



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PEMODELAN DAN SIMULASI RANGKAIAN *CHOPPER*  
PENURUN TEGANGAN ARUS SEARAH  
SEBAGAI MASUKAN  
MOTOR ARUS SEARAH PENGUAT TERPISAH**

**SKRIPSI**

**NIA MARLYANA PRIHARTININGSIH  
0405030591**

**FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JULI 2009**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PEMODELAN DAN SIMULASI RANGKAIAN *CHOPPER*  
PENURUN TEGANGAN ARUS SEARAH  
SEBAGAI MASUKAN  
MOTOR ARUS SEARAH PENGUAT TERPISAH**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**NIA MARLYANA PRIHARTININGSIH**

**0405030591**

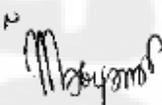
**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JULI 2009**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Nia Marlyana Prihartiningsih

NPM : 0405030591

Tanda Tangan : 

Tanggal : Juli 2009

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Nia Marlyana Prihartiningsih

NPM : 0405030591

Program Studi : Teknik Elektro

Judul Skripsi : Pemodelan dan Simulasi Rangkaian *Chopper*  
Penurun Tegangan Arus Searah sebagai Masukan  
Motor Arus Searah Penguat Terpisah

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. I Made Ardita Y., MT.

Penguji : Ir. Agus R. Utomo, MT.

Penguji : Ir. Amin Rahardjo, MT.

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : Juli 2009

## KATA PENGANTAR

*Segala puji bagi Allah yang telah memberi petunjuk kami kepada jalan ini.  
Kami tidak akan mendapatkan petunjuk ini seandainya Allah tidak berkenan  
memberikannya kepada kami.*

Puji syukur ke hadirat Allah Azza wa Jalla yang telah memberikan hidayah serta kemudahan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Skripsi ini dapat terselesaikan atas bantuan serta dukungan banyak pihak. Pertama penulis mengucapkan terima kasih kepada:

**Ir. I Made Ardita Y., MT.**

sebagai dosen pembimbing yang telah banyak meluangkan waktunya untuk memberikan saran, bimbingan, serta pengarahan sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik. Selain itu, penulis juga mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Kedua orang tua penulis, **Bapak Komar K.** dan **Ibu Mulyawati** serta adik-adikku, **Novia M.W.**, **Molina M.S.**, dan **Pramesta DIP** yang selalu memberikan doa serta dukungan selama penulisan skripsi ini.
- (2) Teman-teman Laboratorium Konversi Energi Listrik UI khususnya Mocho serta teman-teman Elektro UI 2005 yang selalu memotivasi penulis, khususnya Amel, Ciput, Dewi, Dita, Khotimah, Mayang, Rinda, Tatin, Bambang, Kuncoro, Ozenk, serta Iyex.
- (3) Para sahabat yang selalu memotivasi penulis dalam menyelesaikan skripsi ini, khususnya mba Victa, Dyas, Dwi, Indah, Tya, Cheri, dan Siti.

Akhir kata, penulis berharap Allah Azza wa Jalla berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu hingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Depok, Juli 2009

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Nia Marlyana Prihartiningsih  
NPM : 0405030591  
Program Studi : Teknik Elektro  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-eksklusif Royalty-Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**PEMODELAN DAN SIMULASI RANGKAIAN *CHOPPER*  
PENURUN TEGANGAN ARUS SEARAH SEBAGAI MASUKAN  
MOTOR ARUS SEARAH PENGUAT TERPISAH**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada Tanggal : Juli 2009

Yang menyatakan

(Nia Marlyana Prihartiningsih)

## ABSTRAK

Nama : Nia Marlyana Prihartiningsih  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : Pemodelan dan Simulasi Rangkaian *Chopper*  
Penurun Tegangan Arus Searah sebagai Masukan  
Motor Arus Searah Penguat Terpisah

Motor arus searah penguat terpisah memiliki beberapa keunggulan bila dibandingkan dengan motor arus searah jenis lainnya. Beberapa diantaranya adalah torsi awal yang cukup besar dan kisaran kecepatan yang cukup luas. Motor jenis ini memiliki suplai tegangan arus searah yang terpisah antara rangkaian medan stator dengan rangkaian jangkar rotornya.

Pada skripsi ini, besarnya suplai tegangan baik pada rangkaian medan stator maupun rangkaian jangkar rotornya dijaga tetap. Untuk mengubah tegangan arus searah tetap menjadi tegangan arus searah berubah digunakan rangkaian *chopper*. Jenis rangkaian *chopper* yang digunakan sebagai masukan motor arus searah penguat terpisah adalah rangkaian *chopper* penurun tegangan arus searah.

Rangkaian *chopper* penurun tegangan arus searah terdiri dari saklar terkontrol GTO dan *free-wheeling diode*. Rangkaian ini dihubungkan secara seri dengan rangkaian jangkar rotor motor arus searah penguat terpisah. Metode pengaturan siklus kerja yang digunakan pada rangkaian ini adalah metode sistem frekuensi tetap.

Pada skripsi ini, pemodelan dan simulasi rangkaian *chopper* penurun tegangan arus searah sebagai masukan motor arus searah penguat terpisah menggunakan fasilitas simulink yang terdapat pada perangkat lunak MATLAB versi 7.6.0.324 (R2008a).

Kata kunci : motor arus searah penguat terpisah, rangkaian *chopper* penurun tegangan arus searah, GTO.

## ABSTRACT

Name : Nia Marlyana Prihartiningsih  
Study Program : Electrical Engineering  
Title : Modeling and Simulation of Step-Down DC Chopper-Fed Separately Excited DC Motor

Separately excited DC motor has some benefits than other DC motor's types. For example: it has high starting torque and wide variety of speed. Separately excited DC motor has separately source voltage between stator field circuit and rotor armature circuit.

On this thesis, the value of source voltage on stator field circuit and rotor armature circuit are kept constant. To vary fixed-voltage DC source voltage to variable-voltage DC source uses chopper circuit. The type of chopper circuit that used as input voltage of separately excited DC motor is step-down DC chopper.

Chopper circuit consists of controllable switch GTO and free-wheeling diode. This circuit is series-connected with rotor armature circuit of separately excited DC motor. The method that used to control the duty cycle of this chopper is constant-frequency system method.

On this thesis, modeling and simulation of step-down chopper-fed separately excited dc motor use simulink on MATLAB version 7.6.0.324 (R2008a).

Key words: separately-excited DC motor, step-down DC chopper, GTO.

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	<b>i</b>
<b>HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS</b>	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b>	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b>	<b>iv</b>
<b>LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH</b>	<b>vi</b>
<b>ABSTRAK</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL</b>	<b>xiii</b>
<b>1. PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	1
1.3 Tujuan Penelitian	1
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi Penelitian	2
1.6 Sistematika Penulisan	2
<b>2. DASAR TEORI</b>	<b>4</b>
2.1 MOTOR ARUS SEARAH PENGUAT TERPISAH	4
2.1.1 Umum	4
2.1.2 Prinsip Kerja	4
2.1.3 Rangkaian Ekuivalen dan Persamaan Matematis	6
2.1.4 Pengaturan Kecepatan	8
2.2 DC <i>CHOPPER DRIVE</i>	9
2.2.1 Umum	9
2.2.2 Prinsip Kerja	11
2.2.3 Rangkaian <i>Chopper</i> Penurun Tegangan Arus Searah	15
2.2.3 GTO ( <i>Gate Turn-off Thyristor</i> )	17
<b>3. PEMODELAN DAN SIMULASI</b>	<b>19</b>
3.1 PEMODELAN	19
3.1.1 Motor Arus Searah Penguat Terpisah	19

3.1.2 Pengendali PI	20
3.1.3 Rangkaian <i>Chopper</i> Penurun Tegangan Arus Searah	22
3.2 SIMULASI	22
3.2.1 Motor Arus Searah Penguat Terpisah	22
3.2.2 Pengendali PI	24
3.2.3 GTO( <i>Gate Turn-off Thyristor</i> )	27
3.2.4 Rangkaian <i>Chopper</i> Penurun Tegangan Arus Searah	28
<b>4. HASIL SIMULASI DAN ANALISIS</b>	<b>31</b>
4.1 WAKTU PADAM $t_{off}$ TETAP	34
4.2 KECEPATAN PUTAR ROTOR $\omega$ TETAP	38
<b>5. KESIMPULAN</b>	<b>43</b>
<b>DAFTAR ACUAN</b>	<b>44</b>
<b>DAFTAR REFERENSI</b>	<b>45</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Karakteristik Motor Arus Searah Penguat Terpisah	....(4)
Gambar 2.2	Rangkaian Ekuivalen Motor Arus Searah Penguat Terpisah	....(7)
Gambar 2.3	<i>Inverter-Rectifer</i>	...(10)
Gambar 2.4	<i>DC Chopper</i>	...(11)
Gambar 2.5	(a) Konfigurasi Rangkaian <i>Chopper</i> Penaik Tegangan Arus Searah dan (b) Pengoperasiannya	...(12)
Gambar 2.6	(a) Konfigurasi Rangkaian <i>Chopper</i> Penurun Tegangan Arus Searah	...(12)
	dan (b) Pengoperasiannya	...(13)
Gambar 2.7	Gelombang Tegangan Keluaran Rangkaian <i>Chopper</i> (a) Sistem Frekuensi Tetap. (b) Sistem Frekuensi Variabel: (1) waktu nyala $t_{on}$ dijaga tetap; (2) waktu padam $t_{off}$ dijaga tetap	...(15)
Gambar 2.8	Arus Jangkar Kontinyu	...(16)
Gambar 2.9	Simbol Rangkaian GTO	...(17)
Gambar 3.1	Diagram Blok Motor Arus Searah Penguat Terpisah	...(20)
Gambar 3.2	Diagram Blok Pengendali PI	...(21)
Gambar 3.3	Motor Arus Searah Penguat Terpisah	...(22)
Gambar 3.4	Rangkaian Motor Arus Searah Penguat Terpisah	...(23)
Gambar 3.5	Blok Parameter Motor Arus Searah Penguat Terpisah	...(24)
Gambar 3.6	Blok Pengendali Kecepatan	...(25)
Gambar 3.7	Blok Parameter Pengendali Kecepatan	...(25)
Gambar 3.8	Pengendali Kecepatan	...(26)
Gambar 3.9	Blok Pengendali Arus	...(26)
Gambar 3.10	Pengendali Arus	...(26)
Gambar 3.11	Blok GTO	...(27)
Gambar 3.12	Blok Parameter GTO	...(27)
Gambar 3.13	Waktu Padam GTO ( $T_f$ dan $T_r$ )	...(28)
Gambar 3.14	Rangkaian <i>Chopper</i> Penurun Tegangan Arus Searah	...(28)

Gambar 3.15	Rangkaian <i>Chopper</i> Penurun Tegangan Arus Searah sebagai Masukan Motor Arus Searah Penguat Terpisah	...(29)
Gambar 4.1	Parameter Motor Arus Searah Penguat Terpisah	...(32)
Gambar 4.2	Parameter Saklar Terkontrol GTO	...(33)



## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	...(18)
Tabel 4.1	...(35)
Tabel 4.2	...(39)





**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PEMODELAN DAN SIMULASI RANGKAIAN *CHOPPER*  
PENURUN TEGANGAN ARUS SEARAH  
SEBAGAI MASUKAN  
MOTOR ARUS SEARAH PENGUAT TERPISAH**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**NIA MARLYANA PRIHARTININGSIH**

**0405030591**

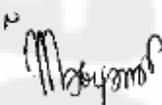
**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JULI 2009**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Nia Marlyana Prihartiningsih

NPM : 0405030591

Tanda Tangan : 

Tanggal : Juli 2009

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Nia Marlyana Prihartiningsih

NPM : 0405030591

Program Studi : Teknik Elektro

Judul Skripsi : Pemodelan dan Simulasi Rangkaian *Chopper*  
Penurun Tegangan Arus Searah sebagai Masukan  
Motor Arus Searah Penguat Terpisah

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. I Made Ardita Y., MT.

Penguji : Ir. Agus R. Utomo, MT.

Penguji : Ir. Amin Rahardjo, MT.

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : Juli 2009

## KATA PENGANTAR

*Segala puji bagi Allah yang telah memberi petunjuk kami kepada jalan ini.  
Kami tidak akan mendapatkan petunjuk ini seandainya Allah tidak berkenan  
memberikannya kepada kami.*

Puji syukur ke hadirat Allah Azza wa Jalla yang telah memberikan hidayah serta kemudahan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Skripsi ini dapat terselesaikan atas bantuan serta dukungan banyak pihak. Pertama penulis mengucapkan terima kasih kepada:

**Ir. I Made Ardita Y., MT.**

sebagai dosen pembimbing yang telah banyak meluangkan waktunya untuk memberikan saran, bimbingan, serta pengarahan sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik. Selain itu, penulis juga mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Kedua orang tua penulis, **Bapak Komar K.** dan **Ibu Mulyawati** serta adik-adikku, **Novia M.W.**, **Molina M.S.**, dan **Pramesta DIP** yang selalu memberikan doa serta dukungan selama penulisan skripsi ini.
- (2) Teman-teman Laboratorium Konversi Energi Listrik UI khususnya Mocho serta teman-teman Elektro UI 2005 yang selalu memotivasi penulis, khususnya Amel, Ciput, Dewi, Dita, Khotimah, Mayang, Rinda, Tatin, Bambang, Kuncoro, Ozenk, serta Iyex.
- (3) Para sahabat yang selalu memotivasi penulis dalam menyelesaikan skripsi ini, khususnya mba Victa, Dyas, Dwi, Indah, Tya, Cheri, dan Siti.

Akhir kata, penulis berharap Allah Azza wa Jalla berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu hingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Depok, Juli 2009

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Nia Marlyana Prihartiningsih  
NPM : 0405030591  
Program Studi : Teknik Elektro  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-eksklusif Royalty-Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**PEMODELAN DAN SIMULASI RANGKAIAN *CHOPPER*  
PENURUN TEGANGAN ARUS SEARAH SEBAGAI MASUKAN  
MOTOR ARUS SEARAH PENGUAT TERPISAH**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada Tanggal : Juli 2009

Yang menyatakan

(Nia Marlyana Prihartiningsih)

## ABSTRAK

Nama : Nia Marlyana Prihartiningsih  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : Pemodelan dan Simulasi Rangkaian *Chopper*  
Penurun Tegangan Arus Searah sebagai Masukan  
Motor Arus Searah Penguat Terpisah

Motor arus searah penguat terpisah memiliki beberapa keunggulan bila dibandingkan dengan motor arus searah jenis lainnya. Beberapa diantaranya adalah torsi awal yang cukup besar dan kisaran kecepatan yang cukup luas. Motor jenis ini memiliki suplai tegangan arus searah yang terpisah antara rangkaian medan stator dengan rangkaian jangkar rotornya.

