

SKRIPSI

**PENGATURAN KECEPATAN PUTARAN MOTOR DC DENGAN
MENGUNAKAN SCR**



OLEH

THOMAS TONGLO
105 82 00911 11

DEDI IRAWAN
105 82 00791 11

**PROGRAM STUDI TEKNIK LISTRIK
JURUSAN ELEKTRO FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR
2015**

SKRIPSI

**PENGATURAN KECEPATAN PUTARAN MOTOR DC DENGAN
MENGUNAKAN SCR**



OLEH

THOMAS TONGLO
105 82 00911 11

DEDI IRAWAN
105 82 00791 11

**PROGRAM STUDI TEKNIK LISTRIK
JURUSAN ELEKTRO FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR
2015**



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR
FAKULTAS TEKNIK

Jl. Sultan Alauddin No. 259 Telp. (0411) 866 972 Fax (0411) 865 588 Makassar 90221

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan untuk memenuhi syarat ujian guna memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) Program Studi Teknik Elektro Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.

Judul Skripsi : **PENGATURAN KECEPATAN PUTARAN MOTOR DC DENGAN MENGGUNAKAN SCR.**

Nama : 1. Thomas Tonglo
2. Dedi Irawan

Stambuk : 1. 105 82 0911 11
2. 105 82 0791 11

Makassar, 08 Maret 2016

Telah Diperiksa dan Disetujui
Oleh Dosen Pembimbing;

Pembimbing I

Pembimbing II

Dr. Ir. Indra Jaya Mansur, M.T

Rizal Ahdiyut Duyo, S.T.,M.T

Mengetahui,

Ketua Jurusan Elektro

Umar Katu, S.T., M.T.
NBM : 990 410



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR
FAKULTAS TEKNIK

Jl. Sultan Alauddin No. 259 Telp. (0411) 866 972 Fax (0411) 865 588 Makassar 90221

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

PENGESAHAN

Skripsi atas nama Thomas Tonglo dengan nomor induk Mahasiswa 105 82 0911 11 dan Dedi Irawan dengan nomor induk Mahasiswa 105 82 0791 11, dinyatakan diterima dan disahkan oleh Panitia Ujian Tugas Akhir/Skripsi sesuai dengan Surat Keputusan Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar Nomor : 043/05/A.5-II/I/37/2016, sebagai salah satu syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar pada hari Jum'at tanggal 22 Januari 2016

Panitia Ujian : Makassar, 28 Jumadil Ula' 1437 H
08 Maret 2016 M.

1. Pengawas Umum

a. Rektor Universitas Muhammadiyah Makassar

Dr. H. Irwan Akib, M.Pd.

b. Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Dr. -Ing. Ir. Wahyu H. Piarah, MSME.

2. Penguji

a. Ketua : Dr. Ir. Hj. Hafsah Nirwana, M.T.

b. Sekretaris : Anugrah, S.T., M.M.

3. Anggota : 1. Dr. Ir. Zahir Zainuddin, M.Sc.

2. Ir. Abd Hafid, M.T.

3. Mutmainnah, S.T., M.T.

Mengetahui :

Pembimbing I

Pembimbing II

Dr. Ir. Indra Jaya Mansur, M.T.

Rizal Ahdiyati Duyo, S.T., M.T.

Ketua Program Studi
Teknik Elektro

Umar Katu, S.T., M.T.
NBM : 990 410

ABSTRAK

Motor arus searah sering digunakan untuk keperluan penggerak di industri-industri, hal ini disebabkan banyaknya metode pengaturan yang dapat digunakan untuk mengatur kecepatannya. Walaupun dalam penerapannya motor arus searah memiliki keunggulan dalam kemudahan pengaturan kecepatannya. Pengaturan kecepatan motor arus searah (DC) akan lebih sempurna bila menggunakan SCR sebagai pengontrolnya. Dimana dengan pengaturan kecepatan putaran motor DC menggunakan SCR ini akan menghasilkan kecepatan putaran motor yang variabel.



KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah penulis panjatkan puji syukur ke hadirat Allah SWT, karena Rahmat dan HidayahNya sehingga penulis dapat menyusun skripsi ini, dan dapat kami selesaikan dengan baik.

Tugas akhir ini disusun sebagai salah persyaratan akademik yang harus ditempuh dalam rangka penyelesaian program studi pada Jurusan Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar. Adapun judul tugas akhir adalah : “Pengaturan Kecepatan Putaran Motor DC Dengan Menggunakan SCR”

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa dalam penulisan skripsi ini masih terdapat kekurangan-kekurangan, hal ini disebabkan penulis sebagai manusia biasa tidak lepas dari kesalahan dan kekurangan baik itu ditinjau dari segi teknis penulis maupun dari perhitungan-perhitungan. Oleh karena itu penulis menerima dengan ikhlas dan senang hati segala koreksi serta perbaikan guna penyempurnaan tulisan ini agar kelak dapat bermanfaat. Skripsi ini dapat terwujud berkat adanya bantuan, arahan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu dengan segalan ketulusan dan kerendahan hati, kami mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada :

1. Bapak Hamzah Al Imran, S.T.,M.T. sebagai Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.
2. Bapak Umar Katu, S.T., M.T. sebagai Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.

3. Bapak. Dr.Ir. Indra Jaya Mansur, M.T. selaku Pembimbing I dan Bapak Rizal A Duyo, S.T., M.T. selaku Pembimbing II, yang telah banyak meluangkan waktunya dalam membimbing kami
 4. Bapak dan ibu dosen serta staf pegawai pada fakultas teknik atas segala waktunya telah mendidik dan melayani penulis selama mengikuti proses belajar mengajar di Universitas Muhammadiyah Makassar.
 5. Ayahanda dan Ibunda yang tercinta, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas segala limpahan kasih sayang, doa dan pengorbanan terutama dalam bentuk materi dalam menyelesaikan kuliah.
 6. Saudara-saudaraku serta rekan-rekan mahasiswa fakultas teknik terkhusus angkatan 2011 yang dengan keakraban dan persaudaraan banyak membantu dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
- Semoga semua pihak tersebut di atas mendapat pahala yang berlipat ganda di sisi Allah SWT dan skripsi yang sederhana ini dapat bermanfaat bagi penulis, rekan-rekan, masyarakat serta bangsa dan Negara. Amin.

Makassar, Desember 2015

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
ABSTRAK.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	x
BAB I PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Rumusan Masalah.....	2
C. Tujuan.....	2
D. Manfaat.....	2
E. Batasan Masalah.....	3
F. Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
A. Thyristor.....	5
1. Karakteristik Thyristor.....	5
2. Sifat-sifat Thyristor.....	7
B. Pembatasan di/dt Thyristor.....	9
C. Pembatasan dv/dt Thyristor.....	10
D. Pendingin thyristor.....	11

E. Rangkaian Penyulut Thyristor.....	14
1. Faktor yang Dipengaruhi oleh Penyulutan.....	15
F. Penyearah Terkendali Penuh Satu Fasa	16
G. Motor Arus Searah	18
1. Prinsip Kerja Motor DC	18
2. GGL Lawan.....	20
3. Arus Jangkar.....	21
H. Kontruksi Motor Listrik Arus Searah	21
1. Badan Motor Listrik.....	22
2. Inti Kutub Magnet dan Lilitan Penguat Magnet	24
3. Sikat-sikat.....	24
4. Komutator	24
5. Jangkar	26
6. Lilitan Jangkar (angker).....	27
I. Karakteristik Kecepatan - Torsi	28
1. Karakteristik kecepatan -Torsi Motor DC Penguat Terpisah.....	28
2. Karakteristik Kecepatan-Torsi Motor DC Shunt	28
3. Karakteristik Kecepatan-Torsi Motor DC Seri	29
4. Karakteristik Kecepatan -Torsi Motor DC Kompon.....	29
J. Pengaturan Motor Arus Searah	30
K. Prinsip Pengaturan Kecepatan Motor DC.....	31
L. Rangkaian Penyearah.....	31

M. Pengaturan Kecepatan Motor DC Dengan Empat Bua Thyristor Sistem Jembatan.....	33
N. Pemilihan Tyristor.....	34
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	36
A. Waktu dan Tempat	36
B. Bahan Dan Peralatan Yang Digunakan	36
C. Metode Penelitian	39
D. Langkah-langkah Pengujian.....	39
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	41
A. Rangkaian Pengujian.....	41
B. Hasil Pengukuran	41
C. Gambar Gelombang Tegangan Keluaran.....	42
D. Analisa Hasil Pengukuran.....	45
1. AnalisaTegangan Keluaran Penyearah	45
2. Analisa Putaran (n) Motor DC Shunt.....	48
3. Analisa Momen (T) Motor DC Setiap Sudut Penyalaan.....	50
E. Perbandingan Data Secara Teori Dan Pengujian	50
BAB V PENUTUP KESIMPULAN DAN SARAN.....	52
A. Kesimpulan	52
B. Saran.....	52
DAFTAR PUSTAKA	54
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Normalisasi huruf ujung lilitan motor DC	23
Tabel 4.1 Hasil pengukuran kecepatan motor DC Shunt Positif	42
Tabel 4.2 Hasil pengukuran kecepatan motor DC Shunt Negatif	42
Tabel 4.3 Analisa tegangan keluaran penyearah	47
Tabel 4.4 Perbandingan tegangan antara hasil uji dan analisa rumus	51
Tabel 4.5 Persentase Kesalahan Antara Hasil Uji Dan Analisa	51



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kontruksi SCR	5
Gambar 2.2 Tiga pn-junction dan Simbol SCR	5
Gambar 2.3 karakteristik SCR	6
Gambar 2.4 Pemasangan induktansi (L) seri dengan beban untuk membatasi di/dt thyristor	10
Gambar 2.5 Penggunaan rangkaian sumber pada thyristor.....	11
Gambar 2.6 Aliran panas dan distribusi temperature pada thyristor.....	13
Gambar 2.7 Karakteristik load line (garis beban).....	15
Gambar 2.8 Karakteristik pulsa trigger.....	16
Gambar 2.9 Rangkaian penyearah system jembatan dengan Empat buah Thyristor.....	17
Gambar 2.10 Kaidah tangan.....	18
Gambar 2.11 Arah arus dan gaya.....	19
Gambar 2.12 Gaya dalam medan magnet.....	19
Gambar 2.13 Konstruksi motor arus searah.....	22
Gambar 2.14 kontruksi sebuah komutator dari motor arus searah.....	25
Gambar 2.15 Konstruksi jangkar.....	26
Gambar 2.16 Kumparan jangkar.....	27
Gambar 2.17 karakteristik Kecepatan Torsi Motor DC Shunt.....	28
Gambar 2.18 Karakteristik Kecepatan-Torsi Motor DC Seri	29
Gambar 2.19 Rangkaian Konverter Penuh Satu Fasa	33

Gambar 2.20 Rangkaian Pengaturan Kecepatan Motor DC Shunt Dengan Empat Buah Thyristor Sistem Jembatan.....	33
Gambar 3.1 Diagram blok Rangkaian.....	39
Gambar 4.1 Rangkaian Pengujian.....	41
Gambar 4.2 Gelombang keluaran sudut penyalan 30°	43
Gambar 4.3 Gelombang keluaran sudut penyalan 60°	43
Gambar 4.4 Gelombang keluaran sudut penyalan 90°	43
Gambar 4.5 Gelombang keluaran sudut penyalan 120°	44
Gambar 4.6 Gelombang keluaran sudut penyalan 150°	44
Gambar 4.7 Gelombang keluaran sudut penyalan 180°	44



BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Sebagaimana diketahui perindustrian sekarang ini mengalami perkembangan yang cukup pesat baik pada industri besar maupun industri kecil. Sehubungan dengan perkembangan perindustrian tersebut maka kebutuhan akan motor-motor listrik meningkat pula sesuai dengan kebutuhan pasar.

Motor arus searah merupakan salah satu jenis motor yang sering digunakan karena motor arus searah adalah mesin yang berfungsi mengubah tenaga listrik DC menjadi tenaga gerak atau tenaga mekanik, dimana tenaga gerak tersebut berupa putar daripada rotor. Alasan utama mengapa pilihan jatuh pada motor DC dalam industri modern adalah karena kecepatan kerja motor-motor DC mudah diatur dalam rentang kecepatan yang lebar, di samping itu banyak metode yang dapat digunakan.

