



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH RESISTANSI DI STATOR TERHADAP
PUTARAN MOTOR INDUKSI TIGA PHASA SANGKAR
TUPAI DENGAN KENDALI TORSI LANGSUNG
MENGUNAKAN PI**

TESIS

VECTOR ANGGIT PRATOMO

08 06 42 47 75

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
KEKHUSUSAN TEKNIK KONTROL INDUSTRI
JULI 2012**

PERNYATAAN ORISINILITAS TESIS

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

Nama : Vector Anggit Pratomo

NPM : 08 06 42 47 75

Tanda Tangan : 

Tanggal : 2 Juli 2012

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis dengan judul:

PENGARUH RESISTANSI DI STATOR TERHADAP PUTARAN MOTOR INDUKSI TIGA PHASA SANGKAR TUPAI DENGAN KENDALI TORSI LANGSUNG MENGUNAKAN PI

Dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Magister Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Kekhususan Teknik Kontrol Industri, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Indonesia dan disetujui untuk diajukan dalam presentasi seminar.

Depok, 2 Juli 2012

Dosen Pembimbing,

Pembimbing I



DR. Ir. Ridwan Gunawan, M.T
NIP. 196710081994031002

Pembimbing II



Ir. Aries Subiantoro, M.Sc
NIP. 197003311995121001

PENGESAHAN DEWAN PENGUJI

Tesis ini diajukan oleh :

Nama : Vector Anggit Pratomo
NPM : 0806424775
Program Studi : Teknik Elektro
Kekhususan : Teknik Kontrol Industri
Judul Tesis : PENGARUH RESISTANSI DI STATOR
TERHADAP PUTARAN MOTOR INDUKSI TIGA
PHASA SANGKAR TUPAI DENGAN KENDALI
TORSI LANGSUNG MENGGUNAKAN PI

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Elektro. Kekhususan Teknik Kontrol Industri, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

1. Dr.Ir. Ridwan Gunawan.,MT
2. Ir.Aries Subiantoro.,M.Sc
3. Dr.Abdul Halim
4. Dr.Ir. Feri Yusivar.,M.Eng.



Ditetapkan di : Depok.

Tanggal : 2 Juli 2012

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

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

Nama : Vector Anggit Pratomo
NPM : 0806424775
Kekhususan : Teknik Kontrol Industri
Departemen : Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Tesis

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 :

Pengaruh Resistansi Di Stator Terhadap Putaran Motor Induksi Tiga Phasa Sangkar Tupai Dengan Kendali Torsi Langsung Menggunakan PI

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 : 2 Juli 2012

Yang menyatakan,



(Vector Anggit Pratomo)

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan seminar ini. Penulisan seminar ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Megister Teknik Jurusan Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan seminar ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. DR. Ir. Ridwan Gunawan, M.T. dan Ir. Aries Subiantoro, M.Sc. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini;
2. Fakultas Teknik Universitas Pancasila, yang telah membiayai saya;
3. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
4. Sahabat yang telah membantu saya dalam menyelesaikan seminar ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, Juli 2012



Vector Anggit Pratomo

08 06 42 47 75

ABSTRAK

Nama : Vector Anggit Pratomo
Program studi : Teknik Kontrol Industri
Judul : **Pengaruh Resistansi Di Stator Terhadap Putaran Motor Induksi Tiga Fasa Sangkar Tupai Dengan Kendali Torsi Langsung Menggunakan PI**

Motor induksi tiga fasa sangkar tupai memiliki perubahan karakteristik jika terjadi perubahan pada temperature diluar batas kerja dari motor, yang menyebabkan terjadinya perubahan nilai resistansi di stator sehingga mempengaruhi dari unjuk kerja kecepatan putar motor, perubahan kecepatan putar motor disebabkan oleh besarn fluks yang dibangkitkan arus terhadap resistansi yang berada distator.

Tesis ini bertujuan untuk memperhatikan karakteristi kecepatan putaran motor induksi tiga Fasa sangkar tupai terhadap perubahan nilai resistansi di stator menggunakan pengendali PI dengan sensor dari kecepatan motor dimana acuan pemodelan motor yang digunakan adalah arus stator dan fluks stator. Pendekatan perubahan resistansi menggunakan pendekatan persamaan dari jumlah belitan di setiap fasa pada stator. Penggunaan metode Kendali Torsi Langsung dikarenakan proses dari kecepatan motor ditentukan oleh fluks stator, torsi, dan posisi sektor untuk menentukan masukan dari *switching inverter* yang diperoleh dari *Lookup Table*. Nilai resistansi pada fluks estimasi memberikan nilai *hysteresis band* terhadap performa fluks actual.

Kata kunci : Resistansi stator, motor induksi, Kendali Torsi Langsung, Pengendali PI

ABSTRACT

Name : Vector Anggit Pratomo
Study Program : Teknik Kontrol Industri
Title : **The Effect Of Resistance In Round Stator Amount The Three Phase Induction Motor Squirrel Cage Using Direct Torque Control and PI Controller**

The Three-phase induction motor squirrel cage has a characteristic change in the event of a change in temperature beyond the work of the motor, which leads to changes in the stator so that the resistance value affects the performance of the rotational speed of the motor, the motor rotation speed changes are influenced by the amount flux generated by the flow of resistance is stator.

This thesis aims to monitoring the motor rotation speed a characteristic three phase squirrel cage induction againts shift in the stator resistance value using a PI controller with a sensor of the motor speed in which the reference modeling is used motor stator current and stator flux. Approach using the resistance change of approach to equality of the number of turns in each phase in the stator. Use of Direct Torque Control method because the process of the motor speed is determined by the stator flux, torque, and position the sector to determine the input of inverter switching obtained from the Lookup Table. The value of resistance in flux estimation gives the value of the flux hysteresis band against actual performance.

Keywords : stator resistance, induction motor, direct torque control, the PI controller

DAFTAR ISI

Halaman

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN ORISINILITAS TESIS	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
PENGESAHAN DEWAN PENGUJI.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
KATA PENGANTAR	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR SINGKATAN	xv
DAFTAR ISTILAH / SIMBOL	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Susunan Penulisan.....	2
1.5 Sistematika Penelitian	2
BAB 2 TEORI MOTOR INDUKSI 3 PHASA	4
2.1 Motor Induksi Secara Umum.....	4
2.2 Prinsip Kerja Motor Induksi 3 Phasa	5
2.3 Teori Kerangka Acuan	8
2.4 Model Motor Induksi Kerangka acuan sumbu qd.....	11
2.5 Motor Induksi dengan Jumlah Belitan	15
2.5.1 Penentuan Induksi	20
2.6 Model motor Induksi dengan Jumlah Belitan Stator.....	23
2.7 Metode Kendali Torsi Langsung.....	28
2.7.1 Komperator Histerisis.....	29
2.7.2 Komperator Histerisis Torsi Tiga Level.....	29
2.7.3 Komperator Histerisis Fluks Dua Level	30
2.7.4 Inverter Sumber Tegangan	34
2.7.5 Estimasi Model Tegangan	35
BAB 3 PERANCANGAN PENGENDALI	37
3.1 Perancangan Pengendali.....	37
3.2 Uji <i>Stability, Observability, dan controllability</i>	37
3.2.1 <i>Satbility</i> Model Motor Induksi Tiga Phasa Sangkar Tupai	38
3.2.2 <i>Controllability</i> Model Motor Induksi Tiga Phasa Sangkar Tupai	39
3.3 Pengendalian kecepatan motor Proposional dan Integral.....	39
3.4 Pemodelan motor induksi	40
3.5 Pemodelan Torsi Dan Kecepatan Motor	41
3.6 Estimasi Fluks dan Fluks Posisi.....	41
3.7 Pengendali Hysterisis Fluks dan Torsi	42

ix

3.8 Pengendali Proposional dan Integral.....	43
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISA.....	44
4.1 Prosedur Simulasi.....	44
4.1.1 Simulasi Perubahan Kecepatan Motor dengan Jumlah Belitan Setimbang Tanpa Beban.....	44
4.1.2 Simulasi Perubahan Kecepatan Motor dengan Jumlah Belitan Tidak Setimbang Tanpa Beban.....	44
4.2 Simulasi Dengan 2 HP.....	45
4.3 Simulasi dengan Jumlah Belitan Simetris Pada Phasa A 252 Phasa B 252 dan Phasa C 252.....	46
4.4 Simulasi dengan Jumlah Belitan Pada Phasa A 242 Phasa B 252 dan Phasa C 252 dan Jumlah Belitan Pada Phasa A 252 Phasa B 242 dan Phasa C 252.....	50
4.5 Simulasi dengan Jumlah Belitan Pada Phasa A 222 Phasa B 252 dan Phasa C 252 dan Jumlah Belitan Pada Phasa A 252 Phasa B 222 dan Phasa C 252.....	52
4.6 Simulasi dengan Jumlah Belitan Pada Phasa A 200 Phasa B 252 dan Phasa C 252 dan Jumlah Belitan Pada Phasa A 252 Phasa B 200 dan Phasa C 252.....	55
BAB 5 KESIMPULAN.....	68
DAFTAR PUSTAKA.....	69
DAFTAR ACUAN.....	71
LAMPIRAN.....	72

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1	Arah Gaya Magnet Sesuia dengan Aturan Tangan Kanan..... 6
Gambar 2.2	Arus Tiga Phasa..... 6
Gambar 2.3	a. Gaya gerak Magnet pada saat t1 7
	b. Gaya gerak Magnet pada saat t2..... 7
	c. Gaya gerak Magnet pada saat t3 7
	d. Gaya gerak Magnet pada saat t4..... 7
Gambar 2.4	Transformasi tiga phasa ke dua phasa 9
Gambar 2.5	Transformasi dua Phasa diam ke dua phasa berputas..... 10
Gambar 2.6	Rangkaian ekivalent dari motor induksi 15
Gambar 2.7	Rangkaian RL 3 Phasa 16
Gambar 2.8	Pemindahan belitan motor induksi..... 23
Gambar 2.9	Rangkaian Dasar Kendali Torsi Langsung..... 29
Gambar 2.10	Komperator Histerisi Torsi Tiga Level..... 30
Gambar 2.12	Komparator Histerisis Fluks Dua Level..... 31
Gambar 2.13	Vektor tegangan saat fluks stator dalam sektor 1..... 32
Gambar 2.14	Vektor tegangan saat fluks stator dalam sektor 2..... 32
Gambar 2.15	Vektor tegangan saat fluks stator dalam sektor 3..... 33
Gambar 2.16	Vektor tegangan saat fluks stator dalam sektor 4..... 33
Gambar 2.17	Vektor tegangan saat fluks stator dalam sektor 5..... 33
Gambar 2.18	Vektor tegangan saat fluks stator dalam sektor 6..... 33
Gambar 2.19	Diagram inverter sumber tegangan..... 34
Gambar 3.1	Blok Diagram Pengendali Torsi Langsung menggunakan pengendali kecepatan motor dengan metode PI 37
Gambar 3.2	Blok Diagram Pengendali Kecepatan..... 40
Gambar 3.3	Model Motor Induksi 40
Gambar 3.5	Pemodelan Torsi dan kecepatan motor 41
Gambar 3.6	Estimasi Fluks dan Fluks Posisi 41
Gambar 3.7	Fluks Histerisis 42
Gambar 3.8	Histerisis Torsi..... 42
Gambar 3.9	Voltage Source Inverter 43
Gambar 4.1	Kecepatan Motor dengan Jumlah Belitan pada phasa A 252 Phasa B 252 dan Phasa C 252..... 46
Gambar 4.2	Arus Pada Phasa A dengan Jumlah Belitan pada phasa A 252 Phasa B 252 dan Phasa C 252..... 47
Gambar 4.3	Arus Pada Phasa B dengan Jumlah Belitan pada phasa A 252 Phasa B 252 dan Phasa C 252..... 47
Gambar 4.4	Fluks dengan Jumlah Belitan pada phasa A 252 Phasa B 252 dan Phasa C 252 48
Gambar 4.5	Torsi elektromagnetik dengan Jumlah Belitan pada phasa A 252 Phasa B 252 dan Phasa C 252..... 48
Gambar 4.6	Inverter dengan Jumlah Belitan pada phasa A 252 Phasa B 252 dan Phasa C 252..... 49

Gambar 4.7(a) Kecepatan Motor dengan Jumlah Belitan pada fase A 242 Fase B 252 dan Fase C 252.....	50
Gambar 4.7(b) Kecepatan Motor dengan Jumlah Belitan pada fase A 252 Fase B 242 dan Fase C 252.....	50
Gambar 4.8(a) Arus Pada Fase A dengan Jumlah Belitan pada fase A 242 Fase B 252 dan Fase C 252.....	50
Gambar 4.8(b) Arus Pada Fase A dengan Jumlah Belitan pada fase A 252 Fase B 242 dan Fase C 252.....	50
Gambar 4.9(a) Arus Pada Fase A dengan Jumlah Belitan pada fase A 252 Fase B 242 dan Fase C 252.....	51
Gambar 4.9(b) Arus Pada Fase B dengan Jumlah Belitan pada fase A 252 Fase B 242 dan Fase C 252.....	51
Gambar 4.10(a) Fluks Pada Fase A dengan Jumlah Belitan pada fase A 252 Fase B 242 dan Fase C 252.....	51
Gambar 4.10(b) Fluks Pada Fase B dengan Jumlah Belitan pada fase A 252 Fase B 242 dan Fase C 252.....	51
Gambar 4.11(a) Torsi Elektromagnetik Pada Fase A dengan Jumlah Belitan pada fase A 252 Fase B 242 dan Fase C 252	51
Gambar 4.11(b) Torsi Elektromagnetik Pada Fase B dengan Jumlah Belitan pada fase A 252 Fase B 242 dan Fase C 252	51
Gambar 4.12(a) Inverter Pada Fase A dengan Jumlah Belitan pada fase A 252 Fase B 242 dan Fase C 252	52
Gambar 4.12(b) Inverter Pada Fase B dengan Jumlah Belitan pada fase A 252 Fase B 242 dan Fase C 252.....	52
Gambar 4.13(a) Kecepatan Motor Pada Fase A dengan Jumlah Belitan pada fase A 222 Fase B 52 dan Fase C 252	52
Gambar 4.13(b) Kecepatan Motor Pada Fase B dengan Jumlah Belitan pada fase A 252 Fase B 222 dan Fase C 252	52
Gambar 4.14(a) Arus Pada Fase A Pada Fase A dengan Jumlah Belitan pada fase A 222 Fase B 252 dan Fase C 252	53
Gambar 4.14(b) Arus Pada Fase A Pada Fase B dengan Jumlah Belitan pada fase A 252 Fase B 222 dan Fase C 252	53
Gambar 4.15(a) Arus Pada Fase B Pada Fase A dengan Jumlah Belitan pada fase A 252 Fase B 222 dan Fase C 252.....	53
Gambar 4.15(b) Arus Pada Fase B Pada Fase B dengan Jumlah Belitan pada fase A 252 Fase B 222 dan Fase C 252	53
Gambar 4.16(a) Fluks Pada Fase A dengan Jumlah Belitan pada fase A 252 Fase B 222 dan Fase C 252.....	53
Gambar 4.16(b) Fluks Pada Fase B dengan Jumlah Belitan pada fase A 252 Fase B 222 dan Fase C 252.....	53
Gambar 4.17(a) Torsi Elektromagnetik Pada Fase A dengan Jumlah Belitan pada fase A 252 Fase B 222 dan Fase C 252	54
Gambar 4.17(b) Torsi Elektromagnetik Pada Fase B dengan Jumlah Belitan pada fase A 252 Fase B 222 dan Fase C 252	54
Gambar 4.18(a) Inverter Pada Fase A dengan Jumlah Belitan pada fase A 252 Fase B 222 dan Fase C 252.....	54
Gambar 4.18(b) inverter Pada Fase B dengan Jumlah Belitan pada fase A 252 Fase B 222 dan Fase C 252	54

Gambar 4.19(a) Kecepatan Motor Pada Phasa A dengan Jumlah Belitan pada phasa A 200 Phasa B 252 dan Phasa C 252	55
Gambar 4.19(b) Kecepatan Motor Pada Phasa B dengan Jumlah Belitan pada phasa A 252 Phasa B 200 dan Phasa C 252	55
Gambar 4.20(a) Arus Pada Phasa A Pada Phasa A dengan Jumlah Belitan pada phasa A 200 Phasa B 252 dan Phasa C 252	55
Gambar 4.20(b) Arus Pada Phasa A Pada Phasa B dengan Jumlah Belitan pada phasa A 252 Phasa B 200 dan Phasa C 252	56
Gambar 4.21(a) Arus Pada Phasa B Pada Phasa A dengan Jumlah Belitan pada phasa A 200 Phasa B 252 dan Phasa C 252	56
Gambar 4.21(b) Arus Pada Phasa B Pada Phasa B dengan Jumlah Belitan pada phasa A 252 Phasa B 200 dan Phasa C 252	56
Gambar 4.226(a) Fluks Pada Phasa A dengan Jumlah Belitan pada phasa A 200 Phasa B 252 dan Phasa C 252	56
Gambar 4.22(b) Fluks Pada Phasa B dengan Jumlah Belitan pada phasa A 252 Phasa B 200 dan Phasa C 252	53
Gambar 4.17(a) Torsi Elektromagnetik Pada Phasa A dengan Jumlah Belitan pada phasa A 200 Phasa B 252 dan Phasa C 252	54
Gambar 4.17(b) Torsi Elektromagnetik Pada Phasa B dengan Jumlah Belitan pada phasa A 252 Phasa B 200 dan Phasa C 252	54
Gambar 4.18(a) Inverter Pada Phasa A dengan Jumlah Belitan pada phasa A 200 Phasa B 252 dan Phasa C 252	57
Gambar 4.18(b) inverter Pada Phasa B dengan Jumlah Belitan pada phasa A 252 Phasa B 200 dan Phasa C 252	57

DAFTAR TABEL

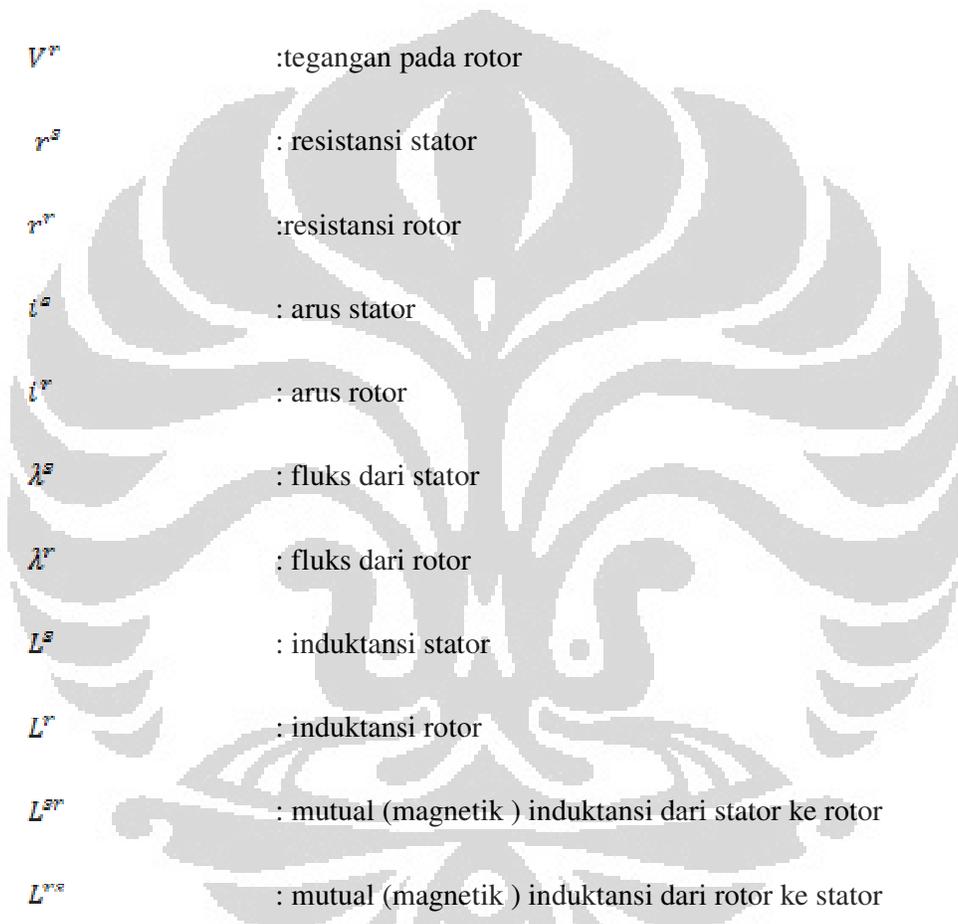
	Halaman
Tabel 2.1	Pemilihan vektor tegangan masing-masing sektor 34
Tabel 2.2	Pensaklaran Inverter berdasarkan Vektor Tegangan 35
Tabel 4.1	Parameter motor 2 HP 45
Tabel 4.2	Nilai resistansi pada fluks estimasi 45



DAFTAR SINGKATAN

f	frekwensi
N_s	Kecepatn sinkron dalam RPM
N_b	Kecepatan dasar dalam RPM
P_e	Jumlah pasang kutub
P	Jumlah kutub
E_{ind}	tegangan induksi
V^s	tegangan pada stator
V^r	tegangan pada rotor
r^s	: resistansi stator
r^r	: resistansi rotor
i^s	: arus stator
i^r	: arus rotor
L^s	: induktansi stator
L^r	: induktansi rotor
L^{sr}	: mutual (magnetik) induktansi dari stator ke rotor
L^{rs}	: mutual (magnetik) induktansi dari rotor ke stator
$(f_{qds0})^T$: Frame Transformasi sumbu qd0
$(f_{abc})^T$: Frame Transformasi sumbu abc
V_{qd0}^s	: tegangan pada stator sumbu qd0
r_{qd0}^s	: resistensi pada stator sumbu qd0
r_{qd0}^r	: resistensi pada rotor sumbu qd0

DAFTAR SIMBOL



V^s	:tegangan pada stator
V^r	:tegangan pada rotor
r^s	: resistansi stator
r^r	:resistansi rotor
i^s	: arus stator
i^r	: arus rotor
λ^s	: fluks dari stator
λ^r	: fluks dari rotor
L^s	: induktansi stator
L^r	: induktansi rotor
L^{sr}	: mutual (magnetik) induktansi dari stator ke rotor
L^{rs}	: mutual (magnetik) induktansi dari rotor ke stator
$(f_{qds0})^T$: Frame Transformasi sumbu $qd0$
$(f_{abc})^T$: Frame Transformasi sumbu abc
V_{qd0}^s	: tegangan pada stator sumbu $qd0$
r_{qd0}^s	: resistensi pada stator sumbu $qd0$

- r_{qd0}^r : resistensi pada rotor sumbu $qd0$
- λ_{qd0}^s : fluks dari pada stator sumbu $qd0$
- v_{ag}, v_{bg} dan v_{cg} : tegangan masukan pada fasa ke ground.
- v_{as}, v_{bs} dan v_{cs} : tegangan masukan pada fasa.
- i_{as}, i_{bs} dan i_{cs} : tegangan masukan pada fasa.
- T_{em} : Torsi pada elektromagnetik pada *shaft* dari motor.
- T_{mech} : Putaran kecepatan rotor yang diperoleh dari torsi *mechanical*.
- T_{damp} : Damping torsi yang diperoleh dari sebrang arah kecepatan rotor
- J : Inersia

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Mesin-mesin produksi di dunia industri banyak menggunakan motor induksi, dan dapat diketahui bahwa yang sering terjadi pada motor induksi adalah induktansi hubungan antar fasa, pengaruh ketidak seimbangan dari tegangan masukan dan karakteristik yang tidak ideal untuk motor induksi dengan pengaruh kedalaman varian pada beban, ketidak setimbangan pada rotor dan temperature yang dihasilkan, sehingga menyebabkan kesalahan kecepatan motor yang disebabkan oleh fluks magnetik stator dikarenakan beberapa jumlah belitan pada stator menjadi terhubung singkat atau dinamakan *inter turn short circuit* membuat resistansi pada stator berubah terutama ketika temperatur pada motor meningkat[1].

