tiristor konvensional dirancang tanpa kemampuan untuk *gate-controlled turn off*, suatu kejadian saat tiristor dapat pulih dari keadaan konduksi ke keadaan nonkonduksi hanya bilamana arus yang dibawanya nol. *Gate turn-off tiristor* (GTO) dirancang mempunyai kemampuan *turn on* dan *turn off* terkontrol.

Jika dibandingkan dengan transistor, tiristor mempunyai rugi-rugi (*losses*) konduksi *on-state* yang lebih rendah dan kemampuan mena-

ngani daya yang lebih besar. Di sisi lain, transistor umumnya mempunyai *switching* yang sangat baik (*superior*) dalam hal kecepatan, *switching* yang lebih tinggi, dan rugi-rugi *switching* yang lebih rendah. Perkembangan selanjutnya adalah dengan dibuatnya piranti terbaik yang mempunyai keunggulan, baik dalam hal rugi-rugi *on-state* maupun rugi-rugi *switching* yang kecil dengan kemampuan menangani daya yang besar.

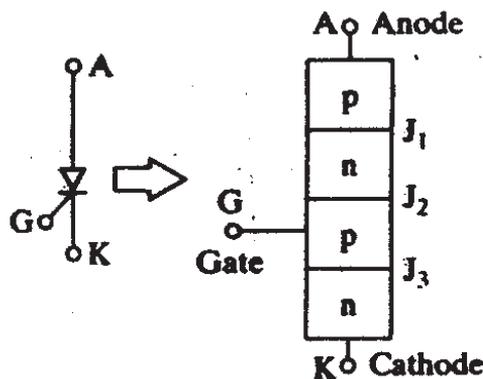
1. Karakteristik Tiristor

Tiristor adalah piranti semikonduktor struktur *pnpn* empat lapisan dengan tiga *junction-pn*. Tiristor mempunyai tiga terminal, yaitu

1. anode,
2. katode, dan
3. *gate*.

Gambar 7.1 menunjukkan simbol tiristor dan tiga *junction-pn*. Pembuatan tiristor di pabrik menggunakan teknik difusi.

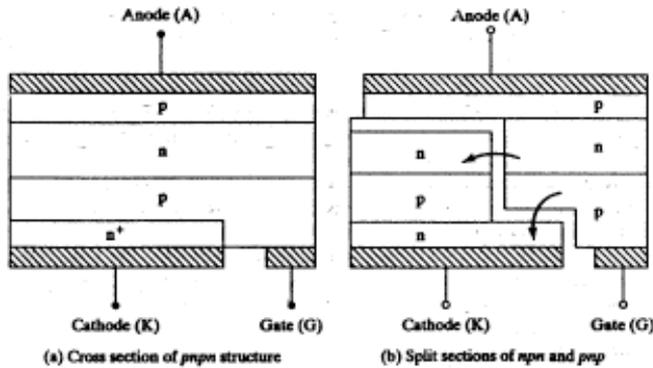
Bagian penampang tiristor yang ditunjukkan pada Gambar 9.16a dapat dibagi menjadi dua bagian, yaitu *npn* dan *pnp* seperti ditunjukkan pada Gambar 9.16b.



Gambar 9.16. Simbol tiristor dan tiga *junction-pn*

Bilamana tegangan anode dibuat positif dengan mengacu ke katode, *junction* J1 dan J3 dibias maju (*forward*). *Junction* J2 dibias balik (*reverse*) dan hanya arus bocor yang kecil yang mengalir dari anode ke katode. Selanjutnya, tiristor dikatakan dalam keadaan *forward blocking* atau *off-state*, suatu kondisi dan arus bocor yang dikenal sebagai arus *off-state* I_D .

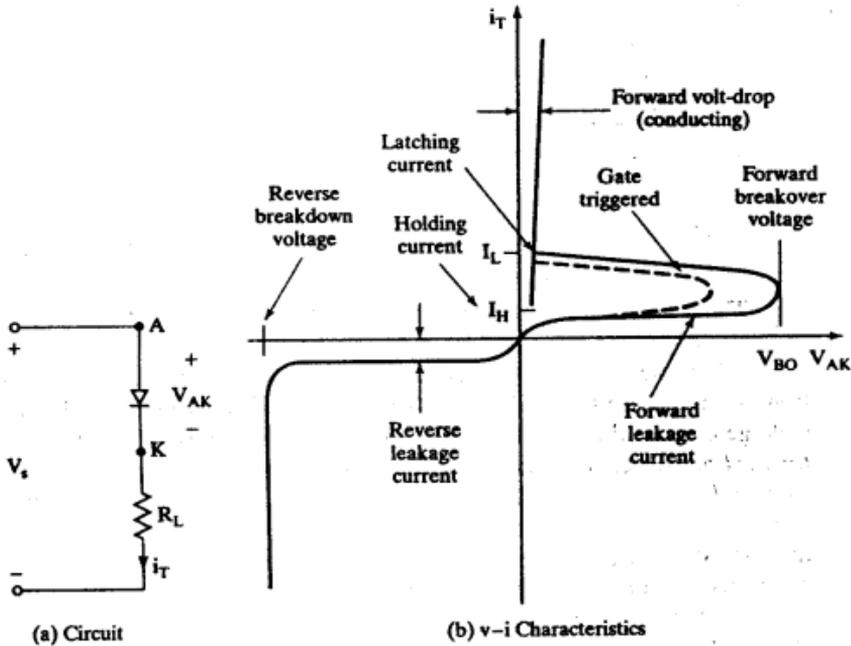
Jika tegangan anode ke katode V_{AK} meningkat tajam, *junction* bias balik J2 putus. Kejadian ini disebut sebagai *avalanche breakdown* dan tegangan yang berhubungan dengannya disebut tegangan *forward breakdown* V_{BO} . *Junction* J1 dan J3 selalu dibias maju sehingga terdapat pergerakan pembawa bebas melalui ketiga *junction* dan menghasilkan arus anode maju yang besar. Selanjutnya, tiristor berada dalam keadaan konduksi atau *on-state*.



Gambar 9.17. Penampang melintang tiristor

Jatuh tegangan diakibatkan oleh jatuh *ohmic* pada empat lapisan yang nilainya kecil, biasanya 1 V. Pada keadaan *on-state*, arus anode dibatasi oleh impedans eksternal atau resistans R_L seperti ditunjukkan pada Gambar 7.3a. Arus anode lebih besar dari nilai arus *latching* I_L sehingga menjaga aliran yang melalui *junction*. Sebaliknya, piranti tersebut kembali pada keadaan *blocking* ketika tegangan anode ke katode berkurang. Arus *latching* I_L adalah arus anode minimal yang dibutuhkan untuk menjaga agar tiristor dengan segera berada dalam keadaan *on* setelah *turned-on* dan si-

nyal *gate* hilang. Karakteristik *v-i* yang khas dari suatu tiristor ditunjukkan pada Gambar 9.18b.



Gambar 9.18. Rangkaian dan karakteristik *v-i* tiristor

Jika tiristor konduksi, akan berlaku seperti halnya dioda konduksi dan tidak ada kontrol tegangan maupun arus pada piranti tersebut. Tiristor akan terus konduksi karena tidak ada lapisan pengosongan pada *junction* J2 yang menyebabkan pergerakan pembawa yang bebas.