Pada saat ini kemajuan teknologi di bidang elektronika daya begitu pesatnya dengan ditemukannya bahan semikonduktor yang berkemampuan daya tinggi seperti thyristor atau *SCR (silicon controller rectifier)* sehingga lingkup elektronika daya menjadi luas dalam pengaturan daya listrik yang berkapasitas tinggi seperti pengaturan kecepatan putaran motor DC yang sebelumnya diatur dengan metode yang konvensional kini dapat dilakukan dengan menggunakan komponen elektronika daya. Dengan alasan diatas maka tugas akhir ini disusun membahas dan menganalisa tentang suatu sistem pengaturan kecepatan putaran

motor DC yang berjudul "**Pengaturan Kecepatan Putaran Motor DC Dengan Menggunakan SCR**".

B. Rumusan Masalah

Adapun permasalahan yang dihadapi pada pengaturan kecepatan putaran motor DC menggunakan sudut penyalan empat buah thyristor dalam sistem jembatan adalah:

1. Bagaimana pengaturan kecepatan putaran motor DC dengan menggunakan SCR
2. Bagaimana karakteristik pengaturan kecepatan putaran motor DC dengan menggunakan SCR

C. Tujuan

Adapun tujuan dari pembahasan tugas akhir ini adalah:

1. Untuk mengetahui pengaturan kecepatan putaran motor arus searah (DC) dengan empat buah SCR sistem jembatan
2. Untuk mengetahui karakteristik SCR sebagai pengaturan kecepatan putaran motor DC

D. Manfaat

Manfaat yang akan dicapai dalam pembahasan tugas akhir ini adalah:

1. Dapat mengetahui cara mengatur kecepatan putaran motor arus searah dengan menggunakan sudut penyalan empat buah SCR dengan sistem jembatan
2. Dapat menjelaskan prinsip kerja SCR dalam pengaturan kecepatan putaran motor DC

3. Dapat membantu praktek mahasiswa di laboratorium.

E. Batasan Masalah

Untuk mencegah terlampaui meluasnya pembahasan masalah maka penulis akan melakukan pembatasan. Masalah yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Pengaturan kecepatan putaran motor DC penguat *shunt*
2. Rangkaian kontrol yang digunakan adalah empat buah *SCR* sistem jembatan
3. Hanya difokuskan pada prinsip kerja dan analisa *SCR* sebagai pengatur kecepatan putaran motor DC
4. Tidak membahas saat start maupun berhentinya motor

F. Sistematika penulisan

Untuk tercapainya penyelesaian dalam penulisan tugas akhir penulis menguraikan secara sistematika yang terdiri dari:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini membahas tentang latar belakang, tujuan, manfaat, permasalahan dan pembatasan masalah serta sistematika penulisan tugas akhir.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini diuraikan secara singkat teori-teori dasar yang menunjang pemahaman dan pembahasan tugas akhir ini.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini berisikan tentang metode-metode penelitian yang digunakan dalam pengaturan kecepatan putaran motor DC

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini akan dibahas tentang hasil yang diperoleh dari pengamatan atau proses data yang telah dilakukan dengan menghitung tegangan jangkar motor DC.

BAB V PENUTUP KESIMPULAN DAN SARAN

Bab terakhir ini merupakan bab terakhir dari tugas akhir ini yang berisikan kesimpulan dan saran



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

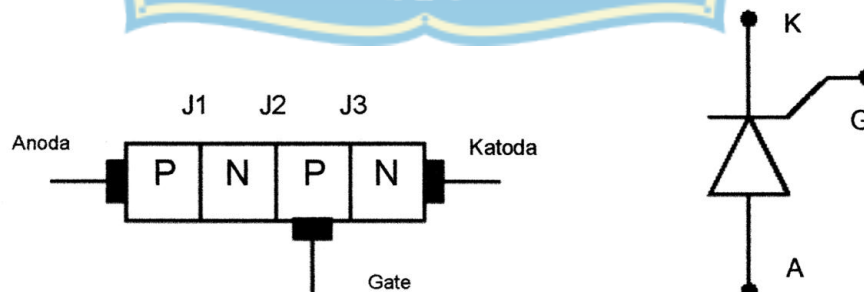
A. Thyristor

1. Karakteristik Thyristor

Thyristor sering juga disebut *SCR (silicon controller rectifier)*. Sebuah *SCR* terdiri dari empat lapisan PNPN dengan PN *junction* terbuat dari bahan semikonduktor silikon. *SCR* memiliki tiga terminal anode, katode dan *gate*. Gambar 2.1 memperlihatkan konstruksi thyristor. Gambar 2.2 simbol thyristor dan bagian dari tiga PN *junction*.

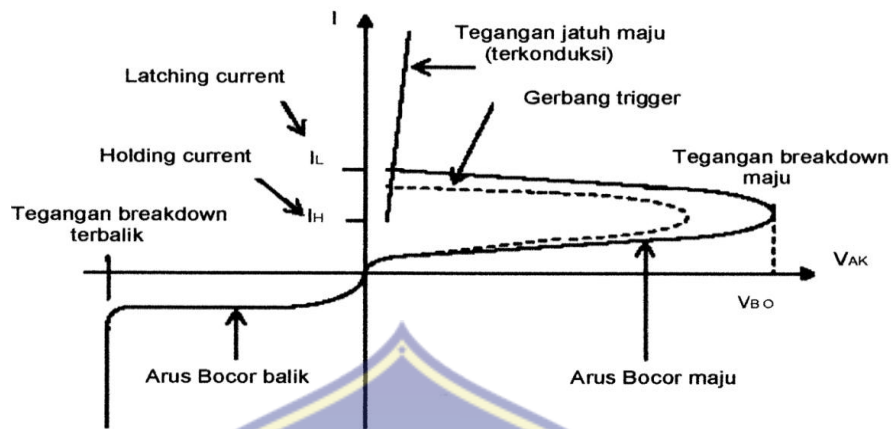


Gambar 2.1 Kontruksi SCR



Gambar 2.2 Tiga PN-junction dan Simbol SCR

(Sumber: Elektronika Daya. Muhammad H Rashid. Hal 75)



Gambar 2.3 Karakteristik SCR

(Sumber: Elektronika Daya. Muhammad H Rashid. Hal 75)

Ketika tegangan anoda dibuat lebih positif dengan katoda, sambungan J1 dan J3 berada pada kondisi *forward* bias. Sambungan J2 berada pada kondisi *reverse* bias, dan akan mengalir arus bocor yang kecil antara anoda dan katoda. Pada kondisi ini SCR berada pada kondisi *forward blocking*. Jika tegangan anoda ke katoda V_{AK} ditingkatkan hingga suatu tegangan tertentu, sambungan J2 akan bocor. Dan karena J1 dan J3 sudah berada pada kondisi *forward* bias, maka akan terjadi lintasan pembawa muatan bebas melewati ketiga sambungan, yang akan menghasilkan arus anoda yang besar. SCR pada kondisi ini disebut berada pada kondisi konduksi atau keadaan hidup. Arus anoda harus lebih besar dari suatu nilai yang disebut *latching current* I_t , agar diperoleh cukup banyak aliran pembawa muatan-muatan bebas yang melewati sambungan-sambungan jika tidak maka SCR akan kembali ke kondisi *blocking* ketika tegangan anoda ke katoda berkurang. Akan tetapi, jika arus maju anoda dibawa suatu tingkatan yang disebut *holding current* I_H , maka thyristor akan kembali ke keadaan *blocking* karena terjadinya

pengurangan pembawa muatan-muatan bebas. Ketika tegangan katoda lebih positif dibandingkan dengan anoda, sambungan J2 ter-*forward* bias, akan tetapi sambungan J1 dan J3 akan ter-*reverse* bias. SCR berada pada kondisi *reverse blocking*.

(Sumber: Elektronika Daya. Muhammad H Rashid. Hal 75)

2. Sifat-Sifat Thyristor

Jika anoda diberikan tegangan positif, kemudian tegangan tersebut diperbesar terus maka pada suatu tegangan tertentu (biasanya sangat besar). Tiba-tiba SCR akan ON dan tegangan drop SCR akan menuju kesuatu harga yang sangat rendah sehingga arus yang mengalir akan besar dan hal ini akan merusak SCR itu sendiri batas kemampuan arus SCR dilewati.

Untuk mencegah hal ini dapat dimanfaatkan suatu sifat khas SCR yaitu efek arus *gate* terhadap tegangan *break over* bervariasi harganya tergantung pada besarnya arus *gatenya*. Makin besar arus *gate* diberikan, makin rendah tegangan *break overnya*. Dengan kata lain SCR dapat di ON kan dengan tegangan yang lebih besar dari tegangan *break over* yaitu dengan melakukan penyulutan atau memberikan suatu harag arus *gate* yang tertentu besarnya, cukup sesaat saja karena jika SCR sudah ON arus *gate* tidak diperlukan lagi. SCR dioperasikan pada *forward* bias yaitu pada tegangan anoda lebih positif dari katodanya. Jika sebaliknya tegangan anoda lebih negatif dari tegangan katoda dikatakan bahwa SCR beroperasi pada *reverse* bias.

Untuk membuat SCR dua cara dibawah ini harus dilakukan sekaligus yaitu:

- Tegangan anoda lebih positif dari katoda dimana tegangan ini sama atau lebih dari tegangan *break over* (V_{bo})
- Diberikan sinyal penyalan positif pada *gate*nya yang lazim disebut sebagai penyulutan
- Besarnya tegangan *break over*, tergantung pada arus *gate* (I_G) yang diberikan (I_G adalah arus yang masuk ke *gate SCR*)
- Semakin besar I_G yang diberikan, semakin kecil tegangan *break over*nya
- Jika *SCR* sudah on, walaupun I_G diputuskan maka *SCR* tetap on selama tegangan *forward* masih ada dan lebih besar atau sama dengan tegangan *holding* (V_H)

Contoh *SCR* akan konduksi atau on apabila *gate* diberi sinyal penyalan dan arus anoda lebih besar dari arus *holding*, thyristor akan terus berada pada kondisi konduksi atau on, bahkan bila sinyal penyalan dihilangkan.

Untuk mematikan thyristor ada beberapa hal yang perlu diperhatikan, yaitu sebagai berikut:

- Arus anoda harus dikurangi menjadi dibawah level *holding* atau arus anoda ini dikendalikan oleh rangkaian luar, ketika untuk suatu perioda yang amat singkat ada arus balik yang mengalir
- Membuat tegangan anodanya lebih negatif dari tegangan katoda yang dilakukan sesaat
- Untuk membuat *SCR* off dapat dilakukan dengan mengurangi arus maju ke tingkat di bawah arus *holding* (I_H)

Bila thyristor diberi tegangan *reverse* maka:

- *SCR* selalu off, tidak tergantung pada arus IG, selama tegangan *reverse* (V_r) masih lebih kecil dari tegang jatuh *SCR* (V_{so}).
- Bila tegangan *reverse* V_r melebihi tegangan jatuh *SCR*, maka *SCR* akan On (katoda-anoda hubung singkat) dan mengalirkan arus *reverse* (I_r) yang sangat besar, sehingga dapat mengakibatkan *SCR* rusak

B. Pembatasan di/dt Thyristor

Pada saat suatu tegangan maju diaplikasikan pada sebuah thyristor, dan thyristor tersebut dinyalakan dengan arus pada *gate* konduksi, arus anoda melewati *junction* berlangsung pada daerah terdekat dari hubungan *gate* dan menyebar melewati seluruh daerah *junction*, sehingga daerah konduksi menyebar secepat mungkin.

Walaupun demikian, jika laju arus kenaikan anoda di/dt demikian besar, akan terbentuk suatu titik panas lokal pada hubungan *gate* yang terdekat akibat densitas arus yang tinggi dibagian *junction* yang melakukan konduksi. Untuk beban-beban dengan daya besar, sangat penting untuk diperhatikan kecuraman arus yang terjadi pada saat peralihan dari off ke on atau sebaliknya.