Metode Kendali Torsi Langsung (*Direct Torque Control*) yang pertama kali diperkenalkan oleh I. Takashi dan T. Noguchi serta Depenbrock akan digunakan sebagai sistem pengendalian motor induksi dengan sumber tegangan inverter[2-3]. Metode ini memungkinkan pengendalian langsung terhadap torsi dan fluks motor induksi dengan cara melakukan pemilihan vektor tegangan. Pemilihan vektor tegangan dilakukan untuk membatasi torsi dan fluks untuk tetap berada didalam *hysteresis band* dan untuk mendapatkan respon torsi yang sangat cepat.

Pemodelan pada motor induksi dengan jumlah belitan pada setiap fasa di stator akan digunakan untuk melihat performa dari torsi, fluks, arus dan masukan tegangan motor induksi dengan Kendali Torsi Langsung dikarenakan memiliki hubungan dengan pengaruh *resistansi* stator sebagai pembangkit fluks.

Pada penelitian ini dirancang suatu pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa sangkar tupai dengan sensor menggunakan metode PI untuk mendapatkan respon performa kecepatan motor, dengan adanya pengaturan kecepatan ini diharapkan mendapatkan kecepatan motor yang diinginkan jika terjadi perubahan resistansi di stator pada motor induksi tiga fasa sangkar tupai.

1.2 Tujuan

Penelitian pada thesis ini bertujuan untuk mengamati kinerja motor induksi dengan pengaruh perubahan resistansi di stator pada motor induksi, menggunakan kendali torsi langsung dengan pengendali PI dengan sensor, untuk mendapatkan Karakteristik fluks stator, Torsi Elektromagnetik, Tegangan masukan dan arus stator pada kondisi kecepatan motor induksi, agar dapat mendeteksi kerusakan pada motor secara dini yang disebabkan oleh perubahan resistansi di stator.

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian dalam tesis ini ruang lingkup masalah meliputi :

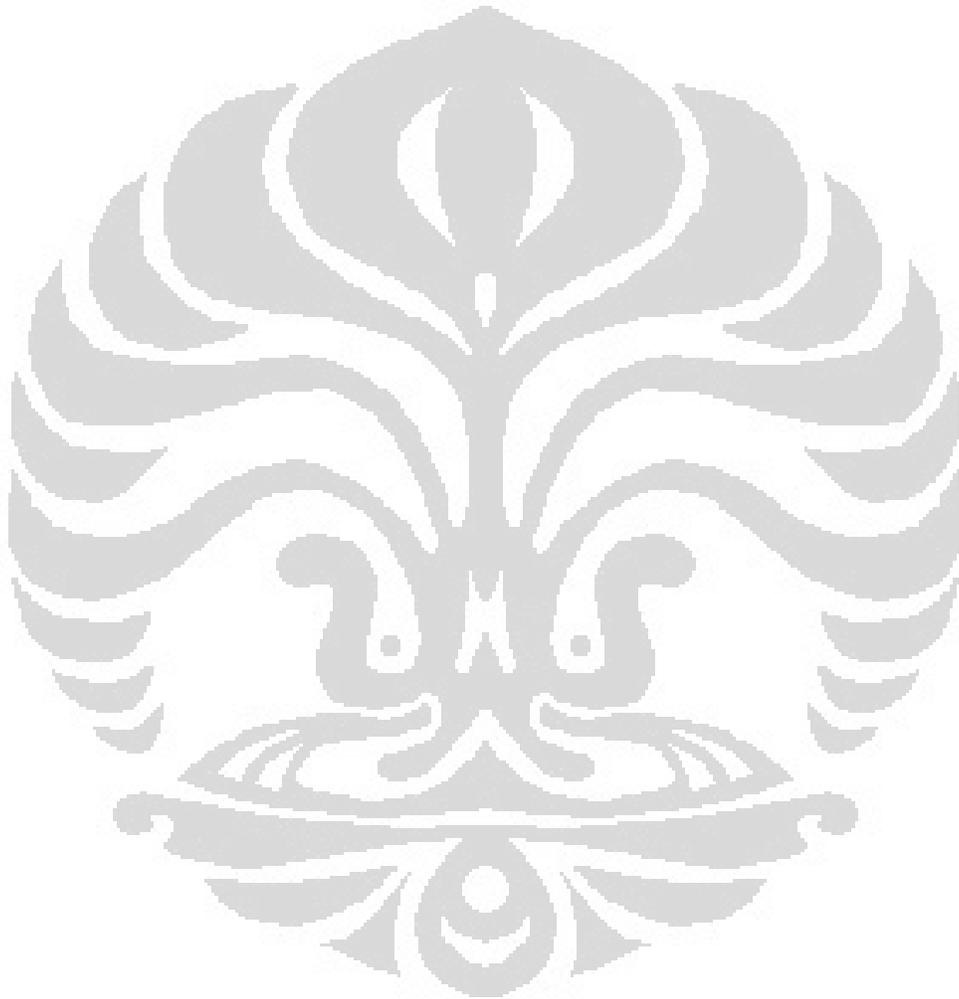
1. Model motor induksi sangkar tupai dengan perubahan resistansi, dimodelkan dengan jumlah belitan stator pada setiap fasa.
2. Jumlah belitan telah ditentukan sebesar 252, 242, 222, 212 dan 200.
3. Motor induksi sangkar tupai tiga fasa yang digunakan adalah model dinamis dengan kerangka acuan stator dengan kapasitas 2 HP, 480 volt, 60 Hz dan 4 pole.
4. Metode kendali motor induksi yang digunakan adalah metode kendali torsi langsung menggunakan PI dengan sensor kecepatan motor dimana besaran $K_p = 0.00316$ dan konstanta integral $K_i = 0.089$.
5. Parameter motor induksi sangkar tupai tiga fasa dihitung menggunakan M-File dan untuk modelnya disimulasikan menggunakan Matlab Simulink versi 7.6.0.3.2.4A.

1.4 Susunan Penulisan

Penulisan laporan ini dibagi kedalam empat bab yang akan menjelaskan secara bertahap mengenai keseluruhan isi seminar ini.

Bab satu merupakan pendahuluan yang berisi latar belakang, tujuan, pembatasan masalah, dan sistematika penulisan. Bab dua diuraikan tentang tinjauan pustaka yang meliputi motor induksi tiga fasa dengan jumlah belitan pada setiap fasa di stator, metode kendali torsi langsung. Bab tiga akan dibahas tentang perancangan metode kendali torsi langsung dengan estimasi model arus menggunakan PI. Bab empat menjelaskan mengenai simulasi dan analisa pengendalian kmotor induksi tiga fasa

sangkar tupai dengan variasi perubahan resistansi di stator untuk melihat unjuk kerja motor induksi belitan. Bab lima memuat kesimpulan dari keseluruhan penelitian pada thesis ini.



BAB 2

TEORI MOTOR INDUKSI TIGA PHASA

2.1 Motor Induksi Secara Umum

Motor induksi adalah jenis motor penggerak yang paling banyak digunakan di industri. Hal ini karena motor induksi mempunyai banyak keuntungan dibandingkan dengan motor listrik lainnya, khususnya jenis rotor sangkar tupai. Motor induksi terdiri dari dua bagian utama, yaitu stator dan rotor. Stator adalah bagian yang tidak bergerak, terdiri dari lapisan-lapisan besi dengan alur-alur berisi kumparan-kumparan. Kumparan-kumparan ini dihubungkan dengan sumber daya tiga fasa, sehingga didapatkan sebuah medan magnet putar. Kecepatan medan magnet putar tergantung pada jumlah kutub stator dan frekuensi sumber dayanya. Kecepatan ini disebut kecepatan sinkron, yang ditentukan dengan rumus:

$$N_{si} = \frac{120 \cdot f}{pe} \quad (2.1)$$

dengan N_s adalah kecepatan sinkron (rpm), f adalah frekuensi sumber daya (Hz), dan P adalah jumlah kutub stator. Rotor dari motor induksi ada dua macam, yaitu rotor sangkar tupai (squirrel cage rotor) dan rotor lilit (wound rotor). Pada jenis rotor sangkar tupai, rotornya terdiri dari besi yang dikelilingi oleh konduktor-konduktor yang terhubung singkat. [4]

Pada motor induksi terjadi slip saat berputar, pada kecepatan yang lebih rendah dari kecepatan dasarnya, motor induksi mengalami perbedaan antara dua kecepatan, perbedaan ini dikarenakan motor induksi mengalami *slip*/geseran yang meningkat seiring meningkatnya beban. Untuk menghindari *slip* dapat dipasang sebuah cincin yang biasa disebut motor cincin geser/*slip ring motor*. Persamaan 2.2 dapat digunakan untuk menghitung persentase *slip*/geseran

$$\% \text{ slip} = \frac{N_{si} - N_{ri}}{N_{si}} \times 100\% \quad (2.2)$$

Dengan,

N_{si} = Kecepatan sinkron dalam RPM

N_{ri} = Kecepatan dasar dalam RPM

Konstruksi motor induksi pada dasarnya terdiri dari dua bagian yaitu, stator

yang diam, dan rotor yang berputar. Motor induksi bila ditinjau dari jenis rotornya, terdiri dari dua macam, yaitu jenis rotor belitan dan jenis rotor sangkar tupai (*squirrel cage*). Pada motor induksi rotor belitan, rotornya tersusun dari kumparan tiga fasa seperti kumparan pada statornya. Pada rotor sangkar tupai rotornya menyerupai sangkar tupai, tersusun dari batang konduktor yang ujung-ujungnya terhubung dengan cincin penghubung (*shorting rings*). Motor induksi jenis ini konstruksinya sederhana, kuat, dan harga yang relatif murah, sehingga sering kali dipilih dibandingkan dengan motor induksi rotor belitan yang membutuhkan perawatan yang lebih sulit.

2.2 Prinsip Kerja Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik dari kumparan stator kepada kumparan rotornya. Garis-garis gaya fluks yang diinduksikan dari kumparan stator akan memotong kumparan rotornya sehingga timbul emf (ggl) atau tegangan induksi dan karena penghantar (kumparan) rotor merupakan rangkaian yang tertutup, maka akan mengalir arus pada kumparan rotor. Penghantar (kumparan) rotor yang dialiri arus ini berada dalam garis gaya fluks yang berasal dari kumparan stator sehingga kumparan rotor akan mengalami gaya Lorentz yang menimbulkan torsi yang cenderung menggerakkan rotor sesuai dengan arah pergerakan medan induksi stator. Pada rangka stator terdapat kumparan stator yang ditempatkan pada slot-slotnya yang dililitkan pada sejumlah kutub tertentu. Jumlah kutub ini menentukan kecepatan berputarnya medan stator yang terjadi yang diinduksikan ke rotornya. Makin besar jumlah kutub akan mengakibatkan makin kecilnya kecepatan putar medan stator dan sebaliknya. Kecepatan berputarnya medan putar ini disebut kecepatan sinkron. Besarnya kecepatan sinkron ini adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\omega_{\text{sink}} &= 2\pi f \text{ (listrik, rad/dt)} \\ &= 2\pi f / P \text{ (mekanik, rad/dt)}\end{aligned}\tag{2.3}$$

atau:

$$N_s = 60 \cdot f / P_e \text{ (putaran/menit, rpm)}\tag{2.4}$$

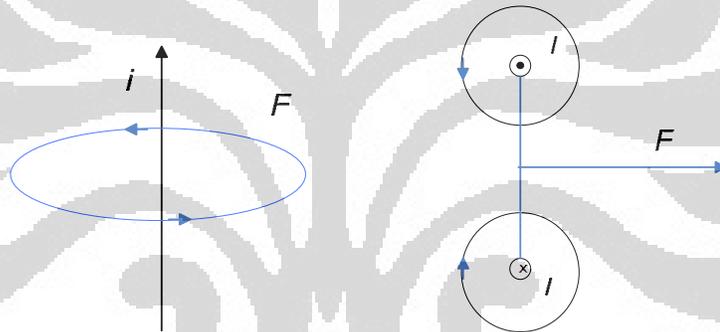
Dengan :

f = frekuensi sumber AC (Hz)

P_e = jumlah pasang kutub

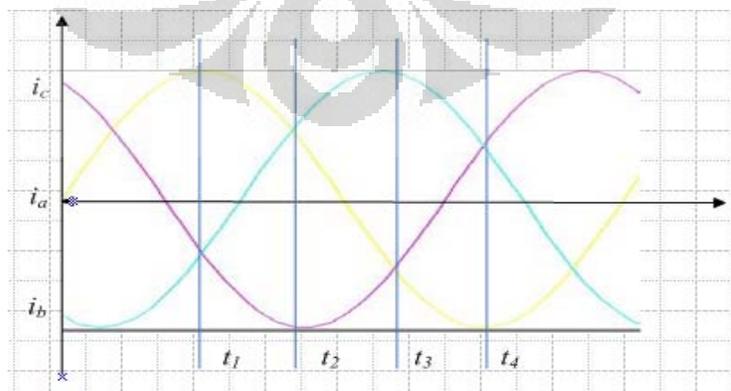
N_{si} = kecepatan putaran sinkron medan magnet stator[22]

Motor induksi mendapatkan masukan tegangan bolak-balik tiga fasa pada statornya, masing-masing fasa dari masukan memiliki beda fasa sebesar 120° . Kumparan kawat di stator terhubung bintang sehingga akan mengalir arus tiga fasa pada kumparan stator tersebut, yang kemudian arus ini akan menghasilkan medan elektromagnet. Arah dari medan yang dihasilkan dari arus tersebut adalah di sekeliling kawat lurus yang dialiri arus akan timbul medan magnet melingkar yang arahnya sesuai dengan 'aturan tangan kanan'.

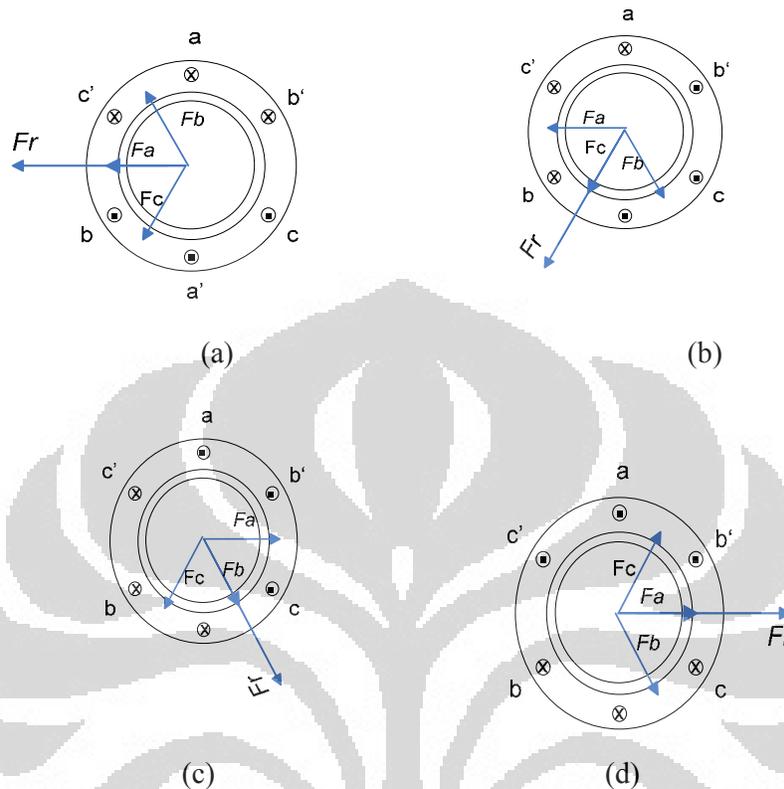


Gambar 2.1 Arah gaya magnet sesuai dengan aturan tangan kanan

Tegangan yang diberikan yang berupa tegangan tiga fasa bolak-balik yang berbeda fasa 120° dan akan menghasilkan arus tiga fasa. Arus tiga fasa dapat digambarkan seperti pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Arus tiga fasa



Gambar 2.3 (a) Gaya gerak magnet pada saat t_1 ; (b) Gaya gerak magnet pada saat t_2 ; (c) Gaya gerak magnet pada saat t_3 ; (d) Gaya gerak magnet pada saat t_4

Gambar 2.3 adalah gambar skema potongan melintang stator motor induksi, yang menunjukkan arah resultan dari medan yang dihasilkan arus stator.

Dimisalkan masing-masing fasa dinamakan fasa a, b, dan c yang berbeda 120° untuk antar fasanya. Berarti pada skema stator terdapat hubungan a-a', b-b', dan c-c'. Diambil waktu sampel t_1 , t_2 , t_3 , dan t_4 . Notasi yang digunakan pada analisis ini adalah *cross* (x) untuk nilai arus sesaat yang positif, sedangkan untuk nilai arus sesaat yang negatif digunakan *dot* (·) diletakkan pada pangkal konduktor.

Pada saat t_1 , nilai sesaat arus i_a positif, sedangkan i_b dan i_c negatif, sehingga notasi pada pangkal konduktor a, b', dan c' adalah *cross* (x), sedangkan b, c, dan a' adalah *dot* (·). Menurut aturan tangan kanan, maka arah gaya-gaya magnet yang ditimbulkan oleh arus i_a , i_b , i_c adalah seperti gambar 2.3 (a), begitu juga notasi yang diberikan pada waktu t_2 , t_3 , dan t_4 . Jika analisis ini dilakukan pada

waktu yang kontinu maka akan terlihat perputaran resultan dan arah gaya magnet yang membentuk medan putar. Kecepatan medan putar ini memiliki persamaan matematis:

$$\omega_s = 2\pi f_e \quad (2.5)$$

Medan magnet yang berputar kemudian akan memotong batang-batang konduktor rotor, sehingga pada rotor timbul tegangan induksi lawan sebesar:

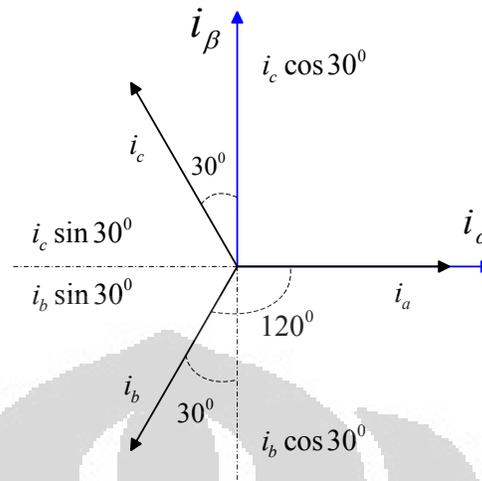
$$E_{ind} = 4,44 \cdot f_e \cdot k \cdot N \cdot \Phi \quad (2.6)$$

Batang-batang konduktor merupakan rangkaian tertutup, sehingga adanya gaya gerak listrik induksi ini akan menimbulkan arus induksi pada rotor. Arus pada rotor akan menimbulkan medan magnet seperti pada stator, sehingga medan rotor ini akan berinteraksi dengan medan stator, menimbulkan gaya dan torsi pada rotor untuk berputar.

2.3 Teori Kerangka Acuan

Motor induksi yang digunakan dalam simulasi ini adalah motor induksi tiga fasa berkekuatan 2HP. Untuk mempermudah analisa dan perhitungan maka digunakan suatu metoda yang akan mengubah arus, fluks, dan tegangan tiga fasa ke bentuk dua fasa. Metode untuk melakukan transformasi tiga fasa ke bentuk dua fasa diam adalah transformasi Clarke, selanjutnya akan ditransformasikan lagi ke bentuk dua fasa berputar dengan transformasi Park.

Misalkan arus tiga fasa akan diubah ke dalam bentuk dua fasa diam dengan transformasi Clarke. Dianggap arus a, b, dan c bernilai sesuai fungsi sinusoida dan memiliki beda fasa sebesar 120° per phasanya. Lalu akan diubah kedalam dua fasa diam, yaitu sumbu $\alpha\beta$, atau dengan sumbu α sebagai nilai real, dan β sebagai nilai imajiner. Transformasi clarke dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Transformasi tiga fasa ke dua fasa diam

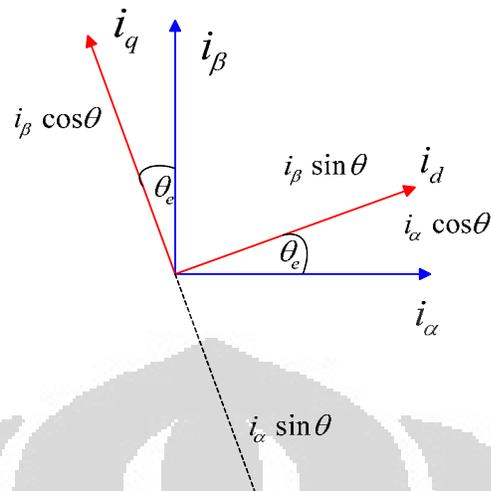
Pada gambar 2.4 ditunjukkan bahwa i_α adalah proyeksi dari i_a , i_b , dan i_c pada sumbu real, sedangkan i_β merupakan proyeksi dari i_a , i_b , dan i_c pada sumbu imajiner. Sehingga dalam bentuk matrik:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{1}{2}\sqrt{3} & \frac{1}{2}\sqrt{3} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Nilai i_0 merupakan arus urutan nol (*zero sequence current*) yang bernilai nol pada keadaan setimbang dan ideal.

Nilai konstanta $\frac{2}{3}$ pada persamaan 2.7 adalah nilai konstanta untuk sistem *power variant*

Transformasi Clarke telah mentransformasikan bentuk tiga fasa, ke dalam bentuk dua fasa diam (i_α dan i_β), selanjutnya akan ditransformasikan dengan transformasi Park untuk mendapatkan nilai dua fasa berputar (i_q dan i_d). Sumbu $qd0$ digunakan untuk mendapatkan diagnosa kondisi motor dengan *negatif sequence* pada tegangan dari *ground* ke fasa.



Gambar 2.5 Transformasi dua fasa diam ke dua fasa berputar (*rotating*)

Gambar 2.5 menunjukkan bahwa arus pada sumbu qd berputar membentuk sudut θ_e terhadap sumbu $\alpha\beta$ yang diam. Nilai θ_e akan berubah terhadap waktu sehingga kerangka dari sumbu qd pun akan berputar sesuai dengan perubahan yang terjadi pada nilai θ_e . Transformasi Park dapat dituliskan dalam matrik:

$$\begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta & \cos\theta \\ \cos\theta & \sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Bila transformasi Clarke dan Park digabungkan, maka matriks transformasinya akan merubah besaran tiga fasa ke bentuk besaran dua fasa berputar, seperti yang ditunjukkan persamaan 2.9.

