

# **SKRIPSI**

## **ANALISIS PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA DENGAN KONTROL VEKTOR MENGUNAKAN *MATLAB SIMULINK***



**Disusun oleh :  
RESTU DWI ANDIKA  
NIM 0312059**

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

**SEPTEMBER 2007**

SECRET

INTERNAL SECURITY INFORMATION  
EXCLUDED FROM AUTOMATIC  
DOWNGRADING AND  
DECLASSIFICATION  
SCHEDULES

NOV 03 13 00

SECRET

SECRET



EXCLUDED FROM AUTOMATIC  
DOWNGRADING AND  
DECLASSIFICATION  
SCHEDULES

SECRET

**LEMBAR PERSETUJUAN**

**ANALISIS PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA  
DENGAN VEKTOR KONTROL MENGGUNAKAN MATLAB SIMULINK**

**SKRIPSI**

*Disusun dan Diajukan Untuk Melengkapi dan Memenuhi  
Persyaratan Guna Mencapai Gelar Sarjana Teknik Elektro (S-1)*

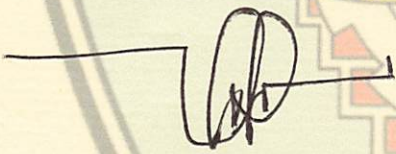
Disusun Oleh :  
**RESTU DWI ANDIKA**  
03.12.059


Malang, September 2007

Diperiksa dan disetujui,

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

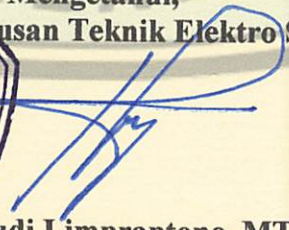
  
( Ir. M. Abdul Hamid, MT )  
NIP.Y. 1018800188

  
( Ir. Eko Nurcahyo )  
NIP. Y. 1028700172

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Elektro S-1



  
( Ir. F. Yudi Limpraptono, MT )  
NIP : Y. 1039500274

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

## LEMBAR PERSEMBAHAN

TERIMA KASIH KOE UCAPKAN YANG TERAMAT DALAM KEPADA ALLAH SWT  
YANG TELAH MEMBERIKAN KESEHATAN, KELANCARAN DAN KEKUATAN  
PADA KOE UNTUK MENYELESAIKAN SKRIPSI KOE

THANK'S TO:

BAPAK KAJUR ITN MALANG YANG TELAH MENYISIHKAN WAKTU  
MEMBERIKAN TANDA TANGAN BUAT SKRIPSI KOE

BAPAK IR. YUSUF NAKHODA, MT YANG TELAH MEMBERIKAN KELANCARAN  
DALAM SKRIPSI KOE. MESKIPUN KELIHATANNYA JARANG SENYUM TAPI  
TERNYATA PAK YUSUF SANGAT BAEK HATI LHO..... BANYAK2 SENYUM YA  
PAK.....

MAS JAYENG YANG TELAH MELUANGKAN WAKTUNYA BUAT URUSAN  
SEMINAR PROPOSAL JUDUL DE EL EL MENGENAI SKRIPSI KOE. MAKACIE YA  
MAS.....

BAPAK IR. ABDUL HAMID, MT 'N IR. EKO NURCAHYO YANG PALING SAYA  
SAYANGI.  
MAKACIE BANGET ATAS BEMBINGANNYA, AKOE GAK BAKAL NGELUPAIN  
BAPAK. SEKALI LAGI TERIMA KASIH.... SUKSES BUAT BAPAK  
BERDUA!!!!!!!!!!!!

DOSEN2 PENGUJI SELAMA SEMINAR DAN UJIAN. TERIMA KASIH ATAS  
SANGGAHANNYA DAN SARANNYA, I LOVE U ALL

MÝ PREND DI ITN KAMPUS II TERUTAMA BUAT ANDIK DAN NUNU' YG BANYAK  
MEMBANTU KULIAH KOE, DAN TEMEN2 YG LAEN YG GAK BISA KOE SEBUTIN  
SEMUANYA.

PARA INSTRUKTUR LAB KONVERSI ENERGY ELEKTRIK ITN MALANG YANG  
TELAH BANYAK MEMBANTU DALAM PENGAMBILAN DATA

**SPECIAL THANK'S TO:**

**MAMA N PAPA KOE YANG PALING KOE SAYANGI  
N KOE CINTAI..... MAKASIE YA PA YA MA ATAS  
SUPPORT N NASEHATNYA. NIE SKRIPSI  
KOE PERSEMBAHKAN SPECIAL BUAT MAMA N PAPA.  
TAK LUPA BUAT MBACK ANTIK N SEPTIAN, THANX Y  
KALIAN JUGA IKUT ANDIL DALAM KESUKSESAN INI.  
KELUARGA KOE PANCEN IS THE BEST.....**



**MAS ANTI, ROBBY, GUNAWAN, LAUHIL, DEDE. THANX YA KALIAN MEMANG  
TEMAN BAEK DAN JUGA TIM TERBAEK. KOE GAK AKAN NGELUPAIN  
KALIAN. SEKALI LAGI MATUR SUON SANGET, KALO GAK ADA KALIAN KOE  
BAKAL KESUSAHAN SELESAIN NIE SEMUA. YHANX THANX N THANX.**

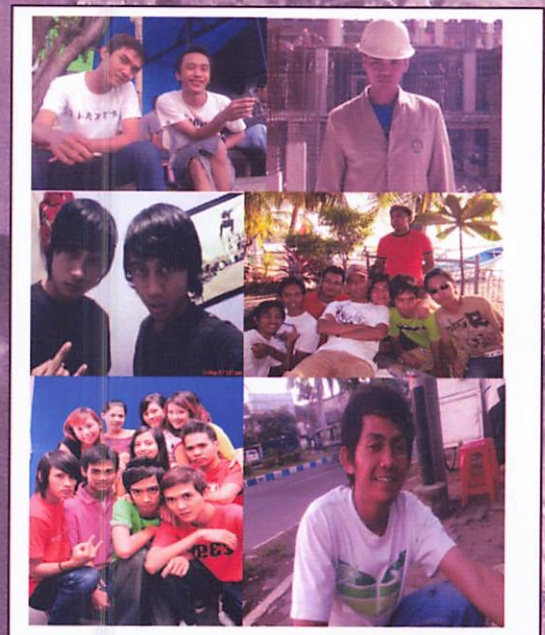
**JANGAN LUPA BUAT KUMPUL2 LAGI.**

**KEY BRO..... MANTAP!!!!!!!**



**MY CWITY.... THANX YA DAH BERI AKU  
DUKUNGAN DAH BERI SEMANGAT BUAT AKU.  
MAJU TERUS YA CWIT N SUKSES BUAT KULIAHMU.  
JANGAN KALAH MA AKU. LOVE U CWITY.....**

**AREK KONTRAKAN E719. DENDY,  
EDU, FAFAN, RENDY, DAN ROMAL.....  
KALIAN TOP BANGET DEH.....!!!!!!!  
TAK LUPA PREND YG LAEN, BREX AJEM,  
BORETH, BAD. LUQMAN, KIKI, NDUT,,,,, KAPAN  
KITA KUMPUL LAGI DI PANTAI???  
ASBHN TITL, UPZ MAAP Y Q GAK PUNYA  
FOTO KALIAN BERDUA.....!!!  
ADEK KOE DICKY.... JANGAN SERING  
LIAT PILM SINCHAN...!!!  
CEWEK2 YG OKE,, ICHA, NENY, MU2N, DYAH  
AREK ZIBOND YG GAK BISA Q SEBUTIN SEMUA  
THANK'S BUAT KALIAN SEMUA.....**



## ABSTRAKSI

# ANALISIS PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA DENGAN KONTROL VEKTOR MENGUNAKAN MATLAB SIMULINK

( Restu Dwi Andika, 0312059, T. Energi Listrik S-1 )

( Dosen Pembimbing : Ir. M. Abdul Hamid, MT dan : Ir. Eko Nurcahyo )

*Kata kunci : vektor kontrol, arus, torsi, fluks rotor, kecepatan, motor induksi, matlab simulink.*

