

**IMPLEMENTASI DIRECT TORQUE CONTROL
(DTC) UNTUK MENGATUR KECEPATAN MOTOR
INDUKSI TIGA PHASA MENGGUNAKAN MATLAB**

SKRIPSI



Disusun oleh :
HERIYANTO
12.12.033

**MILIK
PERPUSTAKAAN
ITN MALANG**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO S-1
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
2016**

1914

RECEIVED THE NATIONAL ARCHIVES
 DEPARTMENT OF THE ARMY
 WASHINGTON, D. C.
 FEBRUARY 10 1914

10 15 1914
 RECEIVED
 DEPARTMENT OF THE ARMY

1914

RECEIVED THE NATIONAL ARCHIVES
 DEPARTMENT OF THE ARMY
 WASHINGTON, D. C.
 FEBRUARY 10 1914

LEMBAR PERSETUJUAN

**IMPLEMENTASI DIRECT TORQUE CONTROL (DTC) UNTUK
MENGATUR KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA PHASA
MENGUNAKAN MATLAB**

SKRIPSI

*Disusun dan Diajukan untuk melengkapi dan memenuhi persyaratan guna
mencapai gelar Sarjana Teknik*

Disusun Oleh :

**Heriyanto
12.12.033**

Diperiksa dan Disetujui

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



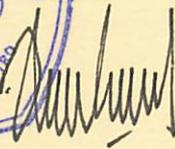
Irrine Budi S. ST, MT
NIP. 197706152005012002



Ir. Abdul Hamid, MT
NIP. Y. 1018800188

Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Elektro S-1



M. Ibrahim Ashari, ST, MT
NIP.P. 10030100358

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

2016

IMPLEMENTASI DIRECT TORQUE CONTROL (DTC) UNTUK MENGATUR KECEPATAN MOTOR INDUKSI 3 PHASA MENGUNAKAN MATLAB

Heriyanto, 1212033
Jurusan Elektro S-1, FTI
Institut Teknologi Nasional Malang
heri5822@gmail.com

ABSTRAK

Motor induksi banyak dipergunakan dalam industri saat ini karena dalam penggunaannya motor induksi dapat dioperasikan dengan kecepatan yang bervariasi. Pengaturan kecepatan putaran motor induksi dapat dilakukan dengan beberapa metode dan salah satu metode yang digunakan adalah dengan mengatur torsi secara langsung.

Direct torque control (DTC) merupakan salah satu metode dalam pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa. Metode ini dapat mengatur fluks dan torsi motor induksi secara langsung dengan mengatur vektor tegangannya. Pengaturan vektor tegangan ini menggunakan pengendalian umpan balik torsi dan fluks stator. Fluks dan torsi ini dihitung dari tegangan dan arus stator yang di ukur pada motor.

Dalam tulisan ini *direct torque control* yang digunakan untuk mengatur kecepatan putaran motor induksi tiga fasa akan di simulasikan menggunakan Matlab 7.0.1.

Kata Kunci : motor induksi tiga fasa, pengaturan kecepatan, *direct torque control*.

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas tuntunannya penulis dapat menyelesaikan pengerjaan laporan skripsi "Implementasi *Direct Torque Control* (DTC) Untuk Mengatur Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Matlab" dengan baik dan tepat waktu.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat yang harus dipenuhi untuk menempuh ujian kelulusan program Sarjana Teknik Energi Listrik Institut Teknologi Nasional Malang. Keberhasilan penulis untuk menyelesaikan laporan ini tidak lepas dari dukungan dari berbagai pihak. Untuk itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Lalu Mulyadi, MTA selaku Rektor Institut Teknologi Nasional Malang.
2. Bapak Ir. H. Anang Subardi, MT selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri.
3. Bapak Ibrahim Azhari ST.MT selaku kepala jurusan Teknik Elektro di Institut Teknologi Nasional Malang.
4. Ibu Irrine Budi S. ST, MT selaku pembimbing pertama
5. Bapak Ir. Abdul Hamid, MT selaku pembimbing kedua.
6. Para staff Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Nasional Malang yang sudah membantu penulis dalam menyelesaikan Skripsi.
7. Orang Tua dan teman-teman yang sudah membantu penulis baik itu dalam bentuk materi dan dukungan doa yang selalu menyertai penulis dalam menyelesaikan Skripsi ini.

Dengan senang hati penulis menerima kritik dan saran untuk kinerja penulis yang lebih baik lagi. Sekian dan terima kasih.

Malang, Agustus 2016

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN.....	i
ABSTRAK	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI.....	iv
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL.....	viii
BAB I	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Pembahasan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metode Penelitian	2
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II.....	2
MOTOR INDUKSI 3 PHASA.....	2
2.1 Umum	2
2.2 Konstruksi Motor Induksi 3 Phasa	6
2.3 Stator.....	6
2.4 Rotor	7
2.5 Medan Putar.....	9
2.6 Prinsip Kerja Motor Induksi	12
2.7 Pengaturan Putaran Motor Induksi 3 Phasa.....	13

2.8	Model Dinamik Motor Induksi Tiga Phasa	16
2.8.1	Model Motor Induksi Dua Phasa	16
2.8.2	Transformasi Tiga Phasa Ke Dua Phasa	19
2.9	Perhitungan Parameter Motor Induksi Tiga Phasa	20
2.9.1	Pngujian Tahanan Stator (<i>DC Test</i>)	21
2.9.2	Pengujian Tanpa Beban (<i>No Load Test</i>).....	22
2.9.3	Pengujian Rotor Tertahan (<i>Blocked Rotor Test</i>).....	24
BAB III	28
DIRECT TORQUE CONTROL		28
3.1	Umum	28
3.2	Pengontrolan Vektor pada Motor Induksi 3 phasa	28
3.3	Kondisi Switching dan Vektor Tegangan Output Inverter	31
3.4	Pengontrolan Fluks	36
3.5	Pengontrolan Torsi	38
BAB IV	42
SIMULASI DIRECT TORQUE CONTROL UNTUK MENGATUR KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA PHASA.....		42
4.1	Umum	42
4.2	Rangkaian simulasi.....	42
4.3	Komponen-komponen Pemodelan	43
4.3.1	<i>Three Phase Source</i> (Sumber Tiga Phasa).....	43
4.3.2	DTC Induction Motor Drive	44
4.3.3	Demux.....	46
4.3.4	Scope.....	46
4.3.5	Simulasi dan Analisa Hasil Simulasi	47
BAB V	53
PENUTUP		53
5.1	Kesimpulan.....	53
5.2	Saran	53
DAFTAR PUSTAKA	54

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Konstruksi Motor Induksi 3 Fasa	6
Gambar 2.2 Konstruksi Stator Dengan Alur-alurnya.....	7
Gambar 2.3 Rotor sangkar	8
Gambar 2.4 Rotor Belitan	9
Gambar 2.5 Arus Tiga Fasa Seimbang.....	9
Gambar 2.6 Diagram Phasor Fluks Tiga Fasa Seimbang.....	10
Gambar 2.7 Medan Putar Pada Motor Induksi Tiga Fasa	10
Gambar 2.8 Kumparan Stator dan Rotor Motor Induksi Dua Fasa.....	17
Gambar 2.9 Kumparan Stator Motor Dua Fasa dan Tiga Fasa	19
Gambar 2.10 Rangkaian Pengukuran Untuk DC Test	22
Gambar 2.11 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi pada Percobaan Beban Nol	23
Gambar 2.12 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Tiga Fasa Pada Percobaan Blocked Rotor Test.....	24
Gambar 3.1 Skema DTC	29
Gambar 3.2 Rangkaian Daya Penggerak Motor Induksi Tiga Fasa.....	31
Gambar 3.3 Bentuk Gelombang Tegangan Keluaran Dioda.....	32
Gambar 3.4 Bentuk Tegangan Keluaran Inverter	32
Gambar 3.5 Tegangan Output Inverter untuk Setiap Switching	35
Gambar 3.6 Pembagian Fluks Linkages Stator dalam 6 Ruang	37
Gambar 3.7 Pengaruh Switching T_e dan T_e pada Phasor Fluks Stator	38
Gambar 3.8 <i>flowchart</i> DTC.....	41
Gambar 4.1 Rangkaian Simulasi <i>Direct Torque Control</i>	42
Gambar 4.2 Sumber Tiga Fasa.....	43

Gambar 4.3 Blok Parameter Sumber Tiga Phasa.....	43
Gambar 4.4 DTC Induction Motor Drive.....	44
Gambar 4.5 Diagram DTC Induction Motor Drive.....	44
Gambar 4.5 Blok Parameter <i>Asynchronous Machine</i>	45
Gambar 4.6 Blok Parameter <i>Converter and DC Bus</i>	45
Gambar 4.7 Blok Parameter <i>Controller</i>	46
Gambar 4.8 <i>Demux</i>	46
Gambar 4.9 <i>Scope</i>	46
Gambar 4.10 Hasil Simulasi Kecepatan Rotor 1780 rpm dengan beban 200 Nm	47
Gambar 4.11 Hasil Simulasi Kecepatan Rotor 1780 rpm dengan beban 400 Nm	48
Gambar 4.12 Hasil Simulasi Kecepatan Rotor 1780 rpm dengan beban 600 Nm	48
Gambar 4.13 Hasil Simulasi Kecepatan Rotor 1780 rpm dengan beban 792 Nm	49
Gambar 4.14 Hasil Simulasi Kecepatan Rotor 1000 rpm dengan beban 200 Nm	50
Gambar 4.15 Hasil Simulasi Kecepatan Rotor 1000 rpm dengan beban 400 Nm	50
Gambar 4.16 Hasil Simulasi Kecepatan Rotor 1000 rpm dengan beban 600 Nm	51
Gambar 4.17 Hasil Simulasi Kecepatan Rotor 1000 rpm dengan beban 792 Nm	51

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Data Name Plate Motor Induksi Tiga Phasa.....	15
Tabel 3.2 Data Pengujian <i>DC Test</i>	21
Tabel 3.3 Data Rotor Tertahan.....	23
Tabel 3.4 Data Pengujian Rotor Tertahan.....	26
Tabel 3.5 Data Name Plate.....	27
Tabel 3.6 Data Pengujian dan Perhitungan.....	27
Tabel 3.1 Kondisi Switching Inverter Phasa a	33
Tabel 3.2 Kondisi <i>Switching</i> Inverter.....	34
Tabel 3.3 Tegangan Keluaran Inverter.....	35
Tabel 3.4 Logic Pengontrolan Fluks	37
Tabel 3.5 Logic Pengontrolan Torsi.....	38
Tabel 3.6 Kondisi Switching Untuk Berbagai Kondisi $S\phi$, ST , dan Se	39
Tabel 4.1 Respon Kecepatan dengan Kecepatan referensi 1780 rpm.....	49
Tabel 4.1 Respon Kecepatan dengan Kecepatan Referensi 1000 rpm.....	52

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Motor induksi merupakan motor penggerak yang paling banyak digunakan dalam bidang industri. Dengan perkembangan kemajuan teknologi dibidang mikrokontroler, mikrokomputer, dan teori kontrol mempermudah operasi dan kinerja dari motor induksi sehingga dapat menggantikan peran motor DC sebagai penggerak elektrik. Keunggulan motor induksi diantaranya adalah konstruksinya yang sederhana, harganya yang lebih murah dibandingkan motor jenis lain, serta perawatannya yang mudah [1]. Sedangkan kekurangan dari motor induksi diantaranya adalah sifatnya yang tidak linier, teknik pengaturan kecepatannya yang relatif sulit diatur dan membutuhkan arus *starting* yang tinggi sekitar enam sampai delapan kali arus nominal motor [1].

Pengaturan kecepatan motor induksi dapat dilakukan dengan berbagai cara seperti kontrol tegangan/frekuensi (v/f) atau dikenal dengan kontrol skalar. Prinsipnya adalah memaksa motor memiliki hubungan yang konstan antara tegangan dan frekuensi. Serta kontrol vektor yang mengatur secara langsung arus stator motor. Metode kontrol vektor yang sekarang ini terus dikembangkan adalah metode *Direct Torque Control* (DTC) [1]. Yaitu suatu teknik kontrol yang mengarah pada pengaturan dengan nilai torsi yang berubah sesuai kebutuhan beban. Perbedaan mendasar antara teknik kontrol vektor dengan DTC pada kontrol vektor masukan sistem adalah kecepatan dan arus stator. Sedangkan pada DTC masukan sistem adalah fluks dan torsi [1].

DTC pertama dikenalkan oleh ilmuwan berkebangsaan Jepang (Takahashi, 1984) dan ilmuwan Jerman (Depenbrock, 1985). *Direct Torque Control* (DTC) merupakan salah satu skema kontrol berdasarkan pengontrolan fluks stator dan torsi yang memberikan respon cepat dan kuat yang diimplementasikan pada motor induksi 3 fasa [2]. DTC ini mempunyai kelebihan antara lain lebih sederhana, mempunyai performa dinamik yang baik, serta tidak sensitif terhadap perubahan parameter, khususnya tahanan stator. Sedangkan kelemahan dari DTC ini adalah

mempunyai *ripple* torsi dan respon transien yang lambat selama *start-up* dan karena pembebanan [2].

1.2 Rumusan Masalah

Dari pembahasan di atas, maka dapat dirumuskan permasalahan yaitu, bagaimana cara mengatur kecepatan konstan terhadap motor induksi tiga fasa dengan beban yang berubah-ubah menggunakan DTC ?

1.3 Tujuan Pembahasan

Tujuan dari pembahasan ini yaitu, mengatur kecepatan putaran motor induksi tiga fasa dengan DTC untuk mencapai kecepatan konstan setelah mengalami perubahan beban.

1.4 Batasan Masalah

Agar pembahasan dalam skripsi lebih terarah sesuai dengan tujuan dan judul yang ada, maka dalam penyusunan skripsi ini penulis memberi batasan sebagai berikut :

1. Motor induksi tiga fasa sebagai obyek penelitian.
2. Metode yang digunakan adalah *Direct Torque Control* (DTC).
3. Tidak membahas secara rinci mengenai inverter.
4. Hanya menampilkan grafik kecepatan rotor.

1.5 Metode Penelitian

Dalam melaksanakan penyusunan skripsi ini metode yang digunakan adalah sebagai berikut :

1. Studi literatur

Pengumpulan bahan dari buku-buku referensi, jurnal, dan sebagainya yang berkaitan dengan motor induksi tiga fasa, DTC, serta penurunan rumus-rumus yang digunakan dalam skripsi ini.

2. Pengumpulan data.

Melakukan pengambilan data dari *name plate* serta melakukan pengujian dan perhitungan motor induksi tiga fasa.

3. Melakukan perhitungan parameter motor induksi tiga fasa dari data yang di peroleh untuk mengisi parameter-parameter yang diperlukan.

4. Membuat pemodelan simulasi dan memasukkan data yang ada ke dalam blok simulink dengan bantuan software MATLAB.
5. Percobaan dan pengamatan melalui simulasi MATLAB.
6. Kesimpulan

Kesimpulan ini berisi poin-poin dari permasalahan yang telah dianalisa. Selain itu diberikan juga saran atau rekomendasi terkait dengan hal yang telah dianalisa.

1.6 Sistematika Penulisan

Dalam penyusunan skripsi ini disusun menjadi beberapa bab dan diuraikan dengan pembahasan sesuai daftar isi. Sistematika penyusunan adalah sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini berisikan latar belakang, rumusan masalah, tujuan pembahasan, batasan masalah, metode penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II : MOTOR INDUKSI 3 PHASA

Bab ini membahas konstruksi, teori, medan putar, prinsip kerja, rangkaian ekivalen, dan model dinamik motor induksi.

BAB III : DIRECT TORQUE CONTROL (DTC) DENGAN INVERTER

Bab ini menjelaskan prinsip terjadinya vektor tegangan inverter, flux yang terjadi, serta torsi yang di kontrol secara langsung oleh switching inverter.

BAB IV : IMPLEMENTASI DIRECT TORQUE CONTROL (DTC) UNTUK MENGATUR KECEPATAN MOTOR INDUKSI 3 PHASA MENGGUNAKAN MATLAB

Bab ini menguraikan rangkaian simulasi, spesifikasi komponen simulasi, prosedur simulasi, hasil simulasi, data hasil simulasi, dan analisa hasil simulasi pengontrolan dengan *direct torque control*.

BAB V : PENUTUP

Dalam bab ini dituliskan hal-hal yang dianggap penting dalam penulisan yang dirangkum sebagai kesimpulan dan saran yang diambil dari pembahasan pada bab sebelumnya.

DAFTAR PUSTAKA

BAB II

MOTOR INDUKSI 3 PHASA

2.1 Umum

Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak balik (AC) yang paling banyak digunakan di industri. Berdasarkan fasa sumber daya yang digunakan, motor induksi dapat di klasifikasikan menjadi motor induksi satu fasa dan tiga fasa. Karena sistem distribusi umumnya menggunakan daya 3 fasa, maka motor induksi yang biasanya digunakan adalah motor induksi 3 fasa [2]. Penamaannya berasal dari kenyataan bahwa motor ini bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator ke rotornya, dimana arus rotor motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar yang dihasilkan oleh arus stator [2].

Motor induksi ini juga disebut mesin asinkron (mesin tak serempak), hal ini dikarenakan putaran motor tidak sama dengan putaran fluks magnet stator. Dengan kata lain, bahwa antara rotor dan fluks magnet stator terdapat selisih perputaran yang disebut dengan slip. Pada umumnya motor AC yang digunakan adalah motor induksi, terutama motor induksi 3 fasa yang paling banyak dipakai di dunia industri. Motor induksi 3 fasa banyak digunakan sebagai penggerak di industri karena banyak memiliki keuntungan, tetapi juga memiliki beberapa kelemahan [2].

