



ELEKTRONIKA DAYA

Mas Ahmad Baihaqi, S.T., M.T

TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK DAN INFORMATIKA
UNIVERSITAS PANCA MARGA 2022

ELEKTRONIKA DAYA

Hak Cipta 2022 pada Penulis

Hak penerbitan pada PANCA MARGA PRESS. Bagi mereka yang ingin memperbanyak sebagian isi buku ini dalam bentuk atau cara apapun harus mendapatkan izin tertulis dari penulis dan penerbit PANCA MARGA PRESS.

Penulis:

Mas Ahmad Baihaqi, S.T., M.T.



Penerbit:

PANCA MARGA PRESS

Gedung Rektorat Kampus 1 Universitas Panca Marga

Jl. Yos Sudarso Pabean Dringu, Probolinggo 67271

Telp. (0335)422715

Email : pancamargapress@upm.ac.id

Hak Cipta dilindungi Undang-undang

All Right Reserved

Cetakan 12, September 2022

ELEKTRONIKA DAYA

Elektronika daya adalah subjek interdisipliner dalam teknik elektro yang berkaitan dengan desain, kontrol, dan konversi daya listrik. Bidang ini mengubah energi listrik menggunakan rangkaian elektronik dengan kontrol tertentu, sehingga sesuai dengan kebutuhan beban listrik dan mencapai efisiensi tinggi. Buku ini bertujuan untuk menjelaskan konsep utama dalam elektronika daya, termasuk Perangkat Elektronika Daya Semikonduktor, Penyearah, Penyearah Terkendali, Kontrol Fase, Konverter DC ke DC, Inverter, dan Konverter AC ke AC.

SASARAN BUKU

Buku ini ditujukan untuk mahasiswa teknik elektro, peneliti, dan peminat elektronika daya. Buku ini merupakan sumber yang baik untuk membantu pembaca memperoleh pengetahuan tentang elektronika daya yang banyak diterapkan di masyarakat.

PRAKATA

Syukur Alhamdulillah, kami panjatkan kehadiran Allah SWT atas selesainya penyusunan Buku Ajar dengan judul "ELEKTRONIKA DAYA". Buku ini disusun berdasarkan pemikiran dan kajian mendalam yang telah dilakukan oleh Penulis. Tujuan dari penulisan buku ini adalah untuk memberikan pemahaman dasar tentang teknologi elektro kepada mahasiswa Teknik Elektro di semester genap. Selain itu, buku ini juga dapat dimanfaatkan oleh mahasiswa dari program studi lain yang membutuhkan pengetahuan bidang elektronika daya.

Proses belajar mengajar di bidang Teknik Elektro menuntut peran aktif para dosen dalam mengembangkan wawasan dan keilmuan mereka, mengingat perkembangan yang sangat pesat dalam disiplin ini. Buku yang membahas keilmuan elektronika daya memerlukan materi yang berkualitas tinggi agar mampu memberikan fondasi yang kuat bagi para mahasiswa.

Kami menyadari bahwa buku ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kami sangat mengharapkan kontribusi dari para pembaca dalam bentuk kritik dan saran yang membangun. Masukan tersebut akan sangat berharga untuk menyempurnakan buku ini di masa mendatang. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat yang besar dan menjadi sumber belajar yang efektif bagi semua yang membutuhkannya.

Akhir kata, semoga Allah SWT meridhoi usaha kita dalam menuntut ilmu dan menjadikannya sebagai amal jariyah yang bermanfaat bagi banyak pihak. Aamiin..

Hormat kami,
Penulis

Mas Ahmad Baihaqi, S.T., M.T.

KATA PENGANTAR

Elektronika daya adalah subjek interdisipliner dalam teknik elektro yang berkembang sangat pesat. Implementasinya telah merambah berbagai peralatan industri, rumah tangga, dan peralatan personal. Subjek ini memiliki beragam sistem yang meskipun secara prinsip dapat dikategorikan menjadi empat sistem utama: konversi daya AC ke DC, daya DC ke DC lainnya, DC ke AC, dan konversi dari satu frekuensi AC ke frekuensi AC yang lain. Implementasi sistem ini semakin canggih dengan integrasi ke dalam sistem lain, seperti sistem kontrol, sistem elektronika, pemrosesan sinyal, dan lain-lain.

Keempat sistem dalam elektronika daya ini bertujuan untuk mengubah energi listrik dari satu bentuk ke bentuk lainnya, dengan hasil yang memiliki karakteristik lebih baik, efisien, bebas kesalahan, bersih, kompak, sederhana, dan nyaman digunakan.

Buku ini menguraikan prinsip dasar elektronika daya, termasuk teori dasar rangkaian elektronika daya, perangkat semikonduktor daya, analisis rangkaian, dan kualitas daya. Buku ini memaparkan konsep dasar, perangkat semikonduktor daya, struktur, operasi, dan karakteristik komponen. Selanjutnya, akan dibahas sistem penyearah, sistem inverter, sistem konverter DC-DC, dan sistem siklokonverter.

Buku ini ditulis dengan orientasi untuk mahasiswa agar mereka dapat belajar secara mandiri. Oleh karena itu, buku ini juga cocok untuk mahasiswa sarjana atau pascasarjana, insinyur atau teknisi yang berpraktik, profesional industri, peneliti, dan akademisi yang ingin mempelajari bidang elektronika daya. Semoga buku ini membawa berkah bagi penulis, pembaca, dan kita semua.

Mas Ahmad Baihaqi, S.T., M.T.

DAFTAR ISI

PRAKATA	IV
KATA PENGANTAR	V
DAFTAR ISI.....	VI
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Definisi.....	1
1.2 Jenis Sistem Elektronika Daya.....	2
1.3 Elektronika Daya - Perangkat Saklar	2
1.4 Aplikasi Elektronika Daya	3
1.5 Latihan	4
II. DASAR-DASAR THYRISTOR.....	5
2.1 Pengantar	5
2.2 Sejarah Singkat Thyristor	5
2.3 Struktur Thyristor	6
2.3.1 Perbedaan Antara Thyristor dan Thyatron.....	7
2.3.2 Perbedaan Antara Thyristor dan Transistor.....	8
2.4 Jenis-jenis Thyristor.....	9
2.5 Penerapan Thyristor	10
2.6 Komponen Elektronika selain Thyristor.....	11
2.7 Latihan	11
III. KARAKTERISTIK KOMPONEN ELEKTRONIKA DAYA.....	12
3.1 Diode Daya	12
3.1.1 Struktur dan Prinsip Kerja.....	12
3.1.2 Karakteristik Dioda Daya.....	14
3.2 Bipolar Junction Transistor (BJT)	17
3.2.1 Konstruksi Transistor Daya.....	18
3.2.2 Karakteristik I-V	19
a. Wilayah cut-off	19
b. Wilayah aktif.....	19
c. Wilayah kuasi-saturasi	20
d. Wilayah saturasi jenuh	20
3.2.3 Prinsip Kerja Transistor Daya.....	21
3.3 MOSFET	21
3.3.1 Karakteristik Umum.....	21
3.3.2 MOSFET Tipe Peningkatan Saluran N	23

3.3.3 MOSFET tipe Peningkatan p-channel.....	24
3.3.4 MOSFET Tipe Deplesi N-Channel.....	25
3.3.5 MOSFET Deplesi Tipe P-Channel.....	25
3.3.6 Ringkasan Karakteristik MOSFET	27
3.4 Silicon Controlled Rectifier (SCR)	27
3.4.1 Prinsip Dasar	28
3.4.2 Analogi Dua Transistor Thyristor	29
3.4.3 Kurva Karakteristik I-V SCR.....	30
3.4.4 Sirkuit Sakelar SCR DC.....	31
3.4.5 Sirkuit SCR DC Alternatif	33
3.4.6 Ringkasan SCR	33
3.5 Bidirectional Triode Thyristor (TRIAC)	34
3.5.1 Prinsip Dasar	34
3.5.2 Simbol dan Konstruksi Triac.....	34
3.5.3 Kurva Karakteristik I-V Triac.....	35
3.5.4 Aplikasi Triac.....	36
a. Sirkuit Sakelar Triac DC	36
b. Sirkuit Sakelar Triac AC.....	37
c. Sirkuit Sakelar Triac yang Dimodifikasi.....	37
3.6 Bidirectional Diode Thyristor (DIAC).....	38
3.6.1 Prinsip Umum	38
3.6.2 Karakteristik DIAC	40
3.6.3 Aplikasi Diac.....	41
3.7 Gate Turn OFF Thyristors (GTO)	41
3.7.1 Prinsip Dasar	41
3.7.2 Model Aplikasi.....	43
3.8 Silicon Control Switch (SCS).....	44
3.8.1 Prinsip Umum	44
3.8.2 Struktur, Rangkaian Ekuivalen dan Karakteristik SCS	45
3.8.3 Aplikasi SCS	46
3.9 Silicon Bilateral Switch (SBS)	47
3.9.1 Prinsip Dasar	47
3.9.2 Karakteristik SBS.....	47
3.10 Silicon Unilateral Switch (SUS).....	48
3.10.1 Prinsip Dasar	48
3.10.2 Karakteristik VI dari SUS	49
3.11 Light Activated Silicon Controlled Rectifier (LASCR)	49
3.11.1 Prinsip Dasar	49
3.11.2 Aplikasi LASCR	51
3.12 Thyristor Induksi Statis (SITH).....	52

3.13 Static Induction Transistors (SIT)	52
3.13.1 Prinsip Dasar	52
3.13.2 Struktur dan Karakteristik SIT	53
3.14 MOS Controlled Thyristor (MCT)	55
3.14.1 Prinsip Dasar	55
3.14.2 Proses Menghidupkan dan Mematikan MCT	56
3.14.3 Keuntungan MCT	57
3.14.4 Aplikasi MCT	57
3.15 Integrated Gate Commutated Thyristor (IGCT)	57
3.15.1 Prinsip Dasar	57
3.15.2 Struktur dan Karakteristik	58
3.16 Insulation Gate Bipolar Transistor (IGBT)	60
3.16.1 Prinsip Dasar	60
3.16.2 Karakteristik IGBT	62
3.16.3 Perbandingan IGBT	64
3.16.4 Penerapan IGBT	66
3.17 Transistor Unijunction	66
3.17.1 Transistor Unijunction	66
3.17.2 Aplikasi Transistor Unijunction	69
3.17.3 Ringkasan Transistor Unijunction	72
3.19 Perangkat Pemotong Transien	73
3.20 Relai Rangkaian Terpadu	85
3.21 Latihan	94
IV. PENYEARAH TAK TERKENDALI	96
4.1 Pengantar	96
4.2 Bentuk Gelombang Sinusoidal AC	97
4.3 Penyearah Fase Tunggal	98
4.3.1 Penyearah Setengah Gelombang	98
4.3.2 Penyearah Gelombang Penuh	102
4.4 Penyearah Tiga Fase	107
4.4.1 Bentuk Gelombang Tiga Fase	107
4.4.2 Penyearah Tiga Fase Setengah Gelombang	108
4.4.3 Penyearah Tiga Fase Gelombang Penuh	112
4.5 Latihan	116
V. PENYEARAH TERKENDALI	118
5.1 Penyearah Terkendali Setengah Gelombang Satu Fase	118
5.2 Penyearah Gelombang Penuh Fase Tunggal	121
5.3 Penyearah tiga fase setengah terkontrol	124
5.4 Penyearah Gelombang Penuh Tiga Fase Terkendali	125

5.5 Latihan	127
VI. KONTROL FASE.....	128
6.1 Sirkuit AC Thyristor.....	128
6.2 Kontrol Fase Setengah Gelombang	130
6.3 Kontrol Fase Triac	133
6.4Latihan	135
VII. KONVERTER DC-DC	136
7.1 Pengantar	136
7.2 Rangkaian Regulator Transistor Seri	138
7.3 Konverter Buck	139
7.3 Konverter Boost.....	142
7.4 Konverter Buck-Boost	145
7.5 Ringkasan Mode Sakelar Catu Daya.....	146
7.6 Latihan	149
VIII. INVERTER	150
8.1 Inverter Fase Tunggal.....	150
8.1.1 Inverter Setengah Jembatan	150
8.1.2 Inverter Jembatan Penuh	151
8.2 Inverter Tiga Fase	151
8.2.1 Mode konduksi 180°	151
8.2.2 Mode konduksi 120°	153
8.3 Inverter Modulasi Lebar Pulsa	155
8.4 Harmonik	158
8.5 Seri Resonant Inverter	159
8.6 Latihan	160
IX. CYCLOCONVERTERS	161
9.1 Prinsip Dasar	161
9.2 Jenis dan Klasifikasi cycloconverter.....	162
9.3 Sisten Cycloconverter Fase tunggal ke fase tunggal.....	162
9.4 Sisten Cycloconverter Tiga fase ke fase tunggal.....	162
9.5 Sisten Cycloconverter Tiga fase ke tiga fase	162
9.6. Latihan	162
DAFTAR PUSTAKA	163

I. PENDAHULUAN

Kemampuan Akhir yang Direncanakan :

Mahasiswa mengenal secara garis besar tujuan, skema umum dan jenis-jenis sistem elektronika daya.

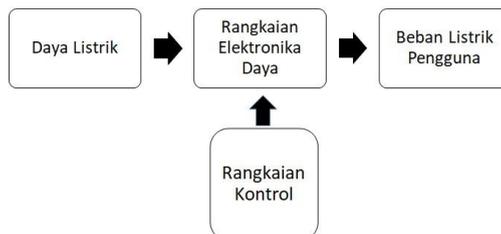
Petunjuk:

Pada bab ini mahasiswa diharapkan membaca dan mencermati substansi materi yang disajikan. Setelah selesai, mahasiswa dapat mengerjakan soal latihan, mencocokkan dan mencari jawabannya dalam naskah, apabila dirasa jawaban belum memuaskan.

1.1 Definisi

Elektronika daya merupakan sistem yang memproses perubahan/pengendalian aliran arus/tegangan agar arus/tegangan sesuai dengan yang dibutuhkan beban. Sistem elektronik daya yang paling diinginkan adalah yang efisiensi dan keandalannya 100%, biaya dan ukuran yang minimum serta ringan. Jadi dalam sistem elektronika daya, terdapat perubahan energi listrik dari satu bentuk ke bentuk lain, dan mengupayakan agar tercapai hal-hal berikut:

- ✓ Efisiensi maksimal
- ✓ Keandalan maksimal
- ✓ Ketersediaan maksimal
- ✓ Biaya minimum
- ✓ Berat paling kecil
- ✓ Ukuran kecil



Gambar 1.1 Sistem elektronika daya

Pengubahan energi pada elektronika dapat digambarkan dengan diagram blok pada Gambar 1.1. Dalam sistem tampak bahwa sumber listrik oleh rangkaian elektronika daya diubah besaran tegangan/arus/frekuensinya sehingga sesuai dengan beban. Perubahan tersebut dikendalikan dengan menggunakan rangkaian kontrol.

1.2 Jenis Sistem Elektronika Daya

Sesuai dengan fungsi perubahan bentuk gelombang yang dihasilkan, konverter elektronik daya dikategorikan ke dalam empat jenis berikut.

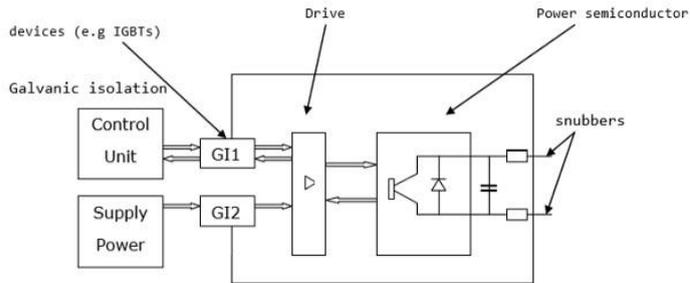
- ✓ **Penyearah/Rectifier: AC ke DC.** Ini mengubah arus AC menjadi DC
- ✓ **Inverter: DC ke AC.** Ini mengubah DC ke AC dari frekuensi dan tegangan yang diinginkan
- ✓ **Chopper: DC ke DC.** Ini mengubah DC konstan ke DC dengan tegangan sesuai yang diinginkan
- ✓ **Cycloconverter/ Matrix converter: AC ke AC.** Ini mengubah AC dari frekuensi tertentu ke frekuensi yang diinginkan (lebih rendah).

Jenis konverter elektronik daya ini dapat ditemukan dalam berbagai macam aplikasi seperti catu daya mode sakelar (SMPS), kontrol mesin listrik, sistem penyimpanan energi, kontrol pencahayaan, filter daya aktif, peralatan pada pembangkit dan distribusi daya, konversi energi terbarukan, fleksibel Transmisi AC dan teknologi *embeded* (tertanam).

1.3 Elektronika Daya - Perangkat Saklar

Elektronik daya adalah perangkat hasil kombinasi antara sistem kontrol, rangkaian drive, semikonduktor daya dan rangkaian kompensasi yang telah terintegrasi menjadi satu dan berfungsi untuk mengubah tegangan/arus/frekuensi sehingga sesuai dengan yang diinginkan melalui suatu proses pensaklaran oleh komponen semikonduktor daya. Jadi elektronika daya intinya adalah proses pensaklaran/switcing. Karakteristik utama dari sakelar ditentukan oleh korelasi internal fungsi dan interaksi sistem terintegrasi. Gambar yang diberikan di bawah ini menunjukkan cara kerja sistem sakelar elektronik daya.

Perangkat sakelar daya atau komponen elektronika daya, biasanya dipilih berdasarkan kemampuannya dalam menangani daya, yaitu komponen dengan kemampuan arus, tegangan, kecepatan dan juga disipasi daya yang ditimbulkan. Spesifikasi yang paling menarik dalam komponen elektronika daya adalah kemampuannya untuk mengurangi kerugian disipasi daya atau hampir menghilangkannya sampai tidak ada disipasi daya.



Gambar 1.2 Sistem elektronika daya sebagai switching

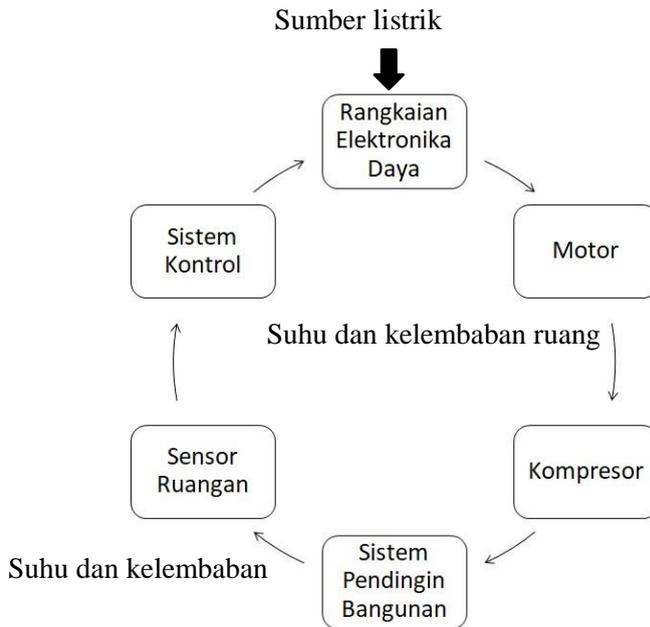
1.4 Aplikasi Elektronika Daya

Aplikasi elektronika daya pada dasarnya bisa diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu aplikasi Statis dan aplikasi pengemudian atau *drive*. Pada aplikasi sistem statis, sistem digunakan untuk peralatan mekanis yang tidak bergerak dan/atau berputar seperti pengelasan, pemanas, pendingin, dan pelapisan listrik serta daya DC. Gambar 1.3 memperlihatkan contoh aplikasi statis, yaitu pada sistem catu daya.



Gambar 1.3 Aplikasi statis sistem elektronika daya

Aplikasi pengemudian atau *drive* memiliki bagian yang berputar seperti motor. Contohnya, kompresor, pompa, sabuk konveyor, dan sistem pendingin udara. Dalam sistem pendingin udara, elektronika daya banyak digunakan di *Air Conditioner* (AC) untuk mengontrol elemen seperti kompresor. Diagram skematik pada gambar 1.4 menunjukkan bagaimana elektronika daya digunakan dalam AC.



Gambar 1.4 Aplikasi drive sistem elektronika daya

1.5 Latihan

1. Jelaskan kelebihan sistem elektronika daya dibanding sistem konvensional!
2. Jelaskan jenis-jenis sistem elektronika daya!
3. Jelaskan prinsip dasar elektronika daya sebagai sistem pensaklaran!
4. Berikan contoh aplikasi sistem elektronika daya dan jelaskan prinsip kerja peran elektronika daya dalam sistem tersebut!

II. DASAR-DASAR THYRISTOR

Kemampuan Akhir yang Direncanakan :

Mahasiswa mengenal dasar-dasar, sejarah terciptanya, serta perbedaan struktur mendasar, dan jenis-jenis thyristor yang merupakan komponen yang banyak digunakan dalam elektronika daya

Petunjuk:

Pada bab ini mahasiswa diharapkan membaca dan mencermati substansi materi yang disajikan. Setelah selesai, mahasiswa dapat mengerjakan soal latihan, mencocokkan dan mencari jawabannya dalam naskah, apabila dirasa jawaban belum memuaskan.

2.1 Pengantar

Saat ini, banyak peralatan rumah tangga, peralatan elektromekanis atau elektrik, seperti *power supply* yang tidak terputus, hingga power industri dan peralatan kontrol motorik, merupakan peralatan yang terbuat dari rangkaian elektronika daya. Hal ini dikarenakan peralatan konvensional kontrol daya yang menggunakan transformator dan komponen lain memunculkan disipasi daya yang besar dan tidak efisien, dan tentu saja menimbulkan biaya tambahan yang tidak diinginkan. Walaupun belakangan, sistem magnet ditemukan untuk menghasilkan kontrol daya statis dengan keandalan yang lebih besar, namun karena ukuran pengontrol yang besar dan efisiensi yang kurang, hal ini terbatas pada aplikasi tertentu.

Pada bagian ini akan diuraikan tentang dasar-dasar thyristor yang secara teknis memiliki berbagai kelebihan dibanding sistem kontrol magnetik dan mekanis. Dimulai dari sejarah penemuan, perbedaan dengan thyatron, jenis-jenis thyristor, serta gambaran aplikasi dari thyristor pada saat ini. Pada akhir bab akan disajikan soal-soal sebagai latihan untuk mengukur kompetensi pembaca terhadap substansi pada bab ini.

2.2 Sejarah Singkat Thyristor

Pengembangan kontrol daya dengan metode elektronik diawali dengan penggunaan katup termionik dan *gas-discharge*. Perangkat ini termasuk konverter busur merkuri, Thyatron serta Ignitrons. Thyatron adalah trioda berisi gas yang digunakan terutama untuk mengkonversi arus besar. Dengan perkembangan pesat teknologi semikonduktor, miniaturisasi

sirkuit elektronik menggantikan katup termonik ini dan menghasilkan katup pelepasan gas, untuk menghasilkan Dioda daya dan Transistor daya dalam banyak aplikasi industri.

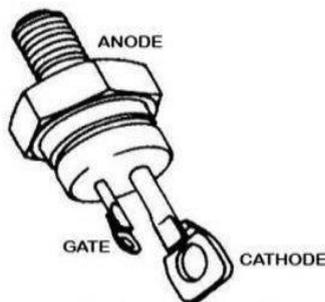
Tren baru dalam teknologi fabrikasi mengembangkan Thyristor yang menunjukkan karakteristik serupa dari Thyatron tabung gas. Nama Thyristor diturunkan dari kombinasi dua kata sebagai **Thyatron dan Transistor**. Karena keandalan yang tinggi, kinerja suhu yang meningkat, dan biaya produksi yang lebih rendah, Thyristor ini kemudian digunakan secara luas pada sistem elektrik.

Prototipe pertama thyristor diperkenalkan pada tahun 1957 oleh perusahaan General Electric. Sejak itu, perkembangan fabrikasi dan kemampuan komponen yang terus berkembang. Berbagai aplikasi industri dan komponen lain dengan karakteristik serupa dan termasuk dalam keluarga Thyristor banyak ditemukan.

Bahan dasar dari perangkat ini adalah silikon dan karenanya dinamai Silicon Controlled Rectifier (SCR). Jadi, secara umum dapat dikatakan bahwa SCR adalah anggota tertua dari keluarga Thyristor.

2.3 Struktur Thyristor

Thyristor adalah perangkat terminal empat lapis (bahan tipe P dan N), biasanya digunakan dalam rangkaian penyearah yang dapat disesuaikan. Terminal tersebut adalah anoda (Anode), katoda (Cathode) dan gerbang (Gate). Gambar 2.1 memperlihatkan bentuk fisik thyristor. Dalam penggunaannya, dua terminal anoda dan katoda dihubungkan secara seri dengan beban, dan arus yang melaluinya thyristor dikendalikan melalui tegangan di terminal gerbang.



Gambar 2.1 Bentuk fisik Thyristor

Thyristor dirancang untuk menangani daya tinggi (tegangan dan arus) kira-kira lebih besar dari 1 KV dan 100 A. SCR tersebut dapat diaktifkan atau dikendalikan oleh tegangan rendah (sekitar 10 W dan 1A) melalui gerbangnya. Oleh karena itu, dengan SCR atau thyristor dapat dilakukan kontrol sederhana namun menghasilkan pengaturan yang luar biasa.

2.3.1 Perbedaan Antara Thyristor dan Thyatron

Sebelum penemuan thyristor atau SCR, thyatron banyak digunakan untuk aplikasi kontrol industri. Bentuk populer dari perangkat ini adalah konverter busur thyatron. Komponen ini banyak digunakan untuk penyearah dan inverter. Thyatron merupakan tabung berisi gas yang terdiri dari tiga terminal yaitu anoda, katoda dan grid. Dengan tegangan positif antara grid dan katoda, thyatron dinyalakan.

Beberapa perbedaan Thyristor atau SCR dan tabung thyatron tercantum di bawah ini.

1. SCR atau Thyristor membutuhkan satu suplai utama dan satu suplai atau sinyal kontrol, sedangkan thyatron membutuhkan tegangan suplai yang besar antara terminal anoda dan katoda dan satu suplai filamen terpisah. Beberapa thyatron juga membutuhkan catu daya tambahan untuk dioda tambahan.



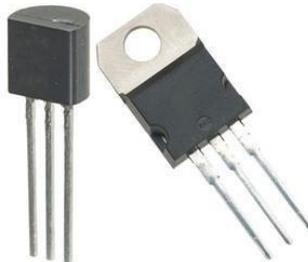
Gambar 2.2 Perbandingan bentuk fisik SCR dengan Thyatron (<http://www.tuopeek.com/image2/thyatron.jpg>)

2. Thyristor dapat dioperasikan dengan berbagai frekuensi, sedangkan thyatron terbatas pada rentang frekuensi 1 KHz, karena waktu pengion dan de-ionisasi busur di thyatron relatif lebih lama.

3. Kehilangan daya di SCR jauh lebih kecil dari pada di thyatron, karena adanya drop tegangan busur anoda ke katoda di thyatron yang lebih tinggi dan berbanding terbalik dengan berat molekul gas yang digunakan.
4. Waktu HIDUP dan MATI thyristor lebih kecil dibandingkan dengan thyatron, hal ini karena pada thyatron perlu waktu lebih lama untuk reaksi gas di daerah antar elektroda.
5. Untuk menghindari *flash-over* dan *arc-back* yang tidak diinginkan, jarak yang cukup harus disediakan antara terminal anoda dan katoda dari thyatron dibandingkan dengan thyristor (anoda tegangannya jauh lebih besar dari katoda). Oleh karena itu, bentuk fisik thyatron lebih besar daripada thyristor, yang memiliki ukuran dan berat yang lebih kecil.
6. Thyristor lebih dapat diandalkan daripada thyatron.
7. Umur thyristor lebih lama sedangkan thyatron memiliki umur yang lebih pendek.
8. Thyatron adalah perangkat yang dikendalikan tegangan, sedangkan thyristor adalah perangkat yang dikendalikan arus.

2.3.2 Perbedaan Antara Thyristor dan Transistor

Baik thyristor dan transistor adalah perangkat sakelar semikonduktor dengan tiga terminal yang digunakan untuk banyak aplikasi karena kelebihanannya seperti ukuran yang lebih kecil, efisiensi tinggi, dan biaya rendah. Meskipun transistor tersedia dengan tegangan tinggi dan peringkat arus yang disebut sebagai transistor daya, ada beberapa perbedaan antara kedua perangkat ini yang tercantum di bawah ini. Namun, baik transistor daya dan thyristor memiliki aplikasi yang berbeda dan spesifik sebagaimana lazim digunakan.



Gambar 2.3 Perbandinagn bentuk fisik Transistor dengan Thyristor

Untuk ukuran tertentu, thyristor memiliki kemampuan arus dan tegangan yang jauh lebih tinggi daripada transistor. Berikut adalah perbedaan antara thyristor dengan transistor.

1. Thyristor adalah perangkat empat lapisan sedangkan transistor memiliki tiga lapisan.
2. Setelah gerbang dipicu dengan satu pulsa, SCR atau thyristor tetap ON (juga disebut sebagai tindakan regeneratif thyristor) sampai dimatikan melalui teknik tertentu. Tetapi transistor membutuhkan arus basis kontinu untuk tetap dalam keadaan konduksi.
3. Thyristor hanya digunakan sebagai perangkat switching (baik untuk menghidupkan atau mematikan) dimana untuk banyak aplikasi, transistor perlu dioperasikan di wilayah aktif.
4. Thyristor digunakan dalam kisaran kilowatt. Di sisi lain, transistor daya hanya mampu dalam kisaran beberapa ratus watt.
5. Kehilangan daya internal pada transistor daya lebih tinggi dari pada thyristor.

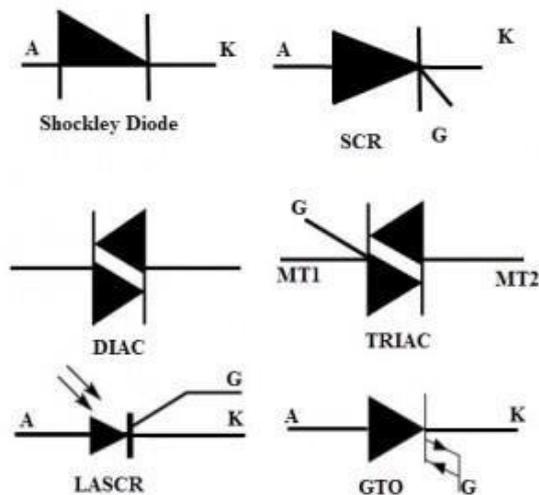
2.4 Jenis-jenis Thyristor

Perangkat keluarga Thyristor diklasifikasikan ke dalam tipe yang berbeda berdasarkan karakteristik dan aplikasinya. Namun pada prinsipnya, pada Thyristor, jika pada komponen diberikan pemicu sinyal di terminal gerbang, akan menyebabkan MENGHIDUPKAN thyristor, sedangkan untuk memamatkannya tergantung pada konfigurasi rangkaian daya. Jadi, kemampuan kontrol eksternal hanya untuk membuat thyristor AKTIF.

Namun beberapa thyristor memiliki sirkuit yang dapat dikontrol secara eksternal untuk menghidupkan dan mematikan thyristor, yaitu melalui pemberian arus/tegangan pada gerbang. Berikut ini adalah komponen yang termasuk dalam jenis thyristor.

1. Thyristor Kontrol Fase (SCR)
2. Thyristor Inverter (SCR kecepatan switching cepat)
3. Asymmetrical Thyristor (ASCRs)
4. Reverse Conducting Thyristor (RCT)
5. Bidirectional Diode Thyristor (DIACs)
6. Gate Assisted Turn-off Thyristor (GATT)
7. Bidirectional Triode Thyristor (TRIAC)
8. Silicon Control Switch (SCS)

9. Silicon Bilateral Switch (SBS)
10. Silicon Unilateral Switch (SUS)
11. Light Activated Silicon Controlled Rectifier (LASCRs)
12. Thyristor Induksi Statis (SITHs)
13. Gate Turn OFF Thyristors (GTO)
14. Static Induction Transistors (SIT)
15. MOS Controlled Thyristor (MCT)
16. Field Controlled Thyristor (FCT)
17. MOS Turn OFF Thyristors (MTO)
18. Emitter Turn OFF Thyristors (ETO)
19. Integrated Gate Commutated Thyristor (IGCT)



Gambar 2.4 Beberapa jenis Thyristor

2.5 Penerapan Thyristor

Karena kecepatan switching yang tinggi dan kapasitas penanganan daya yang tinggi, thyristor banyak digunakan dalam aplikasi kontrol arus bolak-balik pada tingkat tegangan dan arus yang lebih tinggi. Dengan sinyal gerbang yang sesuai dari spesifikasi thyristor, daya keluaran suatu sistem dapat dikontrol menggunakan thyristor.

Pada thyristor bias maju, sinyal *gating* tertunda dapat menghasilkan keluaran terkontrol fase. Pengendalian fase ini dapat menghasilkan tegangan rata-rata yang lebih rendah daripada tegangan rata-rata yang dihasilkan oleh penyearah yang tidak terkontrol. Ini adalah aplikasi terpenting dari thyristor. Berikut ini adalah aplikasi thyristor yang digunakan untuk kontrol daya.

- ✓ Pengendali Kecepatan motor AC dan DC
- ✓ Pemutus arus DC dan AC
- ✓ Iluminasi (peredup cahaya) dan pengontrol suhu
- ✓ Kontrol tekanan dan regulator level cairan
- ✓ Tegangan variabel AC ke penyearah DC
- ✓ Variabel frekuensi DC ke AC inverter
- ✓ Variabel frekuensi AC ke konverter AC atau konverter Cyclo
- ✓ HVDC, transmisi HVAC dan sistem VAR statis.
- ✓ Pengelasan resistif dan sistem pemanas induksi
- ✓ dll.

2.6 Komponen Elektronika selain Thyristor

Selain komponen Thyristor, elektronika daya juga menggunakan komponen lain yang bukan kelompok Thyristor, seperti Diode, BJT dan MOSFET. Komponen-komponen ini, saat ini juga banyak digunakan dalam sistem elektronika daya.

