



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMODELAN DAN SIMULASI Pengereman Dinamik
MOTOR INDUKSI TIGA FASA**

SKRIPSI

**Elvys Hirsley Anthon Masihin
04 04 03 704 5**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
DESEMBER 2008**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMODELAN DAN SIMULASI Pengereman Dinamik
MOTOR INDUKSI TIGA FASA**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar

Sarjana Teknik

Elvys Hirsley Anthon Masihin

04 04 03 704 5

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

DEPOK

DESEMBER 2008

HALAMAN PERNYATAAN ORISINILITAS

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

Nama : Elvys Hirsley Anthon Masihin

NPM : 0404037045

Tanda Tangan :

Tanggal : 12 Desember 2008

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Elvys Hirsley Anthon Masihin
NPM : 04 04 03 704 5
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Pemodelan Dan Simulasi Pengereman Dinamik
Motor Induksi Tiga Fasa.

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. Uno Bintang Sudibyo ()

Penguji : Ir. I Made Ardita Y. MT ()

Penguji : Ir. Amien Rahardjo ()

Ditetapkan di : Kampus UI Depok

Tanggal : 12 Desember 2008

KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan sebesar-besarnya kepada Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini yang merupakan salah satu syarat mencapai gelar Sarjana Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia, tempat saya menuntut ilmu sejak tahun 2004. Saya sangat menyadari bahwa, tanpa bantuan dari berbagai pihak, sangatlah sulit untuk menyelesaikan skripsi ini dengan baik dan tepat waktu. Oleh karena itu, saya ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Uno Bintang Sudiby, selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu beliau untuk memberikan arahan, bimbingan dan diskusi sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.
2. Ibu, Bapak dan Kakak tercinta yang telah memberikan motivasi dan dukungan.
3. Rekan-rekan mahasiswa Departemen Teknik Elektro FTUI yang telah memberikan bantuan dalam penulisan skripsi ini.

Akhir kata, semoga Tuhan Yang Maha Esa membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu saya dalam penyusunan skripsi ini. Dan semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pembacanya.

Depok, 12 Desember 2008

Penulis

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

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

Nama : Elvys Hirsley Anthon Masihin
NPM : 04 04 03 704 5
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 Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**Pemodelan Dan Simulasi Penghentian Putaran Motor Induksi Tiga Fasa
Dengan Menggunakan Metode Pengereman Dinamik**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan 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 : 12 Desember 2008
Yang menyatakan

(Elvys Hirsley Anthon Masihin)

ABSTRAK

Nama : Elvys Hirsley Anthon Masihin
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Pemodelan Dan Simulasi Penghentian Putaran Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Menggunakan Metode Pengereman Dinamik

Motor induksi tiga fasa banyak digunakan oleh dunia industri karena memiliki beberapa keuntungan antara lain motor ini sederhana, murah dan mudah pemeliharaannya. Pada penggunaan motor induksi sering dibutuhkan proses menghentikan putaran motor dengan cepat, terutama aplikasi untuk konveyor. Untuk menghentikan putaran rotor, torsi pengereman diperlukan yang dapat dihasilkan secara mekanik maupun secara elektrik.

Pengereman untuk menghentikan putaran motor induksi dapat dirancang secara dinamik, yaitu sistem pengereman yang dilakukan dengan membuat medan magnetik motor stasioner. Keadaan tersebut dilaksanakan dengan menginjeksikan arus DC pada kumparan stator motor induksi tiga fasa setelah hubungan kumparan stator dilepaskan dari sumber tegangan suplai AC.

Metode pengereman dinamik memiliki keuntungan antara lain kemudahan pengaturan kecepatan pengereman terhadap motor induksi tiga fasa dan kerugian mekanis dapat dikurangi. Dengan mengaplikasikan pengereman dinamik pada motor induksi tiga fasa didapatkan hasil proses menghentikan putaran motor induksi lebih cepat dibandingkan tanpa pengereman dinamik

Kata kunci : motor induksi, pengereman dinamik, injeksi arus searah.

ABSTRACT

Name : Elvys Hirsley Anthon Masihin
Study Program : Electrical Engineering
Title : Three Phase Inuction Motor Dynamic Braking Modelling and Simulation.

The Three Phase Induction Motor is common used in industrial technology because they have any advantages, such as simple construction, more cheap, dan easy maintenance. When used, the induction motor usually needed a process for stop the rotor speed fastest, especially for koneyor aplication. For stop the rotor speed, braking torque needed who can resulting mechanically or electrically.

Braking for stop the rotor speed can be builded as dinamic, braking system that making a stationary magnetic field. That condition happen with injecting direct current on stator winding of the three phase induction motor after stator winding connection is cut off from AC voltage supply.

Dinamic braking method have any advantages, such as easy to setting speed of braking, and also mechanical effect can be minimize. With aplicate dinamic braking on the three phase induction motor, we have that result of the braking process more fastest than without usign dinamic braking.

Key words : Three phase induction motor, dinamic braking, direct current injection

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH.....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
DAFTAR SIMBOL.....	xv
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Penelitian.....	1
1.1.1 Perumusan Masalah.....	1
1.1.2 Tujuan Penelitian.....	2
1.2 Batasan Masalah.....	2
1.3 Metodologi Penelitian.....	2
1.4 Sistematika Penulisan.....	3
2. MOTOR INDUKSI TIGA FASA.....	4
2.1 Motor Induksi Tiga Fasa.....	4
2.2 Konstruksi Motor Induksi Tiga Fasa.....	4
2.3 Prinsip Kerja Motor Induksi Tiga Fasa.....	7
2.4 Rangkaian Ganti Motor Induksi.....	8
2.5 Hubungan Torsi dan Slip.....	9
2.5.1 Slip.....	9

2.5.2 Torsi.....	10
2.6 Pengaruh Beban Terhadap Faktor Daya.....	11
2.7 Metode Pengereman Motor Induksi.....	11

3. PEMODELAN DAN SIMULASI PENGHENTIAN PUTARAN MOTOR

INDUKSI TIGA FASA MENGGUNAKAN Pengereman Dinamik.....	16
3.1 Pemodelan Motor Induksi Tiga Fasa.....	16
3.1.1 Kerangka Acuan.....	16
3.1.2 Model Mesin Induksi.....	18
3.1.3 Model Motor Induksi Tiga Fasa	22
3.2 Parameter Mesin Induksi.....	29
3.3 Rangkaian Sistem Simulasi.....	31
3.3.1 Simulasi Sistem Dengan MATLAB.....	31
3.4 Model Pengereman Kecepatan.....	33
3.4.1 Penyearah Penuh Satu Fasa.....	34
3.5 Simulasi Sistem.....	36

4. ANALISIS HASIL SIMULASI ENGEREMAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA MENGGUNAKAN Pengereman Dinamik..... 39

4.1 Analisis Hasil Simulasi Sistem Tanpa Pengereman Dinamik.....	39
4.2 Analisis Hasil Simulasi Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Pengereman Dinamik.....	43

5. KESIMPULAN 50

DAFTAR ACUAN..... 51

DAFTAR PUSTAKA..... 52

LAMPIRAN..... 53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Rotor Belitan (<i>wound rotor</i>).....	5
Gambar 2.2	Rotor Sangkar Tupai.....	6
Gambar 2.3	Gambaran Motor Induksi Dengan Satu Kumparan Stator dan Rotor.....	6
Gambar 2.4	Rangkaian Ganti Motor Induksi.....	9
Gambar 2.5	Rangkaian Pengereman Dinamik Dengan Injeksi Arus Searah.....	12
Gambar 2.6	Kurva Kecepatan-Torsi Selama Pengereman Dinamik.....	13
Gambar 2.7	<i>Phasor Diagram</i> Mesin Induksi Ketika Selama Pengereman Dinamik.....	14
Gambar 2.8	Rangkaian Ganti Selama Proses Pengereman Dinamik.....	14
Gambar 3.1	Hubungan abc-dq0.....	18
Gambar 3.2	Mesin Induksi Tiga Fasa Dua Kutub Dengan Konfigurasi Bintang.....	18
Gambar 3.3	Model Mesin Induksi Dalam Referensi Kerangka Acuan.....	20
Gambar 3.4	Representasi Sumbu Dua Fasa dan Tiga Fasa Pada Stator.....	23
Gambar 3.5	<i>Rotor Flux Reference Frame</i>	25
Gambar 3.6	Model Mesin Induksi yang Digunakan Pada MATLAB.....	31
Gambar 3.7	Kotak Dialog Parameter Mesin Induksi Pada MATLAB.....	32
Gambar 3.8	Simulasi Motor Induksi Tiga Fasa.....	33
Gambar 3.9	Rangkaian Simulasi Penyearah Satu Fasa Gelombang Penuh.....	34

Gambar 3.10	Prinsip Kerja Penyearah Satu Fasa Gelombang Penuh.....	34
Gambar 3.11	Kotak Dialog Parameter Transformator yang Digunakan.....	35
Gambar 3.12	Simulasi Penghentian Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Menggunakan Metode Pengereman Dinamik.....	36
Gambar 3.13	Torsi Masukkan Motor Induski Tiga Fasa.....	37
Gambar 4.1	Grafik Kecepatan Putar Motor Induksi Tiga Fasa.....	40
Gambar 4.2	Grafik Torsi Elektromagnetik Motor Induksi Tanpa Pengereman Dinamik.....	42
Gambar 4.3	Grafik Daya pada Terminal Stator Motor Induksi Tanpa Pengereman Dinamik.....	42
Gambar 4.4	Grafik Kecepatan Putar Dengan Pengereman Dinamik Motor Induksi 110 Volt.....	44
Gambar 4.5	Grafik Injeksi Arus Searah Tegangan Terminal 110 Volt.....	45
Gambar 4.6	Grafik Torsi Elektromagnetik Pengereman Dinamik 110 Volt.....	46
Gambar 4.7	Grafik Kecepatan Putar Dengan Pengereman Dinamik Motor Induksi 220 Volt.....	47
Gambar 4.8	Grafik Injeksi Arus Searah Tegangan Terminal 220 Volt.....	48
Gambar 4.9	Grafik Kecepatan Putar Dengan Pengereman Dinamik Motor Induksi 380 Volt.....	49

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Pasangan Kutub (p), Jumlah Kutub dan Kecepatan Mesin.....	5
Tabel 3.1	Parameter Mesin Induksi yang digunakan dalam Penelitian.....	30

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Gambar Grafik Hasil Simulasi.....	53
Lampiran 1	Rangkaian Simulasi.....	64

DAFTAR SIMBOL

abc	= Sumbu Fasa
$dq0$	= Sumbu Kerangka Acuan
f	= Frekuensi
\bullet	= Sudut Putar
\bullet	= Kecepatan Putar
\bullet	= Vairabel Integral
N	= Jumlah Lilitan
\bullet	= Fluks Gandeng
p	= Notasi Derivatif
L	= Induktansi
i, I	= Arus
V, U	= Tegangan
P	= Daya Aktif
Q	= Daya Reaktif
j	= Notasi Bilangan Imajiner
X	= Reaktansi
R	= Tahanan
a	= nilai per unit dari frekuensi
b	= nilai per unit dari kecepatan
Z	= Impedansi
C	= Kapasitansi
\bullet	= notasi phi
s	= slip

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Penelitian

Motor induksi tiga fasa banyak digunakan oleh dunia industri karena memiliki beberapa keuntungan. Keuntungan yang dapat diperoleh dalam pengendalian motor-motor induksi tiga fasa yaitu, struktur motor induksi tiga fasa lebih ringan (20% hingga 40%) dibandingkan motor arus searah (DC) untuk daya yang sama, harga satuan relatif lebih murah, konstruksinya lebih sederhana dan kokoh, dan perawatan motor induksi tiga fasa lebih hemat.

Pada penggunaannya, pada motor induksi sering dibutuhkan proses menghentikan putaran motor dengan cepat, terutama aplikasi pada konveyor. Proses pengereman pada motor menyebabkan timbulnya kelebihan energi kinetik pada motor. Kelebihan energi kinetik tersebut disebabkan karena energi yang diberikan ke motor lebih kecil dibandingkan dengan energi yang dihasilkan motor.

Salah satu pendekatan yang digunakan untuk meningkatkan efisiensi energi pada saat dilakukan pengereman adalah dengan membuat medan magnetik motor stasioner. Keadaan tersebut dilaksanakan dengan menginjeksikan arus searah pada kumparan stator motor induksi tiga fasa setelah hubungan kumparan stator dilepaskan dari sumber tegangan suplai arus bolak-balik. Metode ini dikenal dengan *dynamic braking* yang selanjutnya disebut dengan pengereman dinamis.

Metode pengereman dinamik memiliki keuntungan, antara lain kemudahan pengaturan kecepatan pengereman terhadap motor induksi tiga fasa dan kerugian mekanis dapat dikurangi. Dengan mengaplikasikan pengereman dinamik pada motor induksi tiga fasa, didapatkan hasil proses menghentikan putaran motor induksi lebih cepat dibandingkan tanpa pengereman dinamis

1.1.1 Perumusan Masalah

Pengereman pada motor induksi tiga fasa, secara umum masih menggunakan metoda yang sangat sederhana, dengan cara pengereman mekanik dimana torsi pengereman dihasilkan oleh peralatan pengereman yang berupa sepatu rem dan drum yang terpasang pada poros rotor. Pada pengereman ini, energi putar dari rotor dikurangi dengan cara menekan poros rotor menggunakan sepatu rem. Pengereman secara mekanik membutuhkan jadwal pemeliharaan tertentu karena terdapat rugi-rugi mekanis seperti gesekan yang menimbulkan panas dan menghasilkan debu akibat gesekan. Pada skripsi ini dibahas bagaimana menghentikan putaran motor dengan cepat dengan proses pengereman dinamik, yaitu menggunakan sistem pengereman yang dilakukan dengan membuat medan magnetik motor stasioner. Keadaan tersebut dilaksanakan dengan menginjeksikan arus DC pada kumparan stator motor induksi tiga fasa setelah hubungan kumparan stator dilepaskan dari sumber tegangan suplai AC. Metode pengereman dinamik (*dynamic braking*) memiliki keuntungan antara lain kemudahan pengaturan kecepatan pengereman terhadap motor induksi tiga fasa.

1.1.2 Tujuan Penelitian

Berdasarkan permasalahan tersebut diatas, pada penelitian ini penulis akan menganalisis penggunaan metode pengereman dinamis sebagai salah satu metode untuk menghentikan putaran motor induksi dengan cepat dan meminimalkan rugi-rugi yang dapat terjadi.

1.2 Batasan Masalah

Pembahasan yang akan diuraikan pada skripsi ini akan dibatasi pada hal-hal sebagai berikut:

- Karakteristik motor induksi;
- Pengukuran arus, kecepatan putar dan waktu berhenti motor induksi tiga fasa dilakukan pada kondisi ideal;
- Simulasi yang dilakukan menggunakan blok model dari perangkat lunak;

- Rangkaian Ganti tidak sepenuhnya dijelaskan
- Kondisi saturasi pada simulasi diabaikan.

1.3 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian yang dilakukan, diawali dengan melakukan studi literatur yang dilanjutkan dengan studi perancangan rangkaian, simulasi rangkaian penelitian dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB R2007b, aplikasi rangkaian penelitian dengan menggunakan mesin induksi merek Labvolt, dan analisis perbandingan hasil simulasi dengan perangkat lunak dan teori.

1.4 Sistematika Penulisan

Agar mempermudah pembahasan, penulisan skripsi ini dibagi dalam beberapa bab. Bab satu menguraikan latar belakang penulisan, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah yang dikembangkan, metodologi penelitian dan sistematika penulisan. Bab dua membahas tentang landasan teori motor induksi tiga fasa, yang meliputi konstruksi, prinsip kerja, kontrol kecepatan dan torsi, serta rangkaian ganti dinamisnya. Bab tiga membahas tentang dasar teori pengereman dinamik pada motor induksi tiga fasa beserta pemodelannya, bab empat membahas tentang hasil simulasi dan analisis perbandingan hasil simulasi dengan teori dan bab lima merupakan kesimpulan dari skripsi ini.

BAB 2

TEORI MOTOR INDUKSI DAN METODE Pengereman

MOTOR INDUKSI TIGA FASA

1.1 Motor Induksi Tiga Fasa

Ada bermacam-macam tipe motor, salah satunya adalah motor tiga fasa. Salah satu contoh dari motor tiga fasa ini adalah motor induksi atau motor asinkron. Motor induksi sendiri terdiri dari berbagai macam. Seperti telah disebutkan di bab sebelumnya, motor induksi yang digunakan adalah motor induksi *wound rotor*.

Motor Induksi merupakan motor arus bolak-balik yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, dimana arus yang mengalir pada kumparan-kumparan di stator yang mempunyai beda fasa 120° , akan menghasilkan medan magnet putar. Medan magnet putar ini akan memotong batang-batang konduktor pada rotor sehingga menginduksi tegangan. Karena kumparan jangkar di rotor merupakan rangkaian tertutup (*closed-loop*), maka pada kumparan tersebut akan mengalir arus rotor yang akan menimbulkan momen pada rotor. Motor induksi disebut juga motor tak serempak, karena adanya perbedaan antara kecepatan putar rotor dan kecepatan putar medan statornya.

Oleh karena itu, motor induksi tidak memerlukan sikat maupun komutator, sehingga konstruksi motor menjadi lebih sederhana jika dibandingkan dengan motor arus searah. Hal ini juga yang menyebabkan harga motor induksi relatif murah, paling banyak digunakan di industri serta praktis sedikit membutuhkan perawatan[6].

1.2 Konstruksi Motor Induksi Tiga Fasa [10]

Motor induksi seperti umumnya motor listrik rotasi memiliki stator yang diam dan rotor yang berputar, yang dipisahkan oleh celah udara (*air gap*) sempit diantara keduanya yang lebarnya tergantung pada kapasitas daya motor.

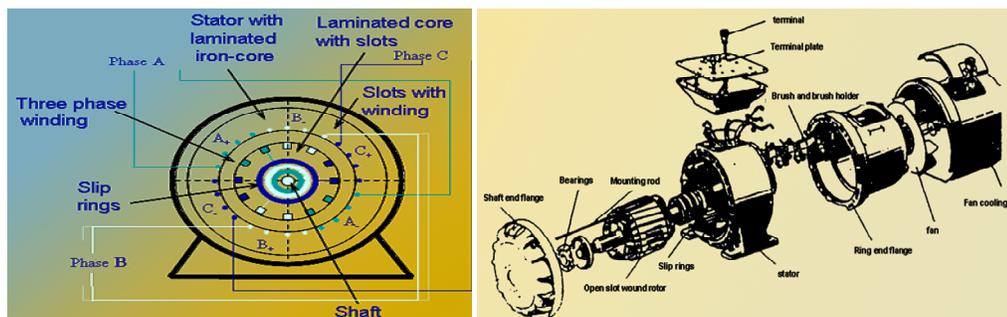
Stator motor induksi berupa kerangka berbentuk silinder yang tersusun atas lapisan-lapisan baja tipis, dengan kumparan stator terdistribusi pada alur-alur disekeliling kerangka, dan dicatu tegangan tiga fasa.

Tabel 2.1 Pasangan kutub (p), jumlah kutub dan kecepatan mesin.

Pasangan Kutub	1	2	3	4	6
Jumlah Kutub	2	4	6	8	12
RPM	3000	1500	1000	750	500

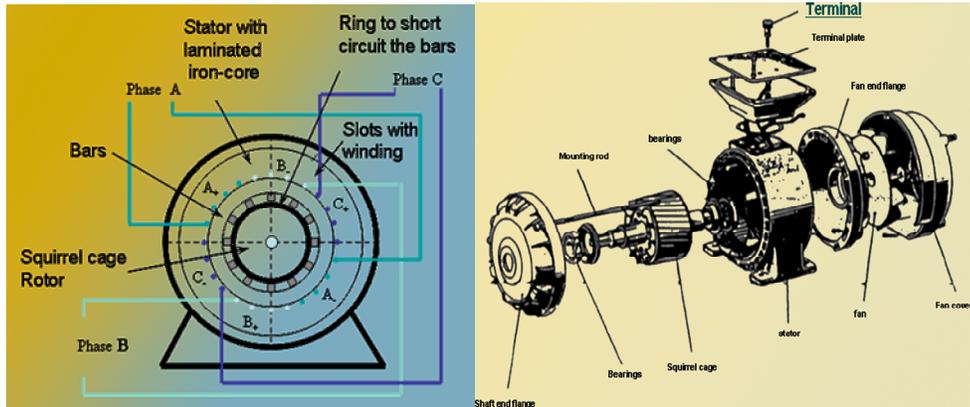
Celah udara pada motor induksi menyebabkan faktor daya motor induksi menjadi rendah karena adanya celah udara memperbesar magnetisasi yang diperlukan untuk menimbulkan fluks di celah udara, dimana arus terbelakang (lagging) terhadap tegangan yang diberikan. Untuk memperbaikinya, celah udara dapat dibuat kecil, tetapi tidak boleh terlalu kecil karena dapat memperbesar kebisingan dan rugi-rugi permukaan gigi-gigi dan dapat menghalangi motor untuk berputar dengan kecepatan yang normal.

Ada dua jenis rotor motor induksi, yaitu rotor belitan (*wound rotor*) dan rotor sangkar (*squirrel-cage rotor*). Kumparan rotor motor induksi rotor belitan mirip kumparan statornya, terdistribusi pada alur-alur rotor, dan tersusun atas lapisan-lapisan baja tipis untuk mengurangi rugi-rugi arus pusar. Rotor belitan biasanya lebih mahal daripada rotor sangkar karena diperlukan perawatan ekstra pada *brush* dan *slip ring* nya.



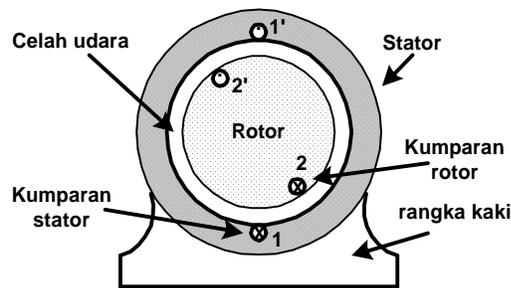
Gambar 2.1. Rotor Belitan (*wound rotor*)

Sedangkan bentuk rotor motor induksi rotor sangkar menyerupai sangkar tupai, terdiri dari batang-batang konduktor yang tersusun dan dihubungkan singkat di ujung-ujungnya oleh cincin penghubung.



Gambar 2.2. Rotor Sangkar Tupai (Squirrel cage rotor)

Bentuk gambaran sederhana penempatan stator dan rotor pada motor induksi diperlihatkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3. Gambaran sederhana motor induksi dengan satu kumparan stator dan rotor.

Tanda silang \otimes pada kumparan stator atau rotor pada gambar 2.3 menunjukkan arah arus yang melewati kumparan masuk ke dalam kertas (tulisan ini) sedangkan tanda titik \bullet menunjukkan bahwa arah arus keluar dari kertas.