Keuntungan motor induksi 3 fasa:

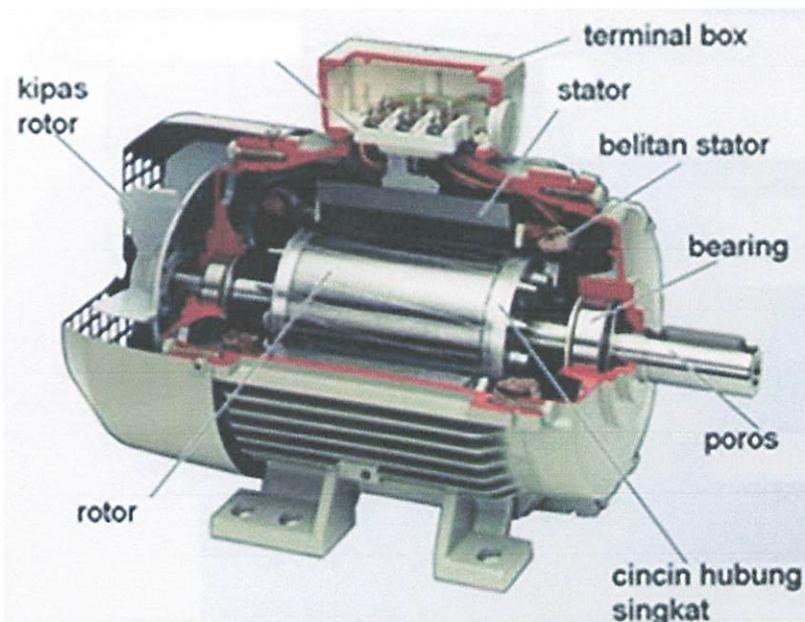
1. Sangat sederhana dan daya tahan kuat (konstruksi hampir tidak pernah terjadi kerusakan).
2. Tenaga yang besar
3. Harga relatif murah dan perawatan mudah.
4. Efisiensi tinggi. Pada kondisi berputar normal, tidak dibutuhkan sikat dan karenanya rugi daya yang diakibatkannya dapat dikurangi.
5. Tidak memerlukan starting tambahan.
6. Tidak ada kontak antara stator dan rotor kecuali bearing.

Kerugian motor induksi 3 phasa:

1. Kecepatan relatif sulit di atur.
2. Kecepatannya menurun seiring dengan penambahan beban.
3. Kopel awal mutunya rendah dibanding dengan motor DC shunt.

2.2 Konstruksi Motor Induksi 3 Phasa

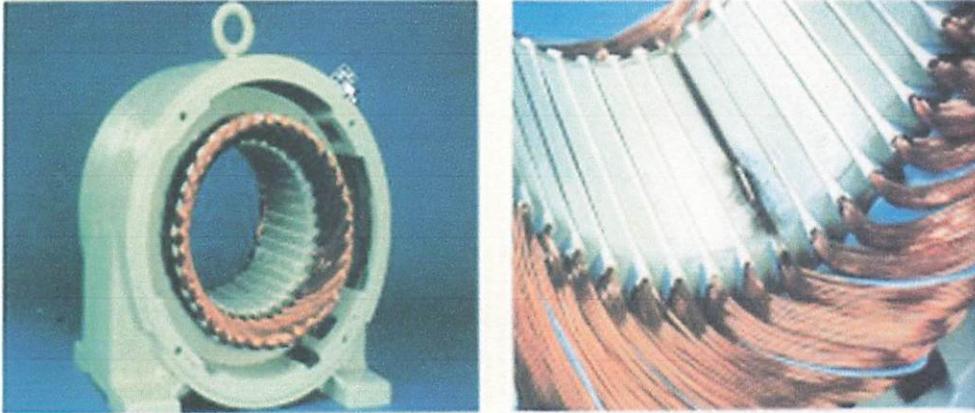
Motor induksi terdiri dari dua bagian utama yaitu stator dan rotor. Stator merupakan bagian yang diam dan rotor bagian yang berputar. Stator dan rotor dipisahkan oleh celah udara yang jaraknya sangat kecil. Konstruksi motor induksi diperlihatkan pada Gambar 2.1 berikut [2].



Gambar 2.1 Konstruksi Motor Induksi 3 Phasa

2.3 Stator

Stator pada motor induksi adalah sama dengan yang dimiliki oleh Motor Sinkron dan Generator Sinkron. Konstruksi stator terbuat dari laminasi-laminasi dari bahan besi Silikon dengan ketebalan (4 s/d 5) mm dengan dibuat alur sebagai tempat meletakkan belitan/Kumparan. Secara detail ditunjukkan pada Gambar 2 berikut [2].



Gambar 2.2 Konstruksi Stator Dengan Alur-alurnya

Dalam alur-alur stator diletakkan belitan stator yang posisinya saling berbeda satu dengan lainnya, sesuai dengan fase derajat listrik yaitu 120° antar fase (motor 3 fase). Jumlah gulungan pada stator dibuat sesuai dengan jumlah kutub dan jumlah putaran yang diinginkan atau ditentukan [2].

2.4 Rotor

Ada dua jenis kumparan rotor, yaitu jenis rotor sangkar (*squirrel-cage rotor*) dan rotor belitan (*wound rotor*). Kedua rotor ini bekerja pada prinsip yang sama dan mempunyai konstruksi stator yang sama, hanya berbeda dalam konstruksinya saja [2].

a. Rotor Sangkar (*squirrel-cage rotor*)

Hampir 90% dari motor induksi 3 phasa adalah jenis rotor sangkar, karena jenis ini mempunyai konstruksi yang sangat sederhana dan kuat. Rotor ini seperti pada Gambar 2.3, terdiri dari laminasi silindris inti dengan slot-slot yang paralel sebagai tempat dari konduktornya dan konduktor-konduktor ini terbuat dari batangan tembaga atau aluminium alloy [2]. Konduktornya tidak terisolasi dari inti, karena arus rotor secara alamiah akan mengalir melalui tahanan yang paling kecil, yaitu konduktor rotor. Pada setiap ujung konduktor rotor, semuanya dihubungkan singkatkan dengan cincin (*bearing*) di ujung sehingga tidak memerlukan tambahan tahanan luar sebagai pembantu starting [2].



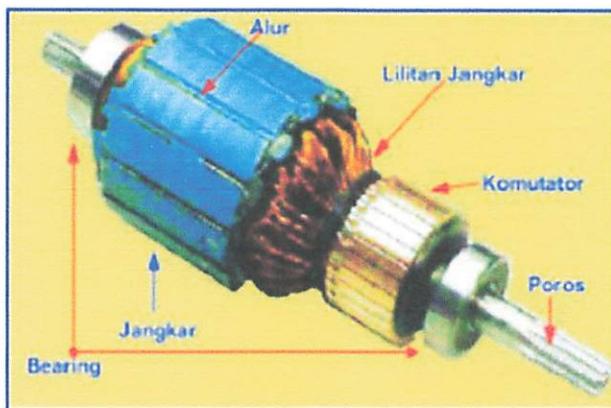
Gambar 2.3 Rotor sangkar

Batang rotor dan cincin ujung motor sangkar yang lebih kecil adalah coran tembaga atau aluminium dalam satu lempeng pada inti rotor. Selain itu pula posisi dari batang-batang konduktor/tembaga posisinya dibuat tidak paralel (tidak segaris) dengan poros rotor [2]. Dalam motor yang lebih besar, batang rotor tidak dicor melainkan ditenamkan ke dalam alur rotor dan kemudian dilas dengan kuat ke cincin ujung. Batang rotor motor sangkar tidak selalu ditempatkan paralel terhadap poros motor tetapi kerap kali dimiringkan. Hal ini akan menghasilkan torsi yang lebih seragam dan juga mengurangi derau dengung magnetik sewaktu motor sedang berputar [2].

b. Rotor Belitan (*Wound Rotor*)

Motor rotor belitan berbeda dengan motor rotor sangkar dalam hal konstruksi rotornya. Rotor ini memiliki belitan tiga fasa dengan jumlah kutub yang sama dengan stator. Belitan rotor ini juga diberikan tambahan resistansi luar yang terhubung melalui slip-ring. Seperti namanya, rotor dililit dengan lilitan terisolasi serupa dengan lilitan stator. Lilitan fasa rotor dihubungkan secara Y dan masing-masing fasa ujung terbuka yang dikeluarkan ke cincin slip yang terpasang pada poros rotor [2].

Motor rotor belitan kurang banyak digunakan dibandingkan dengan motor rotor sangkar karena harganya yang mahal dan biaya pemeliharaannya yang lebih besar. Rotor belitan dapat dilihat pada Gambar 2.4 berikut [2].



Gambar 2.4 Rotor Belitan

2.5 Medan Putar

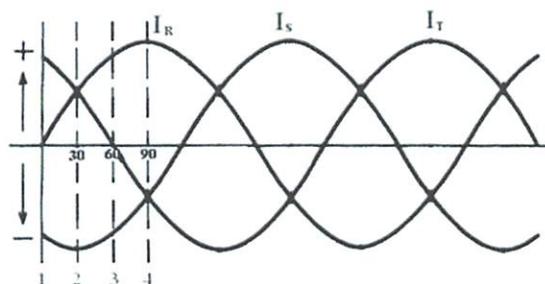
Ketika belitan tiga fasa dari motor induksi diberi suplai maka medan magnet yang berputar akan dihasilkan. Medan magnet ini dibentuk oleh kutub- kutubnya yang berada pada posisi yang tidak tetap pada stator tetapi berubah-ubah mengelilingi stator. Adapun magnitudo dari medan putar ini selalu tetap yaitu sebesar $1.5 \Phi_m$ dimana Φ_m adalah fluks yang disebabkan suatu fasa [2].

Untuk melihat bagaimana medan putar dibangkitkan, maka dapat diambil contoh pada motor induksi tiga fasa dengan jumlah kutub dua. Dimana ketiga fhasanya R,S,T disupply dengan sumber tegangan tiga fasa, dengan arus pada fasa ini ditunjukkan sebagai I_R, I_S, I_T , maka fluks yang dihasilkan oleh arus-arus ini adalah:

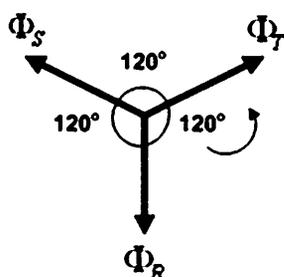
$$\phi_R = \phi_m \sin \omega t \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\phi_S = \phi_m \sin (\omega t - 120^\circ) \dots\dots\dots (2.2)$$

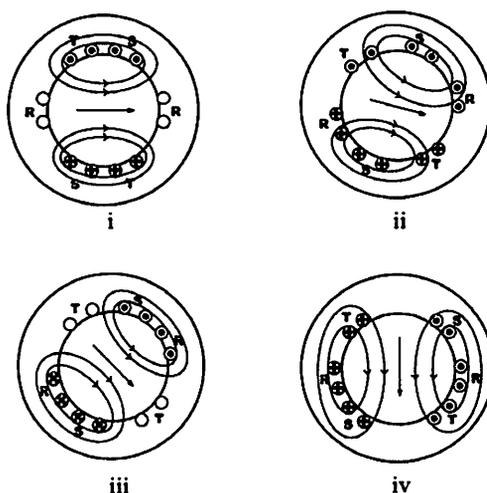
$$\phi_T = \phi_m \sin (\omega t - 240^\circ) \dots\dots\dots (2.3)$$



Gambar 2.5 Arus Tiga Fasa Seimbang



Gambar 2.6 Diagram Phasor Fluks Tiga Fasa Seimbang



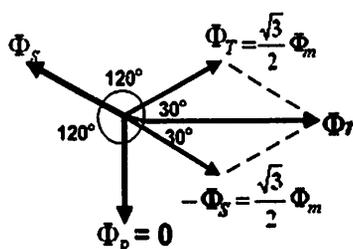
Gambar 2.7 Medan Putar Pada Motor Induksi Tiga Fasa

- a. Pada keadaan (i) Gambar 2.5, $\omega t = 0$; arus pada fasa R bernilai nol, sedangkan besar arus pada fasa S dan T memiliki nilai yang sama dan arahnya berlawanan. Dalam keadaan seperti ini arus sedang mengalir ke luar dari konduktor sebelah atas dan memasuki konduktor sebelah bawah [3]. Sementara resultan fluks yang dihasilkan memiliki besar yang konstan sebesar $1,5 \phi_m$ dan dibuktikan sebagai berikut:

$$\phi_R = 0$$

$$\phi_S = \phi_m \sin(-120^\circ) = -\frac{\sqrt{3}}{2} \phi_m ;$$

$$\phi_T = \phi_m \sin(-240^\circ) = \frac{\sqrt{3}}{2} \phi_m$$



Oleh karena itu resultan fluks, ϕ_r adalah jumlah phasor dari ϕ_T dan $-\phi_S$.

Sehingga resultan fluks, $\phi_r = 2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \phi_m \cos 30^\circ = 1,5 \phi_m$

- b. Pada keadaan (ii), arus bernilai maksimum negatif pada fasa S, sedangkan pada fasa R dan fasa T bernilai 0,5 maksimum, dan pada saat ini $\omega t = 30^\circ$, oleh karena itu fluks yang diberikan oleh masing-masing fasa, yaitu:

$$\phi_R = \phi_m \sin(30^\circ) = 0,5 \phi_m$$

$$\phi_S = \phi_m \sin(-90^\circ) = -\phi_m$$

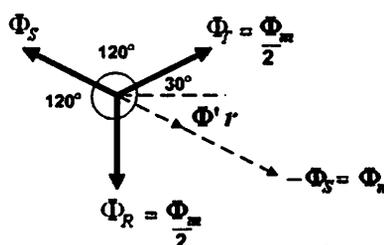
$$\phi_T = \phi_m \sin(-210^\circ) = 0,5 \phi_m$$

Maka jumlah fasor ϕ_R dan $-\phi_T$ adalah :

$$\phi_r' = 2 \times 0,5 \phi_m \cos 60^\circ = 0,5 \phi_m$$

Sehingga resultan fluks $\phi_r = 0,5 \phi_m + \phi_m = 1,5 \phi_m$

Dari diagram fasor tersebut dapat dilihat bahwa resultan fluks berpindah sejauh 30° dari posisi pertama [3].



- c. Pada keadaan ini $\omega t = 60^\circ$, arus pada fasa R dan fasa S memiliki besar yang sama dan arahnya berlawanan ($0,866 \phi_m$) oleh karena itu fluks yang diberikan oleh masing-masing fasa:

$$\phi_R = \phi_m \sin(60^\circ) = \frac{\sqrt{3}}{2} \phi_m$$

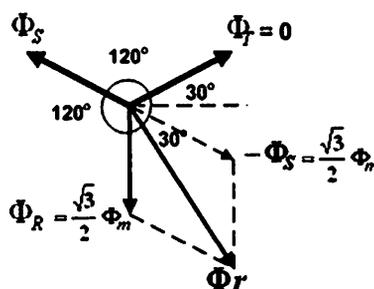
$$\phi_S = \phi_m \sin(-60^\circ) = -\frac{\sqrt{3}}{2} \phi_m$$

$$\phi_T = \phi_m \sin(-180^\circ) = 0$$

Maka magnitudo dari fluks resultan:

$$\phi_r = 2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \phi_m \cos 30^\circ = 1,5 \phi_m$$

Dari diagram fasor tersebut dapat dilihat bahwa resultan fluks berpindah sejauh 60° dari posisi pertama [3].



- d. Pada keadaan ini $\omega t = 90^\circ$, arus pada fasa R maksimum (positif), dan arus pada fasa S dan fasa T = $0,5 \phi_m$, oleh karena itu fluks yang diberikan oleh masing-masing fasa:

$$\phi_R = \phi_m \sin(90^\circ) = \phi_m$$

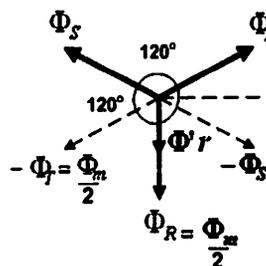
$$\phi_S = \phi_m \sin(-30^\circ) = -0,5 \phi_m$$

$$\phi_T = \phi_m \sin(-150^\circ) = -0,5 \phi_m$$

Maka jumlah fasor $-\phi_T$ dan $-\phi_S$ adalah:

$$\phi_r' = 2 \times 0,5 \phi_m \cos 60^\circ = 0,5 \phi_m$$

Sehingga resultan fluks:



$$\phi_r = 0,5 \phi_m + \phi_m = 1,5 \phi_m$$

Dari diagram fasor tersebut dapat dilihat bahwa resultan fluks berpinda sejauh 90° dari posisi pertama [3].

2.6 Prinsip Kerja Motor Induksi

Motor induksi terdiri atas dua bagian utama yaitu rotor dan stator. Ada dua jenis rotor yaitu rotor sangkar dan rotor belitan. Stator dibuat dari sejumlah stampings dengan slots untuk membawa gulungan tiga fase. Gulungan ini dilingkarkan untuk sejumlah kutub yang tertentu [2]. Stator merupakan bagian yang diam dari motor induksi tiga fasa, pada bagian stator terdapat beberapa slot yang merupakan tempat kawat (konduktor) dari tiga kumparan tiga fasa yang disebut kumparan stator, yang masing-masing kumparan mendapatkan suplai arus tiga fasa, maka pada kumparan tersebut segera timbul medan putar. Dengan adanya medan magnet putar pada kumparan stator akan mengakibatkan rotor berputar, hal ini terjadi karena adanya induksi magnet dengan kecepatan putar rotor sinkron dan kecepatan putar stator [2].

Perputaran motor pada mesin arus bolak – balik ditimbulkan oleh adanya medan putar (fluks yang berputar) yang dihasilkan dalam kumparan statornya. Medan putar ini terjadi apabila kumparan stator dihubungkan dalam fasa banyak umumnya fasa 3. hubungan dapat berupa hubungan bintang atau delta [2].