Pada skripsi ini, besarnya suplai tegangan baik pada rangkaian medan stator maupun rangkaian jangkar rotornya dijaga tetap. Untuk mengubah tegangan arus searah tetap menjadi tegangan arus searah berubah digunakan rangkaian *chopper*. Jenis rangkaian *chopper* yang digunakan sebagai masukan motor arus searah penguat terpisah adalah rangkaian *chopper* penurun tegangan arus searah.

Rangkaian *chopper* penurun tegangan arus searah terdiri dari saklar terkontrol GTO dan *free-wheeling diode*. Rangkaian ini dihubungkan secara seri dengan rangkaian jangkar rotor motor arus searah penguat terpisah. Metode pengaturan siklus kerja yang digunakan pada rangkaian ini adalah metode sistem frekuensi tetap.

Pada skripsi ini, pemodelan dan simulasi rangkaian *chopper* penurun tegangan arus searah sebagai masukan motor arus searah penguat terpisah menggunakan fasilitas simulink yang terdapat pada perangkat lunak MATLAB versi 7.6.0.324 (R2008a).

Kata kunci : motor arus searah penguat terpisah, rangkaian *chopper* penurun tegangan arus searah, GTO.

## ABSTRACT

Name : Nia Marlyana Prihartiningsih  
Study Program : Electrical Engineering  
Title : Modeling and Simulation of Step-Down DC Chopper-Fed Separately Excited DC Motor

Separately excited DC motor has some benefits than other DC motor's types. For example: it has high starting torque and wide variety of speed. Separately excited DC motor has separately source voltage between stator field circuit and rotor armature circuit.

On this thesis, the value of source voltage on stator field circuit and rotor armature circuit are kept constant. To vary fixed-voltage DC source voltage to variable-voltage DC source uses chopper circuit. The type of chopper circuit that used as input voltage of separately excited DC motor is step-down DC chopper.

Chopper circuit consists of controllable switch GTO and free-wheeling diode. This circuit is series-connected with rotor armature circuit of separately excited DC motor. The method that used to control the duty cycle of this chopper is constant-frequency system method.

On this thesis, modeling and simulation of step-down chopper-fed separately excited dc motor use simulink on MATLAB version 7.6.0.324 (R2008a).

Key words: separately-excited DC motor, step-down DC chopper, GTO.

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	<b>i</b>
<b>HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS</b>	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b>	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b>	<b>iv</b>
<b>LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH</b>	<b>vi</b>
<b>ABSTRAK</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL</b>	<b>xiii</b>
<b>1. PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	1
1.3 Tujuan Penelitian	1
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi Penelitian	2
1.6 Sistematika Penulisan	2
<b>2. DASAR TEORI</b>	<b>4</b>
2.1 MOTOR ARUS SEARAH PENGUAT TERPISAH	4
2.1.1 Umum	4
2.1.2 Prinsip Kerja	4
2.1.3 Rangkaian Ekuivalen dan Persamaan Matematis	6
2.1.4 Pengaturan Kecepatan	8
2.2 DC <i>CHOPPER DRIVE</i>	9
2.2.1 Umum	9
2.2.2 Prinsip Kerja	11
2.2.3 Rangkaian <i>Chopper</i> Penurun Tegangan Arus Searah	15
2.2.3 GTO ( <i>Gate Turn-off Thyristor</i> )	17
<b>3. PEMODELAN DAN SIMULASI</b>	<b>19</b>
3.1 PEMODELAN	19
3.1.1 Motor Arus Searah Penguat Terpisah	19

3.1.2 Pengendali PI	20
3.1.3 Rangkaian <i>Chopper</i> Penurun Tegangan Arus Searah	22
3.2 SIMULASI	22
3.2.1 Motor Arus Searah Penguat Terpisah	22
3.2.2 Pengendali PI	24
3.2.3 GTO( <i>Gate Turn-off Thyristor</i> )	27
3.2.4 Rangkaian <i>Chopper</i> Penurun Tegangan Arus Searah	28
<b>4. HASIL SIMULASI DAN ANALISIS</b>	<b>31</b>
4.1 WAKTU PADAM $t_{off}$ TETAP	34
4.2 KECEPATAN PUTAR ROTOR $\omega$ TETAP	38
<b>5. KESIMPULAN</b>	<b>43</b>
<b>DAFTAR ACUAN</b>	<b>44</b>
<b>DAFTAR REFERENSI</b>	<b>45</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Karakteristik Motor Arus Searah Penguat Terpisah	....(4)
Gambar 2.2	Rangkaian Ekuivalen Motor Arus Searah Penguat Terpisah	....(7)
Gambar 2.3	<i>Inverter-Rectifer</i>	...(10)
Gambar 2.4	<i>DC Chopper</i>	...(11)
Gambar 2.5	(a) Konfigurasi Rangkaian <i>Chopper</i> Penaik Tegangan Arus Searah dan (b) Pengoperasiannya	...(12)
Gambar 2.6	(a) Konfigurasi Rangkaian <i>Chopper</i> Penurun Tegangan Arus Searah	...(12)
	dan (b) Pengoperasiannya	...(13)
Gambar 2.7	Gelombang Tegangan Keluaran Rangkaian <i>Chopper</i> (a) Sistem Frekuensi Tetap. (b) Sistem Frekuensi Variabel: (1) waktu nyala $t_{on}$ dijaga tetap; (2) waktu padam $t_{off}$ dijaga tetap	...(15)
Gambar 2.8	Arus Jangkar Kontinyu	...(16)
Gambar 2.9	Simbol Rangkaian GTO	...(17)
Gambar 3.1	Diagram Blok Motor Arus Searah Penguat Terpisah	...(20)
Gambar 3.2	Diagram Blok Pengendali PI	...(21)
Gambar 3.3	Motor Arus Searah Penguat Terpisah	...(22)
Gambar 3.4	Rangkaian Motor Arus Searah Penguat Terpisah	...(23)
Gambar 3.5	Blok Parameter Motor Arus Searah Penguat Terpisah	...(24)
Gambar 3.6	Blok Pengendali Kecepatan	...(25)
Gambar 3.7	Blok Parameter Pengendali Kecepatan	...(25)
Gambar 3.8	Pengendali Kecepatan	...(26)
Gambar 3.9	Blok Pengendali Arus	...(26)
Gambar 3.10	Pengendali Arus	...(26)
Gambar 3.11	Blok GTO	...(27)
Gambar 3.12	Blok Parameter GTO	...(27)
Gambar 3.13	Waktu Padam GTO ( $T_f$ dan $T_r$ )	...(28)
Gambar 3.14	Rangkaian <i>Chopper</i> Penurun Tegangan Arus Searah	...(28)

Gambar 3.15	Rangkaian <i>Chopper</i> Penurun Tegangan Arus Searah sebagai Masukan Motor Arus Searah Penguat Terpisah	...(29)
Gambar 4.1	Parameter Motor Arus Searah Penguat Terpisah	...(32)
Gambar 4.2	Parameter Saklar Terkontrol GTO	...(33)



## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	...(18)
Tabel 4.1	...(35)
Tabel 4.2	...(39)



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

Motor arus searah digunakan untuk mengubah energi listrik arus searah menjadi energi mekanik. Energi mekanik inilah yang nantinya digunakan untuk menggerakkan beberapa peralatan listrik baik di rumah maupun di industri. Pada umumnya, penggunaan motor arus searah dibatasi untuk beberapa peralatan dengan kecepatan rendah, serta penggunaan daya rendah hingga sedang.

Ada beberapa jenis motor arus searah berdasarkan suplai tegangan pada rangkaian medan stator dengan rangkaian jangkar rotornya. Salah satunya adalah motor arus searah penguat terpisah. Motor jenis ini memiliki suplai tegangan arus searah yang terpisah antara rangkaian medan stator dengan rangkaian jangkar rotornya.

Pada penggunaannya, suplai tegangan arus searah memerlukan sebuah alat yang digunakan untuk mengubah tegangan arus searah tetap menjadi tegangan arus searah berubah. Alat tersebut dinamakan *chopper*. *Chopper* merupakan rangkaian pemenggal tegangan arus searah.

Ada dua jenis *chopper* berdasarkan besarnya tegangan arus searah keluaran *chopper*, yakni: rangkaian *chopper* penaik tegangan arus searah (*step-up DC chopper*) dan penurun tegangan arus searah (*step-down DC chopper*). Efisiensi yang cukup tinggi, ukurannya yang kecil, serta praktis dalam penggunaan merupakan beberapa keunggulan penggunaan rangkaian *chopper*.

### 1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas pada skripsi ini adalah pemodelan serta simulasi rangkaian *chopper* penurun tegangan arus searah sebagai masukan motor arus searah penguat terpisah. Pengaturan siklus kerja rangkaian *chopper* menggunakan saklar terkontrol, yakni GTO (*Gate Turn-Off Thyristor*).

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penulisan skripsi ini adalah untuk membuat pemodelan serta simulasi rangkaian *chopper* penurun tegangan arus searah sebagai masukan motor arus searah penguat terpisah, dengan menggunakan fasilitas simulink pada perangkat lunak MATLAB versi 7.6.0.324 (R2008a).

### 1.4 Batasan Masalah

Untuk mempersempit masalah dan mempermudah analisis, permasalahan dibatasi sebagai berikut :

1. Simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB versi 7.6.0.324 (R2008a).
2. Parameter-parameter yang digunakan ditentukan oleh perangkat lunak MATLAB versi 7.6.0.324 (R2008a).
3. Analisis dilakukan pada kondisi tunak.
4. Suplai tegangan arus searah, baik di rangkaian medan stator maupun jangkar rotor, bernilai tetap.
5. Besarnya waktu *chopping*  $T$  diasumsikan bernilai tetap, sehingga untuk mengubah besarnya waktu nyala  $t_{on}$  GTO dapat dilakukan dengan cara mengubah besarnya waktu padam  $t_{off}$  GTO.
6. Proses komutasi, reaksi jangkar, proteksi, rugi-rugi daya, dan harmonik tidak akan dibahas pada skripsi ini.

### 1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian yang dilakukan dalam penyusunan skripsi ini adalah dengan studi literatur mengenai motor arus searah penguat terpisah, DC *chopper drive*, serta GTO (*Gate Turn-Off Thyristor*). Hasil studi literatur tersebut diimplementasikan dengan melakukan simulasi pada perangkat lunak MATLAB versi 7.6.0.324 (R2008a) dan melakukan analisis atas hasil simulasi yang diperoleh.

### 1.6 Sistematika Penulisan

Agar mempermudah pembahasan, penulisan dibagi dalam beberapa bab. Bab satu menguraikan latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan

Universitas Indonesia

penulisan, pembatasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan. Bab dua membahas tentang motor arus searah penguat terpisah, DC *chopper drive*, serta GTO (*Gate Turn-Off Thyristor*). Bab tiga membahas tentang pemodelan motor arus searah penguat terpisah, pengendali PI, dan rangkaian *chopper* penurun tegangan arus searah. Serta simulasi motor arus searah penguat terpisah, pengendali PI, GTO, serta rangkaian *chopper* penurun tegangan arus searah sebagai masukan motor arus searah penguat terpisah. Bab empat membahas tentang hasil simulasi serta analisis dari simulasi yang dilakukan, yakni pada waktu padam  $t_{off}$  tetap dan kecepatan putar rotor  $\omega$  tetap. Bab lima merupakan penutup yang berisi kesimpulan dari skripsi ini.

## BAB II

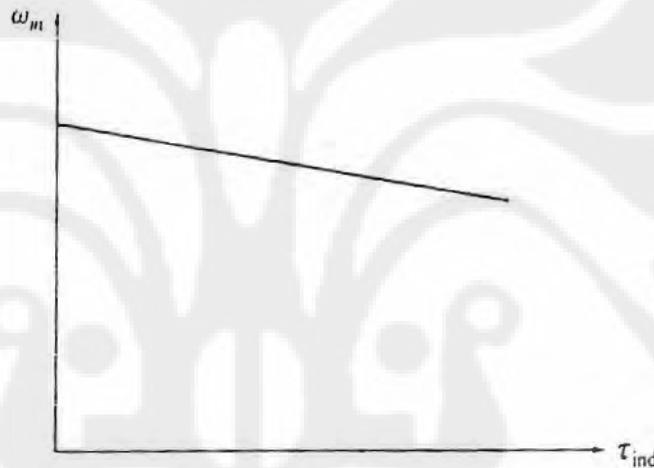
### DASAR TEORI

#### 2.1 Motor Arus Searah Penguat Terpisah

##### 2.1.1 Umum

Motor arus searah penguat terpisah merupakan salah satu jenis motor arus searah yang memiliki suplai tegangan arus searah terpisah antara rangkaian medan stator dengan rangkaian jangkar rotornya.

Karakteristik dari motor jenis ini ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.1 Karakteristik Motor Arus Searah Penguat Terpisah [1]

##### 2.1.2 Prinsip Kerja

Motor arus searah penguat terpisah dapat bekerja dengan penjelasan sebagai berikut. Bagian stator diberikan suplai tegangan arus searah  $V_f$  sehingga mengalir arus searah  $I_f$  ke rangkaian medan stator yang mengakibatkan timbulnya medan magnet  $B_f$  pada rangkaian tersebut.

$$B_f = \mu \cdot N \cdot I_f / 2l \quad \dots(2.1)$$

$B_f$  = Medan magnet stator

$\mu$  = Permeabilitas bahan

$I_f$  = Arus stator

$l$  = Panjang penghantar

Adanya medan magnet ini akan mengimbaskan kumparan jangkar rotor sehingga timbul fluks  $\Phi$  medan pada kumparan jangkar rotor.

$$\Phi = B_f \cdot A \cos \theta \quad \dots(2.2)$$

$\Phi$  = Fluks yang dihasilkan pada rangkaian medan stator

$B_f$  = Medan magnet stator

$A$  = Luas permukaan tembus rotor terhadap medan magnet stator

$\cos \theta$  = Sudut antara  $B_f$  dengan garis normal bidang  $A$

Bagian rotor juga diberikan suplai tegangan arus searah  $V_f$  sehingga arus searah  $I_a$  dapat mengalir ke rangkaian jangkar rotor melalui sikat dan komutator. Arus searah ini akan mengakibatkan timbulnya medan magnet  $B_a$  pada rangkaian jangkar rotor. Medan magnet  $B_a$  ini akan berinteraksi dengan medan magnet  $B_f$  sehingga menghasilkan medan magnet resultan  $B_R$ .

