

Muhamad Ali

APLIKASI ELEKTRONIKA DAYA

Pada Sistem Tenaga Listrik

Elektronika Daya merupakan salah satu bidang ilmu yang mempelajari dan membahas aplikasi elektronika yang berkaitan dengan peralatan listrik yang berdaya cukup besar. Berbagai peralatan dan aplikasi nyata di industri yang menggunakan sumber listrik dengan kapasitas daya yang besar seperti motor listrik, pemanas, pendingin, fan, kompresor, pompa, konveyor dan aplikasi-aplikasi lainnya. Elektronika daya mulai populer setelah berbagai pengaturan secara konvensional kurang dapat memenuhi kebutuhan industri.

Buku ini membahas tentang materi elektronika daya dan aplikasinya dalam sistem tenaga listrik. Secara garis besar, buku ini membahas tentang rangkaian elektronika daya yang terdiri atas rangkaian pengubah listrik AC menjadi DC, pengubah listrik DC menjadi DC dengan tegangan yang dapat diatur, pengubah listrik AC menjadi AC dengan tegangan dan frekuensi yang dapat diatur serta rangkaian pengubah listrik DC menjadi AC. Pembahasan dilengkapi dengan contoh aplikasi baik di rumah tangga maupun industri sehingga akan memudahkan pembaca dalam memahaminya.



UNY Press

Jl. Gejayan, Gg. Alamanda, Komplek Fakultas Teknik UNY
Kampus UNY Karangmalang Yogyakarta 55281
Telp: 0274 - 589346
Mail: unypress.yogyakarta@gmail.com

Anggota Ikatan Penerbit Indonesia (IKAPI)
Anggota Asosiasi Penerbit Perguruan Tinggi Indonesia (APPTI)

ISBN 978-602-5566-79-0



9 786025 566790

Muhamad Ali

Muhamad Ali

APLIKASI ELEKTRONIKA DAYA PADA SISTEM TENAGA LISTRIK

UNY PRESS

APLIKASI ELEKTRONIKA DAYA

Pada Sistem Tenaga Listrik



APLIKASI ELEKTRONIKA
DAYA PADA SISTEM
TENAGA LISTRIK

Muhamad Ali

**UNDANG-UNDANG REPUBLIK INDONESIA
NOMOR 28 TAHUN 2014
TENTANG HAK CIPTA**

Pasal 2

Undang-Undang ini berlaku terhadap:

- a. semua Ciptaan dan produk Hak Terkait warga negara, penduduk, dan badan hukum Indonesia;
- b. semua Ciptaan dan produk Hak Terkait bukan warga negara Indonesia, bukan penduduk Indonesia, dan bukan badan hukum Indonesia yang untuk pertama kali dilakukan Pengumuman di Indonesia;
- c. semua Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dan pengguna Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait bukan warga negara Indonesia, bukan penduduk Indonesia, dan bukan badan hukum Indonesia dengan ketentuan:
 1. negaranya mempunyai perjanjian bilateral dengan negara Republik Indonesia mengenai perlindungan Hak Cipta dan Hak Terkait; atau
 2. negaranya dan negara Republik Indonesia merupakan pihak atau peserta dalam perjanjian multilateral yang sama mengenai perlindungan Hak Cipta dan Hak Terkait.

**BAB XVII
KETENTUAN PIDANA**

Pasal 112

Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 7 ayat (3) dan/atau Pasal 52 untuk Penggunaan Secara Komersial, dipidana dengan pidana penjara paling lama 2 (dua) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp300.000.000,00 (tiga ratus juta rupiah).

- (1) Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
- (2) Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
- (3) Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
- (4) Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

APLIKASI ELEKTRONIKA DAYA PADA SISTEM TENAGA LISTRIK

Muhamad Ali



APLIKASI ELEKTRONIKA DAYA PADA SISTEM TENAGA LISTRIK

Oleh: Muhamad Ali

ISBN: xxxxxxxxxxxxxxxx

Edisi Pertama

Diterbitkan dan dicetak oleh:

UNY Press

Jl. Gejayan, Gg. Alamanda, Komplek Fakultas Teknik UNY

Kampus UNY Karangmalang Yogyakarta 55281

Telp: 0274 – 589346

Mail: unypress.yogyakarta@gmail.com

© 2018 Muhamad Ali

Anggota Ikatan Penerbit Indonesia (IKAPI)

Anggota Asosiasi Penerbit Perguruan Tinggi Indonesia (APPTI)

Penyunting Bahasa:

Desain Sampul: Muh Wildanul Firdaus

Tata Letak: Muh Wildanul Firdaus

Muhamad Ali

Aplikasi Elektronika Daya pada Sistem Tenaga Listrik

-Ed.1, Cet.1.- Yogyakarta: UNY Press 2018

vii + 134 hlm; 16 x 23 cm

ISBN: xxx-xxx-xxxx-xx-x

1. Aplikasi Elektronika Daya pada Sistem Tenaga Listrik

Isi di luar tanggung jawab percetakan

Kata Pengantar

Alhamdulillah Robbil 'alamin, puji dan syukur Kami panjatkan kehadiran Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan penulisan Buku dengan judul "*Aplikasi Elektronika Daya pada Sistem Tenaga Listrik*". Buku ini disusun guna melengkapi pustaka tentang elektronika daya yang masih sangat kurang di Indonesia. Dengan hadirnya buku ini, mahasiswa dapat lebih mudah belajar mata kuliah Elektronika Daya sehingga diharapkan mampu membekali bidang ilmu keteknikoelektronan.

Buku ini membahas tentang materi elektronika daya dan aplikasinya dalam sistem tenaga listrik. Secara garis besar, buku ini membahas tentang rangkaian elektronika daya yang terdiri atas rangkaian pengubah listrik AC menjadi DC, pengubah listrik DC menjadi DC dengan tegangan yang dapat diatur, pengubah listrik AC menjadi AC dengan tegangan dan frekuensi yang dapat diatur serta rangkaian pengubah listrik DC menjadi AC. Pembahasan dilengkapi dengan contoh aplikasi baik di rumah tangga maupun industri sehingga akan memudahkan pembaca dalam memahaminya.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam penyusunan dan penyempurnaan buku ini. Tidak ada gading yang tidak retak,

demikian pula dengan buku ini yang masih jauh dari kata sempurna. Kritik, saran dan masukan akan sangat diharapkan dan semoga buku ini dapat memberikan manfaat. Amin.

Yogyakarta, 1 September 2018

Penulis,

Daftar Isi

	halaman
Kata Pengantar	v
Daftar Isi.....	vii
BAB 1 PENGANTAR ELEKTRONIKA DAYA.....	1
1.1 Pengantar	1
1.2 Ruang Lingkup	2
1.3 Karakteristik Elektronika Daya.....	7
1.4 Fungsi Komponen Semikonduktor	10
1.5 Contoh Penggunaan Elektronika Daya.....	14
BAB 2 KOMPONEN SEMIKONDUKTOR DAYA.....	15
2.1 Pengantar	15
2.2 Dioda Power	16
2.3 Transistor Power	18
2.4 Transistor Efek Medan (FET).....	23
2.5 Silicon Control Rectifier (SCR).....	27
2.6 Uni Junction Transistor (UJT)	30
2.7 Diac.....	32
2.8 Triac.....	34
2.9 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).....	36
BAB 3 PENYEARAH DAYA DAN APLIKASINYA.....	39
3.1 Pengantar	39
3.2 Rangkaian Penyearah Daya Satu Fasa.....	40
3.3 Rangkaian Penyearah Daya Tiga Fasa.....	49
3.4 Aplikasi Rangkaian Penyearah Daya.....	53

BAB 4 RANGKAIAN PEMICU DAN KOMUTASI SCR.....	57
4.1 Pengantar	57
4.2 Prinsip Pemicuan Komponen Semikonduktor.....	58
4.3 Rangkaian Pemicu Transistor	59
4.4 Rangkaian Komutasi	66
 BAB 5 PENYEARAH TERKENDALI DAN APLIKASINYA.....	 69
5.1 Pengantar	69
5.2 Rangkaian Penyearah Terkendali Satu Fasa.....	71
5.3 Rangkaian Penyearah Terkendali Tiga Fasa.....	82
5.4 Aplikasi Rangkaian Penyearah Terkendali.....	88
 BAB 6 AC REGULATOR DAN APLIKASINYA	 93
6.1 Pengantar	93
6.2 AC Regulator Satu Fasa.....	94
6.3 Rangkaian AC Regulator Tiga Fasa	98
6.4 Aplikasi AC Regulator.....	102
 BAB 7 RANGKAIAN DC CHOPPER DAN APLIKASINYA.....	 107
7.1 Pengantar	107
7.2 Rangkaian Chopper Step-Down	108
7.3 Rangkaian Chopper Step-Up.....	111
7.4 Rangkaian Chopper Step-Down/Up.....	113
7.5 Kelas-Kelas Chopper	114
7.6 Aplikasi Rangkaian Chopper	119
 BAB 8 RANGKAIAN INVERTER DAN APLIKASINYA.....	 123
8.1 Pengantar	123
8.2 Rangkaian Inverter Satu Fasa	125
8.3 Rangkaian Inverter Tiga Fasa	128
8.4 Rangkaian Penghalus Gelombang Kotak.....	130
8.5 Aplikasi Rangkaian Inverter	132

BAB 9 SIMULASI RANGKAIAN ELEKTRONIKA DAYA DENGAN	
SOFTWARE PSIM	137
9.1 Pengantar	137
9.2 Software Simulasi PSIM.....	138
9.3 Membuat Rangkaian Elektronika Daya.....	141
9.4 Melakukan Simulasi Rangkaian	145
9.5 Simulasi Rangkaian Penyearah Terkendali dengan SCR	147
REFERENSI.....	149

BAB 1

PENGANTAR ELEKTRONIKA DAYA

1.1 Pengantar

Elektronika Daya merupakan salah satu bidang ilmu yang mempelajari dan membahas aplikasi elektronika yang berkaitan dengan peralatan listrik yang berdaya cukup besar. Berbagai peralatan dan aplikasi nyata di industri yang menggunakan sumber listrik dengan kapasitas daya yang besar seperti motor listrik, pemanas, pendingin, fan, kompresor, pompa, konveyor dan aplikasi-aplikasi lainnya. Elektronika daya mulai populer setelah berbagai pengaturan secara konvensional kurang dapat memenuhi kebutuhan industri. Pengaturan berbagai aplikasi di industri secara konvensional tidak efektif dan menimbulkan rugi-rugi yang cukup besar sehingga diperlukan mekanisme pengaturan yang lebih baik. Salah satu pilihan adalah dengan menggunakan perangkat elektronika.

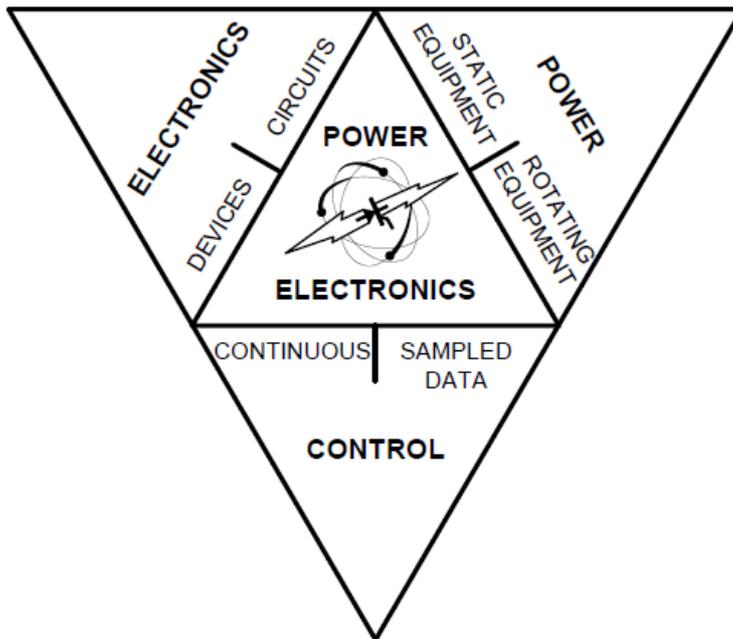
Untuk dapat melakukan pengaturan berbagai macam peralatan di industri diperlukan peralatan kontrol yang mampu beroperasi pada tegangan dan arus yang cukup besar. Peralatan elektronika

biasa yang sering digunakan dalam aplikasi rumah tangga tidak mampu bekerja pada arus dan tegangan yang besar sehingga diperlukan perangkat elektronika yang mampu bekerja pada arus dan tegangan yang besar. Elektronika Daya memberikan solusi terhadap permasalahan di dunia industri untuk dapat melakukan pengaturan peralatan-peralatan dengan menggunakan rangkaian yang dapat bekerja dengan arus dan tegangan yang besar. Beberapa aplikasi di industri bekerja pada arus yang mencapai ratusan bahkan ribuan amper dan tegangan yang tinggi 220 V, 380 V, 600 V, 3,8 KV, 6 KV, 11 KV, 13,8 KV bahkan ada yang lebih tinggi lagi. Pengaturan peralatan yang berdaya besar ini tidak mungkin dilakukan dengan rangkaian elektronika yang berdaya kecil seperti peralatan rumah tangga yang arusnya kurang dari 5 Ampere dan tegangannya kurang dari 60 V.

1.2 Ruang Lingkup

Elektronika Daya mencakup berbagai bidang ilmu yang mendasari perkembangan ilmu ini. Beberapa bidang ilmu yang terkait dengan Elektronika daya diantaranya adalah: 1) Elektronika yang mencakup peralatan dan rangkaian elektronika, 2) Sistem Tenaga Listrik yang mencakup peralatan tenaga listrik statik maupun peralatan listrik yang berputar, dan Sistem Kontrol yang mencakup kontrol kontinyu dan diskrit. Secara lengkap, ruang lingkup materi bahasan Elektronika Daya seperti pada gambar di bawah ini.

Bidang ilmu elektronika daya tidak dapat lepas dari ilmu-ilmu lain terutama dalam bidang teknologi *solid state physics*. Kebutuhan aplikasi di dunia kerja dan industri yang semakin kompleks menuntut adanya kolaborasi berbagai bidang ilmu untuk sehingga dapat menyelesaikan berbagai permasalahan di industri.

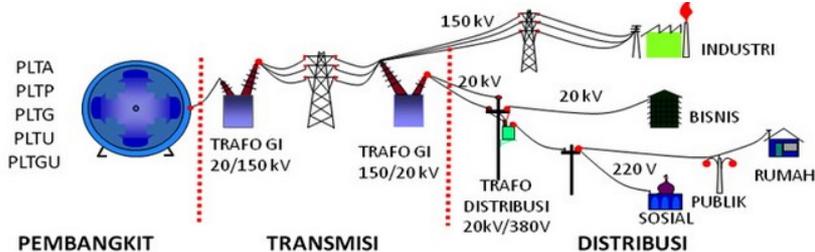


Gambar 1.1 Ruang lingkup elektronika daya

1.2.1. Sistem Elektronika

Sistem elektronika merupakan dasar utama pada aplikasi elektronika daya. Sistem elektronika akan membahas tentang peralatan elektronika yang terdiri atas semikonduktor dan komponen lainnya dalam suatu rangkaian elektronika. Untuk mempelajari elektronika daya diperlukan pemahaman terhadap materi rangkaian elektronika baik analog maupun digital. Berikut ini adalah salah satu contoh rangkaian elektronika yang terdiri atas komponen-komponen semikonduktor daya seperti IC TCA 785, Dioda, SCR, Triac, Resistor, Kapasitor dan komponen-komponen lainnya yang membentuk rangkaian elektronika daya.

Peralatan listrik yang membutuhkan kontrol elektronika daya dapat berupa peralatan statik seperti trafo maupun peralatan yang berputar seperti motor listrik. Berikut ini adalah gambaran sistem tenaga listrik yang dimulai dari pembangkit sampai ke pemakaian oleh konsumen baik industri maupun rumah tangga.



Gambar 1.3. Sistem tenaga listrik

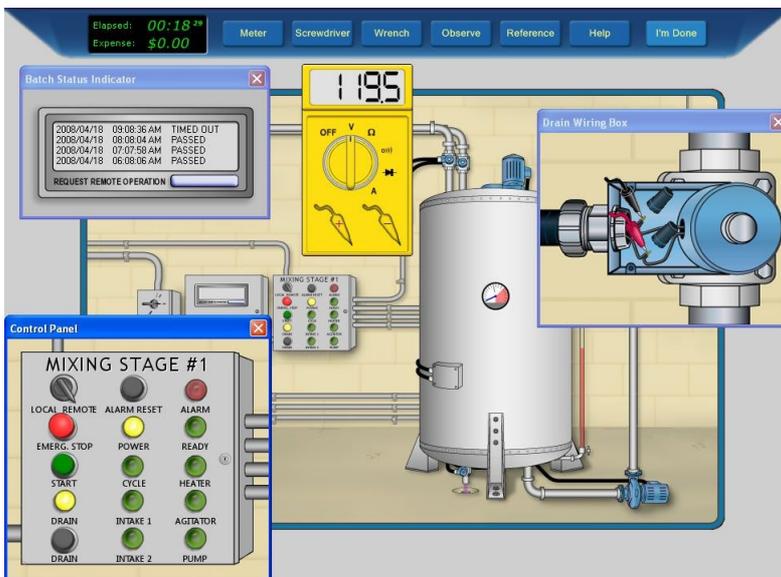
Gambar 1.3 menunjukkan bidang-bidang teknik tenaga listrik mulai dari pembangkit listrik, saluran transmisi, jaringan distribusi sampai dengan pemakaian oleh konsumen baik rumah tangga, dunia usaha maupun industri. Aplikasi elektronika daya berkaitan dengan permasalahan-permasalahan sistem tenaga listrik sebagaimana diilustrasikan pada gambar 1.3 di atas.

1.2.3. Sistem Kontrol

Aplikasi elektronika daya pada umumnya untuk melakukan pengontrolan aplikasi di industri. Oleh karena itu, diperlukan pemahaman yang baik terhadap teknik dan sistem kontrol berbagai peralatan yang digunakan di industri. Sistem kontrol pada dasarnya dibedakan menjadi kontrol kontinyu dan contoh diskrit. Sistem kontrol kontinyu sering disebut dengan istilah kontrol proses yang digunakan untuk mengontrol proses produksi yang berlangsung secara kontinyu seperti pada industri minyak, gas, pembangkit listrik,

distribusi tenaga listrik, pengeboran minyak dan gas, industri makanan dan minuman serta industri-industri yang prosesnya berlangsung secara kontinyu. Sedangkan kontrol diskrit digunakan untuk mengontrol proses di industri yang berlangsung tidak secara kontinyu melainkan putus-putus. Industri perakitan kendaraan mempunyai karakteristik proses produksi yang diskrit.

Contoh pengaturan yang paling sering ditemui adalah pengaturan kecepatan putar motor listrik, pengaturan torsi motor listrik, pengaturan kecepatan aliran (*flow*) minyak, gas, pengaturan temperature, pengaturan tekanan, pengaturan kecepatan konveyor, pengaturan gerakan peralatan di industri dan pengaturan-pengaturan parameter lainnya.



Gambar 1.4. Contoh kontrol proses di industri

1.2.4. Sistem Komputer

Aplikasi industri sekarang ini kebanyakan sudah terintegrasi dengan sistem komputer. Untuk melakukan pengaturan berbagai peralatan di industri dilakukan secara remote dan hasilnya dapat

dimonitor dengan tampilan yang terintegrasi dengan *database* yang dioleh dalam komputer.



Gambar 1.5. Sistem kontrol berbasis komputer

Gambar 1.5 di atas menunjukkan salah satu antar muka antara peralatan listrik dengan manusia yang terhubung melalui layar monitor. Antar muka antara peralatan dengan manusia sering dikenal dengan istilah Human Machine Interface (HMI) atau juga dikenal dengan istilah lain Human Interface Station (HIS). Peralatan antar muk ini bnayak dijumpai pada industri yang menerapkan sistem kontrol otomatis dengan menggunakan peralatan kontrol berbasis Programmable Logic Controller (PLC), Distributed Control Systems (DCS) maupun Supervisory Control and Data Acquitition (SCADA).

1.3 Karakteristik Elektronika Daya

Elektronika Daya (*Power Electronics*) didefinisikan sebagai sebuah aplikasi elektronika yang menitikberatkan pada pengaturan peralatan listrik yang berdaya besar dengan cara melakukan pengubahan parameter-parameter listrik (arus, tegangan, daya

listrik). Aplikasi elektronika yang dimaksud disini yaitu rangkaian yang menggunakan peralatan elektronika terutama semikonduktor yang difungsikan sebagai saklar (*switching*) untuk melakukan pengaturan dengan cara melakukan perubahan tipe sumber dari listrik AC menjadi AC (*AC Regulator*), perubahan listrik AC menjadi DC (*Converter*), perubahan listrik DC menjadi DC (*DC Converter*) dan perubahan listrik DC menjadi AC (*Inverter*). Peralatan semikonduktor yang digunakan adalah *solid-state electronics* untuk melakukan pengaturan yang lebih efisien pada sistem yang mempunyai daya dan energi yang besar.

Rangkaian elektronika daya memiliki karakteristik sebagai berikut:

1. Aplikasi teknik kontrol untuk mendapatkan efisiensi dalam proses konversi besaran listrik.

Salah satu permasalahan utama dalam proses perubahan besaran listrik adalah efisiensi. Perubahan besaran listrik secara konvensional mempunyai kelemahan yaitu rugi-rugi daya yang cukup besar sehingga efisiensinya rendah. Dengan perkembangan elektronika daya, proses perubahan besaran-besaran listrik dapat dilakukan dengan konsep *switching* elektronik sehingga rugi-ruginya dapat diminimalisasi.

2. Elektronika daya merupakan gabungan dari berbagai disiplin ilmu yaitu Teknik Tenaga Listrik, Elektronika dan teknologi sistem kontrol.

Sebagaimana dijelaskan pada sub bab sebelumnya, elektronika daya berkembang berkat adanya dukungan dari berbagai ilmu lain. Perkembangan ilmu elektronika daya harus didukung dengan penelitian bidang ilmu pendukung yang telah dibahas pada sub bab 2.

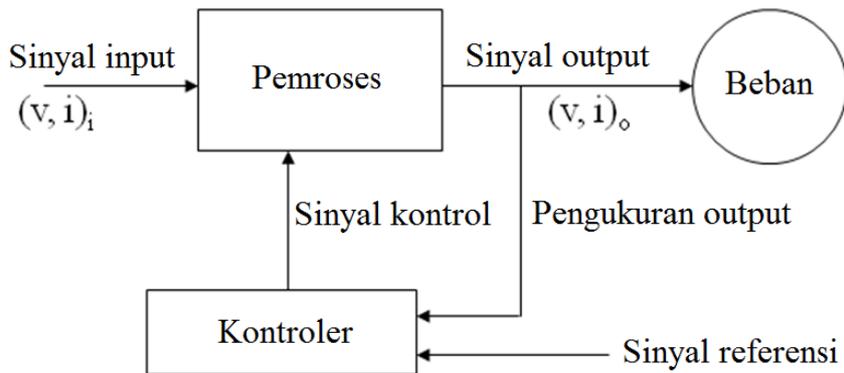
3. Elektronika daya menggunakan komponen elektronika daya (solid-state) untuk mengontrol dan mengonversi tenaga listrik. Salah satu kunci keberhasilan bidang ilmu elektronika daya adalah makin berkembangnya komponen-komponen semikonduktor daya. Komponen semikonduktor yang dulu hanya mampu menahan arus dan tegangan kecil, sekarang mulai berkembang komponen-komponen yang mampu menahan arus dan tegangan tinggi. Hal ini tidak lepas dari kebutuhan konsumen terutama dari industri dan juga riset yang dilakukan oleh lembaga pendidikan.
4. Rangkaian elektronika daya terdiri atas input dan beban (load). Prinsip rangkaian elektronika adalah melakukan konversi atau pengubahan dari input menjadi output yang kemudian dihubungkan ke beban. Untuk memudahkan dalam melakukan perancangan, analisis dan pengembangan perlu diperhatikan hal ini. Rangkaian elektronika daya dapat dianalisis dari inputnya dan dibandingkan dengan outputnya.

Prinsip ini akan memudahkan para engineer dalam melakukan analisis rangkaian elektronika daya.

5. Rangkaian elektronika daya dapat terdiri dari satu atau lebih converter untuk melakukan perubahan parameter listrik. Dalam aplikasinya, kombinasi berbagai rangkaian pengubah sering kali dikombinasi dalam sebuah peralatan. Contoh sederhana yaitu pada peralatan Uniinterruptible Power Supply (UPS), dimana pada peralatan ini terdapat pengubah listrik AC ke DC untuk mengisi baterai, rangkaian pengubah DC ke DC untuk menyesuaikan kebutuhan tegangan pengisian baterai. Pada saat listrik utama padam, maka listrik yang tersimpan di baterai akan diubah menjadi listrik AC untuk mensuplai beban melalui peralatan inverter.

Hal yang sama juga terjadi pada peralatan-peralatan elektronika daya lainnya seperti Variable Speed Drive (VSD), rangkaian eksitasi generator dengan menggunakan eksitasi terpisah maupun terintegrasi, lampu emergensi dan lainnya.

Secara umum, aplikasi elektronika daya dapat dijelaskan dengan diagram skematik sebagai berikut:



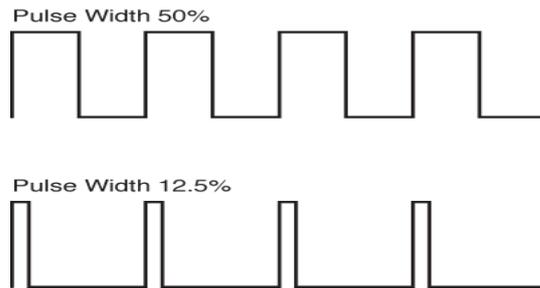
Gambar 1.6. Sistem Elektronika Daya

1.4 Fungsi Komponen Semikonduktor

Peralatan semikonduktor pada sistem elektronika daya mempunyai 3 fungsi utama yaitu sebagai berikut:

1. Pensaklaran (Switching)

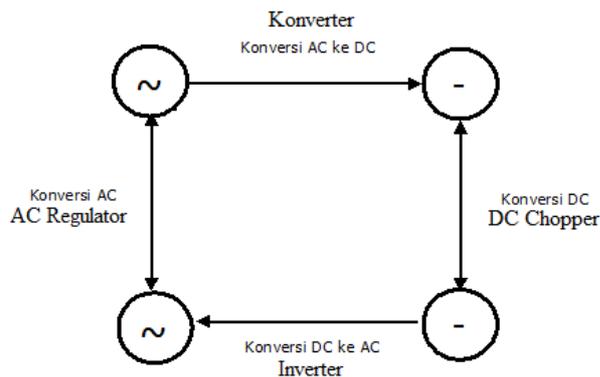
Fungsi utama semikonduktor pada aplikasi elektronika daya adalah sebagai saklar (*switching*) elektronik. Proses *switching* menjadi pokok bahasan utama pada materi elektronika daya sehingga perlu difahami dengan baik. *Switching* dilakukan secara elektronik dengan kecepatan tinggi yang dapat diatur sesuai dengan kebutuhan dengan rangkaian pembangkit pulsa seperti pada contoh berikut ini.



Gambar 1.7. Switching dengan lebar pulsa 50% dan 12,5 %

2. Pengubahan (Converting)

Fungsi kedua dari peralatan semikonduktor elektronika daya adalah untuk melakukan pengubahan atau *converting* dari tipe sumber. Konversi yang sering dilakukan pada rangkaian elektronika daya yaitu mengubah bentuk gelombang listrik. Pengubahan bentuk gelombang listrik didasarkan pada kebutuhan peralatan listrik dan sumber yang tersedia. Proses pengubahan besaran listrik dapat terjadi dari AC ke DC, AC ke AC, DC ke DC maupun dari DC ke AC. Proses pengubahan besaran meliputi pengubahan bentuk gelombang arus, tegangan maupun besaran lainnya.

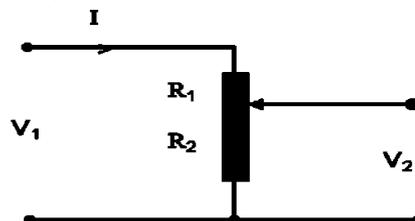


Gambar 1.8. Konversi parameter listrik dalam elektronika daya

Contoh perubahan energi listrik pada elektronika daya terjadi pada catu daya peralatan listrik seperti lampu LED. Peralatan listrik lampu LED memerlukan catu daya DC dengan tegangan sekitar 12 Volt, sedangkan sumber listrik yang tersedia adalah listrik AC 220 volt. Oleh karena itu diperlukan rangkaian pengubah dari listrik dari tegangan listrik AC 220 Volt menjadi tegangan listrik DC 12 Volt. Demikian juga pada pembangkit listrik tenaga matahari atau solar sel yang menghasilkan listrik DC sebesar 24 Volt. Jika beban listrik yang digunakan adalah lampu AC atau TV, Motor Pompa AC 220 Volt, maka dibutuhkan rangkaian elektronika daya untuk mengubah sumber listrik DC 24 Volt menjadi listrik AC 220 Volt.

3. Pengendalian (Controlling)

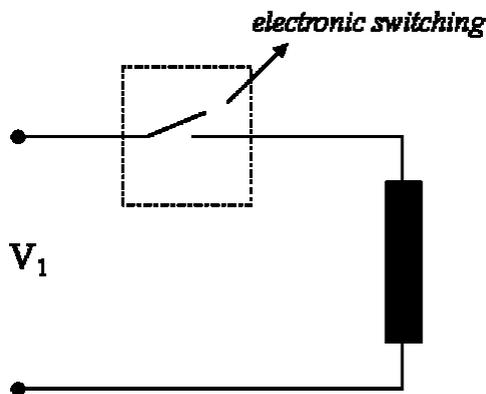
Fungsi ketiga dari peralatan semikonduktor elektronika daya adalah untuk melakukan pengaturan aplikasi elektronika industri sesuai dengan yang diinginkan. Contoh pengaturan adalah pengaturan tegangan, pengaturan arus, pengaturan daya listrik dan pengaturan besaran-besaran lainnya. Dengan melakukan pengaturan besaran listrik akan berpengaruh pada sistem kerja pada sistem yang bekerja di industri seperti kecepatan putaran, tekanan, suhu, kecepatan gerak, dan sistem kerja lainnya.



Gambar 1.9. Pengaturan tegangan dengan pembagi tegangan resistor

Contoh ilustrasi penggunaan aplikasi elektronika daya secara sederhana adalah pada pengaturan tegangan. Gambar di bawah ini merupakan rangkaian pembagi tegangan yang digunakan untuk mengatur tegangan V_2 sesuai dengan yang dibutuhkan. Melalui pengaturan resistor variable (Potensiometer) kita bisa mendapatkan tegangan V_2 sesuai kebutuhan. Cara pengaturan konvensional seperti ini memang sangat mudah tetapi coba lihat rugi-rugi yang dihasilkan. Dengan menggunakan resistor maka akan muncul panas yang besarnya berbanding dengan kuadrat arus (I) dan nilai resistornya.

$$\text{Rugi-rugi panas} = I^2 \cdot R \text{ Watt}$$



Gambar 1.10. Pengaturan tegangan dengan switching

Metode pengaturan lain yang dapat digunakan adalah dengan menggunakan *switching* (saklar) pada sisi sumber sehingga bisa diatur nilai tegangan keluaran dengan mengatur duty circle (siklus kerja) dari peralatan switching. Dengan metode seperti ini, maka tegangan keluaran dapat diatur tanpa menimbulkan panas karena pada saat tidak digunakan

sumber dimatikan dan sumber akan dihidupkan jika dibutuhkan.

1.5 Contoh Penggunaan Elektronika Daya

Contoh rangkaian elektronika banyak digunakan untuk kepentingan peralatan rumah tangga dan industri. Perangkat elektronika daya banyak digunakan pada peralatan konversi daya listrik yang besar seperti : saluran transmisi daya listrik, jaringan distribusi daya listrik, pengaturan motor listrik secara elektronis di industri, pengatur pemanas air, pengubah daya listrik AC menjadi DC, DC menjadi DC, DC menjadi AC untuk kepentingan pengaturan peralatan di industri, charger baterai pada peralatan industri, dan lain sebagainya.

Dalam kehidupan sehari-hari aplikasi elektronika daya dapat dilihat pada UPS (Uninterruptable Power Supply), peralatan pengubah daya dari listrik DC menjadi listrik AC (inverter), catu daya untuk laptop, notebook dan komputer, pengatur tingkat keterangan lampu, peredup lampu (dimmer), pengatur pemanas, pengatur cahaya, ballast elektronik pada lampu neon, relai-relai elektronik, pemutus tenaga, sistem elektronis dalam mobil dan wahana ruang angkasa. Selain itu aplikasi elektronika daya juga banyak digunakan di industri untuk pengaturan berbagai peralatan industri seperti pengaturan kecepatan putar motor listrik, pengatur kecepatan putar penggerak konveyor, pengatur kecepatan gerak lift, pengatur kecepatan gerak eskalator dengan beban yang berubah-ubah, pengaturan kecepatan aliran fluida gas dan minyak, pengaturan tekanan pada mesin pompa, blower, pengaturan kipas dan lain sebagainya.

BAB 2

KOMPONEN SEMIKONDUKTOR DAYA

2.1 Pengantar

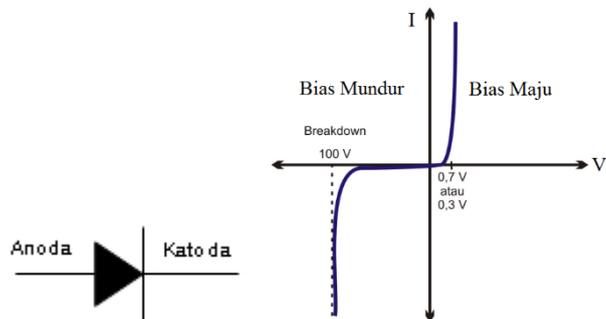
Komponen yang banyak digunakan dalam aplikasi elektronika daya pada umumnya sama dengan aplikasi elektronika biasa. Perbedaan utama adalah pada kapasitas dayanya saja yaitu arus, tegangan dan daya yang digunakan. Komponen semikonduktor yang biasa digunakan pada aplikasi elektronika daya terdiri atas Dioda Power, Transistor Daya, SCR (*Silicon Control Rectifier*) atau dikenal dengan nama Thyristor, Diac dan Triac. Ada juga beberapa komponen semikonduktor yang didesain untuk keperluan khusus diantaranya yaitu GTO (*Gate turn off switch*), IGBT (*Insulated Gate Bipolar Junction Transistor*), SUS (*Silicon Unilateral Switch*), SCS (*Silicon Controlled Switch*), SBS (*Silicon Biilateral Switch*), LASCR (*Light Activated SCR*), LASCS (*Light Activated SCS*), PUT (*Programmable Unijunction Transistor*), RCT (*Reverse Conducting Thyristor*) dan komponen-komponen lainnya.