Adapun prinsip kerja motor induksi adalah jika pada belitan stator diberi tegangan tiga phasa, maka pada stator akan dihasilkan arus tiga phasa, arus ini akan mengalir melalui belitan yang akan menimbulkan fluks dan karena adanya perbedaan sudut phasa sebesar 120° antara ketiga phasanya, maka akan timbul medan putar dengan kecepatan sinkron n_s :

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \text{ (rpm)} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dalam stator sendiri akan timbul tegangan pada masing-masing phasa yang dinyatakan:

$$E_1 = 4,44 f N_1 \phi \text{ (Volt)} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dalam keadaan rotor masih diam, medan putar stator akan memotong batang konduktor pada rotor [3]. Akibatnya pada kumparan rotor timbul tegangan induksi (ggl) sebesar E_2 :

$$E_2 = 4,44fN_2\phi_m \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana:

E_2 = tegangan induksi pada rotor saat rotor dalam keadaan diam (Volt)

N_2 = Jumlah lilitan kumparan rotor

ϕ_m = Fluks maksimum (Wb)

Karena kumparan rotor membentuk rangkaian tertutup, maka ggl tersebut akan menghasilkan arus I_2 . Adanya arus I_2 di dalam kumparan rotor akan menghasilkan medan magnet rotor. Interaksi medan magnet rotor dengan medan putar stator akan menimbulkan gaya F pada rotor. Bila kopel awal yang dihasilkan oleh gaya F cukup besar untuk memikul kopel beban, rotor akan berputar searah medan putar stator [3]. Perputaran rotor akan semakin meningkat hingga mendekati kecepatan sinkron. Perbedaan kecepatan sinkron medan putar stator (n_s) dan kecepatan rotor (n_r) disebut slip, dinyatakan dengan:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\% \dots\dots\dots (2.7)$$

Pada saat rotor dalam keadaan berputar, besar tegangan yang terinduksi pada kumparan rotor akan bervariasi tergantung besarnya slip, dan tegangan induksi ini dinyatakan dengan E_{2s} :

$$E_{2s} = 4,44sfN_2\phi_m \text{ (Volt)} \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana:

E_{2s} = Tegangan induksi pada rotor dalam keadaan berputar (Volt)

$f_2 = s.f$ = Frekuensi rotor (rotor dalam keadaan berputar)

Bila $n_s = n_r$, tegangan tidak akan terinduksi dan arus tidak akan mengalir pada kumparan rotor, karena tidak dihasilkan kopel. Kopel ditimbulkan jika $n_r < n_s$.

2.7 Pengaturan Putaran Motor Induksi 3 Phasa

$$n_r = n_s(1 - s) = \frac{120.f}{p}(1 - s) \dots\dots\dots (2.9)$$

Dari persamaan di atas, dapat dilihat bahwa pengaturan kecepatan putaran motor induksi tiga phasa dapat dilakukan beberapa cara, yaitu:

1. Mengubah jumlah kutub

Salah satu cara pengaturan putaran adalah dengan mengubah jumlah kutub (p), dan ini hanya dapat memberikan perubahan putaran yang diskrit, karena p

harus merupakan bilangan bulat. Dengan perencanaan yang benar dari rotor sangkar, hanya diperlukan untuk mengubah jumlah kutub dari belitan stator, bersamaan dengan itu arus rotor akan menemukan jalurnya masing-masing pada sangkar.

2. Mengubah Frekuensi

Pengaturan frekuensi untuk mengendalikan putaran motor induksi biasanya dibarengi juga dengan pengaturan tegangan masuk yang sebanding dengan frekuensi. Dengan menggunakan inverter, yaitu suatu alat yang dapat mengubah tegangan searah menjadi tegangan bolak-balik, frekuensi yang dihasilkan dapat dibuat berubah [4]. Perubahan frekuensi arus bolak-balik dari inverter ini ditentukan oleh periode pulsa yang memicu penyearah yang digunakan. Dengan mempercepat atau memperlambat periode pulsa yang memicu penyearah, frekuensi, dan juga kecepatan dapat diatur [4].

3. Mengubah tegangan stator

Pengaturan putaran dengan mengubah tegangan stator dapat dilakukan dengan mengatur vektor tegangannya. Pengaturan vektor tegangan ini menggunakan pengendalian umpan balik torsi dan fluks stator. Fluks dan torsi dihitung dari tegangan dan arus stator yang di ukur pada motor [4]. Fluks dan torsi ini merupakan keadaan aktual, yang akan dibandingkan dengan torsi dan fluks referensi untuk menentukan kondisi torsi error, fluks error, dan posisi fluks stator. Dengan menggabungkan output torsi error, output fluks error, dan posisi fluks stator, maka dapat diperoleh posisi switching inverter yang akan menentukan besar tegangan dan arus yang diberikan ke stator [4]. Pengaturan ini dapat dilakukan dengan *Dirrect Torque Control* (DTC) dan pengaturan dengan metode ini akan di bahas lebih lanjut pada BAB berikutnya.

Data motor induksi tiga phasa yang digunakan dalam percobaan simulasi dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Data Name Plate Motor Induksi Tiga Phasa

V	380 V
I	226 A
F	60 Hz
Nr	1780 rpm
HP	200 HP
p	4 kutub

Dari data di atas dapat dihitung:

1. Kecepatan normal

$$N_s = \frac{120 \times F}{p}$$

$$N_s = \frac{120 \times 60}{4}$$

$$N_s = 1800 \text{ rpm}$$

2. Slip motor

$$s = \frac{N_s \times N_r}{N_s} \times 100\%$$

$$s = \frac{1800 \times 1780}{1800} \times 100\%$$

$$s = 1,1 \%$$

3. Torsi motor

$$T_m = \frac{5250 \times HP}{N_s}$$

$$T_m = \frac{5250 \times 200}{1800}$$

$$T_m = 589,888 \text{ lb.ft}$$

$$T_m = 589,888 \times 1,355$$

$$T_m = 799,29$$

4. Daya motor

$$P = 200 \text{ HP} \times 746 \text{ W}$$

$$P = 149200$$

5. Torsi beban

$$T_b = \frac{P}{2\pi N_s \left(\frac{1}{60}\right)}$$

$$T_b = \frac{149200}{2 \times 3,14 \times 1800 \left(\frac{1}{60}\right)}$$

$$T_b = 792 Nm$$

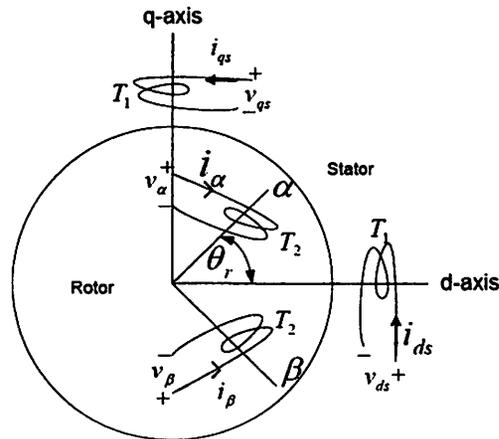
2.8 Model Dinamik Motor Induksi Tiga Phasa

2.8.1 Model Motor Induksi Dua Phasa

Rangkaian ekivalen motor motor seperti diuraikan sebelumnya hanya dapat digunakan untuk menganalisa performansi motor induksi tiga phasa dalam keadaan stabil (*steady-state*). Ini menyebabkan kondisi transient ketika terjadi perubahan beban dan perubahan frekuensi diabaikan. Perubahan ini terjadi pada aplikasi yang membutuhkan penggerak pengatur kecepatan yang variabel (*variable speed drive*) [2]. Model dinamik ini digunakan untuk melihat pengaruh perubahan sesaat tegangan atau arus, frekuensi stator, dan torsi. Untuk mendapatkan model dinamik motor induksi, maka ada beberapa asumsi yang di ambil pada motor induksi tiga phasa, yaitu:

1. Celah udara yang seragam.
2. Kumparan stator dan rotor motor seimbang, dengan distribusi *magnetomotive force* (mmf) yang sinusoidal.
3. Induktansi bervariasi secara sinusoidal terhadap posisi rotor.
4. Perubahan parameter motor dan saturasi di abaikan.

Model dinamik motor induksi tiga phasa ini di dapat dengan menggunakan model motor induksi dua phasa dalam koordinat *d* (*direct*) dan *q* (*quadrature*). Motor induksi dua phasa dengan kumparan stator dan rotor ditunjukkan pada Gambar 2.8 [2].



Gambar 2.8 Kumparan Stator dan Rotor Motor Induksi Dua Fasa

Tegangan terminal pada kumparan stator dan rotor merupakan penjumlahan tegangan jatuh pada resistansi dengan rata-rata perubahan fluks pada persamaan di bawah ini. Perubahan fluks ini merupakan perkalian arus dengan induktansi [2].

$$v_{qs} = R_q i_{qs} + p(L_{qq} i_{qs}) + p(L_{qd} i_{ds}) + p(L_{q\alpha} i_{\alpha}) + p(L_{q\beta} i_{\beta}) \dots \dots \dots (2.10)$$

$$v_{ds} = p(L_{dq} i_{qs}) + R_d i_{ds} + p(L_{dd} i_{ds}) + p(L_{d\alpha} i_{\alpha}) + p(L_{d\beta} i_{\beta}) \dots \dots \dots (2.11)$$

$$v_{\alpha} = p(L_{aq} i_{qs}) + p(L_{ad} i_{ds}) + R_{\alpha} i_{\alpha} + p(L_{\alpha\alpha} i_{\alpha}) + p(L_{\alpha\beta} i_{\beta}) \dots \dots \dots (2.12)$$

$$v_{\beta} = p(L_{\beta q} i_{qs}) + p(L_{\beta d} i_{ds}) + p(L_{\beta\alpha} i_{\alpha}) + R_{\beta} i_{\beta} + p(L_{\beta\beta} i_{\beta}) \dots \dots \dots (2.13)$$

Dengan p adalah operator diferensial d/dt , $v_{qs}, v_{ds}, v_{\alpha}, v_{\beta}$ adalah tegangan terminal stator pada koordinat q, d , dan pada kumparan rotor α dan β . i_{qs} dan i_{ds} adalah arus stator pada koordinat d dan q . i_{α} dan i_{β} adalah arus rotor pada kumparan α dan β . $L_{qq}, L_{dd}, L_{\alpha\alpha}$, dan $L_{\beta\beta}$ adalah induktansi diri pada q, d axis dan pada kumparan α dan β . T_1 adalah jumlah belitan kumparan stator, sementara T_2 adalah jumlah belitan kumparan rotor [2]. Induktansi bersama antara dua buah kumparan dilambangkan dengan L , dengan dua subscript. Subscript pertama menyatakan ggl induksi yang timbul pada sebuah kumparan oleh karena arus pada kumparan lain (arus pada kumparan lain ini dinotasikan dengan subscript kedua). Sebagai contoh L_{qd} merupakan induktansi bersama antara kumparan d dan q disebabkan arus pada kumparan d . Dengan asumsi celah udara yang seragam, maka besarnya induktansi diri konstan setiap saat tanpa dipengaruhi posisi angular rotor.

$$L_{\alpha\alpha} = L_{\beta\beta} = L_{rr} \quad (L_{rr} = \text{induktansi rotor}) \dots\dots\dots (2.14)$$

$$L_{dd} = L_{qq} = L_s \quad (L_s = \text{induktansi stator}) \dots\dots\dots (2.15)$$

Induktansi bersama antara kumparan-kumparan stator dan antara kumparan-kumparan rotor adalah nol, karena fluks yang timbul pada kumparan tidak akan melingkupi kumparan lain yang berbeda sudut 90° . Sehingga :

$$L_{\alpha\beta} = L_{\beta\alpha} = 0 \dots\dots\dots (2.16)$$

$$L_{DQ} = L_{QD} = 0 \dots\dots\dots (2.17)$$

Induktansi bersama antara kumparan stator dengan rotor merupakan fungsi posisi rotor, r . Induktansi bersama ini merupakan fungsi sinusoidal karena asumsi mmf (*magnetomotive force*) yang sinusoidal pada kumparan. Karena kumparan stator dan rotor adalah simetris, maka induktansi bersama antara kumparan stator dengan rotor adalah sama apakah dilihat dari sisi stator ataupun rotor.

$$L_{\alpha d} = L_{d\alpha} = L_{sr} \cos\theta_r \dots\dots\dots (2.18)$$

$$L_{\beta d} = L_{d\beta} = L_{sr} \sin\theta_r \dots\dots\dots (2.19)$$

$$L_{\alpha q} = L_{q\alpha} = L_{sr} \sin\theta_r \dots\dots\dots (2.20)$$

$$L_{\beta q} = L_{q\beta} = -L_{sr} \cos\theta_r \dots\dots\dots (2.21)$$

Dengan L_{sr} adalah nilai puncak induktansi bersama kumparan stator dengan kumparan rotor. Persamaan 2.21 bernilai negatif karena arus yang bernilai positif pada kumparan β menghasilkan *fluks linkage* yang bernilai negatif pada kumparan q . Dengan mensubstitusikan persamaan 2.14 s/d 2.21 ke dalam persamaan 2.10 s/d 2.13 dihasilkan persamaan diferensial dengan induktansi yang bervariasi terhadap waktu. Persamaan tersebut menjadi:

$$v_{qs} = (R_s + L_s p)i_{qs} + L_{sr} p(i_\alpha \sin\theta_r) - L_{sr} p(i_\beta \cos\theta_r) \dots\dots\dots (2.22)$$

$$v_{ds} = (R_s + L_s p)i_{ds} + L_{sr} p(i_\alpha \cos\theta_r) + L_{sr} p(i_\beta \sin\theta_r) \dots\dots\dots (2.23)$$

$$v_\alpha = L_{sr} p(i_{qs} \sin\theta_r) + L_{sr} p(i_{ds} \cos\theta_r) + (R_{rr} + L_{rr} p)i_\alpha \dots\dots\dots (2.24)$$

$$v_\beta = L_{sr} p(i_{qs} \cos\theta_r) + L_{sr} p(i_{ds} \sin\theta_r) + (R_{rr} + L_{rr} p)i_\beta \dots\dots\dots (2.25)$$

Dengan:

$$R_s = R_q = R_d = \text{tahanan stator}$$

$$R_{rr} = R_\alpha = R_\beta = \text{tahanan rotor}$$

$$L_{rr} = \text{induktansi rotor}$$

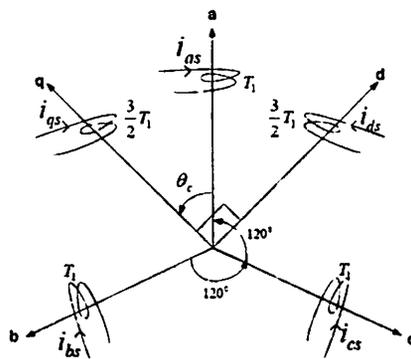
L_s = induktansi stator

L_{sr} = induktansi bersama kumparan stator dengan rotor

Persamaan 2.22 s/d 2.25 berubah ubah menurut waktu karena dipengaruhi oleh posisi sesaat rotor (θ_r). Oleh karena itu untuk mempermudah menganalisis performansi motor dibutuhkan persamaan yang lebih sederhana yang besarnya tidak tergantung pada posisi rotor [3].

2.8.2 Transformasi Tiga Fasa Ke Dua Fasa

Pada pengaturan kecepatan putaran motor induksi metode DTC, *estimator* berfungsi sebagai pengganti sensor kecepatan dan posisi rotor. Nilai fluks dan torsi berdasarkan persamaan tegangan stator estimasi tidak memerlukan sinyal kecepatan atau posisi jika berada pada sumbu *stationer* [2]. Transformasi motor induksi dari sumbu 3 fasa (abc) menjadi sumbu 2-fasa (dq) diperlukan agar mempermudah analisa dalam pengaturan posisi atau kecepatan dan juga agar motor induksi 3 fasa memiliki sifat atau perilaku yang menyerupai motor DC sehingga lebih mudah dikontrol. Persamaan tegangan dan arus stator berada pada sumbu-dq berdasarkan transformasi Park [3]. Pada metode DTC konvensional adapun persamaan fluks stator estimasi dalam fungsi tegangan dan arus stator sebagai berikut:



Gambar 2.9 Kumparan Stator Motor Dua Fasa dan Tiga Fasa

$$I_{qs} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{sa} \dots\dots\dots (2.26)$$

$$I_{ds} = \frac{1}{\sqrt{2}} (I_{sb} - I_{sc}) \dots\dots\dots (2.27)$$

$$V_{qs} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} \left(V_a - \frac{1}{2} (V_b + V_c) \right) \dots\dots\dots (2.28)$$

$$V_{ds} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_{dc} (V_b - V_c) \dots\dots\dots (2.29)$$

Persamaan fluks stator estimator adalah sebagai berikut:

$$\Phi_{qs} = \int (V_{qs} - i_{qs} \cdot R_s) dt \dots\dots\dots (2.30)$$

$$\Phi_{ds} = \int (V_{ds} - i_{ds} \cdot R_s) dt \dots\dots\dots (2.31)$$

Jadi,

$$\frac{d\Phi_s}{dt} = V_s - i_s \cdot R_s \dots\dots\dots (2.32)$$

Jika R_s nilainya sangat kecil, maka $R_s \cdot i_s = 0$, sehingga:

$$\frac{d\Phi_s}{dt} = V_s \dots\dots\dots (2.33)$$

$$\Delta\Phi_s = V_s \Delta t \dots\dots\dots (2.34)$$

Dimana Δt adalah periode sampling.

Nilai torsi estimasi adalah sebagai berikut:

$$P = T \cdot \omega \cdot N_s \left(\frac{1}{60} \right) \dots\dots\dots (2.35)$$

$$P = T \cdot 2\pi \cdot N_s \left(\frac{1}{60} \right) \dots\dots\dots (2.36)$$

$$T_b = \frac{P}{2\pi \cdot N_s \left(\frac{1}{60} \right)} \dots\dots\dots (2.37)$$

Dimana:

Φ_s = fluks stator (Wb)

V_s = tegangan stator (volt)

i_s = arus stator (A)

R_s = tahanan stator (ohm)

T_b = torsi motor (Nm)

N_s = kecepatan sinkron (rpm)

ω = kecepatan sudut (rad/sec)

2.9 Perhitungan Parameter Motor Induksi Tiga Fasa

Data yang diperlukan untuk menghitung performansi dari suatu motor induksi tiga fasa dapat diperoleh dari hasil pengujian tahanan stator (*DC Test*), pengujian tanpa beban (*No Load Test*), dan pengujian rotor tertahan (*Blocked Rotor Test*) [3].

2.9.1 Pngujian Tahanan Stator (*DC Test*)

Untuk menentukan besarnya tahanan stator R_s dilakukan dengan test DC. Pada dasarnya tegangan DC diberikan pada belitan stator motor induksi. Karena arus yang disuplai adalah arus DC, maka tidak terdapat tegangan yang diinduksikan pada rangkaian rotor sehingga tidak ada arus yang mengalir pada rotor. Dalam keadaan demikian, reaktansi dari motor juga bernilai nol, oleh karena itu, yang membatasi arus pada motor hanya tahanan stator [3].