2. Tiristor dengan Model Dua-Transistor

Aksi latching regeneratif menyebabkan umpan balik positif dapat didemonstrasikan menggunakan tiristor dengan model dua-transistor. Sebuah tiristor dapat dianggap sebagai dua transistor yang saling melengkapi, yaitu transistor pnp Q_1 dan transistor npn Q_2 seperti ditunjukkan pada Gambar 7.4a. Model rangkaian ekivalennya diperlihatkan pada

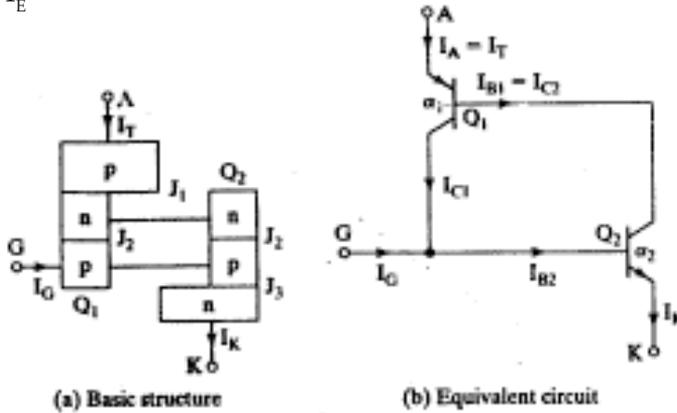
Gambar 9.19b.

Hubungan antara arus kolektor I_C tiristor dengan arus emiter I_E dan arus bocor *junction collector-base* I_{CBO} adalah sebagai berikut.

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$$

Gain arus *common-base* didefinisikan sebagai berikut.

$$\alpha \cong I_C / I_E$$



Gambar 9.19. Model dua-transistor dari suatu tiristor

Untuk transistor Q1, arus emiter adalah arus anode I_A dan arus kolektor I_{C1} dapat dicari dari persamaan berikut.

$$I_{C1} = \alpha_1 I_{E1} + I_{CBO1}$$

α_1 adalah gain arus dan I_{CBO1} adalah arus bocor untuk Q₁. Sama halnya untuk transistor Q2, arus kolektor I_{C2} adalah

$$I_{C2} = \alpha_2 I_K + I_{CBO2}$$

dengan α_2 adalah gain arus dan I_{CBO2} adalah arus bocor untuk Q₂.

3. Turn-On Tiristor

Sebuah tiristor di-turn on-kan melalui peningkatan arus anode. Hal ini dapat dikerjakan dengan cara-cara berikut ini.

a. Termal

Jika temperatur tiristor tinggi, akan terdapat peningkatan jumlah pasangan elektron-hole yang dapat meningkatkan arus bocor. Peningkatan arus menyebabkan α_1 dan α_2 meningkat. Aksi regeneratif menyebabkan $(\alpha_1 + \alpha_2)$ cenderung *unity* dan tiristor dapat menjadi *turned on*. Jenis *turn on* ini dapat menyebabkan termal ringan dan biasanya dihindari.

b. Cahaya

Jika cahaya mengenai *junction* tiristor, pasangan elektron-hole akan meningkat dan tiristor dapat menjadi *turned on*. Tiristor yang diaktifkan dengan cahaya akan di-*turn on*-kan dengan menerapkan cahaya pada wafer silikon.

c. Tegangan Tinggi

Jika tegangan maju anode ke katode lebih besar dari tegangan *break-down* maju V_{BO} , arus bocor akan mengalir untuk memulai *turn on* regeneratif. Jenis *turn on* ini dapat menyebabkan kerusakan dan biasanya dihindari.

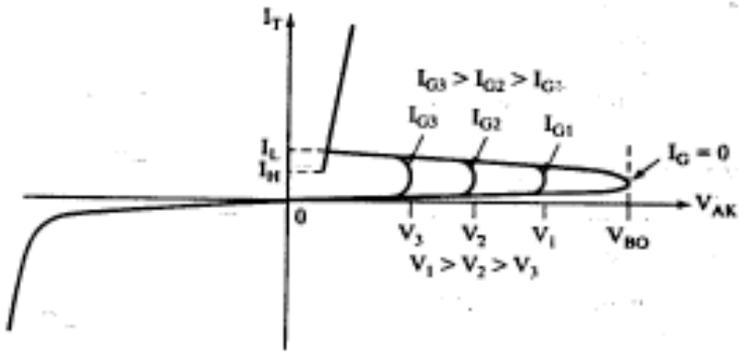
4. Arus Gate

Jika tiristor dibias maju, injeksi arus gate dengan menerapkan tegangan gate positif antara terminal gate dan katode akan membuat tiristor menjadi *turned on*. Jika arus gate meningkat, tegangan blocking maju menurun seperti ditunjukkan pada Gambar 9.20.

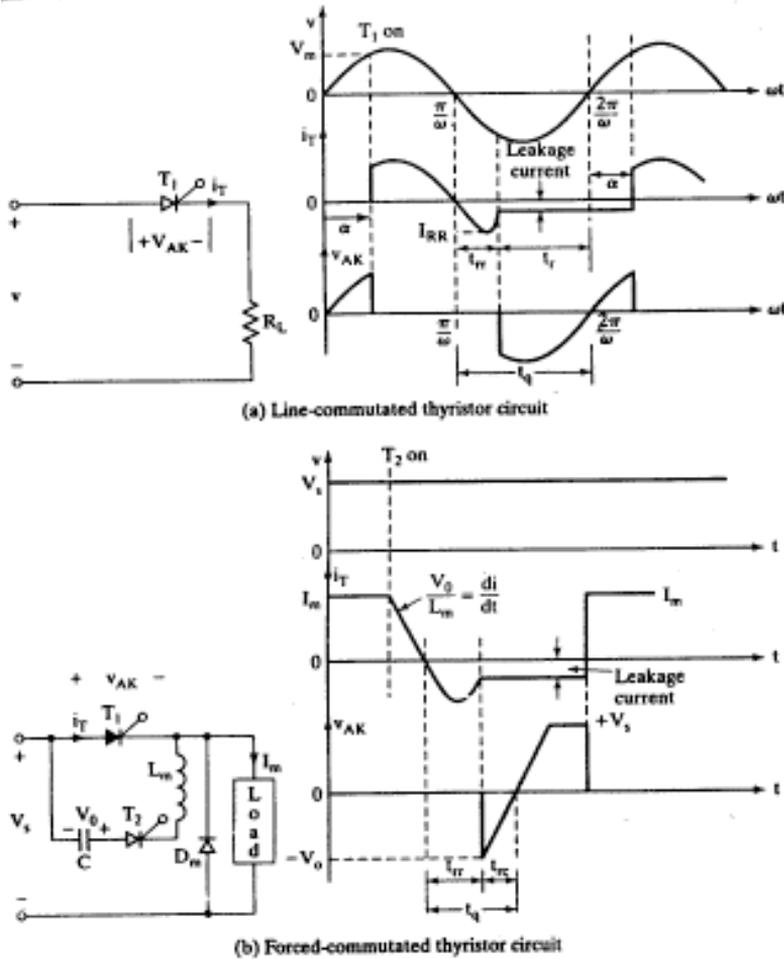
5. Turn-Off Tiristor

Sebuah tiristor dalam keadaan *turn on* dapat di-*turn off*-kan dengan mengurangi arus maju di bawah aras arus *holding* I_H . Ada berbagai teknik untuk membuat tiristor menjadi *turned off*. Dalam seluruh teknik komu-

tasi, arus anode dibawa arus *holding* untuk waktu yang cukup lama sehingga seluruh pembawa berlebih dalam empat lapisan disapu keluar atau direkombinasi. Gambar 9.21 menunjukkan karakteristik *turn off* dari suatu tiristor.