Dengan adanya medan magnet resultan dan arus yang mengalir pada rangkaian jangkar rotor, maka akan timbul gaya Lorentz  $F$  pada rangkaian jangkar rotor.

$$F = B_R \cdot I_a \cdot L \sin \theta \quad \dots(2.3)$$

$F$  = Gaya Lorentz

$B_R$  = Medan magnet resultan

$I_a$  = Arus jangkar

$\theta$  = Sudut antara vektor  $B_R$  dan  $I_a$

Kemudian akan timbul torsi induksi  $T_{ind}$  pada rangkaian jangkar rotor sebesar

$$T_{ind} = F \times r \quad \dots(2.4)$$

$T_{ind}$  = Torsi induksi

$F$  = Gaya Lorentz

$r$  = Jari-jari rotor

Setelah nilai torsi induksi cukup untuk menggerakkan rotor, maka rotor akan bergerak dengan arah yang sesuai dengan gaya Lorentz  $F$ .

Sesuai dengan hukum Faraday, sesaat setelah rotor bergerak akan timbul ggl lawan  $E_a$  pada rangkaian jangkar rotor yang sifatnya melawan sumber tegangan  $V_t$ . Perputaran rotor menyebabkan timbulnya perubahan posisi rotor terhadap medan magnet stator, sehingga menghasilkan perubahan fluks yang berubah terhadap waktu  $d\Phi/dt$ .

$$E_a = - N \frac{d\Phi}{dt} \quad \dots(2.5)$$

$E_a$  = Tegangan induksi pada rangkaian jangkar rotor

$N$  = Jumlah lilitan pada rangkaian jangkar rotor

$d\Phi/dt$  = Perubahan fluks terhadap waktu

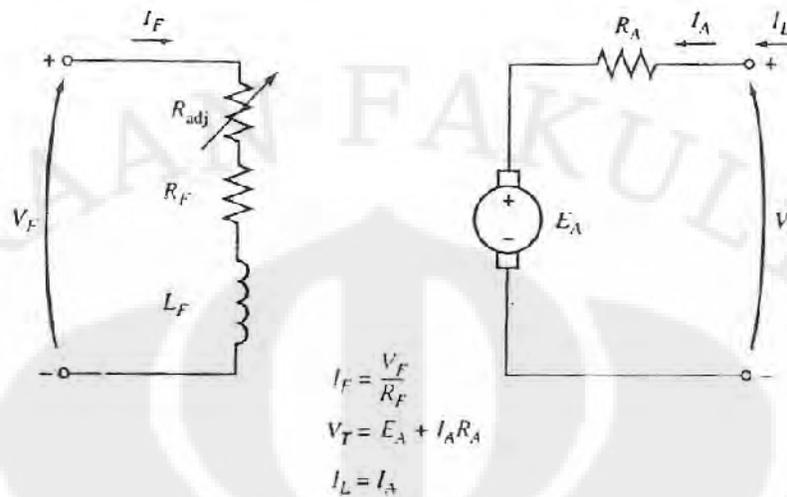
Tegangan induksi  $E_a$  yang dihasilkan akan disearahkan menjadi tegangan keluaran  $E_{out}$  melalui proses komutasi.

### 2.1.3 Rangkaian Ekuivalen dan Persamaan Matematis

Pada skripsi ini, jenis motor arus searah yang digunakan adalah dengan penguat terpisah. Hal ini dikarenakan beberapa keunggulan motor jenis ini bila dibandingkan dengan motor arus searah jenis lainnya. Beberapa diantaranya adalah torsi awal yang cukup besar dan kisaran kecepatan yang cukup luas.

Rangkaian ekuivalen motor arus searah jenis penguat terpisah terdiri dari dua rangkaian listrik yang terpisah, yakni rangkaian medan stator dan rangkaian jangkar rotor. Masing-masing rangkaian tersebut disuplai oleh sumber tegangan searah yang berbeda, seperti terlihat pada gambar di bawah ini:

Rangkaian ekuivalen motor arus searah penguat terpisah ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Rangkaian Ekuivalen Motor Arus Searah Penguat Terpisah [1]

Berdasarkan hukum Kirchoff, persamaan tegangan pada rangkaian medan stator adalah

$$V_f = R_f \cdot I_f + L_f \frac{dI_f}{dt} \quad \dots(2.6)$$

Pada keadaan tunak, nilai dari  $\frac{dI_f}{dt} = 0$ , sehingga persamaan (2.4) menjadi

$$V_f = R_f \cdot I_f \quad \dots(2.7)$$

Untuk rangkaian jangkar rotor, diperoleh persamaan tegangan

$$V_t = E_a + I_a \cdot R_a + L_a \frac{dI_a}{dt} \quad \dots(2.8)$$

Pada keadaan tunak, nilai dari  $\frac{dI_a}{dt} = 0$ , sehingga persamaan (2.6) menjadi

$$V_t = E_a + I_a \cdot R_a \quad \dots(2.9)$$

$E_a$  merupakan tegangan induksi yang dibangkitkan di rangkaian jangkar rotor sebelum melalui komutator dan sikat.  $E_a$  memiliki persamaan, yakni

$$E_a = K \cdot \omega \cdot \Phi \quad \dots(2.10)$$

Substitusi persamaan (2.8) ke (2.7) sehingga diperoleh persamaan

$$V_t = K \cdot \omega \cdot \Phi + I_a \cdot R_a \quad \dots(2.11)$$

Diperoleh persamaan kecepatan motor arus searah penguat terpisah, yakni

$$\omega = (V_t - I_a \cdot R_a) / K \cdot \Phi \quad \dots(2.12)$$

Universitas Indonesia

Torsi induksi yang dihasilkan pada rangkaian jangkar rotor adalah

$$T_{ind} = K \cdot \Phi \cdot I_a \quad ..(2.13)$$

Substitusi persamaan (2.11) ke (2.10) sehingga diperoleh persamaan

$$\omega = (V_t / K \cdot \Phi) - (R_a \cdot T_{ind} / (K \cdot \Phi)^2) \quad ..(2.14)$$

Sehingga secara mekanik, persamaan keseimbangan torsi adalah

$$T_{ind} = T_{mek} + B_R \cdot \omega + J \cdot d\omega/dt \quad ..(2.15)$$

#### 2.1.4 Pengaturan Kecepatan

Kecepatan motor arus searah penguat terpisah dapat dikendalikan dengan tiga metode, yakni:

1. Pengaturan tegangan jangkar  $V_t$

Pengaturan besarnya tegangan suplai terminal yang terhubung ke rangkaian jangkar akan mempengaruhi tingkat kecepatan motor arus searah. Untuk meningkatkan kecepatan motor tersebut, maka besarnya tegangan jangkar  $V_t$  harus ditingkatkan, dan begitu pula sebaliknya.

2. Pengaturan arus medan  $I_f$

Besarnya arus medan dapat diatur dengan cara mengubah besarnya tegangan suplai rangkaian medan stator  $V_f$ , serta besarnya resistor variabel (rheostat)  $R_f$  dari rangkaian medan stator tersebut. Bila besarnya arus medan  $I_f$  ditingkatkan, maka besarnya kecepatan motor arus searah akan mengalami penurunan, dan begitu pula sebaliknya.

3. Pengaturan resistansi jangkar  $R_a$

Metode ini dilakukan dengan mengubah besarnya resistor variabel seri pada rangkaian jangkar rotor  $R_a$ .

Pada aplikasi yang membutuhkan kecepatan variabel umumnya digunakan metode pengaturan tegangan jangkar  $V_t$  dan pengaturan arus medan  $I_f$ . Pengaturan tahanan variabel seri pada rangkaian jangkar rotor  $R_a$  jarang digunakan karena akan memperbesar rugi-rugi daya  $P_{loss}$ , berupa panas.

## 2.2 DC Chopper Drive

### 2.2.1 Umum

Pada awalnya, ada dua metode konvensional yang biasa digunakan untuk mengubah tegangan arus searah tetap menjadi tegangan arus searah berubah, yakni:

#### 1. Pengaturan resistansi

Pada metode ini, digunakan resistor yang besarnya dapat diubah-ubah. Resistor tersebut dipasang di antara sumber tegangan arus searah yang besarnya tetap dengan beban. Metode ini biasa digunakan dalam pengaturan motor traksi. Metode ini memiliki beberapa kelemahan, diantaranya adalah besarnya rugi-rugi yang disebabkan oleh nilai resistansi yang digunakan.

#### 2. Pemasangan Motor-Generator

Pada metode ini, besarnya tegangan arus searah berubah dihasilkan oleh pengaturan besarnya arus medan yang dihasilkan oleh generator arus searah. Metode ini biasa digunakan pada beberapa mesin industri yang menggunakan sistem pengendali.

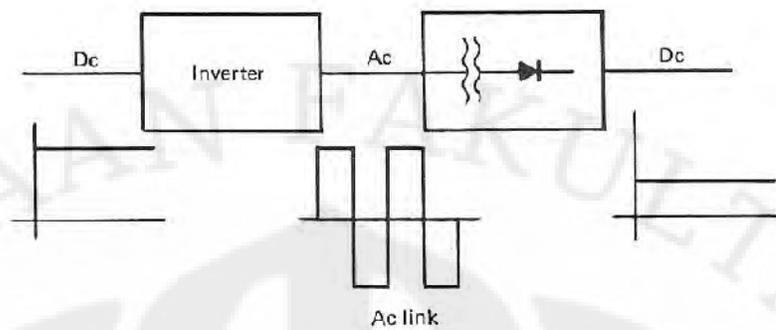
Pada tahun 1960-an, teknologi elektronika daya mulai mengalami perkembangan yang cukup pesat. Hal tersebut menjadikan kedua metode konvensional di atas menjadi jarang sekali digunakan.

Pada perkembangannya, konverter daya listrik, yang terdiri dari divais *thyristor*, biasa digunakan untuk mengubah tegangan arus searah tetap menjadi tegangan arus searah berubah. Penggunaan konverter jenis ini memiliki beberapa keunggulan bila dibandingkan dengan metode konvensional yang biasa digunakan sebelumnya, diantaranya: efisiensi yang lebih tinggi, respon yang lebih cepat, pengoperasian yang lebih halus, perawatan yang lebih sederhana, ukuran yang lebih kecil, berat yang lebih ringan, serta harga yang lebih murah.

Ada dua tipe konverter *thyristor* yang biasa digunakan, yakni:

#### 1. *Inverter-rectifier*

Skema dari tipe konverter ini dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 *Inverter-Rectifier* [4]

Pada tipe ini, tegangan arus searah diubah terlebih dahulu menjadi tegangan arus bolak-balik, yang besarnya dapat diatur dengan menggunakan transformator. Kemudian, tegangan arus bolak-balik tersebut diubah kembali menjadi tegangan arus searah. Proses pengubahan tegangan yang dilakukan pada tipe ini melalui dua tahap, yakni dari arus searah menjadi arus bolak-balik serta dari arus bolak-balik menjadi arus searah. Oleh karena itu, konverter *thyristor* tipe ini memerlukan lebih banyak biaya dalam pengoperasiannya serta nilai efisiensi yang dihasilkan lebih kecil.

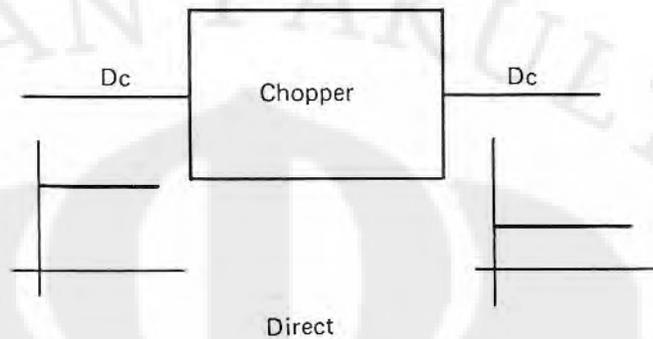
## 2. DC Chopper

DC *chopper* merupakan teknologi yang digunakan untuk mengubah tegangan arus searah tetap menjadi tegangan arus searah berubah secara langsung. Rangkaian *chopper* tipe ini biasanya dihubungkan seri dengan rangkaian jangkar rotor pada motor tersebut. Oleh karena itu, rangkaian ini dapat digunakan dalam pengoperasian kendaraan yang memerlukan penyimpanan energi.

Rangkaian *chopper* tipe ini biasa digunakan pada pengoperasian kendaraan *subway* untuk mereduksi hasil pemanasan dari kendaraan tersebut. Selain itu, rangkaian ini juga biasa digunakan pada kendaraan trolley, truk, serta pengangkut barang tambang.

Pengaturan yang lebih halus, efisiensi yang lebih tinggi, respon yang lebih cepat, serta biaya pengoperasian yang lebih murah merupakan beberapa keunggulan penggunaan konverter tipe DC *chopper* bila dibandingkan dengan tipe *inverter-rectifier*.

Skema dari tipe konverter ini ditunjukkan pada gambar 2.4.



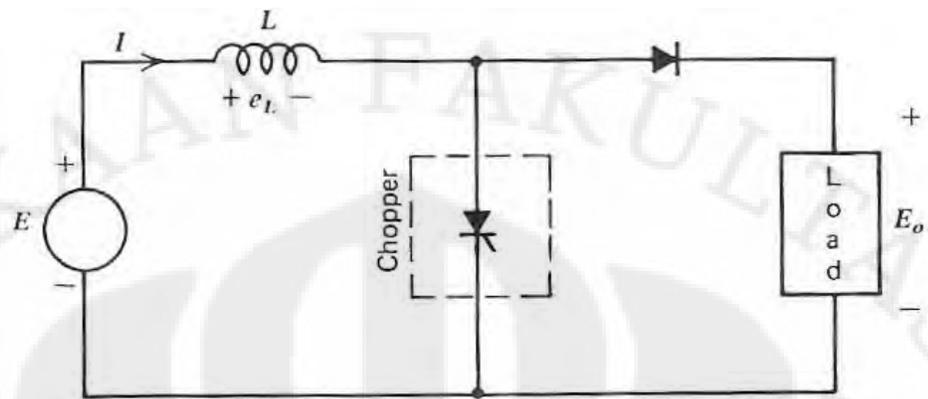
Gambar 2.4 DC Chopper [4]

### 2.2.2 Prinsip Kerja

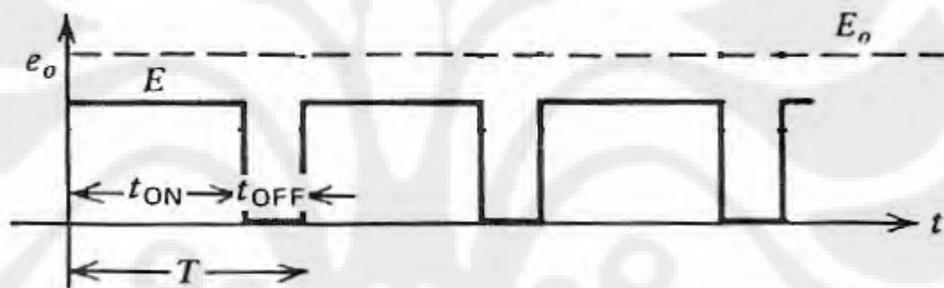
*Chopper* adalah rangkaian pemenggal tegangan arus searah. Komponen utama dari *chopper* adalah *thyristor* yang berfungsi sebagai penyambung dan pemutus beban dari tegangan suplai yang bekerja sangat cepat dengan frekuensi tinggi. Dengan demikian *chopper* dianggap sebagai saklar.