Untuk melakukan pengujian ini, arus pada belitan stator diatur pada nilai rated, yang mana hal ini bertujuan untuk memanaskan belitan stator pada temperatur yang sama selama operasi normal [3]. Apabila tahanan stator dihubung Y, maka besar tahanan stator/ fasa adalah:

$$R_s = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}} \dots\dots\dots (2.38)$$

Bila stator dihubung delta, maka besar tahanan stator:

$$R_s = \frac{3V_{DC}}{2I_{DC}} \dots\dots\dots (2.39)$$

Dengan diketahuinya nilai dari R_s rugi-rugi tembaga stator pada beban nol dapat ditentukan, dan rugi-rugi rotasional dapat ditentukan sebagai selisih dari daya input pada beban nol dan rugi-rugi tembaga stator [3]. Data pengujian *DC Test* dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Data Pengujian *DC Test*

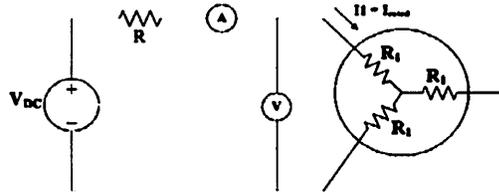
V_{DC}	50
I_{DC}	1,683

Perhitungan *DC Test*

$$R_s = \frac{50}{2 \times 1,683}$$

$$R_s = 14,85 \Omega$$

Gambar 2.10 menunjukkan salah satu bentuk pengujian DC pada stator motor induksi yang terhubung Y.



Gambar 2.10 Rangkaian Pengukuran Untuk DC Test

2.9.2 Pengujian Tanpa Beban (No Load Test)

Pengujian tanpa beban pada motor induksi akan memberikan keterangan berupa besarnya arus magnetisasi dan rugi – rugi tanpa beban. Biasanya pengujian tersebut dilakukan pada frekuensi yang diizinkan dan dengan tegangan tiga fasa dalam keadaan setimbang yang diberikan pada terminal stator. Pembacaan diambil pada tegangan yang diizinkan setelah motor bekerja cukup lama, agar bagian–bagian yang bergerak mengalami pelumasan sebagaimana mestinya [3]. Rugi–rugi rotasional keseluruhan pada frekuensi dan tegangan yang diizinkan pada waktu dibebani biasanya dianggap konstan dan sama dengan rugi–rugi tanpa beban [3].

Pada keadaan tanpa beban, besarnya arus rotor sangat kecil dan hanya diperlukan untuk menghasilkan torsi yang cukup untuk mengatasi gesekan. Karenanya rugi–rugi I^2R tanpa beban cukup kecil dan dapat diabaikan. Pada transformator rugi–rugi I^2R primernya tanpa beban dapat diabaikan, akan tetapi rugi–rugi stator tanpa beban motor induksi besarnya cukup berarti karena arus magnetisasinya lebih besar [3]. Besarnya rugi–rugi rotasional P_R pada keadaan kerja normal adalah:

Karena slip pada keadaan tanpa beban sangat kecil, maka akan mengakibatkan tahanan rotor R_2/s sangat besar. Sehingga cabang paralel rotor dan cabang magnetisasi menjadi jX_M di shunt dengan suatu tahanan yang sangat besar, dan besarnya reaktansi cabang paralel karenanya sangat mendekati X_M . Sehingga besar reaktansi yang tampak X_{nl} yang diukur pada terminal stator pada keadaan tanpa beban sangat mendekati $X_1 + X_M$, yang merupakan reaktansi sendiri dari stator, sehingga:

$$X_{nl} = X_s + X_M \dots\dots\dots (2.40)$$

Maka besarnya reaktansi diri stator, dapat ditentukan dari pembacaan alat ukur pada keadaan tanpa beban [3]. Untuk mesin tiga fasa yang terhubung Y besarnya impedansi tanpa beban / phasa:

$$I_{nl} \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \dots\dots\dots (2.41)$$

$$Z_{nl} = \frac{V_{nl}}{\sqrt{3}I_{nl}} \dots\dots\dots (2.42)$$

Dimana V_{nl} merupakan tegangan line pada pengujian tanpa beban [3].

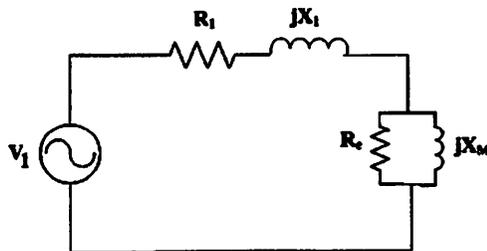
Besarnya tahanan pada pengujian tanpa beban R_{nl} adalah:

$$R_{nl} = \frac{P_{nl}}{3I_{nl}^2} \dots\dots\dots (2.43)$$

P_{nl} merupakan suplai daya tiga phasa pada keadaan tanpa beban, maka besar reaktansi tanpa beban:

$$X_{nl} = \sqrt{Z_{nl}^2 - R_{nl}^2} \dots\dots\dots (2.44)$$

Untuk pengujian beban nol, maka rangkaian ekivalen motor induksi seperti gambar 2.12.



Gambar 2.11 Rangkaian Ekivalen Motor Induksi pada Percobaan Beban Nol

Data pengujian tanpa beban dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Data Rotor Tertahan

P_{nl}	219,57 W
V_{nl}	380 V
I_a	0,052
I_b	0,050
I_c	0,051

Perhitungan pengujian tanpa beban (*no load*)

$$1. I_{nl} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3}$$

$$I_{nl} = \frac{0,052 + 0,050 + 0,051}{3}$$

$$I_{nl} = 0,051$$

$$2. Z_{nl} = \frac{V_{nl}}{\sqrt{3}I_{nl}}$$

$$Z_{nl} = \frac{380}{\sqrt{3} \times 0,051}$$

$$Z_{nl} = 4301,83$$

$$3. R_{nl} = \frac{P_{nl}}{3I_{nl}^2}$$

$$R_{nl} = \frac{219,57}{3 \times (0,051)^2}$$

$$R_{nl} = 1435,13$$

$$4. X_{nl} = \sqrt{Z_{nl}^2 - R_{nl}^2}$$

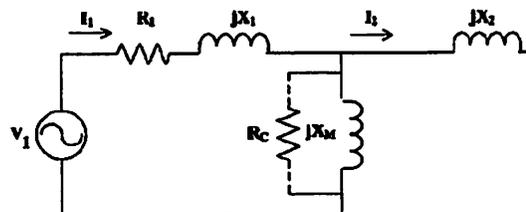
$$X_{nl} = \sqrt{4301,83^2 - 1435,13^2}$$

$$X_{nl} = 4055,385$$

2.9.3 Pengujian Rotor Tertahan (*Blocked Rotor Test*)

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan parameter-parameter motor induksi, dan biasa juga disebut dengan *blocked rotor test*. Pada pengujian ini rotor dikunci/ ditahan sehingga tidak berputar [3].

Untuk melakukan pengujian ini, tegangan AC disuplai ke stator dan arus yang mengalir diatur mendekati beban penuh. Ketika arus telah menunjukkan nilai beban penuhnya, maka tegangan, arus, dan daya yang mengalir ke motor diukur. Rangkaian ekuivalen untuk pengujian ini dapat dilihat pada gambar 2.11 di bawah ini [3].



Gambar 2.12 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Tiga Fasa Pada Percobaan Blocked Rotor Test

Saat pengujian ini berlangsung $s = 1$ dan tahanan rotor $\frac{R_2}{s} = R_r$. Karena nilai R_r dan X_r begitu kecil, maka arus input akan seluruhnya mengalir melalui tahanan dan reaktansi tersebut. Oleh karena itu, kondisi sirkit pada saat ini terlihat seperti kombinasi seri X_s , R_s , X_r , dan R_r . Sesudah tegangan dan frekuensi diatur, arus yang mengalir pada motor diatur dengan cepat, sehingga tidak timbul kenaikan temperatur pada rotor dengan cepat.

$$I_{BR} \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \dots\dots\dots (2.44)$$

$$Z_{BR} = \frac{V_T}{\sqrt{3}I_{BR}} \dots\dots\dots (2.46)$$

Tahanan *block rotor*:

$$R_{BR} = \frac{P}{3.(I_{BR})^2} \dots\dots\dots (2.47)$$

Sedangkan reaktansi *block rotor*

$$X_{BR} = \sqrt{(Z_{BR})^2 - (R_{BR})^2} \dots\dots\dots (2.48)$$

Motor induksi yang dipakai adalah motor induksi dengan rotor sangkar tunggal kelas A, maka X_s dan X_r diasumsikan sama sehingga:

$$X_s = X_r = 0,5 x X_{BR} \dots\dots\dots (2.49)$$

$$L_s = L_r = \frac{X_s}{2\pi f} \dots\dots\dots (2.50)$$

Besarnya reaktansi yang diukur pada terminal stator pada keadaan tanpa beban (X_{nl}) mendekati sama dengan $X_s + X_m$ yang merupakan reaktansi stator, sehingga:

$$X_m = X_{nl} - X_s \dots\dots\dots (2.51)$$

Induktansi dapat ditentukan sebagai berikut :

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f} \dots\dots\dots (2.52)$$

Data pengujian rotor tertahan dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.4 Data Pengujian Rotor Tertahan

P	5502,21 W
V	3500 V
I_a	8,72
I_b	8,87
I_c	8,84

Perhitungan pengujian rotor tertahan

1.
$$I_{BR} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3}$$

$$I_{BR} = \frac{8,72 + 8,87 + 8,84}{3}$$

$$I_{BR} = 8,81 \text{ A}$$
2.
$$Z_{BR} = \frac{V_T}{\sqrt{3} \cdot I_{BR}}$$

$$Z_{BR} = \frac{3500}{\sqrt{3} \times 8,81}$$

$$Z_{BR} = 229,33 \Omega$$
3.
$$R_{BR} = \frac{P}{3 \cdot (I_{BR})^2}$$

$$R_{BR} = \frac{5502,21}{3 \cdot (8,81)^2}$$

$$R_{BR} = 23,63$$
4.
$$X_{BR} = \sqrt{(Z_{BR})^2 - (R_{BR})^2}$$

$$X_{BR} = \sqrt{229,33^2 - 23,63^2}$$

$$X_{BR} = 228,114 \Omega$$
5.
$$X_s = X_r = 0,5 \times X_{BR}$$

$$X_s = X_r = 0,5 \times 228,114$$

$$X_s = X_r = 114,057$$
6.
$$L_s = L_r = \frac{X_s}{2\pi f}$$

$$L_s = L_r = \frac{114,057}{2 \times 3,14 \times 60}$$

$$L_s = L_r = 0,3027$$
7.
$$X_m = X_{nl} - X_s$$

$$X_m = 4055,385 - 114,057$$

$$X_m = 3941,328$$
8.
$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f}$$

$$L_m = \frac{3941,328}{2 \times 3,14 \times 60}$$

$$L_m = 10,46$$

Dari pengujian dan perhitungan yang telah dilakukan, dapat diambil data-data motor induksi tiga phasa untuk mengisi parameter pada Matlab. Data tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.5 dan Tabel 3.6.

Tabel 3.5 Data Name Plate

V	380 V
I	226 A
F	60 Hz
N_r	1780 rpm
HP	200 HP
p	4 kutub

Tabel 3.6 Data Pengujian dan Perhitungan

P	149,2 W
N_s	1800 rpm
s	1,1%
X_s	114,057 Ω
X_r	114,057 Ω
X_m	3941,328 Ω
R_s	14,85 Ω
R_r	9,295 Ω
L_s	0,03027 H
L_r	0,03027 H
L_m	10,46 H

BAB III

DIRECT TORQUE CONTROL

3.1 Umum

Dalam penggunaannya, motor induksi dapat dioperasikan dengan kecepatan yang bervariasi. Oleh karena itu, motor induksi banyak dipergunakan dalam industri saat ini. Pengaturan kecepatan putaran motor induksi dapat dilakukan dengan beberapa metode dan salah satu metode yang digunakan adalah dengan mengontrol torsi motor secara langsung [4].

Direct torque control (DTC) merupakan kemajuan terbaru dalam teknologi pengontrolan kecepatan motor induksi tiga fasa. Seperti diketahui bahwa fungsi dasar penggerak pengatur kecepatan (*variable speed drive*) adalah mengendalikan aliran energi dari jala-jala ke mesin dalam proses produksi industri. Energi itu disuplai lewat poros motor [4]. Dua besaran yang dapat di ukur yang menunjukkan kondisi poros ini adalah torsi dan kecepatan. Untuk mengendalikan aliran energi maka besaran tersebut harus diatur. Dalam prakteknya salah satu besaran ini harus di kontrol yang dikenal dengan kontrol torsi (*torque control*) dan kontrol kecepatan (*speed control*). Ketika variabel kontrol kecepatan beroperasi sebagai kontrol torsi, maka kecepatan bergantung kepada beban [4].

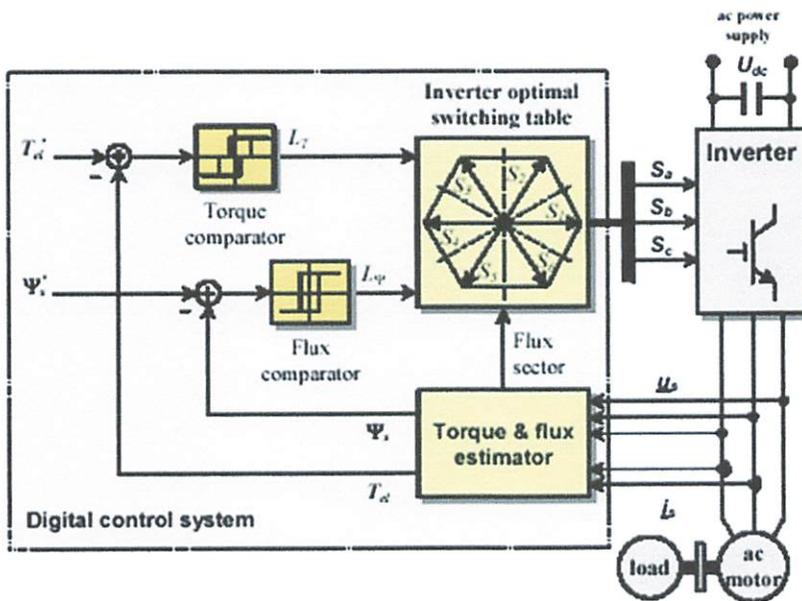
Pada awalnya yang paling banyak digunakan dalam aplikasi mesin listrik yang membutuhkan pengaturan kecepatan dan pengontrolan torsi dengan kehandalan yang tinggi adalah motor DC, karena fluks dan torsinya dapat dengan mudah diatur tanpa membutuhkan peralatan elektronika yang kompleks [5]. Perkembangan teknologi penggerak pengatur kecepatan mesin AC, didasari atas keinginan untuk menandingi bahkan melebihi performansi yang cukup bagus yang dimiliki penggerak motor DC, seperti respon torsi yang cepat dan pengaturan kecepatan yang akurat dengan memanfaatkan berbagai kelebihan motor AC [5].

3.2 Pengontrolan Vektor pada Motor Induksi 3 fasa

DTC adalah suatu metode yang digunakan dalam *variable frequency drive* untuk mengontrol torsi dan kecepatan pada motor induksi tiga fasa. Metode ini

meliputi perhitungan estimasi fluks dan torsi motor berdasarkan tegangan dan arus pada motor [5]. Fluks stator diestimasi berdasarkan tegangan stator. Torsi diestimasi dari estimator vektor fluks stator dan arus motor. Magnitude fluks dan torsi yang diestimasi kemudian dibandingkan dengan nilai referensinya [5].

Teknik pengontrolan pada motor induksi tiga fasa yang dikenal dengan *field oriented control* (FOC) bekerja dengan performansi dinamik yang tinggi yang sebanding dengan karakteristik motor DC [5]. Pengontrolan motor induksi ini dilakukan dengan mengontrol parameter motor dalam besaran vektor. Pengontrolan vektor ini menggunakan pengendalian umpan balik torsi dan fluks stator (Gambar 3.1). fluks dan torsi dihitung dari tegangan dan arus stator yang diukur pada motor. Metode ini menggunakan model referensi stator motor induksi [5].



Gambar 3.1 Skema DTC

Berdasarkan konsep dasar DTC diatas, nilai magnitudo dari fluks stator dan torsi dapat dikontrol secara langsung dengan melakukan pemilihan vektor tegangan secara tepat, yaitu pemilihan state inverter secara berurutan dengan spesifikasi berikut:

1. Vektor tegangan bukan nol yang sudut fluks statornya tidak melebihi $\pm 90^\circ$ menyebabkan fluks naik.

2. Vektor tegangan bukan nol yang sudut fluks statornya melebihi $\pm 90^\circ$ menyebabkan fluks turun.
3. Vektor tegangan nol (V_0 dan V_7 , vektor tegangan saat *short - circuit*) tidak berpengaruh pada vektor fluks stator yang berarti motor berhenti bergeak.
4. Torsi dapat dikontrol dengan pemilihan state inverter yang tepat dimana fluks stator meningkat atau menurun.