Hal ini sangat diperhitungkan untuk beban-beban *resistif* seperti lampu, pemanas dan lain-lain. Karena kecuraman melebihi rating (kemampuan), thyristor akan dapat rusak. Cara mengatasi kecuraman arus ini dapat menggunakan sebuah induktor yang dihubungkan seri dengan beban, *transien* akan membatasi kecuraman arus maksimum dengan menggunakan rumus :

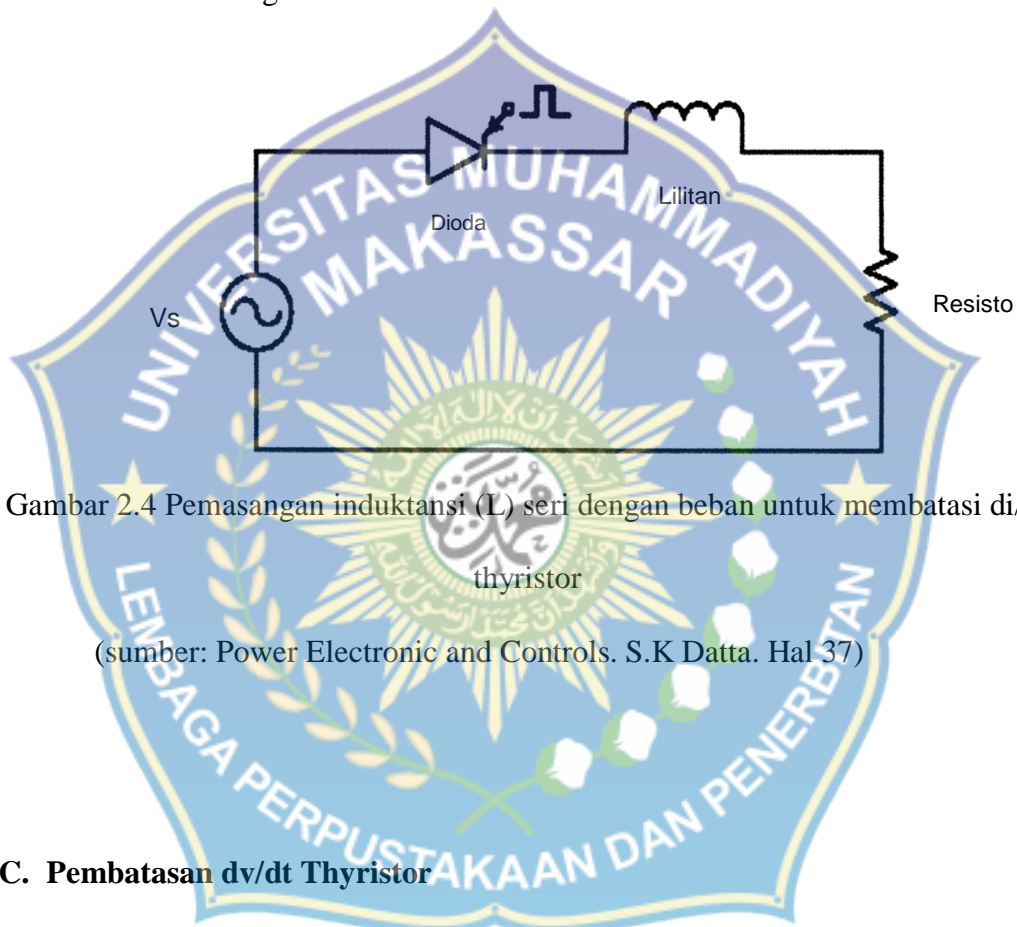
$$\frac{di}{dt} |_{x_{max}} = \frac{V_m}{L} \text{A/sec} \dots\dots\dots 2.1$$

(sumber: Power Electronic and Controls. S.K Datta. Hat 36)

Dimana:

V_m = tegangan maksimum

L = besar harga induktansi



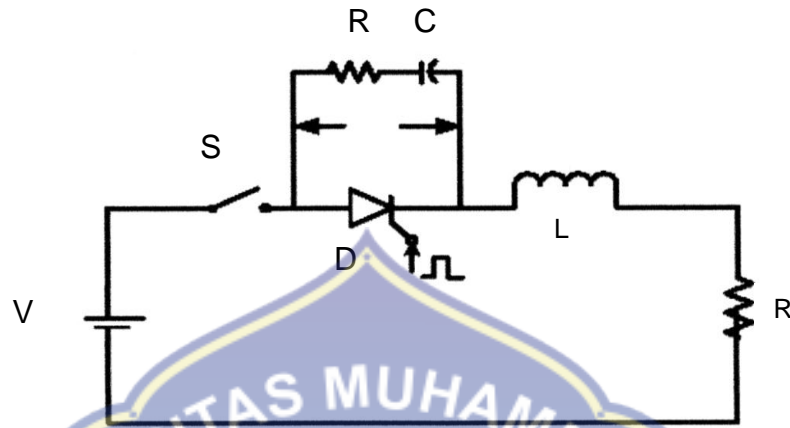
Gambar 2.4 Pemasangan induktansi (L) seri dengan beban untuk membatasi di/dt thyristor

(sumber: Power Electronic and Controls. S.K Datta. Hal 37)

C. Pembatasan dv/dt Thyristor

Setiap thyristor mempunyai spesifikasi perubahan tegangan (dv/dt) maksimumnya. Ketika thyristor berubah dari keadaan off ke on, maka akan terjadi tingkat perubahan tegangan yang sangat cepat yang disebut dengan dv/dt. Tingkat perubahan tegangan ini tidak boleh melebihi dv/dt maksimumnya. Bila ini terjadi, maka thyristor akan on dengan sendirinya sehingga tidak bias dikendalikan lagi. Hal ini harus dicegah, yaitu dengan memasang RC ini parallel dengan thyristor.

Rangkaian *RLC* ini dikenal dengan rangkaian sumber seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Penggunaan rangkaian sumber pada thyristor

(sumber: Power Electronic and Controls. S.K Datta. Hal 37)

Secara pendekatan dv/dt dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\left. \frac{dv_{ak}}{dt} \right|_{max} = \frac{V}{\sqrt{LC}} \quad \dots \dots \dots 2.2$$

(sumber: Power Electronic and Controls. S.K Datta. Hal 37)

Dimana:

V= tegangan baterai

L= besar harga induktansi.

C= besar harga kapasitansi

D. Pendingin Thyristor

Kerugian daya pada thyristor dapat dibagi empat bagian yaitu:

1. Rugi-rugi daya yang timbul pada saat konduksi yang merupakan fungsi tegangan dan arus. Rugi-rugi ini sangat dominan pada frekuensi rendah

2. Rugi-rugi yang disebabkan oleh arus bocor terjadi pada keadaan non konduksi (*reverse*)
3. Rugi-rugi yang terjadi pada rangkaian gate
4. Rugi-rugi *switching* dimana pada keadaan ini energi dilepas ke komponen baik pada saat konduksi maupun tidak konduksi

(sumber: Power Electronics. Cyril W. Lander. Hal 19)

Semua rugi-rugi diatas akan menimbulkan panas pada komponen thyristor, yang mengakibatkan kenaikan temperatur pada komponen tersebut. Panas yang dibangkitkan di *junction* (sambungan) akan mengalir ke *base* (dasar) dan kemudian dilepas ke *heatsink*.

Tingkat temperatur yang terjadi pada base tidak boleh melewati batas yang diizinkan pabrik pembuatan komponen tersebut. Perpindahan panas terjadi dari daerah yang mempunyai temperatur yang lebih rendah. Perpindahan ini sebanding dengan temperatur yang berbanding terbalik dengan hambatan thermal R, dengan rumus:

$$P = \frac{T_1 - T_2}{R} \dots\dots\dots 2.3$$

(sumber : Power Electronics. Cyril W. Lander. Hal 19)

Dimana:

T1 = daerah yang mempunyai temperatur lebih tinggi (oC)

T2 = daerah yang mempunyai temperatur lebih rendah (oC)

P = banyaknya panas yang dipindahkan (W)

R = hambatan thermal (oC/W)

Panas yang ditimbulkan pada *junction* akibat dari rugi-rugi daya yang mengalir ke base thyristor lalu ke *heatsink* dan kemudian di sekelilingnya.

Persamaan hambatan thermalnya:

$$R_{ja} = R_{jb} + R_{bs} + R_{sa} \dots\dots\dots 2.4$$

(sumber : Power Electronics. Cyril W. Lander. Hal 20) Dimana:

R_{ja} = impedansi thermal junction ambient

R_{bs} = impedansi thermal junction base

R_{bs} = impedansi thermal base heatsink

R_{sa} = impedansi thermal heatsink ambient

Sedangkan persamaan untuk temperatur:

$$T_j = T_a + P_{ave} R_{ja} \dots\dots\dots 2.5$$

(sumber : Power Electronics. Cyril W. Lander. Hal 20)

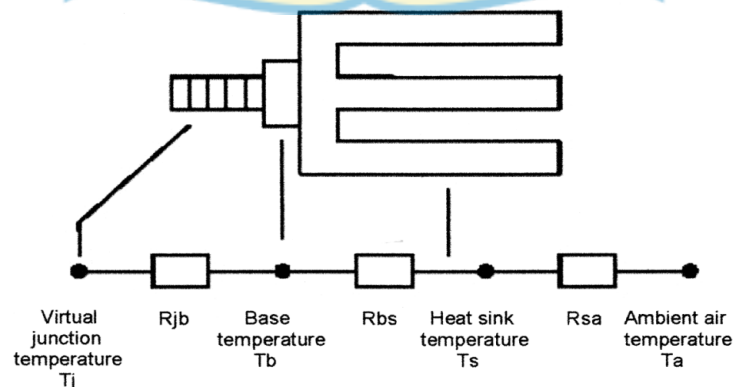
$$T_j - T_a = P_{ave} (R_{jb} + R_{bs} + R_{sa}) \dots\dots\dots 2.6$$

Dimana:

T_j = temperatur *junction* (oC)

T_a = temperatur *ambient* (oC)

P_{ave} = daya rata-rata (Watt)



Gambar 2.6 Aliran panas dan distribusi temperatur pada thyristor

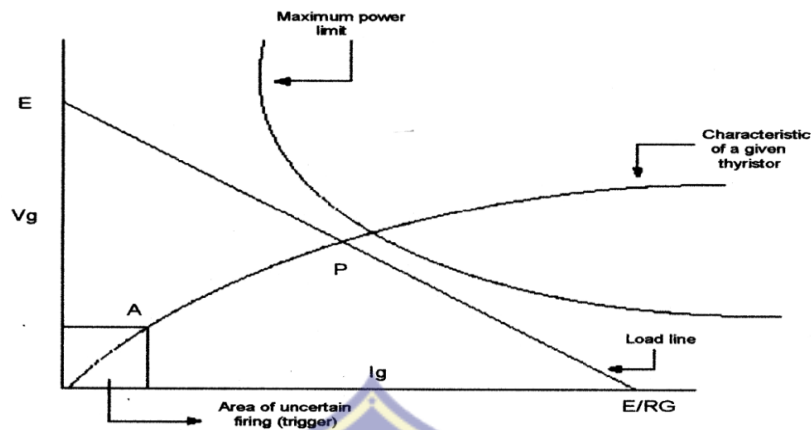
(sumber: Power Electronics. Cyril W. Lander. Hal 21)

E. Rangkaian Penyulut Thyristor

Untuk mengoperasikan thyristor dengan baik perlu adanya rangkaian penyulut, untuk membuat rangkaian penyulut harus mengetahui dahulu beberapa kondisi dan karakteristik dari thyristor yang akan dikontrol. Kondisi yang digunakan mempunyai dua macam yaitu :

1. Thyristor yang kondisi tidak ditrigger, dimana tidak akan mengalir arus, hasil ini dapat diumpamakan sebagai saklar terbuka
2. Thyristor yang kondisi ditrigger, dimana arus tidak akan pada kondisi ditrigger akan tetap berlangsung sampai arus majunya mencapai harga lebih kecil atau sama dengan arus *holding*, dan selanjutnya thyristor akan off

Untuk menyulut sebuah thyristor secara benar dan dalam periode waktu yang sangat singkat diperlukan suatu arus *gate* berbentuk pulsa dengan waktu naik untuk mencapai maksimum yang diizinkan yang sangat cepat. Untuk itu dibutuhkan rangkaian penyulut yang dapat membangkitkan pulsa dengan waktu yang sangat cepat dan mempunyai *periods* yang sangat cukup untuk memberikan kesempatan pada anoda untuk mencapai harga maksimum. Keuntungan dengan menggunakan pulsa adalah arus daya disipasi pada *gate*-nya relatif kecil bila dibandingkan dengan menggunakan arus penyulut yang *kontinyu* (bukan pulsa), selain itu pemakaian pulsa juga akan memberikan akurasi waktu penyulutan yang lebih baik.



