

**INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
PROGRAM STUDI TEKNIK ENERGI LISTRIK S-1**



**SIMULASI SISTEM PENGENDALIAN MOTOR DC
DENGAN KONVERTER GANDA EMPAT KUADRAN
MENGUNAKAN PERANGKAT LUNAK MATLAB**

SKRIPSI

Diusun oleh :
DEDY IRAWAN
NIM : 98.12.125

SEPTEMBER 2005

LEMBAR PERSETUJUAN

**SIMULASI SISTEM PENGENDALIAN MOTOR DC
DENGAN KONVERTER GANDA EMPAT KUADRAN
MENGUNAKAN PERANGKAT LUNAK MATLAB**

SKRIPSI

*Disusun Guna Melengkapi dan Memenuhi Syarat-Syarat
Mencapai Gelar Sarjana Teknik*

Disusun Oleh :

**DEDY IRAWAN
NIM : 98.12.125**



**Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro**

**Ir. F. Yudi Kimpraptono, MT
NIP.Y. 1039500274**

**Menyetujui,
Dosen Pembimbing**

**Ir. Widodo Pudji M, MT
NIP. 102 8700 171**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ENERGI LISTRIK (S-1)
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG**

ABSTRAKSI

SIMULASI SISTEM PENGENDALIAN MOTOR DC DENGAN KONVERTER GANDA EMPAT KUADRAN MENGUNAKAN PERANGKAT LUNAK MATLAB

(Dedy Irawan, 9812125, Teknik Elektro Energi Listrik (S-1)

(Dosen Pembimbing : Ir. Widodo Pudji M, MT)

Kata Kunci : Sistem Pengendalian, Konverter Ganda Empat Kuadran, Simulasi Matlab

Perancangan sistem pengendalian merupakan alternatif pemilihan sistem pengendalian motor DC yang dapat dioperasikan sebagai generator maupun motor dengan suplai daya dari suatu konverter tiga fasa yang dikendalikan dengan sistem pengendalian.

Sistem Pengendalian motor DC ini Terbagi atas dua yaitu pengendalian dengan arus sirkulasi dan pengendalian tanpa arus sirkulasi, sistem pengendalian ini diaplikasikan pada bagian konverter tiga fasa yang mencatu terminal motor dc penguatan terpisah, mode operasi motor DC yang terbagi menjadi empat kuadran

Hasil simulasi perencanaan sistem tersebut menunjukkan bahwa sistem pengendalian dengan arus sirkulasi mempunyai hasil yang lebih baik dari pada pengendalian tanpa arus sirkulasi dalam hal respon waktu sistem untuk mencapai steady state operasi motor DC, tetapi sistem pengendalian tanpa arus sirkulasi mempunyai hasil yang lebih baik karena komponen yang digunakan lebih sedikit.

KATA PENGANTAR

Dengan memanjatkan puji syukur kehadiran Allah S.W.T. atas karunia dan hidayah-Nya skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik, yang diajukan sebagai syarat untuk menyelesaikan studi di Fakultas Teknologi Industri Jurusan Teknik Elektro Program Studi Teknik Energi Listrik S-1 Institut Teknologi Nasional Malang.

Pada kesempatan yang sangat bahagia ini, penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Kedua orang tuaku yang paling kucintai yang telah memberikan doa restu serta dukungan moril maupun materiil hingga terselesaikan skripsi ini dengan baik.
2. Ir. Widodo Pudji M, MT sebagai dosen pembimbing atas kesediaannya memberikan bimbingan, saran dan masukan dalam penyusunan skripsi ini.
3. Ir. F. Yudi Limpraptono, MT selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Energi Listrik Institut Teknologi Nasional Malang..
4. Ir. Mimien Mustikawati selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Energi Listrik Institut Teknologi Nasional Malang.
5. Semua pihak yang telah membantu selama penulisan Skripsi ini yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa isi Skripsi ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu saran dan kritik yang membangun penulis harapkan.

Semoga Skripsi ini dapat bermanfaat bagi penyusun maupun pembaca pada umumnya.

Malang, September 2005

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBERAN PERSETUJUAAN	ii
KATA PENGHANTAR	iii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	vi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TEORI DASAR	4
2.1 Thyristor	4
2.1.1 Karakteristik Thyristor	4
2.1.2 Model Thyristor	7
2.2 Penyearah Tiga Fasa Terkontrol Penuh	8
2.2.1 Cara Kerja Rangkaian	9
2.2.2 Bentuk Gelombang Penyearah Tiga Fasa Terkontrol Penuh	9
2.3 Dual Converter (Konverter Ganda)	11

2.4	Motor DC	14
2.4.1	Umum.....	14
2.4.2	Prinsip Kerja.....	15
2.5	Jenis Motor DC	17
2.5.1	Motor DC Penguatan Terpisah.....	18
2.5.2	Karakteristik Torsi-Kecepatan Motor DC Penguatan Terpisah	19
2.6	Pengaturan Kecepatan Motor DC.....	20
2.6.1	Umum	20
2.6.2	Pengaturan Kecepatan Motor DC Penguatan Terpisah	21
2.7	Pengereman Motor DC	23
2.7.1	Umum.....	23
2.7.2	Metode Pengereman Motor DC	23
2.8	Pembalikan Putaran Motor DC	25

BAB III PENGENDALIAN MOTOR DC EMPAT KUADRAN

	DENGAN KONVERTER GANDA	27
3.1	Penyearah Tiga Fasa Mencatu Beban Motor DC.....	27
3.1.1	Model Penyearah Tiga Fasa Dalam Mencatu Motor DC.....	27
3.1.2	Karakteristik Mekanik Motor DC yang di Catu Penyearah Tiga Fasa	30
3.1.3	Induktor Arus Kontinyu	31
3.2	Cara Kerja Motor DC Konverter Ganda Empat Kuadran	36
3.3	Pengendalian Motor DC Dengan Konverter Ganda	37
3.3.1	Pengendalian Tanpa Arus Sirkulasi	38

3.3.2 Pengendalian Dengan Arus Sirkulasi	41
3.4 Metode Kontroler Ganda.....	46
BAB IV HASIL PENELITIAN	47
4.1 Pengendalian Tanpa Arus Sirkulasi	47
4.2 Pengendalian dengan Arus Sirkulasi.....	56
4.3 Metode Kontroler Ganda.....	62
4.4 Flowchart.....	64
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	66
5.1 Kesimpulan.....	66
5.2 Saran-saran	66
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN I	
LAMPIRAN II	

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Simbol Thyristor Dengan Tiga Pn-Junction.....	4
2.2 Rangkaian Thyristor dan Karakteristik V-I.....	5
2.3 Karakteristik Turn-on Time Thyristor.....	6
2.4 Karakteristik Turn-of Time Thyristor	7
2.5 Pemodelan Thyristor dengan dua Thyristor	7
2.6 Rangkaian Penyearah Terkontrol Penuh Tisa Fasa.....	9
2.7 Bentuk Gelombang Penyearah Tiga Fasa Terkontrol Penuh	10
2.8 Bentuk Gelombang Keluaran Konverter Ganda	11
2.9 Rangkaian Duel Converter(Konverter Ganda).....	12
2.10 Kontruksi Motor DC	14
2.11 Interaksi antara Medan Magnet dan Penghantar yang dialiri Arus	15
2.11 Rangkaian Jenis Motor DC Penguatan Terpisah	17
2.12 Rangkaian Jenis Motor DC Penguatan Terpisah a) Seri b) Shunt c) Kompon Pendek d) Kompon Panjang.....	18
2.13 Karakteristik Torsi-Kecepatan Motor DC Penguatan Terpisah	20
2.14 Metode Pengaturan Fluksi/Medan.....	21
2.15 Karakteristik Torsi-Kecepatan Motor DC Penguatan Terpisah Dengan Metode Pengaturan Fluksi?Medan	21
2.16 Metode Pengaturan Resistansi Jangkar	22

2.17	Karakteristik Torsi-Kecepatan Motor DC Penguatan Terpisah Dengan Metode Pengaturan Resistansi Jangkar	22
2.18	Metode Pengaturan Tegangan Jangkar	23
2.19	Karakteristik Torsi-Kecepatan Motor DC Penguatan Terpisah Dengan Metode Pengaturan Tegangan Jangkar	23
2.20	Metode Pengereman Regeneratif	24
2.21	Metode Pengereman Rheostatic	24
2.22	Metode Pengereman Plugging	25
2.23	Prinsip Kerja membalik Arah Putar Motor DC	26
3.1	Penyearah Tiga Terkontrol Penuh dengan Beban Penuh Motor DC.....	27
3.2	Model Operasi Penyearah Tiga Fasa Terkontrol Penuh dengan Beban Motor Arus Searah	28
3.3	Kurva Kecepatan-Torsi dari Pengendalian Penyearah Tiga Fasa Terkontrol Penuh	30
3.4	a) Switching pada saat Tegangan Sumber lebih besar dari Tegangan rata-rata b) Switching pada saat Tegangan Sumber lebih kecil..... dari Tegangan rata-rata c) Switching pada saat Tegangan Sumber sama dari Tegangan rata-rata	33
3.5	Model Operasi Motor DC Konverter Ganda Empat Kuadran	37
3.6	Rangkaian Daya Konverter Ganda	38
3.7	Kontaktor Pembalik Tegangan Jangkar	39

3.8	Pengendalian Konverter tanpa Arus Sirkulasi	40
3.9	Variasi Tegangan keluaran terhadap Penyalaan pada Konverter Ganda.....	42
3.10	a) Pengendalian Arus Sirkulasi dalam Konverter Ganda b) Kontrol Loop Arus	44
3.11	Batas Torsi dari Pengendalian Kontrol Ganda	46
4.1	Karakteristik Mekanik tanpa Induktor tambahan	52
4.2	Kerja Motoring.....	54
4.3	Kerja Generating	55
4.4	Arus Keluaran Konverter Positif.....	57
4.5	Arus Keluaran Konverter Negatif.....	57
4.6	Keadaan arus Kontiyu dan Arus Diskontiyu setelah Penambahan Circulating Current Reactor 60	60
4.7	Karakteristik Mekanik Motor DC Penguatan Terpisah dengan $\alpha=60$	61
4.8	Karakteristik Mekanik Motor DC Penguatan Terpisah dengan $\alpha=120$	61
4.9	Rangkaian Simulasi Mat-Lab.....	62
4.10	Metode Kontrol Ganda.....	63

DAFTAR TABEL

Tabel		Halaman
3.1	Kerja Motor DC dengan Catu Penyearah Terkontrol Penuh.....	28
3.2	Kerja Motor DC dalam Konverter Ganda empat Kuadran	37

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perancangan sistem pengendalian mendapat perhatian yang menarik. Karena mengalami peningkatan yang pesat, perkembangan yang sangat signifikan dicapai dalam hal bentuk software yang mampu memberikan keuntungan dalam pelaksanaannya.

Sistem pengendalian memegang peranan yang sangat penting dalam perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang berhubungan langsung dengan dunia industri. Pemakaian sistem pengendalian di Indonesia pada umumnya masih menggunakan kontroler konvensional sehingga diperlukan alternative yang dapat memberikan nilai lebih pada hasil produksinya. Dalam dunia industri sistem pengendalian diperlukan untuk menjaga kestabilan variable proses dan meningkatkan efisiensi energi yang diperlukan secara keseluruhan, oleh karena itu maka diperlukan adanya sistem pengendalian alternative yang mampu melakukan semua aktivitas yang disebut diatas.

Penggunaan bahan semikonduktor sebagai komponen switching memberikan peran utama untuk menjalankan berbagai macam fungsi pengendalian. Bahan semikonduktor ini mampu menjadi otot dalam suatu sistem pengendalian dan didukung oleh komponen lain seperti mikroelektronik yang memiliki kemampuan dan kecerdasan sebagai otak.

Pada sistem tenaga listrik, penggunaan komponen semikonduktor pada umumnya adalah sebagai komponen switching dalam suatu sistem pengendali pengaturan kecepatan motor elektrik untuk mendapatkan kemampuan motor elektrik yang menurunkan rugi-rugi, efisiensi yang tinggi, dan lainnya. berdasarkan latar belakang di atas maka **Pengendalian Motor DC Dengan Konverter Ganda Empat Kuadran** dibahas sebagai alternatif pemilihan sistem pengendalian yang dapat meningkatkan efisiensi dan kestabilan sistem. Pada tugas akhir ini akan dibahas bagaimana motor DC dapat berfungsi sebagai penggerak dan sebagai pengereman secara regeneratif.

1.2. Perumusan Masalah

Mengacu pada latar belakang diatas maka permasalahan yang timbul adalah:

1. Bagaimana menganalisa cara kerja dari sistem pengendali motor DC konverter ganda dan kinerja motor DC
2. Membuat simulasi rangkaian konverter ganda sebagai sistem pengendalian kecepatan putaran dari motor DC penguatan terpisah dengan menggunakan bantuan software 5.3.
3. Melakukan pengujian simulasi.

1.3. Tujuan Penelitian

Membuat rancangan suatu sistem pengendalian alternatif yang mampu mengendalikan kecepatan dan arah putar motor DC

1.4. Batasan Masalah

Agar pembahasan skripsi ini lebih lebih terarah sesuai dengan tujuan, maka permasalahan dibatasi oleh hal-hal sebagai berikut :

1. Pembahasan diutamakan pada rangkaian daya
2. Komponen pada rangkaian daya dianggap ideal sehingga walaupun terdapat jatuh tegangan, nilainya dapat diabaikan
3. Motor yang digunakan adalah motor DC penguat terpisah .
4. Karakteristik motor DC dianggap linier dengan mengabaikan pengaruh reaksi jangkar dan kejenuhan inti besi
5. Komponen harmonisa yang terjadi pada rangkaian secara keseluruhan tidak dibahas
6. Simulasi hasil dengan software MatLab 5.3 secara off-line

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika pembahasan pada skripsi ini tersusun sebagai berikut:

BAB I : PENDAHULUAN

Membahas latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II : TEORI DASAR

Membahas tentang Thyristor, Konverter dan Motor DC penguatan terpisah

BAB III : PENGENDALIAN MOTOR DC EMPAT KUADRAN DENGAN KONVERTER GANDA

membahas tentang konverter tiga fasa dalam mencatu beban motor DC dalam empat kuadran dan metode pengendalian motor DC yang dicatu oleh konverter ganda tiga fasa

BAB IV : UJI SIMULASI

Meliputi analisa karakteristik sistem dalam beberapa metode dalam kaitannya dengan peningkatan efisien dan kestabilan sistem

BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

Memuat kesimpulan dari hasil skripsi dan saran untuk pengembangan lebih lanjut

BAB II Teori Dasar

2.1 Thyristor

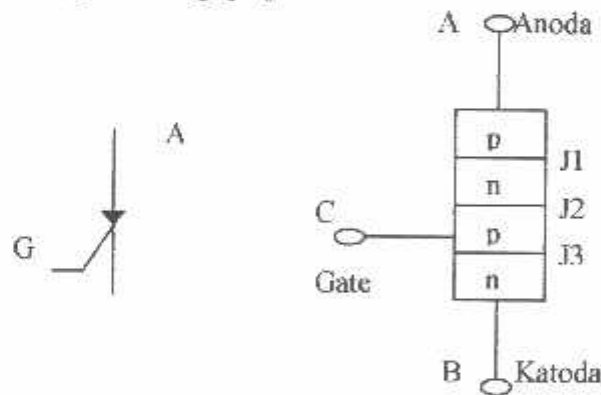
Thyristor adalah salah satu tipe komponen semikonduktor daya yang paling penting dan telah banyak digunakan secara intensif pada rangkaian daya yang biasanya digunakan sebagai saklar. Pada banyak aplikasi thyristor dapat diasumsikan sebagai saklar ideal akan tetapi dalam prakteknya thyristor mempunyai batasan dan karakteristik tertentu.

2.1.1 Karakteristik Thyristor

Dua macam karakteristik thyristor yang akan dibahas disini yaitu karakteristik statis dan karakteristik dinamis.

a) Karakteristik Statis

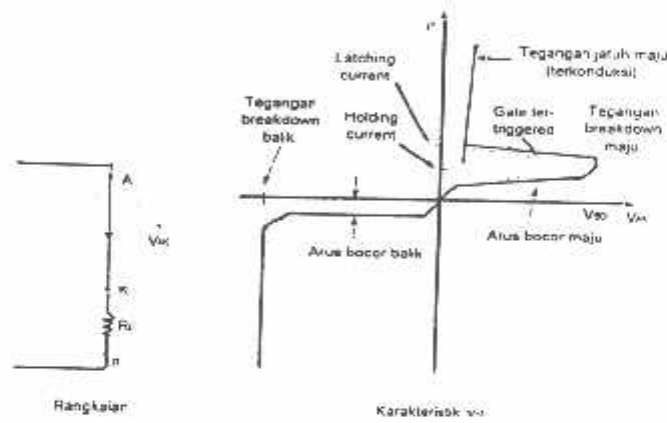
Thyristor merupakan salah satu komponen semikonduktor empat lapis yang berstruktur $PnPn$ dengan tiga Pn -junction. Komponen ini memiliki tiga terminal anoda, katoda dan gerbang (*gate*). Gambar 2.1 memperlihatkan simbol thyristor dan bagan dari tiga pn -junction



Gambar 2.1 Simbol Thyristor Dengan Tiga Pn-Junction

Thyristor adalah bahan semikonduktor yang dapat menghantarkan arus dalam satu arah, jadi syarat konduksi thyristor adalah bila anoda lebih positif daripada katoda.

Pada saat tegangan anoda dibuat lebih positif dari pada katoda, thyristor berada pada kondisi *forward blocking* atau kondisi *off-state*. Jika tegangan antara anoda dan katoda V_{AK} dinaikan sampai pada nilai tertentu sehingga melampaui tegangan *breakdown* V_{BO} maka terjadi *avalanche breakdown*. Pada saat ini thyristor berada pada kondisi *forward bias* atau menyala. Tetapi penyalaan seeperti ini bersifat merusak. Apabila tegangan *gate* diberi sehingga p setingkat lebih positif dari n , pada sambungan J_2 akan terjadi *avalanche* sehingga thyristor dapat konduksi, tanpa harus memberikan tegangan yang melampaui V_{BO} pada terminal anoda dan katodanya.



Gambar 2.2 Rangkaian Thyristor dan Karakteristik V-i

Garis putus-putus pada gambar 2.2 memperlihatkan begitu thyristor dihidupkan dengan sinyal *gate*. Penyalaan dengan sinyal *gate* dapat dilakukan apabila arus anoda yang mengalir lebih besar dari arus pengunci atau disebut *latching current* I_L , agar diperoleh cukup banyak aliran pembawa muatan bebas yang melewati *junction*. Pembatas arus ini disimbolkan dengan R_L pada gambar 2.2 diatas.

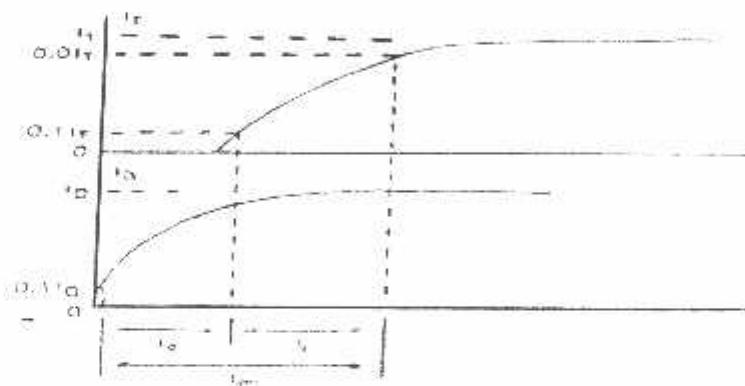
Pada keadaan konduksi ini apabila arus anodanya masih lebih besar dari arus holding I_{H} , thyristor akan tetap dalam kondisi tersambung dalam satu arah walaupun sinyal *gate* dihilangkan. Thyristor dapat *off* atau padam apabila arus

maju tersebut dikurangi Sampai ketinggian dibawah *holding current* I_{H} . cara pemadaman seperti ini lazim disebut dengan komutasi alamiah.

b) Karakteristik dinamis

Ketika thyristor berkerja ada dua proses yang terjadi yaitu, penyalaan (*turn on*) dan pemadaman (*turn of*). Interval waktu diantaranya disebut *turn-on time* untuk proses penyalaan dan *turn-of time* untuk proses pemadaman.

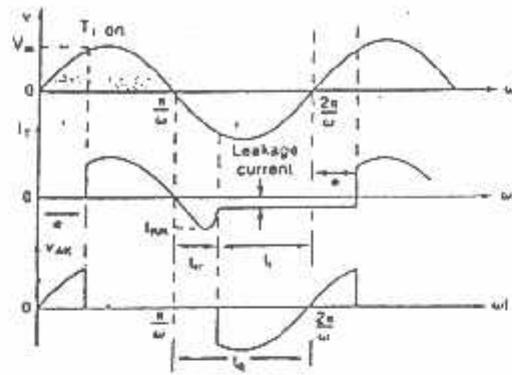
Turn-on time thyristor, tampak pada gambar 2.3 ketika thyristor diberi sinyal pada kaki *gate* dan pada saat thyristor mulai konduksi. Selang waktu ini disebut *turn-on time* dan dihitung anantara 10% dari arus *gate* saat mulai naik sampai 90% dari arus *on-state* thyristor mencapai keadaan tunak (*steady-state*).



Gambar 2.3 Karakteritik *Turn-on Time Thyristor*

Dari gambar 2.3 terlihat waktu penyalaan t_{on} adalah penjumlahan dari waktu tunda t_d dan waktu mulai t_r . t_d didefinisikan sebagai selang waktu antar 10% arus *gate* dan 10% arus keadaan *on* thyristor. t_r adalah waktu yang diperlukan agar arus anoda meningkat dari 10% sampai 90% arus keadaan *on* thyristor.

Untuk *turn-off time* thyristor, bentuk gelombang arus dan tegangan thyristor ditunjukkan pada gambar 2.4.

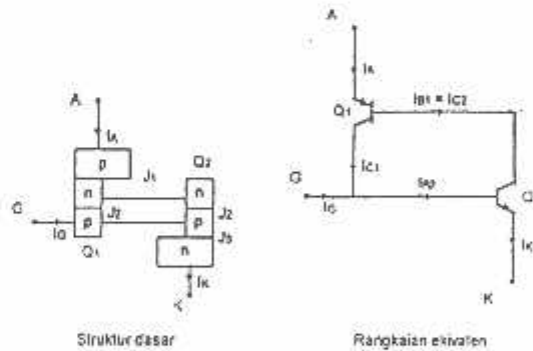


Gambar 2.4 Karakteristik *Turn-Off Time* thyristor

Ketika tegangan sumber menurun sampai melewati nol, thyristor tidak akan langsung memblok atau menahan tegangan dalam polaritas negatif (*voltage revers*), tetapi thyristor akan meneruskan arus itu sampai selang waktu tertentu dan masih dalam kondisi konduksi, selang waktu ini disebut *reverse recovery time* t_{rr} . Setelah itu thyristor akan memblok arus itu selama periode negative dari tegangan masukan, selang waktu ini disebut *recombination time* t_{rc} . *turn-off time* t_q adalah penjumlahan dari *revers recovery time* dan *recombination time*, t_q bergantung ada nilai puncak dari arus keadaan *on* dan tegangan keadaan *on* sesaat.

2.1.2 Model Thyristor

Model thyristor dapat digambarkan sebagai dua transistor yang komplementer, satu *pnp* (Q_1) dan yang lainnya *npn* (Q_2).



Gambar 2.5 Pemodelan Thyristor Dengan Dua Thyristor

Aksi regeneratif thyristor :

1. *Gate* dibuat lebih positif dari katoda sehingga ada arus yang mengalir menuju basis Q_2 yaitu I_{B2} .
2. Arus I_{B2} mengakibatkan transistor Q_2 konduksi dan arus I_{C2} mengalir pada kolektor Q_2 yang merupakan arus basis Q_1 yaitu I_{B1} .
3. Dengan mengalirnya arus basis ini, maka arus I_{C1} akan mengalir pada kolektor Q_1 dan masuk ke basis Q_2 , hal ini menyebabkan arus basis Q_2 bertambah besar.

Dengan demikian proses konduksi yang berlangsung sama dengan proses konduksi pada thyristor. Begitu juga pada proses tidak konduksi dapat dijelaskan dengan jalan pikiran yang sama.

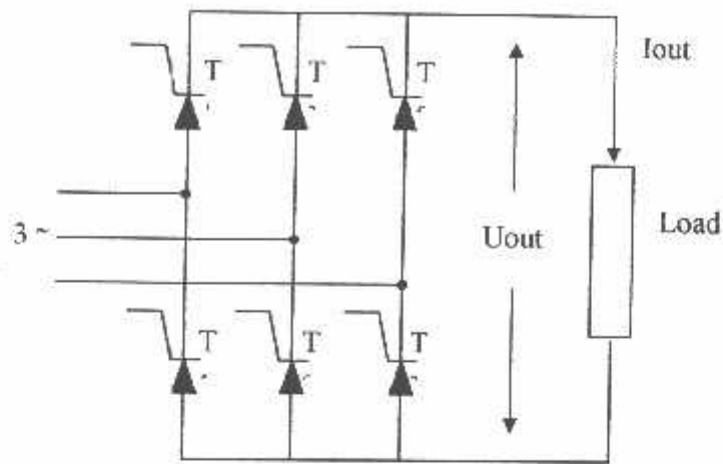
Dalam kaitannya dengan simulasi thyristor dianggap ideal. Pemodelan thyristor dengan software minimal harus mempunyai karakteristik sebagai berikut:

1. Harus nyala atau *on* ketika diberi sinyal gerbang kecil positif, dengan syarat tegangan anoda lebih positif dari pada katoda.
2. Harus pada keadaan *on* selama arus katoda mengalir, walaupun sinyal *gate* dihilangkan.
3. Harus kembali ke *off* ketika arus anoda ke nol menuju kearah negatif.

Model ini berkerja dengan baik untuk rangkaian konverter yang arus thyristomnya akan kembali ke nol dengan sendirinya karena karekteristik dan arus itu sendiri.

2.2 Penyearah Tiga Fasa Terkontrol Penuh

Penyearah tiga fasa terkontrol penuh atau disebut dengan konverter enam pulsa adalah jenis penyearah yang menggunakan enam thyristor (dalam hal ini SCR) yang disusun pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Rangkaian Penyearah Terkontrol Penuh Tiga Fasa

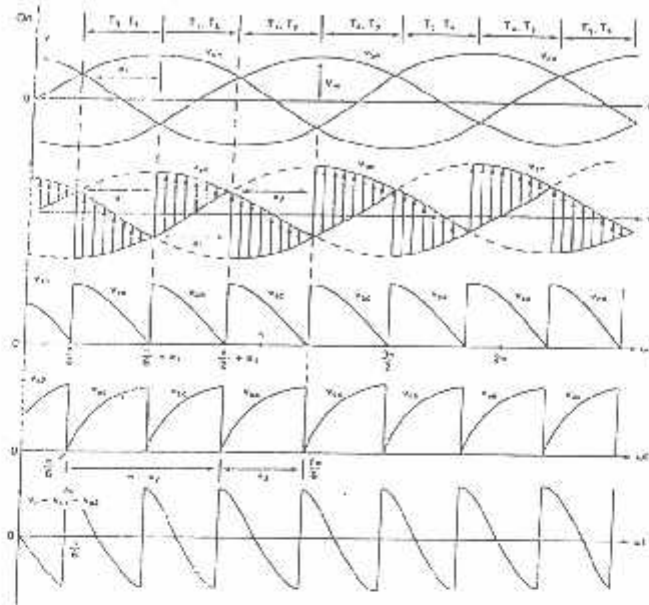
2.2.1 Cara kerja Rangkaian

Untuk menjelaskan alur kerja dari rangkaian ini adalah dengan mengelompokkan thyristor tersebut dalam dua grup, yaitu ganjil dan genap, seperti pada gambar 2.6 Rangkaian ini mempunyai sifat bahwa SCR dengan nomor ganjil akan konduktif bila tegangan dari anodanya mempunyai harga paling tinggi dibandingkan dengan tegangan anoda dari komponen-komponen dengan nomor ganjil yang lain. Sedang untuk SCR dengan nomor genap akan konduktif bila tegangan katodanya berada pada keadaan paling rendah dibandingkan dengan tegangan katoda dari komponen-komponen dengan nomor genap lain.