Komponen semikonduktor utama yang akan dibahas pada materi ini adalah Dioda Power, Transistor BJT, Uni Junction

Transistor (UJT), Transistor Efek Medan (FET), SCR atau Thyristor, Triac dan Diac.

2.2 Dioda Power

Dioda merupakan salah satu komponen semikonduktor elektronika daya yang banyak digunakan untuk aplikasi di rumah tangga maupun industri. Komponen dioda memiliki dua terminal yang disebut dengan nama Anoda (kutub positif) dan Katoda (kutub negatif). Pada rangkaian elektronika daya, dioda berfungsi sebagai *switching* atau saklar untuk melewatkan arus listrik dalam satu jalan. Pada gambar di bawah ini dijelaskan tentang simbol dan karakteristik dioda.



Gambar 2.1. Simbol dan karakteristik Dioda

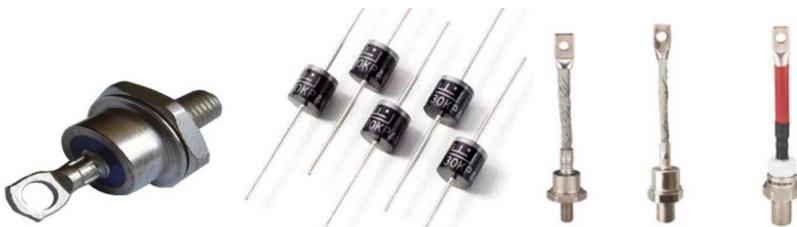
Dioda pada rangkaian elektronik dapat berfungsi sebagai penyearah, pemotong, penjepit dan fungsi lainnya. Pada pokok bahasan ini yang akan dibahas adalah Dioda sebagai saklar. Gambar di atas menunjukkan simbol dan karakteristik dari Dioda. Dioda akan berada pada keadaan konduksi (ON) jika potensial pada anoda lebih positif daripada potensial pada katoda. Dioda akan berada pada kondisi (OFF) jika potensial pada anoda lebih

negatif daripada potensial pada katoda. Pada kondisi ideal, pada waktu dioda dalam kondisi ON akan memiliki karakteristik tegangan pada dioda sama dengan nol dan arus yang mengalir pada dioda sama dengan arus bebannya. Sebaliknya, dioda dalam kondisi OFF memiliki karakteristik tegangan pada dioda sama dengan tegangan sumbernya dan arus yang mengalir sama dengan nol. Dalam kondisi dioda ON dan OFF ini dapat dinyatakan tidak terjadi kerugian daya pada dioda.

Secara elektronik, kondisi ON dan OFF dioda dapat dijelaskan sebagai berikut. Dioda akan On jika Anoda dan Katoda diberikan panjar maju artinya Terminal Anoda dihubungkan dengan sumber positif sedangkan Anoda dihubungkan dengan sumber negatif. Pada kondisi ini, maka tegangan antara Anoda dan Katoda akan menjadi nol dan akan mengalir arus dari anoda ke katoda melewati beban.

Sebaliknya jika Dioda diberikan panjar mundur atau Terminal Anoda dihubungkan dengan sumber negatif, dan terminal Katoda dihubungkan dengan sumber positif, maka Dioda akan mati. Pada kondisi ini, tegangan antara Anoda dan Katoda (V_{AK}) sama dengan tegangan sumber dan tidak ada arus yang mengalir pada rangkaian.

Dioda di pasaran mempunyai bentuk dan bahan pendukung yang beragam seperti terlihat pada gambar di bawah ini.



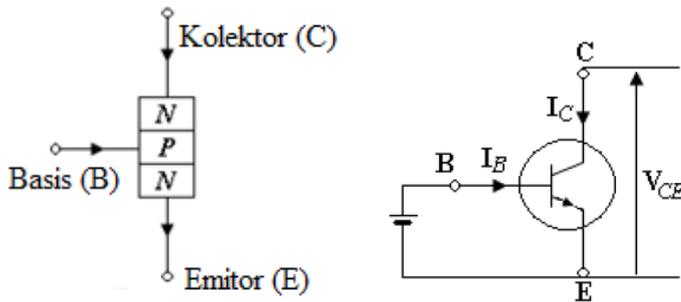
Gambar 2.2. Bentuk Dioda Power

2.3 Transistor Power

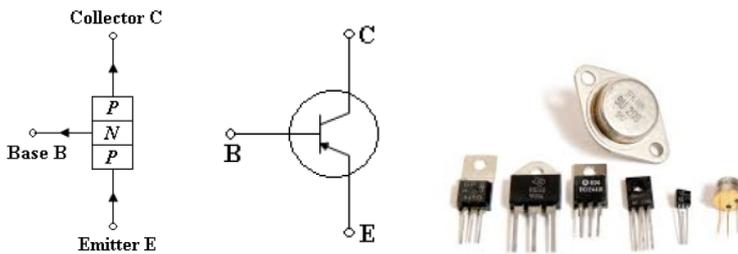
Transistor merupakan salah satu komponen yang banyak digunakan dalam aplikasi elektronika baik yang berdaya rendah maupun yang berdaya besar. Kalau dalam bidang elektronika berdaya rendah transistor lebih banyak digunakan sebagai penguat, dalam aplikasi elektronika daya, transistor lebih difokuskan pada fungsi sebagai saklar elektronik. Transistor terdiri atas tiga lapisan yaitu Negatif-Positif-Negatif atau N-P-N dan Positif-Negatif-Positif atau P-N-P seperti ditunjukkan pada gambar 2.2. Prinsip kerja transistor didasarkan pada arus kolektor (I_C) yang merupakan fungsi dan arus basis (I_B). Perubahan arus basis akan mengakibatkan perubahan yang telah dikuatkan pada arus kolektor pada tegangan kolektor-emitor yang dikenakan padanya.

Transistor daya memiliki karakteristik kontrol untuk berfungsi sebagai saklar yaitu pada kondisi ON dan OFF. Transistor mempunyai 4 daerah kerja yaitu 1) daerah aktif, 2) daerah saturasi atau daerah jenuh, 3) daerah cut off dan 4) daerah breakdown. Untuk memfungsikan sebagai saklar elektronik, transistor harus dioperasikan pada daerah saturasi atau jenuh. Pada daerah kerja ini, transistor akan menghasilkan drop tegangan yang rendah sehingga transistor berfungsi sebagai saklar pada kondisi ON. Transistor akan berfungsi sebagai saklar dalam kondisi OFF bila berada pada daerah Cut Off.

Dalam aplikasinya sebagai saklar elektronik, transistor mempunyai kecepatan pensaklaran dengan frekuensi hingga ribuan Hz. Transistor modern yang didesain khusus untuk kepentingan kontrol peralatan industri mempunyai kecepatan pensaklaran yang tinggi bahkan bisa lebih tinggi daripada keluarga thyristor. Transistor power sering digunakan dalam konverter DC-DC dan DC-AC, dengan diode terhubung paralel terbalik untuk menghasilkan aliran arus dua arah.

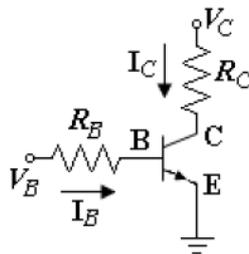


Gambar 2.3. Struktur dan Simbol Transistor NPN



Gambar 2.4. Struktur, Simbol, dan Bentuk Transistor PNP

Dengan memanfaatkan karakteristik transistor common emitor (emitor bersama), pada kondisi saturasi (jenuh) dan keadaan cut-off (mati) maka transistor dapat dijadikan sebagai saklar elektronis dengan pemutus dan penyambungnya berupa (tegangan pada basisnya). Perhatikan rangkaian sebagai berikut :



Gambar 2.5. Aliran arus pada transistor

Dari gambar 2.5, dapat dijelaskan, persamaan matematik yang menggambarkan prinsip kerja transistor adalah sebagai berikut:

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

β : penguatan transistor

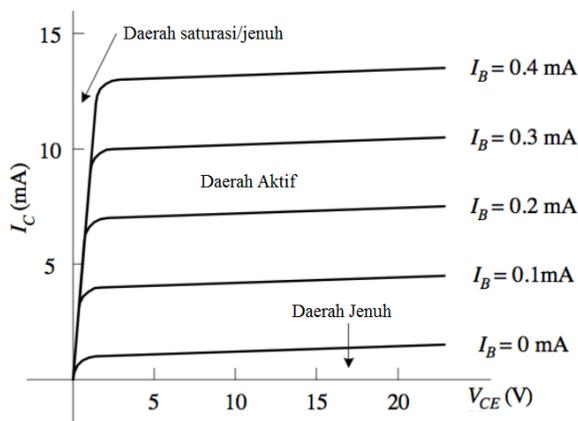
Jika $I_B = 0$ maka $I_C = 0$

Pada saat $I_B = 0$, maka transistor tidak mengantarkan arus I_C , dengan kata lain transistor berada pada daerah cut-off atau daerah mati, seperti sebuah kran air yang knopnya ditutup. Dari rangkaian diatas diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$I_B = \frac{V_B - V_{CE}}{R_B}$$

$$I_C = \frac{V_C - V_{CE}}{R_C}$$

Persamaan ini sering disebut sebagai persamaan garis beban transistor dan sering digunakan untuk menjelaskan tentang karakteristik sebuah transistor. Berikut ini adalah gambar hubungan antara I_B dan I_C dan V_{CE} dan penggambaran daerah kerja transistor yang dapat dijadikan pedoman dalam memahami karakteristik transistor



Gambar 2.6. Daerah kerja transistor

Gambar 2.6. menjelaskan karakteristik transistor dimana terdapat 3 daerah kerja berdasarkan arus basis. Pada kondisi $I_B = 0$ maka I_C tidak mengalirkan arus atau $I_C = 0$. Pada kondisi ini transistor mati atau belum bekerja walaupun sudah diberi catu daya dan transistor berada pada daerah cutt off atau mati.

Jika I_B diberikan nilai yang kecil, maka transistor mulai bekerja atau masuk ke daerah kerja aktif. Semakin besar nilai I_B maka akan menaikkan I_C sesuai dengan juga akan naik sesuai dengan persamaan $I_C = \beta \cdot I_B$.

Jika I_B dinaikkan terus sampai I_C tidak mampu naik lagi sesuai dengan persamaan $I_C = \beta \cdot I_B$, maka dikatakan transistor memasuki daerah jenuh atau saturasi. Kondisi ini disebut sebagai daerah kerja jenuh (saturasi). Pada kondisi ini I_C sudah jenuh walaupun arus I_B dinaikkan terus. Pada kondisi ini akan berdampak pada

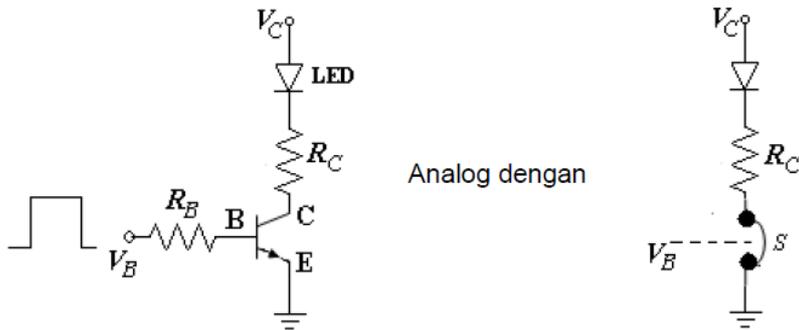
$$V_{CE} \cong 0 \text{ (kecil)}$$

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

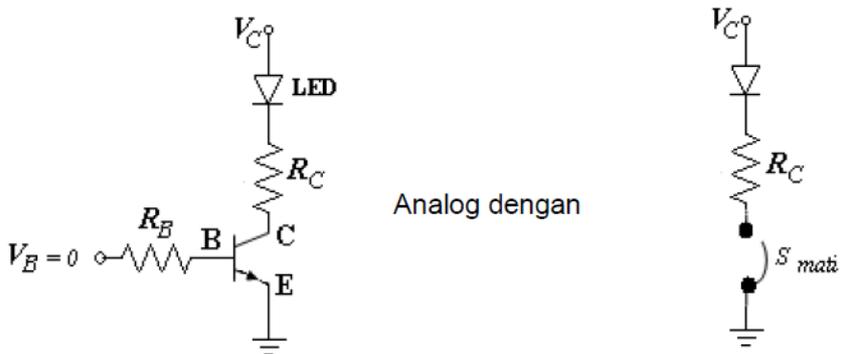
Sesuai dengan persamaan di atas maka pada kondisi jenuh ini, arus akan menjadi besar sedangkan tegangan VCE kecil sekali mendekati nol (0). Pada kondisi ini dapat dikatakan bahwa hambatan pada CE, menuju nol sehingga seolah-olah transistor berfungsi sebagai saklar ON. Jadi untuk membuat transistor BJT berlaku sebagai saklar yang ON harus diberikan tegangan V_B yang mengakibatkan transistor saturasi.

Pada gambar karakteristik transistor juga dapat dilihat pada saat $V_B = 0$, maka arus basis $I_B = 0$. Akibatnya arus kolektor $I_C = 0$. Pada kondisi ini transistor akan berada pada kondisi tidak menghantarkan arus I_C sama dengan kondisi saklar terbuka.

Ilustrasi kondisi transistor pada saat beroperasi pada daerah jenuh dan daerah cut off dapat dijelaskan pada gambar berikut ini:



Gambar 2.7. Transistor beroperasi sebagai saklar ON

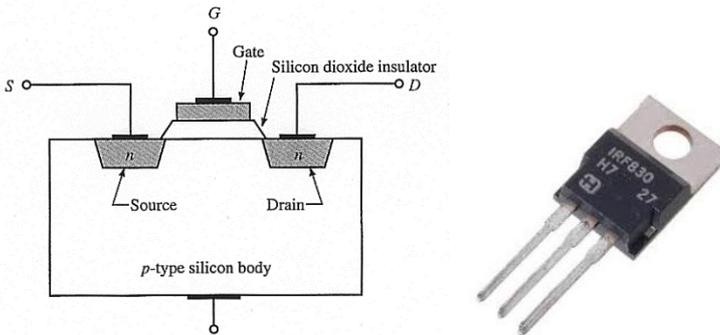


Gambar 2.8. Transistor beroperasi sebagai saklar OFF

Transistor jenis BJT (Bipolar junction power transistors) banyak digunakan untuk aplikasi elektronika daya misalnya pada catu daya, pengatur kecepatan motor DC (Chopper), Pengatur kecepatan motor Induksi (Inverter) PWM (Pulse Width Modulation) dan banyak aplikasi lainnya.

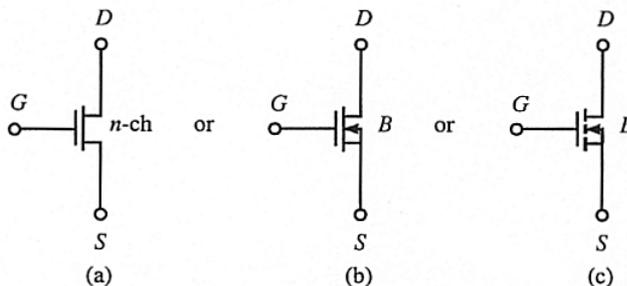
2.4 Transistor Efek Medan (FET)

Selain transistor jenis BJT (Bipolar Junction Transistor), dalam aplikasi elektronika daya banyak juga digunakan transistor efek medan. Salah satu jenis transistor jenis ini yang paling terkenal adalah MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor FET*). Berbeda dengan transistor BJT yang mempunyai 3 kaki yaitu Basis, Emitor dan Kolektor, MOSFET mempunyai 3 kaki yang dikenal dengan istilah Drain (D), Gate (G) dan Source (S). MOSFET mempunyai struktur yang sedikit berbeda dengan BJT yang dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 2.9. Struktur dan bentuk transistor jenis FET

Transistor jenis FET mempunyai kaki-kaki dan simbol yang berbeda dengan transistor jenis BJT. Berikut ini adalah simbol transistor jenis FET.

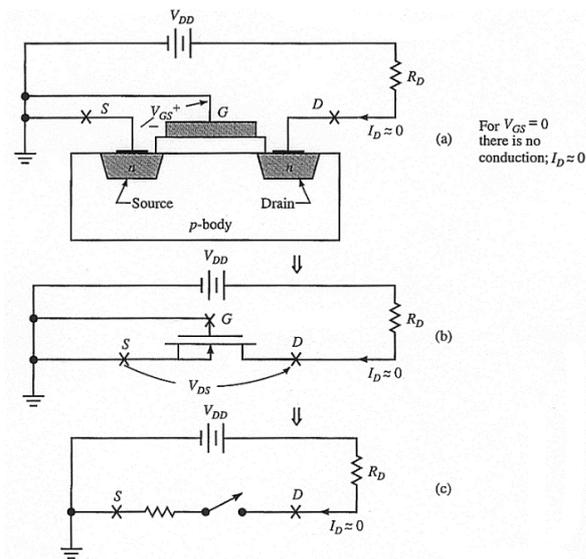


Gambar 2.10 Simbol transistor jenis FET

2.4.1. Prinsip Kerja FET

FET mempunyai prinsip kerja yang hampir sama dengan transistor BJT. FET dan BJT terdiri atas 3 buah sambungan baik negatif-positif-negatif atau positif-negatif-positif. Yang membedakan keduanya adalah, jika pada transistor BJT kontrolnya dilakukan oleh arus basis (I_B), sedangkan pada FET kontrol dilakukan oleh tegangan gate (V_{GS}). Pengaturan kerja FET dengan tegangan mempunyai kelebihan dibanding pengaturan dengan arus seperti pada BJT yaitu berkurangnya rugi-rugi panas yang dihasilkan, sehingga FET mempunyai efisiensi yang lebih tinggi dibanding dengan BJT.

Transistor FET akan On jika terminal Drain (D) dan Source (S) dibias maju dengan polaritas D dan S tergantung jenisnya. Setelah itu perlu diberikan tegangan penyulutan dengan memberikan $V_{GS} > 0$. Dengan kondisi ini maka tegangan antara Drain dan Source V_{DS} menjadi nol dan akan mengalir arus listrik di Drain yang besarnya sama dengan arus beban.

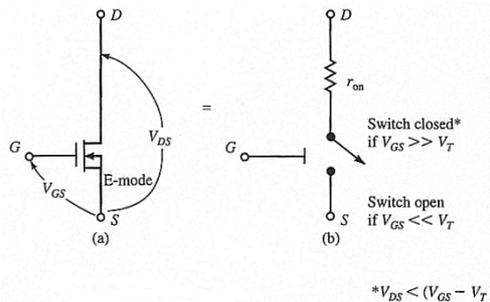


Gambar 2.11. Operasi Off transistor jenis FET

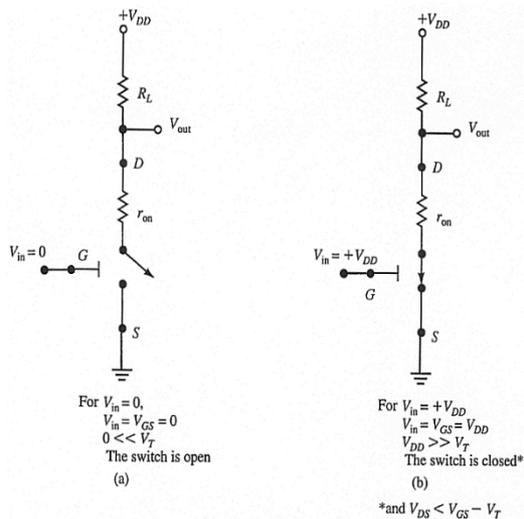
Mosfet akan Off jika terminal Drain dan Source dibias maju, tetapi tegangan Gate diberi input sama dengan nol. Kondisi ini akan menjadikan tegangan Drain Source (V_{DS}) akan sama dengan tegangan tegangan Drain Drain (V_{DD}) dan sama dengan tegangan sumber dan arus sama dengan nol. Gambar 2.11. menjaelaskan tentang operasi transistor FET.

2.4.2. Pengoperasian FET Sebagai Saklar

Salah satu aplikasi yang banyak digunakan pada MOSFET adalah untuk saklar (*switching*).



Gambar 2.12. FET Sebagai saklar ON-OFF

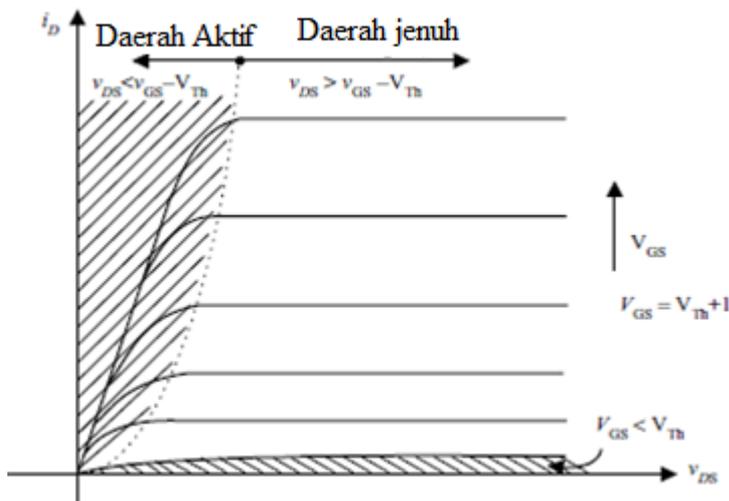


Gambar 2.13. MOSFET Sebagai saklar ON dan Off

Gambar 2.12 dan 2.13. menjelaskan prinsip kerja transistor FET sebagai saklar. FET berfungsi sebagai saklar ON jika Drain dan Source dibias maju dan Gate diberikan tegangan pemicuan. Sebaliknya untuk menjadikan FET sebagai saklar OFF, maka nilai tegangan Gate diberi nilai sama dengan nol. Dalam aplikasi saklar elektronis, FET akan didrive dengan rangkaian pembangkit pulsa dengan frekuensi tertentu.

2.4.3. Karakteristik FET

FET mempunyai karakteristik yang hampir sama dengan transistor BJT. Secara umum FET mempunyai 3 daerah operasi yaitu 1) daerah kerja Cut Off atau mati, 2) daerah kerja aktif dan 3) daerah jenuh atau saturasi. Kendali daerah kerja FET dipengaruhi oleh tegangan gate (V_{DS}). Berikut ini merupakan gambar daerah kerja dan karakteristik dari suatu FET.



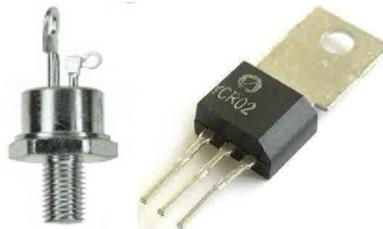
Gambar 2.14. Daerah kerja Mosfet

2.5 Silicon Control Rectifier (SCR)

Silicon Controlled Rectifier (SCR) merupakan salah satu komponen semikonduktor yang banyak digunakan dalam aplikasi elektronika daya. Komponen ini terdiri atas 3 (tiga) terminal yang digunakan untuk mengatur arus yang melalui suatu beban. SCR dapat digunakan untuk mengatur tegangan dan arus pada suatu rangkaian elektronika daya.

Kelebihan SCR dibanding dengan komponen lainnya adalah kemampuannya dalam mengalirkan arus yang cukup besar melalui Anoda-Katoda hanya dengan arus yang kecil dari Gate-nya. Beberapa aplikasi yang menggunakan SCR mempunyai daya arus bolak-balik (AC) hingga 100 MW dengan rating arus sebesar 2000 A pada tegangan ribuan Volt. Daerah kerja dari SCR dapat mencapai frekuensi 50 KHz. Beberapa SCR didesain khusus untuk bekerja pada suhu yang sangat tinggi sehingga mampu digunakan untuk pengaturan berbagai peralatan industri yang mempunyai suhu kerja sangat tinggi seperti pemanas, motor listrik, konveyor, lift, eskalator, dan lain sebagainya.

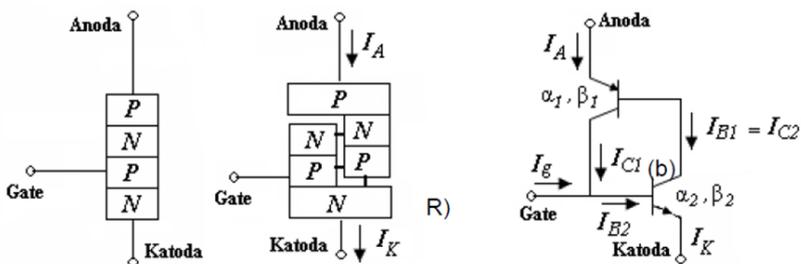
Prinsip kerja SCR adalah dengan memberikan bias maju dari anoda ke katoda melebihi tegangan minimalnya. Karakteristik tambahan dari komponen ini adalah diperlukan arus trigger yang cukup kecil untuk memulai menghidupkan SCR yang biasa dikenal dengan istilah penyulutan. SCR akan tetap on atau bekerja selama arus mengalir pada Anoda-Katoda dan arus Gate dapat dihilangkan setelah penyulutan.



Gambar 2.15. Bentuk SCR

2.5.1. Struktur SCR

Sebagai salah satu komponen semikonduktor, struktur SCR tidak berbeda jauh dengan transistor. Struktur SCR secara sederhana dapat dipandang sebagai dua transistor N-P-N dan P-N-P yang dihubungkan membentuk pasangan *feedback regenerative* P-N-P-N. Struktur sambungan pada SCR dapat dijelaskan seperti pada gambar di bawah ini :



Gambar 2.15. Struktur sambungan SCR

Keterangan :

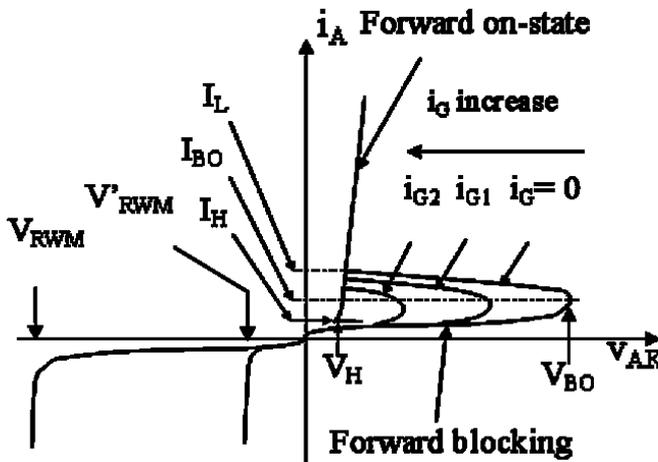
- I_B : Arus basis
- I_C : Arus collector
- I_A : Arus anoda
- I_K : Arus katoda
- I_g : Arus gate

2.5.2. Karakteristik SCR

Kelebihan SCR dibanding dengan komponen semikonduktor lainnya seperti transistor BJT dan FET yaitu dapat mendapatkan masukan baik listrik AC maupun DC. Kelebihan SCR jika dibanding dengan Dioda adalah, kemampuannya untuk dapat diatur sesuai

dengan kebutuhan dengan mengatur sudut penyulutan di terminal gate. Dengan kelebihan-kelebihan ini, SCR dapat digunakan di berbagai rangkaian elektronika daya seperti rangkaian pengubah AC ke DC, AC ke AC, maupun pengubah dari DC ke AC.

SCR bekerja dengan mengalirkan arus hanya pada satu arah yaitu pada saat dipanjar maju atau tegangan anoda (V_A) lebih besar dari tegangan katoda (V_K). Selanjutnya dengan memberikan arus gate dengan nilai tertentu maka akan menjadikan SCR ON. Pemberian arus gate dinamakan dengan penyulutan yang dapat diatur kapan SCR akan ON sehingga dapat dipakai untuk pengaturan. Karakteristik SCR tidak berbeda jauh dari komponen semikonduktor daya lainnya yang dapat dijelaskan pada gambar di bawah ini:



Gambar 2.16. Karakteristik SCR

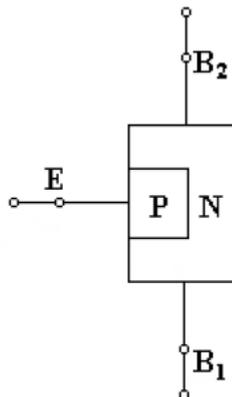
SCR akan ON jika diberikan bias maju ($V_A > V_K$) dan diberikan arus gate, maka tegangan Anoda ke katoda akan menjadi nol ($V_{AK} = 0$) dan akan mengalirkan arus yang nilainya arus beban. SCR akan OFF atau mati jika Anoda dan Katoda dibias

mundur walaupun diberikan arus gate tidak akan berpengaruh. Pada kondisi OFF tegangan antara Anoda dan katoda (V_{AK}) akan sama dengan tegangan pada sumber (V_{sumber}) dan arus anoda tidak mengalir ($I_A = 0$).

2.6 Uni Junction Transistor (UJT)

Unijunction Transistor (UJT) merupakan salah satu komponen semikonduktor yang banyak digunakan dalam aplikasi elektronika daya. UJT tidak mempunyai elektroda kolektor sebagaimana transistor bipolar ataupun dioda rectifier. Sebagai gantinya, pada UJT ditambahkan sebuah elektroda basis sehingga piranti ini mempunyai dua basis dan sebuah emitor. UJT atau transistor sambungan tunggal banyak digunakan untuk menghasilkan isyarat pulsa. Pulsa ini digunakan untuk mengontrol peralatan instrumentasi yang diantaranya adalah untuk mengatur SCR dan TRIAC.

Struktur UJT tidak berbeda jauh dengan komponen semikonduktor lainnya yang terdiri atassambungan terminal positif dan negatif sebagaimana terlihat pada gambar 2.17 di bawah ini.



Gambar 2.17 Struktur UJT

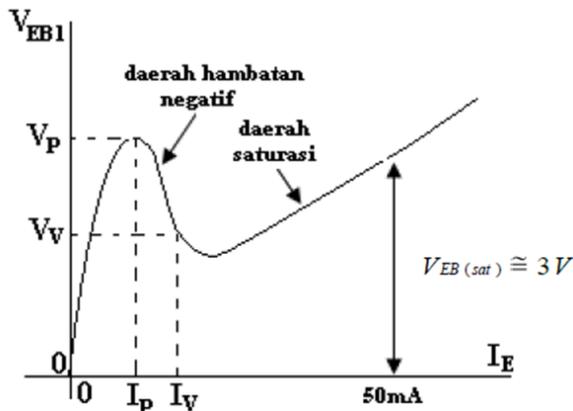
Gambar 2.17 memberikan gambaran struktur UJT yang terdiri atas 2 terminal basis dan Emitter. Sesuai dengan strukturnya, UJT dilambangkan dengan 2 buah basis dan 1 emitor. UJT yang ada di pasaran mempunyai bentuk yang bervariasi seperti pada gambar berikut:



Gambar 2.18 Simbol dan bentuk UJT

Karakteristik UJT

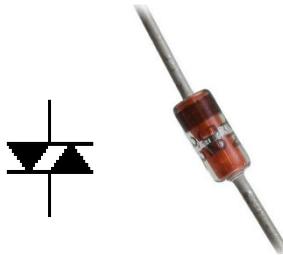
Sebagai salah satu komponen semikonduktor, UJT mempunyai prinsip kerja yang hampir sama dengan komponen semikonduktor lainnya seperti diod, transistor BJT, FET, SCR dan Triac. UJT mempunyai daerah kerja hambatan positif, daerah aktif dan daerah jenuh sebagaimana pada gambar 2.19.



Gambar 2.19 Karakteristik UJT

2.7 Diac

Diac merupakan komponen semikonduktor yang paling sederhana dari keluarga thyristor. Diac terdiri atas tiga lapisan dengan struktur seperti pada transistor PNP. Jika lapisan Negatif (N) pada transistor dibuat sangat tipis sehingga elektron dapat dengan mudah menyeberang dan menembus lapisan ini, sedangkan pada Diac, lapisan N di buat cukup tebal sehingga elektron mengalami kesulitan untuk menembusnya. Struktur Diac dapat dipandang sebagai dua buah dioda PN dan NP, sehingga dalam beberapa literatur Diac digolongkan sebagai dioda dan disimbolkan sebagai dua dioda yang dipasang secara berkebalikan seperti pada gambar berikut.

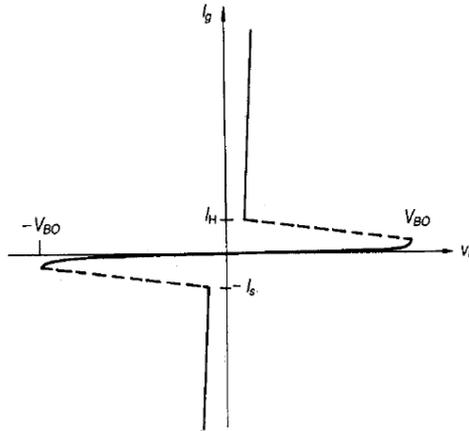


Gambar 2.20. Simbol dan bentuk Diac

Lapisan N yang cukup tebal pada Diac, menjadikan impedansinya cukup tinggi sehingga diperlukan tegangan yang cukup untuk melewati *breakover* arah mundur. Biasanya tegangan panjar atau bias untuk Diac antara 28 sampai 36 volt untuk mencapai *breakover* tergantung pada tipe dan jenisnya. Untuk memahami prinsip kerja Diac dapat diperhatikan gambar 2.21. yang menjelaskan tentang karakteristiknya.

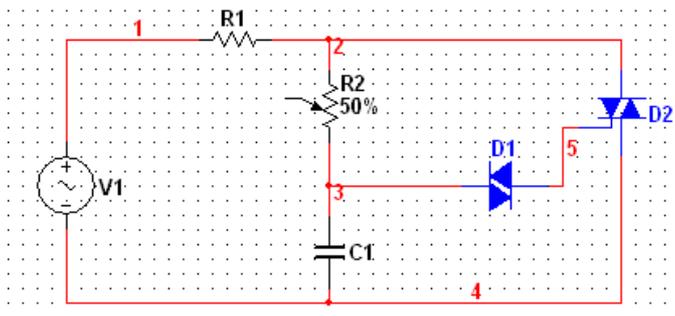
Diac mempunyai karakteristik seperti dua buah thyristor yang dihubungkan saling bertolak belakang. Oleh karena itu, Diac mempunyai dua buah tegangan penyalan. Tegangan penyalan pertama berada pada tegangan maju ($+V_{bo}$) sedangkan yang kedua

ada pada tegangan baliknya ($-V_{BO}$). Karakteristik tegangan terhadap arus dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 2.21. Karakteristik Diac

Kurva di atas menjelaskan bahwa Diac selalu mempunyai karakteristik tahanan negatif yang secara terus-menerus pada saat arus lebih besar daripada arus *breakover*-nya. Dalam aplikasinya, Diac banyak digunakan sebagai pemacu rangkaian pengendali daya yang menggunakan Triac seperti yang ditunjukkan pada gambar rangkaian dibawah ini.