Belitan stator yang dihubungkan dengan suatu sumber tegangan akan menghasilkan medan magnet yang berputar dengan kecepatan sinkron. Medan

putar pada stator tersebut akan memotong konduktor-konduktor pada rotor, sehingga terinduksi arus; dan sesuai dengan Hukum Lenz, rotor pun akan turut berputar mengikuti medan putar stator. Perbedaan putaran relatif antara stator dan rotor disebut slip. Bertambahnya beban, akan memperbesar kopel motor yang oleh karenanya akan memperbesar pula arus induksi pada rotor, sehingga slip antara medan putar stator dan putaran rotor pun akan bertambah besar. Jadi. Bila beban motor bertambah, putaran rotor cenderung menurun.

1.3 Prinsip Kerja Motor Induksi Tiga Fasa [5]

Motor induksi atau yang dikenal dengan motor asinkron terdiri dari dua bagian, yaitu stator dan rotor. Pada motor induksi, stator (bagian yang tidak bergerak) merupakan kumparan jangkar sedangkan rotor (bagian yang berputar) berupa kumparan magnet.

Stator diberi suplai berupa tegangan tiga fasa. Karena stator merupakan suatu rangkaian tertutup, tegangan tiga fasa ini akan menghasilkan arus tiga fasa pada stator. Sesuai dengan Hukum Faraday, arus akan menimbulkan medan magnet dengan arah mengikuti aturan tangan kanan. Karena arus yang dihasilkan adalah arus tiga fasa, medan magnet yang dihasilkan akan berputar, atau dikenal dengan medan magnet putar, dengan arah putaran tergantung dari arah arus tiga fasa. Medan magnet putar ini memiliki besar yang selalu sama dan berputar dengan kecepatan angular sama dengan frekuensi stator.

Medan magnet putar ini akan menembus konduktor rotor dan menghasilkan fluks pada rotor yang besarnya sesuai dengan persamaan :

$$\Phi = B.A.\cos\alpha \quad (2.1)$$

dengan B adalah besarnya medan magnet, A adalah luasan bidang yang ditembus oleh medan magnet, dan α adalah sudut yang dibentuk antara B dan normal bidang yang ditembus medan magnet. Karena sudut yang dibentuk antara B dan normal bidang berubah-ubah, maka fluks yang dihasilkan juga berubah-ubah. Perubahan fluks akan menghasilkan tegangan induksi pada rotor sesuai persamaan:

$$E = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.2)$$

dengan N adalah banyaknya lilitan pada rotor dan $\frac{d\Phi}{dt}$ adalah perubahan fluks terhadap waktu yang terjadi. Karena rotor merupakan rangkaian tertutup, arus induksi akan mulai mengalir pada rotor dan menghasilkan medan magnet rotor. Medan magnet putar dan medan magnet rotor akan saling berinteraksi dan menghasilkan medan magnet total atau resultan. Adanya medan magnet resultan, arus rotor, dan panjang rotor akan menghasilkan gaya lorentz. Gaya ini akan menghasilkan torsi untuk menggerakkan rotor. Hal ini sesuai dengan persamaan-persamaan berikut ini.

$$F_L = (i \times B_{total}) \cdot l \quad (2.3)$$

$$t = F_L \times r \quad (2.4)$$

Dengan i adalah arus rotor, B_{total} adalah medan magnet resultan, l adalah panjang rotor, dan r adalah lengan gaya yang ditarik tegak lurus terhadap poros putar.

Rotor akan berputar selama terdapat perbedaan kecepatan antara medan putar stator dan kecepatan putar rotor. Perbedaan kecepatan ini disebut dengan slip, dengan persamaan:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.5)$$

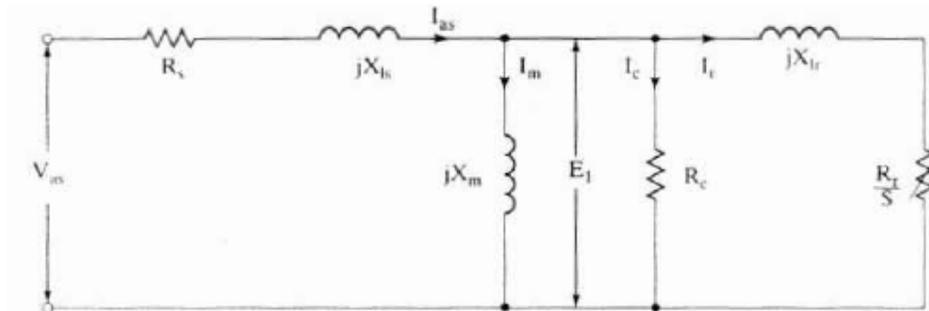
$$n_s = \frac{120 fe}{p} \quad (2.6)$$

dengan s adalah slip, n_s adalah kecepatan medan putar stator, n_r adalah kecepatan putar rotor, fe adalah frekuensi elektrik tetap dari suplai AC PLN yang dicatu pada stator, dan p adalah banyaknya kutub pada stator. Ketika kecepatan medan putar stator sama dengan kecepatan putar rotor, tidak ada fluks yang dihasilkan karena sudut yang dibentuk antara medan putar stator dan konduktor rotor sebesar 90° . Tidak adanya fluks mengakibatkan tidak ada tegangan yang diinduksikan ke rotor sehingga timbul arus rotor yang menghasilkan torsi untuk menggerakkan rotor.

Hal ini menyebabkan kecepatan rotor berkurang. Melambatnya kecepatan rotor akan kembali menghasilkan fluks untuk menggerakkan rotor, demikian seterusnya. Ketika motor diberi beban, rotor akan berputar dengan kecepatan yang besarnya akan selalu lebih kecil dari kecepatan medan putar stator.

1.4 Rangkaian Ganti Motor Induksi [3]

Rangkaian ganti motor induksi tidak jauh berbeda dengan rangkaian ganti transformator. Karena pada dasarnya, prinsip induksi tegangan dan arus pada mesin induksi sama dengan prinsip induksi pada transformator, sehingga rangkaian ganti motor induksi serupa dengan rangkaian ganti transformator. Proses memperoleh rangkaian ganti dan rangkaian ganti transformator tidak dijelaskan dalam skripsi ini. Rangkaian ganti dari motor induksi adalah sebagai berikut :



Gambar 2.4. Rangkaian Ganti Motor Induksi

1.5 Hubungan Torsi dan Slip

2.5.1 Slip

Pada keadaan normal, kecepatan putar rotor (n_r), lebih rendah dari kecepatan medan putar stator (n_s). Dari persamaan (2.5), terlihat slip (s) merupakan perbedaan antara kecepatan medan putar stator dan kecepatan putar rotor., yang sering ditunjukkan dalam presentasi kecepatan sinkron dan normalnya antara 4% dan 11% dari kecepatan rata-rata.

Berubah-ubahnya kecepatan motor induksi mengakibatkan berubahnya besar slip dari 100% pada saat start sampai 0% pada saat motor diam ($n_r = n_s$). Dengan mengetahui besar slip dari motor induksi, maka kita dapat mengetahui keadaan motor tersebut.

Beberapa kondisi slip yang dapat terjadi pada mesin induksi [5]:

- $s = 0$: motor dalam keadaan sinkron, dimana $n_s = n_r$;
- $s = 1$: motor dalam keadaan diam, dimana $n_r = 0$;
- $0 < s < 1$: mesin induksi berfungsi sebagai motor induksi;
- $s > 1$: motor dalam keadaan terjadi pengereman;
- $s < 0$: mesin induksi berfungsi sebagai generator, dimana $n_s < n_r$.

2.5.2 Torsi

Di dalam tangkai rotor, tegangan dipaksakan melalui medan magnet. Tegangan ini memungkinkan suatu arus untuk mengalir melalui tangkai rotor sirkuit pendek, yang kemudian akan membangkitkan torsi pada tangkai motor.

Hubungan antara torsi motor dan kecepatan bervariasi mengikuti bentuk rotor. Torsi motor dihasilkan dalam gaya yang memutar tangkai motor, sesuai dengan persamaan (2.4).

Energi W yang diserap oleh motor ditunjukkan sebagai :

$$W = F \times d \tag{2.7}$$

Dimana, d adalah diameter dan n merupakan jumlah putaran:

$$d = n \cdot 2\pi r \tag{2.8}$$

Energi juga dapat dijabarkan sebagai daya aktif dikalikan waktu :

$$W = P \times t \tag{2.9}$$

Substitusi persamaan (2.7) sampai (2.9) diperoleh :

$$t = F \times r = \frac{W}{d} \times r = \frac{P \times t \times r}{n \cdot 2\pi r} \quad (2.10)$$

Persamaan (2.10) menunjukkan hubungan antara kecepatan n [rpm], torsi t [Nm] dan daya motor P [kW]. Persamaan ini memberikan gambaran luas secara cepat ketika melihat pada n , t dan P dalam hubungannya dengan nilai yang sesuai pada titik pengoperasian yang diberikan (n_r , t_r dan P_r). Titik pengoperasian normalnya nilai titik pengoperasian pada motor dan rumus dapat dimodifikasi sebagai berikut :

$$t_r = \frac{P_r}{n_r} \quad (2.11)$$

$$P_r = t_r \times n_r \quad (2.12)$$

Ada beberapa poin penting dalam tingkat kerja suatu motor induksi, yaitu:

- § t_a , yang merupakan torsi awal suatu motor yang membangun daya motor ketika tingkat tegangan dan frekuensi diberi suplai sesaat dalam posisi diam;
- § t_k , yang merupakan torsi pengereman motor yang juga merupakan torsi terbesar yang mampu dihasilkan suatu motor ketika tingkat tegangan dan frekuensi diberi suplai;
- § t_r adalah torsi rata-rata dari suatu motor, yang merupakan nilai mekanis dan elektrik untuk motor tersebut sesuai dengan rancangan standar. Hal ini dapat dilihat dari plat nama motor dan juga direferensikan sebagai nilai plat nama. Tingkat nilai mengindikasikan poin operasi optimal suatu motor untuk hubungan langsung ke suplai utama.

2.6 Pengaruh Beban Terhadap Faktor Daya [7]

Arus yang ditarik oleh motor induksi yang sedang jalan tanpa beban sebagian besar merupakan arus pemagnetan, arus tanpa beban tertinggal dari tegangannya dengan sudut yang besar. Jadi faktor daya dari motor induksi yang dibebani ringan

adalah rendah sekali. Karena celah udara, reluktansi rangkaian magnetiknya tinggi dan menghasilkan harga arus tanpa beban yang relatif lebih besar dibandingkan dengan transformator.

Jika beban ditambah, komponen aktif atau komponen daya dari arus bertambah, menghasilkan suatu faktor daya yang lebih tinggi. Tetapi karena besarnya arus pemagnetan, yang ada tanpa mempedulikan beban, faktor daya motor induksi sekalipun pada beban penuh jarang melebihi 90%.

2.7 Metode Pengereman Motor Induksi[9][10][11][12]

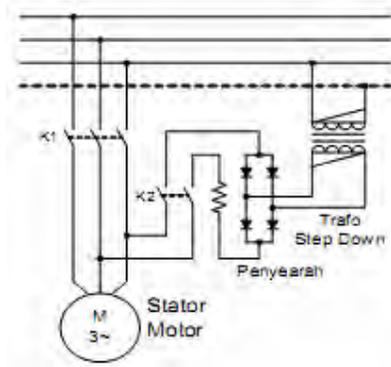
Mesin pada keseluruhan dapat diperlambat kecepatannya secara mekanik, dan seperti sudah dikatakan sebelumnya, bahwa semua sistem pengereman mekanik memerlukan perawatan yang bersifat periodik karena adanya kecenderungan untuk cepat rusak. Oleh karena itu dibuatlah beberapa sistem pengereman yang dapat mengurangi efek negatif dari pemakaian sistem pengereman secara mekanik, yaitu pengereman regeneratif, plugging dan dinamik.

Metode pengereman tersebut penggunaannya tergantung dari kondisi yang diinginkan terjadi, misalnya untuk menghentikan putaran mesin atau hanya untuk memperlambat putarannya. Hal ini juga erat hubungannya dengan torsi dan slip yang terjadi pada mesin.

Metode pengereman regeneratif terjadi ketika rotor dari motor induksi berputar lebih cepat dari medan putar stator sehingga terjadi slip negatif dan mesin menyuplai daya. Oleh karena itu, kapanpun motor mempunyai kecenderungan untuk berputar lebih cepat dari medan putar, pengereman regeneratif terjadi [6]. Kecepatan motor berkurang dan torsi pengereman membuat motor bekerja pada kecepatan konstan, dan tidak menutupi kemungkinan untuk berkerja lebih cepat. Ditinjau dari efek resistansi stator, torsi maksimum yang timbul selama proses regenerasi ini lebih besar daripada torsi maksimum selama proses *motoring*. Akan tetapi selama proses pengereman regeneratif, ada kemungkinan terjadinya kecepatan membahayakan jika torsi beban lebih besar

dari torsi breakdown dari motor, karena torsi yang timbul tidak dapat memperlambat motor dan sebaliknya terjadi percepatan [6].

Sedangkan untuk pengereman plugging (*plugging braking*) atau yang disebut juga dengan *counter current braking* bekerja dengan menukarkan *phase sequence* inputan motor induksi sehingga arah dari medan putar stator dapat dibalik. Pada prakteknya, metode ini dilakukan dengan *interchanging* suplai tegangan ke dua terminal motor, dengan demikian dapat timbul torsi pengereman dan motor dapat berhenti dengan cepat [7]. Akan tetapi motor harus tidak hubungkan dari sumber tegangan ketika kecepatan nol terjadi.



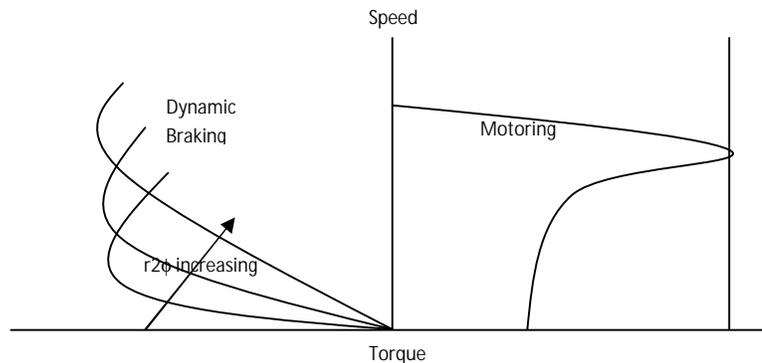
Gambar 2.5 Rangkaian pengereman dinamik dengan injeksi arus searah.

Metode pengereman motor induksi yang selanjutnya adalah metode pengereman dinamik (*dynamic braking*), digunakan untuk menghentikan putaran rotor motor induksi. Tegangan pada stator diubah dari sumber tegangan bolak-balik (AC) menjadi tegangan searah (DC) dalam waktu yang sangat singkat. Torsi yang dihasilkan dari pengereman tergantung pada besar arus DC yang diinjeksikan pada belitan stator. Pada gambar 2.5 menunjukkan bentuk rangkaian pengereman dengan injeksi arus searah pada motor induksi tiga fasa.

Arus searah yang diinjeksikan pada kumparan stator akan mengembangkan medan magnet stasioner untuk menurunkan tegangan pada rotor. Oleh karena kumparan rotor terhubung singkat, arus yang mengalir menghasilkan medan

magnet. Medan magnet akan berputar dengan kecepatan yang sama dengan rotor tetapi dengan arah yang berlawanan untuk menjadikan stasioner terhadap stator. Interaksi medan resultan dan gerak gaya magnet rotor akan mengembangkan torsi yang berlawanan dengan torsi motor, sehingga pengereman terjadi. Torsi pengereman yang dihasilkan tergantung pada besarnya arus injeksi DC pada belitan stator, karena torsi pengereman sebanding dengan arus injeksi. Sedangkan nilai tahanan (R) berpengaruh pada nilai kecepatan torsi pengereman terjadi. Semakin kecil nilai tahanan, semakin cepat torsi pengereman terjadi [8]. Pada gambar 2.6 terlihat kurva hubungan antara kecepatan dengan torsi motor induksi selama terjadi pengereman dinamik.

Rangkaian ganti dan diagram fasor dari motor induksi selama proses pengereman dinamik, terlihat pada gambar 2.7 dan 2.8. Ketika stator aliri arus dc, maka terbentuk medan magnet stasioner di stator. Medan magnet yang terbentuk tergantung dari hubung belitan stator, jumlah lilitan, dan besar arus [8].

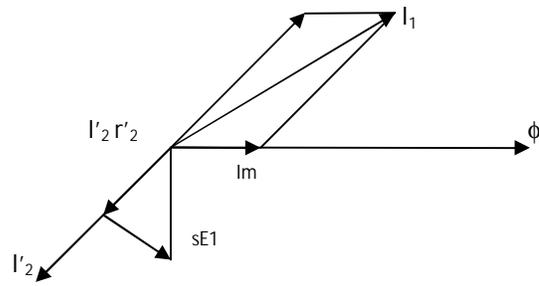


Gambar 2.6 Kurva kecepatan-torsi selama pengereman dinamik

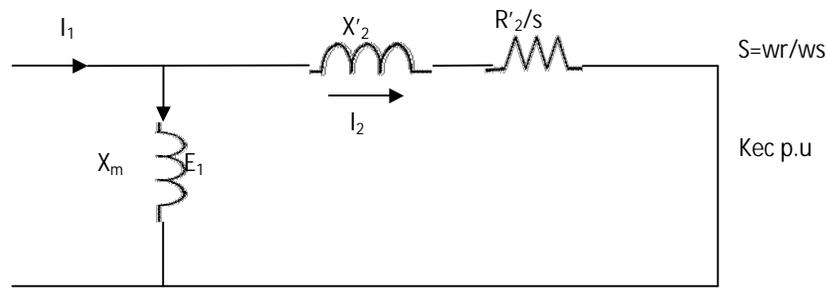
Arus stator berpengaruh terhadap magnetisasi yang terbentuk, sedangkan arus rotor berpengaruh terhadap torsi. Sehingga dapat ditulis persamaan [8]:

$$T = \frac{3}{2p n_s} I_2'^2 \frac{r_2'}{s} \quad (2.13)$$

Ketika s merupakan satuan per unit [8]:



Gambar 2.7 Phasor diagram mesin induksi ketika selama pengereman dinamik



Gambar 2.8 Rangkaian ganti selama proses pengereman dinamik

Dari rangkaian ganti kita dapat [8]:

$$T = I_2' = I_{eq} \frac{C_m}{\sqrt{\left(\frac{r_2'}{s}\right)^2 + (C_2' + C_m)^2}} \quad (2.14)$$

Dan dari diagram fasor didapat [8]:

$$I_{eq}^2 = I_m^2 + I_2'^2 + 2I_m I_2' \cos\alpha_2 \quad (2.15)$$

$$C_m = \frac{E_m}{I_m} \quad (2.16)$$

Sehingga diperoleh persamaan torsi [8]:

$$T = \frac{3}{2pn_s} I_{eq}^2 \frac{c_m^2 \left(\frac{r_2'}{s} \right)}{\left(\frac{r_2'}{s} \right)^2 + (c_m + c_2')^2} \quad (2.17)$$

Torsi maksimum yang dapat terjadi pada suatu kondisi slip [8]:

$$s_{mb} = \frac{r_2'}{c_m + c_2'} \quad (2.18)$$

Dan torsi pengereman maksimum dapat dihitung dengan [8]:

$$T_{mb} = \frac{3}{2pn_s} I_1^2 \frac{c_m^2}{2(c_m + c_2')} \quad (2.19)$$

$$\frac{T}{T_{mb}} = \frac{2}{\frac{s_{mb}}{s} + \frac{s}{s_{mb}}} \quad (2.20)$$

Vedam Subrahmanyam [8] mengatakan, bahwa dari keseluruhan metode pengereman kecepatan putar motor induksi yang disebutkan di atas, dianggap metode yang paling efektif dan paling aman untuk digunakan untuk menghentikan putaran motor induksi karena sangat kecil kemungkinannya untuk terjadi rugi-rugi daya yang terbuang selama proses pengereman adalah metode pengereman dan penghentian motor dengan metode pengereman dinamik, yaitu dengan menginjeksi arus searah ke stator dari motor induksi tiga fasa.

BAB 3

PEMODELAN DAN SIMULASI PENGHENTIAN PUTARAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA MENGGUNAKAN PENEREMAN DINAMIK

3.1 Pemodelan Motor Induksi Tiga Fasa [1][2][3][4]

3.1.1 Kerangka Acuan

Agar mempermudah dalam menganalisa model mesin induksi, maka besaran-besaran yang terdapat dalam mesin induksi ditransformasikan kedalam bentuk kerangka acuan. Pada dasarnya teori kerangka acuan ini adalah untuk mentransformasikan besaran dalam sistem abc (sistem fasa) menjadi besaran dalam sistem berputar $dq0$. Teori kerangka acuan menyatakan bahwa besaran-besaran fasa (tegangan, arus, dan fluks gandeng) dapat dinyatakan dalam besaran-besaran pada sumbu-sumbu kuadratur (*quadrature*), langsung (*direct*), dan nol (*zero*) pada kerangka acuan dengan mengasumsikan suatu nilai kecepatan putar dari kerangka acuan pada transformasinya. Jika sistem yang ditransformasikan merupakan sistem yang seimbang maka nilai komponen nol akan sama dengan nol.

Transformasi variabel 3 fasa dari suatu rangkaian yang diam menjadi kerangka acuan ditentukan dengan persamaan [2][3]:

$$f_{qd0s} = K_s f_{abcs} \quad (3.1)$$

Dimana:

$$f_{qd0s} = \begin{bmatrix} f_{qs} \\ f_{ds} \\ f_{0s} \end{bmatrix}; f_{abcs} = \begin{bmatrix} f_{as} \\ f_{bs} \\ f_{cs} \end{bmatrix}; K_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos q & \cos\left(q - \frac{2p}{3}\right) & \cos\left(q + \frac{2p}{3}\right) \\ \sin q & \sin\left(q - \frac{2p}{3}\right) & \sin\left(q + \frac{2p}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$q = \int_0^t w(x) dx + q(0)$$

Dengan θ adalah variabel pengintegralan.