Gambar 2.7 Karakteristik *load line* (garis beban)

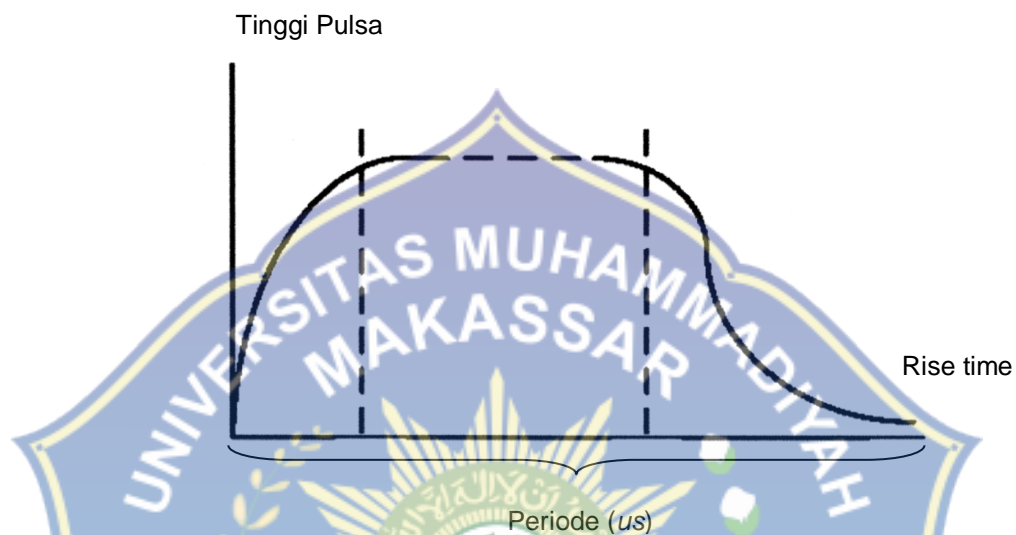
(sumber: Power Electronics. Cyril W. Lander. Hal 12)

Dalam kondisi *steady state* hubungan antara tegangan *gate* (V_c) dan arus *gate* (i_g) ditentukan oleh harga-harga dari E dan r_e sepanjang garis beban, terlihat pada gambar 2.7 ketika pada *gate* diberi sinyal maka arus akan naik hingga mencapai kondisi *steady state*-nya, yaitu titik P , akan tetapi thyristor harus sudah konduksi pada daerah sebelum titik P dicapai dan sesudah titik A . Pada umumnya harga dari E berkisar antara 5 sampai 10 Volt dengan arus sekitar 0,5 sampai 1 Ampere.

1. Faktor Yang Diperlukan Oleh Rangkaian Penyulut

Untuk menyulut sebuah thyristor benar dan dalam periode waktu yang sangat singkat, diperlukan suatu arus *gate* yang berbentuk pulsa dengan waktu naik (*rise time*) untuk mencapai maksimum yang diinginkan sangat cepat. Untuk itu dibutuhkan rangkaian penyulut yang dapat membangkitkan pulsa dengan *rise time* yang cepat dan mempunyai periode yang cukup untuk memberikan kesempatan pada arus anoda mencapai harga *latchingnya* (I_L).

Keuntungan dari penyulut dengan menggunakan pulsa daya disipasi pada *gatenya* relatif kecil bila dibandingkan dengan menggunakan arus penyulut yang komersial akan mempunyai bentuk karakteristik dari pulsa yang dihasilkan seperti pada gambar 2.8



Gambar 2.8 Karakteristik pulsa trigger
(sumber: Power Electronics. Cyril W. Lander. Hal 14)

Terlihat bahwa pulsa tersebut mempunyai *rise time* selama 1 μs untuk mencapai harga maksimum dan mempunyai periode (panjang pulsa) sekitar 50 μs . Untuk thyristor dengan respon lambat diperlukan periode yang lebih lama yaitu 100 μs . Untuk beberapa jenis penyearah akan dibutuhkan penyulut yang serentak empat buah thyristor sekaligus, yang mana masing-masing katoda mempunyai beda tegangan yang berlainan.

F. Penyearah Terkendali Penuh Satu Fasa

Rangkaian penyearah ini membutuhkan 2 pasang pulsa trigger, yaitu 1 pasang bekerja di daerah setengah gelombang positif dan 1 pasang yang lain pada setengah gelombang negatif. Bila penyearah dihubung dengan sumber tegangan

seperti yang terlihat pada gambar, pada setengah gelombang positif thyristor Q1 dan Q4 mendapat bias-maju. Dalam keadaan ini, bila kedua thyristor tersebut disulut pada sudut α yang sama maka tegangan masukan akan dikirim ke beban sejak awal sudut penyulutan sampai kedua thyristor mengalami komutasi (tegangan nol). Kemudian pada setengah periode berikutnya, thyristor Q3 dan Q2 mendapat bias maju. Sama halnya dengan keadaan pada setengah periode pertama, bila kedua thyristor ini disulut pada sudut α yang sama, pada daerah negatif tersebut maka tegangan negatif masukan akan ditransfer ke beban sehingga tegangan keluaran V_{da} terlihat seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Rangkaian penyearah sistem jembatan dengan empat buah thyristor

Gambar 2.9 juga menunjukkan bentuk gelombang tegangan dan arus keluaran, V_{da} dan I_{da} , di mana keduanya mempunyai polaritas yang sama. Kelebihan penyearah ini adalah kemampuannya dalam mengumpukan balik energi beban ke sumber. Dengan beban yang induktansinya tinggi, aliran arus akan kontinyu.

G. Motor Arus Searah

1. Prinsip Kerja Motor DC

Motor arus searah adalah mesin yang berfungsi mengubah tenaga listrik DC menjadi tenaga gerak atau tenaga mekanik, dimana tenaga gerak tersebut berupa putar daripada rotor. Motor listrik arus searah mempunyai prinsip kerja berdasarkan percobaan Lorents yang menyatakan "Jika sebatang penghantar listrik yang berarus berada di dalam medan magnet maka pada kawat penghantar tersebut akan terbentuk suatu gaya". Gaya yang terbentuk sering dinamakan gaya Lorents.

Untuk menentukan arah gaya dapat digunakan kaidah tangan kiri *Flemming* atau kaidah telapak tangan kiri. Gambar berikut melukiskan konstruksi kaidah tangan kiri *Flemming*



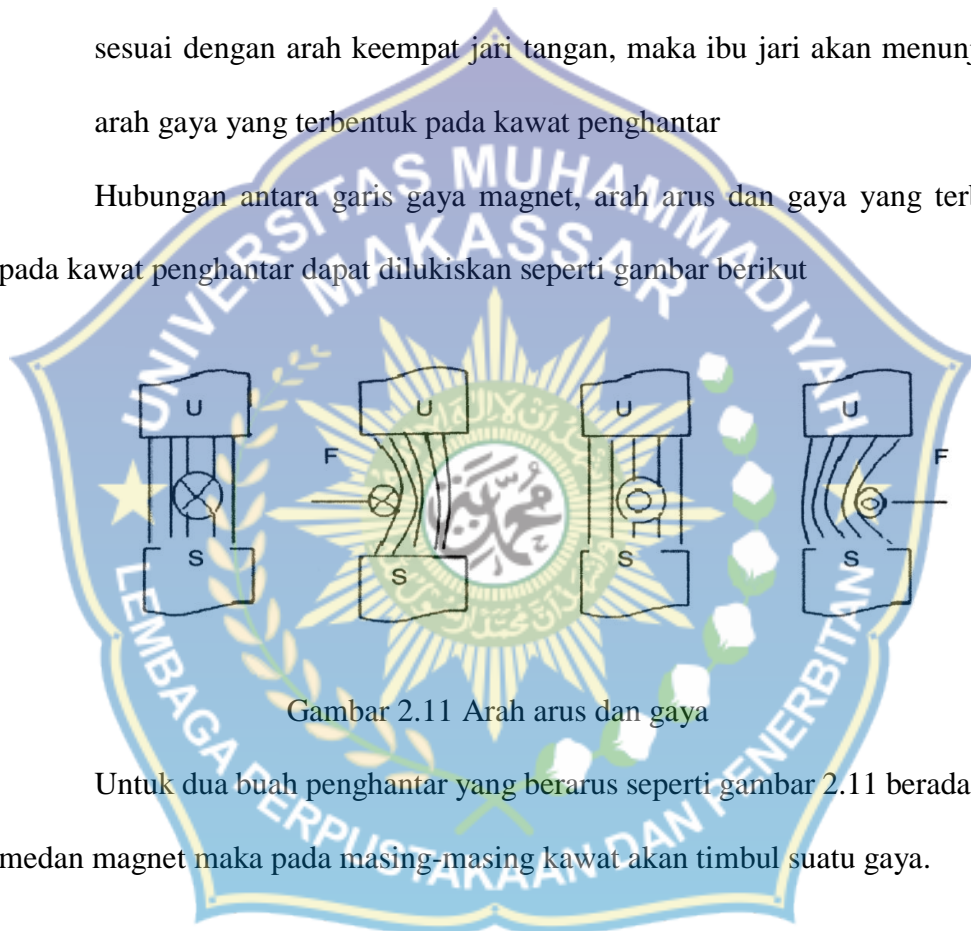
Gambar 2.10 Kaidah tangan

Jika ibu jari, jari tengah dan jari telunjuk disusun seperti gambar 2.10, garis gaya magnet sesuai dengan arah jari telunjuk, arus yang mengalir pada penghantar searah dengan jari tengah maka, gaya yang terbentuk pada kawat penghantar akan searah dengan arah ibu jari.

Jika digunakan kaidah telapak tangan kiri, maka didalam menentukan arah gaya dapat dikerjakan sebagai berikut:

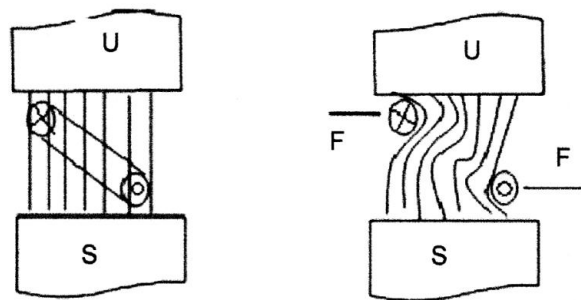
- Telapak tangan kiri direntangkan sedemikian rupa sehingga ibu jari dengan keempat jari yang lain saling tegak lurus
- Jika garis gaya magnet menembus tegak lurus telapak tangan, arah arus sesuai dengan arah keempat jari tangan, maka ibu jari akan menunjukkan arah gaya yang terbentuk pada kawat penghantar

Hubungan antara garis gaya magnet, arah arus dan gaya yang terbentuk pada kawat penghantar dapat dilukiskan seperti gambar berikut



Gambar 2.11 Arah arus dan gaya

Untuk dua buah penghantar yang berarus seperti gambar 2.11 berada dalam medan magnet maka pada masing-masing kawat akan timbul suatu gaya.



Gambar 2.12 Gaya dalam medan magnet

Besarnya gaya dapat ditentukan dengan persamaan:

$$F = B \cdot I \cdot L \dots\dots\dots$$

Dimana:

F = gaya lorentz (newton)

B = kerapatan flux magnet (Weber/m²)

I = arus listrik (ampere)

L = panjang sisi kumparan rotor (m)

2. GGL lawan

Karena kawat penghantar tersebut bergerak didalam medan magnet maka sesuai dengan percobaan Faraday, pada kawat penghantar tersebut akan terbentuk GGL Induksi.

GGL induksi ini mempunyai arah melawan tegangan yang menyebabkan, sehingga GGL induksi ini sering disebut GGL lawan.