Gambar 2.22. Aplikasi Diac untuk menyalut Triac

2.8 Triac

Triac merupakan salah satu komponen semikonduktor yang banyak digunakan dalam aplikasi elektronika daya. Triac mempunyai kelebihan dibanding komponen lainnya yaitu kemampuan untuk mengendalikan daya arus bolak-balik secara penuh. Triac dapat diaplikasikan dengan dua buah SCR yang terhubung secara paralel berlawanan (anti paralel) dan gatenya disatukan, seperti yang diperlihatkan pada gambar berikut:



Gambar 2.23. Simbol dan bentuk Triac

Triac merupakan singkatan dari Triode Alternating Current Switch, yang berarti saklar berganti untuk arus bolak-balik yang mempunyai tiga terminal (Triode-AC) sebagaimana komponen semikonduktor daya lainnya seperti transistor BJT, FET, UJT maupun SCR. Triac dikenal juga sebagai Bidirectional Triode Thyristor. Karakteristik Triac hampir sama dengan SCR, namun TRIAC dapat menghantarkan arus dalam dua arah baik panjar maju maupun panjar mundur. Struktur Triac terdiri atas 5 lapisan bahan jenis P dan N dalam arah lain antara terminal T1 dan T2 dan dapat menghantarkan dalam arah yang lain sebagaimana ditunjukkan secara jelas pada simbolnya. Secara elektris, Triac dapat dipandang sebagai dua buah SCR yang digabungkan dalam hubungan negatif terbalik.

Dalam aplikasinya, Triac banyak digunakan untuk mengontrol arus rata-rata yang mengalir ke suatu beban. Jika TRIAC sedang OFF,

arus tidak dapat mengalir diantara terminal-terminal utamanya, atau dengan kata lain diumpamakan saklar terbuka. Jika Triac sedang ON, maka dengan tahanan yang rendah arus mengalir dari satu terminal ke terminal lainnya dengan arah aliran tergantung dari polaritas tegangan yang digunakan. Jika tegangan T2 positif, maka arus akan mengalir dari T1 ke T2 dan sebaliknya jika T1 positif, maka arus akan mengalir dari T1 ke T2 dan dalam kondisi ini Triac diumpamakan sebagai saklar tertutup.

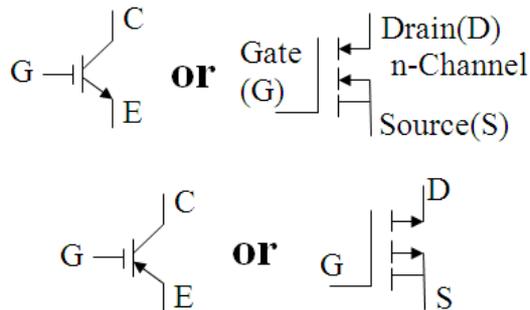
Prinsip kerja Triac hampir sama dengan komponen SCR. Triac akan ON jika diberi panjar maju atau (terminal Anoda dihubungkan dengan sumber positif dan Anoda dihubungkan sumber negatif). Setelah Triac diberi panjar maju, selanjutnya diberi arus penyulutan melalui terminal Gate (I_G). Pada saat Triac ON, maka tegangan antara Anoda dan Katoda (V_{AK}) akan menjadi nol sehingga akan mengalir arus dari Anoda menuju Katoda yang nilainya sama dengan arus beban. Karena Triac dapat dialiri dari dua arah, maka Triac juga akan ON jika dipanjar mundur (terminal Anoda dihubungkan dengan sumber positif dan Anoda dihubungkan sumber negatif) dan terminal gate diberi arus negatif.

Triac akan OFF jika Gate tidak diberi arus listrik ($I_G = 0$) baik dipanjar maju atau dipanjar mundur. Pada kondisi OFF maka tegangan antara Anoda dan Katoda (V_{AK}) akan sama dengan tegangan sumber dan tidak mengalir arus dari Anoda ke Katoda ($I_A = 0$).

2.9 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

IGBT merupakan salah satu komponen semikonduktor yang banyak digunakan dalam aplikasi elektronika industri. IGBT biasanya didesain untuk keperluan khusus guna melakukan pengaturan peralatan industri secara elektronis dengan daya yang sangat besar. Kemampuan menahan arus dan tegangan yang besar dan frekuensi pensaklaran merupakan karakteristik utama yang perlu dipertimbangkan dalam aplikasi menggunakan IGBT.

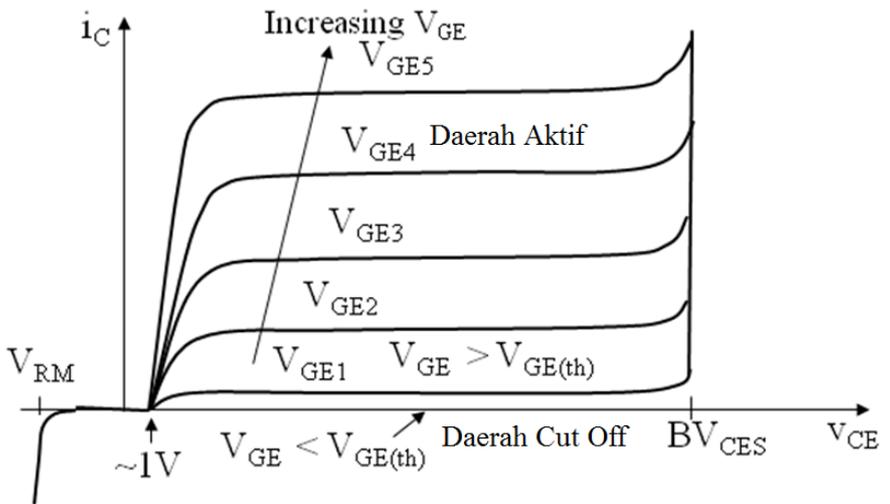
Komponen IGBT mempunyai 3 kaki yaitu Gate, Kolektor dan Emitor atau Gate, Drain dan Source sehingga disimbolkan seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.24. Simbol dan bentuk IGBT

Karakteristik IGBT

Karakteristik IGBT dapat dijelaskan berdasarkan daerah kerja yang mirip dengan karakteristik transistor seperti pada gambar berikut ini.



Gambar 2.25. Karakteristik IGBT

Di pasaran, IGBT tersedia dalam bentuk IC atau dalam bentuk modul yang sudah jadi.



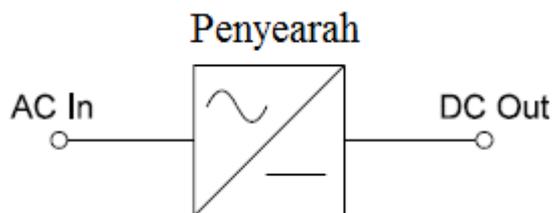
Gambar 2.26. Produk IGBT dalam bentuk IC dan modul

BAB 3

PENYEARAH DAYA DAN APLIKASINYA

3.1 Pengantar

Salah satu rangkaian terpenting dalam aplikasi elektronika daya adalah penyearah daya. Rangkaian ini banyak digunakan sebagai catu daya atau *power supply* untuk berbagai peralatan listrik baik di rumah tangga maupun di industri. Peralatan-peralatan listrik pada umumnya didesain menggunakan catu daya DC, sementara sumber yang tersedia adalah listrik AC, sehingga diperlukan rangkaian catu daya. Contoh peralatan listrik yang membutuhkan catu daya DC adalah Televisi, komputer, Laptop, Handphone, Printer, Lampu LED, peralatan komunikasi HT, peralatan kontrol industri berbasis PLC, mikrokontroler, Forklift dan lain sebagainya.



Gambar 3.1. Blok diagram rangkaian penyearah daya

Secara umum rangkaian penyearah daya didefinisikan sebagai rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah sumber tegangan listrik AC menjadi tegangan listrik DC seperti diilustrasikan pada gambar 3.1 di atas. Biasanya tegangan keluaran DC yang dihasilkan oleh rangkaian penyearah masih mempunyai riak atau *ripple* (komponen AC) sehingga perlu difilter dan diregulasi agar bentuk gelombang DC lebih halus dan konstan pada nilai tertentu.

Rangkaian penyearah dapat dikelompokkan berdasar pada sumber tegangan listrik input, bentuk gelombang output dan beban pada rangkaian. Berdasarkan sumber tegangan input, rangkaian penyearah dapat dibedakan menjadi 2 yaitu:

1. Rangkaian Penyearah Daya dengan Sumber tegangan AC 1 Fasa dan
2. Rangkaian Penyearah Daya dengan Sumber tegangan AC 3 Fasa

Berdasarkan bentuk gelombangnya, rangkaian penyearah daya dapat dibedakan menjadi

1. Rangkaian Penyearah Daya Setengah Gelombang dan
2. Rangkaian Penyearah Daya Gelombang Penuh

Dan berdasarkan bebannya, rangkaian penyearah dapat dibedakan menjadi

1. Rangkaian Penyearah Daya Beban R
2. Rangkaian Penyearah Daya Beban RL

3.2 Rangkaian Penyearah Daya Satu Fasa

Rangkaian penyearah daya satu fasa merupakan rangkaian penyearah daya yang sumber masukannya adalah listrik satu fasa.

Rangkaian penyearah daya satu fasa dapat dikelompokkan menjadi 2 yaitu:

3.2.1. Rangkaian Penyearah Daya Satu Fasa Setengah Gelombang

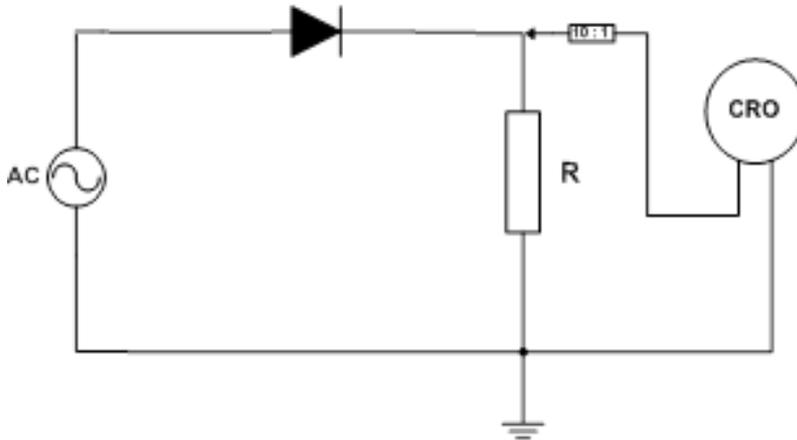
Rangkaian penyearah satu fasa setengah gelombang merupakan rangkaian penyearah daya yang paling sederhana dimana hanya terdiri atas satu dioda. Rangkaian penyearah setengah gelombang biasanya digunakan untuk beban-beban DC yang tidak membutuhkan kestabilan tinggi, seperti untuk catu daya lampu indikator pada rangkaian elektronika. Kelemahan rangkaian ini adalah bentuk gelombang DC yang dihasilkan kurang halus sehingga untuk menghaluskan diperlukan filter kapasitor dengan kapasitor yang besar. Adapun kelebihan dari rangkaian ini hanya membutuhkan satu dioda, sehingga lebih hemat.

Prinsip kerja rangkaian penyearah satu fasa setengah gelombang dapat dijelaskan sebagai berikut: komponen utama pada rangkaian ini adalah dioda yang berfungsi sebagai saklar (*switching*) dan pengubah (*converting*). Sebagai saklar, dioda akan ON pada saat tegangan input AC pada siklus positif, maka dioda dipanjar maju sehingga ON. Pada setengah siklus berikutnya akan berubah menjadi kebalikannya dan dioda dipanjar mundur sehingga OFF. Demikian siklus ini terjadi secara berulang-ulang. Untuk lebih jelas dapat dilihat pada gambar bentuk gelombang input dan output pada rangkaian penyearah.

Pada aplikasinya, rangkaian penyearah satu fasa setengah gelombang dapat diberi beban resistif seperti lampu dan pemanas. Selain beban resistif, penyearah setengah gelombang juga dapat diberi beban resistif induktif seperti motor listrik DC, lilitan, kumparan, solenoida dan beban-beban lain yang bersifat induktif.

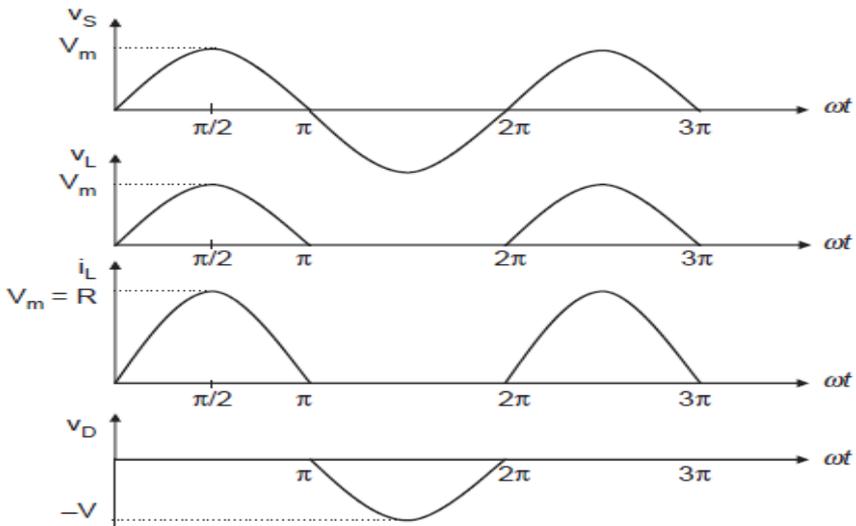
Penyearah Daya satu Fasa Setengah Gelombang Beban RL

Rangkaian penyearah satu fasa setengah gelombang dapat dilihat pada gambar 3.1 di bawah ini. Disebut sebagai penyearah setengah gelombang karena hanya setengah siklus saja yang disearahkan dan setengah siklus berikutnya dijadikan nol.



Gambar 3.2. Rangkaian Penyearah 1 fasa setengah gelombang

Prinsip kerja dari rangkaian penyearah satu fasa setengah gelombang dengan beban R adalah mengubah gelombang input AC menjadi DC. Penyearahan dilakukan pada saat setengah siklus ke-dua pada saat dioda dipanjar mundur. Pada setengah siklus ini, output rangkaian akan mengubah dari AC polaritas negatif diubah menjadi no. Untuk lebih detail bentuk gelombang input dan output rankaian penyearah setengah gelombang dengan beban R dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.3. Bentuk gelombang input dan output

Gambar di atas menunjukkan tegangan output rangkaian satu fasa setengah gelombang mempunyai bentuk yang masih kasar dengan ripple yang besar. Untuk membuat tegan output menjadi DC yang stabil diperlukan kapsitor yang dipasang paralel dengan beban dan juga regulator tegangan.

Besarnya tegangan output yang dihasilkan oleh rangkaian penyearah daya setengah 1 fasa gelombang dengan beban R adalah:

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} = 0.318V_m$$

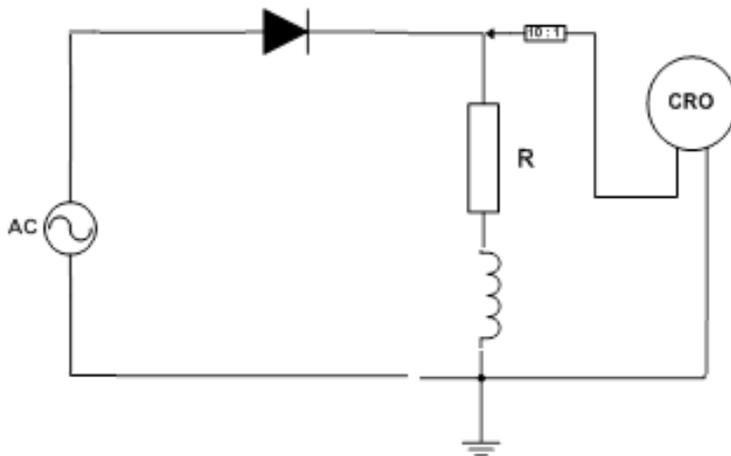
Sedangkan arus yang mengalir ke beban dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$I_{dc} = \frac{0.318V_m}{R}$$

Secara sederhana dapat dikatakan bahwa tegangan DC keluaran dari rangkaian penyearah setengah gelombang akan menghasilkan sekitar 1/3 dari tegangan masukan AC.

Penyearah Daya satu Fasa Setengah Gelombang Beban RL

Beban pada suatu rangkaian elektronika daya tidak selamanya bersifat resistif saja melainkan kebanyakan bersifat resistif (R) dan induktif (L). Contoh beban-beban yang bersifat RL adalah motor listrik, solenoida dan peralatan listrik lainnya yang menggunakan prinsip induksi elektromagnetik. Karakteristik beban induktif pada rangkaian *switching* adalah kemampuan menyimpan daya pada saat ON dan mengalirkan daya pada saat OFF.



Gambar 3.4. Rangkaian penyearah daya 1 fasa beban RL

Prinsip kerja rangkaian penyearah daya 1 fasa setengah gelombang beban RL hampir sama dengan prinsip kerja penyearah daya 1 fasa beban R. Komponen utama adalah Dioda yang berfungsi sebagai saklar dan pengubah. Dioda akan ON pada setengah siklus pertama dimana sumber listrik AC pada polaritas positif. Pada setengah siklus berikutnya Dioda akan OFF karena polaritas tegangan pada anoda lebih positif dibandingkan pada katoda.

Beban induktif akan mempengaruhi bentuk tegangan output rangkaian karena akan membuat Dioda tetap ON selama beberapa saat walaupun Dioda dipanjar mundur karena pengaruh beban L ini. waktu konduksi dioda menjadi lebih lama yaitu sebesar $(\pi + \phi)$.

Beban Resistif dan Induktif akan mempengaruhi terhadap tegangan output yang dihasilkan oleh rangkaian ini dan dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$V_{dc} = \frac{V_m}{2\pi} [1 - \cos(\pi + \theta)] = \frac{V_m}{2\pi} (1 - \cos \beta)$$

Dengan

$$\theta = (\beta - \pi), \quad \text{dan} \quad \theta \approx \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$$

Untuk lebih jelas mengenai pengaruh beban L pada rangkaian penyearah daya dapat dilihat pada gambar.

Untuk mengatasi masalah munculnya tegangan negatif pada saat dioda OFF, maka pada rangkaian perlu dipasang dioda komutasi.

3.2.2. Rangkaian Penyearah Daya Satu Fasa Gelombang Penuh

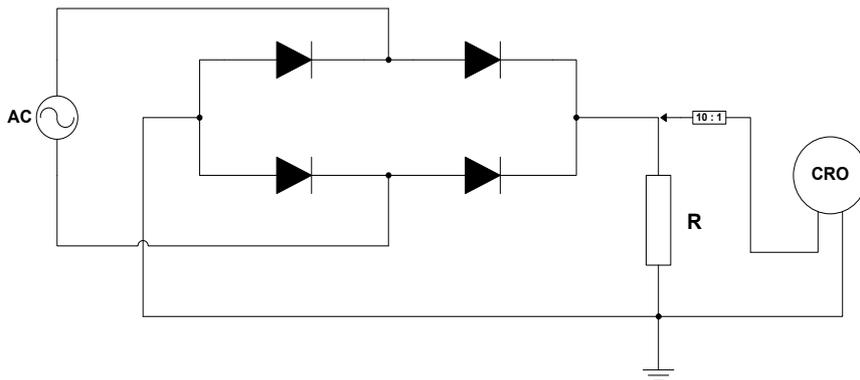
Rangkaian penyearah daya 1 fasa gelombang penuh banyak dipakai untuk catu daya peralatan listrik di rumah tangga maupun di industri. Banyak peralatan listrik di rumah seperti TV, Laptop, Handphone, DVD Player, Radio Tape, Compo, dan peralatan komunikasi lain menggunakan rangkaian penyearah 1 fasa gelombang penuh sebagai catu daya listriknya.

Kelebihan rangkaian penyearah 1 fasa gelombang penuh jika dibanding dengan rangkaian penyearah setengah gelombang adalah bentuk tegangan dan arus keluaran relatif lebih baik dengan *ripple*

yang lebih kecil. Selain itu tegangan output yang dihasilkan juga lebih besar jika dibanding dengan rangkaian penyearah setengah gelombang.

Pada aplikasinya, rangkaian penyearah gelombang penuh bisa dibebani dengan beban yang bersifat resistif seperti lampu pijar, lampu LED dan pemanas. Selain beban resistif, terkadang rangkaian penyearah ini juga diberi beban yang bersifat resistif dan induktif.

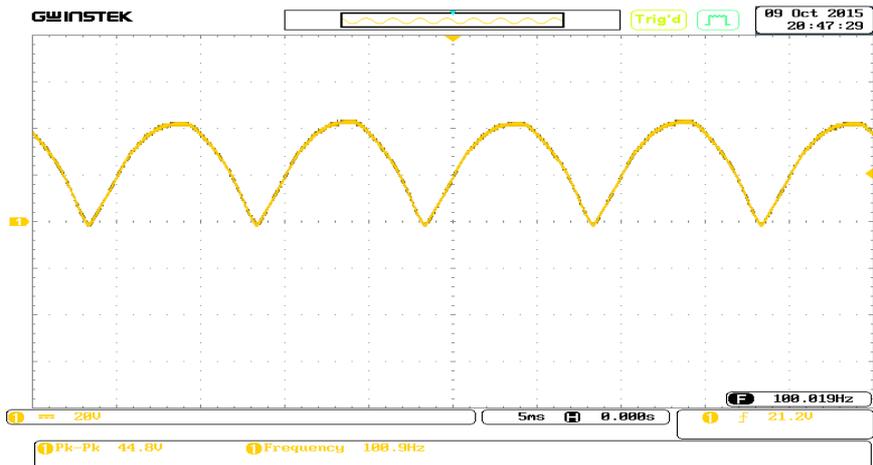
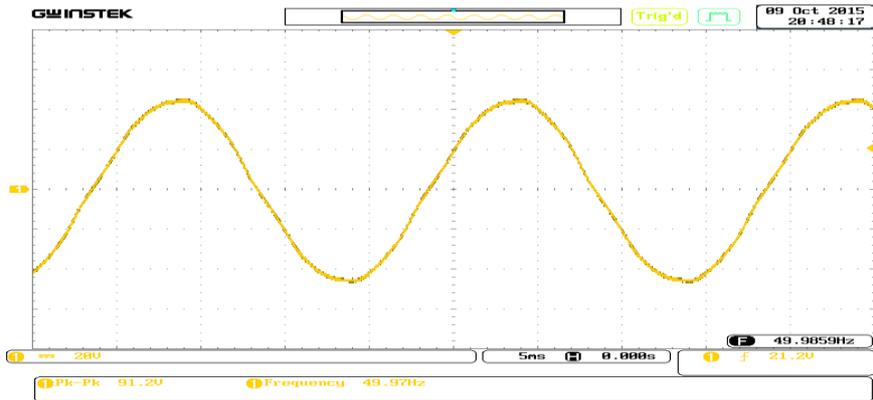
Rangkaian Penyearah Daya 1 Fasa Gelombang Penuh Beban R



Gambar 3.5. Rangkaian penyearah daya satu fasa beban R

Untuk beban resistif, bentuk tegangan output dari rangkaian dapat dilihat pada gambar 3.5. Jika pada penyearah setengah gelombang hanya setengah siklus saja yang disearahkan, pada penyearah gelombang penuh kedua siklus disearahkan sehingga bentuk gelombang lebih baik dan nilai tegangan lebih besar.

Bab 3 Penyearah Daya dan Aplikasinya



Gambar 3.6. Gelombang input dan output penyearah daya 1 fasa

Tegangan output rangkaian penyearah daya satu fasa gelombang penuh dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

Tegangan rerata (V_{DC})

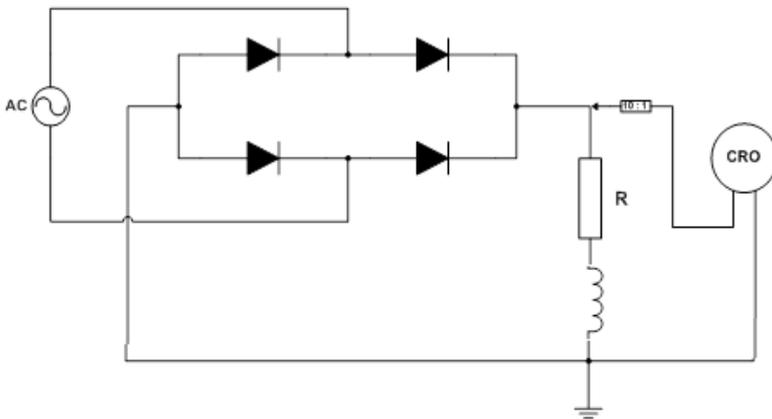
$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} = 0,637V_m$$

Sedangkan tegangan RMS (V_L) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut

$$V_L = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0,707V_m$$

Rangkaian Penyearah Daya 1 Fasa Gelombang Penuh Beban RL

Beban induktif akan mempengaruhi bentuk tegangan output rangkaian karena akan membuat Dioda tetap ON selama beberapa saat walaupun Dioda dipanjar mundur karena pengaruh beban L ini. Waktu konduksi dioda menjadi lebih lama yaitu sebesar $(\pi + \phi)$.



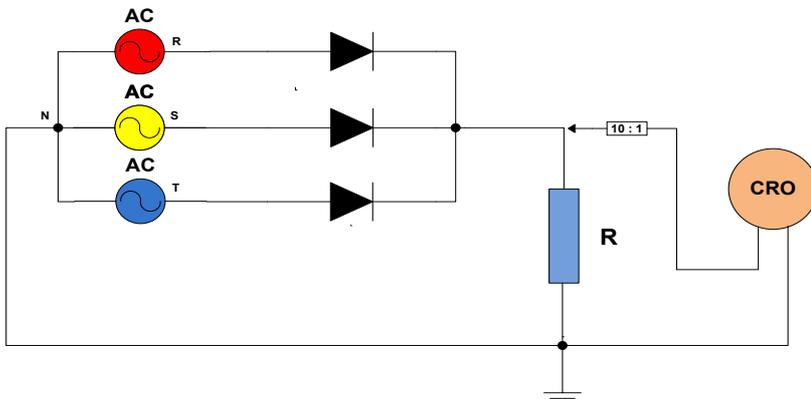
Gambar 3.5. Rangkaian penyearah daya 1 fasa beban RL

3.3 Rangkaian Penyearah Daya Tiga Fasa

Rangkaian penyearah daya tiga fasa merupakan rangkaian penyearah daya yang sumber masukannya adalah listrik 3 fasa. Rangkaian penyearah daya tiga fasa banyak digunakan di industri baik sebagai rangkaian yang berdiri sendiri atau sebagai dari peralatan lain yang lebih kompleks. Kelebihan dari rangkaian penyearah daya tiga fasa dibanding rangkaian penyearah daya satu fasa adalah bentuk gelombang output yang lebih baik dan rata, sehingga kapasitor filter yang dibutuhkan tidak terlalu besar.

1. Rangkaian Penyearah Daya 3 Fasa Setengah Gelombang Beban R

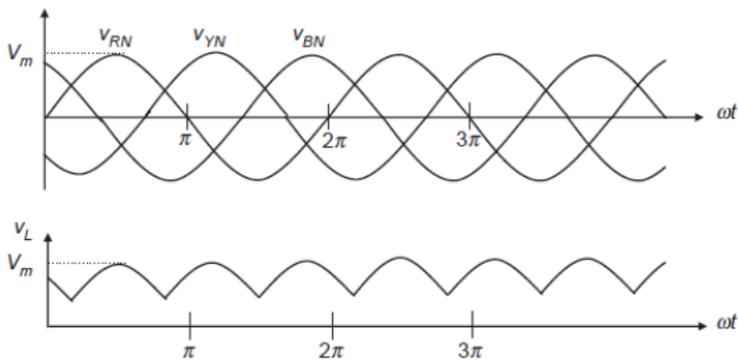
Rangkaian penyearah tiga fasa ini digunakan untuk menyearahkan sumber listrik tiga fasa. Bentuk gelombang output sudah lebih baik dari penyearah satu fasa baik yang setengah maupun gelombang penuh. Seperti halnya pada rangkaian penyearah satu fasa.



Gambar 3.6. Rangkaian penyearah daya 1 fasa beban RL

Pada rangkaian penyearah tiga fasa, sumber listrik dapat menggunakan konfigurasi bintang atau segitiga. Pada umumnya listrik tiga fasa menggunakan konfigurasi bintang dimana titik tengah dari lilitan dihubungkan dengan titik netral yang ditanahkan. Input listrik AC tiga fasa terdiri atas 3 fasa yaitu fasa R, fasa S dan fasa T yang masing-masing fasa berbeda 120° .

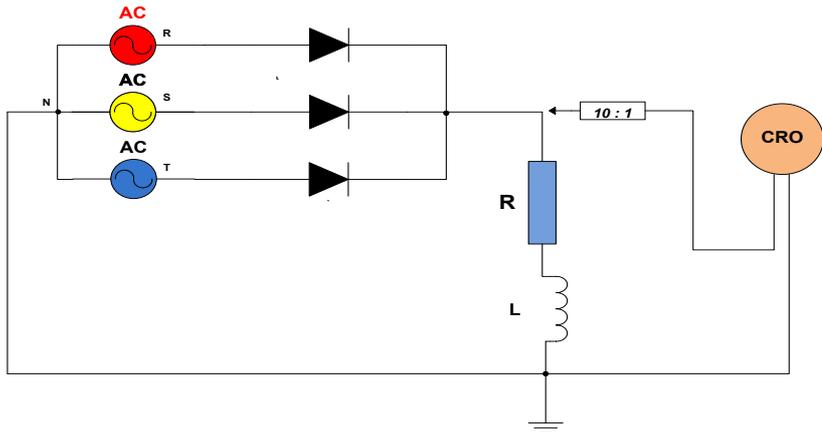
Bentuk gelombang input dan output rangkaian penyearah daya 3 fasa setengah gelombang dapat dilihat pada gambar 3.7.



Gambar 3.7. Gelombang penyearah daya tiga fasa setengah gelombang

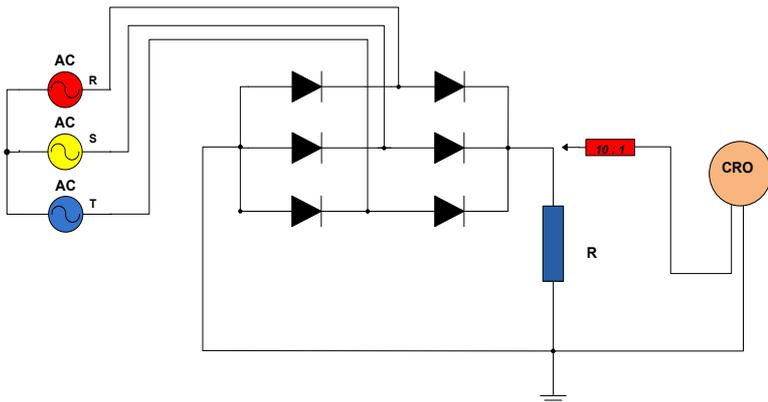
2. Rangkaian Penyearah Daya 3 Fasa Setengah Gelombang Beban RL

Beban yang dicatu pada rangkaian penyearah bisa bersifat Resistif murni atau campuran resistif dan induktif. Untuk beban yang bersifat resistif induktif akan mempunyai dampak yang sama dengan beban resistif induktif pada penyearah satu fasa.



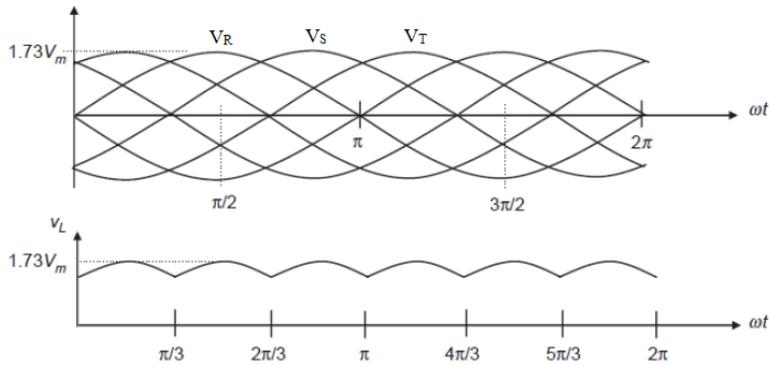
Gambar 3.8. Rangkaian penyearah daya 1 fasa beban RL

3. Rangkaian Penyearah Daya 3 Fasa Gelombang Penuh Beban R
Rangkaian penyearah tiga fasa gelombang penuh terdiri atas 6 dioda yang dipasang seperti pada gambar 3.9. jumlah dioda yang lebih banyak akan menghasilkan bentuk gelombang DC yang lebih halus.



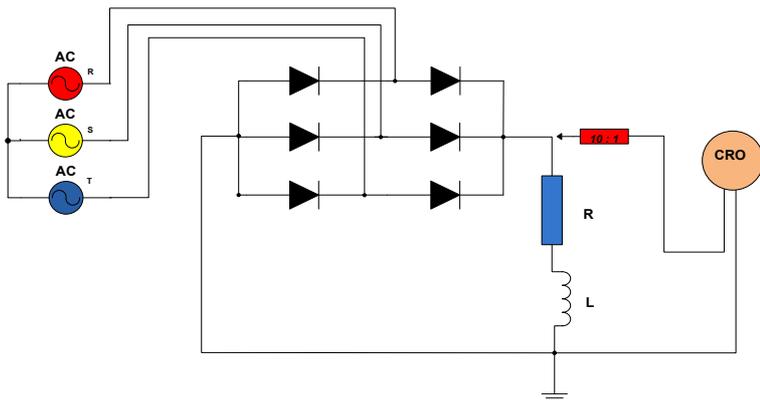
Gambar 3.9. Rangkaian penyearah daya 3 fasa gelombang penuh

Berikut ini adalah gambar bentuk gelombang input dan output pada rangkaian penyearah tiga fasa gelombang penuh. Bentuk gelombang output terlihat lebih halus dibanding output rangkaian penyearah gelombang satu fasa maupun tiga fasa setengah gelombang.



Gambar 3.10. Rangkaian penyearah daya 3 fasa gelombang penuh

4. Rangkaian Penyearah Daya 1 Fasa Gelombang Penuh Beban RL



Gambar 3.11. Rangkaian penyearah daya 1 fasa beban RL

3.4 Aplikasi Rangkaian Penyearah Daya

Sebagaimana yang telah dijelaskan di awal, rangkaian penyearah daya berfungsi untuk mengubah sumber listrik AC menjadi listrik DC. Aplikasi rangkaian penyearah daya dapat dilihat di berbagai peralatan baik di rumah tangga maupun di industri.

