



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGENDALIAN KECEPATAN  
MOTOR ARUS SEARAH SERI DENGAN DC CHOPPER**

**SKRIPSI**

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

**DHANANG ROSID RIDLO  
0806330806**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK**

**JULI 2012**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

|              |   |  |
|--------------|---|--|
| Nama         | : | Dhanang Rosid Ridlo  |
| NPM          | : | 0806330806   |
| Tanda Tangan | : |  |
| Tanggal      | : | 2 Juli 2012  |

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Dhanang Rosid Ridlo  
NPM : 0806330806  
Program studi : Teknik Elektro  
Judul skripsi : Pengendalian Kecepatan Motor Arus Searah Seri dengan  
*DC Chopper.*

Telah berhasil dipertahankan dihadapan 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 : Dr. Ir. Ridwan Gunawan, MT (.....)  
Penguji 1 : Ir. I Made Ardita Y, MT (.....)  
Penguji 2 : Ir. Agus R. Utomo, MT (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 2 JULI 2012

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini sesuai dengan jadwal yang telah ditentukan. Dengan terselesaikannya skripsi ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Ir Ridwan Gunawan M.T selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, petunjuk dan saran-saran serta kemudahan lainnya, sehingga skripsi ini dapat diselesaikan;
2. Dosen-dosen jurusan Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia yang telah memberikan ilmunya serta berbagai masukan dan pengarahan kepada penulis;
3. Kedua orang tua penulis beserta kakak-kakak penulis yang selalu mendorong dan mendoakan sehingga skripsi ini terselesaikan;
4. Serta kepada sahabat-sahabat penulis, teman-teman RTS, Haris Kasminto Aji, Heru Jovendra, Antoni Aldila, Akhmad Kalmin, Mukhammad Khalimudin, Harisman Dwi, Taufal Hidayat, serta teman-teman lainnya yang tidak bisa disebutkan satu persatu, yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap agar laporan ini bisa berguna bagi para pembaca, dan dapat berperan didalam pengembangan ilmu dan teknologi di Indonesia, khususnya di Universitas Indonesia.

Depok, 2 Juli 2012

Penulis

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

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

Nama : Dhanang Rosid Ridlo  
NPM : 0806330806  
Program studi : Teknik Elektro  
Departemen : Teknik Elektro  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

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

**Pengendalian Kecepatan Motor Arus Searah Seri dengan *DC Chopper*.**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non Eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan mengalihmedia/memformatkan, mengolah dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikannya tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 2 Juli 2012

Yang menyatakan



Dhanang Rosid Ridlo

## ABSTRAK

Nama : Dhanang Rosid Ridlo  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul skripsi : Pengendalian Kecepatan Motor Arus Searah Seri dengan *DC Chopper*.

Motor arus searah adalah sebuah mesin arus searah yang mengubah energi listrik arus searah menjadi energi mekanik dengan memanfaatkan prinsip induksi elektromagnetik. Motor arus searah banyak digunakan dalam berbagai aplikasi karena motor jenis ini mudah dalam pengendaliannya. Salah satu jenis motor arus searah adalah motor arus searah seri. Motor jenis ini mempunyai karakteristik torsi *start* yang tinggi menjadikan motor jenis ini banyak digunakan dalam berbagai industri terutama untuk traksi. Namun, perubahan beban motor dapat menurunkan kecepatan sudut yang besar. Sehingga pengendalian kecepatan sudut motor arus searah seri memiliki peran yang sangat penting dalam penggunaannya. Untuk mengatur kecepatan motor maka digunakan metode pengaturan tegangan. *DC chopper* adalah salah satu cara untuk mengatur tegangan yang mencatu motor. Namun metode *dc chopper* seringkali menimbulkan *ripple* arus yang ditimbulkan oleh *dc chopper* itu sendiri. Untuk mengatasi masalah *ripple* ini digunakan sistem dengan frekuensi tinggi. Sistem *dc chopper* menggunakan *thyristor* jenis GTO yang mampu melakukan *switching* pada frekuensi tinggi. Dengan frekuensi tinggi, *ripple* yang ditimbulkan akan semakin kecil. Untuk *switching* GTO dilakukan oleh PWM, dengan mengatur besarnya frekuensi PWM maka diperoleh frekuensi *switching* yang diinginkan. Dengan metode tersebut maka dibuat model pengendalian pengendali kecepatan motor arus searah seri menggunakan *dc chopper* pada beban yang berubah-ubah dengan *ripple* seminimal mungkin.

Kata kunci: motor DC, motor DC seri, PWM, *dc chopper*.

## ABSTRACK

Name : Dhanang Rosid Ridlo  
Study Program : Electrical Engineering  
Title : Speed Control of a DC Series Motor Using DC Chopper

DC motor is a machine that converts direct current electrical energy into mechanical energy by utilizing the principle of electromagnetic induction. DC motors are widely used in various applications because of motor easily in control. One type of DC motor are DC series motor. This type of motor has high starting torque characteristics, make this type of motor is widely used in various industries, especially for traction. However, changes in motor load can reduce speed. So the speed control of DC motor series have a very important role in its use. To set the motor speed voltage regulation method is used. DC chopper is one way to regulate the supply voltage of the motor. But the chopper dc methods often cause ripple currents caused by dc chopper itself. To overcome the problem of ripple is used with high frequency systems. So that, the dc chopper system using GTO thyristor types are capable of switching at high frequencies. With high frequency, ripple generated will be smaller. For the GTO switching performed by the PWM, PWM frequency by adjusting the magnitude of the switching frequency can be obtained as desired. With these methods, it made the model controlling the DC series motor speed control using a dc chopper on the variation load with a small ripple.

Keywords : motor DC, motor DC seri, PWM, dc chopper.

## DAFTAR ISI

|   |          |
|---|----------|
| HALAMAN JUDUL   | i        |
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS   | ii       |
| LEMBAR PENGESAHAN   | iii      |
| KATA PENGANTAR  | iv       |
| LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH                               | v        |
| ABSTRAK   | vi       |
| ABSTRACK  | vii      |
| DAFTAR ISI  | viii     |
| DAFTAR GAMBAR   | ix       |
| DAFTAR TABEL  | xi       |
| <b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>  | <b>1</b> |
| 1.1 Latar Belakang  | 1        |
| 1.2 Perumusan Masalah   | 2        |
| 1.3 Tujuan Penelitian   | 2        |
| 1.4 Batasan Masalah   | 3        |
| 1.5 Sistematika Penulisan   | 3        |
| <b>BAB 2 MOTOR ARUS SEARAH</b>  | <b>4</b> |
| 2.1 Pengertian Motor Arus Searah  | 4        |
| 2.2 Konstruksi Motor Arus Searah  | 5        |
| 2.2.1 Badan Motor (Rangka)  | 5        |
| 2.2.2 Kutub Medan   | 6        |
| 2.2.3 Inti Jangkar  | 6        |
| 2.2.4 Sikat   | 7        |
| 2.2.5 Kumparan Medan  | 7        |
| 2.2.6 Kumparan Jangkar  | 7        |
| 2.2.7 Celah Udara   | 7        |
| 2.2.8 Komutator   | 7        |
| 2.3 Prinsip Kerja Motor Arus Searah                                     | 9        |
| 2.3.1 Medan Magnet Pada Kawat Berarus                                   | 9        |
| 2.3.2 Prinsip Dasar Motor Arus Searah                                   | 10       |
| 2.4 Motor Arus Searah Seri  | 12       |
| 2.4.1 Karakteristik Motor Arus Searah Penguatan Seri                    | 13       |
| 2.4.2 Dinamika Motor Arus Searah Seri                                   | 15       |
| 2.5 Thyristor   | 17       |
| 2.5.1 Karakteristik Thyristor   | 18       |
| 2.5.2 Penyalaan Thyristor   | 20       |
| 2.6 DC Chopper  | 21       |
| 2.6.1 Prinsip Pengaturan Tegangan Arus Searah                           | 22       |
| 2.6.2 Prinsip Dasar Penurunan Tegangan Searah Dengan Beban RL           | 24       |
| 2.7 Prinsip Dasar Pengendalian Motor Arus Searah Seri dengan DC Chopper | 27       |
| 2.8 Pulse Width Modulation  | 29       |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.9 Pengendali PID  | 30        |
| <b>BAB 3 PERANCANGAN SYSTEM PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR ARUS SEARAH SERI DENGAN DC CHOPPER</b> | <b>33</b> |
| 3.1 Diagram Rangkaian Motor Arus Searah Seri  | 33        |
| 3.2 Merepresentasikan Persamaan Sistem  | 34        |
| 3.3 Menghitung Fungsi Transfer  | 36        |
| 3.4 Merancang Blok Model DC Chopper   | 38        |
| 3.5 Membuat Simulasi Dengan Simulink Software MATLAB  | 39        |
| 3.5.1 Bagian dc machine   | 40        |
| 3.5.2 Bagian PWM  | 41        |
| 3.5.3 Bagian GTO  | 40        |
| <b>BAB 4 SIMULASI PENGATURAN KECEPATAN MOTOR ARUS SEARAH SERI DENGAN MENGGUNAKAN DC CHOPPER</b> | <b>44</b> |
| 4.1 Karakteristik System Motor Arus Searah Seri   | 44        |
| 4.2 Hasil Simulasi Pengendalian Kecepatan Dengan DC Chopper                                     | 51        |
| 4.2.1 Pengaruh Frekuensi Terhadap Arus Dan Kecepatan Motor                                      | 51        |
| 4.2.2 Analisis Sistem Loop Terbuka Beban Berubah  | 57        |
| 4.2.3 Analisis Sistem Tertutup beban berubah  | 65        |
| <b>BAB 5 KESIMPULAN</b>   | <b>69</b> |
| <b>DAFTAR ACUAN</b>   | <b>70</b> |

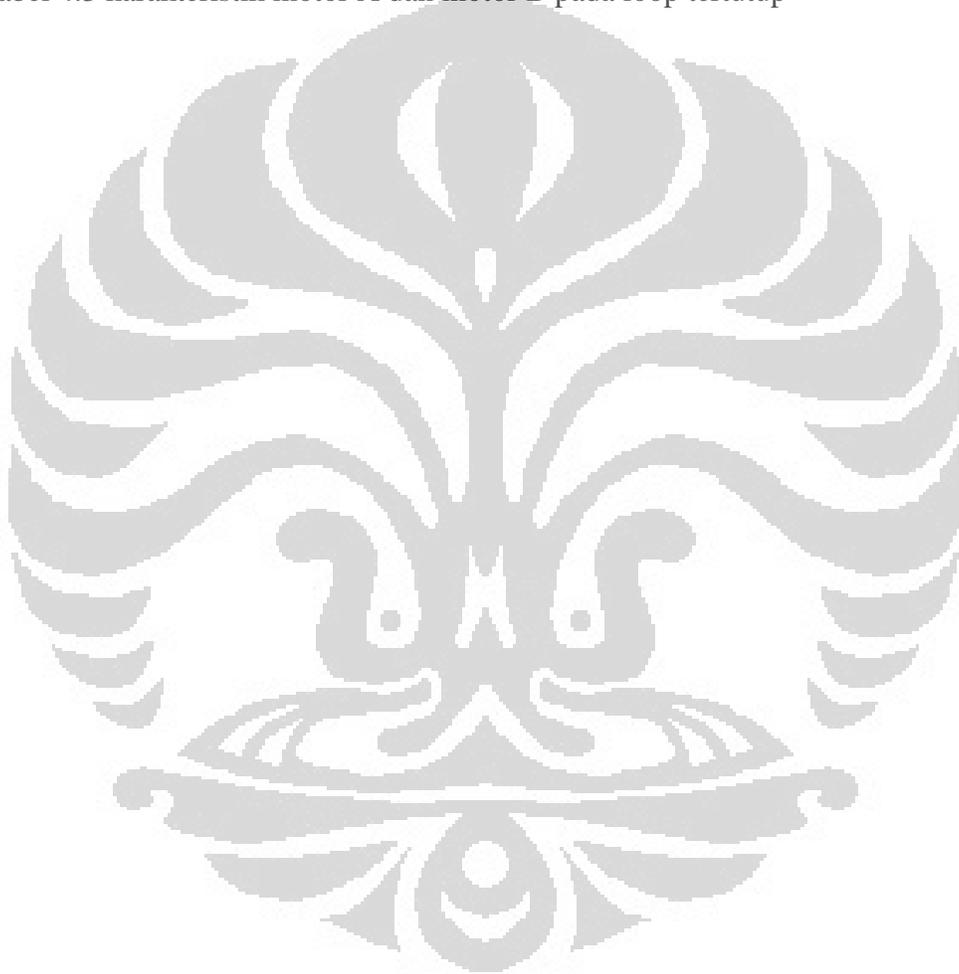
## DAFTAR GAMBAR

|   |    |
|---|----|
| Gambar 2.1 Konstruksi Motor Arus Searah   | 5  |
| Gambar 2.2 Cara kerja komutator pada lilitan jangkar motor arus searah                | 8  |
| Gambar 2.3 Tegangan Keluaran Pada Komutator   | 9  |
| Gambar 2.4 Medan Magnet Yang Membawa Arus Mengelilingi Konduktor                      | 9  |
| Gambar 2.5 Medan Magnet Yang Terjadi Antara Dua Kutub                                 | 10 |
| Gambar 2.6 Prinsip dasar motor arus searah  | 10 |
| Gambar 2.7 Resultan gaya yang bekerja pada loop                                       | 11 |
| Gambar 2.8 Motor dengan kumparan seri   | 12 |
| Gambar 2.9 Rangkaian pengganti motor arus searah seri                                 | 13 |
| Gambar 2.10 Karakteristik torsi induksi dengan kecepatan sudut motor arus searah seri | 15 |
| Gambar 2.11 Simbol thyristor dan rangkaian pengganti thyristor                        | 18 |
| Gambar 2.12 Grafik Karakteristik Thyristor  | 19 |
| Gambar 2.13 Efek Pemberian Gate Pada Thyristor  | 21 |
| Gambar 2.14 Rangkaian DC Chopper dan tegangan keluarannya                             | 22 |
| Gambar 2.15 Gambar rangkaian dc chopper dengan beban RL                               | 24 |
| Gambar 2.16 Rangkaian dan Tegangan Keluaran Dari Operasi DC Chopper                   | 25 |
| Gambar 2.17 Cara Kerja Dc Chopper Pada Sistem Pengendalian                            | 28 |
| Gambar 2.18 Pembentukan sinyal PWM  | 30 |
| Gambar 3.1 Rangkaian Pengganti Motor Arus Searah                                      | 33 |
| Gambar 3.2 Diagram Blok Persamaan Arus Motor  | 35 |
| Gambar 3.3 Diagram blok hubungan antara $I_m(s)$ dengan $T_e(s)$                      | 36 |
| Gambar 3.4 Diagram Blok Persamaan Kecepatan Sudut                                     | 36 |
| Gambar 3.5 Diagram Blok Motor Arus Searah Seri  | 36 |
| Gambar 3.6 Fungsi Umpan Balik   | 36 |
| Gambar 3.7 Model pengendalian kecepatan sudut motor arus searah seri                  | 38 |
| Gambar 3.8 Blok Model Pengendalian Kecepatan Motor Arus Searah Seri                   | 39 |
| Gambar 3.9 Bagian Elektrik DC Machine   | 40 |
| Gambar 3.9 Bagian Mekanik DC Machine  | 41 |

|   |    |
|---|----|
| Gambar 4.1 Diagram Pemberian Input Step Pada Sistem                                 | 46 |
| Gambar 4.2 Grafik Step Respon Untuk Motor A   | 46 |
| Gambar 4.3 Grafik Root Locus Untuk Motor A  | 47 |
| Gambar 4.4 Grafik Step Respon Untuk Motor B   | 50 |
| Gambar 4.5 Grafik Root Locus Untuk Motor B  | 51 |
| Gambar 4.6 Grafik kecepatan sudut dan arus jangkar motor<br>pada frekuensi 5 Hz     | 52 |
| Gambar 4.7 Grafik kecepatan sudut dan arus jangkar motor<br>pada frekuensi 10 Hz    | 52 |
| Gambar 4.8 Grafik kecepatan sudut dan arus jangkar motor<br>pada frekuensi 50 Hz    | 53 |
| Gambar 4.9 Grafik kecepatan sudut dan arus jangkar motor<br>pada frekuensi 100 Hz   | 53 |
| Gambar 4.10 Grafik kecepatan sudut dan arus jangkar motor<br>pada frekuensi 500 Hz  | 54 |
| Gambar 4.11 Grafik kecepatan sudut dan arus jangkar motor<br>pada frekuensi 1000 Hz | 54 |
| Gambar 4.12 Blok simulink MATLAB untuk percobaan loop terbuka                       | 56 |
| Gambar 4.13 Tegangan Keluaran GTO motor A   | 57 |
| Gambar 4.14 Grafik Kecepatan Sudut motor A  | 58 |
| Gambar 4.15 Grafik tegangan keluaran GTO motor B                                    | 59 |
| Gambar 4.16 Grafik Kecepatan Sudut motor B  | 59 |
| Gambar 4.17 Blok diagram pengendalian motor arus searah seri                        | 60 |
| Gambar 4.18 Karakteristik kecepatan sudut dengan pengendali PI motor A              | 61 |
| Gambar 4.19 Karakteristik kecepatan sudut dengan pengendali PI motor B              | 61 |

## DAFTAR TABEL

|   |    |
|---|----|
| Tabel 2.1 karakteristik parameter dari pengendali PID                     | 32 |
| Tabel 4.1 Pengaruh frekuensi PWM terhadap ripple arus dan kecepatan sudut | 55 |
| Tabel 4.2 karakteristik motor A dan motor B pada loop terbuka             | 60 |
| Tabel 4.3 karakteristik motor A dan motor B pada loop tertutup            | 62 |



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Motor arus searah adalah sebuah mesin arus searah yang mengubah energi listrik arus searah menjadi energi mekanik dengan memanfaatkan prinsip induksi elektromagnetik. Motor arus searah mempunyai banyak aplikasi dalam industri modern. Keunggulan dari motor arus searah adalah dalam hal pengendalian kecepatannya. Motor arus searah lebih mudah dikendalikan kecepatan sudutnya dari pada motor jenis lainnya.

Penggunaan motor arus searah banyak digunakan di industri-industri seperti industri baja, industri tambang dan industri transportasi. Dalam industri transportasi motor arus searah digunakan untuk penggerak kereta listrik. Bahkan akhir-akhir ini motor arus searah digunakan sebagai penggerak pada mobil listrik. Motor arus searah juga dimanfaatkan sebagai tenaga penggerak bagi peralatan-peralatan mekanik lainnya seperti pompa, penggerak kipas angin, *lift*, eskalator, elevator, traksi dan lain-lain. Salah satu jenis motor arus searah adalah motor arus searah seri. Motor ini biasanya digunakan untuk melayani beban dengan torsi start yang besar, karakteristik torsi juga bervariasi. Agar dapat digunakan secara efektif dan efisien maka motor arus searah harus tepat dalam penggunaannya.

Karakteristik kecepatan sudut motor arus searah berpenguatan seri bisa diubah-ubah dengan memperbesar atau memperkecil arus yang mengalir pada tegangan terminalnya. Karena penggunaannya yang sangat luas maka pengendalian kecepatan motor arus searah sangatlah penting. Hal ini mengingat bahwa pengendalian kecepatan yang tepat dapat meningkatkan kegunaan motor arus searah dan juga dapat menghemat energi yang digunakan serta biaya listrik yang dikeluarkan. Dalam skripsi ini dilakukan simulasi pengendalian kecepatan motor arus searah seri dengan *dc chopper*.

Perkembangan teknologi semikonduktor semakin maju, sehingga penggunaan peralatan semikonduktor sebagai saklar otomatis pada *dc chopper* sangat tepat untuk

meningkatkan unjuk kerja pengendalian kecepatan sudut motor arus searah seri. Dalam skripsi ini dilakukan simulasi penggunaan GTO (*Gate Turn Off Thyristor*) pada rangkaian *dc chopper* untuk mengendalikan kecepatan motor arus searah seri.

## 1.2 Perumusan Masalah

Karakteristik motor arus searah seri yang mempunyai torsi *start* yang tinggi menjadikan motor jenis ini banyak digunakan dalam berbagai industri terutama untuk traksi. Namun, perubahan beban motor dapat menurunkan kecepatan sudut yang besar. Sehingga pengendalian kecepatan sudut motor arus searah seri memiliki peran yang sangat penting dalam penggunaannya. Pengendalian kecepatan motor yang biasa digunakan adalah dengan *dc chopper*. Di sisi lain, metode *dc chopper* memiliki masalah dalam hal *ripple* arus yang ditimbulkan oleh *dc chopper* itu sendiri. Untuk mengatasi masalah *ripple* ini digunakan sistem dengan frekuensi tinggi. Sehingga sistem *dc chopper* menggunakan *thyristor* jenis GTO yang mampu melakukan switching pada frekuensi tinggi. Dengan frekuensi tinggi, *ripple* yang ditimbulkan akan semakin kecil. Sementara *switching* GTO dilakukan oleh PWM, dengan mengatur frekuensi PWM maka bisa diperoleh frekuensi *switching* GTO. Dengan metode tersebut maka dibuat model pengendalian pengendali kecepatan motor arus searah seri menggunakan *dc chopper* pada beban yang berubah.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Sesuai dengan kurikulum pendidikan sarjana (Starta-1) Departemen Teknik Elektro jalur peminatan Tenaga Listrik Fakultas Teknik Universitas Indonesia, skripsi dimaksudkan agar setiap mahasiswa dapat mengenali permasalahan teknik elektro dan dapat mencari penyelesaiannya dengan mempraktekkan pengetahuan yang sudah didapatkan. Tujuan skripsi ini adalah membuat rancangan suatu pengendalian kecepatan motor arus searah seri dengan *dc chopper*. Rancangan simulasi yang dibuat dengan *ripple* yang seminimal mungkin dan untuk beban yang berubah.

#### 1.4 Batasan Masalah

Agar materi yang dipaparkan dalam skripsi ini lebih terarah maka penulis membatasi masalah yang akan dibahas. Dalam skripsi ini batasan masalahnya adalah:

1. Motor yang digunakan adalah motor arus searah penguat seri.
2. Motor arus searah seri dianggap dalam keadaan tunak.
3. Metode pengendaliannya dengan mengatur tegangan terminal pada motor.
4. Sistem switching *dc chopper* yang digunakan dalam keadaan ideal.
5. Tidak membahas *starting* motor.