Jika ditulis dalam bentuk persamaan maka bentuk matriks diatas menjadi:

$$f_q = \frac{2}{3} \left[f_a \cos \theta + f_b \cos \left(\theta - \frac{2p}{3} \right) + f_c \cos \left(\theta + \frac{2p}{3} \right) \right] \quad (3.2)$$

$$f_d = \frac{2}{3} \left[f_a \sin \theta + f_b \sin \left(\theta - \frac{2p}{3} \right) + f_c \sin \left(\theta + \frac{2p}{3} \right) \right] \quad (3.3)$$

$$f_0 = \frac{1}{3} (f_a + f_b + f_c) \quad (3.4)$$

Sedangkan untuk merepresentasikan variabel kerangka acuan sebagai variabel 3 fasa dapat digunakan invers dari persamaan diatas yaitu :

$$f_{abc} = K_s^{-1} f_{dq0s} \quad (3.5)$$

Dengan :

$$K_s^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos \left(\theta - \frac{2p}{3} \right) & \sin \left(\theta - \frac{2p}{3} \right) & 1 \\ \cos \left(\theta + \frac{2p}{3} \right) & \sin \left(\theta + \frac{2p}{3} \right) & 1 \end{bmatrix}$$

Atau dalam bentuk persamaan menjadi

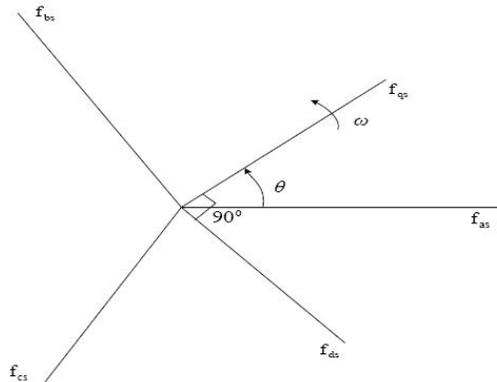
$$f_a = f_q \cos \theta + f_d \sin \theta + f_0 \quad (3.6)$$

$$f_b = f_q \cos \left(\theta - \frac{2p}{3} \right) + f_d \sin \left(\theta - \frac{2p}{3} \right) + f_0 \quad (3.7)$$

$$f_c = f_q \cos \left(\theta + \frac{2p}{3} \right) + f_d \sin \left(\theta + \frac{2p}{3} \right) + f_0 \quad (3.8)$$

Variabel f dalam persamaan diatas dapat merepresentasikan tegangan, arus, fluks gandeng, ataupun muatan listrik. Notasi subskripsi s menandakan bahwa

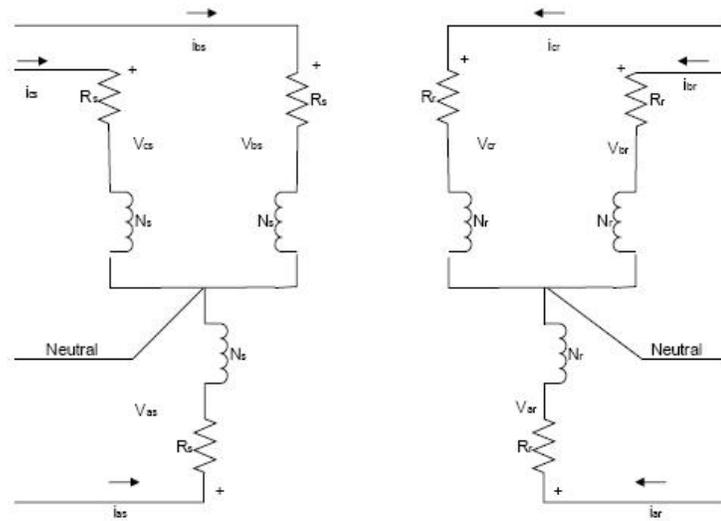
variabel, parameter, dan transformasi berhubungan dengan rangkaian stasioner. Transformasi diatas juga dapat digunakan untuk mentransformasikan kumparan mesin induksi yang berubah terhadap waktu. Jika digambarkan, maka hubungan dari besaran-besaran diatas akan tampak seperti berikut [2]:



Gambar 3.1 Hubungan $abc-dq0$

Berdasarkan gambar diatas, persamaan transformasi kerangka acuan merupakan transformasi yang meletakkan variabel f_{qs} dan f_{ds} secara tegak lurus yang berputar dengan kecepatan sudut ω diatas f_{as} , f_{bs} , dan f_{cs} (besaran dalam fungsi waktu) yang diasumsikan sebagai variabel dalam suatu sumbu yang diam dengan beda fasa 120° .

3.1.2 Model Mesin Induksi [2]



Gambar 3.2 Mesin Induksi 3 Fasa 2 Kutub Dengan Konfigurasi Bintang

Gambar diatas merupakan gambar penampang stator dan rotor dari sebuah mesin induksi 2 kutub, 3 fasa, dengan konfigurasi Bintang. Kumparan stator merupakan kumparan yang terdistribusi sinusoidal identik dengan jumlah lilitan sebanyak N_s dan memiliki tahanan r_s . Sedangkan kumparan rotor terdiri dari tiga kumparan yang terdistribusi sinusoidal identik dengan jumlah lilitan sebanyak N_r dan hambatan r_r . Ketiga fasa yang tergambar pada gambar diatas merupakan fasa a, b, c dengan urutan positif.

Rotor mesin induksi terdapat dua jenis, rotor belitan dan rotor sangkar bajing. Dalam menganalisa mesin induksi, rotor sangkar bajing dapat dianalisa menggunakan perumpamaan sebagai rotor belitan. Persamaan yang dianalisa disini merupakan persamaan untuk rotor belitan. Namun persamaan ini juga dapat digunakan untuk menganalisa rotor sangkar bajing.

Pada mesin induksi yang beroperasi sebagai generator, persamaan tegangan diberikan oleh [2]:

$$V_{abcs} = r_s i_{abcs} + p l_{abcs} \quad (3.9)$$

$$V_{abcr} = r_r i_{abcr} + p l_{abcr} \quad (3.10)$$

Dengan notasi subskripsi s dan r secara berurutan mengindikasikan variabel yang bersesuaian dengan stator dan rotor. • melambangkan fluks gabungan. Dan p adalah notasi derivatif $\frac{d}{dt}$.

Persamaan diatas dapat dirubah dengan mengganti fluks hubung sebagai hasil kali antara arus dan induktansi kumparan. Kemudian merubah persamaan dalam referensi kerangka acuan dengan transformasi $abc-dq0$. Maka persamaan diatas menjadi [3]:

$$V_{qd0s} = r_s i_{qd0s} + \omega l_{dqs} + p l_{qd0s} \quad (3.11)$$

$$V'_{qd0r} = r'_r i'_{qd0r} + (\omega - \omega_r) l'_{dqr} + p l'_{qd0r} \quad (3.12)$$

Dimana:

- adalah kecepatan angular elektrik dari kerangka acuan
- ω_r adalah kecepatan angular dari rotor

$$l_{dqs} = \begin{bmatrix} l_{ds} \\ -l_{qs} \\ 0 \end{bmatrix}; l'_{dqr} = \begin{bmatrix} l'_{dr} \\ -l'_{qr} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dan notasi ' menandakan nilai besaran rotor yang mengacu pada besaran stator

Rangkaian ganti mesin induksi memiliki bentuk yang sama dengan rangkaian ganti transformator. Maka jika melihat kembali teori transformator dimana fluks bocor dari kumparan primer atau sekunder akan menghasilkan efek eksitasi inti. Efek eksitasi inti ini kemudian dimodelkan dalam rangkaian ganti sebagai sebuah induktansi dengan arus yang mengalir sebesar i . Efek eksitasi inti ini lebih jauh disebut sebagai fluks hubung pada inti transformator. Sehingga dengan memasukkan hubungan antara fluks hubung dengan arus yang mengalir, dimana arus telah ditransformasikan dalam referensi kerangka acuan, maka persamaan tegangan dapat ditulis sebagai [3]:

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \omega l_{ds} + p l_{qs} \quad (3.13)$$

$$V_{ds} = r_s i_{ds} - \omega l_{qs} + p l_{ds} \quad (3.14)$$

$$V'_{qr} = r'_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) l'_{dr} + p l'_{qr} \quad (3.15)$$

$$V'_{dr} = r'_r i'_{dr} - (\omega - \omega_r) l'_{qr} + p l'_{dr} \quad (3.16)$$

Dengan:

$$l_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr}$$

$$l_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr}$$

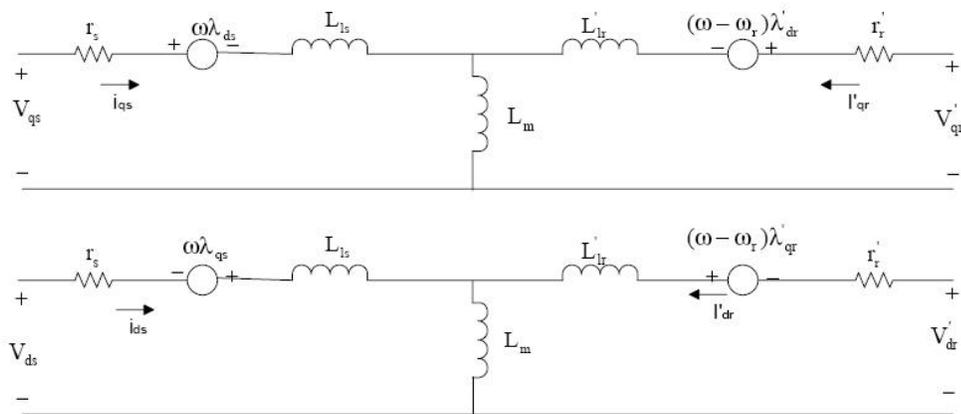
$$l'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs}$$

$$l'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds}$$

$$L_s = L_{ls} + L_m$$

$$L_r = L_{lr} + L_m$$

Dengan menggunakan persamaan diatas, maka dapat digambarkan rangkaian ganti dari mesin induksi dalam referensi kerangka acuan sebagai berikut [2]:



Gambar 3.3 Model Mesin Induksi Dalam Referensi Kerangka Acuan

Rangkaian dan persamaan diatas merupakan pemodelan untuk sisi elektrik dari mesin induksi. Sedangkan untuk sisi mekanisnya dapat dilakukan pemodelan

dengan menggunakan besar daya yang terdapat pada kumparan stator dan rotor sebagai [3],

$$P = v_{as}i_{as} + v_{bs}i_{bs} + v_{cs}i_{cs} + v'_{ar}i'_{ar} + v'_{br}i'_{br} + v'_{cr}i'_{cr} \quad (3.17)$$

Jika besaran daya tersebut ditransformasikan kedalam bentuk $dq0$ maka akan diperoleh persamaan,

$$P = \frac{3}{2}(v_{qs}i_{qs} + v_{ds}i_{ds} + 2v_{0s}i_{0s} + v'_{qr}i'_{qr} + v'_{dr}i'_{dr} + v'_{0r}i'_{0r}) \quad (3.18)$$

Dengan mengasumsikan bahwa sistem seimbang baik pada stator maupun rotor, maka komponen 0 dapat dihilangkan.

Kemudian dengan mensubstitusi persamaan 3.13 hingga 3.16 pada persamaan 3.18 dapat diketahui bahwa persamaan daya mesin induksi dalam referensi kerangka acuan terdiri dari tiga komponen yaitu i^2r , $ip\bullet$, dan $\bullet\bullet i$. Komponen i^2r melambangkan rugi tembaga. Komponen $ip\bullet$ melambangkan besar pertukaran energi medan magnet diantara kumparan. Sedangkan komponen $\bullet\bullet i$ melambangkan besar energi yang dikonversi menjadi energi mekanik. Sehingga dapat disimpulkan bahwa besar torsi elektromagnetis yang berkerja pada mesin sebagai jumlah dari komponen $\bullet\bullet i$ dibagi dengan kecepatan putar mekanis mesin. Atau secara matematis, besar torsi elektromagnetis adalah [2],

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2W_r} \left[W(l_{ds}i_{qs} - l_{qs}i_{ds}) + (W - W_r)(l'_{dr}i'_{qr} - l'_{qr}i'_{dr}) \right] \quad (3.19)$$

Dengan melihat hubungan fluks gandeng pada persamaan 3.13 hingga 3.16 dapat diketahui bahwa

$$l_{ds}i_{qs} - l_{qs}i_{ds} = -(l'_{dr}i'_{qr} - l'_{qr}i'_{dr}) = L_m(i'_{dr}i_{qs} - i'_{qr}i_{ds}) \quad (3.20)$$

Sehingga persamaan torsi elektromagnetis mesin induksi dapat dituliskan sebagai,

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i'_{dr}i_{qs} - i'_{qr}i_{ds}) \quad (3.21)$$

Pada operasi mesin induksi sebagai generator, torsi elektromagnetis yang terjadi bernilai negatif maka persamaan 3.21 menjadi,

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i'_{qr} i_{ds} - i'_{dr} i_{qs}) \quad (3.22)$$

Sedangkan hubungan antara torsi dan kecepatan putar pada mesin induksi yang beroperasi sebagai generator diberikan oleh,

$$T_m = J \left(\frac{2}{P} \right) p\omega_r + T_{em} \quad (3.23)$$

Dengan mengatur ulang persamaan diatas dapat diperoleh [4],

$$p\omega_m = \frac{1}{2J} (T_m - T_{em} - F\omega_m) \quad (3.24)$$

Dengan :

J adalah konstanta inersia mesin

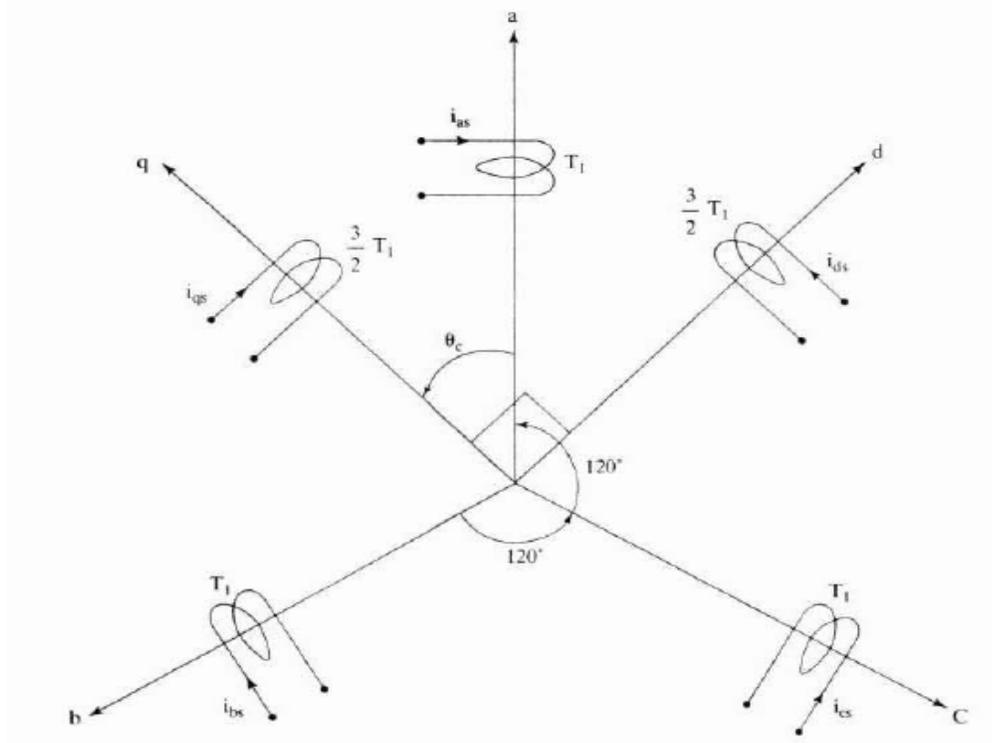
F adalah koefisien gesek mesin

P adalah jumlah kutub dari mesin

$$\frac{dq_m}{dt} = \omega_m; \omega_m = \frac{\omega_r}{P}$$

3.1.3 Model Motor Induksi Tiga Fasa [3]

Motor-motor induksi yang ada pada umumnya merupakan motor tiga fasa sedangkan model yang dikembangkan sampai saat ini adalah model motor dua fasa karena perhitungan dan analisa yang dilakukan menjadi lebih mudah [3]. Oleh sebab itu, dibutuhkan transformasi dari tiga fasa menjadi dua fasa untuk memodelkan motor induksi yang digunakan. Gambar 3.4 menunjukkan sumbu untuk tiga fasa dan dua fasa.



Gambar 3.4. Representasi sumbu dua fasa dan tiga fasa pada stator

Pada gambar 3.4 diasumsikan bahwa masing-masing kumparan pada tiga fasa memiliki lilitan sebanyak T_1 dan besar arus yang sama pada masing-masing fasanya. Dengan demikian, kumparan dua fasa akan memiliki $3/2T_1$ lilitan per fasanya. Sumbu d diasumsikan memiliki perbedaan sudut sebesar $q_c = 0$ terhadap sumbu a . Dari gambar 3.4 terlihat bahwa tiga fasa diwakili oleh sumbu abc dan dua fasa diwakili oleh sumbu dq . Transformasi arus sumbu abc ke sumbu $dq0$ diwakili oleh persamaan matriks berikut ini [3].

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos q_c & \cos(q_c - \frac{2p}{3}) & \cos(q_c + \frac{2p}{3}) \\ \sin q_c & \sin(q_c - \frac{2p}{3}) & \sin(q_c + \frac{2p}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Arus i_o merepresentasikan ketidakseimbangan terhadap arus fasa ia, ib , dan ic , dan dapat dikenal sebagai komponen urutan nol (*zero-sequence*) pada arus. Pada mesin tiga fasa yang seimbang, jumlah ketiga arus fasa adalah nol [3].

$$i_{as} + i_{bs} + i_{cs} = 0 \quad (3.26)$$

Sesuai persamaan (3.1), besar arus i_o adalah nol [[3].

$$i_o = \frac{1}{3}(i_{as} + i_{bs} + i_{cs}) = 0 \quad (3.27)$$

Oleh sebab itu arus i_o ini tidak menghasilkan medan magnet. Persamaan (3.25) dapat juga dituliskan dalam bentuk [3] :

$$i_{dq0} = [T_{abc}] i_{abc} \quad (3.28)$$

dengan

$$i_{dq0} = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad i_o]^t \quad (3.29)$$

$$i_{abc} = [i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs}]^t \quad (3.30)$$

Matriks transformasi dari variable abc ke $dq0$ adalah sebagai berikut [3] :

$$[T_{abc}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos q_c & \cos(q_c - \frac{2p}{3}) & \cos(q_c + \frac{2p}{3}) \\ \sin q_c & \sin(q_c - \frac{2p}{3}) & \sin(q_c + \frac{2p}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Sedangkan transformasi arus dua fasa menjadi arus tiga fasa dapat diperoleh sebagai berikut [3].

$$i_{ab} = [T_{abc}]^{-1} i_{dq0} \quad (3.32)$$

$$\text{dengan } [T_{abc}]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos q_c & \sin q_c & 1 \\ \cos(q_c - \frac{2}{3}) & \sin(q_c - \frac{2}{3}) & 1 \\ \cos(q_c + \frac{2}{3}) & \sin(q_c + \frac{2}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

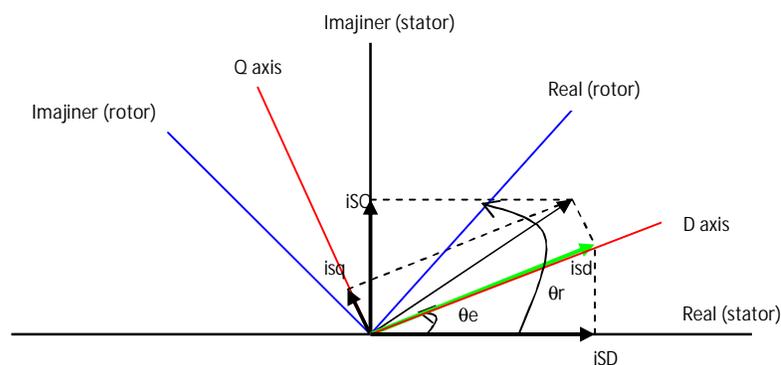
Matriks transformasi dari tiga fasa ke dua fasa dan sebaliknya tidak hanya dapat digunakan untuk transformasi arus tetapi juga dapat untuk transformasi tegangan maupun fluks.

Pada umumnya, sumbu d diletakkan segaris dengan sumbu a . Oleh sebab itu sumbu dq merupakan kerangka acuan stator. Model menggunakan acuan stator dikenal sebagai model *Stanley* atau *stator reference model* [3]. Dengan demikian $q_c = 0$ sehingga transformasi dari variable abc ke $dq0$ ditunjukkan persamaan berikut [3].

$$T_{abc}^s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Konstanta sebesar $\frac{2}{3}$ digunakan untuk *system power non-invariant* sedangkan untuk *system power invariant*, konstanta tersebut bernilai $\sqrt{\frac{2}{3}}$.

Motor induksi yang digunakan dalam simulasi, dimodelkan dengan menggunakan acuan fluks rotor (*rotor flux reference frame*) [4].



Gambar 3.5. rotor flux reference frame

Adapun transformasi dari kerangka acuan stator menjadi kerangka acuan rotor direpresentasikan dalam persamaan berikut ini [4].

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{sd} \\ \dot{i}_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_e & \sin\theta_e \\ -\sin\theta_e & \cos\theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{sD} \\ \dot{i}_{sQ} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Vektor tegangan stator \bar{V}_s' , vektor arus stator \bar{i}_s' , vektor fluks stator \bar{y}_s' dan vektor fluks rotor \bar{y}_r' dalam kerangka acuan fluks rotor ditunjukkan dalam persamaan (3.36) sampai (3.39) berikut ini [4].

$$\bar{V}_s' = \bar{V}_s e^{-j\theta_e} = V_{sd} + jV_{sq} \quad (3.36)$$

$$\bar{i}_s' = \bar{i}_s e^{-j\theta_e} = i_{sd} + ji_{sq} \quad (3.37)$$

$$\bar{y}_s' = \bar{y}_s e^{-j\theta_e} = y_{sd} + jy_{sq} \quad (3.38)$$

$$\bar{y}_r' = \bar{y}_r e^{-j(\theta_e - \theta_r)} = y_{rd} + jy_{rq} \quad (3.39)$$

Persamaan (3.36) sampai (3.39) dapat juga ditulis (dilihat dari kerangka acuan stator) sebagai berikut:

$$\bar{V}_s = \bar{V}_s' e^{j\theta_e} \quad (3.40)$$

$$\bar{i}_s = \bar{i}_s' e^{j\theta_e} \quad (3.41)$$

$$\bar{y}_s = \bar{y}_s' e^{j\theta_e} \quad (3.42)$$

$$\bar{y}_r = \bar{y}_r' e^{j(\theta_e - \theta_r)} \quad (3.43)$$

Vektor fluks stator dan rotor dapat ditulis sebagai fungsi dari arus stator dan rotor sebagai berikut [3].

$$\bar{y}_s' = L_s \bar{i}_s' + L_m \bar{i}_r' \quad (3.44)$$

$$\overline{y}_r' = L_r \overline{i}_r' + L_m \overline{i}_s' \quad (3.45)$$

$$\overline{i}_{mr} = \overline{i}_s' + \frac{L_r}{L_m} \overline{i}_r' \quad (3.46)$$

Dari persamaan (3.46) dapat diperoleh persamaan berikut:

$$\overline{i}_r' = (\overline{i}_m - \overline{i}_s') \frac{L_m}{L_r} \quad (3.47)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (3.43) kedalam persamaan (3.45) diperoleh:

$$\overline{y}_r' = L_m \overline{i}_{mr}' \quad (3.48)$$

Tegangan stator dan rotor dapat dilihat pada persamaan (3.25) dan (3.26). Untuk motor induksi yang menggunakan *squirrel cage*, tegangan pada rotor sama dengan nol [3].

$$\overline{V}_s = R_s \overline{i}_s' + \frac{d}{dt} \overline{y}_s' \quad (3.49)$$

$$\overline{V}_r = R_r \overline{i}_r' + \frac{d}{dt} \overline{y}_r' = 0 \quad (3.50)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (3.40)-(3.48) ke persamaan (3.49) dan (3.50), tegangan stator dan rotor menjadi persamaan (3.51) dan (3.52).

$$\overline{V}_s' = R_s \overline{i}_s' + \frac{d}{dt} \overline{y}_s' + j\omega_e \overline{y}_s' \quad (3.51)$$

$$0 = R_r \frac{L_m}{L_r} (\overline{i}_{mr} - \overline{i}_s') + \frac{d}{dt} L_m \overline{i}_{mr}' + j(\omega_e - \omega_r) L_m \overline{i}_{mr}' \quad (3.52)$$

Persamaan (3.49) dan (3.50) ini kemudian diubah ke dalam bentuk *dq-axis* sehingga diperoleh persamaan (3.53) sampai (3.56) [3].