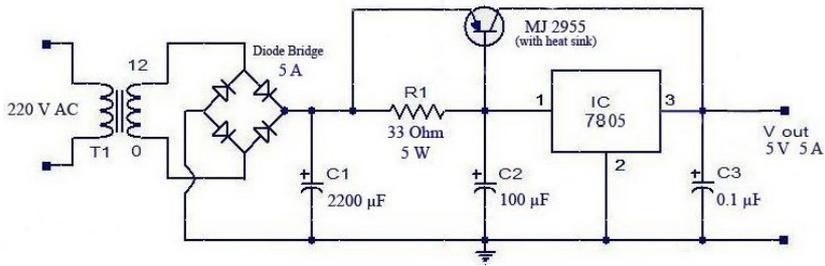
3.4.1. Catu Daya DC

Catu daya listrik DC merupakan satu peralatan listrik yang paling banyak digunakan. Kebanyakan peralatan listrik dan elektronik saat ini didesain dan dikembangkan dengan sumber arus DC, sedangkan sumber listrik yang tersedia kebanyakan AC. Oleh karena itu, catu daya DC menjadi kebutuhan utama agar peralatan elektronika dapat bekerja dengan baik. Beberapa peralatan elektronika menggunakan sumber listrik DC dari baterai atau Aki, tetapi dengan pertimbangan efisiensi tetap disediakan catu daya DC.

Contoh peralatan yang memerlukan catu daya DC diantaranya adalah sebagai berikut:

- TV
- Radio
- Laptop
- Komputer
- Printer
- Peralatan elektronika lainnya

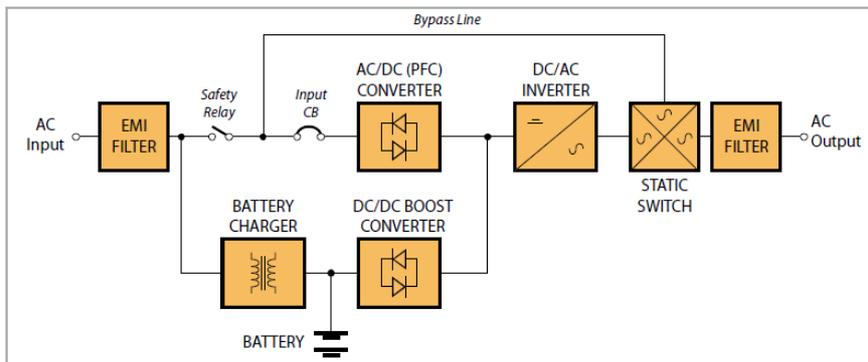
Berikut ini adalah contoh aplikasi rangkaian penyearah daya yang digunakan sebagai catu daya.



Gambar 3.12. Rangkaian catu daya DC

3.4.2. UPS (*Uninterruptible Power Supply*)

Perkembangan ilmu dan teknologi yang sangat pesat, menjadikan kebutuhan untuk mendapatkan catu daya yang kontinu tanpa putus menjadi semakin tinggi. Oleh karena itu, beberapa peralatan yang tidak boleh mati memerlukan catu daya kontinu. UPS merupakan catu daya yang mampu menyediakan sumber listrik tanpa putus. UPS biasanya menjadi catu daya cadangan jika catu daya listrik utama mengalami kegagalan.



Gambar 3.12. Blok diagram rangkaian UPS

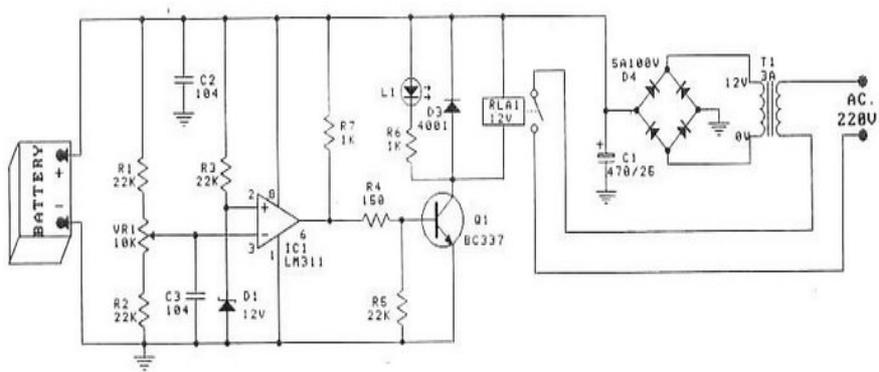


Gambar 3.13. Contoh produk UPS

3.4.3. Charger Aki atau Baterai

Aplikasi rangkaian penyearah daya yang banyak digunakan yaitu untuk charger Aki atau baterai. Peralatan-peralatan listrik dan elektronika yang memerlukan catu daya DC dapat menggunakan sumber listrik DC dari rangkaian penyearah atau juga bisa menggunakan baterai atau Aki. Baterai atau Aki yang digunakan pada catu daya listrik DC dapat menggunakan berbagai jenis baik yang basah maupun yang kering, baik yang dapat diisi ulang atau yang sekali pakai.

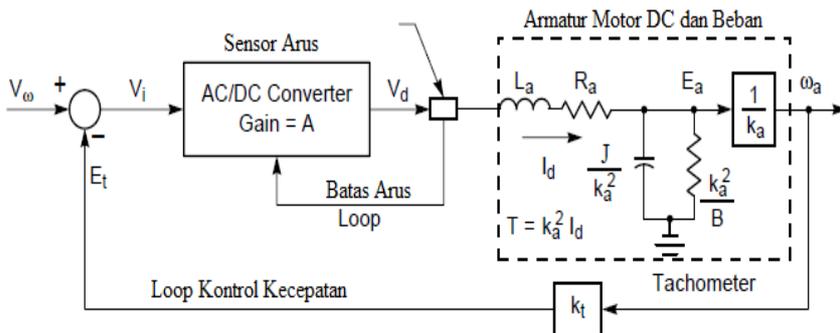
Baterai atau Aki yang dapat diisi ulang perlu *dicharge* dengan rangkaian *charging* yang prinsipnya menggunakan rangkaian penyearah daya baik satu maupun tiga fasa.



Gambar 3.14. Rangkaian charger baterai

3.4.4. Pengendali Kecepatan Motor DC

Rangkaian penyearah daya juga dapat digunakan dalam aplikasi pengaturan motor DC dengan menambahkan unit pengatur tegangan pada sisi outputnya. Dengan mengatur tegangan output dari rangkaian penyearah daya dapat digunakan sebagai kontroler kecepatan maupun arah putar motor DC. Aplikasi di industri banyak digunakan pada mesin-mesin produksi yang dikontrol baik secara manual maupun otomatis.



Gambar 3.14. Blok diagram kontrol motor DC

BAB 4

RANGKAIAN PEMICU DAN KOMUTASI SCR

4.1 Pengantar

Rangkaian elektronika daya terdiri atas komponen-komponen elektronika baik pasif maupun aktif seperti yang telah dijelaskan pada bab 2. Komponen pasif terdiri atas resistor (R), induktor (L) dan kapasitor, sedangkan komponen aktif terdiri atas dioda, transistor, MOSFET, SCR, Diac, Triac, IGBT dan komponen semikonduktor lainnya. Pada aplikasi rangkaian elektronika daya, komponen semikonduktor lebih banyak difungsikan sebagai saklar elektronik. Sebagai sakelar elektronis, komponen semikonduktor tidak dapat ON/OFF secara langsung, melainkan membutuhkan rangkaian dari luar yang menghasilkan sinyal untuk memicu agar komponen semikonduktor dapat bekerja. Untuk itu diperlukan rangkaian penyulut (*triggering circuits*) untuk mengaktifkan komponen semikonduktor.

Komponen semikonduktor seperti BJT, FET dan IGBT digunakan sebagai sakelar elektronis dengan sumber input listrik DC. Contoh aplikasi rangkaian dengan input DC adalah rangkaian konverter DC ke DC atau dikenal dengan istilah Chopper. Sedangkan SCR dan Triac digunakan untuk *switching* dengan sumber listrik DC

mupun AC sehingga banyak dipakai pada aplikasi penyearah terkendali (AC ke DC Konverter) dan AC Regulator (AC ke AC Konverter).

Rangkaian pemicu pada dasarnya adalah rangkaian elektronika yang akan menghasilkan sinyal listrik baik dalam bentuk arus maupun tegangan listrik. Sinyal inilah yang digunakan sebagai penyulut komponen semikonduktor agar dapat bekerja sesuai dengan mekanisme yang dirancang. Transistor BJT, SCR membutuhkan sinyal pemicuan berupa arus listrik untuk dapat bekerja melalui kaki basis dan gate. Sedangkan FET dan IGBT memerlukan sinyal tegangan sebagai pemicu agar komponen ini dapat bekerja dengan baik. Kemampuan komponen untuk disulut inilah yang dijadikan sebagai dasar dalam melakukan pengendalian melalui pengaturan sudut penyulutan. Dengan mengatur sudut penyulutan akan didapat output yang terkontrol sesuai dengan sudut penyulutannya. Proses pengaturan sudut picu dapat dilakukan secara manual dengan potensiometer atau secara digital dengan keypad atau juga secara otomatis melalui peralatan terprogram.

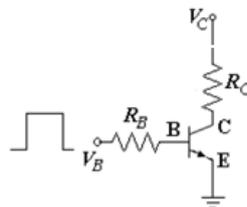
4.2 Prinsip Pemicuan Komponen Semikonduktor

Komponen semikonduktor terbuat dari bahan semikonduktor yang mempunyai sifat pada saat kondisi normal berfungsi sebagai isolator. Untuk mengaktifkan komponen semikonduktor sebagai konduktor diperlukan catu daya tegangan yang sesuai. Komponen semikonduktor daya seperti BJT, FET, IGBT, SCR dan Triac didesain bekerja jika diberikan catu daya tegangan yang sesuai dan diberi arus atau tegangan pemicuan dengan nilai tertentu. Oleh karena itu, komponen-komponen semikonduktor daya ini memerlukan rangkaian pemicu untuk mengatur ON/OFF untuk diaplikasikan pada rangkaian elektronika daya.

Prinsip pemicuan komponen semikonduktor adalah memberikan arus atau tegangan tertentu untuk menjadikan komponen ini bekerja baik sebagai saklar elektronis maupun fungsi lainnya. Arus atau tegangan yang diberikan berfungsi sebagai pemicu artinya setelah komponen elektronika daya ON, maka sudah tidak diperlukan lagi dan jika arus atau tegangan pemicuan dihentikan maka tidak akan menakibatkan komponen tersebut mati. Biasanya pemicuan komponen semikonduktor diberikan dalam bentuk pulsa dengan kecepatan tinggi yang dapat diatur siklus kerja (*duty cycle*) nya.

4.3 Rangkaian Pemicu Transistor

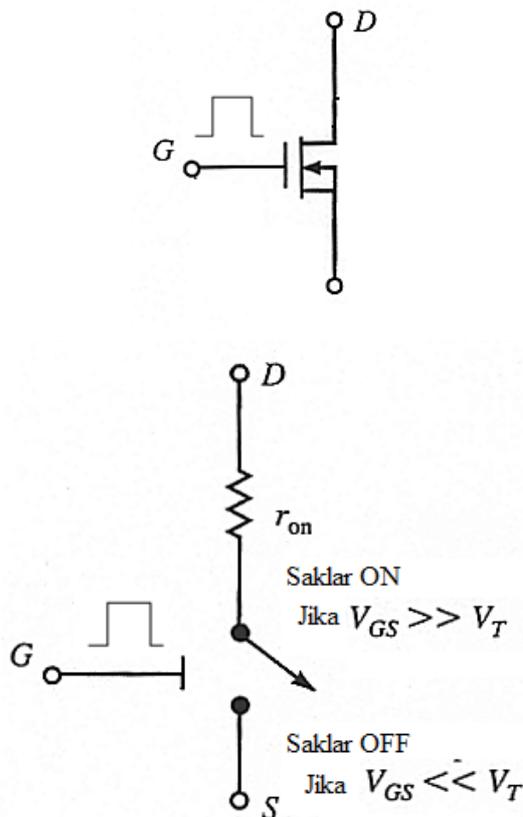
Transistor sebagaimana telah dijelaskan pada Bab 2 tentang komponen semikonduktor daya merupakan komponen semikonduktor yang memiliki 3 kaki yaitu Basis (B), Kolektor (C) dan Emitor (E). Untuk memfungsikan transistor menjadi saklar elektronis, maka transistor perlu diberikan panjar maju untuk Kolektor Emitor dan input arus basis agar transistor dapat bekerja sebagai saklar (ON/OFF). Transistor akan ON jika kolektor dan Emitor dibias maju dan basis diberi arus yang cukup untuk membuat transistor jenuh. Sebaliknya untuk memfungsikan transistor sebagai saklar OFF, maka arus basis dibuat menjadi nol. Dalam aplikasi saklar elektronis seperti pada rangkaian DC Chopper baik step-up maupun step-down diperlukan rangkaian pembangkit pulsa seperti pada gambar 4.1.



Gambar 4.1. Transistor sebagai saklar

4.3.1. Rangkaian Pemicu FET

FET mempunyai karakteristik yang hampir sama dengan transistor BJT. Jika transistor BJT memerlukan rangkaian pemicu berupa arus listrik yang dialirkan melalui terminal basis (I_B), sedangkan FET memerlukan pemicu berupa tegangan yang diberikan pada terminal Gate (V_{DS}). Berikut ini adalah prinsip kerja pemicuan dari FET.

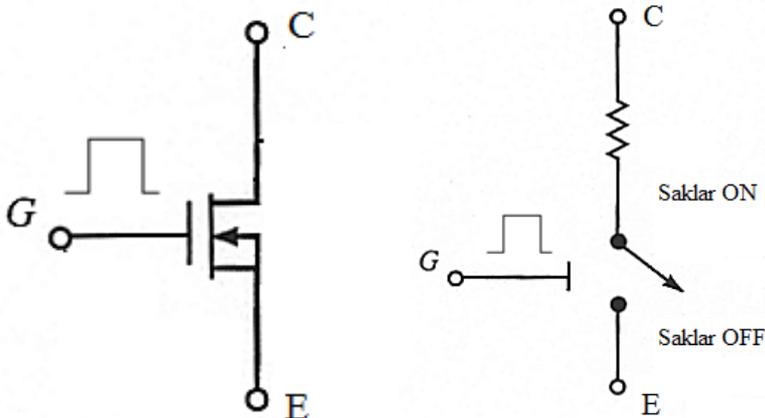


Gambar 4.2. Transistor sebagai saklar

Dengan memberikan sinyal pemicuan berupa pulsa tegangan, maka FET dapat difungsikan sebagai saklar elektronis yang dapat diatur siklus kerja (*duty cycle*) untuk melakukan pengaturan pada tegangan keluaran. Pengaturan pulsa baik arus maupun tegangan pada Transistor BJT dan FET sering dikenal dengan istilah pengaturan lebar pulsa (Pulse Width Modulation) atau PWM. Dengan mengatur lebar pulsa yaitu Ton dan Toff, maka transistor dapat diatur hidup dan matinya dengan frekuensi tertentu. Rangkaian pembangkit pulsa akan dibahas pada sub pokok bahasan berikutnya.

4.3.2. Rangkaian Pemicu IGBT

IGBT merupakan salah satu jenis transistor yang merupakan kombinasi dari BJT dan FET. Simbol IGBT dapat dilihat pada gambar 4.3 dimana terminal-terminal IGBT terdiri atas Gate, Kolektor dan Emitor. Prinsip pemicuan IGBT hampir sama dengan pemicuan pada FET yang membutuhkan tegangan agar arus mengalir dari Kolektor ke Emitor seperti pada gambar 4.3. di bawah ini.

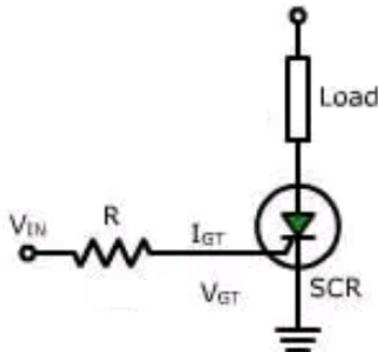


Gambar 4.3. Transistor sebagai saklar

Terminal Gate pada IGBT perlu dipicu dengan pulsa tegangan dengan lebar pulsa yang dapat diatur sehingga didapatkan pengaturan output yang diinginkan.

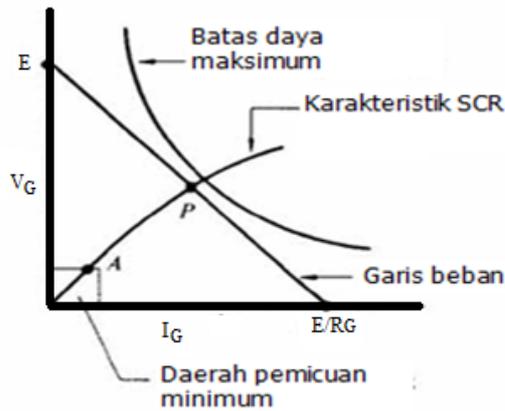
4.3.3. Rangkaian Pemicu SCR

Sebagaimana telah dijelaskan pada Bab 2 tentang komponen elektronika daya, SCR untuk dapat ON memerlukan perlakuan khusus yaitu harus dipanjar maju pada terminal Anoda dan Katoda serta diberi pemicuan berupa arus listrik pada terminal Gate. Berikut ini adalah cara sederhana untuk menghidupkan SCR seperti terlihat pada gambar 4.4.



Gambar 4.4. Transistor sebagai saklar

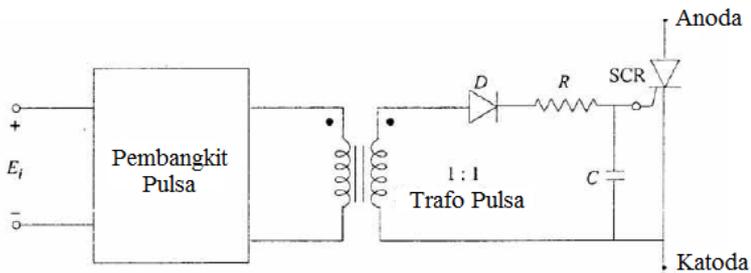
Karena jenis dan ragam SCR sangat banyak di pasaran, maka pemicuan SCR harus dilakukan sesuai dengan data sheet yang dikeluarkan oleh pabrik pembuat. Secara teoritis, pemicuan pemicu harus berdasar pada kurva karakteristik hubungan antara tegangan Gate dan Arus Gate seperti ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5. Transistor sebagai saklar

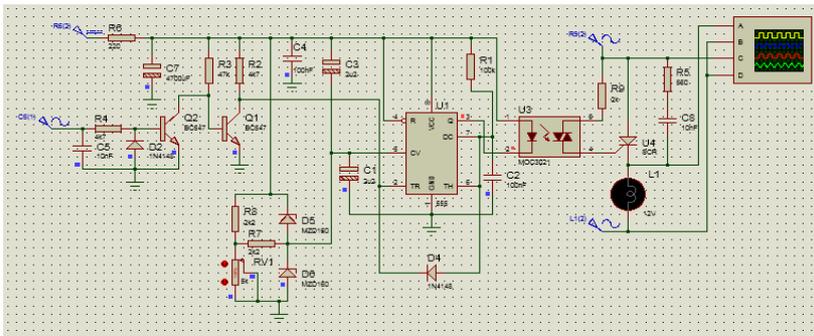
Pemicuan SCR harus memperhatikan tegangan rating, arus rating, dan daya maksimum dari SCR yang dikeluarkan oleh pabrik dan di-publish melalui *datasheet*. Dari kurva ini dapat ditentukan berapa arus pemicuan yang aman agar tidak menyebabkan komponen berjalan dengan baik dan tidak mengalami gangguan.

Pemicuan SCR dapat juga dilakukan dengan rangkaian trafo pulsa yang akan membangkitkan pulsa arus dan dihubungkan dengan terminal Gate. Berikut ini adalah gambar diagram pemicu SCR dengan Trafo Pulsa.



Gambar 4.6. Rangkaian Pemicu SCR

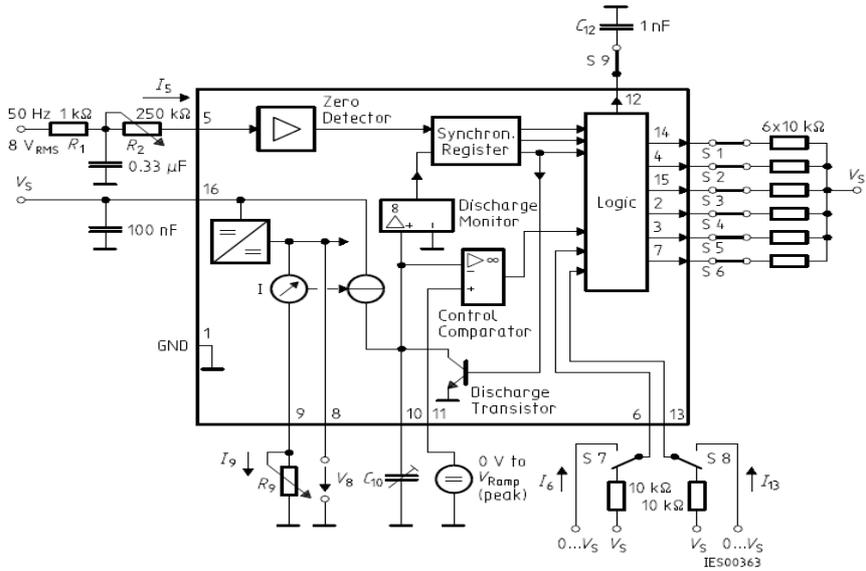
Pemicuan sinyal Gate pada SCR secara kontinu dapat dilakukan oleh rangkaian terintegrasi (*Integrated Circuit* atau IC) yang didesain khusus sebagai rangkaian pembangkit gelombang. Rangkaian terintegrasi yang bisa digunakan sebagai pembangkit gelombang yaitu IC 555. Dengan konstruksi yang sederhana dan harga yang murah menjadikan IC 555 sebagai pilihan bagi desainer peralatan elektronik. Berikut ini adalah salah satu desain yang dapat digunakan sebagai rangkaian pemicu SCR.



Gambar 4.7. Rangkaian Pemicu SCR dengan IC 555

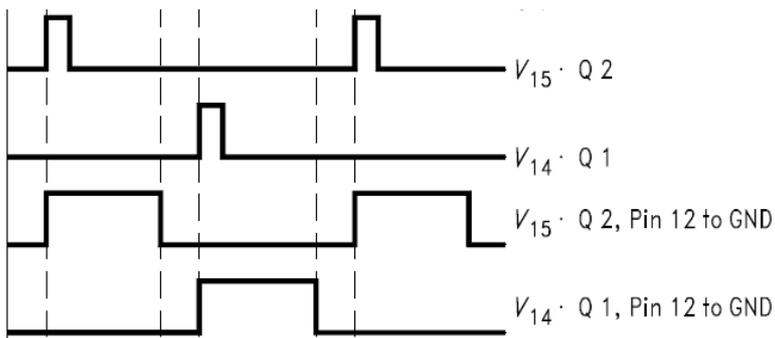
Salah satu kelemahan rangkaian pemicuan SCR dengan IC 555 adalah hanya menghasilkan satu gelombang output sebagai pemicuan SCR sehingga hanya dapat digunakan untuk memicu satu SCR seperti pada rangkaian setengah gelombang. Untuk memicu dua SCR diperlukan dua buah IC yang diatur perbedaan sudut penyulutannya, hal ini menjadi pertimbangan engineer dalam desain rangkaian pemicu.

Untuk mengatasi pemicuan dua SCR pada rangkaian penyearah terkendali gelombang penuh satu maupun tiga fasa biasanya digunakan rangkaian terintegrasi yang lebih kompleks. IC TCA 785 menjadi alternatif dalam desain rangkaian pemicuan SCR. Berikut ini adalah contoh rangkaian pemicu SCR.



Gambar 4.7. Rangkaian Pemicu SCR dengan IC TCA 785

Rangkaian di atas akan menghasilkan arus penyulutan berupa pulsa yang dapat diatur. Bentuk gelombang arus pulsa yang dihasilkan dari rangkaian di atas dapat dilihat pada gambar 4.7.



Gambar 4.7. Gelombang pulsa keluaran rangkaian pemicu SCR

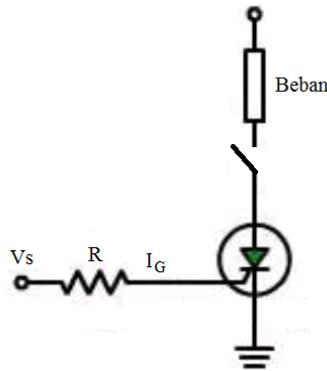
4.4 Rangkaian Komutasi

Karakteristik dari SCR yaitu apabila sudah ON, maka akan ON terus walaupun arus pemicuan sudah dihentikan sampai ada mekanisme untuk mematikan. Cara mematikan SCR dikenal dengan istilah komutasi. Untuk mematikan SCR seperti yang sudah dibahas pada bab 2, yaitu dengan memberikan panjar muncur atau dengan mematikan sumbernya yaitu menutup sumber yang mengalir ke Anoda dan Katoda.

Untuk input listrik AC, dimana polaritas selalu berubah, maka SCR secara otomatis akan ON dan OFF secara alami tanpa diperlukan mekanisme khusus untuk memamatkannya. Hal ini dinamakan dengan komutasi alami (*natural commutation*). Sedangkan untuk sumber listrik DC, dimana sumber listrik polaritasnya tetap sepanjang waktu, maka harus diperlukan rangkaian khusus untuk mematikan SCR. Rangkaian komutasi pada sumber listrik DC dikenal dengan istilah komutasi paksa atau (*forced commutation*).

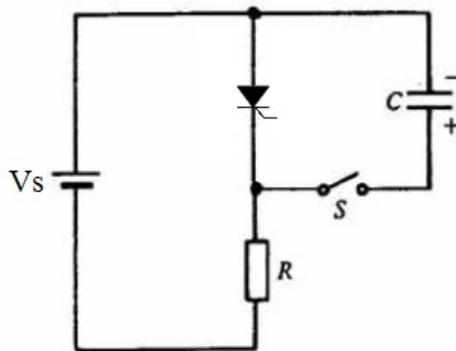
Prinsip komutasi SCR adalah dengan melepas catu daya dari anoda ke katoda atau memberikan panjar mundur. Cara paling sederhana untuk mematikan SCR adalah dengan melepas catu daya yang melewati terminal katoda dan anoda. Dengan meng-off-kan saklar pada catu daya Anoda dan katoda, maka SCR otomatis akan mati seperti terlihat pada gambar 4.9. Akan tetapi cara ini tidak efisien karena akan menimbulkan tegangan dan arus transien yang dapat merusak SCR. Untuk itu dibutuhkan rangkaian komutasi SCR untuk sumber DC yang lebih baik. Ada berbagai teknis dan cara yang dapat digunakan untuk mematikan SCR secara halus. Salah satu prinsip yang digunakan adalah dengan memanfaatkan komponen kapasitor (C) yang mampu menyimpan muatan pada

saat diberikan sumber listrik dan melepaskan kembali muatan jika sumber dimatikan.



Gambar 4.8. Mekanisme komutasi SCR secara paksa

Mekanisme mematikan secara paksa dengan menggunakan sifat dasar komponen Kapasitor dapat dilihat pada gambar 4.9. Pada saat saklar pada posisi OFF dan SCR dipicu maka SCR akan ON dan kapasitor (C) akan terisi muatan. Pada saat saklar ON, maka Kapasitor (C) akan meluapkan muatannya dari Katoda menuju Anoda dan SCR mendapatkan panjar mundur sehingga akan OFF.



Gambar 4.9. Mekanisme komutasi SCR dengan Kapasitansi

Dengan prinsip yang sama dapat dikembangkan rangkaian-rangkaian komutasi SCR secara paksa dengan menggunakan kapasitor untuk memberikan panjar mundur.

BAB 5

PENYEARAH TERKENDALI DAN APLIKASINYA

5.1 Pengantar

Pada bab 3 telah dibahas rangkaian penyearah daya, dan pada bab 5 ini akan dibahas rangkaian penyearah terkendali. Kedua rangkaian ini mempunyai fungsi yang sama yaitu untuk mengubah listrik AC menjadi listrik DC. Perbedaan utama antara rangkaian penyearah daya dan penyearah terkendali yaitu pada komponen yang digunakan, jika rangkaian penyearah daya menggunakan Dioda, rangkaian penyearah terkendali menggunakan SCR. Dari sisi tegangan output yang dihasilkan, rangkaian penyearah daya menghasilkan tegangan DC tetap, sedangkan rangkaian penyearah terkendali mampu menghasilkan tegangan DC yang dapat diatur. Kemampuan pengendalian tegangan output yang dapat diatur sesuai dengan yang diinginkan, sedangkan pada rangkaian penyearah daya keluarannya tetap.

Aplikasi rangkaian penyearah terkendali dalam peralatan listrik dan elektronika hampir sama pada aplikasi rangkaian

penyearah yaitu sebagai catu daya DC peralatan-peralatan listrik dan elektronika yang memerlukan pengaturan nilai tegangannya. Peralatan-peralatan listrik dan elektronika yang membutuhkan pengaturan tegangan DC diantaranya adalah kontrol motor DC, kontrol arus eksitasi pada mesin sinkron, catu daya DC variabel, kontrol lampu LED, catu daya peralatan komunikasi seperti HP, komputer, pesawat komunikasi lainnya dan catu daya DC berkualitas tinggi yang mampu menyesuaikan dengan perubahan beban dan aplikasi lainnya.

Secara umum rangkaian penyearah terkendali didefinisikan sebagai rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah sumber tegangan listrik AC menjadi tegangan listrik DC dengan tegangan keluaran yang dapat diatur sesuai kebutuhan. Pengaturan tegangan output dilakukan oleh komponen semikonduktor SCR melalui penyulutan terminak Gate. Untuk memperhalus tegangan keluaran yang dihasilkan oleh rangkaian penyearah terkendali diperlukan filter kapasitor dan regulasi tenaga DC dengan menggunakan DC Chopper.

Rangkaian penyearah terkendali dapat dikelompokkan berdasar pada sumber tegangan listrik input, bentuk gelombang output dan beban pada rangkaian. Berdasarkan sumber tegangan input, rangkaian penyearah terkendali dapat dibedakan menjadi 2 yaitu:

1. Rangkaian Penyearah terkendali dengan Sumber tegangan AC 1 Fasa, dan
2. Rangkaian Penyearah Terkendali dengan Sumber tegangan AC 3 Fasa.

Berdasarkan bentuk gelombangnya, rangkaian penyearah Terkendali daya dapat dibedakan menjadi

1. Rangkaian Penyearah Terkendali Setengah Gelombang, dan
2. Rangkaian Penyearah Terkendali Gelombang Penuh.

Dan berdasarkan bebannya, rangkaian penyearah terkendali dapat dibedakan menjadi

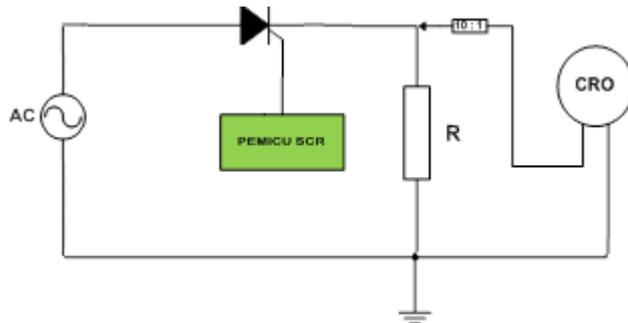
1. Rangkaian Penyearah Terkendali Beban R.
2. Rangkaian Penyearah Terkendali Beban RL.

5.2 Rangkaian Penyearah Terkendali Satu Fasa

Rangkaian penyearah terkendali satu fasa merupakan rangkaian penyearah terkendali yang sumber masukannya adalah listrik satu fasa. Rangkaian penyearah terkendali satu fasa dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu rangkaian penyearah terkendali setengah gelombang dan rangkaian penyearah terkendali gelombang penuh.

5.2.1. Rangkaian Penyearah Terkendali Satu Fasa Setengah Gelombang

Rangkaian penyearah terkendali satu fasa setengah gelombang merupakan rangkaian penyearah terkendali yang paling sederhana dimana hanya terdiri dari satu SCR. Rangkaian penyearah terkendali setengah gelombang biasanya digunakan untuk beban-beban DC yang tidak membutuhkan kestabilan tinggi, seperti untuk catu daya lampu indikator pada rangkaian elektronika. Kelemahan rangkaian ini adalah bentuk gelombang DC yang dihasilkan kurang halus karena masih mengandung riak yang cukup besar, sehingga untuk menghaluskan diperlukan filter kapasitor dengan kapasitas yang besar.



Gambar 5.1. Rangkaian Penyearah 1 fasa setengah gelombang

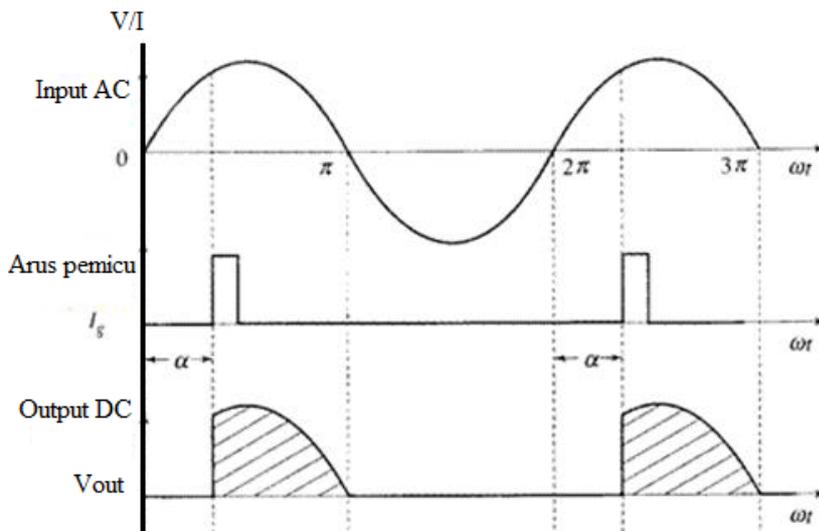
Prinsip kerja rangkaian penyearah terkendali setengah gelombang menggunakan SCR untuk mengubah listrik AC menjadi DC (*converting*) dengan cara ON/OFF terhadap sumber masukan (*switching*), dan mengatur tegangan outpunya (*controlling*). SCR berfungsi sebagai saklar ON pada saat diberikan panjar maju dimana Anoda dihubungkan dengan sumber positif dan Katoda dihubungkan sumber negatif. SCR berfungsi sebagai Saklar OFF pada saat dipanjar mundur dimana Anoda dihubungkan dengan sumber negatif dan Katoda dihubungkan sumber positif. Komutasi SCR berlangsung secara alami karena perubahan polaritas sumber AC.