#### 1.5 Sistematika Penulisan Skripsi

Bab satu adalah pendahuluan, dalam bab ini menjelaskan mengenai latar belakang dibuatnya skripsi ini, perumusan masalah dalam pembuatan skripsi dengan tema yang diambil, tujuan dibuatnya skripsi ini, batasan masalah yang akan di bahas, dan sistematika penulisan. Bab dua mengenai dasar teori yang digunakan dalam melakukan simulasi ini meliputi pengertian motor arus searah, cara kerja motor arus searah, karakteristik motor arus searah seri, *thyristor* , *dc chopper*, prinsip dasar pengendalian motor arus searah seri dengan *dc chopper*, pengendali PID. Bab tiga mengenai rancangan yang digunakan untuk mensimulasikan pengendalian kecepatan motor arus searah seri. Bab empat mengenai hasil simulasi serta analisis. Bab lima kesimpulan.

## **BAB II**

### **DASAR TEORI**

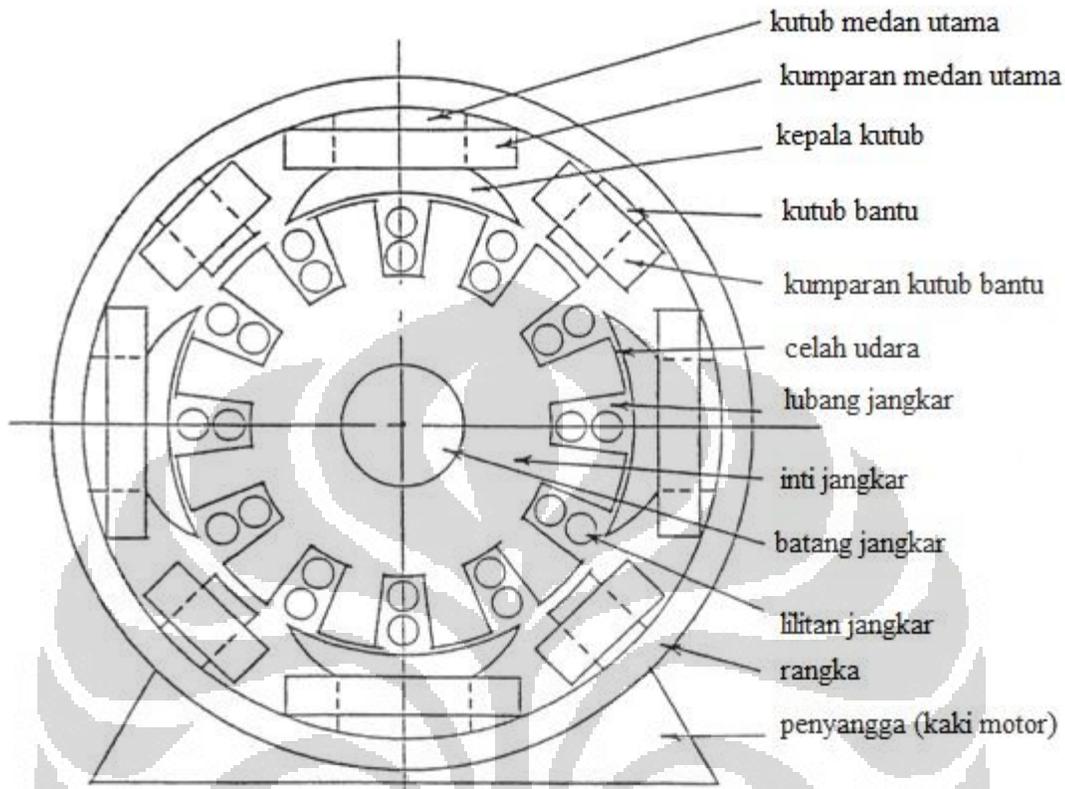
#### **2.1 Pengertian Motor Arus Searah**

Motor arus searah merupakan salah satu jenis mesin listrik, dimana mesin ini digunakan untuk mengkonversi energi listrik arus searah menjadi energi mekanik. Energi mekanik ini digunakan untuk misalnya memutar fan atau blower, conveyors, pompa sentrifugal dll.

Berdasarkan konstruksinya ada 3 komponen penting dari mesin listrik, yakni: stator, rotor, dan air gap. Stator merupakan bagian mesin yang statis, rotor merupakan bagian mesin yang bergerak/berputar. Sedangkan air gap merupakan celah antara stator dan rotor yang berfungsi untuk mencegah terjadinya friksi antara stator dengan rotor, serta mempermudah rotor untuk berputar pada porosnya. Di tinjau dari segi sumber arus penguat magnetnya, motor arus searah dapat dibedakan menjadi:

- a. Motor arus searah penguatan terpisah, bila arus penguat medan rotor dan medan stator diperoleh dari luar motor.
- b. Motor arus searah penguatan sendiri, bila arus penguat magnet berasal dari motor itu sendiri. Berdasarkan penguatan sendiri motor arus searah dapat diklasifikasikan sebagai berikut:
  1. Motor arus searah penguatan shunt.
  2. Motor arus searah penguatan seri.
  3. Motor arus searah kompon panjang.
    - Motor arus searah kompon panjang kumulatif.
    - Motor arus searah kompon panjang differensial.
  4. Motor arus searah kompon pendek.
    - Motor arus searah kompon pendek kumulatif.
    - Motor arus searah kompon pendek differensial.

## 2.2 Konstruksi Motor Arus Searah



Gambar 2.1. Konstruksi motor arus searah[1]

### 2.2.1 Badan motor (rangka)

Bagian ini secara umum mempunyai dua fungsi:

- Merupakan pendukung mekanik untuk mesin secara keseluruhan.
- Untuk membawa fluks magnetik yang dihasilkan oleh kutub-kutub mesin.

Untuk mesin kecil, biasanya rangkanya terbuat dari besi tuang (*cast iron*), tetapi untuk mesin-mesin besar umumnya terbuat dari baja tuang (*cast steel*), atau lembaran baja (*rolled steel*). Rangka ini pada bagian dalam dilaminasi untuk mengurangi rugi-rugi inti. Rangka motor selain kuat secara mekanik juga harus memiliki permeabilitas yang tinggi supaya tidak dapat tembus air.

### 2.2.2 Kutub Medan

Medan penguat atau medan magnet terdiri atas inti kutub dan sepatu kutub.

Kutub sepatu berfungsi untuk:

- a. Menyebarkan fluks pada celah udara dan juga karena merupakan bidang lebar maka akan mengurangi reluktansi jalur magnet.
- b. Sebagai pendukung secara mekanik untuk kumparan penguat atau kumparan medan.

Inti kutub terbuat dari lembaran-lembaran besi tuang atau baja tuang yang terisolasi satu sama lain. Sepatu kutub dilaminasi dan dibaut ke rangka mesin. Sebagaimana diketahui bahwa fluks magnet yang terdapat pada motor arus searah dihasilkan oleh kutub-kutub magnet buatan dengan prinsip elektromagnetik. Kumparan kutub ini biasanya terbuat dari kawat tembaga (berbentuk bulat atau strip/persegi). Kumparan medan berfungsi untuk mengalirkan arus listrik untuk terjadinya proses elektromagnetik.

### 2.2.3 Inti Jangkar

Pada motor arus searah inti jangkar yang digunakan biasanya berbentuk silinder yang diberi alur-alur pada permukaannya untuk tempat melilitkan kumparan-kumparan tempat terbentuknya ggl induksi. Inti jangkar ini terbuat dari bahan *ferromagnetik* dengan maksud supaya komponen-komponen (lilitan jangkar) berada dalam daerah yang induksi magnetnya besar. Hal ini dilakukan supaya ggl induksi dapat bertambah besar. Jangkar dibuat dari bahan-bahan berlapis-lapis tipis untuk mengurangi panas yang terbentuk karena adanya arus eddy.

### 2.2.4 Sikat

Sikat adalah jembatan bagi aliran arus jangkar ke lilitan jangkar. Dimana permukaan sikat ditekan ke permukaan segmen komutator untuk menyalurkan arus listrik. Sikat memegang peranan penting untuk terjadinya komutasi. Sikat-sikat terbuat dari bahan dengan tingkat kekerasan yang bermacam-macam dan dalam beberapa hal dibuat dari campuran karbon dan logam tembaga. Sikat harus lebih lunak daripada segmen-segmen komutator supaya yang terjadi antara segmen-segmen komutator dan sikat tidak mengakibatkan ausnya komutator.

### 2.2.5 Kumparan medan

Kumparan medan adalah susunan konduktor yang dibelitkan pada inti kutub. Dimana konduktor tersebut terbuat dari kawat tembaga yang berbentuk bulat ataupun persegi. Rangkaian medan yang berfungsi untuk menghasilkan fluksi utama dibentuk dari kumparan pada setiap kutub. Pada aplikasinya rangkaian medan dapat dihubungkan dengan kumparan jangkar baik seri maupun paralel dan juga dihubungkan tersendiri langsung kepada sumber tegangan sesuai dengan jenis penguatan pada motor.

### 2.2.6 Kumparan Jangkar

Kumparan jangkar pada motor arus searah merupakan tempat dibangkitkannya ggl induksi. Pada motor arus searah penguatan kompon panjang kumparan medan serinya diserikan terhadap kumparan jangkar, sedangkan pada motor arus searah penguatan kompon pendek kumparan medan serinya dipararelkan terhadap kumparan jangkar. Jenis-jenis konstruksi kumparan jangkar pada rotor ada tiga macam yaitu:

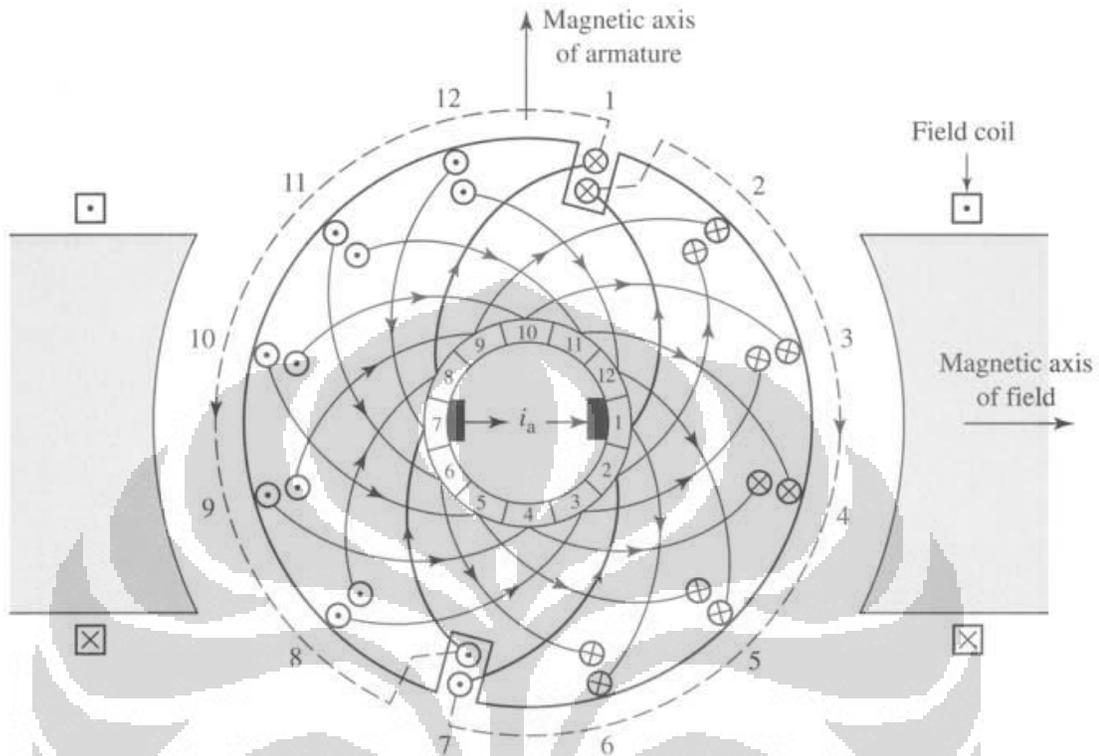
1. Kumparan jerat (*lap winding*)
2. Kumparan gelombang (*wave winding*)
3. Kumparan zig-zag (*frog-leg winding*)

### 2.2.7 Celah Udara

Celah udara merupakan ruang atau celah antara permukaan jangkar dengan permukaan sepatu kutub yang menyebabkan jangkar tidak bergesekan dengan sepatu kutub. Fungsi dari celah udara adalah sebagai tempat mengalirkan fluksi yang dihasilkan oleh kutub-kutub medan.

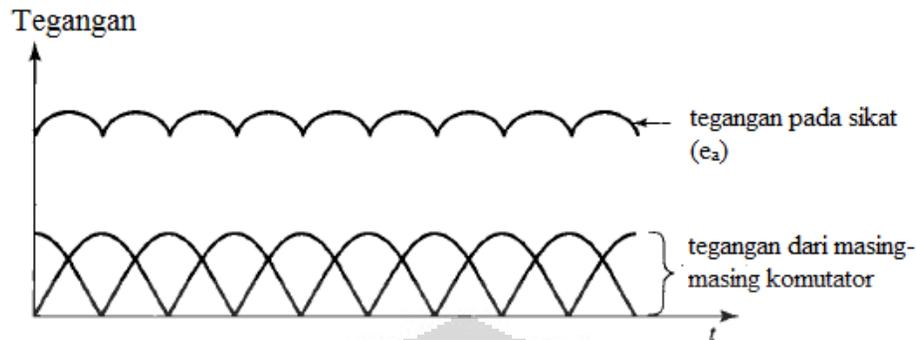
### 2.2.8 Komutator

Komutator adalah suatu konverter mekanik yang membuat arus dari sumber mengalir pada arah yang tetap walaupun belitan motor berputar. Komutator berpasangan dengan ‘**cincin belah**’ (*slip-rings*). Proses yang dilakukan oleh komutator adalah “*commutation*” yaitu proses mengubah tegangan bolak-balik dan arus bolak-balik pada rotor menjadi tegangan searah dan arus searah. Komutator adalah bagian penting dari motor arus searah. Cara kerja komutator adalah sebagai berikut:



Gambar 2.2 Cara kerja komutator pada lilitan jangkar motor arus searah[2]

Pada gambar (2.2) diatas merupakan cara kerja sistem komutator. Arus mengalir melalui segmen 1 kemudian diteruskan ke segmen 7 dan seterusnya. Sehingga dengan sistem ini arah arus disebelah kanan magnetik axis selalu mengalir menuju kedalam bidang dan disebelah kiri *axis* arah arus selalu mengalir menuju keluar bidang. Medan stator mengalir dari kiri ke kanan, sesuai dengan kaidah tangan kanan maka motor akan konsisten berputar searah jarum jam. Komutator disebut juga sebagai *rectifier* mekanik. Berikut ini adalah hasil keluaran tegangan pada komutator,

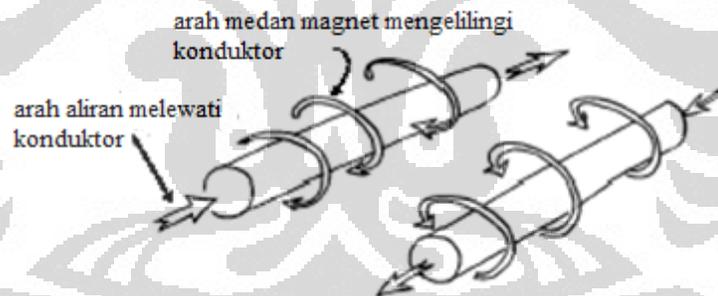


Gambar 2.3 (atas) tegangan resultan pada sikat.[2]  
(bawah) Tegangan keluaran pada komutator dengan dua pasang sikat.

Gambar diatas adalah tegangan resultan pada komutator dengan dua pasang sikat. Dengan dua pasang sikat hasil tegangan masih mempunyai ripple, jika jumlah sikat semakin banyak maka ripple yang terjadi akan semakin berkurang.

## 2.3 Prinsip Kerja Motor Arus Searah

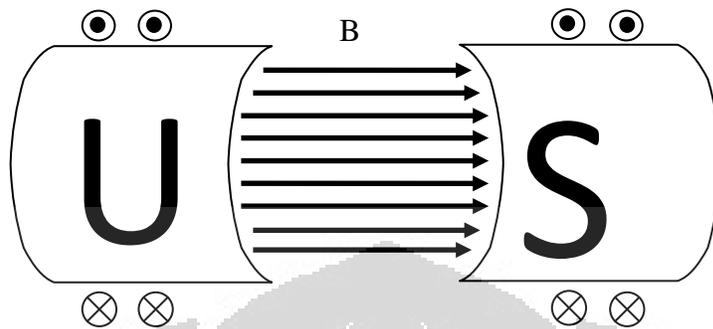
### 2.3.1 Medan magnet pada kawat berarus



Gambar 2.4 Medan magnet yang membawa arus mengelilingi konduktor.[3]

Jika arus lewat pada suatu konduktor, timbul medan magnet di sekitar konduktor. Arah medan magnet ditentukan oleh arah aliran arus pada konduktor. Aturan Tangan Kanan berlaku untuk menentukan arah garis fluks di sekitar konduktor yang dialiri arus listrik. Jika jempol menunjukkan arah arus maka keempat jari akan menunjukkan arah medan magnet (B).

Pada motor listrik konduktor berbentuk U disebut angker dinamo. Prinsip dari stator terlihat pada gambar berikut:

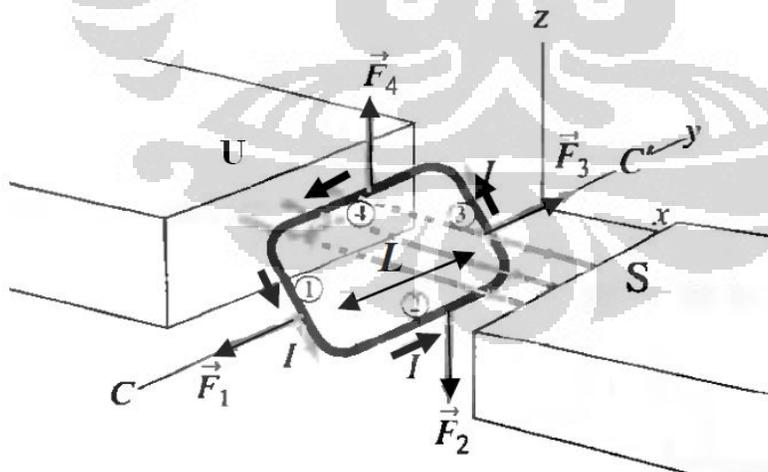


B = medan magnet

Gambar 2.5 Medan magnet yang terjadi diantara dua kutub.

Pada gambar diatas fluks magnet mengarah dari utara ke selatan. Fluks-fluks magnet ini bisa ditimbulkan dari magnet permanen maupun dari lilitan yang dialiri arus listrik. Dengan menggunakan aturan tangan kanan jika keempat jari menunjukkan arah arus maka ibu jari akan menunjukkan arah kutub utara. Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa arus listrik mengalir dari atas ke bawah sehingga ujung kanan merupakan kutub utara.

### 2.3.2 Prinsip Dasar Motor Arus Searah.



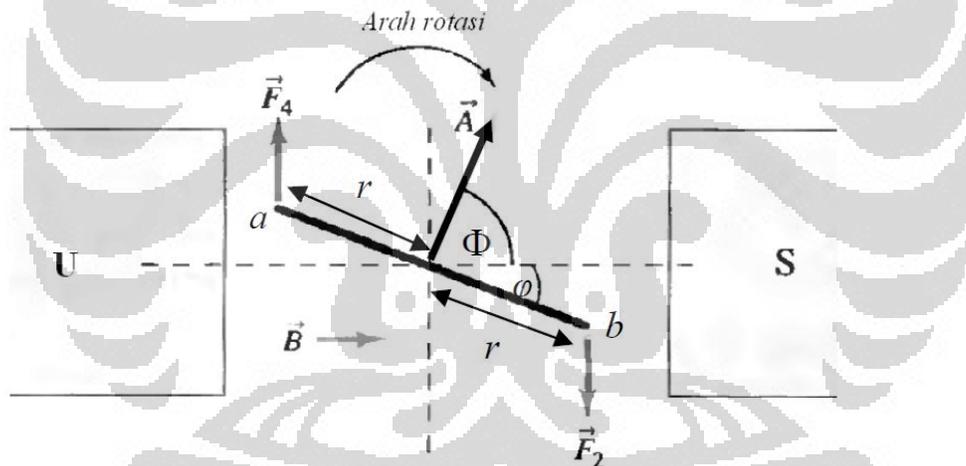
Gambar 2.6 Prinsip dasar motor arus searah.[4]

Gaya magnet yang ditimbulkan oleh kawat berarus pada gambar di atas adalah

$$F = i ( l \times B ) \quad (2.1)$$

Gaya magnet yang bekerja pada segmen yang kawat yang tegak lurus dengan medan magnet B. pada setiap segmen kawat yang dialiri arus listrik I bekerja gaya magnet masing-masing  $F_1, F_2, F_3$  dan  $F_4$  yang arah gayanya sesuai dengan kaidah tangan kanan. Gaya pada sumbu y saling menghilangkan, demikian juga komponen gaya pada sumbu z. Namun demikian terdapat perbedaan antara resultan gaya pada sumbu y dan sumbu z. pada sumbu z walaupun terletak dalam satu orientasi resultan gaya  $F_2$  dan  $F_4$  menghasilkan torsi gaya yang menyebabkan loop berputar relatif terhadap sumbu y. torsi gaya yang dihasilkan oleh gaya  $F_2$  dan  $F_4$  relatif terhadap sumbu y dapat ditentukan sebagai berikut:

$$\tau_T = \tau_2 + \tau_4 = (r_2 \times F_2) + (r_4 \times F_4) \quad (2.2)$$



Gambar 2.7 Resultan gaya yang bekerja pada loop. [4]

Sehingga torsi total

$$\tau_T = 2 r i l B \quad (2.3)$$

Dengan  $A_p$  adalah luas permukaan kutub yaitu  $A_p = \pi r l$  dan  $\Phi = A_p B$  maka persamaan di atas menjadi:

$$\tau_T = 2/\pi \Phi i \quad (2.4)$$

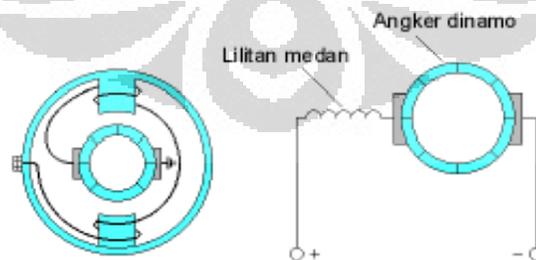
Sehingga, dari persamaan di atas dapat dilihat bahwa torsi yang dihasilkan pada motor arus searah dipengaruhi oleh fluks pada motor dan juga arus pada motor. Secara umum torsi yang dihasilkan pada motor arus searah tergantung pada:

- Fluks motor.
- Arus yang diberikan ke motor.
- Konstanta yang merepresentasikan motor.