Masukan *chopper* adalah tegangan arus searah yang tetap dan keluarannya adalah tegangan arus searah yang terpenggal (*chopped voltage*). Nilai rata-rata keluaran dapat diatur besarnya dengan mengatur perbandingan antara waktu nyala  $t_{on}$  dengan waktu padam  $t_{off}$  *thyristor* utama tersebut.

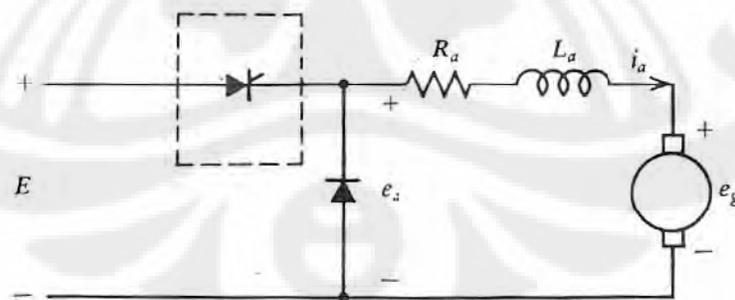
Konfigurasi rangkaian *chopper* serta proses dihasilkannya tegangan arus searah (*chopped voltage*) ditunjukkan pada gambar 2.5 (a) dan (b) untuk rangkaian *chopper* penaik tegangan arus searah. Sedangkan untuk rangkaian *chopper* penurun tegangan arus searah ditunjukkan pada gambar 2.6 (a) dan (b).



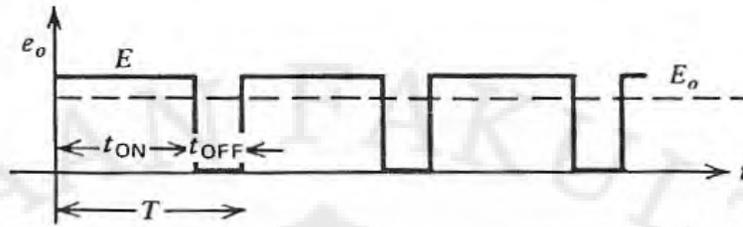
Gambar 2.5 (a) Konfigurasi Rangkaian *Chopper* Penaik Tegangan Arus Searah [4]



dan (b) Pengoperasiannya



Gambar 2.6 (a) Konfigurasi Rangkaian *Chopper* Penurun Tegangan Arus Searah [4]



dan (b) Pengoperasiannya [4]

Selama periode  $t_{on}$ , *chopper* menyala, terminal suplai terhubung dengan terminal beban. Selama periode  $t_{off}$ , *chopper* padam, sehingga arus mengalir menuju *free-wheeling diode*  $D_{FW}$ , dan terminal beban menjadi terhubung singkat.

Tegangan arus searah dihasilkan pada terminal beban. Besarnya tegangan pada terminal beban  $E_o$  dapat diketahui berdasarkan penjelasan di bawah ini.

1. Rangkaian *chopper* penaik tegangan arus searah (*step-up DC chopper*)

$$\begin{aligned} E_o &= E (t_{on} + t_{off}) / t_{off} \\ &= E T / T - t_{on} \\ &= E / (1 - \alpha) \end{aligned} \quad \text{..(2.16)}$$

2. Rangkaian *chopper* penurun tegangan arus searah (*step-down DC chopper*)

$$\begin{aligned} E_o &= E t_{on} / (t_{on} + t_{off}) \\ &= E t_{on} / T \\ &= \alpha E \end{aligned} \quad \text{..(2.17)}$$

Keterangan:

$t_{on}$  = waktu nyala

$t_{off}$  = waktu padam

$T$  =  $t_{on} + t_{off}$  (waktu *chopping*)

$\alpha$  =  $t_{on}/T$  (siklus kerja)

Besarnya tegangan pada terminal beban  $E_o$  diatur dengan cara mengatur besarnya siklus kerja pada rangkaian *chopper* tersebut. Metode-metode yang biasa digunakan untuk mengatur siklus kerja *chopper*, yakni:

1. Sistem frekuensi tetap:  $f = 1/T$

Besarnya frekuensi *chopping* (waktu *chopping*) dijaga tetap, dan besarnya waktu nyala  $t_{on}$  divariasikan. Metode ini biasa disebut dengan *Pulse-Width Modulation*.

## 2. Sistem frekuensi berubah

Besarnya waktu *chopping* divariasikan, dan waktu nyala  $t_{on}$  atau waktu padam  $t_{off}$  dijaga tetap. Metode ini biasa disebut dengan *Frequency Modulation*.

Pada aplikasinya, metode yang biasa digunakan untuk mengatur siklus kerja *chopper* adalah metode sistem frekuensi tetap. Metode ini memiliki beberapa keunggulan bila dibandingkan dengan metode sistem frekuensi berubah, yakni:

### 1. Pada metode sistem frekuensi tetap, besarnya frekuensi dijaga tetap.

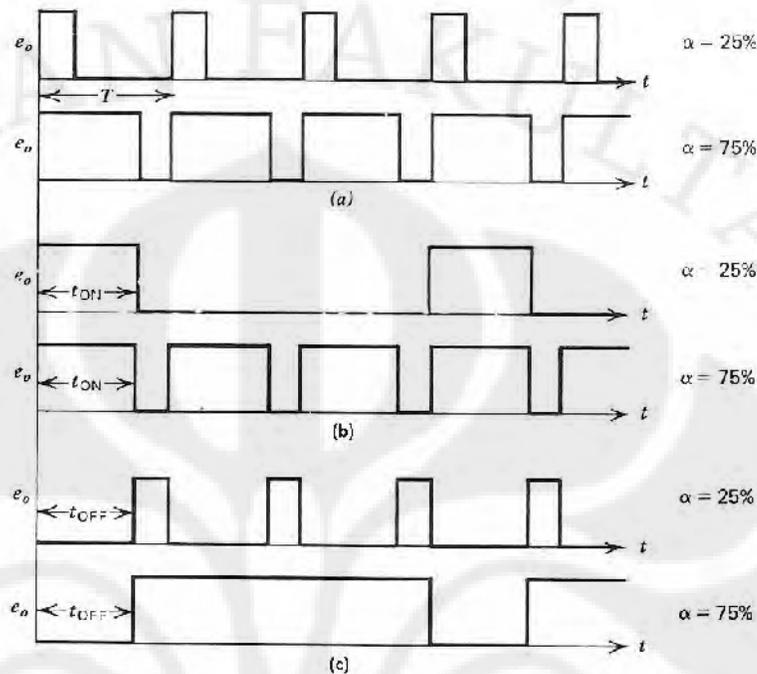
Hal tersebut menyebabkan besarnya tegangan keluaran rangkaian *chopper* tidak akan melebihi batas tegangan maksimal yang dapat dihasilkan oleh rangkaian tersebut.

### 2. Metode ini tidak menghasilkan harmonik pada keluarannya.

Hal tersebut menyebabkan tidak diperlukannya desain filter pada metode. Walaupun pada akhirnya diperlukan desain filter, tentu rangkaian filter tersebut tetap jauh lebih sederhana bila dibandingkan dengan metode sistem frekuensi berubah.

### 3. Untuk waktu padam $t_{off}$ yang cukup besar, arus yang dihasilkan pada metode ini tidak berubah menjadi diskontinyu.

Prinsip kerja dari kedua metode tersebut dapat dilihat pada gambar 2.7



**Gambar 2.7** Gelombang Tegangan Keluaran Rangkaian *Chopper*  
 (a) Sistem Frekuensi Tetap. Sistem Frekuensi Variabel:  
 (b) waktu nyala  $t_{on}$  dijaga tetap; (c) waktu padam  $t_{off}$  dijaga tetap. [4]

### 2.2.3 Rangkaian *Chopper* Penurun Tegangan Arus Searah

Pada rangkaian *chopper* penurun tegangan arus searah, besarnya tegangan yang dihasilkan oleh rangkaian tersebut  $E_o$  bernilai lebih kecil bila dibandingkan dengan tegangan masukannya  $E$ .

Metode pengaturan siklus kerja rangkaian *chopper* yang digunakan pada skripsi ini adalah metode sistem frekuensi tetap. Dengan menggunakan metode ini, arus jangkar yang dihasilkan bernilai kontinyu. Oleh karena itu, berdasarkan gambar 2.6, persamaan dari rangkaian *chopper* penurun tegangan arus searah pada saat arus jangkar  $I_a$  bernilai kontinyu, yakni:

$$E = I_a \cdot R_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + K \cdot \omega \cdot \Phi \quad 0 < t < t_{on} \quad \dots(2.18)$$

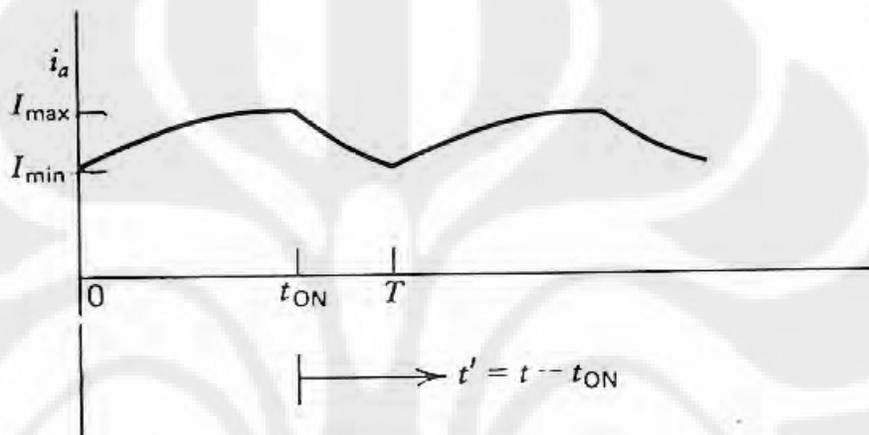
$$0 = I_a \cdot R_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + K \cdot \omega \cdot \Phi \quad t_{on} < t < T \quad \dots(2.19)$$

Keterangan:

$0 < t < t_{on}$  Kondisi rangkaian *chopper* menyala

$t_{on} < t < T$  Kondisi rangkaian *chopper* padam

Arus jangkar kontinu yang dihasilkan oleh rangkaian *chopper* ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Arus Jangkar Kontinu [4]

Pada kondisi tunak, arus jangkar akan bernilai minimal saat rangkaian *chopper* menyala dan bernilai maksimal saat rangkaian *chopper* padam.

Besarnya arus jangkar maksimal  $I_{max}$  ditunjukkan oleh persamaan di bawah ini.

$$I_{max} = E (1 - e^{-t_{on}/\tau}) / R_a (1 - e^{-T/\tau}) - (K \cdot \omega \cdot \Phi / R_a) \quad ..(2.20)$$

Sedangkan besarnya arus jangkar minimal  $I_{min}$  ditunjukkan oleh persamaan di bawah ini.

$$I_{min} = E (e^{t_{on}/\tau} - 1) / R_a (e^{T/\tau} - 1) - (K \cdot \omega \cdot \Phi / R_a) \quad ..(2.21)$$

Besarnya arus jangkar rata-rata ditunjukkan oleh persamaan 2.22.

$$I_a = 1/T (I_1 \cdot t_{on} + \tau(I_{min} - I_1)(1 - e^{-t_{on}/\tau}) + I_2(T - t_{on}) - \tau(I_{max} + I_2)(1 - e^{-(T-t_{on})/\tau}) \quad ..(2.22)$$

Besarnya arus jangkar rms adalah

$$I_{rms} = [1/T (I_1 \cdot t_{on} + 2\tau I_1 (I_{min} - I_1)(1 - e^{-t_{on}/\tau}) + \tau/2 (I_{min} - I_1)^2(1 - e^{-2t_{on}/\tau}) + I_2^2(T - t_{on}) - 2\tau I_2 (I_{max} + I_2)(1 - e^{-(T-t_{on})/\tau}) + \tau/2 (I_{max} + I_2)^2(1 - e^{-2(T-t_{on})/\tau})]^{1/2} \quad ..(2.23)$$

Keterangan:

$$I_1 = (E - K \cdot \omega \cdot \Phi) / R_a \quad ..(2.24)$$

$$I_2 = -K \cdot \omega \cdot \Phi / R_a \quad ..(2.25)$$

Torsi rata-rata yang dihasilkan motor adalah

$$T = K \cdot I_{rms}^2 \quad ..(2.26)$$

Tegangan keluaran rms ditunjukkan pada persamaan di bawah ini.

$$V_{rms} = \sqrt{\alpha} \cdot E \quad ..(2.27)$$

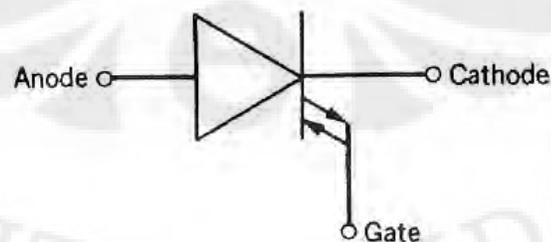
Sedangkan besarnya daya keluaran rangkaian *chopper* adalah

$$P = (\alpha E^2) / Z \quad ..(2.28)$$

#### 2.2.4 GTO (*Gate Turn-Off Thyristor*)

Pada skripsi ini, jenis *thyristor* yang digunakan adalah GTO (*Gate Turn-Off Thyristor*). GTO dapat dinyala-padamkan melalui sinyal yang diberikan ke terminal gerbang (*gate*)-nya.

Simbol rangkaian GTO ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2.9 Simbol Rangkaian GTO [2]

Tabel di bawah ini menunjukkan beberapa perbedaan dalam penggunaan thyristor konvensional dengan GTO.

No.	Keterangan	Thyristor Konvensional	GTO
1	Nyala	$i_{thy} > 0$	$g > 0$
2	Padam	$i_{thy} = 0$	$g < 0$
3	Penggunaan	Daya rendah	Daya tinggi

**Tabel 2.1 Perbedaan Thyristor Konvensional Dengan GTO**

## BAB III

### PEMODELAN DAN SIMULASI

#### 3.1 Pemodelan

##### 3.1.1 Motor Arus Searah Penguat Terpisah

Pada skripsi ini, jenis motor arus searah yang digunakan adalah dengan penguat terpisah. Motor jenis ini memiliki suplai tegangan arus searah yang terpisah antara kumparan medan stator dengan kumparan jangkar rotornya.

Salah satu keuntungan penggunaan motor arus searah penguat terpisah dibandingkan jenis motor lainnya adalah kisaran kecepatan pengoperasian motor yang cukup luas.