2.7 Latihan

1. Jelaskan mengapa saat ini banyak peralatan rumah tangga yang dibuat dengan sistem elektronika daya!
2. Jelaskan sejarah singkat ditemukannya Thyristor!
3. Gambar dan jelaskan struktur secara umum thyristor!
4. Jelaskan perbedaan struktur thyristor dengan Thyatron dan Transistor!
5. Jelaskan jenis-jenis thyristor serta penerapannya dalam sistem kelistrikan!
6. Sebutkan komponen-komponen lain dalam elektronika daya selain thyristor!

III. KARAKTERISTIK KOMPONEN ELEKTRONIKA DAYA

Kemampuan Akhir yang Direncanakan:

Mahasiswa mampu memahami karakteristik dan prinsip kerja komponen-komponen elektronika daya dan mampu memahami penerapannya dalam sistem kelistrikan.

Petunjuk:

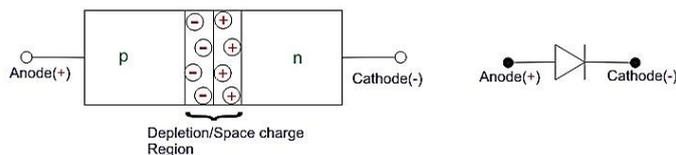
Pada bab ini, materi dibagi menjadi tiga bagian. Mahasiswa diharapkan membaca dan mencermati substansi materi yang disajikan. Setelah selesai, mahasiswa dapat mengerjakan soal latihan, mencocokkan dan mencari jawabannya dalam naskah, apabila dirasa jawaban belum memuaskan. Mahasiswa juga diharapkan mampu mengenal komponen elektronika daya yang beredar di pasar, baik dari jenis/tipe maupun spesifikasinya, dengan mengakses *data sheet* dari internet.

Bagian I : Diode, BJT, MOSFET, SCR, TRIAC dan DIAC

3.1 Diode Daya

3.1.1 Struktur dan Prinsip Kerja

Dioda adalah perangkat semikonduktor paling sederhana yang hanya memiliki dua lapisan, dua terminal dan satu persimpangan. Dioda sinyal biasa memiliki persimpangan yang dibentuk oleh semikonduktor tipe p dan semikonduktor tipe n, kaki yang terhubung dengan tipe p disebut anoda dan kaki sisi lain yang terhubung dengan tipe n disebut katoda. Gambar 3.1 menunjukkan struktur dioda biasa dan simbolnya.

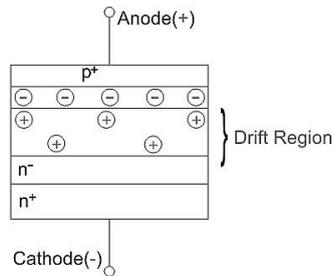


Gambar 3.1 Kontruksi dan simbol diode sinyal

Dalam dioda sinyal, tingkat doping kedua sisi P dan N adalah sama dan karenanya kita mendapatkan persimpangan PN yang seimbang, tetapi

dalam dioda daya, persimpangan yang terbentuk antara P doping yang lebih besar dan doping N lebih sedikit. Karenanya strukturnya terlihat seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.2, sedangkan bentuk fisik tampak pada Gambar 3.3.

Adanya lapisan N^- pada diode daya, merupakan kunci dari dioda daya yang membuatnya cocok untuk aplikasi daya tinggi. Lapisan ini sangat mudah dibuat, bahkan hampir intrinsik, dan karenanya perangkat ini juga dikenal sebagai dioda PIN, di mana i adalah singkatan dari intrinsik. Seperti yang kita lihat pada gambar di atas bahwa kondisi ruang muatan netral masih dipertahankan seperti yang terjadi pada dioda sinyal, tetapi ketebalan daerah **drift** cukup besar dan + merambah ke daerah N^- .



Gambar 3.2 Struktur diode daya

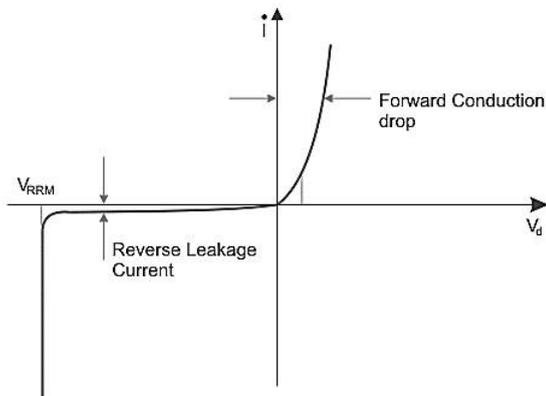
Kondisi dimana **drift** yang cukup besar disebabkan oleh konsentrasi perbedaan doping muatannya, sebagaimana diketahui bahwa ketebalan daerah muatan daerah netral meningkat seiring dengan penurunan konsentrasi doping. Peningkatan ketebalan daerah netral atau daerah muatan netral membantu dioda untuk memblokir tegangan bias balik yang lebih besar, dan karenanya memiliki tegangan dadal yang lebih besar. Namun penambahan lapisan N^- secara signifikan meningkatkan resistansi ohmik dioda, yang menyebabkan diode lebih panas selama keadaan konduksi maju. Karenanya dioda daya dilengkapi dengan pelepas panas (*heat sink*) untuk pembuangan panas yang cepat.



Gambar 3.3 Bentuk fisik Diode daya

3.1.2 Karakteristik Dioda Daya

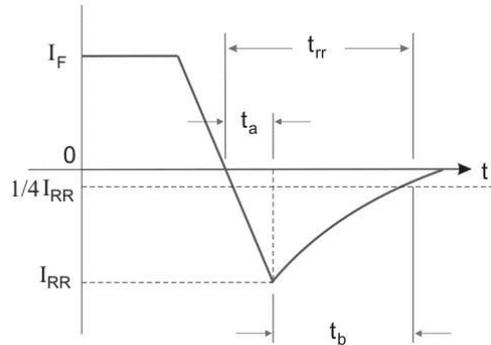
Gambar 3.4 menunjukkan karakteristik V-I dari dioda daya yang hampir mirip dengan dioda sinyal. Dalam dioda sinyal untuk wilayah bias maju, arus meningkat secara eksponensial, namun pada dioda daya, arus maju yang besar menyebabkan ohmik tinggi sehingga fungsi eksponensial menjadi kurva hampir linier. Tegangan balik maksimum yang dapat ditahan dioda digambarkan oleh V_{RRM} , yaitu tegangan puncak balik. Di atas tegangan ini, arus balik menjadi sangat tinggi secara tiba-tiba, dan karena dioda tidak dirancang untuk menghilangkan panas yang besar maka diode daya akan rusak. Tegangan ini disebut sebagai tegangan invers puncak (PIV).



Gambar 3.4 Karakteristik diode daya

Sedangkan gambar 3.5 memperlihatkan karakteristik pemulihan balik dari dioda daya. Setiap kali dioda dimatikan, arus meluruh dari I_F ke nol dan

selanjutnya berlanjut ke arah sebaliknya karena muatan yang disimpan di wilayah muatan ruang wilayah semikonduktor. Arus balik ini mencapai puncak I_{RR} dan sekali lagi mulai mendekati nilai nol dan akhirnya dioda mati setelah waktu t_{rr} . Waktu ini didefinisikan sebagai waktu pemulihan balik dan didefinisikan sebagai waktu antara arus maju instan mencapai nol dan saat arus balik meluruh menjadi 25% dari I_{RR} . Setelah waktu ini, dioda dikatakan mencapai waktu pemblokiran terbalik.



Gambar 3.5 Karakteristik pemulihan terbalik dari dioda daya

Dari gambar 3.5 kita melihat bahwa waktu pemulihan balik (t_{rr}) dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$t_{rr} = t_a + t_b$$

t_a → waktu ketika muatan dari daerah penipisan dihilangkan

t_b → waktu ketika muatan dari daerah semikonduktor dihilangkan

Juga dari gambar tersebut kita dapat mengatakan bahwa

$$I_{rr} = t_a \frac{di}{dt}$$

Dimana, di/dt adalah laju perubahan arus balik.

Daerah yang dibatasi oleh wilayah segitiga pada gambar di atas merupakan arus total yang tersimpan atau arus pemulihan sebaliknya, Q_R . Makanya persamaan bisa ditulis menjadi

$$Q_R = \frac{1}{2} I_{RR} t_{rr}$$

Sekarang, untuk $t_a \approx t_{rr}$, dan dengan melihat kedua persamaan bisa didapatkan bahwa:

$$t_{rr} = \sqrt{\left[\frac{2Q_R}{\left(\frac{di}{dt} \right)} \right]}$$

Substitusi persamaan untuk $t_a \approx t_{rr}$, didapatkan:

$$I_{RR} = \sqrt{2Q_R \left[\frac{di}{dt} \right]}$$

Dari persamaan di atas dapat dilihat bahwa t_r dan I_{RR} tergantung pada Q_R , yang pada gilirannya tergantung pada arus awal maju dioda I_F . Parameter yang menarik lainnya untuk dioda daya adalah karakteristik saat mau mati, yang dikenal sebagai Faktor Kelembutan (Faktor S) yang didefinisikan sebagai rasio antara t_b dan t_a , atau kalau ditulis dalam persamaan, seperti ini.

$$S - factor = \frac{t_b}{t_a}$$

Jika dioda memiliki faktor S satu, itu dikenal sebagai dioda pemulihan lunak dan untuk faktor S kurang dari satu itu dikenal sebagai dioda pemulihan cepat atau tajam. Faktor S secara tidak langsung menunjukkan transien tegangan yang terjadi pada saat dioda dimatikan. Faktor S rendah menyiratkan tegangan transien tinggi, sementara faktor S tinggi menyiratkan tegangan balik osilasi rendah.

Kehilangan daya total selama proses menuju mati adalah produk dari arus dioda dan tegangan selama t_{rr} . Sebagian besar kehilangan daya terjadi selama t_b . Dalam lembar data dioda daya, parameter terpenting yang diberikan adalah $I_{F\text{rata-rata}}$, I_{FRMS} , V_{RRM} , I_t^2 , suhu persimpangan T_j , t_{rr} , S-factor, dan I_{RR} . Selain parameter-parameter yang telah disampaikan, banyak

parameter dan grafik lain juga bisa digunakan untuk menilai kinerja diode daya.

Berdasarkan pada karakteristik tersebut, maka diode daya dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kelompok. Tabel 3.1 memperlihatkan tiga jenis diode daya serta karakteristiknya secara ringkas.

Tabel 3.1 Jenis dan karakteristik Diode Daya

Tipe	Tegangan (V_{RRM})	Arus (I_F)	Waktu pemulihan (t_{rr})	Aplikasi	Catatan
Dioda Tujuan Umum	50-5000 V	1A hingga beberapa ribu Amps	$\sim 25\mu s$	UPS, pengisi daya baterai, pengelasan, traksi dll.	-
Diode Pemulihan Cepat	50-3000 V	1A hingga beberapa ribu Amps	$<5\mu s$	SMP, rangkaian saklar, chopper, pemanas induksi	Doping dilakukan dengan menggunakan platina atau emas
Dioda Schottky	hingga 100V	1-300 A	$\sim ns$	Catu daya dan instrumentasi switching frekuensi sangat tinggi	Sambungan logam-semikonduktor, biasanya Al-Si (tipe-n), perangkat pembawa mayoritas, karenanya waktu switching sangat rendah

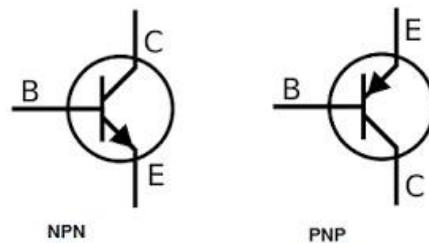
3.2 Bipolar Junction Transistor (BJT)

Transistor daya sambungan bipolar (BJT) atau Transistor Daya, memiliki kemampuan memblokir tegangan tinggi ketika keadaan dalam keadaan OFF dan mengalirkan arus tinggi dalam keadaan ON. Dengan demikian maka kapasitas BJT dalam mengendalikan daya, sangat tinggi. Berkaitan dengan hal tersebut, maka BJT banyak digunakan untuk catu daya mode saklar (SMPS), penguat daya, relay dan driver, pengontrol kecepatan

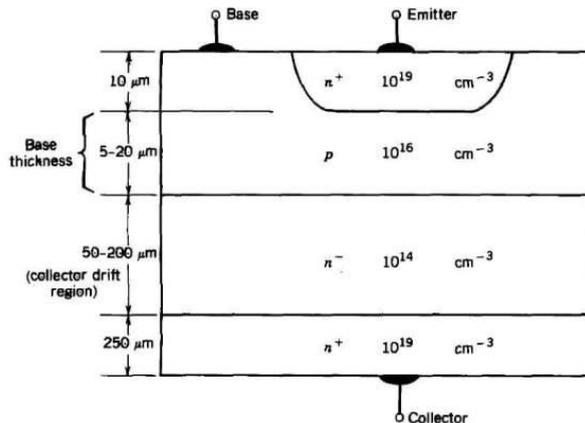
motor ac, inverter DC/AC, sebagai transistor catu daya yang diatur, penguat audio sistem stereo dan rangkaian kontrol daya.

3.2.1 Konstruksi Transistor Daya

BJT daya memiliki tiga terminal Collector (C), Emitter (E) dan Base (B). BJT memiliki struktur empat lapis yang berorientasi vertikal. Struktur vertikal digunakan untuk menambah luas penampang. Ada dua jenis BJT; transistor NPN dan transistor PNP. Dari kedua jenis ini, transistor NPN banyak digunakan dibandingkan dengan transistor PNP. Gambar 3.6 memperlihatkan skema dua jenis BJT tersebut.



Gambar 3.6 Skema BJT NPN dan PNP



Gambar 3.7 Konstruksi Transistor daya

Gambar 3.7 memperlihatkan konstruksi BJT daya. BJT memiliki empat lapisan. Lapisan pertama adalah lapisan emitor yang dikotori lebih

banyak (n+). Lapisan kedua dikotori sedang pada lapisan dasar (p). Lapisan ketiga adalah daerah deplesi kolektor yang didoping ringan (n). Lapisan terakhir adalah lapisan kolektor yang didoping cukup banyak (n+).

Lapisan (n-) meningkatkan kapasitas pemblokiran tegangan transistor karena tingkat doping yang rendah. Lebar lapisan ini menentukan tegangan rusaknya. Kerugian dari lapisan ini adalah bahwa adanya penurunan tegangan dan peningkatan resistansi perangkat, yang meningkatkan kehilangan daya. Kapasitas daya transistor jenis ini sangat besar, dan ini mengakibatkan BJT harus membuang tenaga dalam bentuk panas. Terkadang, *heatsink* digunakan untuk meningkatkan area efektif pelepasan panas dan karena itu meningkatkan kapasitas disipasi daya. *Heatsink* yang digunakan umumnya terbuat dari logam.

3.2.2 Karakteristik I-V

Karakteristik I-V BJT daya terbagi menjadi empat wilayah, yaitu daerah cut-off, daerah aktif, daerah kuasi-saturasi dan daerah saturasi jenuh. Gambar 3.8 memperlihatkan karakteristik BJT dan 4 daerah tersebut. Untuk menjelaskan karakteristik tersebut, maka perlu diperhatikan bahwa dalam struktur BJT terdapat dua deplesi, yaitu Basis-Emitor (BE) dan Kolektor-Basis (CB).

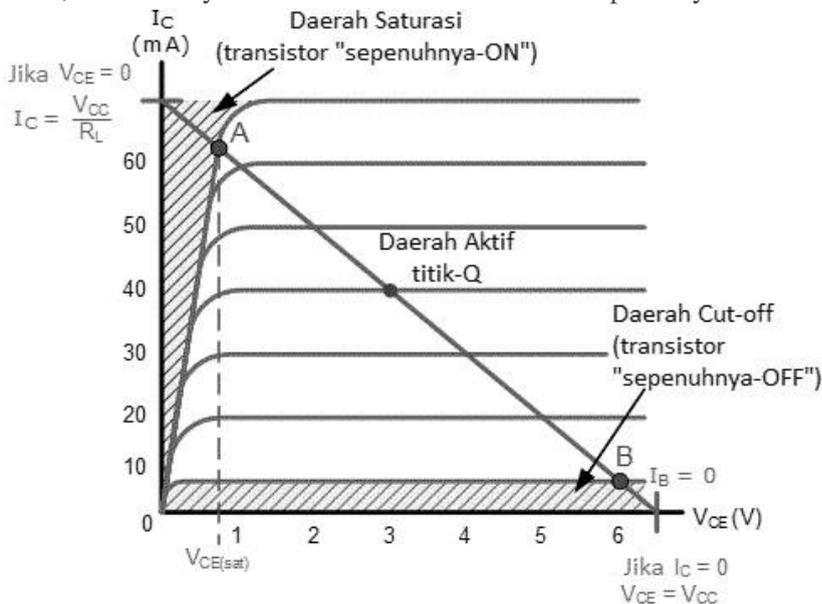
a. Wilayah cut-off

Persambungan pada BE dan CB transistor merupakan sambungan dalam kondisi panjar mundur atau bias balik. Arus basis $I_B = 0$ dan arus kolektor I_C sama dengan arus bocor balik I_{CEO} . Daerah di bawah karakteristik untuk $I_B = 0$ adalah daerah cut-off. Di wilayah ini, BJT memiliki resistansi yang besar. Karenanya kondisi ini setara dengan sirkuit terbuka.

b. Wilayah aktif

Persambungan BE pada kondisi adalah bias maju dan persimpangan CB adalah bias balik. Arus kolektor I_C meningkat sedikit dengan peningkatan tegangan V_{CE} dan jika I_B dinaikkan. Hubungan I_B dan I_C adalah, $I_C = \beta_{dc} I_B$ berlaku pada daerah aktif ini. Jika BJT digunakan sebagai penguat atau sebagai transistor rangkaian regulator tegangan, maka

transistor beroperasi pada wilayah ini. Pada daerah ini terjadi resistansi yang dinamis, dan besarnya resistansi akan menentukan disipasi daya.



Gambar 3.8 Karakteristik Transistor daya

c. Wilayah kuasi-saturasi

Wilayah kuasi-saturasi berada di antara saturasi penuh dan wilayah aktif. Wilayah ini ada karena lapisan penyimpangan yang dikotori ringan. Ketika BJT beroperasi pada frekuensi tinggi, BJT dioperasikan di wilayah ini. Kedua persimpangan itu bias maju. Pada kondisi ini, transistor memiliki resistansi lebih rendah dibandingkan dengan pada wilayah aktif. Jadi, *power loss* lebih sedikit. Di wilayah ini, perangkat tidak mengalami saturasi yang dalam, sehingga bisa mati dengan cepat. Oleh karena itu, daerah ini dapat digunakan untuk aplikasi frekuensi tinggi.

d. Wilayah saturasi jenuh

BJT daya berubah ke wilayah saturasi-jenuh dari wilayah kuasi-saturasi dengan meningkatkannya arus basis. Wilayah ini juga dikenal sebagai wilayah saturasi dalam. Besarnya resistansi di wilayah ini minimal. Resistansinya pastinya lebih kecil dari resistansi di wilayah kuasi-saturasi. Jadi, ketika BJT beroperasi di wilayah ini, disipasi listrik

minimal. Perangkat bertindak sebagai sakelar tertutup saat beroperasi di wilayah ini. Tapi butuh lebih banyak waktu untuk mematikan. Jadi, region ini hanya cocok untuk aplikasi *switching* frekuensi rendah. Di wilayah ini, kedua perambungan merupakan bias maju. Arus kolektor tidak lagi sebanding dengan arus basis, I_C akan konstan, yaitu sebesar $I_{C(sat)}$ dan tidak bergantung pada nilai arus basis.

3.2.3 Prinsip Kerja Transistor Daya

Prinsip kerja transistor daya pada umumnya akan memfungsikan transistor sebagai saklar. Transistor akan mengalami cut-off jika arus yang mengalir pada basis sangat kecil dan kondisi ini akan membuat kolektor dan emitor seperti rangkaian terbuka. Sebaliknya transistor akan pada kondisi jenuh apabila arus yang melalui basis besar, dan antara kolektor dan emitor seperti rangkaian hubung singkat, dengan begitu tegangan antara kolektor dan emitor V_{CE} adalah 0 Volt.

3.3 MOSFET

3.3.1 Karakteristik Umum

MOSFET adalah perangkat tri-terminal, merupakan piranti unipolar, dengan sistem kontrol berupa tegangan. Selain itu komponen ini juga memiliki impedansi input tinggi dan merupakan bagian integral dari berbagai macam sirkuit elektronik. Tiga kaki pada perangkat ini, yaitu Drain (D), Source (S) dan Gate (G).

MOSFET dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis yaitu, tipe depleksi (depletion) dan tipe peningkatan (enhancement), masing-masing tergantung pada apakah mereka memiliki saluran dalam keadaan awal atau tidak. Selanjutnya, masing-masing jenis akan dapat berupa perangkat saluran-p atau saluran-n, karena mereka dapat memiliki arus konduksi masing-masing karena lubang atau elektron.

Namun terlepas dari perbedaan strukturalnya, semuanya terlihat bekerja berdasarkan prinsip dasar yang sama, tentu saja karena semuanya menunjukkan kurva karakteristik yang hampir serupa, tetapi untuk nilai tegangan yang berbeda. Gambar 3.9 memperlihatkan bentuk fisik MOSFET.



Gambar 3.9 Bentuk fisik Mosfet

Secara umum, setiap MOSFET terlihat menunjukkan tiga daerah operasi yaitu,

1. *Cut-Off*

Daerah *cut-off* wilayah merupakan wilayah di mana MOSFET akan OFF karena tidak akan ada arus mengalir melalui MOSFET. Di wilayah ini, MOSFET berperilaku seperti sakelar terbuka dan oleh karena itu digunakan saat diperlukan untuk berfungsi sebagai sakelar elektronik.

2. Daerah Ohmic atau Daerah Linear

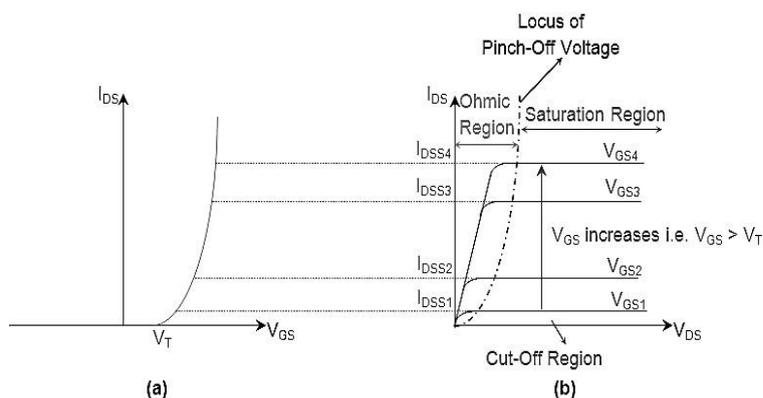
Ohmic atau daerah linier adalah suatu daerah dimana pada saat I_{DS} meningkat dengan kenaikan V_{DS} . Saat MOSFET dibuat untuk beroperasi di wilayah ini, MOSFET dapat digunakan sebagai amplifier.

3. Saturasi

Daerah wilayah saturasi, MOSFET memiliki I_{DS} konstan meskipun V_{DS} dinaikkan, sampai besarnya V_{DS} melebihi nilai pinch-off tegangan V_P . Dalam kondisi ini, perangkat akan bertindak seperti sakelar seperti saklar tertutup dan merupakan nilai jenuh arus I_{DS} . Akibatnya, wilayah operasi ini dipilih saat MOSFET diperlukan untuk melakukan operasi pensaklaran.

3.3.2 MOSFET Tipe Peningkatan Saluran N

Gambar 3.10 sebelah kiri (a) menunjukkan karakteristik transfer (arus drain-to-source I_{DS} versus tegangan gate-to-source V_{GS}) dari MOSFET n-channel tipe enhancement. Dari gambar ini, jelas bahwa arus yang melalui perangkat akan menjadi nol sampai V_{GS} melebihi nilai ambang tegangan V_T . Ini karena dalam keadaan tersebut, perangkat akan kehilangan saluran yang akan menghubungkan saluran pembuangan dan terminal sumber. Dalam kondisi ini, peningkatan V_{DS} tidak akan menghasilkan aliran arus seperti yang ditunjukkan oleh karakteristik keluaran yang sesuai (I_{DS} versus V_{DS}) yang ditunjukkan pada gambar kanan (b). Kondisi ini merupakan representasi wilayah *cut-off* MOSFET.



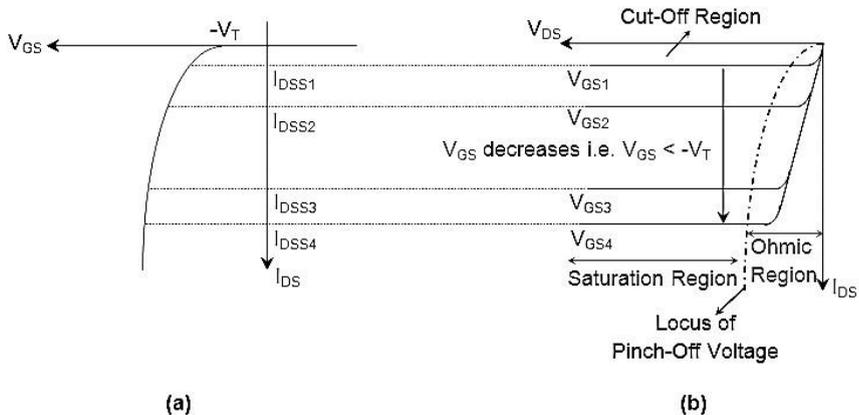
Gambar 3.10 Karakteristik MOSFET tipe Peningkatan saluran n

Selanjutnya, setelah V_{GS} melintasi V_T , arus yang melalui perangkat meningkat dengan peningkatan I_{DS} (wilayah Ohmic), dan kemudian menuju jenuh ke nilai yang ditentukan oleh V_{GS} (wilayah operasi saturasi) yaitu saat V_{GS} meningkat, juga arus saturasi yang mengalir melalui perangkat juga meningkat. Hal ini dibuktikan oleh Gambar 3.10(b) di mana I_{DSS2} lebih besar dari I_{DSS1} karena $V_{GS2} > V_{GS1}$, I_{DSS3} lebih besar dari I_{DSS2} karena $V_{GS3} > V_{GS2}$, dan lain sebagainya. Selanjutnya gambar juga menunjukkan locus pinch-off tegangan (hitam kurva terputus), dari mana V_P terlihat meningkat dengan peningkatan V_{GS} .

3.3.3 MOSFET tipe Peningkatan p-channel

Gambar 3.11 menunjukkan karakteristik transfer **type-p MOSFET enhancement**. Dari sini jelas bahwa I_{DS} tetap nol (negara cutoff) sampai V_{GS} menjadi sama dengan $-V_T$. Pada saat ini, akan mulai terbentuk saluran untuk menghubungkan terminal saluran dari perangkat dengan terminal sumbernya. Setelah ini, I_{DS} terlihat meningkat ke arah sebaliknya (artinya peningkatan I_{SD} , yang menandakan peningkatan arus perangkat yang akan mengalir dari sumber ke drain). Ini terjadi saat ada penurunan nilai V_{DS} . Ini berarti bahwa perangkat berfungsi di wilayah ohmiknya dengan arus yang melalui perangkat meningkat dengan meningkatnya tegangan yang diberikan (yang akan menjadi V_{SD}).

Namun, saat V_{DS} menjadi sama dengan $-V_P$, perangkat memasuki saturasi di mana besar arus jenuh (I_{DSS}) mengalir melalui perangkat, seperti yang ditentukan oleh nilai V_{GS} . Lebih lanjut perlu dicatat bahwa nilai arus saturasi yang mengalir melalui perangkat terlihat meningkat karena V_{GS} menjadi semakin negatif yaitu arus saturasi untuk V_{GS3} lebih besar daripada untuk V_{GS2} dan dalam kasus V_{GS4} jauh lebih besar dari keduanya karena V_{GS3} lebih negatif daripada V_{GS2} sementara V_{GS4} jauh lebih negatif jika dibandingkan dengan salah satu dari keduanya (Gambar 11.b). Selain itu, dari lokus tegangan pinch-off itu juga jelas bahwa sebagai V_{GS} menjadi lebih dan lebih negatif, bahkan negatif dari V_P juga meningkat.

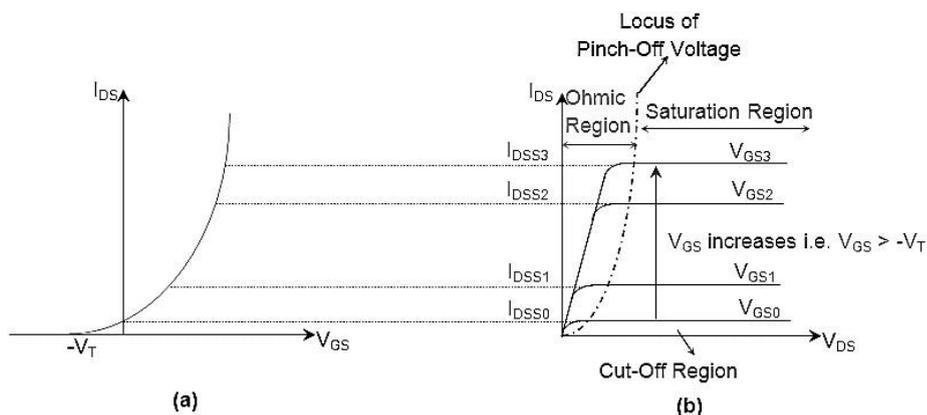


Gambar 3.11 Karakteristik MOSFET tipe Peningkatan p-channel

3.3.4 MOSFET Tipe Depleksi N-Channel

Karakteristik transfer MOSFET depleksi n-channel ditunjukkan oleh Gambar 3.12 (a). Gambar tersebut menunjukkan bahwa perangkat memiliki arus yang mengalir bahkan ketika V_{GS} adalah 0V. Ini menunjukkan bahwa perangkat ini bekerja bahkan ketika terminal gerbang dibiarkan tidak ada bias, yang selanjutnya ditekan oleh kurva V_{GS0} pada Gambar 3.12 (b). Dengan kondisi ini, arus yang melalui MOSFET terlihat meningkat dengan peningkatan nilai V_{DS} (wilayah Ohmic) hingga V_{DS} menjadi sama dengan tegangan pinch-off V_P . Setelah ini, I_{DS} akan menjadi jenuh ke tingkat I_{DSS} tertentu (wilayah operasi saturasi) yang meningkat dengan peningkatan V_{GS} yaitu $I_{DSS3} > I_{DSS2} > I_{DSS1}$, sebagai $V_{GS3} > V_{GS2} > V_{GS1}$. Selanjutnya, lokus tegangan pinch-off juga menunjukkan bahwa V_P meningkat dengan peningkatan V_{GS} .

Namun perlu dicatat bahwa, jika diperlukan pengoperasian perangkat ini dalam keadaan terputus, maka V_{GS} harus dibuat negatif dan setelah itu menjadi sama dengan $-V_T$, konduksi melalui perangkat berhenti ($I_{DS} = 0$) karena saluran tipe-n-nya dicabut (Gambar 3.12 (a)).



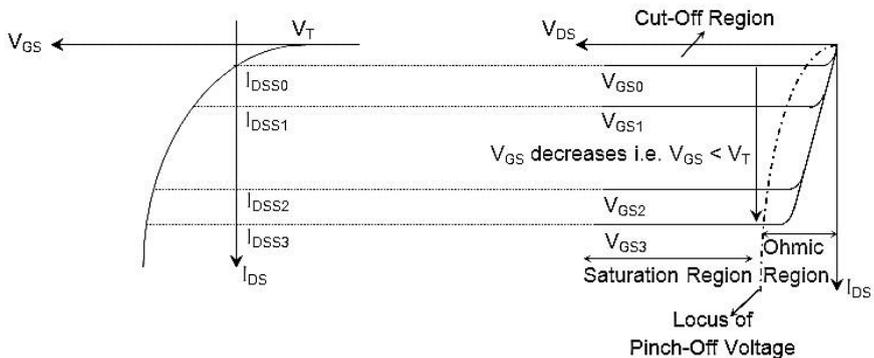
Gambar 3.12 Karakteristik MOSFET depletion-type n

3.3.5 MOSFET Depleksi Tipe P-Channel

Karakteristik transfer MOSFET mode depleksi p-channel pada Gambar 3.13 (a) menunjukkan bahwa perangkat ini akan ON secara normal, dan dengan demikian berjalan bahkan tanpa adanya V_{GS} . Ini karena

MOSFET dicirikan oleh adanya saluran dalam keadaan awal yang memiliki I_{DS} bukan nol untuk $V_{GS} = 0$ V, seperti yang ditunjukkan oleh kurva V_{GS0} pada Gambar 13.b. Nilai tersebut meningkat saat dengan peningkatan V_{DS} (wilayah ohmic operasi), dan terlihat jenuh setelah V_{DS} melebihi V_P (daerah saturasi operasi). Nilai arus saturasi ini ditentukan oleh V_{GS} , dan terlihat meningkat ke arah negatif karena V_{GS} menjadi semakin negatif. Misalnya, arus saturasi untuk V_{GS3} lebih besar dari pada V_{GS2} yang mana lebih besar jika dibandingkan dengan V_{GS1} . Ini karena V_{GS2} lebih negatif jika dibandingkan dengan V_{GS1} , dan V_{GS3} jauh lebih negatif jika dibandingkan dengan keduanya.

Selanjutnya, kita juga dapat mencatat dari lokus titik pinch-off bahwa bahkan V_P mulai menjadi semakin negatif ketika negativitas yang terkait dengan V_{GS} meningkat. Terakhir, hal ini terbukti dari Gambar 3.13 (a) yang memperlihatkan fenomena untuk beralih dari OFF, salah satu kebutuhan untuk meningkatkan V_{GS} sehingga menjadi sama atau lebih besar dari tegangan ambang V_T . Ini karena, ketika dilakukan, perangkat ini akan kehilangan saluran tipe-p mereka, yang selanjutnya mendorong MOSFET ke wilayah operasi cut-off mereka.