SCR berfungsi sebagai pengubah pada saat diberikan input negatif dari sumber listrik AC. Pada kondisi ini, SCR akan OFF dan oleh karenanya akan mengubah listrik AC negatif menjadi keluaran sama dengan nol. Dengan pengubahan ini maka output listrik yang dihasilkan adalah DC terjadi perubahan dari input listrik AC.

SCR berfungsi sebagai pengendali pada saat dilakukan penyulutan pada terminal Gate. Sebagaimana dijelaskan pada Bab 2 tentang komponen semikonduktor daya, karakteristik SCR

memerlukan arus penyulutan pada terminal Gate. Penyulutan SCR dapat dilakukan dengan memberikan pulsa penyulutan yang dapat diatur sudut penyulutannya, hal ini dapat dimanfaatkan untuk mengatur nilai tegangan keluaran rangkaian penyearah terkendali. Pengaturan pemicuan SCR biasa dikenal dengan pengaturan sudut picu SCR (pengaturan α).

Bentuk tegangan input dan output dari rangkaian penyearah terkendali dapat dilihat pada gambar 5.1. Input rangkaian ini adalah listrik AC satu fasa dan outpunya adalah listrik DC. Gambar 5.2 menunjukkan bagaimana pengaturan tegangan output yang dilakukan dengan mengatur sudut penyulutan arus pemicu pada terminal Gate.



Gambar 5.2. Bentuk gelombang input dan output

Bentuk gelombang tegangan output rangkaian penyearah terkendali satu fasa setengah gelombang hampir sama dengan output rangkaian penyearah daya setengah gelombang. Yang membedakan

adalah adanya mekanisme pengaturan penyulutan melalui terminal Gate pada SCR yang akan menyebabkan bentuk gelombang output seperti pada gambar 5.2. Bentuk gelombang tegangan yang agak terpotong mempunyai pengaruh pada besarnya nilai tegangan output.

Besarnya tegangan output yang dihasilkan oleh rangkaian penyearah daya satu fasa setengah gelombang dengan beban R dirumuskan sebagai berikut:

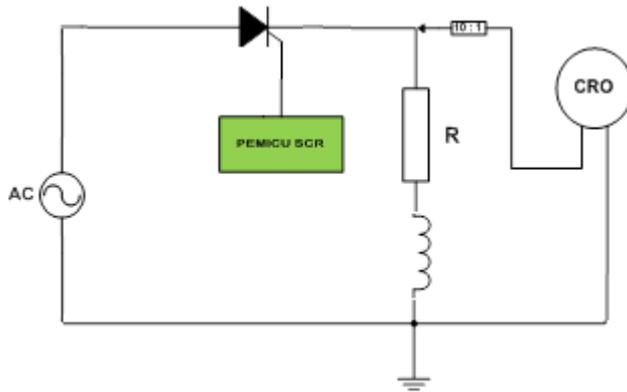
$$V_{\text{out}} = \frac{V_m}{2\pi} (1 + \cos \alpha)$$

Sedangkan tegangan output efektif dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_{\text{out RMS}} = V_m \left[\frac{\pi - \alpha}{4\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{8\pi} \right]^{1/2}$$

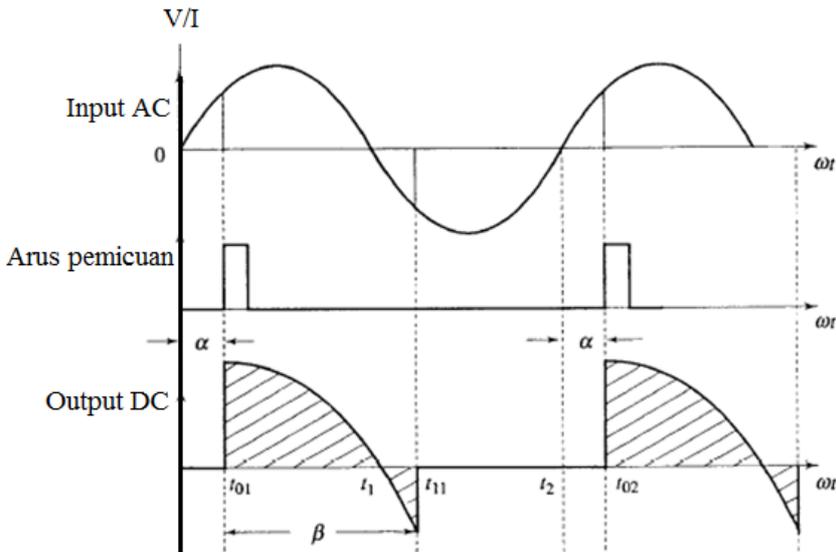
Beban pada suatu rangkaian elektronika daya tidak selamanya bersifat resistif melainkan ada juga yang bersifat resistif (R) dan induktif (L) atau dikenal dengan istilah beban RL. Contoh beban-beban yang bersifat RL adalah motor listrik, solenoida dan peralatan listrik lainnya yang menggunakan prinsip induksi elektromagnetik. Karakteristik beban induktif pada rangkaian *switching* adalah kemampuan menyimpan daya pada saat ON dan mengalirkan daya pada saat OFF. Beban induktif disimbolkan dengan induktor (L) dimana beban ini mempunyai sifat menyimpan muatan pada saat dialiri arus listrik dan pada saat tidak dialiri listrik maka induktor akan mengalirkan arus yang tersimpan tadi. Demikian seterusnya karena prinsip kerja rangkaian elektronika daya menggunakan *switching* elektronik. Jadi selama proses berlangsung komponen induktor akan menyimpan dan melepaskan muatan listriknya. Hal ini

berpengaruh pada output baik tegangan maupun arus. Berikut ini adalah model rangkaian penyearah terkendali dengan beban RL



Gambar 5.3. Penyearah terkendali setengah gelombang 1 fasa beban RL

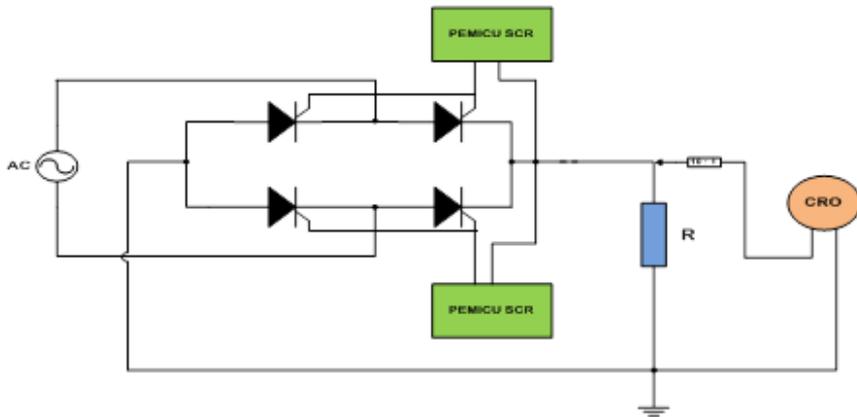
Prinsip kerja rangkaian penyearah terkendali 1 fasa setengah gelombang beban RL hampir sama dengan prinsip kerja penyearah daya 1 fasa beban RL. Komponen utama adalah SCR yang berfungsi sebagai saklar dan pengubah. Dioda akan ON pada setengah siklus pertama dimana sumber listrik AC pada polaritas positif. Pada setengah siklus berikutnya Dioda akan OFF karena polaritas tegangan pada anoda lebih positif dibandingkan pada katoda. Beban induktif akan mempengaruhi bentuk tegangan output rangkaian karena akan membuat SCR tetap ON selama beberapa saat walaupun SCR dipanjar mundur karena pengaruh beban L ini. Waktu konduksi dioda menjadi lebih lama yaitu sebesar $(\pi + \phi)$. Untuk lebih jelas mengenai pengaruh beban L pada rangkaian penyearah terkendali dapat dilihat pada gambar.



Gambar 5.4. Bentuk input dan output untuk beban RL

5.2.2. Rangkaian Penyearah Terkendali Gelombang Penuh

Rangkaian penyearah terkendali 1 fasa gelombang penuh mempunyai kelebihan dibanding penyearah terkendali setengah gelombang. Bentuk gelombang outputnya lebih halus karena proses penyearahan terjadi penuh. Konsekuensinya dibutuhkan komponen semikonduktor SCR yang lebih banyak. Rangkaian penyearah terkendali gelombang penuh dapat dibangun dengan rangkaian jembatan yang terdiri atas empat buah SCR yang dipasang dengan konfigurasi jembatan (*bridge*). Akan tetapi jika sumber listrik AC menggunakan trafo jenis center tap (CT) dapat digunakan hanya 2 SCR saja. Penggunaan konfigurasi jembatan atau trafo CT didasarkan pada pertimbangan ekonomis. Secara teknis tidak ada perbedaan signifikan diantara konfigurasi kedua rangkaian tersebut.



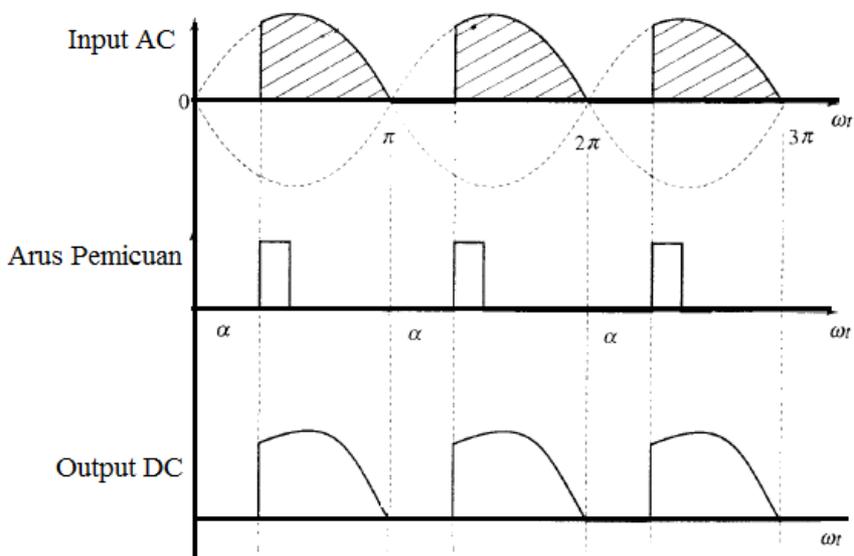
Gambar 5.5. Rangkaian penyearah terkendali 1 fasa gelombang penuh

Prinsip kerja rangkaian penyearah terkendali satu fasa gelombang penuh menggunakan penyearahan penuh baik pada setengah siklus pertama dimana input polaritas positif maupun setengah siklus berikutnya dimana polaritas input negatif. SCR pada rangkaian ini berfungsi sebagai saklar (*switching*), pengubah (*converting*) dan pengendali (*controlling*). SCR berfungsi sebagai saklar ON pada saat diberikan panjar maju dimana Anoda dihubungkan dengan sumber positif dan Katoda dihubungkan sumber negatif. SCR berfungsi sebagai Saklar OFF pada saat dipanjar mundur dimana Anoda dihubungkan dengan sumber negatif dan Katoda dihubungkan sumber positif.

SCR berfungsi sebagai pengubah pada saat diberikan input negatif dari sumber listrik AC. Pada kondisi ini, SCR akan OFF dan oleh karenanya akan mengubah listrik AC negatif menjadi keluaran sama dengan nol. Dengan pengubahan ini maka output listrik yang dihasilkan adalah DC terjadi perubahan dari input listrik AC.

SCR berfungsi sebagai pengendali pada saat dilakukan penyulutan pada terminal Gate. Sebagaimana dijelaskan pada Bab 2 tentang komponen semikonduktor daya, karakteristik SCR memerlukan arus penyulutan pada terminal Gate. Penyulutan SCR dapat dilakukan dengan memberikan pulsa penyulutan yang dapat diatur sudut penyulutannya, hal ini dapat dimanfaatkan untuk mengatur nilai tegangan keluaran rangkaian penyearah terkendali. Pengaturan pemicuan SCR biasa dikenal dengan pengaturan sudut picu SCR (pengaturan α).

Untuk beban RL pengaruhnya hampir sama pada rangkaian penyearah gelombang penuh dengan beban yang sama. Adanya beban induktif menyebabkan adanya perubahan bentuk tegangan dan arus pada saat seharusnya nol, tetapi karena adanya muatan yang tersimpan di induktor, sehingga akan muncul tegangan negati. Berikut ini bentuk gelombang rangkaian penyearah terkendali satu fasa beban RL.



Gambar 5.6. Bentuk gelombang input output RPT beban RL

Besarnya tegangan output yang dihasilkan oleh rangkaian penyearah daya satu fasa gelombang penuh dengan beban R dirumuskan sebagai berikut:

$$V_{\text{out}} = \frac{V_m}{\pi}(1 + \cos \alpha)$$

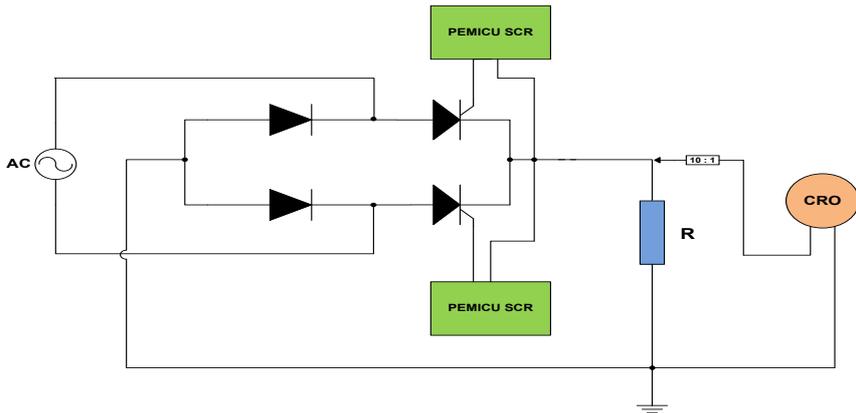
Sedangkan tegangan output efektif dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_{\text{out RMS}} = V_m \left[\frac{\pi - \alpha}{2\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{4\pi} \right]^{1/2}$$

5.2.3. Rangkaian Penyearah Semi Konverter Satu Fasa

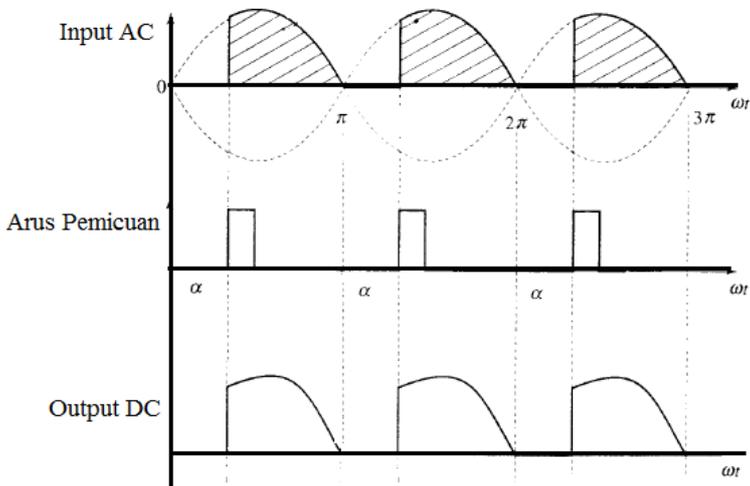
Rangkaian penyearah terkendali semikonverter merupakan rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah sumber listrik AC menjadi listrik DC dengan memadukan antara SCR dan Dioda. Rangkaian ini hanya dapat dibentuk dengan konfigurasi jembatan seperti terlihat pada gambar di bawah ini. Kombinasi SCR dan Dioda secara teknis dapat menghemat biaya dan dari segi kualitas tidak berbeda jauh. Ada dua cara pemasangan Dioda dan SCR agar dihasilkan bentuk tegangan output yang simetris atau tidak simetris. Karena pada prinsipnya yang dapat diatur hanya SCR, maka kombinasi ON OFF SCR dan Dioda harus pas agar outputnya simetris.

Berikut ini adalah rangkaian penyearah terkendali dengan output tegangan yang simetris. SCR berpasangan dengan Dioda pada saat ON dan OFF, jadi masing-masing polaritas dapat diatur melalui sudut penyulutan pada terminal Gate.



Gambar 5.7 Rangkaian penyearah semikonverter satu fasa

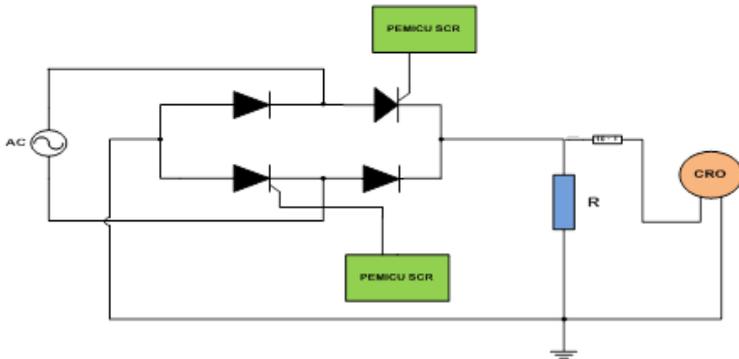
Bentuk gelombang input dan output pada rangkaian ini dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 5.8 Bentuk gelombang input dan output semikonverter

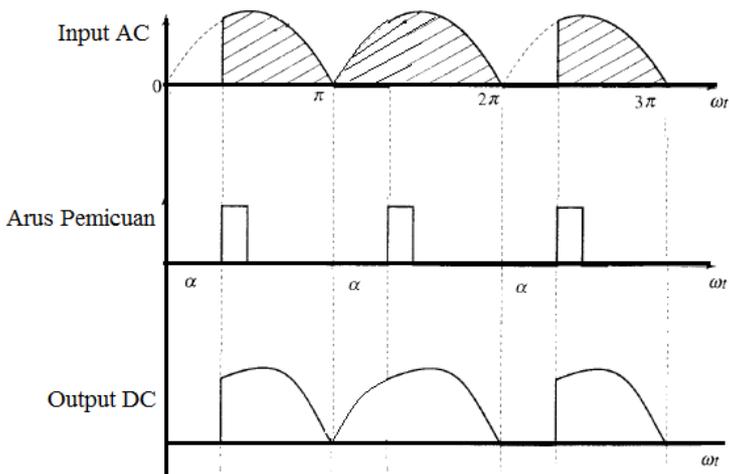
Jika rangkaian disusun SCR berpasangan dengan SCR dan Dioda berpasangan dengan Dioda, maka akan menghasilkan output

tegangan DC yang tidak simetris. Hal ini disebabkan karena hanya satu polaritas saja yang dapat diatur yaitu pada sisi SCR yang berpasangan dengan SCR. Sedangkan Dioda dengan Dioda tidak dapat diatur.



Gambar 5.9 Rangkaian penyearah semikonverter satu fasa

Bentuk gelombang input dan output untuk rangkaian penyearah terkendali dengan bentuk tidak simetris dapat dilihat pada gambar 5.9 di bawah ini.



Gambar 5.10. Rangkaian penyearah semikonverter satu fasa

Besarnya tegangan output yang dihasilkan oleh rangkaian penyearah daya satu fasa semikonverter sama dengan rangkaian penyearah terkendali gelombang penuh yang dirumuskan sebagai berikut:

$$V_{\text{out}} = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

Sedangkan tegangan output efektif dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_{\text{out RMS}} = V_m \left[\frac{\pi - \alpha}{2\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{4\pi} \right]^{1/2}$$

5.3 Rangkaian Penyearah Terkendali Tiga Fasa

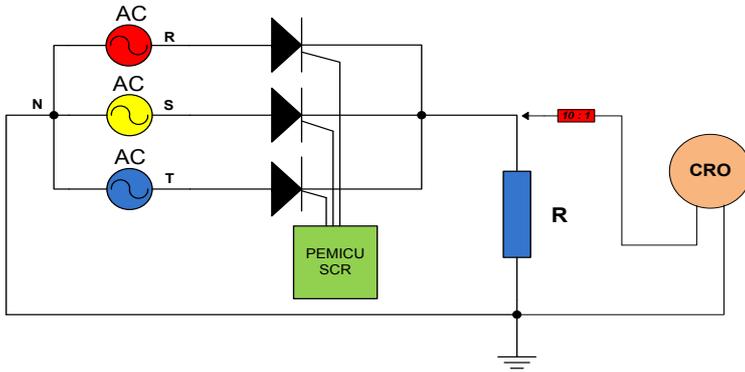
Rangkaian penyearah terkendali tiga fasa merupakan rangkaian penyearah daya yang sumber masukannya adalah listrik 3 fasa dan tegangan outputnya dapat diatur. Rangkaian penyearah terkendali tiga fasa terdiri atas:

1. Rangkaian Penyearah Terkendali Tiga Fasa Setengah Gelombang,
2. Rangkaian Penyearah Terkendali Tiga Fasa Gelombang penuh, dan
3. Rangkaian Penyearah Terkendali Tiga Fasa Semikonverter.

5.3.1. Rangkaian Penyearah Terkendali Tiga Fasa Setengah Gelombang

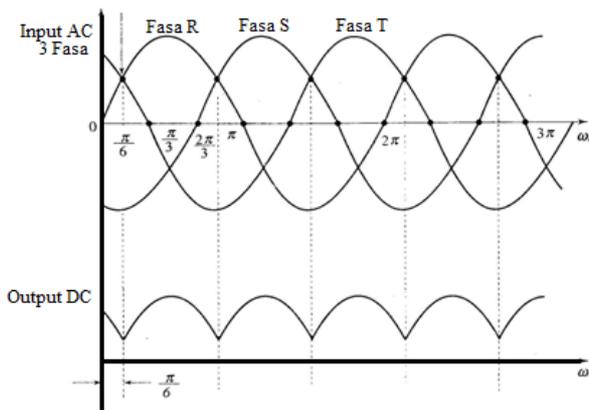
Rangkaian penyearah terkendali tiga fasa setengah gelombang terdiri atas 3 SCR yang disusun di masing-masing fasa R, S dan T. Pemasangan SCR masing-masing fasa harus sama untuk kaki anoda

dan katoda. Dengan penyulutan pada terminal Gate, maka output tegangan dapat diatur sesuai dengan arus penyulutannya.



Gambar 5.11. Rangkaian penyearah tiga fasa setengah gelombang

Prinsip kerja rangkaian penyearah terkendali tiga setengah gelombang hampir sama dengan penyearah terkendali satu fasa setengah gelombang, pada rangkaian ini, inputnya ada tiga fasa sehingga prosesnya terjadi di masing-masing fasa. Yang perlu diperhatikan adalah pada penyearah terkendali tiga fasa yaitu adanya lintasan fasa yaitu pertemuan antara fasa R, S dan T yang terjadi pada sudut 30° . Pada titik ini dinamakan penyulutan diskontinyu.



Gambar 5.12. Rangkaian penyearah tiga fasa setengah gelombang

Berkaitan dengan pemicuan terminal Gate, karena adanya lintasan fasa pada sudut $\pi/6$, maka ada dua operasi yaitu 1) operasi kontinyu dan operasi diskontinyu. Operasi kontinyu terjadi pada saat SCR dipicu pada sudut kurang dari 30° . Sedangkan operasi diskontinyu terjadi pada saat SCR dipicu pada sudut antara 30 sampai 150° . Besarnya tegangan output yang dihasilkan oleh rangkaian penyearah daya satu fasa semikonverter sama dengan rangkaian penyearah terkendali gelombang penuh yang dirumuskan sebagai berikut:

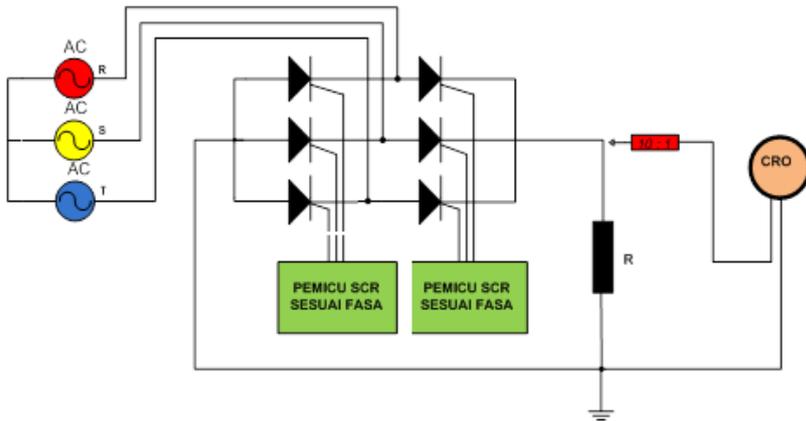
$$V_{\text{out}} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos \alpha$$

Sedangkan tegangan output efektif dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_{\text{out}} = V_m \left[\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi} \cos 2\alpha \right]^{1/2}$$

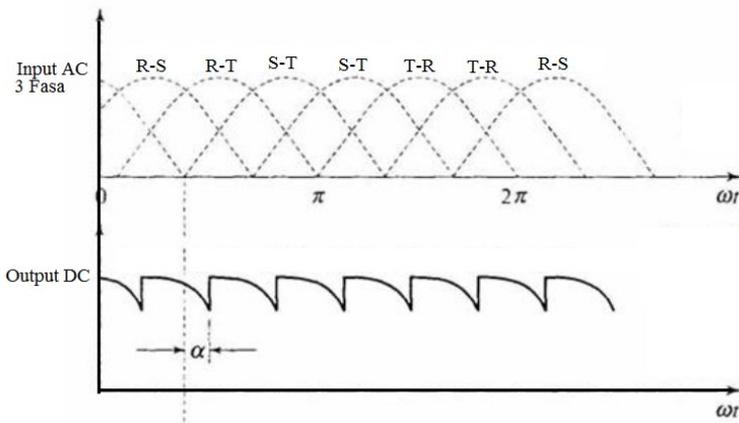
5.3.2. Rangkaian Penyearah Terkendali Tiga Fasa Gelombang Penuh

Rangkaian penyearah terkendali tiga fasa setengah gelombang terdiri dari 3 SCR yang disusun di masing-masing fasa R, S dan T. Pemasangan SCR masing-masing fasa harus sama untuk kaki anoda dan katoda. Dengan penyulutan pada terminal Gate, maka output tegangan dapat diatur sesuai dengan arus penyulutannya.



Gambar 5.13. Rangkaian penyearah tiga fasa gelombang penuh

Prinsip kerja rangkaian penyearah terkendali tiga setengah gelombang hampir sama dengan penyearah terkendali satu fasa setengah gelombang, pada rangkaian ini, inputnya ada tiga fasa sehingga prosesnya terjadi di masing-masing fasa. Yang perlu diperhatikan adalah pada penyearah terkendali tiga fasa yaitu adanya lintasan fasa yaitu pertemuan antara fasa R, S dan T yang terjadi pada sudut 30° . Pada titik ini dinamakan penyulutan diskontinyu.



Gambar 5.14. Output rangkaian penyearah tiga fasa setengah gelombang

Berkaitan dengan pemicuan terminal Gate, karena adanya lintasan fasa pada sudut $\pi/6$, maka ada dua operasi yaitu 1) operasi kontinyu dan operasi diskontinyu. Operasi kontinyu terjadi pada saat SCR dipicu pada sudut kurang dari 30° . Sedangkan operasi diskontinyu terjadi pada saat SCR dipicu pada sudut antara 30 sampai 150° . Besarnya tegangan output yang dihasilkan oleh rangkaian penyearah daya satu fasa semikonverter sama dengan rangkaian penyearah terkendali gelombang penuh yang dirumuskan sebagai berikut:

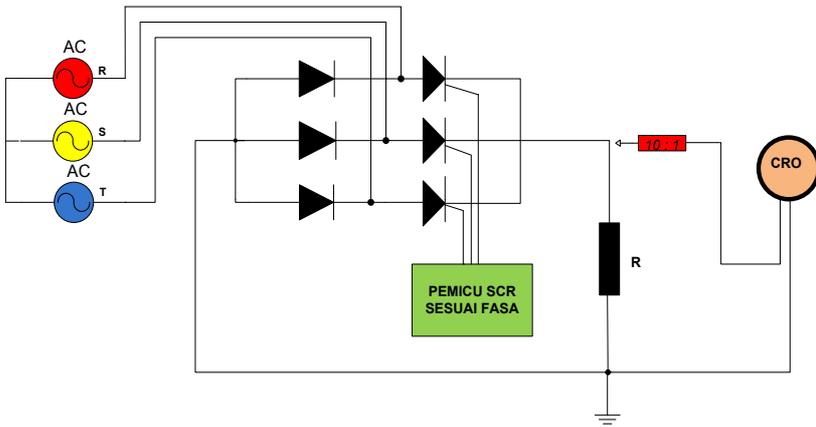
$$V_{\text{out}} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos \alpha$$

Sedangkan tegangan output efektif dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

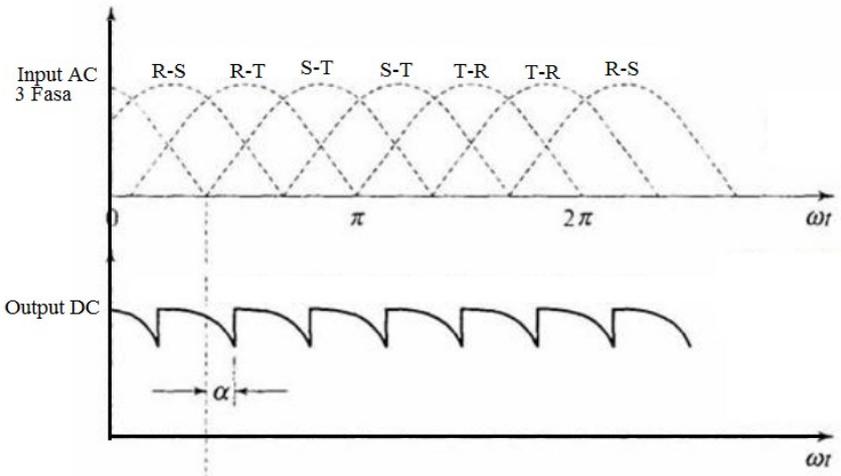
$$V_{\text{out}} = V_m \left[\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi} \cos 2\alpha \right]^{1/2}$$

5.3.3. Rangkaian Penyearah Terkendali Tiga Fasa Semikonverter

Rangkaian penyearah terkendali tiga fasa setengah gelombang terdiri atas 3 SCR yang disusun di masing-masing fasa R, S, dan T. Pemasangan SCR masing-masing fasa harus sama untuk kaki anoda dan katoda. Dengan penyulutan pada terminal Gate, maka output tegangan dapat diatur sesuai dengan arus penyulutannya.



Gambar 5.15. Rangkaian penyearah tiga fasa gelombang penuh



Gambar 5.16. Output rangkaian penyearah tiga fasa gelombang penuh

5.4 Aplikasi Rangkaian Penyearah Terkendali

Aplikasi rangkaian penyearah terkendali baik satu maupun tiga fasa dapat dilihat pada berbagai peralatan listrik, elektronika maupun peralatan kendali. Rangkaian penyearah terkendali dapat digunakan secara mandiri atau dapat juga digabung dengan rangkaian elektronika daya lainnya dalam sebuah aplikasi. Berikut ini adalah contoh penggunaan rangkaian penyearah terkendali dalam aplikasi baik di rumah maupun industri.

5.2.4. Catu Daya Variabel

Catu daya listrik DC merupakan satu peralatan listrik yang paling banyak digunakan. Kebanyakan peralatan listrik dan elektronik saat ini didesain dan dikembangkan dengan sumber arus DC, sedangkan sumber listrik yang tersedia kebanyakan AC. Oleh karena itu catu daya DC menjadi kebutuhan utama agar peralatan elektronika dapat bekerja dengan baik. Beberapa peralatan elektronika menggunakan sumber listrik DC dari baterai atau Aki, tetapi dengan pertimbangan efisiensi tetap disediakan catu daya DC.

Catu daya yang dibutuhkan untuk peralatan listrik dan elektronika mempunyai nilai yang berbeda antara satu peralatan dengan peralatan lain sesuai dengan besar kecilnya daya, oleh karena itu dibutuhkan catu daya variabel yang dapat diatur tegangannya untuk disesuaikan dengan beban peralatan yang digunakan. Untuk membuat rangkaian catu daya variabel, dapat digunakan rangkaian penyearah terkendali baik satu, maupun tiga fasa.



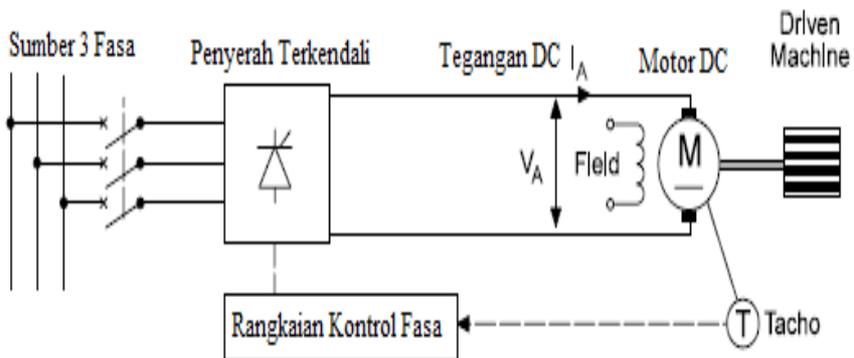
Gambar 5.17. Produk catu daya variabel

5.2.5. Kontrol Motor Listrik DC

Mesin listrik baik motor maupun generator banyak digunakan sebagai mesin-mesin penggerak di industri. Contoh penggunaan motor listrik adalah sebagai mesin cuci, mesin pompa, kipas (*fan*), blower, kompresor, mesin bubut, mesin bor, konveyor, mesin freis dan mesin-mesin industri lainnya. Untuk dapat beroperasi dengan baik diperlukan pengontrolan terhadap penyalaan dan pematian (OB/OFF), kecepatan putar, maupun torsi. Untuk itu dibutuhkan peralatan kontrol yang baik untuk mampu beroperasi pada tegangan dan arus yang besar. Penggunaan elektronika daya menjadi kebutuhan wajib untuk pengontrolan peralatan seperti ini.