Untuk menentukan GGL lawan E_a mempunyai persamaan dengan GGL induksi pada generator arus searah yaitu :

$$E_a = C \cdot n \cdot \phi \cdot \text{volt} \dots\dots\dots 1.6$$

E_a : GGL lawan (volt)

ϕ : fluks per kutub (*Weber*)

n : jumlah putaran per menit (rpm)

C : $(P/a) \times (Z/60) = \text{konstanta}$

P : jumlah kutub

a : jumlah cabang paralel lilitan jangkar

Z : jumlah kawat penghantar aktif

3. Arus jangkar

Karena tegangan pemakaian dan ggl lawan berlawanan arah satu samalain, jumlah tegangan pada jangkar adalah selisih dari kedua tegangan ini. Dengan demikian arus jangkar dapat dihitung dengan persamaan

$$I_a = \frac{V_t - E_a}{R_a} \dots\dots\dots 1.7$$

Sedangkan hubungan antara ggl lawan dengan tegangan supply dinyatakan dengan persamaan:

$$E_a = V_t - I_a \cdot R_a \dots\dots\dots 1.8$$

Dari persamaan 1.6 dan persamaan 1.8 sehingga didapat:

$$C \cdot n \cdot \phi = V_t - I_a \cdot R_a$$
$$n = \frac{V_t - I_a \cdot R_a}{C \cdot \phi} \dots\dots\dots 1.9$$

Dimana:

I_a = arus jangkar (ampere)

V_t = tegangan terminal (volt)

E_a = GGL lawan (volt)

R_a = tahanan jangkar (ohm)

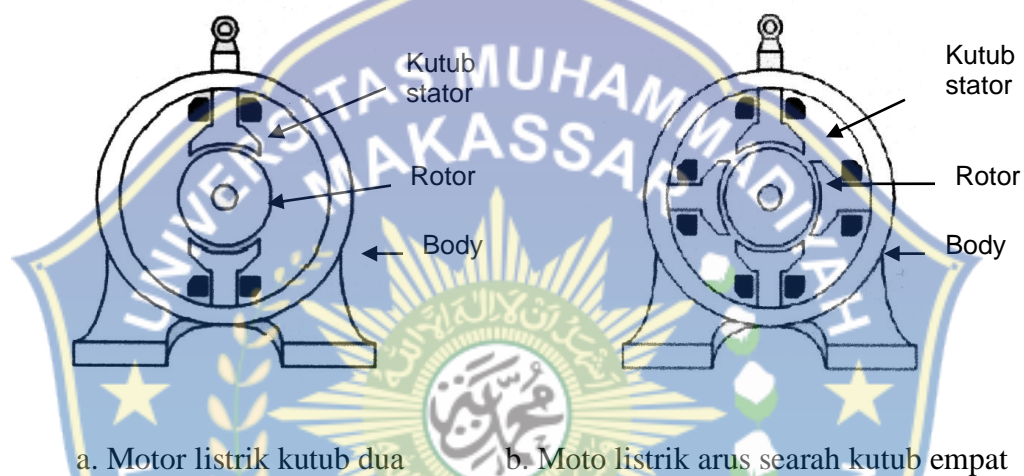
H. Konstruksi Motor Listrik Arus Searah

Gambar 2.13 melukiskan konstruksi bagian yang terpenting dari sebuah motor listrik arus searah kutub dua dan kutub empat.

Secara umum konstruksi motor listrik arus searah dapat dibagi menjadi dua :

1. Stator (bagian yang diam)
2. Rotor (bagian yang berputar)

Untuk bagian yang diam (stator) dalam motor listrik arus searah terdiri atas badan (*body*), inti kutub magnet dan sikat-sikat. Sedangkan untuk bagian rotornya adalah komutator, jangkar dan lilitan jangkar.



Gambar 2.13 Konstruksi motor arus searah

1. Badan Motor listrik

Fungsi utama dari badan motor adalah sebagai bagian tempat untuk mengalirnya *fluks* magnet yang dihasilkan kutub-kutub magnet, karena itu badan motor dibuat dari bahan *ferromagnetik*. Disamping itu badan motor ini berfungsi untuk meletakkan alat-alat tertentu dan melindungi bagian-bagian motor lainnya.

Pada badan motor terdapat papan nama (*name plat*) yang bertuliskan spesifikasi umum atau data teknik dari motor. Papan nama tersebut untuk mengetahui beberapa hal pokok yang perlu diketahui dari motor tersebut. Selain

papan nama badan motor juga terdapat kotak hubung yang merupakan tempat ujung-ujung penguat magnet dan lilitan jangkar.

Ujung-ujung lilitan jangkar ini tidak langsung dan lilitan jangkar tetapi merupakan ujung kawat penghubung lilitan jangkar yang melalui komutator dan sikat-sikat. Dengan adanya kotak hubung akan memudahkan dalam pergantian susunan lilitan penguat magnet dan memudahkan pemeriksaan kerusakan yang mungkin terjadi pada lilitan jangkar maupun lilitan penguat tanpa membongkar mesin. Untuk mengetahui ujung-ujung lilitan tersebut, setiap pabrik/negara mempunyai normalisasi huruf tertentu, yang mana hal tersebut dapat dinyatakan dalam tabel di bawah ini:

Tabel 2.1 Normalisasi huruf ujung lilitan motor DC

Jenis lilitan	VEMET	VDE	Amerika
1. lilitan jangkar	B-b	A-a	A ₁ -A ₂
2. lilitan penguat magnet			
a. lilitan shunt	F-f	C-D	F ₁ -F ₂
b. lilitan seri	S-s	E-F	S ₁ -S ₂
c. lilitan terpisah	E-e	I-K	F ₁ -F ₂

2. Inti Kutub Magnet dan Lilitan Penguat Magnet

Sebagaimana diketahui bahwa *fluks* magnet yang terdapat pada motor arus searah dihasilkan oleh kutub-kutub magnet buatan yang dibuat prinsip elektromagnetis. Lilitan penguat magnet berfungsi untuk mengalirkan arus listrik sebagai terjadinya proses elektromagnetis.

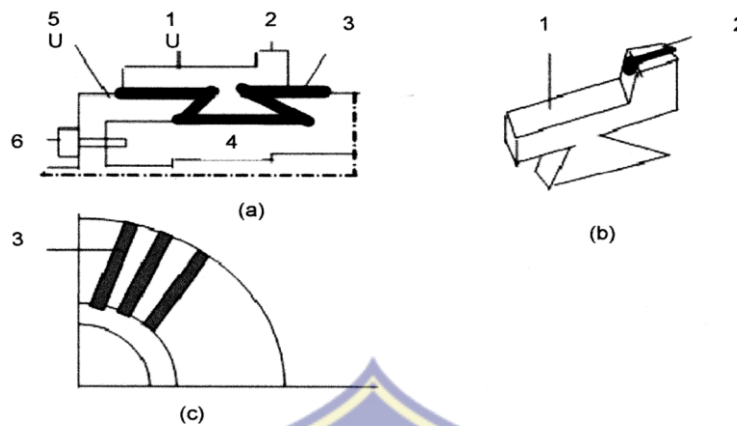
3. Sikat-sikat

Fungsi utama dari sikat-sikat adalah untuk jembatan bagi aliran arus dari lilitan jangkar dengan sumber tegangan. Disamping itu sikat-sikat memegang peranan penting untuk terjadinya komutasi. Agar gesekan antara komutator-komutator dan sikat tidak mengakibatkan ausnya komutator, maka bahan sikat lebih lunak dari komutator. Biasanya dibuat dari bahan arang (*coal*).

4. Komutator

Komutator untuk mengumpulkan arus listrik induksi dari konduktor jangkar dan mengkonversikannya menjadi arus searah melalui sikat. Komutator yang digunakan dalam motor arus searah pada prinsipnya mempunyai dua bagian yaitu:

- a. Komutator bar merupakan tempat terjadinya pergesekan antara komutator dengan sikat-sikat
- b. Komutator riser merupakan bagian yang menjadi tempat hubungan komutator dengan ujung dari lilitan jangkar



Gambar 2.14 Kontruksi sebuah komutator dari motor arus searah

Keterangan : a. Segmen komutator b. Pemasangan komutator c. Susunan komutator

1. Komutator bar
2. Riser
3. Isolator
4. Poros
5. Ring pengunci
6. Baut

Isolator yang digunakan yang terletak antara komutator yang satu dengan komutator yang lain harus dipilih sesuai dengan kemampuan isolator tersebut terhadap suhu yang terjadi dalam mesin.

Jadi disamping sebagai isolator terhadap listrik, juga harus mampu terhadap suhu tertentu. Berdasarkan jenis isolator yang digunakan terhadap kemampuan panas ini maka pada mesin listrik dikenal:

- a. Klas A : jika temperatur tinggi diijinkan 70°C (katun, sutera, kertas)
- b. Klas B : jika temperatur tinggi diijinkan 110°C (serat asbes, serat gelas)

- c. Klas H : jika temperatur tinggi diijinkan 185°C (mika, gelas, porselin, keramik)

5. Jangkar (*angker*)

Umumnya jangkar yang digunakan dalam motor arus searah adalah berbentuk selinder dan diberi alur-alur pada permukaannya untuk tempat melilitkan kumparan-kumparan tempat terbentuknya GGL lawan.

Seperti halnya pada inti kutub magnet, maka jangkar dibuat dari bahan berlapis-lapis tipis untuk mengurangi panas yang terbentuk karena adanya arus liar (Eddy current). Bahan yang digunakan jangkar ini sejenis campuran baja silikon.

Adapun konstruksinya dari jangkar tersebut dapat dilukiskan seperti gambar 2.15.



a. Jangkar beralur

b. Lempeng plat jangkar

Gambar 2.15 Konstruksi jangkar

6. Lilitan jangkar (*anker*)

Lilitan jangkar pada motor arus searah berfungsi sebagai tempat terbentuknya GGL lawan. Pada prinsipnya kumparan terdiri atas :

- a. Sisi kumparan aktif, yaitu bagian sisi kumparan yang terdapat dalam alur jangkar yang merupakan bagian yang aktif (terjadi GGL lawan sewaktu motor bekerja)
- b. Kepala kumparan, yaitu bagian dari kumparan yang terletak di luar alur yang berfungsi sebagai penghubung satu sisi kumparan aktif dengan sisi kumparan aktif lain dan kumparan tersebut
- c. Juluran, yaitu bagian ujung kumparan yang menghubungkan sisi aktif dengan komutator



Gambar 2.16 Kumparan jangkar

I. Karakteristik kecepatan –torsi

1. Karakteristik Kecepatan -Torsi Motor dc Penguat Terpisah

Karakteristik-karakteristik motor penguat terpisah mempunyai persamaan dengan karakteristik-karakteristik pada motor *shunt*. Oleh karena itu tinjauan pada motor ini dapat dilihat pada motor *shunt Rsh*.

2. Karakteristik Kecepatan -Torsi Motor dc *Shunt*

Motor *shunt* mempunyai rangkaian jangkar dan medan yang dihubungkan paralel yang memberikan kekuatan medan dan kecepatan yang sangat konstan. Motor *shunt* digunakan jika diperiukan pengaturan kecepatan yang bagus pada mesin yang digerakkan. Dengan menambahkan *rheostat* yang dipasang seri dengan rangkaian medan *shunt*, kecepatan motor dapat dikontrol diatas kecepatan dasar. Kecepatan motor akan menjadi berbanding terbalik dengan arus medan. Ini berarti motor *shunt* berputar cepat dengan arus medan rendah, dan berputar lambat pada saat arus ditambah.