Persamaan tegangan stator mesin dalam model referensi stator (*stator reference frames*) dalam besaran vektor adalah:

$$\bar{v}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\lambda}_s}{dt} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

Sehingga:

$$\bar{\lambda}_s = \int (\bar{v}_s - R_s \bar{i}_s) dt \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

Dimana:

\bar{v}_s = vektor tegangan stator

\bar{i}_s = vektor arus stator

R_s = tahanan stator

$\bar{\lambda}_s$ = vektor fluks stator

Dengan demikian fluks linkages dalam koordinat *stator reference frame* dihitung berdasarkan:

$$\lambda_{qs} = \int (v_{qs} - R_s i_{qs}) dt \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

$$\lambda_{ds} = \int (v_{ds} - R_s i_{ds}) dt \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

Seingga besarnya fluks stator adalah:

$$\lambda_s = \sqrt{(\lambda_{qs})^2 + (\lambda_{ds})^2} \angle \theta_{fs} \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

$$\theta_{fs} = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_{qs}}{\lambda_{ds}} \right) \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

Persamaan torsi elektromagnetik adalah:

$$T_e = \frac{3P}{2} (i_{qs} \lambda_{ds} - i_{ds} \lambda_{qs}) \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

Frekuensi listrik dihitung dengan mendifferensialkan sudut vektor fluks rotor, yaitu:

$$\omega_e = \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d}{dt} \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_{qs}}{\lambda_{ds}} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

$$\omega_e = \frac{\lambda_{qs}\lambda_{ds} - \lambda_{ds}\lambda_{qs}}{\lambda_s^2} \dots\dots\dots (3.9)$$

Persamaan kecepatan rotor adalah:

$$\omega_r = P \left(\omega_e - R_r \frac{T_e}{\lambda_r^2} \right) \dots\dots\dots (3.10)$$

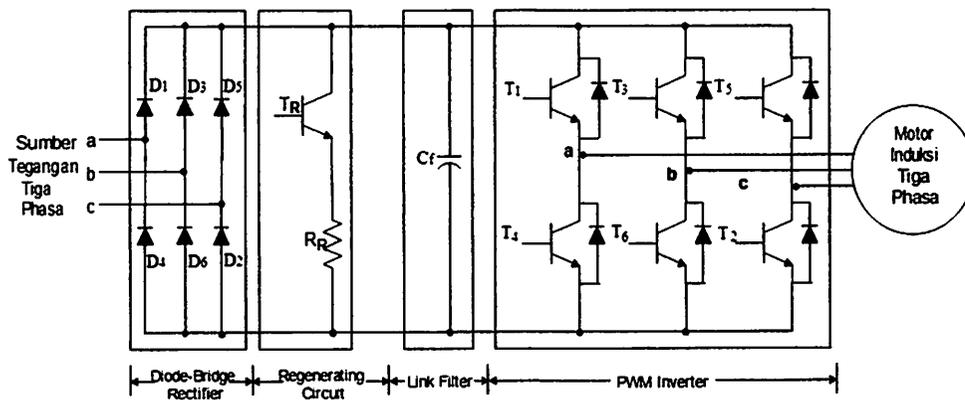
Dengan komponen d dan q-axis diperoleh dari transformasi tiga fasa ke sistem dua fasa:

$$i_{qs} = i_{as} \dots\dots\dots (3.11)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{cs} - i_{bs}) \dots\dots\dots (3.12)$$

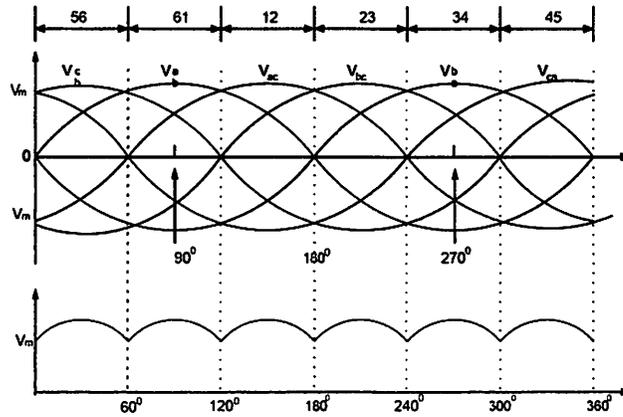
3.3 Kondisi Switching dan Vektor Tegangan Output Inverter

Rangkaian daya penggerak motor induksi tiga fasa dapat dilihat pada gambar 3.2.



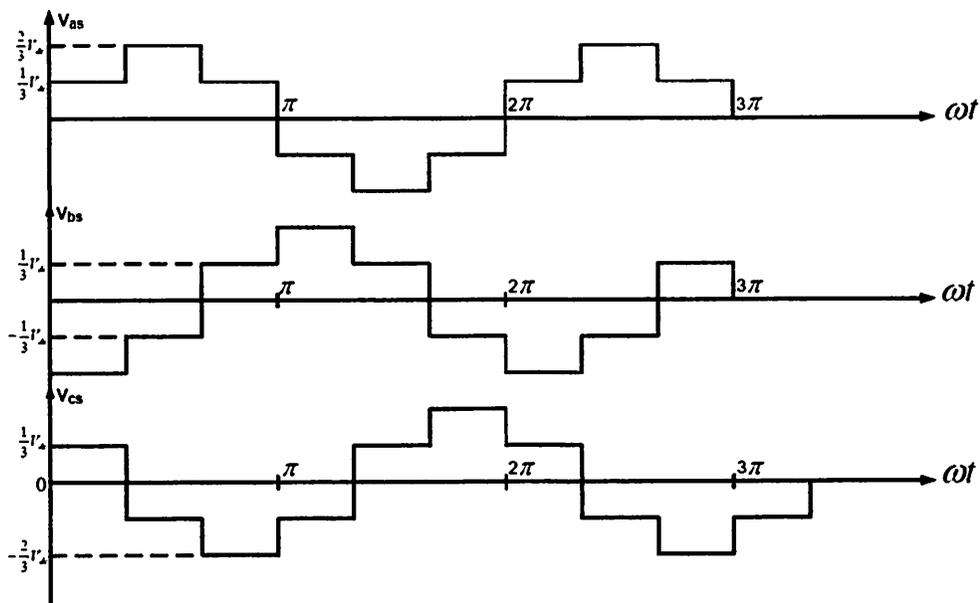
Gambar 3.2 Rangkaian Daya Penggerak Motor Induksi Tiga Fasa

Sumber tegangan tiga fasa pada gambar 3.2 terlebih dahulu disearahkan dengan menggunakan penyearah tiga fasa. Bentuk gelombang setelah disearahkan dapat dilihat pada Gambar 3.3 [6].



Gambar 3.3 Bentuk Gelombang Tegangan Keluaran Dioda

Setelah diseleksi maka tegangan ini akan di ubah ke dalam tegangan bolak-balik yang akan diberikan kepada motor induksi tiga pisa. Bentuk tegangan yang dihasilkan oleh inverter ini untuk kondisi 180° pada transistor adalah seperti Gambar 3.4 [6].



Gambar 3.4 Bentuk Tegangan Keluaran Inverter

Pada inverter tiga pisa pada Gambar dapat dibuat beberapa kombinasi switching yang akan menghasilkan vektor tegangan yang berbeda. Jika T_1 on dan T_4 off (dilambangkan dengan $S_a = 1$) maka pada V_a timbul tegangan sebesar V_{dc} .

seperti dapat dilihat pada Tabel 3.1. Demikian juga halnya pada S_b dan S_c . Ketika T_1 dan T_4 off, maka tidak ada tegangan pada V_a [6].

Tabel 3.1 Kondisi Switching Inverter Fase a

T_1	T_4	S_a	V_a
on	off	1	V_{dc}
off	off	0	0

Tegangan output tiga fase diperoleh dari konfigurasi waktu penyalaan enam buah transistor pada Gambar 3.2 tersebut. Ada 8 jenis switching yang berbeda yang dapat dibuat dari kombinasi S_a , S_b , dan S_c . 8 jenis switching ini akan menghasilkan 8 buah vektor tegangan output inverter yang berbeda [6]. Vektor tegangan yang terjadi untuk tegangan output inverter yang berbeda [6]. Vektor tegangan yang terjadi untuk tegangan *line to line* berlaku :

$$v_{ab} = v_a - v_b \dots\dots\dots (3.13)$$

$$v_{bc} = v_b - v_c \dots\dots\dots (3.14)$$

$$v_{ca} = v_c - v_a \dots\dots\dots (3.15)$$

Untuk sistem yang seimbang berlaku:

$$v_a + v_b + v_c = 0 \dots\dots\dots (3.16)$$

$$v_a = -v_b - v_c$$

Persamaan ini di uraikan menjadi:

$$v_a + 2v_a = v_a - v_b - v_c + v_a$$

$$3v_a = v_{ab} - v_{ca}$$

$$v_a \frac{v_{ab} - v_{ca}}{3}$$

Sehingga tegangan fase kumparan stator motor adalah:

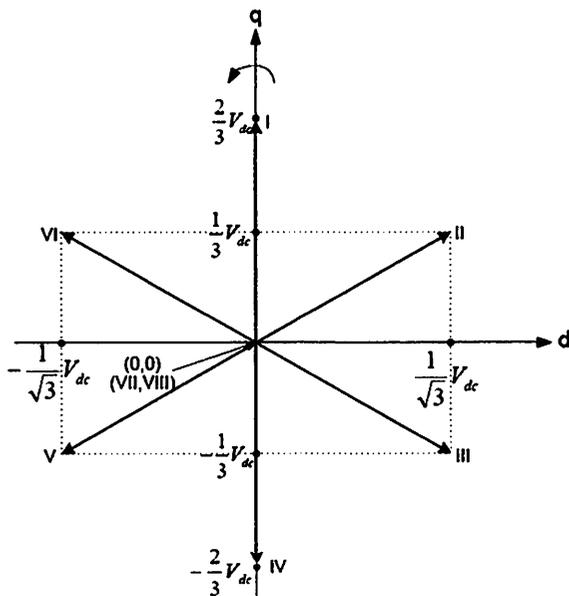
$$v_{as} \frac{v_{ab} - v_{ca}}{3} \dots\dots\dots (3.17)$$

Dengan cara yang sama didapatkan:

$$v_{bs} \frac{v_{bc} - v_{ab}}{3} \dots\dots\dots (3.18)$$

$$v_{cs} \frac{v_{ca} - v_{bc}}{3} \dots\dots\dots (3.19)$$

Dengan, v_{as} , v_{bs} , v_{cs} = tegangan fase kumparan stator motor. dan tegangan stator motor pada d dan q axis adalah:

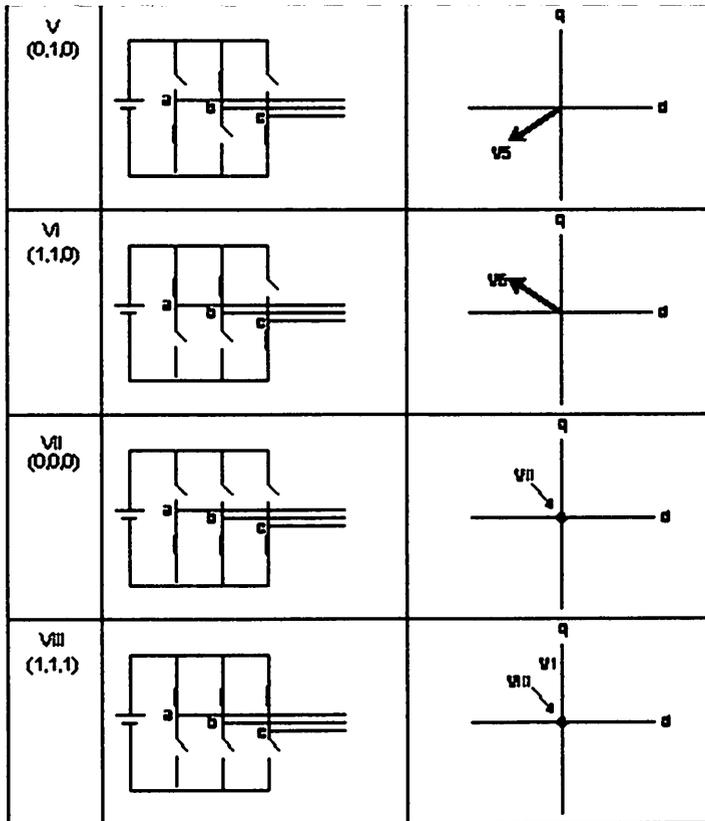


Gambar 3.5 Tegangan Output Inverter untuk Setiap Switching

Jadi untuk berbagai jenis switching didapatkan phasor tegangan stator yang berbeda sebagai resultan dari V_{qs} dan V_{ds} (Gambar 3.5 dan Tabel 3.3) [6].

Tabel 3.3 Tegangan Keluaran Inverter

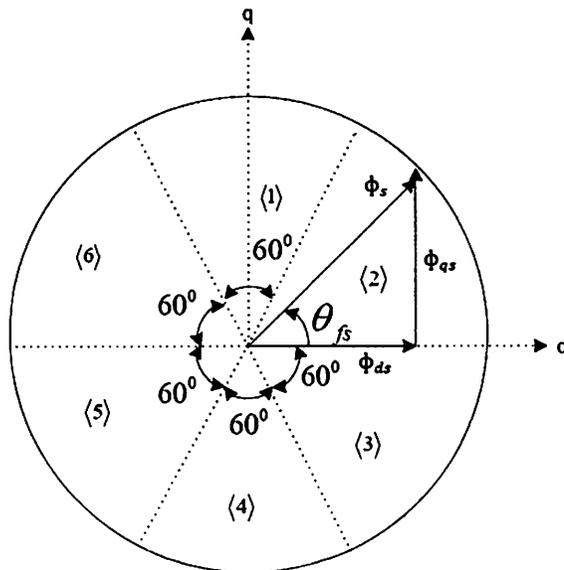
Switch	Topolog Switching	Tegangan Output (dalam koordinat d-q)
I (1,0,0)		
II (1,0,1)		
III (0,0,1)		
IV (0,1,1)		



Dengan phasor tegangan yang berubah-ubah, maka sesuai dengan persamaan (3.1) dan (3.2) didapat fluks stator berubah secara vektoris [6].

3.4 Pengontrolan Fluks

Fluks yang bergerak melingkar pada stator mesin menempati salah satu dari enam ruang seperti Gambar 3.6. Phasor fluks stator mempunyai besar ϕ_s , dengan posisi θ_{fs} . Fluks dalam koordinat d-q adalah ϕ_{ds} dan ϕ_{qs} . Jika phasor fluks berada pada ruang (2) maka vektor tegangan yang harus diberikan adalah VI atau I. Salah satu dari kedua vektor tegangan ini memperbesar fluks sementara yang lain mengurangi. Penjelasan ini dapat dilihat pada Gambar 3.7 [5].



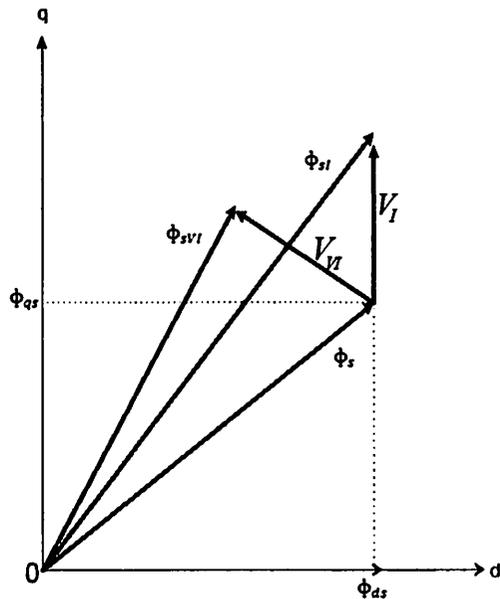
Gambar 3.6 Pembagian Fluks Linkages Stator dalam 6 Ruang

Pada gambar 3.7 dapat dilihat pengaruh switching phasor tegangan I (V_I), yang memperbesar phasor fluks dari ϕ_s menjadi ϕ_{sI} . Sementara phasor tegangan VI (V_{VI}) mengurangi fluks menjadi ϕ_{sVI} . Ini menyebabkan phasor tegangan yang lebih dekat memperbesar fluks, sementara phasor tegangan yang lebih jauh mengurangi fluks [5]. Tetapi kedua-duanya memperbesar posisi phasor fluks. Pengontrolan fluks ini dilakukan dengan cara membandingkan fluks rotor ϕ_s yang didapat dari persamaan (3.3 Sd 3.5) dengan fluks referensi (ϕ_{ref}). Kemudian hasil perbandingan ini dikonversikan dalam sinyal digital (dilambangkan S_ϕ). Perbandingan ini dapat dilihat pada Tabel 3.4 [5].

Tabel 3.4 Logic Pengontrolan Fluks

Kondisi	S_ϕ
$\phi_{ref} - \phi_s > 0$	1
$\phi_{ref} - \phi_s \leq 0$	0

Dari hasil perbandingan ini akan ditentukan vektor tegangan yang sesuai untuk mengontrol perubahan fluks secara langsung. Jika S_ϕ bernilai 1 berarti fluks harus diperbesar, sementara jika bernilai 0 fluks harus diperkecil [5].



Gambar 3.7 Pengaruh Switching T_e dan T_e pada Phasor Fluks Stator

3.5 Pengontrolan Torsi

Pengontrolan torsi ini dilakukan dengan membandingkan torsi yang diinginkan (torsi referensi) dengan torsi rotor pada motor (Tabel 3.5). Torsi rotor dihitung menggunakan persamaan (3.7) [5].

Tabel 3.5 Logic Pengontrolan Torsi

Kondisi	S_T
$(T_{ref} - T_e) > \delta T_e$	1
$-\delta T_e < (T_{ref} - T_e) < \delta T_e$	0
$(T_{ref} - T_e) < -\delta T_e$	-1

Dengan T_e adalah torsi elektromagnetik, T_{ref} adalah torsi referensi, dan δT_e adalah batas torsi yang diterima di atas torsi referensi. Ketika torsi eror $(T_{ref} - T_e)$ melebihi δT_e maka waktunya untuk menambah torsi, dilambangkan dengan sinyal +1 [5]. Jika torsi eror berada antara positif dan negatif δT_e , maka phasor tegangan harus vektor tegangan nol. Untuk torsi eror di bawah δT_e , maka waktunya untuk melakukan pengereman, dilambangkan dengan sinyal -1 [5].

Sementara jika S_T bernilai 1 berarti phasor tegangan harus dinaikkan, 0 artinya phasor tegangan bernilai tetap dan -1 berarti phasor tegangan harus

diperlambat di belakang phasor fluks untuk pengereman. Dengan menggabungkan output fluks eror S_ϕ , output torsi eror S_T dan keenam ruang posisi fluks stator S_θ maka tabel switching dapat dibuat untuk memperoleh switching inverter yang tepat pada suatu kondisi tertentu seperti terlihat pada Tabel 3.6 [6].