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + L_s S \frac{d}{dt} i_{sd} - \omega_e L_s S i_{sq} + L_s (1-S) \frac{d}{dt} i_{mr} - L_s (1-S) \omega_e i_{mr} \quad (3.53)$$

$$V_{sq} = W_e L_s S i_{sd} + R_s i_{sq} + L_s S \frac{d}{dt} i_{sq} + L_s (1-S) W_e i_{mrd} + L_s (1-S) \frac{d}{dt} i_{mrq} \quad (3.54)$$

$$i_{sd} = i_{mrd} + \frac{L_r}{R_r} \frac{d}{dt} i_{mrd} - \frac{L_r}{R_r} (W_e - p W_r) i_{mrq} \quad (3.55)$$

$$i_{sq} = i_{mrq} + \frac{L_r}{R_r} \frac{d}{dt} i_{mrq} - \frac{L_r}{R_r} (W_e - p W_r) i_{mrd} \quad (3.56)$$

dengan $S = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ dan p adalah banyaknya kutub.

Dari persamaan (3.31) dan (3.32) diperoleh :

$$\frac{d}{dt} i_{mrd} = -\frac{R_r}{L_r} i_{mrd} + \frac{R_r}{L_r} i_{sd} + (W_e - p W_r) i_{mrq} \quad (3.57)$$

$$\frac{d}{dt} i_{mrq} = -\frac{R_r}{L_r} i_{mrq} + \frac{R_r}{L_r} i_{sq} - (W_e - p W_r) i_{mrd} \quad (3.58)$$

Adapun persamaan torsi untuk motor induksi adalah sebagai berikut [4]

$$T_e = P \frac{L_m}{L_r} (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad (3.59)$$

Persamaan (3.48) disubstitusi ke dalam persamaan (3.59) sehingga menjadi:

$$T_e = P \frac{L_m^2}{L_r} (i_{sq} i_{mrd} - i_{sd} i_{mrq}) \quad (3.60)$$

Kecepatan rotor dan posisi dari motor induksi ditunjukkan oleh persamaan (3.61) dan (3.62) [4].

$$\frac{d}{dt} W_r = \frac{(T_e - T_L) - B W_r}{J} \quad (3.61)$$

$$W_e = W_{sl} + p W_r \quad (3.62)$$

dengan:

$$W_{sl} = \frac{Rr i_{sq}}{Lr i_{mr}} \quad (3.63)$$

$$\frac{d}{dt} Q_e = W_e \quad (3.64)$$

Dari persamaan (3.53) diperoleh:

$$\frac{d}{dt} i_{sd} = \frac{1}{L_s S} V_{sd} - \frac{R_s}{L_s S} i_{sd} - \frac{L_m^2}{L_r L_s S} \frac{d}{dt} i_{mrd} + W_e i_{sq} + \frac{L_m^2 W_e}{L_r L_s S} i_{mrq} \quad (3.65)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (3.57) ke persamaan (3.65), akan diperoleh:

$$\frac{d}{dt} i_{sd} = \frac{1}{L_s S} V_{sd} + \left(-\frac{R_s}{L_s S} - \frac{L_m^2}{L_r L_s S} \right) i_{sd} + W_e i_{sq} + \frac{L_m^2}{L_r L_s S} i_{mrd} + \frac{L_m^2 p W_r}{L_r L_s S} i_{mrq} \quad (3.66)$$

Sedangkan dari persamaan (3.54) diperoleh:

$$\frac{d}{dt} i_{sq} = \frac{1}{L_s S} V_{sq} - W_e i_{sd} - \frac{R_s}{L_s S} i_{sq} - \frac{L_m^2 W_e}{L_r L_s S} i_{mrd} - \frac{L_m^2}{L_r L_s S} i_{mrq} \quad (3.67)$$

Kemudian dengan mensubstitusi persamaan (3.58) ke persamaan (3.67), akan diperoleh persamaan berikut:

$$\frac{d}{dt} i_{sq} = \frac{1}{L_s S} V_{sq} - W_e i_{sd} + \left(-\frac{R_s}{L_s S} - \frac{L_m^2 R_r}{L_r^2 L_s S} \right) i_{sq} - \frac{L_m^2 p W_r}{L_r L_s S} i_{mrd} + \frac{L_m^2}{L_r^2 L_s S} i_{mrq} \quad (3.68)$$

Jadi, model motor induksi [3]:

$$\frac{d}{dt} i_{sd} = \frac{1}{L_s S} V_{sd} + \left(-\frac{R_s}{L_s S} - \frac{(1-S)R_r}{L_r S} \right) i_{sd} + W_e i_{sq} + \frac{(1-S)R_r}{L_r S} i_{mrd} + \frac{(1-S)pW_r}{S} i_{mrq} \quad (3.69)$$

$$\frac{d}{dt} i_{sq} = \frac{1}{L_s S} V_{sq} - W_e i_{sd} + \left(-\frac{R_s}{L_s S} - \frac{(1-S)R_r}{L_r S} \right) i_{sq} - \frac{(1-S)pW_r}{S} i_{mrd} + \frac{(1-S)R_r}{L_r S} i_{mrq} \quad (3.70)$$

$$\frac{d}{dt} i_{mrd} = -\frac{R_r}{L_r} i_{mrd} + \frac{R_r}{L_r} i_{sd} + (W_e - pW_r) i_{mrq} \quad (3.71)$$

$$\frac{d}{dt} i_{mrq} = -\frac{R_r}{L_r} i_{mrq} + \frac{R_r}{L_r} i_{sq} - (W_e - pW_r) i_{mrd} \quad (3.72)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{\left(P \frac{L_m^2}{L_r} (i_{sq} i_{mrd} - i_{sd} i_{mrq}) - T_L - B \omega_r \right)}{J} \quad (3.73)$$

3.2 Parameter Mesin Induksi[2] [9]

Mesin induksi yang digunakan dalam simulasi skripsi ini merupakan mesin induksi yang terdapat pada Laboratorium Konversi Energi Listrik Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Mesin induksi ini memiliki daya maksimum ketika beroperasi sebagai motor sebesar 2 kW. Mesin induksi ini dikopel dengan menggunakan mesin AS yang juga memiliki daya maksimum sebesar 2 kW. Ketika mesin induksi beroperasi sebagai generator, mesin AS digunakan sebagai motor yang mengkopel mesin induksi. Pada simulasi ini generator induksi dioperasikan secara sendiri, dalam arti generator tidak terhubung dengan jaringan listrik. Sehingga terminal keluaran generator terhubung langsung dengan beban.

Untuk mendapatkan parameter mesin induksi yang digunakan dalam simulasi, telah dilakukan beberapa percobaan. Percobaan tersebut adalah percobaan uji arus searah, percobaan mesin induksi beban nol, dan percobaan mesin induksi hubung singkat [9]. Dari ketiga percobaan ini akan diperoleh nilai parameter mesin induksi seperti tahanan dan reaktansi mesin.

Percobaan pertama adalah percobaan uji arus searah. Percobaan ini dilakukan dengan memberikan catu arus searah pada kumparan stator kemudian mengukur besar arus yang mengalir. Dari percobaan ini selanjutnya dapat diperoleh besar tahanan stator. Setelah dilakukan pengukuran pada mesin dan dilakukan perhitungan terhadap data hasil percobaan diperoleh besar tahanan stator sebesar 2

• .

Percobaan kedua adalah percobaan mesin induksi beban nol. Percobaan ini bertujuan untuk mendapatkan nilai reaktansi magnetis X_m dari mesin induksi. Percobaan dilakukan dengan menjalankan mesin induksi sebagai motor, kemudian rotor mesin induksi dikopel dengan mesin AS dengan arah putaran searah dengan

putaran mesin induksi. Hal ini bertujuan agar mesin induksi bekerja dengan slip minimal sehingga torsi mekanik yang terjadi mendekati nol. Dengan kondisi ini maka tidak mengalir ke rotor karena tahanan pada rotor sangat besar. Pada kondisi ini diukur besar daya beban nol, tegangan beban nol, dan arus beban nol. Dari hasil perhitungan data diketahui besar impedansi beban nol adalah sebesar $86,6 \cdot \Omega$. Nilai ini bukanlah nilai reaktansi magnetis sebab impedansi beban nol merupakan jumlah dari nilai tahanan stator, reaktansi stator, dan reaktansi magnetis. Sehingga nilai reaktansi magnetis baru dapat diketahui setelah nilai impedansi beban nol dikurangi dengan nilai tahanan stator dan reaktansi stator.

Percobaan ketiga adalah percobaan mesin induksi hubung singkat. Percobaan ini bertujuan untuk memperoleh nilai impedansi hubung singkat yang terdiri dari tahanan stator, tahanan rotor, reaktansi stator, dan reaktansi rotor. Percobaan dilakukan dengan prosedur yang hampir sama dengan percobaan mesin induksi beban nol hanya saja putaran mesin AS dibuat berlawanan dengan putaran mesin induksi. Putaran yang berlawanan ini akhirnya akan membuat rotor mesin induksi terkunci dan tidak berputar [9]. Pada kondisi rotor terkunci ini, diukur besar daya hubung singkat, tegangan hubung singkat, arus hubung singkat, dan frekuensi hubung singkat. Dari hasil perhitungan data diketahui besar tahanan total mesin induksi adalah sebesar $4,36 \cdot \Omega$. Nilai ini kemudian dikurangi dengan nilai tahanan stator sehingga diperoleh besar tahanan rotor sebesar $2,36 \cdot \Omega$. Dari hasil perhitungan juga diperoleh besar reaktansi total mesin induksi sebesar $7,2 \cdot \Omega$. Nilai ini kemudian dipecah sebagai nilai reaktansi stator dan rotor menggunakan perbandingan yang terdapat pada Chapman [7] yaitu sebesar 50:50. Sehingga diperoleh besar reaktansi stator dan rotor sebesar masing-masing $3,6 \cdot \Omega$ dan $3,6 \cdot \Omega$.

Dengan diketahuinya nilai reaktansi stator dapat diketahui besar nilai reaktansi magnetis. Dengan mengurangi nilai impedansi hubung singkat dengan nilai tahanan dan reaktansi stator, diperoleh nilai reaktansi magnetis sebesar $83 \cdot \Omega$.

Agar lebih jelas, maka parameter mesin induksi yang digunakan dalam simulasi dirangkum seperti pada tabel berikut ini,

Tabel 3.1. Parameter Mesin Induksi Yang Digunakan Dalam Penelitian

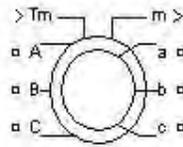
Daya Maksimum	2 kW
Tegangan	220 / 380 V
Arus Beban Penuh	8,3 / 4,8 A
Tahanan Stator	2 •
Tahanan Rotor	2,36 •
Reaktansi Magnetis	83 •
Reaktansi Stator	3,6 •
Reaktansi Rotor	3,6 •
Frekuensi	50 Hz
Cos Phi	0,8
Kecepatan Putar	1440 rpm

3.3 Rangkaian Sistem Simulasi

Pada skripsi ini simulasi hanya dilakukan pada perangkat lunak MATLAB R2007b dengan menggunakan program SIMULINK yang terdapat di dalam MATLAB. Simulasi dengan menggunakan mesin induksi merk LabVolt yang terdapat di laboratorium hanya dilakukan untuk mendapatkan nilai parameter dari mesin induksi.

3.3.1 Simulasi Sistem Dengan MATLAB

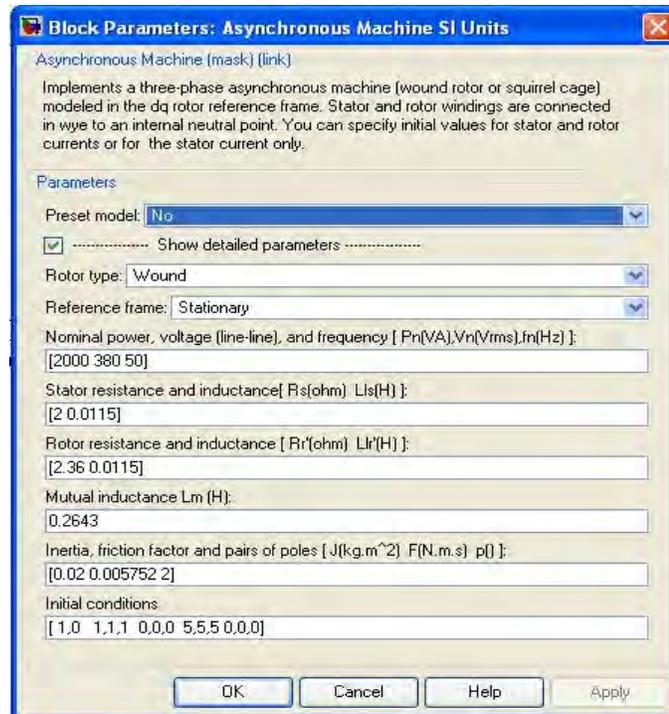
Model mesin induksi yang terdapat pada gambar 3.5 dibawah adalah model mesin induksi yang digunakan dalam simulasi dengan program MATLAB.



Gambar 3.6. Model Mesin Induksi yang Digunakan Pada MATLAB

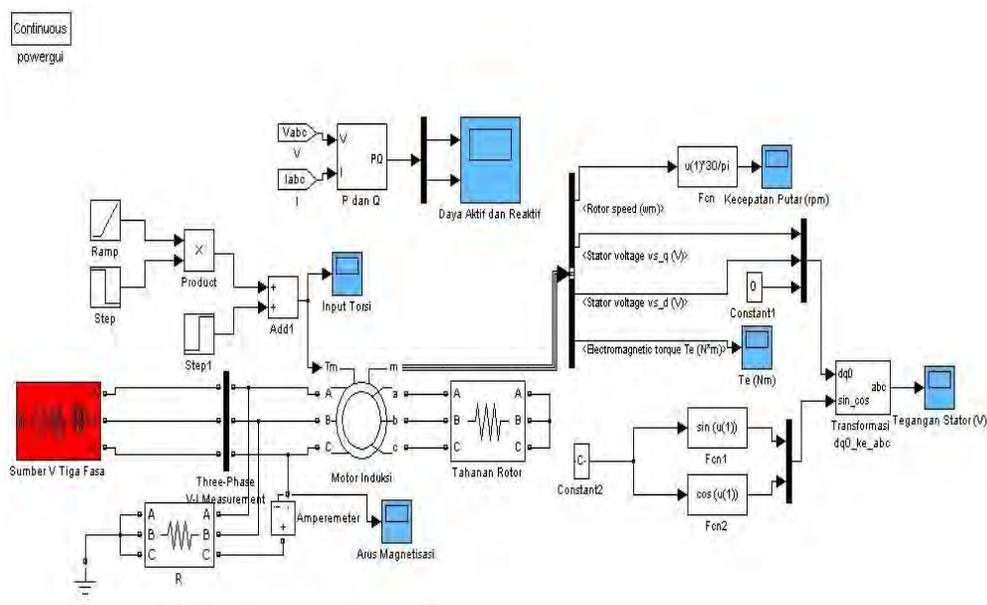
Model mesin induksi tersebut bekerja dengan menggunakan model persamaan 3.13 hingga 3.16 untuk model elektrisnya, sedangkan model mekanis menggunakan persamaan 3.22 dan 3.24 dengan memasukkan nilai torsi dengan nilai negatif agar mesin model bekerja sebagai generator. Dalam simulasi ini, model persamaan listrik diturunkan sehingga persamaan yang digunakan dalam simulasi adalah persamaan 3.41 sehingga dapat langsung diperoleh model untuk generator induksi berpenguat sendiri.

Model mesin induksi juga dilengkapi dengan kotak dialog untuk memasukkan nilai parameter mesin induksi yang akan digunakan dalam simulasi. Kotak dialog tersebut tampak seperti pada gambar 3.6 berikut,



Gambar 3.7. Kotak Dialog Parameter Mesin Induksi Pada MATLAB

Nilai parameter yang dimasukkan pada kotak dialog tersebut merupakan nilai parameter mesin induksi yang telah disebutkan pada sub bab sebelumnya. Nilai induktansi (dalam Henry) diperoleh dengan menghitung besar rasio dari reaktansi induktif mesin dengan frekuensi tegangan nominal mesin. Nilai inersia dan faktor gesekan menggunakan nilai awal yang terdapat pada MATLAB. Hal ini dilakukan karena tidak dilakukan pengukuran rinci terhadap nilai konstanta mekanis ini.



Gambar 3.8. Simulasi Motor Induksi Tiga Fasa

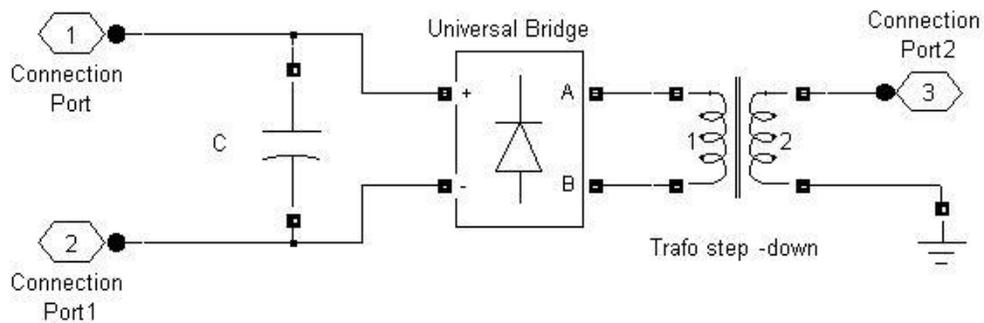
Mesin induksi pada simulasi ini bagian rotornya dihubungkan dengan tahanan sebesar $15 \cdot$ pada setiap fasanya. Hal ini dilakukan untuk mengurangi lonjakan arus ketika mesin pertama kali dijalankan.

3.4 Model Pengereman Kecepatan

Model pengereman kecepatan yang digunakan pada simulasi ini adalah peralatan yang digunakan untuk memperlambat putaran motor induksi sehingga dapat mengurangi rugi-rugi listrik maupun mekanis yang dapat terjadi selama proses penghentian putaran motor. Pada simulasi ini digunakan rangkaian

penyearah satu fasa gelombang penuh yang dilengkapi dengan transformator penurun tegangan untuk menginjeksi arus searah ke dua fasa kumparan stator. Model pengereman kecepatan ini disimulasikan dengan menggunakan program SIMULINK yang terdapat pada MATLAB R2007b.

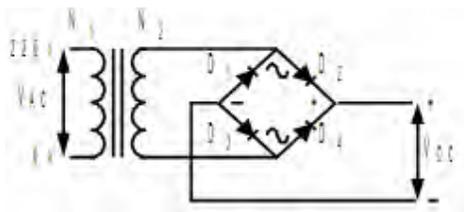
3.4.1 Penyearah Penuh Satu Fasa



Gambar 3.9. Rangkaian simulasi penyearah satu fasa gelombang penuh

Penyearah yang dipakai pada alat ini adalah penyearah gelombang penuh dengan menggunakan transformator step down dan mempunyai keluaran tegangan DC positif. Rangkaian penyearah gelombang penuh dengan menggunakan transformator step down dapat dilihat pada gambar.

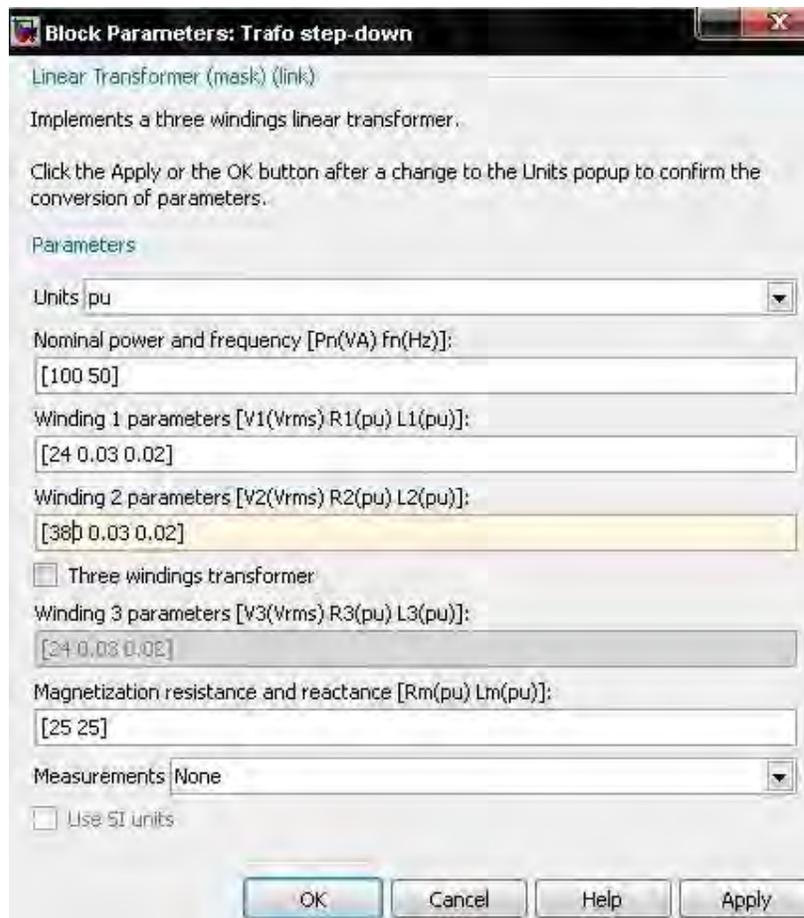
Pada saat setengah siklus positif, dioda D2 dan D3 akan konduksi untuk menghasilkan satu siklus positif dan pada siklus negatif, dioda D4 dan D1 akan konduksi untuk menghasilkan satu siklus negatif.