#### 2.4 Motor Arus Searah Seri

Motor arus searah seri identik dalam konstruksi untuk motor shunt kecuali untuk medan. Medan dihubungkan secara seri dengan jangkar. Oleh karena itu, membawa arus jangkar seluruhnya. Medan seri ini terdiri dari beberapa putaran kawat yang mempunyai penampang cukup besar untuk membawa arus. Fluks motor arus searah seri tergantung dari arus armature dan beban. Saat arusnya besar, fluxnya besar dan saat arusnya kecil fluksnya kecil. Pada motor yang mempunyai hubungan seri jumlah arus yang melewati jangkar sama besar dengan yang melewati kumparan medan. Jika beban naik motor berputar makin pelan.

Jika kecepatan motor berkurang maka medan magnet yang terpotong juga makin kecil, sehingga terjadi penurunan EMF (*Elektromotive Force*) kembali dan peningkatan arus catu daya pada kumparan dan angker dinamo selama ada beban. Arus lebih ini mengakibatkan peningkatan torsi yang sangat besar. Contoh keadaan adalah pada motor starter.



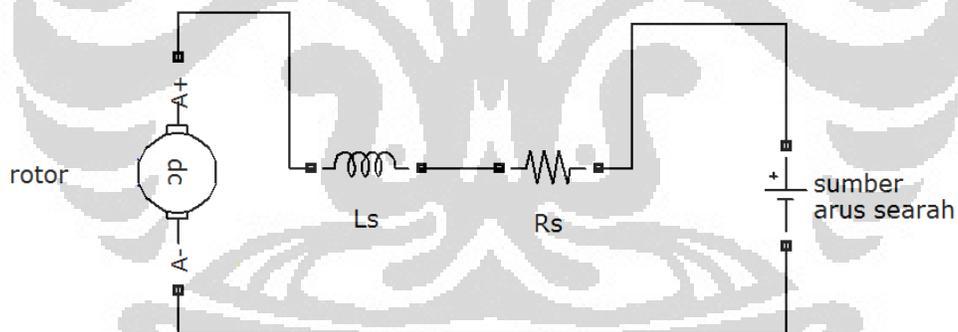
Gambar 2.8 Motor dengan kumparan seri.[3]

(angker dinamo menyentuh kutub karena kurang lurus atau ring yang aus). Arus yang tinggi akan mengalir melalui kumparan medan dan lilitan jangkar, karena kecepatan angker dinamo menurun dan menyebabkan turunnya EMF kembali.

#### 2.4.1 Karakteristik Motor Arus Searah Penguatan Seri

Motor arus searah penguatan seri terdiri dari medan seri dibuat dari sedikit lilitan kawat besar yang dihubungkan seri dengan jangkar. Jenis motor arus searah ini mempunyai karakteristik torsi start dan kecepatan variable yang tinggi. Ini berarti bahwa motor dapat start atau menggerakkan beban yang sangat berat, tetapi kecepatan akan bertambah kalau beban turun. Motor arus searah seri dapat membangkitkan torsi starting yang besar karena arus yang sama yang melewati jangkar juga melewati medan. Jadi, jika jangkar memerlukan arus lebih banyak, arus ini juga melewati medan, menambah kekuatan medan. Sehingga, motor seri berputar cepat dengan beban ringan dan berputar lambat saat beban ditambahkan.

Rangkaian pengganti motor arus searah seri



Gambar 2.9 Rangkaian pengganti motor arus searah seri

Gambar diatas adalah rangkaian pengganti motor arus searah seri, berdasarkan gambar diatas maka

$$V_t = E_A + I_A(R_A + R_S) \quad (2.5)$$

Torsi induksi yang dihasilkan motor arus searah seri adalah

$$\tau_{ind} = K \Phi I_A \quad (2.6)$$

Fluks yang dihasilkan motor sebanding dengan arus yang melewati jangkar oleh karena itu fluks dirumuskan sebagai berikut:

$$\Phi = c I_A \quad (2.7)$$

Dengan  $c$  adalah konstantan kesebandingan, sehingga torsi induksi yang dihasilkan:

$$\tau_{ind} = K \Phi I_A = K c I_A^2 \quad (2.8)$$

dari persamaan di atas dapat dilihat bahwa torsi induksi yang dihasilkan sebanding dengan kuadrat arus jangkar. Akibatnya, motor arus searah seri memberikan torsi yang besar dari pada motor arus searah jenis lainnya. Dalam kegunaannya motor arus searah seri digunakan untuk aplikasi yang membutuhkan torsi yang tinggi. Kegunaan motor arus searah seri yaitu untuk starter motor pada mobil, elevator motor, dan traksi motor pada lokomotif.

Dari persamaan (2.8) arus jangkar dapat dirumuskan menjadi

$$I_A = \sqrt{\frac{\tau_{IND}}{Kc}} \quad (2.9)$$

Dengan  $E_A = K \Phi \omega$  maka persamaan (2.5) menjadi

$$V_T = K \Phi \omega + \sqrt{\frac{\tau_{IND}}{Kc}} (R_A + R_S) \quad (2.10)$$

Dari persamaan (2.7)

$$I_A = \frac{\phi}{c} \quad (2.11)$$

Dan persamaan (2.9)

$$\tau_{IND} = \frac{K}{c} \phi^2$$

Sehingga fluks dapat dirumuskan

$$\phi = \sqrt{\frac{c}{K}} \sqrt{\tau_{IND}} \quad (2.12)$$

Dengan mensubstitusikan nilai  $V_T$  dari persamaan (2.10) dan nilai fluks dari persamaan (2.12) maka

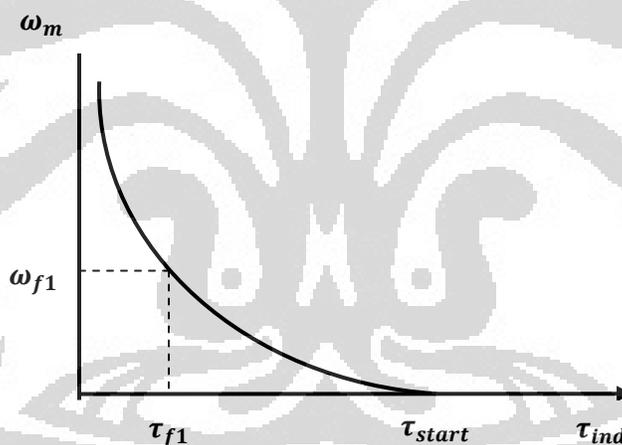
$$V_T = K \sqrt{\frac{c}{K}} \sqrt{\tau_{IND}} \omega + \sqrt{\frac{\tau_{IND}}{Kc}} (R_A + R_S)$$

$$\sqrt{Kc} \sqrt{\tau_{IND}} \omega = V_T - \frac{R_A + R_S}{\sqrt{Kc}} \sqrt{\tau_{IND}}$$

Sehingga kecepatan sudut dapat dirumuskan menjadi

$$\omega = \frac{V_T}{\sqrt{Kc}} \frac{1}{\sqrt{\tau_{IND}}} - \frac{R_A + R_S}{Kc} \quad (2.13)$$

Dari persamaan (2.13) dapat diketahui bahwa kecepatan sudut berbanding terbalik dengan akar torsi induksinya. Sehingga jika torsi induksi bernilai nol maka kecepatan sudut motor menjadi tak berhingga. Hal ini bisa merusak motor, sehingga motor arus searah penguatan seri dalam penggunaannya dikopel langsung dengan beban. Dalam praktiknya torsi induksi tidak pernah mencapai nol karena adanya rugi-rugi mekanik, rugi-rugi inti dan rugi-rugi lainnya. Karakteristik kurva hubungan antara kecepatan sudut dengan torsi induksi sebagai berikut:



Gambar 2.10 Karakteristik kecepatan sudut motor terhadap torsi induksi motor arus searah penguatan seri[5]

#### 2.4.2 Dinamika Motor Arus Searah Seri

Motor arus searah mempunyai keunggulan dalam hal pengontrolan. Motor arus searah dengan kontrol solid-state sering digunakan dalam berbagai aplikasi seperti dengan *dc chopper*. Dalam bagian ini akan di bahas lebih lanjut motor arus

searah seri dengan penekanan pada karakteristik dinamis sebagai sistem elektromekanik. Berdasarkan referensi [2]

Torsi motor arus searah dapat dirumuskan

$$T = \frac{PZ_a}{2\pi a} \Phi_d i_a = K_a \Phi_d i_a \quad (2.14)$$

dengan

$i_a$  = arus jangkar

$\Phi_d$  = fluks

$Z_a$  = Jumlah konduktor pada rotor.

$a$  = Jumlah paths yang mengelilingi rotor.

$P$  = Jumlah pole pada stator.

Persamaan dinamis motor arus searah

$$T = K_a \Phi_d i_a \quad (2.15)$$

dengan

$$K_a = \frac{PZ_a}{2\pi a} \quad (2.16)$$

Persamaan-persamaan diatas mencakup penurunan dari sistem mekanik, persamaan arus dan tegangan untuk stator dan rotor.

$$e_a = k_f i_f \omega_n \quad (2.17)$$

Dengan  $k_f$  konstan. Dengan sikat berada pada sumbu porosnya maka induktansi bersama antara medan dan jangkar bernilai nol. Persamaan tegangan medan adalah

$$v_f = L_{ff} p i_f + R_f i_f \quad (2.18)$$

dengan

$v_f$  = tegangan terminal.

$L_{ff}$  = induktansi sendiri medan.

$i_f$  = arus medan.

$R_f$  = hambatan medan.

$p$  = derivative operator  $d/dt$

Untuk motor maka persamaan tegangan jangkar menjadi

$$v_{ta} = e_a + L_{aq} p i_a + R_a i_a \quad (2.19)$$

$$v_{ta} = k_f i_f \omega_m + L_{aq} p i_a + R_a i_a \quad (2.20)$$

dengan

$v_{ta}$  = tegangan terminal.

$L_{aq}$  = induktansi jangkar.

$i_f$  = arus medan.

$R_f$  = hambatan medan.

$p$  = derivative operator  $d/dt$

$e_a$  = tegangan induksi

Induktansi  $L_{aq}$  termasuk efek dari *quadrature axis* dan *pole interface* lilitan tambahan yang digunakan pada mesin-mesin besar untuk memperbaiki komutator.

Persamaan mekanik motor adalah

$$T = k_f i_f i_a = J p \omega_m + T_L \quad (2.21)$$

dengan

$J$  = momen inertia.

$T_L$  = torsi beban yang berlawanan dengan putaran motor.

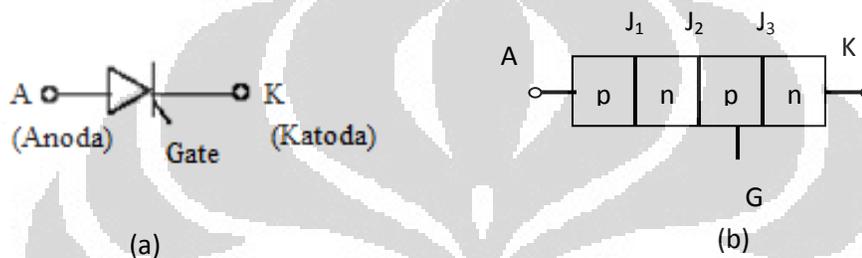
$\omega_m$  = kecepatan sudut motor.

## 2.5 Thyristor

Dalam skripsi ini dc chopper yang digunakan menggunakan device elektronika daya, *thyristor*. *Thyristor* merupakan salah satu komponen semikonduktor yang penting dalam elektronika daya karena *thyristor* dapat digunakan sebagai switch. *Thyristor* bekerja pada kondisi “on” dan “off”. Kondisi “on” ketika *thyristor* bersifat sebagai penghantar arus atau konduktor. Kondisi “off” ketika *thyristor* bersifat sebagai penghambat arus atau isolator. *Thyristor* dapat diasumsikan sebagai switch yang ideal, namun *thyristor* mempunyai karakteristik dan keterbatasan. [6]

### 2.5.1 Karakteristik *Thyristor*

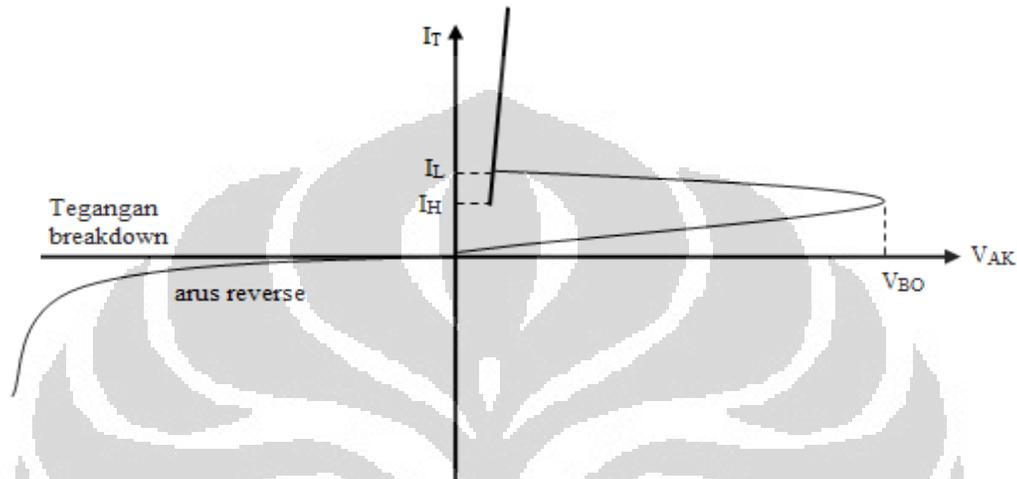
*Thyristor* mempunyai empat lapisan semikonduktor yaitu *pnpn*, mempunyai 3 *pn junction* dan mempunyai tiga terminal yaitu anoda, katoda dan *gate*. Berikut adalah simbol dan rangkaian penggantinya



Gambar 2.11 (a) simbol *thyristor* (b) rangkaian pengganti *thyristor*

Ketika tegangan anoda bernilai positif relatif terhadap katode maka *junction* satu,  $J_1$  dan *junction* tiga  $J_3$  menjadi *forward bias*, artinya dapat dialiri arus listrik. Dan *junction* dua  $J_2$  menjadi *reverse bias* sehingga arus tidak bisa mengalir, hanya arus *reverse* saja yang mengalir yang nilainya sangat kecil. Pada kondisi ini maka *thyristor* dalam kondisi “*off state*” atau forward blocking karena tidak ada arus yang mengalir ke katoda kecuali arus *reverse*. Jika tegangan anoda-katoda  $V_{AK}$  meningkat maka *junction* dua  $J_2$  akan rusak sehingga arus dapat mengalir. Kondisi ini dikenal dengan *avalanche breakdown* dan tegangan yang menyebabkan kondisi ini disebut tegangan *forward breakdown*  $V_{BO}$ . Sementara *junction* yang lain selalu dalam kondisi *forward*. Kondisi ini disebut kondisi *on state* sehingga arus dapat mengalir. [6]

Karakteristik V-I *thyristor* adalah sebagai berikut



Gambar 2.12 Grafik karakteristik V-I *thyristor* [6]

Keterangan

$V_{BO}$  = Tegangan Forward Breakover

$V_{AK}$  = Tegangan Anoda-Katoda

$I_T$  = Arus *Thyristor*

$I_L$  = Arus *latching*

$I_H$  = Arus *holding*

Arus anoda harus lebih dari arus *latching* supaya *thyristor* dalam kondisi “on” sehingga *thyristor* berfungsi sebagai konduktor. *Thyristor* akan kembali ke kondisi “off” jika tegangan anoda-katoda diturunkan. Batas penurunan arus anoda ketika *thyristor* dalam kondisi “on” yaitu dibawah nilai arus *holding*. Arus *holding* nilainya dibawah arus *latching*,  $I_L > I_H$ . Dengan kata lain, arus *holding* adalah arus minimum anoda untuk menjaga *thyristor* dalam kondisi “on”.

Dari penjelasan kurva karakteristik diatas dapat diketahui bahwa peningkatan arus anoda-katoda  $V_{AK}$  dapat menyalakan *thyristor* sehingga *thyristor* berfungsi sebagai konduktor. Namun, cara ini bisa merusak *thyristor*. Dalam praktiknya tegangan anoda –katoda dijaga dibawah tegangan *forward breakover*, untuk menyalakan *thyristor* digunakan arus positif antara gate dengan katoda.

### 2.5.2 Penyalaan *Thyristor*

*Thyristor* menjadi konduktor ketika arus anode meningkat. Ada beberapa cara agar *thyristor* pada kondisi konduktor:

#### 1. Kenaikan suhu

Ketika suhu pada *thyristor* meningkat, maka jumlah pasangan *elektron-hole* akan meningkat. Sehingga *thyristor* dapat dalam kondisi sebagai konduktor.

#### 2. Cahaya

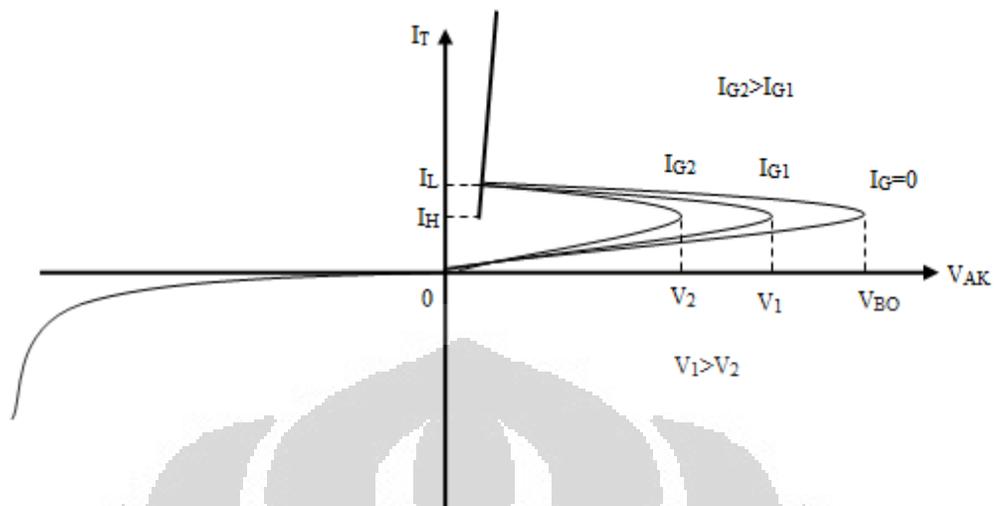
Jika cahaya mengenai *junction* pada *thyristor* maka pasangan *elektron-hole* akan meningkat. Dalam kondisi ini, *thyristor* kemungkinan bisa menjadi konduktor.

#### 3. Tegangan tinggi

Jika tegangan *forward* anoda ke katoda lebih besar dari *forward breakdown voltage*,  $V_{BO}$ , maka *thyristor* menjadi dalam kondisi konduktor. Penyalaan *thyristor* jenis ini bisa merusak *thyristor* sehingga harus dihindari.

#### 4. Arus gate

Pemberian arus positif pada *gate* - katoda menyebabkan *thyristor* dalam kondisi sebagai konduktor. Jika arus gate semakin meningkat maka  $V_{BO}$  akan menurun. Seperti ditunjukkan gambar berikut



Gambar 2.13 Efek pemberian gate pada *thyristor*[6]

Grafik diatas menunjukkan karakteristik *thyristor* ketika diberi arus gate. Ketika arus gate semakin meningkat maka  $V_{BO}$  akan semakin menurun, sehingga ketika arus gate semakin membesar maka *thyristor* akan berada dalam kondisi “on” tanpa harus memberikan nilai  $V_{AK}$  sampai nilai  $V_{BO}$ . Konsep inilah yang diterapkan dalam *chopper DC* dalam skripsi ini. Dalam skripsi ini digunakan *thyristor* jenis GTO (*gate turn off thyristor*) yang mempunyai keunggulan dapat dinyalakan dengan memberikan pulsa ke gate dan mempunyai keunggulan dapat digunakan untuk frekuensi tinggi.

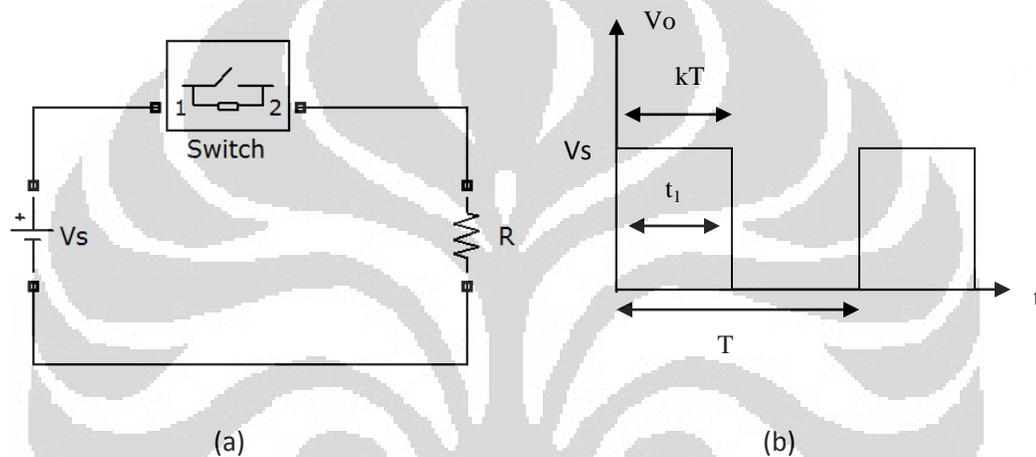
## 2.6 DC Chopper

*DC chopper* adalah metode atau peralatan untuk memotong tegangan arus searah menjadi tegangan arus searah yang diinginkan. Metode memotong tegangan arus searah banyak digunakan di berbagai aplikasi industri. Prinsip dasar metode ini adalah mengubah tegangan arus searah menjadi tegangan arus searah dengan nilai yang bisa diubah-ubah atau disebut juga *dc-to-dc converter*. *Chopper* dapat diibaratkan sebagai transformator bagi tegangan bolak-balik, sehingga ada metode menaikkan tegangan ataupun menurunkan tegangan.

Metode *chopper* banyak digunakan dalam berbagai kegunaan industri seperti untuk mengontrol kecepatan dengan mengubah tegangan motor pada mobil listrik, bus-bus listrik, motor untuk lift dan lain sebagainya. Metode ini menjadikan pengaturan kecepatan motor menjadi lebih halus, efisiensi tinggi dan respon cepat. Metode *chopper* juga dapat digunakan untuk mengatur tegangan arus searah pada sistem listrik arus searah.