Jadi pada prinsipnya selalu ada dua SCR yang konduktif dalam waktu yang bersamaan, sehingga untuk setiap interval dibutuhkan dua pulsa penyalan. Pada group ganjil SCR dipicu pada sirkus positif tegangan fasa yang terhubung pada SCR tersebut, sedang pada group genap SCR dipicu pada siklus negatif oleh tegangan fasa yang terhubung padanya.

2.2.2 Bentuk Gelombang Penyearah Tiga Fasa Terkontrol Penuh

Bentuk gelombang dari tegangan masukan, tegangan keluaran, arus masukan dan arus yang melalui thyristor dengan $\alpha = \eta/3$ seperti pada gambar 2.7



Gambar 2.7 Bentuk Gelombang Penyearah Tiga Fasa Terkontrol Penuh

Jika tegangan saluran ke netral didefinisikan sebagai

$$\begin{aligned}
 V_{an} &= \frac{V_m}{\sqrt{3}} \sin \omega t & V \\
 V_{bn} &= \frac{V_m}{\sqrt{3}} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) & V \dots\dots\dots (2.1) \\
 V_{cn} &= \frac{V_m}{\sqrt{3}} \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) & V
 \end{aligned}$$

Tegangan antara saluran yang sesuai diperoleh

$$\begin{aligned}
 V_{ab} &= V_{an} - V_{bn} = V_m \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{6} \right) & V \\
 V_{bc} &= V_{bn} - V_{cn} = V_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) & V \dots\dots\dots (2.2) \\
 V_{ca} &= V_{cn} - V_{an} = V_m \sin \left(\omega t + \frac{5\pi}{6} \right) & V
 \end{aligned}$$

Tegangan keluaran rata-rata diperoleh

$$\begin{aligned}
 V_{dm} &= \frac{3}{\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2+\alpha} V_{ab} d(\omega t) = \frac{3}{\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2+\alpha} V_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) d(\omega t) \\
 &= \frac{3V_m}{\pi} \cos \alpha & V \dots\dots\dots (2.3)
 \end{aligned}$$

Tegangan rata-rata maksimum

$$V_{dm} = \frac{3V_m}{\pi} & V \dots\dots\dots (2.4)$$

Tegangan keluaran rata-rata ternormalisasi

$$V_n = \frac{V_o}{V_m} = \cos \alpha \dots\dots\dots(2.5)$$

Sehingga nilai rms dari tegangan keluaran diperoleh

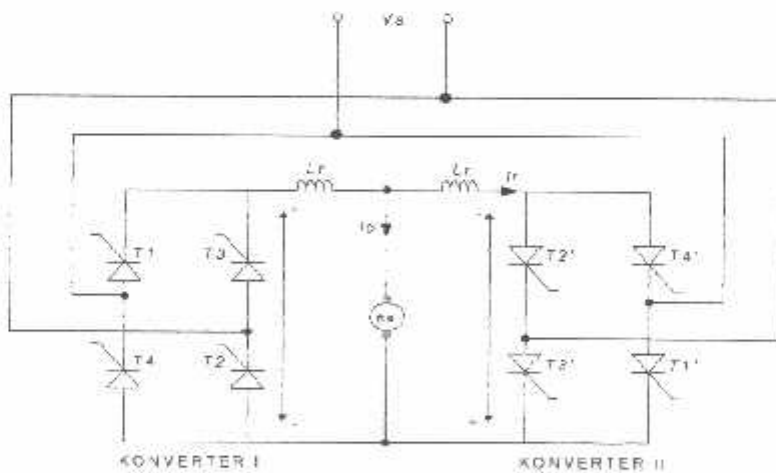
$$V_{rms} = \left[\frac{3}{\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2+\alpha} V_m^2 \sin^2 \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) d(\omega t) \right]^{1/2}$$

$$= V_m \left(\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} \cos 2\alpha \right) \quad V \dots\dots\dots(2.6)$$

Pada gambar 2.7 memperlihatkan bentuk gelombang untuk $\alpha = \pi/3$ untuk $\alpha > \pi$, tegangan keluaran V_o akan memiliki nilai negatif, arus beban harus selalu positif. Akibat beban resistif, tegangan sesaat tidak dapat negatif, artinya konverter hanya bekerja pada satu kuadran.

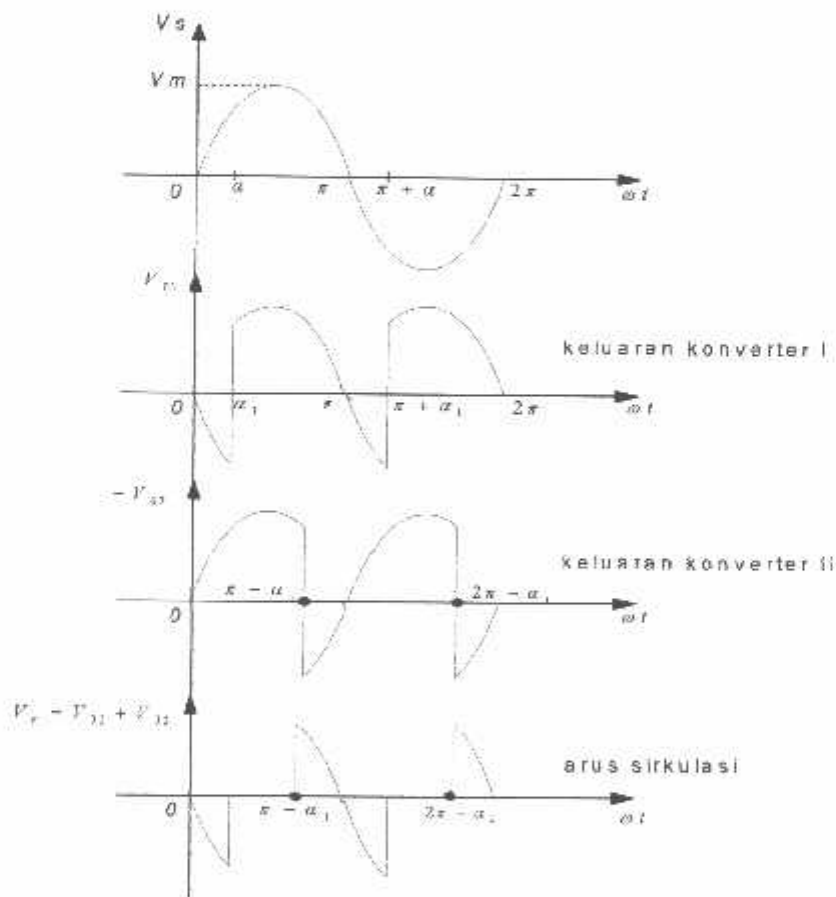
2.3 Dual Konverter (konverter ganda)

Dual konverter merupakan penggabungan dari dua buah konverter penuh yang dipasang antiparalel. Jika α_1 dan α_2 berturut-turut merupakan sudut penyalan konverter satu dan konverter dua, maka tegangan keluaran rata-rata tiap konverter adalah V_{dc1} dan V_{dc2} . Jika semua *gate* pada SCR diberi sinyal masukan maka pada saat T_1 sampai T_4 bekerja sebagai penyearah maka T_1' sampai T_4' akan bekerja sebagai *inverter* begitu juga sebaliknya, akan tetapi keduanya akan menghasilkan tegangan keluaran rata-rata yang sama.



Gambar 2.8 Rangkaian Dual konverter

Gambar 2.8 merupakan rangkaian dual konverter dengan beban yang sangat induktif. Pada saat setengah siklus positif pada sumber tegangan bolak-balik V_s maka T_1 dan T_2 terbias maju sedangkan T_3 dan T_4 terbias mundur. Ketika SCR dinyalakan secara bersamaan dengan memberikan sinyal *gate*, pada $\omega t = \alpha$ beban akan terhubung ke sumber melalui T_1 dan T_2 . T_1 dan T_2 akan terus sambung saat $\omega t = \pi$ walaupun tegangan masukan negatif akibat beban yang bersifat induktif. Saat setengah siklus negatif berikutnya pada sumber tegangan bolak-balik V_s maka T_3 dan T_4 akan terbias maju dan penyalaan T_3 dan T_4 akan memberikan tegangan sumber sebagai tegangan bias mundur bagi T_1 dan T_2 kemudian arus beban ditransfer dari T_1 dan T_2 ke T_3 dan T_4 . Demikian juga yang terjadi pada T_1' dan T_2' serta T_3' dan T_4' . Gambar 2.9 memperlihatkan gelombang keluaran dari dual konverter.



Gambar 2.9 Bentuk Gelombang Keluaran Konverter Ganda

Tegangan keluaran sesaat dari dual konverter berbeda fasa, sehingga akan timbul perbedaan tegangan sesaat dan hal ini akan menghasilkan arus berputar di antara dua konverter. Arus berputar tidak akan melalui beban dan biasanya dibatasi oleh induktor arus putar (L_r).

Dual konverter dapat beroperasi dengan atau tanpa arus berputar. Pada kasus operasi tanpa arus berputar, hanya satu konverter beroperasi pada setiap saat dan mengalirkan arus beban, dan konverter yang lain akan diblok sepenuhnya dengan menghilangkan sinyal *gate* dan pada operasi tanpa arus putar tidak diperlukan pemasangan induktor arus putar (L_r).

Pada operasi dengan arus berputar memiliki beberapa keuntungan yaitu:

- Arus berputar akan memelihara konduksi kontinyu dari kedua konverter pada seluruh daerah kontrol dan tak bergantung pada beban
- Aliran daya pada sebarang arah dan sebarang waktu menjadi mungkin karena satu konverter selalu menjadi penyearah dan yang lain menjadi *inverter*.
- Respons waktu untuk perubahan dari operasi kuadran pertama ke yang lain akan lebih cepat karena kedua konverter berada pada kondisi tersambung kontinyu.

Tetapi operasi dengan arus berputar juga memiliki kerugian yaitu:

- Dengan adanya induktor arus putar (L_r) akan menambah biaya, berat dan rugi daya.
- Efisiensi dan factor daya akan rendah karena adanya arus sirkulasi.

Pada operasi tanpa arus berputar juga memiliki beberapa keuntungan yaitu:

- Efisiensi dan factor daya baik tanpa adanya arus sirkulasi.
- Tanpa adanya induktor arus putar (L_r) akan mengurangi biaya, berat dan rugi daya.

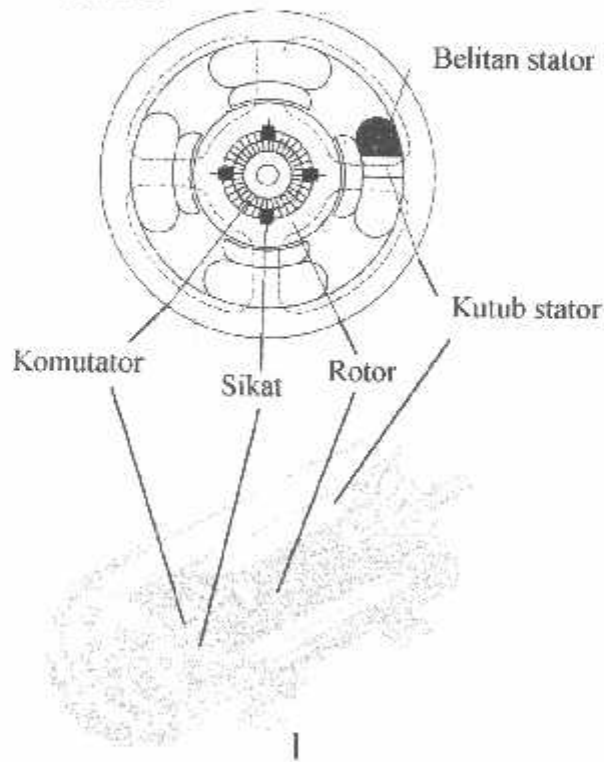
Tetapi kerugian dari operasi tanpa arus putar yaitu:

- Kestabilan kecepatan motor buruk karena konduksi yang tidak kontinyu dan menyebabkan karakteristik transfer dari konverter menjadi tidak linier.
- Adanya waktu berhenti pada saat operasi pembalikan arah arus sehingga membutuhkan waktu yang lebih untuk melakukan operasi tersebut.

2.4 Motor DC

2.4.1 Umum

Motor DC adalah mesin DC yang mengubah energi listrik DC menjadi energi mekanik. Motor DC terdiri dari dua bagian dasar yaitu stator dan rotor. Stator merupakan bagian dari motor DC yang tidak bergerak sedangkan rotor merupakan bagian yang bergerak. Pada stator terdapat belitan yang dinamakan belitan medan karena berfungsi menghasilkan medan magnet, sedangkan pada rotor terdapat belitan yang dinamakan belitan jangkar karena berfungsi membawa arus beban. Pada poros rotor terdapat komutator dan sikat, komutator bergerak bersamaan dengan poros rotor sedangkan sikat tidak bergerak tetapi menyentuh komutator. Komutator berupa silinder yang terbuat dari beberapa segmen tembaga yang terisolasi satu sama lain, dan sikat terbuat dari bahan karbon. Komutator dan sikat secara bersamaan berfungsi sebagai penyearah. Gambar 2.10 merupakan gambar konstruksi motor DC.

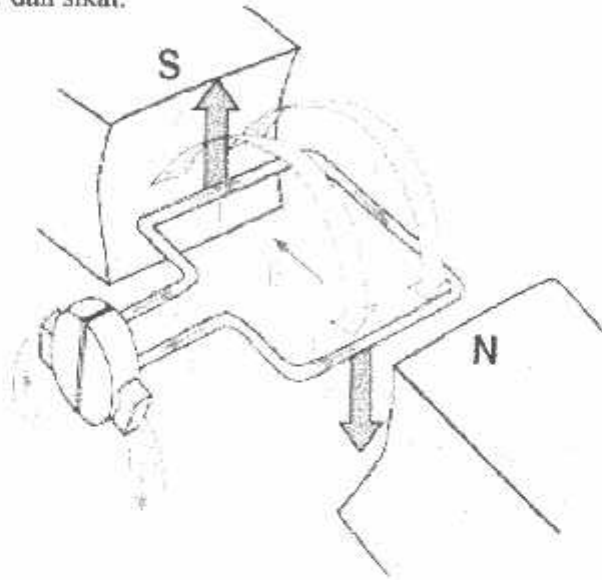


Gambar 2.10 Konstruksi Motor DC

2.4.2 Prinsip Kerja

Prinsip kerja motor DC berdasarkan pada penghantar yang dialiri arus ditempatkan dalam suatu medan magnet sehingga penghantar tersebut akan mengalami

gaya. Gaya menimbulkan torsi sehingga menghasilkan putaran. Penghantar yang berputar akan menimbulkan tegangan AC sehingga diubah menjadi tegangan DC oleh komutator dan sikat.



Gambar 2.11 Interaksi Antara Medan Magnet Dan Penghantar Yang Dialiri Arus.

Gaya yang dihasilkan sebesar

$$F = B.l.I \dots\dots\dots(2.7)$$

Gaya itu menimbulkan torsi sebesar:

$$T = F.r \dots\dots\dots(2.8)$$

dengan:

F = Gaya (N).

B = Rapat fluks (T).

l = Arus yang mengalir pada penghantar (A).

l = Panjang penghantar (m).

r = Jari-jari inti jangkar (m).

T = Torsi (Nm).

Jangkar memiliki jumlah penghantar dan cabang paralel penghantar sehingga dari Persamaan (2-7) dan (2-8) didapatkan:

$$T = \frac{Z}{a} B I_a l r \dots\dots\dots(2.9)$$

dengan:

Z = Jumlah penghantar jangkar.

a = Jumlah cabang paralel penghantar jangkar yang berada di antara sikat.

I_a = Arus jangkar (A).

Rapat fluks yang dihasilkan sebesar:

$$B = \frac{\phi \cdot p}{2\pi \cdot r \cdot l} \dots\dots\dots(2.10)$$

Jika Persamaan (2-9) diberikan ke Persamaan (2-10) didapatkan:

$$T = \frac{p \cdot Z}{2\pi \cdot a} \phi I_a \dots\dots\dots(2.11)$$

$$T = K \cdot \phi \cdot I_a \dots\dots\dots(2.12)$$

dengan:

p = Jumlah kutub stator.

ϕ = Fluks tiap kutub stator (Wb).

K = Konstanta mesin.

Putaran jangkar yang berada dalam medan magnet akan menghasilkan gaya gerak listrik lawan sebesar:

$$E_a = K \cdot \phi \cdot \omega_m \dots\dots\dots(2.13)$$

Daya yang dihasilkan sebesar:

$$P = E_a \cdot I_a \dots\dots\dots(2.14)$$

Dari persamaan (2-13) dan (2-14)

$$P = K \cdot \phi \cdot I_a \cdot \omega_m \dots\dots\dots(2.15)$$

$$P = T \cdot \omega_m \dots\dots\dots(2.16)$$

dengan:

E_a = Gaya gerak listrik lawan (V).

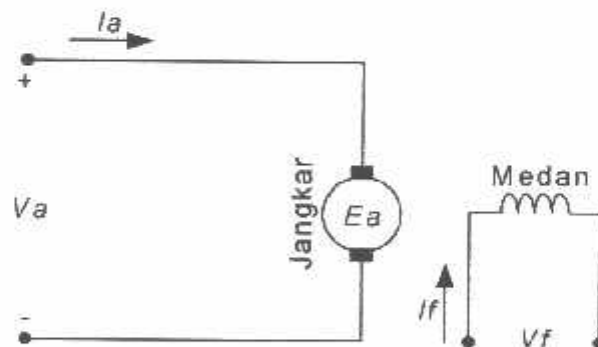
P = Daya (W).

ω_m = Putaran (rad/s).

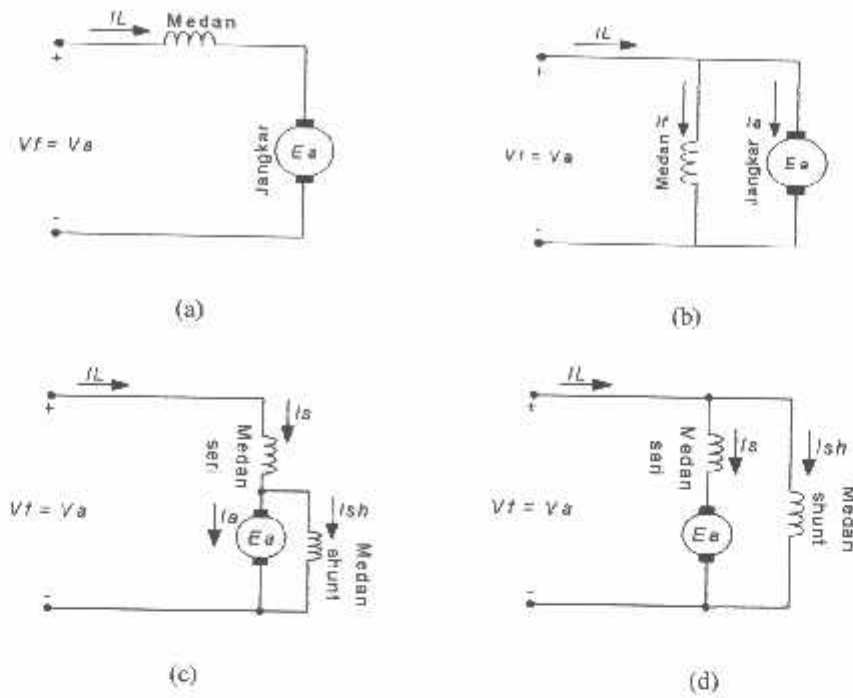
2.5 Jenis Motor DC

Motor DC berdasarkan jenis penguatannya terbagi menjadi 2 yaitu: motor DC penguatan terpisah dan motor DC penguatan sendiri. Penguatan pada motor DC diberikan oleh belitan medan sehingga jenis penguatan motor DC berdasarkan pada cara pemberian catu tegangan pada belitan medan yang akan menimbulkan medan magnet.

Motor DC penguatan terpisah dicatu oleh dua sumber tegangan terpisah pada belitan medan dan belitan jangkarnya seperti pada Gambar 2.11 Motor DC penguatan sendiri dicatu oleh satu sumber pada belitan medan dan belitan jangkarnya. Motor DC penguatan sendiri berdasarkan cara menghubungkan belitan medan dan belitan jangkarnya terbagi menjadi tiga yaitu: motor DC *shunt*, seri dan kompon. Motor DC *shunt* belitan medan dan belitan jangkarnya dihubungkan parallel, motor DC seri belitan medan dan belitan jangkarnya dihubungkan seri, sedangkan motor DC kompon merupakan penggabungan dari motor DC *shunt* dan motor DC seri yang terbagi menjadi dua macam yaitu: kompon panjang dan kompon pendek seperti pada Gambar 2.12. Motor DC penguatan terpisah dibandingkan motor DC penguatan sendiri memiliki kelebihan dalam pengaturan tegangan sumbernya yaitu pengaturan tegangan jangkar dan pengaturan tegangan medan sehingga memiliki jangkauan pengaturan yang lebih luas.



Gambar 2.11 Rangkaian Jenis Motor DC Penguatan Terpisah



Gambar 2.12 Rangkaian Jenis Motor DC Penguatan Sendiri
(a) Seri, (b) Shunt, (c) Kompon Pendek, (d) Kompon Panjang

2.5.1 Motor DC Penguatan Terpisah

Rangkaian motor DC penguatan terpisah seperti pada Gambar 2.11 terdiri atas belitan medan dan belitan jangkar yang modelnya dapat diwakili oleh unsur-unsur resistansi dan induktansi. Berdasarkan rangkaian tersebut didapatkan persamaan:

$$V_f = R_f I_f + L_f \frac{dI_f}{dt} \dots \dots \dots (2.17)$$

$$V_a = E_a + I_a R_a + L_a \frac{dI_a}{dt} \dots \dots \dots (2.18)$$

Jika persamaan (2-13) diberikan ke Persamaan (2-18) didapatkan:

$$V_a = K \phi \omega_m + I_a R_a + L_a \frac{dI_a}{dt} \dots \dots \dots (2.19)$$

Berdasarkan Persamaan (2-12) untuk model mekanis motor DC penguatan terpisah adalah:

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_w \dots\dots\dots(2.20)$$

dengan:

V_f = Tegangan medan (V).

L_f = Induktansi belitan medan (H).

R_f = Resistansi belitan medan (Ω).

I_f = Arus medan (A).

V_a = Tegangan jangkar (V).

L_a = Induktansi belitan jangkar (H).

R_a = Resistansi belitan jangkar (Ω).

I_a = Arus jangkar (A).

J = Momen inersia (kg m^2).

B = Koefisien gesekan motor [$\text{Nm}/(\text{rad/s})$].

T_w = Torsi beban (Nm).

Untuk operasi motor dalam keadaan mantap pada Persamaan (2-17), (2-18), (2-18), dan (2-20) turunan terhadap waktunya adalah nol sehingga persamaannya berturut-turut menjadi:

$$V_f = R_f I_f \dots\dots\dots(2.21)$$

$$V_a = E_a + I_a R_a \dots\dots\dots(2.22)$$

$$V_a = K \phi \omega_m + I_a R_a \dots\dots\dots(2.23)$$

$$T = B\omega + T_w \dots\dots\dots(2.24)$$

Untuk menghitung kinerja dari motor DC maka digunakan keempat persamaan di atas, yang terdiri atas tiga persamaan sistem listrik pada jangkar dan medan yaitu: Persamaan (2-21), (2-22), (2-23) dan satu persamaan sistem mekanik pada poros rotor yaitu Persamaan (2-24).

2.5.2 Karakteristik Torsi-Kecepatan Motor DC Penguatan Terpisah

Motor DC penguatan terpisah banyak digunakan untuk menggerakkan beban-beban mekanis yang membutuhkan kecepatan yang konstan dengan beban yang berubah-ubah, maupun kecepatan yang berubah-ubah dengan beban yang konstan.

Berdasarkan hal tersebut maka perlu diketahui hubungan antara torsi dan kecepatan.

Berdasarkan Persamaan (2-23) didapatkan hubungan antara torsi dan kecepatan motor DC penguatan terpisah sebagai berikut:

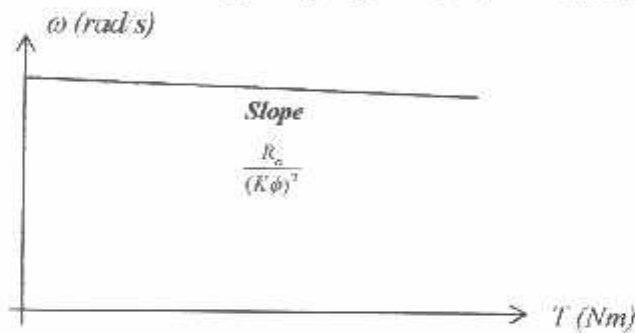
$$\omega = \frac{V_a - I_a R_a}{(K\phi)} \dots\dots\dots(2.25)$$

Jika Persamaan (2-12) diberikan ke Persamaan (2-25) didapatkan:

$$\omega = \frac{V_a}{(K\phi)} - \frac{R_a T}{(K\phi)^2} \dots\dots\dots(2.26)$$

$$= \frac{(k\phi)V_a - R_a T}{(k\phi)^2 + R_a B} \dots\dots\dots(2.27)$$

Jika tegangan jangkar dan fluks tidak berubah, maka karakteristik torsi dan kecepatan dapat digambarkan oleh grafik yang terdapat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Karakteristik Torsi-Kecepatan Motor DC Penguatan Terpisah

2.6 Pengaturan Kecepatan Motor DC

2.6.1 Umum

Motor DC merupakan mesin penggerak yang banyak digunakan karena memiliki kelebihan pada pengaturan kecepatannya. Pada umumnya pengaturan kecepatan motor DC penguatan terpisah dan motor DC penguatan sendiri hampir sama. Pengaturan kecepatan pada motor DC penguatan terpisah lebih luas dibandingkan pengaturan kecepatan pada motor DC penguatan sendiri dikarenakan motor DC penguatan terpisah dicatu oleh dua sumber:

Untuk selanjutnya di sini hanya akan ditinjau pengaturan kecepatan motor DC penguatan terpisah.

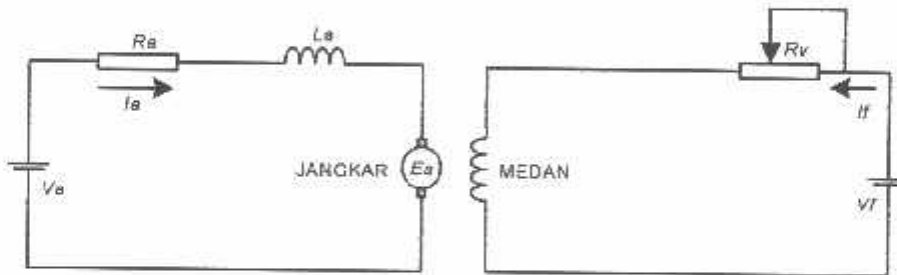
2.6.2 Pengaturan Kecepatan Motor DC Penguatan Terpisah

Kecepatan motor DC penguatan terpisah dapat diatur sesuai Persamaan (2-25) dengan menggunakan tiga metode yaitu:

- Pengaturan fluksi/medan.
- Pengaturan resistansi jangkar.
- Pengaturan tegangan jangkar.

a) Pengaturan Fluksi/Medan

Pada metode pengaturan ini, resistansi jangkar dan tegangan jangkar dijaga konstan, sehingga pengaturan hanya dilakukan di sisi medan. Pengaturan di sisi medan dilakukan dengan mengatur arus I_f yang berbanding lurus dengan fluksi melalui tahanan R_f , seperti terlihat pada Gambar 2.14



Gambar 2.14 Metode Pengaturan Fluksi/Medan.