Hubungan $\theta_q = \theta_d + \pi/2$ [10]

$$\begin{bmatrix} i_q \\ i_d \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta_q & \cos\left(\theta_q - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_q + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\theta_q & \sin\left(\theta_q - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_q + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

2.4 Model Motor Induksi Kerangka Acuan Sumbu qd

Pemodelan motor induksi tiga fasa kerangka acuan qd dilakukan berdasarkan kerangka acuan stator dengan parameter model yang digunakan adalah dengan arus stator dan fluks stator. Karena kerangka acuan yang digunakan adalah kerangka acuan stator, maka nilai kecepatan sinkron stator $\omega=0$. Maka persamaan untuk tegangan stator motor induksi menjadi[5]:

$$V_q^s = r^s i_q^s \frac{d}{dt} \lambda_q^s \quad (2.10)$$

$$V_d^s = r^s i_d^s \frac{d}{dt} \lambda_d^s \quad (2.11)$$

Persamaan tegangan rotor untuk motor induksi adalah

$$V_q^r = r^r i_q^r + \frac{d}{dt} \lambda_q^r - \omega_r \lambda_d^r \quad (2.12)$$

$$V_d^r = r^r i_d^r + \frac{d}{dt} \lambda_d^r - \omega_r \lambda_q^r \quad (2.13)$$

Persamaan Fluks rotor adalah

$$\lambda_q^r = L^r i_q^r + L^m i_d^s \quad (2.14)$$

$$\lambda_d^r = L^r i_d^r + L^m i_q^s \quad (2.15)$$

Persamaan Fluks stator adalah

$$\lambda_q^s = L^s i_q^s + L^m i_d^r \quad (2.16)$$

$$\lambda_d^s = L^s i_d^s + L^m i_q^r \quad (2.17)$$

Persamaan arus rotor diperoleh dari persamaan (2.16) dan (2.17) pada fluks stator menjadi

$$i_d^r = \frac{1}{L^m} (\lambda_q^s - L^s i_q^s) \quad (2.18)$$

$$i_q^r = \frac{1}{L^m} (\lambda_d^s - L^s i_d^s) \quad (2.19)$$

Dari persamaan (2.12) substitusikan dengan persamaan (2.14) dan (2.15) menjadi

$$V_q^r = r^r i_q^r + L^r \frac{d}{dt} i_q^r + L^m \frac{d}{dt} i_d^s - \omega_r L^r i_d^r - \omega_r L^m i_q^s \quad (2.20)$$

Dari persamaan (2.20) substitusikan persamaan (2.18) dan (2.19) menjadi

$$V_q^r = \frac{r^r}{L^m} \lambda_d^s - r^r \frac{L^s}{L^m} i_d^s + \frac{L^r}{L^m} \frac{d}{dt} \lambda_d^s - \left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right) \frac{d}{dt} i_d^s - \left(\frac{L^r L^s}{L^m} + L^m \right) \omega_r i_q^s - \omega_r \frac{L^r}{L^m} \lambda_q^s \quad (2.21)$$

Persamaan fluks stator dari persamaan (2.10) dan (2.11) menjadi

$$\frac{d}{dt} \lambda_q^s = -r^s i_q^s + V_q^s \quad (2.22)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_d^s = -r^s i_d^s + V_d^s \quad (2.23)$$

Persamaan (2.21) substitusikan dengan persamaan (2.23) menjadi

$$V_q^r = \frac{r^r}{L^m} \lambda_d^s - \left(r^r \frac{L^s}{L^m} + r^s \frac{L^r}{L^m} \right) i_d^s + \frac{L^r}{L^m} V_d^s - \left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right) \frac{d}{dt} i_d^s - \left(\frac{L^r L^s}{L^m} + L^m \right) \omega_r i_q^s - \frac{L^r}{L^m} \omega_r \lambda_q^s \quad (2.24)$$

Motor induksi tiga fasa yang digunakan adalah *squirrel-cage* yang dihubungkan singkat sehingga tegangan rotor bernilai nol ($\bar{V}_r = 0$). Dari persamaan (2.24) diperoleh turunan arus stator i_d^s yaitu:

$$\frac{d}{dt} i_d^s = \frac{\frac{r^r}{L^m}}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right)} \lambda_d^s - \frac{\left(r^r \frac{L^s}{L^m} + r^s \frac{L^r}{L^m} \right)}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right)} i_d^s + \frac{\frac{L^r}{L^m}}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right)} V_d^s - \frac{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right)}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right)} \omega_r i_q^s - \frac{\frac{L^r}{L^m}}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right)} \omega_r \lambda_q^s \quad (2.25)$$

Untuk mencari turunan arus stator i_q^s maka dari persamaan (2.13) disubstitusikan dengan persamaan 2.14 dan persamaan 2.15 menjadi

$$V_d^r = r^r i_d^r + L^r \frac{d}{dt} i_d^r + L^m \frac{d}{dt} i_q^s - \omega_r L^r i_q^r - \omega_r L^m i_d^s \quad (2.26)$$

Dari persamaan (2.26) substitusikan persamaan (2.18) dan (2.19) menjadi

$$V_d^r = \frac{r^r}{L^m} \lambda_q^s - \frac{r^r L^s}{L^m} i_q^s + \frac{L^r}{L^m} \frac{d}{dt} \lambda_q^s - \left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right) \frac{d}{dt} i_q^s - \left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right) \omega_r i_d^s - \frac{L^r}{L^m} \omega_r \lambda_d^s \quad (2.27)$$

Dari persamaan (2.28) substitusikan dengan persamaan (2.22) menjadi

$$V_d^r = \frac{r^r}{L^m} \lambda_q^s - \left(\frac{r^r L^s}{L^m} + \frac{r^s L^r}{L^m} \right) i_q^s + \frac{L^r}{L^m} V_q^s - \left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right) \frac{d}{dt} i_q^s - \left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right) \omega_r i_d^s - \frac{L^r}{L^m} \omega_r \lambda_d^s \quad (2.28)$$

Untuk mendapatkan turunan arus stator i_q^s maka dari persamaan (2.28) diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_q^s &= \frac{\frac{r^r}{L^m}}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right)} \lambda_q^s - \frac{\left(\frac{r^r L^s}{L^m} + \frac{r^s L^r}{L^m} \right)}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right)} i_q^s + \frac{\frac{L^r}{L^m}}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right)} V_q^s \\ &\quad - \frac{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right)}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right)} \omega_r i_d^s - \frac{\frac{L^r}{L^m}}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right)} \omega_r \lambda_d^s \end{aligned} \quad (2.29)$$

Sehingga didapatkan model motor dalam kerangka acua qd adalah:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_q^s &= \frac{\frac{r^r}{L^m}}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right)} \lambda_q^s - \frac{\left(\frac{r^r L^s}{L^m} + \frac{r^s L^r}{L^m} \right)}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right)} i_q^s + \frac{\frac{L^r}{L^m}}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right)} V_q^s \\ &\quad - \frac{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right)}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right)} \omega_r i_d^s - \frac{\frac{L^r}{L^m}}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right)} \omega_r \lambda_d^s \\ \frac{d}{dt} i_d^s &= \frac{\frac{r^r}{L^m}}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right)} \lambda_d^s - \frac{\left(r^r \frac{L^s}{L^m} + r^s \frac{L^r}{L^m} \right)}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right)} i_d^s + \frac{\frac{L^r}{L^m}}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right)} V_d^s \\ &\quad - \frac{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right)}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right)} \omega_r i_q^s - \frac{\frac{L^r}{L^m}}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m \right)} \omega_r \lambda_q^s \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_q^s = -r^s i_q^s + V_q^s$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_d^s = -r^s i_d^s + V_d^s$$

Persamaan (2.29), (2.24), (2.22) dan (2.26) dapat ditulis dalam matriks yaitu:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q^s \\ i_d^s \\ \lambda_q^s \\ \lambda_d^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q^s \\ i_d^s \\ \lambda_q^s \\ \lambda_d^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \\ b_{41} & b_{42} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_q^s \\ V_d^s \end{bmatrix}$$

Dengan :

$$a_{11} = a_{22} = -\frac{\left(\frac{r^r L^s}{L^m} + \frac{r^s L^r}{L^m}\right)}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m\right)}$$

$$a_{13} = \frac{\frac{r^r}{L^m}}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m\right)}$$

$$a_{12} = -\frac{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m\right)}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m\right)} \omega_r$$

$$a_{14} = -\frac{\frac{L^r}{L^m}}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m\right)} \omega_r$$

$$a_{21} = -\frac{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m\right)}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m\right)} \omega_r$$

$$a_{24} = \frac{\frac{r^r}{L^m}}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m\right)}$$

$$a_{23} = -\frac{\frac{L^r}{L^m}}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m\right)} \omega_r$$

$$a_{31} = a_{42} = -r^s$$

$$a_{32} = a_{33} = a_{34} = a_{41} = a_{43} = a_{44} = 0$$

$$b_{11} = b_{22} = \frac{\frac{L^r}{L^m}}{\left(\frac{L^r L^s}{L^m} - L^m\right)}$$

$$b_{32} = b_{33} = b_{34} = b_{41} = b_{43} = b_{44} = 0$$

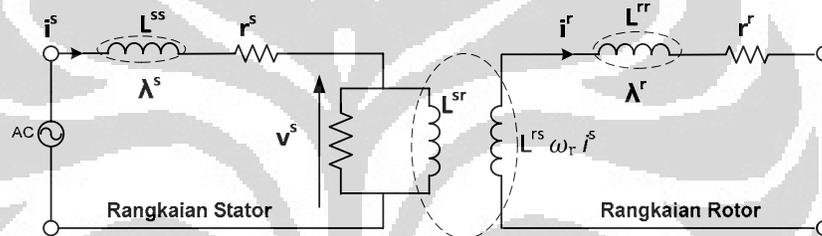
Sedangkan vektor keluarannya dapat ditulis dalam bentuk matrik sebagai berikut:

$$I_s = CX$$

$$\begin{bmatrix} I_q^s \\ I_d^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q^s \\ i_d^s \\ \lambda_q^s \\ \lambda_d^s \end{bmatrix}$$

2.5 Motor induksi dengan jumlah Belitan stator

Dengan dasar rangkaian ekivalent dari mesin asinkron yang ditunjukkan pada gambar 2.6. [6] rangkaian dari motor induksi dapat dijabarkan oleh sebuah sistem, dimana motor tiga fasa dari stator dan rotor disajikan kedalam vector.



Gambar 2.6 Rangkaian ekivalent dari motor induksi

Persamaan stator dan rotor untuk asimetris motor induksi adalah

$$V^s = r^s i^s + d\lambda^s/dt, \quad (2.30)$$

$$0 = r^r i^r + d\lambda^r/dt \quad (2.31)$$

Model untuk *a symmetrical* motor induksi tiga fasa dapat diketahui dari ruang vector motor induksi pada putaran rotor yang disebabkan oleh garis fluks dari stator [7-10]. Untuk memperoleh persamaan dari asimetris belitan stator dan rotor, telah dibuat sebuah asumsi sebagai berikut:

- Setiap fasa pada stator dari motor telah memiliki putaran yang berbeda, tapi penempatan kekhususannya telah ditentukan.
- Magnetic saturasi tidak disajikan.

Sesuai dengan symbol *as, bs, cs, ar, br, dan cr*, persamaan untuk tegangan dari magnetis pengabungan stator dan rangkaian rotor dapat ditulis sebagai berikut.

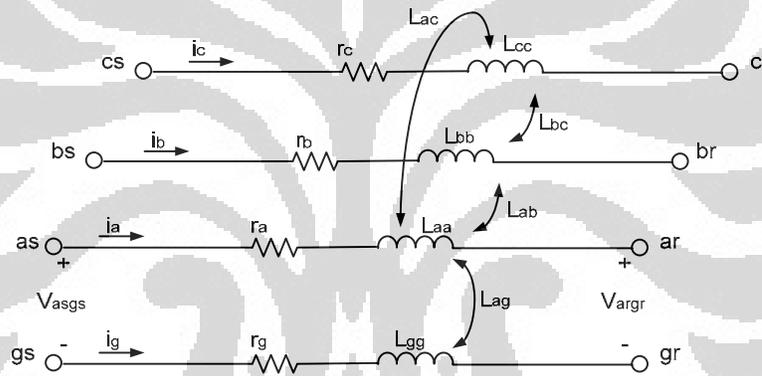
$$V_{abc}^s = r_{abc}^s i_{abc}^s + p\lambda_{abc}^s \quad (2.32)$$

$$0 = r_{abc}^r i_{abc}^r + p \lambda_{abc}^r \quad (2.33)$$

Model belitan motor pada stator merupakan rangkaian ekivalent yang terhubung dengan RL seri, dimana pendekatannya biasanya digunakan untuk hal tertentu dari rangkaian tiga fasa [11-12] ditunjukkan pada gambar 2.8 dapat dituliskan persamaan

$$V_s = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} i_s + \begin{bmatrix} \frac{d\lambda_{sa}}{dt} \\ \frac{d\lambda_{sb}}{dt} \\ \frac{d\lambda_{sc}}{dt} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

$$\lambda_s = \begin{bmatrix} L_{asas} & L_{asbs} & L_{ascs} \\ L_{bsas} & L_{bsbs} & L_{bscs} \\ L_{csas} & L_{csbs} & L_{cscs} \end{bmatrix} i_s + \begin{bmatrix} L_{asr} \\ L_{bsr} \\ L_{csr} \end{bmatrix} i_r \quad (2.35)$$



Gambar 2.7 Rangkaian RL 3 fasa dengan ground

Untuk element matriks r_{qd}^s dari model motor diperoleh dari hubungan resistansi pada fasa a,b dan c yang di ubah ke 2 sumbu resistansi q dan sumbu d adalah

$$r_{qd}^s = \begin{bmatrix} r_{11}^s & r_{12}^s & r_{13}^s \\ r_{21}^s & r_{22}^s & r_{23}^s \\ r_{31}^s & r_{32}^s & r_{33}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q^s \\ i_d^s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$r_{11}^s = \frac{2}{3} \left(r_{as} + \frac{1}{4} r_{bs} + \frac{1}{4} r_{cs} \right) \quad (2.37)$$

$$r_{12}^s = \frac{\sqrt{3}}{6} (r_{bs} - r_{cs}) \quad (2.38)$$

$$r_{13}^s = \frac{1}{3}(2r_{as} - r_{bs} - r_{cs}) \quad (2.39)$$

$$r_{22}^s = \frac{1}{2}(r_{bs} + r_{cs}) \quad (2.40)$$

$$r_{33}^s = \frac{1}{3}(2r_{as} + r_{bs} + r_{cs}) \quad (2.41)$$

$$r_{21}^s = r_{12}^s, r_{23}^s = -\frac{1}{2}r_{12}^s \quad (2.42)$$

$$r_{31}^s = -\frac{1}{2}r_{12}^s \text{ dan } r_{32}^s = -r_{12}^s \quad (2.43)$$

Dengan

$$r_{as} = \frac{N_a}{N_s} r_s, r_{bs} = \frac{N_b}{N_s} r_s, \text{ dan } r_{cs} = \frac{N_c}{N_s} r_s, \quad N_a = N_b = N_c = N_s \quad (2.44)$$

$$r_{dq0}^r = r_r \mathbf{I}_{3 \times 3} \quad (2.45)$$

Dalam notasi matrik, arah *flux* dari belitan stator dan rotor dapat dituliskan kedalam bagian dari belitan induktansi dan arus sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} \lambda_a^s \\ \lambda_b^s \\ \lambda_c^s \\ \lambda_a^r \\ \lambda_b^r \\ \lambda_c^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa}^{ss} & L_{ab}^{ss} & L_{ac}^{ss} & L_{aa}^{sr} & L_{ab}^{sr} & L_{ac}^{sr} \\ L_{ba}^{ss} & L_{bb}^{ss} & L_{bc}^{ss} & L_{ba}^{sr} & L_{bb}^{sr} & L_{bc}^{sr} \\ L_{ca}^{ss} & L_{cb}^{ss} & L_{cc}^{ss} & L_{ca}^{sr} & L_{cb}^{sr} & L_{cc}^{sr} \\ L_{aa}^{rs} & L_{ab}^{rs} & L_{ac}^{rs} & L_{aa}^{rr} & L_{ab}^{rr} & L_{ac}^{rr} \\ L_{ba}^{rs} & L_{bb}^{rs} & L_{bc}^{rs} & L_{ba}^{rr} & L_{bb}^{rr} & L_{bc}^{rr} \\ L_{ca}^{rs} & L_{cb}^{rs} & L_{cc}^{rs} & L_{ca}^{rr} & L_{cb}^{rr} & L_{cc}^{rr} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a^s \\ i_b^s \\ i_c^s \\ i_a^r \\ i_b^r \\ i_c^r \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abc}^s \\ \lambda_{abc}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{abc}^{ss} & \mathbf{L}_{abc}^{sr} \\ \mathbf{L}_{abc}^{rs} & \mathbf{L}_{abc}^{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abc}^s \\ \mathbf{i}_{abc}^r \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

Dengan induktansi stator dan rotor adalah

$$\mathbf{L}_{abc}^{ss} = \begin{bmatrix} L_{asas} & L_{asbs} & L_{ascs} \\ L_{bsas} & L_{bsbs} & L_{bscs} \\ L_{csas} & L_{csbs} & L_{cscs} \end{bmatrix}, \text{ dan} \quad (2.48)$$

$$\mathbf{L}_{abc}^{rr} = \begin{bmatrix} L_{arar} & L_{arbr} & L_{arcr} \\ L_{brar} & L_{brbr} & L_{brcr} \\ L_{crar} & L_{crbr} & L_{crcr} \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

Dikarenakan simetris, hubungan antar induktansi $L_{asbs} = L_{bscs}$, $L_{ascsc} = L_{csas}$ dan $L_{bscs} = L_{csas}$. sama dengan rotor pada hubungan induktansi dimana $L_{arar} = L_{brbr} = L_{cr cr}$ dan, $L_{arbr} = L_{arcr} = L_{brar} = L_{brcr} = L_{crar} = L_{crbr}$. Hubungan induktansi antara stator ke rotor pada sudut rotor (orientasi mengacu pada stator) maka diperoleh persamaan

$$\mathbf{L}_{abc}^{sr} = \begin{bmatrix} L_{asar} \cos \theta_r & L_{asbr} \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & L_{ascr} \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \\ L_{bsar} \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{bsbr} \cos \theta_r & L_{bscr} \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ L_{csar} \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & L_{csbr} \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{cscr} \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

Dan $L_{abs}^{rs} = L_{abc}^{sr}$ dimana (') merupakan transpose dari matrik. Koefisien untuk $L_{asar}, L_{asbr}, L_{ascr}, L_{bsar}, L_{bsbr}, L_{bscr}$ dan $L_{csar}, L_{csbr}, L_{cscr}$ merupakan nilai hubungan induksi dari stator ke rotor. Karena simetris dengan rotor $L_{asar} = L_{asbr} = L_{ascr}, L_{bsar} = L_{bsbr} = L_{bscr}$ dan $L_{csar} = L_{csbr} = L_{cscr}$.

Stator dan rotor garis fluks $qd0$ diperoleh dengan menerapkan transformasi dari garis fluks abc stator dan rotor kedalam persamaan 2.34 maka

$$\lambda_{qd0}^s = \mathbf{L}_{qd0}^{ss} i_{qd0}^s + \mathbf{L}_{qd0}^{sr} i_{qd0}^r \quad (2.69)$$

$$\lambda_{qd0}^r = \mathbf{L}_{qd0}^{rs} i_{qd0}^s + \mathbf{L}_{qd0}^{rr} i_{qd0}^r \quad (2.70)$$

Dengan

$$\mathbf{L}_{qd0}^{ss} = \begin{bmatrix} L_{11}^{ss} & L_{12}^{ss} & L_{13}^{ss} \\ L_{21}^{ss} & L_{22}^{ss} & L_{23}^{ss} \\ L_{31}^{ss} & L_{32}^{ss} & L_{33}^{ss} \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

$$\mathbf{L}_{qd0}^{sr} = \begin{bmatrix} L_{11}^{sr} & L_{12}^{sr} & 0 \\ L_{21}^{sr} & L_{22}^{sr} & 0 \\ L_{31}^{sr} & L_{32}^{sr} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

$$\mathbf{L}_{qd0}^{rr} = \begin{bmatrix} L_{11}^{rr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{22}^{rr} & 0 \\ 0 & 0 & L_{33}^{rr} \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

$$\mathbf{L}_{qd0}^{rs} = \begin{bmatrix} L_{11}^{sr} & L_{12}^{sr} & 0.5L_{13}^{sr} \\ L_{21}^{sr} & L_{22}^{sr} & -0.5L_{32}^{sr} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.74)$$

Matriks element dari \mathbf{L}_{qd0}^{ss} , \mathbf{L}_{qd0}^{sr} , \mathbf{L}_{qd0}^{rr} dan \mathbf{L}_{qd0}^{rs} terdiri dari:

1. Stator $qd0$ dan mutual induktansi , Matriks element dari \mathbf{L}_{qd0}^{ss} yaitu:

$$L_{11}^{ss} = \frac{2}{3}(L_{asas} + .25L_{bsbs} + .25L_{cscs} - L_{asbs} - L_{ascs} - .5L_{bscs}) \quad (2.75)$$

$$L_{12}^{ss} = \frac{1}{2\sqrt{3}}(L_{bsbs} - L_{cscs} + L_{ascs}) \quad (2.76)$$

$$L_{13}^{ss} = \frac{2}{3}(L_{asas} - .5L_{bsbs} - .5L_{cscs} + .5L_{asbs} + .5L_{ascs} - L_{bscs}) \quad (2.77)$$

$$L_{21}^{ss} = \frac{1}{\sqrt{3}}(.5L_{bsbs} - .5L_{cscs} - L_{asbs} + L_{ascs}) \quad (2.78)$$

$$L_{22}^{ss} = \frac{1}{2}(L_{bsbs} + L_{cscs} - 2L_{bscs}) \quad (2.79)$$

$$L_{23}^{ss} = \frac{1}{\sqrt{3}}(-L_{bsbs} + L_{cscs} - L_{asbs} + L_{ascs}) \quad (2.80)$$

$$L_{33}^{ss} = \frac{1}{3}(L_{asas} + L_{bsbs} + L_{cscs} + 2L_{asbs} + 2L_{ascs} + 2L_{bscs}) \quad (2.81)$$

$$L_{31}^{ss} = \frac{1}{2}L_{13}^{ss} \quad (2.82)$$

$$L_{32}^{ss} = \frac{1}{2}L_{23}^{ss} \quad (2.83)$$

dimana $N_a = N_b = N_c, N_{asas} = N_{bsbs} = N_{cscs}$ dan $N_{asbs} = N_{ascs} = N_{bscs}$

2. Stator ke rotor $qd0$ dan mutual induktansi , Matriks element dari \mathbf{L}_{qd0}^{sr}

Dikarenakan dari rotor simetris, koefisien dari hubungan induksi stator ke rotor dapat disederhanakan sebagai $N_{asar} = N_{asbr} = N_{ascr} = N_{asr}, N_{bsar} = N_{bsbr} = N_{bscr} = N_{bsr}$, dan $N_{csar} = N_{csbr} = N_{cscr} = N_{csr}$, dan hasil dari transformasi adalah:

$$L_{11}^{sr} = L_{asr} + .25L_{bsr} + .25L_{csr} \quad (2.84)$$

$$L_{12}^{sr} = \frac{\sqrt{3}}{4}(L_{bsr} - L_{csr}) \quad (2.85)$$

$$L_{22}^{sr} = \frac{3}{4}(L_{bsr} + L_{csr}) \quad (2.86)$$

$$L_{31}^{sr} = .5L_{asr} - .25L_{bsr} - .25L_{csr} \quad (2.87)$$

$$L_{21}^{sr} = L_{12}^{sr}, \text{ dan } L_{32}^{sr} = -L_{12}^{sr}. \quad (2.88)$$

$$L_{asar} = L_{asbr} = L_{ascr}, L_{bsar} = L_{bsbr} = L_{bscr} = L_{csar} = L_{csbr} = L_{cscr} \quad (2.88)$$

3. Rotor *qd0* dan hubungan induktansi adalah

$$L_{11}^{rr} = L_{22}^{rr} = L_{lr} + \frac{3}{2}L_{mar} = L_{lr} + \frac{N_r^2}{N_s^2}L_m \quad (2.89)$$

$$L_{33}^{rr} = L_{lr} \quad (2.90)$$

Pada dasarnya motor induksi dihubungkan ke dalam masukan tiga phasa oleh tiga kabel yang terhubung. Karenanya, untuk motor induksi sangkar tupai dan hubungan tiga kabel, arus fluks stator dan rotor pada persamaan 2.69 dan 2.70 dapat dibuat persamaan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \lambda_q^s \\ \lambda_d^s \\ \lambda_q^r \\ \lambda_d^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11}^{ss} & L_{12}^{ss} & L_{11}^{sr} & L_{12}^{sr} \\ L_{21}^{ss} & L_{22}^{ss} & L_{21}^{sr} & L_{22}^{sr} \\ L_{11}^{sr} & L_{12}^{sr} & L_{11}^{rr} & 0 \\ L_{21}^{sr} & L_{22}^{sr} & 0 & L_{22}^{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q^s \\ i_d^s \\ i_q^r \\ i_d^r \end{bmatrix} \quad (2.91)$$

2.5.1 Penentuan Induksi

Untuk dapat menentukan mesin induksi yang asimetris, sebagai mana phasa pada stator *as, bs dan cs* memiliki jumlah dari putaran belitan yang disimbolkan dengan N_a, N_b dan N_c , dan pada rotor *ar, br dan cr* memiliki putaran belitan yang disimbolkan dengan N_{ar}, N_{br} dan $N_{cr} = N_r$ dan hubungan induksi dapat diketahui untuk mesin asimetris dengan jumlah refrensi dari putaran belitan N_s .