Gambar 9.20. Pengaruh arus *gate* pada tegangan blocking maju



Gambar 9.21. Karakteristik *turn-off* tiristor

Latihan:

1. Jelaskan prinsip kerja diode daya!
2. Jelaskan prinsip kerja tiristor daya!
3. Jelaskanlah pengertian bias maju dan bias mundur pada dioda!
4. Jelaskanlah pengertian efek Zener dan Avalanche!
5. Jelaskanlah karakteristik *turn-on* tiristor!
6. Jelaskanlah karakteristik *turn-off* tiristor!•

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

A. Penyearah Dioda

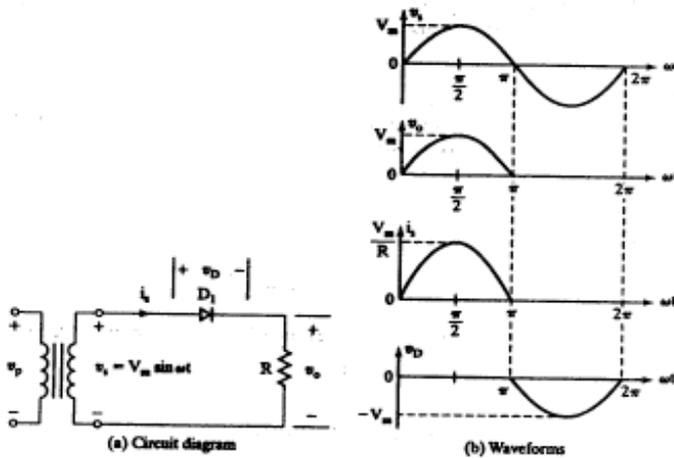
Dioda secara luas digunakan sebagai penyearah (*rectifier*). Sebuah pe-

nyearah 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.

B. 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.

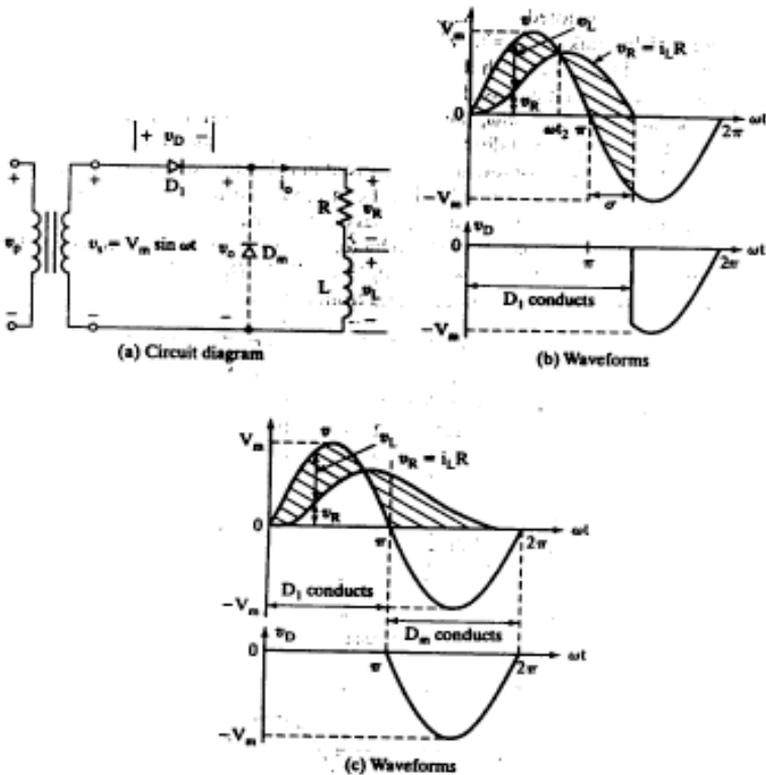


Gambar 10.1. Penyearah gelombang setengah fase tunggal

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 masu-

kan, 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. Periode konduksi dioda D1 akan diperpanjang melewati 180° hingga arus menjadi nol pada saat $\omega t = \pi + \sigma$ karena bebannya adalah induktif. 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 dili-

hat pada Gambar 10.3a. Untuk $v_s > E$, dioda D1 konduksi. Sudut α pada saat dioda mulai konduksi dapat dicari dari menggunakan persamaan berikut.

$$V_m \sin \alpha = E$$

Dengan demikian,

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

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 berikut.

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

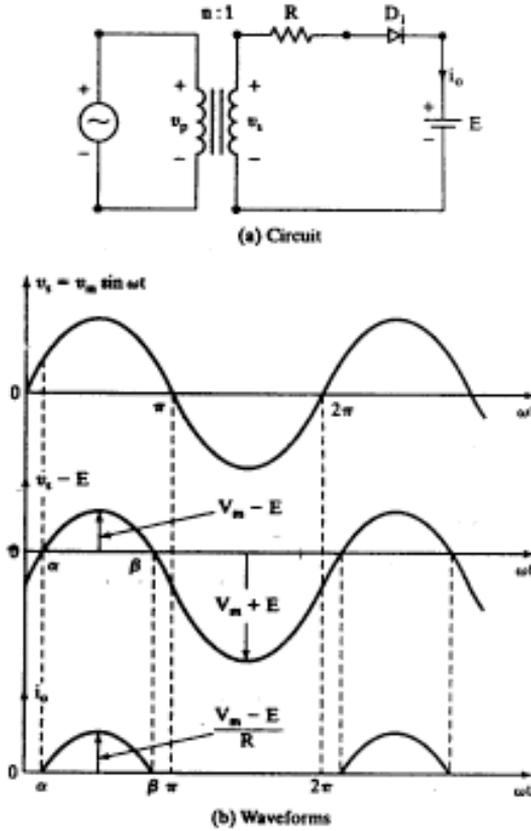
C. Penyearah Gelombang Penuh Fase Tunggal

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. Tanpa arus DC yang melalui trafo, tidak ada masalah penjenuhan inti trafo. Tegangan keluaran rerata adalah sebagai berikut.