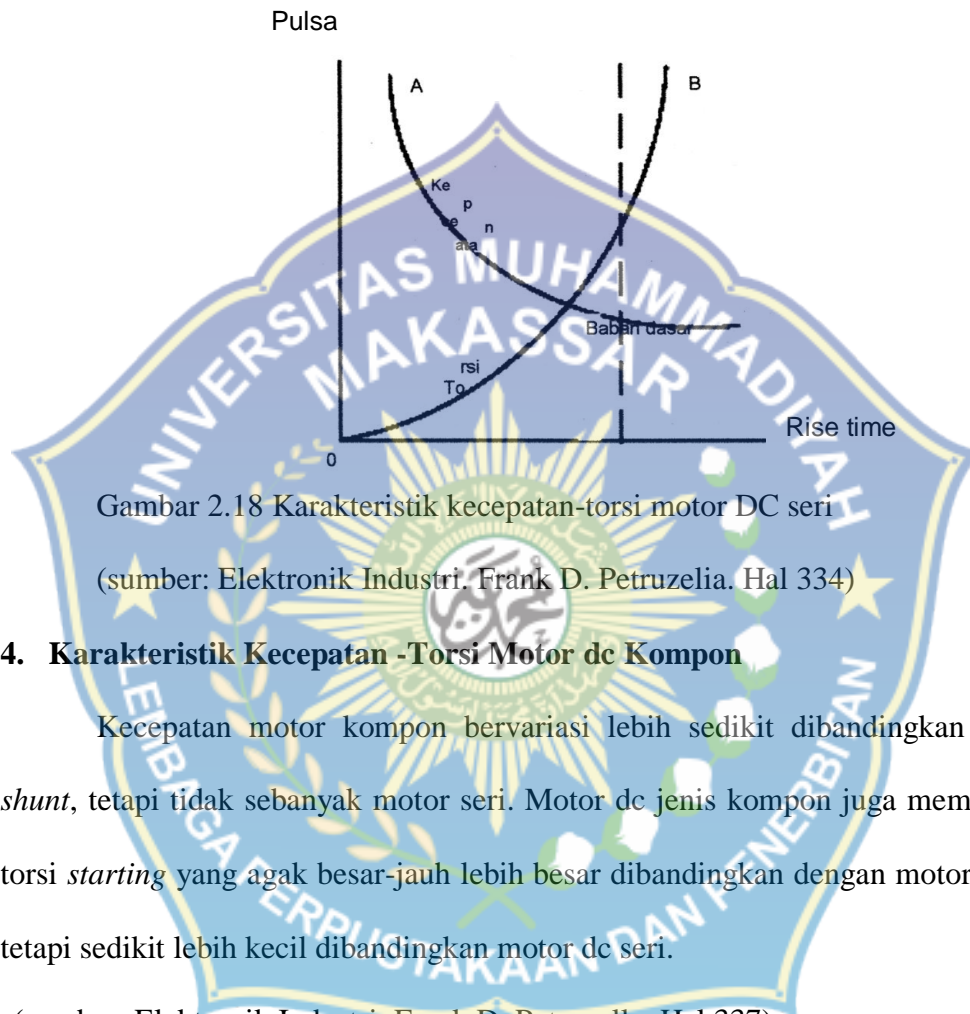
Gambar 2.17 Karakteristik kecepatan-torsi motor DC *shunt*

(sumber: Elektronik Industri, Frank D. Petruzella. Hal 336)

3. Karakteristik Kecepatan -Torsi Motor dc Seri

Motor jenis ini mempunyai karakteristik torsi start dan kecepatan variabel yang tinggi. Ini berarti bahwa motor dapat start atau menggerakkan beban yang sangat berat, tetapi kecepatan akan bertambah kalau beban turun. Motor dc seri dapat membangkitkan torsi *starting* yang besar karena arus yang sama melewati jangkar juga melewati medan. Jadi jika jangkar memerlukan arus lebih banyak

(membangkitkan torsi lebih besar), arus ini juga melewati medan, menambah kekuatan medan. Oleh karena itu, motor seri berputar cepat dengan beban ringan dan berputar lambat pada saat beban ditambahkan



Gambar 2.18 Karakteristik kecepatan-torsi motor DC seri
(sumber: Elektronik Industri. Frank D. Petruzelia. Hal 334)

4. Karakteristik Kecepatan -Torsi Motor dc Kompon

Kecepatan motor kompon bervariasi lebih sedikit dibandingkan motor *shunt*, tetapi tidak sebanyak motor seri. Motor dc jenis kompon juga mempunyai torsi *starting* yang agak besar-jauh lebih besar dibandingkan dengan motor *shunt*, tetapi sedikit lebih kecil dibandingkan motor dc seri.

(sumber: Elektronik Industri. Frank D. Petruzella. Hal 337)

J. Pengaturan Kecepatan Motor Arus Searah

Secara umum ada tiga metode pengaturan yang sering digunakan untuk mengatur kecepatan putaran motor DC yaitu:

1. Pengaturan arus medan (*field current control*) merupakan metode yang paling umum digunakan dan merupakan salah satu keuntungan yang menonjol dari

motor-motor *shunt*. Dengan menyisipkan tahanan ias30ble yang dipasang secara sen terhadap kumparan medan (pada motor *shunt*), dapat diatur arus medan I_f dan *fluks*-nya (ϕ). Cara ini sangat sederhana dan murah, selain itu rugi panas yang ditimbulkan kecil pengaruhnya. Karena besarnya *fluks* yang 30 ias dicapai oleh kumparan medan terbatas, kecepatan yang dapat diatur pun terbatas. Kecepatan terendah didapat dengan membuat tahanan 30ias30ble sama dengan r_a , sedangkan kecepatan tertinggi dibatasi oleh perencanaan mesin dengan gaya *sentrifugal* maksimum tidak sampai merusak rotor. Kopel maksimum didapatkan pada kecepatan terendah. Motor yang 30ias diatur dengan cara ini adalah motor *shunt* dan motor kompon.

2. Pengaturan tahanan rangkaian jangkar (*armature circuit resistance*) contoh metode ini umum digunakan untuk pengaturan kecepatan bagi motor-motor sen karena akan diperoleh perubahan kecepatan yang lebar karena adanya perubahan tahanan jangkar. Dengan menyisipkan tahanan variabel secara seri terhadap tahanan jangkar, dengan demikian tahanan jangkar pun dapat diatur, berarti pula kecepatan motor dapat dikontrol. Cara ini jarang digunakan, karena penambahan tahanan seri terhadap tahanan jangkar menimbulkan rugi panas yang cukup besar
3. Pengaturan tegangan terminal jangkar (*armature terminal voltage control*) dalam pengaturan tegangan terminal ini suatu cara yang umum digunakan sistem *Ward Leonard* yang merupakan himpunan generator-motor untuk mencatu daya ke jangkar dan kecepatannya akan diatur. Motor yang dipakai adalah motor berpenguat bebas/terpisah

K. Prinsip Pengaturan Kecepatan Motor DC

Pengaturan kecepatan motor arus searah (DC) akan lebih sempurna bila menggunakan thyristor dengan hubungan rangkaian tertentu dapat menghasilkan tegangan searah. Tegangan searah ini adalah tegangan input motor.

Besar tegangan output dari penyearah dapat ditentukan dan sangat tergantung pada yaitu:

- Jenis rangkaian penyearah
- Susunan thyristor yang terdapat pada rangkaian penyearah

Besar tegangan output dapat diatur dan berkisar antara suatu harga minimum nol Volt (untuk sudut kelambatan penyalaan yang maksimum) sampai suatu harga yang maksimum (untuk sudut perlambatan penyalaan minimum $\alpha = 0^\circ$). Harga maksimum dan minimum dari sudut tergantung dari rangkaian penyearah yang digunakan.

L. Rangkaian Penyearah

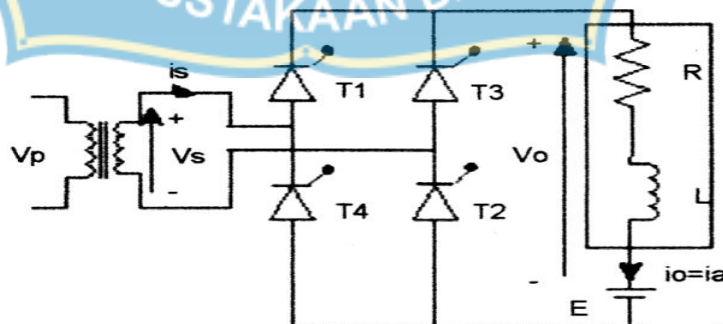
Rangkaian untuk penyearah satu fase dengan beban sangat induktif sehingga beban bersifat kontinyu. Sepanjang setengah siklus positif, thyristor T_1 dan T_2 ditrigger dan konduksi secara bersamaan pada $\omega t = \alpha$, beban akan terhubung kesupply melalui T_1 dan T_2 . Akibat beban yang bersifat induktif, thyristor T_1 dan T_2 akan terus tersambung saat waktu telah melewati $\omega t = \pi$ walaupun tegangan masukan telah negatif. Selama siklus tegangan masukan negatif, thyristor T_3 dan T_4 akan ditrigger sehingga T_3 dan T_4 konduksi. T_1 dan T_2 akan mati melalui komutasi *line* (komutasi natural) dan arus beban akan ditransfer dari T_1 dan T_2 ke T_3 dan T_4 . Gambar 3.2 memperlihatkan beban operasi konverter pada gambar 3.3 yang

memperlihatkan gelombang tegangan masukan, tegangan keluaran dan arus masukan serta keluaran.

Selama periode dari α ke T , tegangan V_s dan arus masukan I_s akan positif, daya akan mengalir dari catu daya ke beban. Saat itu konverter dikatakan berada pada mode operasi penyearah. Selama periode dari t ke $t + \alpha$, tegangan V_s akan negatif, sedangkan I_s akan positif saat ini konverter disebut berada pada keadaan mode operasi inverter.

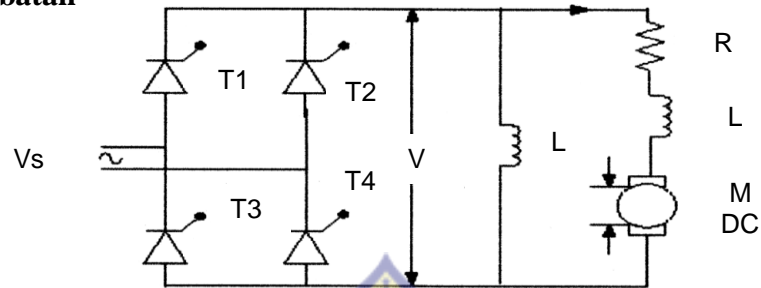
Tegangan keluaran rata-rata dapat ditentukan dari :

$$\begin{aligned}
 V_o &= \int \frac{T+\alpha}{Vm} \sin \omega t \, d(\omega t) \\
 &= \frac{Vm}{T+\alpha} T[-\cos(\omega t)]_{\alpha} \\
 &= \frac{Vm}{T} [-\cos(\pi + \alpha) + \cos \alpha] \\
 &= \frac{Vm}{T} [-(\cos T \cdot \cos \alpha - \sin T \cdot \sin \alpha) + \cos \alpha] \\
 &= \frac{Vm}{T} [-(-\cos \alpha) + \cos \alpha] \\
 &= \frac{2Vm}{T} \cos \alpha \dots\dots\dots 3.1
 \end{aligned}$$



Gambar 2.19 Rangkaian converter penuh satu fasa

M. Pengaturan kecepatan motor DC dengan empat buah thyristor sistem jembatan



Gambar 2.20 Pengaturan kecepatan motor DC shunt dengan empat buah thyristor sistem jembatan

Pada Gambar 2.20 menunjukkan pengaturan kecepatan putaran motor DC dengan penyearah terkendali penuh satu fasa. Tegangan keluaran penyearah dapat diubah-ubah atau dikendalikan dengan mengendalikan sudut penyalan dan thyristor. Penyalan thyristor dilakukan dengan memberikan pulsa penyulutan pada *gate* thyristor. T1 dan T4 diberi pulsa penyulutan siklus positif tegangan sumber sedangkan T2 dan T3 diberi pulsa penyulutan negatif tegangan sumber. Jika T1 dan T4 ditrigger dengan sudut penyalan α selanjutnya T2 dan T3 ditrigger secara bersamaan.

Tegangan keluaran dan penyearah inilah yang akan masuk pada motor dengan mengubah-ubah sudut penyalan thyristor maka kecepatan motor DC akan berubah-ubah pula. Semakin besar sudut penyalan thyristor semakin kecil putaran motor DC dan sebaliknya semakin kecil sudut penyalan thyristor maka putaran motor semakin besar.

N. Pemilihan Thyristor

Thyristor dalam rangkaian penyearah, berfungsi sebagai pengatur tegangan yang diserah atau sebagai pecatu tegangan keluaran. Dimana dalam hal ini diatur melalui pengaturan pada pembangkit pulsa.