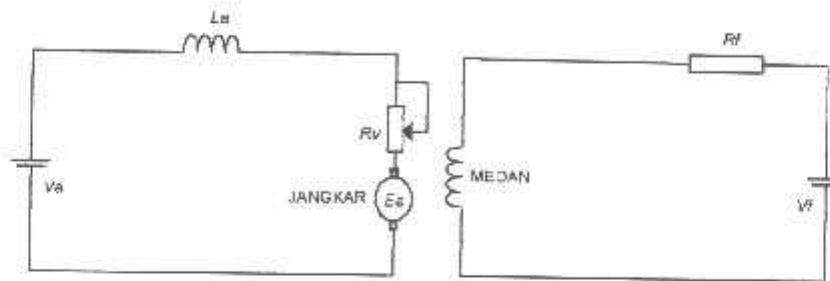
Sesuai dengan Persamaan (2-26) dengan menggunakan metode pengaturan fluksi/medan didapatkan karakteristik torsi-kecepatan:



Gambar 2.15 Karakteristik Torsi-Kecepatan Motor DC Penguatan Terpisah Dengan Metode Pengaturan Fluksi/Medan.

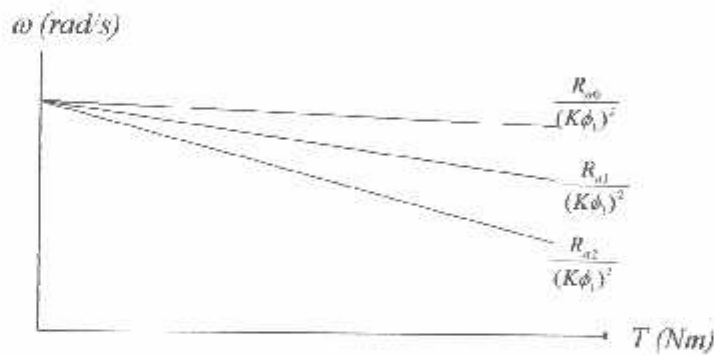
b) Pengaturan Resistansi Jangkar.

Pada metode pengaturan ini, tegangan jangkar dan arus medan dijaga konstan sehingga pengaturan hanya dilakukan pada resistansi jangkarnya. Kecepatan motor diatur dengan mengubah-ubah resistansi tahanan jangkar dengan menambahkan resistansi seperti pada Gambar 2.16



Gambar 2.16 Metode Pengaturan Resistansi Jangkar

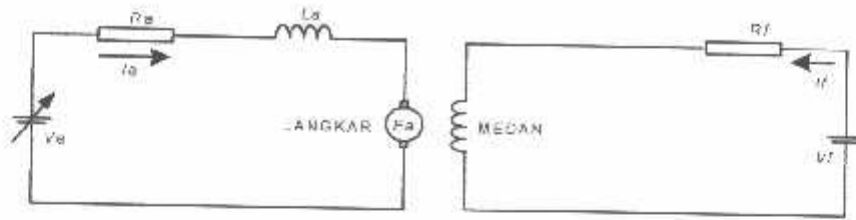
Sesuai dengan Persamaan (2-26) dengan menggunakan metode pengaturan resistansi jangkar didapatkan karakteristik torsi-kecepatan.



Gambar 2.17 Karakteristik Torsi-Kecepatan Motor DC Penguatan Terpisah Dengan Metode Pengaturan Resistansi Jangkar

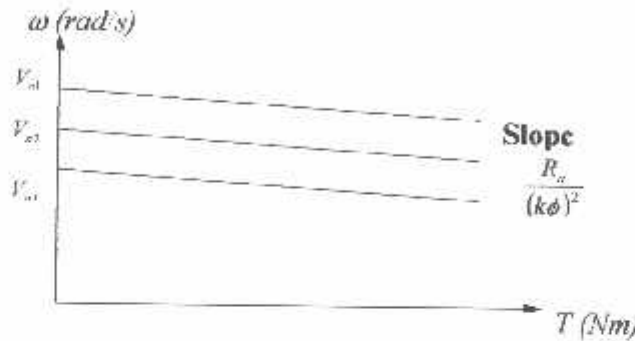
c) Pengaturan Tegangan Jangkar

Pada metode ini resistansi jangkar dan sisi medannya dijaga konstan sehingga pengaturan hanya dilakukan pada tegangan jangkarnya. Pengaturan kecepatan dilakukan dengan mengatur tegangan jangkar seperti pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Metode Pengaturan Tegangan Jangkar

Sesuai dengan Persamaan (2-26) dengan menggunakan metode pengaturan tegangan jangkar didapatkan karakteristik torsi-kecepatan:



Gambar 2.19 Karakteristik Torsi-Kecepatan Motor DC Penguatan Terpisah Dengan Metode Pengaturan Tegangan Jangkar

2.7 Pengereman Motor DC

2.7.1 Umum

Pada aplikasi penggunaan motor sebagai mesin penggerak ada kalanya diinginkan untuk memperlambat atau bahkan menghentikan putaran motor tersebut. Motor DC merupakan mesin penggerak yang memiliki kelebihan selain dalam pengaturan kecepatan putaran juga dalam perlambatan atau penghentian putaran. Proses perlambatan atau penghentian putaran disebut pengereman. Metode pengereman pada motor DC penguatan terpisah dan penguatan sendiri sama.

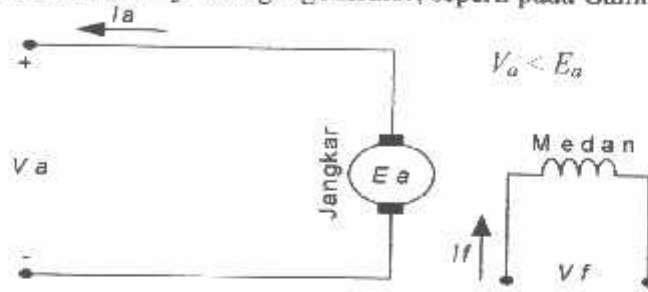
2.7.2 Metode Pengereman Motor DC

Metode pengereman pada motor DC ada tiga macam yaitu:

- Pengereman *regenerative*
- Pengereman *rheostatic*
- Pengereman *plugging*

a) Pengereman Regenerative

Pengereman *regenerative* adalah pengereman yang dilakukan dengan cara mengembalikan energi yang tersimpan dalam motor pada saat berputar ke sumber tegangan. Hal ini dapat dilakukan dengan cara membuat ggl motor lebih besar dari pada tegangan sumbernya, sehingga arus akan mengalir kembali ke sumber tegangan dan motor akan bekerja sebagai generator, seperti pada Gambar 2.20.



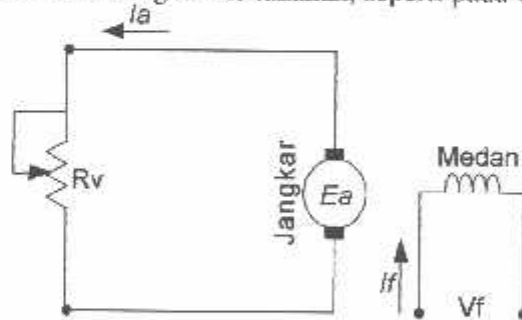
Gambar 2.20 Metode Pengereman Regenerative

Besarnya arus yang mengalir adalah:

$$I_a = \frac{E_a - V_a}{R_a} \dots\dots\dots(2.28)$$

b) Pengereman Rheostatic

Pengereman *rheostatic* dilakukan dengan jalan membuang energi yang dihasilkan putaran motor menjadi energi panas dalam *rheostat*. Pada motor yang berputar akan dihasilkan GGL lawan, saat pengereman tegangan catu pada motor dilepas kemudian dihubungkan ke tahanan, seperti pada Gambar 2.21.



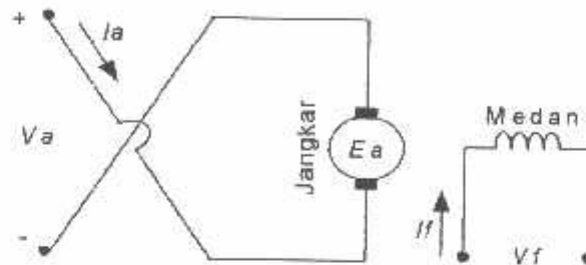
Gambar 2.21 Metode pengereman rheostatic

Akibat adanya ggl lawan tersebut akan menghasilkan arus yang kemudian dialirkan melalui tahanan. Besarnya arus yang mengalir dalam tahanan tersebut:

$$I_a = -\frac{E_a}{R_a + R} \dots\dots\dots(2.29)$$

c) Pengereman *Plugging*

Pengereman *plugging* adalah pengereman yang dilakukan dengan membalik polaritas salah satu belitan, baik belitan jangkar ataupun belitan medan, seperti pada Gambar 2.22.



Gambar 2.22 Metode Pengereman *Plugging*

Pada saat dilakukan pengereman *plugging* timbul arus yang cukup besar. Arus yang ditimbulkan besarnya:

$$I_a = -\frac{V_a + E_a}{R_a} \dots\dots\dots(2.30)$$

karena arus yang dihasilkan pada pengereman *plugging* cukup besar sehingga akan membahayakan motor. Untuk membatasi arus yang cukup besar tersebut bisa dilakukan penambahan resistor pada rangkaian motor pada saat dilakukan pengereman.

2.8 Pembalikan Putaran Motor DC

Untuk membalikan arah putaran motor DC, persamaan (2.12) $T = K \phi I_a$

dapat digunakan sebagai acuan :

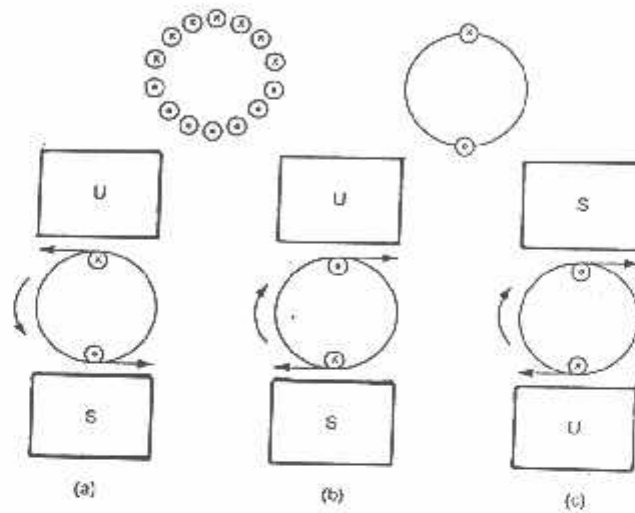
- a) Jika I_a negatip, maka T negatip
- b) Jika ϕ negatip, maka T negatip
- c) Jika I_a negatip, ϕ negatip, maka T positif

Sehingga untuk membalik putaran motor DC dapat dilakukan dengan cara :

- a) Membalikan arah putar arus jangkar dan arah arus penguatan tetap
- b) Membalikan arah arus penguatan dan arah arus jangkar tetap

Apabila arah arus jangkar dan arah arus penguatan keduanya dibalik maka arah putaran motor tidak berubah.

Pengertian-pengertian ini sesuai dengan kaidah tangan kiri. Perhatikan gambar 2.23 Untuk memudahkan penjelasan sisi kumparan pada bagian atas dan bawah masing-masing hanya digambarkan dengan sebuah kawat.



Gambar 2.23 Prinsip Kerja Membalikan Arah Putaran Motor DC

- Pada gambar a : Mula-mula arah putaran motor berlawanan dengan arah putara jarum jam,
- Pada gambar b : Kemudian arah arus jangkar dirubah, kutup-kutup tetap, sesuai dengan kaidah tangan kiri sekarang arah putaran berubah.
- Pada gambar c : Sesudah itu kutup-kutup dirubah dan arah arus jangkar tetap, sesuai dengan kaidah tangan kiri, maka arah putaran sekarang juga berubah.

Jadi mula-mula arah putaran berlawanan dengan jarum jam, untuk merubah arah putaran menjadi searah dengan jarum jam dapat dilakukan dengan dua cara, dengan membalikan arah arus jangkar atau merubah kutup-kutup magnet. Apabila arah arus jangkar dan kutup-kutup magnet keduanya berubah maka arah putaran akan tetap.

BAB III PENGENDALIAN MOTOR DC EMPAT KUADRAN DENGAN KONVERTER GANDA

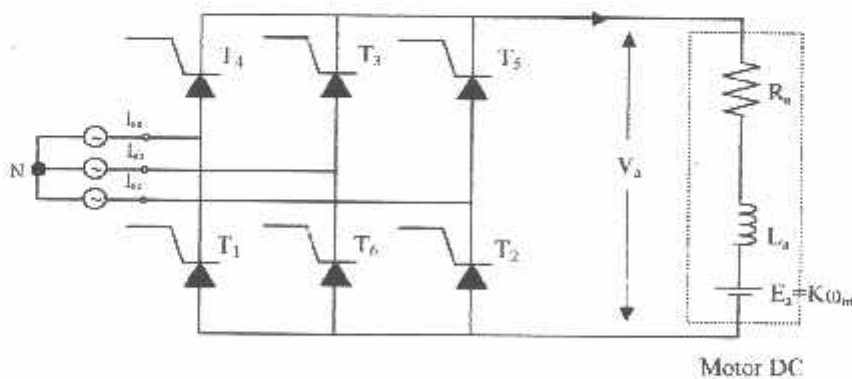
3.1 Penyearah Tiga Fasa Mencatu Beban Motor DC

Untuk memudahkan perhitungan dalam menganalisa perlu diadakan asumsi-asumsi pendekatan :

1. Thyristor adalah merupakan *switch* ideal. Tidak mempunyai jatuh tegangan saat konduksi dan tidak mempunyai arus bocor saat *blocking*. Hal ini mengindikasikan bahwa rugi-rugi akibat penyerah diabaikan. Ini biasanya dipakai untuk motor dengan daya tinggi.
2. Resistansi dan induktansi jangkar dianggap konstan. Efek kulit yang disebabkan arus *ripple* dari motor dan perubahan nilai resistansi akan sulit dihitung dan perubahannya sangat kecil sehingga diabaikan.
3. Selama beroperasi dalam keadaan tunak (*steady state*), kecepatan dianggap konstan, fluktuasi *ripple* arus dari torsi mempunyai konstanta waktu yang sangat besar dibandingkan *ripple* arus dari motor, sehingga disini fluktuasi torsi diabaikan, dan pada *steady state* ini tegangan dari GGL lawan dianggap DC murni.
4. Induktansi sumber diabaikan.

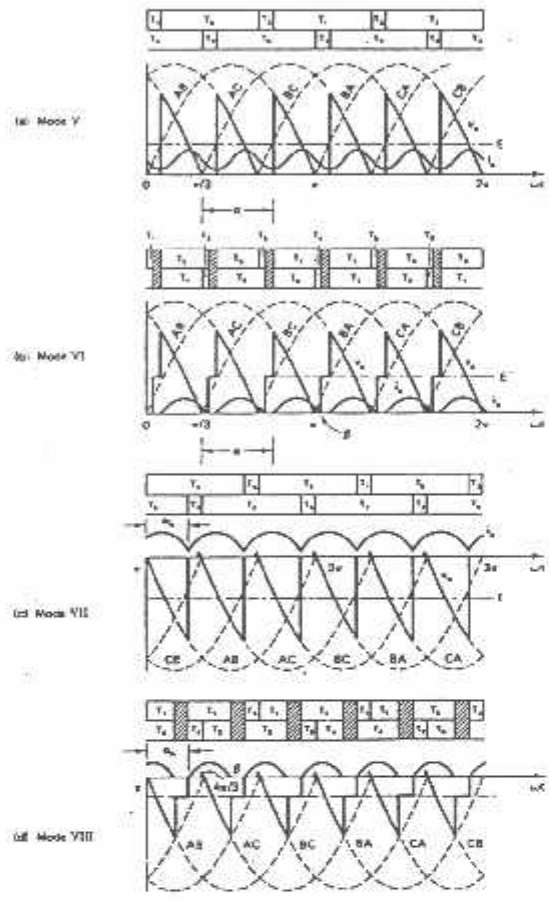
3.1.1 Model Penyearah Tiga Fasa Dalam Mencatu Motor DC

Rangkaian penyearah tiga fasa terkontrol penuh (enam pulsa) dalam mencatu motor DC penguatan terpisah dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Penyearah Tiga Fasa Terkontrol Penuh Dengan Beban Motor DC

Cara kerjanya dapat kita dilihat pada bab II sebelumnya. Sedangkan dalam menganalisa bagaimana penyerah tiga fasa memcatu motor DC, maka ada empat kondisi yang harus diperhatikan, kondisi tersebut dijadikan dalam sebuah model. Untuk lebih jelasnya model-model tersebut dapat kita lihat pada gambar dan tabel:



Gambar 3.2 Model Operasi Penyearah Tiga Fasa Terkontrol Penuh Dengan Beban Motor Arus Searah

Model	Arus Motor	Kerja motor
I	Konduksi Kontiyu	Motoring
II	Konduksi Diskontiyu	Motoring
III	Konduksi Kontiyu	Pengereman
IV	Konduksi Diskontiyu	Pengereman

Tabel 3.1 Kerja Motor DC Dengan Mencatu Penyearah Terkontrol Penuh

Model I

Tegangan keluaran dari $\omega t = \alpha + \pi/3$ sampai $\omega t = \alpha + 2\pi/3$ dapat ditentukan :

$$V_a = \frac{1}{\omega} \int_{\alpha+\pi/3}^{\alpha+2\pi/3} V_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{V_m}{\omega} \cos \alpha = V_{av} \cos \alpha \quad V \dots\dots\dots(3.1)$$

Dimana :

$$V_{av} = \frac{V_m}{\omega} \quad V$$

Pada arus penguatan I_f konstan, maka dari persamaan (2.26) dan (3.1) didapatkan nilai

$$\omega_a = \frac{V_m}{s} \cos \alpha - \frac{R_s}{k^2} I_a \quad rad / det \dots\dots\dots(3.2)$$

Model II

Tegangan keluaran dari $\omega t = \alpha + \pi/3$ sampai $\omega t = \alpha + 2\pi/3$ dapat ditentukan :

$$V_a = I_a \frac{d\alpha}{dt} + R_s I_a + K \omega_a = V_m \sin \omega t \quad V, (\alpha + \frac{\pi}{3}) \leq \omega t \leq \beta \dots\dots\dots(3.3)$$

solusi persamaan differensial diatas :

$$i_c(\omega t) = \frac{V_a}{Z} \sin(\omega t - \psi) + A_1 \exp\left\{-\left(\frac{R_s}{L_c}\right)t\right\} - \frac{K \omega_a}{R} \dots\dots\dots(3.4)$$

dengan $Z = \sqrt{R_s^2 + (\omega L_c)^2} \quad \Omega$

$$\psi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L_c}{R_s}\right) \quad rad$$

Konstanta A_1 pada persamaan (3.4) dapat ditentukan dengan mengambil kondisi awal $i_a(\pi/3 + \alpha)$

$$A_1 = \left[i_a \left(\frac{\pi}{3} + \alpha \right) + \frac{K \omega_a}{R_s} - \frac{V_a}{Z} \sin \left(\frac{\pi}{3} + \alpha - \psi \right) \right] \exp \left\{ \left(\frac{R_s}{L_c} \right) \left(\frac{\pi/3 + \alpha}{\omega} - t \right) \right\} - \frac{K \omega_a}{R} \quad A \dots\dots\dots(3.5)$$

Substitusi persamaan (3.5) kedalam persamaan (3.4), menghasilkan

$$i_a \omega t = \frac{V_a}{Z} \sin(\omega t - \psi) + \left[i_a \left(\frac{\pi}{3} + \alpha \right) + \frac{K \omega_a}{R_s} - \frac{V_a}{Z} \sin \left(\frac{\pi}{3} + \alpha - \psi \right) \right] \exp \left\{ \left(\frac{R_s}{L_c} \right) \left(\frac{\pi/3 + \alpha}{\omega} - t \right) \right\} - \frac{K \omega_a}{R} \quad A \dots\dots\dots(3.6)$$

untuk $i_a(\omega t) = i_a(\alpha - \pi/3)$, maka

$$i_a(\omega t) = \frac{\frac{V_a}{Z} [\sin(\omega t - \psi) - \sin(\alpha + \frac{\pi}{3} - \psi)] \exp \left\{ \left(\frac{R_s}{L_c} \right) (\alpha + \frac{\pi}{3} - \omega t) \cos \psi \right\}}{1 - \exp \left\{ \left(\frac{R_s}{L_c} \right) (\alpha + \frac{\pi}{3} - \omega t) \cos \psi \right\}} - \frac{K \omega_a}{R} \quad A \dots\dots\dots(3.7)$$

dari persamaan (3.7) diatas nilai β dapat dicari dengan $i_a(\beta) = 0$, sehingga

$$\frac{V_a}{Z} [\sin(\beta - \psi) - \sin(\alpha - \frac{\pi}{3} - \psi) \exp\{(\alpha + \frac{\pi}{3} - \beta) \cot \omega\}] = \frac{K \omega_m}{K_c} [1 - \exp\{(\alpha + \frac{\pi}{3} - \beta) \cot \psi\}] \quad A \dots\dots\dots(3.8)$$

Dengan metode iterasi(coba-coba) nilai β dapat diketahui

Setelah nilai β didapat, maka

$$V_a = \frac{3}{\pi} \left[\int_{\alpha + \frac{\pi}{3}}^{\beta} V_m \sin \omega t d(\omega t) + \int_{\beta}^{\alpha + \frac{2\pi}{3}} K \omega t d(\omega t) \right] = \frac{3}{\pi} [V_m \{ \cos(\alpha + \frac{\pi}{3}) - \cos \beta \} + K \omega_m (\alpha + \frac{2\pi}{3} - \beta)] \quad V \dots\dots\dots(3.9)$$

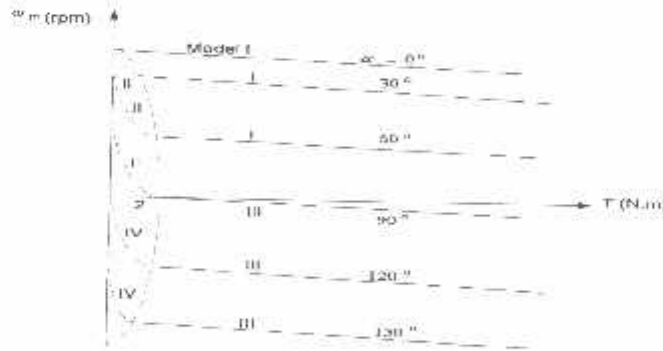
dari persamaan(2.26) dan persamaan (3.9)

$$\omega_a = \frac{V_a [\cos(\alpha + \frac{\pi}{3}) - \cos \beta]}{K (\beta - \alpha - \frac{\pi}{3})} = \frac{\pi I_a}{3 \omega_m (\beta - \alpha - \frac{\pi}{3})} T_a \quad rad / det \dots\dots\dots(3.10)$$

Pengujian bentuk gelombang V_a dan I_a dari model III dan IV mempunyai persamaan yang tidak berbeda dengan persamaan pada model I dan II. Persamaan (3.1) dan (3.2) dapat diterapkan persamaan model III, sedangkan persamaan (3.3) sampai (3.10) dapat diterapkan pada model IV. Hanya saja pada model III dan IV, E dan V_a bernilai negative sehingga motor melakukan kerja sebagai pengereman regeneratif. Pada operasi empat kuadran kecepatan motor negatif(mundur), sedangkan pada operasi dua kuadran, maka nilai K yang diambil negatif.

3.1.2 Karakteristik Mekanik Motor DC Yang Dicu Penyearah Tiga Fasa

Berikut ini adalah karakteristik kecepatan dan torsi pada motor DC yang dicatu oleh penyearah tiga fasa terkontrol penuh.



Gambar 3.3 Kurva Kecepatan-Torsi Dari Pengendali Penyearah Tiga Fasa Terkontrol Penuh

Pada gambar diatas daerah diskontiyu ditampakkan oleh garis putus-putus.

Pada operasi motor tanpa beban $E = V_m$ untuk $0 \leq \alpha \leq \pi/6$ radian. Dan $E = V_m \sin(\alpha + \pi/3)$ untuk $\pi/6 \leq \alpha \leq \pi$ radian. Maka kecepatan tanpa beban dapat dicari:

$$\omega_{mc} = \frac{V_m}{K}, \quad 0 \leq \alpha \leq \pi/6 \quad \text{rad / det} \dots\dots\dots(3.11)$$

$$\omega_{mc} = \frac{V_m \sin(\alpha + \pi/3)}{K}, \quad \pi/6 \leq \alpha \leq \pi \quad \text{rad / det} \dots\dots\dots(3.12)$$

Ketika beroperasi pada model II, batas konduksi antara kontiyu dan diskontiyu ditandai dengan tampaknya sudut pemadaman β pada titik $\alpha + 2\pi/3$, disubtitusikan nilai β ini pada persamaan (3.8) akan menghasilkan kecepatan kritis ω_{mc} , sedangkan torsi kritis τ_{ac} dapat dicari melalui persamaan (3.2).

Untuk tegangan ternormalisasi diambil V_R yang sama dengan nilai maksimum dari rata-rata tegangan keluaran penyearah V_{av} (pada persamaan 3.1), sedangkan arus ternormalisasi dipilih dari arus rata-rata yang mengalir saat $\omega_m = 0$ dan $V_u = V_b$ sehingga

$$V_b - V_{av} = \frac{3V_m}{\pi} \quad V, \quad \text{dan} \quad I_b = \frac{V_b}{R_a} = \frac{V_m}{R_a} = \frac{3V_m}{\pi R_a} \quad A \dots\dots\dots(3.13)$$

maka kecepatan ternormalisasi ω_{mc} dan torsi ternormalisasi τ_{ac} diberikan oleh persamaan :

$$\omega_{mc} = \frac{E}{K} = \frac{V}{K} = \frac{\pi V_m}{3V_a}, \quad \text{dan} \quad \tau_{ac} = \frac{T_c}{I_a} = \frac{\pi V_m}{3V_a} (I_a) \dots\dots\dots(3.14)$$

batas ini dapat digunakan untuk membantu dalam menghitung performansi dari motor dan memilih filter induktansi agar dapat mengeliminasi kondisi diskontiyu pada pengendalian saat *steady-state*.