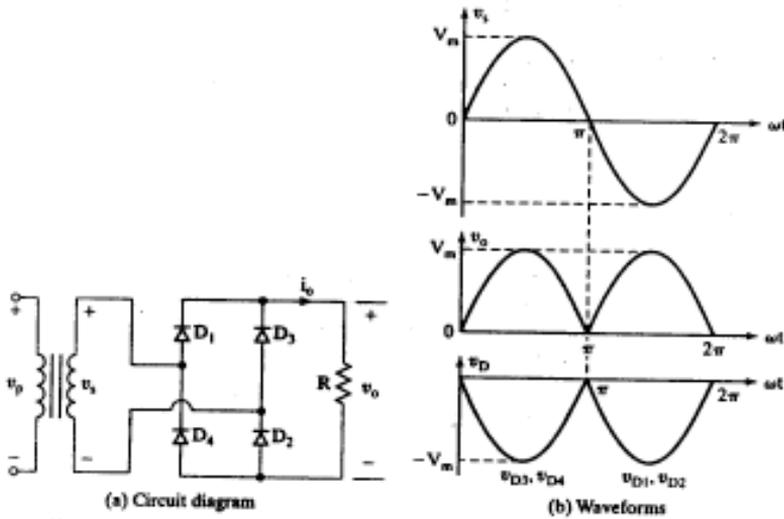
$$V_d = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} V_m \sin \omega t dt = \frac{2V_m}{\pi} = 0,6366V_m$$

Dari pada menggunakan penyearah gelombang penuh dengan trafo *center-tapped*, lebih baik digunakan rangkaian penyearah dengan empat

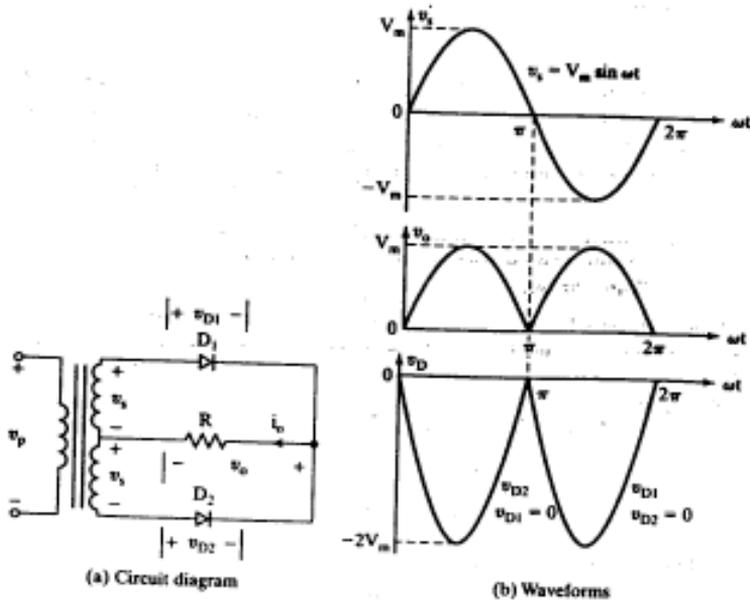
buah dioda seperti ditunjukkan pada Gambar 3.5a.



Gambar 10.3. Pengisi baterai



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 D_1 dan D_2 . Pada saat siklus negatif, dioda D_3 dan D_4

konduksi. Bentuk gelombang tegangan keluarannya ditunjukkan pada Gambar 10.5b dan terlihat 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.

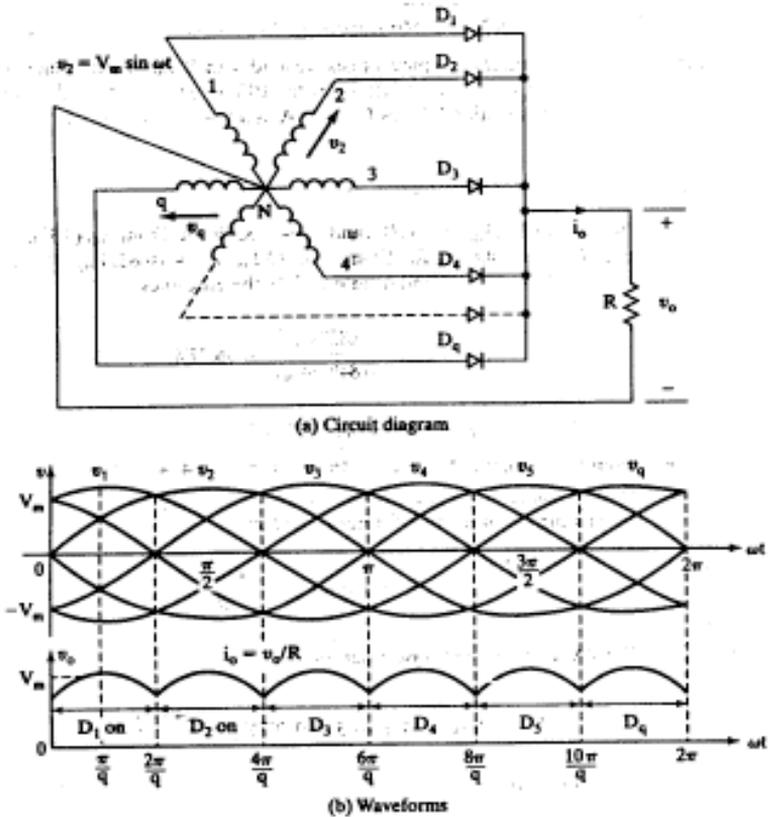
D. Penyearah Fase Jamak

Berdasarkan pembahasan sebelumnya, tegangan keluaran rerata yang diperoleh dari penyearah fase tunggal gelombang penuh adalah $0,6366V_m$. 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 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 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, 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

E. Konverter DC-DC

Dalam banyak aplikasi di industri, perlu 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 ekuivalen DC dengan transformator AC dengan rasio lilitan variabel kontinyu. 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 troli, 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 motor DC untuk mengembalikan energi ke catu daya. Keunggulan ini dapat menghemat energi untuk sistem transportasi yang sering berhenti mendadak. Konverter DC dapat digunakan dalam regulator tegangan DC dan sebagai konjungsi dengan sebuah induktor untuk membangkitkan sumber arus DC, khususnya untuk inverter sumber arus.

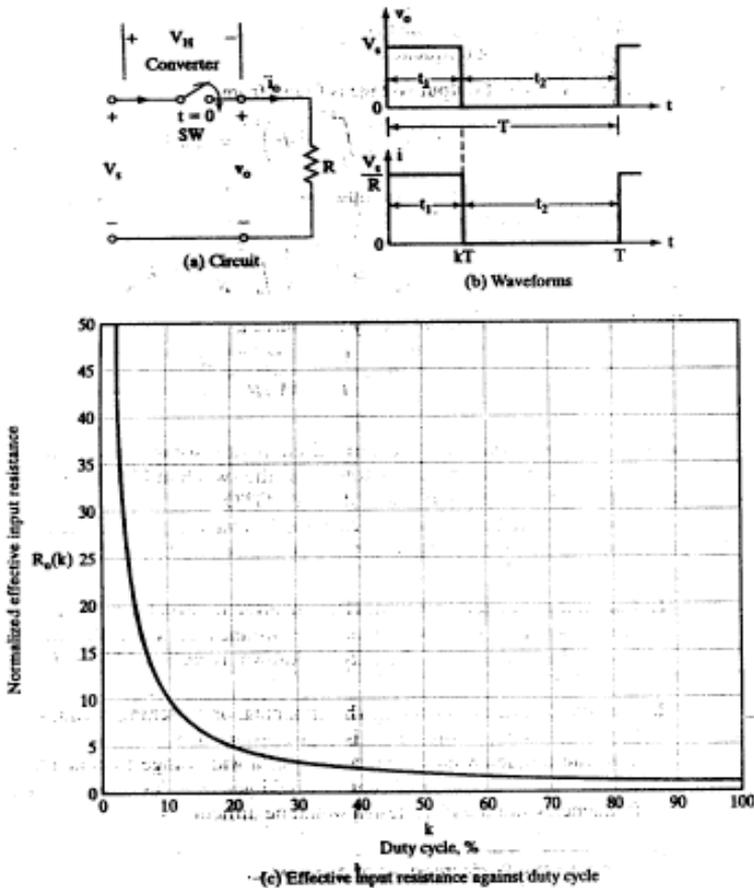
F. Prinsip Operasi Penurun Tegangan

Prinsip operasi penurun tegangan (*step-down*) dapat dijelaskan menggunakan Gambar 10.7a. Jika sakelar SW, yang dikenal sebagai *chopper*, ditutup pada saat t_1 , akan timbul tegangan masukan v_s pada beban. Jika sakelar 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.