Tabel 3.6 Kondisi Switching Untuk Berbagai Kondisi S_ϕ , S_T , dan S_e

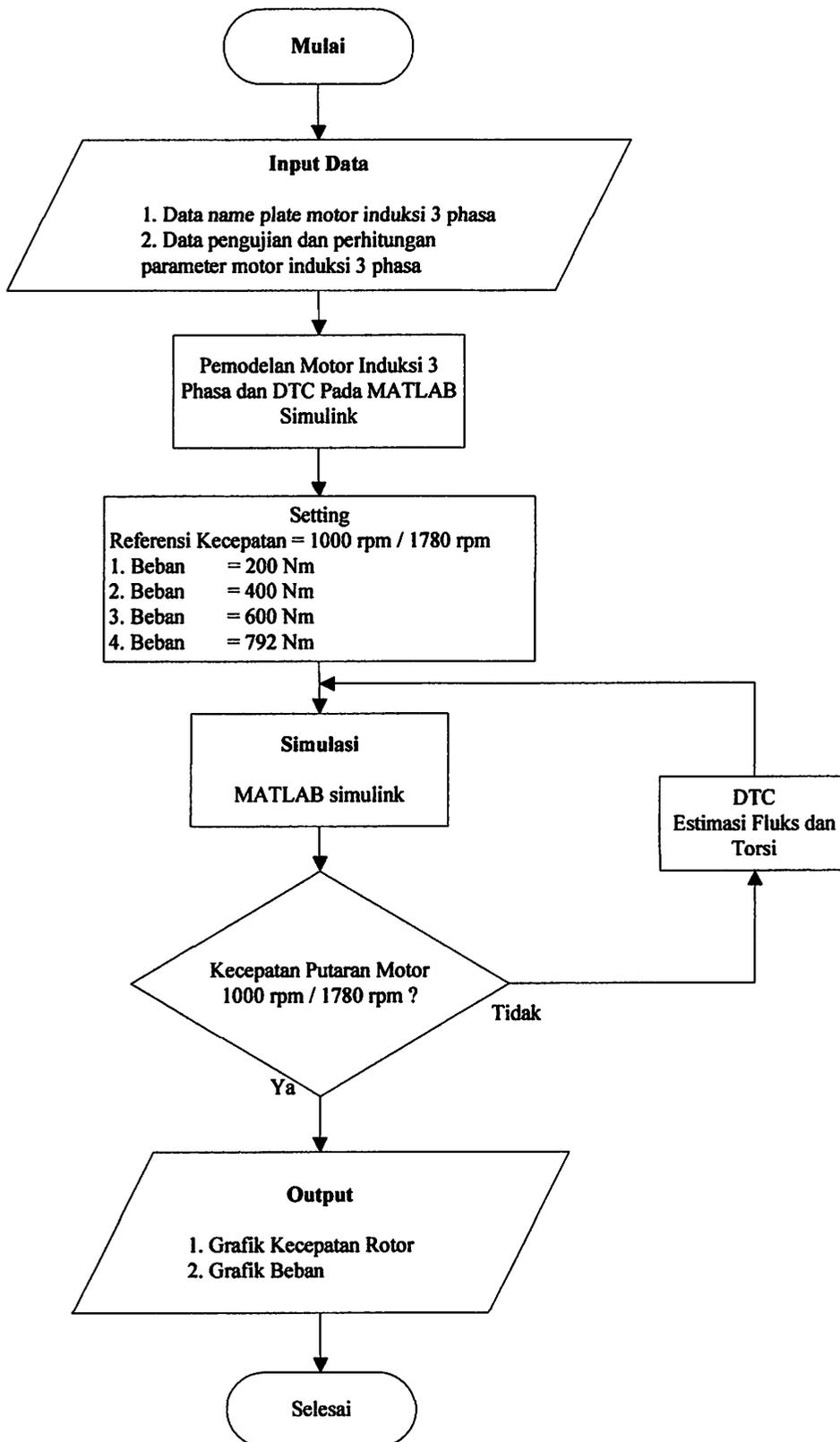
S_ϕ	S_T	S_e					
		{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}
1	1	VI (1,1,0)	I (1,0,0)	II (1,0,1)	III (0,0,1)	IV (0,1,1)	V (0,1,0)
1	0	VIII (1,1,1)	VII (0,0,0)	VIII (1,1,1)	VII (0,0,0)	VIII (1,1,1)	VII (0,0,0)
1	-1	II (1,0,1)	III (0,0,1)	IV (0,1,1)	V (0,1,0)	VI (1,1,0)	I (1,0,0)
0	1	V (0,1,0)	VI (1,1,0)	I (1,0,0)	II (1,0,1)	III (0,0,1)	IV (0,1,1)
0	0	VII (0,0,0)	VIII (1,1,1)	VII (0,0,0)	VIII (1,1,1)	VII (0,0,0)	VIII (1,1,1)
0	-1	III (0,0,1)	IV (0,1,1)	V (0,1,0)	VI (1,1,0)	I (1,0,0)	II (1,0,1)

Pada kolom $S_\theta = (1)$ untuk sinyal fluks bernilai 1 yang berarti besarnya fluks kurang dari yang diharapkan sehingga phasor fluks harus diperbesar. Pada saat bersamaan torsi eror bernilai positif yang berarti torsi harus dinaikkan. Dengan menggabungkan kedua sinyal ini dengan posisi fluks phasor pada (1) maka phasor tegangan yang memenuhi untuk kondisi ini adalah I dan VI. Tetapi ini hanya berlaku pada sudut 30° pada (1) [6]. Pada sudut 30° kedua, phasor tegangan I akan memperbesar phasor fluks tetapi memperlambat sudut fluks. Ini akan menyebabkan penurunan frekuensi stator dan mengubah arah torsi [6]. Pengontrolan pada kondisi ini dimaksudkan untuk membuat fluks terus berputar (dalam hal ini berlawanan arah jarum jam). Dengan demikian pada sudut 30° kedua, pada ruang (1) phasor tegangan yang sesuai adalah VI. Jadi untuk S_T dan S_ϕ bernilai +1 dengan posisi phasor fluks pada ruang (1) phasor tegangan yang memenuhi hanya phasor tegangan VI [6]. Ketika sinyal torsi bernilai nol, pilihan satu-satunya adalah memberi phasor tegangan nol yaitu vektor tegangan VIII. Jika

torsi eror menjadi negatif dengan $S_T = -1$, sementara $S_\phi = 1$, maka torsi harus diperkecil dengan memberi phasor tegangan II [6].

Jika $S_\phi = 0$ (yang berarti phasor fluks telah melampaui nilai yang seharusnya), maka fluks ini harus diperkecil dengan memilih phasor tegangan V. Dengan memilih phasor tegangan V maka akan mempercepat perputaran fluks, sehingga slip makin bertambah, dengan demikian torsi elektromagnetik juga bertambah besar [6]. Dengan demikian dipenuhi untuk $S_T = 1$. Jika $S_T = 0$ maka waktunya untuk memilih phasor tegangan nol (dalam hal ini phasor vektor tegangan VII). Sementara untuk $S_T = -1$ maka torsi harus diperkecil, sementara fluks bertambah. Dalam kondisi phasor tegangan harus memperlambat perputaran torsi, sehingga phasor tegangan yang tepat adalah III [6].

Direct torque control ini merupakan pengontrolan penggerak motor AC yang unik karena switching pada inverter mengontrol secara langsung variabel motor induksi tiga fasa, yaitu fluks dan torsi [6].



Gambar 3.8 flowchart DTC

BAB IV
SIMULASI DIRECT TORQUE CONTROL UNTUK MENGATUR
KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA PHASA

4.1 Umum

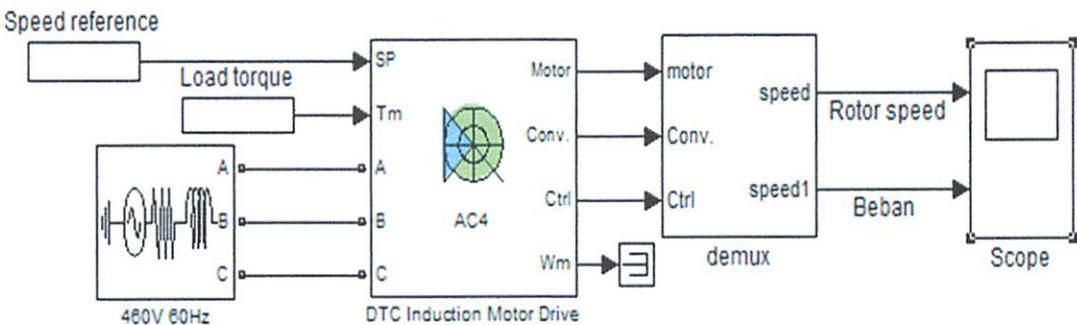
MATLAB (*Matrix Laboratory*) adalah sebuah program untuk analisis komputasi numerik yang merupakan bahasa pemrograman matematika lanjutan dengan dasar pemikiran menggunakan sifat dan bentuk matrik. MATLAB sering digunakan untuk:

1. Matematika dan komputasi
2. Pengembangan dan algoritma
3. Pemrograman modeling, simulasi, dan pembuatan prototipe
4. Analisa data, eksplorasi, dan visualisasi
5. Analisa numerik dan statistik
6. Pengembangan aplikasi teknik

Dalam tugas akhir ini, MATLAB digunakan untuk mensimulasikan pengaturan kecepatan motor induksi tiga fase dengan metode *direct torque control*.

4.2 Rangkaian simulasi

Model rangkaian simulasi *direct torque control* dapat dilihat pada Gambar 4.1.



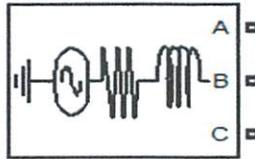
Gambar 4.1 Rangkaian Simulasi *Direct Torque Control*

4.3 Komponen-komponen Pemodelan

Berikut ini adalah model-model dan blok parameter yang digunakan dalam simulasi, yaitu :

4.3.1 *Three Phase Source* (Sumber Tiga Fasa)

Model sumber tiga fasa pada Gambar 4.2 merupakan implementasi sumber tegangan tiga fasa dengan impedansi dalam R-L. Ketiga fasa sumber tegangan dihubungkan Y dengan hubungan netral ditanahkan.



Gambar 4.2 Sumber Tiga Fasa

Data parameter sumber tegangan tiga fasa adalah sebagai berikut :

1. Tgangan antar fasa (V_{L-L}) : 460 V
2. Frekuensi Sumber (f) : 60 Hz
3. Tahanan Sumber (R) : 0,02 Ω
4. Induktansi Sumber (L) : 0,05 H

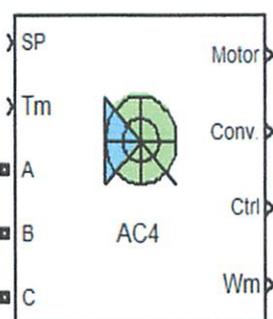
Adapun parameter-parameter sumber tegangan tiga fasa dimasukkan ke dalam blok parameter sumber tiga fasa seperti pada Gambar 4.3.



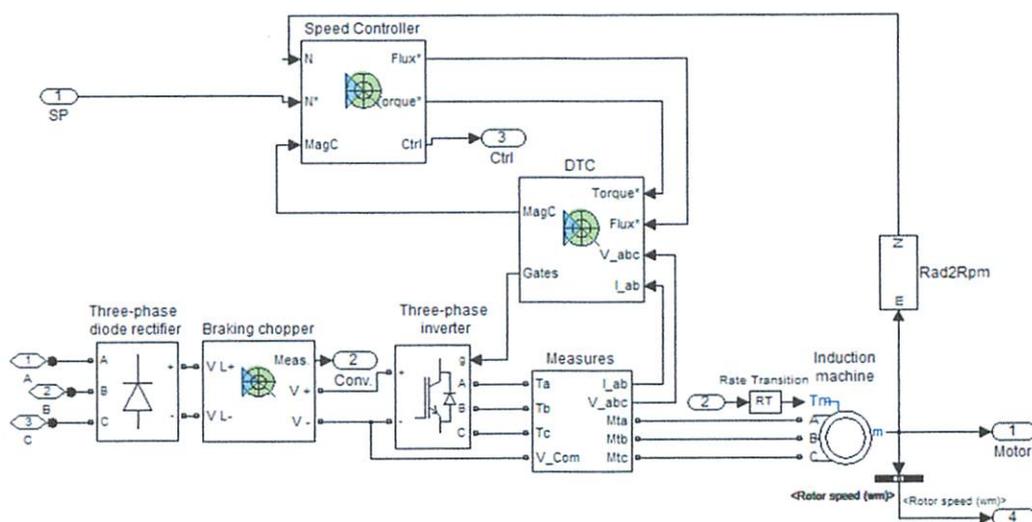
Gambar 4.3 Blok Parameter Sumber Tiga Fasa

4.3.2 DTC Induction Motor Drive

DTC Induction Motor Drive pada Gambar 4.4 adalah model dari motor induksi tiga fase dan direct torque control yang terdiri dari motor induksi, inverter, dioda penyearah, *speed controller*, *braking chopper*, dan DTC controller.

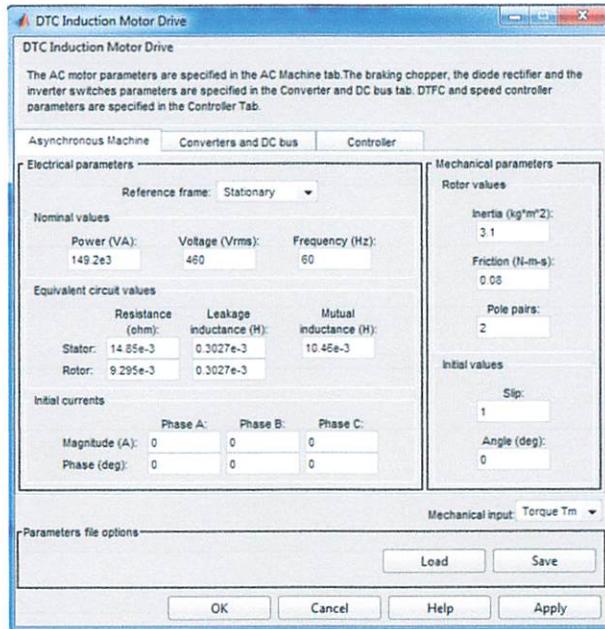


Gambar 4.4 DTC Induction Motor Drive



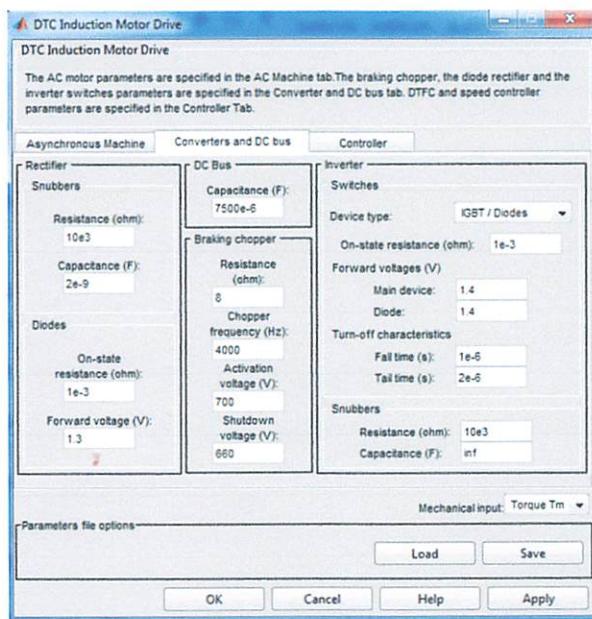
Gambar 4.5 Diagram DTC Induction Motor Drive

Adapun parameter-parameter motor induksi dapat dilihat pada blok parameter *asynchronous machine* seperti pada Gambar 4.5.



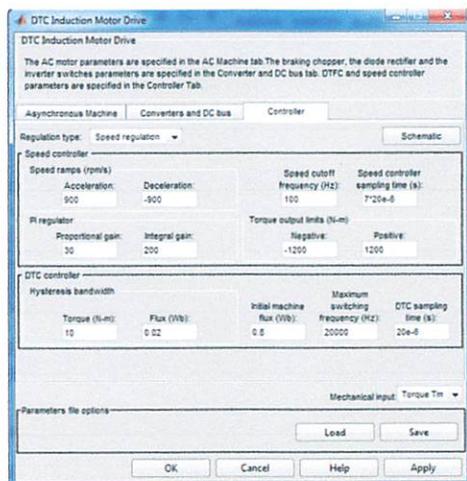
Gambar 4.5 Blok Parameter *Asynchronous Machine*

Untuk parameter-parameter inverter, *braking chopper*, *diode*, dan DC bus dapat dilihat pada blok parameter *converter* and DC bus seperti pada Gambar 4.6.



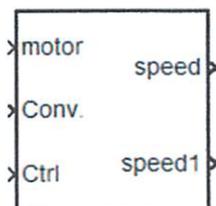
Gambar 4.6 Blok Parameter *Converter and DC Bus*

Untuk parameter-parameter *speed controller* dan *DTC controller* dapat dilihat pada blok parameter *controller* seperti pada Gambar 4.7.

Gambar 4.7 Blok Parameter *Controller*

4.3.3 Demux

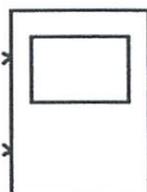
Demux merupakan pembagi sinyal keluaran mesin yang berasal dari motor, converter, control pada blok DTC Induction Motor Drive. Sinyal keluaran pada motor induksi tiga fasa yaitu kecepatan rotor.

Gambar 4.8 *Demux*

Untuk mengetahui sinyal keluaran kecepatan agar dapat dibaca oleh alat ukur, maka digunakan demux untuk melihat.