Pemodelan motor arus searah penguat terpisah diperoleh dari penurunan model matematis pada rangkaian ekivalennya (gambar 2.2) ke bentuk transformasi Laplace. Transformasi Laplace dari persamaan 2.6, adalah :

$$V_{f(s)} = R_f \cdot I_{f(s)} + s \cdot L_f \cdot I_{f(s)} \quad \dots(3.1)$$

sehingga :

$$I_{f(s)} = V_{f(s)} / (L_f \cdot s + R_f) \quad \dots(3.2)$$

Berdasarkan persamaan 2.8, transformasi Laplace dari persamaan tegangan terminal motor adalah :

$$V_{t(s)} = E_{a(s)} + R_a \cdot I_{a(s)} + s \cdot L_a \cdot I_{a(s)} \quad \dots(3.3)$$

sehingga :

$$I_{a(s)} = [V_{t(s)} - E_{a(s)}] / R_a (1 + \tau_a \cdot s) \quad \dots(3.4)$$

dengan  $\tau_a = L_a / R_a$  adalah konstanta waktu listrik

Berdasarkan persamaan 2.13, maka transformasi Laplace dari torsi induksi

$T_{ind}$  :

$$T_{ind(s)} = K \cdot \Phi \cdot I_a \approx L_{af} \cdot I_{f(s)} \cdot I_a(s) \quad \dots(3.5)$$

Berdasarkan persamaan 2.15, transformasi Laplace untuk keseimbangan torsi induksi :

$$T_{\text{ind}(s)} = T_{\text{mek}} + B_R \cdot \omega(s) + s \cdot J \cdot \omega(s) \quad \dots(3.6)$$

sehingga :

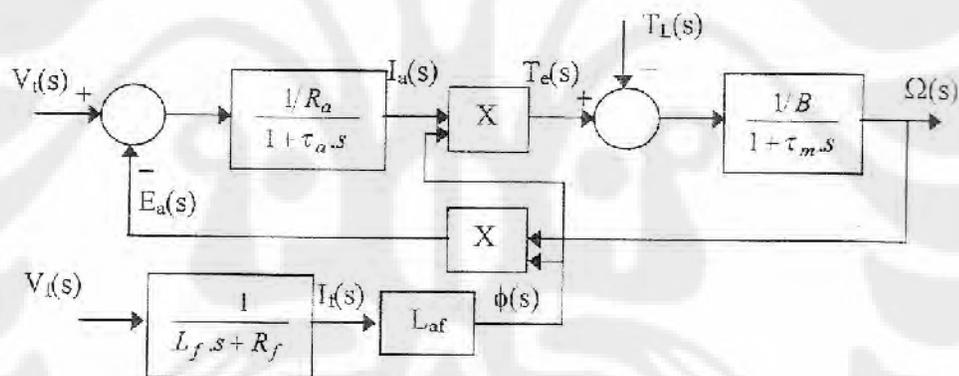
$$\omega(s) = [T_{\text{ind}(s)} - T_{\text{mek}(s)}] / B (1 + \tau_m \cdot s) \quad \dots(3.7)$$

dengan  $\tau_m = J/B$  adalah konstanta waktu mekanis.

Dengan mentransformasikan ke bentuk transformasi Laplace, maka persamaan 2.10 menjadi:

$$E_a(s) = K \cdot \Phi(s) \cdot \omega(s) \approx L_{af} \cdot I_f(s) \cdot I_a(s) \quad \dots(3.8)$$

Dari persamaan 3.2, 3.4, 3.5, 3.7, dan 3.8 dapat dinyatakan dengan diagram blok seperti pada gambar di bawah ini.



Gambar 3.1 Diagram Blok Motor Arus Searah Penguat Terpisah [3]

### 3.1.2 Pengendali PI

Pengendali yang digunakan dalam sistem kendali motor arus searah penguat terpisah ini terdiri dari pengendali arus jangkar dan pengendali kecepatan, dengan keduanya menggunakan pengendali PI.

Pada sistem kendali ini, pengendali PI cukup memadai karena penguat integral dapat dikendalikan untuk memperbaiki tanggapan keadaan tunak serta memperoleh tanggapan dan kestabilan yang cepat. Selain pengendali PI, sistem

kendali ini juga dilengkapi dengan rele yang digunakan untuk membatasi besarnya arus yang mengalir pada rangkaian jangkar rotor.

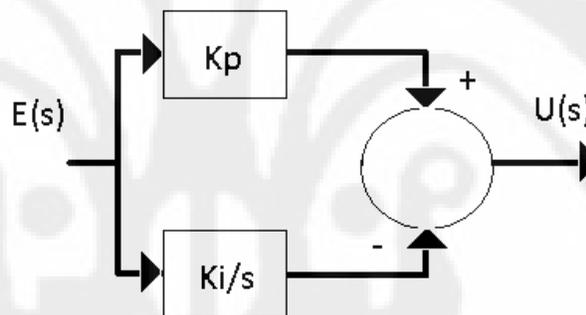
Dalam domain waktu, pengendali PI didefinisikan dengan persamaan:

$$u_{(t)} = K_p \cdot e_{(t)} + K_i \cdot \int e_{(t)} \cdot dt \quad \dots(3.9)$$

Dengan  $u_{(t)}$  adalah keluaran pengendali yang merupakan aksi kendali sistem. Masukan pengendali berupa  $e_{(t)}$  yang merupakan selisih antara nilai acuan dengan nilai keluaran yang sebenarnya sedangkan  $K_p$  dan  $K_i$  adalah konstanta penguat proporsional dan integral, yang menentukan tanggapan sistem yang diinginkan. Dengan mentransformasikan persamaan ke bentuk transformasi Laplace maka fungsi alih pengendali menjadi:

$$G_{c(s)} = U_{(s)} / E_{(s)} = K_p + K_i/s \quad \dots(3.10)$$

Diagram blok pengendali PI diperlihatkan pada gambar di bawah ini:



Gambar 3.2 Diagram Blok Pengendali PI [3]

Dalam skripsi ini, konstanta pengendali arus dan kecepatan diberikan dengan memperhatikan karakteristik masing-masing penguat, yakni sebagai berikut:

- Penguat Proporsional

Penguat ini memungkinkan sistem menanggapi masukan dengan cepat namun cenderung memperbesar osilasi yang terjadi sehingga jika nilai konstanta penguat terlalu besar maka prosentase *overshoot* akan semakin besar.

- Penguat Integral

Penguat ini memiliki karakteristik mengurangi kesalahan keadaan tunak namun akan memperburuk tanggapan peralihan sistem. Penambahan konstanta penguat integral akan memperbesar prosentase *overshoot* dan juga membuat respon sistem menjadi lambat.

### 3.1.3 Rangkaian *Chopper* Penurun Tegangan Arus Searah

Pada skripsi ini, metode pengaturan siklus kerja rangkaian *chopper* yang digunakan adalah metode sistem frekuensi tetap. Dengan menggunakan metode ini, arus yang dihasilkan adalah kontinyu, dimana pengoperasiannya pada kondisi  $0 < t < t_{on}$ .

Pemodelan rangkaian *chopper* penurun tegangan arus searah sebagai masukan masukan motor arus searah penguat terpisah diperoleh dari penurunan model matematis pada rangkaian ekuivalennya (gambar 2.6) ke bentuk transformasi Laplace. Transformasi Laplace dari persamaan 2.18 yakni:

$$E(s) = I_a(s) \cdot R_a + s L_a \cdot I_a(s) + K \cdot \Phi \cdot \omega(s) \quad ..(3.11)$$

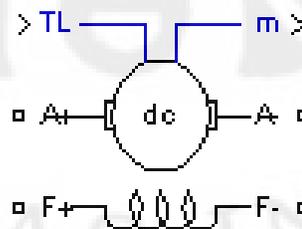
Keterangan:

Besarnya tegangan masukan rangkaian *chopper* E yakni sebesar tegangan jangkar rotor  $V_t$ . Maka,  $E = V_t$ .

## 3.2 Simulasi

### 3.2.1 Motor Arus Searah Penguat Terpisah

Blok simulasi motor arus searah penguat terpisah (MAS-PT) yang digunakan pada simulasi ini merupakan blok yang terdapat pada perangkat lunak MATLAB versi 7.6.0.324 (R2008a). Tampilan dari blok tersebut ditunjukkan pada gambar 3.3.



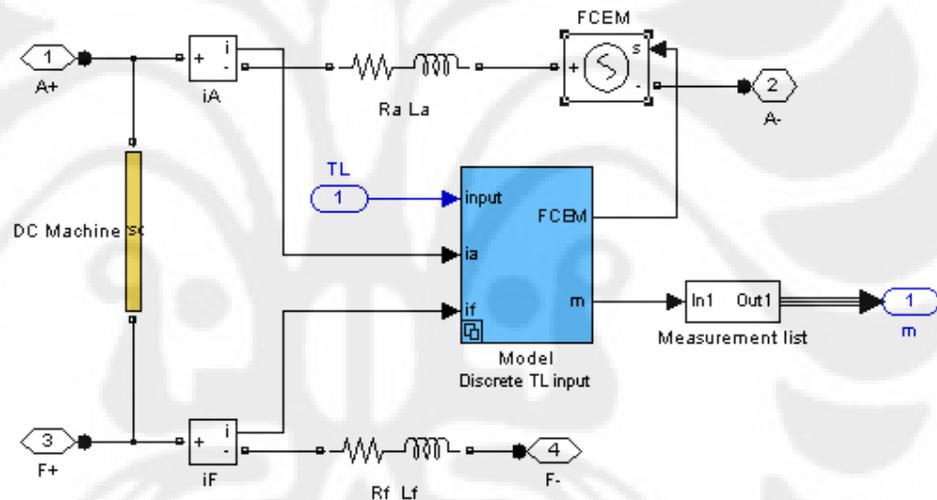
Gambar 3.3 Motor Arus Searah Penguat Terpisah

Universitas Indonesia

Terminal TL pada motor arus searah penguat terpisah terhubung dengan torsi beban yang akan diberikan pada motor tersebut. Sedangkan terminal m menunjukkan keluaran yang diperoleh dari motor tersebut.

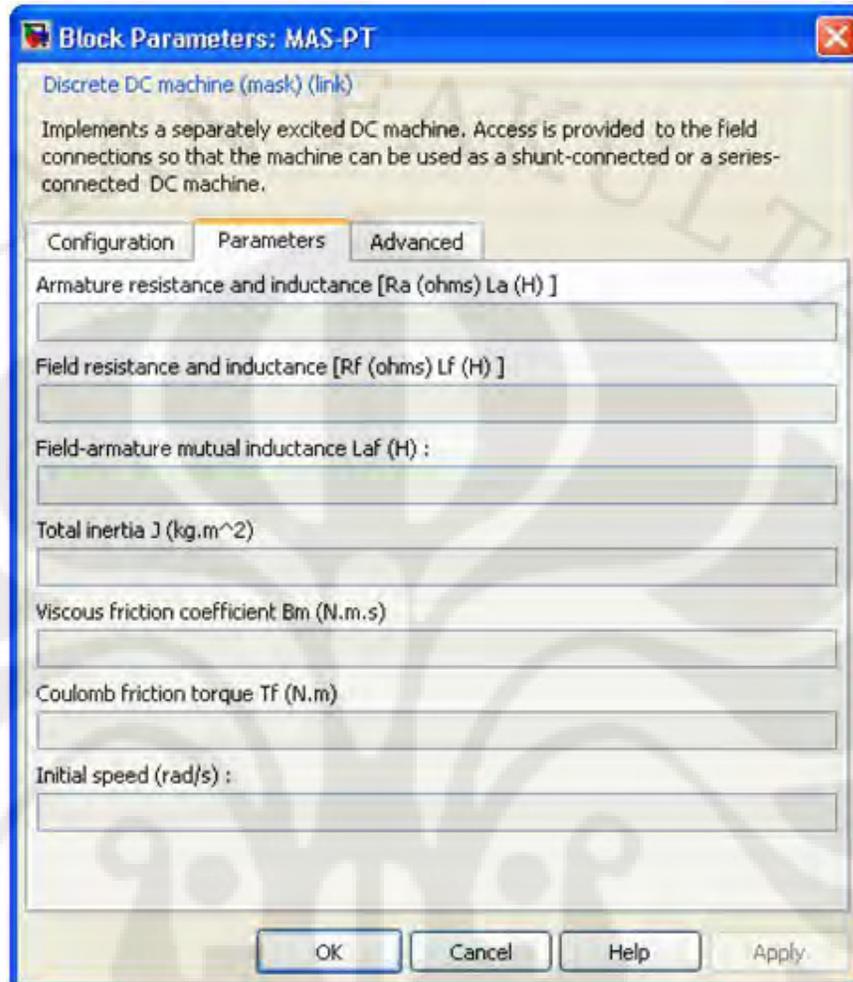
Terminal A+ dan A- merupakan rangkaian jangkar rotor dari motor arus searah penguat terpisah. Terminal A+ terhubung dengan rangkaian *chopper* penurun tegangan arus searah, sedangkan terminal A- terhubung ke pentanahan. Terminal A+ dan A- terdiri dari  $R_a$  dan  $L_a$  yang terpasang seri dengan *counter electromotive force* (CEMF), seperti ditunjukkan pada gambar 3.4.

Sedangkan terminal F+ dan F- merupakan rangkaian medan stator dari motor arus searah penguat terpisah. Terminal F+ terhubung dengan tegangan medan stator  $V_f$ , sedangkan terminal F- terhubung ke pentanahan.



Gambar 3.4 Rangkaian Motor Arus Searah Penguat Terpisah

Blok parameter motor arus searah penguat terpisah yang digunakan pada simulasi ini ditunjukkan pada gambar 3.5.



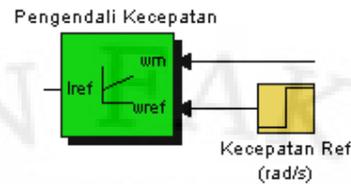
Gambar 3.5 Blok Parameter Motor Arus Searah Penguat Terpisah

### 3.2.2 Pengendali PI

Pada skripsi ini digunakan dua pengendali yakni pengendali kecepatan dan pengendali arus.