Dengan menggunakan parameter yang diketahui induktansi pada stator untuk tiap fasa *as, bs dan cs* dapat dihitung dengan persamaan

$$L_{asas} = \frac{N_a^2}{N_s^2} \left(L_{ls} + \frac{2}{3} L_m \right) = N_a^2 L_{mls} \quad (2.92)$$

$$L_{bsbs} = N_b^2 L_{mls} \quad (2.93)$$

$$L_{cs cs} = N_c^2 L_{mls} \quad (2.94)$$

Dengan

$$L_{mls} = \frac{1}{N_s^2} \left(L_{ls} + \frac{2}{3} L_m \right) \quad (2.95)$$

Induksi pada stator antara fasa *as dan bs, bs dan cs, dan cs dan as* dapat dikendalikan yaitu

$$\begin{aligned} L_{asbs} = L_{bsas} &= \left(-\frac{1}{2} N_a N_b \right) \left(\frac{2 L_m}{3 N_s^2} \right) = -\frac{1}{3} \frac{N_a N_b}{N_s^2} L_m \\ &= N_a N_b L_{mss} \end{aligned} \quad (2.96)$$

$$L_{asc s} = L_{csas} = N_a N_c L_{mss} \quad (2.97)$$

$$L_{bscs} = L_{csbs} = N_b N_c L_{mss} \quad (2.98)$$

Dengan

$$L_{mss} = -\frac{1}{3} \frac{L_m}{N_s^2} \quad (2.99)$$

Induksi rotor dan mutual induktansi rotor dapat diperoleh dengan cara yang sama. Karena rotor diasumsikan simetris, total dari induksi pada fasa rotor *ar, br dan cr* adalah sama, maka

$$L_{arar} = L_{brbr} = L_{crrc} = L_{llr} + \frac{2 N_r^2}{3 N_s^2} L_m = L_{lr} + L_{mar} \quad (2.100)$$

$$L_{mar} = \frac{2 N_r^2}{3 N_s^2} L_m \quad (2.101)$$

Untuk keadaan yang sama , induktansi mutual pada rotor adalah

$$\begin{aligned} L_{arbr} &= L_{arcr} = L_{brar} = L_{brar} = L_{crar} \\ &= L_{crbr} = -\left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{2 N_r^2}{3 N_s^2} L_m\right) = -\frac{1}{2} L_{mar} \end{aligned} \quad (2.102)$$

Sebelumnya definisi dari hubungan induktansi stator ke rotor dapat didefinisikan kedalam bagian dari parameter baru. Karena dari rotor simetris (jumlah putaran untuk setiap fasa rotor adalah sama) induktansi dapat menjadi $L_{asar} = L_{asbr} = L_{ascr}, L_{bsar} = L_{bsbr} = L_{bscr} = L_{csar} = L_{csbr} = L_{cscr}$.

Mengacu pada gambar 2.8 Dapat dilihat fasa rotor *ar* ditempatkan pada fasa stator *as* oleh sudut *electrical* θ_r , variasi dari variabel θ_r untuk hubungan induktansi akan disesuaikan. Variabel faktor *sinus* dan *cosinus* telah diperlihatkan pada persamaan 2.38, maka hasil dari hubungan induksi menjadi.

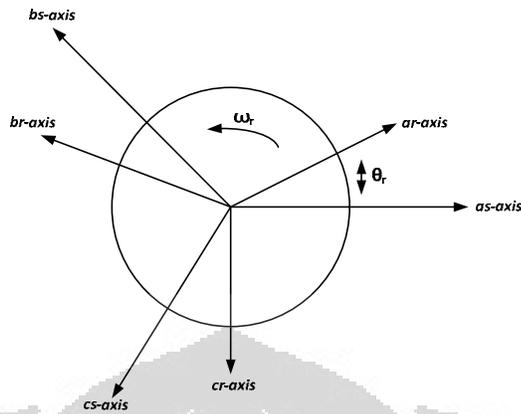
$$L_{asar} = L_{asbr} = L_{ascr} = \frac{2 N_a N_r}{3 N_s^2} L_m = N_a L_{msr} \quad (2.103)$$

$$L_{bsar} = L_{bsbr} = L_{bscr} = \frac{2 N_b N_r}{3 N_s^2} L_m = N_b L_{msr} \quad (2.104)$$

$$L_{csar} = L_{csbr} = L_{cscr} = \frac{2 N_c N_r}{3 N_s^2} L_m = N_c L_{msr} \quad (2.105)$$

Dengan

$$L_{msr} = \frac{2 N_r}{3 N_s^2} L_m \quad (2.106)$$



Gambar 2.8 Pemindahan belitan motor induksi

2.6 Pemodelan motor induksi dengan jumlah Belitan stator

persamaan yang digunakan untuk model motor induksi asimetris dengan jumlah belitan pada stator, menggunakan sumbu acuan qd maka persamaan 2.10 - 2.29 untuk setiap komponen resistansi dan induktansi menggunakan elemen matriks dari persamaan model motor induksi dengan jumlah stator.

Dari persamaan 2.10 - 2.17 dimasukan persamaan elemen matriks resistansi persamaan 2.36 dan persamaan induktansi 2.91 sumbu qd menjadi

$$V_q^s = r_{11}^s i_q^s + \frac{d}{dt} \lambda_q^s \quad (2.107)$$

$$V_d^s = r_{22}^s i_d^s + \frac{d}{dt} \lambda_d^s \quad (2.108)$$

Persamaan tegangan rotor untuk motor induksi adalah

$$V_q^r = r^r i_q^r + \frac{d}{dt} \lambda_q^r - \omega_r \lambda_d^r \quad (2.109)$$

$$V_d^r = r^r i_d^r + \frac{d}{dt} \lambda_d^r - \omega_r \lambda_q^r \quad (2.110)$$

Persamaan Fluks rotor adalah

$$\lambda_q^r = L_{11}^{rr} i_q^r + L_{12}^{sr} i_d^s \quad (2.111)$$

$$\lambda_d^r = L_{22}^{rr} i_d^r + L_{21}^{sr} i_q^s \quad (2.112)$$

Persamaan Fluks stator adalah

$$\lambda_q^s = L_{11}^{ss} i_q^s + L_{12}^{sr} i_d^r \quad (2.113)$$

$$\lambda_d^s = L_{22}^{ss} i_d^s + L_{21}^{sr} i_q^r \quad (2.114)$$

Persamaan arus rotor diperoleh dari persamaan (2.113) dan (2.114) pada fluks stator menjadi:

$$i_d^r = \frac{1}{L_{12}^{sr}} (\lambda_q^s - L_{11}^{ss} i_q^s) \quad (2.115)$$

$$i_q^r = \frac{1}{L_{21}^{sr}} (\lambda_d^s - L_{22}^{ss} i_d^s) \quad (2.116)$$

Dari persamaan (2.109) substitusikan dengan persamaan (2.111) dan (2.112) menjadi

$$V_q^r = r^r i_q^r + L_{11}^{rr} \frac{d}{dt} i_q^r + L_{12}^{sr} \frac{d}{dt} i_d^s - \omega_r L_{22}^{rr} i_d^r - \omega_r L_{21}^{sr} i_q^s \quad (2.117)$$

Dari persamaan (2.117) substitusikan persamaan (2.115) dan (2.116) menjadi

$$\begin{aligned} V_q^r = & \frac{r^r}{L_{21}^{sr}} \lambda_d^s - r^r \frac{L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} i_d^s + \frac{L_{11}^{rr}}{L_{21}^{sr}} \frac{d}{dt} \lambda_d^s - \left(\frac{L_{11}^{rr} L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} - L_{12}^{sr} \right) \frac{d}{dt} i_d^s \\ & + \left(\frac{L_{22}^{rr} L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} - L_{21}^{sr} \right) \omega_r i_q^s - \frac{L_{22}^{rr}}{L_{12}^{sr}} \omega_r \lambda_q^s \end{aligned} \quad (2.118)$$

Persamaan fluks stator dari persamaan (2.109) dan (2.110) menjadi

$$\frac{d}{dt} \lambda_q^s = -r_{11}^s i_q^s + V_q^s \quad (2.119)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_d^s = -r_{22}^s i_d^s + V_d^s \quad (2.120)$$

Persamaan 2.118 substitusikan dengan persamaan 2.120 menjadi :

$$V_q^r = \frac{r^r}{L_{21}^{sr}} \lambda_d^s - \left(r^r \frac{L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} + r_{22}^s \frac{L_{11}^{rr}}{L_{21}^{sr}} \right) i_d^s + \frac{L_{11}^{rr}}{L_{21}^{sr}} V_d^s - \left(\frac{L_{11}^{rr} L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} - L_{12}^{sr} \right) \frac{d}{dt} i_d^s$$

$$+ \left(\frac{L_{22}^{rr} L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} - L_{21}^{sr} \right) \omega_r i_q^s - \frac{L_{22}^{rr}}{L_{12}^{sr}} \omega_r \lambda_q^s \quad (2.121)$$

Motor induksi tiga fasa yang digunakan adalah *squirrel-cage* yang dihubungkan singkat sehingga tegangan rotor bernilai nol ($\bar{V}_r = 0$). Dari persamaan (2.121) diperoleh turunan arus stator i_d^s yaitu:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_d^s = & \frac{\frac{r^r}{L_{21}^{sr}}}{\left(\frac{L_{11}^{rr} L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} - L_{12}^{sr} \right)} \lambda_d^s - \frac{\left(r^r \frac{L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} + r_{22}^s \frac{L_{11}^{rr}}{L_{21}^{sr}} \right)}{\left(\frac{L_{11}^{rr} L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} - L_{12}^{sr} \right)} i_d^s + \frac{\frac{L_{11}^{rr}}{L_{21}^{sr}}}{\left(\frac{L_{11}^{rr} L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} - L_{12}^{sr} \right)} V_d^s \\ & - \frac{\left(\frac{L_{22}^{rr} L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} - L_{21}^{sr} \right)}{\left(\frac{L_{11}^{rr} L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} - L_{12}^{sr} \right)} \omega_r i_q^s - \frac{\frac{L_{22}^{rr}}{L_{12}^{sr}}}{\left(\frac{L_{11}^{rr} L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} - L_{12}^{sr} \right)} \omega_r \lambda_q^s \end{aligned} \quad (2.122)$$

Untuk mencari turunan arus stator i_q^s maka dari persamaan 2.110 disubstitusikan dengan persamaan 2.111 dan persamaan 2.112 menjadi

$$V_d^r = r^r i_d^r + L_{22}^{rr} \frac{d}{dt} i_d^r + L_{21}^{sr} \frac{d}{dt} i_q^s - \omega_r L_{11}^{rr} i_q^r - \omega_r L_{12}^{sr} i_d^s \quad (2.123)$$

Dari persamaan (2.123) substitusikan persamaan (2.115) dan (2.116) menjadi

$$\begin{aligned} V_d^r = & \frac{r^r}{L_{12}^{sr}} \lambda_q^s - \frac{r^r L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} i_q^s + \frac{L_{22}^{rr}}{L_{12}^{sr}} \frac{d}{dt} \lambda_q^s - \left(\frac{L_{22}^{rr} L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} - L_{21}^{sr} \right) \frac{d}{dt} i_q^s \\ & - \left(\frac{L_{11}^{rr} L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} - L_{12}^{sr} \right) \omega_r i_d^s - \frac{L_{11}^{rr}}{L_{21}^{sr}} \omega_r \lambda_d^s \end{aligned} \quad (2.124)$$

Dari persamaan (2.124) substitusikan dengan persamaan (2.119) menjadi

$$\begin{aligned} V_d^r = & \frac{r^r}{L_{12}^{sr}} \lambda_q^s - \left(\frac{r^r L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} + \frac{r_{11}^s L_{22}^{rr}}{L_{12}^{sr}} \right) i_q^s + \frac{L_{22}^{rr}}{L_{12}^{sr}} V_q^s - \left(\frac{L_{22}^{rr} L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} - L_{21}^{sr} \right) \frac{d}{dt} i_q^s \\ & - \left(\frac{L_{11}^{rr} L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} - L_{12}^{sr} \right) \omega_r i_d^s + \frac{L_{11}^{rr}}{L_{21}^{sr}} \omega_r \lambda_d^s \end{aligned} \quad (2.125)$$

Untuk mendapatkan turunan arus stator i_q^s maka dari persamaan (2.125) diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_q^s &= \frac{\frac{r^r}{L_{12}^{sr}}}{\left(\frac{L_{22}^{rr} L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} - L_{21}^{sr}\right)} \lambda_q^s - \frac{\left(\frac{r^r L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} + \frac{r_{11}^s L_{22}^{rr}}{L_{12}^{sr}}\right)}{\left(\frac{L_{22}^{rr} L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} - L_{21}^{sr}\right)} i_q^s + \frac{\frac{L_{22}^{rr}}{L_{12}^{sr}}}{\left(\frac{L_{22}^{rr} L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} - L_{21}^{sr}\right)} V_q^s \\ &\quad - \frac{\left(\frac{L_{11}^{rr} L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} - L_{12}^{sr}\right)}{\left(\frac{L_{22}^{rr} L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} - L_{21}^{sr}\right)} \omega_r i_d^s - \frac{\frac{L_{11}^{rr}}{L_{21}^{sr}}}{\left(\frac{L_{22}^{rr} L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} - L_{21}^{sr}\right)} \omega_r \lambda_d^s \end{aligned} \quad (2.126)$$

Sehingga didapatkan model motor dalam kerangka acua qd adalah:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_q^s &= \frac{\frac{r^r}{L_{12}^{sr}}}{\left(\frac{L_{22}^{rr} L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} - L_{21}^{sr}\right)} \lambda_q^s - \frac{\left(\frac{r^r L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} + \frac{r_{11}^s L_{22}^{rr}}{L_{12}^{sr}}\right)}{\left(\frac{L_{22}^{rr} L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} - L_{21}^{sr}\right)} i_q^s + \frac{\frac{L_{22}^{rr}}{L_{12}^{sr}}}{\left(\frac{L_{22}^{rr} L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} - L_{21}^{sr}\right)} V_q^s \\ &\quad - \frac{\left(\frac{L_{11}^{rr} L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} - L_{12}^{sr}\right)}{\left(\frac{L_{22}^{rr} L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} - L_{21}^{sr}\right)} \omega_r i_d^s - \frac{\frac{L_{11}^{rr}}{L_{21}^{sr}}}{\left(\frac{L_{22}^{rr} L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} - L_{21}^{sr}\right)} \omega_r \lambda_d^s \\ \frac{d}{dt} i_d^s &= \frac{\frac{r^r}{L_{21}^{sr}}}{\left(\frac{L_{11}^{rr} L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} - L_{12}^{sr}\right)} \lambda_d^s - \frac{\left(r^r \frac{L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} + r_{22}^s \frac{L_{11}^{rr}}{L_{21}^{sr}}\right)}{\left(\frac{L_{11}^{rr} L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} - L_{12}^{sr}\right)} i_d^s + \frac{\frac{L_{11}^{rr}}{L_{21}^{sr}}}{\left(\frac{L_{11}^{rr} L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} - L_{12}^{sr}\right)} V_d^s \\ &\quad - \frac{\left(\frac{L_{22}^{rr} L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} - L_{21}^{sr}\right)}{\left(\frac{L_{11}^{rr} L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} - L_{12}^{sr}\right)} \omega_r i_q^s - \frac{\frac{L_{22}^{rr}}{L_{12}^{sr}}}{\left(\frac{L_{11}^{rr} L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} - L_{12}^{sr}\right)} \omega_r \lambda_q^s \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_q^s = -r_{11}^s i_q^s + V_q^s$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_d^s = -r_{22}^s i_d^s + V_d^s$$

Persamaan umum untuk kecepatan rotor motor induksi yaitu [11]

$$\omega_r(t) = \frac{P}{2J} \int (T_e - T_m - T_l) dt \quad (2.127)$$

Persamaan untuk torsi electromagnetic adalah:

$$T_e = \frac{3P}{2} (\lambda_d^s i_q^s - \lambda_q^s i_d^s) \quad (2.128)$$

Dengan posisi rotor adalah:

$$\frac{d}{dt} \theta_r = \omega_r \quad (2.129)$$

Persamaan (2.126), (2.122), (2.119) dan (2.120) dapat ditulis dalam matriks yaitu:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q^s \\ i_d^s \\ \lambda_q^s \\ \lambda_d^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q^s \\ i_d^s \\ \lambda_q^s \\ \lambda_d^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \\ b_{41} & b_{42} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_q^s \\ V_d^s \end{bmatrix}$$

Dengan :

$$a_{11} = -\frac{\left(\frac{r^r L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} + \frac{r_{11}^s L_{22}^{rr}}{L_{12}^{sr}}\right)}{\left(\frac{L_{22}^{rr} L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} - L_{21}^{sr}\right)} \quad a_{13} = \frac{\frac{r^r}{L_{12}^{sr}}}{\left(\frac{L_{22}^{rr} L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} - L_{21}^{sr}\right)}$$

$$a_{12} = -\frac{\left(\frac{L_{11}^{rr} L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} - L_{12}^{sr}\right)}{\left(\frac{L_{22}^{rr} L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} - L_{21}^{sr}\right)} \omega_r \quad a_{14} = -\frac{\frac{L_{11}^{rr}}{L_{21}^{sr}}}{\left(\frac{L_{22}^{rr} L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} - L_{21}^{sr}\right)} \omega_r$$

$$a_{21} = -\frac{\left(\frac{L_{22}^{rr} L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} - L_{21}^{sr}\right)}{\left(\frac{L_{11}^{rr} L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} - L_{12}^{sr}\right)} \omega_r \quad a_{22} = -\frac{\left(r^r \frac{L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} + r_{22}^s \frac{L_{11}^{rr}}{L_{21}^{sr}}\right)}{\left(\frac{L_{11}^{rr} L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} - L_{12}^{sr}\right)}$$

$$a_{23} = -\frac{\frac{L_{22}^{rr}}{L_{12}^{sr}}}{\left(\frac{L_{11}^{rr} L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} - L_{12}^{sr}\right)} \omega_r \quad a_{24} = \frac{\frac{r^r}{L_{21}^{sr}}}{\left(\frac{L_{11}^{rr} L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} - L_{12}^{sr}\right)}$$

$$a_{31} = -r_{11}^s \quad a_{32} = a_{33} = a_{34} = a_{41} = a_{43} = a_{44} = 0$$

$$a_{42} = -r_{22}^s$$

$$b_{11} = \frac{\frac{L_{22}^{rr}}{L_{12}^{sr}}}{\left(\frac{L_{22}^{rr}L_{11}^{ss}}{L_{12}^{sr}} - L_{21}^{sr}\right)} \quad b_{32} = b_{33} = b_{34} = b_{41} = b_{43} = b_{44} = 0$$

$$b_{22} = \frac{\frac{L_{11}^{rr}}{L_{21}^{sr}}}{\left(\frac{L_{11}^{rr}L_{22}^{ss}}{L_{21}^{sr}} - L_{12}^{sr}\right)}$$

Sedangkan vektor keluarannya dapat ditulis dalam bentuk matrik sebagai berikut:

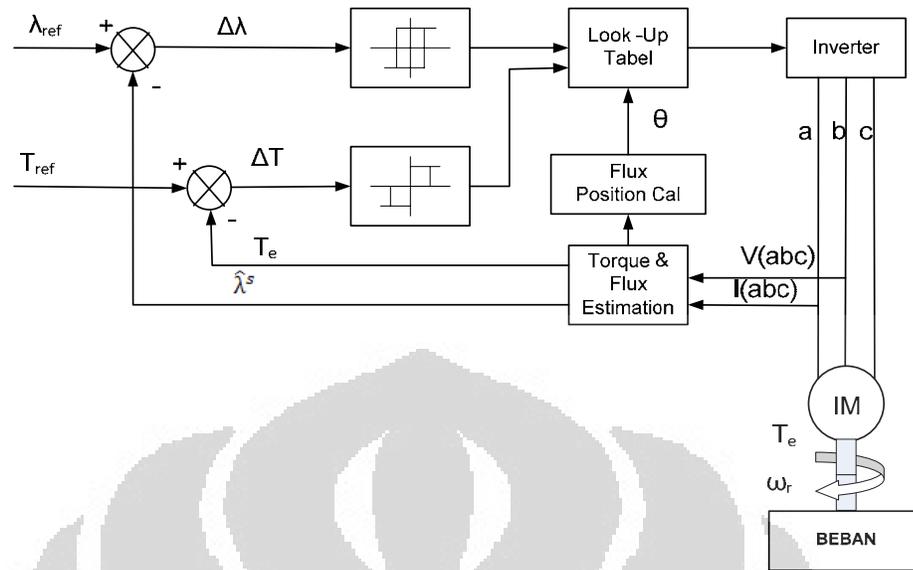
$$I_s = CX$$

$$\begin{bmatrix} I_q^s \\ I_d^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q^s \\ i_d^s \\ \lambda_q^s \\ \lambda_d^s \end{bmatrix}$$

2.7. Metode Kendali Torsi Langsung

Kendali Torsi Langsung (KTL) atau biasa disebut Direct Torque Control (DTC) adalah metode pengendalian torsi secara langsung berdasarkan kondisi elektromagnetik dari motor induksi. Pada KTL dimungkinkan untuk dilakukan pengendalian langsung torsi dan fluks stator dengan penentuan pemilihan vektor tegangan.

Rangkaian system KTL meliputi komperator histerisis, estimator untuk torsi, nilai magnitude fluks dan posisi fluks stator, dan pemilihan vector tegangan (voltage selector) sebagai masukan inverter sumber tegangan atau bias disebut dengan Voltage Source Inverter (VSI) [13] Proses KTL pada motor induksi tiga fasa digambarkan dalam blok diagram 2.10 sebagai berikut:



Gambar 2.9. Rangkaian Dasar Kendali Torsi Langsung

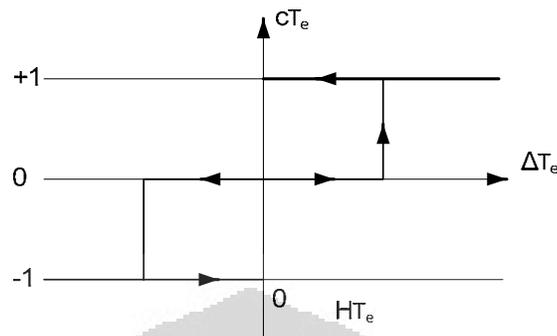
Pada gambar 2.10. ditunjukkan metode KTL menggunakan komparator histerisis yang akan dilakukan perbandingan antara nilai acuan fluks stator dan torsi dengan nilai hasil estimasi fluks stator dan torsi dari motor. Pada komparator histerisis ini terdapat kondisi fluks dan torsi, dan dengan posisi fluks stator akan digunakan untuk melakukan pemilihan vector tegangan.