Dalam pemilihan thyristor perlu diperhatikan bentuk tegangan sumber yang dipakai, karena dalam rangkaian pengaturan motor DC satu fasa, tegangan sumber yang dipakai adalah tegangan bolak-balik (AC), maka harga maksimum tegangan thyristor adalah:

$$V_{\max} = \sqrt{2} \times V \dots\dots\dots 3.2$$

Dimana:

V_{\max} = tegangan maksimum thyristor (Volt)

V = tegangan sumber (volt)

$$\begin{aligned} V_{\max} &= \sqrt{2} \times 220 \text{ Volt} \\ &= 1,41 \times 220 \text{ Volt} \\ &= 310 \text{ Volt} \end{aligned}$$

Arus efektif yang melewati thyristor:

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{2} \times I_M \dots\dots\dots 3.3$$

$$= \sqrt{2} \times 5.7$$

$$= 8,06 \text{ A}$$

Jadi Thyristor yang dipilih adalah thyristor yang mempunyai kemampuan

$$I_{\text{TMs}} > 8,06 \text{ A}$$

$$V_{\text{RMS}} > 310 \text{ V}$$

Thyristor yang dipilih pada rangkaian daya ini adalah thyristor type S2800D yang mempunyai kemampuan sebagai berikut:

$$I_{Tms} = 10A$$

$$V_{RMS} = 400V$$



BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat

a. Waktu

Pembuatan tugas akhir ini akan dilaksanakan selama 6 bulan, mulai dari bulan Agustus 2015 sampai dengan Desember 2015 sesuai dengan perencanaan waktu yang terdapat pada jadwal penelitian.

b. Tempat

Penelitian dilaksanakan di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar

B. Bahan dan Peralatan yang Digunakan

1. Alat

- Tang
- Obeng (+-)
- Solder
- Pengisap timah
- Multimeter

2. Bahan

- Motor arus searah
 - o V = 220 V
 - o I = 5,7 A
 - o P = 1 KW
 - o n = 2040 rpm

- Regulator AC
- Thyristor 4 buah
- Beban Resistif 1 buah
- Osiloskop 1 buah
- R.P.M indicator 1 buah
- Tachogenertor 1 buah
- Amperemeter DC 1 buah
- Voltmeter DC 1 buah
- Pembangkit pulsa thyristor
- Papan PCB
- Saklar
- ★ Kabel secukupnya

Fungsi dari masing-masing peralatan bantu pada pengujian ini adalah sebagai berikut:

1. Regulator AC

Regelator AC digunakan untuk mengatur tegangan sumber sesuai dengan tegangan yang diinginkan, Jadi dapat diatur 110 volt atau 220 volt.

2. Osiloskop

Osiloskop digunakan untuk mengetahui sudut penyalan pada thyristor atau untuk menentukan sudut penyalan yang kita inginkan

3. Voltmeter DC

Voltmeter DC digunakan untuk mengukur besarnya tegangan output yang dipengaruhi oleh penyalan thyristor

4. Amperemeter DC

Amperemeter DC digunakan untuk mengukur besarnya arus output yang dipengaruhi sudut penyalan thyristor

5. R. P. M indicator

R. P. M. indikator digunakan untuk mengukur putaran motor dipengaruhi oleh sudut penyalan thyristor

6. Tocho-generator

Tachogenerator digunakan untuk pembacaan putaran pada R.P.M indikator

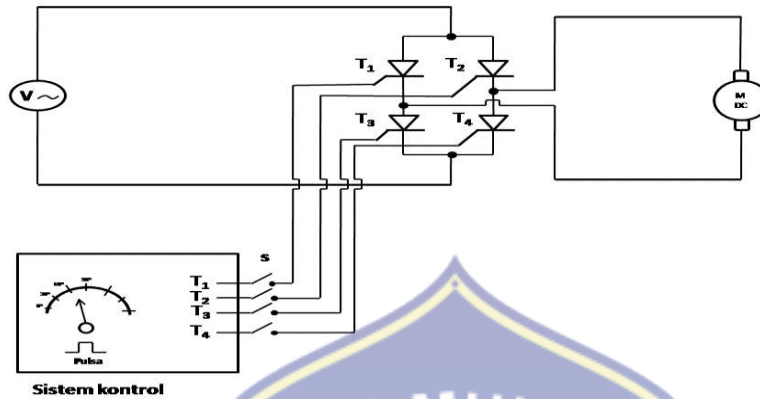
7. Transformator

Transformator digunakan untuk mengubah tegangan

8. Pembangkit pulsa

Pembangkit pulsa digunakan untuk membangkitkan sudut penyalan thyristor. Pengujian yang dilakukan dengan cara menentukan besarnya sudut penyalan thyristor yaitu dengan mengatur pembangkit pulsa dengan melihat osiloskop. Dengan mengatur sudut penyalan thyristor maka putaran motor bisa sesuai yang kita inginkan.

Gambar Blok Rangkaian



Gambar 3.1 Blok rangkaian

C. Metode Penelitian

1. Persiapan
2. Melakukan studi pustaka
3. Melakukan pengujian
4. Pengambilan data uji
5. Melakukan analisis
6. Menyusun laporan
7. Melakukan seminar atau ujian
8. Mempersiapkan artikel (format) Jurnal

D. Langkah-Langkah Pengujian

Sebelum melakukan pengujian terlebih dahulu lihat *name plat* motor supaya dalam melakukan pengujian tidak mengalami kesalahan. Dalam melakukan pengujian ini sudut penyalaan 0 sampai 180°. Dalam pengujian ini langkah-langkah pengujian yang dibakukan pada percobaan adalah sebagai berikut:

1. Mempersiapkan semua peralatan yang diperlukan dalam pengujian

2. Menghubungkan semua peralatan bantu yang dibutuhkan dengan rangkaian pengaturan motor
3. Periksa kembali rangkaian apabila sudah benar hidupkan tegangan sumber yang diinginkan
4. Hidupkan semua peralatan bantu yang digunakan
5. Aturilah sudut penyalan thyristor yang kita inginkan sesuai dengan tabel
6. Mencatat tegangan keluaran V_{out} , untuk dimasukkan ke tabel
7. Mencatat tegangan keluran lout, untuk dimasukkan ke tabel
8. Mencatat besarnya putaran motor untuk sesuai dengan pengaturan sudut penyalan
9. Setelah selesai pengujian, peralatan dan bahan yang digunakan dirapikan



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Rangkaian pengujian

Pada pengujian dengan menghubungkan rangkaian Peyearah Terkendali Penuh Satu Fasa ke motor DC *shunt*, maksud pengujian ini yaitu untuk pengaturan kecepatan motor DC *shunt* dengan mengatur sudut penyalaan 4 buah thyristor.



Gambar 4.1 Pengujian Rangkaian

Input dari penyearah berupa tegangan bolak-balik (AC) 220 V yang konstan yang dihubungkan ke sumber tegangan melalui transformator. Kecepatan putaran motor diukur dengan R. P. M *indicator* dan *tochogenerator*. Rangkaian untuk melakukan dan pengukuran alat dapat dilihat pada gambar 4.1

B. Hasil pengukuran

Dari hasil pengujian dan pengukuran yang dilakukan di laboratorium teknik AC listrik, maka didapat data-data seperti pada tabel dibawah ini:

Tabel 4.1 Hasil pengukuran kecepatan motor DC *Shunt* polaritas positif

No	Pengatur sudut (α)	Vs (volt)	Vout (volt)	I _{out} (Ampere)	Putaran n (rpm)	Keterangan
1	0°	220	200	1,2	1900	
2	30°	220	172	1	1600	
3	60°	220	100	0,8	900	
4	90°	220	0	0	0	

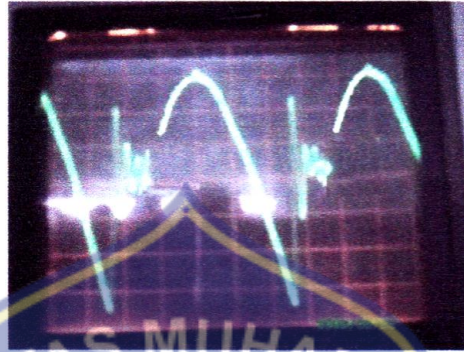
Tabel 4.2 Hasil pengukuran kecepatan motor DC *Shunt* polaritas negatif

No	Pengaturan sudut (α)	Vs (volt)	Vout (volt)	I _{out} (Ampere)	Putaran n (rpm)	Keterangan
1	120°	220	100	0,8	900	Polaritas motor
2	150°	220	172	1	1600	shunt dibalik
3	180°	220	200	1,2	1900	

C. Gambar Gelombang Tegangan Keluaran

Rangkaian pengaturan kecepatan motor DC *shunt* ini dapat bekerja sebagai penyearah atau inverter tergantung sudut penyalan dari thyristor. Jika sudut penyalan $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ maka rangkaian bekerja sebagai penyearah sedangkan jika sudut penyalan (α) lebih besar dari 90° maka rangkaian bekerja sebagai

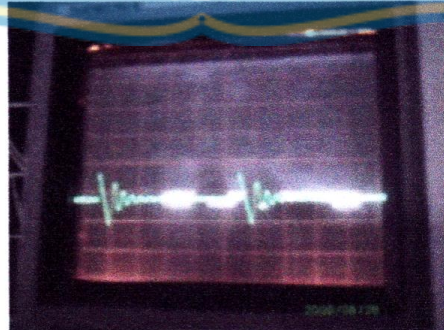
inverter. Bentuk gelombang keluaran yang dihasilkan untuk berbagai sudut penyalan dapat dilihat sebagai berikut.



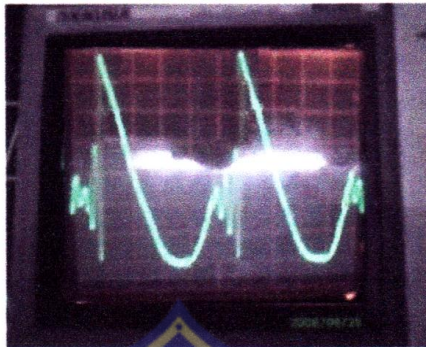
Gambar 4.2 Gelombang keluaran sudut penyalan 30°



Gambar 4.3 Gelombang keluaran sudut penyalan 60°



Gambar 4.4 Gelombang keluaran sudut penyalan 90°



Gambar 4.5 Gelombang keluaran sudut penyalan 120°



Gambar 4.6 Gelombang keluaran sudut penyalan 150°



Gambar 4.7 Gelombang keluaran sudut penyalan 180°

D. Analisa Hasil Pengukuran

Data hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai tegangan yang keluaran dari penyearah berubah dengan perubahan sudut penyalaan α dimana tegangan akan maksimum apabila sudut penyalaan $\alpha = 0$ dan pada sudut penyalaan $\alpha = 90^\circ$ tegangan outputnya 0 sedangkan untuk sudut penyalaan 180° , tegangan outputnya = negatif maximum. Perubahan putaran motor berubah sesuai dengan pengaturan tegangan keluaran penyearah karena tegangan ini adalah tegangan yang masuk pada motor DC . Pada sudut penyalaan α lebih kecil 90° tegangan keluaran rangkaian daya akan bernilai positif. Kecepatan motor akan maksimal pada sudut penyalaan $\alpha = 0^\circ$. Sedangkan pada sudut penyalaan α lebih besar dari 90° tegangan keluaran rangkaian daya akan bernilai negatif serta polaritas motor dibalik. Kecepatan motor akan maksimal pada sudut penyalaan $\alpha = 180^\circ$. Motor akan berhenti pada sudut penyalaan $\alpha = 90^\circ$.