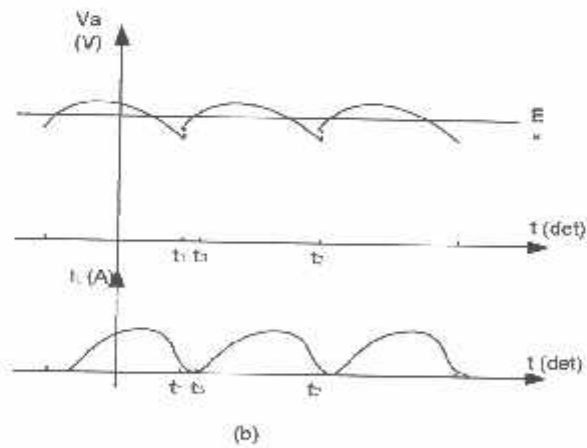
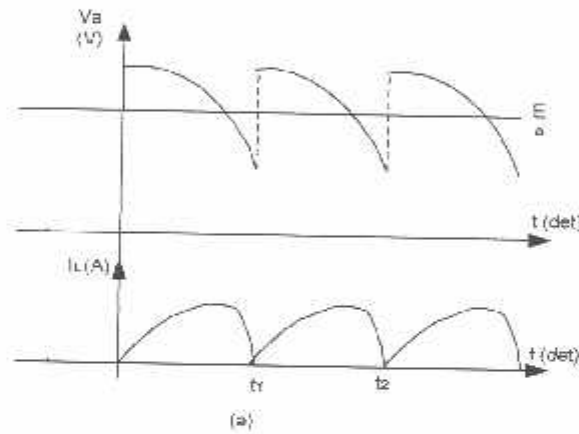
3.1.3 Induktor Arus Kontinyu

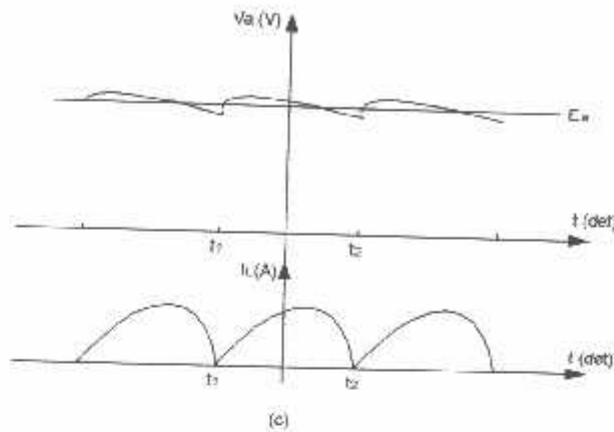
Untuk mendesain sesuatu penyearah yang baik harus mengetahui kondisi kerja dan mengetahui kondisi kerja dan mengetahui tegangan keluarannya sebagai fungsi α . Karakteristik dari motor yang bagian jangkarnya disuplai penyearah tiga fasa terkontrol penuh atau konverter enam pulsa mempunyai daerah konduksi kontinyu dan konduksi diskontinyu, seperti yang terlihat pada gambar (3.3). Daerah konduksi kontinyu lebih luas dari pada daerah konduksi diskontinyu,

daerah ini akan bertambah jika diberikan induktansi yang dipasang pada rangkaian jangkar. Penentuan besarnya nilai induktansi yang tepat akan meningkatkan performansi dari system pengendalian.

Untuk penyearah terkontrol dengan sudut penyalaaan nol, *ripple* dari tegangan keluaran relatif kecil dan induktansi yagn dibutuhkan untuk menjaga arus tetap kontinu juga kecil. Tetapi dengan bertambahnya sudut penyalaaan α , *ripple* tegangan juga bertambah dan penambahan nilai induktansi juga diperlukan untuk menjaga konduksi kontinu pada beban minimum.

Dalam menganalisa, pertamakali diambil nilai dimana saat GGL lawan sama dengan tegangan rata-rata jangkar dari motor karena nilai induktor minimum dapat ditentukan dari sini. Gambar (3.4a) menunjukkan penyearah terkontrol tiga fasa dimana arus induktor menjadi nol pada akhir interval konduksi dari masing-masing thyristor.





Gambar (3.4) a) *Switching* Pada Saat Tegangan Sumber Lebih Besar Dari Tegangan Rata-rata

b) *Switching* Pada Saat Tegangan Sumber Lebih Kecil Dari Tegangan Rata-rata

c) *Switching* Pada Saat Tegangan Sumber Sama Dengan Tegangan Rata-rata

Pada gambar (3.4a) tegangan sumber pada saat *switching* lebih besar dari pada rata-rata tegangan keluaran E_a , kondisi ini menunjukkan i_1 bertambah untuk $\omega t > \alpha$ dan nilai minimum i_1 terjadi pada saat *switching*.

Kemungkinan kedua sumber tegangan pada saat *switching* kurang dari rata-rata tegangan output E_a pada saat ini i_1 akan berkurang untuk sesaat seperti yang terlihat pada gambar(3.4b). nilai minimum i_1 tidak terjadi pada saat *switching* namun sesaat kemudian yaitu t_3 .

Sekarang terlihat nilai α dibatasi oleh dua nilai. Pada gambar (3.4c), t_1 merupakan waktu saat sudut penyalaan dinyalakan, sehingga dengan menggunakan persamaan (3.1) nilai α dapat ditentukan sebagai

$$V_m \cos \omega t_1 = E_a = \frac{3V_m}{\pi} \cos \alpha \quad V \dots\dots\dots(3.15)$$

$$\text{atau} \quad \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{6}\right) = \frac{3}{\pi} \cos \alpha \dots\dots\dots(3.16)$$

melalui perhitungan iterasi* maka didapat $\alpha = 10,08$.

Dalam menentukan besarnya nilai inductor kritis L yaitu nilai inductor minimal yang didapat membuat jangkar kontiyu ($L_c = L_a + L_c$, dengan L_c inductor tambahan), maka ada dua keadaan yang harus dianalisa :

a) Untuk nilai $\alpha > 10,08^\circ$

penulisan ini dimulai dari penentuan i_a yang bernilai sama dengan i_L selama konduksi

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_m \cos \omega t - L_c}{L} \quad A / \det \dots\dots\dots(3.17)$$

Nilai dari i_L adalah nol pada saat *switching*, seperti yang ditunjukkan pada gambar (3.4a) penyelesaian dari persamaan (3.17) diberikan oleh

$$i_L = \int_t^{-t} \frac{V_m \cos \omega t - L_c}{L} dt$$

$$i_L = \left(\frac{1}{\omega L}\right) \left[(\sin \omega t - \sin \omega t_1) - \left(\frac{3}{\pi} \cos \alpha\right) (\omega t - \omega t_1) \right] \quad A \dots\dots\dots(3.18)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (3.15) kedalam persamaan (3.18) maka

$$i_L = \left(\frac{V_m}{\omega L}\right) \left[(\sin \omega t - \sin \omega t_1) - \left(\frac{3}{\pi} \cos \alpha\right) (\omega t - \omega t_1) \right] \quad A \dots\dots\dots(3.19)$$

nilai dari i_L akan nol pada saat t_2 , dimana $\pi/3$ kemudian dari t_1 , nilai ini dapat disubstitusikan ke dalam t, sehingga $t = (t_1 + \pi/3)$.

Nilai rata-rata dari i_L selama konduksi, yaitu $t_1 = (\alpha + \pi/6)/\omega$ sampai $t_2 = (\alpha + \pi/6)/\omega + \pi/3\omega$ Dapat dicari dengan mengintegalkan persamaan (3.16).

$$I_L = \left(\frac{3V_m}{2\pi}\right) \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{\omega L} \left[(\sin \omega t - \sin \omega t_1) - \left(\frac{3}{\pi} \cos \alpha\right) (\omega t - \omega t_1) \right] dt$$

$$I_L = \frac{3V_m}{\omega L} \left[\left(1 - \frac{\pi}{2\sqrt{3}}\right) \sin \alpha \right] \quad A \dots\dots\dots(3.20)$$

Rata-rata nilai arus inductor tergantung pada nilai beban resistif, sehingga

$$I_L = \frac{E_a}{R_c} = \frac{2V_m \cos \alpha}{\pi} A \dots\dots\dots(3.21)$$

Dengan menggunakan persamaan (3.20) dan (3.21), maka induktansi kritis dapat ditentukan :

$$\frac{\omega L}{R_c} = 0.0931 \tan \alpha$$

b) untuk nilai $\alpha < 10,08^\circ$

Pada analisa ini dimana waktu untuk i_L menjadi nol tidak lagi pada saat switching sebagaimana ditunjukkan pada gambar (3.4b). persamaan (3.19) dapat kembali sebagai

$$i_L = \left(\frac{V_m}{\omega L}\right) \left[(\sin \omega t - \sin \omega t_3) - \left(\frac{1}{\pi} \cos \alpha\right) (\omega t - \omega t_3) \right] A \dots\dots\dots(3.23)$$

Dengan mengintegalkan persamaan diatas dapat ditemukan nilai rata-rata dari i_L .

$$I_L = \left(\frac{V_m}{2\pi}\right) \int_{t_1}^{t_3} \left[(\sin \omega t - \sin \omega t_3) - \left(\frac{1}{\pi} \cos \alpha\right) (\omega t - \omega t_3) \right] dt \quad A \dots\dots(3.24)$$

$$I_L = \frac{3V_m}{2\pi\omega L} \left[\sin \alpha - \frac{\pi}{3} \sin \omega t_3 + (\omega t_3 - \alpha) \cos \alpha \right] A \dots\dots\dots(3.25)$$

Dari sini persamaan (3.21) masih dapat diterapkan, kombinasi persamaan (3.21) dan (3.25) menghasilkan

$$\frac{\omega L}{R_c} = \tan \alpha - \left(\frac{\pi \sin \omega t_3}{3 \cos \alpha}\right) + \omega t_3 - \alpha \dots\dots\dots(3.26)$$

Dari persamaan (3.26), ωt_3 bernilai negatif. Pada grafik dalam gambar (3.4b) tegangan jangkar direpresentasikan oleh fungsi cosinus dan t_3 yang dihasilkan harus bernilai negatif, maka t_3 dapat ditentukan :

$$V_m \cos \omega t = V_m \cos \omega t_3 = \frac{3V_m}{\pi} \cos \alpha \quad V \dots\dots\dots(3.27)$$

Dan

$$\omega_s = \cos^{-1}\left(\frac{s}{\alpha} \cos \alpha\right) \quad \text{rad} \dots\dots\dots(3.28)$$

Pada persamaan (3.28) ini, negatif dapat dipilih dari nilai ganda pada *invers* cosinus.

3.2 Cara Kerja Motor DC Konverter Ganda Empat Kuadran

Motor DC dapat dioperasikan dalam empat kuadran mode operasi dengan mengatur besarnya tegangan jangkar serta mengubah-ubah polaritas tegangan jangkarnya, seperti pada Gambar 3.5. Mode operasi pada motor DC penguatan terpisah dan motor DC penguatan sendiri sama. Mode operasi motor DC empat kuadran yaitu:

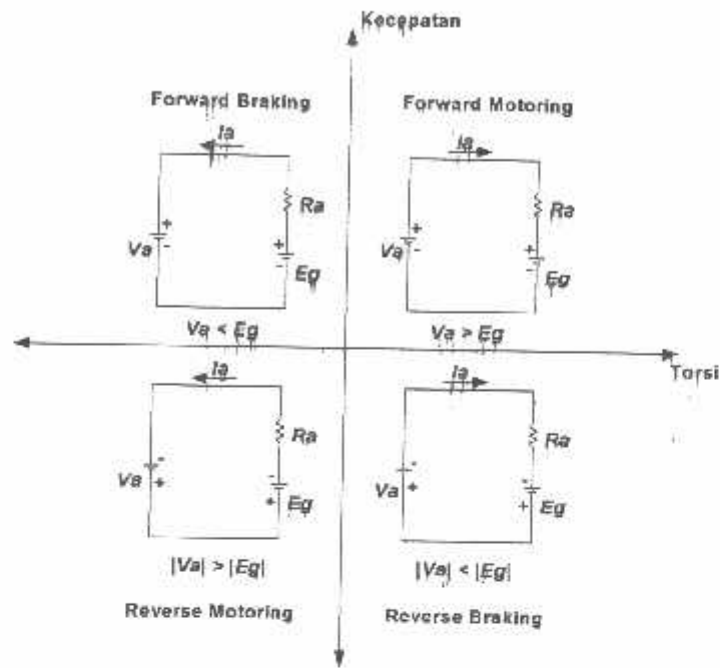
Kuadran I: Motor berputar maju karena V_a lebih besar dari pada E_a sehingga arah arus jangkar dari kutub positif ke kutub negatif, arah putaran motor dan torsiya searah.

Kuadran II: Motor melakukan pengereman arah putaran maju karena V_a lebih kecil dari pada E_a sehingga motor akan bekerja sebagai generator dan mengembalikan energi ke sumber. Torsi yang timbul berlawanan dengan arah putaran sehingga disebut torsi pengereman.

Kuadran III: Motor berputar mundur karena polaritas sumber dibalik, V_a lebih besar dari pada E_a . Arah arus jangkar dari kutub positif ke kutub negatif. Torsi yang ditimbulkan searah dengan arah putarannya.

Kuadran IV: Motor melakukan pengereman arah putaran mundur, V_a lebih kecil daripada E_a sehingga arus mengalir dari E_a ke V_a dan motor bekerja sebagai generator.

Dengan pengaturan tegangan jangkar tersebut maka motor dapat berputar dalam dua arah dan dapat melakukan pengereman dalam dua arah putaran tersebut. Mode operasi dalam empat kuadran dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Mode Operasi Motor DC Konverter Ganda Empat Kuadran

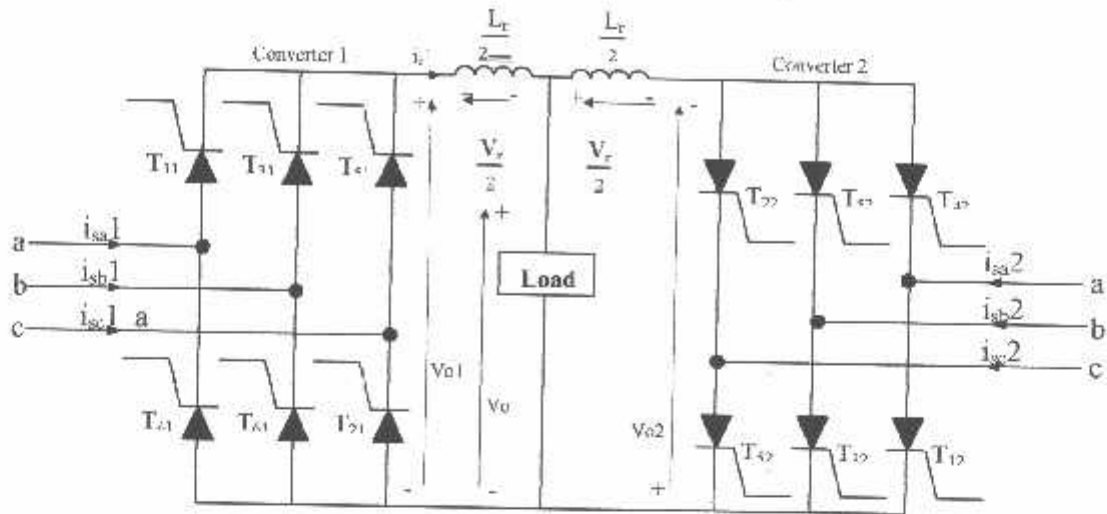
Kuadran	Kerja Motor	Polaritas tegangan sumber	Arah Arus Sumber
I	Motor Maju	Positif	Positif
II	Pengereman Maju	Positif	Negatif
III	Motor Mundur	Negatif	Negatif
IV	Pengereman Mundur	Negatif	Positif

Tabel 3.2 Kerja Motor DC Dalam Konverter Ganda Empat Kuadran

3.3 Pengendalian Motor DC Dengan Konverter Ganda

Pada pengendalian kecepatan motor DC biasanya diperlukan konverter yang dapat menjalankan motor dalam arah yang berlainan. Dalam memenuhi kerja empat kuadran, salah satunya dapat dilakukan dengan menghubungkan dua buah konverter tiga fasa yang dirangkai secara anti paralel dan diantaranya dipasang beban yang dalam hal ini motor DC. Rangkaian ini kemudian disebut dengan konverter ganda.

Rangkaian ganda konverter ganda tiga fasa dapat dilihat pada gambar 3.6



Gambar 3.6 Rangkaian Daya Converter Ganda

Pada masing-masing konverter mempunyai enam SCR konverter yang konduksi pada saat motor berputar maju dinamakan konverter 1 (konverter positif) sedang konverter yang konduksi pada saat motor berputar mundur dinamakan konverter 2 (konverter negatif).

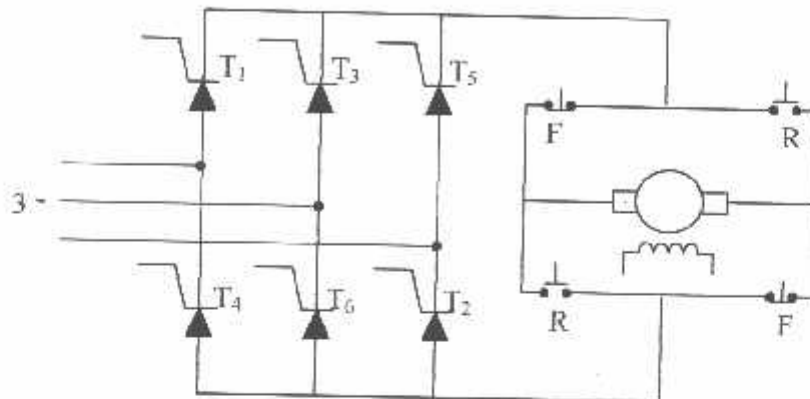
Dalam dua buah konverter diatas, tegangan dan arus dapat mempunyai polaritas yang berlainan. Keluaran masing konverter mempunyai polaritas yang sama dihubungkan ke reaktor tap tengah (mid point reactor). Jika diasumsikan konverter ideal, ripple dari tegangan keluaran diabaikan maka tegangan keluaran masing-masing konverter harus sama dengan tegangan beban.

Pada konverter ganda penyearah positif, bekerja pada kuadran pertama dan keempat, sedang penyearah negatif bekerja pada kuadran kedua dan ketiga. Konverter ganda memungkinkan beroperasi dengan arus sirkulasi atau tanpa arus sirkulasi.

3.3.1 Pengendalian Tanpa Arus Sirkulasi

Konverter ganda tanpa arus sirkulasi, pada waktu tertentu hanya satu konverter yang bekerja untuk menyuplai arus beban, sementara konverter yang lainnya di blok melalui sudut penyalannya. Dalam pengendalian ini tidak diperlukan reactor antara kedua konverter.

Karena hanya satu konverter yang bekerja pada waktu tertentu maka kerja dari konverter ganda tanpa arus sirkulasi ini dapat di ilustrasikan seperti kontaktor pembalik tegangan jangkar gambar 3.7



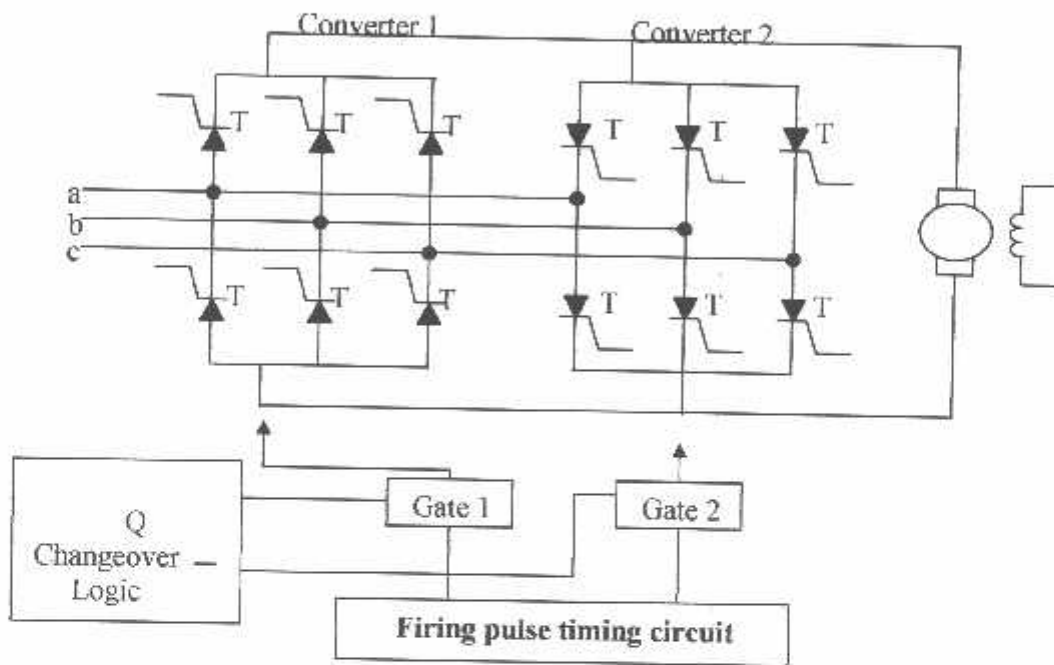
Gambar 3.7 Kontaktor Pembalik Tegangan Jangkar

Dari gambar 3.7 terlihat bahwa pada saat tertentu kerja dari konverter ganda tanpa arus sirkulasi tidak berbeda dengan penyearah tiga fasa, yang diatas sudah kita bahas.

Dalam pengendalian tanpa arus sirkulasi ini pembalikan arus putaran dapat dilakukan sebagai berikut. Pada saat motor beroperasi dikuadran satu konverter positif akan dikontrol dan pulsa penyalaan pada konverter negatif akan diblok. Untuk mengganti arah kecepatan pada arah mundur, operasi tersebut dilakukan dengan memindahkan *switch* dari konverter positif ke konverter negatif. Sebelum konverter negatif diaktifkan semua thyristor dalam konverter positif harus dipastikan padam. Hal ini dilakukan untuk menghindari adanya arus sirkulasi yang besar karena tidak adanya reactor arus sirkulasi sebagai pembatas. Arus sirkualsi yang besar ini dapat merusak thyristor dalam konverter. Setting sudut penyalaan konverer positif pada nilai tertinggi menyebabkan arus jangkar diturunkan menjadi nol. Pada keadaan normal membutuhkan waktu berhenti sepuluh sampai dua puluh mili per detik. Ini untuk memastikan thyristor pada konverter positif tersebut padam. Sekarang pulsa penyalaan beralih dari konverter positif ke konverter negatif kemudian konverter negatif dapat diatur melalui sudut penyalaan α_2 .

Kecepatan respon dari metode pengendalian ini kurang baik karena harus mempertimbangkan pengaruh dari waktu berhenti motor. Dalam pengendalian performansi tinggi ini harus dikurangi sampai kenilai minimum. Besarnya nilai waktu berhenti tergantung pada tingkat ketelitian suatu alat yang dapat mendeteksi arus nol. Thyristor sendiri hanya membutuhkan waktu sekitar 50-100 mikrodetik untuk konduksi.

Pengendalian tanpa arus sirkulasi dilengkapi dengan kontrol rangkaian logika seperti pada gambar 3.8.



Gambar 3.8 Pengendalian Konverter Ganda Tanpa Arus Sirkulasi

Pada gambar yang ditentukan besar sudut penyalaan disetting melalui blok rangkaian yang berlabel "firing pulse timing circuit" karena hanya satu gate yang dapat aktif diatur maka diperlukan blok rangkaian yang berlabel "changeover logic" untuk menentukan gate mana yang bekerja sesuai dengan polaritas beban yang diinginkan.

Sistem dapat bekerja dengan baik tergantung pada ketelitian dan kecepatan dari rangkaian "changeover logic" yang dapat memastikan pergantian sudut penyalaan pada masing-masing konverter, konverter positif berfungsi sebagai

penyarah pada pengendalian motor arah maju, sekarang dibutuhkan kecepatan khusus untuk membalik arah putaran. Dengan merubah input berupa *set point*, maka sudut penyalan dari konverter positif bertambah dan menyebabkan tegangan berkurang sehingga arus jangkar menjadi nol. Deteksi arus nol dalam rangkaian motor akan memerintah *changeover logic* mengganti blok sudut penyalan dari konverter positif ke negatif diaktifkan, sebagai proteksi diperlukan beberapa waktu milidetik sebagai waktu tunda setelah arus nol terdeteksi sebelum sudut penyalan dari converter negatif diaktifkan

Deteksi *changeover logic* dapat berkerja dengan baik saat arus motor konduksi kontiyu, namun pada saat arus motor konduksi diskontiyu *changeover logic* tidak dapat berkerja dengan baik karena deteksi arus nol hanya diinginkan sebagai perintah untuk membalik arah putar saja. Pada arus motor konduksi diskontiyu rangkaian kontrol akan menjadi lebih kompleks selain respons kurang baik. Untuk mempercepat pembalikan arah arus sesuai yang diinginkan maka konverter ganda dapat dioperasikan dalam model pengendalian dengan arus sirkulasi.

3.3.2 Pengendalian Dengan Arus Sirkulasi

Arus sirkulasi memungkinkan mengalir pada dua konverter yang dihubungkan secara anti paralel jika kita mengatur sudut penyalan kedua konverter pada saat yang bersamaan, beda tegangan sesaat antara tegangan keluaran masing-masing konverter menyebabkan arus sirkulasi yang mengalir melalui kedua konverter tersebut. Arus dikendalikan dengan mengatur sudut penyalan, apabila α_1 dan α_2 adalah sudut penyalan konverter positif dan negatif, dan tegangan puncak *line to line* pada suplai adalah V_m , maka dari persamaan (2.3) dapat diperoleh

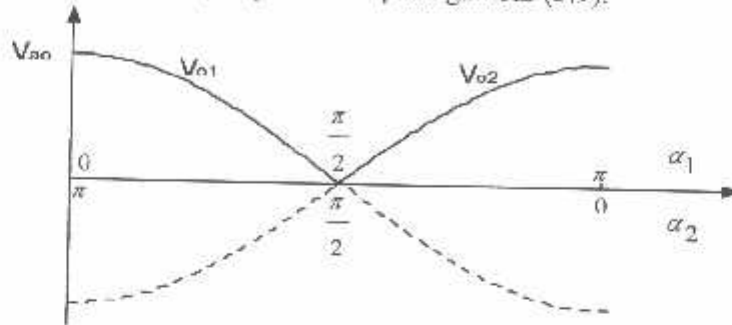
$$\frac{3V_m}{\pi} \cos(\alpha_1) = -\frac{3V_m}{\pi} \cos(\alpha_2) \quad V \dots\dots\dots(3.29)$$

Karena tegangan keluaran pada masing-masing konverter sama sehingga

$$\cos(\alpha_1) = \cos(\pi - \alpha_2)$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \pi \text{ rad} \dots \dots \dots (3.30)$$

Disini terlihat jumlah dari kedua sudut penyalaan tersebut adalah π radian. Variasi tegangan keluaran terhadap sudut penyalaan masing-masing converter pada persamaan (3.29) dan (3.29) dapat dilihat pada gambar (3.9).



Gambar (3.9) Variasi Tegangan Keluaran Terhadap Penyalaan Pada Konverter Ganda

Dalam konverter ganda sudut penyalaan dari konverter dapat diubah sesuai persamaan (3.30). Sudut penyalaan dikendalikan sehingga konverter positif beroperasi pada kuadran I ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$), maka konverter positif bertindak sebagai penyearah dan pada saat itu konverter negatif beroperasi pada kuadran dua ($90^\circ < \alpha_2 < 180^\circ$) dan bertindak sebagai inverter, akan tetapi keduanya akan menghasilkan tegangan keluaran yang sama.

Besarnya arus sirkulasi yang mengalir melalui kedua konverter dapat dihitung sebagai berikut, jika V_{01} dan V_{02} merupakan tegangan sesaat mulai sepanjang induktor pada interval $(\pi/6 + \alpha) < \omega t < (\pi/2 + \alpha)$ adalah

$$\begin{aligned} V_r &= V_{01} + V_{02} = V_{ab} - V_{bc} \\ &= V_m [\sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) - \sin(\omega t - \frac{\pi}{6})] \\ &= \sqrt{3} V_m \cos(\omega t - \frac{\pi}{6}) \quad V \dots \dots \dots (3.31) \end{aligned}$$

Arus sirkulasinya akan dapat diperoleh dari

$$\begin{aligned} I_r(t) &= \frac{1}{\omega L_r} \int_{\pi/6 + \alpha}^{\omega t} V_r d(\omega t) = \frac{1}{\omega L_r} \int_{\pi/6 + \alpha}^{\omega t} \sqrt{3} V_m \cos(\omega t - \frac{\pi}{6}) d(\omega t) \\ &= \frac{\sqrt{3} V_m}{\omega L_r} \left[\sin(\omega t - \frac{\pi}{6}) - \sin \alpha \right] \quad A \dots \dots \dots (3.32) \end{aligned}$$

Arus sirkulasi sesaat bergantung pada sudut penyalan α_1 dan induktansi L_r .