2.7.1 Komparator histerisis

Pengendalian pada metode KTL dilakukan dengan cara membandingkan torsi hasil estimasi dengan torsi acuannya dan membandingkan fluks hasil estimasi dengan fluks acuannya. Komparator histerisis ini membandingkan kesalahan torsi dan fluks dengan nilai histerisisnya.

2.7.2 Komparator Histerisis Torsi tiga level

Pada pengendalian torsi digunakan komparator histerisis tiga level untuk torsi. Hal ini berarti terdapat tiga keadaan yang diinginkan untuk torsi (cT_e). (cT_e) akan bernilai 1 jika torsi yang dibutuhkan harus dinaikan. Jika dibutuhkan penurunan nilai torsi maka (cT_e) akan bernilai -1, sedangkan jika dibutuhkan adanya perubahan nilai torsi, maka nilai (cT_e)=0.



Gambar.2.10 Komparator Histerisis Torsi Tiga Level

Prinsip kerja komparator histerisis torsi tiga level untuk mengubah keadaan torsi adalah sebagai berikut:

Jika selisih dari torsi acuan dengan torsi estimasi lebih besar sama dengan nilai positif histerisisnya (H_{Te}) maka kondisi torsi (cTe) akan bernilai 1.

Jika selisih dari torsi acuan dengan torsi estimasi lebih kecil sama dengan nilai negatif histerisisnya ($-H_{Te}$) maka kondisi torsi (cTe) akan bernilai -1.

Jika selisih dari torsi acuan dengan torsi estimasi diantara nilai positif histerisisnya (H_{Te}) dengan nilai negative histerisisnya ($-H_{Te}$) maka harus dilihat kondisi torsi sebelumnya.

Bila kesalahan berada antara 0 dan ($-H_{Te}$) terdapat tiga keadaan torsi yang harus diperhatikan :

** Jika kondisi torsi sebelumnya (cTe) = -1 maka nilai (cTe) yang baru adalah -1

** Jika kondisi torsi sebelumnya (cTe) = 1 maka nilai (cTe) yang baru adalah 0

** Jika kondisi torsi sebelumnya (cTe) = 0 maka nilai (cTe) yang baru adalah 0

** Jika nilai kesalahan berada antara 0 dan (H_{Te}) terdapat tiga keadaan torsi yang juga harus diperhatikan :

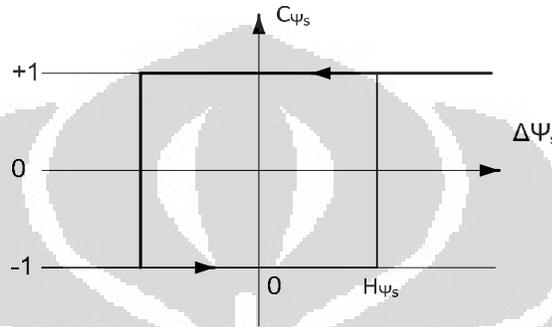
*** Jika kondisi torsi sebelumnya (cTe) = -1 maka nilai (cTe) yang baru adalah 0

*** Jika kondisi torsi sebelumnya (cTe) = 0 maka nilai (cTe) yang baru adalah 0

*** Jika kondisi torsi sebelumnya (cTe) = 1 maka nilai (cTe) yang baru adalah 1

2.7.3 Komparator Histerisis Fluks Dua Level

Pada pengendalian fluks digunakan komparator histerisis dua level. Hal ini menunjukkan hanya terdapat dua keadaan atau kondisi yang diinginkan untuk fluks ($c\psi$) akan bernilai, sedang bila dibutuhkan penurunan nilai fluks maka ($c\psi$) akan bernilai -1.



Gambar2.11. Komparator Histerisis Fluks Dua Level

Cara kerja komparator histerisis fluks dua level lebih sederhana bila dibandingkan dengan komparator histerisis tiga level untuk torsi.

Jika selisih nilai fluks acuan dengan fluks estimasi lebih kecil sama dengan nilai negative histerisis ($-H_{\text{fluks}}$), maka kondisi ($c\psi$) akan bernilai -1.

Jika selisih nilai fluks acuan dengan fluks estimasi lebih besar dari nilai positif histerisis (H_{fluks}), maka kondisi ($c\psi$) akan bernilai 1.

Jika selisih nilai fluks acuan dengan fluks estimasi diantara nilai negative histerisis dan positif histerisis fluks maka perlu dilihat ($c\psi$) (kondisi fluks) sebelumnya.

** Jika ($c\psi$) sebelumnya bernilai -1 maka ($c\psi$) yang baru adalah -1

** Jika ($c\psi$) sebelumnya bernilai 1 maka ($c\psi$) yang baru adalah 1

Pemilihan Vektor Tegangan

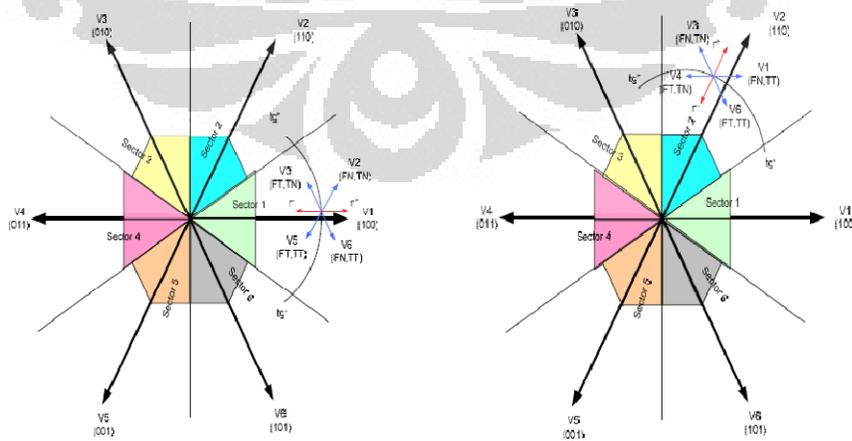
Pemilihan vektor tegangan bertujuan untuk mengatur tegangan yang akan masuk ke motor induksi tiga fasa dengan vektor control, dengan memilih vektor tegangan stator yang memenuhi kondisi torsi dan fluks yang ditentukan untuk setiap sektor.

Terdapat enam vektor tegangan dan dua vektor tegangan nol (0) sebagai

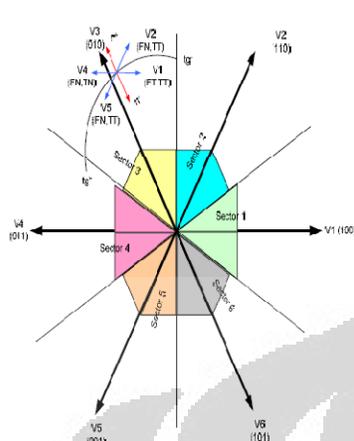
keluaran inverter, yaitu $V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6,$ dan V_7 . KTL menggunakan delapan kemungkinan vektor tegangan stator untuk mengendalikan fluks stator dan torsi untuk memenuhi nilai acuan yang ditentukan. Penentuan pemilihan vektor tegangan stator pada KTL ini dilakukan dengan menempatkan komponen radial dan tangensial pada daerah atau sektor vektor fluks.

Pada penentuan vektor tegangan ini terdapat enam sektor atau daerah dengan sudut tiap sektornya adalah 60° . Pembagian sektor ini dimulai dari sudut $30^\circ - 30^\circ$ untuk sektor 1, untuk sektor 2 dari sudut $30^\circ - 90^\circ$, begitu seterusnya dengan interval 60° sampai sektor 6 dengan sudut antara $270^\circ - 30^\circ$. Gambar 2.12 Yaitu pemilihan vektor tegangan saat fluks stator di 1, tegangan yang tidak digunakan adalah V_1 dan V_4 karena sejajar dengan garis normal. Untuk setiap sektor terdapat kondisi fluks naik (FN), fluks turun (FT), torsi naik (TN), torsi tetap, dan torsi turun (TT) yang dilihat dari sumbu tangensial (tg) dan sumbu normal (n).

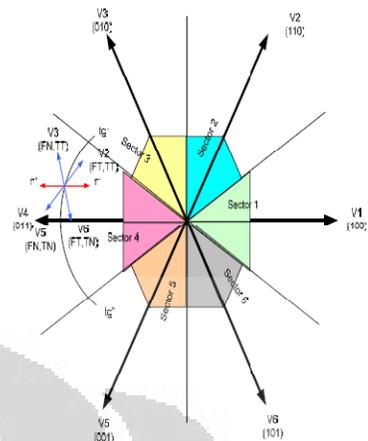
Vektor tegangan searah dengan sumbu normal positif (n+) adalah kondisi fluks naik (FN). Vektor tegangan searah dengan sumbu normal negative (n-) adalah kondisi fluks turun (FT). Vektor tegangan searah dengan sumbu tangensial positif (tg+) adalah kondisi torsi naik (TN). Vektor tegangan searah dengan sumbu tangensial negative (tg-) adalah kondisi torsi turun (TT). Penentuan untuk sektor selanjutnya juga sama seperti sector 1 hanya tergantung dari sumbu tangensial dan garis normal pada masing-masing sektor tersebut. Berikut keenam gambar pemiliha vektor tegangan pada daerah fluks stator.



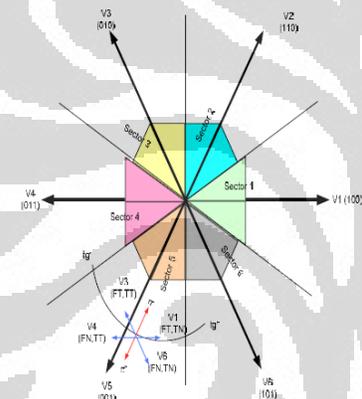
Gambar 2.12 Vektor tegangan saat fluks stator dalam sektor 1 **Gambar 2.13** Vektor tegangan saat fluks stator dalam sektor 2



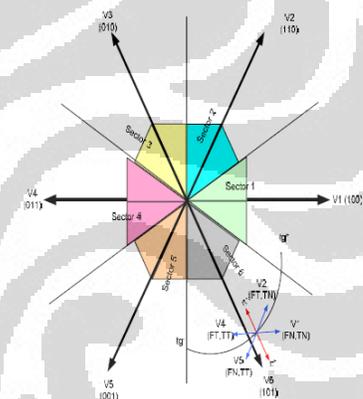
Gambar 2.14 Vektor tegangan saat fluks stator dalam sektor 3



Gambar 2.15 Vektor tegangan saat fluks stator dalam sektor 4



Gambar 2.16 Vektor tegangan saat fluks stator dalam sektor 5



Gambar 2.17 Vektor tegangan saat fluks stator dalam sektor 6

Dari keenam gambar pemilihan vektor tegangan masing-masing sektor dapat dituliskan menjadi pensaklaran sebagai berikut:

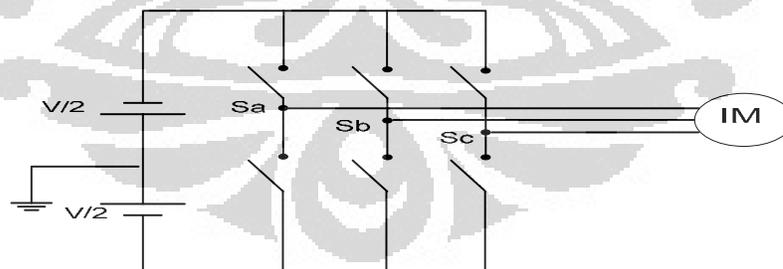
Tabel 2.1. Pemilihan vektor Tegangan masing-masing sektor

ϕ	Te	Sector					
		1	2	3	4	5	6
$c\phi=1$	CT=1	V2	V3	V4	V5	V6	V1
	CT=0	V7	V0	V7	V0	V7	V0
	CT=-1	V6	V1	V2	V3	V4	V5
$c\phi=-1$	CT=1	V3	V4	V5	V6	V1	V2
	CT=0	V0	V7	V0	V7	V0	V7
	CT=-1	V5	V6	V1	V2	V3	V4

Dengan $c\phi = 1$ berarti fluks harus dinaikan sebaliknya $c\phi = -1$ berarti fluks harus diturunkan. Untuk kondisi torsi yaitu $cT = 1$ berarti torsi harus dinaikan, $cT = 0$ berarti torsi tetap tidak perlu diubah nilainya, dan $cT = -1$ torsi diturunkan.

2.7.4 Inverter Sumber Tegangan

Inverter sumber tegangan memiliki enam buah saklar (tiga pasang) yang bekerja bergantian. Inverter akan menghasilkan tegangan tiga fasa sebagai masukan motor induksi. Tiap pasangannya terdapat dua buah saklar yang bekerja bergantian. Hal ini berarti tidak ada kemungkinan dari satu pasangan saklar bekerja bersamaan karena dapat mengakibatkan terjadinya hubungan singkat. Jika Sa bernilai 1 maka Sa' bernilai 0.



Gambar.2.19.Diagram Inverter Sumber Tegangan

Keluaran inverter yang berupa tegangan tiga fasa masukan dari motor adalah dapat rumuskan dengan persamaan:

$$V_n = (S_n - S_n') \times V_{DC}/2 \quad (n=a, b, c)$$

Tabel.2.2 Pensaklaran inverter berdasarkan vektor tegangan

	Sa	Sb	Sc
V0	0	0	0
V1	1	0	0
V2	1	1	0
V3	0	1	0
V4	0	1	1
V5	0	0	1
V6	1	0	1
V7	1	1	1

2.7.5 Estimasi Model Tegangan

Pada pengestimasi menggunakan model tegangan, perhitungan parameter estimasinya menggunakan persamaan fluks stator estimasi. Fluks stator dan Torsi estimasi dihitung berdasarkan persamaan dinamik motor model kerangka acuan stator yang diberikan pada persamaan (2.130) dan persamaan 2 [1].(Albazer)

Persamaan model tegangan untuk mendapatkan estimasi fluks stator adalah

$$\lambda_q^s = \int (v_q^s - r_s i_q^s) dt \quad (2.130)$$

$$\lambda_d^s = \int (v_d^s - r_s i_d^s) dt \quad (2.131)$$

Dengan :

$$v_q^s = \frac{2}{3} \left[v_{as} - \frac{1}{2} (v_{bs} + v_{cs}) \right] \quad (2.132)$$

$$v_d^s = \frac{1}{\sqrt{3}} [-v_{bs} + v_{cs}] \quad (2.133)$$

Untuk Persamaan model tegangan untuk mendapatkan estimasi fluks stator dengan jumlah belitan[2] menjadi:

$$\hat{\lambda}_q^s = \int (v_q^s - r_{11}^s i_q^s - r_{12}^s i_d^s) dt \quad (2.134)$$

$$\hat{\lambda}_d^s = \int (v_d^s - r_{21}^s i_q^s - r_{22}^s i_d^s) dt \quad (2.135)$$

$$\hat{\lambda}^s = \sqrt{(\hat{\lambda}_q^s)^2 + (\hat{\lambda}_d^s)^2} \quad (2.136)$$

Persamaan torsi dapat dilihat dari persamaan (2.122)

$$T_e = \frac{3P}{2} (\hat{\lambda}_d^s i_q^s - \hat{\lambda}_q^s i_d^s)$$

Sedangkan untuk mendapatkan posisi fluks stator digunakan persamaan

$$\hat{\theta}_{\text{fluks}} = \tan^{-1} \left(\frac{\hat{\lambda}_q^s}{\hat{\lambda}_d^s} \right) \quad (2.137)$$

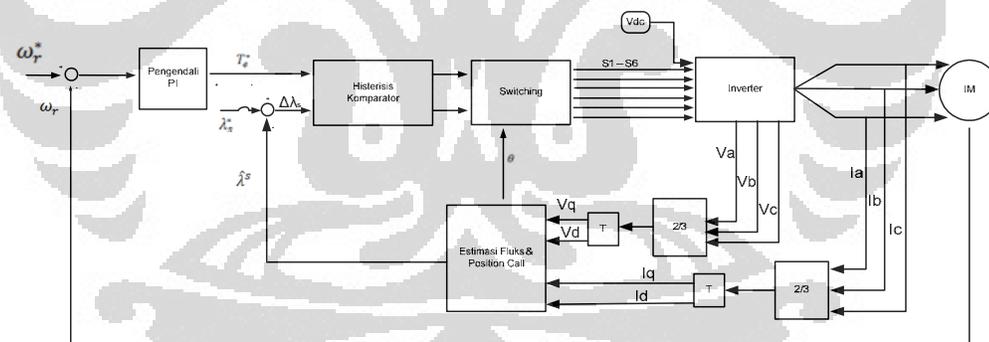
BAB 3

PERANCANGAN PENGENDALI

3.1 Penerapan Pengendali Kecepatan

Pengendali torsi langsung ini dapat diterapkan pengendali kecepatan baik untuk model setimasi tegangan. Berikut adalah implementasi pengendali kecepatan pengendali torsi langsung dengan metode PI. Masukan pengendali kecepatan berupa nilai kecepatan yang diukur dari estimasi kecepatan motor induksi dimana kecepatan motor sebanding dengan torsi elektromagnetik, masukan ini akan dibandingkan dengan kecepatan acuannya kemudian oleh PI sehingga menghasilkan torsi acuan yang akan dibandingkan dengan torsi estimasinya. Sehingga kesalahan torsi dapat dikendalikan oleh pengendali KTL.

Referensi untuk kecepatan motor menggunakan masukan unit step untuk melihat keadaan saat terjadi perubahan resistansi di stator pada keadaan yang tidak dapat diperkirakan kapan terjadinya perubahan resistansi di stator.



Gambar3.1 Blok diagram pengendali torsi langsung menggunakan pengendali kecepatan dengan metode PI

3.2 Uji *Stability*, *Controlbility* dan *Observability* Untuk Model Motor Induksi Tiga Phasa Sangkar Tupai

Sebelum melakukan aplikasi kontrol pada sebuah sistem harus di periksa terlebih dahulu apakah sistem yang dibuat dapat di kendalikan, dapat diamati dan

memiliki kestabilan, pengujian kestabilan diasumsikan dimana keadaan motor pada besaran minimum 187 rad/s.

Pengujian dari ketiga karakteristik diatas akan digunakan untuk motor induksi tiga fasa sangkar tupai dengan perubahan resistansi, dimana parameter pengujian yang digunakan dari model motor dengan jumlah belitan simetris sebesar 252 belitan pada setiap fasa di stator, adalah:

$$A = \begin{bmatrix} -20.6605 & -0.8219 & 25.2429 & -1.3389 \\ -1.2167 & -21.0522 & -1.6291 & 30.7125 \\ -1.3500 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1.3500 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1.3389 & 0 \\ 0 & 1.3389 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3.2.1 Stability Model Motor Induksi Tiga Fasa Sangkar Tupai

Suatu sistem dikatakan tidak stabil jika akar-akar persamaan karakteristiknya berada disebalah kanan sumbu imajiner. Untuk menguji kestabilan dari suatu sistem dapat dilihat dengan menentukan nilai *eigen* dari model motor, dengan menggunakan persamaan (3.1), untuk menghitung dari nilai *eigen* menggunakan M-File Matlab.

$$\det(\mu I - A) \quad (3.1)$$

$$\det(\mu I - A) = \left(\mu \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -20.6605 & -0.8219 & 25.2429 & -1.3389 \\ -1.2167 & -21.0522 & -1.6291 & 30.7125 \\ -1.3500 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1.3500 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right)$$

$$\mu = \begin{bmatrix} -20.0747 \\ -17.5959 \\ -1.7115 \\ -2.3305 \end{bmatrix}$$

Dri nilai *eigen* yang diperoleh menunjukkan akar- akar persamaan karakteristiknya berada pada sebelah kiri sumbu imajiner, sistem dinyatakan stabil.

3.2.1 *Controbility* Model Motor Induksi Tiga Phasa Sangkar Tupai

Sebelum melakukan langkah kontrol pada model motor *controbility* dari sebuah sistem harus diteliti. Parameter motor merupakan sebuah sistem *Linier Time Invariant* yang linier, dimana dinyatakan dalam *state space* dengan menggunakan dari sistem matriks A dan B. Sebuah sistem dapat dikendalikan juka matriks P dibawah ini mempunyai rank = n, dimana persamaan(3.2), untuk menghitung dari rank menggunakan M-File Matlab.

$$P = [AB \ A^2B \ \dots \dots \dots \ A^{(n-1)}B] \quad (3.2)$$

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 28 & -1 & 5271 & 48 & 10011 & -1589 \\ 0 & 1 & -2 & -28 & 71 & 539 & -2127 & -10244 \\ 0 & 0 & 225 & 0 & -37 & 1 & 712 & 65 \\ 0 & 0 & 0 & -2 & 2 & 38 & 96 & 728 \end{bmatrix}$$

rank = 4

Nilai *rank* = 4=n , maka sistem dikatakan dapat dikendaliakan atau *controbility*

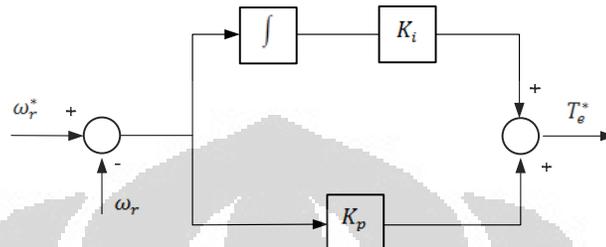
3.3 Pengendalian Kecepatan Menggunakan *Proposoanal* dan *Integral*

Pada perancangan pengendali torsi langsung dapat diterapkanya pengendali kecepatan. Pengendali kecepatan menggunakan PI sebagai pengendalinya agar keluaran tunak sama dengan titik acuan yang merupakan masukan dari pengendali PI. Dengan rumus PI adalah

$$u = K_p(x - y) + K_i \int (x - y) \quad (3.3)$$

Dengan x adalh titik acuan, y adalah sinyal keluaran , dan u merupakan sinyal pengendali yang dihasilkan.

Pengendali kecepatan yang memiliki masukan kecepatan motor acuan dan kecepatan motor aktual (dengan sensor yaitu umpan balik langsung dari motor) atau kecepatan rotor estimasi (untuk tanpa sensor yaitu tidak diukur dari motor melainkan dihitung pada perhitungan estimasi) dengan gambar sebagai berikut:

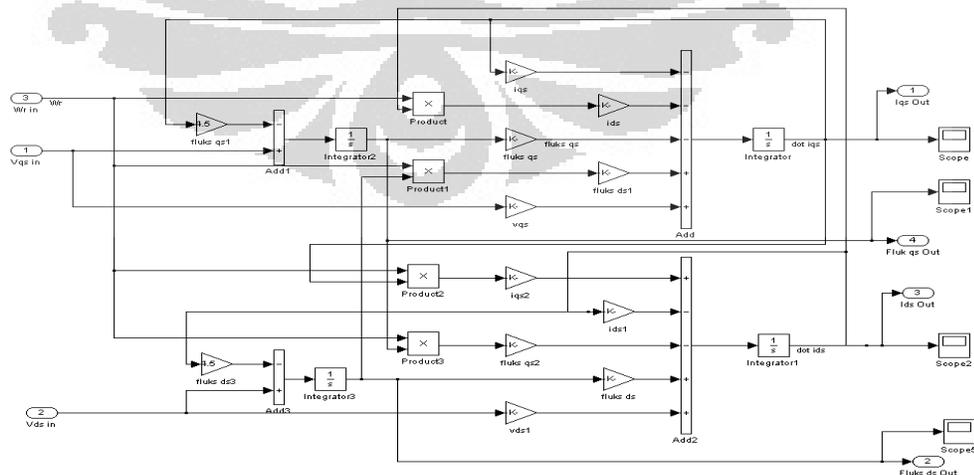


Gambar 3.2 Blok Diagram Pengendali Kecepatan

Keluaran dari pengendali kecepatan ini dalam hal ini yaitu u atau sinyal kendali adalah torsi acuan T_e^* , karena kecepatan motor sebanding dengan torsi.