Sakelar konverter dapat diimplementasikan 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 praktiknya, terbatas hanya untuk jatuh tegangan pada rentang 0,5–2 V. Untuk kepentingan penyederhanaan, jatuh tegangan tersebut diabaikan untuk piranti semikonduktor daya tersebut.

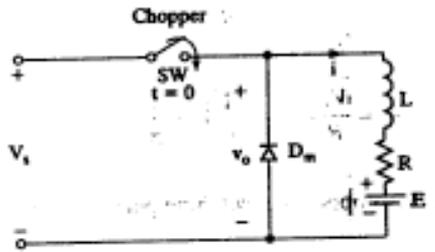


Gambar 10.8. Konverter penurun tegangan dengan beban resistif

G. Konverter Penurun Tegangan dengan Beban RL

Sebuah konverter dengan beban RL ditunjukkan pada Gambar 10.9. Operasi konverter dapat dibagi menjadi dua mode. Saat mode 1, konverter ditutup dan arus mengalir dari catu daya ke beban. Ketika 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

$$V_S = R_1 + L \frac{di_1}{dt} + E$$

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

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

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 berikut.

$$0 = R_2 + L \frac{di_2}{dt} + E$$

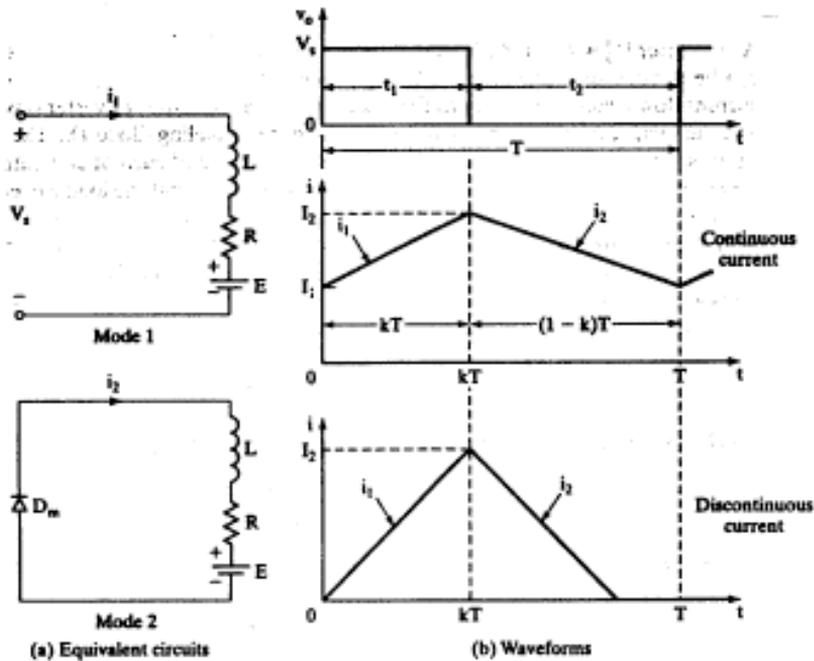
Arus inisial $i_2(t = 0) = I_2$ memberikan sumbu asal waktu (yakni $t =$

0) pada permulaan mode 2 dan diperoleh

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

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 ekivalen dan bentuk gelombang beban RL

H. 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.

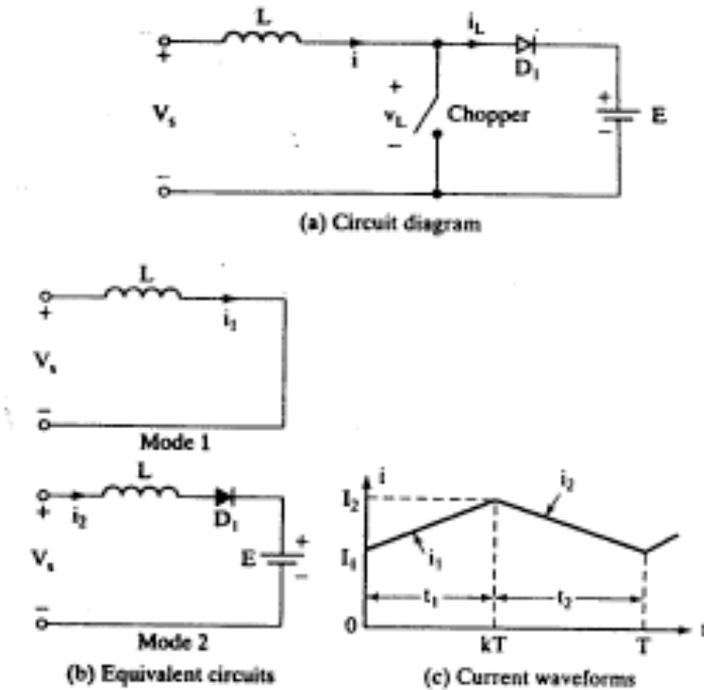
Arus induktor pada mode 1 diberikan oleh persamaan

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

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

$$0 < V_s < E$$

I. 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 atau frekuensi variabel dapat ditetapkan. Tegangan keluaran variabel dapat diperoleh dengan memvariasikan tegangan DC masukan dan menjaga gain konstanta inverter. Jika tegangan masukan DC adalah tetap dan tidak dapat dikontrol, tegangan keluaran variabel dapat diperoleh dengan memvariasikan gain inverter. Secara normal, hal itu 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 si-

nusoidal. Akan tetapi, bentuk gelombang inverter dalam praktiknya non-sinusoidal dan mengandung harmonik. Untuk aplikasi daya rendah dan menengah, gelombang tegangan persegi atau gelombang hampir persegi dapat diterima. Namun, 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 *stanby*, dan *uninterruptible power supplies* (UPS). 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, dan
3. 115 hingga 200 V pada 400 Hz.

Inverter dapat diklasifikasikan ke dalam dua jenis, yaitu

1. inverter satu fase dan
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. Invert-

er-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.

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. Jika transistor *off*, tegangan baliknya adalah V_s dan bukan $V_s/2$. Inverter jenis ini dikenal sebagai *half-bridge inverter*.

Tegangan keluaran *root-mean-square* (rms) dapat dicari dari persamaan berikut.