### 2.6.1 Prinsip Pengaturan Tegangan Arus Searah

Prinsip dasar metode ini adalah sebagai berikut



Gambar 2.14 (a) rangkaian *dc chopper* (b) tegangan keluaran dengan beban *resistive*

Gambar diatas merupakan rangkaian pengganti *dc chopper*. Komponen *dc chopper* terdiri dari divais semikonduktor yang berfungsi sebagai switch dan beban  $R$ .

Tegangan rata-rata dari rangkaian diatas adalah

$$V_a = \frac{1}{T} \int_0^{t_1} V_o dt = \frac{t_1}{T} V_s = f t_1 V_s = k V_s \quad (2.22)$$

Sehingga rata-rata arus bebanya adalah

$$I_a = \frac{V_a}{R} = \frac{kV_s}{R} \quad (2.23)$$

dengan

$$k = \frac{t_1}{T} \quad (2.24)$$

$k$  disebut *duty cycle*,  $f$  merupakan frekuensi *chopping* dan  $T$  adalah periode dari *chopping*. Dengan mengasumsikan sistem *chopper* tanpa rugi-rugi maka daya pada sistem *chopper* adalah

$$P_i = \frac{1}{T} \int_0^{kT} V_o i dt = \frac{1}{T} \int_0^{kT} \frac{V_o^2}{R} dt = k \frac{V_s^2}{R} \quad (2.25)$$

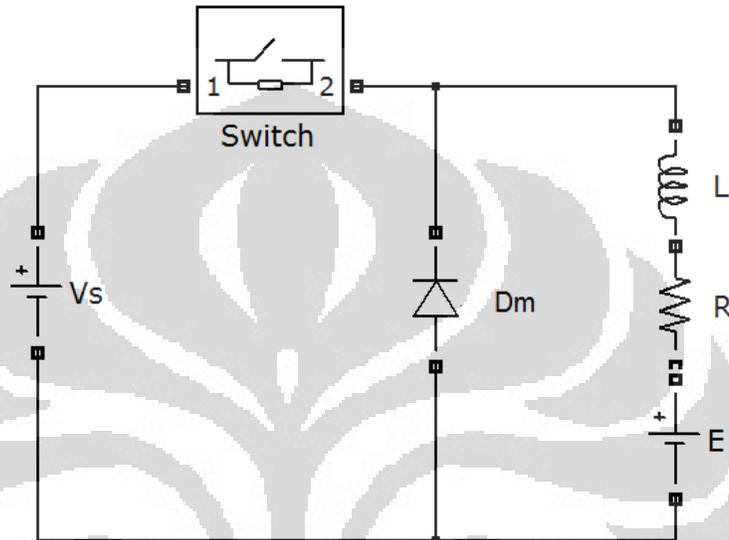
*Duty cycle*  $k$ , dapat divariasikan dari nilai 0 sampai 1 dengan memvariasikan nilai dari  $t_1$ ,  $T$ , atau  $f$ . Oleh karena itu, tegangan keluaran  $V_o$  dapat bernilai dari 0 sampai  $V_s$  tergantung dari nilai *duty cycle*.

Ada dua metode untuk mengatur sistem *chopping*

1. Metode frekuensi konstan, yaitu dengan menjaga frekuensi pada nilai konstan (periode juga konstan) namun mengubah nilai  $t_1$ . Lebar pulsa dari motor berubah-ubah sehingga sistem ini dikenal dengan sistem PWM (*Pulse Width Modulation*).
2. Metode mengubah frekuensi, yaitu dengan mengubah-ubah nilai frekuensi. Sedangkan  $t_1$  dan  $T-t_1$  dijaga pada nilai konstan, sistem ini disebut dengan *frequency modulation*.

### 2.6.2 Prinsip Dasar Penurunan Tegangan Searah Dengan Beban RL

Rangkaian pengganti penurunan tegangan arus searah

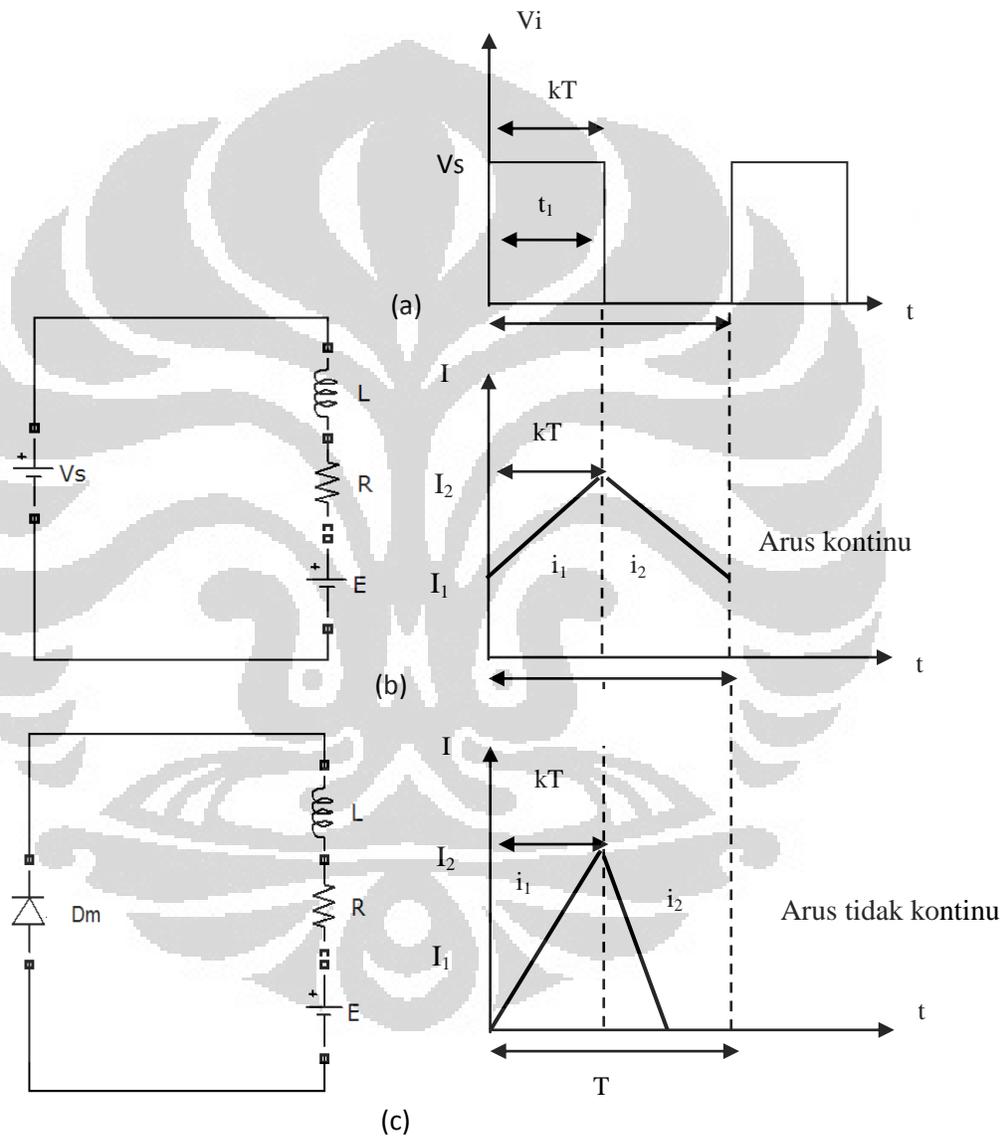


Gambar 2.15 Gambar rangkaian *dc chopper* dengan beban RL

Cara kerja dari sistem ini terbagi menjadi 2 yaitu,

1. Mode 1, ketika *switch* dalam kondisi *on* dan arus mengalir ke beban.
2. Mode 2, ketika *switch* dalam kondisi *off* dan arus beban mengalir ke *freewhelling diode* Dm.

Rangkaian pengganti untuk dua mode ini adalah sebagai berikut:



Gambar 2.16 (a) tegangan masukan  $V_s$  (b) Rangkaian pengganti mode 1 beserta karakteristik arus. (c) Rangkaian pengganti mode 2 beserta karakteristik arus.

Arus pada mode 1 dapat dicari dengan persamaan berikut,

$$V_s = Ri_1 + L \frac{di_1}{dt} + E \quad (2.26)$$

Dari persamaan diatas dengan arus awal  $i_1(t=0) = I_1$ . Maka arus beban adalah

$$i_1(t) = I_1 e^{-tR/L} + \frac{V_s - E}{R} (1 - e^{-tR/L}) \quad (2.27)$$

Pada mode ini maka arus beban menjadi:

$$i_1(t = t_1 = kT) = I_2 \quad (2.28)$$

Arus pada mode 2 dapat dicari dengan

$$0 = Ri_1 + L \frac{di_1}{dt} + E \quad (2.29)$$

Dengan arus mula-mula  $I_2$  maka arus menjadi

$$i_2(t) = I_1 e^{-tR/L} - \frac{E}{R} (1 - e^{-tR/L}) \quad (2.30)$$

Ketika waktu  $(1-k)T$  maka arus beban menjadi

$$i_2(t = t_2) = I_3 \quad (2.31)$$

dari persamaan (2.20) maka besarnya  $I_2$  dapat dirumuskan

$$I_2 = I_1 e^{-kTR/L} + \frac{V_s - E}{R} (1 - e^{-kTR/L}) \quad (2.32)$$

Dari persamaan (2.22) dan (2.23) maka besarnya nilai  $I_3$

$$I_3 = I_1 = I_2 e^{-(1-k)TR/L} - \frac{E}{R} (1 - e^{-(1-k)TR/L}) \quad (2.33)$$

Puncak ke puncak arus ripple yang terjadi adalah

$$\Delta I = I_2 - I_1 \quad (2.34)$$

Sehingga dengan menyederhanakan persamaan didapatkan persamaan berikut

$$\Delta I = \frac{V_s}{R} \frac{1 - e^{-kTR/L} + e^{-TR/L} - e^{-(1-k)TR/L}}{1 - e^{-TR/L}}$$

(2.35)

Maksimum ripple,

$$\frac{d(\Delta I)}{dk} = 0 \tag{2.36}$$

Dengan memisalkan nilai  $k = 0,5$   $1-k = k = 0,5$  maka diperoleh persamaan

$$\Delta I_{mak} = \frac{V_s}{R} \tanh \frac{R}{4fL} \tag{2.37}$$

Untuk  $4fL \gg R$  maka  $\tanh a$  mendekati  $a$  sehingga persamaan (2.37) menjadi

$$\Delta I_{mak} = \frac{V_s}{4fL} \tag{2.38}$$

Dari persamaan diatas dapat diambil kesimpulan bahwa arus ripple maksimal semakin kecil jika frekuensi semakin membesar. Hal inilah yang digunakan sebagai dasar teori untuk menurunkan arus ripple dalam skripsi ini.

Catatan: Untuk persamaan (2.26) sampai (2.38) merupakan persamaan untuk aliran arus kontinu. Sehingga untuk waktu *off* yang lama atau frekuensi rendah tidak berlaku persamaan tersebut.

## 2.7 Prinsip Dasar Pengendalian Motor Arus Searah Seri dengan DC Chopper

Motor arus searah merupakan jenis motor yang sering digunakan dalam berbagai sistem penggerak karena jenis motor ini relatif mudah untuk dikendalikan. Salah satu cara pengendalian kecepatan motor arus searah yang sering digunakan adalah *dc chopper*. Pengendalian dilakukan untuk mengatur tegangan terminal yang mencat motor. Hubungan antara kecepatan motor dengan tegangan terminal adalah berbanding lurus, sehingga semakin kecil tegangan maka kecepatan motor akan menurun. Hal ini juga didukung dengan adanya kemajuan teknologi semikonduktor yang memungkinkan penggunaan panyaklaran *dc chopper* dengan frekuensi tinggi. Dari referensi [7] pengendalian kecepatan motor arus searah (N) dapat dirumuskan dengan persamaan dibawah ini:

$$N = \frac{V_{TM} - I_A R_A}{K\Phi} \quad (2.39)$$

dengan

$V_{TM}$  = tegangan terminal

$I_A$  = arus jangkar motor

$R_A$  = hambatan jangkar motor

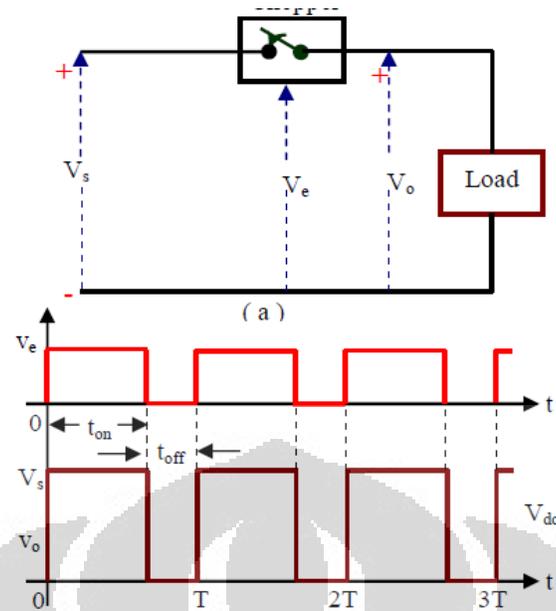
$K$  = konstanta motor

$\Phi$  = fluks magnet yang terbentuk pada motor.

Dalam kasus pengendalian kecepatan putar motor arus searah, tegangan terminal motor  $V_{TM}$  adalah variable yang diatur untuk mendapatkan kecepatan putar motor yang dikehendaki. Pengaturan dengan teknik *dc chopper*, sehingga didapatkan rumusan:

$$N = \frac{\frac{T_{on}}{T} V_{TM} - I_A R_A}{K\Phi} \quad (2.40)$$

Dari persamaan di (2.40) tegangan terminal motor diatur menggunakan *dc chopper*. Besarnya tegangan terminal dapat ditentukan dengan mengatur waktu penyalaan  $T_{on}$ . Jika nilai  $T_{on}$  semakin besar maka tegangan terminal rata-rata juga akan semakin besar begitu juga sebaliknya. Jika waktu penyalaan  $T_{on}$  semakin kecil maka tegangan terminal rata-rata juga akan semakin mengecil. Gambar berikut menunjukkan cara kerja *dc chopper*

Gambar 2.16 Cara kerja *dc chopper*[8]

Keterangan

$V_s$  = Tegangan sumber

$V_e$  = Tegangan *gate*

$V_o$  = Tegangan keluaran *dc chopper*.

$t_{on}$  = waktu hidup

$t_{off}$  = waktu mati

Dari gambar diatas dapat diketahui frekuensi *chopper* yaitu

$$f_c = \frac{1}{t_{on} + t_{off}} \quad (2.41)$$

dengan

$f_c$  = frekuensi *chopper*

sehingga *duty cycle* dari *chopper* adalah

$$d = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.42)$$

dengan

$d$  = *duty cycle*

$T$  = periode *chopper*

Dengan mengasumsikan bahwa tidak ada tegangan jatuh dan switch ideal maka tegangan keluaran yang dihasilkan dari sistem *DC chopper* ini

$$V_{dc} = \frac{t_{on}}{T} V_s = dV_s \quad (2.43)$$

dengan

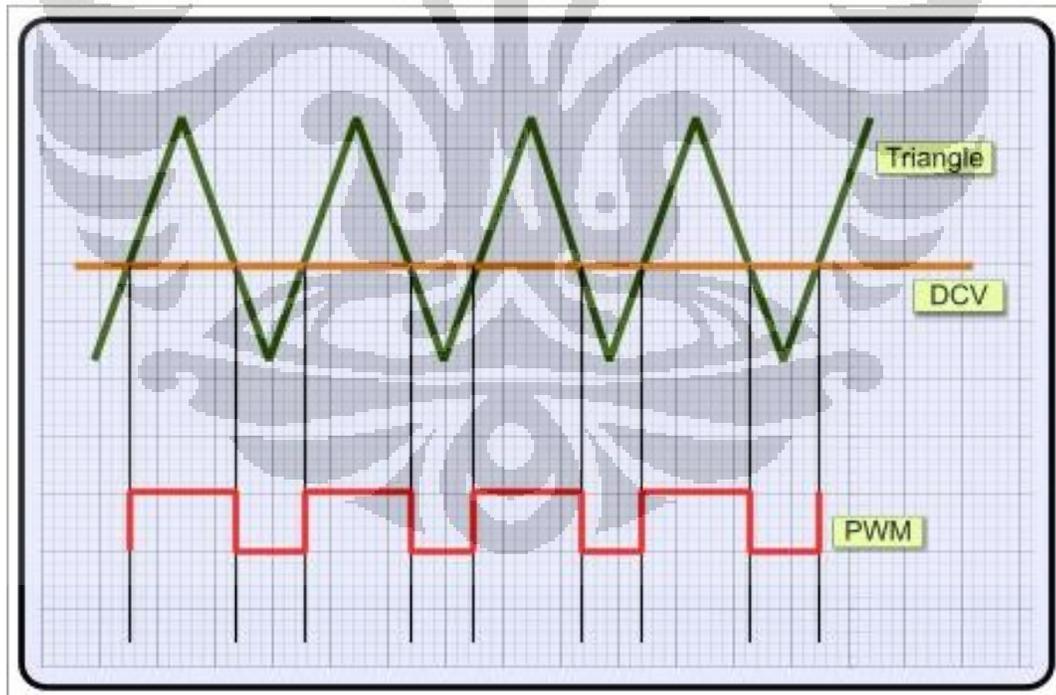
$V_s$  = sumber tegangan

## 2.8 Pulse Width Modulation (PWM)

Ide utama dari teknik PWM ini adalah melakukan modulasi sumber tegangan (bolak-balik atau searah) ke bentuk pulsa untuk mengatur tegangan. Dalam sistem PWM terdapat dua bagian yaitu bagian *carier* dan bagian referensi. Sinyal carier memiliki beberapa variasi yaitu:

- SPWM yang dibangkitkan oleh sinyal segitiga.
- SPWM yang dibangkitkan oleh sinyal gergaji.
- SPWM yang dibangkitkan oleh sinyal trapezoidal.

Berikut ini adalah gambar skema pembentukan PWM



Gambar 2.18 Pembentukan sinyal PWM[9]

Pada gambar diatas sinyal carier yang digunakan adalah jenis sinyal segitiga. Sedangkan DCV merupakan sinyal referensi yang menentukan lebarnya pulsa PWM. Pembentukan sinyal PWM terjadi jika sinyal referensi lebih dari sinyal *carier* maka keluaran akan bernilai 0 jika sinyal referensi kurang dari sinyal carier maka keluaran bernilai 1. Dengan mengatur besarnya DCV maka lebar sinyal PWM dapat diatur. Sehingga tegangan keluaran sesuai dengan sinyal referensi yang ditentukan. Besarnya sesuai dengan persamaan (2.43).

## 2.9 Pengendali PID

Pengendali PID (*Propotional, Integral, Derivative*) merupakan suatu pengendali yang mampu memperbaiki error dari suatu sistem yang memiliki karakteristik umpan-balik/*feedback* pada sistem tersebut. Pengendali PID menghitung dan meminimilasi nilai error/selisih antara output dari proses terhadap input/setpoint yang diberikan ke sistem.

Pengendali PID terdiri dari tiga komponen yaitu *Propotional, Integral, Derivative* yang dapat dipakain secara bersamaan maupun sendiri-sendiri tergantung dari respon yang diinginkan pada sustu sistem. Penjelasan dari masing-masing komponen adalah sebagai berikut:

### 2.8.1 Pengendali *Propositional*

Pengendali *propositional/gain* bertindak sebagai penguat yang mampu mengubah output dari sistem secara proposional tanpa memberikan efek dinamik pada kinerja pengendali tersebut. Respon dari pengendali proposional dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$P_{out} = K_c E(t) \quad (2.44)$$

dengan

$P_{out}$  = output dari pengendali proposional

$K_c$  = konstanta gain

$E(t)$  = error yang dinyatakan dalam waktu secara kontinu.

Pengaturan dengan pengendali proposional ini mampu memperbaiki respon transien dari sistem, khususnya rise time. Pengendali ini juga mampu memperbaiki settling time dari sistem.

### 2.8.2 Pengendali Integral

Pengendali integral merupakan pengendali yang berfungsi untuk memperbaiki respon tunak/steady state dari sistem sehingga pengendali ini mampu memperkecil error sistem. Respon dari pengendali integral dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$I_{out} = K_i \int E(\tau) d\tau \quad (2.45)$$

dengan

$I_{out}$  = output pengendali integral

$K_i$  = konstanta integral

$E(\tau)$  = error yang dinyatakan secara kontinu

$\tau$  = variable integrasi

dengan mengatur nilai dari konstanta integral yang tepat, nilai error *steady state* dapat diperkecil dalam waktu yang lebih cepat sehingga nilai output akan lebih cepat mengikuti nilai setpoint.

### 2.8.3 Pengendali *Derivative*

Pengendali *Derivative* merupakan suatu pengendali yang terutama berfungsi untuk memperbaiki respon transien dari sistem. Respon pengendali *derivative* dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$D_{out} = K_d E(t) \quad (2.46)$$

dengan

$D_{out}$  = output pengendali *derivative*

$K_d$  = konstanta derivative

$E(t)$  = error yang dinyatakan dalam waktu kontinu

Selain mampu memperbaiki respon transien, pengendali *derivative* juga mampu mengurangi nilai *overshoot* yang timbul akibat penggunaan pengendali integral.