Gambar 3.10. Prinsip kerja penyearah satu fasa gelombang penuh

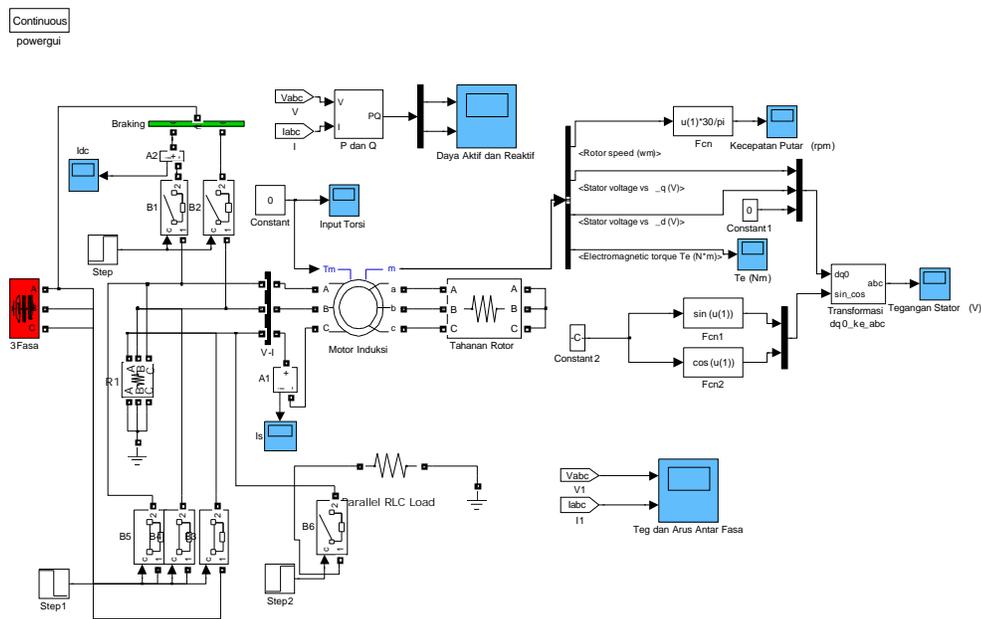
Arus searah yang diinjeksikan ke kumparan stator diperoleh dengan menghubungkan tegangan satu fasa dari terminal utama ke transformator penurun tegangan (*step-down*) sebelum dihubungkan ke rangkaian penyearah gelombang penuh. Hal ini dikarenakan dioda mempunyai rating tegangan *breakdown* yang kecil, sehingga dengan mengurangi tegangan masukkan ke rangkaian penyearah dapat mencegah terjadinya kerusakan dioda akibat tegangan berlebih yang mengalir pada dioda.

Transformator penurun tegangan yang digunakan mempunyai perbandingan 220/110 yang kemudian masuk ke rangkaian penyearah dan arus searah yang dihasilkan dialirkan ke kumparan stator. Berikut ini adalah kotak dialog model transformator *step-down* yang digunakan untuk memasukkan nilai parameter trafo yang akan digunakan:



Gambar 3.11. Kotak dialog parameter transformator yang digunakan

Dengan menginjeksi kumparan stator motor induksi tiga fasa dengan arus searah, dan divariasikan dengan penambahan beban resistif pada jala-jala satu fasa tegangan terminal, maka diharapkan waktu penghentian kecepatan dari motor induksi tiga fasa ini lebih cepat dan meminimalisasi besar arus yang dialirkan untuk menghentikan putaran motor. Arus searah diinjeksikan ke fasa A dan B pada kumparan stator hubung bintang. Berikut ini gambar simulasi sistem penghentian kecepatan motor induksi tiga fasa dengan menggunakan pengereman dinamik,

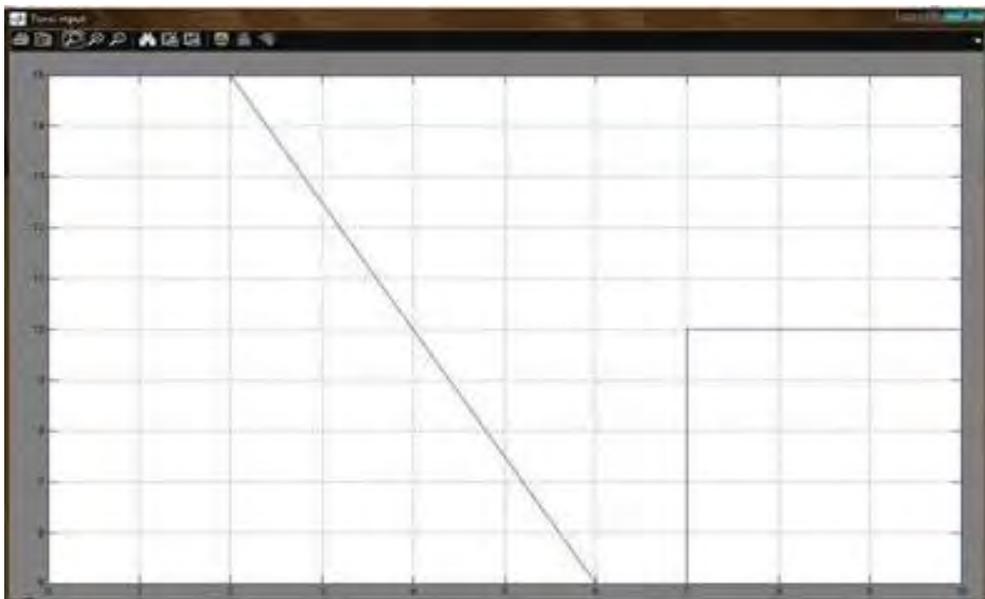


Gambar 3.12. Simulasi penghentian motor induksi tiga fasa dengan menggunakan metode pengereman dinamik

3.5 SIMULASI SISTEM

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, simulasi pada skripsi ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak SIMULINK yang terdapat pada MATLAB R2007b dan menggunakan mesin induksi yang terdapat di Laboratorium Konversi Energi Listrik Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Sub bab ini akan menjelaskan langkah-langkah simulasi yang dilakukan.

Dengan menggunakan SIMULINK dilakukan beberapa simulasi. Simulasi pertama adalah simulasi dengan rangkaian dasar motor induksi tiga fasa. Simulasi dilakukan selama 10 detik. Pada simulasi ini torsi masukan yang diberikan pada model mesin dibuat berubah-ubah. pada detik 0 hingga 2, nilai torsi diberikan sebesar 15 Nm. Mulai detik ke-2 hingga 6 nilai torsi diturunkan hingga mencapai 5 Nm, nilai ini dipertahankan hingga detik 7. Pada detik ke-7 nilai torsi ditingkatkan menjadi 10 Nm dan dipertahankan hingga detik ke-10.



Gambar 3.13 Torsi masukan motor induksi tiga fasa

Dari perubahan nilai torsi masukan ini kemudian akan dilihat perubahan pada keluaran motor seperti tegangan, arus, torsi elektromagnetik dan kecepatan putar. Diharapkan dari simulasi ini akan diperoleh karakteristik keluaran motor induksi tiga fasa ketika torsi masukan berubah-ubah.

Simulasi kedua adalah simulasi pengereman motor induksi pada motor induksi tiga fasa dengan menggunakan pengereman dinamis atau injeksi arus searah dengan penambahan beban resistif sebesar 7500W. Pada simulasi ini, arus dc yang berasal dari penyearah satu fasa gelombang penuh diinjeksikan ke stator motor induksi tiga fasa. Pada simulasi ini, yang diatur adalah besar arus dc yang

akan diinjeksikan ke stator motor induksi untuk menimbulkan medan magnet stasioner untuk memperlambat putaran motor dan motor beroperasi menjadi generator. Pada simulasi ini, akan dilihat hasil keluaran berupa perubahan kecepatan putar sebelum dan sesudah terjadi pengereman dinamik, daya akti dan reaktif keluaran motor induksi tiga fasa, arus magnetisasi serta perubahan torsi elektromagnet yang timbul selama pengereman.

BAB 4

ANALISIS HASIL SIMULASI

PENGEREMAN DINAMIK MOTOR INDUKSI TIGA FASA

Bab ini akan menjelaskan hasil simulasi sistem motor induksi tiga fasa yang telah dilakukan. Hasil ini kemudian akan dianalisis sehingga dapat diketahui karakteristik pengaturan pengereman putaran motor dengan injeksi arus searah.

4.1 Analisis Hasil Simulasi Sistem Tanpa Pengereman Dinamik

Simulasi pertama mensimulasikan sistem dasar motor induksi tiga fasa tanpa dilengkapi dengan rangkaian pengereman dinamik. Motor induksi pada simulasi ini diberi hambatan resistif sebesar $15\ \Omega$ yang dipasang paralel antara sumber tegangan dan stator untuk membatasi arus lonjakan awal yang tinggi, sementara itu bagian rotor dihubungkan singkat dengan hambatan sebesar $15\ \Omega$ juga yang seimbang pada ketiga fasanya. Pada simulasi ini, nilai torsi masukan yang diterima motor induksi dibuat berubah-ubah, sehingga diharapkan pada simulasi ini diperoleh karakteristik keluaran motor induksi ketika torsi masukan yang diterima motor berubah-ubah. Pada simulasi ini, nilai torsi yang dimasukkan adalah 15 Nm untuk detik 0 hingga detik ke-2. Kemudian dari detik ke-2 hingga detik ke-6, nilai torsi diturunkan secara linier hingga mencapai 5 Nm. Dari detik ke-6, nilai torsi dipertahankan konstan sampai detik ke-7. Kemudian pada detik ke-7, nilai torsi dinaikkan menjadi 10 Nm. Nilai torsi ini dipertahankan konstan hingga detik ke-10.

Nilai kecepatan putar yang tercatat pada grafik memperlihatkan bahwa pada saat torsi masukan awal 15 Nm yang dipertahankan konstan sampai detik ke-2, kecepatan rotor sedang dibangkitkan menuju *steady state*, dan ketika torsi masukan diturunkan sampai pada detik ke-6, kecepatan putar rotor meningkat tiga kali lipat. Pada detik ke-6 sampai 7 saat torsi bernilai konstan, kecepatan juga ikut stabil, tetapi ketika dinaikkan kembali torsi pada detik ke-7 dan dibuat stabil sampai detik ke-10, kecepatan menjadi berkurang dan kembali stabil. Hal ini

menerangkan bahwa kecepatan putar motor berbanding terbalik dengan torsi masukan yang diberikan.

Akan tetapi hal tersebut sebenarnya dapat terjadi dikarenakan meningkatnya arus pada stator yang akan membuat torsi elektromagnetik motor semakin besar juga. Torsi elektromagnetik ini akan melawan arah torsi masukan motor induksi sehingga akan menurunkan kecepatan putar motor induksi. Torsi mekanik yang diberikan pada motor selanjutnya akan menyesuaikan besarnya dengan torsi elektromagnetik sehingga membuat grafik kecepatan berosilasi. Penyesuaian ini akan terjadi sampai motor mencapai keadaan tunak. Ketika telah mencapai keadaan tunak, nilai resultan antara torsi mekanik dan torsi elektromagnetik akan tetap. Hal ini terbukti dengan besar kecepatan putar motor induksi yang sudah konstan. Dengan semakin besarnya torsi masukan yang diberikan, maka nilai torsi elektromagnetik yang terjadi ketika awal timbulnya arus akan semakin besar. Hal ini membuat penyesuaian besar resultan torsi akan semakin cepat sehingga keadaan tunak dapat tercapai dengan lebih cepat.



Gambar 4.1. Grafik kecepatan putar motor induksi tiga fasa

Bila nilai torsi yang diberikan pada motor tetap, maka kecepatan putar yang dihasilkan motor juga tetap besarnya. Dalam simulasi dilakukan percobaan dengan menurunkan besar torsi masukan motor induksi. Penurunan torsi dilakukan pada detik kedua hingga detik keenam dengan penurunan total sebesar 10 Nm secara linier. Kemudian torsi langsung diturunkan menjadi 5 Nm pada detik keenam. Ketika torsi masukan diturunkan besarnya, kecepatan putar yang dihasilkan motor meningkat besarnya. Pada kondisi ini besar tegangan terminal stator motor induksi tetap. Naiknya kecepatan putar motor induksi ini dapat dijelaskan dengan menggunakan persamaan berikut,

$$P = VI = \omega \cdot m \quad (4.1)$$

Sesuai dengan persamaan diatas, maka ketika nilai torsi masukan turun dan daya yang merupakan hasil kali tegangan dan arus dibuat tetap, maka besar kecepatan motor induksi akan meningkat. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada grafik yang terdapat pada gambar 4.1 diatas.

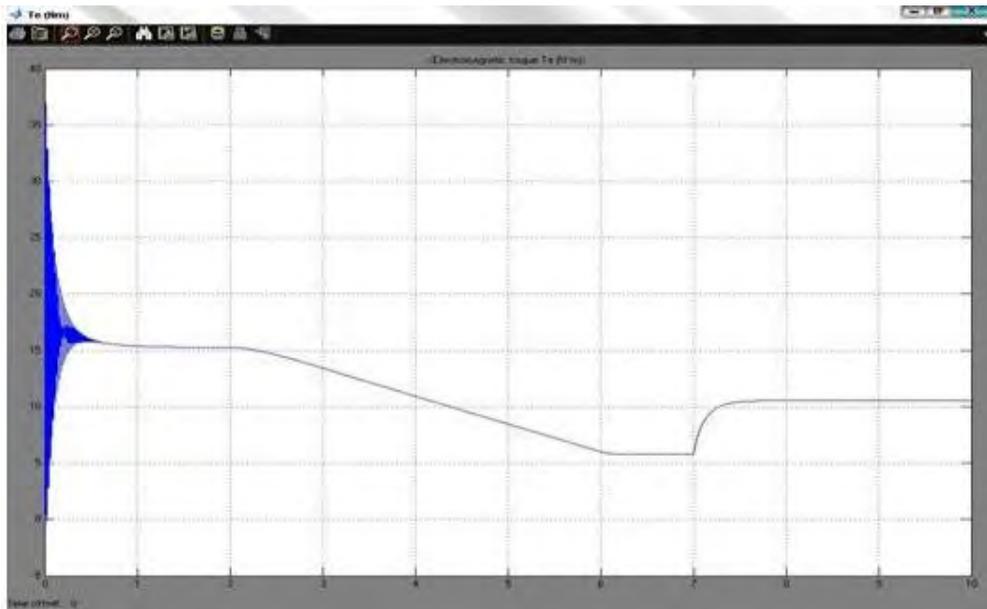
Semakin besar torsi yang diberikan, menyebabkan sudut antara vektor fluks magnet stator dengan vektor fluks magnetik rotor semakin lebar. Fluks magnetik rotor yang mengikuti fluks magnetik stator berjalan lebih lambat. Torsi juga mempengaruhi besar slip dan faktor daya, dikarenakan torsi berbanding terbalik dengan kecepatan putar rotor yang menyebabkan slip dan faktor daya yang terjadi berbanding lurus dengan torsi. Hal ini dapat dibuktikan dengan persamaan (2.5). Perubahan torsi yang terjadi juga ada hubungannya dengan daya yang timbul. Berdasarkan persamaan (2.7) sampai dengan persamaan (2.12), dapat dilihat bahwa daya pada motor induksi berbanding lurus dengan perubahan torsi.

Untuk mengimbangi pertambahan torsi, diperlukan pula tambahan fluks magnetik stator dengan menarik arus yang lebih besar dari catu daya. Oleh karena itu, perubahan torsi disini berbanding lurus dengan arus pada stator. Hal ini sesuai dengan persamaan :

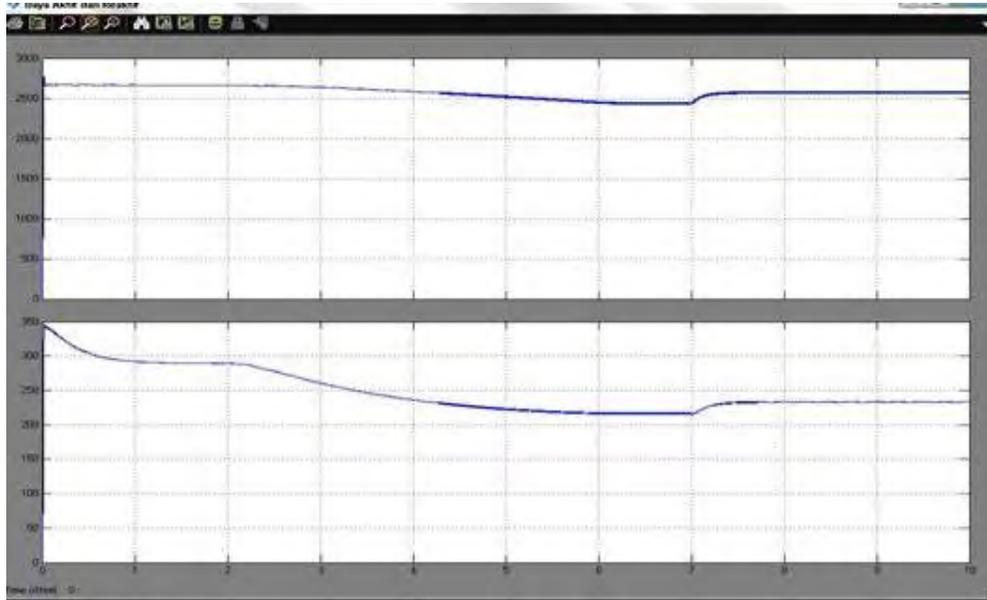
$$\omega = k \cdot I \quad (4.2)$$

Dengan adanya perubahan arus ini, maka dapat mempengaruhi besar torsi elektromagnetis yang timbul pada motor induksi, dimana dengan adanya perubahan arus dapat mempengaruhi perubahan torsi elektromagnetis karena keduanya saling berbanding lurus.

Dari simulasi ini, dapat disimpulkan bahwa kecepatan putar motor induksi tiga fasa meningkat ketika torsi masukan yang diberikan ke motor turun, dan akan berkurang seiring dengan penambahan torsi masukan motor. Perubahan torsi yang terjadi secara tiba-tiba membuat terjadi fluktuasi kecepatan putar motor sebelum akhirnya motor mencapai keadaan tunak atau besar kecepatan putar yang baru.



Gambar 4.2. Grafik Torsi elektromagnetik motor induksi tanpa pengereman dinamik.



Gambar 4.3. Grafik Daya pada terminal stator motor induksi tiga fasa tanpa pengereman dinamik

4.2 Analisis Hasil Simulasi Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Pengereman Dinamik

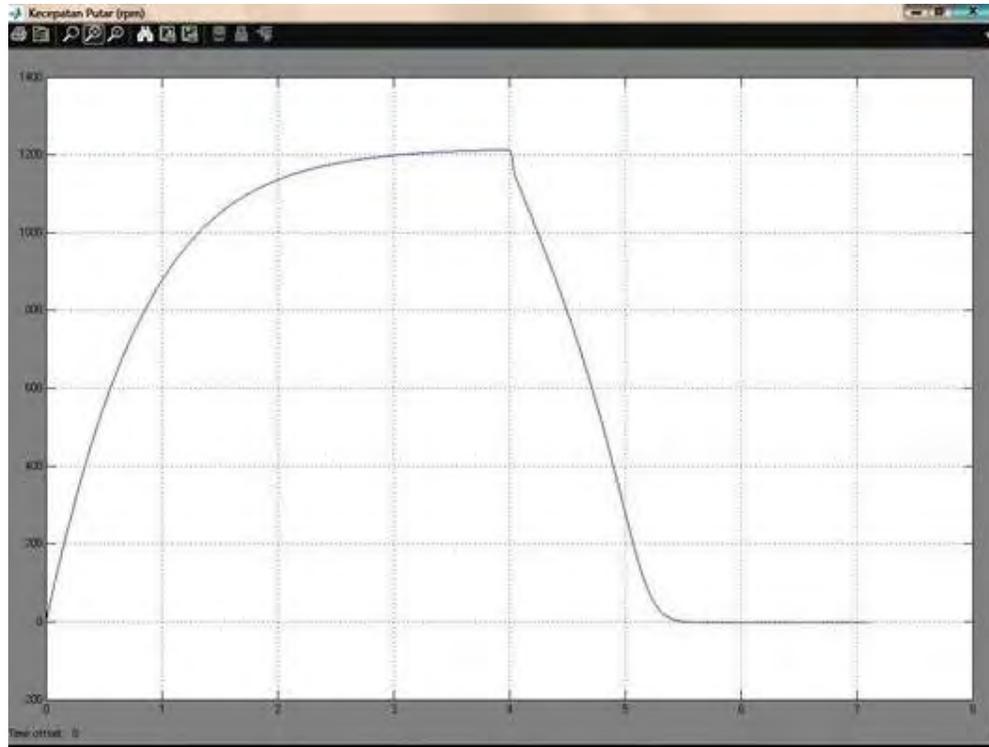
Simulasi ini adalah simulasi pengaturan penghentian putaran pada sistem motor induksi tiga fasa dengan menggunakan pengereman dinamik. Pada simulasi ini rangkaian pengereman dinamik yang berfungsi menginjeksikan arus searah dihubungkan dengan motor induksi tiga fasa dan beban resistif 7500 watt pada salah satu fasanya yang dihubungkan secara paralel.

Besar arus searah yang akan diinjeksikan ke kumparan stator dapat dihitung tergantung dari konfigurasi yang digunakan saat dihubungkan ke stator. Namun pada skripsi ini tidak dibahas lebih lanjut tentang konfigurasi yang dapat digunakan dan besar arus injeksi yang diperoleh. Skripsi ini dibatasi hanya menganalisis karakteristik waktu penghentian motor induksi tiga fasa dengan menggunakan pengereman dinamik. Pada simulasi ini, torsi yang diberikan dibuat tetap, yaitu nol. Hal ini dengan pengertian bahwa motor sedang beroperasi dalam keadaan tanpa beban. Pada terminal inputan, diberikan beban resistif satu fasa sebesar 7500 watt yang dihubungkan secara paralel. Pemberian beban pada salah satu fasa ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik motor induksi setelah

pengereman, ketika kecepatan putar rotor lebih besar dari kecepatan medan putar stator sehingga motor mengembalikan daya ke sumber.