1. Analisa Tegangan Keluaran Penyearah

Tegangan keluaran penyearah rata-rata dapat ditentukan dari persamaan

3.1

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha$$

$$V_m = \sqrt{2} V_{in}$$

$$= \sqrt{2} \times 220$$

$$= 311,13 \text{ Volt}$$

- Untuk $\alpha = 0^\circ$

$$\begin{aligned}
 V_{dc} &= \frac{2 \times 311,13}{3,14} \cos 0^\circ \\
 &= \frac{622,26 \times 1}{3,14} \\
 &= 198,17 \text{ Volt}
 \end{aligned}$$

- Untuk $\alpha = 30^\circ$

$$\begin{aligned}
 V_{dc} &= \frac{2 \times 311,13}{3,14} \cos 30^\circ \\
 &= \frac{622,26 \times 0,86}{3,14} \\
 &= 170,43 \text{ Volt}
 \end{aligned}$$

- Untuk $\alpha = 60^\circ$

$$\begin{aligned}
 V_{dc} &= \frac{2 \times 311,13}{3,14} \cos 60^\circ \\
 &= \frac{622,26 \times 0,5}{3,14} \\
 &= 99,08 \text{ Volt}
 \end{aligned}$$

- Untuk $\alpha = 90^\circ$

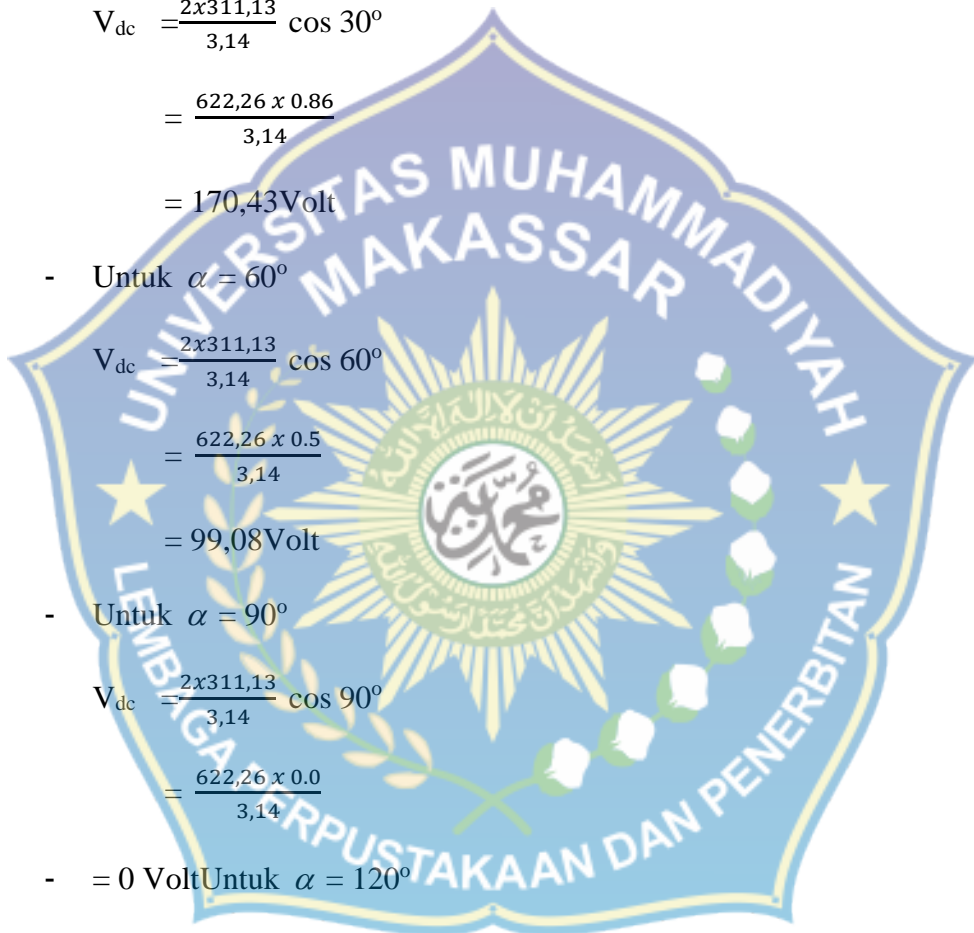
$$\begin{aligned}
 V_{dc} &= \frac{2 \times 311,13}{3,14} \cos 90^\circ \\
 &= \frac{622,26 \times 0,0}{3,14} \\
 &= 0 \text{ Volt}
 \end{aligned}$$

- Untuk $\alpha = 120^\circ$

$$\begin{aligned}
 V_{dc} &= \frac{2 \times 311,13}{3,14} \cos 120^\circ \\
 &= \frac{622,26 \times -0,5}{3,14} \\
 &= -99,08 \text{ Volt}
 \end{aligned}$$

- Untuk $\alpha = 150^\circ$

$$V_{dc} = \frac{2 \times 311,13}{3,14} \cos 150^\circ$$



$$= \frac{622,26 x - 0,86}{3,14}$$

$$= - 170,43 \text{ Volt}$$

- Untuk $\alpha = 180^\circ$

$$V_{dc} = \frac{2 \times 311,13}{3,14} \cos 180^\circ$$

$$= \frac{622,26 x - 1}{3,14}$$

$$= - 198,17 \text{ Volt}$$

Dari hasil perhitungan di atas didapat data-data seperti pada tabel dibawah ini:

Tabel 4.3 Analisa tegangan keluaran penyearah

No	Sudut Penyalan	Vout (volt)
1	0°	198,17
2	30°	170,43
3	60°	99,08
4	90°	0
5	120°	-99,08
6	150°	-170,43
7	180°	-198,17

2. Analisa Putaran (n) Motor DC Shunt

Dari hasil pengukuran, maka putaran motor dapat dicari dengan rumus :

$$n = \frac{Eb}{C \cdot \varphi}$$

$$\text{dimana } Eb = E_a - I_a R_a$$

$$= V_{\text{out}} - I_{\text{out}} R_a$$

$$C\varphi = \frac{V_{220}}{0,11} \text{ V/Rpm}$$

$$n = 2040$$

$$R_a = 0,15\Omega$$

- Untuk $\alpha = 0^\circ$

$$n = \frac{200 - (1,2 \times 0,15)}{0,11}$$

$$n = \frac{200 - 0,18}{0,11}$$

$$= 1816 \text{ rpm}$$

- Untuk $\alpha = 30^\circ$

$$n = \frac{172 - (1,2 \times 0,15)}{0,11}$$

$$n = \frac{172 - 0,15}{0,11}$$

$$= 1562 \text{ rpm}$$

- Untuk $\alpha = 60^\circ$

$$n = \frac{100 - (1,2 \times 0,15)}{0,11}$$

$$n = \frac{100 - 0,12}{0,11}$$

$$= 908 \text{ rpm}$$

- Untuk $\alpha = 90^\circ$

$$n = \frac{0 - (1,2 \times 0,15)}{0,11}$$

$$n = \frac{0 - 0}{0,11}$$

$$= 0 \text{ rpm}$$

- Untuk $\alpha = 120^\circ$

$$n = \frac{-100 - (1,2 \times 0,15)}{0,11}$$

$$n = \frac{-100 - 0,12}{0,11}$$

$$= 901 \text{ rpm}$$

- Untuk $\alpha = 150^\circ$

$$n = \frac{-172 - (1,2 \times 0,15)}{0,11}$$

$$n = \frac{-172 - 0,15}{0,11}$$

$$= -1565 \text{ rpm}$$

- Untuk $\alpha = 180^\circ$

$$n = \frac{-200 - (1,2 \times 0,15)}{0,11}$$

$$n = \frac{-200 - 0,18}{0,11}$$

$$= -1819 \text{ rpm}$$

Perbedaan antara hasil pengukuran dengan hasil perhitungan diatas dapat disebabkan karena ketidakpresisian alat ukur atau dapat juga karena posisi mata pada saat pengukuran tidak tegak lurus terhadap jarum ukur dan angka pada alat ukur, ini disebabkan karena alat ukur yang digunakan bukan alat ukur digital.

3. Analisa Women (T) Motor DC Shunt Setiap Sudut Penyalaan

Momen motor DC *shunt* berubah-ubah akibat pengaruh sudut penyalaan sesuai dengan rumus berikut:

$$T = C\phi \cdot I_a \text{ Nm}$$

$$C\phi = \frac{0,11 \times 60}{2 \times 3,14 \times 3,14} = 6,6 = 1,05 \text{ s/rad}$$

- Untuk $\alpha = 0^\circ$

$$T = 1,05 \times 1,2 = 1,26 \text{ Nm}$$

- Untuk $\alpha = 30^\circ$

$$T = 1,05 \times 1 = 1,05 \text{ Nm}$$

- Untuk $\alpha = 60^\circ$

$$T = 1,05 \times 0,8 = 0,84 \text{ Nm}$$

- Untuk $\alpha = 90^\circ$

$$T = 1,05 \times 0 = 0 \text{ Nm}$$

- Untuk $\alpha = 120^\circ$

$$T = 1,05 \times 0,8 = 0,84 \text{ Nm}$$

- Untuk $\alpha = 150^\circ$

$$T = 1,05 \times 1 = 1,05 \text{ Nm}$$

- Untuk $\alpha = 180^\circ$

$$T = 1,05 \times 1,2 = 1,26 \text{ Nm}$$



E. Perbandingan Data Secara Teori dan Pengujian Serta Presentase

Kesalahan Yang di dapat

Perbedaan antara hasil pengukuran dengan hasil perhitungan dapat disebabkan karena ketidak presisian alat ukur atau dapat juga karena posisi mata pada saat pengukuran tidak tegak lurus terhadap jarum ukur dan angka pada alat ukur, ini disebabkan karena alat ukur yang digunakan bukan alat ukur digital.

Tabel 4.4 Perbandingan tegangan antara hasil uji dan analisa rumus

No	Sudut Penyalaan	Tegangan DC		RPM
		Hasil Uji (V)	Hasil Analisa (V)	
1	0°	200	198,17	1900
2	30°	172	170,43	1600
3	60°	100	99,08	900
4	90°	0	0	0
5	120°	-100	-99,08	900
6	150°	-172	-170,43	1600
7	180°	-200	-198,17	1900

Tabel 4.5 Persentase Kesalahan Antara Hasil Uji Dan Analisa

No	Nilai Tegangan		Modulus Hasil Uji - Hasil Analisa	'Error Relatif' Modulus / Hasil Analisa	Kesalahan % Relatif X 100
	Hasil Uji (V)	Hasil Analisa (V)			
1	200	198,17	1,83	0,0092	0,92
2	172	170,43	1,57	0,0092	0,92
3	100	99,08	0,92	0,0093	0,93
4	0	0	0	0,0000	0,00
5	-100	-99,08	-0,92	0,0093	0,93
6	-172	-170,43	-1,57	0,0092	0,92
7	-200	-198,17	-1,83	0,0092	0,92

BAB V

PENUTUP

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Dari pembahasan dan data yang diperoleh dalam pengukuran yang dilakukan maka dapat diambil kesimpulan :

1. Pada pengujian pengaturan kecepatan putaran motor DC *shunt* dapat melebihi kecepatan putaran nominalnya karena tegangan belitan pada motor diatur dengan *SCR*. Semakin besar sudut penyalan thyristor semakin kecil tegangan yang masuk pada motor
2. Pada sudut penyalan dengan menggunakan *SCR* lebih besar dari 90° tegangan keluaran rangkaian daya akan bernilai negatif dan sistem ini disebut dengan inverter yang digunakan untuk pengereman regeneratif sedangkan sudut penyalan lebih kecil 90° tegangan keluaran rangkaian daya akan bernilai positif dan sistem disebut dengan sistem penyearah mesin DC sebagai generator dan dapat mengembalikan daya ke suply

B. Saran

1. Karena sudut penyalan dapat diatur dengan menggunakan *SCR* maka pengaturan kecepatan putaran motor DC ini dapat diterapkan pada kipas angin dan bor tangan
2. Sebaiknya pada rangkaian penyearah ini digunakan sudut penyalan $\alpha = 0^{\circ}$ dibandingkan dengan sudut penyalan $\alpha = 180^{\circ}$ karena dengan sudut penyalan

$\alpha = 0^\circ$ akan menghasilkan tegangan DC yang lebih besar dan berada pada sistem penyearah



DAFTAR PUSTAKA

Rijono, Drs. Yon, Dasar Teknik Tenaga Listrik, 2014:Yogyakarta, PenerbitANDI.

Fitzgerald, A.E., Charles Kingsley, Jr., dan Stephen D. Umans, Mesin-mesinlistrik, terjemahan Djoko Achyanto, edisi keempat, 1990: Jakarta, PenerbitErlangga.

Rashid, H. Muhammmad. Eiektronika Daya, 2013: Jakarta, Penerbit PT.PrenhaHindo.

Zuhal, Dasar Tenaga Listrik, 1982: Bandung, ITB.

Berde, M.S, Thyristor Engineering, 2012: Delhi.Khanna Publihers.

Berde, M.S, Thyristor Engineering, 2012: Delhi.Khanna Publihers.

Dewan, S.BdanA, Straughen, Power Semiconductor Circuits, 2011: New York,Jhon wiley & Sons.