Nilai output dari pengendali PID didapatkan berdasarkan penjumlahan dari masing-masing komponen sebagai berikut:

$$MV(t) = K_p(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.47)$$

Ringkasan dari karakteristik pengendali PID adalah sebagai berikut

Table 2.1 karakteristik parameter dari pengendali PID[10]

|    | Rise time                   | Overshoot  | Settling time               | Error steady state          |
|----|-----------------------------|------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Kp | Mengurangi                  | Menambah   | Menimbulkan perubahan kecil | Mengurangi                  |
| Ki | Mengurangi                  | Menambah   | Menambah                    | Meniadakan                  |
| Kd | Menimbulkan perubahan kecil | Mengurangi | Mengurangi                  | Menimbulkan perubahan kecil |

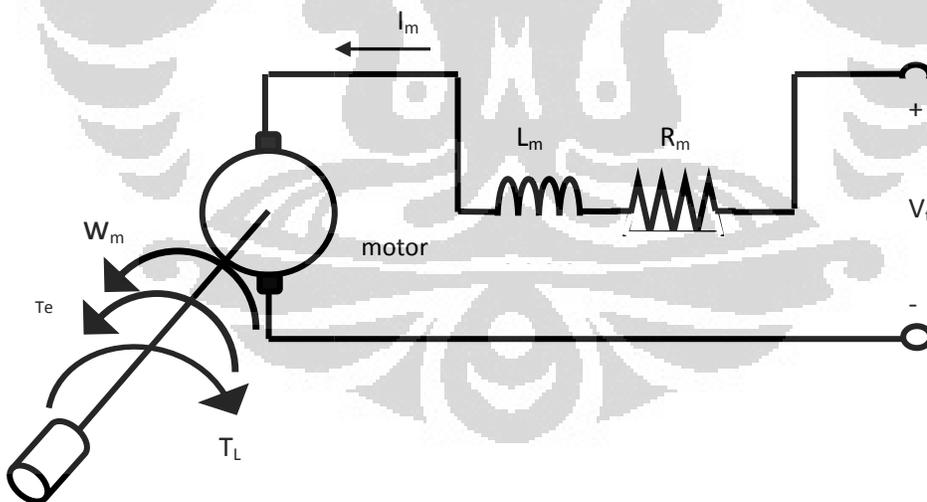
### BAB III

## PERANCANGAN SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN SUDUT MOTOR ARUS SEARAH SERI DENGAN DC CHOPPER

Berdasarkan referensi [11] untuk melakukan perancangan sistem dan simulasi pengendalian kecepatan motor arus searah seri maka dilakukan langkah-langkah sebagai berikut

1. Merepresentasikan diagram rangkaian motor arus searah seri.
2. Merepresentasikan persamaan sistem
3. Menghitung fungsi transfernya
4. Merancang blok model *dc chopper*
5. Membuat simulasi dalam simulink *software* MATLAB
6. Menganalisisnya

### 3.1 Diagram Rangkaian Motor Arus Searah Seri



Gambar 3.1 Rangkaian pengganti motor arus searah penguatan seri

Gambar diatas menunjukkan rangkaian pengganti motor arus searah seri. Disebut motor arus searah seri karena antara bagian medan dan bagian jangkar dirangkai seri. Dari gambar diatas tampak bahwa  $T_L$ , torsi load, berlawanan arah dengan kecepatan sudut dan torsi elektrik.

### 3.2 Persamaan Sistem

Dari rangkaian pengganti pada gambar (3.1) maka diperoleh persamaan elektrik motor

$$V_m = (R_a + R_f)I_m + (L_a + L_f)\frac{dI_m}{dt} + E_a \quad (3.1)$$

Karena motor arus searah seri maka hambatan pengganti menjadi

$$R_a + R_f = R_m$$

dan induktor pengganti menjadi

$$L_a + L_f = L_m$$

maka tegangan terminal menjadi

$$V_T = R_m I_m + L_m \frac{dI_m}{dt} + E_a \quad (3.2)$$

Tegangan back EMF dipindahkan ruasnya

$$V_T - E_a = R_m I_m + L_m \frac{dI_m}{dt}$$

Persamaan diatas kemudian diubah menjadi persamaan laplace supaya mudah dianalisis kestabilan sistemnya.

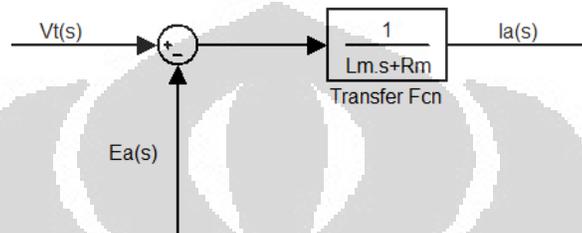
$$V_T(s) - E_a(s) = R_m I_m(s) + L_m [sI_m - I_{m-0}] \quad (3.3)$$

$$V_T(s) - E_a(s) = (R_m + sL_m)I_m(s)$$

Sehingga diperoleh persamaan arus motor adalah

$$I_m(s) = \frac{V_T(s) - E_a(s)}{(R_m + sL_m)} \quad (3.4)$$

Dari persamaan arus diatas diperoleh diagram blok untuk persamaan arus motor



Gambar 3.2 Diagram blok persamaan arus motor

Torsi elektrik sebanding dengan arus motor, maka didapatkan persamaan torsi elektrik motor

$$T_e = K_t I_m \quad (3.5)$$

Diagram blok persamaan torsi elektrik motor

Gambar 3.3 Diagram blok hubungan antara  $I_m(s)$  dengan  $T_e(s)$ 

Torsi elektrik ( $T_e$ ) dikurangi dengan torsi beban ( $T_L$ ) akan mendapatkan torsi total motor yang sebanding dengan penjumlahan momen inersia motor ( $J$ ) dan gesekan motor dikalikan dengan kecepatan sudutnya. Sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut:

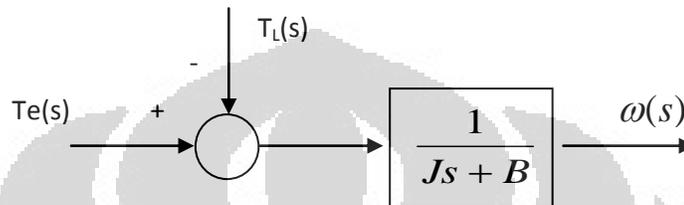
$$T_e(s) - T_L(s) = Js\omega(s) + B\omega(s) \quad (3.6)$$

$$T_e(s) - T_L(s) = (Js + B)\omega(s) \quad (3.7)$$

Sehingga didapatkan kecepatan sudut

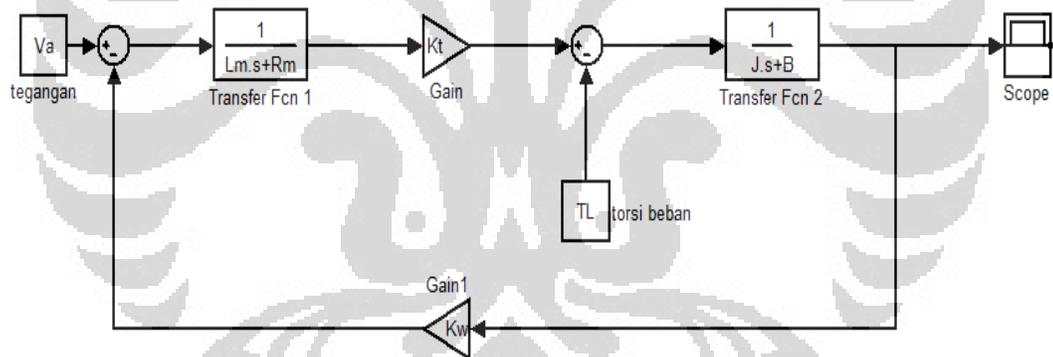
$$\omega(s) = \frac{T_e(s) - T_L(s)}{Js + B} \quad (3.8)$$

Diagram blok untuk persamaan kecepatan sudut:



Gambar 3.4 Diagram blok persamaan kecepatan sudut

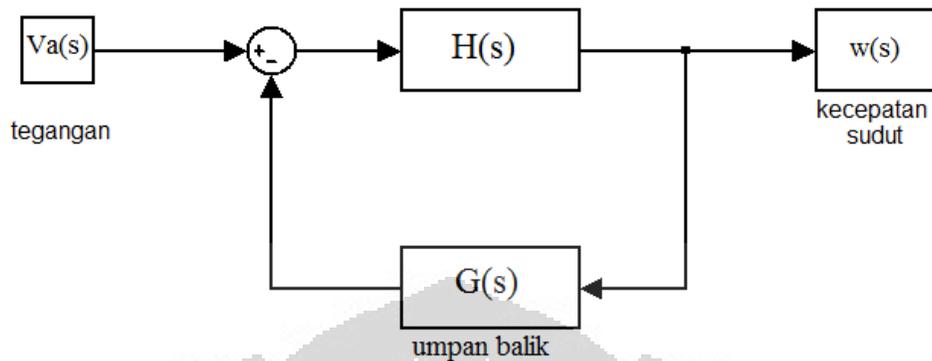
Sehingga diagram blok dari pengendalian kecepatan motor arus searah seri adalah



Gambar 3.5 Diagram blok motor arus searah seri

### 3.3 Menghitung Fungsi Transfer

Dari diagram blok motor arus searah seri yang diperoleh bisa didapatkan fungsi transfer dari sistem/*plant*. Secara umum diagram blok umpan balik adalah sebagai berikut



Gambar 3.6 Fungsi umpan balik

Fungsi transfer dari diagram blok sistem umpan balik diatas adalah

$$Gv(s) = \frac{u(s)}{Va(s)} = \frac{H(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (3.9)$$

Sehingga fungsi transfer motor arus searah seri adalah

$$Gv(s) = \frac{\omega(s)}{Va(s)} = \frac{\frac{K}{(L_m s + R_m)(Js + B)}}{1 + \frac{K^2}{(L_m s + R_m)(Js + B)}} \quad (3.10)$$

$$Gv(s) = \frac{\omega(s)}{Va(s)} = \frac{\frac{K}{(L_m s + R_m)(Js + B)}}{\frac{(L_m s + R_m)(Js + B)}{(L_m s + R_m)(Js + B)} + \frac{K^2}{(L_m s + R_m)(Js + B)}}$$

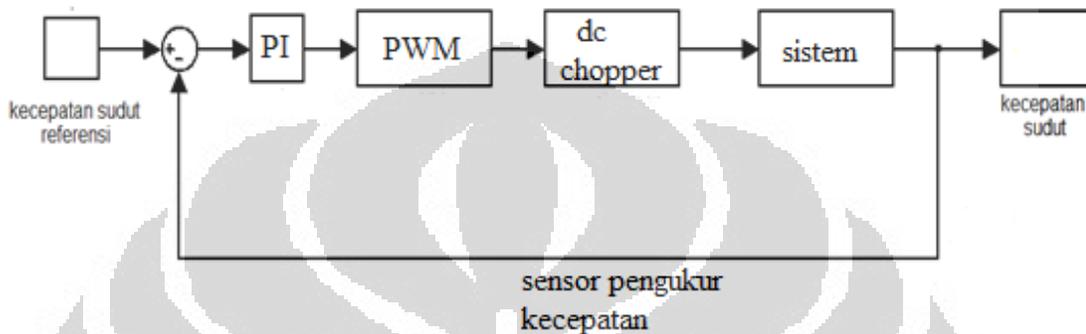
Dengan menyederhanakan persamaan diatas maka diperoleh fungsi transfer dari sistem/plant adalah

$$Gv(s) = \frac{\omega(s)}{Va(s)} = \frac{K}{\{(L_m s + R_m)(Js + B) + K^2\}} \quad (3.11)$$

Dari fungsi transfer diatas maka bisa diketahui karakteristik kestabilan sistem.

### 3.4 Mengkonversikan ke blok model DC chopper

Perancangan sistem pengendalian kecepatan loop tertutup motor arus searah seri dengan *dc chopper* mempunyai model sebagai berikut



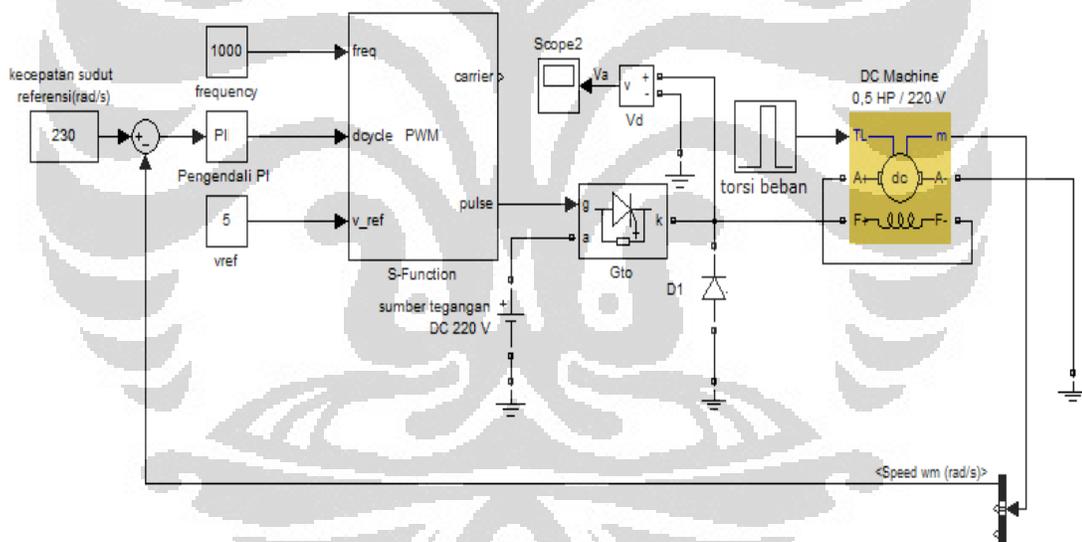
Gambar 3.7 Model pengendalian kecepatan sudut motor arus searah seri dengan *dc chopper*

Pada pengendalian loop tertutup diatas, sensor pengukur kecepatan sudut mengidentifikasi kecepatan sudut motor, kemudian diumpan balik. Pada skripsi ini, setpoint berupa kecepatan motor yang diinginkan dan diset sesuai kebutuhan. Kemudian terjadi perbandingan antara set point (kecepatan sudut referensi) dan kecepatan sudut dari alat ukur, proses ini disebut sebagai error. Perbedaan antara setpoint dan kecepatan sudut terukur dimasukkan ke dalam persamaan PI. Keluaran dari pengendali PI digunakan sebagai *duty cycle* pada PWM. Semakin besar error yang terjadi, semakin besar *duty cycle* yang dihasilkan. PWM akan mengeluarkan pulsa-pulsa sesuai nilai *duty cycle* keluaran dari pengendali PI. Sinyal pulsa ini digunakan untuk *switching* pada GTO (*Gate Turn Off Thyristor*). Nilai *switching* GTO yang berubah-ubah menyebabkan tegangan rata-rata yang menyuplai motor juga berubah-ubah tergantung dari waktu hidup  $t_{on}$  sesuai dengan persamaan (2.40) Hal inilah yang menjadi prinsip pengendalian tegangan arus searah menggunakan *dc chopper*.

Bila kecepatan yang diinginkan sudah stabil, akan ada perubahan beban yang digunakan sebagai pengganggu pada kecepatan yang telah stabil. Pengganggu yang dalam bentuk beban ini, akan mempengaruhi kinerja dari kecepatan motor. Jika perubahan beban bertambah motor akan mengalami penurunan kecepatan, dan apabila beban berkurang, motor akan mengalami kenaikan kecepatan. Disinilah fungsi dari sistem umpan balik, sebagai pembaca kecepatan. Error ini akan diproses kembali oleh PID, agar didapatkan keluaran baru untuk menstabilkan kecepatan sudut sesuai dengan kecepatan sudut referensi.

### 3.5 Membuat Simulasi dalam Simulink Software MATLAB

Simulasi *DC chopper* menggunakan simulink MATLAB, dengan konfigurasi sebagai berikut,



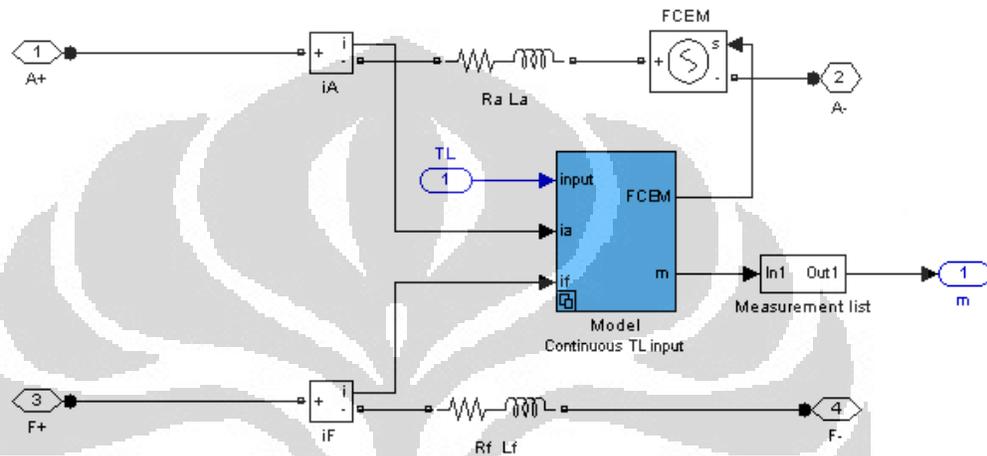
Gambar 3.8 Gambar blok model pengendalian kecepatan motor arus searah seri dengan simulink MATLAB.

Dalam simulasi digunakan metode chopper fed untuk mengatur tegangan terminal yang masuk ke motor. Bagian-bagian chopper fed meliputi GTO (*Gate-Turn-Off Thyristor*), *freewhelling dioda*, dan induktor. Komponen *dc machine* dalam

simulasi ini mempunyai dua bagian yaitu bagian elektrik dan bagian mekanik. Berikut adalah penjelasan komponen-komponen dalam simulasi ini.

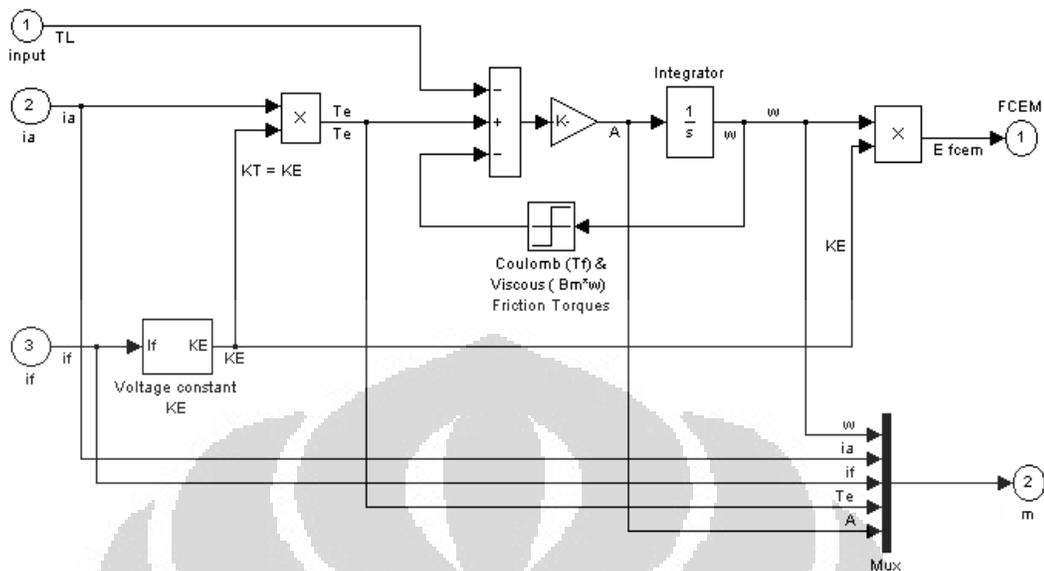
### 3.5.1 Bagian *dc machine*

Gambar rangkaian elektriknya sebagai berikut



Gambar 3.9 Bagian elektrik *dc machine* dalam simulasi pengendali kecepatan motor arus searah seri dengan *dc chopper*.

Bagian atas yaitu rangkaian pengganti jangkar (*armature*), meliputi  $R_a$  dan  $L_a$  serta alat ukur ampere meter untuk mengukur arus jangkar  $I_a$ . Bagian bawah merupakan bagian rangkaian pengganti stator, meliputi  $R_f$  dan  $L_f$  serta alat ukur amperemeter untuk mengukur arus stator  $I_f$ . Dengan konfigurasi seperti diatas maka bisa dibuat motor arus searah berpenguatan terpisah, *shunt* ataupun seri. Dalam simulasi ini menggunakan motor arus searah berpenguatan seri, yaitu dengan menghubungkan sumber tegangan arus searah dengan kutub positif stator kemudian bagian kutub negatif stator dihubungkan ke bagian kutub positif jangkar. Sedangkan bagian kutub negatif jangkar dihubungkan ke sistem pentanahan. Bagian mekanik dalam simulasi ini seperti ditunjukkan bagan sebagai berikut:



Gambar 3.10 Bagian mekanik *dc machine* dalam simulasi pengendali kecepatan motor arus searah seri dengan *dc chopper*.

Masukan dari sistem ini adalah *torsi load*,  $TL$ . Arus jangkar,  $I_a$ , dan arus medan,  $I_f$ , dikalikan dengan konstanta  $KE$  menghasilkan torsi elektrik. Torsi elektrik yang dihasilkan dikurangi dengan *torsi load*, *coulomb friction torque* dan *viscous friction coefficient*. Dengan mengintegrasikan hasil dari pengurangan torsi elektrik maka didapatkan kecepatan sudut. Back EMF dari sistem ini adalah kecepatan sudut dikalikan dengan konstanta  $KE$ .

### 3.5.2 Bagian PWM

Bagian PWM dalam simulasi ini menggunakan program *c-mex*. Dengan masukan adalah frekuensi, nilai *duty cycle* yang dinyatakan dalam persen dan tegangan referensi. Dengan algoritma PWM sebagai berikut

```
dc = vref(0)-dcycle(0)*vref(0);
```

```
temp=fmod(time,period);           (menghasilkan sinyal gergaji dengan  
                                  memanfaatkan sisa hasil bagi)
```

```
carrier[0] =temp*freq(0)*vref(0); (sinyal karir PWM)
```

```
if (carrier[0]>=dc)                (pembentukan sinyal PWM)
```

```
fast_pwm[0] = vref(0);
```

```
    }  
else {  
    fast_pwm[0] = 0;
```

dari algoritma diatas maka dihasilkan sinyal PWM yang berbentuk kotak-kotak sesuai dengan *duty cycle*.

### 3.5.3 Bagian GTO (*Gate Turn Off Thyristor*)

GTO yang digunakan dalam simulasi ini adalah sebuah alat semikonduktor yang *on* dan *off* nya dengan pemberian sinyal pada *gate*. Seperti *thyristor* pada umumnya, GTO menjadi *on* dengan pemberian arus positif pada *gate* dan masuk dalam kondisi *off* dengan pemberian arus nol pada *gate*. GTO menjadi dalam kondisi *on* dan *off* sesuai dengan sinyal yang diberikan pada *gate*. Dalam simulasi ini pemberian sinyal pada *gate* dilakukan oleh keluaran PWM, sehingga frekuensi PWM menentukan frekuensi *switching* GTO.