#### 1. Pengendali kecepatan

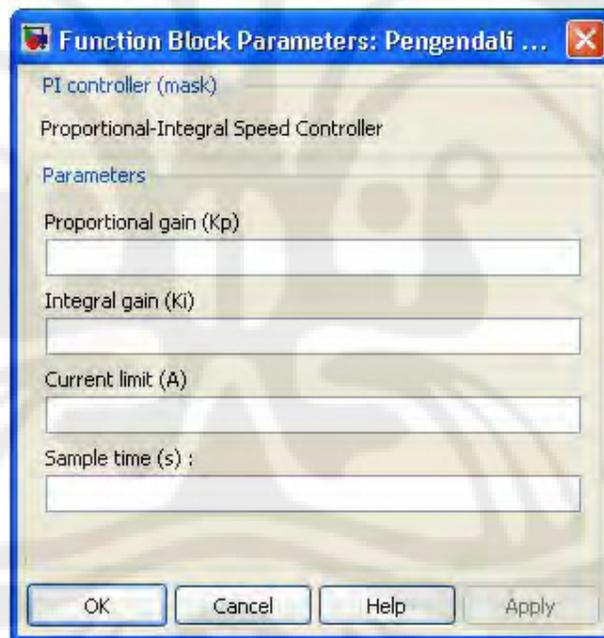
Blok pengendali kecepatan yang digunakan pada simulasi ini ditunjukkan pada gambar 3.6.



**Gambar 3.6 Blok Pengendali Kecepatan**

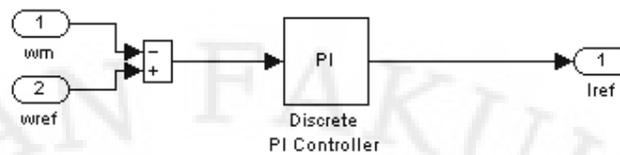
Terminal  $w_m$  menunjukkan besarnya kecepatan yang dihasilkan oleh motor arus searah penguat terpisah yang digunakan pada simulasi ini. Sedangkan terminal  $w_{ref}$  terhubung dengan kecepatan referensi yang diberikan pada motor tersebut.

Blok parameter dari pengendali kecepatan yang digunakan pada simulasi ini yakni.



**Gambar 3.7 Blok Parameter Pengendali Kecepatan**

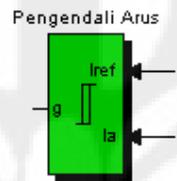
Terminal  $w_m$  dan  $w_{ref}$  terhubung dengan pengendali PI yang digunakan untuk mengusahakan supaya besarnya  $w_m$  sama dengan  $w_{ref}$ . Keluaran dari pengendali PI adalah  $I_{ref}$ , seperti ditunjukkan pada gambar 3.8.  $I_{ref}$  ini nantinya akan menjadi masukan pada rangkaian pengendali arus.



Gambar 3.8 Pengendali Kecepatan

## 2. Pengendali arus

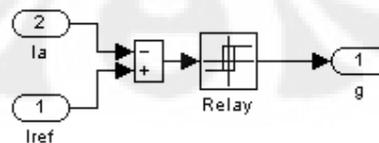
Blok pengendali arus ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 3.9 Blok Pengendali Arus

Terminal  $I_{ref}$  menunjukkan besarnya arus referensi yang digunakan pada simulasi ini, dimana besarnya arus referensi dipengaruhi oleh besarnya kecepatan referensi. Terminal  $I_a$  terhubung dengan rangkaian jangkar rotor. Sedangkan terminal  $g$  terhubung dengan saklar terkontrol GTO yang digunakan pada rangkaian *chopper*.

Pada skripsi ini, besarnya arus maksimal yang boleh mengalir pada rangkaian yakni 30 Ampere. Oleh karena itu, pada rangkaian pengendali arus digunakan rele arus untuk menjaga supaya besarnya arus yang mengalir pada rangkaian motor arus searah penguat terpisah tidak lebih dari 30 Ampere, seperti ditunjukkan pada gambar di bawah ini.

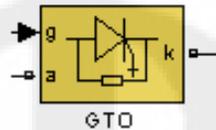


Gambar 3.10 Pengendali Arus

### 3.2.3 GTO

Pada skripsi ini, saklar terkontrol yang digunakan pada rangkaian *chopper* adalah GTO.

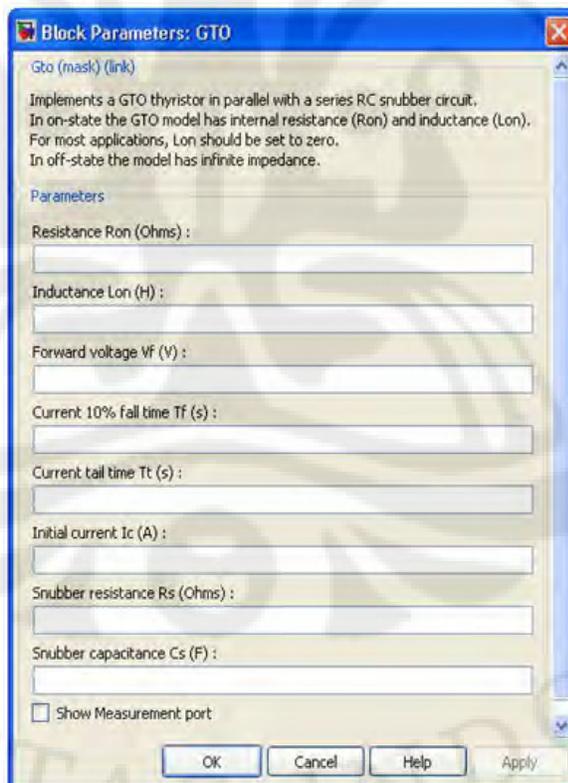
Blok GTO ditunjukkan pada gambar 3.11.



Gambar 3.11 Blok GTO

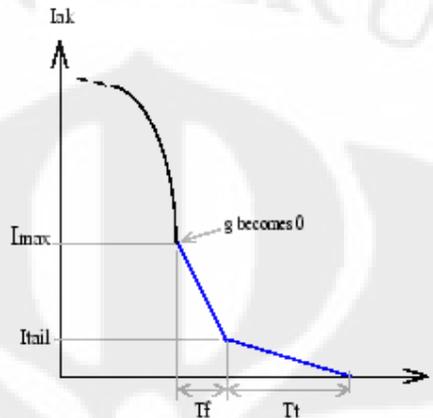
Terminal g pada GTO terhubung dengan blok pengendali arus. Terminal a terhubung dengan tegangan jangkar motor arus searah penguat terpisah. Sedangkan terminal k terhubung dengan *free-wheeling diode* dan induktor yang terpasang seri pada rangkaian *chopper*.

Blok parameter GTO yang digunakan pada simulasi ini yakni.



Gambar 3.12 Blok Parameter GTO

Pada simulasi ini, yang besarnya diubah-ubah hanya *fall time*  $T_f$  dan *tail time*  $T_t$ .  $T_f$  dan  $T_t$  menunjukkan lamanya waktu yang dibutuhkan oleh GTO untuk padam, seperti ditunjukkan pada gambar 3.13.

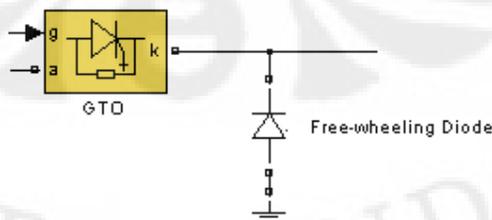


Gambar 3.13 Waktu Padam GTO ( $T_f$  dan  $T_t$ )

### 3.2.4 Rangkaian *Chopper* Penurun Tegangan Arus Searah

Pada skripsi ini, dilakukan perancangan dan pensimulasian rangkaian *chopper* penurun tegangan arus searah sebagai masukan motor arus searah penguat terpisah. Seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya bahwa rangkaian *chopper* terdiri dari saklar terkontrol serta *free wheeling diode*. Pada simulasi ini, saklar terkontrol yang digunakan adalah GTO. Hal tersebut dikarenakan beberapa keunggulan yang dimiliki saklar jenis ini bila dibandingkan dengan *thyristor* konvensional, salah satunya adalah mudah untuk dinyala-padamkan.

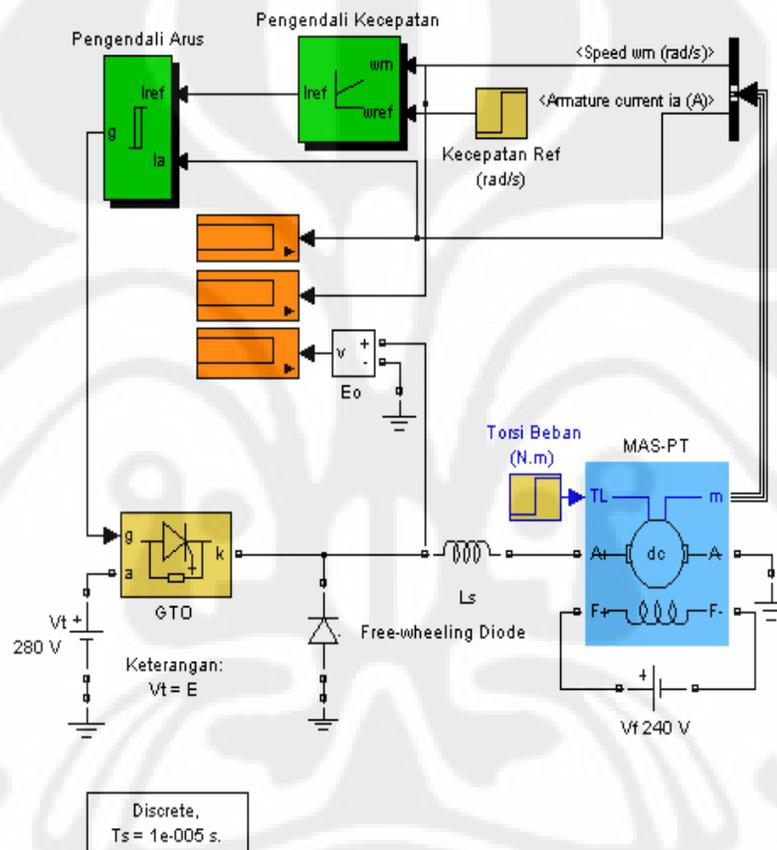
Blok simulasi rangkaian *chopper* penurun tegangan arus searah ditunjukkan pada gambar 3.14.



Gambar 3.14 Rangkaian *Chopper* Penurun Tegangan Arus Searah

Sedangkan simulasi rangkaian *chopper* penurun tegangan arus searah sebagai masukan motor arus searah penguat terpisah (MAS-PT) ditunjukkan pada gambar 3.15.

### Rangkaian Chopper Penurun Tegangan Arus Searah sebagai Masukan MAS-PT



Gambar 3.15 Rangkaian *Chopper* Penurun Tegangan Arus Searah sebagai Masukan Motor Arus Searah Penguat Terpisah

#### Deskripsi Rangkaian

Pada rangkaian simulasi di atas dapat terlihat bahwa sebuah motor arus searah disuplai tegangan arus searah melalui rangkaian *chopper* penurun tegangan

arus searah. Rangkaian *chopper* terdiri dari *thyristor* GTO dan sebuah *free-wheeling diode*. Motor menggunakan mesin arus searah diskrit yang terdapat pada *Machines library*. Lamanya waktu diskrit pembacaan simulasi yakni  $e^{-5}$  atau 6.74 ms.

Selain itu, pada rangkaian simulasi terdapat rangkaian pengendali, yakni pengendali arus dan pengendali kecepatan. Pengendali arus histerisis digunakan untuk membandingkan arus yang dihasilkan rangkaian dengan arus referensi. Pengendali ini menghasilkan sinyal penyalaaan *thyristor* GTO yang memaksa arus jangkar untuk akhirnya bernilai sama dengan arus referensi. Sedangkan rangkaian pengendali kecepatan menggunakan pengendali PI. Pengendali PI digunakan untuk menghasilkan arus referensi.

## BAB IV

### HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Bab ini akan menjelaskan hasil simulasi rangkaian *chopper* penurun tegangan arus searah sebagai masukan motor arus searah penguat terpisah. Hasil ini nantinya akan dianalisis sehingga dapat dilihat karakteristik yang dimiliki oleh rangkaian ini.

Simulasi pada skripsi ini menggunakan simulink yang terdapat pada perangkat lunak MATLAB versi 7.6.0.324 (R2008a). Simulasi ini terdiri dari dua blok utama, yakni: blok motor arus searah penguat terpisah dan blok rangkaian *chopper* penurun tegangan arus searah.

Pada blok motor arus searah penguat terpisah, diberikan suplai tegangan medan stator  $V_f$  sebesar 240 Volt dan tegangan jangkar rotor  $V_t$  sebesar 280 Volt. Kedua suplai tegangan tersebut besarnya dijaga tetap. Selain itu, parameter motor arus searah penguat terpisah juga dijaga tetap.

Parameter motor arus searah penguat terpisah yang digunakan pada simulasi ini yakni:

$$R_a = 0.5 \Omega$$

$$L_a = 0 \Omega$$

$$R_f = 240 \Omega$$

$$L_f = 0 \text{ H}$$

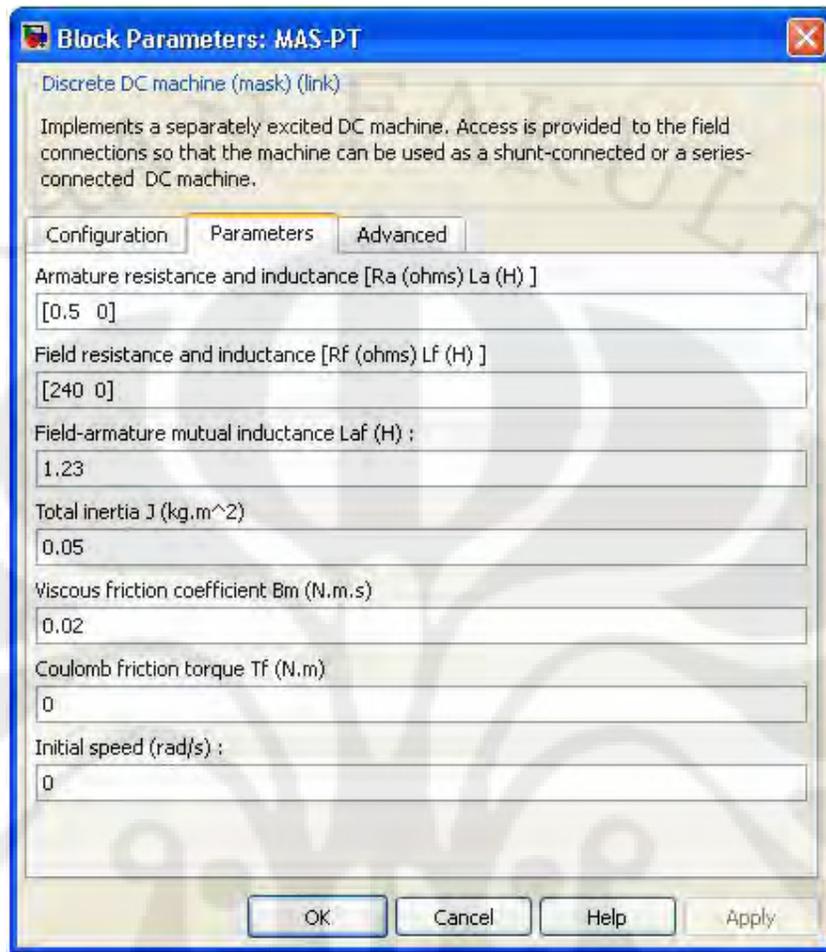
$$L_{af} = 1.23 \text{ H}$$

$$J = 0.05 \text{ kgm}$$

$$B_m = 0.02 \text{ Nms}$$

$$T_f = 0 \text{ Nm}$$

$$\omega_{\text{initial}} = 0 \text{ rad/s}$$



Gambar 4.1 Parameter Motor Arus Searah Penguat Terpisah

Sedangkan blok rangkaian *chopper* penurunan tegangan arus searah terdiri dari saklar terkontrol GTO dan *free-wheeling diode*. Parameter saklar terkontrol GTO yang digunakan pada simulasi ini dijaga tetap, kecuali besarnya *fall time*  $T_f$  dan *tail time*  $T_t$  diatur besarnya. Parameter saklar terkontrol GTO yang digunakan pada simulasi ini yakni:

$$R_{on} = 0.05 \Omega$$

$$L_{on} = 0 \Omega$$

$$V_f = 1 \text{ V}$$

$$T_f = [\text{diatur}] \text{ H}$$

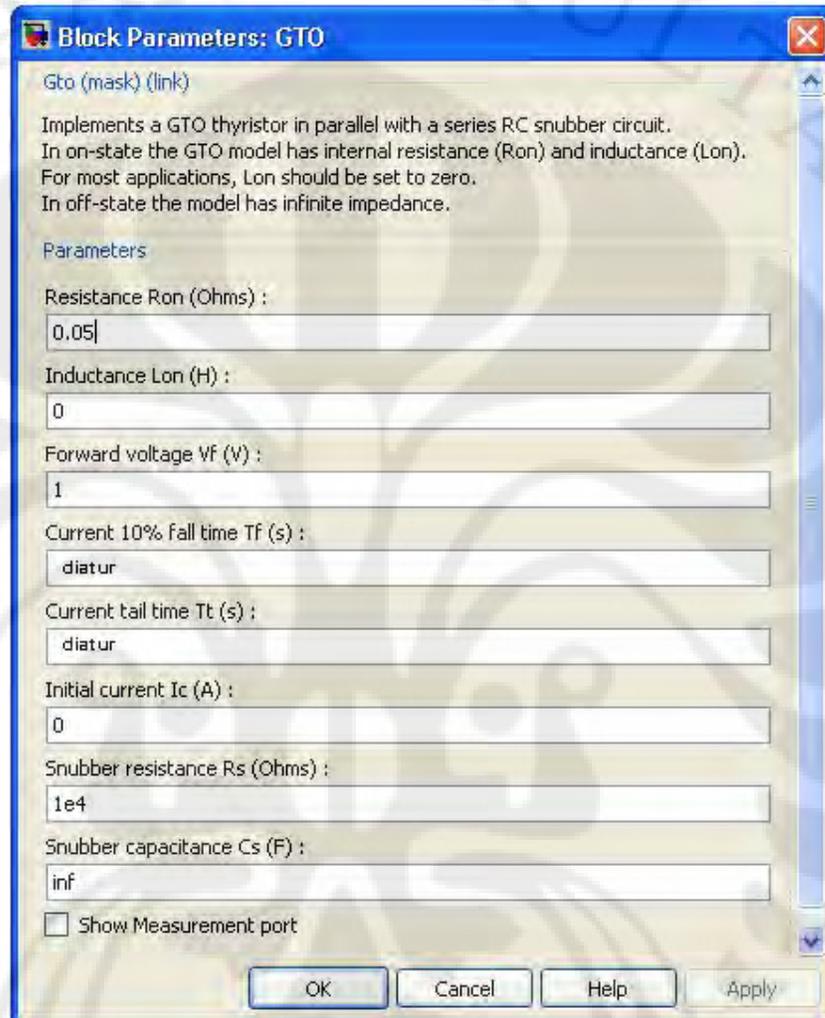
$$T_t = [\text{diatur}] \text{ H}$$

$$I_c = 0 \text{ A}$$

Universitas Indonesia

$$R_s = e^4 \Omega$$

$$C_s = \text{inf}$$



Gambar 4.2 Parameter Saklar Terkontrol GTO

Rangkaian *chopper* penurun tegangan arus searah dihubungkan secara seri dengan rangkaian jangkar motor arus searah penguat terpisah. Berdasarkan gambar 2.6 (a), suplai tegangan jangkar rotor  $V_t$  diberikan pada rangkaian *chopper* penurun tegangan arus searah.

Penggunaan rangkaian *chopper* jenis ini adalah untuk mengatur besarnya tegangan suplai yang diberikan pada rangkaian jangkar rotor  $E_o$  pada kecepatan

Universitas Indonesia

tertentu. Dengan menggunakan rangkaian *chopper* jenis ini, motor arus searah penguat terpisah diharapkan dapat dioperasikan pada kecepatan tertentu dengan besar arus jangkar rotor  $I_a$  yang lebih kecil bila dibandingkan dengan pengoperasian motor arus searah penguat terpisah secara konvensional (tanpa rangkaian *chopper*).

Berdasarkan persamaan 2.17, dimana  $V_t = E$ , pada kondisi tegangan jangkar rotor  $V_t$  dijaga tetap, besarnya suplai tegangan yang diberikan pada rangkaian jangkar rotor  $E_o$  dipengaruhi oleh besarnya siklus kerja  $\alpha$  yang dimiliki oleh rangkaian *chopper* tersebut.

Berdasarkan persamaan  $\alpha = t_{on}/T$ , besarnya siklus kerja  $\alpha$  dipengaruhi oleh besarnya waktu nyala  $t_{on}$  dan waktu *chopping*  $T$ . Pada skripsi ini, besarnya waktu *chopping* diasumsikan tetap, sedangkan besarnya waktu nyala  $t_{on}$  diubah-ubah dengan cara mengubah besarnya waktu padam  $t_{off}$  GTO. Metode yang digunakan untuk mengatur besarnya suplai tegangan yang diberikan pada rangkaian jangkar rotor  $E_o$  adalah sistem frekuensi tetap.

Berdasarkan persamaan  $T = t_{on} + t_{off}$ , dimana besarnya waktu *chopping*  $T$  diasumsikan tetap, bila besarnya waktu padam  $t_{off}$  diperkecil, maka besarnya waktu nyala  $t_{on}$  akan semakin besar seiring dengan perubahan waktu padam  $t_{off}$  tersebut. Pada skripsi ini, pengendalian siklus kerja  $\alpha$  rangkaian *chopper* dilakukan dengan mengubah besarnya waktu padam  $t_{off}$  GTO.

Pada perangkat lunak MATLAB versi 7.6.0.324 (R2008a), untuk mengubah besarnya waktu padam  $t_{off}$  GTO dapat dilakukan dengan cara mengubah besarnya *fall time*  $T_f$  dan *tail time*  $T_t$  yang terdapat pada blok parameter GTO.

Simulasi dilakukan pada dua kondisi, yakni pada saat waktu padam  $t_{off}$  (*fall time*  $T_f$  dan *tail time*  $T_t$ ) dijaga tetap dan kecepatan putar rotor  $\omega$  dijaga tetap.

#### 4.1 Waktu Padam $t_{off}$ Tetap

Pada simulasi ini, besarnya waktu padam  $t_{off}$  GTO dijaga tetap. Parameter motor arus searah penguat terpisah juga dijaga tetap. Sedangkan besarnya kecepatan putar rotor  $\omega$  motor arus searah penguat terpisah diatur sebesar 150, 160, dan 170 rad/s.

Simulasi ini dilakukan untuk mengetahui hubungan antara pengaturan kecepatan putar rotor motor arus searah penguat terpisah dengan besarnya suplai tegangan yang diberikan pada rangkaian jangkar rotor  $E_o$  serta arus jangkar rotor  $I_a$  pada kondisi waktu padam  $t_{off}$  GTO, yang terdiri dari *fall time*  $T_f$  dan *tail time*  $T_t$ , dijaga tetap.

Pada simulasi ini, diperoleh beberapa data yang pada akhirnya akan dianalisis. Data tersebut ditunjukkan pada tabel di bawah ini.

Waktu padam ( $T_f$  dan  $T_t$ ) dijaga tetap

$T = 25 \text{ N.m}$

$T_f$ (s)	$T_t$ (s)	$\omega$ (rad/s)	$I_a$ (A)	$E_o$ (V)
0.008	0.008	150	23.15	278.8
0.008	0.008	160	22.61	278.9
0.008	0.008	170	22.06	279

$T_f$ (s)	$T_t$ (s)	$\omega$ (rad/s)	$I_a$ (A)	$E_o$ (V)
0.008	0.005	150	23.15	278.8
0.008	0.005	160	22.61	278.9
0.008	0.005	170	22.06	279

$T_f$ (s)	$T_t$ (s)	$\omega$ (rad/s)	$I_a$ (A)	$E_o$ (V)
0.005	0.005	150	23.08	278.2
0.005	0.005	160	22.41	278.8
0.005	0.005	170	22	277.9

**Tabel 4.1 Data Pada Kondisi Waktu Padam  $t_{off}$  Tetap**  
Universitas Indonesia

Untuk *fall time*  $T_f$  sebesar 0.008 s dan *tail time*  $T_t$  sebesar 0.008 s:

Saat kecepatan putar rotor  $\omega$  sebesar 150 rad/s, besarnya tegangan keluaran rangkaian *chopper*  $E_o$  adalah 278.8 V, sedangkan besarnya arus jangkar rotor  $I_a$  adalah 23.15 A.

Saat kecepatan putar rotor  $\omega$  diperbesar menjadi 160 rad/s, besarnya tegangan keluaran rangkaian *chopper*  $E_o$  adalah 278.9 V, sedangkan besarnya arus jangkar rotor  $I_a$  adalah 22.61 A.

Sedangkan saat kecepatan putar rotor  $\omega$  diperbesar menjadi 170 rad/s, besarnya tegangan keluaran rangkaian *chopper*  $E_o$  adalah 279 V, sedangkan besarnya arus jangkar rotor  $I_a$  adalah 22.06 A.

Untuk *fall time*  $T_f$  sebesar 0.008 s dan *tail time*  $T_t$  sebesar 0.005 s:

Saat kecepatan putar rotor  $\omega$  sebesar 150 rad/s, besarnya tegangan keluaran rangkaian *chopper*  $E_o$  adalah 278.8 V, sedangkan besarnya arus jangkar rotor  $I_a$  adalah 23.15 A.

Saat kecepatan putar rotor  $\omega$  diperbesar menjadi 160 rad/s, besarnya tegangan keluaran rangkaian *chopper*  $E_o$  adalah 278.9 V, sedangkan besarnya arus jangkar rotor  $I_a$  adalah 22.61 A.

Sedangkan saat kecepatan putar rotor  $\omega$  diperbesar menjadi 170 rad/s, besarnya tegangan keluaran rangkaian *chopper*  $E_o$  adalah 279 V, sedangkan besarnya arus jangkar rotor  $I_a$  adalah 22.06 A.

Untuk *fall time*  $T_f$  sebesar 0.005 s dan *tail time*  $T_t$  sebesar 0.005 s:

Saat kecepatan putar rotor  $\omega$  sebesar 150 rad/s, besarnya tegangan keluaran rangkaian *chopper*  $E_o$  adalah 278.2 V, sedangkan besarnya arus jangkar rotor  $I_a$  adalah 23.08 A.

Saat kecepatan putar rotor  $\omega$  diperbesar menjadi 160 rad/s, besarnya tegangan keluaran rangkaian *chopper*  $E_o$  adalah 278.8 V, sedangkan besarnya arus jangkar rotor  $I_a$  adalah 22.41 A.

Sedangkan saat kecepatan putar rotor  $\omega$  diperbesar menjadi 170 rad/s, besarnya tegangan keluaran rangkaian *chopper*  $E_o$  adalah 277.9 V, sedangkan besarnya arus jangkar rotor  $I_a$  adalah 22 A.

Universitas Indonesia

Berdasarkan hasil simulasi yang diperoleh, dapat dilihat bahwa besarnya arus jangkar rotor  $I_a$  yang mengalir pada rangkaian motor arus searah penguat terpisah tidak lebih dari batas arus maksimal yang diperbolehkan pada rangkaian tersebut, yakni sebesar 30 A. Besarnya arus jangkar rotor  $I_a$  yang mengalir pada rangkaian motor arus searah penguat terpisah yakni sebesar 22; 22.06; 22.06; 22.41; 22.61; 22.61; 23.08; 23.15; 23.15 A (diurut dari kecil ke besar).

Selain itu, juga dapat dilihat bahwa besarnya suplai tegangan yang akan diberikan pada rangkaian jangkar  $E_o$  motor arus searah penguat terpisah tidak lebih dari tegangan jangkar  $V_t$  yang diberikan pada rangkaian *chopper* penurunan tegangan arus searah, yakni sebesar 280 V. Hal ini sesuai dengan persamaan di bawah ini,

$$E_o = \alpha E$$

dimana  $E_o$  bernilai lebih kecil daripada  $E$ . Besarnya suplai tegangan yang akan diberikan pada rangkaian jangkar  $E_o$  motor arus searah penguat terpisah yakni sebesar 277.9; 278.2; 278.8; 278.8; 278.8; 278.9; 278.9; 279; 279 V (diurut dari kecil ke besar).

Pada saat motor dioperasikan pada  $T_f$  sebesar 0.005 s dan *tail time*  $T_t$  sebesar 0.005 s, dengan besar kecepatan 170 rad/s, besarnya suplai tegangan yang akan diberikan pada rangkaian jangkar  $E_o$  motor arus searah penguat terpisah mengalami penurunan bila dibandingkan dengan besar kecepatan 160 rad/s.

Berdasarkan hasil simulasi yang diperoleh, dapat diketahui bahwa pada kondisi waktu padam  $t_{off}$  GTO dijaga tetap, semakin besar kecepatan putar rotor  $\omega$  yang diinginkan dalam pengoperasian motor arus searah penguat terpisah, semakin besar juga suplai tegangan rangkaian jangkar  $E_o$  yang dibutuhkan dalam pengoperasian motor tersebut. Hal tersebut sesuai dengan persamaan di bawah ini,

$$\omega = E_o - I_a \cdot R_a / K \cdot \Phi$$

Pada kondisi ini, besarnya arus jangkar rotor  $I_a$  yang akan mengalir pada rangkaian akan semakin kecil. Hal ini akan menghasilkan performansi

pengoperasian motor arus searah penguat terpisah yang lebih baik. Karena untuk mengoperasikan motor pada suatu kecepatan tertentu, besarnya arus jangkar rotor  $I_a$  yang mengalir pada rangkaian motor tersebut tidak terlalu besar.