Gambar 3.13 Karakteristik MOSFET tipe depleksi p-channel

3.3.6 Ringkasan Karakteristik MOSFET

Penjelasan yang diberikan di atas dapat diringkas dalam bentuk tabel 3.2 berikut ini.

Tabel 3.2 Karakteristik MOSFET

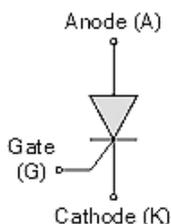
Jenis MOSFET	Wilayah Operasi		
	Cut off	Ohmic / Linear	Jenuh
n-channel Enhancement-type	$V_{GS} < V_T$	$V_{GS} > V_T$ dan $V_{DS} < V_P$	$V_{GS} > V_T$ dan $V_{DS} > V_P$
Tipe peningkatan p-channel	$V_{GS} > -V_T$	$V_{GS} < -V_T$ dan $V_{DS} > -V_P$	$V_{GS} < -V_T$ dan $V_{DS} < -V_P$
n-channel Depletion-type	$V_{GS} < -V_T$	$V_{GS} > -V_T$ dan $V_{DS} < V_P$	$V_{GS} > -V_T$ dan $V_{DS} > V_P$
p-channel Depletion-type	$V_{GS} > V_T$	$V_{GS} < V_T$ dan $V_{DS} > -V_P$	$V_{GS} < V_T$ dan $V_{DS} < -V_P$

3.4 Silicon Controlled Rectifier (SCR)

SCR merupakan salah satu komponen dari keluarga Thyristor. Sebagaimana diketahui bahwa Thyristor merupakan salah satu tipe devais semikonduktor daya yang penting dan banyak digunakan pada sistem kelistrikan. Thyristor digunakan sebagai saklar/bistabil, beroperasi pada keadaan non konduksi dan konduksi. Thyristor dapat diasumsikan sebagai saklar ideal, walaupun pada prakteknya Thyristor memiliki batasan karakteristik tertentu. Beberapa komponen lain yang termasuk Thyristor antara lain PUT (*Programmable Uni-junction Transistor*), UJT (*Uni-Junction Transistor*), GTO (*Gate Turn Off switch*), dan LASCR (*Light Activated Silicon Controlled Rectifier*).

3.4.1 Prinsip Dasar

SCR adalah perangkat semikonduktor multi-layer, oleh karena itu ada kata yang disebut pada nama komponen ini, yaitu **Silikon**. Komponen ini membutuhkan sinyal gerbang untuk mengubahnya menjadi "ON", bagian ini yang kemudian memunculkan nama "**Controlled**", nama satu lagi karena perangkat berperilaku seperti dioda penyearah, maka ada bagian nama "**Rectifier**" dari nama komponen. Simbol komponen ini diperlihatkan pada Gambar 3.14.



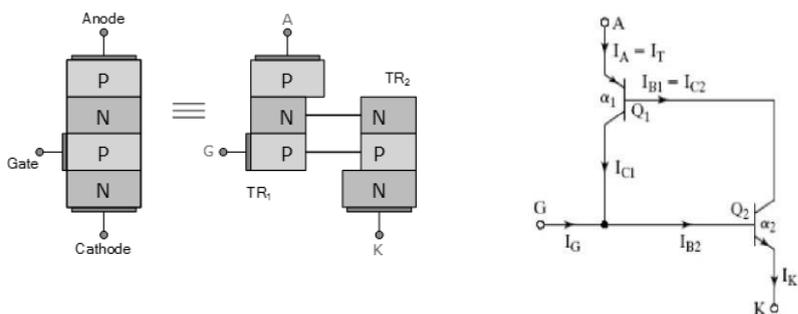
Gambar 3.14 Simbol SCR

SCR adalah perangkat semikonduktor empat lapisan (PNPN) yang berisi tiga persambungan PN. Seperti dioda, SCR adalah perangkat searah, yang hanya akan menghantarkan arus dalam satu arah saja, tetapi tidak seperti dioda, SCR dapat dibuat untuk beroperasi sebagai sakelar sirkuit terbuka atau sebagai dioda penyearah, tergantung pada caranya gerbang SCR dipicu. Dengan kata lain, SCR hanya dapat beroperasi dalam mode *switching* dan tidak dapat digunakan untuk amplifikasi.

SCR adalah salah satu dari beberapa perangkat semikonduktor daya, bersama dengan Triac (*Triode AC*), Diacs (*Diode AC*) dan UJT (*Unijunction Transistor*), semuanya merupakan sakelar AC yang sangat cepat, untuk mengendalikan tegangan AC yang besar dan arus. Jadi pembaca buku ini dapat menggunakan perangkat ini untuk mengendalikan motor AC, lampu dan untuk kontrol fase. SCR adalah perangkat tiga terminal yaitu "Anode", "Cathode" dan "Gate" dan terdiri dari tiga persimpangan PN yang dapat dinyalakan "ON" dan "OFF" dengan kecepatan yang sangat cepat, atau dapat diubah "ON" untuk durasi waktu yang bervariasi selama setengah siklus guna mengalirkan daya sesuai kebutuhan ke beban.

3.4.2 Analogi Dua Transistor Thyristor

Pengoperasian SCR dapat dijelaskan paling mudah dengan mengasumsikannya sebagai komponen yang terdiri dari dua transistor. Pada gambar 3.15 ditunjukkan bahwa arus kolektor dari transistor NPN TR2 disambungkan langsung dengan basis transistor PNP TR1, sedangkan arus kolektor TR1 dimasukkan ke basis TR2. Kedua transistor ini saling terhubung dan bergantung satu sama lain, konduksi transistor didapatkan dari arus basis-emitor dan dari arus kolektor-emitor yang lain. Jadi salah satu transistor diberi arus basis, maka baru akan terjadi arus Anoda ke Katoda.



Gambar 3.15 Analogi dua transistor untuk SCR

Persamaan untuk transistor 1 PNP adalah:

$$I_{C1} = \alpha_1 I_{E1} + I_{CBO1}; \quad I_{E1} = I_A$$

atau

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

Sedangkan untuk transistor 2 NPN persamaannya adalah:

$$I_{C2} = \alpha_2 I_{E2} + I_{CBO2}$$

dan

$$I_{E2} = I_K$$

Pada sisi lain, arus katode adalah:

$$I_K = I_A + I_G$$

Dengan demikian persamaannya menjadi:

$$I_{C2} = \alpha_2 (I_A + I_G) + I_{CBO2}$$

Dari gambar juga dapat ditentukan bahwa:

$$I_A = I_{C_1} + I_{C_2}$$

sehingga persamaan menjadi:

$$I_A = \alpha_1 I_A + I_{CBO_1} + \alpha_2 (I_A + I_G) + I_{CBO_2}$$

dari gambar dapat juga ditentukan bahwa

$$I_{C_2} = I_{B_1}$$

akhirnya dapat diperoleh b

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_G + I_{CBO_1} + I_{CBO_2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

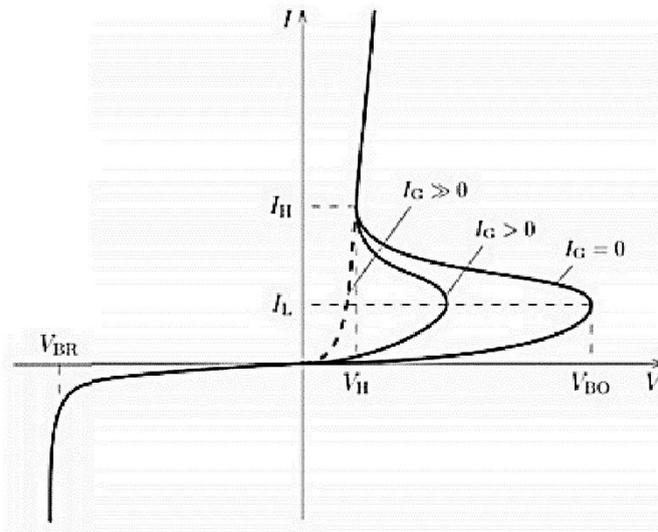
Dari persamaan tersebut tampak bahwa untuk menyalakan SCR, maka perlu ada arus pada gerbang. Arus gerbang ini akan mempersempit bahkan akan menghilangkan persambungan semikonduktor yang di tengah. Dan setelah ada arus gerbang, maka SCR akan ON. Setelah SCR dalam kondisi "ON" dan melewati arus dari anoda ke katode, maka keberadaan sinyal gerbang tidak lagi berpengaruh, karena berdasarkan analogi dua transistor tersebut, maka kedua transistor tersebut akan saling mengunci, dan akan terbuka jika kondisi persambungan yang ada dalam komponen dipulihkan melalui pemutusan arus atau dengan cara antara anoda dan katoda diberikan tegangan balik, anode lebih negatif dibandingkan katode.

3.4.3 Kurva Karakteristik I-V SCR

Seperti dijelaskan sebelumnya bahwa untuk membuat thyristor menjadi ON adalah dengan memberi arus trigger pada gerbang, yaitu lapisan P yang dekat dengan katoda. Karena letaknya yang dekat dengan katoda, pin *gate* dapat juga disebut pin *gate* katoda (*cathode gate*).

Pemberian arus gate I_G yang semakin besar dapat menurunkan tegangan *breakover* (V_{bo}) sebuah SCR. Tampak pada gambar 3.16 bahwa tegangan ini adalah tegangan minimum SCR agar menjadi ON. Kondisi ON ini bisa terjadi pada tegangan *forward* yang sangat kecil, misalnya 1 volt saja atau bahkan lebih kecil lagi.

Pada gambar juga ditunjukkan adanya arus I_H , yaitu arus *holding*, yaitu besarnya arus yang akan mempertahankan SCR tetap ON. Ini berarti bahwa agar SCR tetap ON maka arus yang mengalir dari Anode ke Katode harus berada di nilai I_H , jika di bawah I_H maka kondisi ON tidak akan terkunci.



Gambar 3.16 Karakteristik SCR

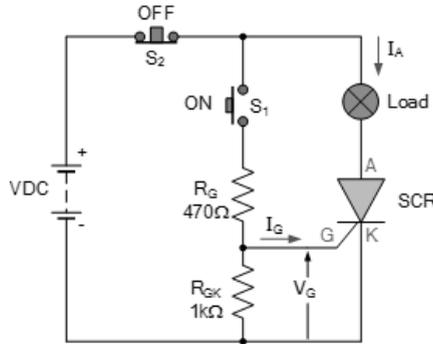
3.4.4 Sirkuit Sakelar SCR DC

Rangkaian SCR "on-off" sederhana ini menggunakan SCR sebagai sakelar, yang dapat digunakan untuk mengontrol lampu, rangkaian kontrol on-off untuk motor, pemanas, atau beban DC lainnya. SCR yang pada kondisi bias maju karena menggunakan sumber DC yang dikonfigurasi seperti gambar 3.17, untuk proses konduksinya dapat dilakukan dengan menutup tombol Normally Open (NO) S_1 . S_1 ini kemudian akan menghubungkan terminal Gerbang ke suplai DC dengan melalui resistor Gerbang, R_G sehingga memungkinkan arus mengalir ke Gerbang dengan nilai tertentu. Dan selanjutnya SCR akan ON.

Setelah SCR ON, kondisi aliran arus akan mengunci sendiri dan tetap ON bahkan ketika tombol S_1 sudah tidak ditekan atau dilepaskan. Tetapi ada syaratnya, yaitu asalkan arus beban yang mengalir melebihi arus untuk mengunci, yaitu I_H . Pada saat ini ketika ada penekanan tombol S_1 tidak akan ada pengaruh, karena rangkaian telah benar-benar dalam kondisi mengunci.

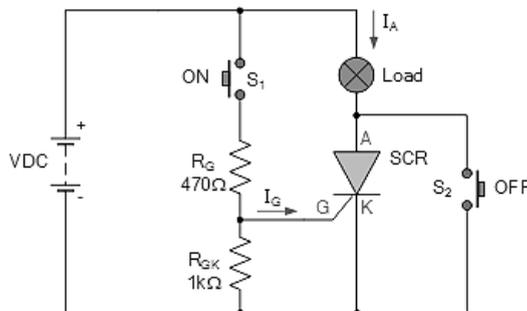
Salah satu keuntungan menggunakan SCR sebagai sakelar pada rangkaian DC adalah bahwa sistem memiliki kemampuan mengalirkan arus yang cukup tinggi. SCR adalah perangkat yang beroperasi secara

spontan, arus Gerbang yang kecil dapat mengontrol arus Anoda yang jauh lebih besar. Resistor Katoda Gerbang R_{GK} umumnya disertakan untuk mengurangi sensitivitas Gerbang dan meningkatkan kemampuan dv/dt sehingga mencegah pemicuan yang menimbulkan kerusakan pada perangkat.



Gambar 3.17 Rangkaian DC SCR

SCR yang telah mengunci sendiri ke dalam status ON, hanya dapat dikembalikan pada kondisi awal dengan memutus catu daya dan mengurangi arus Anoda hingga di bawah nilai arus penahan minimum SCR (I_H). Caranya adalah dengan membuka tombol *Normally Closed* (NC) S_2 yang biasanya tertutup. Jika S_2 ditekan, maka arus anode ke katode akan terputus atau arus menjadi nol, sehingga memaksa untuk mematikan SCR. Namun, salah satu kelemahan dari rangkaian SCR DC ini adalah bahwa sakelar NC mekanis S_2 harus memiliki kapasitas yang cukup besar. Jika demikian, kita bisa mengganti SCR dengan sakelar mekanis besar. Salah satu cara untuk mengatasi kebutuhan sakelar kapasitas yang besar adalah dengan menghubungkan sakelar secara paralel.



Gambar 3.18 Rangkaian DC SCR alternatif

3.4.5 Sirkuit SCR DC Alternatif

Pada sakelar SCR alternatif ini, SCR menerima tegangan yang diperlukan dan sinyal pulsa Gerbang seperti pada rangkaian sebelumnya, tetapi sakelar NC yang besar dari rangkaian sebelumnya, diganti dengan sakelar NO yang lebih kecil yang dipasang secara paralel dengan SCR. Gambar 3.18 adalah sistem yang dimaksud. Aktivasi sakelar S_2 dilakukan dengan membuat S_2 menjadi korsleting antara SCR Anoda dan Katoda, sehingga akan menghentikan perangkat dari konduksi, yaitu dengan mengurangi arus hingga di bawah nilai minimumnya.

3.4.6 Ringkasan SCR

Silicon Controlled Rectifier yang biasa dikenal sebagai SCR adalah perangkat semikonduktor PNPN dengan tiga persambungan yang dapat dianggap sebagai dua transistor yang saling terhubung yang dapat digunakan dalam pensaklaran beban listrik yang berat. SCR dapat terkunci ON dengan pulsa tunggal arus positif yang diterapkan ke terminal Gerbang dan akan tetap ON tanpa batas waktu sampai arus Anoda ke Katoda turun di bawah level kait minimumnya.

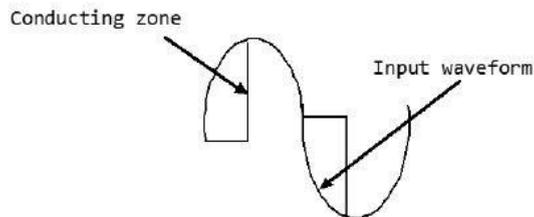
Karakteristik statis dari SCR secara prinsip dapat diringkas seperti berikut ini:

- SCR adalah perangkat semikonduktor yang hanya dapat beroperasi dalam mode *switching*.
- SCR adalah perangkat yang dioperasikan berbasis arus, arus Gerbang kecil mengontrol arus Anoda yang lebih besar.
- Arus hanya akan mengalir ketika dilakukan bias maju dan ada arus pemicu diterapkan ke Gerbang.
- SCR bertindak seperti dioda penyearah setelah dipicu "ON".
- Arus anoda harus lebih besar daripada arus *holding* untuk menjaga konduksi.
- Memblokir arus saat bias mundur, tidak akan terpengaruh pada ada atau tidak adanya arus Gerbang.
- Setelah dipicu ON, SCR akan mengunci konduksi, bahkan ketika arus gerbang tidak lagi diterapkan, asalkan arus Anoda di atas arus kait.

3.5 Bidirectional Triode Thyristor (TRIAC)

3.5.1 Prinsip Dasar

TRIAC adalah singkatan dari *Triode for Alternating Current*. TRIAC adalah perangkat semikonduktor dengan tiga terminal yang mengontrol aliran arus, sehingga dinamai Triac. Tidak seperti SCR, TRIAC adalah dua arah sedangkan SCR adalah satu arah. Triac sangat ideal untuk sistem listrik yang menggunakan daya AC, untuk tujuan pengontrolan aliran arus pada kedua bagian siklus dari arus bolak-balik, baik yang positif maupun negatif. Gambar 3.19 memperlihatkan pengontrolan tersebut.



Gambar 3.19 Pengontrolan arus pada Triac

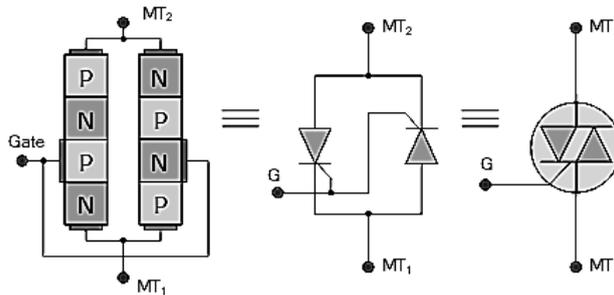
3.5.2 Simbol dan Konstruksi Triac

Triac adalah komponen 4-lapis, PNP di arah positif dan NPN di arah negatif, perangkat dua arah tiga terminal yang memblokir arus dalam keadaan OFF bertindak seperti sakelar sirkuit terbuka. Triac tidak seperti thyristor konvensional, Triac dapat mengalirkan arus pada arah yang tertentu, positif atau negatif, ketika saat gerbang dipicu oleh pulsa tunggal. Gambar 3.20 adalah konstruksi, analogi dalam dua SCR dan simbol Triac.

Triac memiliki empat mode operasi, yang tergantung pada arah arus (polaritas tegangan) dan arus gerbang pemicu (polaritas tegangan). Empat mode tersebut adalah sebagai berikut.

- Mode I+ = MT₂ arus positif (+ve), arus gerbang positif (+ve)
- Mode I- = MT₂ arus positif (+ve), arus gerbang negatif (-ve)
- Mode III+ = MT₂ arus negatif (-ve), arus gerbang positif (+ve)
- Mode III- = MT₂ arus negatif (-ve), arus gerbang negatif (-ve)

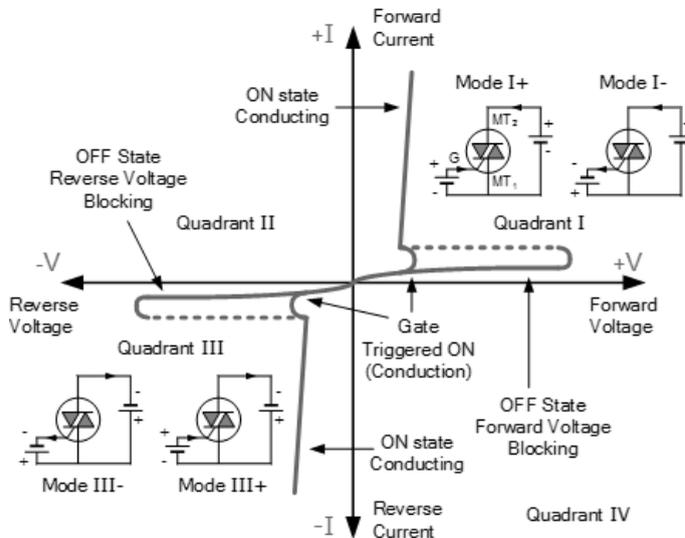
Keempat mode di mana triac dapat dioperasikan ini ditunjukkan dengan menggunakan kurva karakteristik I-V Triac pada Gambar 3.21.



Gambar 3.20 Konstruksi, analogi dan simbol Triac

3.5.3 Kurva Karakteristik I-V Triac

Dalam Kuadran I, Triac biasanya dipicu menjadi konduksi oleh arus gerbang positif, diberi label sebagai mode I+. Tapi itu juga bisa dipicu oleh arus gerbang negatif, mode I-. Demikian pula, di Kuadran III, memicu dengan arus gerbang negatif, $-I_G$, maka akan terjadi mode III-. Sebaliknya untuk $+I_G$ akan muncul mode III+. Mode I- dan III+, adalah konfigurasi yang kurang sensitif yang membutuhkan arus gerbang yang lebih besar. Pemicuan triac yang lebih umum adalah dengan mode I+ dan III-.



Gambar 3.21 Karakteristik Triac

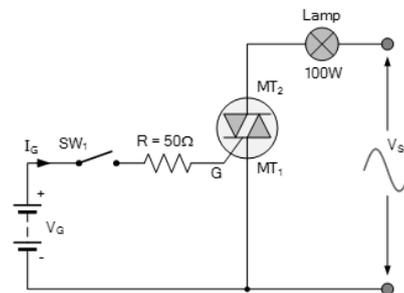
Seperti penyearah terkontrol silikon (SCR), triac juga membutuhkan arus penahanan minimum I_H untuk mempertahankan konduksi. Dengan analogi dua SCR digabungkan menjadi satu perangkat menjadi triac, keduanya masih menunjukkan karakteristik kelistrikan individu seperti tegangan dadal yang berbeda, arus holding dan tingkat tegangan pemicu, jadi persis sama seperti perangkat SCR yang terpisah.

3.5.4 Aplikasi Triac

Triac ini paling banyak digunakan untuk *switching* dan kontrol daya sistem AC. Triac dapat diaktifkan “ON” oleh salah satu positif atau negatif Gerbang pulsa, terlepas dari polaritas pasokan AC pada waktu itu. Ini membuat triac ideal dapat digunakan untuk mengontrol lampu atau beban motor AC dengan rangkaian sakelar triac yang sangat sederhana seperti diberikan di bawah ini.

a. Sirkuit Sakelar Triac DC

Rangkaian pada Gambar 3.22 menunjukkan rangkaian sakelar triac daya yang dipicu DC sederhana. Dengan sakelar SW1 terbuka, tidak ada arus yang mengalir ke Gerbang triac dan oleh karena itu lampu "OFF". Ketika SW1 ditutup, arus gerbang mengalir ke triac dari suplai baterai V_G melalui resistor R dan triac didorong untuk konduksi penuh. Pada kondisi ini Triac bertindak seperti sakelar tertutup dan daya penuh ditarik oleh lampu dari suplai sinusoidal.



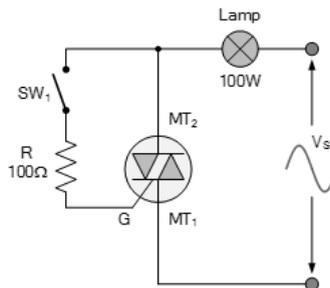
Gambar 3.22 Sirkuit Sakelar Triac DC

Selama baterai memasok arus Gerbang positif ke triac dengan cara sakelar SW1 ditutup, triac akan terus-menerus diberi gerbang dalam mode I+ dan III +. Tentu saja, rangkaian sakelar triac sederhana ini memerlukan

suplai Gerbang positif atau negatif tambahan untuk memicu triac ke konduksi. Tetapi kita juga dapat memicu triac menggunakan tegangan suplai AC sebagai tegangan pemicu gerbang, sebagaimana akan dijelaskan pada bagian berikut ini.

b. Sirkuit Sakelar Triac AC

Gambar 3.23 memperlihatkan rangkaian triac yang digunakan sebagai sakelar daya AC statis sederhana yang menyediakan fungsi "ON" - "OFF" yang serupa dalam pengoperasiannya dengan rangkaian DC sebelumnya. Ketika sakelar SW1 terbuka, triac bertindak sebagai sakelar terbuka dan arus yang melewati lampu nol. Ketika SW1 ditutup triac di-gated "ON" melalui resistor pembatas arus R dan segera *self-latch* setelah dimulainya setiap setengah siklus, sehingga mengalirkan daya penuh ke beban lampu.

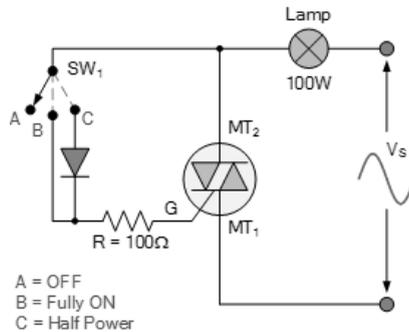


Gambar 3.23 Sirkuit Sakelar Triac AC

Karena triac secara efektif adalah dua SCR yang terhubung secara *back-to-back*, kita dapat mengubah rangkaian sakelar triac ini lebih baik yaitu dengan memodifikasi gerbang dipicu seperti yang dijelaskan pada bagian di bawah ini.

c. Sirkuit Sakelar Triac yang Dimodifikasi

Seperti sebelumnya, jika sakelar SW1 terbuka pada posisi A, tidak ada arus gerbang dan lampu "OFF". Jika sakelar dipindahkan ke posisi B, arus gerbang mengalir pada setiap setengah siklus sama seperti sebelumnya dan daya penuh ditarik oleh lampu saat triac beroperasi dalam mode I + dan III-.



Gambar 3.24 Sirkuit Sakelar Triac Modifikasi

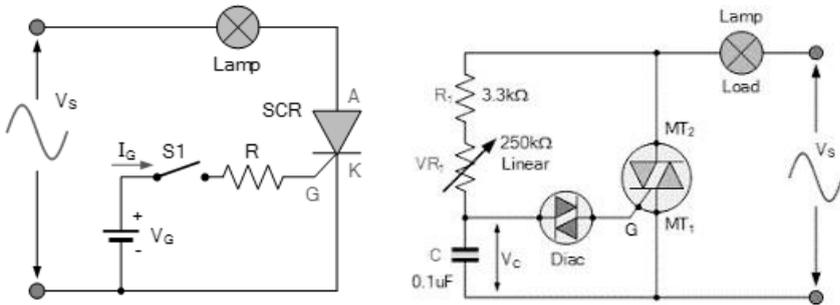
Namun saat ini ketika sakelar terhubung ke posisi C, dioda akan mencegah pemucuan gerbang saat MT_2 negatif karena dioda bias balik. Dengan demikian triac hanya bekerja pada setengah siklus positif yang beroperasi dalam mode I_+ saja dan lampu akan menyala dengan daya setengah. Jadi pada rangkaian ini, sistem bekerja tergantung pada posisi sakelar, bebannya bisa *Off*, pada *Half Power* atau *Fully ON*.

3.6 Bidirectional Diode Thyristor (DIAC)

3.6.1 Prinsip Umum

DIAC adalah perangkat semikonduktor dua arah dua persimpangan yang dirancang untuk dadal ketika tegangan AC yang melewatinya melebihi level tertentu yang melewati arus di kedua arah. DI-ode AC atau DIAC secara singkat dapat dijelaskan sebagai suatu solid state, tiga lapis, yang merupakan perangkat semikonduktor dua-*junction*. Tapi tidak seperti transistor, DIAC tidak memiliki koneksi basis, yang membuatnya menjadi perangkat yang hanya dua terminal, berlabel A1 dan A2.

Diac adalah komponen elektronik yang memberikan kemungkinan kontrol atau penguatan, tetapi bertindak seperti dioda switching dua arah, karena mereka dapat mengalirkan arus dari kedua polaritas catu tegangan AC. Dalam menjelaskan DIAC, diperlukan juga komponen lain, yaitu *SCR* dan *Triac*, yang difungsikan sebagai sakelar ON-OFF. Kelebihan dari DIAC adalah bahwa perangkat ini dapat dipicu oleh sirkuit sederhana yang menghasilkan arus gerbang keadaan stabil seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.25.



Gambar 3.25 Rangkaian DIAC

Saat sakelar, S1 terbuka, tidak ada arus gerbang yang mengalir dan lampunya OFF. Ketika sakelar S1 ditutup, arus gerbang I_G mengalir dan SCR menjadi ON pada setengah siklus positif hanya karena beroperasi di kuadran I. Perlu diingat bahwa setelah dalam keadaan ON, SCR hanya akan beralih OFF ketika tegangan suplai yang ke Anoda lebih negatif dari Katode atau I_A kurang dari nilai holdingnya I_H .

Jika kita ingin mengontrol arus yang lampu, daripada hanya menyalakannya "ON" atau "OFF", kita dapat menerapkan pulsa pendek arus gerbang pada titik pemacu yang telah ditentukan sebelumnya untuk memungkinkan konduksi SCR terjadi hanya sebagian dari setengah siklus. Kemudian nilai rata-rata arus lampu akan divariasikan dengan mengubah waktu tunda, T antara dimulainya siklus dan titik pemacu. Metode ini umumnya dikenal sebagai "kontrol fase".

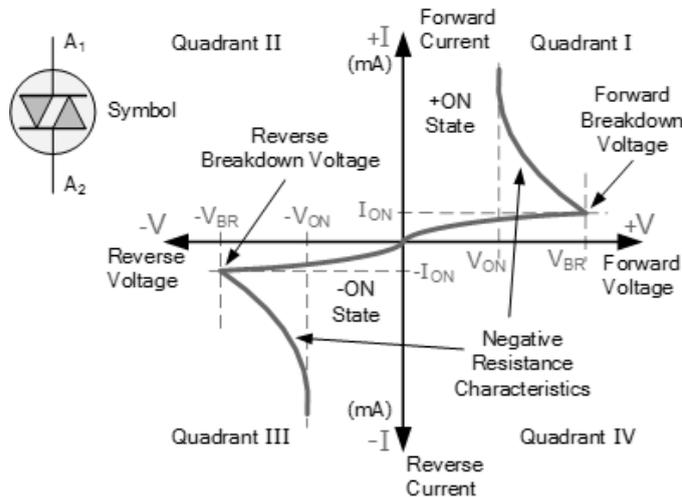
Tetapi untuk mencapai kontrol fase, dibutuhkan dua hal. Salah satunya adalah rangkaian pergeseran fasa variabel (biasanya rangkaian pasif RC), dan dua, beberapa bentuk rangkaian pemacu atau perangkat yang dapat menghasilkan pulsa gerbang yang diperlukan ketika bentuk gelombang yang tertunda mencapai tingkat tertentu. Salah satu perangkat semikonduktor solid state yang dirancang untuk menghasilkan pulsa gerbang ini adalah **Diac**.

Diac dibangun seperti transistor tetapi tidak memiliki koneksi basis yang memungkinkannya dihubungkan ke sirkuit dengan polaritas mana pun. Diac terutama digunakan sebagai perangkat pemacu dalam aplikasi pemacu fase dan kontrol daya variabel karena diac membantu memberikan pulsa pemacu yang lebih tajam dan lebih instan (berlawanan dengan tegangan ramp yang terus meningkat) yang digunakan untuk mengaktifkan "ON" perangkat switching utama.

3.6.2 Karakteristik DIAC

Kita dapat melihat dari kurva karakteristik diac I-V pada Gambar 2.26, bahwa diac memblokir aliran arus di kedua arah sampai tegangan yang diterapkan lebih besar dari V_{BR} , di mana titik kerusakan perangkat terjadi dan diac berjalan dengan sangat baik dengan cara yang mirip dengan dioda zener melewati pulsa tegangan tiba-tiba. Titik V_{BR} disebut tegangan *breakdown* atau tegangan *breakover* Diac.

Dalam dioda zener biasa, tegangan yang melewatinya akan tetap konstan saat arus meningkat. Namun, dalam diac, aksi transistor menyebabkan tegangan berkurang dengan meningkatnya arus. Setelah berada dalam kondisi konduksi, resistansi diac turun ke nilai yang sangat rendah sehingga arus yang relatif besar dapat mengalir. Untuk diac yang paling umum tersedia seperti ST2 atau DB3, tegangan rusaknya biasanya berkisar antara ± 25 hingga 35 volt. Tersedia peringkat tegangan *breakover* yang lebih tinggi, misalnya 40 volt untuk diac DB4.



Gambar 3.26 Simbol dan Karakteristik DIAC

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.26, karakteristik resistansi negatif merupakan karakteristik yang spesifik pada Diac. Pada gambar juga tampak bahwa Diac adalah perangkat simetris, karena memiliki karakteristik yang sama untuk tegangan positif dan negatif dan aksi

resistansi negatif. Karakteristik inilah yang membuat **Diac** cocok sebagai perangkat pemacu untuk SCR atau triac.

3.6.3 Aplikasi Diac

Seperti disebutkan di atas, Diac biasanya digunakan sebagai perangkat pemacu *solid state* dan perangkat *switching* semikonduktor lainnya, terutama SCR dan triac. Triac banyak digunakan dalam aplikasi seperti dimmer lampu dan pengontrol kecepatan motor dan dengan demikian diac digunakan bersama dengan triac untuk menyediakan kontrol gelombang penuh dari suplai AC seperti yang telah ditunjukkan.

3.7 Latihan

1. Gambarlah skema dan jelaskan prinsip kerja dari komponen elektronika daya berikut ini: diode, BJT, MOSFET, SCR, TRIAC, DIAC!
2. Gambarlah grafik karakteristik dan jelaskan fenomenanya dari komponen elektronika daya berikut ini: diode, BJT, MOSFET, SCR, TRIAC, DIAC!
3. Berikan contoh aplikasi dan jelaskan prinsip kerjanya dari komponen elektronika daya berikut ini: diode, BJT, MOSFET, SCR, TRIAC, DIAC!
4. Carilah *data sheet* dari internet dan lakukan telaah terhadap setiap spesifikasi untuk dengan komponen elektronika daya berikut ini: diode, BJT, MOSFET, SCR, TRIAC, DIAC!