## BAB IV

### SIMULASI PENGATURAN KECEPATAN MOTOR ARUS SEARAH SERI DENGAN MENGGUNAKAN DC CHOPPER

Bab ini menjelaskan karakteristik kondisi *transien* sistem motor arus searah seri dan hasil simulasi pengaturan kecepatan motor arus searah seri dengan menggunakan *DC Chopper*. Untuk simulasi *DC chopper* yang dilakukan meliputi simulasi PWM dengan frekuensi yang berbeda-beda dan simulasi dengan beban berubah. Karakteristik motor yang digunakan adalah motor arus searah berpenguatan seri berdasarkan referensi [12] yang selanjutnya disebut motor A dengan spesifikasi sebagai berikut: Motor arus searah seri 220 volt, 0,5 HP, 3000 r.p.m.

$$R_a = 10,5 \text{ ohm}$$

$$L_a = 0,11783 \text{ Henry}$$

$$R_f = 5,5 \text{ ohm}$$

$$L_f = 0,2675 \text{ Henry}$$

$$L_{af} = 1,23 \text{ Henry}$$

$$B = 0,0001 \text{ Nm/(rad/sec)}$$

$$J = 0,0015 \text{ Kg.m}^2$$

$$K_o = 0,2126 \text{ Volt / (rad/sec)}$$

Karakteristik motor kedua yang selanjutnya disebut motor B

260Volt, 5HP, 1750 rpm

$$R_a = 0,78 \text{ ohm}$$

$$L_a = 0,1016 \text{ Henry}$$

$$R_f = 20 \text{ ohm}$$

$$L_f = 112,5 \text{ Henry}$$

$$L_{af} = 1,234 \text{ Henry}$$

$$B = 0,01 \text{ Nm/(rad/sec)}$$

$$J = 0,05 \text{ Kg.m}^2$$

$$K_o = 0,8185 \text{ Volt / (rad/sec)}$$

#### 4.1 Karakteristik Sistem Motor Arus Searah Seri

Untuk motor A sesuai dengan persamaan (3.11) maka diperoleh fungsi transfer sebagai berikut:

$$Gv(s) = \frac{\omega(s)}{Va(s)} = \frac{K}{\{(L_m s + R_m)(Js + B) + K^2\}}$$

dengan

$$R_m = R_a + R_f$$

$$L_m = L_a + L_f$$

Dengan memasukkan parameter motor arus searah diatas didapatkan

Fungsi transfer sistem motor arus searah seri

Untuk motor A

$$Gv(s) = \frac{\omega(s)}{Va(s)} = \frac{0.2126}{\{(0.38533s + 16)(0.0015s + 0.0001) + (0.2126)^2\}}$$

$$Gv(s) = \frac{\omega(s)}{Va(s)} = \frac{0.2126}{\{(0.0006s^2 + 0.0240s + 0.0016) + (0.04519876)\}}$$

$$Gv(s) = \frac{\omega(s)}{Va(s)} = \frac{0.2126}{\{(0.0006s^2 + 0.0240s + 0.04679876)\}}$$

Sesuai dengan persamaan ideal orde dua

$$Gv(s) = \frac{\omega(s)}{Va(s)} = \frac{\omega_n^2}{\{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2\}} \quad (4.1)$$

Sehingga persamaan sistem menjadi

$$Gv(s) = \frac{\omega(s)}{Va(s)} = \frac{354,33}{\{s^2 + 40s + 78\}}$$

Dari persamaan diatas maka perlu ditambahkan penguatan sebesar

$$Kp = \frac{78}{354,33} = 0,22$$

Sehingga persamaan sistem menjadi

$$Gv(s) = \frac{\omega(s)}{Va(s)} = Kp \frac{78}{\{s^2 + 40s + 78\}}$$

Menganalisis kondisi *transien* sistem, sesuai dengan persamaan (4.1) maka nilai

Frekuensi natural motor Adalah

$$\omega_n = \sqrt{78} = 8.83176$$

dan faktor peredaman motor Adalah

$$2\xi\omega_n = 40$$

$$\xi = \frac{40}{2 \times 8.83176} = 2.2645$$

Karena nilai faktor peredaman lebih besar dari satu maka sistem termasuk kategori *overdamped* sehingga sistem tidak memiliki %overshoot. Dari persamaan (4.1) didapatkan penurunan rumus pole sebagai berikut

$$s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1} \quad (4.2)$$

Sehingga nilai pole dari motor Adalah

$$s_1 = -\xi\omega_n + \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1}$$

$$s_{1,2} = -2.26455 \times 8.83176 \pm 8.83176 \sqrt{(2.26455)^2 - 1}$$

$$s_1 = -2.055$$

$$s_2 = -37.94$$

*Settling time* adalah waktu yang dibutuhkan oleh sistem untuk mencapai *steady state error* 98%, persamaan *settling time*

$$T_s = \frac{4}{\xi\omega_n}$$

(4.3)

Sehingga *settling time* motor Adalah

$$T_s = \frac{4}{2.26455 \times 8.83176}$$

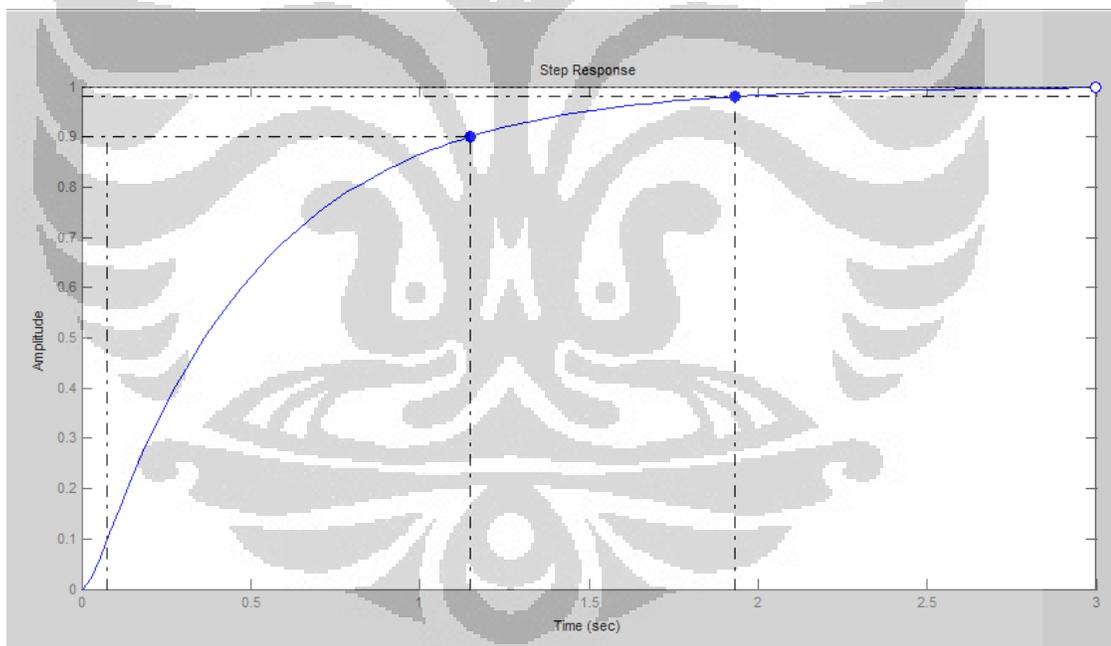
$$T_s = 0.2$$

Dengan memberi fungsi step ke sistem persamaan fungsi transfer diatas, maka didapatkan karakteristik kestabilan sistem



Gambar 4.1 Diagram pemberian input *step* ke sistem

Grafik *step response*



Gambar 4.2 Grafik *step response* untuk motor A

Diperoleh hasil

Rise time : 1,07 detik

Settling time : 1,93 detik (perhitungan 2.0 detik)

Steady state : 3 detik

% Overshoot : 0%

Hasil percobaan dengan software MATLAB menunjukkan perbedaan *settling time* hasil perhitungan sebesar 0,07 detik lebih rendah. Perbedaan ini disebabkan nilai pembulatan yang diambil pada perhitungan. Sementara %OS bernilai nol untuk hasil percobaan maupun hasil perhitungan.

Untuk grafik *rootlocus*



Grafik 4.3 Grafik *rootlocus* untuk motor A

Dari hasil percobaan dengan MATLAB untuk motor A didapatkan nilai pole

$s_1 = -2,09$  (perhitungan  $-2,059$ )

$s_2 = -37,9$  (perhitungan  $-37,94$ )

Dari hasil analisis kondisi transien sistem maka dapat disimpulkan bahwa sistem ini memiliki tingkat kestabilan yang bagus.

Pada motor B seperti motor A dengan persamaan (3.11) maka diperoleh fungsi transfer sebagai berikut:

$$Gv(s) = \frac{\omega(s)}{Va(s)} = \frac{K}{\{(L_m s + R_m)(Js + B) + K^2\}}$$

dengan

$$R_m = R_a + R_f$$

$$L_m = L_a + L_f$$

Dengan memasukkan parameter motor arus searah diatas didapatkan

Fungsi transfer sistem motor arus searah seri

Untuk motor B

$$Gv(s) = \frac{\omega(s)}{Va(s)} = \frac{0.8185}{\{(112.6016s + 20.78)(0.05s + 0.01) + (0.8185)^2\}}$$

$$Gv(s) = \frac{\omega(s)}{Va(s)} = \frac{0.8185}{\{(5.6301s^2 + 2.1650s + 0.2078) + (0.66994225)\}}$$

$$Gv(s) = \frac{\omega(s)}{Va(s)} = \frac{0.8185}{\{(5.6301s^2 + 2.1650s + 0.87774225)\}}$$

Sesuai dengan persamaan ideal orde dua persamaan (4.1)

$$Gv(s) = \frac{\omega(s)}{Va(s)} = \frac{\omega_n^2}{\{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2\}}$$

Sehingga persamaan sistem menjadi

$$Gv(s) = \frac{\omega(s)}{Va(s)} = \frac{0.1453793}{\{s^2 + 0.38454s + 0.1559\}}$$

Dari persamaan diatas maka perlu ditambahkan penguatan sebesar

$$Kp = \frac{0.1559}{0.1453793} = 1.07236$$

Sehingga persamaan sistem setelah ditambahkan penguatan Kp menjadi

$$Gv(s) = \frac{\omega(s)}{Va(s)} = Kp \frac{0.1559}{\{s^2 + 0.38454s + 0.1559\}}$$

Menganalisis kondisi *transien* sistem, sesuai dengan persamaan (4.1) maka nilai

Frekuensi natural motor adalah

$$\omega_n = \sqrt{0.1559} = 0.3948$$

dan faktor peredaman motor adalah

$$2\xi\omega_n = 0.38454$$

$$\xi = \frac{0.38454}{2 \times 0.3948} = 0.4869$$

Karena nilai faktor peredaman lebih besar dari satu maka sistem termasuk kategori *underdamp* sehingga sistem memiliki %overshoot. Dari persamaan (4.1) didapatkan penurunan rumus pole sebagai berikut

$$s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1}$$

Sehingga nilai pole dari motor adalah

$$s_1 = -\xi\omega_n + \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1}$$

$$s_{1,2} = -0.4869 \times 0.3948 \pm 0.3948 \sqrt{(0.4869)^2 - 1}$$

$$s_1 = -0.192 + 0.345i$$

$$s_2 = -0.192 - 0.345i$$

*Settling time* adalah waktu yang dibutuhkan oleh sistem untuk mencapai *steady state error* 98%, persamaan *settling time*

$$T_s = \frac{4}{\xi\omega_n}$$

(4.3)

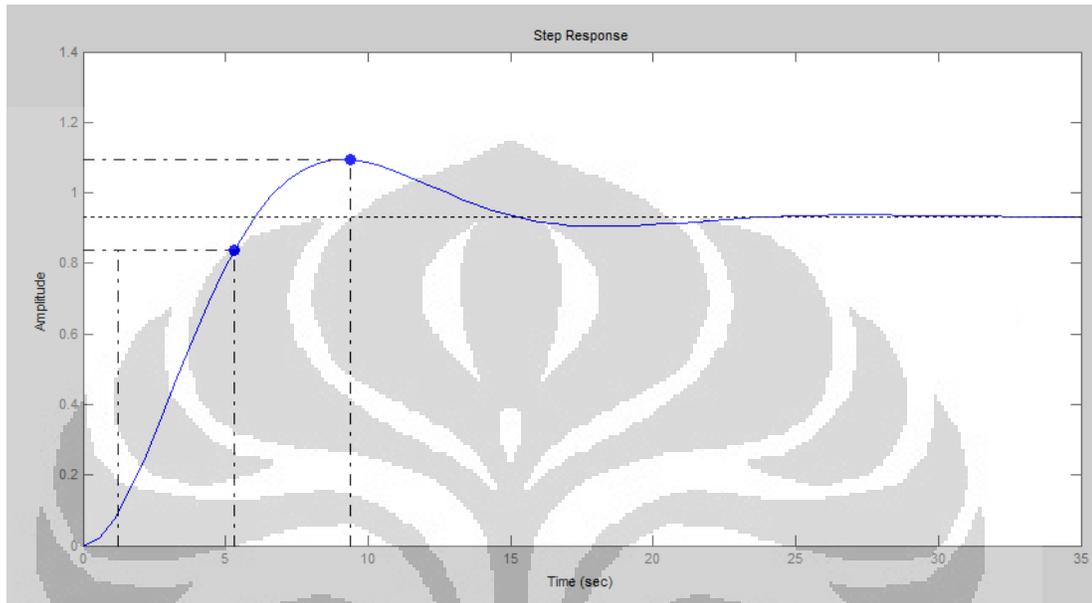
Sehingga *settling time* motor Adalah

$$T_s = \frac{4}{0.4869 \times 0.3948}$$

$$T_s = 20.8$$

Dengan memberi fungsi step ke sistem persamaan fungsi transfer diatas, maka didapatkan karakteristik kestabilan sistem

Grafik step responses



Gambar 4.4 Grafik *step response* untuk motor B

Diperoleh hasil

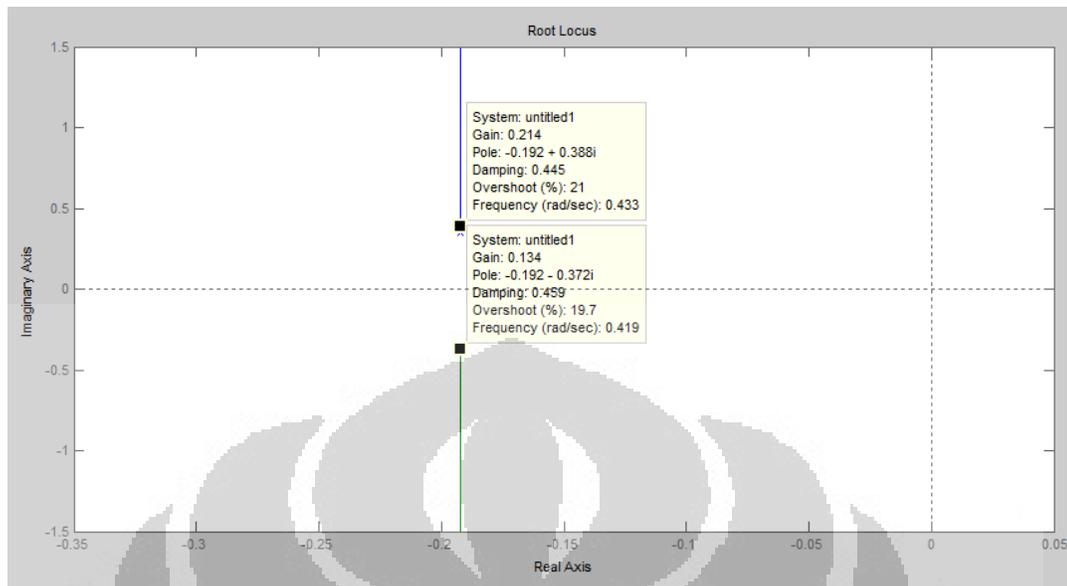
- Rise time : 5.28 detik
- Settling time : 20.7 detik (perhitungan 20.8)
- Steady state : 35 detik
- % Overshoot : 17.5%

Dari hasil diatas maka dapat disimpulkan bahwa motor B tidak stabil dan membutuhkan waktu yang lama untuk mencapai *steady state*.

Dari hasil percobaan dengan MATLAB untuk motor A didapatkan nilai pole

$$s_1 = -0.192 + 0.345i$$

$$s_2 = -0.192 - 0.345i$$



Gambar 4.5 Grafik *rootlocus* motor B

Dari grafik *root locus* untuk motor B maka disimpulkan bahwa motor B tidak stabil. Selanjutnya akan dilakukan simulasi untuk mengendalikan kecepatan sudut untuk motor B. Dalam skripsi ini akan dilakukan perbandingan pengendalian untuk motor A dan motor B.

## 4.2 Hasil Simulasi dengan Menggunakan DC Chopper

### 4.2.1 Pengaruh Frekuensi PWM Terhadap Arus Dan Kecepatan Motor

Sesuai dengan rancangan simulasi pada bab tiga, maka percobaan pertama yang dilakukan adalah mensimulasikan perubahan frekuensi PWM terhadap sistem. Tujuan simulasi ini untuk mengetahui pengaruh frekuensi terhadap ripple yang terjadi di arus maupun kecepatan sudutnya. Dengan parameter sebagai berikut:

Kecepatan sudut referensi adalah 100 rad/detik.

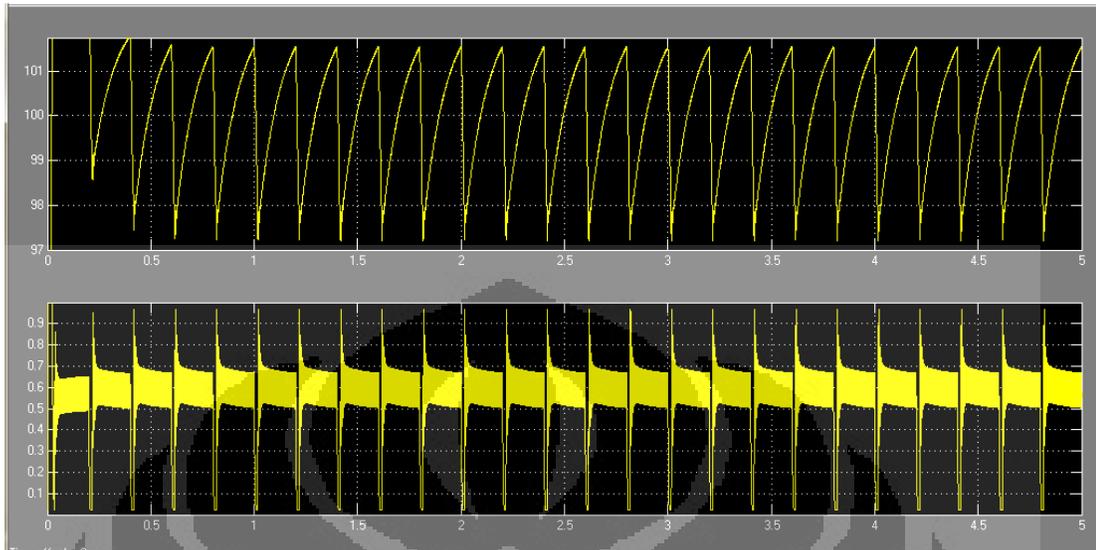
Pengendali yang digunakan  $K_p = 0,22$  dan  $K_i = 2$ .

Torsi beban  $T_L$  konstan pada 0,4Nm.

Dengan konfigurasi parameter yang digunakan

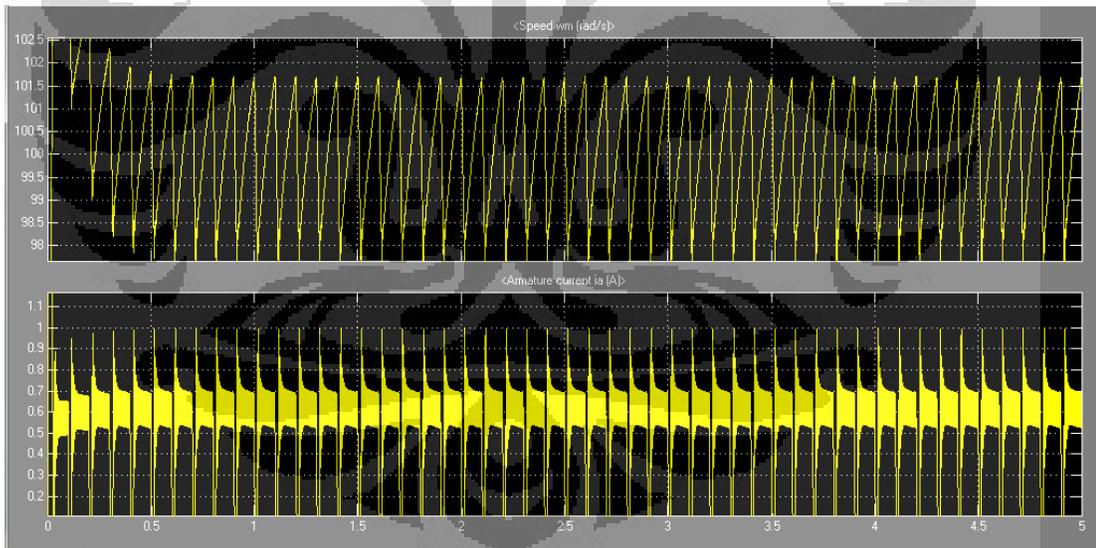
*Solver ode23tb variable-step stiff* dengan *relative tolerance* pada  $10^{-4}$  untuk mendapatkan unjuk kerja simulasi yang akurat.