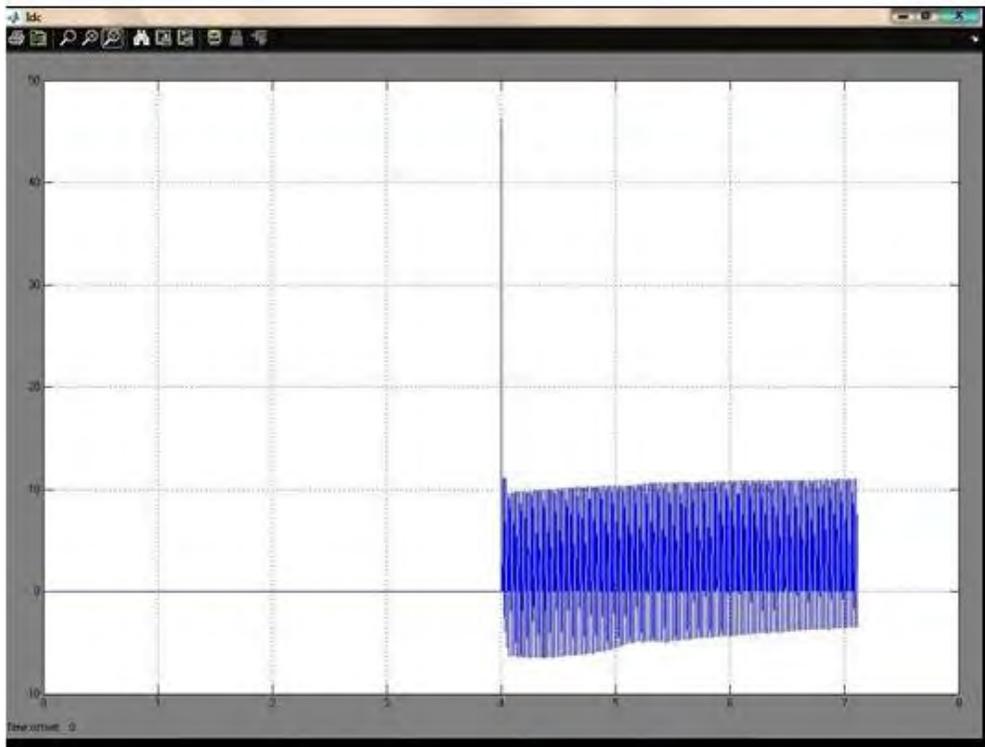
Pada simulasi ini juga akan dilihat pengaruh tegangan masukan dengan kecepatan penghentian motor induksi, atau saat kecepatan putar berada pada kondisi nol. Torsi beban yang diberikan sebesar nol agar motor induksi berputar pada kecepatan nominalnya. Adapun cara kerja simulasi ini pertama-tama adalah dengan memberikan catu tegangan bolak-balik dengan variasi tegangan yaitu 380 Volt, 220 Volt dan 110 Volt. Setelah dijalankan sampai detik keempat, breaker yang menghubungkan jala-jala dengan rangkaian pengereman dan juga beban resistif berada dalam posisi terhubung singkat dan breaker yang menghubungkan jala-jala dan sumber diputus. Kemudian maka akan mengalir arus searah ke kumparan stator dan menimbulkan medan magnet stasioner ke dalam motor induksi yang resultannya akan saling mengurangi sehingga kecepatan motor induksi akan berkurang. Hasil dari simulasi ini akan kita lihat pengaruh perubahan arus, daya, torsi elektromagnetik, tegangan stator, dan waktu pengereman motor induksi.

Saat tegangan terminal sebesar 110 Volt kita berikan sebagai sumber motor induksi dapat dilihat grafik kecepatan putar motor induksi dibawah ini (gambar 4.7), pada detik keempat ketika arus searah mulai diinjeksikan, terlihat kecepatan motor turun sampai pada posisi nol dalam waktu kurang lebih 1,4 detik, kemudian pada detik ke-7,2 motor berhenti berputar.



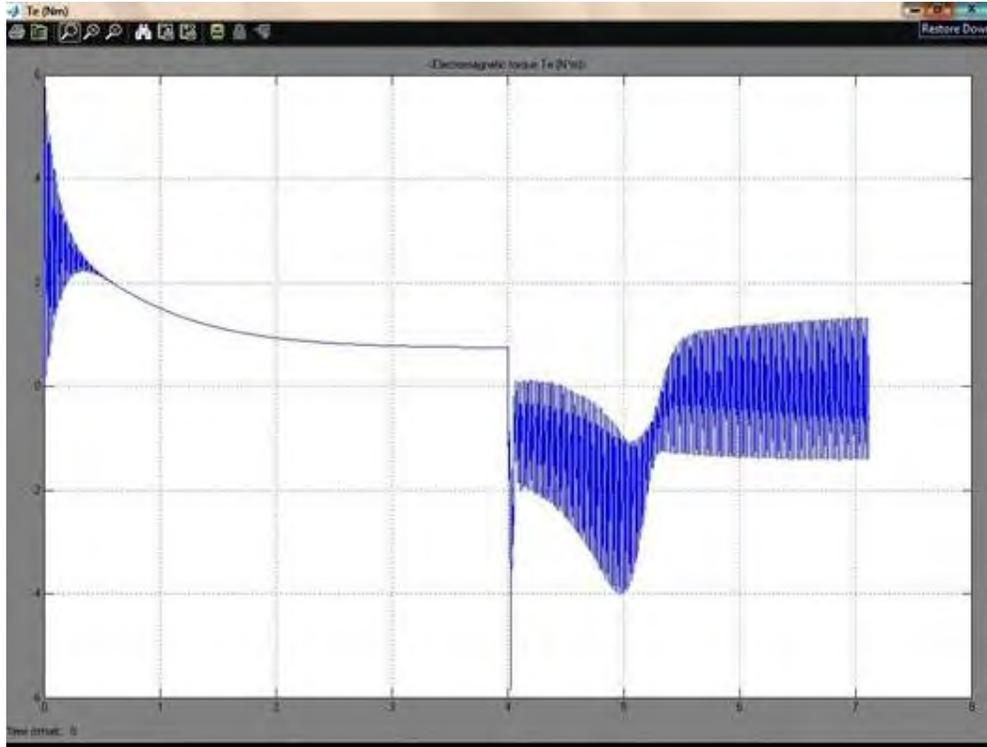
Gambar 4.4. Grafik kecepatan putar dengan pengereman dinamik motor induksi 110 Volt.

Arus searah yang diinjeksikan ke kumparan stator mengalami lonjakan hampir lima kalilipat dari keadaan tunaknya setelah dihubungkan ke motor induksi. Lonjakan sebesar kurang lebih 50 Ampere itu terjadi sangat cepat sebelum turun menjadi kurang lebih 11 Ampere.



Gambar 4.5. Grafik injeksi arus searah tegangan terminal 110 Volt

Grafik kecepatan putar motor induksi ketika dilakukan pengereman dinamik memperlihatkan bahwa ketika rangkaian pengereman dinamik terhubung ke stator, mempengaruhi besar torsi elektromagnetik dari motor induksi. Pada simulasi ini, motor induksi juga menghasilkan daya reaktif. Hal ini menyebabkan arus pada bagian stator motor induksi tiga fasa mengalami perubahan akibat daya reaktif yang dihasilkan. Apabila daya reaktif yang dihasilkan semakin tinggi, maka arus pada bagian stator juga akan semakin tinggi. Demikian pula jika daya reaktif yang dihasilkan motor induksi berkurang, maka arus pada bagian stator motor induksi tiga fasa juga berkurang.



Gambar 4.6. Grafik torsi elektromagnetik pengereman dinamik 110 Volt

Pada grafik 4.6 diatas terlihat setelah dilakukan pengereman, grafik torsi elektromagnetik tersebut mengalami riak diantara garis sumbu nol. Dibandingkan dengan keadaan tanpa pengereman dinamik, dimana grafiknya relatif stabil. Hal ini dapat dikarenakan adanya penambahan beban resistif satu fasa pada terminal, yang dapat saja dianggap sebagai gangguan satu fasa oleh sistem motor induksi tiga fasa ini. Perubahan arus stator juga dapat dapat memepengaruhi besar torsi elektromagnetik pada motor induksi tiga fasa. Apabila besar arus bertambah maka torsi elektromagnetik yang dihasilkan juga bertambah, demikian pula sebaliknya. Hal ini sesuai dengan persamaan torsi elektromagnetik pada motor induksi yang dinyatakan pada persamaan dibawah ini :

$$T_{em} = k_t \cdot \Phi \cdot I_a \quad (4.3)$$

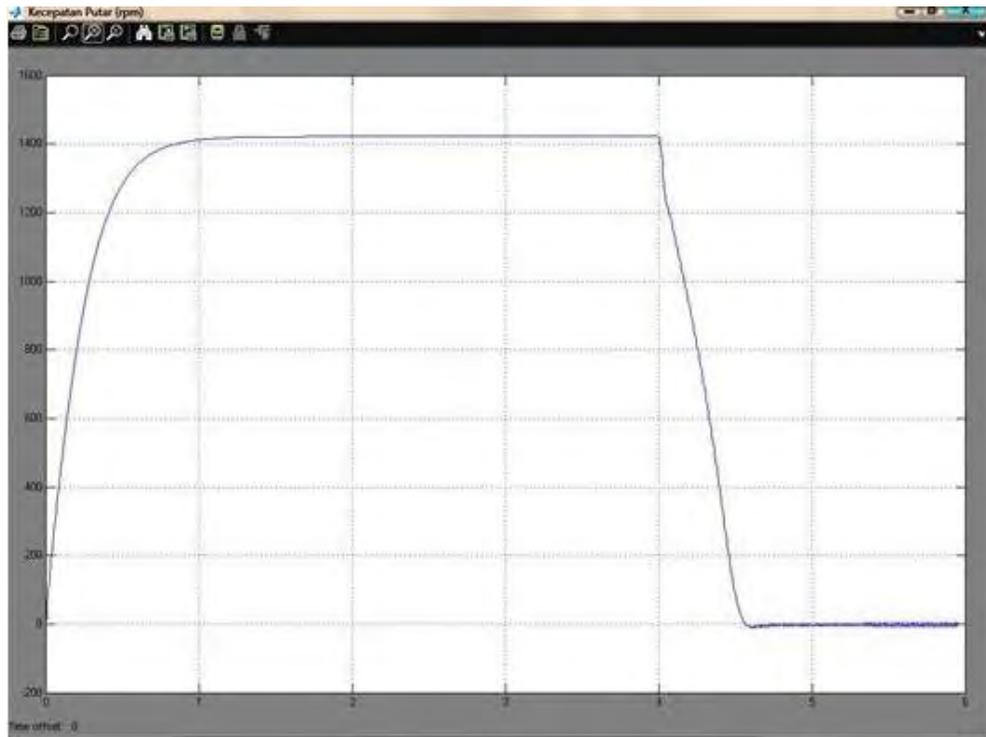
Dimana,

T_{em} = torsi elektromagnetik

Φ = fluks magnetik

I_a = arus pada bagian stator

Besar torsi elektromagnetik ini akan mempengaruhi kecepatan putar dari motor induksi tiga fasa, karena interaksi medan resultan dan gaya gerak magnet rotor akan mengembangkan torsi yang berlawanan dengan torsi motor. Pada simulasi ini, nilai torsi yang diberikan pada motor induksi tiga fasa dibuat tetap sebesar nol, sehingga terlihat dari grafik torsi elektromagnetik yang timbul juga tetap sebelum terjadi pengereman pada detik keempat.

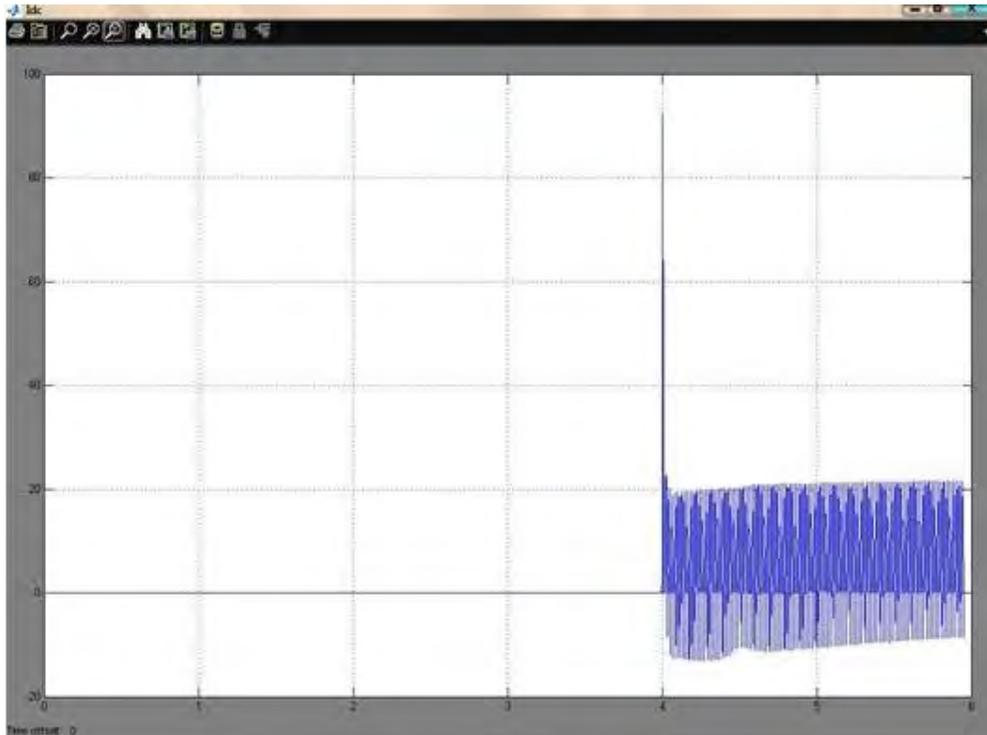


Gambar 4.7. Grafik kecepatan putar dengan pengereman dinamik motor induksi 220 Volt.

Ketika tegangan terminal dinaikkan menjadi 220 Volt pada grafik 4.7 diatas terlihat setelah dilakukan pengereman pada detik keempat kecepatan motor induksi tiga fasa turun sampai sumbu nol dalam waktu kurang lebih 0,6 detik dan kemudian berhenti pada detik ke-6. Hal ini menunjukkan setelah tegangan terminal dinaikkan maka waktu berhenti motor induksi tiga fasa lebih cepat. Hal ini dikarenakan semakin besar tegangan, maka semakin besar juga arus yang timbul sehingga medan magnet stasioner yang akan terbentuk untuk pengereman lebih cepat.

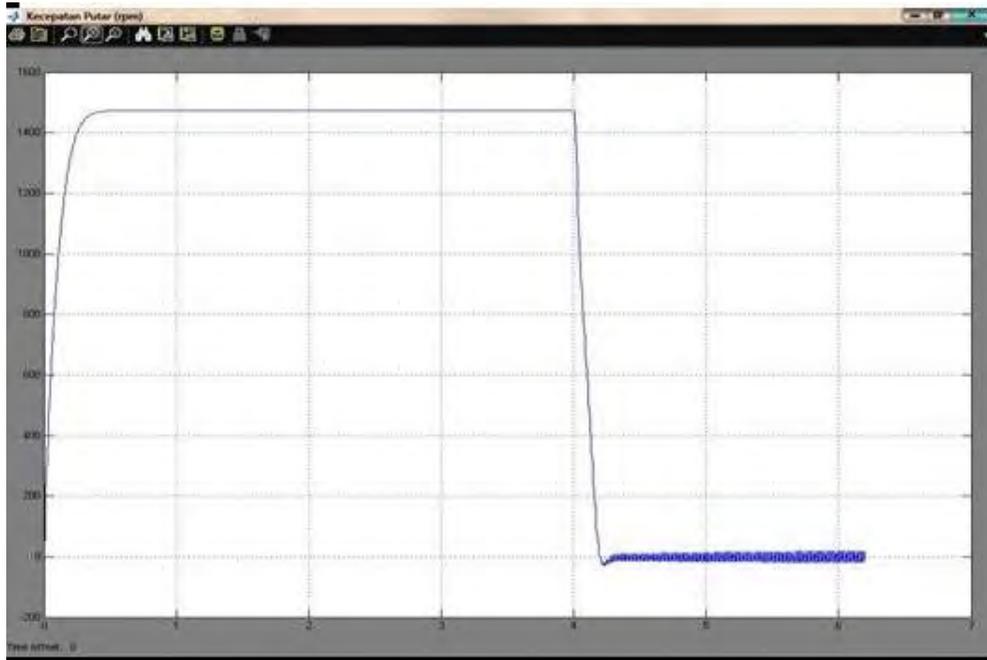
Berikut ini merupakan grafik arus injeksi pada pengereman dinamik motor induksi tiga fasa saat tegangan terminal 220 Volt, dimana dengan penambahan tegangan sebesar 2 kali lipat maka arus yang dihasilkan juga dua kali lipat besarnya dari yang sebelumnya, yaitu kurang lebih 22,42 Ampere. Hal ini menyatakan arus yang timbul sebanding dengan besar tegangan yang diberikan sesuai dengan yang dinyatakan hukum ohm berikut :

$$V = I \cdot R \quad (4.4)$$



Gambar 4.8. Grafik injeksi arus searah tegangan terminal 220 Volt

Sedangkan untuk besar tegangan terminal diberikan 380 Volt, pada grafik terlihat bahwa motor induksi pada grafik berikut ini terlihat setelah dilakukan pengereman pada detik keempat kecepatan motor induksi tiga fasa turun sampai sumbu nol dalam waktu yang lebih cepat dari sebelumnya, yaitu kurang lebih 0,2 detik dan kemudian berhenti pada detik ke-5,8. Hal ini menunjukkan setelah tegangan terminal dinaikkan maka waktu berhenti motor induksi tiga fasa lebih cepat, atau dapat dikatakan juga bahwa semakin pengereman lebih cepat terjadi jika tegangan terminal motor mendekati tegangan nominal motor itu sendiri.



Gambar 4.9. Grafik kecepatan putar dengan pengereman dinamik motor induksi 380 Volt.

Adapun yang harus diperhatikan juga adalah perubahan arus injeksi yang terjadi, dimana pada saat tegangan 110 Volt diinjeksikan arus sebesar 11 Ampere, saat tegangan dinaikkan dua kali lipat yaitu sebesar 220 Volt, arus searah yang diinjeksikan sebesar dua kali lipat juga yaitu kurang lebih 22,42 Ampere. Ketika dinaikkan lagi sebesar 380 Volt, arus yang diinjeksikan melalui pengereman dinamik ini menjadi bertambah besar lagi yaitu sebesar kurang lebih 38,4 Ampere. Bertambahnya besar arus yang diinjeksikan menjadikan motor juga semakin cepat berhenti.

Berikut ini merupakan grafik perbandingan besar arus dan lama waktu penghentian motor induksi tiga fasa dengan pengereman dinamik :

Tabel 4.1. Perbandingan Perubahan Tegangan, Arus injeksi dan Waktu berhenti

Tegangan (V)	Arus Injeksi (A)	Waktu Berhenti (t)
110	11	1,4
220	22,42	0,6
380	38,4	0,2

BAB 5

KESIMPULAN

1. Penggunaan pengereman dinamik dapat digunakan untuk memperlambat dan juga dapat menghentikan putaran motor induksi tiga fasa dalam waktu yang relatif singkat dan tanpa hentakan yang biasanya dapat terjadi jika kita menggunakan pengereman mekanik.
2. Pada tegangan 380 Volt, injeksi besar arus injeksi motor induksi adalah 38,4 Ampere dengan waktu motor berhenti yaitu pada detik ke-0,2 setelah rangkaian dihubungkan dengan rangkaian pengereman dinamik. Sedangkan untuk tegangan terminal 220 Volt dan 110 Volt, besar arus injeksi masing-masing sebesar 22,42 Ampere dan 11 Ampere, dengan waktu motor berhenti pada detik ke-0,6 dan ke-1,4.
3. Rata-rata besar arus injeksi yang diperoleh dari simulasi yang dilakukan adalah sebesar 23,94 Ampere, dengan rata-rata waktu berhenti sebesar 0,733 detik setelah dilakukan pengereman dinamik.
4. Penurunan kecepatan motor induksi dapat diakibatkan oleh meningkatnya torsi masukan dan torsi elektromagnetik melawan arah torsi masukan sehingga dapat mengurangi kecepatan motor induksi.

DAFTAR ACUAN

- [1] Nieke Wulansari, Pengendali Tegangan DC Link pada Pengereman Regeneratif Motor Induksi Tiga Fasa, Skripsi, Juni 2005
- [2] Winna Evelina Analisis Karakteristik Pengaturan VAR Pada Generator Induksi Berpenguat Sendiri Dengan Menggunakan Kondensor Sinkron, Skripsi, Juni 2008
- [3] Krishnan,R.,Electric Motor Drives,Prentice Hall,USA,2001
- [4] Vas, Peter, Electric Machine and Drives: A Space Vector Theory Approach, Oxford University, New York, 1992
- [5] Zuhail, Dasar Tenaga Listrik dan Elektronika Daya , Gramedia, Jakarta, 1995
- [6] Fitzgerald, A, E.,Jr, Charles, Kingsley.,Umans, Stephen, D,Electric Machinery, 6th edition,Mc Graw Hill, 2003
- [7] Arthur Mychael, AC Machines, McGrawHill, 1986
- [8] Vedam Subrahmanyam, Electric Drives, Concepts and Applications, Tata McGraw-Hill, New Delhi, 1994.
- [9] Chapman, Stephen J.,”Electric Machinery and Power System Fundamentals”, McGraw-Hill, New York, 2002.