*Pengendalian motor induksi dengan metode kontrol vector mulai diperkenalkan pada periode tahun 1960an. Metode vector kontrol adalah suatu cara yang digunakan untuk memperbaiki unjuk kerja motor. Unjuk kerja yang buruk menyebabkan penggunaan motor menjadi terbatas. Metoda kontrol vektor dilakukan dengan cara mengestimasi fluks rotor dan posisi rotor, untuk mengendalikan fluks rotor dan kecepatan rotor digunakan pengendali PI. Untuk mengendalikan arus stator, digunakan sensor kecepatan dan sensor arus phasa, kemudian arus stator yang terukur ditransformasikan dalam sumbu d-q menjadi  $i_d$  dan  $i_q$ . Adanya inputan torsi beban nol dan torsi beban yang berubah-ubah kecepatan motor dapat di jaga konstan oleh vector kontrol. Simulasi dilakukan dengan bantuan MATLAB Simulink 7.0. Hasil simulasi menunjukkan kontrol vektor dapat mengendalikan tanggapan kecepatan motor dengan baik. ketika motor dijalankan tanpa torsi luar maka kecepatan motor langsung mengikuti kecepatan referensi, tetapi pada saat motor dijalankan dengan inputan torsi luar maka kecepatan motor mengalami sedikit perubahan akibat torsi beban yang berubah-ubah. Pada saat motor dijalankan tanpa beban flux stator mengalami kondisi transient yang lebih cepat yaitu dari  $t=0$  s sampai  $t= 0.35$  s, sedangkan ketika motor dibebani dengan torsi luar dari starting awal maka flux stator mengalami kondisi transient yang lebih lama yaitu dari  $t=0$  sampai  $t=0.5$  s.*

## KATA PENGANTAR

Dengan memanjatkan puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena dengan rahmat dan karunia-NYA kami dapat menyelesaikan Penyusunan Skripsi ini yang merupakan syarat untuk meraih gelar Sarjana Teknik Jurusan Elektro Konsentrasi Energi Listrik di Institut Teknologi Nasional Malang.

Dalam penyusunan skripsi ini tidak luput dari bantuan beberapa pihak yang terus memberi masukan dan dukungan. Pada kesempatan kami mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada

1. Bapak Prof. DR. Eng Ir. Abraham Lomi, MSEE selaku Rektor ITN Malang
2. Bapak Ir.FX Yudi Limpraptono,MT, selaku Ketua Jurusan Elektro.
3. Bapak. Ir. M. Abdul Hamid, MT Selaku Dosen Pembimbing Utama
4. Bapak. Ir. Eko Nurcahyo Selaku Dosen Pembimbing Pendamping
5. Bapak. Ir. M. Abdul Hamid , MT Ka Lab Konversi Energi Elektrik Institut Teknologi Nasional Malang
6. Bapak Ir. Choirul Saleh, MT dan ibu Irrine Budi S., ST, MT selaku dosen penguji
7. Kedua Orang Tua untuk doa dan dukungannya selama ini
8. Seluruh Dosen Elektro Energi Listrik di Institut Teknologi Nasional Malang
9. Semua pihak yang telah mendukung skripsi ini.

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PERSETUJUAN .....</b>	<b>ii</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>iv</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>x</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan. ....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Metodologi Penelitian .....	3
<b>BAB II TEORI DASAR</b>	
2.1. Teori Dasar Motor Induksi.....	4
2.2. Konstruksi Motor Induksi .....	5
2.2.1 Stator .....	5
2.2.2 Rotor.....	6
2.3. Medan Putar .....	6
2.4 Prinsip Kerja Motor Induksi.....	8
2.5 Slip Dan Frekuensi Arus Stator.....	9

2.4. Rangkaian Ekuivalen Motor induksi.....	11
2.4.1. Rangkaian Ekuivalen Stator .....	11
2.4.2. Rangkaian Ekuivalen Rotor .....	12
2.4.3. Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi.....	13
2.6 Operasional Motor Induksi.....	16
2.6.1 Performa Keadaan Mantap ( Steady State ) .....	16
2.6.2 Performa Peralihan ( Transient ) .....	17
2.7. Parameter Motor Induksi.....	19
2.7.1. Pengujian Arus Searah ( <i>DC Test</i> ) .....	19
2.7.2. Pengujian Tanpa Beban ( <i>No Load Test</i> ) .....	20
2.7.3. Pengujian Rotor Tertahan ( <i>Blocked Rotor Test</i> ) .....	21
2.8. Matlab Simulink.....	23
 <b>BAB III METODE VEKTOR KONTROL</b>	
3.1. Blok Kontrol Vektor.....	28
3.2. Model Motor Induksi 3 phasa .....	35
3.3. Algoritma Program.....	41
3.3. 1. Algoritma Program Secara Umum .....	41
3.4 Flowchart penyelesaian masalah secara umum.....	42
 <b>BAB IV MENGHITUNG PRAMETER MOTOR DAN ANALISA HASIL SIMULASI</b>	
4.1. Menghitung Parameter Motor Induksi .....	43
4.1.1. Alat-alat yang digunakan .....	43
4.1.2. Pengujian Arus Searah ( <i>DC Test</i> ) .....	44

4.1.3. Pengujian Tanpa Beban ( <i>No Load Test</i> ) .....	44
4.1.4. Pengujian Rotor Tertahan ( <i>Blocked Rotor Test</i> ) .....	44
4.2. Analisa Parameter Motor Induksi .....	45
4.3. Analisa Hasil Simulasi .....	48
4.3.1 Tampilan Program-Mfiles Parameter Motor.....	48
4.3.2 Simulasi Pada saat Torsi Beban = 0 .....	49
4.3.3 Analisa Hasil Simulasi Untuk Torsi Beban = 0 Nm .....	50
4.3.4 Simulasi Untuk Torsi Luar Yang Berubah-Ubah.....	53
4.3.5 Analisa Hasil Simulasi Untuk Torsi Yang Berubah-Ubah.....	54

## **BAB V PENUTUP**

5.1. Kesimpulan.....	58
----------------------	----

## **DAFTAR PUSTAKA**

## DAFTAR TABEL

Tabel 4.1. Data Hasil Pengujian Arus Searah ( <i>DC Test</i> ) .....	44
Tabel 4.2. Data Hasil Pengujian Tanpa Beban ( <i>No Load Test</i> ) .....	44
Tabel 4.3. Data Hasil Pengujian Rotor Tertahan ( <i>Blocked Rotor Test</i> ) .....	44
Tabel 4.4. Data Hasil Pengujian Parameter Motor Induksi.....	47
Tabel 4.4. Data Hasil Simulas Tanpa Beban.....	52
Tabel 4.4. Data Hasil Simulasi Berbeban .....	57

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Karakteristik Motor Induksi .....	4
Gambar 2.2	Konstruksi Motor Induksi .....	5
Gambar 2.3.	Stator 3 Fasa Motor Induksi .....	5
Gambar 2.4.	Motor Induksi Rotor Belitan Dan Sangkar Tupai .....	6
Gambar 2.5.	Medan Putar Pada Motor Induksi.....	7
Gambar 2.6.	Rangkaian Ekivalen Stator .....	11
Gambar 2.7	Rangkaian Ekivalen Rotor .....	13
Gambar 2.8	Rangkaian Ekivalen Motor Induksi.....	14
Gambar 2.9.	Penyederhanaan Rangkaian Ekivalen Motor Induksi .....	15
Gambar 2-10	Kondisi Steady State Motor Induksi .....	16
Gambar 2-11	Transient Respons Pada Starting Motor Induksi.....	17
Gambar 2-12	Karakteristik Torsi Pada Beban Berubah-ubah .....	17
Gambar 2.13	Pengujian Arus Searah ( <i>DC Test</i> ) .....	19
Gambar 2.14.	Pengujian Tanpa Beban ( <i>No Load Test</i> ) .....	20
Gambar 2.15	Pengujian Rotor Tertahan.....	22
Gambar 2.16	Tampilan Blok Simulink MATLAB 7.0 .....	24
Gambar 2.17	Contoh Penggunaan Simulink .....	25
Gambar 2.18	Contoh Tampilan M-Files .....	26
Gambar 3.1	Hubungan Sumbu 3 fasa, sumbu $\alpha$ - $\beta$ dan d-q .....	28
Gambar 3.2	Blok Simulink abc to DQ .....	29
Gambar 3.3	Blok Parameter Fcn .....	29