### Frekuensi 5 Hz



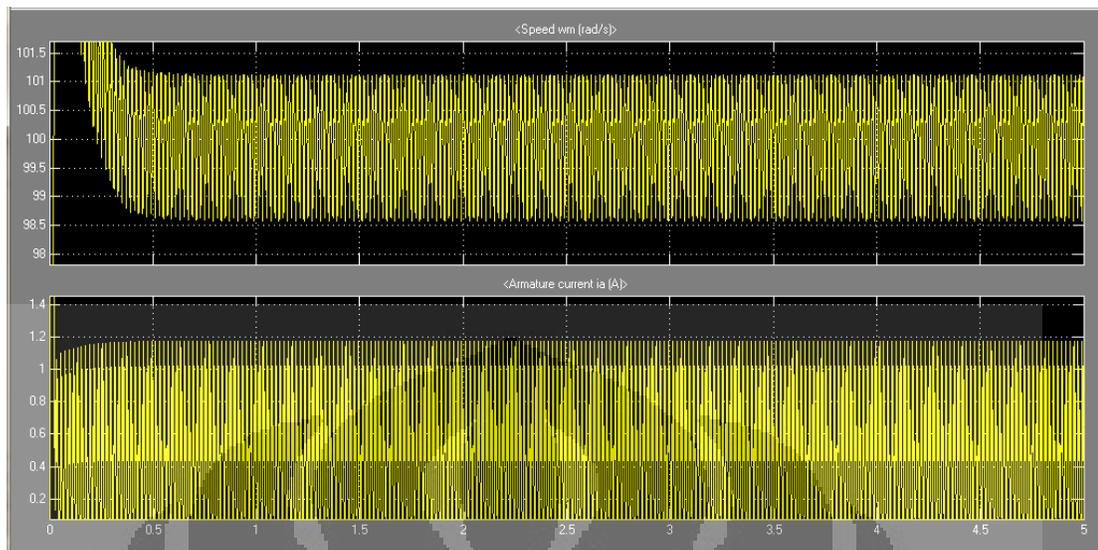
Gambar 4.6 Grafik kecepatan sudut dan arus jangkar motor pada frekuensi PWM 5Hz

### Frekuensi 10 Hz



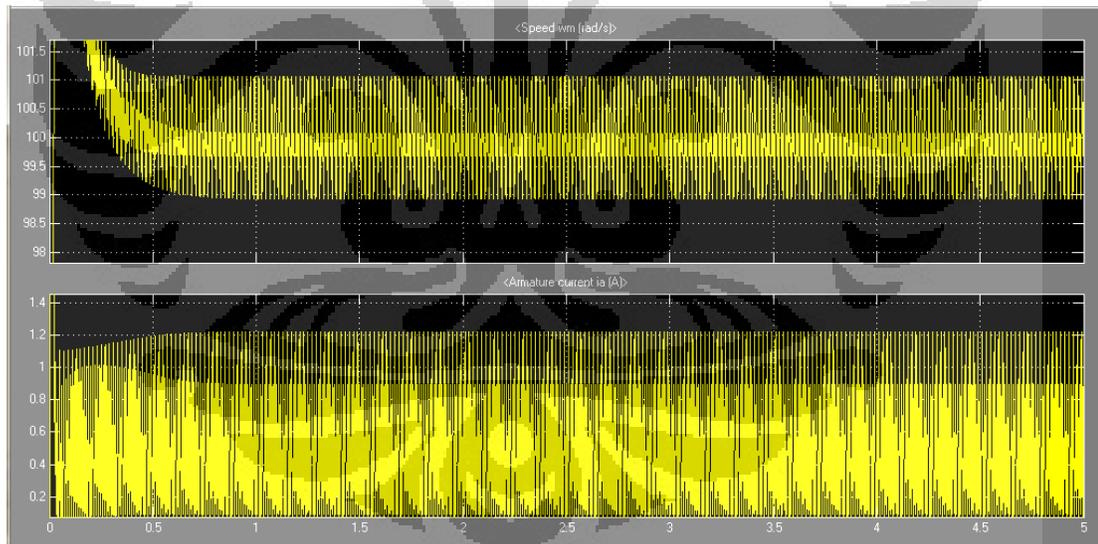
Gambar 4.7 Grafik kecepatan sudut dan arus jangkar motor pada frekuensi PWM 10Hz

### Frekuensi 50 Hz



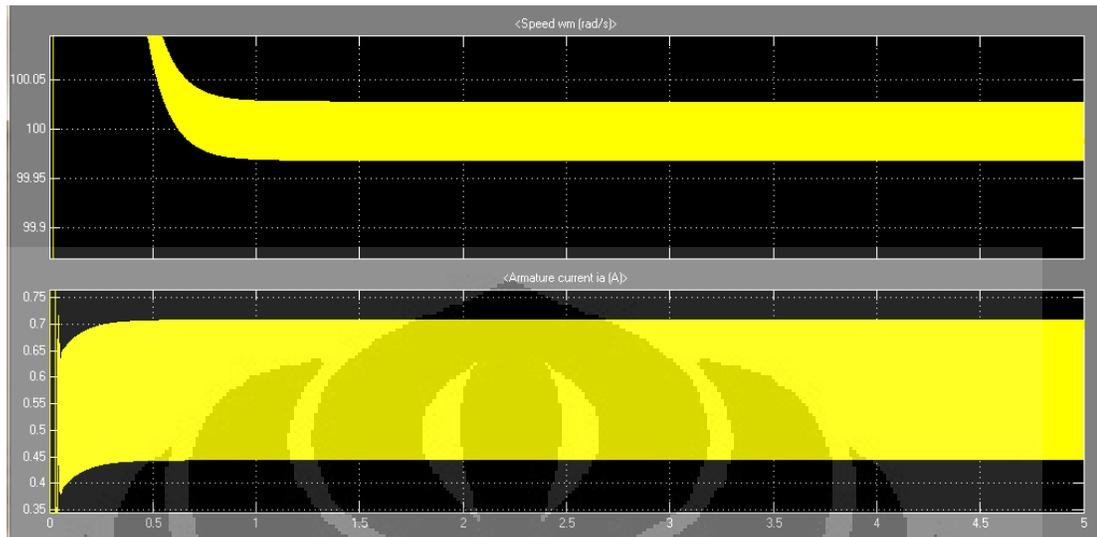
Gambar 4.8 Grafik kecepatan sudut dan arus jangkar motor pada frekuensi PWM 50Hz

Frekuensi 100 Hz



Gambar 4.9 Grafik kecepatan sudut dan arus jangkar motor pada frekuensi PWM 100Hz

### Frekuensi 500 Hz



Gambar 4.10 Grafik kecepatan sudut dan arus jangkar motor pada frekuensi PWM 500Hz

### Frekuensi 1000Hz



Gambar 4.11 Grafik kecepatan sudut dan arus jangkar motor pada frekuensi PWM 1000Hz

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan bisa disimpulkan melalui table berikut

Table 4.1 pengaruh frekuensi PWM terhadap ripple arus dan kecepatan sudut

| No | Frekuensi (Hertz) | Ripple arus, $\Delta I$ (Ampere) | Ripple kecepatan sudut, $\Delta \omega$ (rad / s) |
|----|-------------------|----------------------------------|---|
| 1  | 5                 | 0,9                              | 4.75  |
| 2  | 10                | 0,9                              | 4.75  |
| 3  | 50                | 1,1                              | 2,5   |
| 4  | 100               | 1,1                              | 2   |
| 5  | 500               | 0,26                             | 0,063   |
| 6  | 1000              | 0,125                            | 0,0132  |

Dari percobaan perubahan frekuensi diatas dapat diketahui bahwa ketika frekuensi ditingkatkan maka ripple arus berkurang begitu juga dengan kecepatan sudut yang dihasilkan. Perubahan frekuensi dari 5Hz-10Hz tidak menimbulkan perubahan yang berarti. Perubahan frekuensi dari 50Hz -100Hz tidak mengurangi ripple namun malah menambah ripple arus yang terjadi namun menurunkan ripple kecepatan sudut. Perubahan frekuensi 500Hz-1000Hz menimbulkan perubahan yang sangat baik, arus ripple pada frekuensi 500Hz sebesar 0,26 Ampere dan ripple kecepatan sudut 0,063 rad/detik. Ripple pada 1000Hz sebesar 0,125 Ampere ripple kecepatan sudut 0,0132 rad/detik. Ketika frekuensi naik maka ripple yang ditimbulkan menurun, namun ini hanya berlaku untuk frekuensi yang tinggi. Sesuai dengan persamaan (2.30)

$$\Delta I_{mak} = \frac{V_s}{4fL}$$

Untuk frekuensi 500Hz (Percobaan 0,26Ampere)

$$\Delta I_{mak} = \frac{220}{4 \times 500 \times 0.38533} = 0.285 \text{ Ampere}$$

Untuk frekuensi 1000Hz (Percobaan 0,125Ampere)

$$\Delta I_{mak} = \frac{220}{4 \times 1000 \times 0.38533} = 0.1427 \text{ Ampere}$$

Sementara untuk percobaan perubahan frekuensi dari 5Hz-100Hz tidak sesuai dengan persamaan ini dikarenakan frekuensi yang digunakan kecil. Dari hasil analisis percobaan perubahan frekuensi ini maka untuk simulasi berikutnya akan digunakan frekuensi antara 500Hz sampai 1000Hz.

#### 4.2.2 Analisis Pada Kondisi Loop Terbuka Beban Berubah

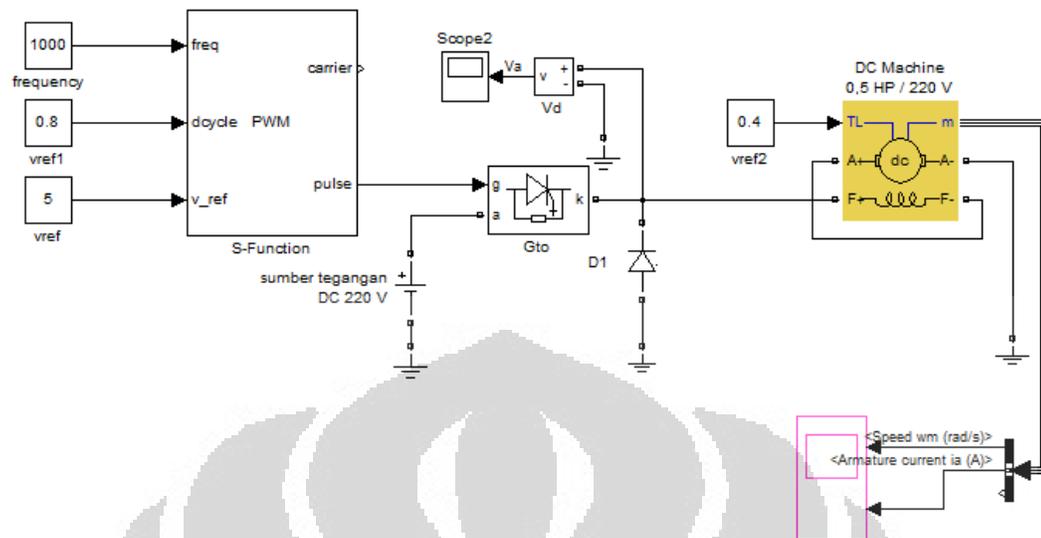
Pada bagian ini akan dilakukan percobaan dengan membebani motor dengan torsi beban berubah pada detik ke 4 sampai 6 waktu simulasi 10 detik. Pada analisis ini tidak digunakan pengendali PI sehingga disebut sebagai loop terbuka. Tegangan sumber 220 Volt. *Duty cycle* PWM pada nilai 0.8 (80%) dengan frekuensi 1000Hz, dan tegangan referensi PWM 5 Volt. Dengan konfigurasi sistem seperti pada gambar (4.12) Untuk motor A maka diperoleh hasil sebagai berikut :

Pada gambar (4.8) terlihat bahwa tegangan keluaran dari GTO berupa pulsa-pulsa. Dengan mengambil sample pada detik ke 9.81-9.811 maka bisa diperoleh nilai frekuensi yang digunakan pada GTO, sesuai dengan persamaan (2.41)

$$f_c = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_{on} + t_{off}}$$

$$T(\text{periode}) = 9.811 - 9.810 = 0.001s$$

maka sesuai dengan persamaan 2.41 frekuensi switching adalah 1000Hz. Frekuensi ini sesuai dengan frekuensi PWM.



Gambar 4.12 diagram blok simulink MATLAB untuk percobaan loop terbuka motor arus searah seri.

Untuk menghitung besarnya tegangan pada *dutycycle* 0.8 dengan menggunakan persamaan (2.42)

$$V_{dc} = \frac{t_{on}}{T} V_s = dV_s$$

Maka tegangan motor Adalah

$$V_{dc} = \frac{t_{on}}{T} V_s = 0.8 \times 220 = 176 \text{ Volt}$$

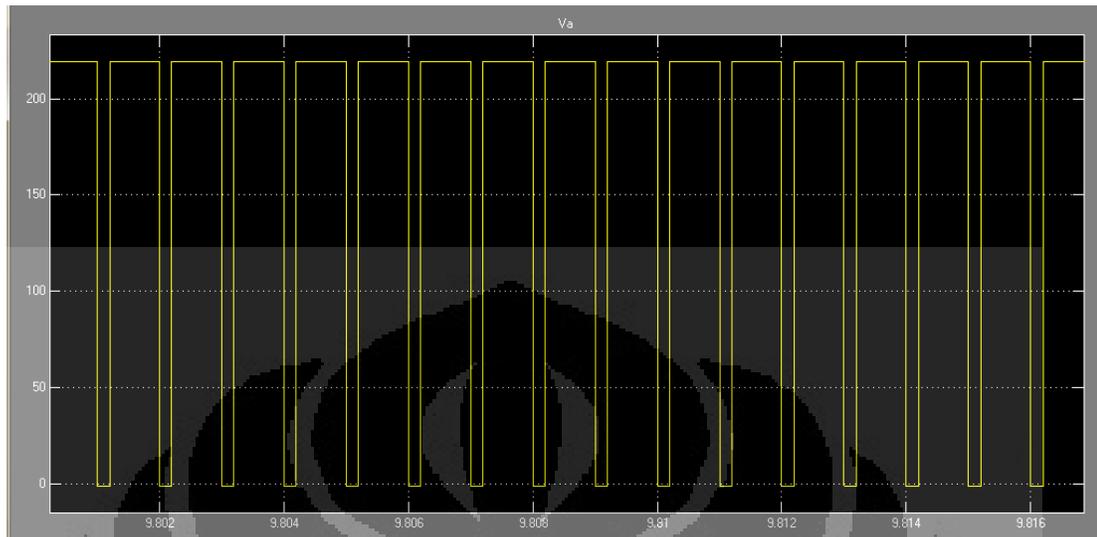
Kecepatan sudut yang diperoleh didapatkan hasil sebagai berikut:

Pada kondisi tunak kecepatan sudutnya adalah 230 rad/detik.

Steady state : 2 detik

% Overshoot : 0%

### Tegangan keluaran dari GTO



Gambar 4.13 Grafik tegangan keluaran dari GTO terhadap waktu  
Pada motor A dengan *dutycycle* PWM 0.8 (80%)

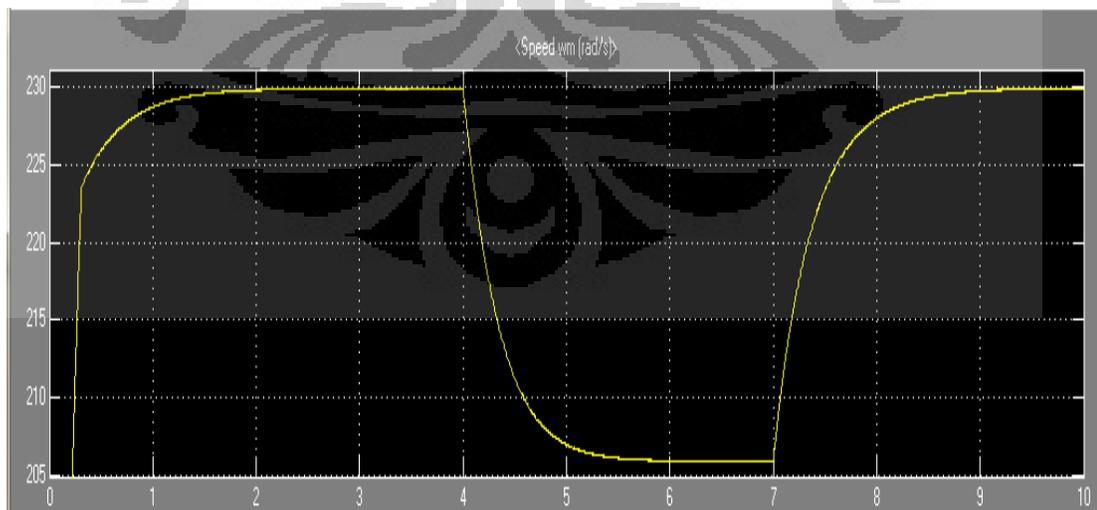
### Karakteristik torsi beban

Detik 0 - 4 : 0.4 Nm

Detik 4 - 7 : 0.5 Nm

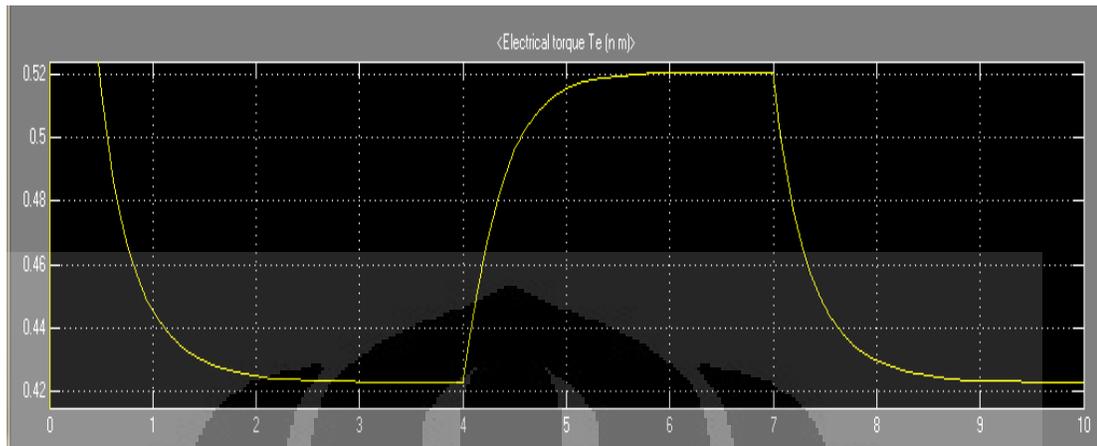
Detik 7 - 10 : 0.4 Nm

### Kecepatan sudut untuk motor A pada kondisi loop terbuka



Gambar 4.14 Grafik kecepatan sudut terhadap waktu pada perubahan beban motor A.

Grafik perubahan torsi elektrik ketika diberi beban pada detik ke 4 sampai 7



Gambar 4.15 Grafik torsi elektrik motor A ketika diberi beban pada detik ke 4 sampai 7.

Pada gambar 4.15 kecepatan mula-mula 229 rad/detik kecepatan pada pemberian beban selama 3 detik menjadi 206 rad/detik. Penurunan kecepatan adalah 23 rad/detik. Torsi elektrik mengalami kenaikan ketika diberi beban. Torsi elektrik mula-mula yaitu ketika torsi beban 0.4Nm adalah 0.4230 kemudian torsi elektrik naik menjadi 0.5206 Nm.

Analisis matematis, dari persamaan (3.8)

$$\omega(s) = \frac{T_e(s) - T_L(s)}{Js + B}$$

maka kecepatan sudut mula-mula dikurangi kecepatan sudut akhir setelah diberi beban adalah  $\Delta\omega(\text{rad/s})$

$$\Delta\omega = \omega_1(s) - \omega_2(s) = \frac{T_{e1}(s) - T_{L1}(s)}{Js + B} - \frac{T_{e2}(s) - T_{L2}(s)}{Js + B} \quad (4.3)$$

Sesuai dengan hasil yang diperoleh pada simulasi, maka persamaan diatas menjadi

$$\Delta\omega = \frac{0.4230 - 0.4 - 0.520 + 0.5}{10^{-4} s(15s + 1)}$$

$$\Delta\omega = \frac{0.0024 \times 10^4}{s(15s+1)}$$

$$\Delta\omega = \frac{\frac{24}{15}}{s(s + \frac{1}{15})}$$

$$\Delta\omega = \frac{A}{s} + \frac{B}{s + \frac{1}{15}}$$

$$A = sF(s) \Big|_{s=0} = 24$$

$$B = s + \frac{1}{15} F(s) \Big|_{s=-\frac{1}{15}} = -24$$

sehingga

$$\Delta\omega = \frac{24}{s} - \frac{24}{s + \frac{1}{15}}$$

inverslaplace

$$\Delta\omega = 24 - 24e^{-\frac{t}{15}} \text{ (rad / det)}$$

Dengan memasukkan  $t$  tak berhingga (kondisi tunak) maka diperoleh perubahan kecepatan sudut sebesar 24 rad/detik. Sesuai dengan hasil simulasi maka perubahan kecepatan sudut adalah sebesar 24 rad/detik. Hasil analisis matematis sama dengan hasil simulasi. Sehingga dari analisis ini bisa disimpulkan bahwa perubahan torsi beban 0.1 Nm pada motor jenis A menyebabkan penurunan kecepatan sebesar 24 rad/detik.

Pada kondisi tunak kecepatannya adalah 230 rad/detik.

Steady state : 3 detik

% Overshoot : 0%

Untuk motor B

Untuk motor B maka diperoleh hasil sebagai berikut:

Pada gambar (4.12) terlihat bahwa tegangan keluaran dari GTO berupa pulsa-pulsa. Dengan mengambil sample pada detik ke 9.81-9.811 maka bisa diperoleh nilai frekuensi yang digunakan pada GTO, sesuai dengan persamaan (2.41)

$$f_c = \frac{1}{t_{on} + t_{off}}$$

$$t_{on} + t_{off} = 19.548 - 19.546 = 0.002$$

maka sesuai dengan persamaan (2.41) maka frekuensi switching adalah 500Hz.

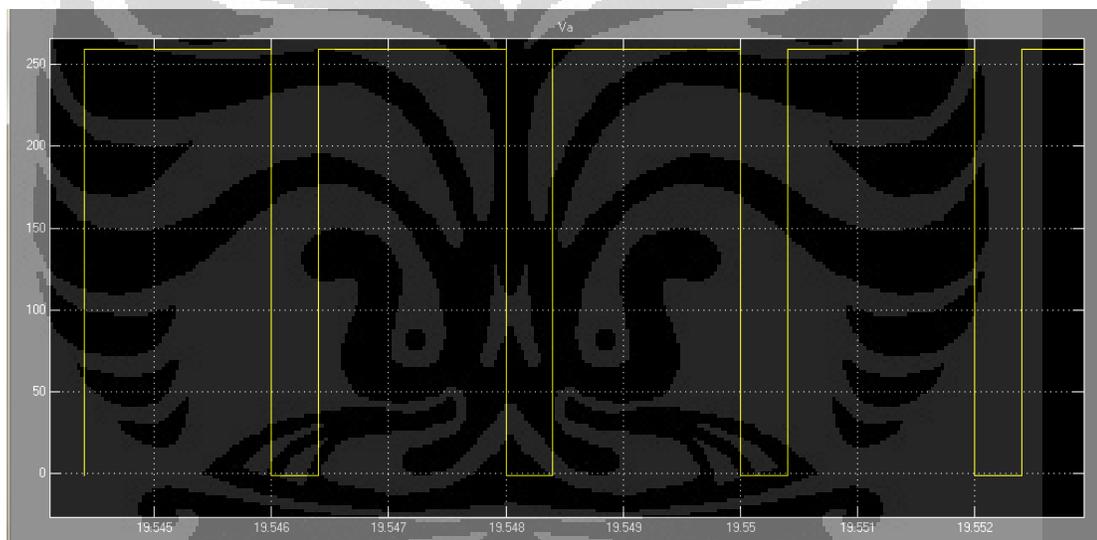
Frekuensi ini sesuai dengan frekuensi PWM. untuk menghitung besarnya tegangan pada *dutycycle* 0.8 dengan menggunakan persamaan (2.42)

$$V_{dc} = \frac{t_{on}}{T} V_s = dV_s$$

Maka tegangan motor adalah

$$V_{dc} = \frac{t_{on}}{T} V_s = 0.8 \times 260 = 208 \text{ Volt}$$

Tegangan keluaran dari GTO



Gambar 4.16 Grafik tegangan keluaran dari GTO terhadap waktu pada motor B *dutycycle* PWM bernilai 0.8 (80%).