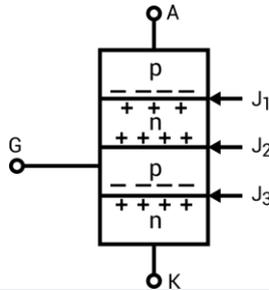
Bagian 2: GTO, SCS, SBS, SUS, LASCR dan SITH

3.8 Gate Turn OFF Thyristors (GTO)

3.8.1 Prinsip Dasar

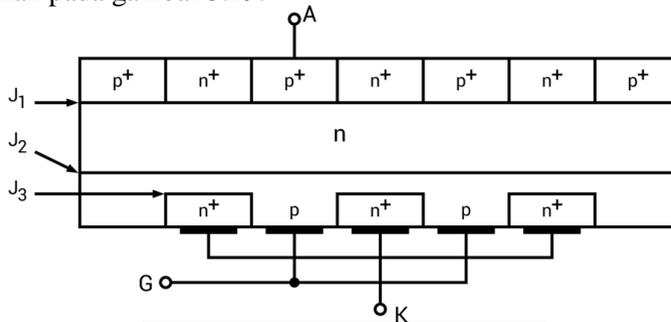
GTO dapat dihidupkan dengan pulsa arus gerbang positif dan dimatikan dengan pulsa arus gerbang negatif. Kemampuannya untuk mematikan disebabkan oleh pengalihan arus kolektor PNP oleh gerbang dan dengan demikian merusak efek umpan balik regeneratif. Sebenarnya desain GTO dibuat sedemikian rupa sehingga *gain* arus PNP dari GTO berkurang.

Titik-titik n yang didoping banyak di lapisan anoda p membentuk efek emitor yang diperpendek dan pada akhirnya mengurangi penguatan arus GTO, serta membuat regenerasi arus yang lebih rendah dan juga kemampuan pemblokiran tegangan balik rendah. Pengurangan dalam kemampuan pemblokiran balik ini dapat ditingkatkan dengan menyebarkan emas tetapi ini mengurangi masa pakai.



Gambar 3.27 Empat Lapisan dan Tiga Persimpangan GTO

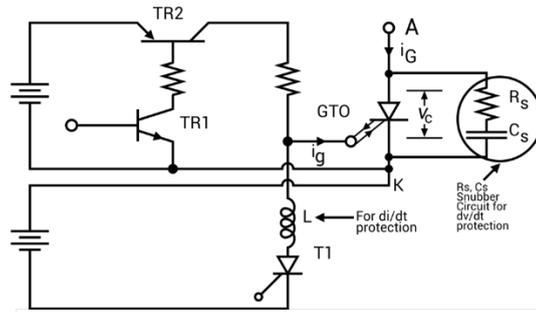
Gambar 3.27 menunjukkan empat lapisan Si dan tiga persimpangan GTO dan Gambar 3.28 menunjukkan bentuk praktisnya. Simbol untuk GTO ditunjukkan pada gambar 3.29.



Gambar 3.28 Bentuk Praktis GTO



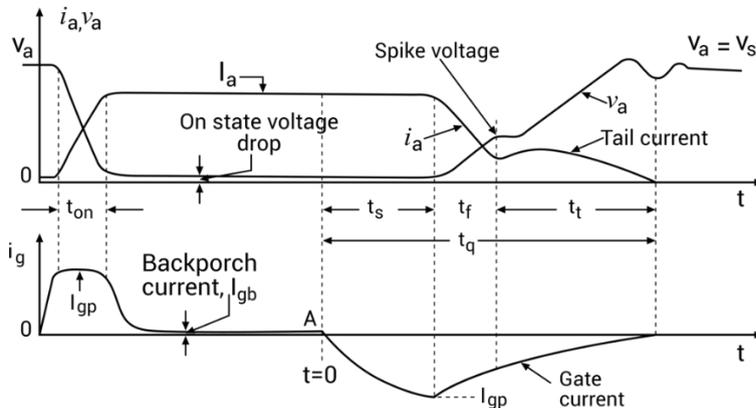
Gambar 3.29 Simbol GTO



Gambar 3.30 Sirkuit Gate Drive untuk GTO

3.8.2 Model Aplikasi

Kecepatan *switching* GTO umumnya lebih cepat dari thyristor (SCR), tetapi *drop* tegangan GTO lebih besar. Kemampuan daya GTO lebih baik dari BJT, IGBT atau SCR. Karakteristik arus tegangan statis GTO mirip dengan SCR kecuali bahwa arus penguncian GTO lebih besar (sekitar 2 A) dibandingkan dengan SCR (sekitar 100-500 mA). Sirkuit penggerak gerbang dengan karakteristik sakelar diberikan pada Gambar 3.30 dan Gambar 3.31.



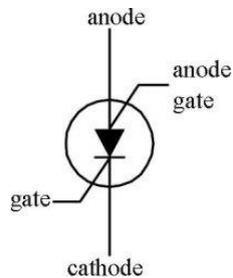
Gambar 3.31 Karakteristik Turn-On dan Turn-Off GTO

3.9 Silicon Control Switch (SCS)

3.9.1 Prinsip Umum

Silicon Controlled Switch (SCS) adalah perangkat semikonduktor daya yang mirip dengan SCR, tetapi dirancang untuk mati ketika pulsa arus input/tegangan positif diterapkan ke terminal "*gerbang Anoda*" tambahan. SCS juga dapat dipicu ke mode konduksi dengan menerapkan pulsa arus tegangan/keluaran negatif ke kabel yang sama. Selain itu, Silicon Controlled Switch berperilaku seperti SCR (yaitu, dengan menerapkan tegangan positif ke terminal "*gerbang*" kita dapat menyalakan perangkat).

Singkatnya, SCS adalah perangkat semikonduktor PNPN empat lapisan, empat terminal. Empat terminal tersebut adalah Anoda (A), Katoda (K) dan dua gerbang. Kedua terminal gerbang tersebut adalah gerbang anoda (AG) dan gerbang katoda (KG). Perangkat ini memiliki satu gerbang anoda (AG) yang mirip dengan PUT dan gerbang katoda lain (KG) yang mirip dengan SCR. Karena memiliki empat terminal, ini dinamai tetrode (empat elektroda thyristor). Simbol Silicon Controlled Switch (SCS) ditunjukkan pada gambar 3.32.



Gambar 3.32 Skema SCS

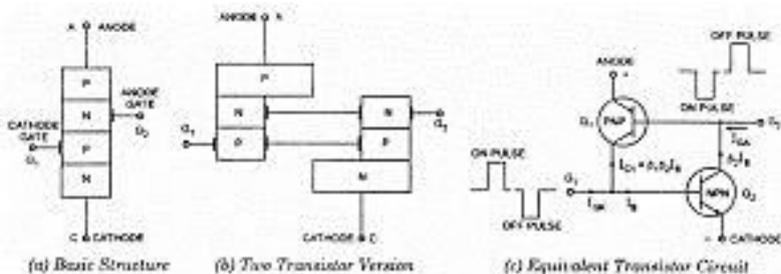
Prinsip kerja SCS adalah sebagai berikut, ketika pulsa arus positif diterapkan ke terminal gerbang, transistor NPN menyala. Hal ini memungkinkan arus keluar dari basis transistor PNP, sehingga transistor PNP ON. Sekarang kedua transistor dalam keadaan ON, arus dapat mengalir dari anoda ke katoda — SCS dihidupkan. Silicon Controlled Switch (SCS) akan tetap ON sampai kita melepaskan arus anoda-ke-katoda, membalik polaritas anoda dan katoda, atau menerapkan tegangan negatif ke gerbang anoda. Tegangan gerbang anoda negatif menghilangkan arus bias mandiri transistor.

Spesifikasi yang umum untuk SCS adalah *Collector to Base Breakdown Voltage* (BV_{CB}), *Emitter ke Base Breakdown Voltage* (BV_{EB}), *Collector to Emitter Breakdown Voltage* (BV_{CE}), Arus Emitter (I_E), *Collector Current* (I_C), Arus *Holding* (I_H) dan Disipasi Daya.

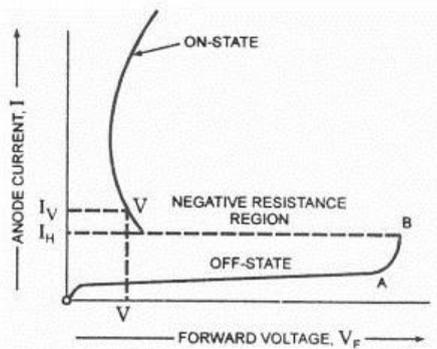
3.9.2 Struktur, Rangkaian Ekuivalen dan Karakteristik SCS

Gambar 3.33 menunjukkan struktur dan model dasar Silicon Controlled Switch (SCS), yang dianalogikan dengan dua transistor bipolar. Rangkaian analogi terlihat banyak dari pada rangkaian ekuivalen SCR, yaitu adanya koneksi antara gerbang dengan anoda.

Cara termudah untuk memahami cara kerjanya adalah dengan mewujudkannya sebagai dua transistor Q_1 dan Q_2 yang ditempatkan secara berurutan, seperti yang ditunjukkan pada gambar (b). Dalam rangkaian ekivalen dua transistor yang ditunjukkan pada gambar c, terlihat bahwa pulsa negatif pada gerbang anoda G_2 menyebabkan transistor Q_1 menyala. Transistor Q_1 menyuplai arus basis ke transistor Q_2 , dan kedua transistor menyala. Demikian pula, pulsa positif di gerbang katoda G_1 dapat menghidupkan perangkat. Karena hanya arus kecil yang terlibat, SCS dapat dimatikan dengan pulsa polaritas yang sesuai di salah satu gerbang. Di gerbang katoda, pulsa negatif diperlukan untuk mematikan sementara di gerbang anoda diperlukan pulsa positif.



Gambar 3.33 Struktur dan rangkaian ekuivalen SCS



Gambar 3.34 Karakteristik SCS

Karakteristik I-V SCS mirip dengan SCR dan ditunjukkan pada gambar 3.34. Dengan peningkatan tegangan yang diberikan, arus pertamanya meningkat perlahan hingga titik A dan kemudian dengan cepat di daerah AB. Pada titik B, hasil kali $\beta_1\beta_2$ melebihi kesatuan dan perangkat tiba-tiba dihidupkan. Dalam keadaan on, arus meningkat pesat dan dibatasi oleh resistor seri eksternal. SCS juga menunjukkan resistansi diferensial negatif di wilayah on yang mirip dengan SCR. SCS dinyalakan secara tidak sengaja jika tegangan anoda diterapkan secara tiba-tiba. Ini dikenal sebagai efek laju, yang disebabkan oleh kapasitansi antar elektroda antara elektroda G_1 dan G_2 , yang dikenal sebagai kapasitansi transisi.

3.9.3 Aplikasi SCS

Silicon Controlled Switch (SCS) digunakan dalam generator pulsa, sensor tegangan, penghitung, timing, logika dan sirkuit pemacu. Perangkat ini digunakan dalam *driver* lampu, sirkuit sakelar daya, dan sirkuit logika serta pada dasarnya semua sirkuit yang memerlukan sakelar yang dapat dinyalakan dan dimatikan dengan dua pulsa kontrol terpisah.

Keuntungan SCS dibandingkan SCR adalah waktu mati yang berkurang, biasanya dalam kisaran 1 hingga 10 mikro detik untuk SCS dan 5 hingga 30 mikro detik untuk SCR. Keuntungan lain dari SCS dibandingkan SCR adalah peningkatan kontrol dan sensitivitas pemucuan dan situasi penembakan yang lebih dapat diprediksi. Namun, SCS terbatas pada peringkat daya, arus, dan tegangan rendah (arus anoda maksimum tipikal berkisar dari 100 mA hingga 300 mA dengan peringkat disipasi 100 hingga 500 mW). Beberapa area penerapan SCS yang lebih umum termasuk

berbagai rangkaian komputer (seperti penghitung, register, dan rangkaian waktu) sensor tegangan, generator pulsa, osilator, dll.

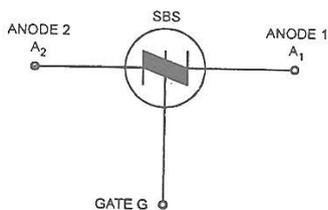
3.10 Silicon Bilateral Switch (SBS)

3.10.1 Prinsip Dasar

Silicon Bilateral Switch (SBS) adalah perangkat *breakover* lain yang mampu memicu triac, dan populer sirkuit pemacu tegangan rendah. Mereka memiliki tegangan *breakover* yang lebih rendah daripada diacs, ± 8 V menjadi rating paling populer. Kurva karakteristik I-V dari SBS mirip dengan diac, tetapi memiliki daerah "resistansi negatif" yang lebih jelas, yaitu penurunan tegangannya lebih drastis setelah memasuki kondisi konduksi. Simbol skema dan karakteristik VI dari SBS masing-masing ditunjukkan pada gambar a dan b. Ketika SBS beralih ke keadaan konduksi, tegangan di terminal anoda turun hampir ke nol (menjadi sekitar 1 V). SBS dikatakan memiliki tegangan *breakback* 7 V saat dinyalakan. Gambar 3.35 memperlihatkan skema SBS.

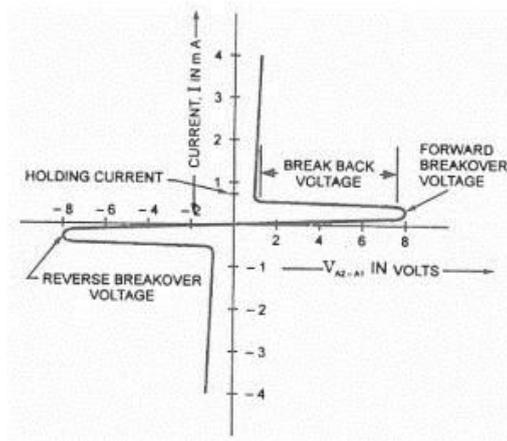
3.10.2 Karakteristik SBS

Kurva karakteristik SBS yang ditunjukkan pada gambar b adalah untuk terminal gerbang perangkat terputus. Karakteristik VI dasar dari SBS dapat diubah dengan menggunakan terminal gerbang. Namun, SBS cukup berguna bahkan tanpa terminal gerbangnya, hanya karena pemutusan snap-action dari A_2 ke A_1 . Alasan menggunakan SBS sebagai pengganti Diac adalah keunggulannya nanti. SBS tidak hanya menunjukkan karakteristik switching yang lebih kuat seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.36, tetapi juga lebih stabil pada suhu dan lebih simetris serta memiliki penyebaran batch yang lebih sedikit daripada diac. SBS modern memiliki koefisien suhu sekitar $+ 0,02\%$ per $^{\circ}C$, yaitu V_{B0} -nya meningkat hanya $0,02\%$ per derajat kenaikan suhu, yang keluar hanya $0,16$ V per $100^{\circ}C$ yang memang sangat stabil terhadap suhu.



Gambar 3.35 Skema SBS

SBS simetris dengan sekitar 0,3 V yaitu, perbedaan besarnya antara $+V_{B0}$ dan $-V_{B0}$ kurang dari 0,3 V. Ini menghasilkan penundaan penembakan yang hampir identik untuk setengah siklus positif dan negatif. Penyebaran batch SBS kurang dari 0,1 V yaitu, perbedaan V_{B0} antara SBS yang berbeda dalam satu batch kurang dari 0,1 V. *Batch* menyebar di antara diac adalah sekitar 4 V_A . Keuntungan utama menggunakan SBS berpagar untuk kontrol pemacu triac adalah bahwa efek histeresis atau *flash-on* dihilangkan.

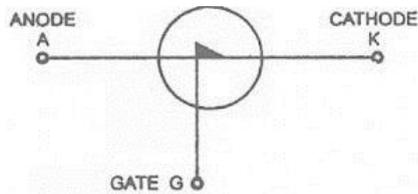


Gambar 3.36 Karakteristik SBS

3.11 Silicon Unilateral Switch (SUS)

3.11.1 Prinsip Dasar

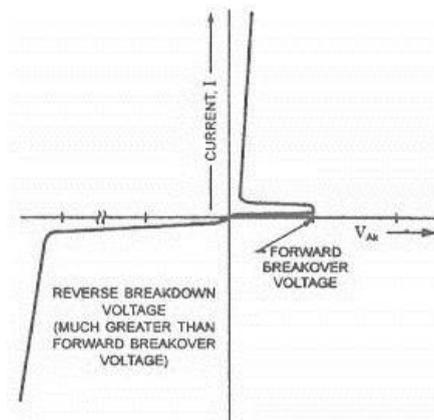
Silikon saklar bilateral dikelompokkan sebagai perangkat bilateral atau dua arah karena mereka dapat breakover di kedua arah. Ada juga alat pemecah yang pecah hanya dalam satu arah; mereka termasuk dalam kategori perangkat *breakover* unilateral atau unidirectional. Meskipun perangkat pemutus unilateral lebih sering digunakan dalam pemucuan SCR, alat ini juga dapat digunakan dalam sirkuit pemacu triac jika memiliki beberapa sirkuit pendukung tambahan. *Silicon Unilateral Switch* (SUS) adalah salah satu perangkat pemutus sepihak yang penting.



Gambar 3.35 Sakelar Silikon Unilateral

3.11.2 Karakteristik VI dari SUS

Simbol skematik dan karakteristik I-V dari SUS yang ditampilkan masing-masing adalah gambar 3.36. SUS, seperti SBS, memiliki terminal gerbang yang dapat mengubah karakteristik *breakover* dasar yang ditunjukkan pada gambar. Dengan menghubungkan dioda Zener antara gate dan katoda SUS, tegangan *breakover* dapat dikurangi menjadi $(V_Z + 0.6 \text{ V})$. Hal ini dilakukan dengan menghubungkan katoda dioda Zener ke gerbang SUS dan anoda dioda Zener ke katoda SUS. SUS dapat ditembakkan pada tegangan anoda ke katoda yang sangat rendah (sekitar 1 V) jika arus gerbang mengalir dari anoda ke gerbang. SUS adalah perangkat bertegangan rendah dan arus rendah. Kebanyakan SUS memiliki tegangan *breakover* 8 V dan batas arus kurang dari 1 A.

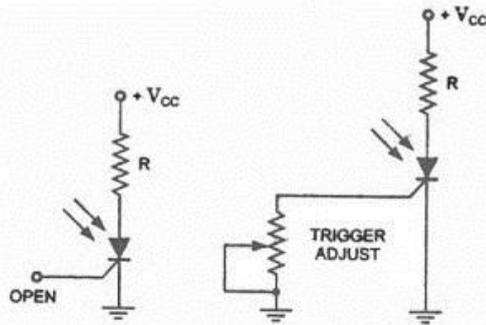


Gambar 3.36 Karakteristik SUS

3.12 Light Activated Silicon Controlled Rectifier (LASCR)

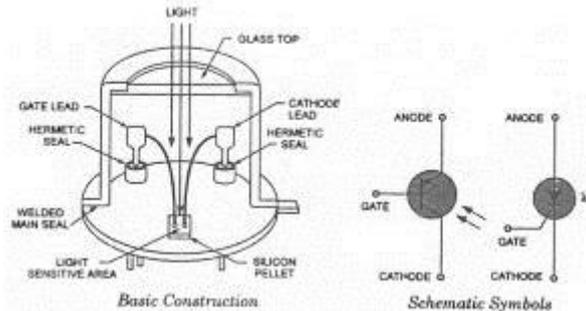
3.12.1 Prinsip Dasar

SCR yang diaktifkan cahaya (LASCR) atau SCR Foto, hanyalah SCR biasa kecuali bahwa itu juga dapat dipicu oleh cahaya. Kebanyakan LASCR juga memiliki terminal gerbang untuk dipicu oleh pulsa listrik seperti SCR konvensional. Konstruksi dasar LASCR ditunjukkan pada gambar. Simbol skematik yang paling umum digunakan untuk LASCR ditunjukkan pada gambar 3.37.



Gambar 3.37 LASCR atau Foto SCR

Beberapa LASCR memiliki jendela bening dalam casingnya sehingga sumber cahaya dari perangkat lain dapat disambungkan. Gambar 3.38 memperlihatkan komponen seperti itu. Banyak sumber cahaya yang dikemas dalam paket yang sama sehingga terbentuk relai. Ketika cahaya yang jatuh pada lapisan penipisan cukup kuat, elektron valensi terlepas dari orbitnya dan menjadi elektron bebas. Ketika elektron bebas ini mengalir keluar dari pengumpul yang satu, transistor ke basis yang lain.



Gambar 3.38 Struktur dan wujud LASCR

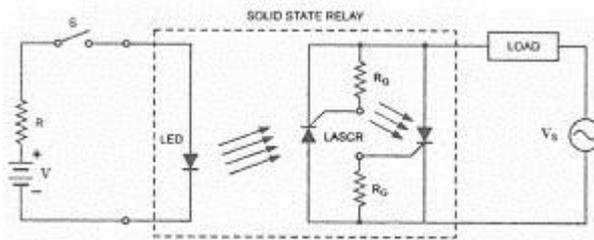
Umpan balik positif dimulai dan LASCR menyala seperti SCR normal, LASCR akan terus bekerja meskipun sumber cahaya dilepas. Untuk kepekaan maksimum terhadap cahaya, gerbang dibiarkan terbuka, seperti

yang ditunjukkan pada gambar. Penyesuaian pemicu dapat dimasukkan jika titik perjalanan yang dapat disesuaikan diinginkan seperti yang ditunjukkan pada gambar. Resistor gerbang mengalihkan beberapa elektron yang dihasilkan cahaya dan mengubah sensitivitas rangkaian ke cahaya yang masuk. Perangkat ini untuk aplikasi daya rendah.

3.12.2 Aplikasi LASCR

LASCR banyak diaplikasikan pada kontrol cahaya optik, relai, kontrol fase, kontrol motorik, dan sejumlah besar aplikasi komputer. Peringkat arus maksimum (rms) dan daya (gerbang) untuk LASCR yang tersedia secara komersial adalah sekitar 3 A dan 0,1 W. Dengan kenaikan suhu persimpangan, energi cahaya yang diperlukan untuk mengaktifkan perangkat berkurang.

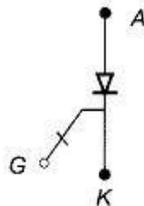
Relai solid-state yang menggunakan dua LASCR secara paralel terbalik ditunjukkan pada gambar. Dua LASCR dihubungkan secara paralel terbalik untuk mendapatkan konduksi di kedua setengah siklus dari tegangan suplai V_g . Dioda pemancar cahaya (LED) tunggal digunakan untuk memicu kedua LASCR. Resistor bias digunakan untuk mengontrol sensitivitas cahaya dari gerbang dan menghindari pemicuan sporadis selama periode nonaktif. Biasanya ketiga perangkat aktif (dua LASCR dan satu LED) dan dua resistor bias R_G dienkapsulasi dalam paket yang sama. Karena aksi relai tidak memerlukan sambungan listrik langsung, relai semacam itu sering digunakan untuk memasang sinyal ke peralatan bertegangan sangat tinggi dan lokasi berbahaya lainnya.



Gambar 3.39 Relay dengan LASCR

3.13 Thyristor Induksi Statis (SITH)

Sebuah *Static Induction Thyristor* atau SI-thyristor adalah perangkat on-off seperti GTO yang dikendalikan sendiri yang diperkenalkan secara komersial di Jepang pada tahun 1988. Perangkat serupa, yang dikenal sebagai *field-controlled thyristor* (FCT) atau *field-controlled diode* (FCD), dikembangkan di USA. Simbol perangkat ditunjukkan pada Gambar 3.40.



Gambar 3.40 Skema SITH

Ini pada dasarnya adalah dioda P^+NN^+ . Mirip dengan SIT, SITH biasanya pada perangkat dengan wilayah N yang dipenuhi dengan pembawa minoritas. Cara mematikan SITH mirip dengan GTO. SITH adalah perangkat berdaya tinggi seperti GTO yang dikendalikan sendiri (1200 V, 800A).

Perbandingan umum antara SITH dengan GTO diberikan di bawah ini.

1. Tidak seperti GTO, SITH biasanya pada pemblokiran asimetris perangkat.
2. Penurunan konduksi lebih tinggi (4,0 V)
3. Keuntungan arus turn-off lebih rendah (1 hingga 3)
4. Frekuensi switching lebih tinggi ($t_{ON} = 2 \mu s$, $t_{OFF} = 9 \mu s$) dan memiliki kerugian switching yang lebih rendah.
5. Peringkat dv/dt dan di/dt lebih tinggi. (2 kV/ μs , 900A/ μs).
6. SOA ditingkatkan dan T_j dibatasi.

3.14 Static Induction Transistors (SIT)

3.14.1 Prinsip Dasar

Pada pertengahan tahun 1970-an, ada jenis JFET khusus yang ditemukan di Jepang disebut *Static Induction Transistor* (SIT), yang merupakan jalan untuk kemudian mendapatkan power amplifier "VFET" yang diproduksi oleh Yamaha dan Sony. Amplifier ini diproduksi selama beberapa tahun dan kemudian dihentikan, tetapi masih sangat dihargai di komunitas audio kelas atas. Perangkat SIT memiliki karakteristik unik yang memiliki nilai khusus untuk penguat audio.

Mengutip abstrak paten penemu Nishizawa, karakteristik drain-current ke drain-voltage mensimulasikan karakteristik arus anoda ke tegangan anoda dari tabung vakum triode dengan sangat dekat. Mereka telah menemukan penggunaan dalam radar dan aplikasi eksotis lainnya, tetapi setelah Sony dan Yamaha berhenti produksi, versi yang sesuai untuk penguatan daya audio sangat dihargai dan sulit diperoleh. Baru-baru ini ada minat baru pada SIT, sebagian karena dua perusahaan audio telah melangkah maju dan menghabiskan uang yang diperlukan untuk membuat perangkat baru yang cocok untuk amplifier daya audio. Yang pertama adalah *Digital Do Main* di Jepang, yang telah menghasilkan dua amplifier audio berdasarkan versi terbaru suku cadang Silicon Yamaha asli. Yang lainnya adalah *Watt*, yang mengatur proses produksi perangkat SIT baru menggunakan proses Silicon Carbide yang lebih baru oleh *SemiSouth*.

3.14.2 Struktur dan Karakteristik SIT

SIT mampu menahan tegangan besar antara saluran dan sumber. SIT dimatikan secara andal dengan menerapkan tegangan yang negatif ke gerbang, relatif terhadap saluran pembuangan. Ketika mati dan itu adalah faktor penguatan tegangan eksternal dari SIT.

Efektivitas sakelar SIT pada dua operasi bipolar ditandai dengan faktor transfer arus yang berada di urutan 100, berbeda dengan transistor bipolar biasa. Kembar Anda sebagai operasi arus 100 sampai 1000 amp, struktur dimodifikasi pelat silikon ditandai dengan konduktivitas lubang digunakan sebagai substrat. Struktur ini dinyalakan hanya dengan menghilangkan potongan potensial dari gerbang. Kemudian injeksi Pembawa muatan dari substrat ke depresi dimulai. Ini memastikan modulasi efektif dari konduktivitas transistor. SIT dari struktur tersebut dikenal sebagai field controlled thyristor (FCT). Perhatikan bahwa transistor yang

dikendalikan medan diaktifkan tanpa adanya umpan balik positif. Akibatnya, transistor kontrol medan relatif tahan terhadap derau pulsa.

Dengan injeksi dari Grid kontrol, seperti dalam operasi SIT bipolar, atau dari substrat, di transistor kontrol medan, muatan sekunder Pembawa muncul di dasar dan negatif. Ini secara signifikan mengubah proses transien, terutama selama shutdown selama shutdown, lubang ditarik dari dasar dan n-negatif oleh reverse Biased Gate. Akibatnya, pulsa arus yang relatif Lee pendek tetapi amplitudo tertutup terhadap arus beban akan bekerja di rangkaian kontrol. Dalam transistor kontrol medan, kita kemudian mengamati munculnya prapetus transistor PNP emitor adalah tiriskan thyristor; sedangkan kolektornya adalah pintu gerbang. Basisnya cepat mati, dengan penutupan saluran arus primer. Sensor transistor kontrol medan turun secara analog ke transistor pnp dengan basis rusak, yaitu muatan menurun perlahan dengan rekombinasi. kemudian, jadwalkan ulang urusan saat ini dalam rangkaian keluaran dan kontrol thyristor; durasinya kira-kira tiga kali masa pakai pembawa muatan.

3.15 Latihan

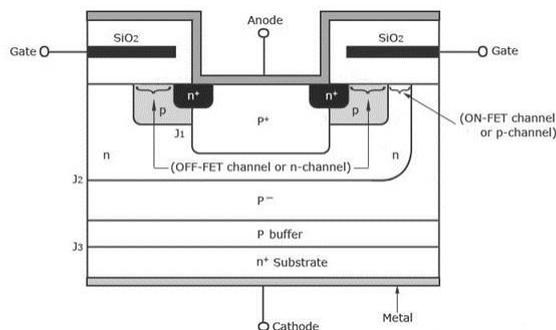
1. Gambarlah skema dan jelaskan prinsip kerja dari komponen elektronika daya berikut ini: GTO, SCS, SBS, SUS, LASCR, SITH, dan SIT!
2. Gambarlah grafik karakteristik dan jelaskan fenomenanya dari komponen elektronika daya berikut ini: GTO, SCS, SBS, SUS, LASCR, SITH, dan SIT!
3. Berikan contoh aplikasi dan jelaskan prinsip kerjanya dari komponen elektronika daya berikut ini: GTO, SCS, SBS, SUS, LASCR, SITH, dan SIT!
4. Carilah *data sheet* dari internet dan lakukan telaah terhadap setiap spesifikasi untuk dengan komponen elektronika daya berikut ini: GTO, SCS, SBS, SUS, LASCR, SITH, dan SIT!

Bagian 3: MCT, IGCT, IGBT, UJT, Pemotong transien, dan Relai Terpadu

3.16 MOS Controlled Thyristor (MCT)

3.16.1 Prinsip Dasar

Dari banyak perangkat yang dikontrol semikonduktor, MCT dianggap yang terbaru. Perangkat ini pada dasarnya adalah thyristor dengan dua MOSFET yang terpasang di dalam struktur gerbang. Sebuah MOSFET digunakan untuk memutar ON MCT dan satu lagi digunakan untuk mengubahnya OFF. Perangkat ini banyak digunakan untuk berpindah aplikasi dan memiliki karakteristik lain seperti frekuensi tinggi, daya tinggi, penurunan konduksi rendah, dan sebagainya. Sebuah MCT menggabungkan fitur dari empat lapisan thyristor konvensional yang memiliki aksi regeneratif dan struktur gerbang MOS. Dalam perangkat ini, semua sinyal gerbang diterapkan sehubungan dengan anoda, yang disimpan sebagai referensi. Dalam SCR yang biasanya digunakan, katoda disimpan sebagai terminal referensi untuk sinyal gerbang. Struktur dasar sel MCT ditunjukkan pada gambar di bawah ini.

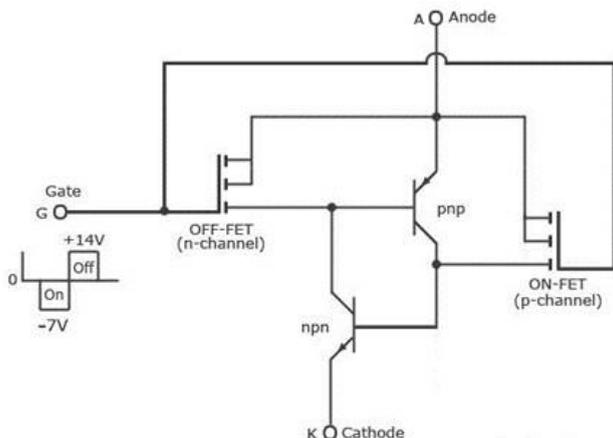


Gambar 3.41 Struktur MOS Controlled Thyristor (MCT)

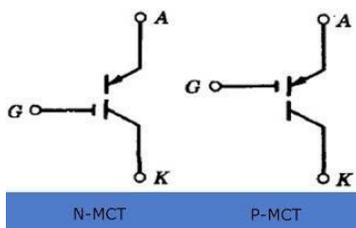
Dalam praktiknya, MCT akan menyertakan ribuan sel dasar yang terhubung secara paralel, seperti PMOSFET. Ini membantu mendapatkan daya dukung arus tinggi untuk perangkat.

Sirkuit ekuivalen MCT ditunjukkan pada gambar 3.42. Ini terdiri dari ON-FET, OFF-FET dan dua transistor. Struktur MOS dari MCT direpresentasikan dalam rangkaian ekivalen. Ini terdiri dari satu ON-FET,

MOSFET p-channel, dan OFF-FET. Transistor npn dan pnp digabungkan untuk mewakili struktur npnp dari MCT. MOSFET n-channel diwakili dengan menggambar panah ke arah terminal gerbang. MOSFET p-channel ditunjukkan dengan menarik panah menjauh dari terminal gerbang. Dua transistor dalam rangkaian ekuivalen menunjukkan bahwa ada umpan balik regeneratif di MCT seperti halnya thyristor biasa. Simbol sirkuit MCT ditunjukkan di bawah ini. Gambar 3.43 memperlihatkan skema MCT.



Gambar 3.42 Sirkuit ekuivalen MOS Controlled Thyristor (MCT)



Gambar 3.43 Simbol Sirkuit (MCT)

3.16.2 Proses Menghidupkan dan Mematikan MCT

Perangkat dihidupkan oleh pulsa tegangan negatif di gerbang yang terhubung dengan anoda. Untuk menyalakan MCT, gerbang dibuat negatif oleh pulsa tegangan antara gerbang dan anoda. Jadi, MCT awalnya harus bias maju, dan kemudian hanya tegangan negatif yang diterapkan. Dengan

penerapan pulsa tegangan negatif ini, ON-FET dihidupkan sedangkan OFF-FET sudah OFF. Dengan ON-FET ON, arus mulai mengalir dari anoda A, melalui ON-FET dan kemudian sebagai arus basis dan emitor transistor npn dan kemudian ke katoda K. Ini menyalakan transistor npn. Hal ini menyebabkan arus kolektor mengalir pada transistor npn. Karena OFF FET MATI, arus kolektor dari transistor npn ini bertindak sebagai arus basis dari transistor pnp. Selanjutnya transistor pnp juga dalam keadaan ON. Jika kedua transistor ON,

Perangkat dimatikan dengan menerapkan pulsa tegangan positif di gerbang. Pulsa tegangan positif menyebabkan OFF-FET menyala dan ON-FET mati. Setelah OFF-FET Diaktifkan, terminal berbasis emitor dari transistor pnp dihubung pendek oleh OFF-FET. Jadi, sekarang arus anoda mulai mengalir melalui OFF-FET dan dengan demikian arus basis transistor pnp mulai berkurang. Perangkat memiliki kelemahan dari kemampuan pemblokiran tegangan balik.