Kontrol mesin listrik sering disebut dengan istilah Motor Drive yang banyak digunakan untuk kontrol baik mesin DC maupun mesin AC. Gambar 5.7. menunjukkan sebuah motor *drive* untuk mengendalikan motor AC. Sumber input dari motor AC adalah listrik AC baik satu maupun tiga fasa. Untuk dapat mengatur kecepatan atau

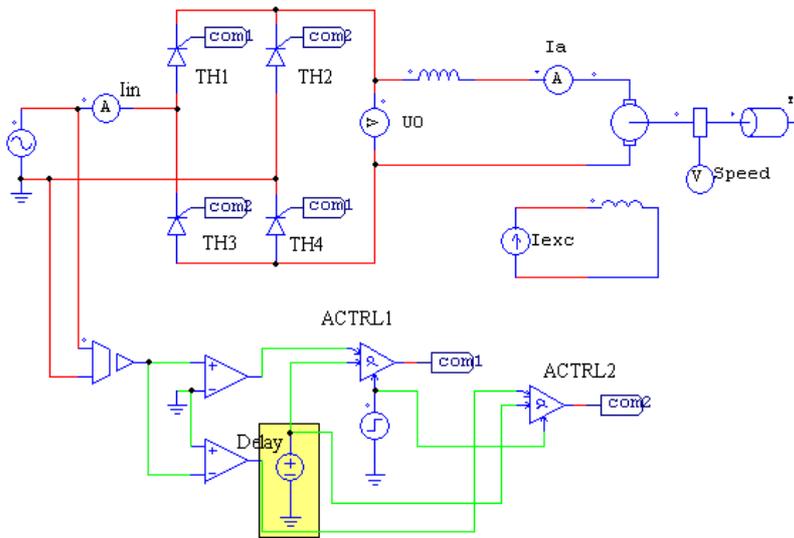
torsi mesin AC diperlukan pengaturan frekuensi, oleh karena itu sumber listrik AC diubah dulu menjadi listrik DC melalui rangkaian penyearah terkendali. Setelah didapatkan listrik DC selanjutnya dilakukan filter untuk mendapatkan bentuk tegangan DC yang lebih halus. Setelah dihasilkan tegangan DC yang lebih halus selanjutnya output tegangan dihubungkan dengan motor DC.



Gambar 5.18. Rangkaian kontrol motor DC dengan penyearah terkendali

Gambar 5.18. menunjukkan daigram kontrol motor DC dari sumber listrik AC tigas fasa yang kemudian disearahkan dengan rangkaian penyearah terkendali tiga fasa. Setelah output tegangan menjadi DC maka dihubungkan dengan motor DC untuk suplai. Output motor DC berupa putaran dan torsi diukur dengan alat ukur dan hasilnya dibandingkan dengan kecepatan putar dan torsi yang diinginkan untuk memberikan feed back atau umpan balik sistem kontrol yang berupa sudut penyulutan SCR. Jika kecepatan putar motor belum sesuai dengan set point, maka sudut penyulutan akan diatur naik atau turun agar menghasilkan kecepatan putar yang diinginkan.

Gambar rangkaian kendali motor DC yang lebih lengkap dapat dilihat pada gambar 5.19.



Gambar 5.19. Rangkaian penyearah terkendali untuk kontrol motor DC

Dalam aplikasi nyata baik di industri maupun di laboratorium, modul kontrol kecepatan motor DC biasanya dibentuk dalam kotak dengan chasing sebagaimana terlihat pada gambar 5.18. Modul kontrol kecepatan motor DC dilengkapi dengan sistem proteksi untuk mencegah terjadinya kondisi ketidaknormalan pada sistem. Modul dilengkapi dengan keterangan dan tombol-tombol untuk memudahkan pengoperasiannya.



Gambar 5.20. Modul kontrol kecepatan motor DC

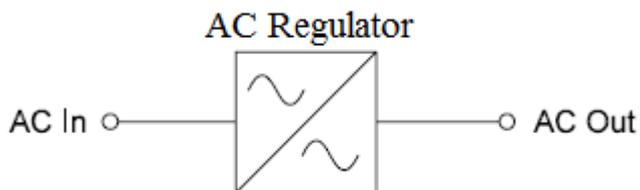
Gambar 5.20. di atas merupakan salah satu produk modul kontrol kecepatan motor DC produksi Edibon.

BAB 6

AC REGULATOR DAN APLIKASINYA

6.1 Pengantar

AC Regulator merupakan rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah sumber listrik AC menjadi listrik AC dengan tegangan dan frekuensi yang berbeda. Perubahan listrik AC menjadi AC dengan tegangan dan frekuensi yang berbeda digunakan untuk mengatur aplikasi peralatan listrik. Contoh aplikasi dari rangkaian ini yaitu Automatic Voltage Regulator (AVR) di generator, rangkaian peredup lampu (dimmer), stabiliser tegangan pada peralatan elektronik, dan Variabel Speed Drive (VSD) pada peralatan kontrol kecepatan motor di industri.



Gambar 6.1. Prinsip kerja rangkaian AC Regulator

Komponen yang digunakan pada rangkaian AC Regulator adalah SCR atau Triac. Prinsip kerja rangkaian AC regulator yaitu dengan mengatur bentuk gelombang tegangan melalui penyuluan SCR atau Triac sehingga didapatkan nilai tegangan yang diinginkan.

6.2 AC Regulator Satu Fasa

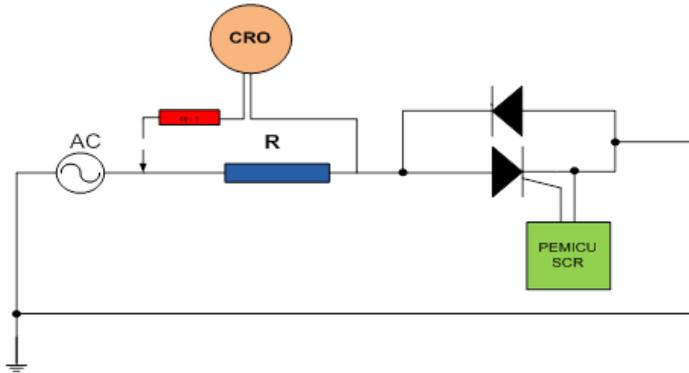
Rangkaian AC Regulator Satu Fasa banyak digunakan pada aplikasi di rumah maupun di industri seperti dijelaskan di atas. Salah satu aplikasi AC regulator adalah peredup lampu (dimmer) dan penyetabil tegangan yang dikenal dengan nama stabiliser. Prinsip kerja dari rangkaian ini adalah dengan mengubah nilai tegangan listrik AC melalui komponen SCR, Dioda atau Triac. Pengaturan tegangan output dilakukan dengan mengatur sudut penyulutan.

Pada aplikasi di lapangan terdapat dua jenis rangkaian AC reguator yaitu Unidirectional dan Bidirectional.

6.2.1. AC Regulator Satu Fasa Unidirectional

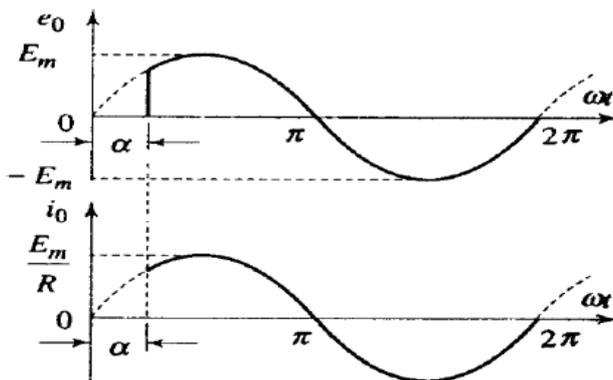
Rangkaian AC regulator satu fasa unidirectional terdiri atassatu komponen SCR dan satu dioda yang dipasang anti paralel. Hal ini dimaksudkan agar kedua komponen ini dapat bergantian ON pada saat diberi panjar maju maupun panjar mundur. Pada saat polaritas listrik input positif, maka yang aktif adalah SCR, demikian sebaliknya pada saat polaritas listrik sumber negatif, maka yang ON adalah Dioda sedangkan SCR OFF. Dengan demikian rangkaian ini dapat dialiri oleh dua arah baik panjar maju maupun panjar mundur. Disebut Unidirectional karena hanya satu saja yang dapat diatur yaitu komponen SCR. Dengan mengatur sudut penyulutannya, maka tegangan output dapat diatur besar kecilnya. Semakin kecil sudut penyulutan, maka tegangan output semakin besar, demikian sebaliknya semakin besar sudut penyulutan maka tegangan output

akan semakin kecil. Berikut ini adalah gambar rangkaian AC Regulator satu fasa unidirectional dengan beban Resistif.



Gambar 6.2. Rangkaian AC Regulator 1 Fasa Unidirectional

Bentuk gelombang tegangan output rangkaian ini dapat dilihat pada gambar 6.2. Tegangan output yang dapat dikontrol hanya pada setengah siklus saja dengan sudut penyulutan SCR, sedangkan pada setengah siklus kedua akan tetap sama dengan gelombang inputnya. Dengan melakukan pengaturan pada setengah siklus maka didapatkan tegangan output rerata dan RMS yang sesuai.



Gambar 6.3. Gelombang Rangkaian AC Regulator 1 Fasa Unidirectional

Besarnya tegangan output yang dihasilkan oleh rangkaian AC regulator 1 fasa unidirectional dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

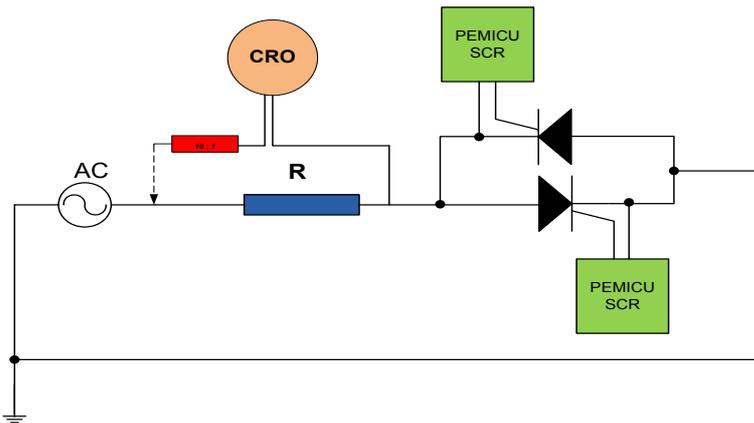
$$V_{ac} = \frac{E}{2\pi} m (\cos \alpha - 1)$$

Sedangkan tegangan efektif yang dihasilkan adalah sebagai berikut.

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

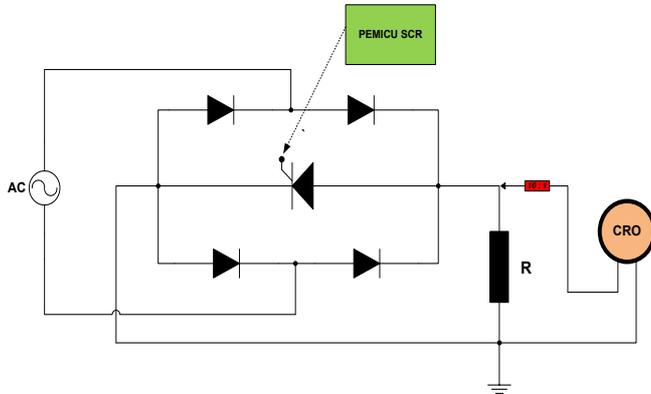
6.2.2. Rangkaian AC Regulator Satu Fasa Bidirectional

Rangkaian AC regulator satu fasa Bidirectional terdiri atas 2 komponen SCR yang dipasang anti paralel. Dengan pemasangan dua SCR memungkinkan kedua siklus AC baik pada polaritas positif maupun negatif dapat diatur. Dengan menghubungkan terminl Gate pada rangkaian pemicu SCR maka dapat diatur sudut penyulutan α . Berikut ini adalah gambar rangkaian AC Regulator Bidirectional.



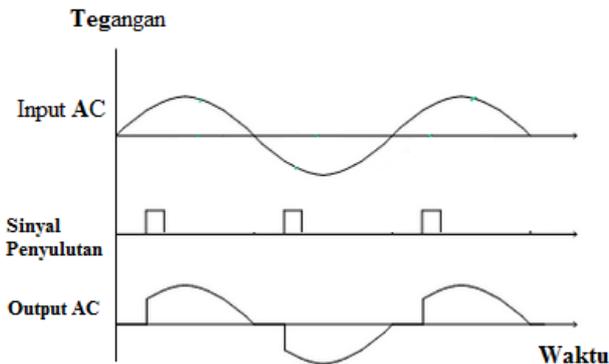
Gambar 6.4. Rangkaian AC Regulator 1 Fasa Bidirectional

Rangkaian AC Regulator satu fasa Bidireksional dapat juga dibuat dengan empat (4) buah Dioda dan satu (1) SCR yang dirangkai seperti pada gambar 6.6. di bawah ini. Dengan menggunakan konfigurasi seperti ini akan didapatkan tegangan output yang dapat diatur dengan sudut penyulutan pada terminal Gate SCR.



Gambar 6.5. Bentuk gelombang AC Regulator 1 Fasa Bidirectional

Bentuk gelombang tegangan output rangkaian ini dapat dilihat pada gambar 6.2. dibawah ini. Hanya tegangan output pada setengah siklus pertama saja yang dapat diatur dengan sudut penyulutan SCR, sedangkan pada setengah siklus kedua akan tetap sama dengan gelombang inputnya.



Gambar 6.6. Bentuk gelombang AC Regulator 1 Fasa Bidirectional

Besarnya tegangan output yang dihasilkan oleh rangkaian AC regulator satu fasa Bidirectional dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

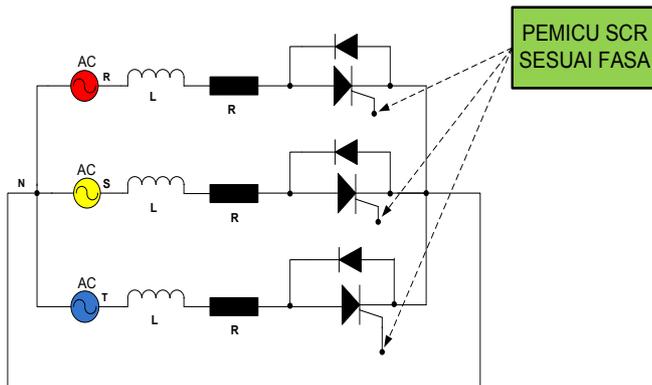
$$V_{out} = V_s \left[\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]^{1/2}$$

6.3 Rangkaian AC Regulator Tiga Fasa

AC regulator tiga fasa merupakan rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah listrik AC tiga fasa menjadi listrik AC dengan tegangan yang dapat diatur. Rangkaian AC regulator tersusun atas Dioda dan SCR yang dipasang anti paralel. Pengaturan tegangan output dilakukan dengan mengatur sudut penyulutan α pada terminal Gate pada SCR.

6.3.1. Rangkaian AC Regulator 3 Fasa Unidirectional

Rangkaian AC Regulator tiga fasa Unidirectional merupakan rangkian pengubah tegangan AC tiga fasa yang tersusun atas kombinasi SCR dan Dioda. Disebut dengan istilah Unidirectional karena hanya satu sisi yang dapat diatur oleh sudut pemicuan. Berikut ini adalah gambar rangkaian AC Regulator tiga fasa Unidirection.



Gambar 6.7. Rangkaian AC Regulator tiga fasa Unidirectional

Prinsip kerja rangkaian AC Regulator AC tiga fasa Unidirectional yaitu mirip dengan AC regulator satu fasa Unidirectional. Untuk rangkaian tiga fasa, masing-masing fasa terdiri atas Dioda dan SCR yang dipasang secara anti paralel. Pada saat input listrik AC pada polaritas positif maka yang aktif adalah salah satu dari Dioda atau SCR, demikian juga pada saat input listrik polaritas negatif, maka yang aktif hanya salah satu. Demikian juga pada fasa yang lain yaitu fasa R, S dan T.

Pengaturan tegangan output dilakukan dengan mengatur sudut penyulutan α pada terminal Gate SCR di masing-masing fasa. Dengan memberikan penyulutan maka tegangan output akan terpotong sesuai dengan penyulutannya. Semakin besar nilai α , maka tegangan output akan semakin kecil, demikian sebaliknya.

Besarnya tegangan output yang dihasilkan oleh rangkaian AC regulator tiga fasa Unidirectional dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut. Tegangan antara Fasa ke Netral dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_{RN} = V_{s,rms} \sqrt{2} \sin \omega t$$

$$V_{SN} = V_{s,rms} \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$V_{TN} = V_{s,rms} \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Sedangkan tegangan antar fasa dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_{R-S} = V_{s,rms} \sqrt{6} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$$

$$V_{S-T} = V_{s,rms} \sqrt{6} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

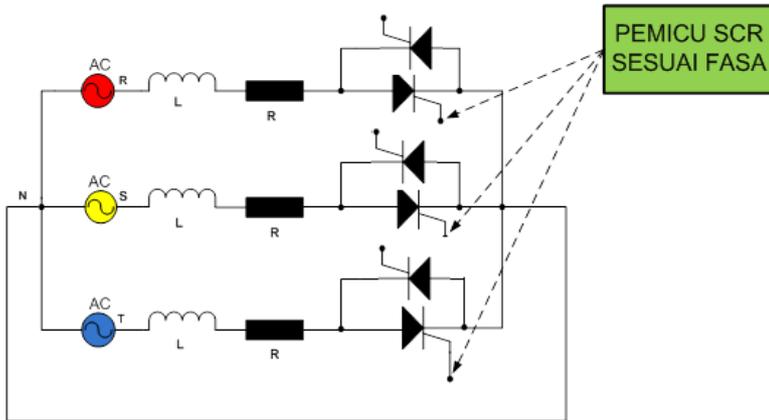
$$V_{T-R} = V_{s,rms} \sqrt{6} \sin\left(\omega t - \frac{7\pi}{6}\right)$$

6.3.2. Rangkaian AC Regulator 3 Fasa Bidirectional

Rangkaian AC Regulator tiga fasa Bidirectional merupakan rangkaian pengubah tegangan AC tiga fasa yang tersusun atas dua buah SCR yang dipasang secara anti paralel di masing-masing fasa. Dengan pemasangan dua SCR di masing-masing fasa maka akan didapat tegangan output yang dapat diatur pada tiap polaritas baik positif maupun negatif. Tegangan yang dihasilkan akan simetris antara positif dan negatif jika pasangan SCR disulut pada sudut fasa yang sama. Karena kedua sisi polaritas dapat diatur maka rangkaian ini disebut dengan Bidirectional.

Prinsip kerja kerja AC regulator tiga fasa bidirectional yaitu dengan memasang dua SCR secara anti paralel pada masing-masing fasa R, S dan T. Pada saat polaritas fasa R positif, maka salah satu SCR dipanjar maju. Dan pada saat arus penyulutan pada terminal Gate diberikan maka SCR akan ON sedangkan SCR yang lain OFF. Pada setengah siklus berikutnya pada saat diberikan input polaritas negatif maka SCR yang satunya akan dipanjar maju dan SCR yang tadi ON dipanjar mundur, sehingga SCR yang satu ON dan satunya OFF. Dengan pengaturan sudut penyulutan α , akan didapat tegangan output tiga fasa yang telah dikontrol.

Berikut ini adalah gambar rangkaian AC Regulator tiga fasa Biredctional.



Gambar 6.8. Rangkaian AC Regulator tiga fasa Bidirectional

Besarnya tegangan output yang dihasilkan oleh rangkaian AC regulator tiga fasa Bidirectional dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut. Tegangan antara Fasa ke Netral dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_{R-N} = V_{s,rms} \sqrt{2} \sin \omega t$$

$$V_{S-N} = V_{s,rms} \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$V_{T-N} = V_{s,rms} \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Sedangkan tegangan antar fasa dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_{R-S} = V_{s,rms} \sqrt{6} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$$

$$V_{S-T} = V_{s,rms} \sqrt{6} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$V_{T-R} = V_{s,rms} \sqrt{6} \sin\left(\omega t - \frac{7\pi}{6}\right)$$

6.4 Aplikasi AC Regulator

Rangkaian AC Regulator merupakan rangkaian pengubah listrik AC menjadi listrik AC baik satu maupun tiga fasa. Oleh karena itu, banyak digunakan pada peralatan yang membutuhkan catu daya AC. di rumah, banyak dijumpai peralatan yang membutuhkan tegangan AC konstan agar peralatan dapat bekerja dengan baik. Oleh karena itu, dibutuhkan peralatan stabilizer atau penyetabil tegangan. Demikian juga dengan rangkaian kontrol redup terang lampu AC yang disebut dengan dimmer. Aplikasi ini banyak ditemui baik di rumah, kantor atau hotel untuk keperluan pencahayaan. Aplikasi lainnya yaitu untuk pengaturan tegangan di generator yaitu untuk menjaga nilai tegangan pada suatu nilai tertentu, untuk itu digunakan peralatan Automatic Voltage Regulator (AVR).

Berikut ini adalah contoh aplikasi rangkaian AC Regulator yang banyak digunakan dalam kebutuhan nyata.

6.4.1. Stabilizer

Stabiliser atau penyetabil tegangan adalah rangkaian yang digunakan untuk menjaga tegangan listrik AC pada nilai tertentu. Tegangan di rumah yang baik harus dijaga tetap pada nilai 220 Volt agar peralatan listrik dapat bekerja secara optimal. Dalam kenyataannya sering kali tegangan listrik berfluktuasi naik dan turun

sehingga berpotensi mengganggu kinerja peralatan listrik dan menyebabkan kerusakan. Dengan stabiliser maka tegangan listrik yang berubah-ubah dapat dijaga tetap pada nilai tertentu. Berikut ini adalah contoh produk stabiliser yang ada di pasaran dan banyak digunakan dalam aplikasi di rumah, kantor maupun industri.



Gambar 6.9. Penyetabil Tegangan atau Stabiliser

Stabiliser yang beredar di pasaran biasanya terdapat 2 sistem tegangan yaitu 220 volt dan 110 volt. Untuk itu diperlukan kehati-hatian dalam menggunakan peralatan ini agar tidak merusakkan peralatan listrik yang akan distabilkan. Sistem kelistrikan di Indonesia menggunakan standar tegangan 220 Volt untuk satu fasa dan 380 Volt untuk tegangan antar fasa pada listrik tiga fasa. Hal ini berbeda dengan negara-negara lain semisal China, Taiwan, Korea dan Jepang yang menggunakan standar tegangan listrik AC 110 Volt. Untuk mengatasi perbedaan sistem tegangan listrik ini, biasanya produsen menyediakan 2 sistem yaitu 110 Volt dan 220 Volt. Oleh

karena itu, pengguna peralatan perlu jeli memilih nilai tegangan sesuai dengan standar yang digunakan di suatu negara.

6.4.2. Peredup Lampu (Dimmer)

Aplikasi lain dari rangkaian AC Regulator adalah peredup lampu atau sering dikenal dengan istilah dimmer. Rangkaian ini digunakan baik di rumah, kantor atau hotel untuk mengatur terang dan redup nyala lampu AC. prinsip kerja alat ini yaitu dengan mengatur tingkat keterangan nyala lampu melalui saklar putar atau tombol keypad.

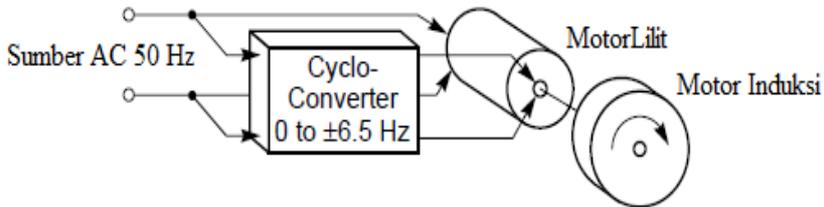


Gambar 6.10. Alat pengatur tingkat keterangan lampu AC (Dimmer)

6.4.3. Kontrol Motor

Peralatan listrik baik di rumah maupun industri kebanyakan digerakkan oleh motor listrik baik motor AC maupun DC. Pada motor AC, untuk melakukan pengaturan kecepatan putar, putar kanan atau

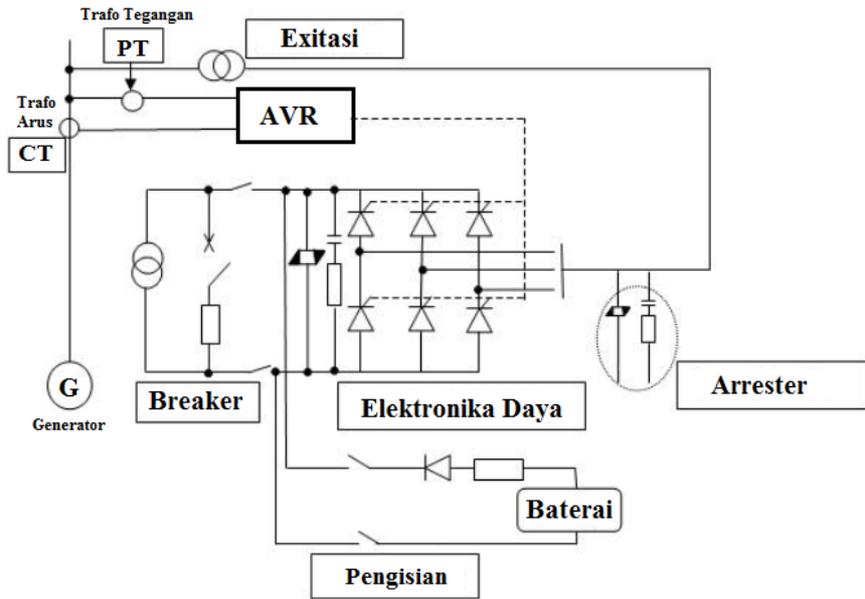
kiri dan pengaturan torsi diperlukan rangkaian pengubah frekuensi. Untuk itu dapat menggunakan VSD atau siklokonverter. Berikut ini adalah contoh penggunaan rangkaian AC Regulator siklokonverter untuk mengatur kecepatan motor AC.



Gambar 6.11. Rangkaian Siklokonverter untuk kontrol motor AC

6.4.4. Automatic Voltage Regulator

Automatic Voltage Regulator (AVR) merupakan peralatan kontrol di pembangkit listrik yang berguna sebagai penyetabil tegangan di generator. Kondisi beban yang berubah-ubah akan menyebabkan tegangan di Generator mengalami fluktuasi. Hal ini tidak baik bagi generator, apalagi jika dihubungkan dalam jaringan interkoneksi. Salah satu syarat generator dapat diparalel atau dihubungkan dengan jaringan yaitu adanya tegangan yang sama, frekuensi yang sama serta urutan fasa yang sama. Oleh karena itu, generator perlu dilengkapi dengan peralatan AVR agar tegangannya selalu sama setiap saat walaupun terjadi perubahan pembebanan.



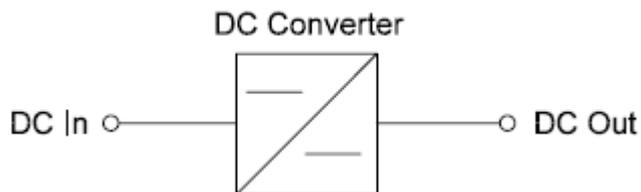
Gambar 6.12. Rangkaian AVR di pembangkit listrik

BAB 7

RANGKAIAN DC CHOPPER DAN APLIKASINYA

7.1 Pengantar

DC Chopper merupakan rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah sumber listrik DC menjadi listrik DC dengan tegangan yang dapat diatur. Pengubahan dan pengaturan tegangan listrik DC menjadi listrik DC sebenarnya dapat dilakukan dengan menggunakan rangkaian pembagi tegangan secara konvensional. Pengaturan atau pengubahan listrik DC menjadi DC dengan cara konvensional mempunyai kelemahan yaitu masalah efisiensi dan panas yang dihasilkan.



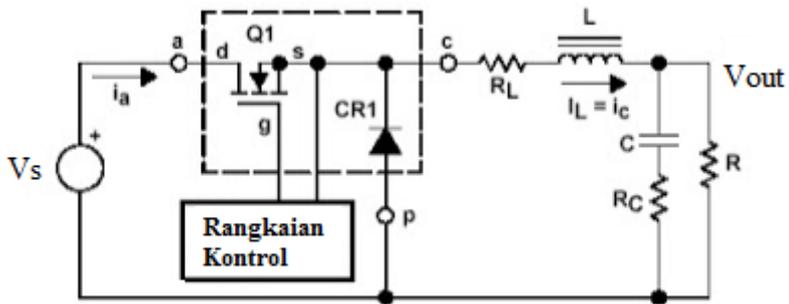
Gambar 7.1. Rangkaian DC Chopper Step-Down

Perkembangan ilmu dan teknologi elektronika membawa perubahan pengubahan listrik DC menjadi DC dengan konsep *switching* atau yang disebut dengan istilah DC Chopper. Pada rangkaian DC Chopper, penurunan atau penaikan tegangan dilakukan dengan komponen semikonduktor daya yaitu Transistor BJT atau FET. Komponen semikonduktor pada rangkaian DC Chopper berfungsi sebagai saklar elektronis yang dalam pengaturannya menggunakan rangkaian pemacu berupa gelombang pulsa baik arus maupun tegangan tergantung pada komponen semikonduktornya.

Istiah lain yang digunakan dalam pengubahan listrik DC menjadi DC yaitu Converter. Rangkaian penurun tegan biasa dikenal dengan nama Chopper Step-down atau Buck Converter, sedangkan rangkaian penaik tegangan biasa dikenal dengan Chopper Step-up atau Boost Converter. Untuk rangkaian yang dapat menurunkan dan menaikkan sering disebut dengan Chopper Step-Down/Up atau Buck/Boost Converter.

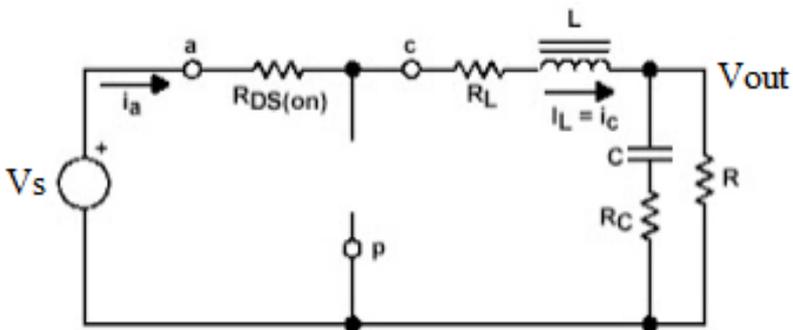
7.2 Rangkaian Chopper Step-Down

Chopper Step-Down atau Buck Converter adalah rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah listrik DC menjadi listrik DC dengan tegangan yang lebih rendah dari tegangan sumber. Rangkaian ini tersusun dari komponen semikonduktor (Transistor BJT, FET, IGBT atau SCR) dan rangkaian penyulutnya. Berikut ini adalah gambar rangkaian chopper step down.



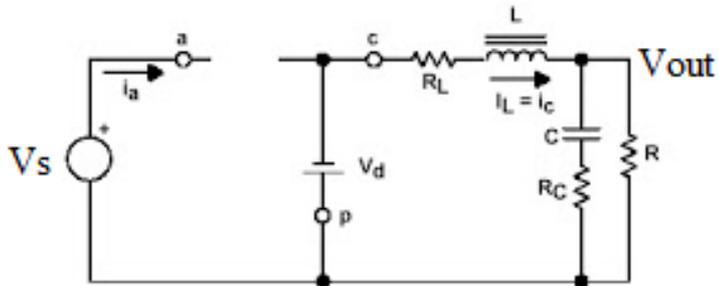
Gambar 7.2. Rangkaian DC Chopper Step-Down

Chopper step down bekerja berdasar pengaturan waktu nyala (T_{ON}) dan waktu mati (T_{OFF}) dari saklar elektronis. Dengan mengatur T_{ON} dan T_{OFF} atau yang dikenal dengan pengaturan siklus kerja (*duty cycle*) maka akan didapatkan tegangan output yang lebih rendah dari tegangan sumber (V_s). Pada saat saklar ON, maka tegangan output akan sama dengan tegangan sumber. Gambar 7.3. menunjukkan arah aliran arus pada saat saklar pada posisi ON.



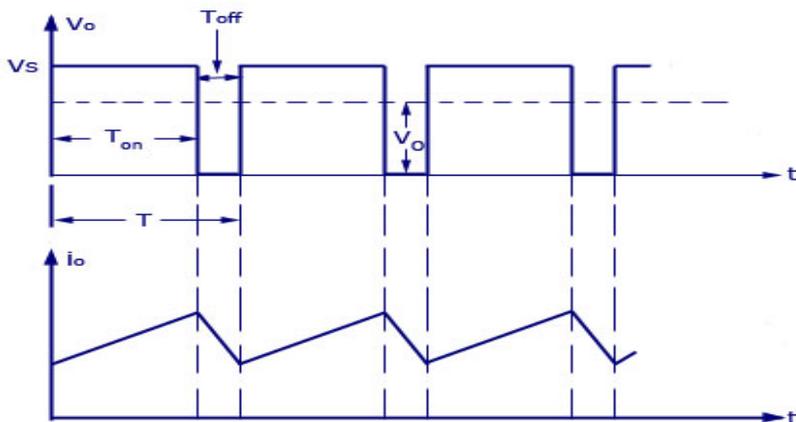
Gambar 7.3. Posisi saklar ON Rangkaian DC Chopper Step-Down

Pada saat saklar OFF maka tegangan output akan sama dengan nol dengan arah arus dapat digambarkan sebagai berikut



Gambar 7.4. Posisi saklar OFF Rangkaian DC Chopper Step-Down

Dari kedua kondisi yaitu saklar ON dan OFF dapat digambarkan gelombang output dan arus yang dihasilkan dari rangkaian seperti terlihat pada gambar 7.5.



Gambar 7.5. Bentuk gelombang output Rangkaian DC Chopper Step-Down

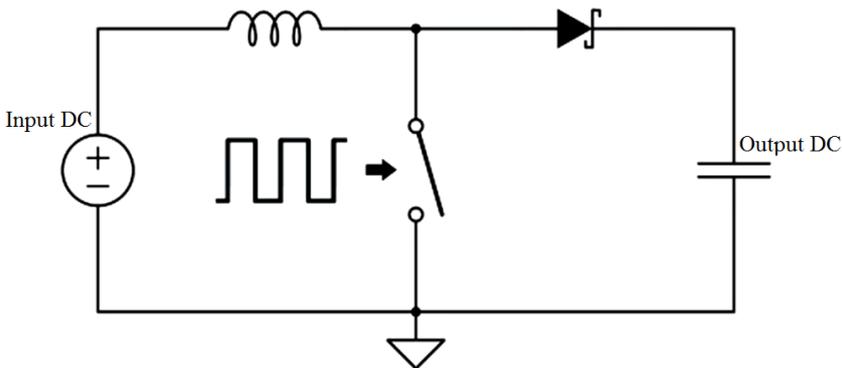
Besarnya tegangan output rangkaian DC Chopper Step Down di atas tergantung pada nilai T_{ON} dan T_{OFF} yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$V_{output} = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} \cdot V_S$$

Pengaturan waktu nyala (T_{ON}) dan waktu mati (T_{OFF}) pada proses switching ini sering disebut dengan istilah pengaturan lebar pulsa dan metode ini dinamakan dengan Pulse Width Modulation (PWM). Metode ini banyak digunakan pada proses kontrol motor dan perubahan gelombang kotak menjadi gelombang sinus.