Gambar 3.4	Blok Parameter Fcn 1 .....	30
Gambar 3.5	Blok Simulink DQ to abc .....	30
Gambar 3.6	Blok Parameter Fcn .....	31
Gambar 3.7	Blok Parameter Fcn 1 .....	31
Gambar 3.8	Blok Parameter Fcn 2 .....	31
Gambar 3.9	Blok Simulink Perhitungan fluksi .....	32
Gambar 3.10	Blok Simulink Perhitungan Torsi.....	33
Gambar 3.11	Blok Simulink Arus Pada Sumbu Q.....	34
Gambar 3.12	Blok Simulink Arus Pada Sumbu D.....	34
Gambar 3.13	Blok Simulink Perhitungan Fluksi dan Arus.....	35
Gambar 3.14	Diagram sumbu DQ motor Induksi 3 phasa.....	36
Gambar 3.15	Rangkaian Ekuivalen DQ Motor Induksi.....	36
Gambar 3.16	Distribusi Flux.....	39
Gambar 3.17	Blok Simulink Motor Induksi .....	40
Gambar 4.1	Tampilan M-files Parameter Motor .....	48
Gambar 4-2	Blok Simulink Untuk $T_l = 0$ .....	49
Gambar 4-3	Hasil Simulasi Kecepatan Referensi, Kecepatan Mekanik dan Flux Stator .....	50
Gambar 4-4	Hasil Simulasi Arus Pada Kondisi $T_l=0$ .....	51
Gambar 4-5	Hasil Simulasi Torsi Elelektik Pada Kondisi $T_l=0$ .....	51
Gambar 4-6	Blok Simulink Untuk Torsi Yang Berubah-Ubah.....	53
Gambar 4-7	Hasil Simulasi Kecepatan Referensi, Kecepatan Mekanik dan Flux Stator .....	54

Gambar 4-8	Hasil Simulasi Arus Pada Torsi Yang berubah-ubah.....	55
Gambar 4-9	Hasil Simualsi Torsi Elektrik Pada Torsi Yang berubah-ubah ...	55

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Penggunaan motor induksi yang mencakup dunia luas baik dalam bidang industri maupun dalam kehidupan sehari-hari membuat motor jenis ini mendapat perhatian dari para pengguna serta pabrik pembuatannya untuk semakin meningkatkan mutu dari suatu motor induksi yang dihasilkan sehingga tidak mengecewakan para konsumennya. Motor induksi yang kecil digunakan untuk peralatan rumah tangga misalnya untuk mesin cuci, dan lemari es, sedangkan motor induksi dengan kapasitas yang besar digunakan pada dunia industri sebagai pompa, fan, compresor dan banyak lainnya.

Pengontrolan kecepatan motor sangat diperlukan apabila motor tersebut akan digunakan pada kecepatan yang diinginkan. Dalam hal ini Pengontrolan dilakukan dengan menggunakan vektor kontrol.

Simulasi komputer sering dipilih untuk mempelajari kinerja peralihan dan kendali atau untuk mencoba rancangan – rancangan konseprual. Simulasi dapat sangat membantu pemahaman terhadap tingkah laku dinamik dan interaksinya yang sering kali tidak nampak dalam teori yang dibaca untuk dilanjutkan pada sistem yang nyata dalam bentuk percobaan.

Dengan menggunakan bantuan software MATLAB versi 7.0 kita dapat menganalisa kecepatan motor dengan membentuk blok-blok *transfer function* dari persamaan matematika motor yang telah diketahui.

## 1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas maka permasalahan yang timbul adalah mengatur kecepatan motor induksi menggunakan vektor kontrol dengan software MATLAB 7.0 dengan membentuk blok blok *transfer function* sehingga perubahan arus, torsi, flux kecepatan untuk torsi beban yang berubah-ubah dapat dianalisis dengan menggunakan software tersebut, sehingga skripsi ini mengambil judul:

### **ANALISIS PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI 3 FASA DENGAN VEKTOR KONTROL MENGGUNAKAN MATLAB SIMULINK**

## 1.3 Tujuan Pembahasan

Tujuan pembahasan skripsi ini adalah untuk menganalisis kecepatan motor induksi 3 fasa dengan vektor kontrol menggunakan MATLAB simulink.

## 1.4 Batasan Masalah

Agar pembahasan dalam skripsi akan lebih terarah sesuai dengan tujuan dan judul yang ada maka permasalahan dibatasi oleh beberapa hal sebagai berikut :

- a. Motor yang dianalisis adalah motor Induksi Tiga Phasa Rotor Sangkar DE LORENZO/DL1021, 1,1 kW, 220/380 ( $\Delta/Y$ ) Volt, 4,3/2,5 ( $\Delta/Y$ ) Ampere,  $\cos \phi$  0,9, 50 Hz, 2820 rpm, 2 kutup. Analisis dilakukan di Lab. Konvrsi Energi Elektrik ITN Malang.
- b. Analisa Menggunakan Simulink yang dibentuk menggunakan *transfer function* dari persamaan matematika.
- c. Sistem kontrol yang digunakan adalah sistem kontrol vektor

- d. Pembahasan lebih ditekankan pada pengaturan kecepatan dengan torsi yang berubah-ubah.
- e. Rangkaian DQ hanya digunakan untuk memodelkan motor induksi
- f. Tidak membahas sistem proteksi motor

### **1.5 Metodologi Penelitian**

Dalam melaksanakan penulisan skripsi ini metodologi sebagai berikut:

- a. Studi literatur

Pengumpulan bahan yang berkaitan dengan motor induksi serta penurunan rumus – rumus yang digunakan dalam skripsi ini.

- b. Pengumpulan Data

Melakukan percobaan dan pengambilan data dari motor induksi yang akan dianalisa.

- c. Melakukan analisa dari data untuk parameter-parameter yang akan digunakan.

- d. Melakukan simulasi dari data yang ada ke dalam Blok Simulink Dengan Bantuan MATLAB versi 7.0

- e. Menganalisa hasil Simulasi

- f. Menarik Kesimpulan

## **BAB II**

### **TEORI DASAR**

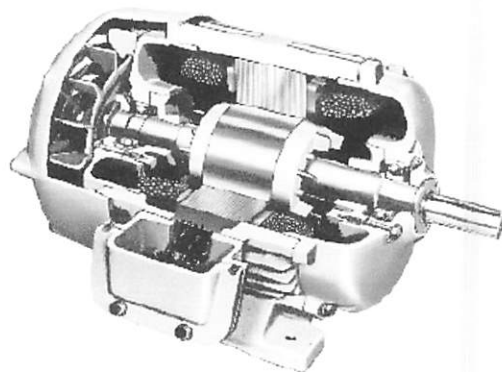
#### **2.1. Teori Dasar Motor Induksi.**

Motor arus bolak-balik ( Motor AC ) adalah suatu mesin yang berfungsi untuk mengubah tenaga listrik arus bolak-balik menjadi tenaga mekanik atau tenaga gerak, dimana tenaga gerak ini berupa perputaran pada motor. Salah satu jenis motor AC ini adalah motor induksi atau motor tak serempak.

Disebut motor tak serempak karena putaran motor tidak sama dengan putaran fluks magnet stator. Dengan kata lain, bahwa antara putaran rotor dan putaran fluks magnet terdapat selisih putaran yang disebut slip.<sup>[7]</sup>

#### **2.2. Konstruksi Motor Induksi**

Konstruksi motor induksi terdiri dari dua bagian utama yaitu stator dan rotor. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2-1 di bawah ini :

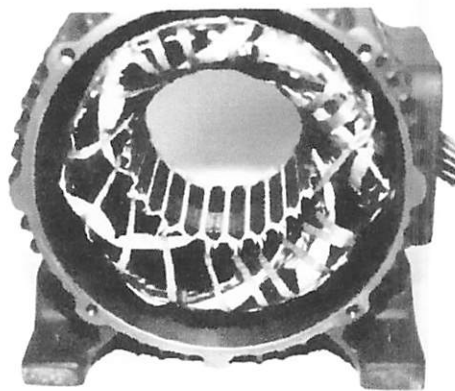


**Gambar 2-1 :**  
**Konstruksi Motor Induksi <sup>[7]</sup>**

### 2.2.1. Stator

Pada dasarnya konstruksi stator pada motor induksi mempunyai bentuk fisik yang sama dengan mesin sinkron, yang terdiri dari :

- a. Rumah stator terbuat dari besi tuang.
- b. Inti stator dari besi atau baja silikon.
- c. Alur dan gigi materialnya sama dengan inti, alur tempat meletakkan belitan.
- d. Belitan stator dari tembaga.