3.16.3 Keuntungan MCT

1. Resistansi konduksi rendah
2. *Fast TURN-ON* dan *Fast OFF*
3. Kerugian *switching* rendah
4. Impedansi masukan gerbang tinggi

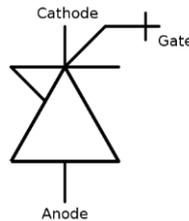
3.16.4 Aplikasi MCT

1. MCT digunakan dalam pemutus sirkuit.
2. Aplikasi daya yang lebih tinggi seperti konversi daya tinggi.
3. Kontrol MOS Thyristor digunakan dalam pemanasan induksi.
4. Sistem UPS
5. Konverter seperti DC ke DC converter.
6. Faktor daya variabel, MCT sebagai saklar daya yang dilakukan paksa.

3.17 Integrated Gate Commutated Thyristor (IGCT)

3.17.1 Prinsip Dasar

IGCT adalah tipe khusus dari thyristor. Itu dibuat dari integrasi unit gerbang dengan perangkat wafer Gate Commutated Thyristor (GCT). Integrasi dekat dari unit gerbang dengan perangkat wafer memastikan pergantian cepat arus konduksi dari katoda ke gerbang. Perangkat wafer mirip dengan gerbang turn-off thyristor (GTO). Mereka dapat dihidupkan dan dimatikan dengan sinyal gerbang, dan menahan tingkat kenaikan tegangan yang lebih tinggi (dv/dt), sehingga tidak diperlukan snubber untuk sebagian besar aplikasi.

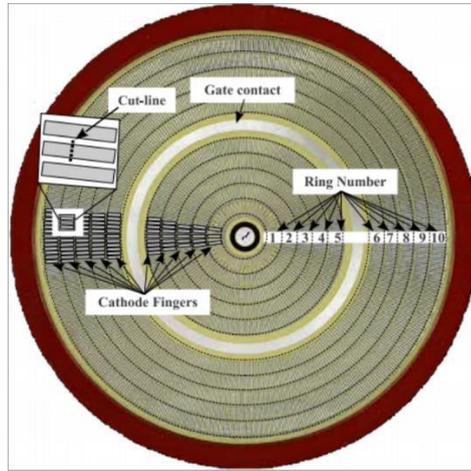


Gambar 3.43 Simbol Sirkuit IGBT

Struktur IGBT sangat mirip dengan thyristor GTO. Dalam IGBT, arus mematikan gerbang lebih besar dari arus anoda. Ini menghasilkan penghapusan lengkap injeksi pembawa minoritas dari persimpangan PN bagian bawah dan waktu mati yang lebih cepat. Perbedaan utama adalah pengurangan ukuran sel, dan koneksi gerbang yang jauh lebih substansial dengan induktansi yang jauh lebih rendah di sirkuit penggerak gerbang dan koneksi sirkuit penggerak. Arus gerbang yang sangat tinggi dan kenaikan dI/dt yang cepat dari arus gerbang berarti bahwa kabel biasa tidak dapat digunakan untuk menghubungkan drive gerbang ke IGBT. PCB sirkuit penggerak diintegrasikan ke dalam paket perangkat. Sirkuit penggerak mengelilingi perangkat dan konduktor melingkar besar yang dipasang ke tepi IGBT digunakan.

3.17.2 Struktur dan Karakteristik

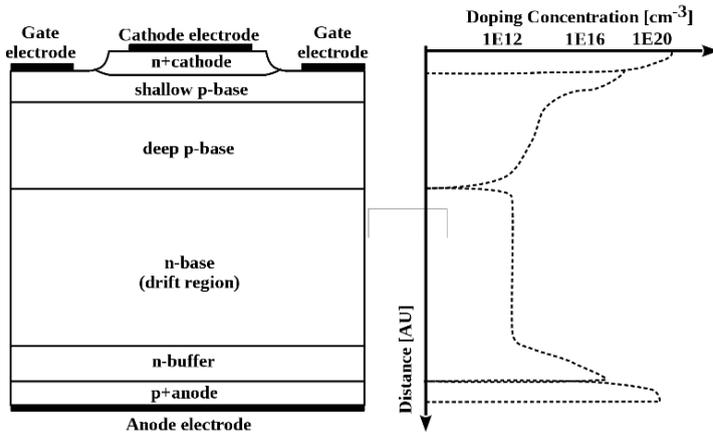
Waktu mematikan IGBT yang jauh lebih cepat dibandingkan dengan GTO memungkinkannya untuk beroperasi pada frekuensi yang lebih tinggi — hingga beberapa kHz untuk periode waktu yang sangat singkat. Namun, karena kerugian switching yang tinggi, frekuensi operasi tipikal hingga 500 Hz.



Gambar 3.44 Struktur IGBT

IGBT tersedia dengan atau tanpa kemampuan pemblokiran terbalik. Kemampuan pemblokiran mundur menambah penurunan tegangan maju karena kebutuhan untuk memiliki wilayah P1 yang panjang dan didoping rendah. IGBT yang mampu memblokir tegangan balik dikenal sebagai IGBT simetris, disingkat S-IGBT. Biasanya, peringkat tegangan pemblokiran mundur dan peringkat tegangan pemblokiran maju adalah sama. Aplikasi tipikal untuk IGBT simetris ada di inverter sumber saat ini.

IGBT yang tidak mampu memblokir tegangan balik dikenal sebagai IGBT asimetris, disingkat A-IGBT. Mereka biasanya memiliki peringkat kerusakan terbalik dalam puluhan volt. A-IGBT digunakan di mana dioda konduksi terbalik diterapkan secara paralel (misalnya, dalam inverter sumber tegangan) atau di mana tegangan balik tidak akan pernah terjadi (misalnya, dalam switching catu daya atau chopper traksi DC). IGBT asimetris dapat dibuat dengan dioda konduksi terbalik dalam paket yang sama. Ini dikenal sebagai RC-IGBT, untuk melakukan IGBT secara terbalik.



Gambar 3.45 Struktur lapisan IGBT

Aplikasi utamanya adalah pada inverter frekuensi variabel, penggerak, traksi, dan sakelar pemutus AC yang cepat. Beberapa IGBT dapat dihubungkan secara seri atau paralel untuk aplikasi daya yang lebih tinggi.

3.18 Insulation Gate Bipolar Transistor (IGBT)

3.18.1 Prinsip Dasar

Transistor bipolar gerbang terisolasi adalah perangkat semikonduktor dengan tiga terminal dan digunakan terutama sebagai sakelar elektronik. Ini ditandai dengan peralihan cepat dan efisiensi tinggi, yang menjadikannya komponen penting dalam peralatan modern seperti ballast lampu, mobil listrik, dan penggerak frekuensi variabel.

Kemampuannya untuk menghidupkan dan mematikan, dengan cepat, membuatnya dapat diterapkan dalam amplifier untuk memproses pola gelombang yang kompleks dengan modulasi lebar pulsa. IGBT menggabungkan karakteristik MOSFET dan BJT untuk masing-masing mencapai kapasitas tegangan arus tinggi dan tegangan saturasi rendah. Ini mengintegrasikan gerbang terisolasi menggunakan FET. IGBT adalah transistor sakelar daya yang menggabungkan keunggulan MOSFET dan BJT untuk digunakan dalam catu daya dan sirkuit kontrol motor. Insulated Gate Bipolar Transistor juga disebut IGBT, adalah sesuatu dari persilangan antara konvensional *Bipolar Junction Transistor*, (BJT) dan *Field Effect*

Transistor, (MOSFET) sehingga ideal sebagai perangkat semikonduktor switching.

IGBT Transistor mengambil bagian terbaik dari kedua jenis transistor umum, impedansi tinggi input dan kecepatan switching yang tinggi dari MOSFET dengan tegangan saturasi rendah dari transistor bipolar, dan menggabungkan mereka bersama-sama untuk menghasilkan jenis lain dari perangkat switching transistor yang mampu menangani arus kolektor-emitor besar dengan penggerak arus gerbang nol secara virtual.

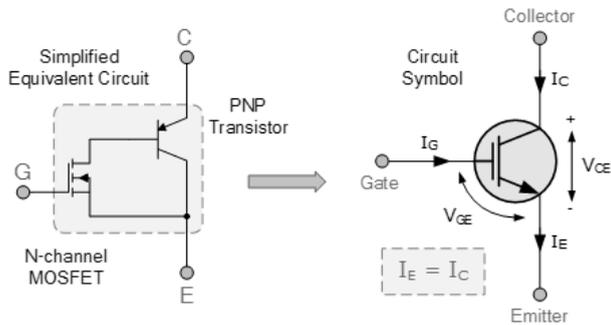


Gambar 3.46 Bentuk fisik IGBT

Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) menggabungkan teknologi gerbang terisolasi (oleh karena itu bagian pertama dari namanya) dari MOSFET dengan karakteristik kinerja output dari transistor bipolar konvensional, (karenanya bagian kedua dari namanya). Hasil dari kombinasi hibrid ini adalah bahwa "Transistor IGBT" memiliki karakteristik sakelar dan konduksi keluaran dari transistor bipolar tetapi dikontrol tegangannya seperti MOSFET.

IGBT terutama digunakan dalam aplikasi elektronika daya, seperti inverter, konverter, dan catu daya, jika tuntutan perangkat switching solid state tidak sepenuhnya dipenuhi oleh bipolar daya dan MOSFET daya. Bipolar arus tinggi dan tegangan tinggi tersedia, tetapi kecepatan peralihannya lambat, sementara MOSFET daya mungkin memiliki kecepatan peralihan yang lebih tinggi, tetapi perangkat tegangan tinggi dan arus tinggi mahal dan sulit dicapai.

Keuntungan yang diperoleh oleh perangkat transistor bipolar gerbang terisolasi dari BJT atau MOSFET adalah bahwa ia menawarkan penguatan daya yang lebih besar daripada transistor tipe bipolar standar yang dikombinasikan dengan operasi tegangan yang lebih tinggi dan kerugian input yang lebih rendah dari MOSFET. Akibatnya itu adalah FET yang terintegrasi dengan transistor bipolar dalam bentuk konfigurasi tipe Darlington seperti yang ditunjukkan.



Gambar 3.47 Rangkaian ekuivalen dan skema IGBT

Kita dapat melihat bahwa transistor bipolar gerbang berinsulasi adalah perangkat transkonduktansi tiga terminal yang menggabungkan input MOSFET saluran-N gerbang berinsulasi dengan keluaran transistor bipolar PNP yang terhubung dalam jenis konfigurasi Darlington. Akibatnya terminal diberi label sebagai: Collector, Emitter dan Gate. Dua terminalnya (C dan E) dikaitkan dengan jalur konduktansi yang melewati arus, sedangkan terminal ketiganya (G), mengontrol perangkat.

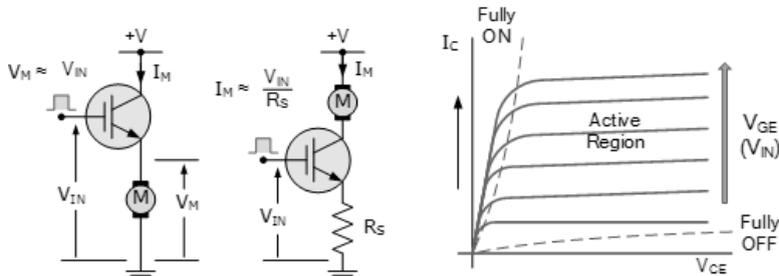
Besarnya amplifikasi yang dicapai oleh transistor bipolar gerbang berinsulasi adalah rasio antara sinyal keluaran dan sinyal masukannya. Untuk transistor pertemuan bipolar konvensional, (BJT) jumlah penguatan kira-kira sama dengan rasio arus keluaran terhadap arus masukan, yang disebut Beta. Untuk transistor efek medan semikonduktor oksida logam atau MOSFET, tidak ada arus masukan karena gerbang diisolasi dari saluran pembawa arus utama. Oleh karena itu, penguatan FET sama dengan rasio perubahan arus keluaran terhadap perubahan tegangan masukan, menjadikannya perangkat transkonduktansi dan ini juga berlaku untuk IGBT. Kemudian kita dapat memperIlkan IGBT sebagai BJT daya yang arus basisnya disediakan oleh MOSFET.

3.18.2 Karakteristik IGBT

Insulated Gate Bipolar Transistor dapat digunakan dalam rangkaian penguat sinyal kecil dalam banyak cara yang sama seperti BJT atau MOSFET jenis transistor. Tetapi karena IGBT menggabungkan kehilangan konduksi rendah dari BJT dengan kecepatan switching yang tinggi dari MOSFET daya, terdapat sakelar solid state yang optimal yang ideal untuk digunakan dalam aplikasi elektronika daya.

Selain itu, IGBT memiliki resistansi "on-state" yang jauh lebih rendah, R_{ON} daripada MOSFET yang setara. Ini berarti bahwa penurunan $I^2 R$ melintasi struktur keluaran bipolar untuk arus switching yang diberikan jauh lebih rendah. Operasi pemblokiran maju dari transistor IGBT identik dengan MOSFET daya. Ketika digunakan sebagai sakelar yang dikendalikan statis, transistor bipolar gerbang berinsulasi memiliki tegangan dan peringkat arus yang mirip dengan transistor bipolar. Namun, kehadiran gerbang terisolasi di IGBT membuatnya jauh lebih mudah untuk dikendarai daripada BJT karena daya penggerak yang dibutuhkan lebih sedikit.

Transistor bipolar gerbang berinsulasi cukup dinyalakan "ON" atau "OFF" dengan mengaktifkan dan menonaktifkan terminal Gerbangnya. Menerapkan sinyal tegangan input positif melintasi Gerbang dan Emitor akan menjaga perangkat dalam keadaan "ON", sementara membuat sinyal gerbang input nol atau sedikit negatif akan menyebabkannya "OFF" dengan cara yang sama seperti transistor bipolar atau eMOSFET. Keuntungan lain dari IGBT adalah ia memiliki resistansi saluran pada status yang jauh lebih rendah daripada MOSFET standar.



Gambar 3.48 Karakteristik IGBT

Karena IGBT adalah perangkat yang dikendalikan tegangan, IGBT hanya membutuhkan tegangan kecil pada Gerbang untuk mempertahankan konduksi melalui perangkat tidak seperti BJT yang mengharuskan arus Basis disuplai secara terus menerus dalam jumlah yang cukup untuk menjaga kejenuhan. Juga IGBT adalah perangkat searah, yang berarti ia hanya dapat mengalihkan arus dalam "arah maju", yaitu dari Collector ke Emitor tidak seperti MOSFET yang memiliki kemampuan switching arus dua arah (dikendalikan dalam arah maju dan tidak terkendali dalam arah sebaliknya)

Prinsip operasi dan rangkaian penggerak gerbang untuk transistor bipolar gerbang berinsulasi sangat mirip dengan MOSFET daya N-channel. Perbedaan mendasarnya adalah bahwa resistansi yang ditawarkan oleh saluran konduksi utama ketika arus mengalir melalui perangkat dalam keadaan "ON" -nya jauh lebih kecil di IGBT. Karena itu, peringkat arus jauh lebih tinggi jika dibandingkan dengan MOSFET daya setara.

Keuntungan utama menggunakan IGBT dibandingkan jenis perangkat transistor lainnya adalah kapabilitas tegangan tinggi, resistansi ON rendah, kemudahan penggerak, kecepatan switching yang relatif cepat dan dikombinasikan dengan arus penggerak gerbang nol menjadikannya pilihan yang baik untuk kecepatan sedang, aplikasi tegangan tinggi seperti dalam modulasi lebar-pulsa (PWM), kontrol kecepatan variabel, catu daya mode sakelar atau inverter DC-AC bertenaga surya dan aplikasi konverter frekuensi yang beroperasi dalam kisaran ratusan kilohertz.

3.18.3 Perbandingan IGBT

Tabel 3.2 memperlihatkan perbandingan IGBT dengan komponen lain. Tampak bahwa IGBT adalah perangkat switching semikonduktor yang memiliki karakteristik keluaran dari transistor pertemuan bipolar, BJT, tetapi dikendalikan seperti transistor efek medan oksida logam, MOSFET. Salah satu keuntungan utama dari transistor IGBT adalah kesederhanaannya yang dapat digerakkan "ON" dengan menerapkan tegangan gerbang positif, atau dimatikan "OFF" dengan membuat sinyal gerbang nol atau sedikit negatif yang memungkinkan untuk digunakan dalam berbagai beralih aplikasi. Itu juga dapat digerakkan di wilayah aktif linier untuk digunakan dalam penguat daya.

Dengan resistansi on-state dan kerugian konduksi yang lebih rendah serta kemampuannya untuk mengalihkan tegangan tinggi pada frekuensi tinggi tanpa kerusakan membuat IGBT ideal untuk menggerakkan beban induktif seperti gulungan kumparan, elektromagnet, dan motor DC.

IGBT memiliki nilai resistansi status ON yang sangat rendah daripada MOSFET. Ini menyiratkan bahwa penurunan tegangan (I^2R) melintasi bipolar untuk operasi sakelar tertentu sangat rendah. Tindakan pemblokiran maju IGBT mirip dengan MOSFET. Ketika

IGBT digunakan sebagai sakelar terkontrol dalam keadaan statis, peringkat arus dan tegangannya sama dengan BJT. Sebaliknya, gerbang terisolasi di IGBT membuatnya lebih mudah untuk menggerakkan muatan BJT dan karenanya lebih sedikit daya yang dibutuhkan.

Tabel 3.2 Perbandingan IGBT

Karakteristik Perangkat	Daya Bipolar	Daya MOSFET	IGBT
Peringkat Tegangan	Tinggi <1kV	Tinggi <1kV	Sangat Tinggi >1kV
Peringkat Saat Ini	Tinggi <500A	Rendah <200A	Tinggi > 500A
Masukan Drive	Saat ini, h_{FE} 20-200	Tegangan, V_{GS} 3-10V	Tegangan, V_{GE} 4-8V
Impedansi masukan	Rendah	Tinggi	Tinggi
Impedansi Output	Rendah	Medium	Rendah
Kecepatan Switching	Lambat (AS)	Cepat (nS)	Medium
Biaya	Rendah	Medium	Tinggi

IGBT dinyalakan atau dimatikan berdasarkan apakah terminal gerbangnya telah diaktifkan atau dinonaktifkan. Beda potensial positif konstan melintasi gerbang dan emitor mempertahankan IGBT dalam status ON. Saat sinyal input dilepas, IGBT dimatikan. IGBT hanya membutuhkan tegangan kecil untuk menjaga konduksi di perangkat tidak seperti di BJT. IGBT adalah perangkat searah, yaitu hanya dapat AKTIF untuk arah maju. Ini berarti arus mengalir dari kolektor ke emitor tidak seperti di MOSFET, yang bersifat bi-directional.

3.18.4 Penerapan IGBT

IGBT digunakan dalam aplikasi daya sedang hingga sangat tinggi, misalnya motor traksi. Dalam IGBT besar, dimungkinkan untuk menangani arus tinggi dalam kisaran ratusan ampere dan tegangan pemblokiran hingga 6kv. IGBT juga digunakan pada perangkat elektronik daya seperti konverter, inverter, dan peralatan lain yang memerlukan peralihan solid state. Bipolar tersedia dengan arus dan tegangan tinggi. Namun, kecepatan peralihannya rendah. Sebaliknya, MOSFET memiliki kecepatan peralihan yang tinggi meskipun harganya mahal.

3.19 Transistor Unijunction

3.19.1 Transistor Unijunction

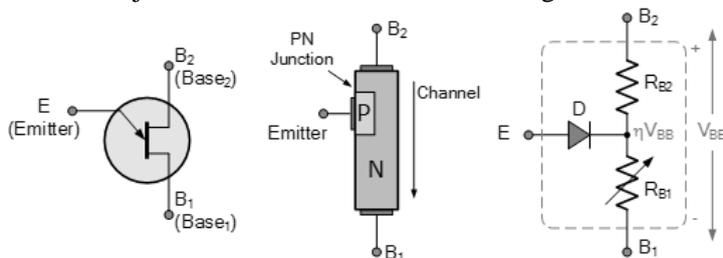
UJT adalah perangkat semikonduktor tiga terminal yang menunjukkan resistansi negatif dan karakteristik sakelar untuk digunakan sebagai osilator relaksasi dalam aplikasi kontrol fase. Transistor sambungan tunggal atau UJT untuk jangka pendek, adalah negara tiga perangkat terminal lain yang solid yang dapat digunakan di pintu gerbang pulsa, waktu sirkuit dan aplikasi memicu generator untuk switch dan kontrol baik thyristor dan triac untuk kontrol daya jenis aplikasi AC.

Seperti dioda, transistor unijunction dibangun dari bahan semikonduktor tipe-P dan tipe-N yang terpisah membentuk sebuah persimpangan-PN tunggal (maka namanya Uni-Junction) di dalam saluran tipe-N konduktor utama perangkat. Meskipun *Transistor Unijunction* memiliki nama transistor, karakteristik pensaklarannya sangat berbeda dari transistor bipolar atau efek medan konvensional karena tidak dapat digunakan untuk memperkuat sinyal tetapi digunakan sebagai transistor sakelar ON-OFF. UJT memiliki konduktivitas searah dan karakteristik impedansi negatif yang bertindak lebih seperti pembagi tegangan variabel selama kerusakan.

Seperti FET saluran-N, UJT terdiri dari sepotong padat bahan semikonduktor tipe-N yang membentuk saluran pembawa arus utama

dengan dua koneksi luarnya yang ditandai sebagai *Basis 2* (B_2) dan *Basis 1* (B_1). Koneksi ketiga ditandai sebagai *Emitter* (E) yang terletak di sepanjang saluran. Terminal emitor diwakili oleh panah yang menunjuk dari emitor tipe-P ke basis tipe-N.

Persimpangan pn penyearah Emitor dari transistor unijunction dibentuk dengan menggabungkan material tipe-P ke dalam saluran silikon tipe-N. Namun, UJT saluran-P dengan terminal Emitor tipe-N juga tersedia tetapi jarang digunakan. Persimpangan Emitor diposisikan di sepanjang saluran sehingga lebih dekat ke terminal B_2 daripada B_1 . Panah digunakan dalam simbol UJT yang mengarah ke pangkalan yang menunjukkan bahwa terminal Emitor positif dan batang silikon adalah material negatif. Di bawah ini menunjukkan simbol, konstruksi, dan rangkaian ekuivalen UJT.



Gambar 3.49 Simbol dan Konstruksi Transistor Unijunction

Perhatikan bahwa simbol transistor unijunction terlihat sangat mirip dengan simbol transistor junction field effect atau JFET, kecuali simbol panah bengkok yang menunjukkan input Emitor (E). Meskipun serupa dalam hal saluran ohmiknya, JFET dan UJT beroperasi dengan sangat berbeda dan tidak perlu bingung. Jadi bagaimana cara kerjanya? Tampak dari rangkaian ekuivalen di atas, bahwa saluran tipe-N pada dasarnya terdiri dari dua resistor R_{B2} dan R_{B1} secara seri dengan dioda ekuivalen (ideal), D mewakili persimpangan pn yang terhubung ke titik pusatnya. Persimpangan pn Emitor ini tetap pada posisinya di sepanjang saluran ohmik selama pembuatan dan oleh karena itu tidak dapat diubah.

Resistansi R_{B1} diberikan antara Emitor, E dan terminal B_1 , sedangkan resistansi R_{B2} diberikan antara Emitor, E dan terminal B_2 . Karena posisi fisik persimpangan pn lebih dekat ke terminal B_2 daripada B_1 , nilai resistif R_{B2} akan lebih kecil dari R_{B1} . Resistansi total batang silikon (resistansi Ohmic) akan bergantung pada tingkat doping aktual semikonduktor serta dimensi fisik saluran silikon tipe-N tetapi dapat diwakili oleh R_{BB} . Jika diukur dengan ohmmeter, resistansi statis ini

biasanya akan mengukur antara sekitar $4k\Omega$ dan $10k\Omega$ untuk UJT yang paling umum seperti 2N1671, 2N2646 atau 2N2647.

Kedua resistansi seri ini menghasilkan jaringan pembagi tegangan antara dua terminal basis transistor unijunction dan karena saluran ini membentang dari B2 ke B1, ketika tegangan diterapkan ke perangkat, potensi di titik mana pun di sepanjang saluran akan masuk proporsional dengan posisinya antara terminal B2 dan B1. Oleh karena itu, tingkat gradien tegangan tergantung pada jumlah tegangan suplai. Saat digunakan dalam sebuah rangkaian, terminal B1 dihubungkan ke ground dan Emitter berfungsi sebagai input ke perangkat. Misalkan tegangan V_{BB} diterapkan di UJT antara B2 dan B1 sehingga B2 bias relatif positif B1 .

Dengan input nol Emitter, tegangan yang dikembangkan melintasi R_{B1} (resistansi yang lebih rendah) dari pembagi tegangan resistif dapat dihitung sebagai:

Transistor sambungan tunggal R_{B1} Voltage

$$V_{RB1} = \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}} \times V_{BB}$$

Untuk transistor unijunction, rasio resistif R_{B1} ke R_{BB} yang ditunjukkan di atas disebut **rasio stand-off intrinsik** dan diberi simbol Yunani: η (eta). Nilai standar tipikal η berkisar dari 0,5 hingga 0,8 untuk UJT yang paling umum. Jika tegangan masukan positif kecil yang kurang dari tegangan yang dikembangkan melintasi resistansi, R_{B1} (ηV_{BB}) sekarang diterapkan ke terminal masukan Emitter, sambungan dioda pn bias balik, sehingga menawarkan impedansi yang sangat tinggi dan perangkat tidak mengadakan. UJT dimatikan "OFF" dan arus nol mengalir.

Namun, ketika tegangan input Emitter dinaikkan dan menjadi lebih besar dari V_{RB1} (atau $\eta V_{BB} + 0.7V$, di mana $0.7V$ sama dengan penurunan volt dioda pn junction) persimpangan pn menjadi bias maju dan transistor unijunction mulai bekerja. Hasilnya adalah arus Emitter, ηI_E sekarang mengalir dari Emitter ke wilayah Base. Pengaruh arus Emitter tambahan yang mengalir ke Base mengurangi bagian resistif saluran antara persimpangan Emitter dan terminal B1. Penurunan nilai resistansi R_{B1} ini ke nilai yang sangat rendah berarti bahwa persimpangan Emitter menjadi lebih bias maju sehingga menghasilkan aliran arus yang lebih besar. Pengaruh ini menghasilkan resistansi negatif di terminal Emitter.

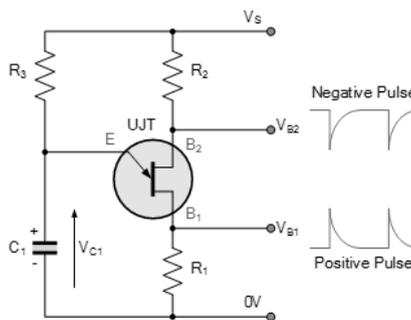
Demikian juga, jika tegangan input yang diterapkan antara terminal Emitter dan B_1 berkurang ke nilai di bawah kerusakan, nilai resistif R_{B1} meningkat ke nilai tinggi.

Kemudian **Transistor Unijunction** dapat dianggap sebagai perangkat pemutus tegangan. Jadi kita bisa melihat bahwa perlawanan yang disajikan oleh R_{B1} adalah variabel dan tergantung pada nilai Emitter saat ini, I_E . Kemudian bias maju persimpangan Emitter sehubungan dengan B_1 menyebabkan lebih banyak arus mengalir yang mengurangi resistansi antara Emitter, E dan B_1 . Dengan kata lain, aliran arus ke Emitter UJT menyebabkan nilai resistif R_{B1} berkurang dan tegangan turun melewatinya, V_{RB1} juga harus berkurang, memungkinkan lebih banyak arus mengalir menghasilkan kondisi resistansi negatif.

3.19.2 Aplikasi Transistor Unijunction

Sudah diketahui bagaimana *transistor unijunction* bekerja, untuk apa UJT dapat digunakan. Aplikasi yang paling umum dari transistor unijunction adalah sebagai perangkat pemicu untuk *SCR* dan *Triac*, tetapi aplikasi UJT lainnya termasuk generator gigi gergaji, osilator sederhana, kontrol fase, dan rangkaian pengaturan waktu. Yang paling sederhana dari semua rangkaian UJT adalah Osilator Relaksasi yang menghasilkan bentuk gelombang non-sinusoidal.

Dalam rangkaian osilator relaksasi UJT dasar dan tipikal, terminal Emitter dari transistor unijunction terhubung ke persimpangan resistor dan kapasitor yang terhubung seri, rangkaian RC seperti yang ditunjukkan di bawah ini.

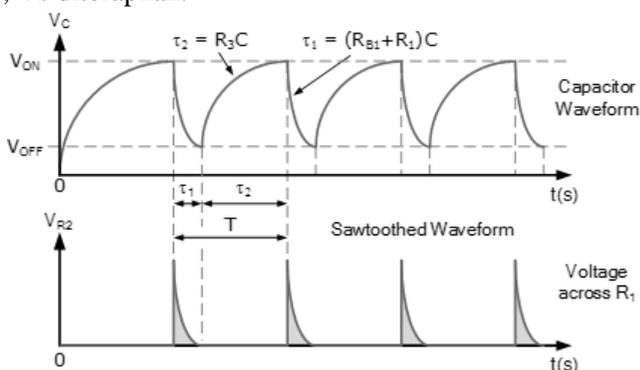


Gambar 3.50 Osilator Relaksasi Transistor Unijunction

Ketika tegangan (V_s) pertama kali diterapkan, transistor unijunction menjadi "OFF" dan kapasitor C_1 sepenuhnya kosong tetapi mulai mengisi secara eksponensial melalui resistor R_3 . Karena Emitor UJT terhubung ke kapasitor, ketika tegangan pengisian V_c melintasi kapasitor menjadi lebih besar dari nilai penurunan volt dioda, sambungan pn berperilaku sebagai dioda normal dan menjadi bias maju yang memicu UJT menjadi konduksi. Transistor unijunction berada pada posisi "ON". Pada titik ini Impedansi Emitor ke B1 runtuh saat Emitor masuk ke status jenuh impedansi rendah dengan aliran arus Emitor melalui R_1 berlangsung.

Karena nilai ohmik resistor R_1 sangat rendah, kapasitor melepaskan dengan cepat melalui UJT dan pulsa tegangan yang naik cepat muncul di R_1 . Juga, karena kapasitor melepaskan lebih cepat melalui UJT daripada mengisi melalui resistor R_3 , waktu pemakaian jauh lebih sedikit daripada waktu pengisian karena kapasitor dilepaskan melalui resistansi rendah UJT.

Ketika tegangan melintasi kapasitor berkurang di bawah titik pegang sambungan pn (V_{OFF}), UJT berubah menjadi "OFF" dan tidak ada arus yang mengalir ke sambungan Emitor sehingga sekali lagi kapasitor mengisi melalui resistor R_3 dan proses pengisian dan pengosongan ini antara V_{ON} dan V_{OFF} terus-menerus diulangi saat ada tegangan suplai, V_s diterapkan.



Gambar 3.51 Bentuk Gelombang Osilator UJT

Kemudian kita dapat melihat bahwa osilator unijunction terus menerus mengaktifkan "ON" dan "OFF" tanpa umpan balik. Frekuensi operasi osilator secara langsung dipengaruhi oleh nilai resistansi pengisian R_3 , secara seri dengan kapasitor C_1 dan nilai η . Bentuk pulsa keluaran yang dihasilkan dari terminal Base1 (B_1) adalah bentuk

gelombang gigi gergaji dan untuk mengatur periode waktu, Anda hanya perlu mengubah nilai resistansi ohmik, R_3 karena ini menetapkan konstanta waktu RC untuk pengisian kapasitor.

Periode waktu, T dari bentuk gelombang gigi gergaji akan diberikan sebagai waktu pengisian ditambah waktu pemakaian kapasitor. Seperti waktu debit, τ_1 umumnya sangat singkat dibandingkan dengan yang lebih besar RC waktu pengisian, τ_2 jangka waktu osilasi kurang lebih setara dengan $T \cong \tau_2$. Frekuensi osilasi karena itu diberikan oleh $f = 1 / T$.

Penerapan Osilator UJT dapat dicontohkan dengan melihat lembar data untuk Transistor Unijunction 2N2646 yang memberikan rasio stand-off intrinsik η sebagai 0,65. Jika kapasitor 100nF digunakan untuk menghasilkan pulsa timing, hitung resistor timing yang diperlukan untuk menghasilkan frekuensi osilasi 100Hz. Dari data tersebut dapat dilakukan perhitungan sebagai berikut>

1. Periode:

$$f = \frac{1}{T}, \quad \therefore T = \frac{1}{f} = \frac{1}{100} = 10\text{mS}$$

2. Nilai resistor timing, R_3

$$T = R_3 C \ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right)$$

$$\therefore R_3 = \frac{T}{C \times \ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right)} = \frac{10\text{mS}}{100\text{nF} \times \ln\left(\frac{1}{1-0.65}\right)}$$

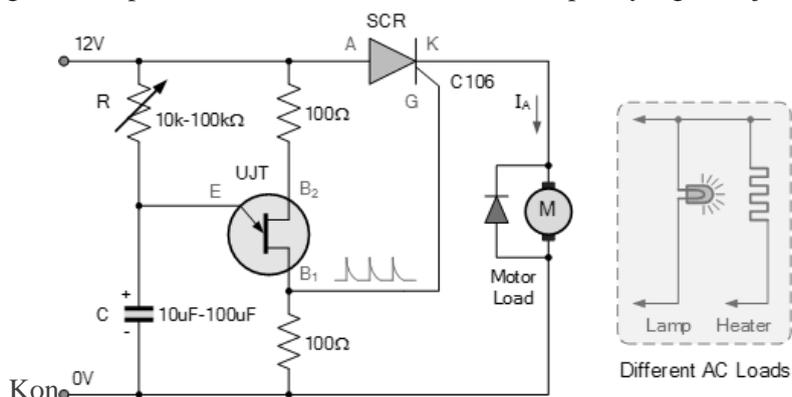
$$\therefore R_3 = 95.238\Omega \text{ or } 95.3\text{k}\Omega$$

Kemudian nilai resistor pengisian yang diperlukan dalam contoh sederhana ini dihitung sebagai 95,3 k Ω ke nilai pilihan terdekat. Namun, ada kondisi tertentu yang diperlukan agar osilator relaksasi UJT beroperasi dengan benar karena nilai resistif R_3 bisa terlalu besar atau terlalu kecil.