Walaupun tanpa beban luar konverter akan terus-menerus berkerja karena adanya arus sirkulasi ini sebagai hasil dari tegangan *ripple* sepanjang induktor. Hal ini memungkinkan pembalikan arah arus beban selama perubahan dari satu kuadran ke kuadran lain dan memberikan respon dinamik yang cukup cepat terutama pada penggerak motor elektrik.

Keberadaan arus sirkulasi ini tidak mengalir melalui beban. Pada saat satu konverter sebagai penyearah maka konverter tersebut dialiri arus sirkulasi dan juga arus beban, sedangkan konverter yang lain yang sebagai inverter hanya dialiri arus sirkulasi saja. Karena arus sirkulasi tidak mengalir melalui beban, maka keberadaan arus ini harus dibatasi. Untuk membatasi arus yang mengalir ini biasanya dipasang *midpoint reactor* yang dinamakan dengan *circulating current reactor*.

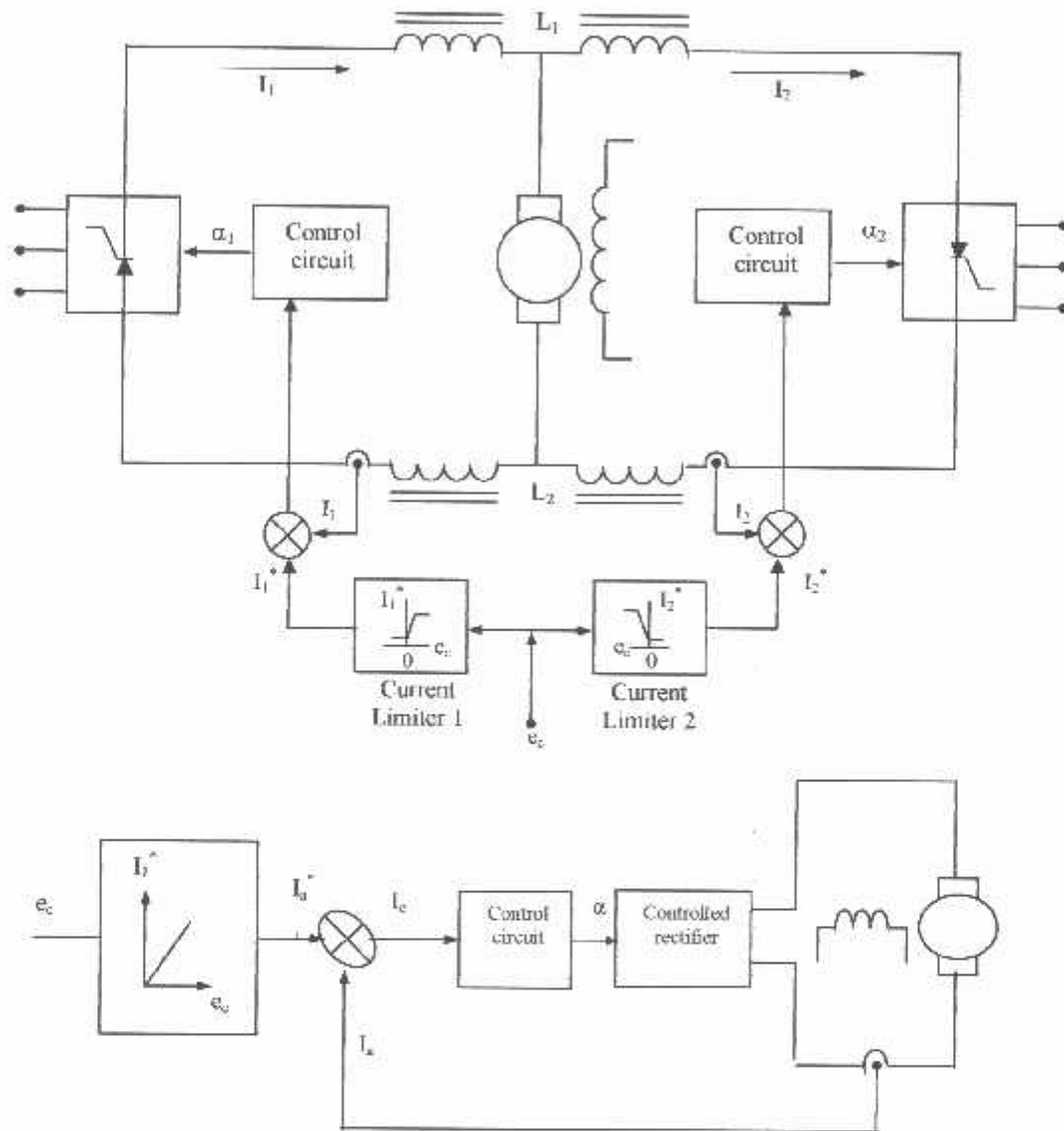
Pengeoperasian dengan arus sirkulasi yang konduksi kontinyu mempunyai beberapa keuntungan :

1. Arus sirkulasi akan memelihara konduksi kontinyu dari kedua converter pada seluruh daerah control tidak tergantung pada beban
2. Karena satu konverter selalu menjadi penyearah dan lainnya sebagai inverter, aliran daya pada sembarang arah pada sembaragn waktu adalah mungkin
3. Karena kedua converter beberapa pada kondisi yang tersambung kontinyu, respon waktu untuk perubaahn dari operasi kuadran I ke yang lainnya menjadi cepat

Jadi karakteristik transfer antara tegangan keluaran dan sudut penyalan adalah linier sehingga respon yang dihasilkan sangat cepat. Rangkaian kontrol menjadi sederhana. Arus beban yang beban mengalir pada arah yang berlainan setiap saat menyebabkan pembalikan arah arus dapat berjalan baik.

Sedangkan dampak lain dari arus sirkulasi ini akan mengurangi efisiensi dan faktor daya, meskipun dapat juga di jaga minimum. Disisi lain arus sirkulasi ini harus tetap konduksi kontinyu supaya penyearah yang lain tetap siap jika terjadi pembalikan arah putaran dengan tanpa adanya waktu berhenti. Jika

penyalan diatur seperti persamaan (3.30) arus sirkulasi yang besar memungkinkan dapat mengalir, untuk menjaga arus sirkulasi tetap minimum biasanya dua penyalah tersebut dilengkapi dengan rangkaian pengendali arus seperti pada gambar (3.10a)



Gambar (3.10) a. Pengendalian Arus Sirkulasi Dalam Konverter Ganda
b. Kontrol Loop Arus

Untuk nilai e_c positif, penyearah memberi arus jangkar dan arus sirkulasi, sedangkan penyearah negatif hanya memberi arus sirkulasi saja, sehingga pembatas arus (*current limiter 2*) pada penyearah negatif diatur kecil (yang disetting melalui arus referensi I_2), maka hanya arus sirkulasi yang mengalir, sedangkan untuk e_c negatif menjadi sebaliknya. Rangkaian kontrol arus pada penyearah seperti pada gambar (3.10b).

Dari dua metode pengendalian diatas maka keuntungan dan kerugian dapat diketahui. Pada pengendalian dengan arus sirkulasi rangkaian kontrolnya cukup sederhana, konduksi kontinyu dapat terjamin karena kebebasan alamiah dari arus motor untuk mengakir pada arah yang berlawanan, sehingga konstanta *gain* dari karakteristik transfer akan terjamin dan pengendaliannya mempunyai tingkat kestabilan yang baik. Sedangkan kerugiannya bahwa penambahan *circulating current reactor* akan menambah biaya, berat, bunyi bising (*noise*), dan rugi daya, respon transien menjadi lambat karena penambahan konstanta waktu, efisien dan akibatnya factor daya akan memburuk pada semua sudut penyalan.

Pada pengendalian tanpa arus sirkulasi mempunyai keuntungan menambah efisiensi dan factor dayanya tinggi, tidak adanya arus dsirkulasi berarti tidak memerlukan *circulating current reactor*, sehingga akan mengurangi biaya, berat, bunyi bising (*noise*), dan rugi daya. Sedangkan kekurangannya adlah pada konduksi diskontinyu kestabilan kecepatan motor buruk dan menyebabkan karakteristik transfer dari converter tidak linier, adanya waktu berhenti pada saat pembalik pada arah arus jangkar serta penambahan logika control yang diperlukan untuk mendeteksi arus nol dalam kaitannya dengan waktu berhenti.

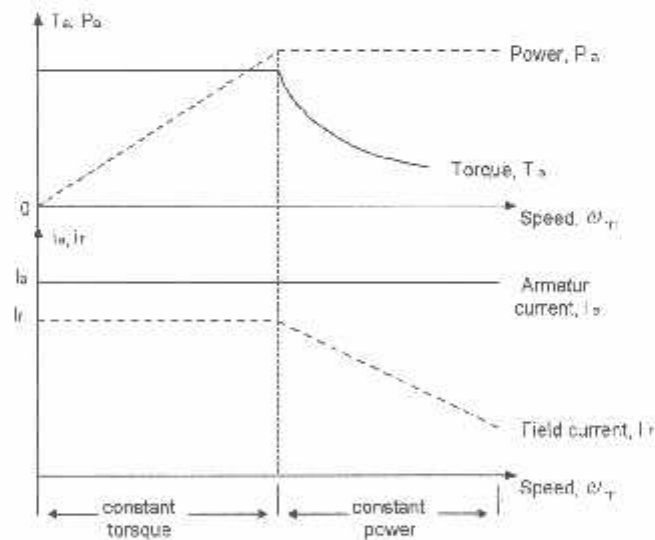
Karena rangkaian control itu cukup komplek, maka adanya waktu berhenti pada pengendalian tanpa arus sirkulasi ini tidak digunakan pada pengendalian perfonmansi tinggi. Namun dalam perkembangannya penggunaan rangkaian *integrated* dan lebih baiknya metode pendeteksi arus nol hingga 2-5 milidetik, pengendalian tanpa arus sirkulasi lebih mudah digunakan karena bertambahnya kecepatan respon waktu tunda yang sangat kecil. Sehingga tanpa arus sirkulasi dimasa sekarang pemakaiaannya sangat luas.

3.4 Metode Kontroller Ganda

pengaturan kecepatan motor DC menggunakan metode kontroller ganda yang bertujuan untuk memperlebar *range* pengaturan dan juga untuk memaksimalkan kapasitas torsi motor. Dengan kabitilitas torsi yang baik diharapkan putaran motor dapat berjalan dengan kestabilan yang baik. Metode pengaturan kecepatan controller ganda ini dilakukan dengan dua cara :

1. Mengatur tegangan jangkar dan menjaga arus medan konstan pada nilai nominalnya pada saat putaran dibawah putaran nominalnya.
2. Mengatur arus medan menjaga tegangan jangkar konstan pada nilai nominalnya. Metode ini diterapkan pada saat diatas putaran nominalnya. Pada pengaturan medan ini tidak dibolehkan kuranga 60% dari nilai nominalnya., sebab pada kecepatan diatas kecepatan maksimumnya, gaya putar dapat mempengaruhi komutator dan mengakibatkan motor rusak.

Karena pengaturan tegangan jangkar dan fluksi medan dilakukan secara bergantian, maka diperlukan control ganda. Variasi dari torsi (τ), daya (P_m) dan arus medan (I_f) dari pengendalian ini dapat diperlihatkan pada gambar (3.11), pada gambar (3.11) terlihat arus jangkar dibuat konstan pada semua kecepatan.



Gambar (3.11) Batas Torsi Dan Pada Pengendalian Kontrol Ganda

Pada gambar diatas terlihat arus jangkar dibuat konstan pada semua kecepatan

BAB IV

HASIL PENELITIAN

Pada bab ini akan dilakukan uji simulasi dari dua metode yang telah dibahas, yaitu metode :

1. Pengendalian tanpa arus sirkulasi
2. Pengendalian dengan arus sirkulasi

Kemudian akan dibahas bagaimana mengendalikan kecepatan putar motor DC dengan menggunakan kontroler ganda. Dari pembahasan ini nantinya diharapkan dapat diperoleh batasan-batasan dari pengoperasian motor DC yang digunakan sebagai tolak ukur dalam mendesain rangkaian kontrol

Pada pengujian ini diambil contoh parameter mesin yang digunakan adalah sebuah motor DC penguatan terpisah, dengan parameter-parameter teraan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} P &= 5 \text{ HP} &= 3,73 \text{ kW} \\ n &= 1750 \text{ rpm} &= 183,26 \text{ rad/det} \\ V_a &= 230 \text{ V} & R_a &= 0.615 \ \Omega \\ I_a &= 19 \text{ A} & L_a &= 0.0045 \text{ H} \\ V_f &= 230 \text{ V} & R_f &= 352 \ \Omega \\ I_f &= 0.65 \text{ A} & L_f &= 45 \text{ H} \\ J &= 0,068 \text{ Kg.m}^2 \\ B &= 0,001 \text{ N.m.det} \end{aligned}$$

4.1 Pengendalian Tanpa Arus Sirkulasi

Pada pengendalian tanpa arus sirkulasi hanya satu konverter yang bekerja untuk menyuplai arus beban pada waktu tertentu, sedangkan konverter yang lainnya sementara diblok/ditahan melalui sudut penyalannya. Melihat kenyataan tersebut kita dapat menganalisa bahwa konverter ganda yang bekerja pada empat kuadran ini sama dengan kerja penyearah dalam mencatu motor DC.

Mengacu pada persamaan (2.1), untuk mencatu beban tersebut maka dibutuhkan tegangan sumber:

$$V_a = \frac{3V_m}{\pi} \cos \alpha$$

Tegangan sumber minimum, yaitu dengan menganggap $\cos \alpha = 1$, didapat

$$\begin{aligned} V_m &= \frac{V_a \pi}{3} \\ &= \frac{230\pi}{3} = 240,85 \text{ volt} \dots\dots\dots (4.1) \end{aligned}$$

dengan V_m adalah tegangan maksimum *line to line*.

Pada pengendalian tanpa arus sirkulasi yang perlu diantisipasi adalah keadaan konduksi arus diskontinyu. Pengujian simulasi ini bertujuan untuk mencari batas antara arus konduksi kontinyu dan diskontinyu

Batas dimana dari keadaan konduksi kontinyu dan diskontinyu pada penyearah tiga fasa terkontrol penuh adalah dimulai dengan tampaknya sudut pemadaman β dititik $2\pi/3 + \alpha$. Nilai ini dapat disubstitusikan pada Persamaan (2.8) dan menghasilkan putaran motor kritis ω_{mc} .

$$\omega_{mc} = \frac{V_a R_a}{Z K} \left[\frac{\sin\left(\alpha + \frac{2\pi}{3} - \psi\right) - \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3} - \psi\right) \exp\left\{\left(-\frac{\pi}{3}\right) \cot \psi\right\}}{1 - \exp\left\{\left(-\frac{\pi}{3}\right) \cot \psi\right\}} \right]$$

rad/det

$$\text{dengan } K = \frac{V_a - I_a R_a}{\omega_m}$$

$$K = \frac{230 - 19 \cdot 0,65}{183,26} = 1,19 \text{ V/rad/det}$$

$$Z = \sqrt{R_a^2 + (\omega L_a)^2}$$

$$Z = \sqrt{0,615^2 + (2\pi \cdot 50 \cdot 45 \cdot 10^{-3})^2} = 14,15 \text{ } \Omega$$

$$\psi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L_a}{R_a}\right)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{2\pi \cdot 50 \cdot 45 \cdot 10^{-3}}{0,615} \right) = 1,527 \text{ rad}$$

Pada sudut penyalaan 60° , putaran kritis motor

$$\omega_{mc} = \frac{240,85 \cdot 0,615}{14,15 \cdot 1,19} \left[\frac{\sin 92,49^\circ - \sin 32,49^\circ (0,956)}{1 \cdot 0,956} \right] = 95,86 \text{ rad/det} \dots\dots (4.2)$$

Arus kritis dari motor

$$\begin{aligned} I_{ac} &= \frac{V_a - K\omega_m}{R_a} = \frac{\frac{3}{\pi} V_m \cos \alpha - K\omega_{mc}}{R_a} \\ &= \frac{\frac{3}{\pi} 240,85 \cos 60^\circ - 1,19 \cdot 95,86}{0,615} = 1,31 \text{ amper} \dots\dots\dots (4.3) \end{aligned}$$

Dan torsi kritisnya

$$\begin{aligned} T_{ac} &= K I_{ac} \\ &= 1,19 \cdot 1,31 = 1,56 \text{ N.m} \dots\dots\dots (4.4) \end{aligned}$$

Torsi kritis ialah suatu nilai batas torsi yang dapat mencapai arus dalam keadaan konduksi kontinyu.

a) Untuk konduksi diskontinyu ($T = 1 \text{ N.m}$)

Operasi konduksi diskontinyu dapat dilihat pada mode II dan mode IV. Dari Persamaan (2.5) didapat

$$\begin{aligned} &\frac{V_m}{Z} \left[\sin(\beta - \psi) - \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3} - \psi\right) \exp\left\{\left(\alpha + \frac{\pi}{3} - \beta\right) \cot \psi\right\} \right] \\ &\quad - \frac{K\omega_m}{R_a} \left[1 - \exp\left\{\left(\alpha + \frac{\pi}{3} - \beta\right) \cot \psi\right\} \right] = 0 \quad \wedge \\ &\frac{240,85}{14,15} \left[\sin(\beta - 87,51^\circ) - \sin 32,49 \exp\left\{\left(\frac{2\pi}{3} - \beta\right) 0,043\right\} \right] \\ &\quad - \frac{1,19\omega_m}{0,615} \left[1 - \exp\left\{\left(\frac{2\pi}{3} - \beta\right) 0,043\right\} \right] = 0 \quad \wedge \\ &17,02 \left[\sin(\beta - 87,51^\circ) - 0,588 \exp(-0,043\beta) \right] \\ &\quad - 1,937\omega_m \left[1 - 1,095 \exp(-0,043\beta) \right] = 0 \quad \wedge \dots\dots\dots (4.5) \end{aligned}$$

Sedangkan dari Persamaan (2.7)

$$\begin{aligned} \omega_m &= \frac{V_m \{\cos(\alpha + \pi/3) - \cos \beta\}}{K(\beta - \alpha - \pi/3)} - \frac{\pi R_a}{3K^2(\beta - \alpha - \pi/3)} T_a \\ &= \frac{240,85 \{\cos 120^\circ - \cos \beta\}}{1,19(\beta - 2\pi/3)} - \frac{0,615 \pi_a}{3 \cdot 1,19^2(\beta - 2\pi/3)} \quad (1) \text{ rad/det.....(4.6)} \end{aligned}$$

Pemecahan secara iterasi^{*)} dari Persamaan (4.5) dan (4.6) diatas didapat

$$\beta = 172,31^\circ$$

dengan memasukkan nilai β dari salah satu persamaan diatas maka didapat

$$\omega_m = 148,77 \text{ rad/det}$$

b) Untuk konduksi kontinyu ($T = 20 \text{ N.m}$)

Dari Persamaan (2.2)

$$\begin{aligned} \omega_m &= \frac{3V_m}{\pi K} \cos \alpha - \frac{R_a}{K^2} T_a \\ &= \frac{3 \cdot 240,85}{1,19\pi} \cos 60^\circ - \frac{0,615}{1,19^2} (20) = 87,95 \text{ rad/det.....(4.7)} \end{aligned}$$

Dari dua contoh diatas terlihat bahwa pada konduksi diskontinyu putaran motor lebih tinggi. Namun demikian pada daerah ini putaran akan cepat berubah terhadap perubahan torsi, sehingga tidak lagi linier.

Pada pengendalian konverter ganda tanpa arus sirkulasi konduksi diskontinyu ini sebisa mungkin dihindari. Untuk mengurangi bahkan mengeliminasi konduksi diskontinyu ini dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu

1. Menambahkan torsi beban minimum
2. Menambahkan induktansi tambahan yang dirangkai seri dengan kumparan jangkar

Simulasi dibawah ini akan menjelaskan bagaimana perubahan dari unsur diatas dapat mempengaruhi kondisi arus konduksi kontinyu dan diskontinyu.

Dalam praktisnya biasanya beban dianggap sebagai gangguan (*disturbance*) sehingga sulit untuk dikendalikan. Maka yang sering dilakukan adalah cara kedua yaitu menambahkan induktansi tambahan yang dirangkai seri

^{*)} Program perhitungan iterasi dalam menentukan β dapat dilihat di lampiran I hal I.6

dengan kumparan jangkar dan menganggap nilai rata-rata beban minimum dari motor sebagai acuan.

Nilai induktansi tambahan yang tepat untuk sembarang sudut penyalaan dapat ditentukan melalui Persamaan (2.20).

$$I_a = \frac{3V_m}{\pi\omega L} \left[\left(1 - \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \right) \sin \alpha \right] = I_a \quad A$$

Karena nilai $T_a = KI_a$, maka

$$L = \frac{3V_m K}{\pi\omega T} \left[\left(1 - \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \right) \sin \alpha \right]$$

Seperti pada Gambar 2.3 atau data yang tertera dilampiran, torsi kritis terbesar dicapai pada sudut penyalaan $\alpha = 90^\circ$ dan jika torsi minimum dipilih $T = 1 \text{ N.m}$, maka

$$L = \frac{3240,85 \cdot 1,19}{\pi \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1} \left[\left(1 - \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \right) \sin 90^\circ \right] = 0,081 \quad H \dots\dots\dots (4.8)$$

Sehingga induktor tambahannya adalah

$$L_c = L - L_a$$

$$L_c = 0,0812 - 0,045 = 0,0362 \quad H \dots\dots\dots (4.9)$$

Dengan menjalankan program yang tertera dalam lampiran^{*)}, Gambar4.1 akan didapat, garis yang melengkung pada gambar tersebut menunjukkan batas antara konduksi kontinyu dan diskontinyu karena dibentuk dari nilai torsi dan putaran kritis pada semua sudut penyalaan^{**)}. Nilai L_c juga dapat dilihat melalui "saran" yang terlihat setelah program di-*running*. Nilai ternormalisasi disini diambil dari nilai maksimum suatu besaran. Didalam perhitungan ternormalisasi, ternormalisasi bernilai satu yang menandakan nilai maksimum dari suatu besaran^{***)}.

*) Lihat lampiran I hal L1-L5
 **) Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.3
 ***) Contoh pengambilan nilai ternormalisasi dapat dilihat persamaan (2.13) dan (2.14) hal 25-51

Pengendalian tanpa arus sirkulasi

1. Contoh

Parameter-parameter motor
Putaran (rpm) = 1750
Arus Jangkar (A) = 19
Tegangan Jangkar (V) = 230
Resistansi Jangkar (ohm) = 0.615
Induktansi Jangkar (mH) = 45
Induktansi Tambahan (mH) = 0
Tegangan Medan (V) = 230
Resistansi Medan (ohm) = 352
Induktansi Medan (H) = 45
Frekuensi (Hz) = 50
Torsi Jangkar Minimum (N.m) = 1

2. Mengisi parameter motor sendiri
pilih salah satu (Nomornya saja) = 1

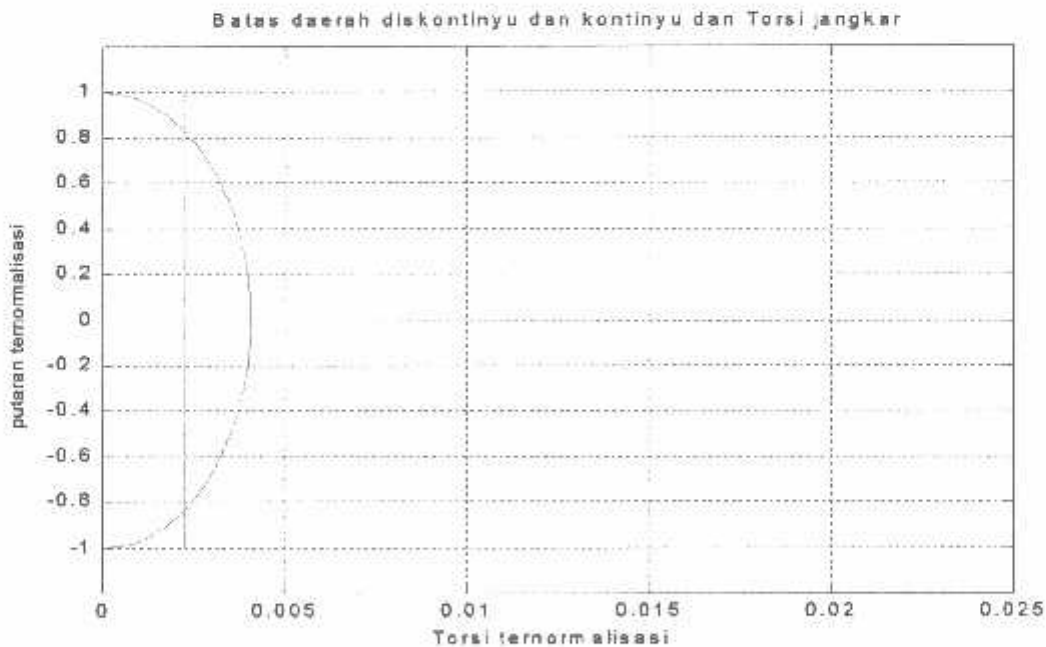
=== Saran ===

Untuk tetap menjaga arus kontinyu pada semua sudut penyalaan
Tambahkan induktor ,minimal
 L_c (mH) = 36.1981

Ingin menambahkan induktor ?

1. ya
2. Tidak

Ya atau Tidak (nomornya saja) =



Gambar 4.1 Karakteristik Mekanik Tanpa Induktor Tambahan

Garis lurus yang berada disebelah kiri dari garis lengkung pada gambar diatas mempresentasikan keadaan arus konduksi diskontinyu karena torsi minimumnya kurang dari nilai torsi kritis. Jika torsi minimum tersebut ditambahkan maka garis lurus tersebut akan bergeser ke kanan. Namun apabila ditambahkan induktansi tambahan yang diseri dengan kumparan jangkar maka batas lengkung tersebut akan bergeser ke kiri. Dalam hal ini besar nilai induktansi tambahan dapat diambil dari “saran” pada program dalam Gambar 4.1, yaitu $L_c = 36,1981$ mH. Gambar 4.2 adalah menjelaskan bagaimana perubahan itu terjadi.

Pengendalian tanpa arus sirkulasi

=====

1. Contoh

Parameter-parameter motor

Putaran (rpm) = 1750
 Arus Jangkar (A)= 19
 Tegangan Jangkar (V)= 230
 Resistansi Jangkar (ohm) = 0.615
 Induktansi Jangkar (mH) = 45
 Induktansi Tambahan (mH) = 0
 Tegangan Medan (V)= 230
 Resistansi Medan (ohm) = 352
 Induktansi Medan (H) = 45
 Frekuensi (Hz)= 50
 Torsi Jangkar Minimum (N.m)= 1

2. Mengisi paramater motor sendiri
 pilih salah satu (Nomornya saja)= 2

Masukkan Parameter-parameter motor

Putaran (rpm) = 1750
 Arus Jangkar (A)= 19
 Tegangan Jangkar (V)= 230
 Resistansi Jangkar (ohm) = 0.615
 Induktansi Jangkar (mH) = 45
 Induktansi Tambahan (mH) = 36.2
 Tegangan Medan (V)= 230
 Resistansi Medan (ohm) = 352
 Induktansi Medan (H) = 45
 Frekuensi (Hz)= 50
 Torsi Jangkar Minimum (N.m)= 1

=== Saran ===

Untuk tetap menjaga arus kontinyu pada semua sudut penyalaan
 Tambahkan induktor ,minimal

L_c (mH) = 0.0000

Ingin menambahkan Induktor ?