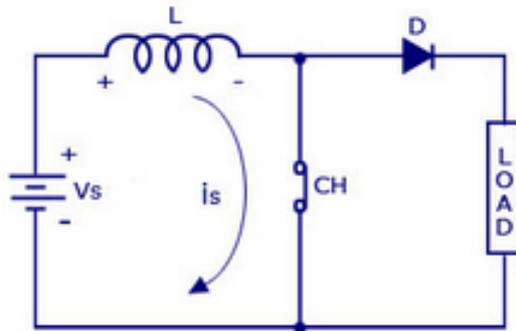
7.3 Rangkaian Chopper Step-Up

Chopper Step-Up adalah rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah listrik DC menjadi listrik DC dengan tegangan yang lebih besar dari tegangan sumber. Untuk menaikkan tegangan sumber pada rangkaian chopper step up diberikan induktor yang akan menyimpan muatan pada saat diberikan tegangan input. Berikut ini adalah gambar rangkaian DC Chopper step up.



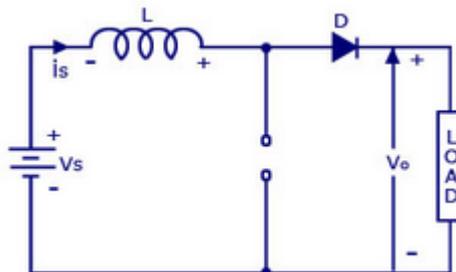
Gambar 7.6. Rangkaian DC Chopper Step-up

Prinsip kerja dari rangkaian Chopper Step up yaitu dengan mengatur saklar elektronik. Pada saat saklar pada posisi ON, maka arus listrik dari sumber akan mengisi induktor dan mengikuti loop sebagaimana terlihat pada gambar 7.3.



Gambar 7.7. Rangkaian DC Chopper Step-up

Pada saat saklar OFF maka arus dari sumber akan melewati induktor dan menuju beban melewati dioda. Berdasarkan hukum Kirchoff tegangan maka besarnya tegangan output merupakan penjumlahan dari tegangan sumber dan tegangan induktor sehingga akan menjadi lebih besar dari tegangan sumbernya.



Gambar 7.8. Rangkaian DC Chopper Step-up

Nilai tegangan output dari rangkaian Chopper Step up dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$V_{Output} = V_S + V_L$$

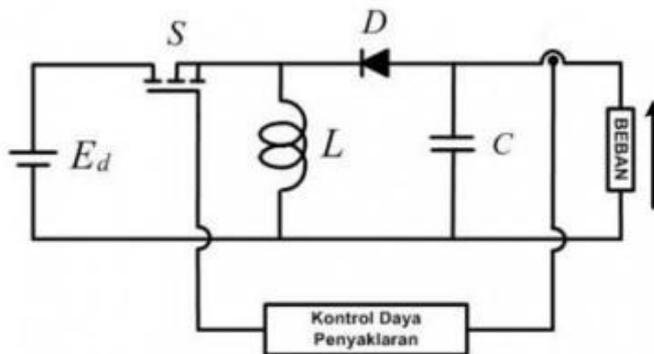
$$V_{output} = \frac{1}{1 - \alpha} \cdot V_S$$

dengan

$$\alpha = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}}$$

7.4 Rangkaian Chopper Step-Down/Up

Rangkaian Chopper Step-up/down atau penaik/penurun tegangan DC ke DC atau juga disebut dengan istilah Buck/Boost Converter merupakan rangkaian pengubah listrik DC menjadi listrik DC dengan tegangan output yang dapat dinaikkan atau diturunkan. Rangkaian ini menggabungkan antara Chpper step-down dan chopper step up. Komponen yang digunakan pada rangkaian ini sama dengan chopper step down atau step up yaitu menggunakan transistor BJT, FET, IGBT ataupun SCR. Rangkaian chopper step-down/up dapat dilihat pada gambar 7.9.



Gambar 7.9. Rangkaian DC Chopper Step-up

Prinsip kerja rangkaian ini adalah rangkaian kontrol daya penyaklaran akan memberikan sinyal kepada Transistor atau FET. Jika Transistor atau FET OFF maka arus akan mengalir ke induktor, energi yang tersimpan di induktor akan naik. Saat saklar transistor atau FET ON energi di induktor akan turun dan arus mengalir menuju beban. Dengan cara seperti ini, nilai rata-rata tegangan keluaran akan sesuai dengan rasio antara waktu pembukaan dan waktu penutupan saklar. Hal inilah yang membuat topologi ini bisa menghasilkan nilai rata-rata tegangan keluaran/beban bisa lebih tinggi maupun lebih rendah daripada tegangan sumbernya.

Besarnya tegangan output yang dihasilkan dari rangkaian ini dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_{out} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} V_s$$

V_{out} : tegangan keluaran DC

V_s : tegangan sumber

α : siklus kerja

$$\alpha = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}}$$

7.5 Kelas-Kelas Chopper

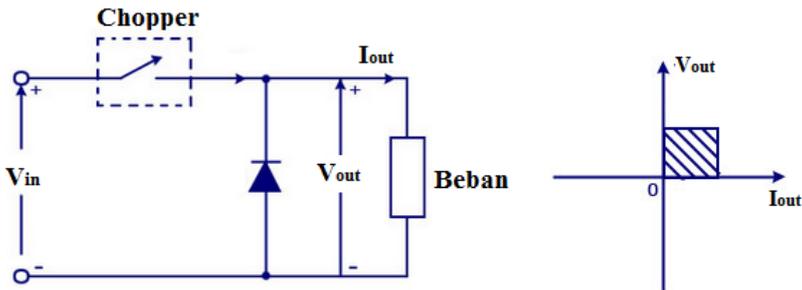
Berdasarkan arus dan tegangan yang dihasilkan, rangkaian Chopper dapat diklasifikasikan menjadi lima yaitu:

7.5.1. Chopper kelas A

Chopper kelas A dikenal dengan nama Chopper Kuadran I, karena daerah arus dan tegangan yang dihasilkan terletak pada kuadran I. Artinya arus dan tegangan yang dihasilkan oleh

rangkaian Chopper kelas A ini adalah positif. Chopper kelas A berfungsi sebagai penurun tegangan (*step down*) atau *buck converter*.

Prinsip kerja Chopper kelas A dapat dilihat pada gambar 7.10. Pada saat saklar Chopper ON maka $V_{out} = V_{in}$ karena arus akan mengalir langsung dari sumber ke beban. Tetapi jika Chopper OFF, maka tegangan V_{out} akan sama dengan 0, tetapi arus I_{out} tetap mengalir dengan arah yang sama melalui dioda *Freewheeling*. Sehingga nilai rerata tegangan dan arus keluarannya akan selalu positif sebagaimana ditunjukkan pada gambar 7.10.



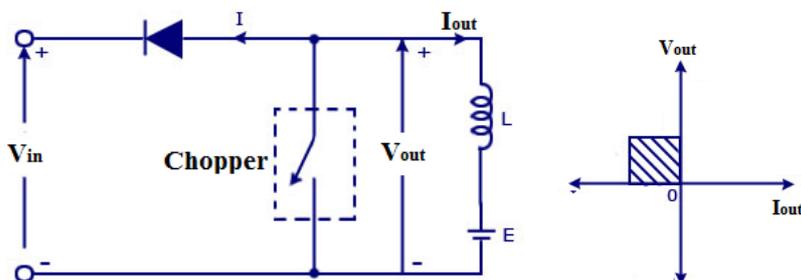
Gambar 7.10. Chopper Kelas A dan karakteristik arus tegangan

Chopper Kelas A akan selalu mengalirkan daya dari sumber ke beban, sehingga tegangan output akan selalu lebih rendah dari tegangan input. Dengan demikian Chopper kelas A bertindak sebagai penurun tegangan DC. Chopper kelas A banyak digunakan untuk melakukan kontrol kecepatan motor DC.

7.5.2. Chopper kelas B

Chopper Kelas B atau sering disebut dengan Chopper Kuadran II mempunyai karakteristik yang berbeda dengan Chopper Kelas A.

Pada Chopper Kelas B selalu terdapat sumber DC pada sisi beban. Prinsip kerja dari Chopper kelas B dapat dilihat pada gambar 7.11.



Gambar 7.11. Chopper Kelas B dan karakteristik arus tegangan

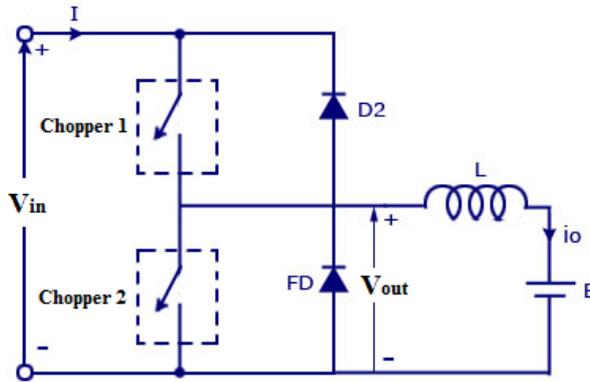
Pada saat Chopper ON, tegangan output V_{out} akan sama dengan 0, tetapi tegangan sumber di beban V_{in} akan mengalirkan arus melalui Induktor dan Chopper. Induktor akan menyimpan energi selama waktu T_{on} dari Chopper. Pada saat Chopper OFF, maka tegangan output merupakan penjumlahan dari tegangan sumber dan tegangan pada induktor atau dapat dirumuskan

$$V_{out} = E + L \cdot di/dt$$

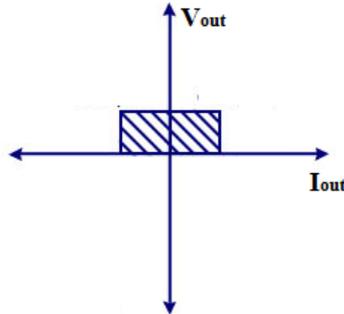
7.5.3. Chopper kelas C

Chopper kelas C merupakan kombinasi dari dua chopper kelas A dan chopper kelas B. Prinsip kerja Chopper kelas C dapat dilihat pada gambar 7.12. Saklar pada Chopper 1 dan Dioda D_2 bekerja seperti chopper kelas A, sedangkan saklar Chopper 2 dan Dioda D_1 bekerja seperti chopper kelas B. pengoperasian Chopper kelas C harus diperhatikan agar kedua saklar tersebut tidak bekerja secara bersama-sama. Jika kedua saklar bekerja secara bersama akan mengakibatkan sumber V_{in} akan mengalami hubung

singkat. Chopper kelas C ini dapat bekerja sebagai penyearah atau pembalik (inverter).



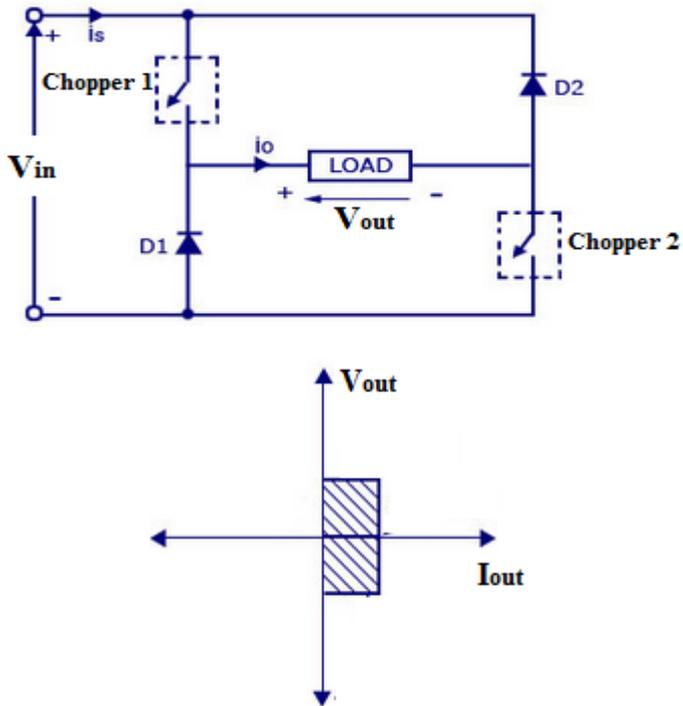
Gambar 7.12. Rangkaian Chopper Kelas C



Gambar 7.13. Karakteristik arus tegangan Chopper kelas C

7.5.4. Chopper kelas D

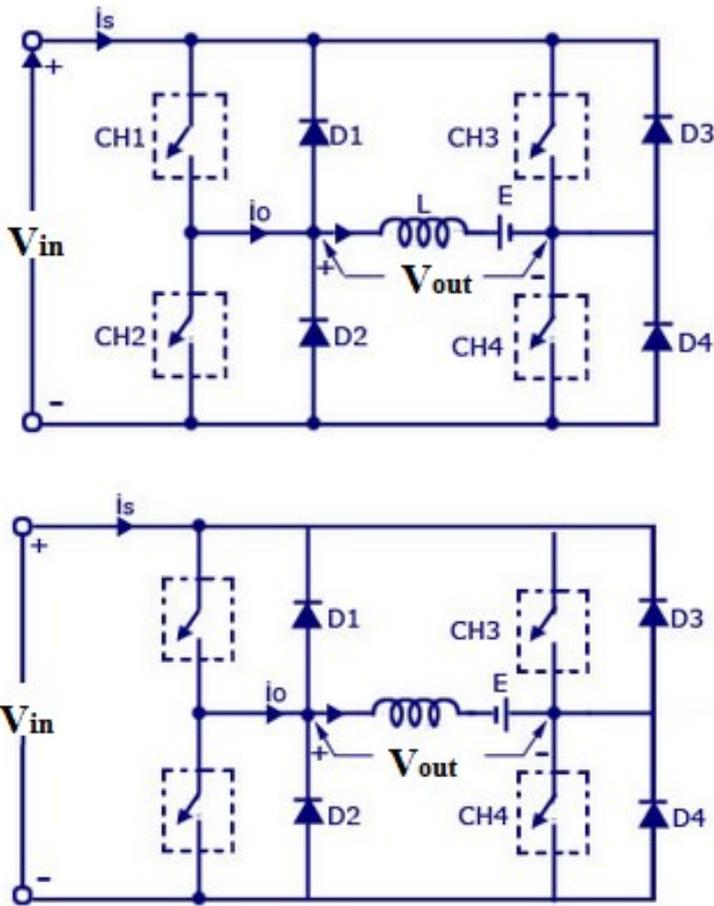
Rangkaian DC chopper kelas D ditunjukkan pada gambar 7.14. Chopper kelas D merupakan gabungan dari chopper kelas A dan chopper kelas B dimana, daerah kerja dari chopper ini yaitu pada kuadran I dan IV yaitu arus selalu positif dengan tegangan yang dapat berubah baik positif maupun negatif.



Gambar 7.14. Karakteristik arus tegangan Chopper kelas C

7.5.5. Chopper kelas E

Chopper kelas E sering disebut juga dengan Chopper empat kuadran dimana daerah kerja atau arus dan tegangan outputnya dapat berada pada empat daerah yaitu bisa positif maupun negatif. Chopper kelas E terdiri atas empat buah saklar semikonduktor dan empat buah Diod yang disusun anti paralel. Chopper 1 (CH1) dan Diod D1 beroperasi pada kuadran I.



Gambar 7.14. Rangkaian Chopper kelas E

7.6 Aplikasi Rangkaian Chopper

Rangkaian Chopper baik sebagai penurun atau penaik tegangan DC banyak dijumpai pada berbagai peralatan elektronik yang membutuhkan catu daya DC. Banyak peralatan listrik dan elektronika membutuhkan catu daya DC, sementara sumber yang ada adalah listrik AC oleh karena itu dibutuhkan rangkaian penyearah baik yang

biasa maupun yang terkendali. Peralatan elektronika yang ada memerlukan tegangan DC yang berbeda-beda sesuai dengan dayanya. Tegangan yang umum digunakan pada peralatan elektronika adalah 3, 3 V, 5 V, 6 V, 9 V, 12 V, 18V, 24V, 48 Volt dan sebagainya. Output dari rangkaian penyearah terkadang masih belum sesuai dengan kebutuhan peralatan sehingga dibutuhkan rangkaian tambahan yaitu rangkaian penurun atau penaik tegangan DC.

Rangkaian penurun atau penaik tegangan DC selama ini dapat dilakukan dengan metode konvensional dengan regulator atau dengan metode switching. Metode konvensional mempunyai kelemahan yaitu efisiensi yang rendah karena kelebihan tegangan dibuang menjadi panas. Dengan adanya panas, diperlukan tambahan pendingin agar komponen tidak cepat rusak.

Sebagai contoh, dalam proses pengukuran tegangan DC, mikrokontroler hanya mempunyai range pembacaan ADC 0-5 Volt, sementara sensor memiliki range input 0 - 100 V. Untuk menurunkan range 0 - 100V agar sesuai dengan pembacaan mikrokontroler, diperlukan rangkaian penurun tegangan untuk menyesuaikannya.

Aplikasi rangkaian DC Chopper sangat banyak dalam peralatan elektronik maupun peralatan listrik. Beberapa contoh aplikasi yaitu pada catu daya DC di komputer, Laptop, Handphone, DVD Player, TV LED, Perangkat audio, obat nyamuk elektrik, alat kejut setrum listrik, alat pijat elektronik, perangkat telekomunikasi dan lain sebagainya. Biasanya Chopper tidak berdiri sendiri melainkan terintegrasi dalam rangkaian catu daya bersama dengan penyearah, penyearah terkendali atau inverter.

Berikut ini adalah contoh produk DC chopper yang ada di pasaran dan banyak digunakan pada aplikasi di industri.



Gambar 7.10. Produk DC Chopper

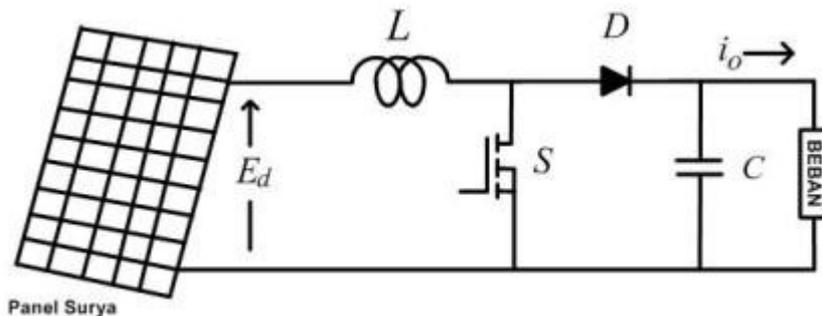
Untuk mengurangi efek panas yang ditimbulkan pada arus yang mengalir, rangkaian DC Chopper perlu dilengkapi dengan pendingin yang dipasang didekat komponen semikonduktor daya. Pendingin biasanya terbuat dari bahan alumunium yang mempunyai bentuk sirip untuk melepas panas. Contoh peralatan DC Chopper yang dilengkapi dengan pendingin dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 7.10. Produk DC Chopper

7.6.1. Rangkaian Peningkat Tegangan Pada Solar Sel

Solar sel merupakan pembangkit listrik yang menggunakan sumber energi matahari. Biasanya tegangan yang dihasilkan dari solar sel relatif kecil sehingga untuk menyuplai beban-beban yang besar tidak mampu. Oleh karena itu, diperlukan rangkaian peningkat tegangan DC. Karena tegangan output solar sel adalah listrik DC, yang digunakan adalah DC Chopper step up atau Boost Converter. Berikut ini adalah gambar rangkaian peningkat tegangan yang terhubung dengan solar sel.



Gambar 7.10. Rangkaian DC Chopper Step-up solar sell

BAB 8

RANGKAIAN INVERTER DAN APLIKASINYA

8.1 Pengantar

Inverter adalah rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah listrik DC menjadi listrik AC baik satu maupun tiga fasa dengan tegangan dan frekuensi yang dapat diatur. Peralatan ini banyak dipakai baik di rumah tangga maupun industri untuk konversi energi listrik dari DC ke AC. peralatan inverter sangat berguna bagi peralatan-peralatan yang membutuhkan catu daya listrik AC tetapi sumber daya yang ada listrik DC.

Perkembangan teknologi elektronika yang semakin pesat menjadikan inverter menjadi sebuah kebutuhan di era modern seperti sekarang. Kebutuhan manusia yang besar terhadap energi listrik, menjadikan peralatan konversi energi listrik merupakan kebutuhan yang tidak bisa ditinggalkan. Inverter digunakan untuk menggerakkan peralatan listrik yang membutuhkan catu daya AC, sedangkan sumber yang tersedia adalah listrik DC.

Pada saat berada dalam kondisi dimana tidak ada sumber listrik AC seperti di daerah pedesaan, daerah terpencil, saat mendaki

gunung, di dalam kendaraan atau saat listrik utama padam maka kebutuhan listrik harus disuplai dari listrik DC. Sumber listrik DC bisa didapat dari baterai, aki atau dari pembangkit listrik tenaga matahari, tenaga angin atau lainnya. Untuk mengoperasikan peralatan listrik AC seperti pemanas, kompor listrik, pendingin udara, kulkas, lampu penerangan dan lainnya dibutuhkan rangkaian pengubah listrik DC menjadi AC dalam sebuah alat yang disebut dengan inverter. UPS (*Uninterruptible Power Supply*) merupakan salah satu contoh peralatan yang di dalamnya terdapat rangkaian inverter. UPS sering digunakan untuk *backup* catu daya listrik pada komputer atau peralatan-peralatan kritikal di rumah, hotel, rumah sakit, dan industri.

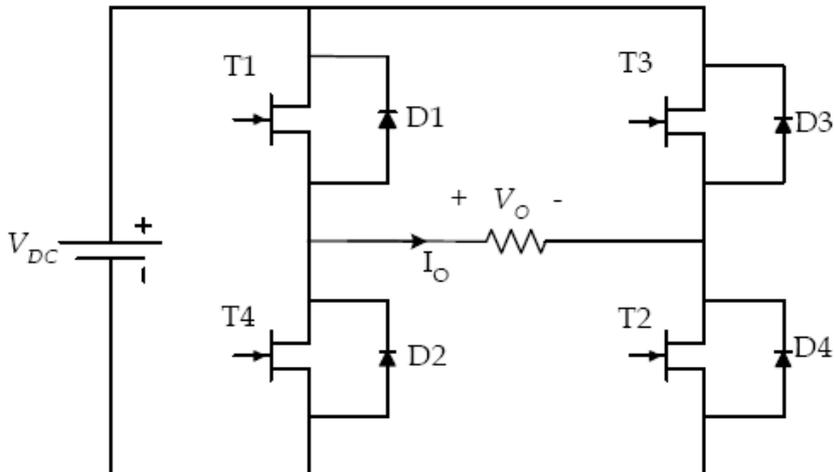
Di pasaran produk inverter tersedia banyak jenis dan ragamnya, mulai dari satu fasa sampai tiga fasa. Inverter tersedia dalam kapasitas daya yang berbeda mulai dari 100 W, 200 W, 300 W hingga yang ribuan KW atau bahkan dalam MW. Demikian juga dengan kualitas gelombang keluaran ada yang gelombang kotak, gelombang sinus yang diperbaiki dan ada pula inverter yang mengeluarkan bentuk gelombang sinus murni.



Gambar 8.1. Contoh produk inverter

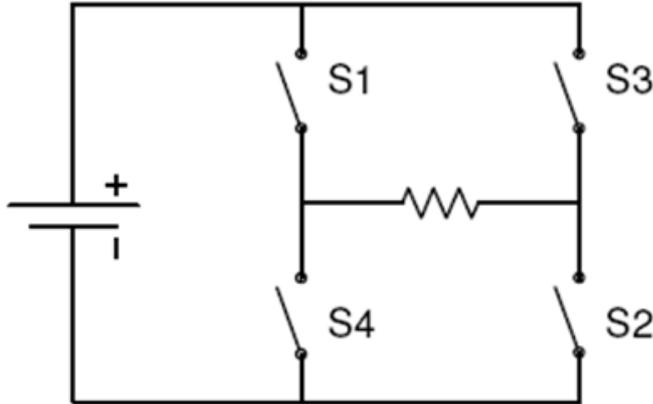
8.2 Rangkaian Inverter Satu Fasa

Rangkaian inverter satu fasa dapat dibentuk dari saklar elektronik dengan konfigurasi jembatan seperti terlihat pada gambar 8.2.



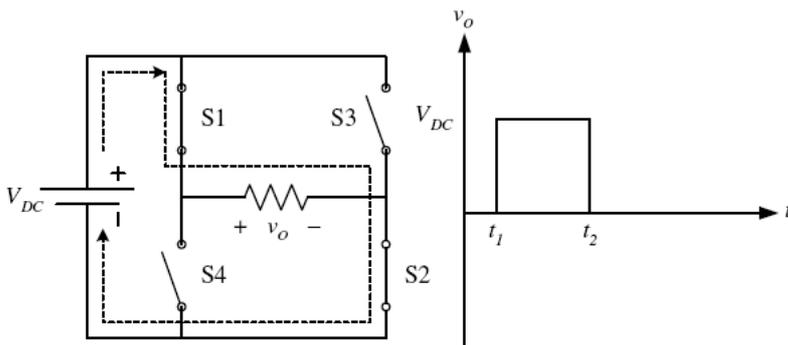
Gambar 8.2. Rangkaian inverter satu fasa

Rangkaian inverter yang terdiri atas 4 saklar elektronik di atas dapat disederhanakan dengan rangkaian ekivalen seperti ditunjukkan pada gambar 8.3. Dengan sumber listrik DC, melalui rangkaian inverter akan didapat output listrik AC dengan cara mengatur ke empat saklar elektronik secara bergantian dengan aturan tertentu.



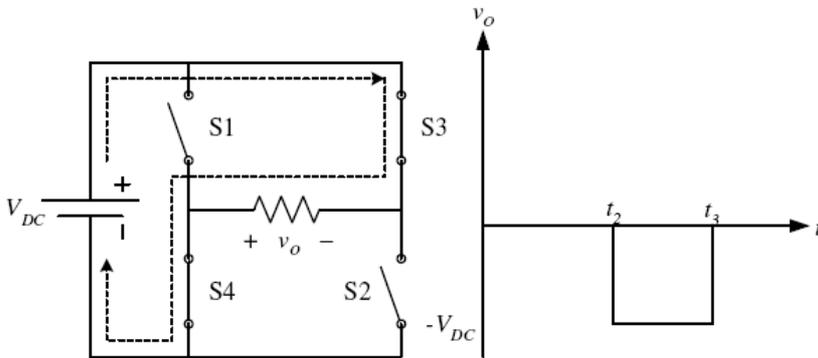
Gambar 8.3. Rangkaian ekivalen inverter 1 fasa

Dengan mengatur Saklar S1 dan S2 ON, dan S3 dan S4 OFF, maka arus listrik akan mengalir dari sumber positif menuju Saklar S1 selanjutnya menuju beban dan seterusnya melewati saklar S2 dan kembali ke sumber daya negatif baterai. Pada kondisi ini arus mengalir dari positif ke negatif beban. Arah arus dan bentuk gelombang pada kondisi ini dapat dilihat pada gambar 8.4.



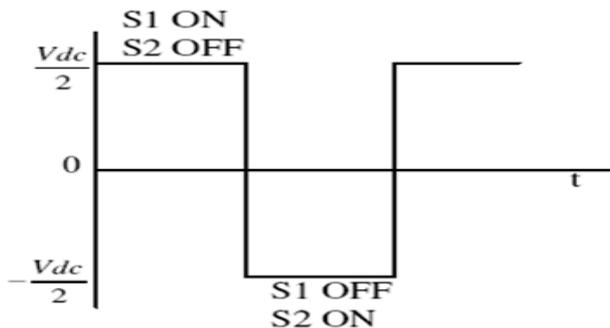
Gambar 8.4. Arah aliran arus dan bentuk gelombang output

Tahap selanjutnya dengan mengatur Saklar S3 dan S4 ON, dan S1 dan S2 OFF, maka arus listrik akan mengalir dari sumber positif menuju Saklar S3 selanjutnya menuju beban dan seterusnya melewati saklar S4 dan kembali ke sumber daya negatif baterai. Arah arus dan bentuk gelombang pada kondisi ini dapat dilihat pada gambar 8. Pada kondisi ini arus mengalir dari negatif ke positif beban yang dapat dijelaskan pada gambar 8.5.



Gambar 8.5. Arah aliran arus dan bentuk gelombang output

Dengan pengaturan saklar-saklar elektronik untuk ON dan OFF secara bergantian dengan frekuensi tertentu, maka akan didapat tegangan output listrik AC seperti pada gambar 8.6.

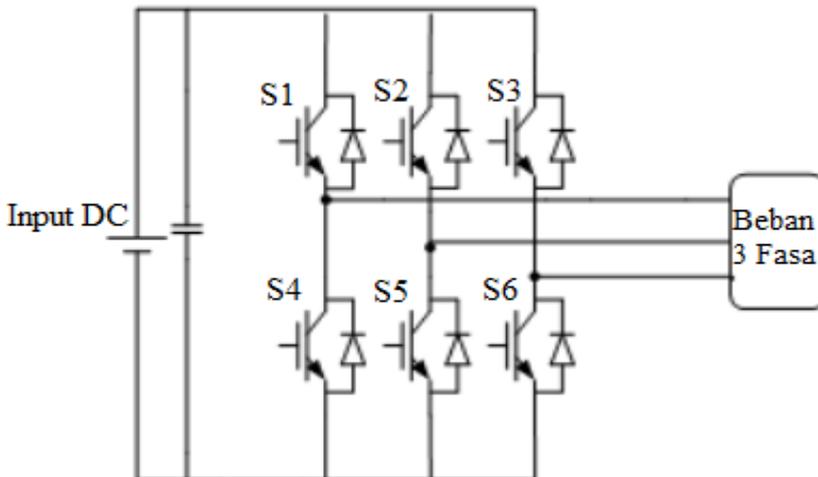


Gambar 8.6. Gelombang output rangkaian inverter 1 fasa

Tegangan output yang dihasilkan dari rangkaian inverter jenis ini masih berupa gelombang kotak. Bentuk gelombang kotak kurang baik jika digunakan untuk menyuplai beban listrik karena akan menimbulkan panas dan ketidaknormalan kinerja peralatan listrik dan elektronika. Motor listrik akan berjalan kurang halus apabila diberikan catu daya listrik AC dengan bentuk gelombang kotak.

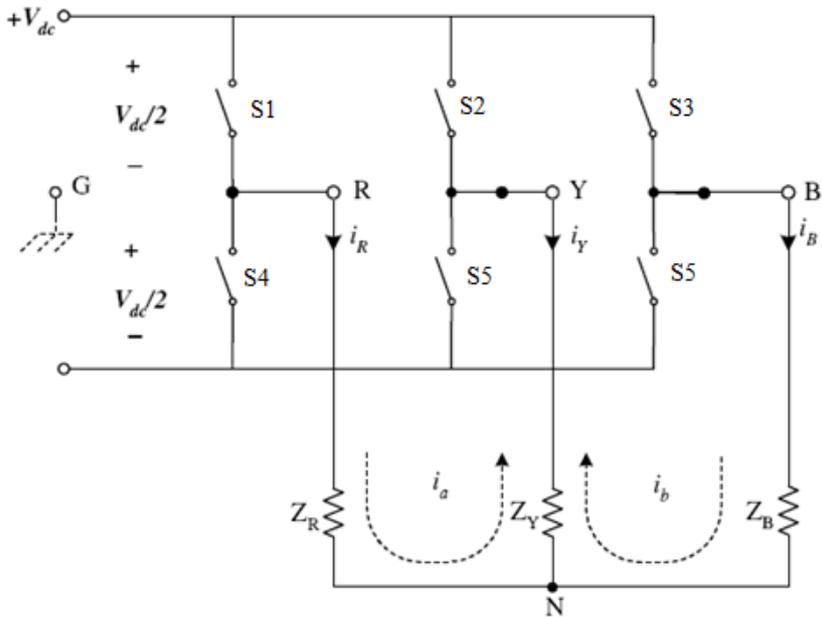
8.3 Rangkaian Inverter Tiga Fasa

Rangkaian inverter tiga fasa digunakan untuk mengubah sumber listrik DC menjadi listrik AC tiga fasa. Komponen yang digunakan pada rangkaian inverter tiga fasa pada umumnya adalah SCR atau IGBT yang disusun dengan konfigurasi jembatan seperti pada gambar berikut:



Gambar 8.6. Rangkaian Inverter tiga fasa

Untuk menganalisis cara kerja rangkaian inverter tiga fasa, rangkaian pada gambar 8.6 dapat disederhanakan menjadi rangkaian pengganti seperti ditunjukkan pada gambar 8.7.



Gambar 8.7. Rangkaian pengganti Inverter tiga fasa

Prinsip kerja dari rangkaian inverter tiga fasa tidak jauh berbeda dengan inverter satu fasa. Untuk mengubah listrik DC menjadi listrik AC diperlukan mekanisme pengendalian kombinasi penyalan saklar elektronis dengan frekuensi yang sesuai. Masing-masing saklar elektronis tidak boleh bekerja secara simultan karena dapat mengakibatkan gangguan.

Untuk menghasilkan gelombang output listrik tiga fasa diperlukan pengaturan penyalan saklar elektronis dalam hal ini IGBT atau SCR dengan perbedaan masing-masing fasa 120° . Urutan penyalan saklar elektronis dapat mengikuti aturan sebagai berikut:

1. Saklar S1, S5 dan S6 ON sedangkan S2, S3 dan S4 OFF
2. Saklar S6, S2 dan S1 ON sedangkan S3, S4 dan S5 OFF
3. Saklar S2, S4 dan S6 ON sedangkan S1, S3 dan S5 OFF
4. Saklar S4, S2 dan S3 ON sedangkan S1, S5 dan S6 OFF

5. Saklar S5, S4 dan S3 ON sedangkan S1, S2 dan S6 OFF
6. Saklar S1, S3 dan S5 ON sedangkan S2, S3 dan S6 OFF
7. Saklar S4, S5 dan S6 ON sedangkan S1, S2 dan S3 OFF
8. Saklar S1, S2 dan S3 ON sedangkan S4, S5 dan S6 OFF

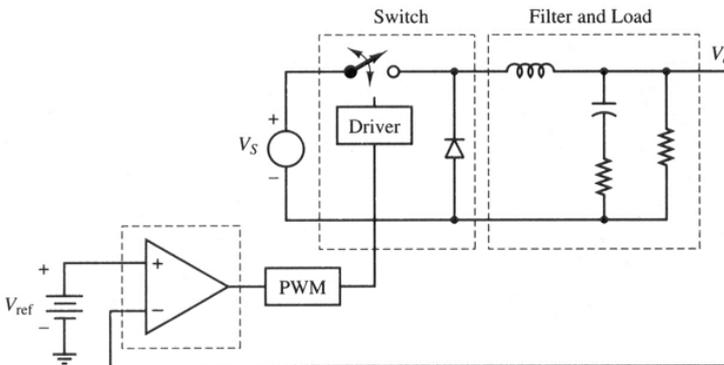
Dengan pengaturan penyalan saklar elektronis yang berjarak 120° , akan didapatkan gelombang listrik AC tiga fasa. Akan tetapi, listrik tiga fasa yang dihasilkan masih berbentuk gelombang kotak. Listrik tiga fasa gelombang kotak ini kurang baik jika digunakan untuk mensuplai peralatan listrik karena dapat menimbulkan panas.