**Gambar 2-2:**  
**Stator Tiga-Phasa Motor Induksi** <sup>[7]</sup>

### 2.2.2. Rotor

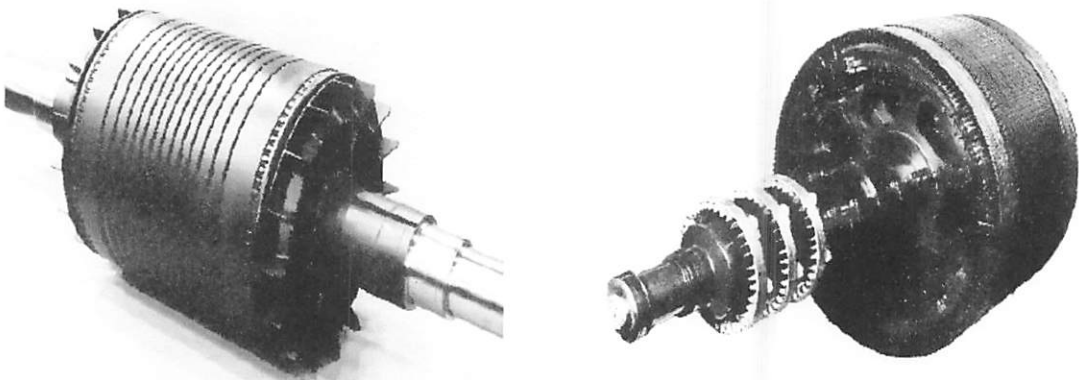
Konstruksi dari rotor motor induksi mempunyai dua bentuk, yaitu :

1. Rotor Belitan (*wound rotor*/ rotor slip ring).

Motor induksi jenis ini mempunyai rotor dengan belitan kumparan tiga-fasa sama seperti kumparan stator. Kumparan stator dan rotor juga mempunyai jumlah kutub yang sama.

2. Rotor sangkar (*squirrel cage rotor*).

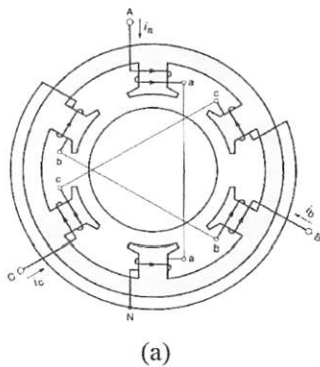
Motor induksi jenis ini mempunyai rotor dengan kumparan yang terdiri atas beberapa batang konduktor yang disusun sedemikian rupa sehingga menyerupai sangkar tupai.

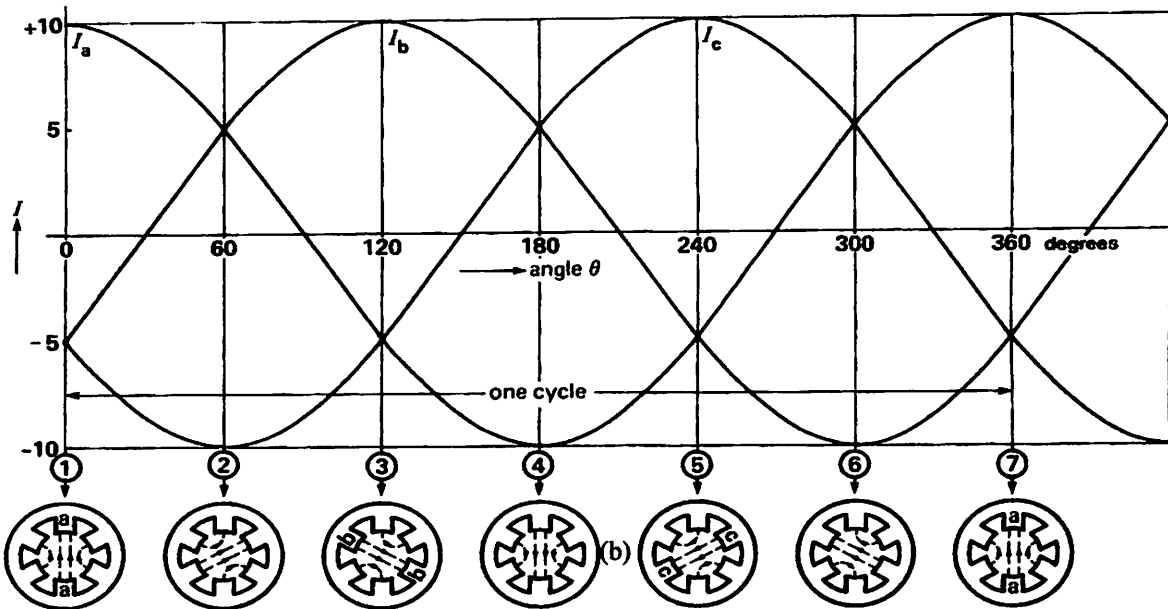


**Gambar 2-3 : a) Motor Induksi Rotor Belitan <sup>[7]</sup>  
b) Rotor Sangkar Bajing <sup>[7]</sup>**

**2.3. Medan Magnet Putar<sup>[2]</sup>**

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 tiga fasa. Hubungan dapat berupa hubungan bintang atau delta.





**Gambar 2-4 :**  
**Medan Putar Pada Motor Induksi <sup>III</sup>**

Medan putar terjadi apabila kumparan A-a, B-b, C-c dihubungkan tiga fasa dengan beda fasa masing-masing  $120^\circ$  (hubungan bintang, Y) dan dialiri arus sinusoida. Distribusi  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  sebagai fungsi waktu adalah seperti gambar 2-4b. Pada keadaan  $t_1$  fluks resultan mempunyai arah yang sama dengan arah yang dihasilkan oleh kumparan A-a, sedangkan pada  $t_3$ , fluks resultannya dihasilkan oleh kumparan B-b. Untuk  $t_4$ , fluks resultannya berlawanan arah dengan fluks resultan yang dihasilkan pada  $t_1$ . Dari gambar 2-4 b tersebut terlihat bahwa fluks resultan ini akan berputar satu kali.

#### 2.4. Prinsip Kerja Motor Induksi

Motor induksi tiga fasa dapat dibandingkan dengan transformator karena merupakan piranti yang melibatkan perubahan kebocoran fluks pada kumparan

stator. Dalam hubungan ini diasumsikan bahwa rotor terdiri atas tipe lilitan dan hubungan bintang. Dengan lilitan rotor dalam keadaan rangkaian terbuka tidak ada torsi yang dibangkitkan. Dengan demikian pemberian tegangan tiga fasa pada kumparan stator tiga fasa menimbulkan medan magnet putar dan memotong kumparan rotor pada frekuensi  $f_1$ . Nilai rata-rata ggl induksi per fasa dari kumparan rotor dinyatakan dengan persamaan :

$$E_2 = 4,44 f_1 N_2 k_{w2} \Phi_m \dots\dots\dots (2.1)$$

Perlu diketahui bahwa frekuensi stator  $f_1$  digunakan disini karena rotor tersebut dalam keadaan diam / berhenti. Dengan demikian  $E_2$  merupakan ggl frekuensi saluran . Fluks ( $\Phi_m$ ) tentu merupakan tiap elektroda (pole) dari kumparan stator dan rotor.