1. ya
2. Tidak

Ya atau Tidak (nomornya saja) - 2

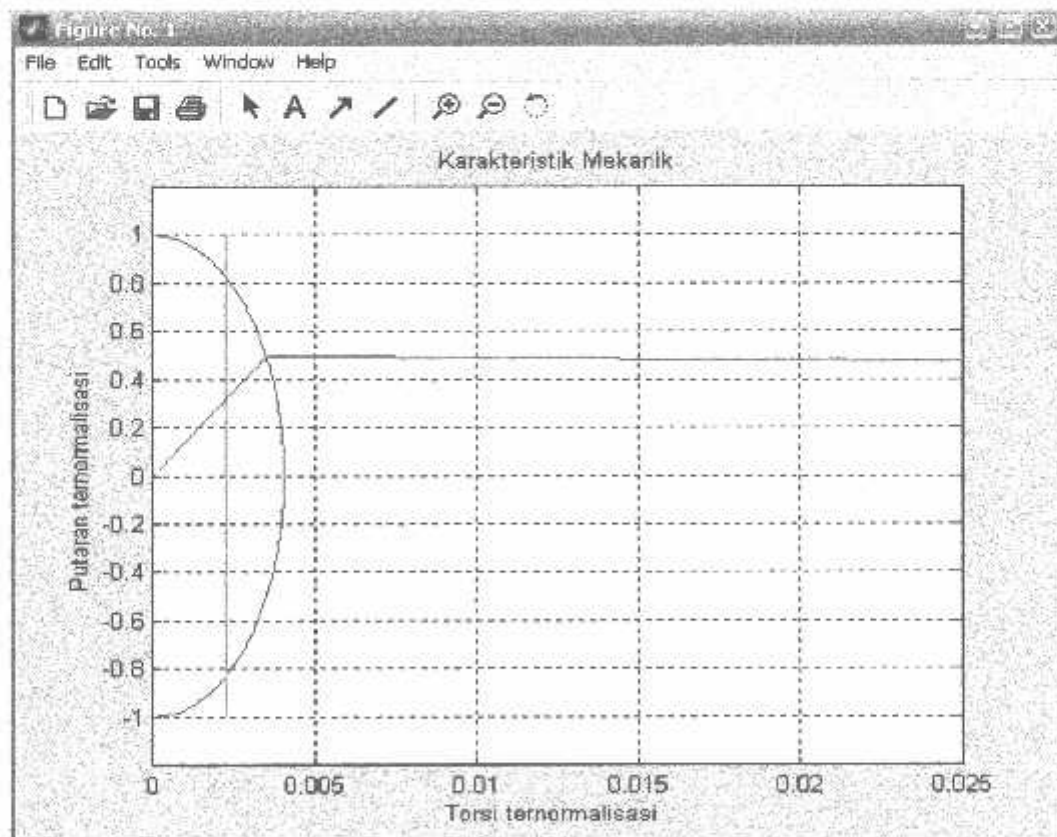
Penentuan nilai induktansi tambahan yang tepat akan memperbaiki performansi dari motor baik kestabilannya, kecepatan responnya maupun efisiensinya.

Pada pengendalian tanpa arus sirkulasi, beban dalam hal ini motor DC akan bekerja pada kuadran I jika sudut penyalan pada konverter negatif diblok, yaitu disetting pada nilai tertinggi (180°) dan sudut penyalan pada konverter positif diatur. Kerja pada kuadran III dicapai pada saat sudut penyalan pada konverter positif diblok dan mengatur sudut penyalan pada konverter negatif. Gambar dibawah ini menunjukkan kerja *motoring* dari motor

Karakteristik mekanik

Masukkan nilai Alpha 0 s/d 180 derajat

Alpha (deg) = 60



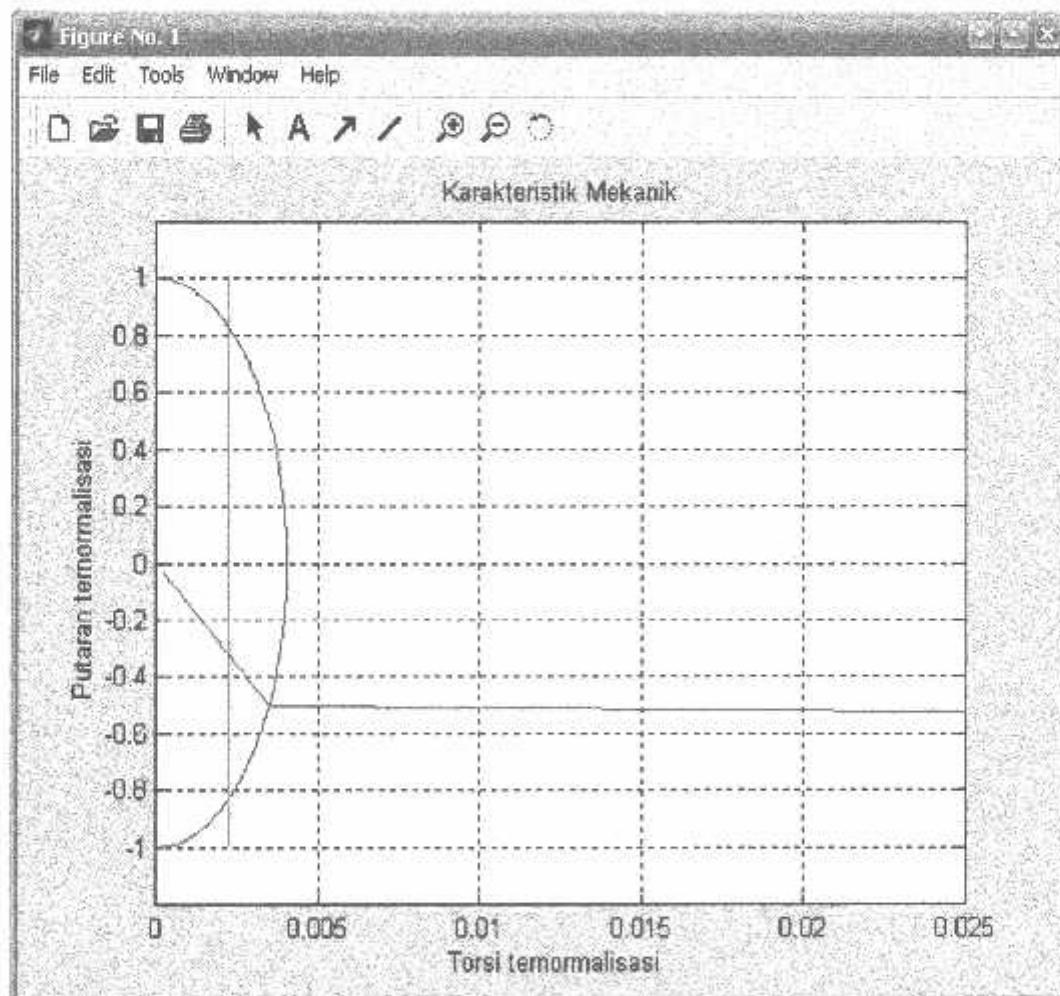
Gambar 4.2 Kerja Motoring

Untuk memperkerjakan motor DC dalam kuadran II dan IV, maka sudut penyalaan diset lebih besar dari 90° dan pada poros motor harus diputar lebih tinggi dari pada putaran motor tanpa beban pada saat dicatu oleh salah satu konverter diatas. Dengan torsi beban yang lebih besar dari pada torsi jangkar dan searah, maka terjadi pengereman regeneratif seperti pada Gambar 4.2. Pada kuadran II terjadi pengereman motor pada arah maju, sedang pengereman motor pada arah mundur terjadi di kuadran IV.

Karakteristik mekanik

Masukkan nilai Alpha 0 s/d 180 derajat

Alpha (deg) = 120



Gambar 4.3 Kerja Regenerating

Gambar diatas didapat dengan memberikan sudut penyalaan sebesar 120° .

Sedang dibidang rangkaian kontrolnya, performansi dari pengendalian ini dapat ditingkatkan dengan menambah keakurasian dari kecepatan pendeteksi arus nol yang digunakan sebagai pengambil keputusan untuk memindahkan konverter yang aktif.

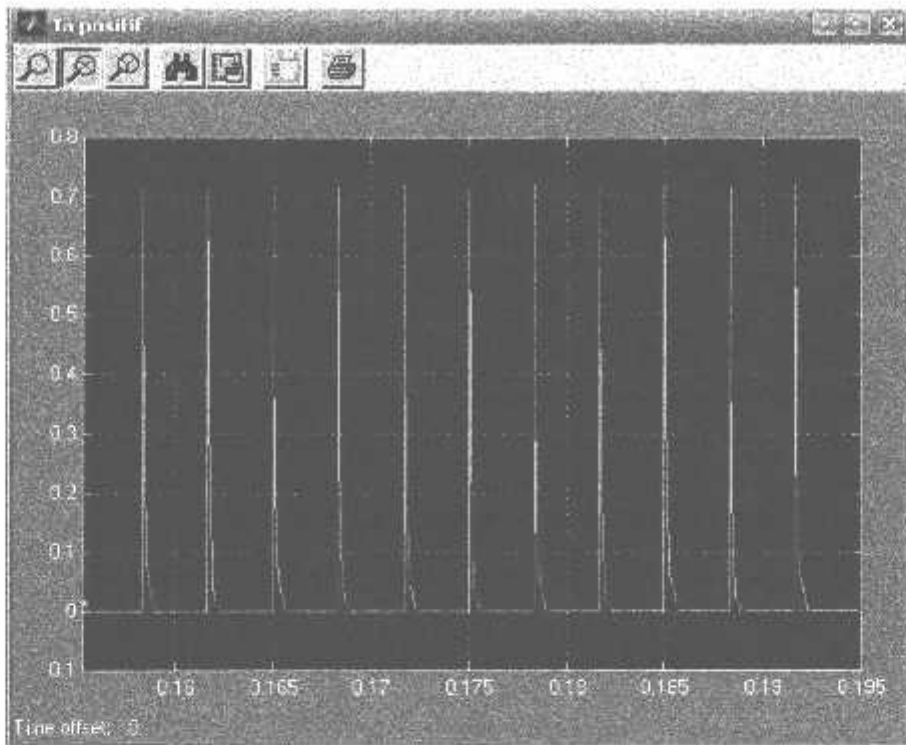
4.2 Pengendalian Dengan Arus Sirkulasi

Pada pengendalian dengan arus sirkulasi dimana sudut penyalaan di setting $\alpha_1 + \alpha_2 = \pi$, untuk α_1 dan α_2 berturut-turut merupakan sudut penyalaan konverter positif dan konverter negatif.

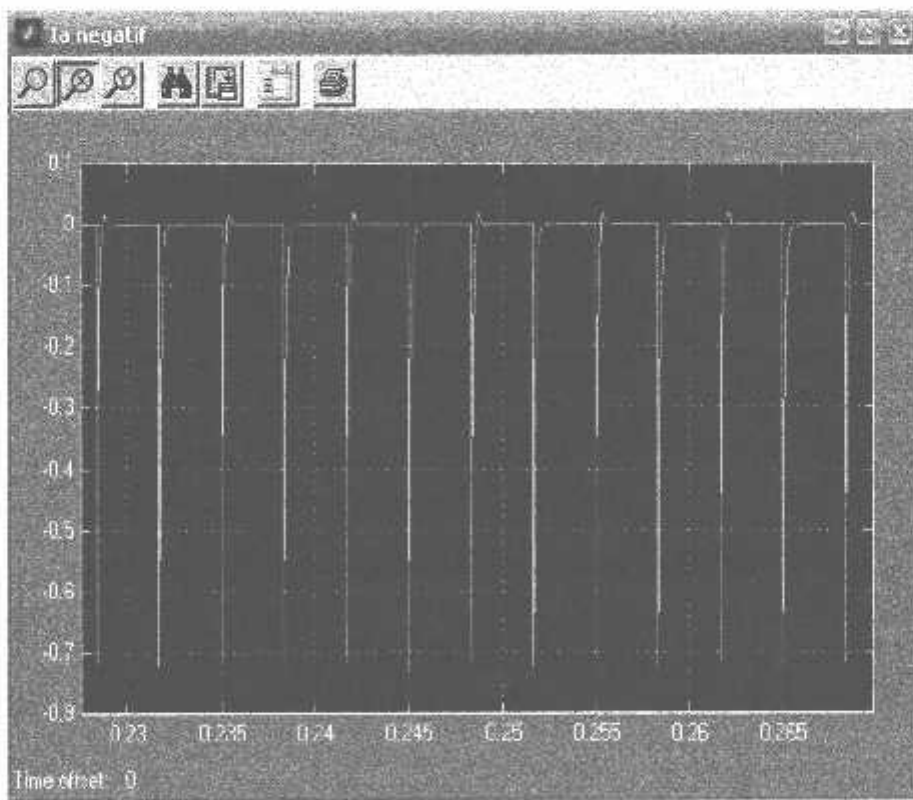
Konverter ganda dapat memperkerjakan beban motor DC didalam empat kuadran. Pada pengendalian dengan arus sirkulasi, jika sudut penyalaan yang diterapkan pada konverter positif $0^\circ < \alpha_1 < 90^\circ$, maka saat ini konverter positif bertindak sebagai penyearah yang memutar motor DC sedangkan konverter negatif bertindak sebagai inverter yang melakukan pangereman regeneratif. Dengan melihat Tabel 2.2, jika konverter positif merasakan bekerja pada kuadran I maka pada saat itu konverter negatif bekerja pada kuadran II. Sedangkan jika sudut penyalaan yang diterapkan pada konverter positif $90^\circ < \alpha_1 < 180^\circ$, maka saat ini konverter negatif bertindak sebagai penyearah yang memutar motor DC sedangkan konverter positif bertindak sebagai inverter yang melakukan pangereman regeneratif. Sehingga jika konverter negatif merasakan bekerja pada kuadran III maka pada saat itu konverter positif bekerja pada kuadran IV.

Pada pengendalian dengan arus sirkulasi, karena sudut penyalaan pada masing-masing konverter dipicu secara bersamaan maka memungkinkan mengalirnya arus sirkulasi pada kedua konverter yang dipasang anti paralel tersebut. Keberadaan arus ini tidak melalui beban. Dengan demikian pada saat sudut penyalaan pada konverter positif di picu pada $0^\circ < \alpha_1 < 90^\circ$, maka pada saat ini konverter positif menyuplai daya untuk arus beban dan arus sirkulasi sedangkan konverter negatif hanya mengalirkan arus sirkulasi saja.

Gambar 4.5 dibawah ini menunjukkan bagaimana arus yang mengalir pada dua konverter tersebut.



Gambar 4.4 Arus Keluaran Konverter Positif



Gambar 4.5 Arus Keluaran Konverter Negatif

Pada gambar diatas α_1 dipicu pada sudut penyalaan 60° . Pada konverter positif terlihat arus yang mengalir berada pada sumbu y positif. Arus sirkulasi dengan puncak yang tinggi akan menurunkan *rated thyristor*.

Untuk mengantisipasi hal diatas maka dipasang *circulating current reactor* sebagai pembatas arus. Penambahan *circulating current reactor* pada konverter ganda diharapkan dapat menurunkan puncak dari gelombang arus. Namun demikian sekali lagi bahwa penambahan nilai induktansi yang terlalu besar akan mengakibatkan turunya efisiensi dan lambatnya respon transien. Sehingga pemilihan nilai induktansi yang tepat dalam hal ini juga diperlukan.

Untuk menentukan besarnya nilai *circulating current reactor* yang baik harus mengetahui nilai teraan daya thyristor. Besarnya nilai *circulating current reactor* kritis atau batas minimum dari *circulating current reactor* dapat ditentukan dengan mengetahui arus sirkulasi maksimal yang diijinkan. Besar arus sirkulasi maksimal yang diijinkan mengalir adalah

$$I_{rm} = T_{rat}/\sqrt{3} \cdot I_a \quad \text{A} \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

Dimana : I_{rm} – arus sirkulasi maksimal (A)
 T_{rat} – teraan daya thyristor (VA)

Dengan menulis kembali Persamaan (2.32),

$$I_r = \frac{\sqrt{3}V_m}{\omega L_r} \left[\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) - \sin\alpha_1 \right] \quad \text{A}$$

maka arus sirkulasi maksimum mengalir pada saat $\omega t = 2\pi/3$ dan $\alpha_1 = 60^\circ$

$$\begin{aligned} I_r &= \frac{\sqrt{3}V_m}{\omega L_r} \left[\sin\left(\frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{6}\right) - \sin 60^\circ \right] \\ &= \frac{\sqrt{3}V_m}{\omega L_r} \left[1 - \frac{1}{2}\sqrt{3} \right] \quad \text{A} \quad \dots\dots\dots (4.11) \end{aligned}$$

dan

$$L_r = \frac{\sqrt{3}V_m}{\omega I_r} \left[1 - \frac{1}{2}\sqrt{3} \right] \quad \text{H} \quad \dots\dots\dots (4.12)$$

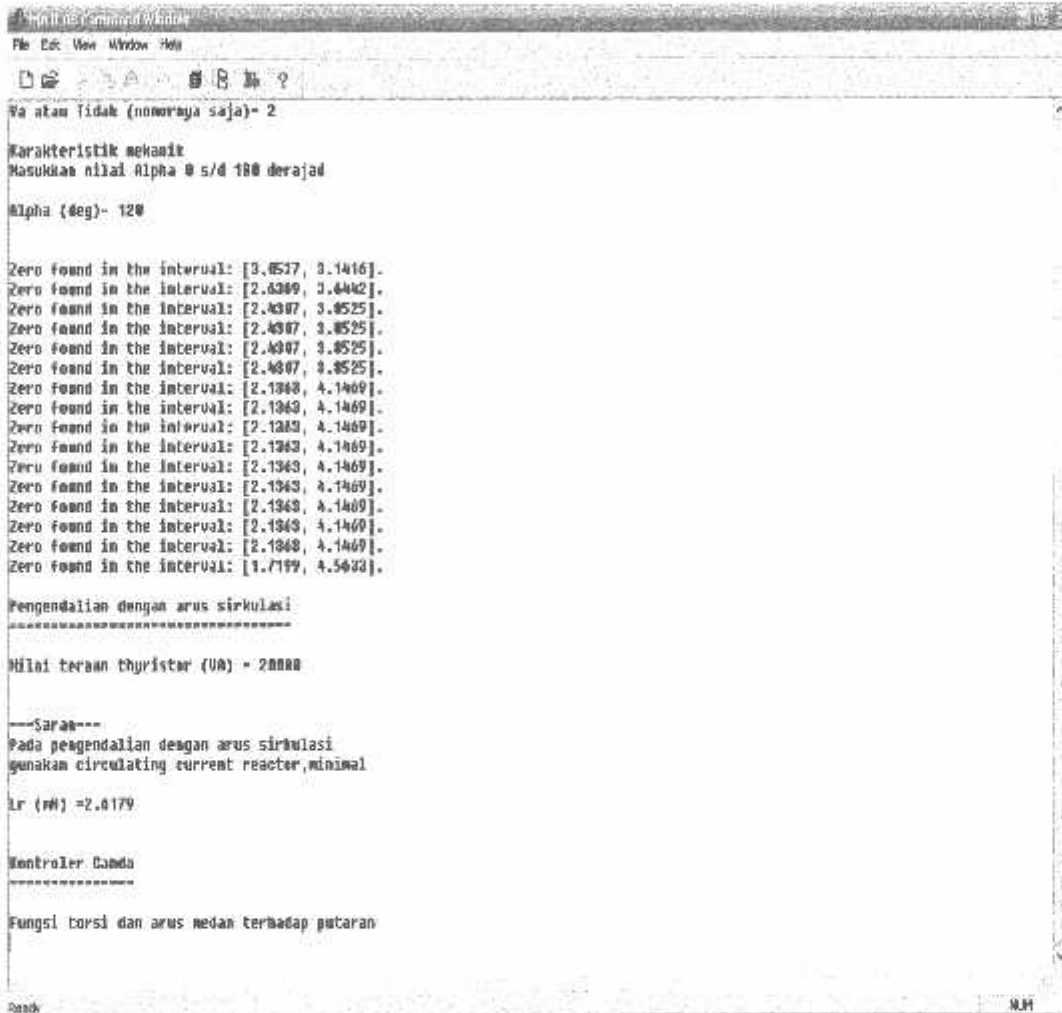
Sebagai permisalan, marilah kita ambil teraan thyristor sebesar 22 kVA. Melalui Persamaan (4.10) besarnya arus sirkulasi maksimum adalah

$$I_{\text{min}} = 22000/230 - 19 = 76,65 \text{ A} \dots\dots\dots(4.13)$$

Dengan Persamaan (4,12), maka besarnya *circulating current reactor* adalah

$$L_r = \frac{\sqrt{3}240,85}{2\pi \cdot 50 \cdot 76,65} \left[1 - \frac{1}{2}\sqrt{3} \right] = 2.32 \text{ mH} \approx 2,5 \text{ mH}$$

Atau dengan me-running program simulasi maka nilai diatas bisa didapat



Pengendalian dengan arus sirkulasi
=====

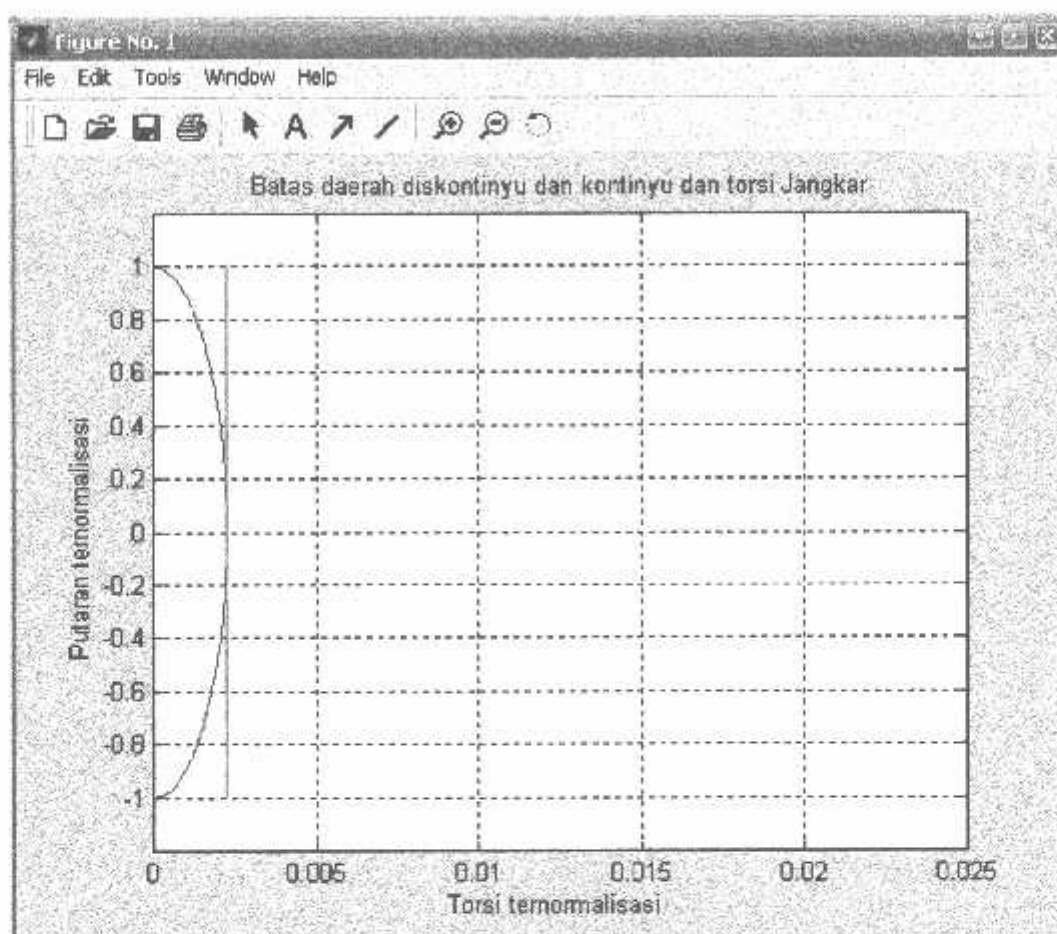
Nilai teraan thyristor(W) = 22000

=== Saran ===

Pada pengendalian dengan arus sirkulasi
gunakan circulating current reaktor, minimal

Lr (mH) = 2.3209

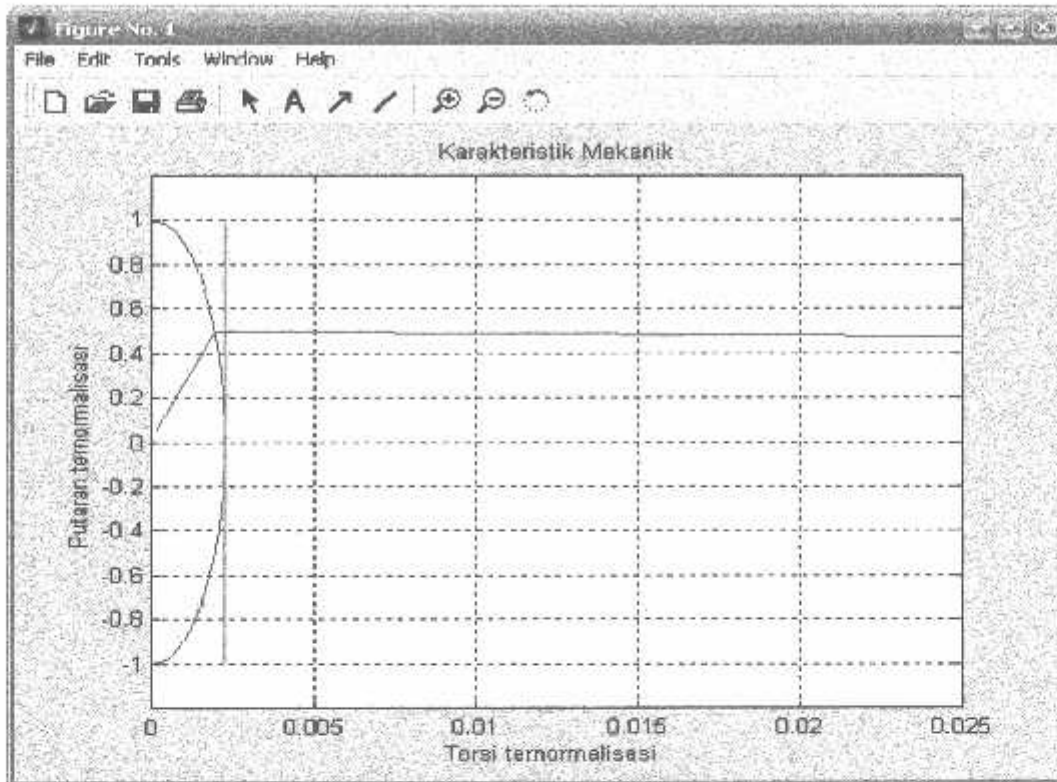
Hasil dari rangkaian simulasi setelah sistem penggerak ditambahkan induktor yang terdapat dalam program Simulink adalah sebagai berikut :



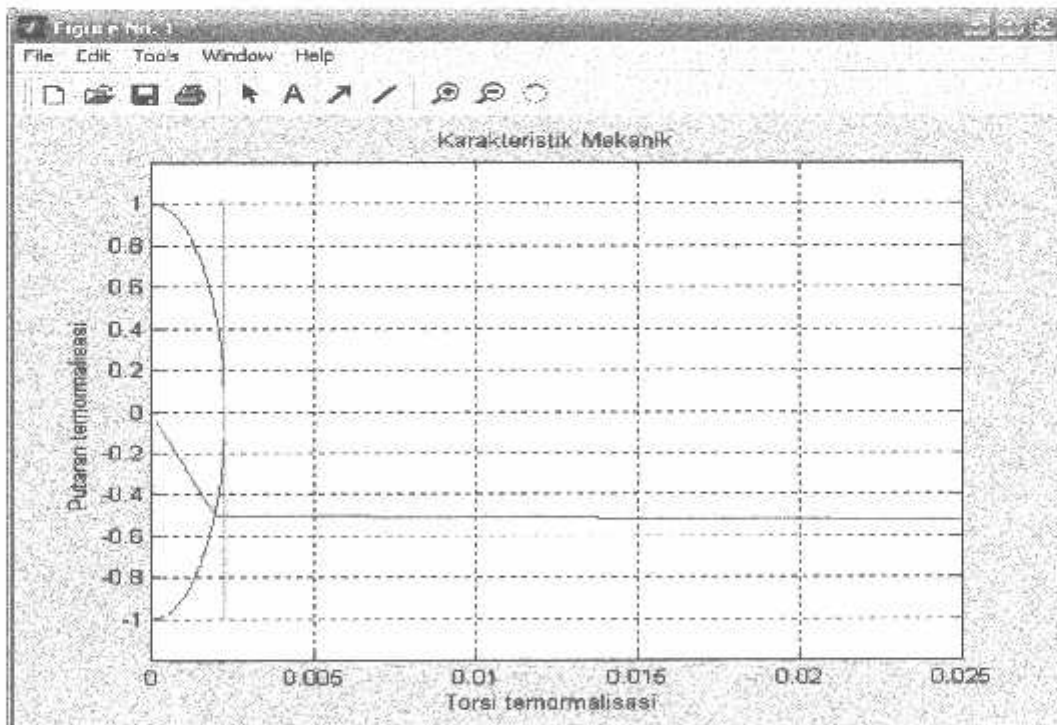
Gambar 4.6 Keadaan Arus Kontinyu Dan Diskontinyu Setelah Penambahan *Circulating Current Reactor*

Selain menurunkan rated dari thyristor, keberadaan arus sirkulasi ini juga dapat menurunkan efisiensi karena terlalu banyak arus mengalir dan tidak melalui beban. Keberadaan *circulating current reactor* juga berfungsi untuk membatasi besar arus yang mengalir pada rangkaian sistem penggerak keseluruhan.