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

Tegangan keluaran seketika dapat dinyatakan dalam deret Fourier sebagai berikut.

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

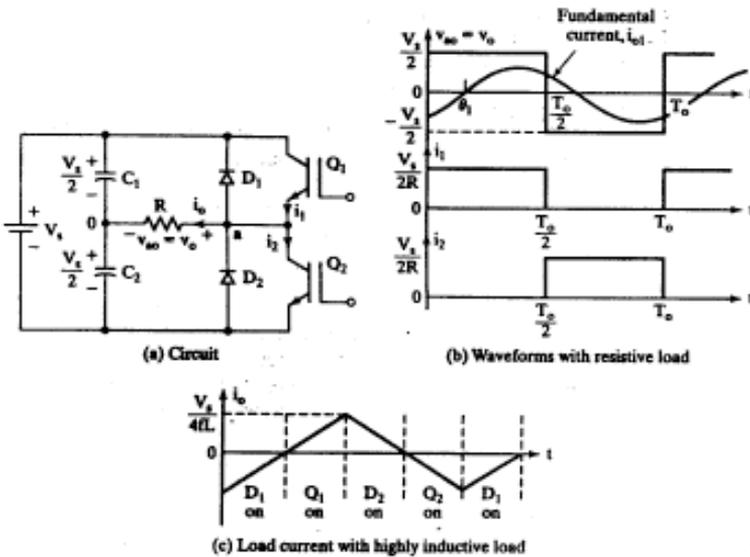
dengan

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

yang akan memberikan tegangan keluaran v_o

$$v_o = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \sin n\omega t$$

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



Gambar 10.12. Inverter jembatan setengah satu fase

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 pada beban menjadi kebalikannya, yaitu $-V_s$. Bentuk gelombang untuk tegangan keluaran ditunjukkan pada Gambar 10.13b.

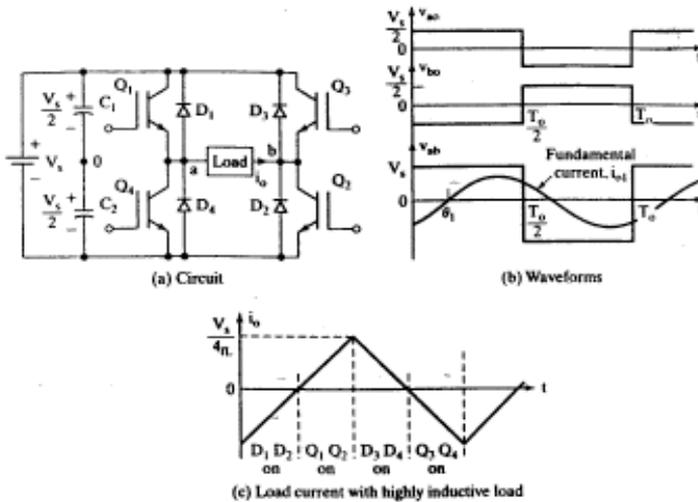
Tegangan keluaran rms dapat dicari menggunakan persamaan berikut.

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

Tegangan keluaran sesaat v_0

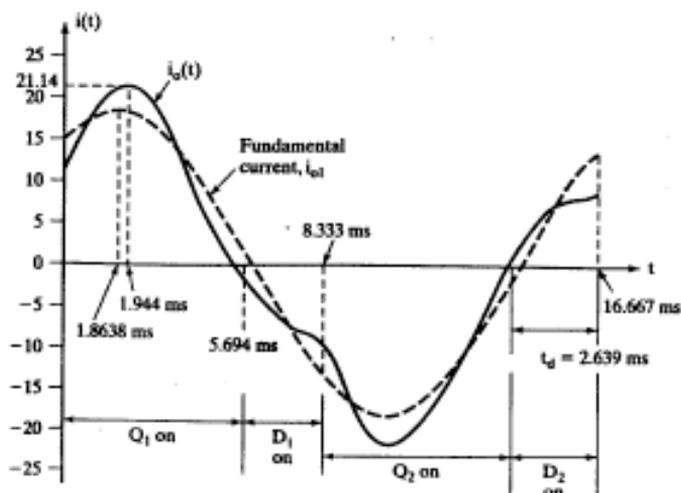
$$v_0 = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_S}{n\pi} \sin n\omega t$$

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



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 , 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

3. Inverter Tiga Fase

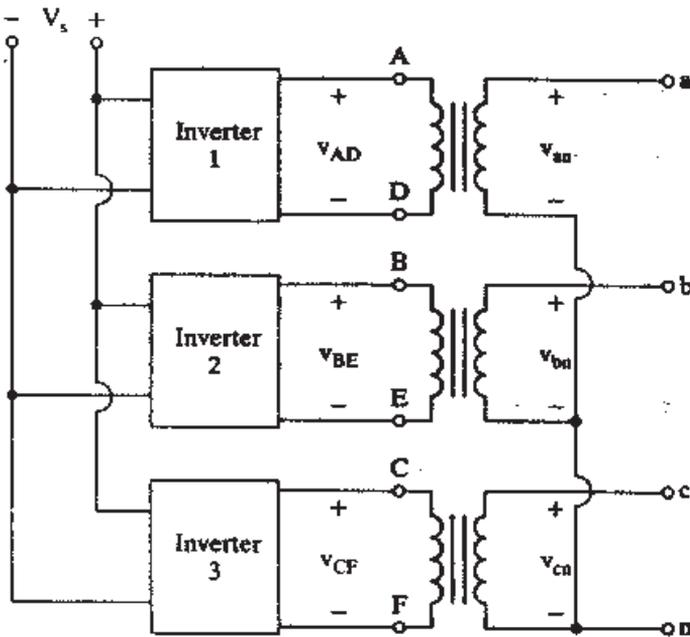
Inverter tiga fase biasanya digunakan untuk aplikasi daya tinggi. Tiga inverter jembatan setengah (atau *full*) satu fase dapat dihubungkan paralel seperti ditunjukkan pada Gambar 10.15a untuk membentuk konfigurasi inverter tiga fase. Sinyal pencetus (*gating*) inverter satu fase harus dimajukan atau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

Belitan primer transformator harus diisolasi satu sama lain, sedangkan 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, tegangan keluaran tiga fasenya juga tidak seimbang.