Rumus yang serupa menyatakan nilai rata-rata ggl induksi tiap fasa yang terjadi dari kumparan stator, yaitu :

$$E_1 = 4,44 f_1 N_1 k_{w1} \Phi_m \dots\dots\dots (2.2)$$

Berdasarkan persamaan (2.1) dan (2.2) dapat dirumuskan rasio :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1 K_{w1}}{N_2 K_{w2}} \dots\dots\dots (2.3)$$

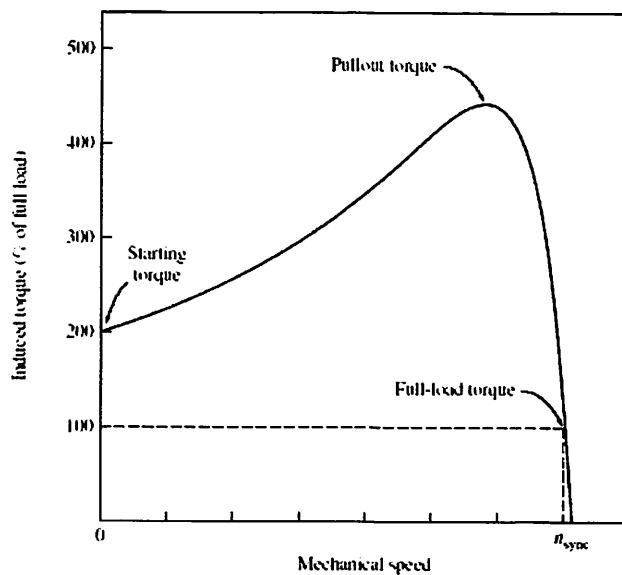
Pada dasarnya, motor induksi pada keadaan diam menyerupai karakteristik transformator dengan kumparan stator sebagai sisi primer dan kumparan rotor sebagai sisi sekundernya.

Untuk menghasilkan torsi mula (dan torsi penggerak berturut-turut) perlu arus yang mengalir dalam kumparan rotor. Mula-mula ggl induksi  $E_2$  mengakibatkan arus rotor  $I_2$  mengalir melalui rangkaian hubung-singkat, menghasilkan torsi mula. Pengaruh torsi ini selalu mengakibatkan rotor berputar

dalam arah yang sama sebagaimana medan putar. Anggaplah bahwa medan fluks putar searah jarum jam pada kecepatan tertentu yang bergantung pada frekuensi stator dan banyaknya kutub dari kumparan stator. Kecepatan ini disebut “kecepatan sinkron” dan dinyatakan :

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

karena rotor meningkat kecepatannya, laju yang mengijinkan medan stator memotong kumparan rotor menurun. Hal ini mengurangi ggl induksi resultan per fasa, dan menghasilkan torsi yang lebih kecil. Pada kenyataan proses ini berlanjut hingga kecepatan rotor mampu untuk menghasilkan ggl yang cukup agar arus yang diperlukan untuk membangkitkan torsi yang setara dengan torsi lawan.



**Gambar 2-5 :**  
**Karakteristik Motor Induksi [7]**

### 2.4.1. Slip dan Frekuensi Arus Rotor

Slip diidentifikasi sebagai bagian Dari kecepatan sinkron  $n_s$  dan kecepatan aktual rotor  $n_r$ . Slip dirumuskan sebagai berikut :

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

Pada keadaan diam medan magnet putar yang dihasilkan oleh stator mempunyai kecepatan relatif yang sama dengan kumparan rotor. Pada saat ini frekuensi dari arus rotor sama dengan frekuensi stator ( $f_r = f_s$ ). Frekuensi rotor  $f_r$  adalah nol ketika motor berputar pada kecepatan sinkron. Pada saat tersebut tidak terdapat gerakan (putaran) relatif antara medan putar dan rotor. Pada kecepatan yang lain, frekuensi rotor proporsional dengan slip ( $s$ ). Hubungan antara slip dan frekuensi dapat dilihat dari persamaan berikut ini<sup>[2]</sup> :

$$n_s = \frac{120f_s}{p} \text{ atau } f_s = \frac{p n_s}{120} \dots\dots\dots (2.6)$$

dimana :  $p$  = jumlah kutub

$f_s$  = frekuensi stator

Pada rotor berlaku hubungan :

$$f_r = \frac{(n_s - n_r)p}{120} = \frac{(n_s - n_r)n_s p}{n_s 120} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \text{ dan } f_s = \frac{p n_s}{120}$$

Maka :

$$f_r = s.f_s \dots\dots\dots (2.9)$$

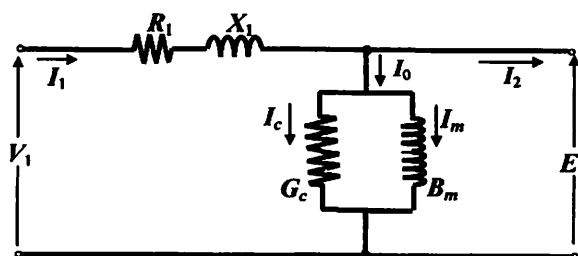
## 2.5. Rangkaian Ekivalen Motor Induksi

Suatu rangkaian ekivalen motor induksi tiga fasa diperlukan untuk membantu analisis operasi dan untuk memudahkan penghitungan kinerja. Rangkaian ekivalen tersebut mengasumsikan suatu bentuk yang identik rangkaian ekivalen transformator. Proses penurunannya serupa dengan model dengan modifikasi-modifikasi baru seperlunya untuk menghitung kumparan sekunder (rotor) dalam hal ini berputar dan menghasilkan daya mekanik.

### 2.5.1. Rangkaian Ekivalen Stator

Apabila kumparan stator diberikan tegangan catu dari jala-jala sebesar  $V_L$ , maka akan mengalir arus putar tiga fasa pada kumparan stator yang membangkitkan medan magnet tiga fasa. Arus stator ( $I_1$ ) bercabang menjadi dua komponen arus yaitu :

1. Komponen arus beban ( $I_2$ )
2. Komponen arus eksitasi ( $I_0$ )



**Gambar 2-6 : Rangkaian Ekivalen Stator <sup>[1]</sup>**

Dimana :

$V_1$  = tegangan terminal per-fasa

$R_1$  = resistansi kumparan stator per-fasa

$X_1$  = reaktansi bocor kumparan stator per-fasa

$E_1$  = tegangan induksi (ggl) per-fasa di dalam kumparan stator

$G_c$  = konduktansi rugi-rugi inti stator per-fasa

$B_m$  = suseptansi magnetisasi stator per-fasa

### 2.5.2. Rangkaian Ekuivalen Rotor

Pada saat rotor diam, medan putar stator akan memotong batang konduktor rotor dengan kecepatan putar sinkron ( $n_s$ ), sehingga frekuensi arus rotor sama dengan frekuensi arus stator ( $f_s = f_r$ ) dan slip sama dengan satu ( $s=1$ ). Dengan mengetahui bahwa frekuensi arus / tegangan rotor adalah frekuensi slip, maka reaktansi bocor rotor (*leakage reactance*) per fasa adalah :

$$X_2' = sX_2 \dots\dots\dots (2.10)$$

$$X_2 = 2\pi f_s L_2 \dots\dots\dots (2.11)$$

dimana  $X_2$  merupakan reaktansi rotor pada start atau diam.

Tegangan induksi pada rotor :

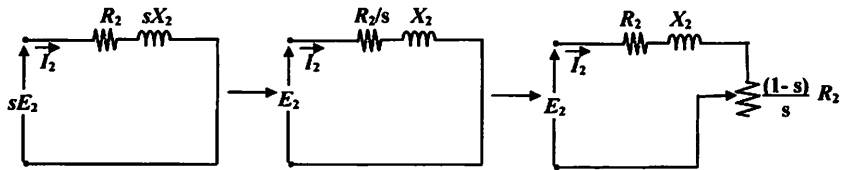
$$E_2 = 4,44f_2 N_2 \Phi_m \dots\dots\dots (2.12)$$

Pada slip,  $s$ , frekuensi rotor menjadi  $s f_s$ , maka tegangan induksi pada rotor ( $E_2'$ ) pada slip,  $s$ , adalah :

$$E_2' = 4,44s f_1 N_2 \Phi_m \dots\dots\dots (2.13)$$

Dengan memasukkan persamaan (2.12) ke (2.13) maka didapat persamaan :

$$E_2' = s E_2 \dots\dots\dots (2.14)$$



**Gambar 2-7: Rangkaian Ekivalen Rotor <sup>[1]</sup>**

Dimana :

S = Slip

$E_2$  = tegangan induksi per-fasa di dalam rotor pada keadaan diam

$R_2'$  = resistansi kumparan rotor per-fasa berpatokan pada stator

$X_2'$  = reaktansi bocor rotor per-fasa berpatokan pada stator

Berdasarkan persamaan (2.10) dan (2.14) maka diperoleh rangkaian ekivalen rotor seperti pada gambar 2-6.