Misalnya, jika nilai R_3 terlalu besar, (Megohms) kapasitor mungkin tidak mengisi daya dengan cukup untuk memicu Emitter Unijunction menjadi konduksi tetapi juga harus cukup besar untuk memastikan bahwa UJT beralih ke "OFF" setelah kapasitor dilepaskan ke di bawah tegangan pemicu yang lebih rendah.

Demikian juga jika nilai R3 terlalu kecil, (beberapa ratus Ohm) setelah memicu arus yang mengalir ke terminal Emitter mungkin cukup besar untuk mendorong perangkat ke wilayah jenuhnya mencegah matikan "OFF" sepenuhnya. Bagaimanapun rangkaian osilator unijunction akan gagal berosilasi.

Salah satu aplikasi tipikal rangkaian transistor unijunction di atas adalah untuk menghasilkan rangkaian pulsa untuk menyalakan dan mengontrol sebuah thyristor. Dengan menggunakan UJT sebagai rangkaian pemacu kontrol fasa dalam hubungannya dengan SCR atau Triac, kita dapat mengatur kecepatan motor AC atau DC universal seperti yang ditunjukkan.



Gambar 3.52 Kontrol Kecepatan Transistor Unijunction

Dengan menggunakan rangkaian di atas, kita dapat mengontrol kecepatan motor seri universal (atau jenis beban apa pun yang kita inginkan, pemanas, lampu, dll) dengan mengatur arus yang mengalir melalui SCR. Untuk mengontrol kecepatan motor, cukup ubah frekuensi pulsa gigi gergaji, yang dicapai dengan memvariasikan nilai potensiometer.

3.19.3 Ringkasan Transistor Unijunction

Unijunction Transistor, singkatnya UJT, adalah perangkat semikonduktor elektronik yang hanya memiliki satu sambungan pn dalam saluran ohmik tipe-N (atau tipe-P) yang didoping ringan. UJT memiliki tiga terminal, satu berlabel Emitter (E) dan dua Basis (B1 dan B2).

Dua kontak ohmik B1 dan B2 dipasang di setiap ujung saluran semikonduktor dengan resistansi antara B1 dan B2, ketika emitor dihubungkan terbuka disebut resistansi antarbase, R_{BB} . Jika diukur dengan ohmmeter, resistansi statis ini biasanya akan mengukur antara sekitar 4 k Ω dan 10 k Ω untuk UJT yang paling umum.

Rasio R_{B1} ke R_{BB} disebut *rasio stand-off intrinsik*, dan diberi simbol Yunani: η (eta). Nilai standar tipikal η berkisar dari 0,5 hingga 0,8 untuk UJT yang paling umum. Transistor unijunction adalah perangkat pemacu solid state yang dapat digunakan di berbagai rangkaian dan aplikasi, mulai dari penembakan thyristor dan triac, hingga penggunaan generator gigi gergaji untuk rangkaian kontrol fase. Karakteristik resistansi negatif dari UJT juga membuat itu sangat berguna sebagai osilator relaksasi sederhana.

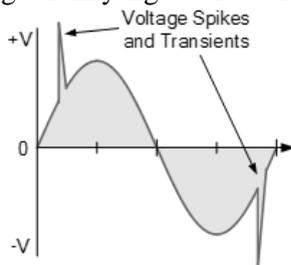
Ketika dihubungkan sebagai osilator relaksasi, ia dapat beroperasi secara independen tanpa sirkuit tangki atau jaringan umpan balik RC yang rumit. Ketika dihubungkan dengan cara ini, transistor unijunction mampu menghasilkan rangkaian pulsa dengan durasi yang bervariasi hanya dengan memvariasikan nilai kapasitor tunggal, (C) atau resistor, (R). Transistor unijunction yang tersedia secara umum termasuk 2N1671, 2N2646, 2N2647, dll, dengan 2N2646 menjadi UJT paling populer untuk digunakan dalam generator pulsa dan gigi gergaji dan sirkuit waktu tunda. Jenis lain dari perangkat transistor unijunction yang tersedia disebut Programmable UJT, yang parameter pengalihannya dapat diatur oleh resistor eksternal. Transistor Unijunction Programmable yang paling umum adalah 2N6027 dan 2N6028.

3.20 Perangkat Pemotong Transien

Perangkat penekan transien dapat secara signifikan mengurangi jumlah energi yang dilepaskan sebagai akibat lonjakan arus dan lonjakan tegangan berlebih. Ini memotivasi adanya pemikiran bahwa catu daya AC atau DC yang ini digunakan untuk menyalakan sirkuit ini adalah pasokan yang bersih dan diatur dengan baik. Namun, peralihan beban induktif AC atau peralihan kontak relai DC dan motor DC sebagai bagian dari proyek mikrokontroler semuanya digabungkan untuk menghasilkan catu daya berkualitas yang sulit dipertahankan.

Transien sakelar induktif ini terjadi ketika beberapa bentuk beban induktif atau reaktif, seperti motor, koil solenoida atau koil relai, tiba-tiba

dimatikan. Runtuhnya medan magnetnya dengan cepat menyebabkan tegangan transien yang ditumpangkan ke suplai kondisi-mapan. Transien tegangan switching induktif ini dapat mencapai 1.000 volt. Transien adalah langkah tegangan yang sangat curam yang terjadi di rangkaian listrik karena pelepasan tiba-tiba dari energi yang disimpan sebelumnya, baik induktif atau kapasitif, yang menghasilkan transien tegangan tinggi, atau lonjakan arus. Pelepasan energi yang tiba-tiba ini kembali ke rangkaian karena beberapa tindakan switching menciptakan lonjakan tegangan transien dalam bentuk impuls energi yang curam yang secara teori dapat bernilai berapa pun.



Gambar 3.53 Spike dan transien tegangan

Lonjakan perpindahan transien dv/dt tinggi ini dapat terjadi baik untuk periode waktu yang sangat singkat (mili-detik atau mikro-detik), atau dapat terjadi begitu sering dalam periode waktu yang singkat, misalnya secara acak dua atau tiga kali sehari. Harus disadari bahwa transien tegangan tidak selalu dimulai dari nol volt atau pada awal siklus, tetapi dapat ditumpangkan ke level tegangan lain. Apa pun itu, transien buruk karena dapat merusak peralatan elektronik dan oleh karena itu perlu ditekan dan dikendalikan. Perangkat penekan transien dapat memiliki berbagai bentuk mulai dari kontak busur, filter, hingga perangkat semikonduktor solid state. Perangkat penekan transien semikonduktor diskrit seperti Metal-oxide Varistor, atau MOV, sejauh ini paling umum karena tersedia dalam berbagai penyerap energi dan peringkat tegangan sehingga memungkinkan untuk melakukan kontrol ketat atas transien yang tidak diinginkan dan berpotensi merusak atau lebih. Lonjakan tegangan.

Perangkat penekan transien dapat digunakan secara seri dengan beban untuk melemahkan atau mengurangi nilai energi transien yang mencegah perambatannya melalui rangkaian, atau dapat digunakan secara paralel dengan beban untuk mengalihkan transien menjauh, biasanya ke ground, dan jadi batasi atau jepit tegangan sisa. Atenuasi transien tegangan biasanya dilakukan dengan menggunakan filter low-pass yang dihubungkan secara

seri dengan rangkaian beban. Ketika transien tegangan terjadi, biasanya terjadi lonjakan frekuensi tinggi yang bergerak cepat sehingga filter melemahkan atau memblokir transien frekuensi tinggi ini sambil tetap membiarkan daya frekuensi rendah atau komponen sinyal terus berlanjut tanpa gangguan. Contoh yang baik dari peredam transien adalah kabel ekstensi yang disaring listrik.

Pengalihan transien biasanya dilakukan dengan menggunakan perangkat tipe penjepit tegangan atau dengan menggunakan apa yang biasa disebut perangkat tipe crowbar. Perangkat yang terhubung paralel ini menunjukkan karakteristik impedansi nonlinier karena arus yang mengalir melaluinya tidak linier dengan tegangan di terminalnya seperti yang diberikan oleh Hukum Ohm.



Gambar 3.54 Metal-oxide Varistor,

Perangkat penjepit tegangan seperti MOV, memiliki impedansi variabel tergantung pada arus yang mengalir melalui perangkat atau tegangan yang melintasi terminalnya. Di bawah kondisi operasi kondisinya normal, perangkat menawarkan impedansi tinggi dan oleh karena itu tidak berpengaruh pada sirkuit yang terhubung.

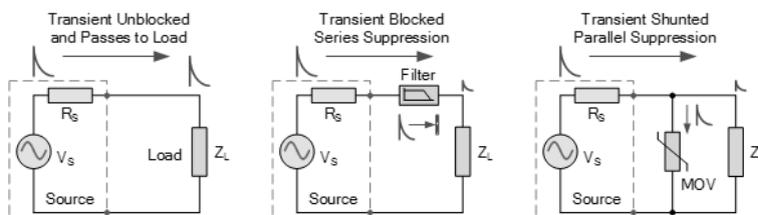
Namun, ketika tegangan transien terjadi, impedansi perangkat berubah meningkatkan arus yang ditarik melalui perangkat saat tegangan naik. Hasilnya adalah penjepitan tegangan transien yang jelas. Karakteristik volt-ampere dari perangkat penjepit umumnya bergantung pada waktu karena peningkatan besar arus menyebabkan perangkat mengeluarkan banyak energi.

Perangkat crowbar adalah jenis perangkat penekan transien lain yang mengalihkan lonjakan tegangan dari rangkaian sebagai hasil dari aksi

penyalan jenis sakelar. Perangkat crowbar serupa dalam pengoperasiannya dengan dioda zener karena dalam kondisi stabil normal tidak berpengaruh pada sirkuit. Ketika transien terdeteksi, mereka dengan cepat mengaktifkan "ON" jalur impedansi yang sangat rendah yang mengalihkan transien dari beban yang terhubung paralel.

Kemudian perangkat penekan transien diskrit dapat dibagi menjadi tiga kategori dasar, tergantung pada jenis koneksi dan operasinya.

- ✓ Seri (memblokir) Filter Akses Rendah yang terhubung.
- ✓ Penjepit Tegangan dan Pemotong Tegangan yang terhubung secara paralel (shunting).
- ✓ Perangkat Crowbar yang terhubung secara paralel (shunting).
- ✓ dan ini dapat ditampilkan sebagai:
- ✓ Perangkat Penindasan Transien



Gambar 3.55 Filter Penekan Transien Seri

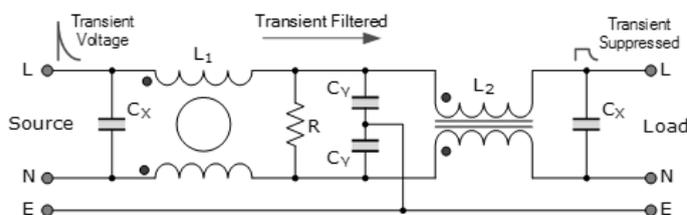
Transien pada saluran listrik AC dapat berkisar dari beberapa volt hingga lebih dari beberapa kilo-volt di atas tegangan listrik normal. Perangkat penekan yang melemahkan atau memblokir sirkuit filter penggunaan transien ini secara efektif menghilangkan transien yang lahir dari listrik ini dengan memasukkan filter 100Hz secara seri dengan beban yang terhubung.

Komponen frekuensi transien tegangan switching cepat bisa jauh lebih tinggi daripada frekuensi fundamental yang bergerak lambat dari sumber AC. Jadi pilihan yang jelas untuk melemahkan dan mengontrol transien yang tidak diinginkan ini adalah dengan menggunakan bagian filter low-pass antara sumber dan beban.

Filter akses rendah, seperti filter LC, dapat digunakan untuk melemahkan transien frekuensi tinggi dan memungkinkan daya atau sinyal frekuensi rendah melewati tanpa gangguan. Bentuk paling sederhana dari

filter penekan transien adalah filter RC resistor-kapasitor yang ditempatkan langsung di seberang saluran listrik untuk melemahkan transien frekuensi tinggi.

Filter yang ditujukan untuk aplikasi daya AC umumnya terdiri dari induktansi dan kapasitor untuk membentuk filter LC multistage yang tingkat atenuasinya tergantung pada jumlah tahapan LC dalam filter. Filter penekan transien listrik AC terhubung seri tipikal ditampilkan di bawah ini.



Gambar 3.56 Filter Penindasan Transien Umum

Filter AC low-pass dua tahap dasar ini memberikan kerugian penyisipan tinggi antara saluran-ke-saluran dan saluran-ke-tanah di seluruh rentang frekuensi yang menawarkan perlindungan tegangan transien yang efektif dengan menghentikan transien frekuensi tinggi dan kebisingan dari mencapai beban yang terhubung peralatan. Selain mengurangi lonjakan tegangan dan transien, filter daya listrik ini dapat membantu menghilangkan gangguan frekuensi radio atau emisi yang dikeluarkan oleh catu daya.

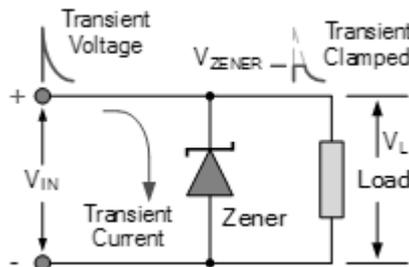
Voltage Clamping Transient Suppressors atau Penjepit tegangan digunakan untuk membatasi amplitudo transien di sirkuit. Perangkat penjepit tegangan mulai berjalan saat tegangan ambang batas yang telah ditetapkan terlampaui, kemudian kembali ke mode non-konduksi saat tegangan berlebih turun di bawah tingkat ambang batasnya. Jadi lonjakan tegangan lebih dipotong ke tingkat yang aman oleh perangkat penjepit.

Perangkat penjepit tegangan umumnya ditempatkan di seluruh suplai dan secara paralel dengan beban untuk melindunginya dari transien tegangan dv/dt tinggi yang tidak diinginkan. Penjepit tegangan bisa menjadi sesuatu yang sederhana seperti dioda zener melintasi catu daya DC, tetapi untuk pasokan AC dua arah kita perlu menggunakan varistor oksida logam (MOV), dioda penekan, atau resistor bergantung tegangan (VDR) untuk perlindungan tegangan berlebih.

Perhatikan bahwa perangkat penjepit tegangan mengalihkan arus lonjakan, mereka tidak menyerapnya seperti pada filter, jadi kehati-hatian harus dilakukan untuk memastikan bahwa jalur yang digunakan untuk mengalihkan transien tidak menghasilkan atau menciptakan masalah sendiri untuk rangkaian.

Penahan Transien Dioda Zener digunakan untuk perlindungan pada suplai DC (searah) karena mereka berperilaku seperti dioda normal dalam arah bias maju, tetapi rusak dan berjalan dalam arah bias terbalik. Jadi tegangan breakdown terbalik dioda zener, V_Z dapat digunakan sebagai referensi atau level tegangan penjepit.

Dalam arah sebaliknya dan di bawah tegangan rusaknya zener, dioda V_Z zener menunjukkan impedansi tinggi ke suplai dan mengalirkan arus bocor yang sangat sedikit. Namun, ketika tegangan melintasi zener lebih besar dari tegangan zenernya, ia mulai rusak dengan konduksi yang meningkat secara bertahap ketika tegangan yang melewatinya meningkat menunjukkan jalur impedansi yang sangat rendah ke transien tegangan berlebih.



Gambar 3.57 Penekan Transien Zener

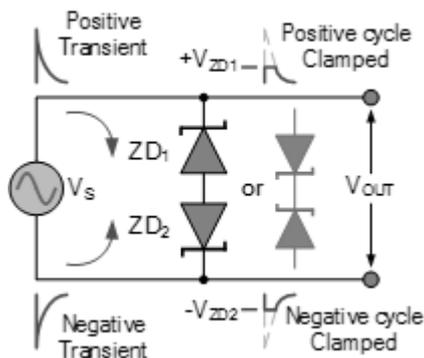
Ketika dihubungkan melalui suplai atau seluruh komponen yang dilindungi, dioda zener secara efektif "tidak terlihat" sampai tegangan transien muncul karena memiliki impedansi tinggi di bawah tegangan breakdown terbalik dan impedansi rendah di atas tegangan breakdown terbalik.

Ketika zener berada dalam mode operasi dadal, yaitu ketika menekan transien, dioda menjepit tegangan berlebih secara instan untuk membatasi

lonjakan ke tingkat yang aman dan kemudian kembali normal setelah tegangan transien berada di bawah tegangan zener, V_Z . Kemudian tegangan penjepit, V_C oleh karena itu sama dengan tegangan kerusakan terbalik zener. Karena karakteristik penjepitan ini, dioda zener digunakan untuk menekan transien karena ia menjepit arus yang berpotensi merusak dari beban yang dilindungi.

Arus lonjakan dan kemampuan daya dioda zener kira-kira sebanding dengan area persimpangannya. Kebanyakan dioda zener dirancang untuk beroperasi pada tingkat daya dan tegangan rendah. Dioda zener yang dirancang untuk beroperasi pada tingkat tegangan yang lebih tinggi dan menyerap arus lonjakan yang lebih tinggi tanpa kerusakan dikenal sebagai *Dioda Avalanche*.

Ini mengatakan sebelumnya bahwa dioda zener tunggal hanya dapat digunakan untuk penindasan transien pada suplai DC kondisi tunak karena karakteristik dioda bias maju mereka. Tetapi dengan menghubungkan dua dioda zener “back-to-back” kita dapat menggunakan karakteristik penjepitannya pada suplai AC dua arah.



Gambar 3.58 Penekan Transien Zener

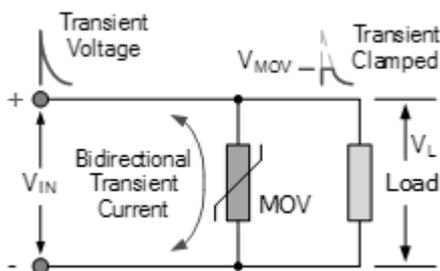
Dengan menghubungkan dua dioda zener secara berurutan, sekarang kita dapat melindungi setengah siklus positif dari transien tegangan lebih dengan satu dioda zener dan setengah siklus negatif dengan yang lain. Jika kedua dioda zener memiliki tegangan kerusakan balik yang sama, maka tegangan transien dari kedua polaritas akan dijepit pada level tegangan zener yang sama karena satu dioda zener akan secara efektif dalam mode bias balik sementara yang lain akan dalam bias maju mode.

Sementara dua dioda zener back-to-back dapat digunakan untuk penindasan transien pasokan AC, perangkat penekan tegangan transien (TVS) tersedia dengan persimpangan berlawanan yang dibangun ke dalam perangkat tunggal sehingga ideal untuk aplikasi daya AC. Dioda longsor dua arah tersedia dalam berbagai level tegangan dan daya.

Penekan transien MOV digunakan untuk mengatasi sistem penekanan yang bekerja cepat dan efektif dalam menjepit tegangan berlebih. Selain peringkat tegangan tingginya, varistor oksida logam mampu menangani arus lonjakan yang jauh lebih besar, baik pada laju yang lebih lambat, dan dapat digunakan di saluran listrik DC dan AC untuk melindungi dari tegangan ekstrem seperti transien tegangan berlebih.

MOV adalah resistor variabel dependen tegangan semikonduktor yang ditempatkan secara paralel (shunt) dengan beban, atau komponen yang akan diproteksi. MOV memiliki resistansi tinggi pada voltase rendah dan resistansi rendah pada voltase tinggi dan karakteristik arus voltase non-liniernya membuatnya berguna dalam melindungi dari lonjakan saluran listrik dan transien voltase lebih.

MOV berperilaku dengan cara yang mirip dengan dioda zener back-to-back karena dapat digunakan untuk penjepitan tegangan dua arah dengan konduksi transien meningkat ketika tegangan meningkat. Jenis varistor oksida logam berbentuk cakram kecil ini menawarkan tegangan tembus yang tinggi di kedua arah dan dapat menyerap jumlah energi yang lebih tinggi, sering kali diberi nilai dalam joule daripada dalam watt.



Gambar 3.59 Penekan transien MOV

Menjadi perangkat penjepit tegangan, varistor oksida logam menawarkan resistansi yang sangat tinggi ketika tegangan pada terminalnya di bawah nilai kerusakan yang telah ditentukan yang bertindak lebih seperti

resistor yang bergantung pada tegangan (VDR). Ketika terkena tegangan transien tinggi dari salah satu polaritas, karakteristik kelistrikan perangkat berubah dan hambatannya menjadi sangat kecil, menjepit tegangan ke tingkat yang aman.

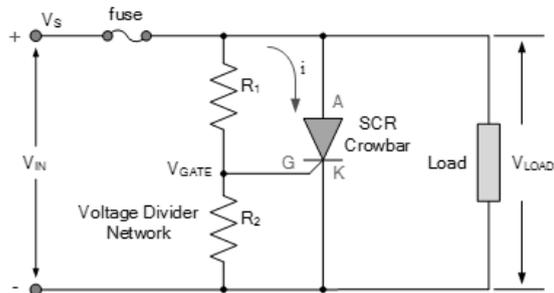
Kemudian tujuan utama varistor oksida logam bila digunakan sebagai perangkat penekan transien adalah untuk menjepit tegangan yang muncul di atasnya ke tingkat yang aman seperti pada kebanyakan aplikasi, perangkat ditempatkan secara paralel dengan sirkuit atau perangkat yang akan dilindungi.

Tipe lain dari paralel (shunt) dihubungkan perangkat penindasan transien dikenal sebagai *crowbar* perlindungan perangkat elektronik *crowbar* melakukan ketika tegangan ambang yang telah ditetapkan terlampaui dengan memicu ke konduktif di negara-mengakibatkan drop tegangan dari hanya beberapa volt, maka nama *crowbar* .

Perangkat dan sirkuit *crowbar* secara efektif membuat korsleting ketika tegangan pemicu tercapai dan biasanya ditemukan pada catu daya stabil yang telah dirancang untuk menghasilkan tegangan keluaran tetap, misalnya 12 volt atau 5 volt konstan, tetapi juga dapat digunakan untuk melindungi sirkuit atau beban dari tegangan transien.

Sirkuit *crowbar* aktif berbasis semikonduktor ditempatkan secara paralel (shunt) dengan beban dan mampu menipiskan arus lonjakan yang sangat besar. Thyristor umumnya digunakan di sirkuit *crowbar* karena memiliki tegangan "on-state" yang rendah dan dapat menjaga tingkat tegangan jauh di bawah tingkat yang merusak. Setelah ditembakkan, mereka dapat mengalihkan sejumlah besar energi transien ke ground melalui diri mereka sendiri karena mereka bertindak sebagai sakelar jenis impedansi yang sangat rendah.

Kerugiannya di sini adalah bahwa korsleting ini dapat menyebabkan sekering sirkuit atau pemutus sirkuit beroperasi jika sirkuit pergantian tambahan tidak disediakan untuk mematikan "OFF" klem *crowbar* setelah dinyalakan "ON" terutama dalam sistem DC karena catu daya disingkat oleh perangkat *crowbar* dan tegangan keluaran akan menjadi nol. Pertimbangkan rangkaian penjepit *crowbar* sederhana di bawah ini.



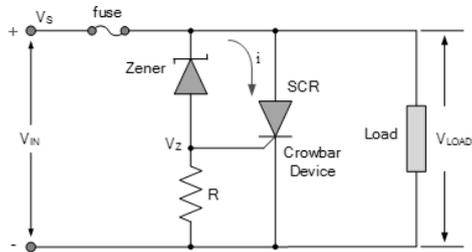
Gambar 3.60 Sirkuit Penjepit Crowbar Dasar

Di sini thyristor atau SCR ditempatkan melintasi suplai dan beban dengan rangkaian pembagi tegangan yang diatur oleh resistor R_1 dan R_2 diatur untuk membiaskan gerbang thyristor pada level yang cukup rendah agar tidak dipicu "ON" selama operasi normal. Kemudian SCR terputus dan non-konduksi.

Namun ketika transien tegangan lebih terjadi dan naik di atas tingkat yang telah ditentukan, jatuh tegangan resistor R_2 juga meningkat dan menjadi cukup untuk memicu gerbang SCR ke konduksi yang pada gilirannya klem tegangan transien melindungi beban. Masalahnya di sini adalah bahwa sementara beban dilindungi dari tegangan berlebih, itu tidak melindungi catu daya sehingga meniup sekering catu daya. Kemudian perlindungan beban dari transien yang dibuat oleh hubungan arus pendek catu daya mungkin lebih besar daripada kejadian yang memicunya.

Selain menggunakan thyristor, untuk proteksi tegangan berlebih pada catu daya AC, triac dapat digunakan sebagai perangkat crowbar dan dipicu ke konduksi dengan cara yang sama. Keuntungan menggunakan thyristor atau triac untuk perlindungan crowbar pada suplai AC adalah bahwa mereka akan mati secara otomatis di setiap setengah siklus. Jadi jika transien durasi pendek dari sepersekian milidetik memicu perangkat crowbar, tindakan shunting hanya akan membuat arus pendek saluran listrik AC yang terhubung setidaknya selama satu setengah siklus yang mungkin terlalu cepat untuk sekering.

Kita dapat meningkatkan penginderaan transien dan kinerja rangkaian crowbar dasar di atas dengan menggunakan dioda zener untuk mendeteksi kondisi tegangan berlebih. Disini rangkaian pembagi tegangan resistif telah diganti dengan dioda zener seperti pada gambar.



Gambar 3.61 Sirkuit Penjepit Crowbar Zener

Tegangan suplai DC, V_S dipantau oleh dioda zener yang bertindak seperti komponen deteksi transien, dan tegangan zenernya, peringkat V_Z menentukan level tegangan di mana SCR menyala. Ketika tegangan suplai DC lebih rendah dari peringkat bias balik dioda zener, dioda zener tidak bekerja sehingga tidak ada tegangan atau arus yang diterapkan ke gerbang SCR sehingga tetap "OFF", non-konduksi.

Jika tegangan suplai meningkat di atas peringkat tegangan zener seperti dalam kasus transien tegangan lebih, dioda zener mulai berjalan sehingga arus gerbang mengalir ke SCR dengan mengubahnya menjadi "ON" dan memendekkan tegangan suplai beban dan meniup sekring. Kemudian beban dilindungi dari tegangan transien di atas tegangan zener, V_Z karena dioda zener hanya membawa arus gerbang untuk SCR agar "ON", karena SCR itu sendiri akan membawa sebagian besar arus shunt.

Sementara rangkaian crowbar zener ini merupakan perbaikan pada jaringan pembagi tegangan dasar, ia mengalami aksi nyala yang lembut karena lutut pada tegangan tembus zener melengkung daripada naik tajam. Rangkaian dasar crowbar yang dapat dimodifikasi dan ditingkatkan lebih lanjut dengan menambahkan beberapa penguatan tegangan pada rangkaian pendeteksi dan pemicuan dalam bentuk rangkaian penguat tunggal atau rangkaian op-amp.

Untuk itu, thyristor dengan pemicu tegangan berlebih yang terpasang telah dirancang untuk transien searah atau dua arah crowbar dan lonjakan tegangan. Seperti rangkaian IC crowbar seri RCA SK9345 yang dirancang untuk melindungi catu daya 15 volt, SK9346 yang melindungi 112 volt, dan SK9347 yang melindungi catu daya 115 volt.

Semua menggunakan sirkuit terintegrasi dengan dioda zener built-in, transistor, dan SCR. Sirkuit penginderaan crowbar tegangan berlebih MC3423 adalah IC tunggal yang dirancang untuk digunakan dengan SCR crowbar eksternal.

Saat kita menggunakan lebih banyak perangkat elektronik dalam kehidupan sehari-hari, kita menjadi lebih bergantung pada perangkat pelindung tegangan berlebih untuk peran mereka dalam melindungi peralatan kita dari lonjakan dan lonjakan tegangan. Tegangan lebih transien biasanya disebabkan oleh rangkaian sakelar induktif atau kapasitif yang melepaskan lonjakan tegangan tinggi yang tiba-tiba.

Lonjakan dan lonjakan tegangan ini dapat terdiri dari energi tinggi untuk periode waktu yang singkat, atau sesekali untuk periode waktu yang singkat dan ditumpahkan di atas nilai steady-state seperti bentuk gelombang listrik AC.

Sirkuit proteksi tegangan berlebih dapat mengambil berbagai bentuk dari filter terhubung seri yang dirancang untuk melewatkan tegangan dan arus frekuensi saluran listrik sambil menolak harmonisa dan kebisingan frekuensi tinggi yang tidak diinginkan, hingga rangkaian penjepit dan crowbar yang terhubung paralel yang menghilangkan tegangan berlebih ke ground.

Jenis yang paling sederhana dari filter saluran listrik AC adalah kapasitor yang ditempatkan melintasi sumber tegangan. Impedansi kapasitor berubah yang mengakibatkan atenuasi transien frekuensi tinggi. Di sebagian besar aplikasi, perangkat penekan transien ditempatkan secara paralel dengan beban yang dilindungi, atau secara paralel dengan beberapa komponen yang akan dilindungi.

Tujuan utama rangkaian penekan tegangan adalah untuk menjepit tegangan ke tingkat yang aman. Bentuk perangkat penjepit tegangan yang paling umum adalah varistor oksida logam, MOV dan Dioda Zener. MOV paling cocok untuk perlindungan pada catu daya AC dua arah, sedangkan dioda zener paling cocok untuk catu daya DC rendah energi.

Sirkuit crowbar solid-state yang menggunakan SCR atau triac sebagai "crowbar" dengan cepat mempersingkat transien tegangan melintasi catu daya untuk meledakkan sekering untuk perlindungan tegangan

berlebih. Pelindung transien / lonjakan hybrid menggabungkan crowbar dengan penjepit, atau penjepit / crowbar dengan filter, dalam satu modul dan ada banyak kombinasi berbeda yang memungkinkan.

3.21 Relai Rangkaian Terpadu

Solid State Relay adalah semikonduktor yang setara dengan relay elektromekanis dan dapat digunakan untuk mengontrol beban listrik tanpa menggunakan bagian yang bergerak. Tidak seperti relay elektro-mekanis (EMR) yang menggunakan kumparan, medan magnet, pegas, dan kontak mekanis untuk mengoperasikan dan mengalihkan suplai, relay solid state, atau SSR, tidak memiliki bagian yang bergerak, tetapi menggunakan sifat listrik dan optik semikonduktor solid state. untuk melakukan fungsi isolasi dan pengalihan masukan ke keluaran.

Sama seperti relay elektro-mekanis normal, SSR menyediakan isolasi listrik lengkap antara kontak input dan outputnya dengan outputnya bertindak seperti sakelar listrik konvensional karena memiliki resistansi yang sangat tinggi, hampir tak terbatas saat non-konduktor (terbuka), dan resistansi yang sangat rendah. saat melakukan (tertutup). Relay solid state dapat dirancang untuk mengalihkan arus AC atau DC dengan menggunakan output transistor SCR, TRIAC, atau switching alih-alih kontak mekanis normal-terbuka (NO) biasa.

Sementara relay solid state dan relay elektro-mekanis pada dasarnya serupa karena input tegangan rendahnya diisolasi secara elektrik dari keluaran yang mengalihkan dan mengontrol beban, relay elektro-mekanis memiliki siklus hidup kontak terbatas, dapat memakan banyak ruang. dan memiliki kecepatan sakelar yang lebih lambat, terutama relay dan kontaktor daya yang besar. Relay solid state tidak memiliki batasan seperti itu.



Gambar 3.62 Relai Solid State

Dengan demikian, kelebihan utama solid state relay dibandingkan relay elektro-mekanis konvensional adalah tidak ada bagian yang bergerak yang aus, dan karena itu tidak ada masalah pantulan kontak, yang dapat mengaktifkan "ON" dan "OFF" jauh lebih cepat daripada relay mekanis. armature dapat bergerak, serta turn-on tegangan nol dan turn-off arus nol menghilangkan kebisingan dan transien listrik.

Relay solid state dapat dibeli dalam paket standar mulai dari beberapa volt atau ampere hingga ratusan volt dan ampere kemampuan switching keluaran. Namun, solid state relay dengan pengenalan arus yang sangat tinggi (150A plus) masih terlalu mahal untuk dibeli karena semikonduktor daya dan persyaratan heat sink, dan dengan demikian, kontaktor elektro-mekanis yang lebih murah masih digunakan.

Mirip dengan relay elektro-mekanis, tegangan masukan kecil, biasanya 3 hingga 32 volt DC, dapat digunakan untuk mengontrol tegangan atau arus keluaran yang jauh lebih besar. Misalnya 240V, 10Amps. Ini membuat mereka ideal untuk mikrokontroler, PIC dan Arduino interfacing sebagai sinyal arus rendah, 5-volt dari katakana mikrokontroler atau gerbang logika dapat digunakan untuk mengontrol beban rangkaian tertentu, dan ini dicapai dengan penggunaan opto- isolator.