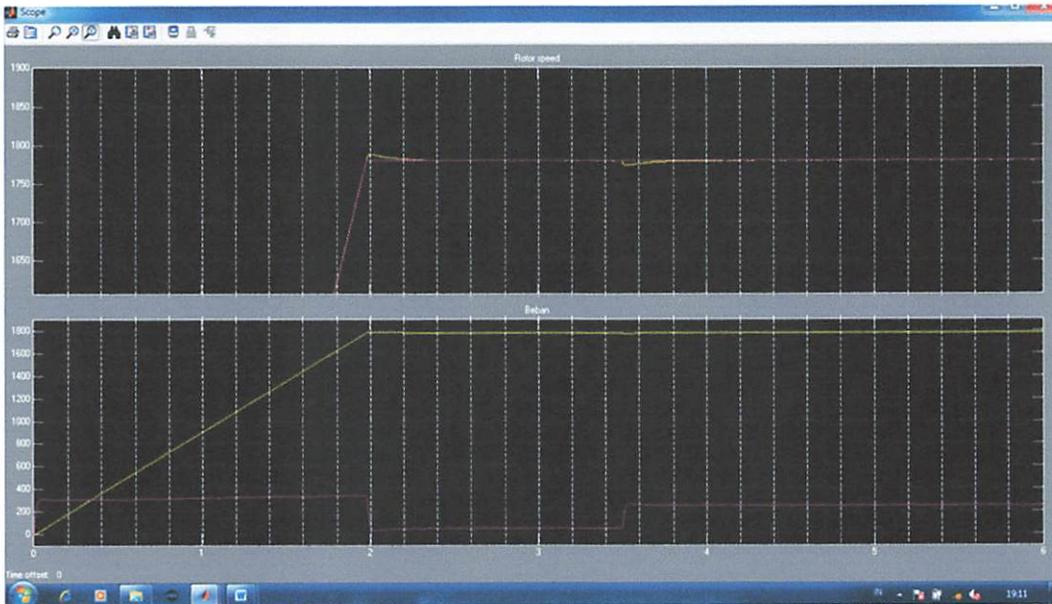
4.3.4 Scope

Scope merupakan blok yang menampilkan sinyal keluaran dari kecepatan rotor yang ada pada demux.

Gambar 4.9 *Scope*

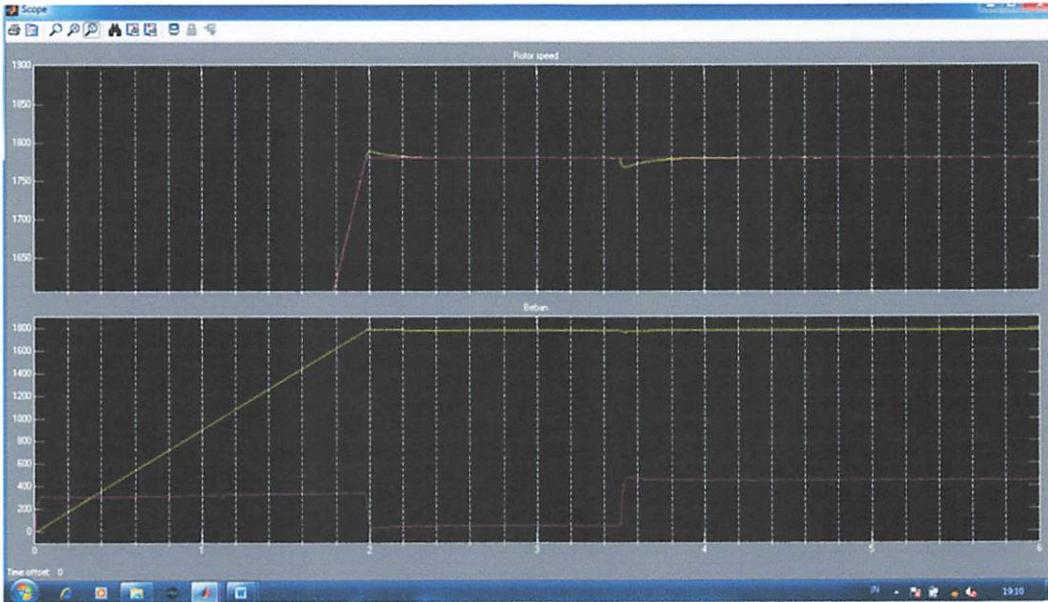
4.3.5 Simulasi dan Analisa Hasil Simulasi

Simulasi pengaturan kecepatan putaran motor induksi tiga fase dilakukan dengan menggunakan Matlab 7.0.1. Rangkaian simulasi ditunjukkan pada Gambar 4.1. Masukkan kecepatan referensi yang diberikan adalah 1780 rpm dan 1000 rpm. Simulasi dilakukan untuk kondisi dengan beban 200 Nm, 400 Nm, 600 Nm, dan 792 Nm. Kondisi ini ditunjukkan pada Gambar 4.10 s/d 4.17.



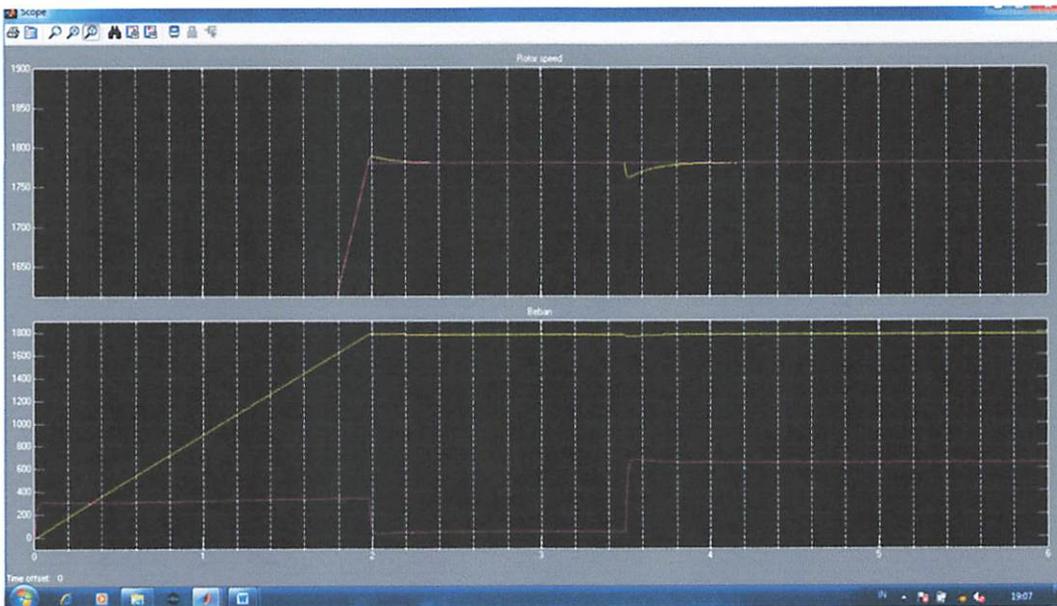
Gambar 4.10 Hasil Simulasi Kecepatan Rotor 1780 rpm dengan beban 200 Nm

Dari simulasi yang dilakukan pada Gambar 4.10 terlihat bahwa dengan beban 200 Nm, pencapaian target kecepatan 1780 rpm motor mampu mencapai kecepatan konstan dalam waktu 0,7 detik pada saat dibebani.



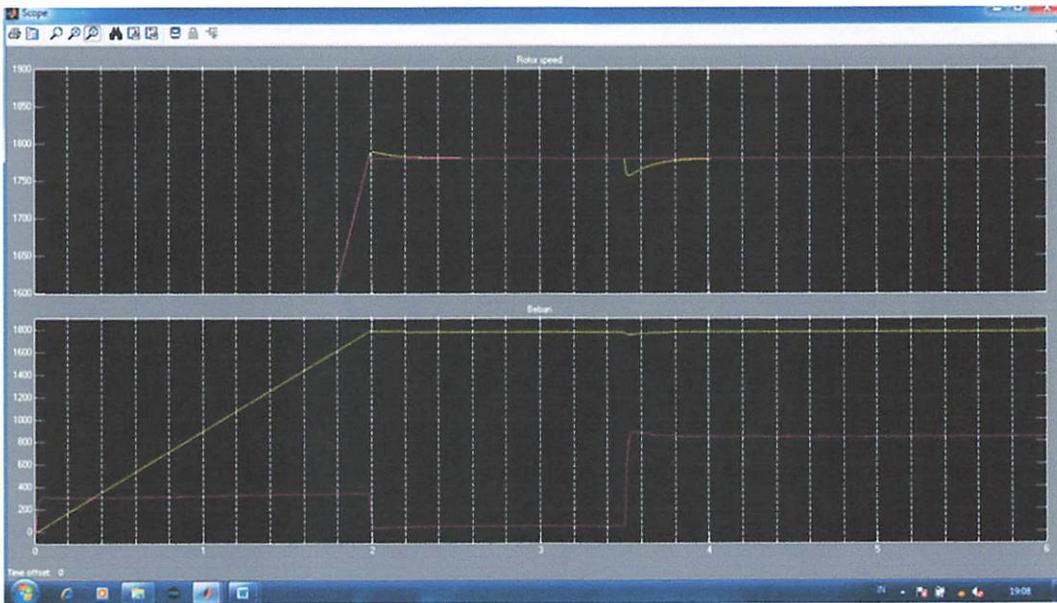
Gambar 4.11 Hasil Simulasi Kecepatan Rotor 1780 rpm dengan beban 400 Nm

Dari simulasi yang dilakukan pada Gambar 4.11 terlihat bahwa dengan beban 400 Nm, pencapaian target kecepatan 1780 rpm motor mampu mencapai kecepatan konstan dalam waktu 0,7 detik pada saat dibebani.



Gambar 4.12 Hasil Simulasi Kecepatan Rotor 1780 rpm dengan beban 600 Nm

Dari simulasi yang dilakukan pada Gambar 4.12 terlihat bahwa dengan beban 600 Nm, pencapaian target kecepatan 1780 rpm motor mampu mencapai kecepatan konstan dalam waktu 0,6 detik pada saat dibebani.

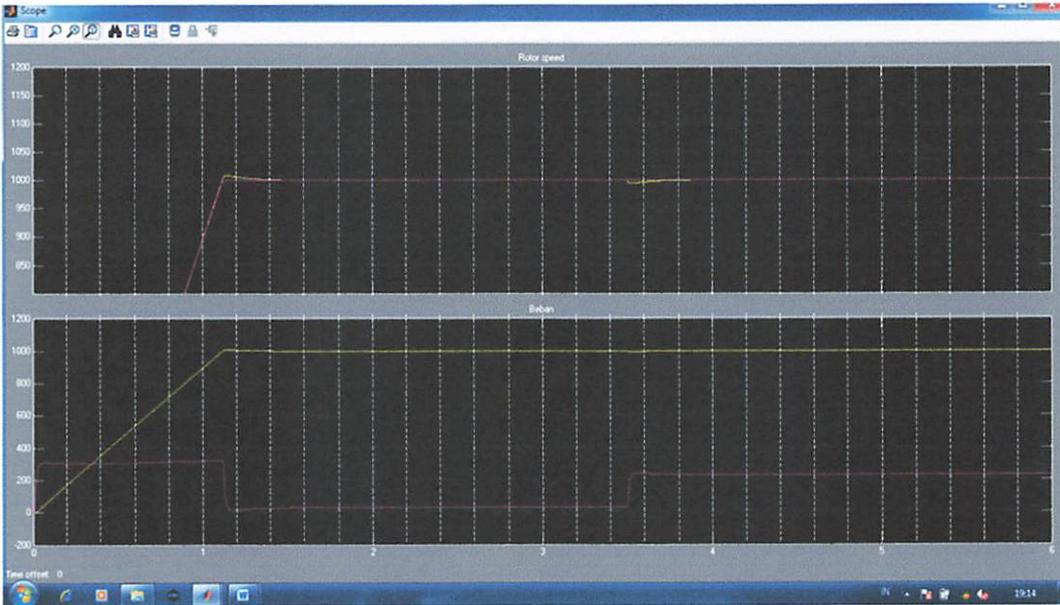


Gambar 4.13 Hasil Simulasi Kecepatan Rotor 1780 rpm dengan beban 792 Nm

Dari simulasi yang dilakukan pada Gambar 4.13 terlihat bahwa dengan beban 600 Nm, pencapaian target kecepatan 1780 rpm motor mampu mencapai kecepatan konstan dalam waktu 0,5 detik pada saat dibebani.

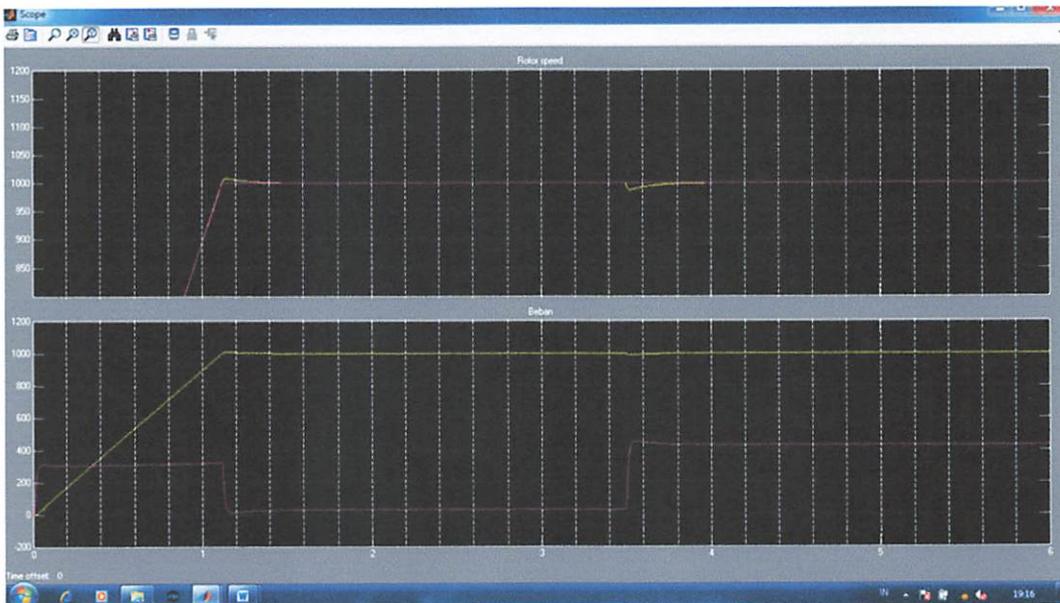
Tabel 4.1 Respon Kecepatan dengan Kecepatan referensi 1780 rpm

Beban (Nm)	Lama Mencapai Kecepatan Referensi
200	0,7 detik
400	0,7 detik
600	0,6 detik
792	0,5 detik



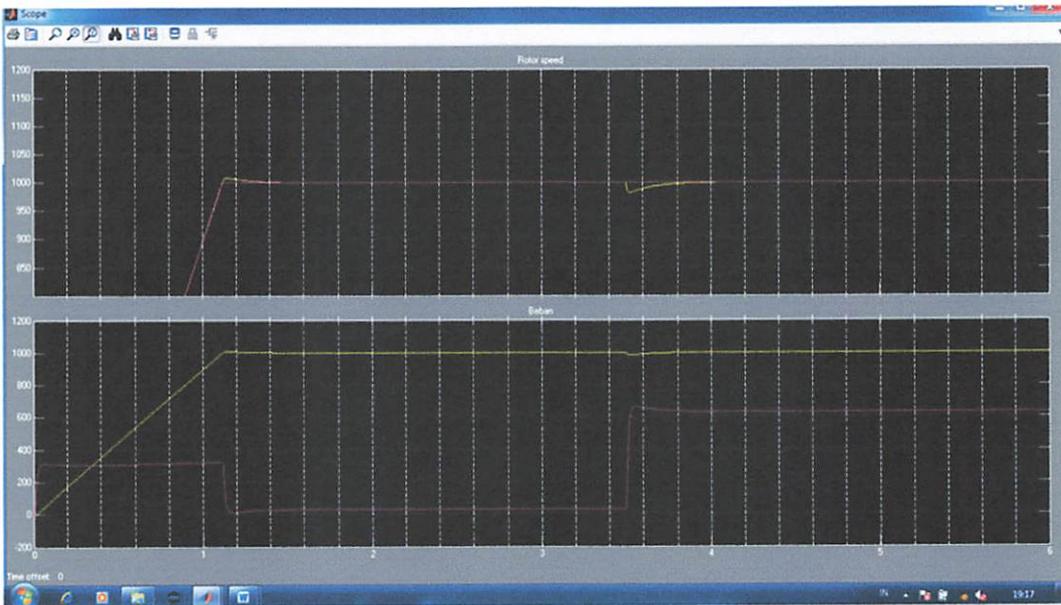
Gambar 4.14 Hasil Simulasi Kecepatan Rotor 1000 rpm dengan beban 200 Nm

Dari simulasi yang dilakukan pada Gambar 4.14 terlihat bahwa dengan beban 200 Nm, pencapaian target kecepatan 1000 rpm motor mampu mencapai kecepatan konstan dalam waktu 0,4 detik pada saat dibebani.



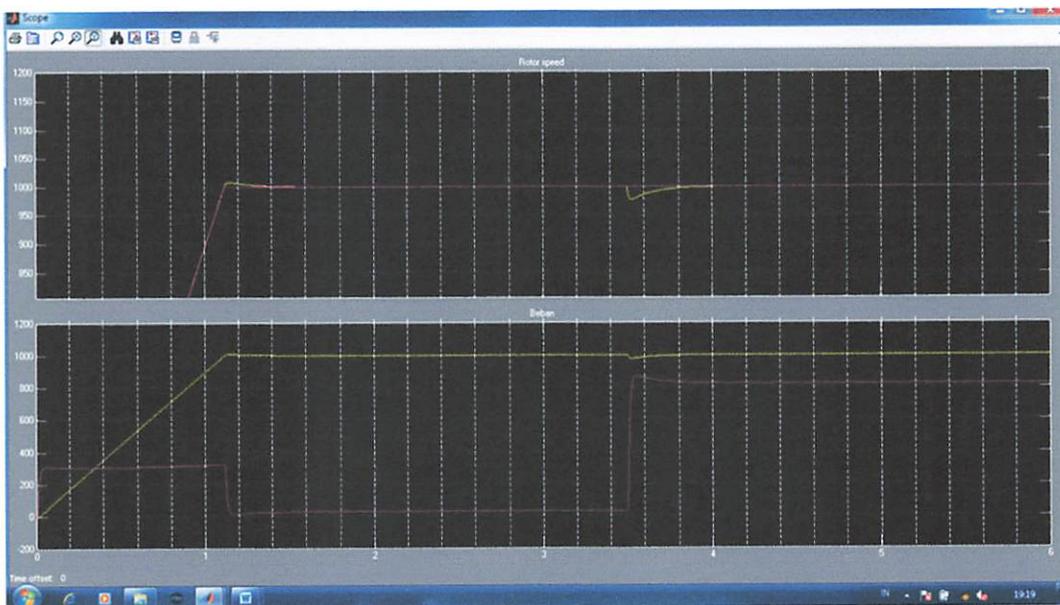
Gambar 4.15 Hasil Simulasi Kecepatan Rotor 1000 rpm dengan beban 400 Nm

Dari simulasi yang dilakukan pada Gambar 4.15 terlihat bahwa dengan beban 400 Nm, pencapaian target kecepatan 1000 rpm motor mampu mencapai kecepatan konstan dalam waktu 0,45 detik pada saat dibebani.