Besar arus rotor ( $I_2$ ) saat berputar adalah :

$$I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}} \dots\dots\dots (2.15)$$

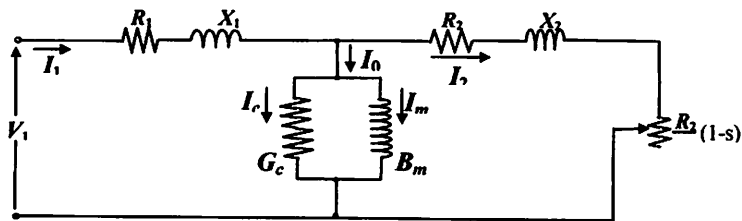
Atau

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}} \dots\dots\dots (2.16)$$

### 2.5.3. Rangkaian Ekivalen Motor Induksi

Kerja motor induksi seperti juga kerja pada transformator adalah berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Oleh karena itu motor induksi dipandang sebagai transformator yang mempunyai ciri-ciri khusus, yaitu :

1. Stator sebagai sisi primer
2. Rotor sebagai sisi sekunder yang penghantar-penghantarnya dihubungkan singkat dan berputar
3. Kopling antara sisi primer dan sisi sekunder dipisahkan oleh celah udara (*air gap*).



**Gambar 2-8 : Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi [4]**

Rangkaian tersebut memperlihatkan bahwa daya keseluruhan yang dialihkan pada celah udara dari stator ( masukan daya ke rotor ) adalah :

$$P_2 = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \dots\dots\dots (2.17)$$

Dengan rugi tembaga rotor :

$$P_{cu2} = 3I_2^2 R_2 \dots\dots\dots (2.18)$$

Maka daya mekanis yang dibangkitkan oleh motor induksi adalah :

$$P_m = P_2 - P_{cu2} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} - 3I_2^2 R_2 = 3I_2^2 R_2 \frac{(1-s)}{s} \dots\dots\dots (2.19)$$

$$P_m = T \cdot \omega_r = T \cdot \omega_s (1-s) \dots\dots\dots (2.20)$$

dimana :

T = Torsi motor dalam N-m

$\omega_r$  = kecepatan rotor dalam rad/det

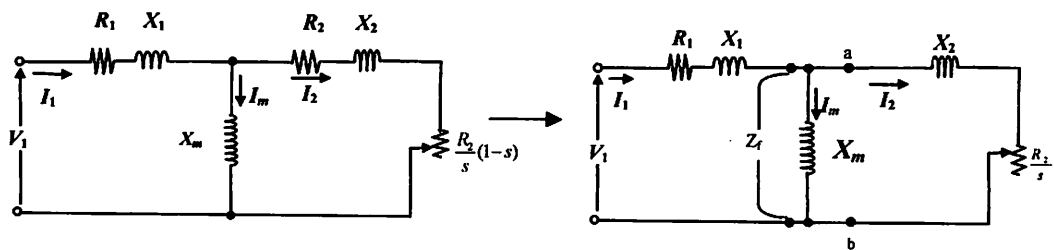
$\omega_s$  = kecepatan sinkron stator dalam rad/det

sehingga diperoleh :

$$T = \frac{3}{\omega_s} I_2^2 \frac{R_2}{s} \text{ Nm} \dots\dots\dots (2.21)$$

$$I_2 = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}} \dots\dots\dots (2.22)$$

Dalam analisis rangkaian ekivalen, sering disederhanakan dengan menghilangkan konduktansi ( $R_c$ ), sehingga rangkaian ekivalen pada gambar (2.7) berubah menjadi :



**Gambar 2-9 :**

**Penyederhanaan Rangkaian Ekivalen Motor Induksi <sup>[4]</sup>**

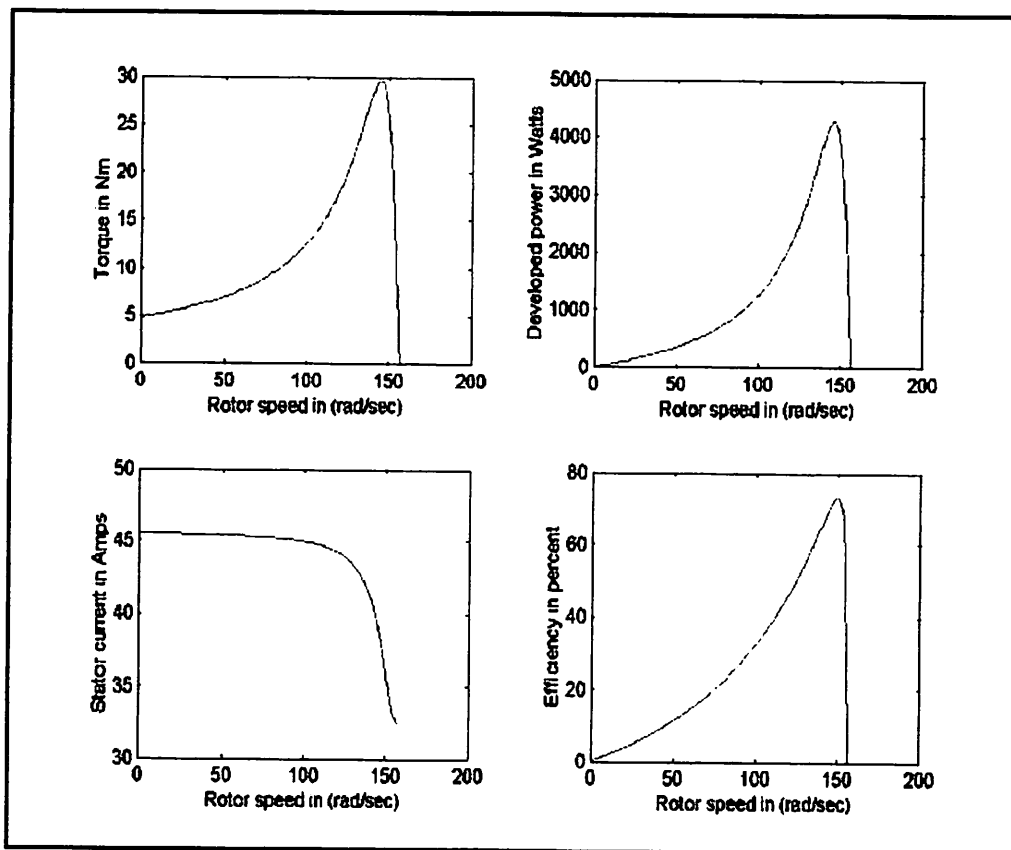
Untuk dapat melakukan menganalisis respons transient pada motor induksi dengan perubahan torsi mekanik yang bervariasi maka rangkaian ekivalen harus dirubah dalam bentuk rangkaian DQ. Pada umumnya pada sebuah motor induksi telah terdapat informasi pada name plate dimana data informasi itu merupakan dasar dalam pengopersian motor tersebut. Data tersebut berupa:

- Daya Output (Hp/KW)
- Tegangan Nominal Y- $\Delta$  (Volt)
- Arus Nominal (Amp)
- Power Faktor
- Kecepatan (rpm)
- Jumlah Kutub

## 2.6. Operasional Motor Induksi

### 2.6.1 Performa Keadaan Mantap ( *Steady State* )

Kondisi motor dalam keadan *steady state* adalah kondisi dimana motor dalam keadaan stabil, hampir tidak ada perubahan arus, torsi maupun tegangan serta kecepatan sehingga motor dikatakan telah bekerja sesuai dengan name plate. Keadaan *steady state* ini merupakan gambaran secara keseluruhan dari motor tersebut yang dapat dijadikan acuan untuk penggunaannya.