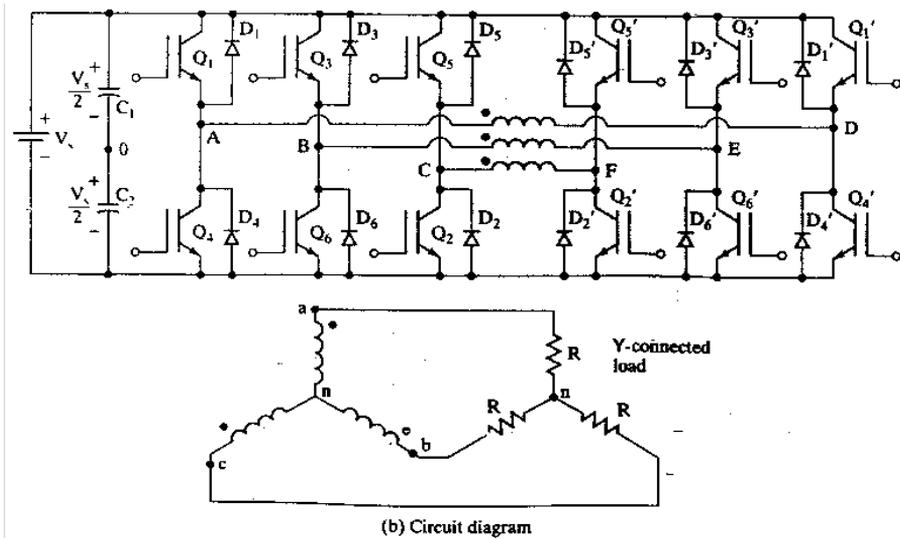
Keluaran tiga fase dapat diperoleh dari konfigurasi enam transistor dan enam dioda. Dua jenis kontrol sinyalnya dapat diterapkan untuk transistor: konduksi 180° atau konduksi 120° . Konduksi 180° pemanfaatannya lebih baik untuk pensakelaran sehingga lebih disukai.

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

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



(a) Schematic



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

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

J. Penyearah Terkontrol

Pada pembahasan sebelumnya, diperoleh pengetahuan bahwa penyearah dioda hanya memberikan tegangan keluaran yang tetap. Untuk memperoleh tegangan keluaran yang terkontrol, tiristor kontrol fase digunakan 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. Dalam kasus beban induktif, tiristor di-*turn off*-kan dengan menyalakan tiristor lain dari penyearah tersebut pada saat siklus setengah negatif tegangan masukan.

Penyearah terkontrol fase lebih sederhana, lebih murah, dan efisiensi penyearahannya umumnya di atas 95%. Penyearah tersebut mengubah

dari AC ke DC sehingga penyearah terkontrol sering juga disebut konverter AC-DC dan digunakan secara luas pada aplikasi di industri, khususnya pengemudi kecepatan variabel yang bervariasi dari ukuran dengan daya kuda (*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. semikonverter (*semi converter*)
- b. konverter penuh (*full converter*)
- c. konverter ganda (*dual converter*)

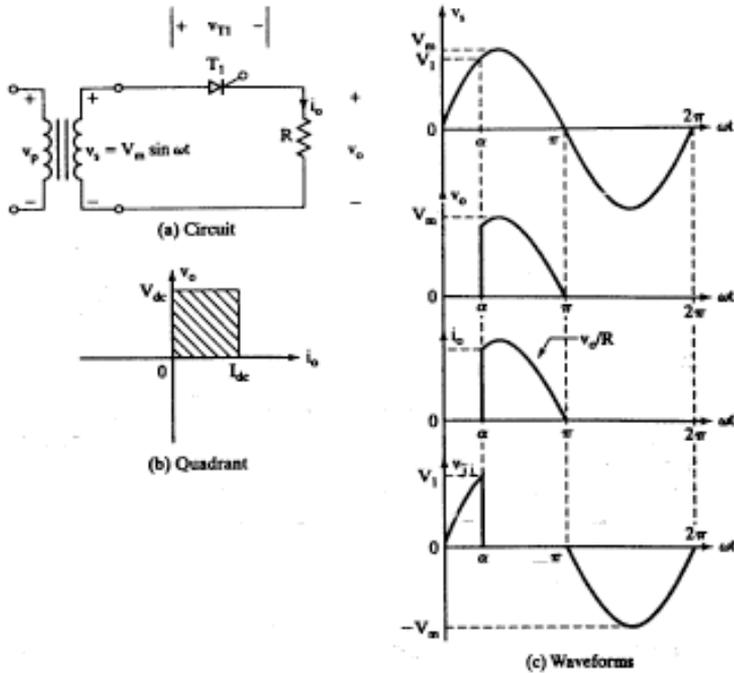
Semikonverter adalah konverter kuadran-satu dan mempunyai satu polaritas tegangan dan arus keluaran. Konverter penuh adalah konverter kuadran-dua dan polaritas tegangan keluarannya dapat positif atau negatif. Akan tetapi, arus keluaran konverter penuh hanya mempunyai satu polaritas. Konverter ganda dapat beroperasi dalam empat kuadran dan tegangan serta 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 unjuk kerja konverter terkontrol fase dengan beban RL. Akan tetapi, untuk menyederhanakan analisis, beban induktans dapat diasumsikan sangat tinggi sehingga arus beban kontinu dan mempunyai riak yang dapat diabaikan.

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, anode tiristor adalah positif dengan mengacu pada katode dan tiristor dikatakan bias maju (*forward biased*). Bilamana tiristor T1 dinyalakan pada $\omega t = \alpha$, tiristor T1 konduksi dan tegangan masukan muncul pada beban. Jika tegangan masukan mulai menuju negatif pada $\omega t = \pi$, anode tiristor adalah negatif, mengacu pada katodenya. 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 dengan tegangan dan arus keluaran mempunyai satu polaritas. Gambar 10.16c me-

nunjukkan 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 melalui persamaan berikut.

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

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

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

Normalisasi tegangan keluaran dengan mengacu V_{dm} . Tegangan keluaran ternormalisasi adalah

$$\begin{aligned} V_n &= \frac{V_d}{V_{di}} \\ &= 0,5(1 + \cos \alpha) \end{aligned}$$

Tegangan keluaran rms-nya didapatkan melalui

$$\begin{aligned}
 V_{rms} &= \left[\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m^2 \sin^2 \omega t \, d(\omega t) \right]^{1/2} \\
 &= \left[\frac{V_m^2}{4\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (1 - \cos 2\omega t) d(\omega t) \right]^{1/2} \\
 &= \frac{V_m}{2} \left[\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]^{1/2}
 \end{aligned}$$

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 katode T_1 melalui rangkaian terisolasi-gerbang

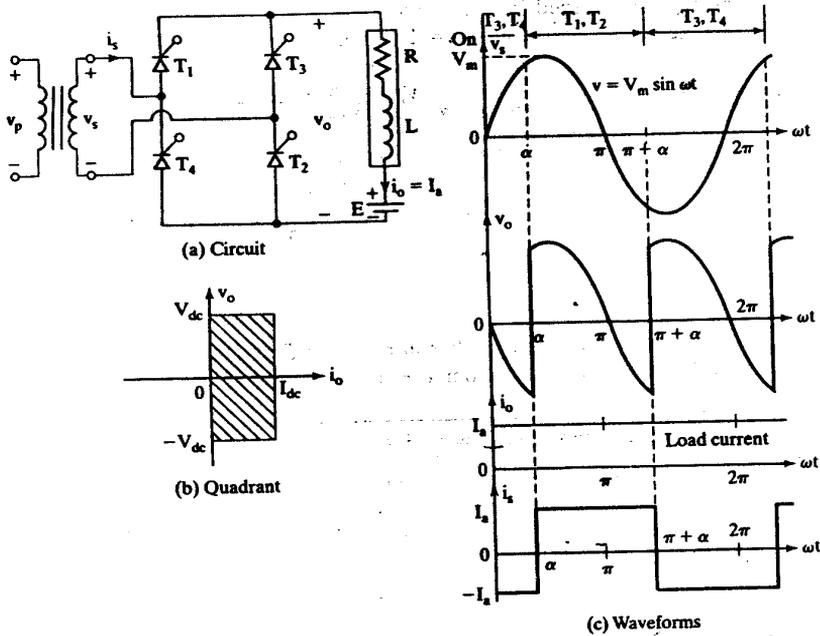
2. Konverter Penuh Fase Tunggal

Susunan rangkaian konverter penuh 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 T1 dan T2 terbias maju. Jika kedua tiristor secara simultan dinyalakan pada $\omega t = \alpha$, beban terhubung ke catu daya melalui T1 dan T2. Tiristor T1 dan T2 kontinu konduksi melampaui $\omega t = \pi$ karena beban induktif, sementara tegangan masukan senantiasa negatif.