Gambar 4.16 Hasil Simulasi Kecepatan Rotor 1000 rpm dengan beban 600 Nm

Dari simulasi yang dilakukan pada Gambar 4.16 terlihat bahwa dengan beban 600 Nm, pencapaian target kecepatan 1000 rpm motor mampu mencapai kecepatan konstan dalam waktu 0,52 detik pada saat dibebani.



Gambar 4.17 Hasil Simulasi Kecepatan Rotor 1000 rpm dengan beban 792 Nm

Dari simulasi yang dilakukan pada Gambar 4.17 terlihat bahwa dengan beban 200 Nm, pencapaian target kecepatan 1000 rpm motor mampu mencapai kecepatan konstan dalam waktu 0,5 detik pada saat dibebani.

Tabel 4.1 Respon Kecepatan dengan Kecepatan Referensi 1000 rpm

Beban (Nm)	Lama Mencapai Kecepatan Referensi
200	0,4 detik
400	0,45 detik
600	0,52 detik
792	0,5 detik

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan yaitu, pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan *Direct Torque Control (DTC)* mampu mencapai kecepatan 1780 rpm dengan beban 200 Nm dalam waktu 0,7 detik, beban 400 Nm dalam waktu 0,7 detik, beban 600 Nm dalam waktu 0,6 detik, dan beban 792 Nm dalam waktu 0,5 detik pada saat di bebani. Pada simulasi kedua, motor mampu mencapai kecepatan 1000 rpm dengan beban 200 Nm dalam waktu 0,4 detik, beban 400 Nm dalam waktu 0,45 detik, beban 600 Nm dalam waktu 0,52 detik, dan beban 792 Nm dalam waktu 0,5 detik pada saat di bebani.

5.2 Saran

DTC diharapkan dapat mengoptimalkan kinerja motor induksi tiga fasa dan mampu memperpanjang masa penggunaannya. Untuk penelitian lebih lanjut perlu dilakukan penelitian untuk mempercepat respon kecepatan motor induksi tiga fasa dalam mencapai kecepatan konstan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wahab Abdul H.F dan Sanusi H., *Simulink Model of Direct Torque Control of Induction Machine*, American Journal of Applied Science, 2008.
- [2] Bose, Bimal K.2002. *Modern Power Electronics and AC Drive*,. Prentice Hall. [8]Lister C. Eugene.1998. *Mesin dan Rangkaian Listrik*, Edisi Keenam, Jakarta, Erlangga.
- [3] Chapman, Stephen J.: *Electric Machinery Fundamentals*, 3rd ed., McGraw-Hill, Burr Ridge, III, 1999.
- [4] Pujol Arias Antoni, Thesis: *Improvement In Direct Torque Control of Induction Motor*,. Nopember, 2000.
- [5] Andrzej M. Trzynadlowski. *Control of Induction Motor*. San Diego, USA : Academic Press. 2001.
- [6] Toufuti Riad, Meziane Salima, dan Benalla Hocine, *Direct Torque Control Strategy of Induction Motor*, Acta Electrotechnica et Informatica, No.1, Vol.7, 2007

LAMPIRAN



PERKUMPULAN PENGELOLA PENDIDIKAN UMUM DAN TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK

BNI (PERSERO) MALANG
BANK NIAGA MALANG

Kampus I : Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2 Telp. (0341) 551431 (Hunting), Fax. (0341) 553015 Malang 65145
Kampus II : Jl. Raya Karanglo, Km 2 Telp. (0341) 417636 Fax. (0341) 417634 Malang

Nomor Surat : ITN-224/EL-FTI/2015

8 Maret 2016

Lampiran : -

Perihal : BIMBINGAN SKRIPSI (**Baru**)

Kepada : Yth. Bapak/Ibu **Irrine Budi S., ST., MT**

Dosen Teknik Elektro S-1

ITN MALANG

Dengan Hormat

Sesuai dengan permohonan dan persetujuan dalam Proposal Skripsi untuk mahasiswa:

Nama : Heriyanto
Nim : 1212033
Fakultas : **Teknologi Industri**
Program Studi : **Teknik Elektro S-1**
Konsentrasi : T. Energi Listrik S1

Maka dengan ini pembimbingan tersebut kami serahkan sepenuhnya kepada Saudara/i selama masa waktu :

“ Semester Genap Tahun Akademik 2015-2016 ”

Demikian atas perhatian serta bantuannya kami sampaikan terima kasih.

Mengetahui

Ketua Program Studi Teknik
Elektro S-1



M. Ibrahim Ashari, ST, MT

NIP.P. 1030100358



PERKUMPULAN PENGELOLA PENDIDIKAN UMUM DAN TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK

BNI (PERSERO) MALANG
BANK NIAGA MALANG

Kampus I : Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2 Telp. (0341) 551431 (Hunting), Fax. (0341) 553015 Malang 65145
Kampus II : Jl. Raya Karanglo, Km 2 Telp. (0341) 417636 Fax. (0341) 417634 Malang

Nomor Surat : ITN-224/EL-FTI/2015

8 Maret 2016

Lampiran : -

Perihal : BIMBINGAN SKRIPSI (**Baru**)

Kepada : Yth. Bapak/Ibu **M. Abdul Hamid, Ir., MT**
Dosen Teknik Elektro S-1
ITN MALANG

Dengan Hormat

Sesuai dengan permohonan dan persetujuan dalam Proposal Skripsi untuk mahasiswa:

Nama : Heriyanto
Nim : 1212033
Fakultas : **Teknologi Industri**
Program Studi : **Teknik Elektro S-1**
Konsentrasi : T. Energi Listrik S1

Maka dengan ini pembimbingan tersebut kami serahkan sepenuhnya kepada Saudara/i selama masa waktu :

" Semester Genap Tahun Akademik 2015-2016"

Demikian atas perhatian serta bantuannya kami sampaikan terima kasih.

Mengetahui

Ketua Program Studi Teknik Elektro S-1



M. Ibrahim Ashari, ST, MT
NIP.P. 1030100358



PERKUMPULAN PENGELOLA PENDIDIKAN UMUM DAN TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK

RSERO) MALANG
AGA MALANG

Kampus I : Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2 Telp. (0341) 551431 (Hunting), Fax. (0341) 553015 Malang 65145
Kampus II : Jl. Raya Karanglo, Km 2 Telp. (0341) 417636 Fax. (0341) 417634 Malang

BERITA ACARA UJIAN SKRIPSI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

Nama : HERIYANTO
NIM : 1212033
Program Studi : TEKNIK ELEKTRO S-1
Konsentrasi : TEKNIK ENERGI LISTRIK
Judul Skripsi : **IMPLEMENTASI DIRECT TORQUE CONTROL (DTC) UNTUK MENGATUR KECEPATAN MOTOR TIGA PHASA MENGGUNAKAN MATLAB**

Dipertahankan dihadapan Majelis Penguji Skripsi Jenjang Strata Satu (S-1) pada:

Hari : Kamis
Tanggal : 18 Agustus 2016
Dengan Nilai : 77,75 (B+)

Panitia Ujian Skripsi

Ketua Majelis Penguji

M. Ibrahim Ashari, ST, MT
NIP.P. 1030100358

Sekretaris Majelis Penguji

Dr. Eng. I Komang Somawirata, ST, MT
NIP.P. 1030100361

Anggota Penguji

Penguji I

Dr. Eng. I Komang Somawirata, ST, MT
NIP.P. 1030100361

Penguji II

Ir. Teguh Herbasuki, MT
NIP.P. 1038900209



PERSETUJUAN PERBAIKAN SKRIPSI

Dari hasil ujian skripsi Program Studi Teknik Elektro jenjang Strata satu (S-1) yang dilaksanakan pada:

Hari : Kamis
Tanggal : 18 Agustus 2016

Telah dilakukan perbaikan skripsi oleh :

Nama : HERIYANTO
NIM : 1212033
Program Studi : TEKNIK ELEKTRO S-1
Konsentrasi : TEKNIK ENERGI LISTRIK
Judul Skripsi : **IMPLEMENTASI DIRECT TORQUE CONTROL (DTC) UNTUK MENGATUR KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA PHASA MEGGUAKAN MATLAB**

No	Materi Perbaikan	Keterangan
1	Tambahkan sitasinya	

Dosen Penguji I



Dr. Eng. I Komang Somawirata, ST, MT
NIP.P. 1030100361

Dosen Pembimbing I



Irrine Budi S. ST, MT
NIP. 197706152005012002

Dosen Pembimbing II



Ir. Abdul Hamid, MT
NIP. Y. 1018800188



PERSETUJUAN PERBAIKAN SKRIPSI

Dari hasil ujian skripsi Program Studi Teknik Elektro jenjang strata satu (S-1) yang diselenggarakan pada :

Hari : Kamis
Tanggal : 18 Agustus 2016

Telah dilakukan perbaikan skripsi oleh :

Nama : HERIYANTO
NIM : 1212033
Program Studi : TEKNIK ELEKTRO S-1
Konsentrasi : TEKNIK ENERGI LISTRIK
Judul Skripsi : **IMPLEMENTASI DIRECT TORQUE CONTROL (DTC) UNTUK MENGATUR KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA PHASA MENGGUNAKAN MATLAB**

No	Materi Perbaikan	Keterangan
1	Tujuan dan kesimpulan disinkronkan	
2	Pada gambar grafik hasil pembebanan harap didampingi dengan tabel supaya dapat melihat waktunya dengan jelas	

Dosen Penguji II

Ir. Teguh Herbasuki, MT
NIP.P. 1038900209

Dosen Pembimbing I

Irrine Budi S. ST, MT
NIP. 197706152005012002

Dosen Pembimbing II

Ir. Abdul Hamid, MT
NIP. Y. 1018800188

SURAT PENYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Heriyanto

NIM : 12.12.033

Program Studi : Teknik Elektro S-1

Konsentrasi : Teknik Energi Listrik

Dengan ini menyatakan bahwa Skripsi yang saya buat adalah hasil karya sendiri, tidak merupakan plagiasi dari karya orang lain. Dalam Skripsi ini tidak memuat karya orang lain, kecuali di cantumkan sumbernya sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat, dan apabila di kemudian hari ada pelanggaran atas surat pernyataan ini, saya bersedia menerima sanksinya.

Malang, 19 September 2016

Yang membuat Pernyataan,



Heriyanto
NIM : 12.12.033



INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

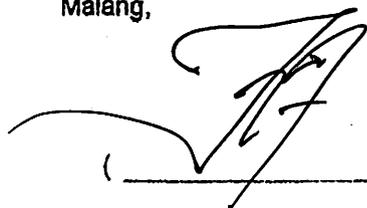
Formulir Perbaikan Ujian Skripsi

Dalam pelaksanaan Ujian Skripsi Janjang Strata 1 Jurusan Teknik Elektro Konsentrasi T. Energi Listrik / T. Elektronika / T. Infokom, maka perlu adanya perbaikan skripsi untuk mahasiswa :

NAMA : HERLIYANTO
NIM :
Perbaikan meliputi : h. 12-033

Perbaiki Citasi nya!

Malang,

()

Formulir Perbaikan Ujian Skripsi

Dalam pelaksanaan Ujian Skripsi Janjang Strata 1 Jurusan Teknik Elektro Konsentrasi T. Energi Listrik / T. Elektronika / T. Infokom, maka perlu adanya perbaikan skripsi untuk mahasiswa :

NAMA : Henryanto
NIM : 1212033
Perbaikan meliputi :

1. Tujuan dan kesimpulan harus disinkronkan!
2. Pada gambar grafik hasil pembebanan harus di dampingi dan tabel, supaya dapat melihat waktunya dan jelas!

Malang,

()



**MONITORING BIMBINGAN SKRIPSI
SEMESTER GENAP TAHUN AKADEMIK 2015-2016**

Nama Mahasiswa : HERIYANTO
NIM : 1212033
Nama Pembimbing : Irrine Budi S. ST, MT
Judul Skripsi : IMPLEMENTASI DIRECT TORQUE CONTROL (DTC)
UNTUK MENGATUR KECEPATAN MOTOR INDUKSI 3
PHASA MENGGUNAKAN MATLAB

Minggu Ke-	Hari, Tanggal	Waktu Bimbingan	Materi Bimbingan	Paraf
1	28-04-2016	13.10	Penulisan BAB I Latar belakang, tujuan dan rumusan masalah.	
2	12-05-2016	10.35	Pembahasan materi motor induksi, pengaturan kecepatan dan DTC.	
3	20-05-2016	14.20	Menunjukkan running program dan penjelasan.	
4	26-05-2016	13.40	Perjelas tujuan, pemilihan beban dijelaskan.	
5	16-06-2016	11.05	Data yang diperlukan harus dirinci. Apa yang harus di atur ?	
6	28-06-2016	10.35	Buat tabel apa saja yang dilakukan dan running simulasi.	
7	30-07-2016	10.15	Penjelasan setiap gambar dan penambahan analisa muatannya	

Malang, 2016

Pembimbing

Irrine Budi S. ST, MT
NIP. 197706152005012002



**MONITORING BIMBINGAN SKRIPSI
SEMESTER GENAP TAHUN AKADEMIK 2015-2016**

Nama Mahasiswa : HERIYANTO
NIM : 1212033
Nama Pembimbing : Ir. Abdul Hamid, MT
Judul Skripsi : IMPLEMENTASI DIRECT TORQUE CONTROL (DTC)
UNTUK MENGATUR KECEPATAN MOTOR INDUKSI 3
PHASA MENGGUNAKAN MATLAB

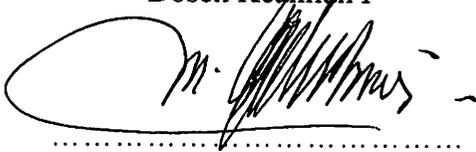
Minggu Ke-	Hari, Tanggal	Waktu Bimbingan	Materi Bimbingan	Paraf
1	10-05-2016	09.35	Perbaiki makalah proposal. Diuji dan dihitung dahulu motor induksi yang digunakan.	
2	24-05-2016	10.20	Apa saja yang diperlukan ? Membuat pemodelan DTC. Teori motor induksi dimasukkan.	
3	16-06-2016	10.10	Data yang diperlukan harus dirinci. Apa yang diatur dalam pembahasan ?	
4	27-06-2016	09.40	Running simulasi. Buat tabel apa saja yang dilakukan selama progres.	
5	01-08-2016	10.30	Perbaiki kesimpulan dan keterangan gambar.	
6	03-08-2016	09.55	Penjelasan untuk setiap output yang ditampilkan.	
7	06-08-2016	10.45	Perbaiki tujuan dan perjelas kata-katanya. Ditambahkan grafik beban.	

Malang, 2016

Pembimbing

Ir. Abdul Hamid, MT
NIP.Y. 1018800188

**BERITA ACARA SEMINAR PROPOSAL SKRIPSI
 PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO S1**

KONSENTRASI		T. Energi Listri S1				
1.	Nama Mahasiswa	Heriyanto		NIM	1212033	
2.	Keterangan	Tanggal		Waktu	Tempat / Ruang	
	Pelaksanaan					
Spesifikasi Judul (berilah tanda silang *)						
3.	<input checked="" type="radio"/> a.	Sistem Tenaga Elektrik	e.	Embbded System	i.	Sistem Informasi
	<input type="radio"/> b.	Konversi Energi	f.	Antar Muka	j.	Jaringan Komputer
	<input checked="" type="radio"/> c.	Sistem Kendali	g.	Elektronika Telekomunikasi	k.	Web
	<input type="radio"/> d.	Tegangan Tinggi	h.	Elektronika Instrumentasi	l.	Algoritma Cerdas
4.	Judul Proposal yang diseminarkan Mahasiswa		Implementasi Direct Torque Control (DTC) Untuk Mengatur Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Dengan Menggunakan MATLAB			
5.	Perubahan Judul yang diusulkan oleh Kelompok Dosen Keahlian				
6.	Catatan :					
Catatan :						
Persetujuan Judul Skripsi						
7.	Disetujui, Dosen Keahlian I			Disetujui, Dosen Keahlian II		
						
Mengetahui, Ketua Jurusan  M. Ibrahim Ashari, ST, MT NIP. P. 1030100358		Disetujui, Calon Dosen Pembimbing				
		Pembimbing I  Irrine Budi S., ST., MT		Pembimbing II  M. Abdul Hamid, Ir., MT		

Biografi Penulis



Nama lengkap penulis adalah Heriyanto lahir pada tanggal 27 Maret 1993 di kota Samarinda. Merupakan anak ke-2 dari 2 bersaudara dari pasangan Bapak Nurdiono dan Ibu Hamidah. Penulis berkebangsaan Indonesia dan beragama Islam. Kini penulis bertempat tinggal di Bengkel Isakuniki Jl. Cipto Mangunkusumo Simpang 3 Jl. Syahrani Dahlan RT.06, Kelurahan Gunung Panjang, Kecamatan Samarinda Seberang, Kota Samarinda, Provinsi Kalimantan Timur. Adapun riwayat pendidikan penulis, yaitu pada tahun 2003 di SD N 004

Samarinda Seberang. Kemudian melanjutkan pendidikan di SMP N 18 Samarinda pada tahun 2008. Kemudian melanjutkan pendidikan di SMK N 2 Samarinda lulus tahun 2012. Setelah itu melanjutkan pendidikan S-1 di Institut Teknologi Nasional Malang Jurusan Teknik Elektro, konsentrasi Teknik Energi Listrik lulus pada bulan September tahun 2016 semester genap (8), penulis telah menyelesaikan skripsi berjudul “Implementasi Direct Torque Control (DTC) Untuk Mengatur Kecepatan Motor Induksi Tiga Phasa Menggunakan”.