Karakteristik torsi beban yang diberikan pada motor B.

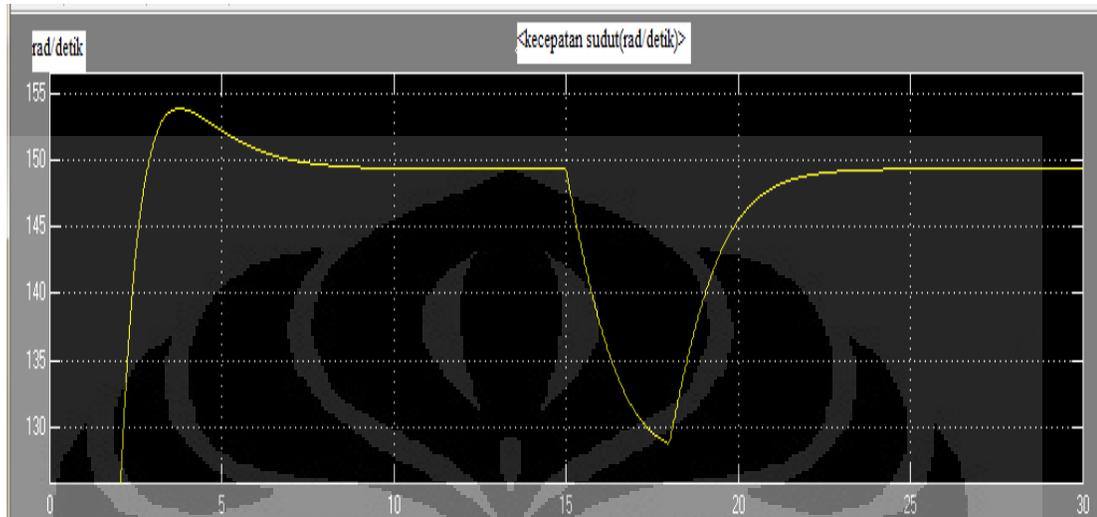
0- 15detik : 0,1 Nm

15-18 detik : 0.8 Nm

18-30 detik : 0.1 Nm

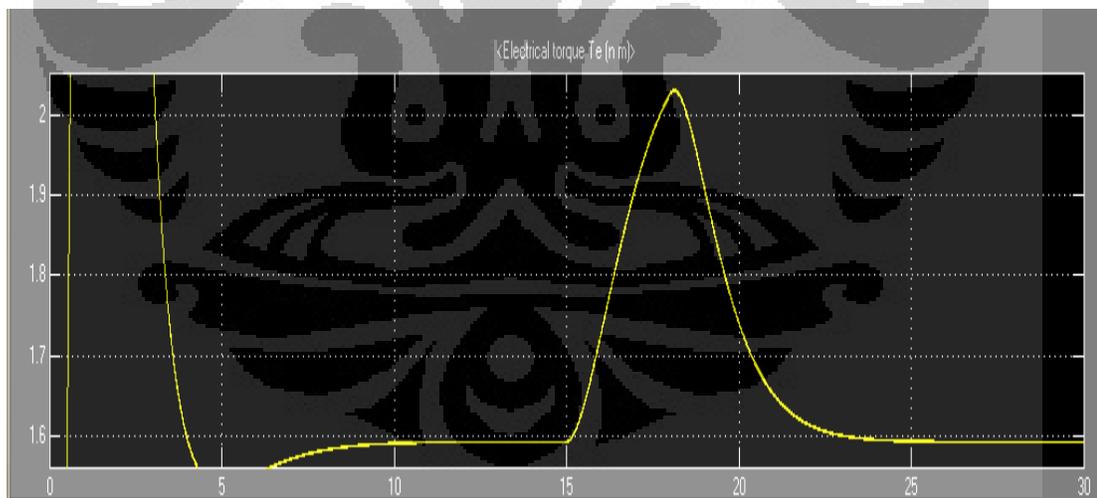
Dengan karakteristik beban seperti diatas maka diperoleh hasil simulasi sebagai berikut.

Kecepatan sudut untuk motor B



Gambar 4.17 Grafik kecepatan sudut motor B terhadap waktu pada beban berubah.

Grafik perubahan torsi elektrik ketika diberi beban pada detik ke 15 sampai 18



Gambar 4.18 Grafik torsi elektrik motor B ketika diberi beban pada detik ke 15 sampai 18.

Pada gambar (4.18) kecepatan mula-mula 149 rad/detik kecepatan pada pemberian beban selama 3 detik menjadi 129 rad/detik. Penurunan kecepatan adalah

20 rad/detik. Pada gambar (4.18) Torsi elektrik mengalami kenaikan ketika diberi beban. Torsi elektrik mula-mula yaitu ketika torsi beban 0.1Nm adalah 1.59 Nm kemudian torsi elektrik naik menjadi 2.03 Nm.

Analisis matematis, dari persamaan (3.8)

$$\omega(s) = \frac{T_e(s) - T_L(s)}{Js + B}$$

maka kecepatan sudut mula-mula dikurangi kecepatan sudut akhir setelah diberi beban adalah seperti pada persamaan 4.3  $\Delta\omega(\text{rad}/s)$

$$\Delta\omega = \omega_1(s) - \omega_2(s) = \frac{T_{e1}(s) - T_{L1}(s)}{Js + B} - \frac{T_{e2}(s) - T_{L2}(s)}{Js + B}$$

Sesuai dengan hasil yang diperoleh pada simulasi, maka persamaan diatas menjadi

$$\Delta\omega = \frac{1.59 - 0.1 - 2.03 + 0.8}{10^{-2}s(5s + 1)}$$

$$\Delta\omega = \frac{0.26 \times 10^2}{s(5s + 1)}$$

$$\Delta\omega = \frac{26}{s(s + \frac{1}{5})}$$

$$\Delta\omega = \frac{A}{s} + \frac{B}{s + \frac{1}{5}}$$

$$A = sF(s) \Big|_{s=0} = 26$$

$$B = s + \frac{1}{5} F(s) \Big|_{s=-\frac{1}{5}} = -26$$

sehingga

$$\Delta\omega = \frac{26}{s} - \frac{26}{s + \frac{1}{5}}$$

inverslaplace

$$\Delta\omega = 26 - 26e^{-\frac{t}{5}} (\text{rad}/\text{det})$$

Sesuai dengan hasil simulasi maka perubahan kecepatan sudut adalah sebesar 20 rad/detik. Hasil analisis matematis tidak sama dengan hasil simulasi hal ini dikarenakan motor masih tidak stabil. Sehingga dari analisis ini bisa disimpulkan bahwa perubahan torsi beban 0.7 Nm pada motor jenis A menyebabkan penurunan kecepatan sebesar 26 rad/detik.

Untuk kecepatan sudut yang diperoleh didapatkan hasil sebagai berikut:

Pada kondisi tunak kecepatan sudutnya adalah 149 rad/detik.

Steady state : 10.5 detik

% Overshoot :  $((153.8-149.3)/149.3) \times 100\% = 3.01\%$

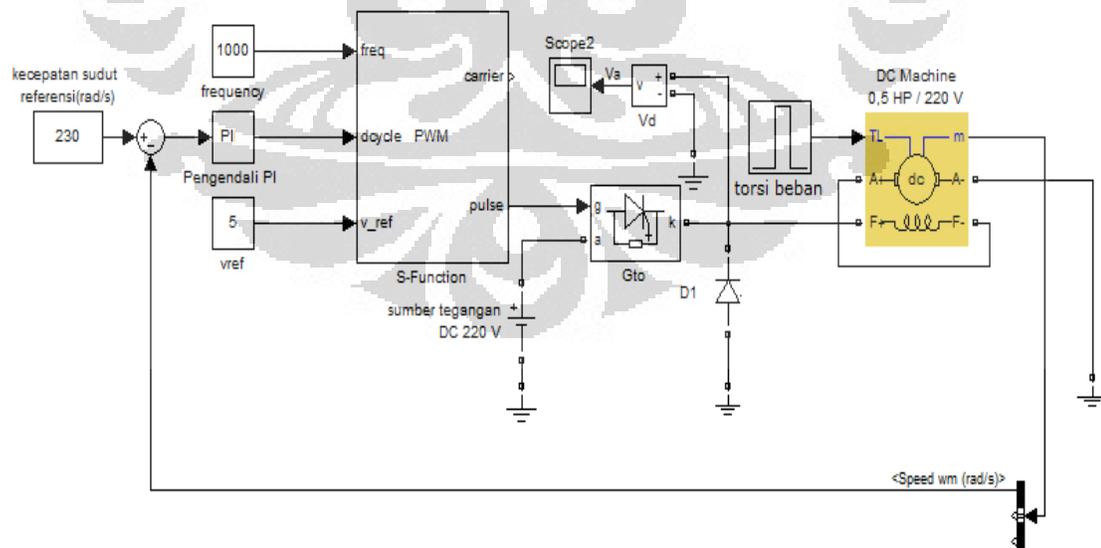
Dari hasil analisis untuk motor A dan motor B diperoleh tabel berikut:

Tabel 4.2 karakteristik motor A dan motor B pada loop terbuka.

| No | Sistem  | Kp | Ki | Steady state time (detik) | %OS (%) | $\omega(\text{rad} / \text{s})$ |
|----|---------|----|----|---------------------------|---------|---------------------------------|
| 1. | Motor A | -  | -  | 3                         | -       | 230                             |
| 2. | Motor B | -  | -  | 10.5                      | 3.01%   | 149.3                           |

#### 4.2.3 Analisi Kondisi Sistem Pada Loop Tertutup Beban Berubah

Dengan blok diagram MATLAB sebagai berikut



Gambar 4.19 Diagram blok pengendalian kecepatan sudut motor arus searah seri.

Pada percobaan ini akan dianalisis karakteristik kecepatan motor dengan menggunakan pengendali PI seperti blok diagram simulink MATLAB pada gambar diatas. Untuk motor A dengan karakteristik sebagai berikut:

Kecepatan sudut referensi : 230 rad/detik

Kp : 5

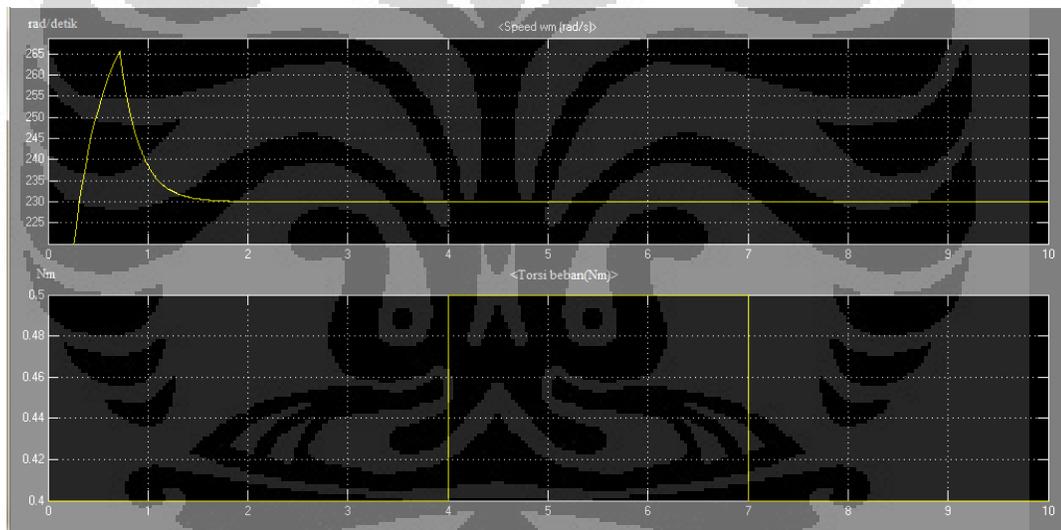
Ki : 15

Torsi beban yang digunakan sama seperti pada analisis loop tertutup yaitu

Detik 0 - 4 : 0.4 Nm

Detik 4 - 7 : 0.5 Nm

Detik 7 - 10 : 0.4 Nm



Gambar 4.20 Karakteristik kecepatan sudut ketika beban berubah dengan pengendali PI untuk motor A.

Motor B

Kecepatan sudut referensi : 125 rad/detik

Kp : 100

Ki : 70

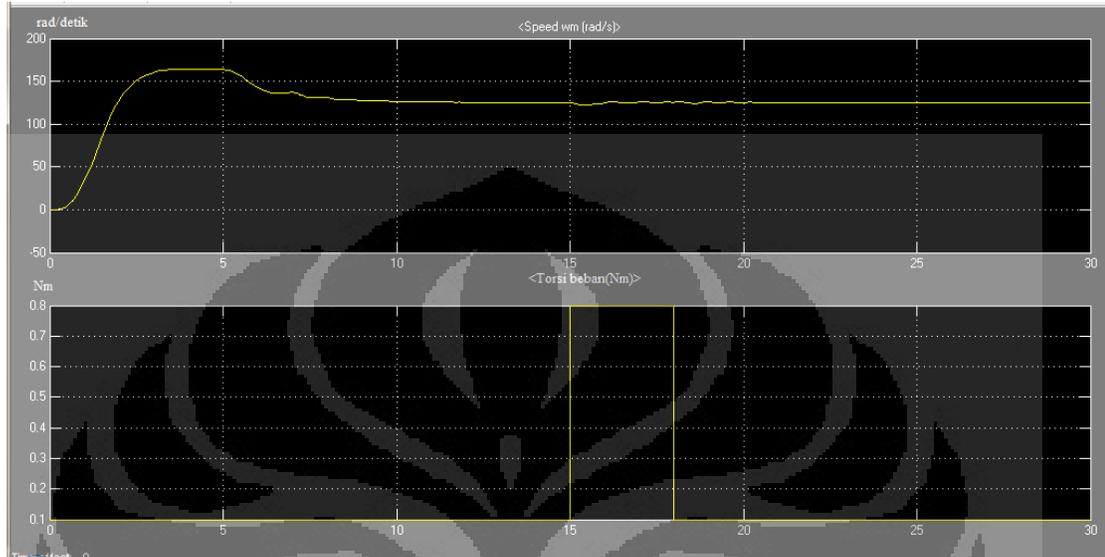
Karakteristik torsi beban yang diberikan pada motor B.

0- 15detik : 0,1 Nm

15-18 detik : 0.8 Nm

18-30 detik : 0.1 Nm

Diperoleh hasil sebagai berikut



Gambar 4.21 Karakteristik pengendalian kecepatan dengan PI pada motor B.

Keluaran tegangan dari sistem *dc chopper* sesuai dengan pulsa yang diberikan oleh PWM. Ketika kondisi on (tegangan positif 5 volt ) maka GTO dalam kondisi *on* juga namun ketika keluaran PWM off (tegangan nol) maka GTO dalam kondisi *off* juga . Sehingga tegangan keluaran dari *dc chopper* sesuai dengan pulsa yang diberikan. Lebar pulsa diatur oleh masukan *duty cycle* yang bernilai 0%-100%. *Duty cycle* diatur oleh pengendali PI yang digunakan disistem ini. Ketika error yang keluar besar maka *dutycycle* juga besar namun ketika error kecil maka *duty cycle* juga kecil. Dari hasil percobaan ini diperoleh tabel sebagai berikut:

Tabel 4.3 karakteristik motor A dan motor B pada loop tertutup.

| No | Sistem  | Kp  | Ki | Steady state time (detik) | %OS (%) | $\omega(\text{rad} / \text{s})$ |
|----|---------|-----|----|---------------------------|---------|---------------------------------|
| 1. | Motor A | 5   | 15 | 1.8                       | 26.9%   | 230                             |
| 2. | Motor B | 100 | 70 | 9                         | 32%     | 125                             |

Dari hasil percobaan dengan menggunakan pengendali PI, untuk kedua sistem waktu untuk mencapai kondisi tunak berkurang. Namun untuk motor A terjadi

overshoot, motor B overshootnya tidak berkurang. Karena sistem ini menggunakan pengendali PI sehingga tidak mengurangi overshoot. Pengendali PI mempercepat kondisi tunak namun menimbulkan overshoot. Dari grafik kedua sistem diatas terlihat bahwa respon dari sistem *dc chopper* tidak menimbulkan ripple.

Pada kedua grafik diatas terlihat bahwa perubahan beban menyebabkan kecepatan sudut motor berubah. Bila kecepatan yang diinginkan sudah stabil, akan ada perubahan beban yang digunakan sebagai pengganggu pada kecepatan yang telah stabil. Pengganggu yang dalam bentuk beban ini, akan mempengaruhi kinerja dari kecepatan motor. Jika beban bertambah motor akan mengalami penurunan kecepatan, dan apabila beban berkurang, motor akan mengalami kenaikan kecepatan. Pengendali PI akan memproses error yang terjadi, agar didapatkan keluaran baru untuk menstabilkan kecepatan sesuai dengan kecepatan sudut referensi. Keluaran dari pengendali PI sebagai nilai untuk *duty cycle* pada PWM. PWM akan mengeluarkan pulsa-pulsa yang digunakan untuk switching pada *dc chopper* tepatnya pada *thyristor* GTO. Hal ini menyebabkan tegangan yang mensuplai motor berubah begitu juga dengan arusnya, sehingga torsi motor mengalami perubahan yang berakibat pada perubahan kecepatan sudutnya.

Pada grafik diatas sudah terlihat bahwa perubahan beban dapat diatasi dengan pengendali PI. Sehingga kecepatan sudut sesuai dengan kecepatan sudut referensinya.

## BAB V

### KESIMPULAN

Dari hasil percobaan pada bab IV maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut

1. Sistem pengendali kecepatan dengan *dc chopper* frekuensi tinggi dapat digunakan untuk mengurangi ripple. Pada frekuensi 1000 Hz ripple kecepatan sudut sebesar 0,26 rad/detik pada kecepatan sudut referensi 100 rad/detik.
2. Pulsa keluaran dari PWM dapat digunakan untuk melakukan penyaklaran pada peralatan *dc chopper* yang menggunakan *Thyristor GTO*.
3. Pada motor A penambahan torsi beban sebesar 0.1Nm menyebabkan kecepatan sudut motor turun sebesar 24 rad/detik. Untuk motor B penambahan torsi beban sebesar 0.7Nm menyebabkan kecepatan sudut motor turun sebesar 26rad/detik.
4. Pengendali PI dapat mengendalikan kecepatan sudut motor sesuai dengan kecepatan sudut referensi, sehingga penurunan kecepatan sudut karena penambahan beban yang terjadi pada point 3 dapat diatasi dengan pengendali PI.
5. Desain pengendali kecepatan sudut pada motor arus searah seri dapat digunakan untuk mengendalikan kecepatan sudut motor pada torsi beban berubah-ubah.

..

## DAFTAR ACUAN

- [1] Baldor Electric Company. (1998, September 1). *Basic Motor Theory*. July, 4 2012. <http://www.reliance.com/mtr/mtrthrmn.htm>.
- [2] Fitzgerald, et al.,ed. *Electric machinery A. E.*, 6th ed.p. cm. McGraw-Hill series in electrical engineering. Power and energy.
- [3] <http://duniaelektronika.blogspot.com/2008/04/mesin-arus-searah.html>
- [4] Saleh, Rosary (2009). *Diktat Matakuliah Fisika Dasar 2*. (n.d). Universitas Indonesia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. [www.scele.ui.ac.id](http://www.scele.ui.ac.id).
- [5] Chapman, J. S. (2002) *Electric Machinery and Power System 1st edition*, McGraw Hill:US.
- [6] Rashid, M. (1998). *Power Electronic, Circuit Device And Application*. Prentice Hall: United State of America.
- [7] Setyo, A.A. (2005). *Kendali Kecepatan Motor DC Berdasarkan Perubahan Jarak Menggunakan Pengendali Logika Fuzi Berbasis Mikrokontroler AT89C51*. Januari 5, 2005. Universitas Gadjah Mada, Teknik Elektro. Yogyakarta.
- [8] Al-Mashhadany, Y.I. (2011, May 31 ). *Modeling and Simulation of Adaptive Neuro-Fuzzy Controller for Chopper-Fed DC Motor Drive*. Paper presented at IEEE Applied Power Electronics Colloquium, 2011. IAPEC 2011, Johor Bahru, 31 (05), 110-115. July 4, 2012.  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5779859&contentType=Conference+Publications&searchField%3DSearch\\_All%26queryText%3DModeling+and+Simulation+of+Adaptive+Neuro-Fuzzy+Controller+for+Chopper-Fed+DC+Motor+Drive](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5779859&contentType=Conference+Publications&searchField%3DSearch_All%26queryText%3DModeling+and+Simulation+of+Adaptive+Neuro-Fuzzy+Controller+for+Chopper-Fed+DC+Motor+Drive)
- [9] Triangle Wave Generator. (n.d). July 4 2012.  
[http://pcbheaven.com/circuitpages/Triangle\\_Wave\\_Generator](http://pcbheaven.com/circuitpages/Triangle_Wave_Generator)
- [10]Toha, Kusuma. 2008. *Perancangan pengendali PID untuk motor DC menggunakan mikrokontroler H8/3052*. Juli 12, 2008.Universitas Indonesia, teknik elektro. Depok, Jawa Barat.

[11]Wai Phyo Aung, 2007, *Analysis on Modeling and Simulink of DC Motor and its Driving System Used for Wheeled Mobile Robot*. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 32 2007.

[12] Tweig, N.T. (2009, December 31). *Speed control of a dc series motor using buck boost converter the eleventh international middle eastpower systems conference (mepcon:2006)*. Paper presented at Power Systems Conference, 2006. MEPCON 2006. Eleventh International Middle East. Egypt, 31 (12), 1-9. 4 July 2012.

[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5372392&contentType=Conference+Publications&searchField%3DSearch\\_All%26queryText%3DSpeed+control+of+a+dc+series+motor+using+buck+boost+converter.+the+eleventh+international+middle+eastpower+systems+conference+.LB.mepcon%3A2006.RB..](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5372392&contentType=Conference+Publications&searchField%3DSearch_All%26queryText%3DSpeed+control+of+a+dc+series+motor+using+buck+boost+converter.+the+eleventh+international+middle+eastpower+systems+conference+.LB.mepcon%3A2006.RB..)