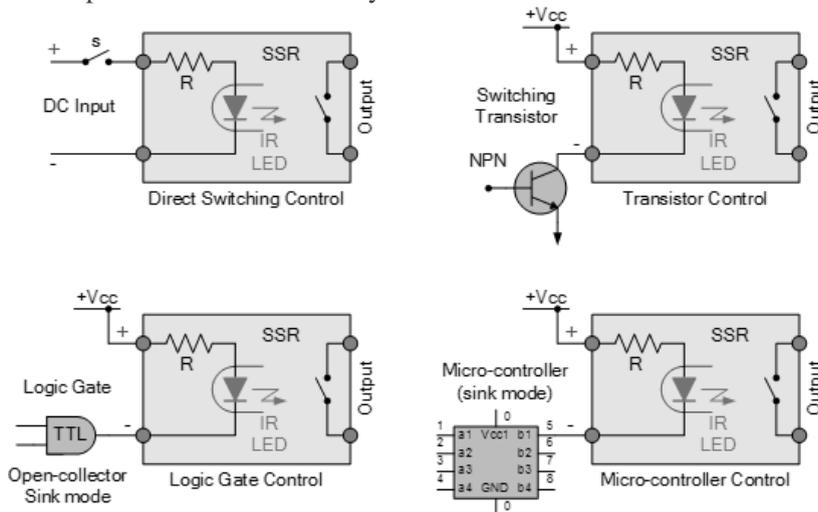
Salah satu komponen utama solid state relay (SSR) adalah opto-isolator (juga disebut optocoupler) yang berisi satu (atau lebih) dioda pemancar cahaya infra merah, atau sumber cahaya LED, dan perangkat peka foto di dalamnya. satu kasus. Opto-isolator mengisolasi input dari output. Sumber cahaya LED disambungkan ke bagian drive input SSR dan menyediakan kopling optik melalui celah ke transistor sensitif foto yang berdekatan, pasangan darlington atau triac. Ketika arus melewati LED, itu menyala dan cahayanya difokuskan melintasi celah ke foto-transistor / foto-triac.

Jadi, output dari SSR yang digabungkan opto menjadi "ON" dengan memberi energi pada LED ini, biasanya dengan sinyal tegangan rendah. Karena satu-satunya koneksi antara input dan output adalah seberkas cahaya, isolasi tegangan tinggi (biasanya beberapa ribu volt) dicapai melalui isolasi optis internal ini.

Opto-isolator tidak hanya memberikan tingkat isolasi input / output yang lebih tinggi, tetapi juga dapat mengirimkan sinyal frekuensi rendah dan

dc. Selain itu, perangkat LED dan peka foto dapat benar-benar terpisah satu sama lain dan secara optik digabungkan dengan menggunakan serat optik. Sirkuit input SSR dapat terdiri dari hanya satu resistor pembatas arus secara seri dengan LED dari opto-isolator, atau rangkaian yang lebih kompleks dengan perbaikan, pengaturan arus, perlindungan polaritas terbalik, penyaringan, dll.

Untuk mengaktifkan atau menhidupkan "ON" relai status yang dijual menjadi konduksi, tegangan yang lebih besar dari nilai minimumnya (biasanya 3 volt DC) harus diterapkan ke terminal inputnya (setara dengan koil relai elektro-mekanis). Sinyal DC ini dapat berasal dari sakelar mekanis, gerbang logika atau mikrokontroler, seperti yang ditunjukkan. Sirkuit Input DC Solid State Relay

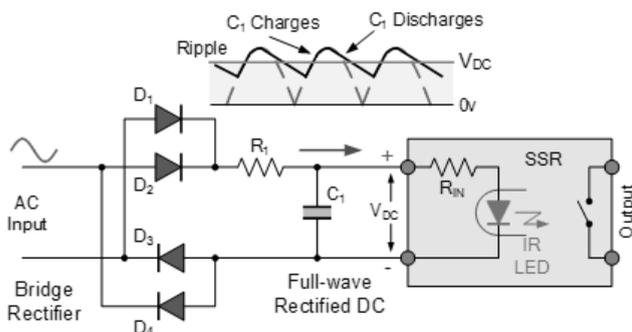


Gambar 3.63 Penggunaan SSR

Saat menggunakan kontak mekanis, sakelar, tombol tekan, kontak relai lainnya, dll, sebagai sinyal pengaktifan, tegangan suplai yang digunakan bisa sama dengan nilai tegangan input minimum SSR, sedangkan saat menggunakan perangkat solid state seperti transistor, gerbang dan mikro-kontrol, tegangan suplai minimum harus satu atau dua volt di atas tegangan hidup SSR untuk memperhitungkan penurunan tegangan internal perangkat switching.

Tetapi selain menggunakan tegangan DC, baik tenggelam atau sourcing, untuk mengalihkan solid state relay menjadi konduksi, kita juga

dapat menggunakan bentuk gelombang sinusoidal juga dengan menambahkan penyearah jembatan untuk penyearah gelombang penuh dan rangkaian filter ke input DC seperti yang ditunjukkan.



Gambar 3.64 Rangkaian Input AC Solid State Relay

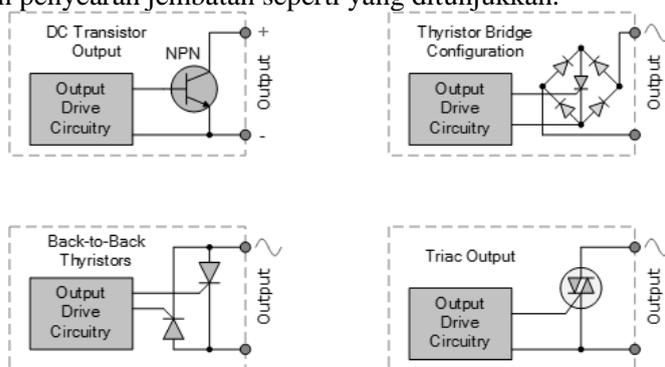
Penyearah jembatan mengubah tegangan sinusoidal menjadi gelombang gelombang penuh yang diperbaiki dua kali frekuensi input. Masalahnya di sini adalah bahwa pulsa tegangan ini mulai dan berakhir dari nol volt yang berarti bahwa mereka akan jatuh di bawah persyaratan tegangan penyalan minimum dari ambang input SSR yang menyebabkan output menjadi "on" dan "off" setiap setengah siklus.

Untuk mengatasi penembakan output yang tidak menentu ini, kita dapat menghaluskan riak yang diperbaiki dengan menggunakan kapasitor penghalus, (C_1) pada output penyearah jembatan. Efek pengisian dan pemakaian kapasitor akan menaikkan komponen DC dari sinyal yang diperbaiki di atas nilai tegangan nyala maksimum dari input relai solid state. Kemudian meskipun bentuk gelombang tegangan sinusoidal yang terus berubah digunakan, input SSR melihat tegangan DC konstan.

Nilai resistor penurunan tegangan, R_1 dan kapasitor penghalus, C_1 dipilih agar sesuai dengan tegangan suplai, 120 volt AC atau 240 volt AC serta impedansi input dari solid state relay. Tapi sekitar $40k\Omega$ dan $10\mu F$ akan melakukannya. Kemudian dengan penyearah jembatan dan rangkaian kapasitor pemulsaan ini ditambahkan, relai solid state DC standar dapat dikontrol menggunakan catu daya AC atau DC non-terpolarisasi. Tentu saja, produsen sudah memproduksi dan menjual relai solid state input AC (biasanya 90 hingga 280 volt AC).

Kemampuan switching output dari solid state relay dapat berupa AC atau DC serupa dengan persyaratan tegangan inputnya. Rangkaian output dari sebagian besar solid state relay standar dikonfigurasi untuk melakukan hanya satu jenis aksi switching yang memberikan ekuivalen dengan operasi relai elektro-mekanis, kutub tunggal, lemparan tunggal (SPST-NO) yang biasanya terbuka.

Untuk sebagian besar DC SSR, perangkat switching solid state yang umum digunakan adalah transistor daya, Darlington's dan MOSFET, sedangkan untuk AC SSR, perangkat switching adalah thyristor triac atau back-to-back. Thyristor lebih disukai karena kemampuan tegangan dan arusnya yang tinggi. Thyristor tunggal juga dapat digunakan dalam rangkaian penyearah jembatan seperti yang ditunjukkan.

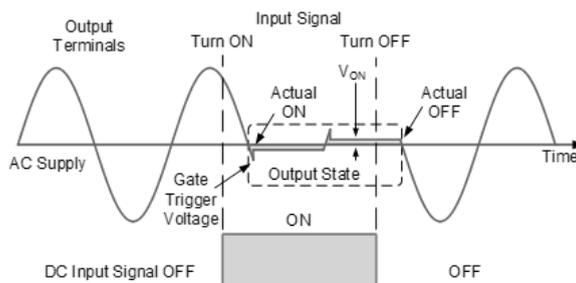


Gambar 3.65 Rangkaian Output Relai Solid State

Aplikasi solid state relay yang paling umum adalah dalam peralihan beban AC, baik itu untuk mengontrol daya AC untuk sakelar ON / OFF, peredupan cahaya, kontrol kecepatan motor, atau aplikasi lain yang serupa di mana kontrol daya diperlukan, beban AC ini dapat dengan mudah dikontrol dengan tegangan DC arus rendah menggunakan relai solid state yang memberikan umur panjang dan kecepatan switching yang tinggi. Salah satu keuntungan terbesar dari solid state relay dibandingkan dengan relai elektromekanis adalah kemampuannya untuk mematikan beban AC "OFF" pada titik arus beban nol, sehingga sepenuhnya menghilangkan lengkung, gangguan listrik dan pantulan kontak yang terkait dengan relai mekanis konvensional dan beban induktif .

Ini karena relai solid state switching AC menggunakan SCR dan TRIAC sebagai perangkat switching outputnya yang terus berjalan, setelah sinyal input dilepas, hingga arus AC yang mengalir melalui perangkat turun

di bawah ambang batasnya atau menahan nilai arus. Kemudian output dari SSR tidak akan pernah bisa OFF di tengah-tengah puncak gelombang sinus. Pematian arus nol adalah keuntungan utama untuk menggunakan relai solid state karena mengurangi gangguan listrik dan ggl-balik yang terkait dengan peralihan beban induktif seperti yang terlihat sebagai busur oleh kontak relai elektro-mekanis. Pertimbangkan diagram bentuk gelombang keluaran di bawah ini dari relai keadaan padat AC tipikal.



Gambar 3.66 Bentuk Gelombang Output Relai Solid State

Tanpa sinyal input yang diterapkan, tidak ada arus beban yang mengalir melalui SSR karena secara efektif OFF (sirkuit terbuka) dan terminal output melihat tegangan suplai AC penuh. Dengan penerapan sinyal input DC, tidak peduli bagian mana dari bentuk gelombang sinusoidal, baik positif atau negatif yang dilalui siklus, karena karakteristik switching tegangan-nol dari SSR, output hanya menyala ketika bentuk gelombang melintasi titik nol.

Ketika tegangan suplai meningkat baik ke arah positif atau negatif, itu mencapai nilai minimum yang diperlukan untuk menyalakan output thyristor atau triac sepenuhnya (biasanya kurang dari sekitar 15 volt). Penurunan tegangan pada terminal output SSR adalah penurunan tegangan pada perangkat switching pada kondisi tegangan, V_T (biasanya kurang dari 2 volt). Jadi setiap arus masuk tinggi yang terkait dengan beban reaktif atau lampu sangat berkurang.

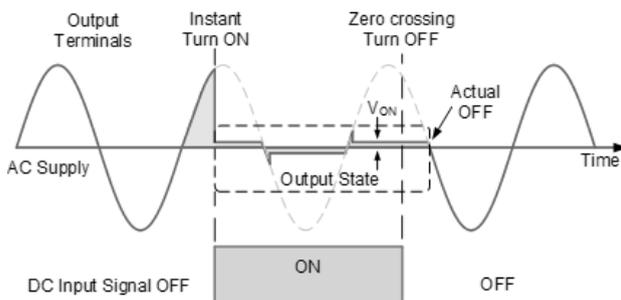
Ketika sinyal tegangan input DC dilepas, output tidak tiba-tiba mati seperti yang pernah dipicu ke konduksi, thyristor atau triac yang digunakan sebagai perangkat switching tetap ON selama sisa setengah siklus sampai arus beban turun di bawah perangkat yang menahan saat ini, di mana titik

itu akan MATI. Jadi ggl balik dv / dt tinggi yang terkait dengan pengalihan beban induktif di tengah gelombang sinus sangat berkurang.

Kemudian keuntungan utama dari solid state relay AC dibandingkan dengan relay elektro-mekanis adalah fungsi zero crossingnya yang menyalakan SSR ketika tegangan beban AC mendekati nol volt, sehingga menekan arus masuk yang tinggi karena arus beban akan selalu mulai dari titik mendekati 0V, dan karakteristik turn-off arus nol yang melekat pada thyristor atau triac. Oleh karena itu ada kemungkinan penundaan mematikan maksimum (antara penghilangan sinyal input dan penghilangan arus beban) dari satu setengah siklus.

Sementara solid state relay dapat melakukan perpindahan beban secara langsung ke nol, mereka juga dapat melakukan fungsi yang jauh lebih rumit melalui sirkuit logika digital, mikroprosesor, dan memori. Penerapan lain yang sangat baik dari solid state relay adalah pada aplikasi peredupan lampu, baik di rumah atau untuk pertunjukan atau konser.

Relai solid state non-nol (instant-on) beralih segera setelah penerapan sinyal kontrol input sebagai lawan dari SSR lintas nol di atas yang menunggu hingga titik persimpangan nol berikutnya dari gelombang sinus AC. Sakelar api acak ini digunakan dalam aplikasi resistif seperti peredupan lampu dan aplikasi yang memerlukan beban hanya untuk diberi energi untuk sebagian kecil siklus AC.



Gambar 3.67 Bentuk Gelombang Output Pengalihan Acak

Meskipun hal ini memungkinkan untuk kontrol fase dari bentuk gelombang beban, masalah utama pengaktifan acak SSR adalah bahwa arus lonjakan beban awal pada saat relai menyala, mungkin tinggi karena daya

sakelar SSR saat tegangan suplai tinggi. mendekati nilai puncaknya (90°). Ketika sinyal input dihapus, itu berhenti berjalan ketika arus beban turun di bawah thyristor atau triac yang menahan arus seperti yang ditunjukkan. Jelas untuk DC SSR, aksi pengalihan ON-OFF instan.

The *relay solid state* sangat ideal untuk berbagai ON / OFF switching aplikasi karena mereka tidak memiliki bagian yang bergerak atau kontak tidak seperti relay elektro-mekanik (ESDM). Ada banyak jenis komersial yang berbeda untuk dipilih untuk sinyal kontrol input AC dan DC serta switching output AC dan DC karena mereka menggunakan elemen switching semikonduktor, seperti thyristor, triac, dan transistor.

Tetapi dengan menggunakan kombinasi opto-isolator yang baik dan triac, kita dapat membuat solid state relay yang murah dan sederhana untuk mengontrol beban AC seperti pemanas, lampu atau solenoid. Karena opto-isolator hanya membutuhkan sedikit daya input / kontrol untuk beroperasi, sinyal kontrol dapat berasal dari PIC, Arduino, Raspberry PI, atau pengontrol mikro lainnya.

Mari kita asumsikan kita menginginkan pengontrol mikro dengan sinyal port keluaran digital hanya +5 volt untuk mengontrol elemen pemanas 120V AC, 600 watt. Untuk ini kita dapat menggunakan isolator opto-triac MOC 3020, tetapi triac internal hanya dapat melewatkan arus maksimum (I_{TSM}) dari puncak 1 Amps pada puncak suplai AC 120V sehingga triac switching tambahan juga digunakan.

Pertama mari pertimbangkan karakteristik input dari MOC 3020 opto-isolator (opto-triac lain tersedia). Lembar data opto-isolator memberi tahu kita bahwa tegangan maju, (V_F) penurunan dioda pemancar cahaya input adalah 1,2 volt dan arus maju maksimum, (I_F) adalah 50mA. LED membutuhkan sekitar 10mA agar bersinar cukup terang hingga nilai maksimumnya 50mA. Namun port keluaran digital dari mikrokontroler hanya dapat memasok maksimum 30mA. Maka nilai arus yang dibutuhkan berada di antara 10 dan 30 mili-ampere. Karena itu:

$$R_{MAX} = \frac{V_S - V_F}{10mA} = \frac{5 - 1.2}{0.01} = 380\Omega$$

$$R_{MIN} = \frac{V_S - V_F}{30mA} = \frac{5 - 1.2}{0.03} = 126\Omega$$

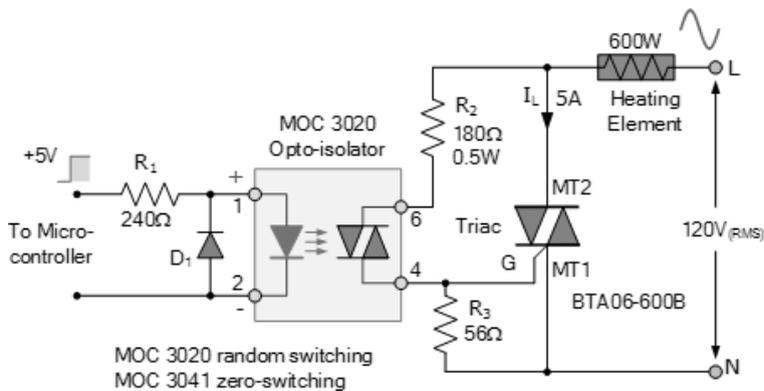
Dengan demikian resistor pembatas arus seri dengan nilai antara 126 dan 380 Ω dapat digunakan. Karena port keluaran digital selalu berganti +5 volt dan untuk mengurangi disipasi daya melalui opto-coupler LED, ini akan memilih nilai resistif yang disukai 240 Ω . Ini memberikan arus maju LED kurang dari 16mA. Dalam contoh ini, nilai resistor apa pun yang disukai antara 150 Ω dan 330 Ω akan dilakukan .

Beban elemen pemanas adalah resistif 600 watt. Menggunakan supply AC 120V akan memberi kita arus beban 5 ampere ($I = P / V$). Karena ini ingin mengontrol arus beban ini di kedua setengah siklus (semua 4 kuadran) dari bentuk gelombang AC, ini memerlukan triac switching listrik. BTA06 adalah triac 600 volt 6 amp ($I_{T(RMS)}$) yang cocok untuk pengalihan ON / OFF beban AC tujuan umum, tetapi triac pengenalan 6 hingga 8 amp yang serupa dapat digunakan. Juga triac switching ini hanya membutuhkan drive gerbang 50mA untuk memulai konduksi yang jauh lebih kecil dari peringkat maksimum 1 amp dari opto-isolator MOC 3020.

Pertimbangkan bahwa triac keluaran dari opto-isolator telah dinyalakan pada nilai puncak (90°) dari tegangan suplai 120V_{RMS} AC. Tegangan puncak ini memiliki nilai: $120 \times 1.414 = 170V_{pk}$. Jika arus maksimum opto-triacs (I_{TSM}) adalah puncak 1 ampere, maka nilai minimum resistansi seri yang dibutuhkan adalah $170/1 = 170\Omega$, atau 180 Ω ke nilai terdekat yang disukai. Nilai 180 Ω ini akan melindungi triac keluaran opto-coupler, serta gerbang triac BTA06 pada suplai 120VAC.

Jika triac opto-isolator AKTIF pada nilai crossover nol (0°) dari tegangan suplai AC 120V_{RMS}, maka tegangan minimum yang diperlukan untuk memasok arus penggerak gerbang 50mA yang diperlukan yang memaksa triac sakelar ke konduksi adalah: $180\Omega \times 50mA = 9,0$ volt. Kemudian triac menyala menjadi konduksi ketika tegangan sinusoidal Gate-to-MT1 lebih besar dari 9 volt.

Jadi tegangan minimum yang diperlukan setelah titik crossover nol dari bentuk gelombang AC akan menjadi puncak 9 volt dengan disipasi daya dalam resistor gerbang seri ini sangat kecil sehingga resistor pengenalan 180 Ω , 0,5 watt dapat digunakan dengan aman. Simak rangkaian di bawah ini.



Gambar 3.68 Rangkaian Relai Solid State AC

Jenis konfigurasi optocoupler ini membentuk dasar dari aplikasi relai solid state yang sangat sederhana yang dapat digunakan untuk mengontrol beban bertenaga listrik AC seperti lampu dan motor. Di sini ini telah menggunakan MOC 3020 yang merupakan isolator sakelar acak. Isolator opto-triac MOC 3041 memiliki karakteristik yang sama tetapi dengan deteksi zero-crossing built-in yang memungkinkan beban menerima daya penuh tanpa arus masuk yang berat saat mengalihkan beban induktif. Diode D_1 mencegah kerusakan karena koneksi balik dari tegangan input, sedangkan resistor 56 ohm (R_3) memotong arus di/dt apa pun ketika triac dalam keadaan OFF untuk menghilangkan pemicu palsu. Ini juga mengikat terminal gerbang ke MT1 memastikan triac dimatikan sepenuhnya. Jika digunakan dengan modulasi lebar pulsa, sinyal input PWM, frekuensi sakelar ON / OFF harus disetel kurang dari maksimum 10Hz untuk beban AC jika tidak, sakelar output dari rangkaian solid state relay ini mungkin tidak dapat mengimbangi.

3.22 Latihan

1. Gambarlah skema dan jelaskan prinsip kerja dari komponen elektronika daya berikut ini: MCT, IGCT, IGBT, UJT, Pemotong transien, dan Relai Terpadu!
2. Gambarlah grafik karakteristik dan jelaskan fenomenanya dari komponen elektronika daya berikut ini: MCT, IGCT, IGBT, UJT, Pemotong transien, dan Relai Terpadu!

3. Berikan contoh aplikasi dan jelaskan prinsip kerjanya dari komponen elektronika daya berikut ini: MCT, IGCT, IGBT, UJT, Pemotong transien, dan Relai Terpadu!
4. Carilah *data sheet* dari internet dan lakukan telaah terhadap setiap spesifikasi untuk dengan komponen elektronika daya berikut ini: MCT, IGCT, IGBT, UJT, Pemotong transien, dan Relai Terpadu!

IV. PENYEARAH TAK TERKENDALI

Kemampuan Akhir yang Direncanakan:

Mahasiswa mampu membuat simulasi dan menganalisis rangkaian penyearah tak terkendali.

Petunjuk:

Pada bab ini mahasiswa diharapkan membaca dan mencermati substansi materi yang disajikan. Setelah selesai, mahasiswa dapat mengerjakan soal latihan, mencocokkan dan mencari jawabannya dalam naskah, apabila dirasa jawaban belum memuaskan. Selain itu mahasiswa juga dapat melakukan simulasi dengan mengakses simulator online free yang link-nya dicantumkan pada materi.

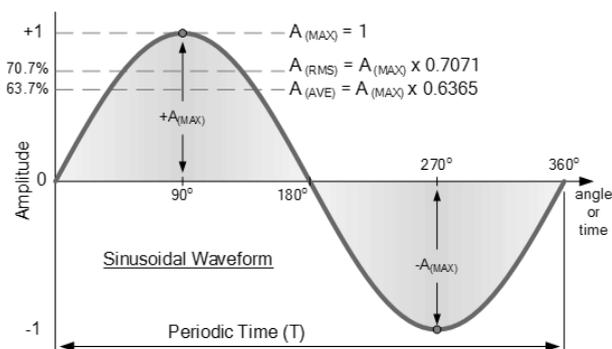
4.1 Pengantar

Penyearah adalah proses menghubungkan catu daya AC ke beban DC yang terhubung dengan menggunakan perangkat semikonduktor solid state. Rektifikasi mengubah sumber tegangan AC sinusoidal yang berosilasi menjadi suplai tegangan DC arus konstan melalui dioda, thyristor, transistor, atau konverter. Proses penyearah ini dapat mengambil berbagai bentuk dengan penyearah setengah gelombang, gelombang penuh, tidak terkendali, dan terkontrol penuh yang mengubah suplai satu fase atau tiga fase menjadi level DC konstan.

Penyearah adalah salah satu blok bangunan dasar konversi daya AC dengan penyearah setengah gelombang atau gelombang penuh yang umumnya dilakukan oleh dioda semikonduktor. Dioda memungkinkan arus bolak-balik mengalir melaluinya ke arah depan sambil memblokir aliran arus ke arah sebaliknya menciptakan level tegangan DC tetap sehingga ideal untuk penyearah. Namun, arus searah yang telah diperbaiki oleh dioda tidak sempurna yang diperoleh dari sumber baterai, tetapi memiliki perubahan tegangan dalam bentuk riak yang ditumpangkan di atasnya sebagai akibat dari pasokan bolak-balik. Tetapi untuk penyearah satu fasa berlangsung, kita membutuhkan bentuk gelombang sinusoidal AC dengan tegangan dan frekuensi tetap seperti yang ditunjukkan.

4.2 Bentuk Gelombang Sinusoidal AC

Bentuk gelombang AC umumnya memiliki dua angka yang terkait dengannya. Angka pertama menunjukkan derajat rotasi bentuk gelombang sepanjang sumbu x yang digunakan alternator untuk memutar dari 0-ke-360°. Nilai ini dikenal sebagai periode (T) yang didefinisikan sebagai interval yang diambil untuk menyelesaikan satu siklus penuh bentuk gelombang. Periode diukur dalam satuan derajat, waktu, atau radian. Hubungan antara periode gelombang sinus dan frekuensi didefinisikan sebagai: $T = 1/f$.



Gambar 4.1 Gelombang sinus

Angka kedua menunjukkan amplitudo nilai, baik arus atau tegangan, di sepanjang sumbu y. Angka ini memberikan nilai sesaat dari nol ke beberapa puncak atau nilai maksimum (A_{MAX} , V_{MAX} atau I_{MAX}) yang menunjukkan amplitudo terbesar gelombang sinus sebelum kembali ke nol lagi. Untuk bentuk gelombang sinusoidal ada dua nilai maksimum atau puncak, satu untuk setengah siklus positif dan satu untuk setengah siklus negatif.

Tetapi selain kedua nilai ini, ada dua lagi yang menarik bagi ini untuk tujuan penyearah. Salah satunya adalah Nilai Rata-rata bentuk gelombang sinusoidal dan yang lainnya adalah Nilai RMS-nya. Nilai rata-rata dari bentuk gelombang diperoleh dengan menambahkan nilai sesaat dari tegangan (atau arus) lebih dari setengah siklus dan ditemukan sebagai: $0,6365 * V_P$. Perhatikan bahwa nilai rata-rata selama satu siklus lengkap dari gelombang sinus simetris akan menjadi nol karena setengah gelombang positif rata-rata dibatalkan oleh gelombang setengah negatif rata-rata yang berlawanan. Yaitu $+1 + (-1) = 0$.

RMS, akar rata-rata kuadrat atau nilai efektif dari sinusoid (sinusoid adalah nama lain untuk gelombang sinus) memberikan jumlah energi yang sama ke resistansi seperti halnya suplai DC dengan nilai yang sama. Alun-alun (rms) nilai akar rata-rata dari tegangan sinusoidal (atau arus) didefinisikan sebagai: $0,7071 * V_p$.

4.3 Penyearah Fase Tunggal

Semua penyearah fase tunggal menggunakan perangkat solid state sebagai perangkat pengubah AC-ke-DC utama mereka. Penyearah setengah gelombang fase tunggal yang tidak terkontrol adalah rangkaian penyearah yang paling sederhana dan mungkin paling banyak digunakan untuk tingkat daya kecil karena keluarannya sangat dipengaruhi oleh reaktansi beban yang terhubung.

Untuk rangkaian penyearah yang tidak terkontrol, dioda semikonduktor adalah perangkat yang paling umum digunakan dan diatur sedemikian rupa untuk membuat rangkaian penyearah *setengah gelombang* atau *gelombang* penuh. Keuntungan menggunakan dioda sebagai perangkat rektifikasi adalah bahwa menurut desain mereka adalah perangkat searah yang memiliki sambungan pn satu arah yang terpasang.

PN-junction ini mengubah suplai bolak-balik dua arah menjadi arus searah satu arah dengan menghilangkan setengah dari suplai. Bergantung pada koneksi dioda, itu bisa misalnya melewatkan setengah positif dari bentuk gelombang AC ketika bias maju, sambil menghilangkan setengah siklus negatif ketika dioda menjadi bias balik.

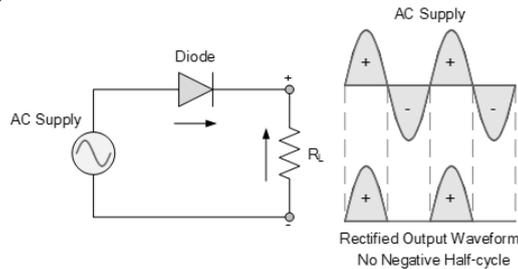
Kebalikannya juga benar dengan menghilangkan setengah positif atau bentuk gelombang dan melewatkan setengah negatif. Either way, output dari penyearah dioda tunggal hanya terdiri dari satu setengah dari bentuk gelombang 360° seperti yang ditunjukkan.

4.3.1 Penyearah Setengah Gelombang

a. Rangkaian dan Prinsip Kerja

Konfigurasi penyearah setengah gelombang fase tunggal di atas melewati setengah positif dari bentuk gelombang suplai AC dengan setengah negatif dihilangkan. Dengan membalik arah dioda kita dapat melewatkan bagian negatif dan menghilangkan bagian positif dari bentuk

gelombang AC. Oleh karena itu, keluarannya akan berupa rangkaian pulsa positif atau negatif.



Gambar 4.2 Penyearah setengah gelombang satu fase

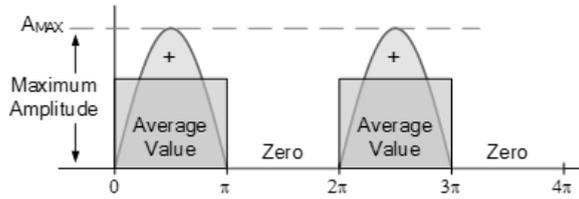
Jadi tidak ada tegangan atau arus yang diterapkan ke beban yang terhubung, R_L untuk setengah dari setiap siklus. Dengan kata lain, tegangan resistansi beban, R_L terdiri dari hanya setengah gelombang, baik positif atau negatif, karena beroperasi selama hanya satu-setengah dari siklus input, maka nama *penyearah setengah gelombang*.

b. Tegangan dan Arus Penyearahan

Tampak bahwa dioda hanya memungkinkan arus mengalir dalam satu arah dan hanya menghasilkan keluaran yang terdiri dari setengah siklus. Bentuk gelombang output yang berdenyut ini tidak hanya bervariasi ON dan OFF setiap siklus, tetapi hanya hadir 50% dari waktu dan dengan beban resistif murni, konten riak tegangan dan arus tinggi ini berada pada level maksimum.

DC yang berdenyut ini berarti bahwa nilai DC ekuivalen jatuh melintasi resistor beban, oleh karena itu R_L hanya setengah dari nilai bentuk gelombang sinusoidal. Karena nilai maksimum dari bentuk gelombang fungsi sinus adalah 1 ($\sin(90^\circ)$), nilai Rata-rata atau Rata-rata DC yang diambil dari setengah dari sinusoid didefinisikan sebagai: $0,637 \times$ nilai amplitudo maksimum.

Jadi selama setengah siklus positif, A_{AVE} sama dengan $0,637 \times A_{MAX}$. Namun karena setengah siklus negatif dihilangkan karena penyearah oleh dioda bias terbalik, nilai rata-rata bentuk gelombang selama setengah siklus negatif ini akan menjadi nol seperti yang ditunjukkan.



Gambar 4.3 Bentuk tegangan keluaran penyearah setengah gelombang

Jadi untuk penyearah setengah gelombang, 50% dari waktu ada nilai rata-rata $0,637 * A_{MAX}$ dan 50% dari waktu ada nol. Jika amplitudo maksimum adalah 1, nilai rata-rata atau ekuivalen DC yang terlihat pada resistansi beban, R_L akan menjadi:

$$A_{AVE} = \frac{0.637}{2} \times A_{MAX} = \frac{A_{MAX}}{\pi} = 0.318 A_{MAX}$$

Jadi ekspresi yang sesuai untuk nilai rata-rata tegangan atau arus untuk penyearah setengah gelombang dengan DC berdenyut diberikan sebagai:

$$V_{AVE} = 0,318 * V_{MAKS}$$

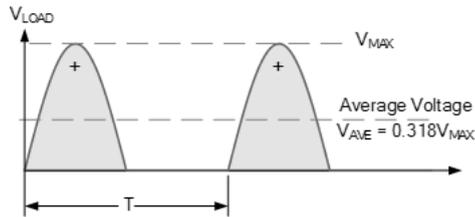
$$I_{AVE} = 0,318 * I_{MAKS}$$

Perhatikan bahwa nilai maksimum, A_{MAX} adalah dari bentuk gelombang input, tetapi kita juga dapat menggunakan RMS-nya, atau nilai "root mean squared" untuk menemukan nilai output DC yang setara dari penyearah setengah gelombang fasa tunggal. Untuk menentukan tegangan rata-rata untuk penyearah setengah gelombang, kita mengalikan nilai RMS dengan 0,9 (faktor bentuk) dan membagi produk dengan 2, yaitu mengalikannya dengan 0,45 menghasilkan:

$$V_{AVE} = 0,45 * V_{RMS}$$

$$I_{AVE} = 0,45 * I_{RMS}$$

Kemudian kita dapat melihat bahwa rangkaian penyearah setengah gelombang mengubah bagian positif atau negatif dari bentuk gelombang AC, tergantung pada arah dioda, menjadi output DC berdenyut yang memiliki nilai DC setara $0,318 * A_{MAX}$ atau $0,45 * A_{RMS}$ seperti yang ditunjukkan.



Gambar 4.4 Tegangan DC Penyearah setengah Gelombang

c. Contoh Kasus

Penyearah setengah gelombang fase tunggal terhubung ke suplai AC 50V RMS 50Hz. Jika penyearah digunakan untuk mensuplai beban resistif 150 Ohm. Hitung tegangan DC ekuivalen yang dikembangkan melintasi beban, arus beban dan daya yang hilang oleh beban. Asumsikan karakteristik dioda yang ideal.