3.4 Pemodelan Motor Induksi

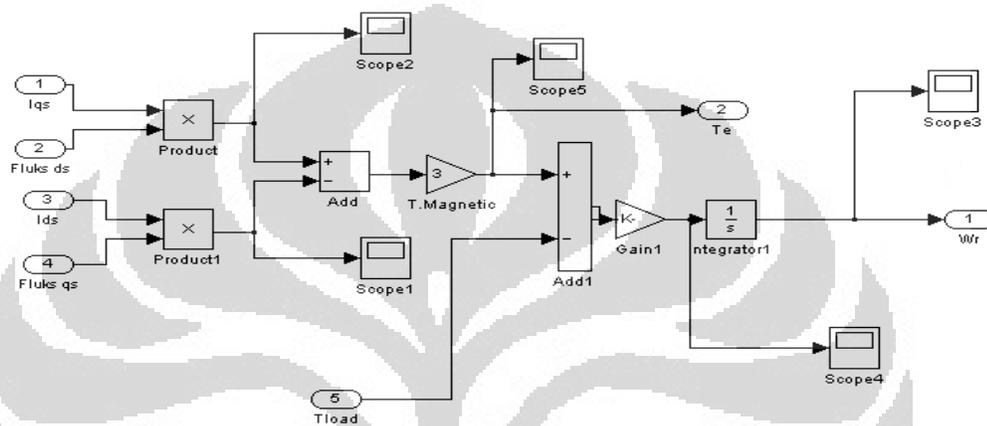
Model motor induksi yang mengacu pada sumbu qd yang merupakan perubahan dari transformasi 3 fasa diperoleh dari persamaan (2.126, 2.122, 2.119, 2.120) dimana nilai parameter dari jumlah belitan divalidasi dengan menggunakan M-File dan untuk model motor diimplementasikan kedalam blok dari fungsi SIMULINK. Model motor induksi di pada model di simulink ditunjukkan pada Gambar 3.3



Gambar 3.3 Model Motor Induksi

3.5 Pemodelan Torsi dan Kecepatan Motor

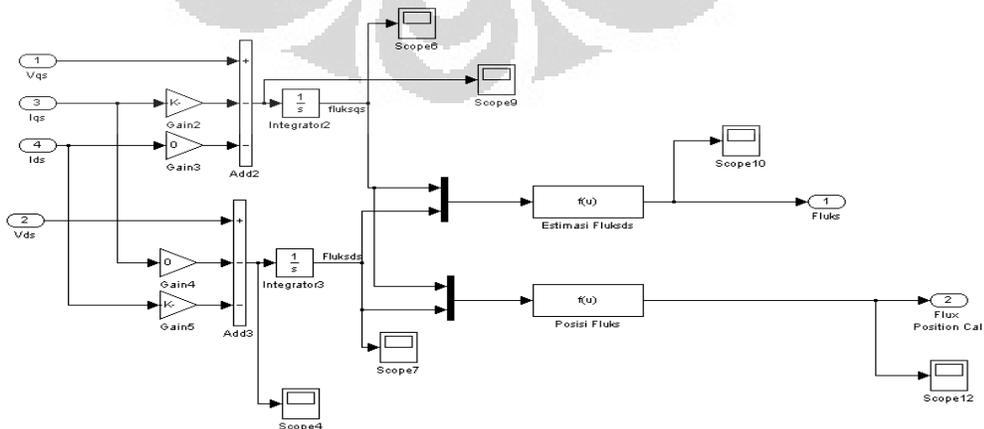
Estimasi Torsi menggunakan persamaan (2.128) dan kecepatan motor menggunakan persamaan (2.127) dimodelkan kedalam simulink ditunjukkan pada gambar 3.4



Gambar 3.4 Pemodelan Torsi dan Kecepatan motor (wr)

3.4 Estimasi Fluks dan Fluks Posisi

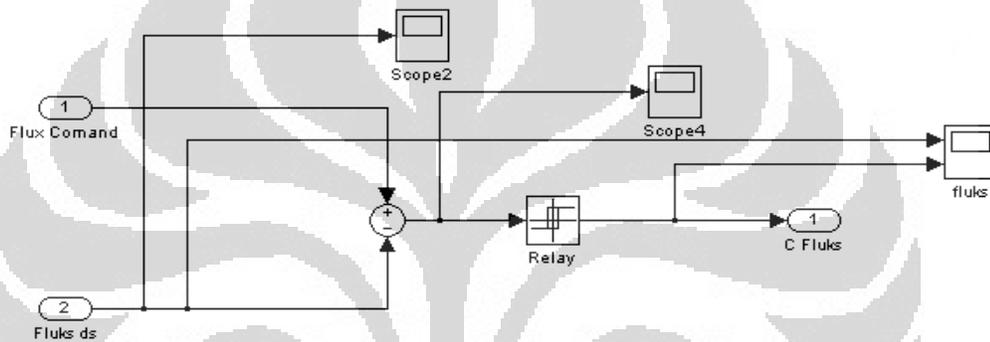
Estimasi fluks menggunakan persamaan (2.136) yang diperoleh dari persamaan (2.134-2.135) dan fluks posisi menggunakan persamaan (2.137) dimodelkan kedalam simulink ditunjukkan pada gambar 3.5



Gambar 3.5 Estimasi Fluks dan Fluks Posisi

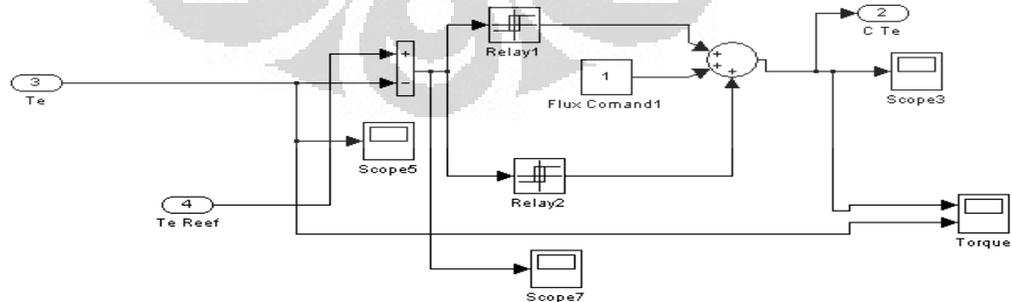
3.5 Pengendali Hysterisis Fluks dan Torsi

Pengendali *hysteresis* pada fluks menggunakan persamaan 2.126 . keluaran dari *comparator* adalah -1 dan 1 dengan mengacu dari fluks *refrensi* terhadap nilai fluks *estimasi*. Dimodelkan kedalam SIMULINK ditunjukkan pada gambar 3.6



Gambar 3.6 Fluks Hysterisis

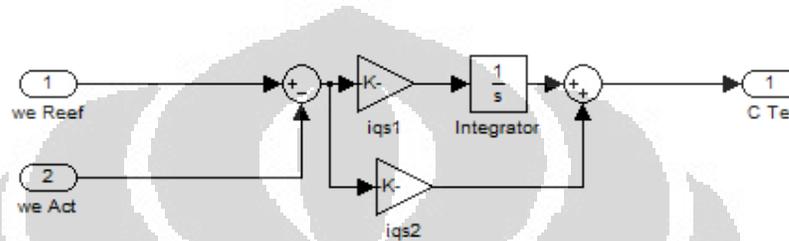
Mengacu dari persamaan (2.122) keluaran dari torsi *hysteresis* adalah -1 , 0 dan 1, karena akan digunakan *Look Up Tabel* dari SUMULINK, sejak keluaran *hysteresis* sebesar -1, 0 dan 1 maka dirubah ke 1,2 dan 3 dikarenakan pada *Look Up Table* menggunakan dimensi pada fungsi blok simulink. Model dari *Hysterisis* Torsi ditunjukkan pada gambar 3.7



Gambar 3.7 Hysterisis Torsi

3.6 Pengendali Proporsional dan integral

Pengendali Proporsional dan integral pada model motor induksi tiga fasa sangkar tupai dengan pengaruh resistansi di stator, di modelkan kedalam SIMULINK ditunjukkan pada gambar 3.8



Gambar 3.8 Pengendali PI

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISA

Untuk menguji hasil rancangan pengendalian motor induksi tiga Phasa metode kendali torsi langsung , dan PI dilakukan simulasi menggunakan program SIMULINK MATLAB dengan variasi perubahan resistensi. Kemudian sebagai tujuan dari penelitian pada tesis ini dilakukan pengendalian torsi langsung dan PI dengan motor induksi 2 HP .

Pada perancangan simulasi KTL ini, blok motor diasumsikan sebagai motor induksi tiga phasa yang sebenarnya. Masukannya berupa tegangan tiga phasa yang dikeluarkan oleh sumber tegangan inverter. Arus keluaran dari motor dan nilai tegangan dari inverter akan di umpan balik ke blok estimasi sedangkan untuk kecepatan motor menggunakan pengendali PI dengan asumsi kecepatan motor sebanding dengan torsi elektromagnetik.

4.1 Prosedur Simulasi

4.1.1 Simulasi Perubahan Kecepatan Motor dengan Jumlah Belitan Setimbang Tanpa Beban

Dalam simulasi jumlah belitan pada phasa a, phasa b dan phasa c sama , karena jumlah phasa b dan phasa c memiliki sudut acuan yang sama maka nilai parameternya juga sama.

4.1.2 Simulasi Perubahan Kecepatan Motor dengan Jumlah Belitan Tidak Setimbang Tanpa Beban

Dalam simulasi jumlah belitan $t=0$ adalah simetris, pada $t=6$ detik jumlah belitan dibuat tidak setimbang untuk setiap jumlah belitan pada phasa stator yang telah ditentukan.

4.2 Simulasi dengan Motor 2 HP

Berikut adalah nilai parameter motor 2 HP yang digunakan pada program simulasi:

Tabel 4.1 Parameter motor 2 HP[11]

Daya	2HP
Jumlah Pasang Kutub (P)	2
Resistansi Stator (Rs)	4.05 ohm
Resistansi Rotor (Rr)	2.6 ohm
Induktansi Stator(Ls)	0.01397 H
Induktansi Rotor (Lr)	0.01397 H
Induktansi Magnetik(Lm)	0.53868H
Momen Inersia (J)	0.06kgm ²
Koeffisien Gesekan (Tm)	0.089Nm
Jumlah Belitan Pada Phasa	252

Nilai resistansi fluks estimasi sebagai berikut:

Tabel 4.2 Nilai Resistensi pada Fluks Estimasi

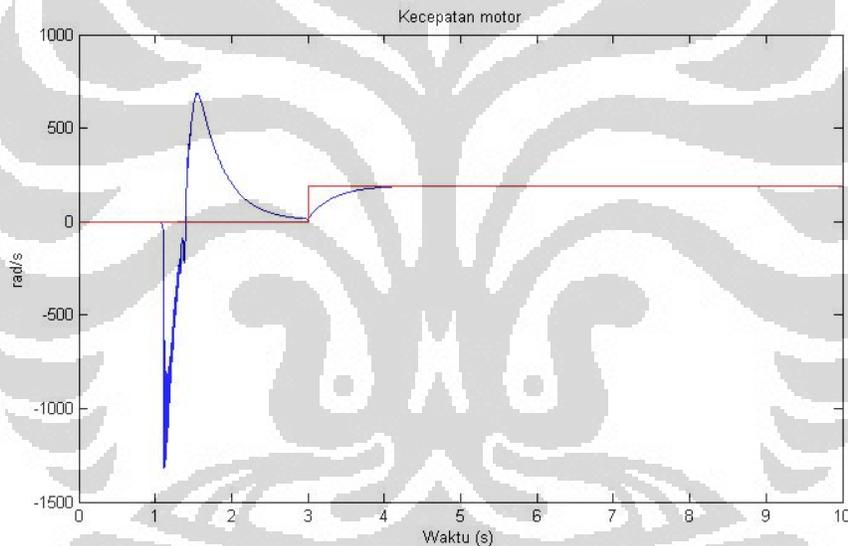
r_{11}^s	1.3500 ohm
r_{12}^s	0 ohm
r_{21}^s	1.3500 ohm
r_{22}^s	0 ohm

Dari simulasi akan dilihat kecepatan rotor (ω_r), Fluks pada stator (λ_s) dan arus satu fasa dari stator (i_d), Konstanta histerisis torsi = 0.06 dengan melihat besaran nilai maksimum sebesar 0.6, sedangkan konstanta histerisi fluks adalah 0.12, Kp= 0.00316 dan konstanta integral Ki= 0.089.

4.3 Simulasi dengan Jumlah Belitan Simetris Pada Phasa A 252 Phasa B 252 dan Phasa C 252

Dari simulasi akan dilihat kecepatan motor (ω_r), arus sumbu a (I_a^s), arus sumbu b (I_b^s), fluks stator (λ_s), torsi (T_e) dan tegangan masukan di sumbu vds.

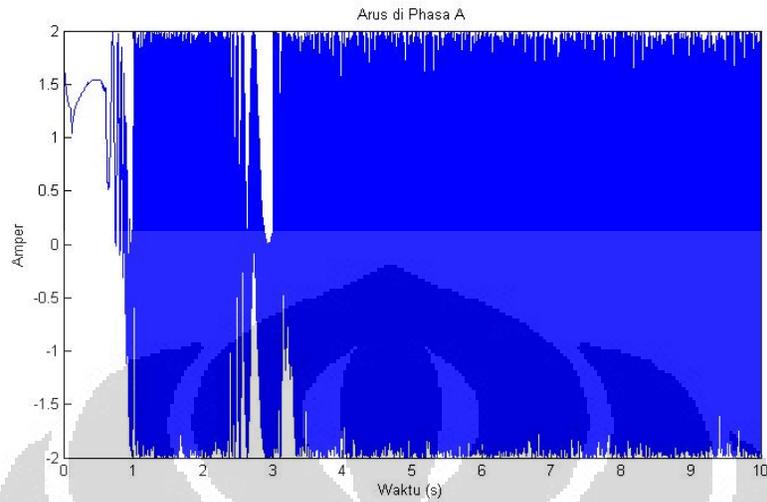
Pada metode kendali torsi langsung dengan pengendali PI sistem merespon perubahan nilai acuan, hal ini dapat diperlihatkan pada gambar 4.1 dimana sinyal kecepatan motor bekerja pada $t=0.54$ detik menunjukkan kinerja dari motor, pada $t=1.1$ detik kecepatan motor = 1200 rad/s, pada saat $t=1.56$ detik kecepatan motor 800 rad/s. pada $t=3$ detik kecepatan motor mengikuti sinyal acuan pengendali.



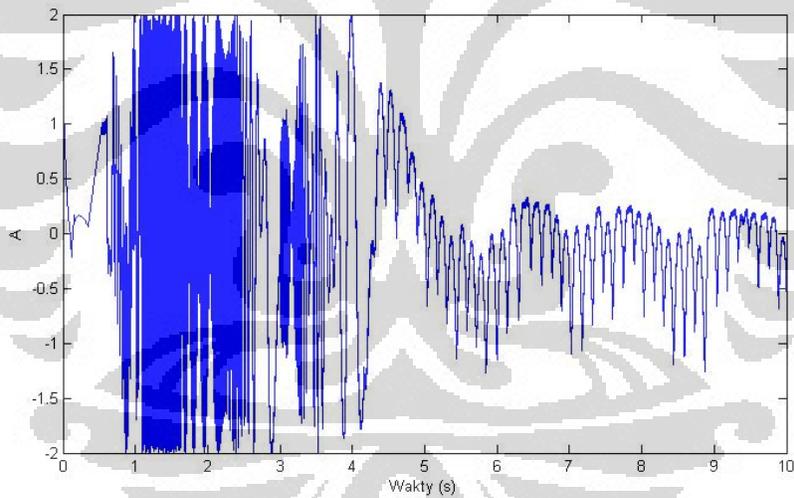
Gambar 4.1 Kecepatan motor dengan jumlah belitan pada Phasa A 252 Phasa B 252 dan Phasa C 252

Untuk Arus pada phasa A Saat $T=5.4$ detik menunjukkan arus = 1.54 A, pada $t=3$ detik menunjukkan arus mengalami penurunan sebesar 0.74 A, pada $t=3.3$ detik arus stabil sebesar 4 A ditunjukkan pada gambar 4.2.

Sedangkan Pada Arus Phasa B setelah $T=4.8$ detik rata arus adalah 1.4A ditunjukkan pada gambar 4.3

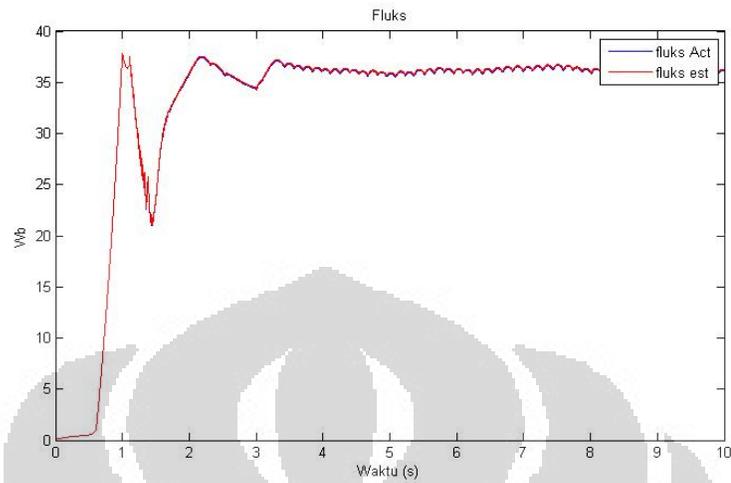


Gambar4.4 Arus Phasa A dengan jumlah belitan pada Phasa A 252 Phasa B 252 dan Phasa C 252



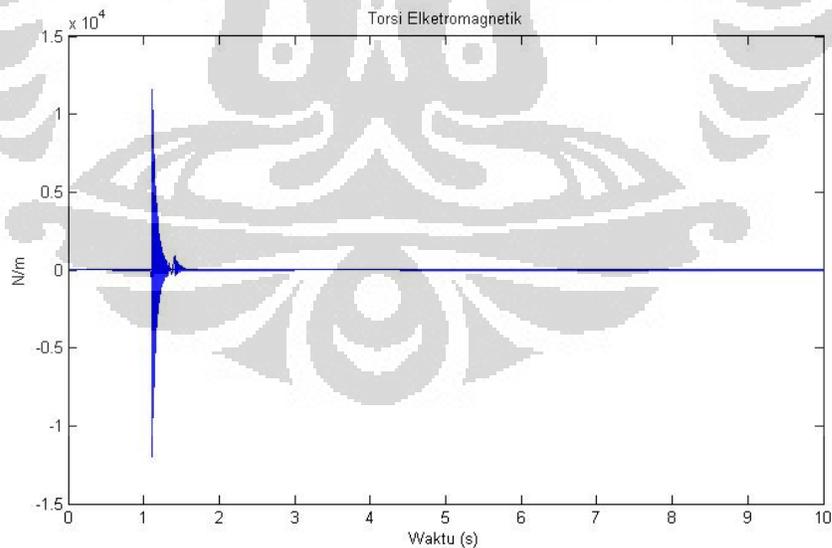
Gambar4.5 Arus Phasa A dengan jumlah belitan pada Phasa A 252 Phasa B 252 dan Phasa C 252

Pada fluks mulai bekerja lebih cepat sebesar $t = 0.54$ detik setelah diberikan pengendali, fluks actual mengikuti fluks estimasi sampai dengan $t = 1$ detik . pada saat $t = 3.3$ detik fluks melonjak . pada saat keadaan stabil besaran fluks = 35.6 Wb ditunjukkan gambar 4.6



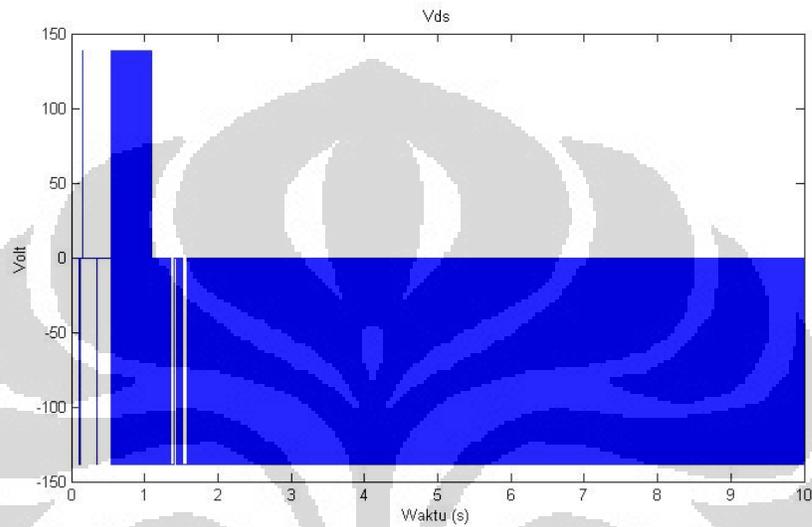
Gambar 4.6 Fluks dengan jumlah belitan pada Phasa A 252 Phasa B 252 dan Phasa C 252

Untuk torsi pada saat $t=0.54$ detik menunjukkan unjuk kerja sebesar 0.12 N/m, pada saat $t=1.1$ melonjak sebesar 1.1×10^4 N/m dan saat $t=3$ detik dimana kecepatan motor dikendalikan torsi mencapai puncak 18 N/m dan kembali stabil pada $t=4.2$ deik dengan rata-rata torsi sebesar 0.9554 N/m ditunjukkan gambar 4.7



Gambar4.7 Torsi Elektromagnetik dengan jumlah belitan pada Phasa A 252 Phasa B 252 dan Phasa C 252

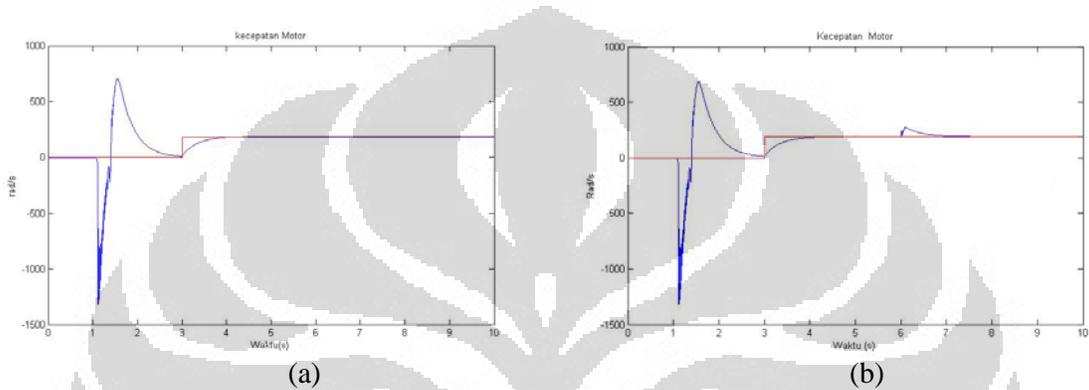
Pada tegangan masukan inverter menunjukkan bahwa pada saat pemilihan tegangan yang diberikan dari sinyal masukan *look up table* ke pada inverter menunjukkan bahwa pada saat $t=0.56$ detik proses pemilihan dapat bekerja secara baik dapat ditunjukkan pada gambar 4.8.