Bentuk gelombang listrik AC baik satu fasa maupun tiga yang ideal adalah sinusoidal. Untuk menghasilkan bentuk gelombang listrik AC yang berbentuk sinusoidal diperlukan rangkaian tambahan seperti Pulse Width Modulator atau sering dikenal dengan istilah PWM.

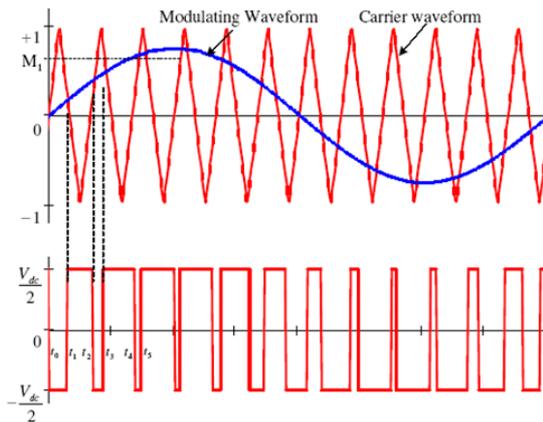
8.4 Rangkaian Penghalus Gelombang Kotak

Rangkaian inverter seperti yang dijelaskan sebelumnya akan menghasilkan listrik AC dengan bentuk gelombang kotak. Bentuk gelombang kotak pada listrik AC tidak baik bagi peralatan listrik karena secara desain, peralatan listrik membutuhkan bentuk gelombang sinus. Pengaruh listrik AC gelombang kotak akan menyebabkan panas berlebih pada berbagai peralatan yang dampaknya menurunkan kinerja dan umur peralatan dan sistem. Untuk itu rangkaian inverter perlu ditambah dengan rangkaian penghalus gelombang kotak menjadi gelombang sinus.

Untuk menghasilkan Listrik AC dari Output rangkaian inverter dengan gelombang sinus diperlukan rangkaian PWM (Pulse Width Modulator). Rangkaian ini yang akan mencacah listrik DC menjadi listrik AC dengan bentuk gelombang mendekati sinus.



Gambar 8.8. Rangkaian *Pulse Width Modulation*



Gambar 8.9. Gambar Gelombang Hasil *Pulse Width Modulation*

Kenapa harus gelombang sinus? Listrik AC dengan gelombang non sinus sebenarnya bisa digunakan untuk sumber peralatan listrik seperti lampu, pemanas dan peralatan lainnya. Tetapi untuk motor listrik, gelombang AC non sinus akan mempengaruhi kualitas dayanya dan berefek pada panas yang ditimbulkan sehingga menyebabkan peralatan cepat panas dan rusak. Dengan menggunakan inverter, maka akan banyak diperoleh keuntungan

secara teknis bila dibandingkan dengan cara lain. Beberapa keuntungan tersebut antara lain:

- Jangkauan pengaturan kecepatan lebih lebar,
- Terdapat beberapa pola hubungan tegangan dan frekuensi,
- Mempunyai fasilitas penunjukan meter,
- Mempunyai lereng akselerasi dan deselerasi yang dapat diatur secara independen,
- Dimensi yang lebih kompak, serta
- Keamanan sistem lebih terjamin.

Di pasaran terdapat banyak produk AC Drive dengan nama produk yang berbeda-beda untuk setiap merek. Ada pabrikan yang menyebut dengan istilah Inverter, ada yang menggunakan istilah Variabel Speed Drive (VSD) dan ada pula yang menggunakan istilah Variabel Frequency Drive (VFD) yang semuanya sebenarnya menurun pada fungsi yang sama.

8.5 Aplikasi Rangkaian Inverter

Inverter dalam aplikasi sehari-hari digunakan sebagai pengubah sumber listrik DC menjadi listrik AC baik satu maupun tiga fasa. Contoh penerapan inverter banyak dijumpai pada berbagai peralatan baik di rumah, kantor maupun industri.

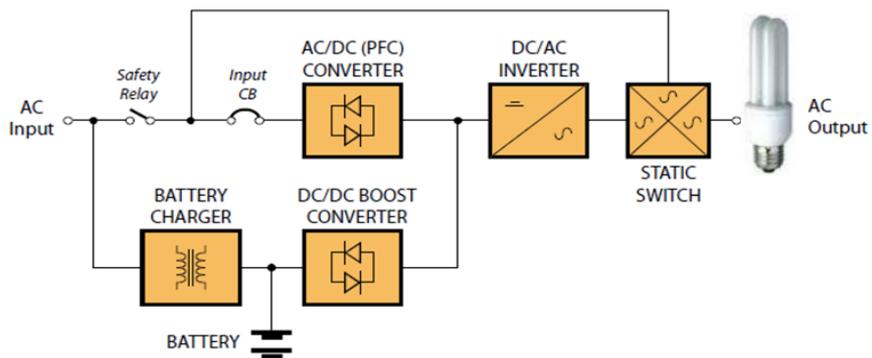
8.5.1. Lampu Emergensi

Salah satu aplikasi rangkaian inverter dapat ditemui pada peralatan di rumah, kantor ataupun industri yaitu pada lampu darurat. Lampu darurat merupakan lampu AC yang didalamnya terdapat sumber tenaga DC, rangkaian pengisi baterai dan rangkaian pengubah listrik DC menjadi listrik AC.



Gambar 8.8. Contoh produk lampu emergensi

Di dalam lampu emergensi terdapat berbagai modul yaitu: 1) modul baterai, modul charging baterai, modul penyearah dari AC ke DC, modul switch yang akan memindahkan catu daya jika sumber listrik utama padam dan modul inverter untuk mengubah listrik DC dari baterai menjadi listrik AC. Blok diagram lampu emergensi dapat dilihat pada gambar 8.9.



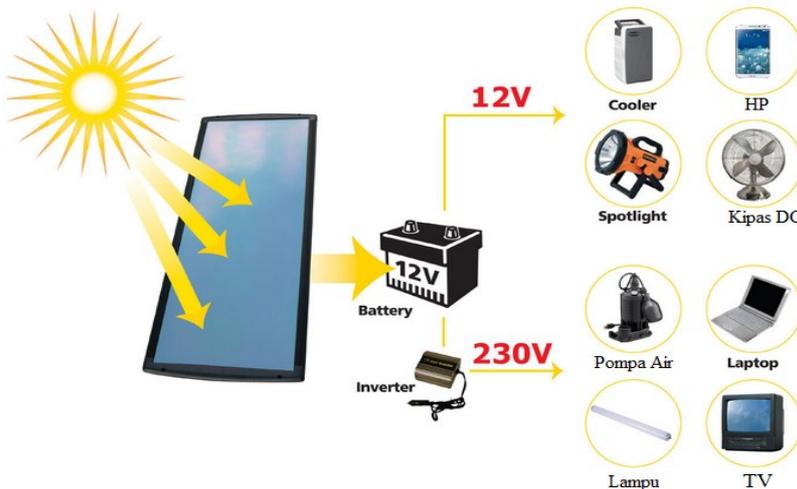
Gambar 8.9. Rangkaian Lampu Emergensi

8.5.2. Pengubah Listrik Solar Sel

Solar sel (pembangkit listrik tenaga matahari) dan wind turbin (pembangkit listrik tenaga angin) merupakan salah satu energi yang dapat diperbarui yang sekarang sedang tren. Makin langka dan menipisnya cadangan energi minyak dunia menjadikan sumber energi terbarukan menjadi primadona energi di masa depan.

Berbeda dengan pembangkit listrik pada umumnya yang menghasilkan listrik AC, solar sel dan wind turbin menghasilkan listrik DC. Oleh karena itu, jika akan digunakan untuk menyuplai beban listrik AC seperti motor listrik, seterika, kipas angin, AC, lampu, pemanas air, maka dibutuhkan peralatan untuk mengubah listrik DC menjadi AC yang disebut dengan inverter. Inverter dipasang dengan baterai untuk mengubah energi yang tersimpan di baterai menjadi energi listrik AC.

Berikut ini adalah blok diagram rangkaian inverter pada solar sel dan wind turbin.



Gambar 8.9. Rangkaian inverter solar sel

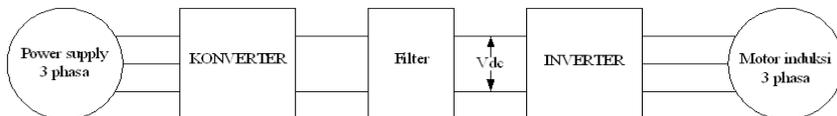
8.5.3. Kontrol Kecepatan dan Torsi Motor dengan VSD

Variabel Speed Drive (VSD) atau dikenal dengan nama Variable Speed Frequency (VSF) atau juga dikenal dengan nama produk Inverter merupakan rangkaian kontrol kecepatan dan torsi motor AC yang menggunakan prinsip perubahan listrik DC menjadi AC.

Meningkatnya penggunaan motor listrik sebagai penggerak peralatan produksi di industri mendorong para pabrikan untuk terus mencari cara meminimasi biaya dan meningkatkan efisiensinya dalam operasinal dan kontrolnya. Salah satu cara yang dapat ditempuh adalah dengan menggunakan VSD.

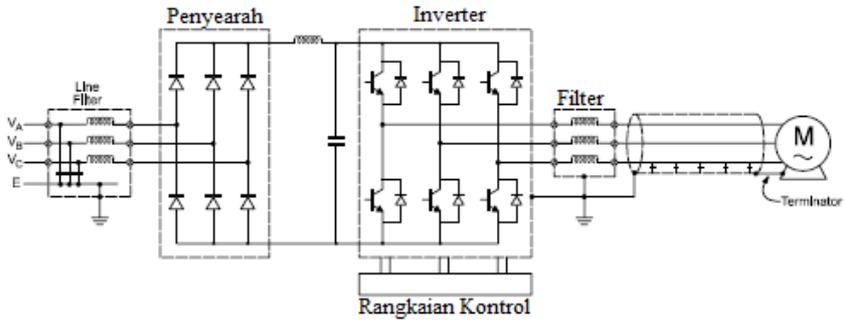
Penggunaan VSD dapat mengurangi konsumsi energi yang dibutuhkan oleh peralatan secara signifikan. Hal ini disebabkan VSD menggunakan prinsip switching untuk melakukan aksi kontrol dari sisi input sehingga motor listrik akan menyesuaikan dengan bebannya. Jika beban kecil, maka motor akan menyerap daya yang rendah sebaliknya jika beban besar motor akan menyerap daya yang besar pula. Hal ini berbeda pada pengendalian secara konvensional dimana motor akan menyerap daya input yang sama untuk beban yang berbeda.

Berikut ini adalah blok diagram rangkaian VSD dimana sumber input AC tiga fasa diubah menjadi listrik DC melalui rangkaian penyearah, selanjutnya listrik DC ini difilter untuk diratakan gelombangnya. Setelah rata selanjutnya listrik DC diubah menjadi listrik AC dengan frekuensi dan tegangan sesuai kebutuhan.



Gambar 8.10. Rangkaian VSD

Rangkaian VSD dapat dilihat pada gambar 8.11 yang terdiri atas penyearah, filter DC dan inverter.



Gambar 8.10. Rangkaian VSD

Di pasaran produk VSD mempunyai bentuk dan merk yang sangat beragam mulai dari yang sederhana sampai yang kompleks. Berikut ini adalah contoh VSD untuk kontrol motor.



Gambar 8.11. Produk VSD

BAB 9

SIMULASI RANGKAIAN ELEKTRONIKA DAYA DENGAN SOFTWARE PSIM

9.1 Pengantar

Peralatan elektronika daya mempunyai karakteristik arus dan tegangan yang mengalir pada rangkaian cukup besar. Hal ini mempunyai potensi terjadinya kerusakan pada peralatan. Untuk itu diperlukan kehati-hatian dalam mendesain, mengoperasikan dan menggunakan peralatan elektronika daya. Salah satu hal yang dilakukan oleh desainer maupun ahli bidang teknik elektronika adalah dengan melakukan simulasi menggunakan bantuan software komputer.

Banyak software yang dapat digunakan untuk mendesain dan mensimulasikan rangkaian elektronika diantaranya adalah PSPICE, PSIM, Multisim, ORCAD dan software-software simulasi elektronika daya lainnya. Software ini digunakan untuk mendesain rangkaian elektronika serta melakukan analisis perhitungan arus, tegangan dan bentuk gelombang dari sinyal input, penyulutan maupun output rangkaian. Dengan software simulasi, dapat diketahui apakah desain

rangkaian sudah sesuai dengan yang diharapkan atau tidak, sehingga kesalahan pemasangan atau kesalahan lainnya dapat dihindari.

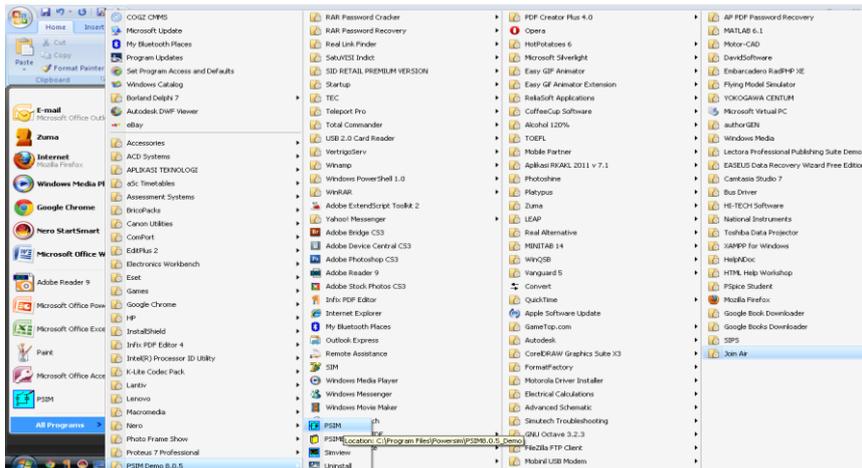
Prinsip simulasi rangkaian elektronika daya dengan software komputer yaitu untuk mengetahui karakteristik rangkaian ditinjau dari kebenaran rangkaiannya. Selain kebenaran rangkaian, simulasi juga bertujuan untuk mengetahui apakah unjuk kerja rangkaian sudah sesuai dengan yang diharapkan. Analisis rangkaian didapat dengan mengukur input dan output baik dalam bentuk nilai maupun bentuk gelombang. Untuk keperluan analisis lebih lanjut dapat juga dilakukan pengecekan pada node-node tertentu pada rangkaian sehingga akan didapat data yang lengkap untuk bahan kajian apakah desain rangkaian sudah sesuai atau belum.

9.2 Software Simulasi PSIM

Bab ini akan membahas studi kasus simulasi rangkaian elektronika dengan software PSIM. Penggunaan *software* simulasi PSIM dapat membantu engineer untuk merancang rangkaian elektronika dan menganalisisnya sebelum membuat dalam bentuk nyata. PSIM merupakan salah satu *software* yang berguna untuk mensimulasikan berbagai karakteristik elektronika dan sistem tenaga listrik yang berjalan pada Sistem operasi Windows XP, Windows 7 maupun Windows 8. Software ini dikembangkan oleh perusahaan Power Sim Inc dan dapat didownload pada alamat situs <http://powersimtech.com>. Pada tutorial ini digunakan versi demo sehingga memiliki kemampuan yang terbatas dalam melakukan simulasinya. Untuk mendapatkan software PSIM profesional dapat dilakukan pembelian software di alamat situsnya

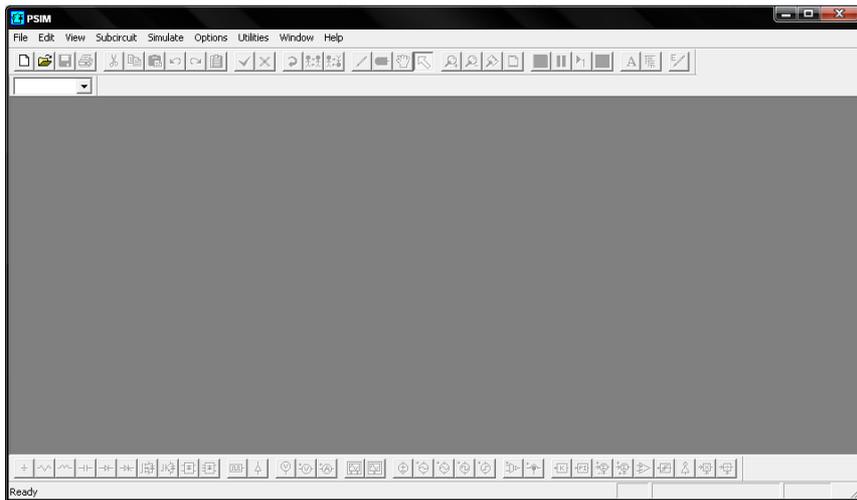
Untuk menjalankan software PSIM, pertama kali harus dilakukan proses instalasi software ini dari master programnya. Untuk proses instalasi hampir sama dengan instalasi software-software berbasis MS Windows pada umumnya.

Untuk menjalankan PSIM, pilih Start >> All Programs >> PSIM Demo 8.5 >> PSIM lalu klik pada PSIM seperti pada gambar di bawah ini.



Gambar 9.1. Cara menjalankan software PSIM

Setelah melakukan proses di atas, maka akan muncul tampilan pertama dari program PSIM sebagai berikut:



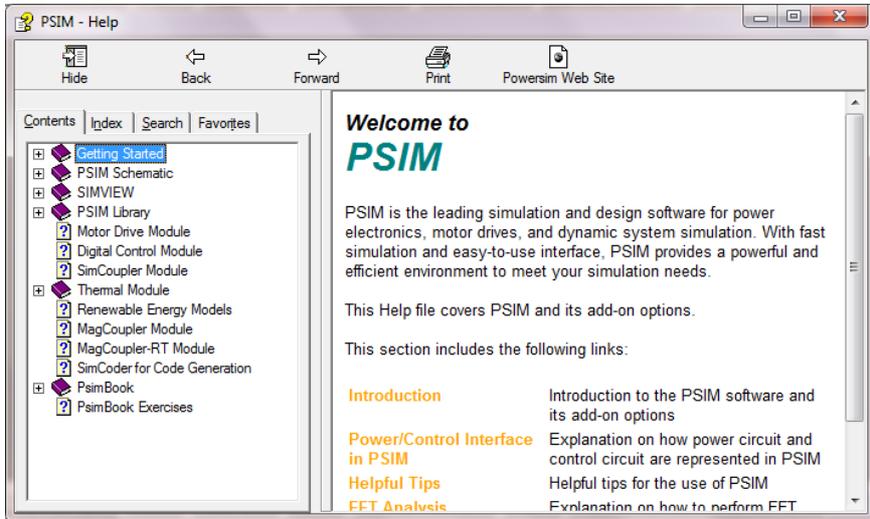
Gambar 9.2. Tampilan awal software PSIM

Tampilan awal program PSIM masih berupa jendela kosong sebagaimana terlihat pada gambar 9.2. Pada jendela ini ada beberapa menu yang aktif diantaranya adalah File sampai dengan Help. Pada menu tampilan ini dapat dilakukan beberapa operasi seperti membuat rangkaian baru, membuka file simulasi yang pernah dibuat, mengubah file yang pernah dibuat untuk dimodifikasi sesuai dengan keinginan serta operasi-operasi lainnya.

Untuk lebih mengoptimalkan penggunaan software PSIM, sebaiknya perlu dipelajari tutorial lengkap yang sudah disediakan pada menu Help. Menu bantuan dapat diakses melalui menu pull down Help.

Untuk mengakses menu bantuan atau Help, dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut:

Pilih Menu Pull Down Help >> Index, lalu klik pada sub menu Index, maka akan muncul jendela sebagai berikut:

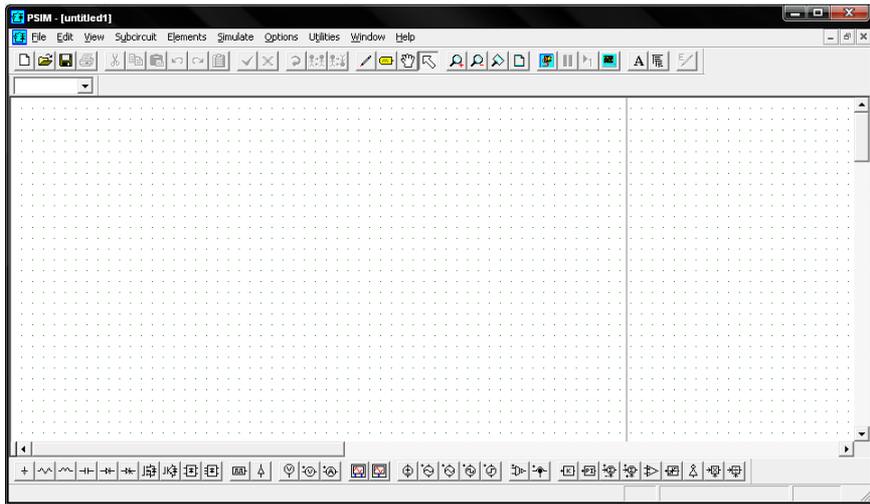


Gambar 9.3. Menu Help pada software PSIM

Pada menu Help seperti pada gambar 9.3, terdapat petunjuk lengkap tentang penggunaan software PSIM, mulai dari cara memulai, bagaimana membuat rangkaian skematik, bagaimana memilih dan meletakkan komponen, bagaimana melakukan simulasi dan lain sebagainya.

9.3 Membuat Rangkaian Elektronika Daya

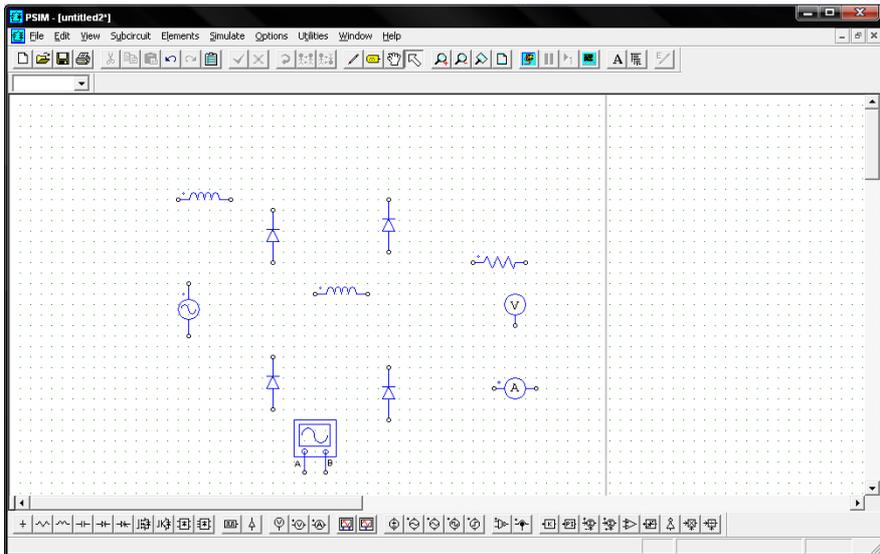
Untuk membuat simulasi dari sistem rangkaian elektronika maupun sistem tenaga listrik, pertama kali harus dibuat gambar rangkaiannya. Untuk membuat gambar rangkaian harus dipilih menu File >> New atau pilih pada short cut New.



Gambar 9.3. Cara memulai membuat rangkaian elektronika daya di PSIM

Selanjutnya perlu dipilih dan diletakkan komponen-komponen yang menyusun suatu rangkaian elektronika yang akan dibuat. Contoh, akan dibuat rangkaian penyearah gelombang penuh dengan tipe jembatan, maka diperlukan komponen-komponen:

- Sumber AC
- Dioda
- Resistor
- Induktor
- Kapasitor
- Ampermeter
- Voltmeter
- Osiloskop



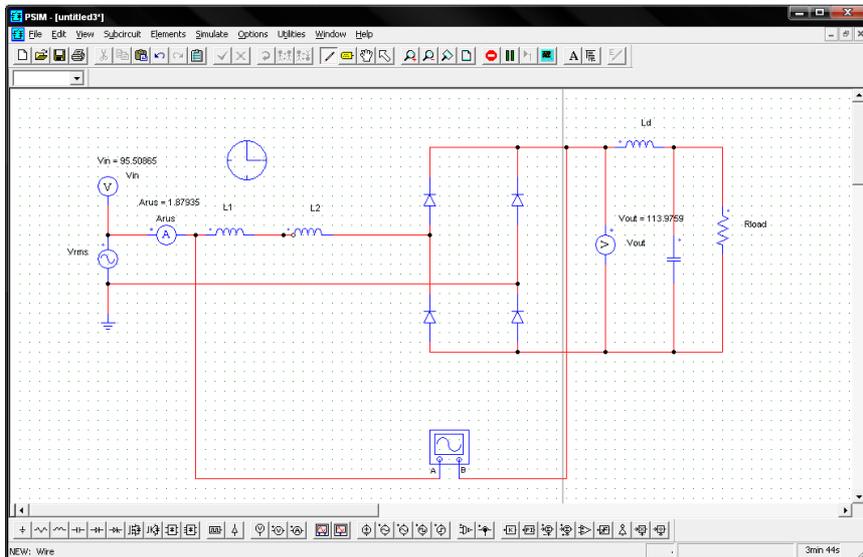
Gambar 9.4. Pemilihan dan penempatan komponen

Setelah seluruh komponen terkumpul, langkah selanjutnya adalah mengatur nilai atau parameter rangkaian dan menempatkan pada posisi dan susunan yang sesuai. Caranya dengan melakukan double klik pada gambar komponen tersebut.



Gambar 9.5. Pengaturan parameter komponen

Setelah daftar komponen dikumpulkan, selanjutnya perlu dilakukan dengan menghubungkan komponen yang satu dengan komponen yang lain. Caranya adalah dengan menarik titik ujung pada komponen dengan menu .



Gambar 9.6. Pengaturan tata letak komponen dalam rangkaian

Setelah rangkaian tersusun, langkah berikutnya adalah mengecek kebenaran dari rangkaian tersebut. Perhatikan peletakan komponen apakah sudah benar. Perhatikan juga koneksi antara satu komponen dengan komponen lainnya apakah sudah terhubung secara sempurna. Setelah semua dicek kebenarannya dapat dilanjutkan dengan melakukan simulasi. Jika rangkaian yang didesain masih ada kesalahan, maka akan muncul pesan kesalahan dan simulasi tidak bisa berjalan sebelum kesalahan tersebut diperbaiki.

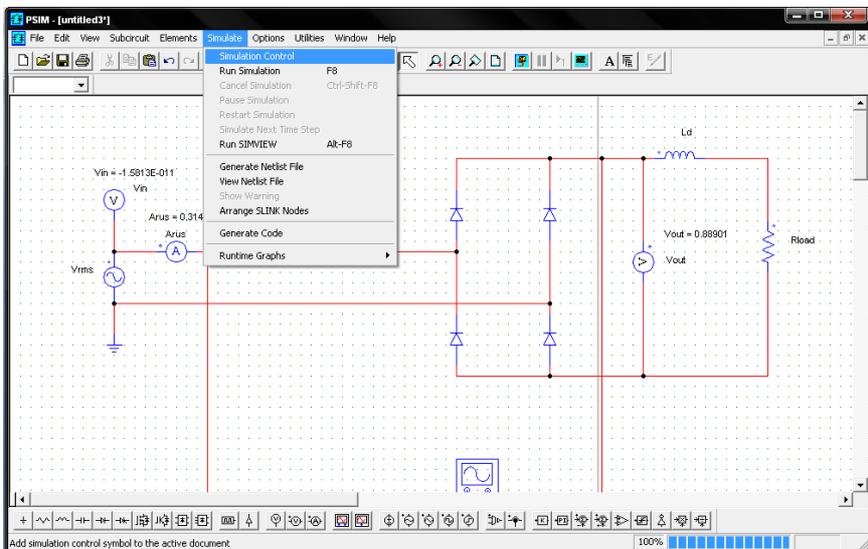
9.4 Melakukan Simulasi Rangkaian

Untuk melakukan simulasi rangkaian yang telah dibuat dapat dilakukan dengan berbagai cara yaitu:

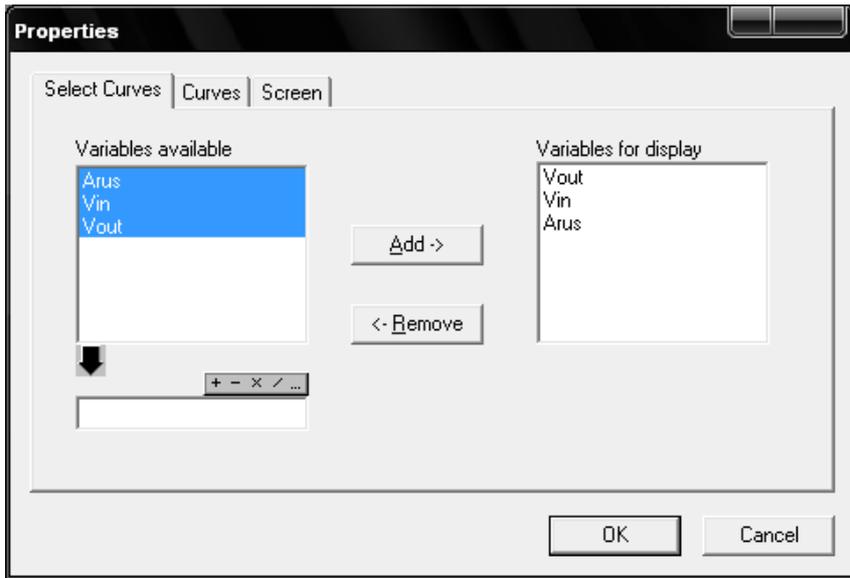
- Menggunakan Osiloskop untuk melihat bentuk gelombang dari rangkaian yang akan dianalisis
- Menggunakan Ampermeter dan Voltmeter
- Menggunakan Simview

Pada contoh di atas, simulasi perilaku dari rangkaian dibuat dengan Osiloskop sehingga bentuk gelombang input dan output dapat dilihat pada tampilan osiloskop.

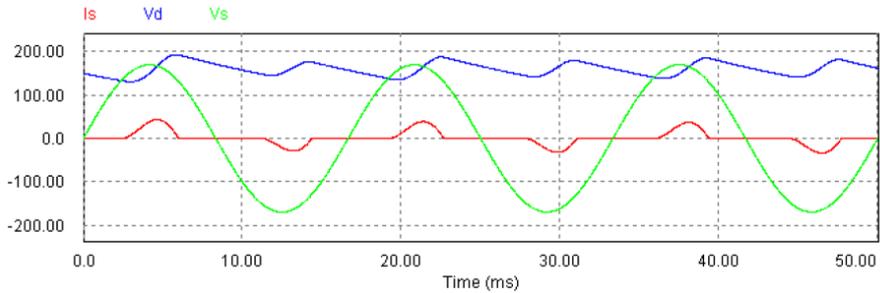
Untuk melakukan simulasi caranya dengan pilih Simulate >> Run Simulation



Gambar 9.7. Menjalankan simulasi rangkaian



Gambar 9.8. Pemilihan parameter yang akan ditampilkan



Gambar 9.9. Bentuk gelombang hasil simulasi

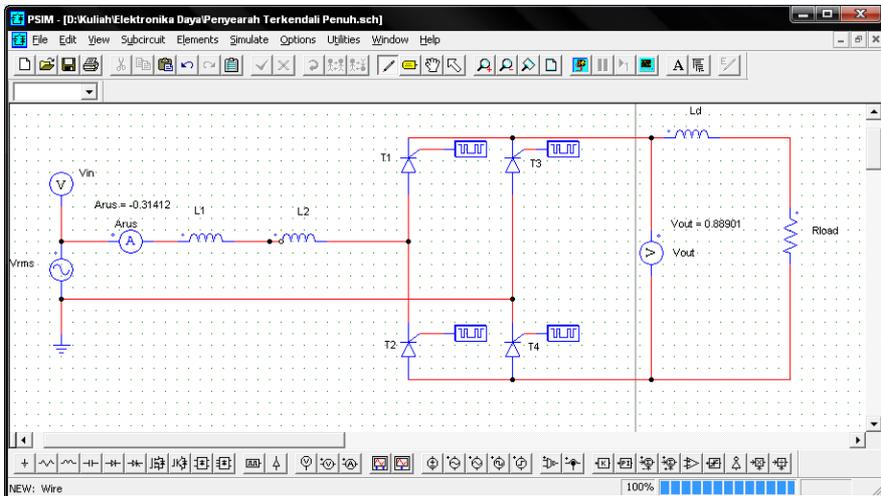
9.5 Simulasi Rangkaian Penyearah Terkendali dengan SCR

Pada materi berikutnya adalah membuat simulasi rangkaian penyearah terkendali (controlled phase rectifier).

Komponen yang dibutuhkan

- SCR
- Gating block (Pembangkit pulsa)
- Sumber AC
- Resistor
- Induktor
- Ampermeter
- Voltmeter
- Osiloskop

Gambar rangkaian



Gambar 9.10. Gambar rangkaian penyearah terkendali satu fasa



Gambar 9.11. Gelombang input output hasil simulasi

REFERENSI

- Ali, M, (2011), Modul Kuliah Elektronika Daya, Jurusan Pendidikan Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Negeri Yogyakarta diakses melalui website <http://muhal.wordpress.com>
- E. Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-Lara, T.J.E Miller (2009). Power Electronics Control in Electrical Systems.
- Ewald F Fuch, Mohammad A.S Masoum (2012), Power Conversion of Renewable Energy Systems, Springer, New York City.
- Hart, DW. (2011). Introduction to Power Electronics. Indiana : Prentice-Hall International, Inc.
- Istanto W. Djatmiko (2011), Modul Kuliah Elektronika Daya, Universitas Negeri Yogyakarta.
- John William Motto Jr (2007). Introduction to Solid State Power Electronics, Powerex, Semiconductor Division Youngwood Pennsylvania.
- Rashid, MH. (2003). Power Electronics: Circuits, devices and application. New Jersey : Prentice-Hall, Inc .
- Singh, MD, KB. Khanchandani. (2007). Power Electronics. New Delhi : Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.
- Valerie Vodovozov (2010), Introduction to Power Electronics, Ventus Publishing Aps, downloaded from <http://bookboon.com>