Bila arus yang mengalir pada rangkaian motor cukup besar bahkan melebihi batas arus yang diperbolehkan mengalir pada rangkaian tersebut, maka akan menyebabkan berkurangnya lama pakai motor arus searah penguat terpisah. Hal ini dikarenakan pemanasan yang terjadi pada rangkaian motor, yang pada akhirnya dapat menyebabkan kerusakan pada isolasi motor tersebut.

Selain itu, penjelasan di atas pada akhirnya terkait dengan besarnya rugi-rugi akibat panas yang dihasilkan selama motor beroperasi. Karena semakin besar arus jangkar rotor  $I_a$  yang mengalir pada rangkaian motor, semakin besar rugi-rugi akibat panas yang dihasilkan oleh motor tersebut. Hal ini sesuai dengan persamaan di bawah ini,

$$P_{\text{loss}} = I_a^2 \cdot R_a$$

Perubahan arus jangkar rotor  $I_a$  dan suplai tegangan rangkaian jangkar  $E_o$  yang diperoleh pada simulasi ini tidak terlalu besar. Hal ini dikarenakan tidak terlalu besarnya kenaikan kecepatan putar rotor  $\omega$  yang diberikan. Walaupun begitu, hasil yang diperoleh sudah memenuhi tujuan dari simulasi ini, seperti yang dijelaskan pada bagian awal sub-bab ini.

#### 4.2 Kecepatan Putar Rotor $\omega$ Tetap

Pada simulasi ini, besarnya kecepatan putar rotor  $\omega$  motor arus searah penguat terpisah dijaga tetap. Parameter motor arus searah penguat terpisah juga dijaga tetap. Sedangkan besarnya waktu padam  $t_{\text{off}}$  GTO (*fall time*  $T_f$  dan *tail time*  $T_t$ ) diatur sebesar 0.008/0.008 s, 0.008/0.005 s, dan 0.007/0.005 s.

Simulasi ini dilakukan untuk mengetahui hubungan antara pengaturan waktu padam  $t_{\text{off}}$  GTO dengan besarnya suplai tegangan yang diberikan pada rangkaian jangkar rotor  $E_o$  serta arus jangkar rotor  $I_a$ , pada kondisi kecepatan putar rotor  $\omega$  motor arus searah penguat terpisah dijaga tetap.

Pada simulasi ini, diperoleh beberapa data yang pada akhirnya akan dianalisis. Data tersebut ditunjukkan pada tabel 4.2.

Kecepatan putar rotor  $\omega$  dijaga tetap

$T = 25 \text{ N.m}$

$T_f$ (s)	$T_t$ (s)	$\omega$ (rad/s)	$I_a$ (A)	$E_o$ (V)
0.008	0.008	150	23.15	278.8
0.008	0.005	150	23.15	278.8
0.007	0.005	150	22	279

$T_f$ (s)	$T_t$ (s)	$\omega$ (rad/s)	$I_a$ (A)	$E_o$ (V)
0.008	0.008	160	22.61	278.9
0.008	0.005	160	22.61	278.9
0.007	0.005	160	21.96	277.9

$T_f$ (s)	$T_t$ (s)	$\omega$ (rad/s)	$I_a$ (A)	$E_o$ (V)
0.008	0.008	170	22.06	279
0.008	0.005	170	22.06	279
0.007	0.005	170	23.33	278.7

**Tabel 4.2 Data Pada Kondisi Kecepatan Putar Rotor  $\omega$  Tetap**

Untuk kecepatan putar rotor  $\omega$  sebesar 150 rad/s:

Saat *fall time*  $T_f$  dan *tail time*  $T_t$  pada blok parameter GTO diatur sebesar 0.008/0.008 s, besarnya tegangan keluaran rangkaian *chopper*  $E_o$  adalah 278.8 V, sedangkan besarnya arus jangkar rotor  $I_a$  adalah 23.15 A.

Saat *fall time*  $T_f$  dan *tail time*  $T_t$  pada blok parameter GTO diatur sebesar 0.008/0.005 s, besarnya tegangan keluaran rangkaian *chopper*  $E_o$  adalah 278.8 V, sedangkan besarnya arus jangkar rotor  $I_a$  adalah 23.15 A.

Sedangkan saat *fall time*  $T_f$  dan *tail time*  $T_t$  pada blok parameter GTO diatur sebesar 0.007/0.005 s, besarnya tegangan keluaran rangkaian *chopper*  $E_o$  adalah 279 V, sedangkan besarnya arus jangkar rotor  $I_a$  adalah 22 A.

Untuk kecepatan putar rotor  $\omega$  sebesar 160 rad/s:

Saat *fall time*  $T_f$  dan *tail time*  $T_t$  pada blok parameter GTO diatur sebesar 0.008/0.008 s, besarnya tegangan keluaran rangkaian *chopper*  $E_o$  adalah 278.9 V, sedangkan besarnya arus jangkar rotor  $I_a$  adalah 22.61 A.

Saat *fall time*  $T_f$  dan *tail time*  $T_t$  pada blok parameter GTO diatur sebesar 0.008/0.005 s, besarnya tegangan keluaran rangkaian *chopper*  $E_o$  adalah 278.9 V, sedangkan besarnya arus jangkar rotor  $I_a$  adalah 22.61 A.

Sedangkan saat *fall time*  $T_f$  dan *tail time*  $T_t$  pada blok parameter GTO diatur sebesar 0.007/0.005 s, besarnya tegangan keluaran rangkaian *chopper*  $E_o$  adalah 277.9 V, sedangkan besarnya arus jangkar rotor  $I_a$  adalah 21.96 A.

Untuk kecepatan putar rotor  $\omega$  sebesar 170 rad/s:

Saat *fall time*  $T_f$  dan *tail time*  $T_t$  pada blok parameter GTO diatur sebesar 0.008/0.008 s, besarnya tegangan keluaran rangkaian *chopper*  $E_o$  adalah 279 V, sedangkan besarnya arus jangkar rotor  $I_a$  adalah 22.06 A.

Saat *fall time*  $T_f$  dan *tail time*  $T_t$  pada blok parameter GTO diatur sebesar 0.008/0.005 s, besarnya tegangan keluaran rangkaian *chopper*  $E_o$  adalah 279 V, sedangkan besarnya arus jangkar rotor  $I_a$  adalah 22.06 A.

Sedangkan saat *fall time*  $T_f$  dan *tail time*  $T_t$  pada blok parameter GTO diatur sebesar 0.007/0.005 s, besarnya tegangan keluaran rangkaian *chopper*  $E_o$  adalah 278.7 V, sedangkan besarnya arus jangkar rotor  $I_a$  adalah 23.33 A.

Sama halnya dengan penjelasan pada kondisi waktu pada  $t_{off}$  dijaga tetap, besarnya arus jangkar rotor  $I_a$  yang mengalir pada rangkaian motor arus searah penguat terpisah tidak lebih dari batas arus yang diperbolehkan pada rangkaian

**Universitas Indonesia**

tersebut, yakni sebesar 30 A. Besarnya arus jangkar rotor  $I_a$  yang mengalir pada rangkaian motor arus searah penguat terpisah yakni sebesar 21.96; 22; 22.06; 22.06; 22.61; 22.61; 23.15; 23.15; 23.33 A (diurut dari kecil ke besar).

Selain itu, juga dapat dilihat bahwa besarnya suplai tegangan yang akan diberikan pada rangkaian jangkar  $E_o$  motor arus searah penguat terpisah tidak lebih dari tegangan jangkar  $V_t$  yang diberikan pada rangkaian *chopper* penurun tegangan arus searah, yakni sebesar 280 V. Hal ini sesuai dengan persamaan di bawah ini,

$$E_o = \alpha E$$

Keterangan:  $V_t = E$

dimana  $E_o$  bernilai lebih kecil daripada  $E$ . Besarnya suplai tegangan yang akan diberikan pada rangkaian jangkar  $E_o$  motor arus searah penguat terpisah yakni sebesar 277.9; 278.7; 278.8; 278.8; 278.9; 278.9; 279; 279; 279 V (diurut dari kecil ke besar).

Berdasarkan hasil simulasi yang diperoleh, dapat diketahui bahwa pada kondisi waktu *chopping*  $T$  dijaga tetap, semakin kecil waktu padam  $t_{off}$ , maka semakin besar waktu nyala  $t_{on}$ . Hal ini sesuai dengan persamaan yang ada, yakni:

$$T = t_{on} + t_{off}$$

Semakin besar waktu nyala  $t_{on}$ , maka semakin besar siklus kerja  $\alpha$  dari rangkaian *chopper* tersebut. Hal ini sesuai dengan persamaan di bawah ini:

$$\alpha = t_{on} / T$$

dimana besarnya siklus kerja  $\alpha$  dari rangkaian *chopper* memiliki hubungan berbanding lurus dengan besarnya waktu nyala  $t_{on}$  rangkaian *chopper* tersebut.

Semakin besar siklus kerja  $\alpha$ , maka semakin besar suplai tegangan yang diberikan pada rangkaian jangkar rotor  $E_o$ . Hal ini sesuai dengan persamaan di bawah ini:

$$E_o = \alpha E$$

dimana besarnya suplai tegangan yang diberikan pada rangkaian jangkar rotor  $E_o$  memiliki hubungan berbanding lurus dengan besarnya siklus kerja  $\alpha$  rangkaian *chopper* tersebut.

Pada kondisi kecepatan putar rotor dijaga tetap, kenaikan suplai tegangan jangkar yang diberikan pada rangkaian jangkar rotor  $E_o$  akan diikuti dengan penurunan besar arus jangkar rotor  $I_a$  yang mengalir pada rangkaian motor arus searah penguat terpisah tersebut. Hal ini sesuai dengan persamaan yang ada, yakni:

$$\omega = E_o - I_a \cdot R_a / K \cdot \Phi$$

Oleh karena itu, berdasarkan hasil simulasi di atas dapat diketahui bahwa pengaturan waktu padam  $t_{off}$  atau waktu nyala  $t_{on}$  pada rangkaian *chopper* akan mengurangi besarnya arus jangkar rotor  $I_a$  yang mengalir pada rangkaian motor untuk satu kecepatan tertentu.

Perubahan arus jangkar rotor  $I_a$  dan suplai tegangan rangkaian jangkar  $E_o$  yang diperoleh pada simulasi ini tidak terlalu besar. Hal ini dikarenakan tidak terlalu besarnya perubahan waktu padam  $t_{off}$  GTO (*fall time*  $T_f$  dan *tail time*  $T_t$ ) yang diberikan. Walaupun begitu, hasil yang diperoleh sudah memenuhi tujuan dari simulasi ini, seperti yang dijelaskan pada bagian awal sub-bab ini.

Berdasarkan simulasi yang dilakukan, baik pada kondisi waktu padam  $t_{off}$  dijaga tetap maupun kecepatan putar rotor  $\omega$  dijaga tetap, dapat diketahui bahwa motor arus searah penguat terpisah dengan masukan rangkaian *chopper* penurunan tegangan arus searah dapat dioperasikan secara optimal pada besar kecepatan 160 rad/s.

## BAB V

### KESIMPULAN

Berdasarkan simulasi yang dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB versi 7.6.0.324 (R2008a), dapat diketahui bahwa :

1. Saat besar *fall time*  $T_f$  dan *tail time*  $T_t$  GTO dijaga tetap, maka
  - Semakin besar kecepatan putar rotor yang diinginkan, maka semakin besar suplai tegangan rangkaian jangkar  $E_o$  yang dibutuhkan.
  - Saat suplai tegangan rangkaian jangkar  $E_o$  yang dibutuhkan semakin besar, maka semakin kecil besar arus jangkar  $I_a$  yang mengalir pada rangkaian motor arus searah penguat terpisah.
2. Saat besar kecepatan putar rotor  $\omega$  dijaga tetap, maka
  - Semakin kecil *fall time*  $T_f$  dan *tail time*  $T_t$  GTO, maka semakin besar tegangan keluaran rangkaian *chopper* yang dihasilkan  $E_o$ .
  - Saat *fall time*  $T_f$  dan *tail time*  $T_t$  GTO semakin kecil, maka semakin kecil pula arus jangkar rotor  $I_a$  yang mengalir pada rangkaian motor arus searah penguat terpisah.
3. Penggunaan rangkaian *chopper* penurunan tegangan arus searah dapat membatasi jumlah arus yang mengalir pada rangkaian motor arus searah penguat terpisah, yang pada akhirnya akan mempengaruhi kinerja pengoperasian motor tersebut.
4. Motor arus searah penguat terpisah dengan masukan rangkaian *chopper* penurunan tegangan arus searah, dengan parameter yang digunakan pada simulasi ini, dapat dioperasikan secara optimal pada besar kecepatan 160 rad/s bila dibandingkan dengan 150 rad/s dan 170 rad/s.

**DAFTAR ACUAN**

- [1] Chapman, Stephen J., "*Electric Machinery and Power System Fundamentals*" McGraw-Hill, New York, 2002.
- [2] Mohan, Ned, et al., "Power Electronics Converter, Application and Design", John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [3] Oktoriadi, Fanny, "Studi Pemodelan Dan Simulasi Sistem Kendali Empat Kuadran Motor Arus Searah Penguat Terpisah Menggunakan Simulink MATLAB 5.3" Skripsi, S1 Departemen Teknik Elektro FTUI, Depok, 2001.
- [4] Sen, P.C. Principles Of Electric Machines And Power Electronics. New Jersey : McGraw-Hill 1997.

**DAFTAR REFERENSI**

Ardiyanti Margono, Fajar, "Pemodelan Dan Simulasi Pengaturan Kecepatan Motor Arus Searah Tanpa Sikat Dengan Menggunakan Metode Pengaturan Sudut Fasa (Phase Advance Angle)" Skripsi, S1 Departemen Teknik Elektro FTUI, Depok, Juni 2005.

Chapman, Stephen J., "*Electric Machinery and Power System Fundamentals*" McGraw-Hill, New York, 2002.

Oktoriadi, Fanny, "Studi Pemodelan Dan Simulasi Sistem Kendali Empat Kuadran Motor Arus Searah Penguat Terpisah Menggunakan Simulink MATLAB 5.3" Skripsi, S1 Departemen Teknik Elektro FTUI, Depok, 2001.

Mohan, Ned, et al., "Power Electronics Converter, Application and Design", John Wiley & Sons, Inc., 1995.

Rais, Ferdinal. "Strategi Pengaturan Kecepatan Motor Arus Searah Berpenguat Shunt Dengan Menggunakan *Chopper*" Skripsi, S1 Departemen Teknik Elektro FTUI, Depok, 1994.

Sen, P.C. Principles Of Electric Machines And Power Electronics. New Jersey : McGraw-Hill 1997.

Tasfin, Moh., "Pengaturan Kecepatan Putaran Motor Arus Searah dengan DC-*Chopper* Berbasis Personal Komputer" Skripsi, S1 Departemen Teknik Elektro FTUI, Depok, 1992