Pertama kita perlu mengubah 50 volt RMS ke puncaknya atau tegangan maksimum yang setara (ini tidak perlu tetapi membantu).

a) Amplitudo Tegangan Maksimum, V_M .

$$V_M = 1,414 * V_{RMS} = 1,414 * 50 = 70,7 \text{ volt}$$

b) Tegangan DC Setara, V_{DC}

$$V_{DC} = 0,318 * V_M = 0,318 * 70,7 = 22,5 \text{ volt}$$

c) Arus Beban, I_L

$$I_L = V_{DC} \div R_L = 22,5 / 150 = 0,15A \text{ atau } 150mA$$

d) Daya yang Hilang oleh Beban, P_L

$$P_L = V * I \text{ atau } I^2 * R_L = 22,5 * 0,15 = 3,375W \cong 3,4W$$

Dalam praktiknya, V_{DC} akan sedikit berkurang karena penurunan tegangan 0,7 volt yang bias maju melintasi dioda penyearah. Salah satu kelemahan utama dari penyearah setengah gelombang fase tunggal adalah bahwa tidak ada output selama setengah dari bentuk gelombang sinusoidal input yang tersedia sehingga menghasilkan nilai rata-rata yang rendah seperti yang telah kita lihat. Salah satu cara untuk mengatasinya adalah dengan menggunakan lebih banyak dioda untuk menghasilkan *penyearah gelombang penuh*.

d. Simulasi

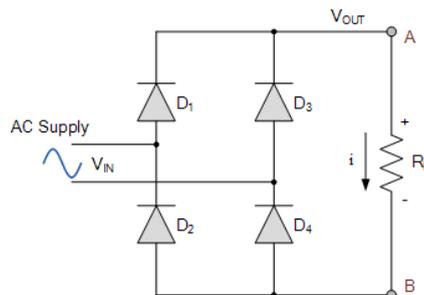
Rangkaian simulasi yang ada di web dan dapat diakses secara bebas ada di alamat berikut ini

4.3.2 Penyearah Gelombang Penuh

a. Rangkaian dan Prinsip Kerja

Tidak seperti penyearah setengah gelombang sebelumnya, penyearah *gelombang penuh* menggunakan kedua bagian dari bentuk gelombang sinusoidal masukan untuk memberikan keluaran searah. Ini karena penyearah gelombang penuh pada dasarnya terdiri dari dua penyearah setengah gelombang yang dihubungkan bersama untuk memberi makan beban.

Penyearah gelombang penuh fase tunggal melakukan ini dengan menggunakan empat dioda yang disusun dalam susunan jembatan melewati setengah positif dari bentuk gelombang seperti sebelumnya tetapi membalikkan setengah negatif gelombang sinus untuk membuat output DC yang berdenyut. Meskipun tegangan dan arus keluaran dari penyearah berdenyut, itu tidak membalikkan arah menggunakan 100% penuh dari bentuk gelombang masukan dan dengan demikian memberikan penyearah gelombang penuh.



Gambar 4.5 Penyearah Jembatan Gelombang Penuh Satu Fase

Konfigurasi jembatan dioda ini menyediakan rektifikasi gelombang penuh karena setiap saat dua dari empat dioda bias maju sementara dua lainnya bias balik. Jadi ada dua dioda di jalur konduksi, bukan satu untuk penyearah setengah gelombang. Oleh karena itu akan ada perbedaan amplitudo tegangan antara V_{IN} dan V_{OUT} karena dua penurunan tegangan maju dari dioda yang terhubung secara serial. Di sini seperti sebelumnya, untuk kesederhanaan matematika ini akan mengasumsikan dioda ideal.

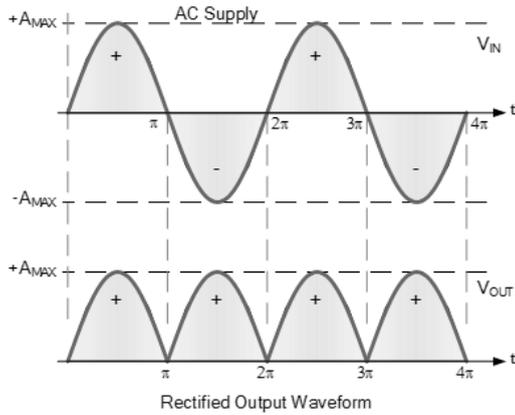
Jadi bagaimana cara kerja penyearah gelombang penuh satu fasa. Selama setengah siklus positif V_{IN} , dioda D_1 dan D_4 bias maju sedangkan dioda D_2 dan D_3 bias balik. Kemudian untuk setengah siklus positif dari bentuk gelombang input, arus mengalir sepanjang jalur: $D_1 - A - R_L - B - D_4$ dan kembali ke supply.

Selama setengah siklus negatif V_{IN} , dioda D_3 dan D_2 bias maju sedangkan dioda D_4 dan D_1 bias balik. Kemudian untuk setengah siklus negatif dari bentuk gelombang input, arus mengalir di sepanjang jalur: $D_3 - A - R_L - B - D_2$ dan kembali ke supply.

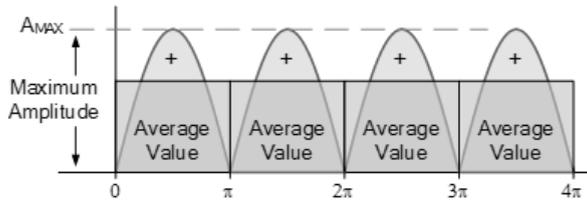
b. Bentuk Gelombang

Dalam kedua kasus setengah siklus positif dan negatif dari bentuk gelombang input menghasilkan puncak output positif terlepas dari polaritas bentuk gelombang input dan dengan demikian arus beban, i selalu mengalir dalam arah yang SAMA melalui beban, R_L antara titik atau node A dan B. Dengan demikian setengah siklus negatif dari sumber menjadi setengah siklus positif pada saat beban. Jadi mana set dioda sedang melakukan, simpul A selalu lebih positif dari simpul B. Oleh karena itu arus dan tegangan beban searah atau DC memberi kita bentuk gelombang keluaran berikut.

Meskipun bentuk gelombang output berdenyut ini menggunakan 100% bentuk gelombang input, tegangan DC rata-rata (atau arus) tidak pada nilai yang sama. Kita ingat dari atas bahwa nilai rata-rata atau mean DC yang diambil alih setengah dari sinusoid didefinisikan sebagai: $0,637 \times$ nilai amplitudo maksimum. Namun tidak seperti penyearah setengah gelombang di atas, penyearah gelombang penuh memiliki dua setengah siklus positif per bentuk gelombang input yang memberi kita nilai rata-rata yang berbeda seperti yang ditunjukkan.



Gambar 4.6 Bentuk Gelombang Output Penyearah Gelombang Penuh



Gambar 4.7 Nilai Rata-rata Penyearah Gelombang Penuh

c. Analisis Tegangan dan Arus

Di sini kita dapat melihat bahwa untuk penyearah gelombang penuh, untuk setiap puncak positif ada nilai rata-rata $0,637 * A_{MAX}$ dan karena ada dua puncak per bentuk gelombang masukan, ini berarti ada dua banyak nilai rata-rata yang dijumlahkan. Jadi tegangan keluaran DC dari penyearah gelombang penuh dua kali lipat dari penyearah setengah gelombang sebelumnya. Jika amplitudo maksimum adalah 1, nilai rata-rata atau ekuivalen DC yang terlihat pada resistansi beban, R_L akan menjadi:

$$A_{AVE} = \frac{2 \times A_{MAX}}{\pi} = \frac{2}{\pi} A_{MAX} = 0.637 A_{MAX}$$

Jadi ekspresi yang sesuai untuk nilai rata-rata tegangan atau arus untuk penyearah gelombang penuh diberikan sebagai:

$$V_{AVE} = 0,637 * V_{MAKS}$$

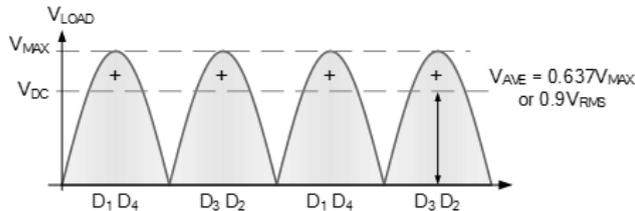
$$I_{AVE} = 0,637 * I_{MAKS}$$

Seperti sebelumnya, nilai maksimum, A_{MAX} adalah bentuk gelombang input, tetapi kita juga dapat menggunakan RMS-nya, atau nilai kuadrat rata-rata akar untuk menemukan nilai output DC yang setara dari penyearah gelombang penuh fase tunggal. Untuk menentukan tegangan rata-rata untuk penyearah gelombang penuh, ini mengalikan nilai RMS dengan 0,9 menghasilkan:

$$V_{AVE} = 0,9 * V_{RMS}$$

$$I_{AVE} = 0,9 * I_{RMS}$$

Kemudian kita dapat melihat bahwa rangkaian penyearah gelombang penuh mengubah KEDUA bagian positif atau negatif dari bentuk gelombang AC menjadi output DC berdenyut yang memiliki nilai $0.637 * A_{MAX}$ atau $0.9 * A_{RMS}$ seperti yang ditunjukkan.



Gambar 4.8 Tegangan Rata-rata Penyearah Gelombang Penuh

d. Contoh Kasus

Empat dioda digunakan untuk membangun rangkaian penyearah jembatan gelombang penuh fase tunggal yang diperlukan untuk memasok beban resistif murni $1k\Omega$ pada 220 volt DC. Hitung nilai RMS dari tegangan input yang dibutuhkan, arus beban total yang ditarik dari suplai, arus beban yang melewati setiap dioda dan total daya yang dihamburkan oleh beban. Asumsikan karakteristik dioda yang ideal.

a) Tegangan Suplai Penyearah, V_{RMS}

$$V_{DC} = 0,9 * V_{RMS} \text{ karena itu: } V_{RMS} = V_{DC} \div 0,9 = 220 / 0,9 = 244,4 \text{ } V_{RMS}$$

b) Arus Beban, I_L

$$I_L = V_{DC} \div R_L = 220/1000 = 0,22A \text{ atau } 220mA$$

c) Arus Beban yang Melewati Setiap Dioda, I_D

Arus beban disuplai oleh dua dioda per siklus, dengan demikian:

$$I_D = I_L \div 2 = 0.22 / 2 = 0.11A \text{ atau } 110mA$$

d) Daya yang Hilang oleh Beban, P_L

$$P_L = V * I \text{ atau } I^2 * R_L = 220 * 0,22 = 48,4W$$

e. Simulasi

Simulasi rangkaian penyearah gelombang penuh satu fase

f. Ringkasan

Penyearah gelombang penuh memiliki banyak keunggulan dibandingkan penyearah setengah gelombang yang lebih sederhana, seperti tegangan keluaran yang lebih konsisten, memiliki tegangan keluaran rata-rata yang lebih tinggi, frekuensi masukan digandakan dengan proses penyearah, dan membutuhkan kapasitor pemulusan nilai kapasitansi yang lebih kecil, jika diperlukan. Tetapi ini dapat meningkatkan desain penyearah jembatan dengan menggunakan thyristor, bukan dioda dalam desainnya.

Dengan mengganti dioda dalam penyearah jembatan fase tunggal dengan thyristor, kita dapat membuat penyearah AC-ke-DC yang dikontrol fase untuk mengubah tegangan suplai AC konstan menjadi tegangan output DC yang terkontrol. Penyearah fase terkontrol baik setengah terkontrol atau terkontrol penuh, memiliki banyak aplikasi dalam catu daya tegangan variabel dan kontrol motorik.

Penyearah jembatan fase tunggal adalah apa yang disebut "penyearah tak terkendali" di mana tegangan masukan yang diterapkan dilewatkan langsung ke terminal keluaran yang memberikan nilai ekuivalen DC rata-rata tetap. Untuk mengubah penyearah jembatan yang tidak terkendali menjadi rangkaian penyearah setengah terkontrol fase tunggal, kita hanya perlu mengganti dua dioda dengan thyristor (SCR) seperti yang ditunjukkan.

4.4 Penyearah Tiga Fase

Penyearah 3-fase adalah proses mengubah catu daya 3-fase yang seimbang menjadi catu daya DC tetap menggunakan dioda solid state atau thyristor. Sebelumnya sudah diketahui bahwa proses mengubah supply input AC menjadi supply DC tetap disebut *Rektifikasi* dengan rangkaian paling populer yang digunakan untuk melakukan proses penyearah ini adalah yang didasarkan pada dioda semikonduktor solid-state. Faktanya, penyearah tegangan bolak-balik adalah salah satu aplikasi dioda yang paling populer, karena dioda tidak mahal, kecil dan kuat memungkinkan kita membuat berbagai jenis rangkaian penyearah menggunakan dioda yang terhubung secara individual atau hanya dengan modul penyearah jembatan terintegrasi tunggal.

Pasokan fase tunggal seperti yang ada di rumah dan kantor umumnya 120 Vrms atau 240 Vrms fase-ke-netral, juga disebut jalur-ke-netral (LN), dan nominal dari tegangan dan frekuensi tetap menghasilkan tegangan atau arus bolak-balik di bentuk gelombang sinusoidal diberi singkatan "AC". Penyearah tiga fasa, juga dikenal sebagai rangkaian rektifikasi fasa poli mirip dengan penyearah satu fasa sebelumnya, perbedaannya kali ini adalah kita menggunakan tiga pasokan fasa tunggal yang dihubungkan bersama yang telah diproduksi oleh satu tiga fasa tunggal. generator.

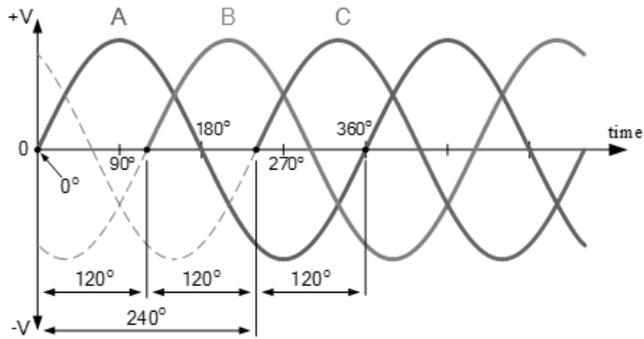
Keuntungannya di sini adalah bahwa rangkaian penyearah 3-fasa dapat digunakan untuk memberi daya pada banyak aplikasi industri seperti kontrol motor atau pengisian baterai yang membutuhkan kebutuhan daya yang lebih tinggi daripada yang dapat disuplai oleh rangkaian penyearah satu fasa.

Pasokan 3-fase membawa ide ini selangkah lebih maju dengan menggabungkan bersama tiga tegangan AC dengan frekuensi dan amplitudo yang identik dengan masing-masing tegangan AC yang disebut "fase". Ketiga fase ini adalah 120 derajat kelistrikan di luar fase dari satu sama lain menghasilkan urutan fase, atau rotasi fase: $360^\circ \div 3 = 120^\circ$ seperti yang ditunjukkan.

4.4.1 Bentuk Gelombang Tiga Fase

Keuntungannya tiga fase adalah bahwa suplai arus bolak-balik (AC) tiga fase dapat digunakan untuk menyediakan daya listrik secara langsung ke beban dan penyearah yang seimbang. Karena supply 3-fasa memiliki

tegangan dan frekuensi tetap, ia dapat digunakan oleh rangkaian rektifikasi untuk menghasilkan daya DC tegangan tetap yang kemudian dapat disaring sehingga menghasilkan tegangan DC keluaran dengan riak yang lebih sedikit dibandingkan dengan rangkaian penyearah fasa tunggal.



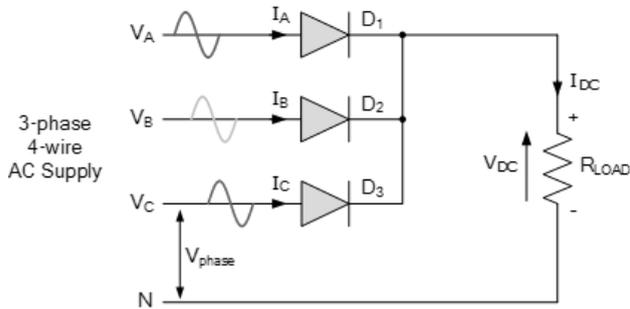
Gambar 4.9 Geelomabng tiga fase

4.4.2 Penyearah Tiga Fase Setengah Gelombang

a. Rangkaian dan Prinsip Kerja

Setelah melihat bahwa supply 3-fasa hanyalah tiga fasa tunggal yang digabungkan bersama, kita dapat menggunakan properti multi-fasa ini untuk membuat rangkaian penyearah 3-fasa. Seperti dengan penyearah satu fasa, penyearah tiga fasa menggunakan dioda, thyristor, transistor, atau konverter untuk membuat rangkaian penyearah setengah gelombang, gelombang penuh, tidak terkontrol, dan terkontrol penuh mengubah pasokan tiga fasa tertentu menjadi tingkat keluaran DC konstan. Pada sebagian besar aplikasi, penyearah tiga fase disuplai langsung dari jaringan listrik utilitas utama atau dari transformator tiga fase jika tingkat keluaran DC yang berbeda diperlukan oleh beban yang terhubung.

Seperti dengan penyearah satu fasa sebelumnya, rangkaian penyearah tiga fasa yang paling dasar adalah rangkaian penyearah setengah gelombang yang tidak terkontrol yang menggunakan tiga dioda semikonduktor, satu dioda per fasa seperti yang ditunjukkan.



Gambar 4.10 Penyearah Tiga Fase Setengah Gelombang

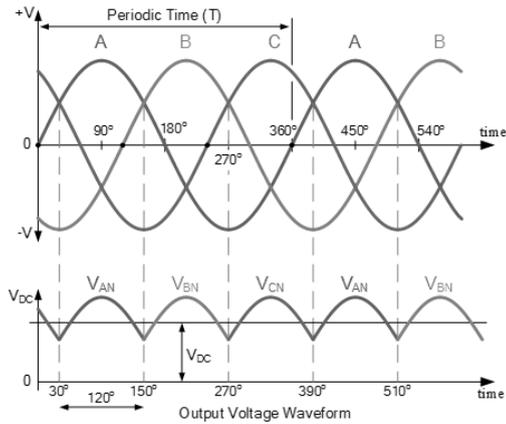
Jadi bagaimana cara kerja rangkaian penyearah setengah gelombang tiga fasa ini. Anoda dari setiap dioda dihubungkan ke satu fasa dari suplai tegangan dengan katoda dari ketiga dioda dihubungkan bersama ke titik positif yang sama, secara efektif menciptakan susunan tipe dioda- “OR”. Titik bersama ini menjadi terminal positif (+) untuk beban sedangkan terminal negatif (-) dari beban dihubungkan ke netral (N) dari suplai.

b. Bentuk Gelombang

Dengan asumsi rotasi fase ($V_A - V_B - V_C$) dan fase (V_A) dimulai pada 0° . Dioda pertama yang akan dihantarkan adalah dioda 1 (D_1) karena akan memiliki tegangan yang lebih positif pada anoda daripada dioda D_2 atau D_3 . Jadi dioda D_1 bekerja untuk setengah siklus positif V_A sementara D_2 dan D_3 berada dalam keadaan bias baliknya. Kabel netral menyediakan jalur balik untuk arus beban kembali ke suplai.

120 derajat kelistrikan kemudian, dioda 2 (D_2) mulai berjalan untuk setengah siklus positif V_B . Sekarang anodanya menjadi lebih positif daripada dioda D_1 dan D_3 yang keduanya “OFF” karena keduanya memiliki bias terbalik. Demikian pula, 120° kemudian V_C (fase biru) mulai meningkatkan putaran "ON" dioda 3 (D_3) karena anoda menjadi lebih positif, sehingga mematikan dioda "OFF" D_1 dan D_2 .

Kemudian kita dapat melihat bahwa untuk penyearah tiga fasa, dioda mana saja yang memiliki tegangan lebih positif pada anoda dibandingkan dengan dua dioda lainnya secara otomatis akan mulai bekerja, sehingga memberikan pola konduksi: $D_1 D_2 D_3$ seperti yang ditunjukkan.



Gambar 4.11 Gelombang Penyearah 3 fase

Dari bentuk gelombang di atas untuk beban resistif, kita dapat melihat bahwa untuk penyearah setengah gelombang setiap dioda melewati arus untuk sepertiga dari setiap siklus, dengan bentuk gelombang keluaran menjadi tiga kali frekuensi input dari supply AC. Oleh karena itu ada tiga puncak tegangan dalam satu siklus, sehingga dengan meningkatkan jumlah fasa dari satu fasa ke tiga fasa, penyearah pasokan ditingkatkan, yaitu tegangan DC keluaran lebih halus.

c. Analisis Tegangan dan Arus

Untuk penyearah setengah gelombang tiga fasa, tegangan suplai V_A , V_B dan V_C seimbang tetapi dengan perbedaan fasa 120° memberikan:

$$V_A = V_P * \sin(\omega t - 0^\circ)$$

$$V_B = V_P * \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$V_C = V_P * \sin(\omega t - 240^\circ)$$

Dengan demikian nilai DC rata-rata dari bentuk gelombang tegangan keluaran dari penyearah setengah gelombang 3 fasa diberikan sebagai:

$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_P = 0.827 * V_{PEAK}$$

Karena tegangan memasok tegangan puncak, V_P sama dengan $V_{RMS} * 1.414$, maka V_P sama dengan $V_P / 1.414$ menghasilkan $0,707 * V_P$, sehingga tegangan keluaran DC rata-rata penyearah dapat dinyatakan dalam istilah tegangan fase rms (root-mean-squared):

$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \times \frac{V_{PEAK}}{1.414}$$

$$V_{DC} = \frac{0.827}{0.707} V_{RMS} = 1.17 * V_{RMS}$$

d. Contoh Penyearah 3-fase

Penyearah setengah gelombang 3 fase dibangun menggunakan tiga dioda individu dan transformator terhubung bintang 3 fase 120VAC. Jika diperlukan untuk memberi daya pada beban yang terhubung dengan impedansi 50Ω , Hitung, a) output tegangan DC rata-rata ke beban. b) arus beban, c) arus rata-rata per dioda. Asumsikan dioda ideal.

a). Tegangan beban DC rata-rata:

$$V_{DC} = 1,17 * V_{rms} = 1,17 * 120 = 140,4 \text{ volt}$$

Perhatikan bahwa jika kita diberi nilai tegangan puncak (V_P), maka:

$$V_{DC} \text{ akan sama dengan } 0.827 * V_P \text{ atau } 0.827 * 169.68 = 140.4V.$$

b). Arus beban DC:

$$I_L = V_{DC} / R_L = 140,4 / 50 = 2,81 \text{ ampere}$$

c). Arus rata-rata per dioda:

$$I_D = I_L / 3 = 2.81 / 3 = 0.94 \text{ ampere}$$

Salah satu kelemahan penyearah setengah gelombang 3 fasa adalah membutuhkan suplai 4 kabel, yaitu tiga fasa plus koneksi netral (N). Juga tegangan output rata-rata DC rendah pada nilai diwakili oleh $0,827 * V_P$ seperti yang telah kita lihat. Ini karena konten riak keluaran tiga kali

frekuensi masukan. Tetapi kita dapat memperbaiki kelemahan ini dengan menambahkan tiga dioda lagi ke rangkaian penyearah dasar yang membuat penyearah jembatan tiga fasa gelombang penuh tak terkendali.

e. Simulasi

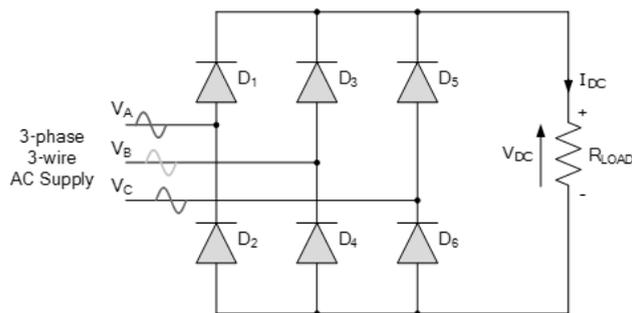
Simulasi rangkaian penyearah stengah gelombang tiga fase

4.4.3 Penyearah Tiga Fase Gelombang Penuh

a. Rangkaian dan Prinsip Kerja

Rangkaian penyearah jembatan tiga fasa gelombang penuh yang tidak terkendali menggunakan enam dioda, dua per fasa dengan cara yang mirip dengan penyearah jembatan satu fasa. Penyearah gelombang penuh 3 fase diperoleh dengan menggunakan dua rangkaian penyearah setengah gelombang. Keuntungannya di sini adalah bahwa rangkaian menghasilkan output riak yang lebih rendah daripada penyearah setengah gelombang 3-fase sebelumnya karena memiliki frekuensi enam kali bentuk gelombang input AC.

Juga, penyearah gelombang penuh dapat diumpankan dari suplai terhubung delta 3-fase 3-kabel yang seimbang karena tidak diperlukan kabel netral (N) keempat. Pertimbangkan rangkaian penyearah 3-fase gelombang penuh di bawah ini.



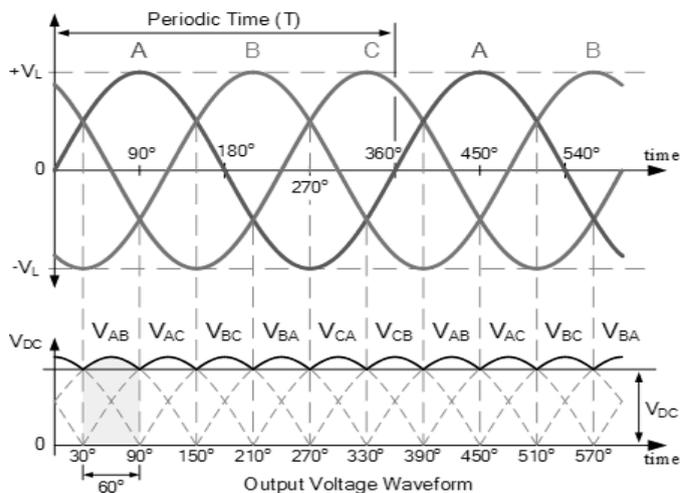
Gambar 4.12 Penyearah Tiga Fase Gelombang Penuh

Seperti sebelumnya, asumsikan rotasi fasa Merah-Kuning-Biru ($V_A - V_B - V_C$) dan fasa merah (V_A) dimulai pada 0° . Setiap fase menghubungkan antara sepasang dioda seperti yang ditunjukkan. Satu dioda dari pasangan hantar memberi daya pada sisi beban positif (+), sedangkan dioda lainnya memberi daya pada sisi beban negatif (-).

b. Bentuk Gelombang

Dioda $D_1 D_3 D_2$ dan D_4 membentuk jaringan penyearah jembatan antara fasa A dan B, demikian pula dioda $D_3 D_5 D_4$ dan D_6 antara fasa B dan C dan $D_5 D_1 D_6$ dan D_2 antara fasa C dan A. Jadi dioda $D_1 D_3$ dan D_5 memberi makan rel positif dan tergantung pada rel mana yang memiliki tegangan lebih positif pada terminal anoda berjalan. Demikian juga, dioda $D_2 D_4$ dan D_6 memberi makan rel negatif dan dioda mana pun yang memiliki tegangan lebih negatif pada terminal katoda akan bekerja.

Kemudian kita dapat melihat bahwa untuk penyearah tiga fasa, dioda berjalan dalam pasangan yang serasi memberikan pola konduksi untuk arus beban: $D_{1-2} D_{1-6} D_{3-6} D_{3-4} D_{5-4} D_{5-2}$ dan D_{1-2} seperti yang ditunjukkan.



Gambar 4.13 Bentuk Gelombang Konduksi Penyearah Tiga-fase Gelombang Penuh

Dalam penyearah daya 3 fase, konduksi selalu terjadi di dioda paling positif dan dioda paling negatif yang sesuai. Jadi saat tiga fase berputar melintasi terminal penyearah, konduksi dilewatkan dari dioda ke dioda. Kemudian setiap dioda berjalan selama 120° (sepertiga) dalam setiap siklus suplai tetapi karena dibutuhkan dua dioda untuk berjalan berpasangan, setiap pasang dioda hanya akan berjalan selama 60° (seperenam) dari siklus pada satu waktu sebagai ditunjukkan di atas.

Oleh karena itu kita dapat dengan benar mengatakan bahwa untuk penyearah 3-fasa yang diumpankan oleh sekunder transformator "3", setiap fasa akan dipisahkan oleh $360^\circ/3$ sehingga membutuhkan dioda $2*3$. Perhatikan juga bahwa tidak seperti penyearah setengah gelombang sebelumnya, tidak ada koneksi umum antara terminal input dan output penyearah. Oleh karena itu dapat diumpankan oleh catu daya transformator terhubung star atau delta.

c. Analisis Tegangan dan Arus

Jadi nilai DC rata-rata dari bentuk gelombang tegangan keluaran dari penyearah gelombang penuh 3 fasa diberikan sebagai:

$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_S = 1.65 * V_S$$

Dimana: V_S sama dengan $(V_{L(PEAK)} \div \sqrt{3})$ dan dimana $V_{L(PEAK)}$ adalah tegangan line-to-line maksimum ($V_L * 1.414$).

d. Contoh Penyearah 3-fase

Penyearah jembatan gelombang penuh 3 fase diperlukan untuk mengumpankan beban resistif 150Ω dari suplai terhubung delta 3 fase 127 volt, 60Hz. Dengan mengabaikan penurunan tegangan pada dioda, hitung: 1. tegangan keluaran DC penyearah dan 2. arus beban.

1. Tegangan keluaran DC:

Tegangan saluran RMS (Root Mean Squared) adalah 127 volt. Oleh karena itu tegangan puncak saluran-ke-saluran ($V_{L-L(PEAK)}$) adalah:

$$V_{L(PEAK)} = V_{L(RMS)} \times \sqrt{2} = 127 \times 1.414 = 179.6 \text{ V}$$

Karena suplai adalah 3-fase, fase ke tegangan netral (V_{P-N}) dari fase apa pun adalah:

$$V_S = V_{L(PEAK)} \div \sqrt{3} = 179.6 \div 1.732 = 103.7 \text{ V}$$

Perhatikan bahwa ini pada dasarnya sama dengan mengatakan:

$$V_S = \frac{V_{L(RMS)} \times \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 103.7 \text{ V}$$

Dengan demikian tegangan output DC rata-rata dari penyearah gelombang penuh 3 fase diberikan sebagai:

$$V_{DC} = \left[\frac{3\sqrt{3}}{\pi} \right] V_S = 1.654 \times V_S$$

$$\therefore V_{DC} = 1.654 \times 103.7 = 171.5 \text{ V}$$

Sekali lagi, dengan cara ini sedikit mengurangi matematika dengan mengatakan dengan benar bahwa untuk nilai tegangan RMS baris-ke-baris tertentu, dalam contoh kita 127 volt, tegangan keluaran DC rata-rata adalah:

$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{L(RMS)} = 1.35 \times 127 = 171.5 \text{ V}$$

2. Arus beban penyearah.

Output dari penyearah memberi makan beban resistif 150Ω. Kemudian menggunakan hukum Ohm arus beban akan menjadi:

$$I_{LOAD} = V_S \div R_L = 171.5 \div 150 = 1.14 \text{ Amps}$$

e. Simulasi

Simulasi rangkaian penyearah tiga fase gelombang penuh

f. Ringkasan dan pengembangan

Penyearah 3 fase yang tidak terkendali menggunakan dioda untuk memberikan tegangan keluaran rata-rata dengan nilai tetap relatif terhadap nilai tegangan AC masukan. Tetapi untuk memvariasikan tegangan output penyearah, kita perlu mengganti dioda yang tidak terkontrol, baik beberapa atau semuanya, dengan thyristor untuk membuat apa yang disebut penyearah jembatan setengah terkendali atau terkendali penuh.

Thyristor adalah perangkat semikonduktor tiga terminal dan ketika pulsa pemicu yang sesuai diterapkan ke terminal gerbang thyristor ketika tegangan terminal Anoda-ke-Katoda positif, perangkat akan menghantarkan dan melewati arus beban. Jadi dengan menunda waktu pulsa pemicu, (sudut tembak) kita dapat menunda waktu instan di mana thyristor secara alami akan mengaktifkan "ON" jika itu adalah dioda normal dan saat itu mulai berjalan saat pulsa pemicu diterapkan .

Jadi dengan penyearah 3 fase terkontrol yang menggunakan thyristor sebagai pengganti dioda, kita dapat mengontrol nilai tegangan output DC rata-rata dengan mengontrol sudut tembak pasangan thyristor dan tegangan output yang diperbaiki menjadi fungsi dari sudut tembak, α .

Oleh karena itu, satu-satunya perbedaan dengan rumus yang digunakan di atas untuk tegangan keluaran rata-rata penyearah jembatan 3-fase adalah dalam sudut cosinus, $\cos(\alpha)$ dari pulsa tembak atau pemicu. Jadi jika sudut tembak adalah nol, ($\cos(0) = 1$), penyearah terkontrol bekerja sama dengan penyearah dioda tak terkendali 3 fase sebelumnya dengan tegangan keluaran rata-rata sama.

4.5 Latihan

1. Buatlah rangkaian simulasi Penyearah fase tunggal setengah gelombang tak terkendali dan bandingkan hasil analisis dengan hasil simulasi!
2. Buatlah rangkaian simulasi Penyearah fase tunggal gelombang penuh tak terkendali dan bandingkan hasil analisis dengan hasil simulasi!
3. Buatlah rangkaian simulasi Penyearah tiga fase setengah gelombang tak terkendali dan bandingkan hasil analisis dengan hasil simulasi!
4. Buatlah rangkaian simulasi Penyearah tiga fase gelombang penuh tak terkendali dan bandingkan hasil analisis dengan hasil simulasi!

5. Lakukan perubahan beban untuk rangkaian soal nomor 1 sampai dengan 4, baik beban R, L dan RL dengan nilai resistansi dan induktansi yang berbeda-beda dan berikan kesimpulan Anda!