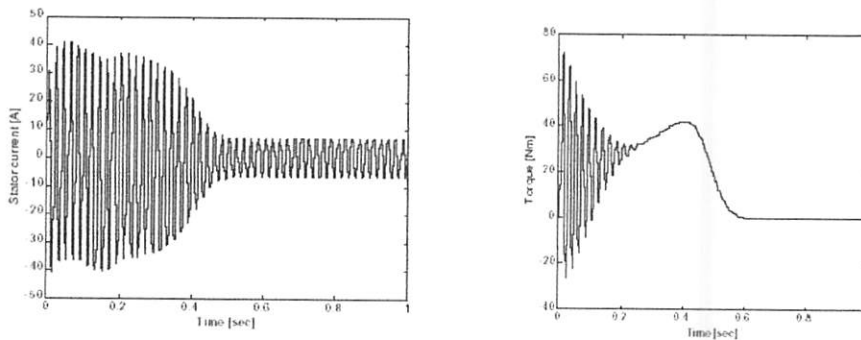
Gambar 2-10

Keadaan Steady State Motor Induksi <sup>[9]</sup>

### 2.6.2 Performa Keadaan Peralihan ( Transient )

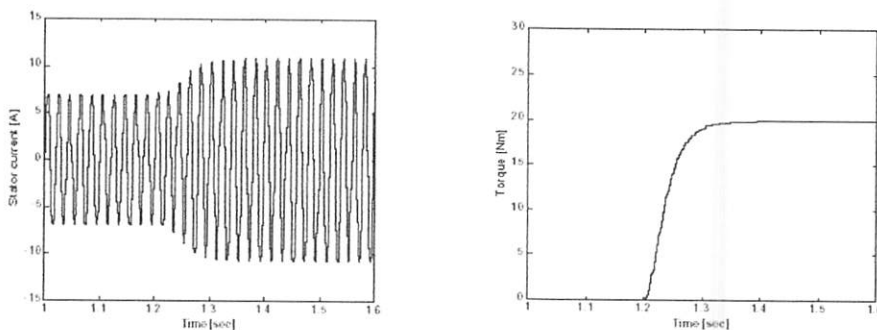
Keadaan transient atau peralihan merupakan kondisi motor sesaat dimana keadaan berubah-ubah dan dapat menentukan beberapa faktor penting dalam pengendalian motor.

Kondisi pada awal atau start, pengereman, perubahan kecepatan akan mengalami keadaan transient pada motor induksi. Misalnya pada keadaan start motor induksi dengan kapasitas besar akan menghasilkan arus starting yang besar dimana besarnya 3 sampai 8 kali arus nominal yang tertera pada name plate motor.



Gambar 2-11

### Transient Respons Pada Starting Motor Induksi [4]



Gambar 2-12

### Karakteristik Torsi Pada Beban Berubah-ubah [4]

Beban motor induksi merupakan factor yang penting dalam stabilitas power system karena adanya beberapa alasan yaitu:

- Perubahan yang cepat dari penambahan beban
- Untuk beban dengan power faktor rendah akan meminta daya reaktif yang tinggi
- Akan menyebabkan tegangan turun ketika beban pada motor ditambah

Perubahan arus torsi dan tegangan yang terjadi misalnya pada keadaan penambahan torsi beban yang berubah-ubah merupakan informasi yang diperlukan oleh teknisi di bidang kontrol sehingga dapat menentukan jenis pengaman yang akan digunakan dan peralatan kontrol yang mana akan digunakan. Keadaan transien berlangsung dalam waktu yang cukup singkat tetapi jika diperhatikan secara baik akan menyebabkan bahaya pada motor tersebut. Jadi adanya transient respons ini sangat berhubungan dengan waktu..

Perubahan torsi beban pada motor akan mempengaruhi, arus stator, tegangan dan fluks rotor. Tidak semua motor dijalankan pada torsi yang konstan misalnya suatu motor dijalankan pada 0,5 dari torsi rata-rata pada awal dan torsi penuh setelah motor berjalan beberapa detik. Faktor-faktor dalam ini merupakan suatu gejala peralihan ketika motor dioperasikan dengan beban ataupun torsi yang berubah-ubah. Perubahan ini juga akan mengakibatkan pada arus, dan flux rotor. Ketika motor pertama kali dijalankan atau pada kondisi startup dapat diketahui akan mengalami transient respons adanya gejala naik turun arus, tegangan, kecepatan dan flux sebelum motor tersebut beroperasi dalam kondisi steady state.

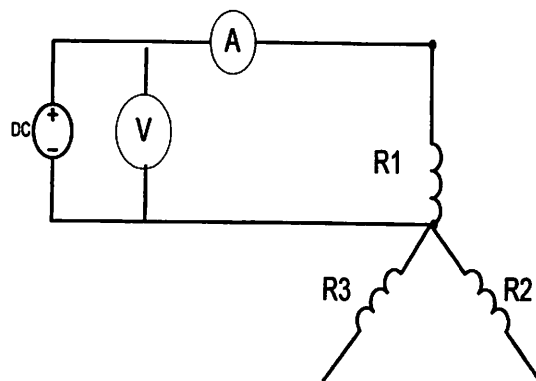
Dalam menganalisa gejala transient ada motor induksi, maka motor induksi digunakan dalam dua fasa yaitu motor dalam D (direct) dan Q (quadrature) sumbu. Konsep ini dianggap mudah karena terdiri dari dua pengaturan medan yaitu pada stator dan pada rotor.

## 2.7. Parameter Motor Induksi 3 fasa

Untuk menganalisis motor diperlukan inputan parameter motor yang dapat diperoleh dengan melakukan beberapa pengujian<sup>[7]</sup>, di antaranya:

### 2.7.1. Pengujian Arus Searah (*DC Test*)

Tujuan dari pengujian arus searah (*DC Test*) adalah untuk menentukan nilai resistansi stator. Diagram pengukuran ditunjukkan pada gambar 2.10.



**Gambar 2-13**

**Pengujian Arus Searah (*DC Test*)<sup>[7]</sup>**

Kumparan stator terhubung bintang (Y) dan bila sumber DC disuplai melalui kumparan kumparan 1 , dengan kumparan ke tiga (kumparan c) dalam keadaan terbuka (*open circuit*), maka nilai dari resistansi ekivalen ( $R_{dc}$ ) :

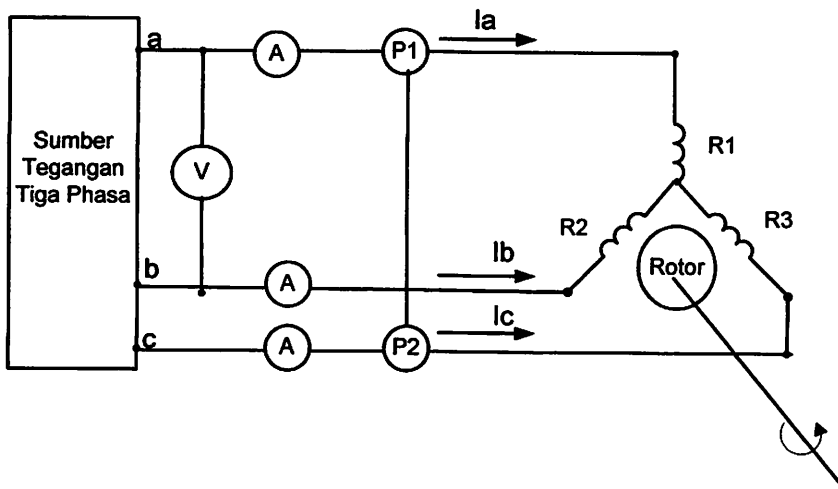
untuk nilai resistansi kumparan a dan b :

$$R_{ab} = R_1 = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \Omega \dots\dots\dots (2.33)$$

Dalam pengujian arus searah dijaga agar arus DC ( $I_{DC}$ ) tidak melampaui nilai dari arus nominal motor induksi.