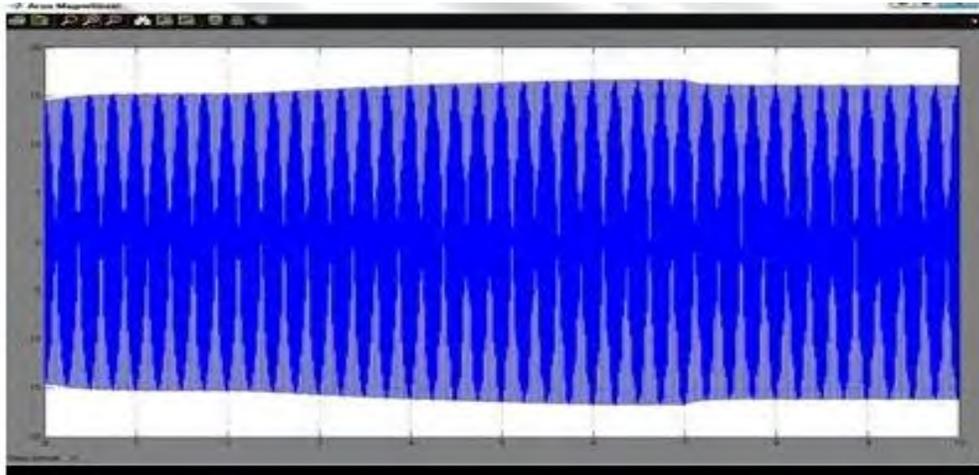
DAFTAR PUSTAKA

- Arthur Mychael, *AC Machines*, McGrawHill, 1986
- Chapman, Stephen J., "*Electric Machinery and Power System Fundamentals*",
McGraw-Hill, New York, 2002.
- Fitzgerald, A. E., Jr, Charles, Kingsley., Umans, Stephen, D, *Electric Machinery*,
6th edition, Mc Graw Hill, 2003
- Krishnan, R., *Electric Motor Drives*, Prentice Hall, USA, 2001
- Nieke Wulansari, *Pengendali Tegangan DC Link pada Pengereman
Regeneratif Motor Induksi Tiga Fasa*, Skripsi, Juni 2005
- Vas, Peter, *Electric Machine and Drives: A Space Vector Theory Approach*,
Oxford University, New York, 1992
- Vedam Subrahmanyam, *Electric Drives, Concepts and Applications*, Tata
McGraw-Hill, New Delhi, 1994.
- Winna Evelina, *Analisis Karakteristik Pengaturan VAR Pada Generator Induksi
Berpenguat Sendiri Dengan Menggunakan Kondensor Sinkron*, Skripsi, Juni
2008
- Zuhal, *Dasar Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*, Gramedia, Jakarta, 1995

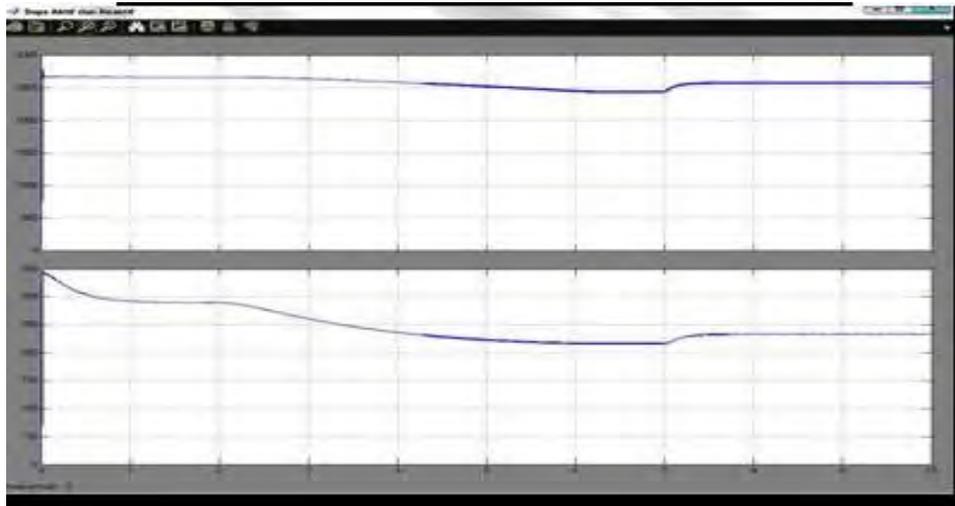
LAMPIRAN

Lampiran 1 Gambar Grafik Hasil Simulasi

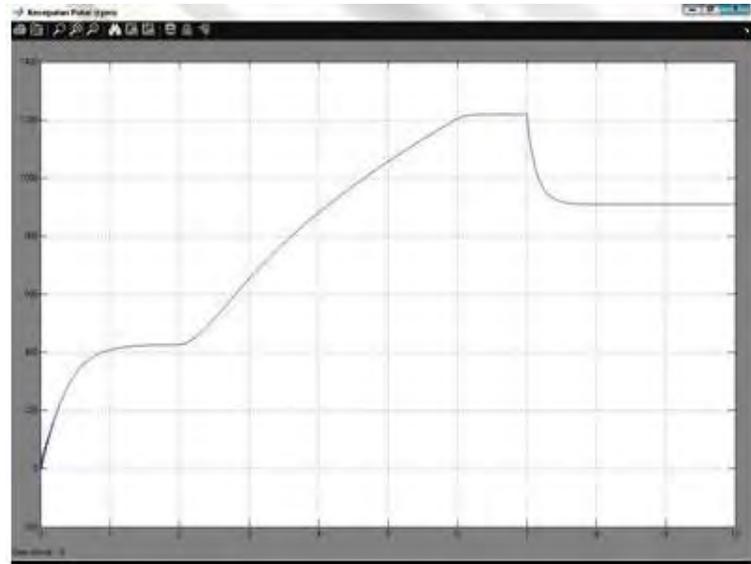
Hasil Simulasi Sistem Tanpa Pengereman Dinamik



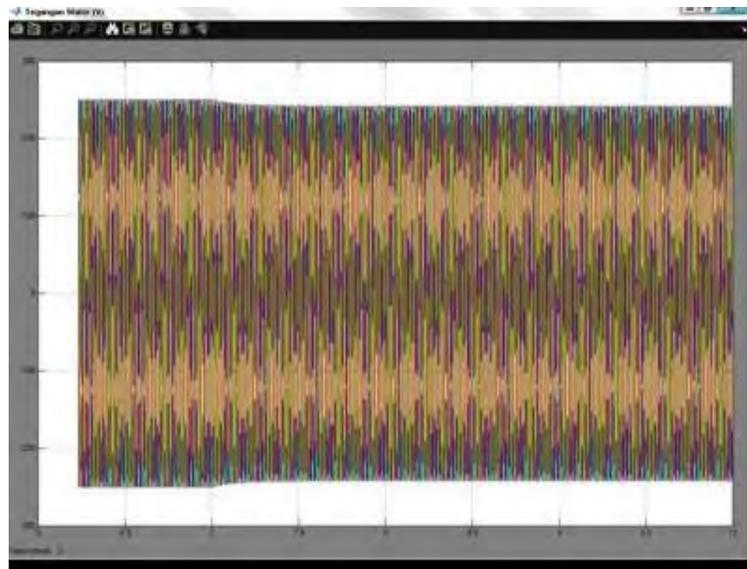
Grafik Arus Magnetisasi Stator Motor Induksi Tanpa Pengereman Dinamik



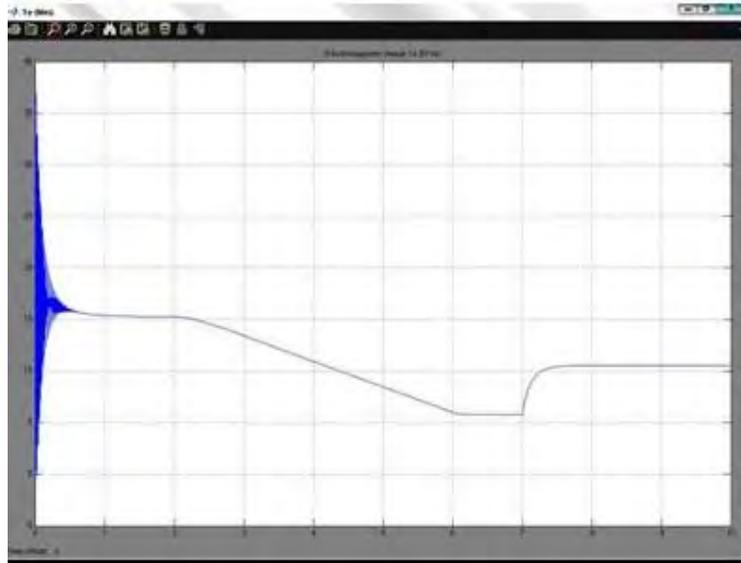
Grafik Daya Aktif (atas) dan Reaktif (bawah) pada Terminal Stator Motor Induksi



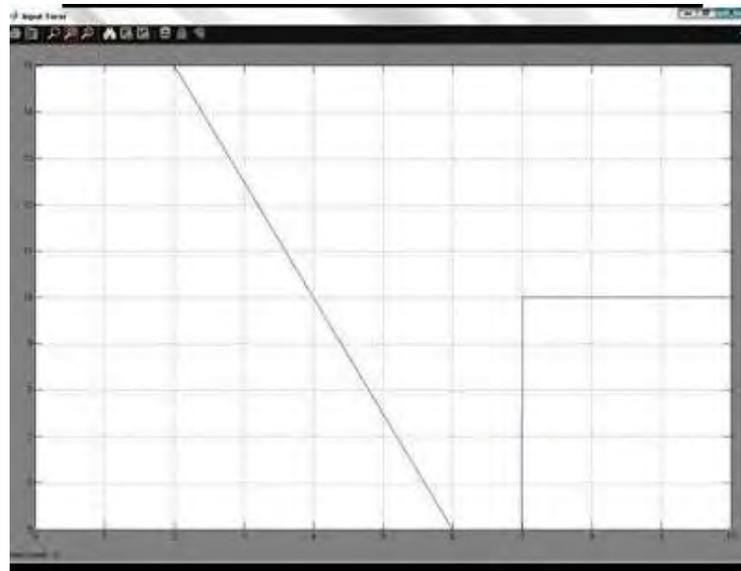
Grafik Kecepatan Putar Rotor Motor Induksi Tiga Fasa Tanpa Pengereman Dinamik



Grafik Tegangan Stator Motor Induksi Tiga Fasa Tanpa Pengereman Dinamik

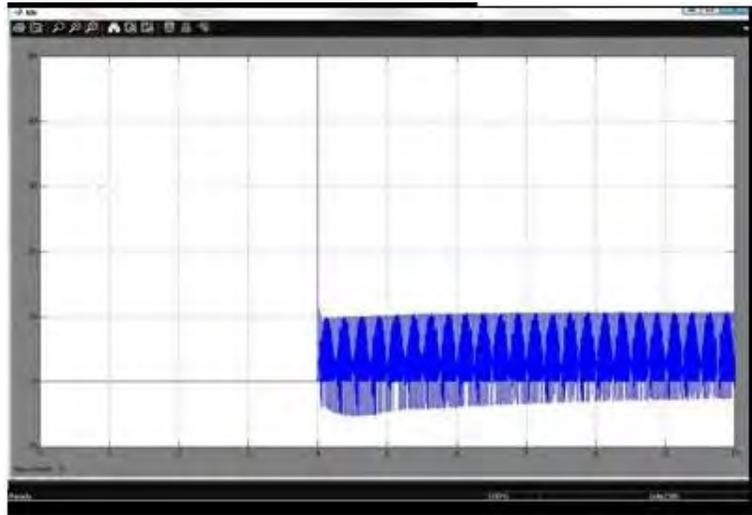


Grafik Torsi Elektromagnetik Motor Induksi Tiga Fasa Tanpa Pengereman Dinamik

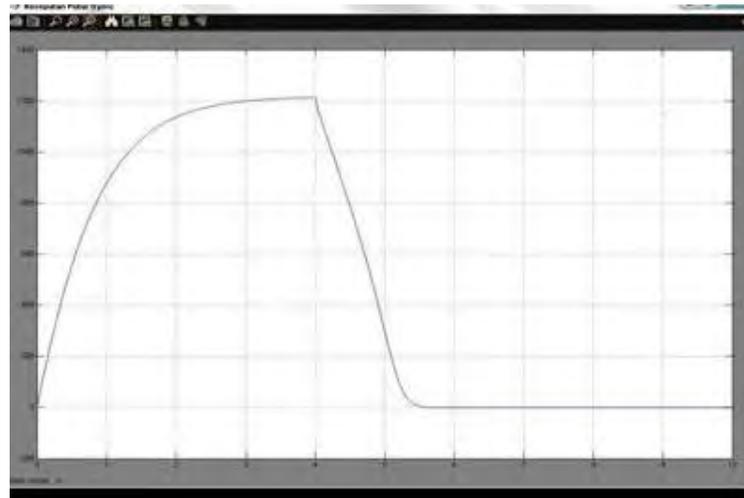


Grafik Perubahan Torsi Inputan Motor Induksi Tiga Fasa Tanpa Pengereman Dinamik

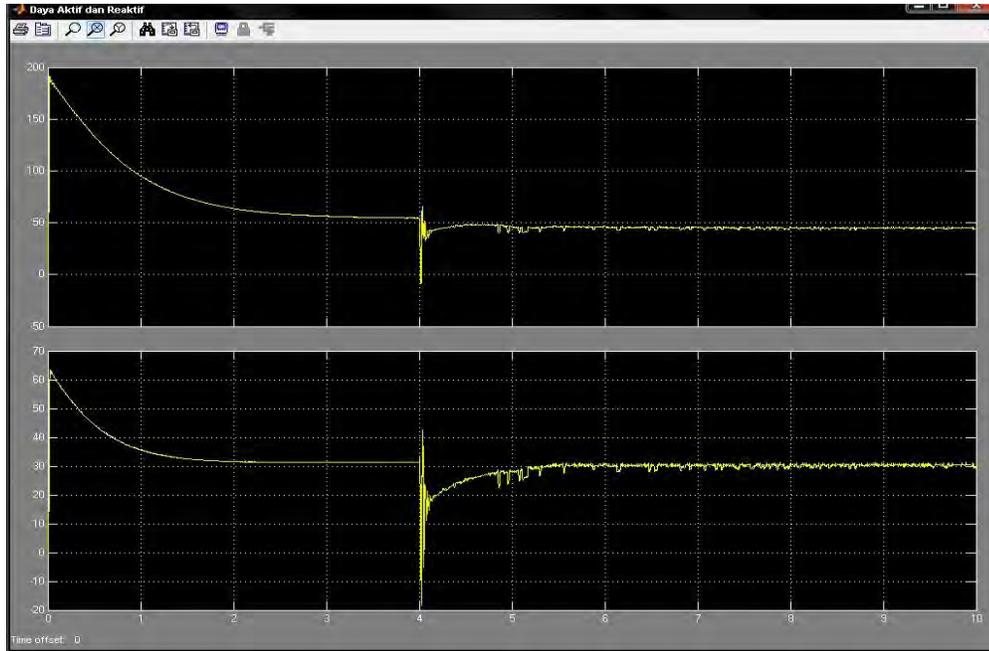
Hasil Simulasi Sistem Dengan Pengereman Dinamik



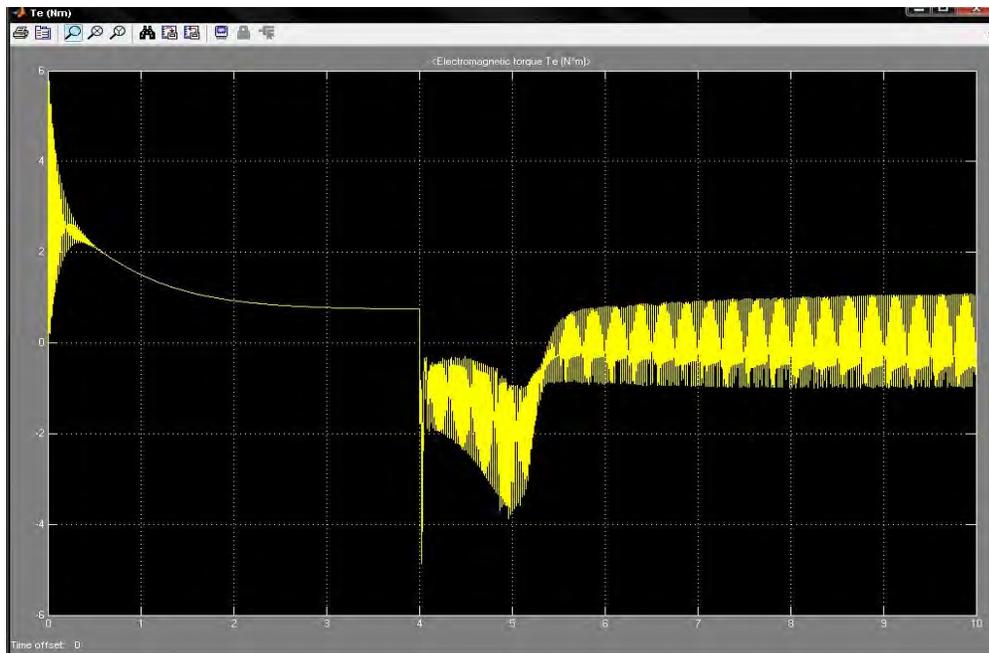
Grafik Arus Injeksi Pengereman Dinamik Tegangan Terminal 110 volt



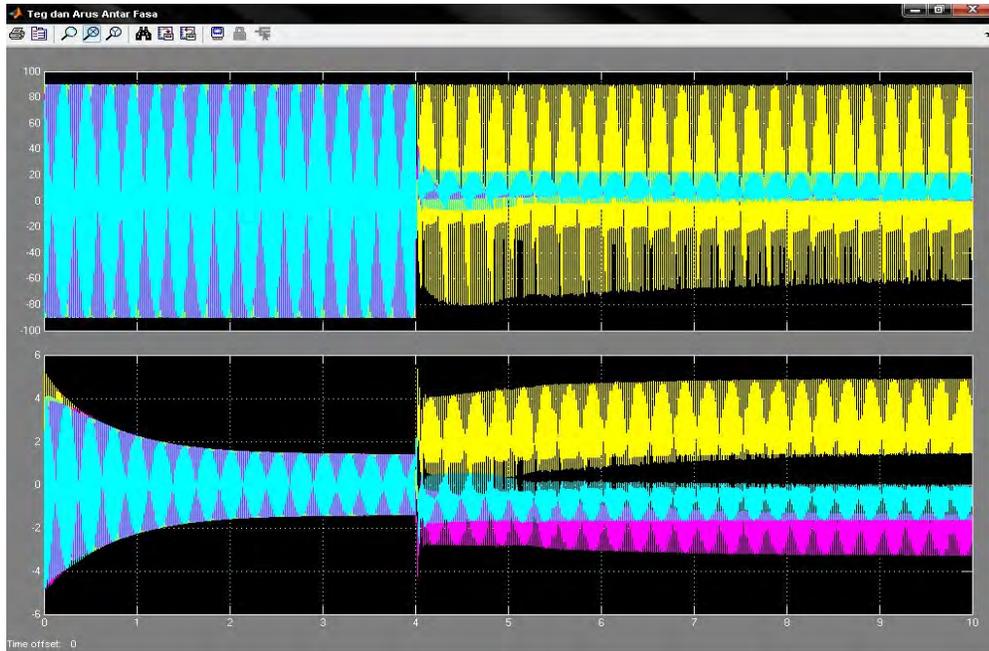
Grafik Kecepatan Putar Pengereman Dinamik Tegangan Terminal 110 volt



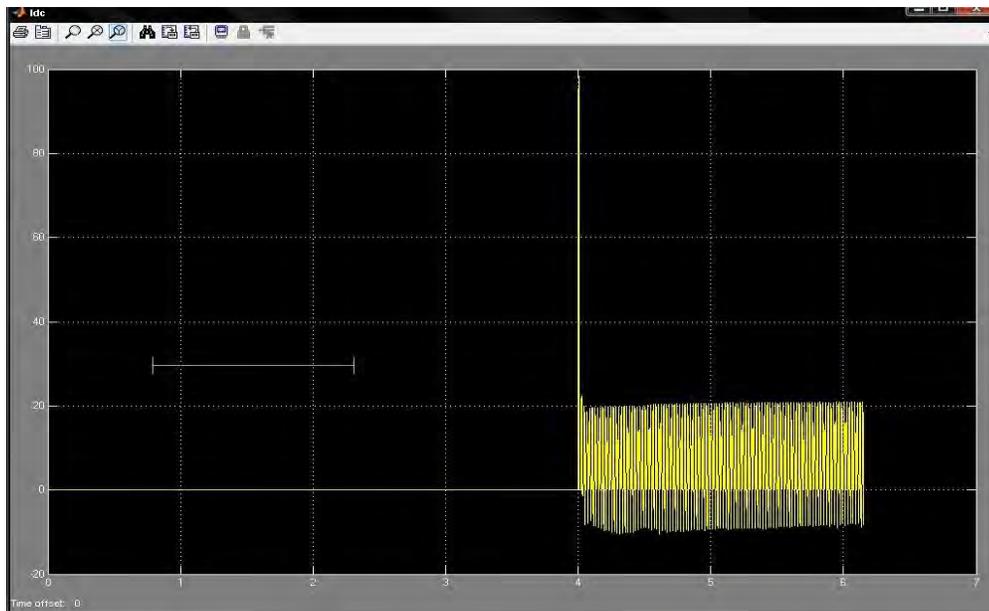
Grafik Daya Aktif dan Reaktif Pengereman Dinamik Tegangan Terminal 110 volt



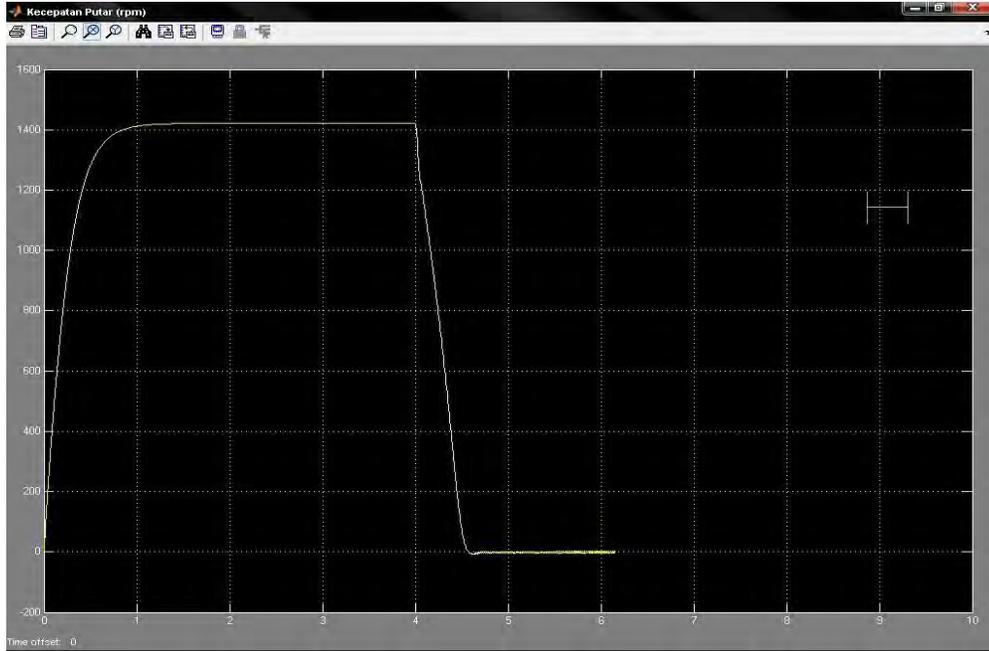
Grafik Torsi Elektromagnetik Pengereman Dinamik Tegangan Terminal 110 volt