Pada saat tegangan masukan siklus setengah negatif, tiristor T3 dan T4 memakai tegangan catu pada tiristor T1 dan T2 sebagai tegangan *blocking* balik. T1 dan T2 di-*turn off*-kan karena saluran (*line*) atau komunikasi alami dan arus beban dikirim dari T1 dan T2 ke T3 dan T4.

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

gan keluaran, dan arus masukan dan keluaran.



Gambar 10.17. Konverter penuh fase tunggal

Saat periode dari α ke π , tegangan masukan v_s dan arus masukan i_s adalah positif sehingga daya mengalir dari catu daya ke beban. Konverter, dalam hal ini, 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 sehingga 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 melalui persamaan berikut.

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

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

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

Tegangan keluaran rms-nya diberikan oleh

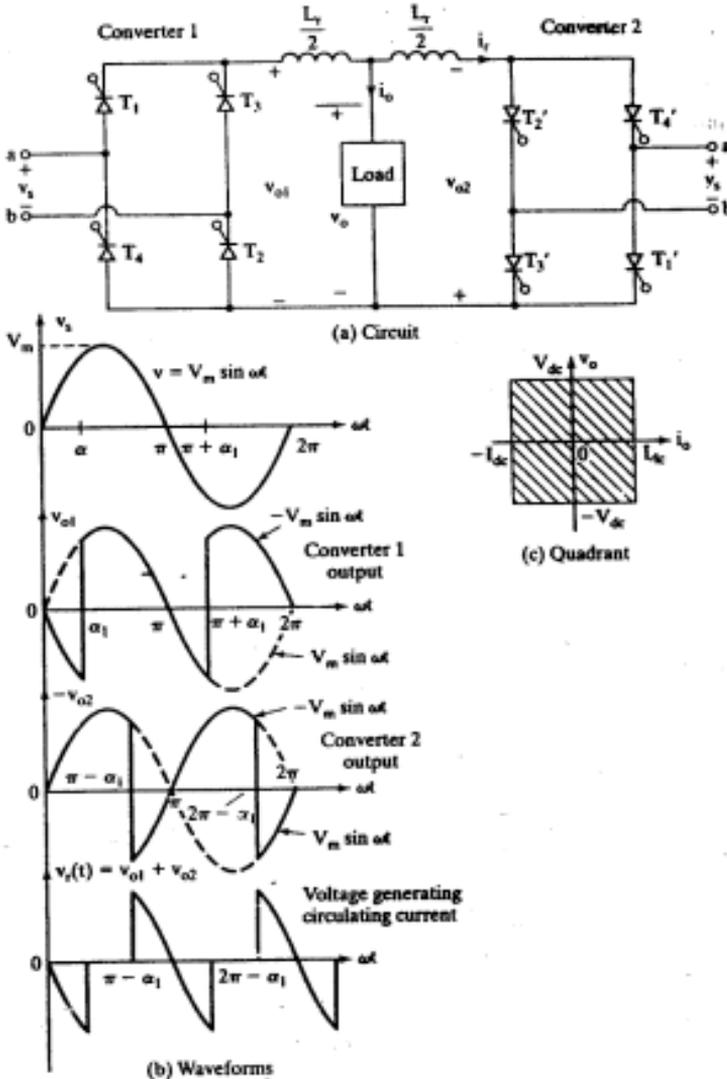
$$\begin{aligned}
 V_{rms} &= \left[\frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) \right]^{1/2} \\
 &= \left[\frac{V_m^2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} (1 - \cos 2\omega t) d(\omega t) \right]^{1/2} \\
 &= \frac{V_m}{\sqrt{2}} = V_s
 \end{aligned}$$

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

3. Konverter Ganda Fase Tunggal

Bagian sebelumnya telah menjelaskan bahwa konverter penuh fase

tunggal dengan beban induktif hanya beroperasi kuadran-dua. Jika dua konverter penuh dihubungkan saling membelakangi seperti terlihat pada Gambar 8.3a, tegangan keluaran dan aliran arus beban dapat dibalikkan (*reversed*).



Gambar 10.18. Konverter ganda fase tunggal

Sistem seperti ini beroperasi dengan kuadran-empat dan disebut

konverter ganda. Konverter ganda 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 dengan dua tegangan keluaran rerata yang sama. Gambar 10.18c menunjukkan karakteristik v-i dari suatu konverter ganda.

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 kerja komponen penaik tegangan DC!
5. Sebutkan dan jelaskanlah prinsip kerja komponen penurun tegangan DC!
6. Jelaskanlah karakteristik v-i dari suatu konverter ganda!•

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: Har-

- moni Alam Dan Peluang Bisnis, Buku Pedoman Pembangunan PLT-MH 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. Sloopweg, 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 (3rd APTECS)*, 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 (3rd APTECS)*, 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. Hutauruk, 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. •

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.

AC, 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 Indonesianya 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, sakelar pemisah, *bus station*, reaktor 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.

Induktans 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 unjuk kerja 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

PLTAngin, 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. Namun, jika radius konduktor relatif kecil terhadap jarak antara kedua kawat, 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 (80-250 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. Namun, jika kita hanya meninjau frekuensi kerja (50

Hz atau 60 Hz), 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 source* (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 energi 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. •

Indeks

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
anode, 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

B

Bahan bakar fosil, 5
belitan, 84, 85, 86, 146, 148, 196, 197,
208
BiMOSFET, 178, 179
biomass, 5, 6, 102, 103

C

Carbon, 89

Circular Mil, 22
CO₂, 89, 90, 91, 124, 140
Completely Self-Protecting, 83

D

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

E

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

F

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

G

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

H

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

I

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

J

JFET, 173

K

kapasitans, 22, 35, 36, 41, 42, 43, 44, 66,
174, 175, 176, 181

Kapasitor, 65, 75

katode, 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

L

Lightning arrester, 75
 linear, 23, 52, 169, 176

M

manajemen beban, 101
 MOSFET, 173, 174, 175, 176, 178, 179,
 181, 198, 204

O

O₂, 89, 94, 95, 97, 104

P

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
 PLTAngin, 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

R

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

S

sakelar, 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

T

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

U

UMKM, 133, 135, 137
utilitas, 10, 11, 15

V

Voltage regulation, 152, 153, 155

Z

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 Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta (2010 – sekarang)
Pendidikan	S1: Program Studi 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	Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik UMY Jl. Brawijaya, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta 55183
Nomor Telepon/ Faks	0274-387656/ 0274-387646
Alamat e-mail	ramadoni@umy.ac.id