Gambar4.8 Inverter dengan jumlah belitan pada Phasa A 252 Phasa B 252 dan Phasa C 252

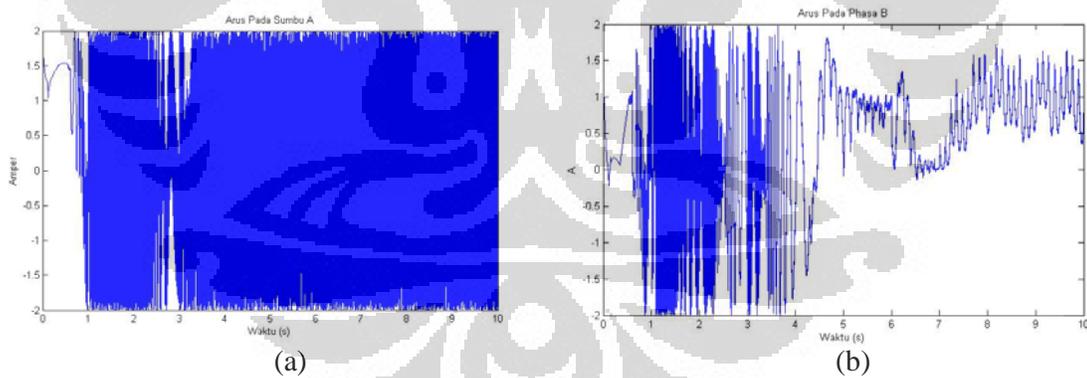
4.4 Simulasi dengan Jumlah Belitan Pada Phasa A 242 Phasa B 252 dan Phasa C 252 dan Jumlah Belitan Pada Phasa A 252 Phasa B 242 dan Phasa C 252

Dari hasil simulasi akan dilihat kecepatan motor (ω_r), arus sumbu a (I_a^s), arus sumbu b (I_b^s), fluks stator (λ_s), torsi (T_e) dan tegangan masukan di sumbu vds pada motor 2 HP yang ditunjukkan oleh gambar 4.9- 4.13



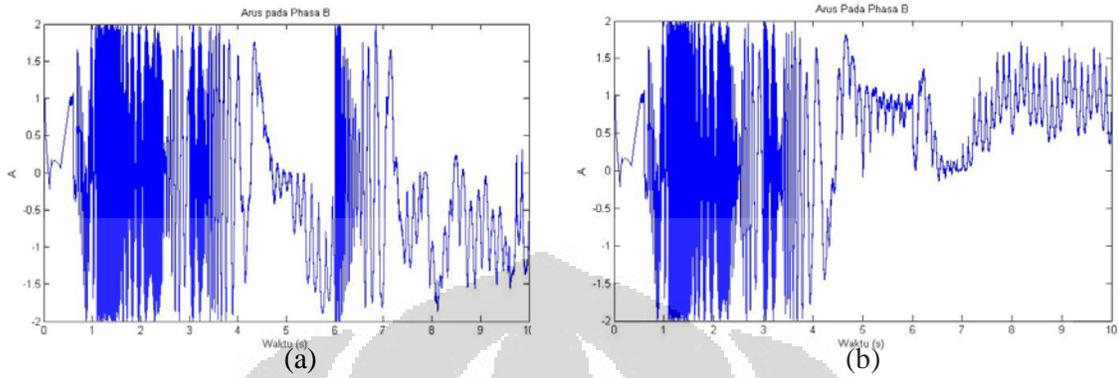
Gambar4.9.

(a) Kecepatan motor dengan jumlah belitan Pada Phasa A 242, Phasa B 252 dan Phasa C 252 (b) kecepatan motor dengan jumlah belitan Pada Phasa A 252, Phasa B 242 dan Phasa C 252



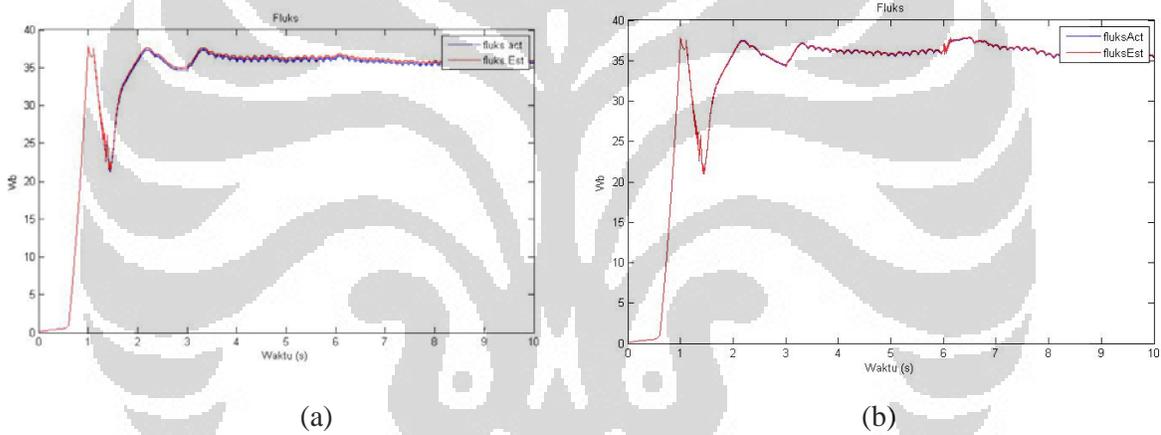
Gambar4.10

(a) Arus pada Phasa Adengan jumlah belitan Pada Phasa A 242, Phasa B 252 dan Phasa C 252 ; (b) Arus pada Phasa A dengan jumlah belitan Pada Phasa A 252, Phasa B 242 dan Phasa C 252



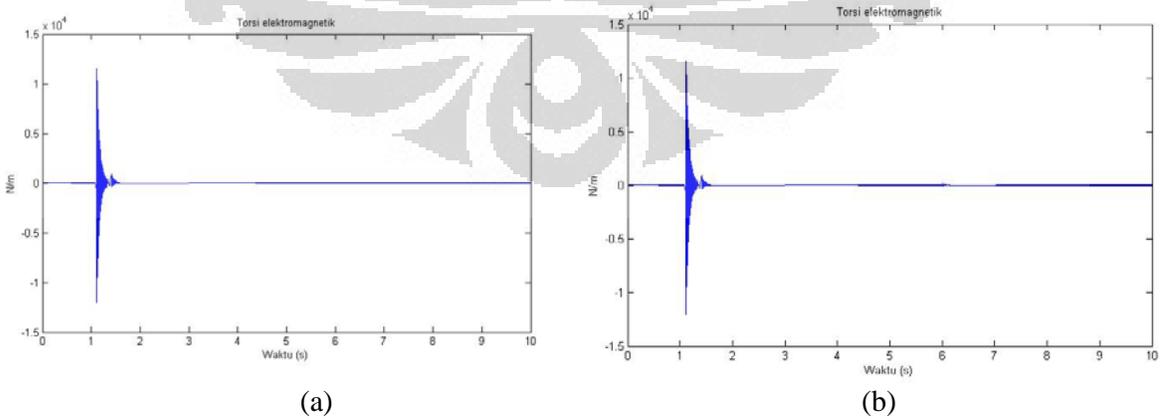
Gambar4.11

- (a) Arus pada Phasa Adengan jumlah belitan Pada Phasa A 242, Phasa B 252 dan Phasa C 252 ;
- (b) Arus pada Phasa A dengan jumlah belitan Pada Phasa A 252, Phasa B 242 dan Phasa C 252



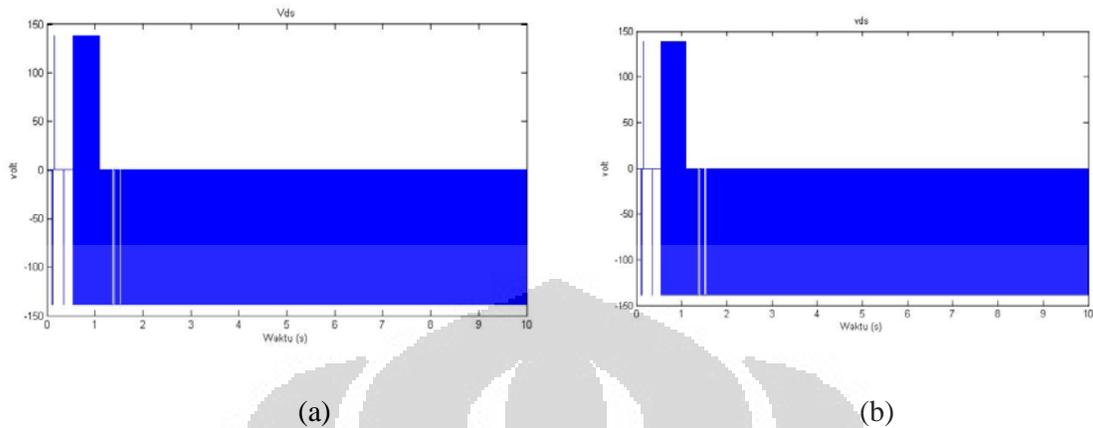
Gambar4.12

- (a) Arus pada Phasa B dengan jumlah belitan Pada Phasa A 242, Phasa B 252 dan Phasa C 252 ;
- (b) Arus pada Phasa B dengan jumlah belitan Pada Phasa A 252, Phasa B 242 dan Phasa C 252



Gambar4.13

- (a) Torsi Elektromagnetik dengan jumlah belitan Pada Phasa A 242, Phasa B 252 dan Phasa C 252 ;
- (b) Torsi Elektromagnetik dengan jumlah belitan Pada Phasa A 252, Phasa B 242 dan Phasa C 252

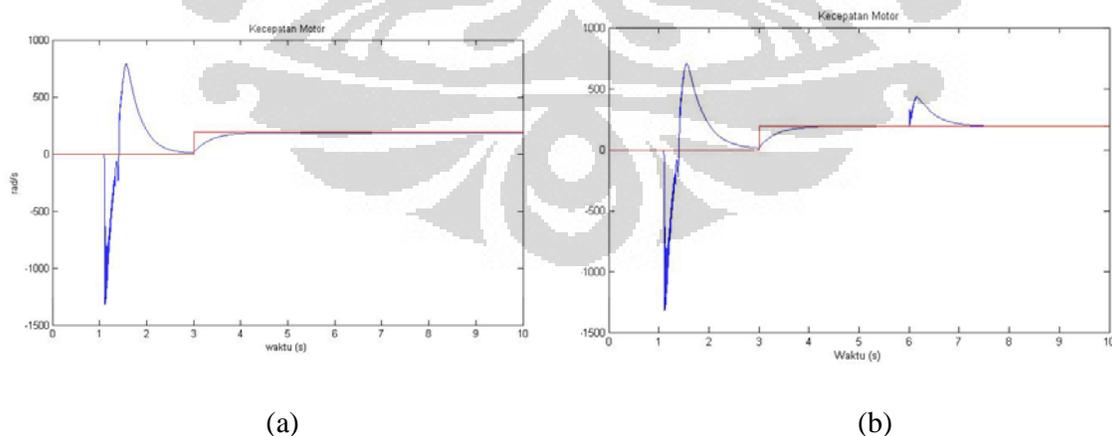


Gambar4.13
 (a) Inverter dengan jumlah belitan Pada Phasa A 242, Phasa B 252 dan Phasa C 252 ;
 (b) Inverter dengan jumlah belitan Pada Phasa A 252, Phasa B 242 dan Phasa C 252

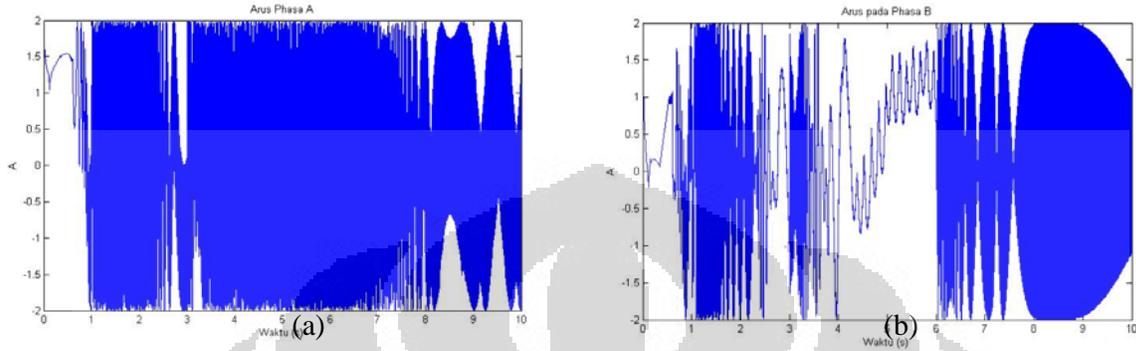
Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa motor masih dapat bekerja dikarenakan pemilihan inverter bekerja masih dengan baik.

4.5 Simulasi dengan Jumlah Belitan Pada Phasa A 222 Phasa B 252 dan Phasa C 252 dan Jumlah Belitan Pada Phasa A 252 Phasa B 222 dan Phasa C 252

Dari hasil simulasi akan dilihat kecepatan motor (ω_r), arus sumbu a (I_a^s), arus sumbu b (I_b^s), fluks stator (λ_s), torsi (T_e) dan tegangan masukan di sumbu vds pada motor 2 HP yang ditunjukkan oleh gambar 4.13- 4.18.

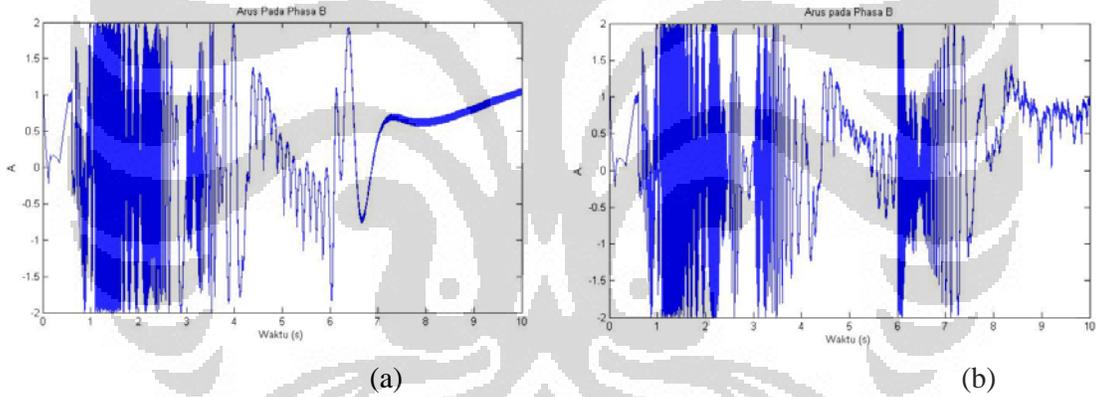


Gambar4.13.
 (a) Kecepatan motor dengan jumlah belitan Pada Phasa A 222, Phasa B 252 dan Phasa C 252
 (b) kecepatan motor dengan jumlah belitan Pada Phasa A 252, Phasa B 222 dan Phasa C 252



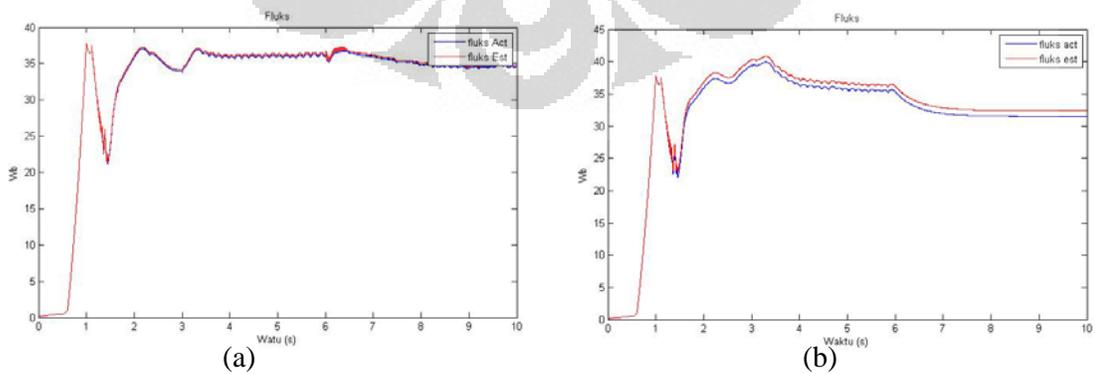
Gambar4.14.

- (a) Arus Pada Phasa A dengan jumlah belitan Pada Phasa A 222, Phasa B 252 dan Phasa C 252
- (b) Arus Pada Phasa A dengan jumlah belitan Pada Phasa A 252, Phasa B 222 dan Phasa C 252



Gambar4.15.

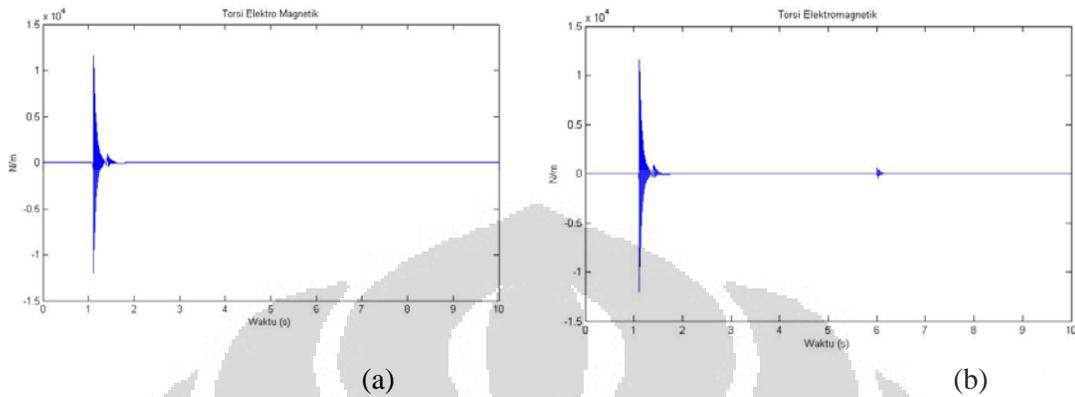
- (a) Arus Pada Phasa B dengan jumlah belitan Pada Phasa A 222, Phasa B 252 dan Phasa C 252
- (b) Arus Pada Phasa B dengan jumlah belitan Pada Phasa A 252, Phasa B 222 dan Phasa C 252



Gambar4.16.

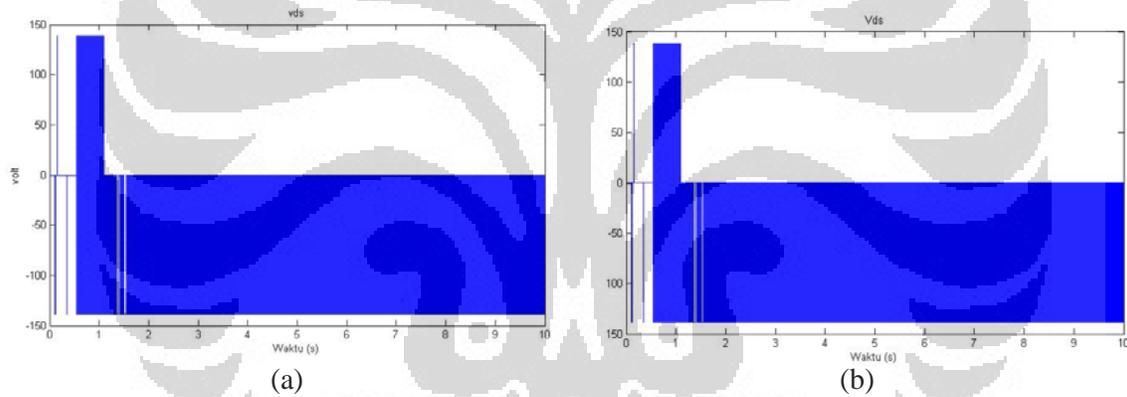
- (a)Fluks Pada Phasa A dengan jumlah belitan Pada Phasa A 222, Phasa B 252 dan Phasa C 252

(b) Fluks Pada Phasa B dengan jumlah belitan Pada Phasa A 252, Phasa B 222 dan Phasa C 252



Gambar4.17.

(a)Fluks Pada Phasa A dengan jumlah belitan Pada Phasa A 222, Phasa B 252 dan Phasa C 252
 (b) Fluks Pada Phasa B dengan jumlah belitan Pada Phasa A 252, Phasa B 222 dan Phasa C 252



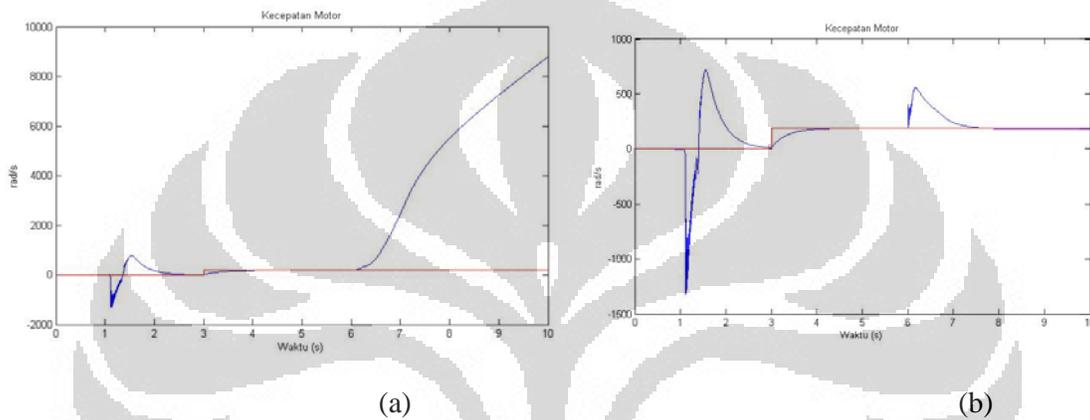
Gambar4.18.

(a)Inverter padaPhasa A dengan jumlah belitan Pada Phasa A 222, Phasa B 252 dan Phasa C 252
 (b) Inverter Pada Phasa B dengan jumlah belitan Pada Phasa A 252, Phasa B 222 dan Phasa C 252

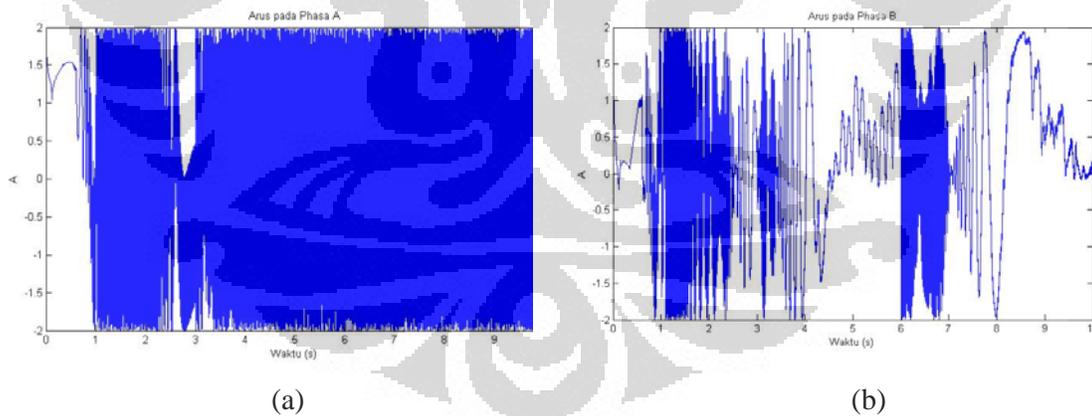
Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa motor masih dapat bekerja dikarenakan pemilihan inverter bekerja masih dengan baik.