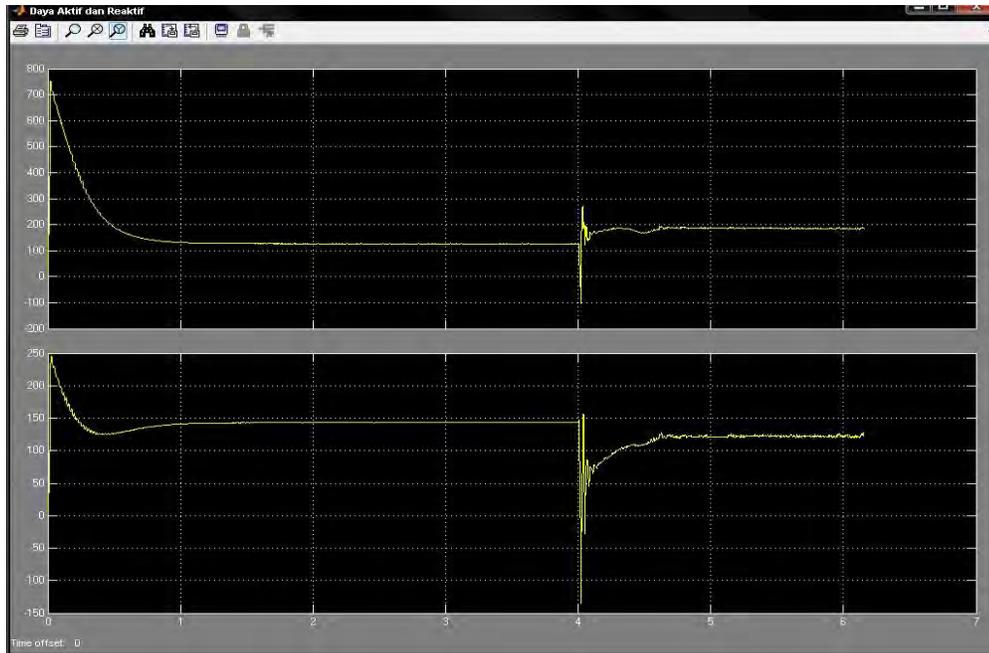
Grafik Tegangan dan Arus Antar Fasa Pengereman Dinamik Tegangan Terminal 110 volt



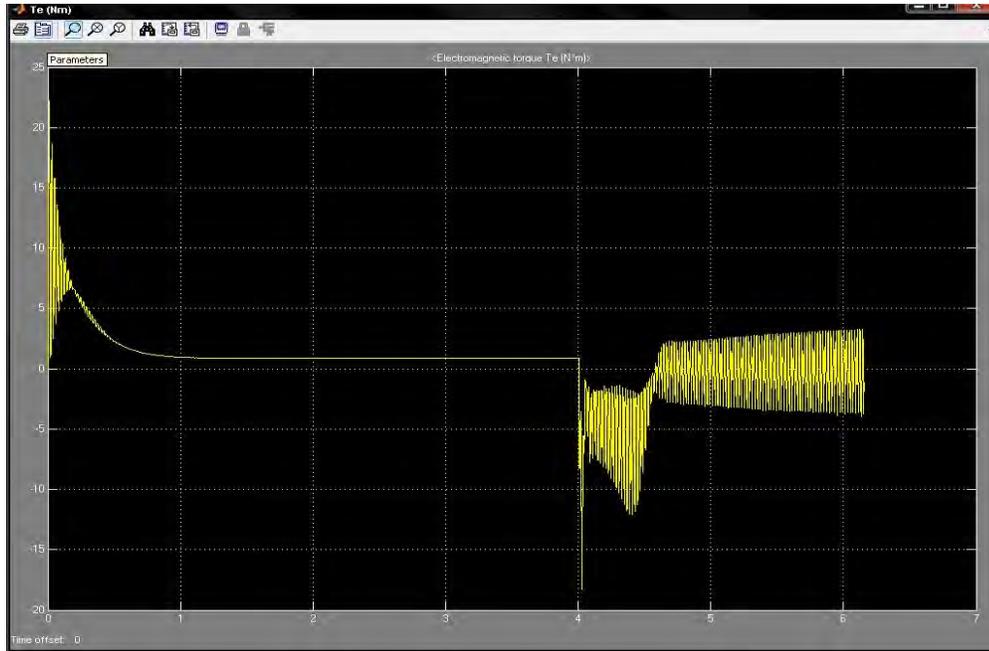
Grafik Arus Injeksi Pengereman Dinamik Tegangan Terminal 220 volt



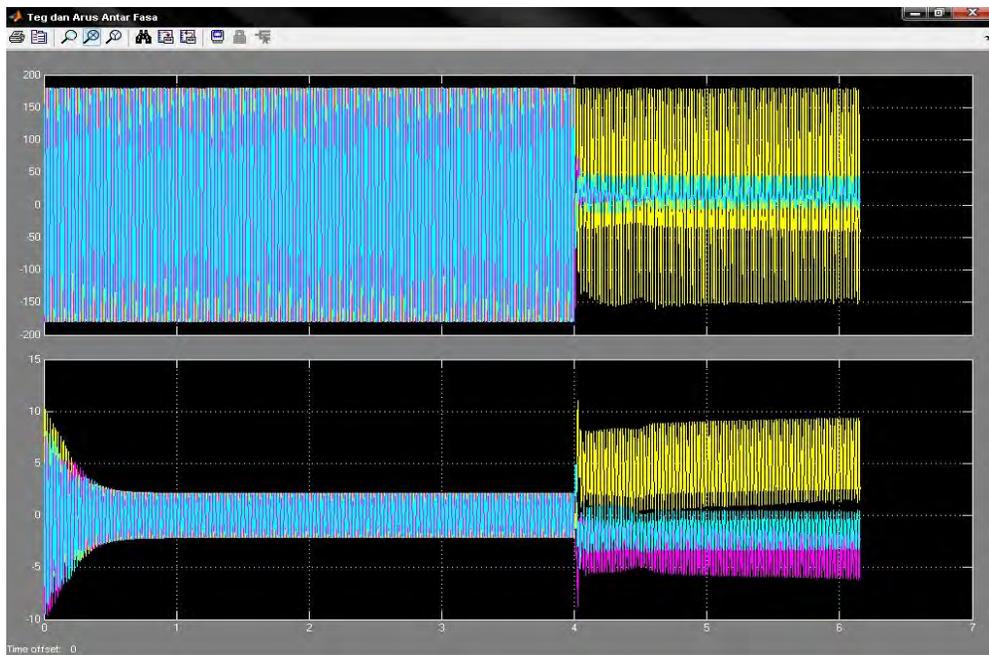
Grafik Kecepatan Putar Pengereman Dinamik Tegangan Terminal 220 volt



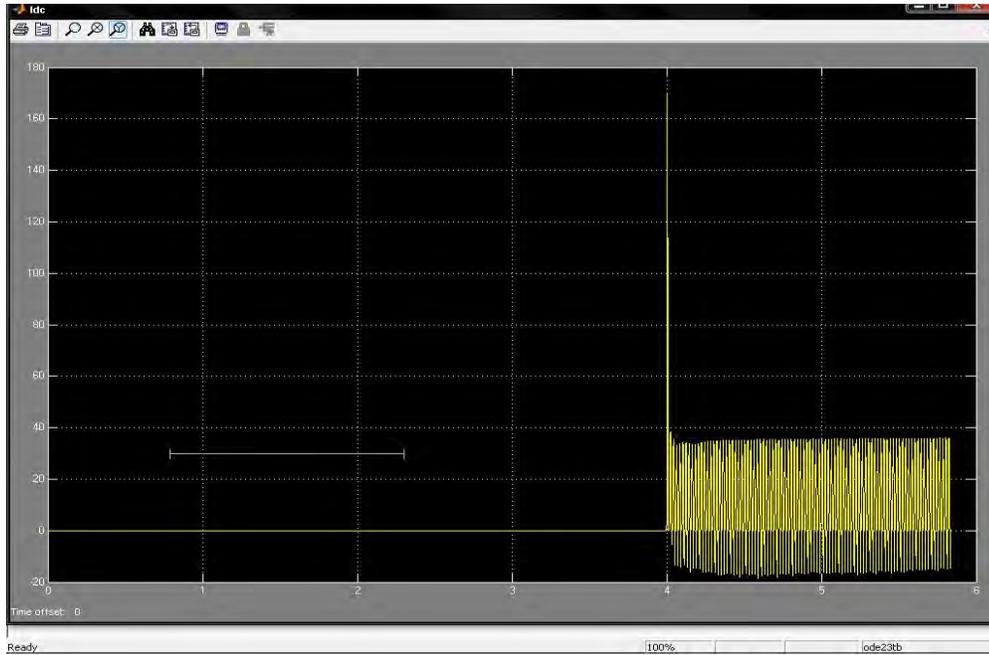
Grafik Daya Aktif dan Reaktif Pengereman Dinamik Tegangan Terminal 220 volt



Grafik Torsi Elektromagnetik Pengereman Dinamik Tegangan Terminal 220 volt



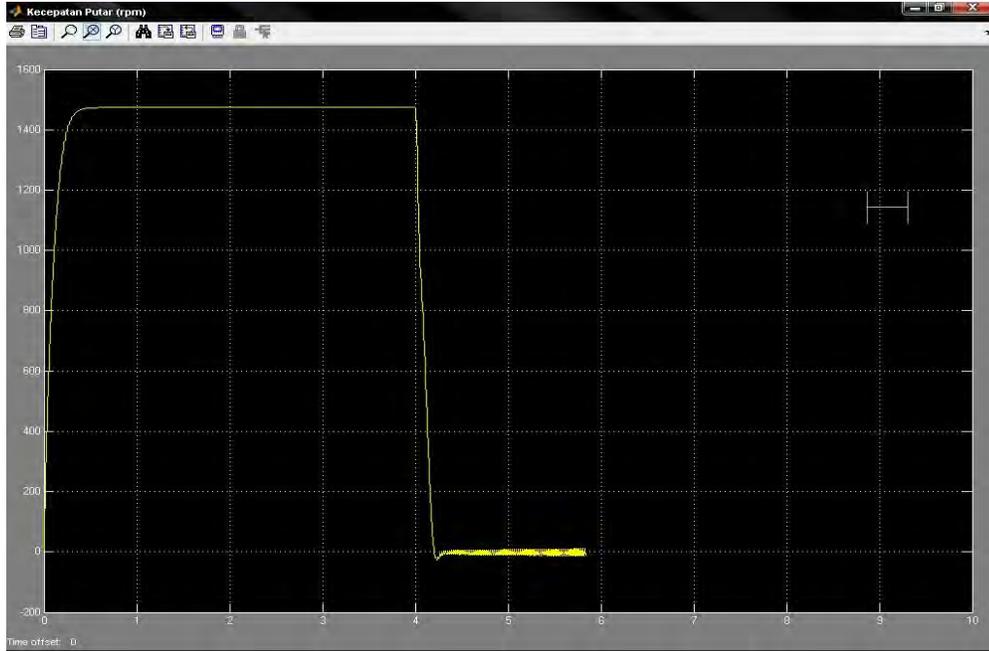
Grafik Tegangan dan Arus Antar Fasa Pengereman Dinamik Tegangan Terminal 220 volt



Grafik Arus Injeksi Pengereman Dinamik Tegangan Terminal 380 volt



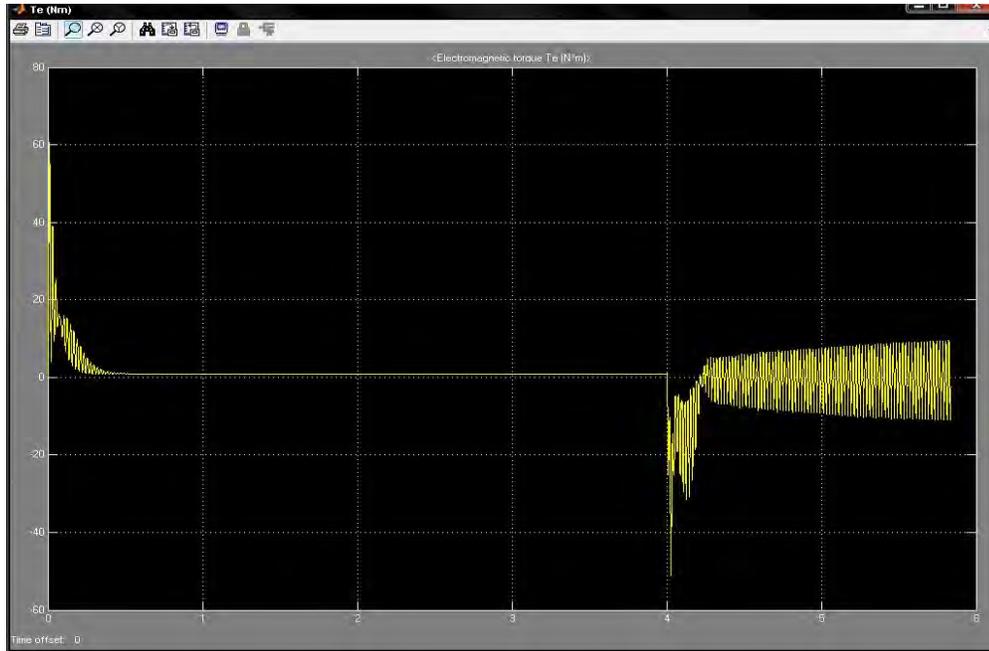
Grafik Arus Beban Resistif Pengereman Dinamik Tegangan Terminal 380 volt



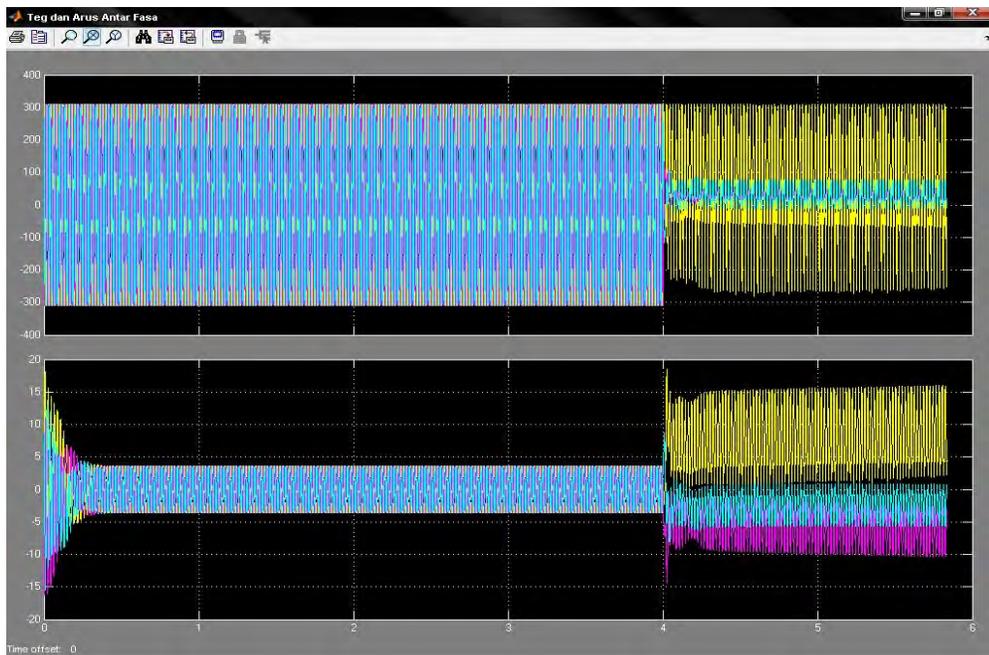
Grafik Kecepatan Putar Pengereman Dinamik Tegangan Terminal 380 volt



Grafik Daya Aktif dan Reaktif Pengereman Dinamik Tegangan Terminal 380 volt

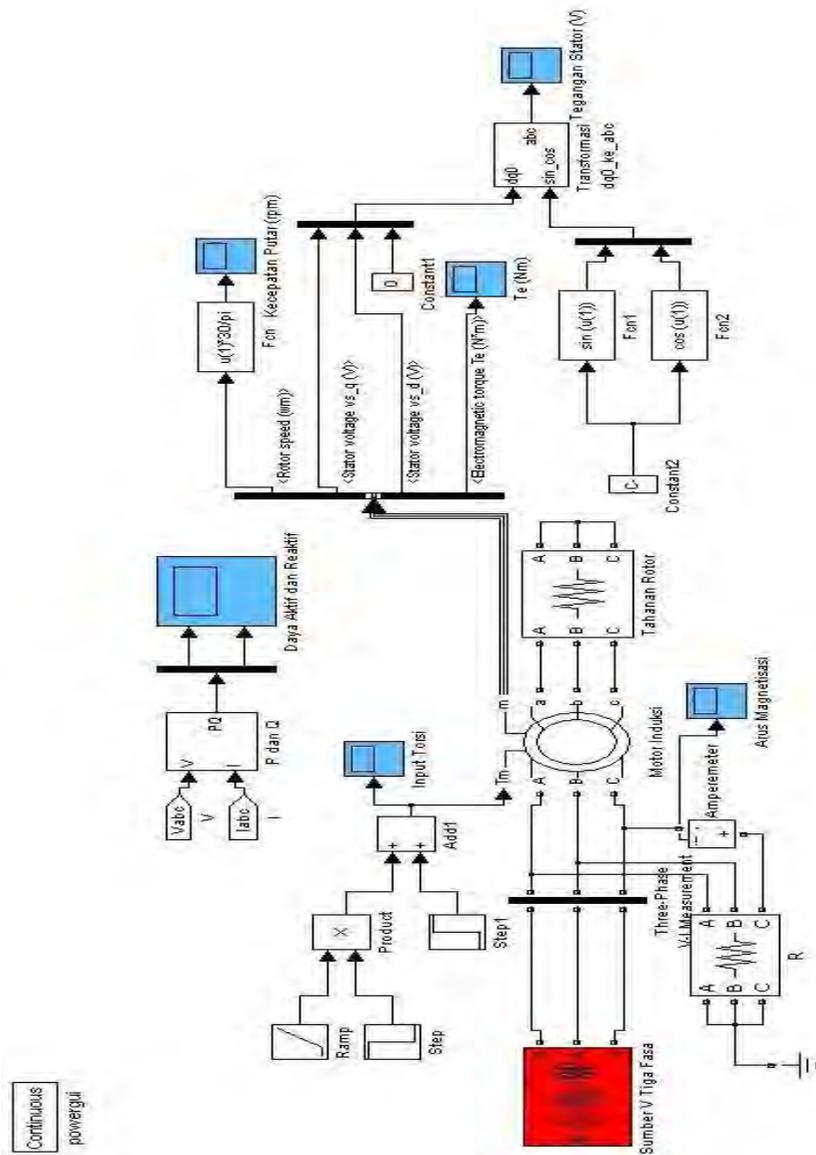


Grafik Torsi Elektromagnetik Pengereman Dinamik Tegangan Terminal 380 volt

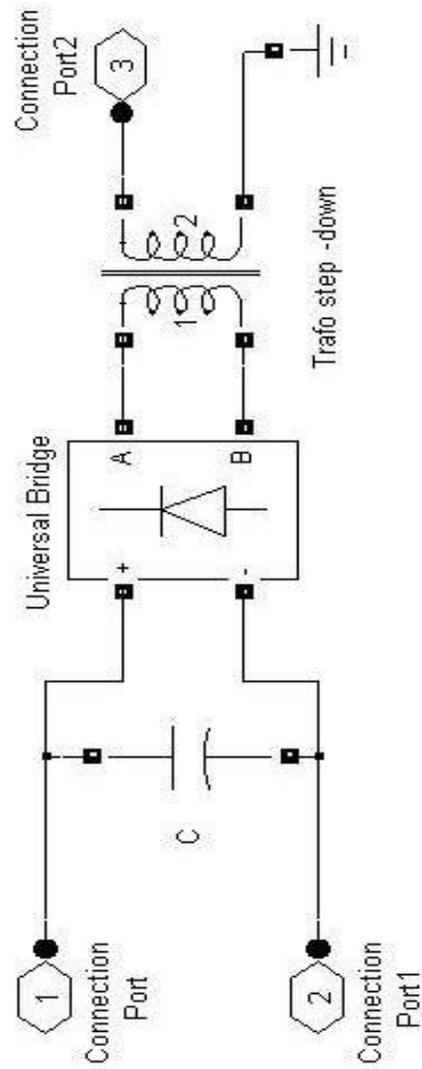


Grafik Tegangan dan Arus Antar Fasa Pengereman Dinamik Tegangan Terminal 380 volt

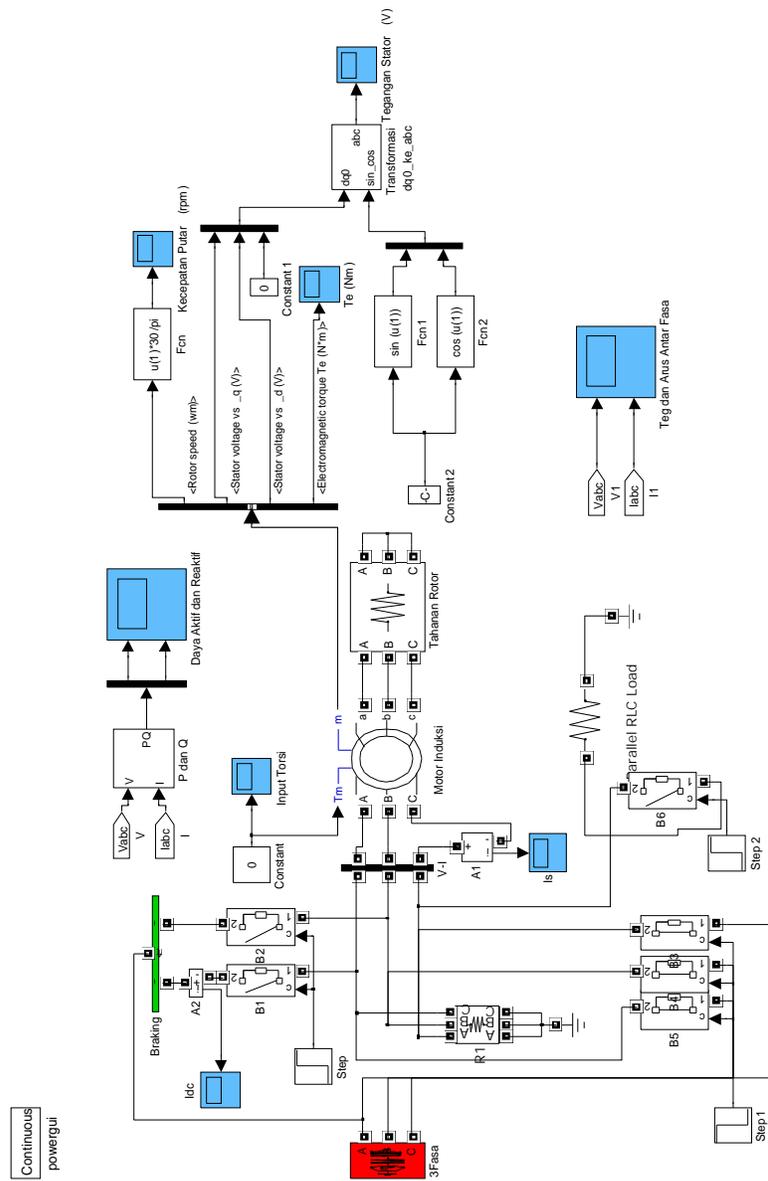
Lampiran 2 Rangkaian Simulasi



Rangkaian Simulasi Motor Induksi Tiga Fasa Tanpa Pengeraman Dinamik



Rangkaian Simulasi Penyearah Satu Fasa Gelombang Penuh



Rangkaian Simulasi Penghentian Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Menggunakan Metode Pengereman Dinamik