Sementara itu untuk karakteristik mekanik motor DC penguat terpisah yang disuplai oleh konverter ganda 3 fasa tergambar di bawah ini :



Gambar 4.7 Karakteristik Mekanik Motor DC Penguat Terpisah Dengan $\alpha = 60^\circ$



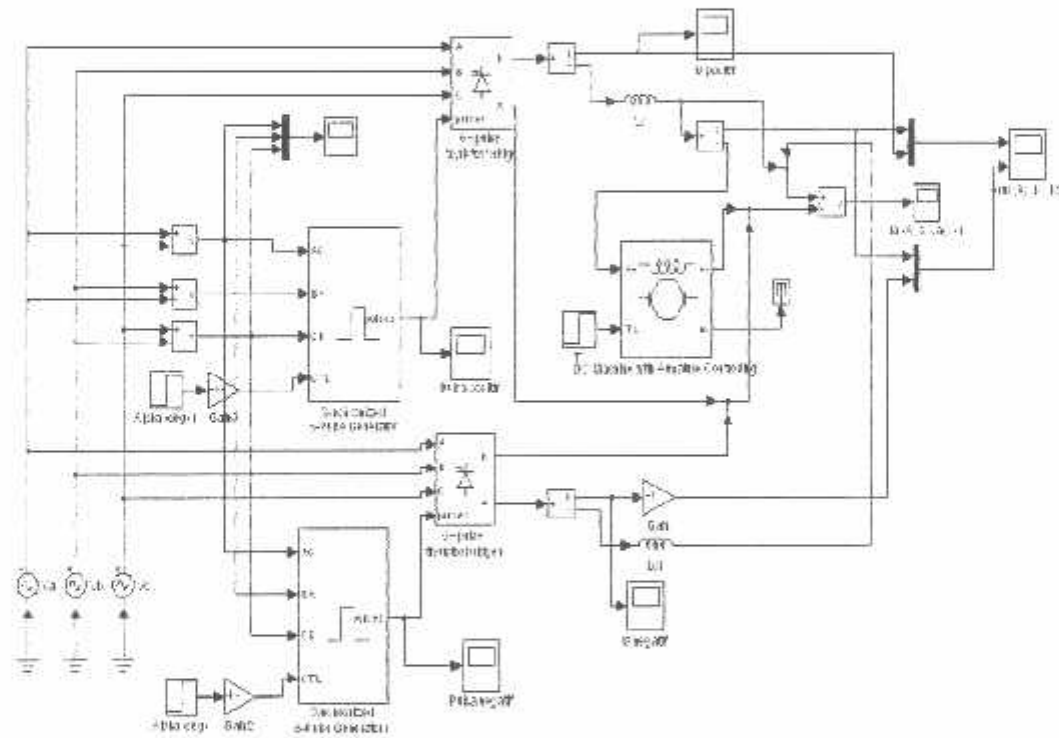
Gambar 4.8 Karakteristik Mekanik Motor DC Penguat Terpisah Dengan $\alpha = 120^\circ$

Dapat dilihat pada gambar di atas bahwa respon waktu motor DC penguat terpisah untuk mencapai keadaan operasi *steady state* lebih cepat daripada sebelum penambahan *circulating current reactor*.

4.3 Metode Kontroler Ganda

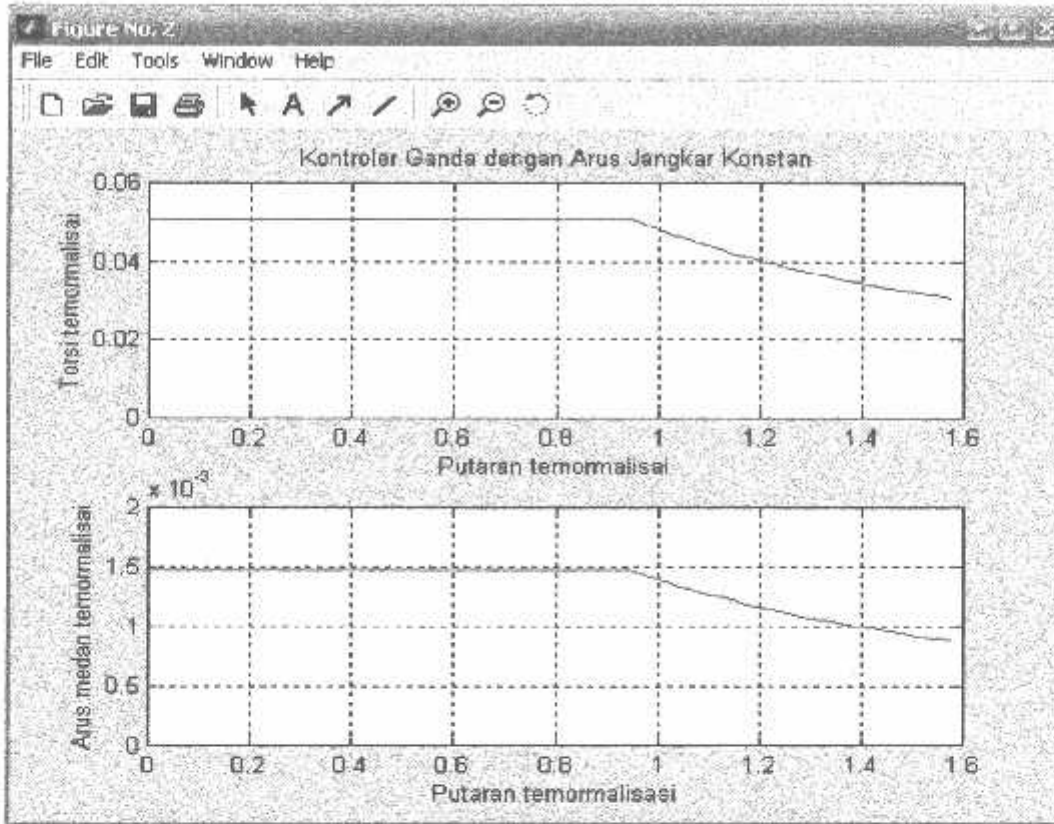
Metode kontroler ganda dilakukan dengan mengatur tegangan jangkar dan menjaga arus medan konstan pada nilai nominalnya pada saat putaran dibawah putaran nominalnya, sedangkan pada putaran diatas putaran nominalnya dilakukan pengaturan arus medan dan menjaga tegangan jangkar konstan pada nilai nominalnya.

Kontroler Ganda
=====



Gambar 4.9 Rangkaian Simulasi Mat-lab

Sementara itu hasil dari program utama dapat dilihat pada gambar di bawah ini :



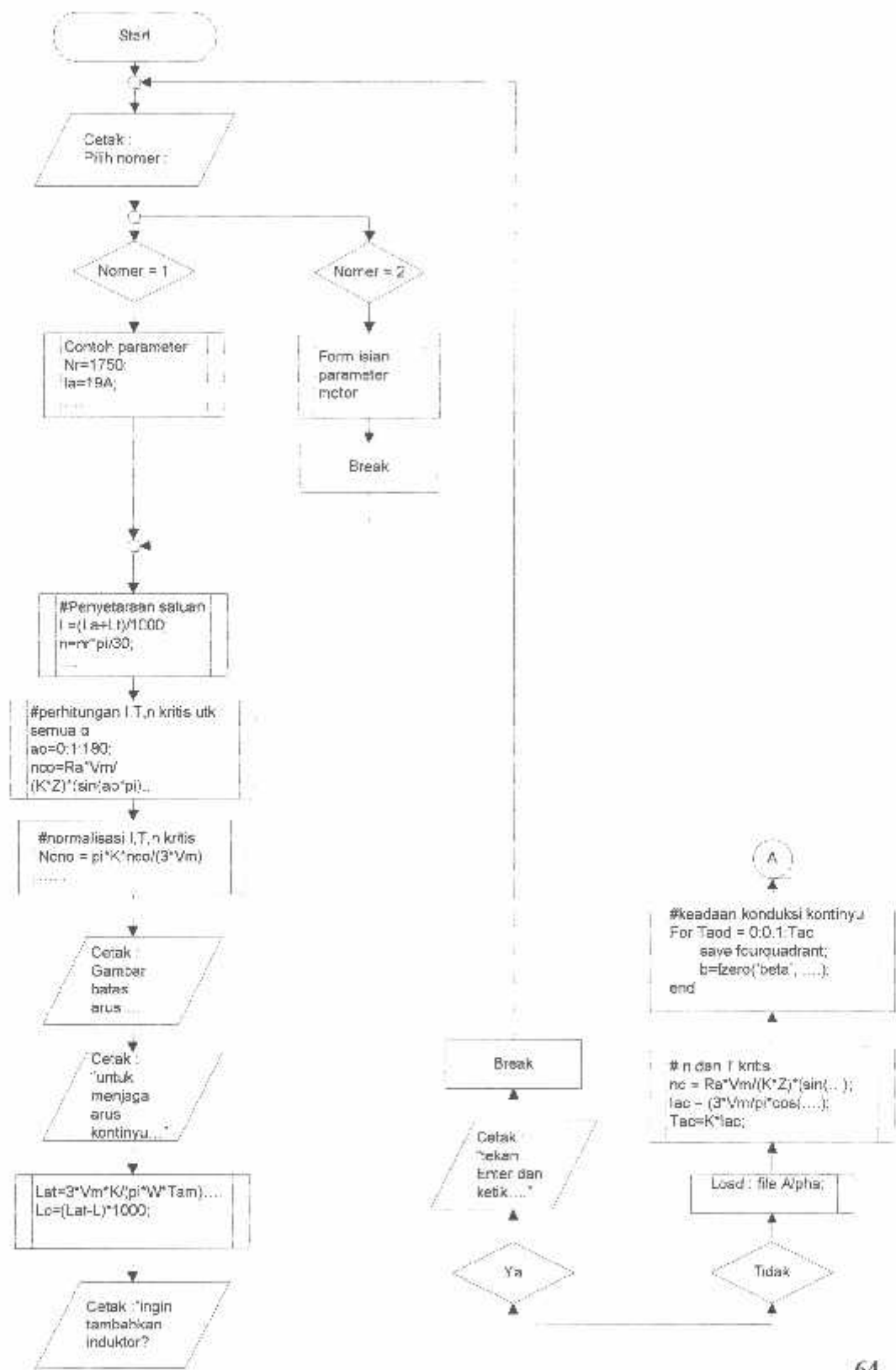
Gambar 4.10. Metode Kontroler Ganda

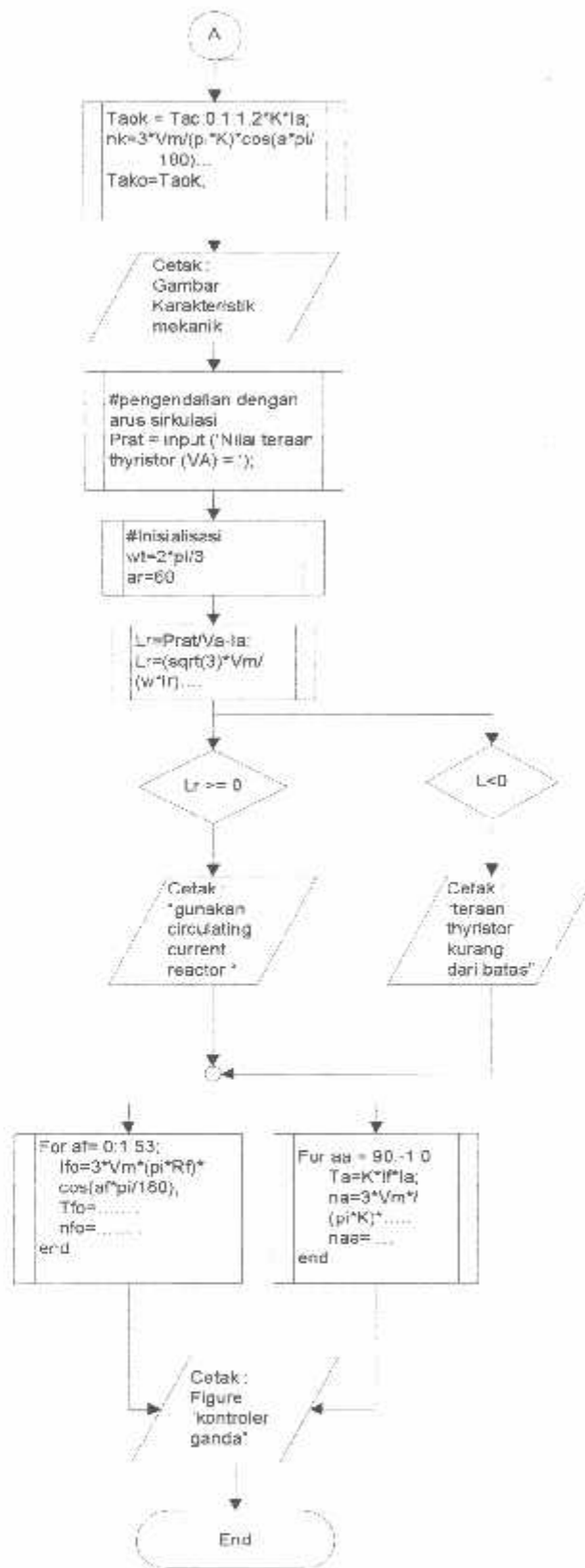
Pada pengaturan kontroler ganda, jika putaran yang diterapkan melebihi dari putaran nominalnya, maka torsi yang dihasilkan menurun. Jadi metode kontroler ganda, hanya mengatur arus medan ketika diinginkan putaran genting, yaitu putaran diatas putaran nominalnya dengan torsi yang rendah.

Pada bab empat telah ditentukan besarnya nilai torsi ternormalisasi, sedangkan arus medan yang digunakan sebagai dasar untuk menentukan besarnya arus ternormalisasi diambil dari arus medan maksimum yang diperbolehkan, yaitu $1,4 I_f^{*}$.

⁴⁾ Lihat bab II hal 39

Flowchart dari program utama dapat dilihat pada bagian ini :





BAB V KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisa uji simulasi pada skripsi ini, maka penyusun dapat menarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Metode pengendalian tanpa arus sirkulasi dan dengan arus sirkulasi sebagai metode yang sering digunakan dalam pengaturan motor DC memiliki kekurangan dan kelebihan tersendiri yang ditunjukkan oleh kinerja motor DC. Metode pengendalian tanpa arus sirkulasi mempunyai efisiensi yang baik, mengingat komponen yang digunakan tidak terlalu banyak sehingga jatuh tegangan dalam sistem tidak terlalu besar. Sedangkan metode pengendalian dengan arus sirkulasi memiliki respon waktu yang baik untuk segera mencapai kondisi operasi *steady state* dari motor DC penguat terpisah.
2. Metode pengendalian dengan arus sirkulasi mempunyai arus keluaran yang kontinu disebabkan adanya penambahan induktor. Hal ini akan menyebabkan kinerja motor menjadi lebih baik. Sedangkan metode pengendalian tanpa arus sirkulasi tidak mempunyai arus keluaran yang kontinu untuk menjadikan kinerja yang baik bagi motor DC .
3. Penambahan induktor tambahan sebagai circulating current reactor mempunyai dampak yang signifikan bagi kinerja motor DC penguat terpisah. Induktor ini juga berfungsi untuk membatasi arus yang masuk terminal motor DC pada saat operasi pertama dan selanjutnya.

5.2 Saran

Untuk pengembangan lebih lanjut dari skripsi ini maka penyusun mengemukakan beberapa saran sebagai berikut :

1. Perlu dilakukan studi lebih lanjut untuk menggunakan metode *close loop* untuk memperoleh hasil yang lebih baik.

2. Untuk mendukung metode *close loop* maka perlu juga digunakan komponen mikrokontroler sebagai otak pengendali proses otomatisasi.
3. Penggunaan PLC dalam sistem penggerak motor DC diperlukan untuk menunjang performa sistem itu sendiri.

DAFTAR PUSTAKA

- Dewan S.B., A. Straughen. 1975. *Power Semiconductor Circuits*. A. Wiley Interscience Publication. Jhon Wiley and Sons.
- Dewan S.B., G.R. Slemon and A. Straughen. 1984. *Power semiconductor Drivers*. Singapore: John Wiley and Sons.
- Duane Hanselman and Brush Littlefield. 1997. *The Student Edition of Matlab version 5*, New Jersey: Prentice Hall, Inc.
- Dubey, G.K. SR. Doradla, A. Joshi and RMK. Sinha. 1986. *Thyristorised Power controller*. New Delhi: Wiley Eastern Limited.
- Dubey, Gopal K. 1993. *Power Semiconductor Controller Drivers*. Singapore: Pretince Hall.
- Fisher, Marvin J. 1991. *Power Electronics*. Syntax International, PTE Limited.
- Fitzgerald, A.E., Charles Kingsley Jr., Stephen D. Umans. 1986. *Mesin-mesin Listrik*. Edisi keempat. Terjemahan Djoko Achyanto. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Journal. 1997. "Simulink Dinamik Sistem Simulation". The Mathwork Inc.
- Lander, Cyril W. 1993. *Power Electronics*. Third Edition. Singapore: McGraw-Hill Book Company.
- Rashid M.H. 1993. *Power Electronics : circuit, device and aplications*. New Jersey: Prentice Hall, Inc.
- Sen, P.C. 1980. *Power Electronics*. New Delhi: Tata McGraw Hill Publishing Company Limited.
- Slemon, Gordon R. 1992. *Electric Machine and Drivers*. Addison Wisley, Inc.
- Sumanto. 1991. *MesinArus Searah*. Yogyakarta: Penerbit Andi Offset.
- The Power Design. 1998. "An Application A Four Quadrant DC Drivers". http://www.powerdesign.com/pe_html.zip.
- Vithayathil, Joseph. 1976. *Power Electronics Principles and aplications*. Mc Graw Hill, Inc.
-



LEMBAR BIMBINGAN SKRIPSI

- | | |
|-------------------------------------|---|
| 1. Nama | : DEDY IARAWAN |
| 2. NIM | : 98.12.125 |
| 3. Jurusan | : Teknik Elektro S-1 |
| 4. Konsentrasi | : Teknik Energi Listrik |
| 5. Judul Skripsi | : Simulasi Sistem Pengendalian Motor DC
Dengan Konverter Ganda Empat
Kuadran Menggunakan Perangkat Lunak
Mat-Lab |
| 6. Tanggal Mengajukan Skripsi | : 10 Agustus 2005 |
| 7. Tanggal Menyelesaikan Skripsi | : 30 September 2005 |
| 8. Dosen Pembimbing | : Ir. <u>Widodo Pudji</u> , MT. |
| 9. Telah Dievaluasikan Dengan Nilai | : 80,00 (Delapan Puluh) |

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro S-1

Ir. F. Yudi Limpratmono, MT.
NIP.Y 1039500274

Diperiksa dan Disetujui,
Dosen Pembimbing

Ir. Widodo Pudji, MT.
NIP. 1028700171



FORMULIR BIMBINGAN SKRIPSI

Nama : DEDY IRAWAN
Nim : 98.12.125
Masa Bimbingan : 10 Agustus 2005 ^s/d 10 Februari 2006
Judul Skripsi : Simulasi Pengendalian Motor DC Dengan Konverter Ganda Empat Kuadran Menggunakan Perangkat Lunak MATLAB.

No.	Tanggal	Uraian	Parap Pembimbing
1.	13 - 08 - 2005	Bab I Pendahuluan	
2.	15 - 08 - 2005	Revisi Bab II, Penambahan Teori	
3.	18 - 08 - 2005	Revisi Bab II, Penambahan Sumber Literatur	
4.	22 - 08 - 2005	Revisi Bab III, Perbaikan Tabel	
5.	25 - 08 - 2005	Revisi Bab IV, Gambar Simulasi MATLAB	
6.	29 - 08 - 2005	Revisi Bab IV, Perhitungan	
7.	01 - 09 - 2005	Revisi Bab IV, Perbaikan Flow Chart	
8.	05 - 09 - 2005	Membuat Kesimpulan	
9.	10 - 09 - 2005	Membuat Makalah Seminar	
10.	12 - 09 - 2005	Acc Makalah Seminar	

Malang, 12 September 2005
Dosen Pembimbing

(Ir. Widodo Pudji M, MT)
NIP.Y. 102 8700 171



BERITA ACARA UJIAN SKRIPSI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

Nama Mahasiswa : Dedy Irawan
N.I.M. : 98.12.125
Jurusan : Teknik Elektro S-I
Konsentrasi : Sistem Tenaga.
Judul Skripsi : Simulasi Sistem Pengendalian Motor DC Dengan
Konverter Ganda Empat Kuadran Menggunakan
Perangkat Lunak Mat-Lab

Dipertahankan dihadapan Team Penguji Skripsi Jenjang Sarjana (S-I)
Pada :

Hari : Selasa
Tanggal : 4-10-2005
Dengan Nilai :

Panitia Ujian Skripsi

Ir. Mochtar Asroni, MSME
Ketua

Ir. F. Yudi Limpratmono, MT
Sekretaris

Anggota Penguji

Ir. Teguh Herbasuki, MT
Penguji Pertama

Ir. Eko Nurcahyo
Penguji Kedua



LEMBAR PERBAIKAN TUGAS AKHIR

Dari hasil ujian Komprehensif Jenjang Sarjana (S-I) Jurusan Teknik Elektro
Konsentrasi Sistem Tenaga Diselenggarakan Pada :

Hari : Selasa
Tanggal : 4 Oktober 2005

Telah dilaksanakan perbaikan Skripsi oleh :


Nama Mahasiswa : Dedy Irawan
N.I.M. : 98.12.125
Judul Skripsi : Simulasi Sistem Pengendalian Motor DC Dengan
Konverter Ganda Empat Kuadran Menggunakan
Perangkat Lunak Mat-Lab

Perbaikan meliputi:

No.	Materi perbaikan	Keterangan
1	Pendahuluan	Perbaikan Daftar isi, Gambar, Tabel
2	BAB II	Perbaikan Gambar dan Tulisan


Ir. Teguh Herbasuki, MT
Penguji Pertama

Disetujui/diperiksa
Anggota Penguji


Ir. Eko Nurcahyo, MT
Penguji Kedua

Mengetahui/Menyetujui
Dosen Pembimbing


Ir. Widodo Pudji, MT.