4.6 Simulasi dengan Jumlah Belitan Pada Phasa A 200 Phasa B 252 dan Phasa C 252 dan Jumlah Belitan Pada Phasa A 252 Phasa B 200 dan Phasa C 252

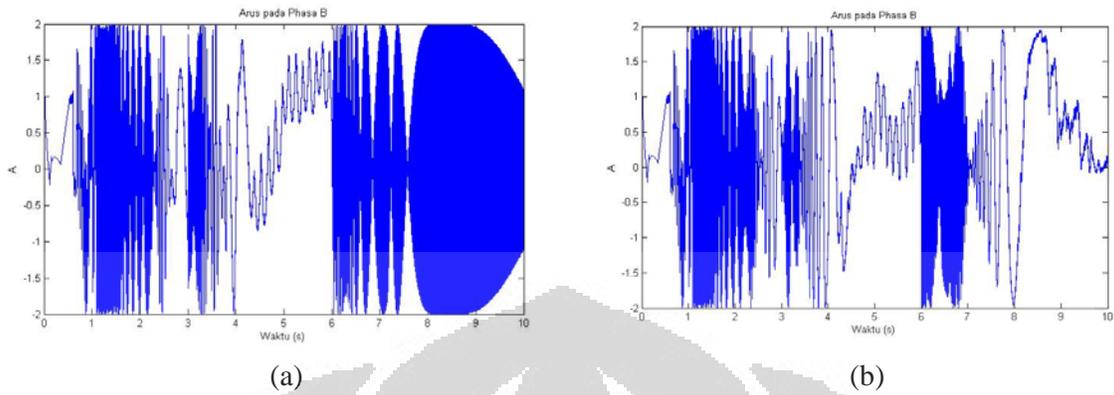
Dari hasil simulasi akan dilihat kecepatan motor (ω_r), arus sumbu a (I_a^s), arus sumbu b (I_b^s), fluks stator (λ_s), torsi (T_e) dan tegangan masukan di sumbu vds pada motor 2 HP yang ditunjukkan oleh gambar 4.19- 4.24.



Gambar4.19.
 (a)Kecepatan motor dengan jumlah belitan Pada Phasa A 200, Phasa B 252 dan Phasa C 252
 (b) kecepatan motor dengan jumlah belitan Pada Phasa A 252, Phasa B 200 dan Phasa C 252

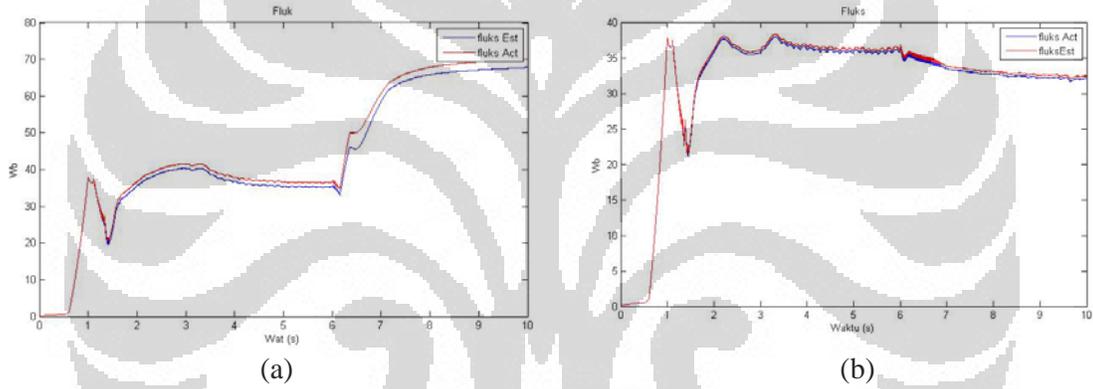


Gambar4.20.
 (a)Arus Pada Phasa A dengan jumlah belitan Pada Phasa A 200, Phasa B 252 dan Phasa C 252
 (b) Arus Pada Phasa A dengan jumlah belitan Pada Phasa A 252, Phasa B 200 dan Phasa C 252



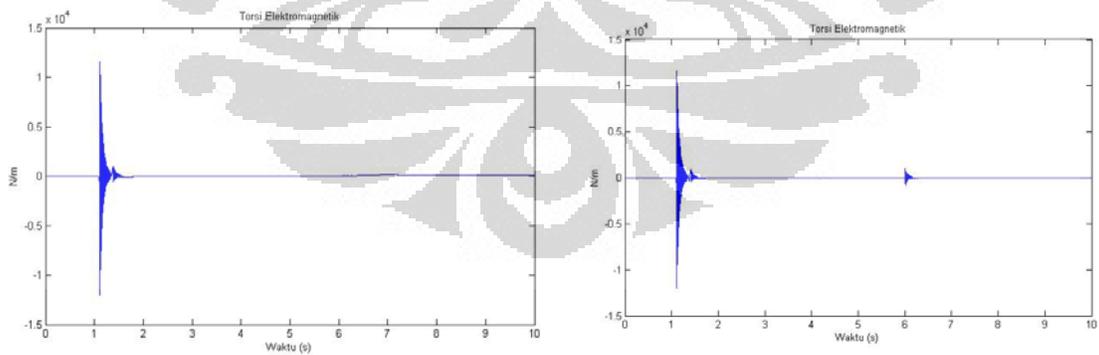
Gambar4.21.

(a) Arus Pada Phasa B dengan jumlah belitan Pada Phasa A 200, Phasa B 252 dan Phasa C 252
 (b) Arus Pada Phasa B dengan jumlah belitan Pada Phasa A 252, Phasa B 200 dan Phasa C 252



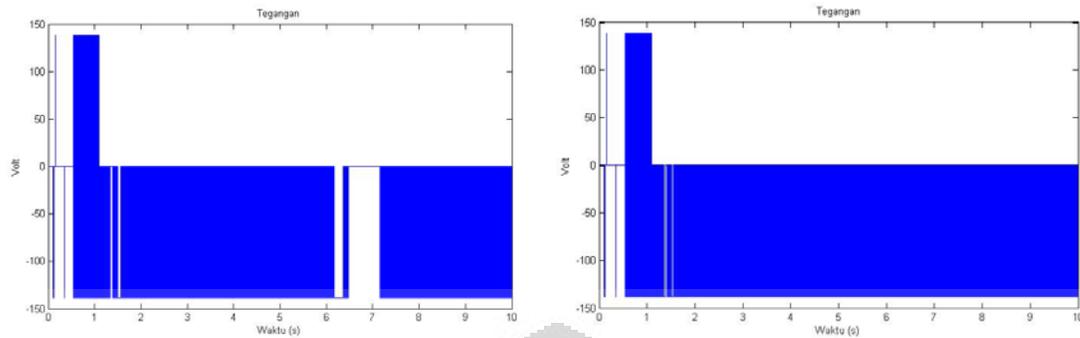
Gambar4.22.

(a) Arus Pada Phasa B dengan jumlah belitan Pada Phasa A 200, Phasa B 252 dan Phasa C 252
 (b) Arus Pada Phasa B dengan jumlah belitan Pada Phasa A 252, Phasa B 200 dan Phasa C 252



Gambar4.23.

(a) Torsi Elektromagnetik dengan jumlah belitan Pada Phasa A 200, Phasa B 252 dan Phasa C 252
 (b) Torsi Elektromagnetik dengan jumlah belitan Pada Phasa A 252, Phasa B 200 dan Phasa C 252



Gambar4.24.

- (a) Inverter dengan jumlah belitan Pada Phasa A 200, Phasa B 252 dan Phasa C 252
- (b) Inverter dengan jumlah belitan Pada Phasa A 252, Phasa B 200 dan Phasa C 252

Dari hasil simulasi untuk model motor dengan jumlah belitan pada phasa A 200, phasa B 252 dan phasa C 252 unjuk kerja inverter sebagai masukan pada $t = 6.2$ detik terhenti sampai $T=7$ detik ini menunjukkan bahwa motor tidak dapat bekerja dengan semestinya, sedangkan untuk motor dengan jumlah belitan pada phasa A 250, phasa B 200 dan phasa C 252 unjuk kerja torsi elektromagnetik melonjak sangat besar pada $T=6$ detik ini menunjukkan bahwa motor tidak dapat bekerja dengan baik.

BAB V

KESIMPULAN

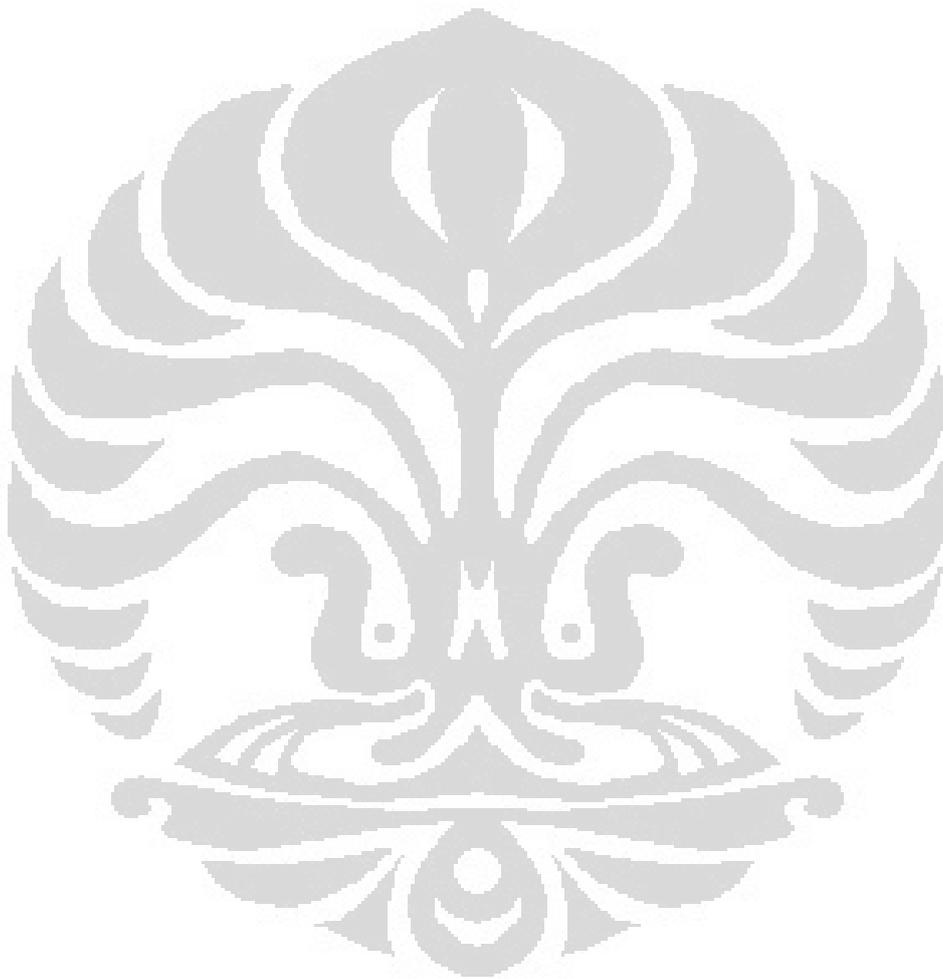
Dari keseluruhan pembahasan dalam laporan ini, dapat disimpulkan beberapa hal, yaitu:

1. Motor 2 HP dengan jumlah belitan dari 252, 242 dan 222 memiliki rata-rata penurunan kecepatan 2 rad/s sampai dengan 4 rad/s .
2. Kecepatan motor pada Phasa A dengan jumlah 200 belitan menyebabkan kecepatan motor tidak terkendali, karena masukan inverter yang tidak bekerja pada $t=6.3$ detik sampai dengan $t=7.3$ detik.
3. Kecepatan motor pada Phasa B dengan jumlah 200 belitan, dapat terkendali tetapi torsi saat $t= 6$ detik melonjak sampai dengan 950 N/m.
4. Pengendalian PI menunjukkan respon kecepatan yang dipengaruhi oleh perubahan resistansi memiliki batasan unjuk kerja motor terhadap fluks dan torsi.
5. Perubahan resistansi pada stator dapat digunakan sebagai pendeteksi awal kerusakan yang akan terjadi pada motor.

DAFTAR PUSTAKA

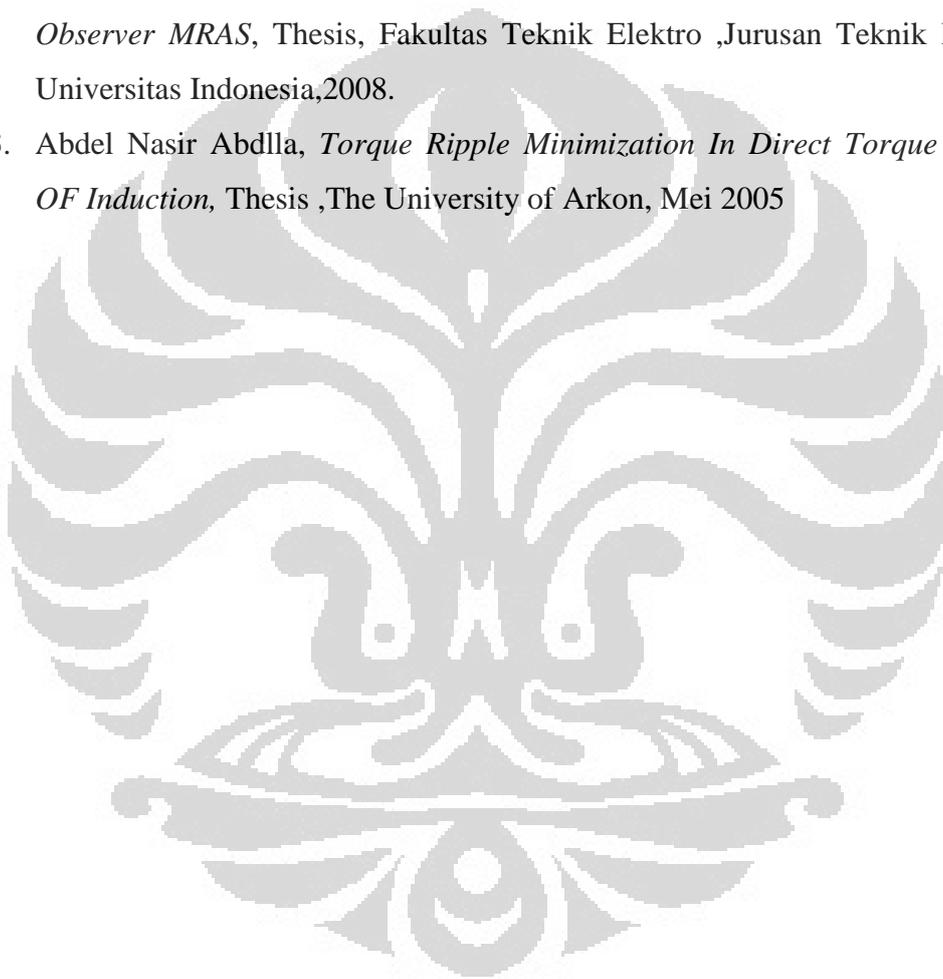
1. M. Arkan, *Stator Fault Diagnosis in Induction Motors*, University of Sussex, Ph.D. Thesis, 2000.
2. Chapman, Stephen J, *Electric Machinery Fundamental*, 2nd Edition, Mcgrawhill Internastional Edition in Electric Series 1991
3. Zuhail, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronik Daya*, PT. Gramedia Pustaka Utama, 1995
4. Yusivar Feri dan S.Wakao, *Minimum Requirements of Motor vector control Modeling and simulation Utilizing C MEX S-function in MATLAB/SIMULINK*, IEEE journal 2001
5. Abdel Nasir Abdlla, *Torque Ripple Minimization In Direct Torque Control OF Induction*, Thesis ,The University of Arkon, Mei 2005
6. P. Krause, O. Wasynczuk, S.D. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery*, IEEE Press Power Engineering Series, 202.
7. D.W. Novotny, T.A. Lipo, *Vector Control and Dynamics of AC Drives*, Clarendon Press, Oxford, 1996.
8. P. Krause, O. Wasynczuk, S.D. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery*, IEEE Inc, 1995 , ISBN 0-7803-1101-9.
9. P. Vas, *Vector Control of AC Machines*, Oxford Science Publications, 1999.
10. C.M. Ong, *Dynamic Simulation of Electric Machinery*, Prentice Hall PTR, 1998, ISBN 013-723785-5.
11. M. Arkan, P.J. Unsworth, *Stator fault diagnosis in induction motors using power decomposition*, in: Phoenix, USA, October, Proceedings of the IEEE Industry Applications Conference 34th Annual Meeting, 2005, vol. 3, pp. 1908–1912.
12. Paul C.Krause, Oleg Wasyncuk, Scoot D. Sudhoff. *Analisisi Of Machinery And Drive Systems*, 2 Edition, IEEE Pres.
13. Asriningtyas, Nurasih, "Perbandingan Estimasi Model Tegangan dan Model Arus pada Pengendali Torsi Langsung Motor Induksi Tiga Fasa", skripsi, UI, Juni 2004.

14. Muhammad Luniar S, Pengaruh Momen Inersia Terhadap Putaran Motor Induksi Dengan Pengendali Torsi Langsung dan Duty Ratio Tanpa Sensor Kecepatan, Thesisi, UI 2008.
15. Ane Prasetyowati, *Pengendalian Adaptif Fuzzy Untuk Self Tuning PI Kontrol Kecepatan Motor Induksi Tiga Phasa Tanpa Sensor Kecepatan Dengan Observer MRAS*, Thesis, Fakultas Teknik Elektro ,Jurusan Teknik Kendali, Universitas Indonesia, 2008.



DAFTAR ACUAN

1. Muhammad Luniar S, Pengaruh Momen Inersia Terhadap Putaran Motor Induksi Dengan Pengendali Torsi Langsung dan Duty Ratio Tanpa Sensor Kecepatan, Thesisi, UI 2008.
2. Ane Prasetyowati, *Pengendalian Adaptif Fuzzy Untuk Self Tuning PI Kontrol Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Tanpa Sensor Kecepatan Dengan Observer MRAS*, Thesis, Fakultas Teknik Elektro ,Jurusan Teknik Kendali, Universitas Indonesia, 2008.
3. Abdel Nasir Abdlla, *Torque Ripple Minimization In Direct Torque Control OF Induction*, Thesis ,The University of Arkon, Mei 2005





```

% parameter-----%

Na=252;
Nb=252;
Nc=251.999;
Ns=252*3;
Nr=1;
Lls=0.1379;
Llr=0.1379;
Lm=5.3868;
Lmls=1/Ns^2*(Lls+(2/3*Lm));
Rs=4.05;
Rr=2.6;

%==== parameter induktansi pada stator====
Lasas=Na^2*Lmls;
Lbsbs=Nb^2*Lmls;
Lcscs=Nc^2*Lmls;

%====parameter induktansi antar phasa stator====
Lmss=-1/3*(Lm/Ns^2);
Lasbs=Na*Nb*Lmss;
Lbsas=Lasbs;
Lascs=Na*Nc*Lmss;
Lcsas=Lascs;
Lbscs=Nb*Nc*Lmss;
Lcsbs=Lbscs;

%====Parameter induktansi pada rotor====
Lmar=2/3*(Nr^2/Ns^2)*Lm;
Larar=Llr+Lmar;
Lbrbr=Larar;
Lcr cr=Larar;

%====Parameter induktansi mutual pada rotor====
Larbr=-1/2*Lmar;
Lbrar=Larbr;
Larcr=Larbr;
Lcrar=Larbr;
Lbrcr=Larbr;
Lcrbr=Larbr;

%====Parameter hubungan induktansi stator dan rotor====
Lmsr=2/3*(Nr/Ns^2)*Lm;
Lasar=Na*Lmsr;
Lasbr=Lasar;
Las cr=Lasar;

Lbsar=Nb*Lmsr;
Lbsbr=Lbsar;
Lbs cr=Lbsar;

Lcsar=Nc*Lmsr;
Lcsbr=Lcsar;
Lcs cr=Lcsar;

%====paramter untuk rotor====

```

```
Ras=(Na/Ns)*Rs;
Rbs=(Nb/Ns)*Rs;
Rcs=(Nc/Ns)*Rs;
```

```
%=====matriks element Stator induktansi=====
```

```
L11ss=2/3*(Lasas+(0.25*Lbsbs)+(0.25*Lcscs)-Lasbs-Lascs-
(0.5*Lbscs));
L22ss=1/2*(Lbsbs+Lcscs-(2*Lbscs));
L12sr=1.732/4*(Lbsbr-Lcscr);
L21sr=L12sr;
L11rr=Llr+(3/2*Lmar);
L22rr=L11rr;
```

```
%=====matriks element Stator resistansi=====
```

```
R11s=2/3*(Ras+(1/4*Rbs)+(1/4*Rcs));
R22s=1/2*(Rbs+Rcs);
```

```
%=====a11=====
```

```
a11=-((Rr*L11ss/L12sr)+(R11s*L22rr/L12sr))/((L22rr*L11ss/L12sr)-
L21sr);
a12=-((L11rr*L22ss/L21sr)-L12sr)/((L22rr*L11ss/L12sr)-L21sr);
a13=(Rr/L12sr)/((L22rr*L11ss/L12sr)-L21sr);
a14=-((L11rr/L21sr)/((L22rr*L11ss/L12sr)-L21sr);
a21=-((L22rr*L11ss/L12sr)-L12sr)/((L11rr*L22ss/L21sr)-L12sr);
a22=-((Rr*L22ss/L21sr)+(R22s*L11rr/L21sr))/((L11rr*L22ss/L21sr)-
L12sr);
a23=-((L22rr/L12sr)/((L11rr*L22ss/L21sr)-L12sr);
a24=(Rr/L21sr)/((L11rr*L22ss/L21sr)-L12sr);
a31=-R11s;
a32=0;
a33=0;
a34=0;
a41=0;
a42=-R11s;
a43=0;
a44=0;
b11=((L22rr)/(L12sr))/(((L22rr*L11ss)/(L12sr))-L21sr);
b12=0;
b21=0;
b22=((L22rr)/(L12sr))/(((L22rr*L11ss)/(L12sr))-L21sr);
b31=0;
b32=0;
b41=0;
b42=0;
```

```
A=[a11 a12 a13 a14 ; a21 a22 a23 a24; a31 a32 a33 a34; a41 a42 a43
a44]
```

```
B=[b11 b12; b21 b22; b31 b32; b41 b42]
```

```
A=[-20.6605 -0.8219 25.2429 -1.3389;  
-1.2167 -21.0522 -1.6291 30.7125;  
-1.3500 0 0 0; 0 -1.3500 0 0];
```

```
B=[1.3389 0;0 1.3389;0 0;0 0];  
C=[1 0 0 0; 0 1 0 0];
```

```
%nilai eigen motor  
y=eig(A)
```

```
%controlabilitas(C)  
C0=B;  
C1=A*B;  
C2=A^2*B;  
C3=A^3*B;  
Con=[C0 C1 C2 C3]  
rank(Con)
```

```
% Observabilitas(O)
```

```
CT=C';  
AT=A';  
ATCT =A'*C';  
AT2CT=(A')^2*C';  
AT3CT2=((A')^3)*C';  
P=[CT ATCT AT2CT AT3CT2]  
rank(P)
```