LAMPIRAN I
LISTING PROGRAM (MATLAB 5.3)

1. File script (fourquadrant)

```
clear;
clc,
disp('Pengendalian tanpa arus si*Yulasi');
disp('=====');
% -----
%—Penyerah Tiga Fasa dengan beban Motor DC—
% -----
disp(' ');

% Contoh
disp('1. Contoh');
disp(' Parameter-parameter motor');
disp(' ');
disp(' Putaran (rpm) = 1750');
disp(' Arus Jangkar (A)= 19 ');
disp(' Tegangan Jangkar (V)= 230');
disp(' Resistansi Jangkar (ohm) = 0.615');
disp(' Induktansi Jangkar (mH) = 45');
disp(' Induktansi Tambahan (mH) = 0');
disp(' Tegangan Medan (V)= 230');
disp(' Resistansi Medan (ohm) = 352');
disp(' Induktansi Medan (H) = 45');
disp(' Frekuensi (Hz)= 50');
disp(' Torsi Jangkar Minimum (N.m)= 1');
disp(' ');

% Mengisi parameter motor sendiri
disp('2. Mengisi parameter motor sendiri');
disp(' ');

pilih = input('pilih salah satu (Nomornya saja)= ');
if pilih==1,
    nr = 1750; % (rpm)
    Ia = 19; % (A)
    Va = 230; % (V)
    Ra = 0.615; % (ohm)
    La = 45; % (mH)
    Lt = 0; % (mH)
    Vf = 230; % (V)
    Rf = 352; % (ohm)
    lf = 45; % (H)
    f = 50; % (Hz)
    Tam = 1; % (N.m)
elseif pilih==2,
    disp('Masukkan Parameter-parameter motor');
    disp(' ');
    nr = input('Putaran (rpm) = ');
    Ia = input('Arus Jangkar (A)= ');
    Va = input('Tegangan Jangkar (V)= ');
    Ra = input('Resistansi jangkar (ohm) = ');
    La = input('Induktansi Jangkar (mH) = ');
    Lt = input('Induktansi Tambahan (mH) = ');
    Vf = input('Tegangan Medan (V)= ');
    Rf = input('Resistansi Medan (ohm) = ');
```

```

L = input('Induktansi Medan (H) = ');
f = input('Frekuensi (Hz) ');
Tan = input('Torsi Jangkar Minimum (N.m) = ');
else
    disp('Perhatikan Perintah, Ulangi Lagi Dari awal...!');
    disp(' ');
    disp(' ');
    break
end

%Penyetaraan saluan dan mencari konstanta K
L = (La+Ll)/1000;
n = nr*pi/30;
T = Va-la*Ra;
K = T/n;
If = Vf/Rf;
Kl = K/If;
w = 2*pi*f;
Za = Ra+w*L^2;
Z = abs(Za);
te = angle(Za);
cot = 1/tan(te);
Vm = Va*pi/3;

%Putaran, arus dan torsi kritis untuk semua sudut penyalaan
ao = 0:1:180;
nco = Za*Vm/(K*Z)*(sin(ao*pi/180+2*pi/3-te)-sin(ao*pi/180+pi/3-te)...
    *exp(-pi/3*cot))/(1-exp(-pi/3*cot));
Iaco = (3*Vm/pi*cos(ao*pi/180)-K*nco)/Ra;
Taco = K*Iaco;

%Putaran dan torsi kritis untuk semua sudut penyalaan ternormalisasi
nncn = pi*K*nco/(3*Vm);
Tamno = pi*Ra*Tan/(3*Vm*K)*ones(length(ao));
Tacno = pi*Ra/(3*Vm*K)*Taco;

%Membuat Gambar
figure(1)
hold off; plot(Tacno,nncn,'b');
hold on; plot(Tamno,nncn,'g');
title('Retas daerah diskontinyu dan kontinyu dan Torsi jangkar');
xlabel('Torsi ternormalisasi ');
ylabel('putaran ternormalisasi ');
axis([0,0.025,-1.2,1.2]);
grid
disp(' ');
disp(' ');

? Mencari nilai induktansi minimal agar dapat konduksi kontinyu-
? pada semua sudut penyalaan
disp('--- Saran ---');
disp('Untuk tetap menjaga arus kontinyu pada semua sudut penyalaan');
disp('Tambahkan induktor ,minimal');
La1 = 3*Vm*K/(pi*w*Tan)*(1-pi/(2*sqrt(3))*sin(pi/2));
Lc = (La1-L)*1000;
disp(' ');
disp(sprintf('Lc (mH) = %5.4f',Lc));
disp(' ');

disp('Ingin menambahkan Induktor ?');

```

```

disp('1. ya');
disp('2. Tidak');
disp(' ');
it = input('Ya atau Tidak (nomornya saja) = ');

if it == 1,
    disp(' ');
    disp('Tekan enter dan ketik "fourquadrant" kemudian= ');
    disp('pilih 2 (Mengisi parameter sendiri)');
    break

elseif it == 2,
    % Karakteristik Mekanik
    disp(' ');
    disp('Karakteristik mekanik');

    %Sudut penyalaan
    disp('Masukkan nilai Alpha 0 s/d 180 derajat');
    disp(' ');
    ai = input('Alpha (deg) = ');
    a = ai-1e-6;
    disp(' ');
    disp(' ');

    %Putaran dan torsi kritis
    nu = Ra*Vm/(K^2)*(sin(a*pi/180+2*pi/3-te)-sin(a*pi/180+pi/3-te)...
        *exp(-pi/3*cot))/(1-exp(-pi/3*cot));
    Iac = (3*Vm/pi*cos(a*pi/180)-K*no)/Ra;
    Tac = K*Iac;

    % Keadaan konduksi diskontinyu
    for Taod = 0:0.1:Tac
        save fourquadrant
        b = fzero('beta',2*pi/3+60*pi/180);
        nd = Vm*(cos(a*pi/180+pi/3)-cos(b))/(K*(b-a*pi/180-pi/3))...
            -pi*Ra/(3*K^2*(b-a*pi/180-pi/3))*Taod;
        Tado(Taod*1/0.1+1) = Taod;
        ndo(Taod*1/0.1+1) = nd;
    end

    % Keadaan konduksi kontinyu
    Taok = Tac;0.1:1.2*K*Ia;
    nk = 3*Vm/(pi*K)*cos(a*pi/180)*ones(1,length(Taok))-Ra/K^2*Taok;
    Tako = Taok;
    nko = nk;

    %buat Gambar
    ro = [ndo nko];
    Tao = [Tado Tako];
    Pano = pi*Ra/(3*Vm*K)*Tao;
    non = pi*K*no/(3*Vm);
    hold on; plot(Pano,non,'r');
    title('Karakteristik Mekanik');
    disp(' ');

    %Pengendalian dengan arus sirkulasi
    disp('Pengendalian dengan arus sirkulasi');
    disp('=====');
    disp(' ');
    Frat = input('Nilai teraan thyristor(VA) = ');
    disp(' ');

```

```

disp(' ');

% Inisialisasi
wt = 2*pi/3;
ar = 60;

% Circulating current reactor
Ir = Pr/Ia;
Ir = (sqrt(3)*Vm/(w*Ir))*(sin(wt-pi/6)-sin(ar*pi/180))*1000;
if Ir >= 0,
    disp('--- Saran ---');
    disp('Pada pengendalian dengan arus sirkulasi');
    disp('gunakan circulating current reaktor, minimal');
    disp(' ');
    disp(sprintf('Ir (mH) = %5.4f',Ir));
    disp(' ');
    disp(' ');
else
    disp('--- Peringatan ---');
    disp(' ');
    disp('Teraan thyristor kurang dari batas..!');
    disp(' ');
    disp(' ');
end

%Metode kontrol ganda
%=====
%Karakteristik mekanik dengan menjaga Ia konstan
disp('Kontroler Ganda');
disp('=====');
disp(' ');
disp(' Fungsi torsi dan arus medan terhadap putaran');

% Pengendalian jangkar
for aa = 30:-1:0,
    Ia = Kf*Ia;
    na = 3*Vm/(pi*K)*cos(aa*pi/180)-Ra/K^2*Ia;
    naa(90-aa+1) = na;
    Taa(90-aa+1) = Ia;
    Iaa(1,90-aa+1) = Ia;
end

%Pengendalian medan
for af = 0:1:53,
    Ifo = 3*Vm/(pi*Rf)*cos(af*pi/180);
    Tfo = Kf*Ifo*Ia;
    nfo = Vn/(Kf*Ifo)-Ra/(Kf*Ifo)^2*Tfo;
    nff(af+1) = nfo;
    Tff(af+1) = Tfo;
    Iff(af+1) = Ifo;
end
naf = [naa nff];
Taf = [Taa Tff];
Iaf = [Iaa Iff];
nain = pi*K*naf/(3*Vm);
Tain = pi*Ra/(3*Vm*K)*Taf;
Iain = pi*Ra/(3*Vm*K)*Iaf;

%Membuat Gambar
figure(2);

```

```
subplot(2,1,1);
plot(nafn, Tafn, 'b');
title('Kontroler Ganda dengan Arus Jangkar Konstan');
xlabel('Putaran ternormalisasi');
ylabel('Icrsi ternormalisasi');
axis([0,1.6,0,0.06]);
grid,
subplot(2,1,2);
plot(nain, Iain, 'r');
xlabel('Putaran ternormalisasi');
ylabel('Arus medan ternormalisasi');
axis([0,1.6,0,0.002]);
grid,

else
    disp('Perhatikan Perintah, Ulangi Lagi Dari awal...!');
    disp(' ');
    disp(' ');
    break
end
```

2. File function (beta)

```
function y = beta(x, Vm, Z, te, a, cot, Ra, Ta, K, Taod)
```

```
load fourquadrant
```

```
y = Vm/Z*(sin(x-te)-sin(a*pi/180-pi/3-te)*exp((a*pi/180+pi/3-x)*cot))...  
-(Vm*(cos(a*pi/180+pi/3)-cos(x)/(x-a*pi/180-pi/3))...  
-pi*Ra*Taod/(3*K*(x-a*pi/180-pi/3)))/Ra*(1-exp((a*pi/180+pi/3-x)*cot));
```

3) File script (Alpha)

```
clear;
clc

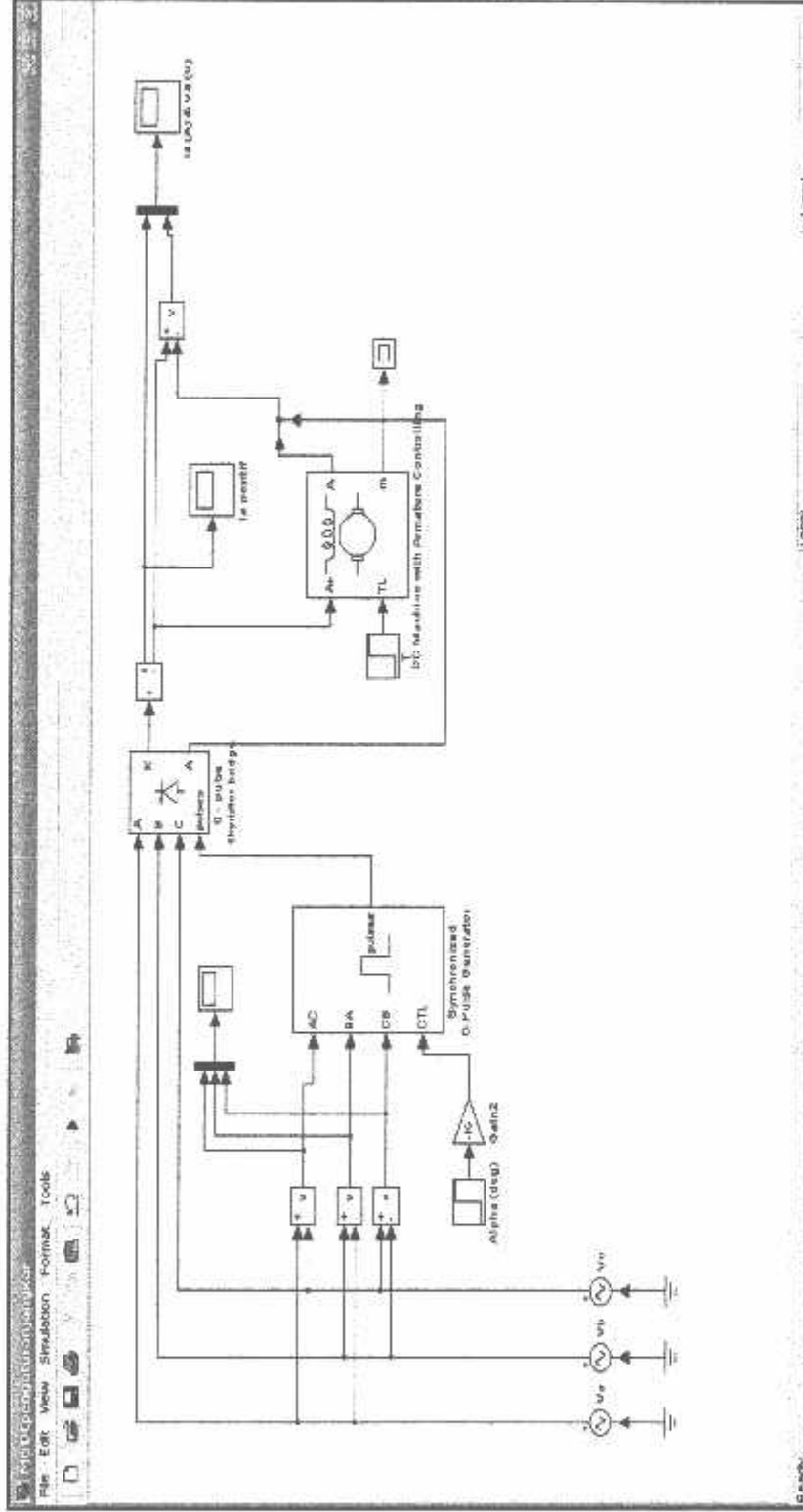
% Inisialisasi variabel
a = 0;
i = 0;

% Melakukan iterasi sampai ke 100
for i = 1:100,
    a = acos(3/pi*cos(a))+pi/6;
end

% Merubah satuan dari radian ke derajat
ad = a/pi*180-180
```

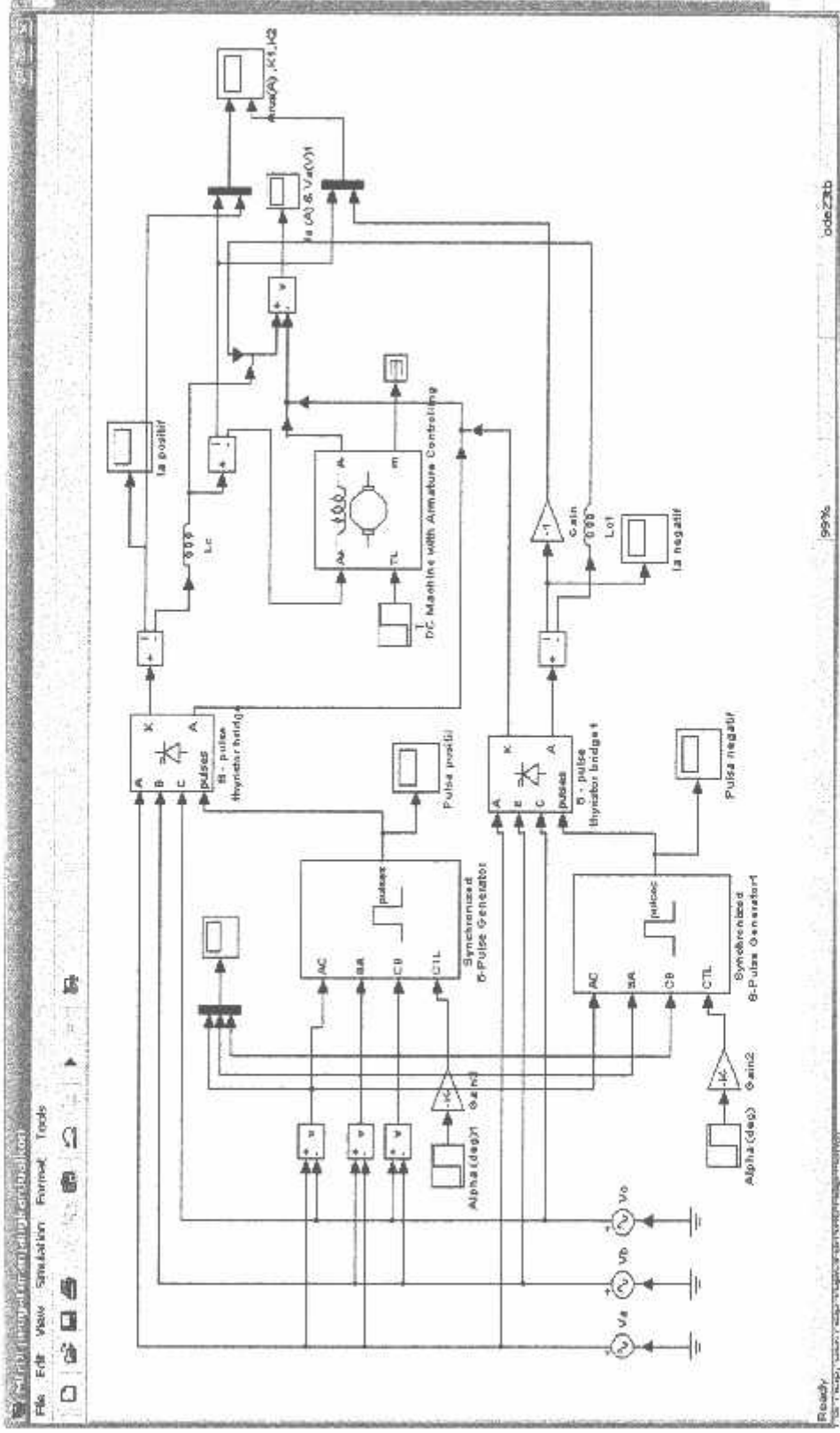
LAMPIRAN II RANGKAIAN SIMULASI

Pengendalian tanpa Arus Sirkulasi



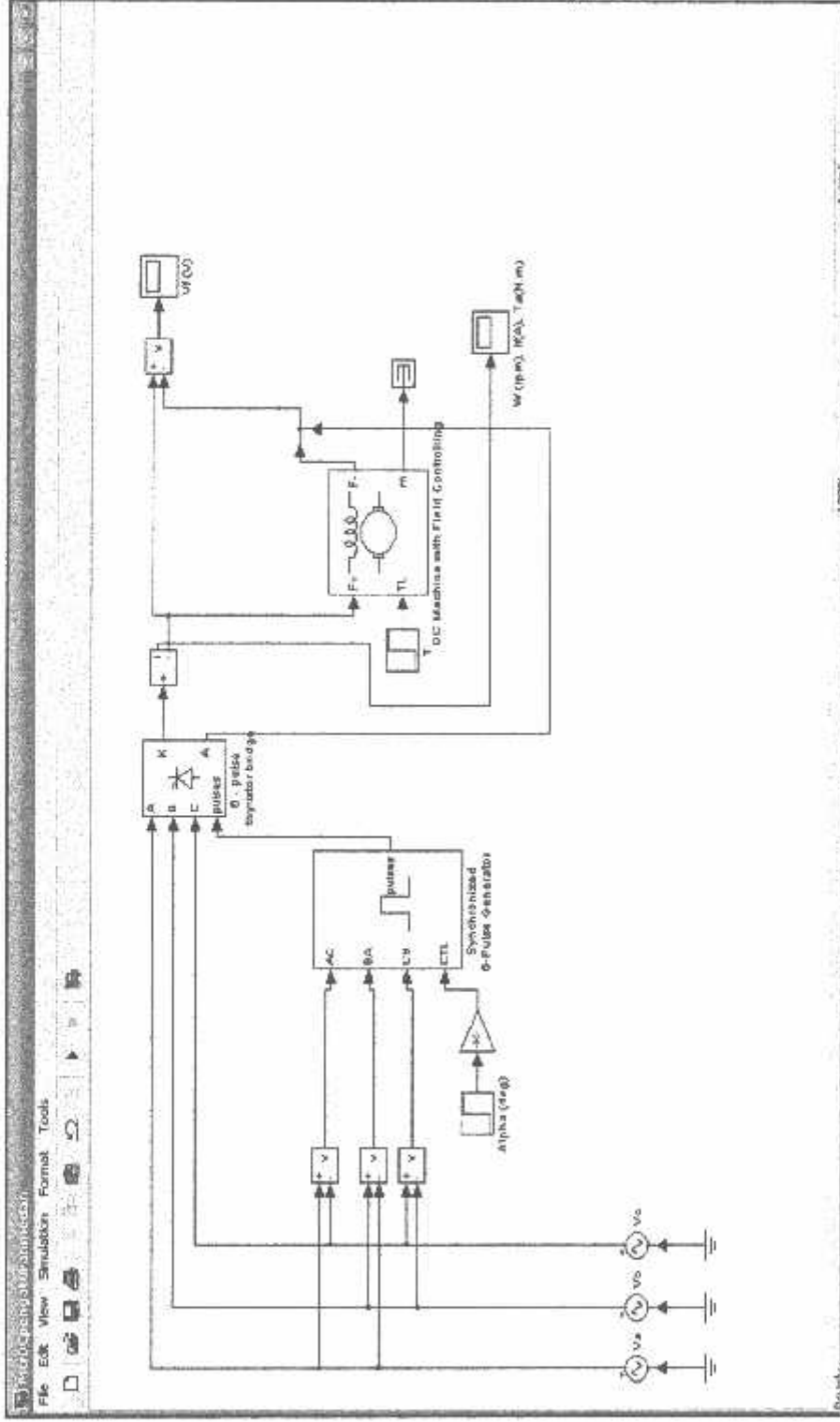
Penyearah tiga fasa dengan beban motor DC

Pengendalian dengan Arus Sirkulasi



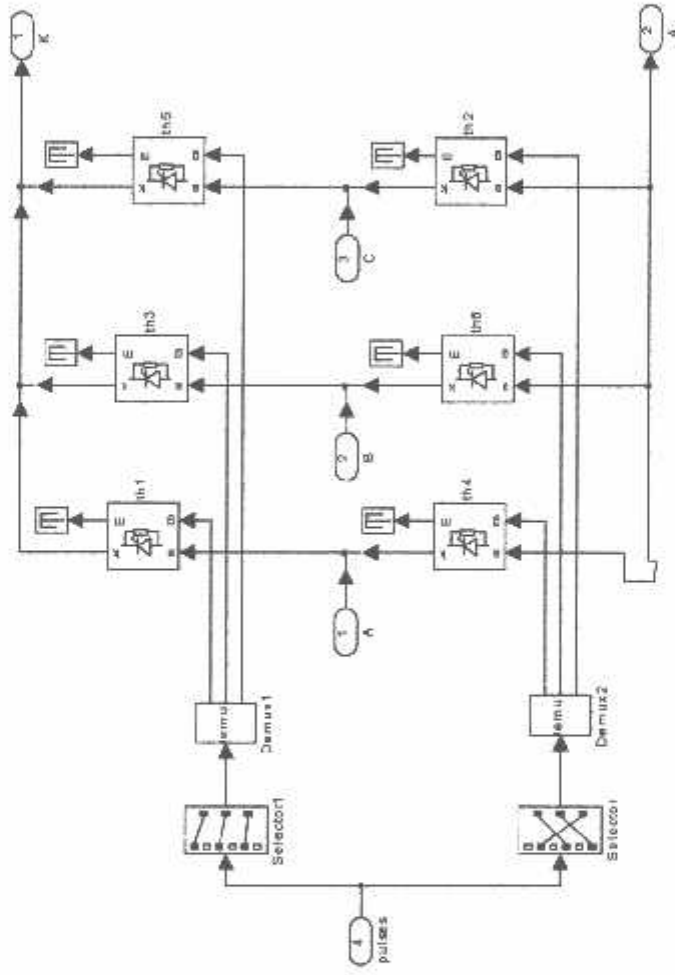
Konverter ganda tiga fasa dengan beban motor DC

Metode kontroler ganda



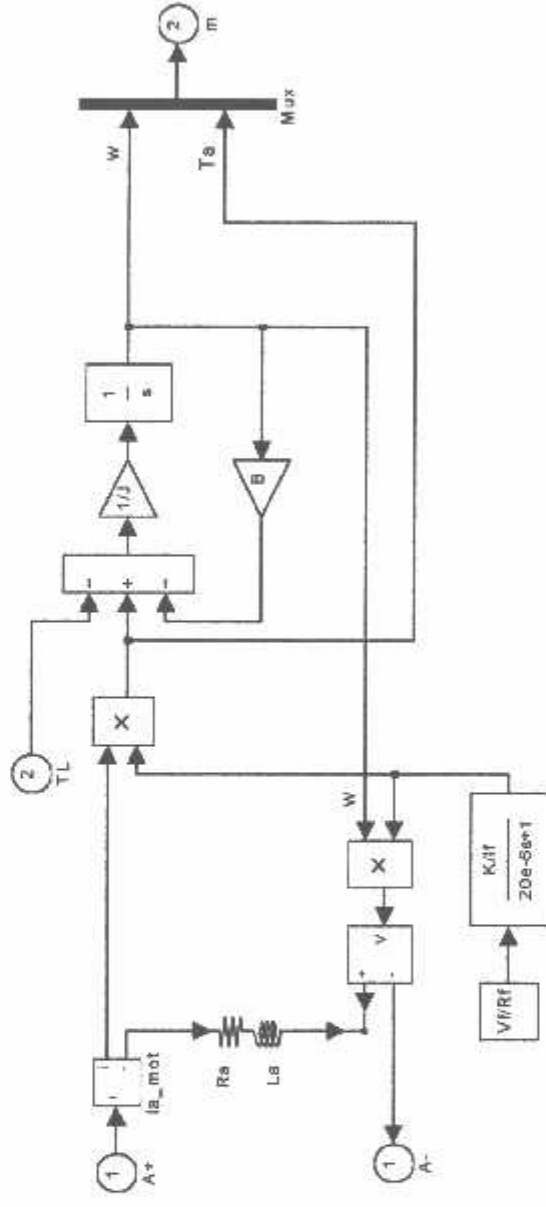
Konverter tiga fasa menyuplai arus medan

Konverter 6-Pulsa



Penyearah tiga fasa terkontrol penuh

Motor DC Penguatan Terpisah dengan Pengaturan Jangkar



Pemodelan motor DC dengan arus medan konstan

Motor DC Penguatan Terpisah dengan Pengaturan Jangkar

Block Parameters: Motor DC Pengaturan

Motor DC (model)

Ini adalah motor DC penguatan terpisah yang medarys sudah di setu tegangan nominal Vf

Input 1 dan output 1: Tegangan jangkar

Input 2: Torsi beban

Output 2: Pengukuran [w Ta]

Parameters

Resistansi dan Induktansi jangkar [R+L] (ohm) [L] (H)

[0.615 45e-3]

Resistansi dan Induktansi medan [Rf] (ohm) [L] (H)

[352 45]

Tegangan medan dan Arus medan nominal [Vf] [If] (A)

[230 0.65]

Konstanta [V/rad/det]

[230.19 0.615] 30/(1750*pi)

Massa [kg.m^2]

0.068

Gaya gesek [N.m/det]

0.001

Putaran awal [rad/det]

0

OK Cancel Help

Blok ini mengimplementasikan motor DC penguatan terpisah dengan tegangan jangkar yang dapat diatur setelah tegangan medan sebesar Vf diberikan.

Implementasi dari pemodelan listrik dan mekanik dapat diterangkan melalui persamaan berikut:

$$V_f = R_f \cdot I_f \quad (\text{pada saat steady state})$$

$$V_a = K \cdot \omega + (R_a + sL_a) \cdot I_a$$

$$T_a = K \cdot I_a$$

$$T_a = J \cdot d\omega/dt + B \cdot \omega + T_L$$

dimana:

V_a , V_f = Tegangan jangkar dan medan (V)

I_a , I_f = Arus jangkar dan medan (A)

ω = kecepatan rotor (rad/s)

s = Operator turunan Laplace = d/dt

T_a = Torsi jangkar (N.m)

T_L = Torsi beban (N.m)

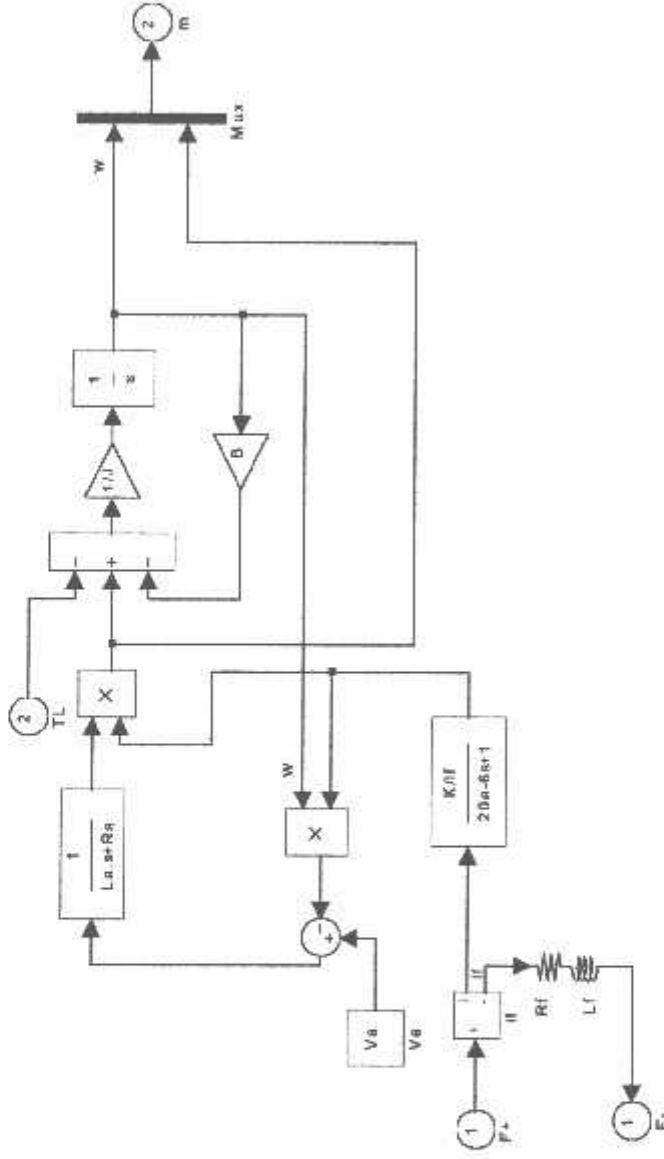
Input 1 dan output 1 : positif dan negatif terminal jangkar

Input 2 dan output 2 : torsi beban dan pengukuran output [w Ta]

Pada model motor torsi beban yang diberikan pada poros motor harus positif.

Blok parameter dan keterangan

Motor DC Penguatan Terpisah dengan Pengaturan Medan



Pemodelan motor DC dengan tegangan jangkar konstan