### 2.7.2 Pengujian Tanpa Beban (*No-Load Test*)

Pengujian Tanpa Beban (*No-Load Test*) bertujuan untuk menentukan nilai resistansi rugi-rugi inti ( $R_c$ ) dan reaktansi pemagnetan ( $X_m$ ). Pada pengujian ini motor induksi disuplai pada tegangan dan frekuensi nominalnya, serta rotor berputar tanpa terhubung dengan peralatan beban dimana harga slip sangat kecil (mendekati 0,0001 atau lebih kecil)



**Gambar 2-14**  
**Rangkaian Pengujian Tanpa Beban (*No Load Test*)<sup>[7]</sup>**

$P_{3-\phi}$ , daya total yang terukur dari P1 dan P2 :

$$P_{3-\phi} = P1 + P2 \text{ Watt}$$

$$P_{nl} \text{ daya per phasa } P_{nl} = \frac{P_{3-\phi}}{3} \text{ Watt/ perphasa}$$

Dengan asumsi bahwa tegangan antar fasa stator seimbang, maka tegangan fasa stator :

$$V_{nl} = \frac{V_{ab}}{\sqrt{3}} \text{ Volt/fasa} \dots\dots\dots (2.34)$$

Untuk arus pada no load

$$I_{nl} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \text{ Ampere} \dots\dots\dots (2.35)$$

$$Z_{nl} = \frac{V_{nl}}{I_{nl}} \text{ ohm} \dots\dots\dots (2.36)$$

$$R_{nl} = \frac{P_{3\phi}}{3I_0} \text{ ohm} \dots\dots\dots (2.37)$$

$$X_{nl} = \sqrt{Z_{nl}^2 - R_{nl}^2} \text{ ohm} \dots\dots\dots (2.38)$$

$R_c$ , resistansi rugi-rugi inti :

$$P_c = P_{nl} - P_{rs} \dots\dots\dots (2.39)$$

$$R_c = \frac{E_a^2}{P_c} \text{ ohm/fasa} \dots\dots\dots (2.40)$$

Rugi Rugi Stator

$$P_{rs} = 3I_{nl}^2 \cdot R_s \text{ (Watt)} \dots\dots\dots (2.41)$$

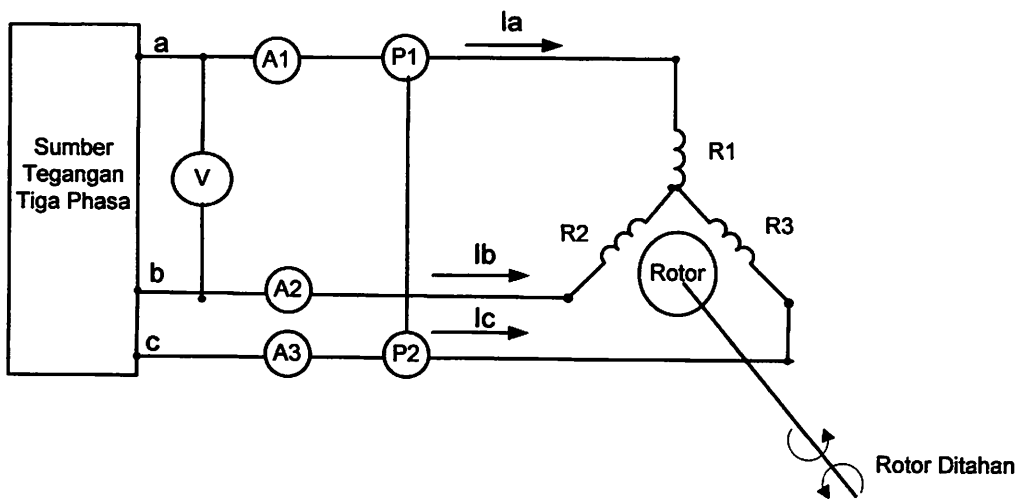
Rugi Gesek, angin, rugi besi :

$$P_{fwc} = P_{nl} - P_{rs} \text{ (Watt)} \dots\dots\dots (2.42)$$

### 2.7.3 Pengujian Rotor Tertahan (*Blocked Rotor Test*)

Tujuan pengujian rotor tertahan adalah untuk menentukan resistansi rotor pada motor induksi. Pada saat pengujian ini perputaran rotor motor induksi dikunci / diblok sehingga slip(s) sama dengan satu. Suplai tegangan tiga fasa

motor induksi adalah tegangan yang nilainya di bawah tegangan nominalnya, yakni tegangan yang dapat menghasilkan arus nominalnya. Sebagai pendekatan, diasumsikan bahwa arus pemagnetan ( $I_m$ ) cukup kecil akibat penurunan suplai tegangan serta motor dalam keadaan tidak berputar ( $s=1$ ) sehingga rugi-rugi inti dapat diabaikan.



**Gambar 2-15**  
**Rangkaian Pengujian Rotor Tertahan (*Blocked Rotor*)** [7]

$P_{3-\phi}$ , daya total yang terukur dari  $W_a$  dan  $W_b$  :

$$P_{3-\phi} = P_a + P_b \text{ watt} \quad (2.43)$$

Daya total tiga-fasa merupakan rugi-rugi tembaga stator dan rotor, karena motor tidak berputar maka rugi-rugi inti diabaikan.

$P_{br}$ , rugi-rugi daya per fasa :

$$P_{br} = \frac{P_{3-\phi}}{3} \text{ watt/fasa} \dots \dots \dots (2.44)$$

Dengan asumsi bahwa tegangan antar fasa stator seimbang, maka tegangan fasa stator :

$$V_{br} = \frac{V_{ab}}{\sqrt{3}} \text{ Volt/fasa} \dots\dots\dots (2.45)$$

$I_{br}$ , arus fasa stator :

$$I_{br} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \text{ Ampere} \dots\dots\dots (2.46)$$

$R_{ek}$ , resistansi ekuivalen :

$$R_{ek} = \frac{P_{br}}{I_{br}^2} \text{ ohm/fasa} \dots\dots\dots (2.47)$$

Untuk  $R_r'$ , resistansi rotor berpatokan pada stator :

$$R_r' = R_{ek} - R_s \text{ ohm/fasa} \dots\dots\dots (2.48)$$

$Z_{br}$ , Impedansi rotor tertahan :

$$Z_{br} = \frac{V_{br}}{I_{br}} \text{ ohm/fasa} \dots\dots\dots (2.49)$$

$X_{ek}$ , reaktansi ekuivalen :

$$X_{ek} = \sqrt{(Z_{br}^2 + R_{ek}^2)} \text{ ohm/fasa} \dots\dots\dots (2.50)$$

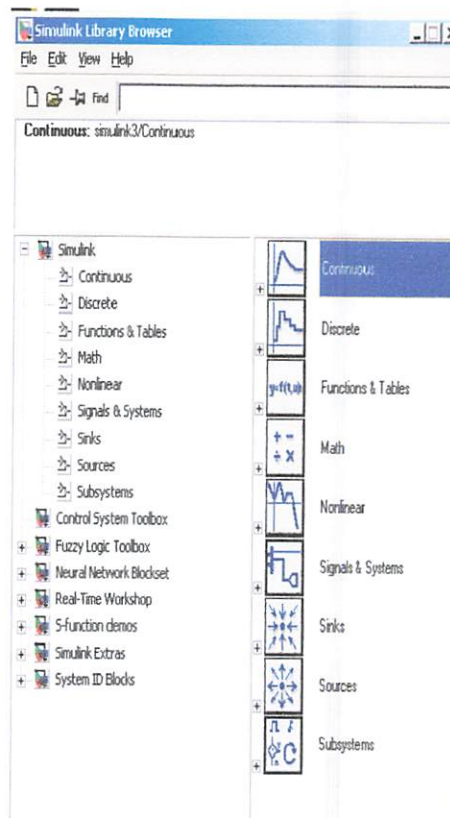
Dimana Motor induksi yang dipakai adalah motor induksi dengan rotor sangkar tunggal. Secara umum  $X_s$  dan  $X_r'$  diasumsikan sama, sehingga ;

$$X_s = X_r' = 0.5 X_{ek} \text{ ohm/fasa}$$

## 2.8 Matlab Simulink

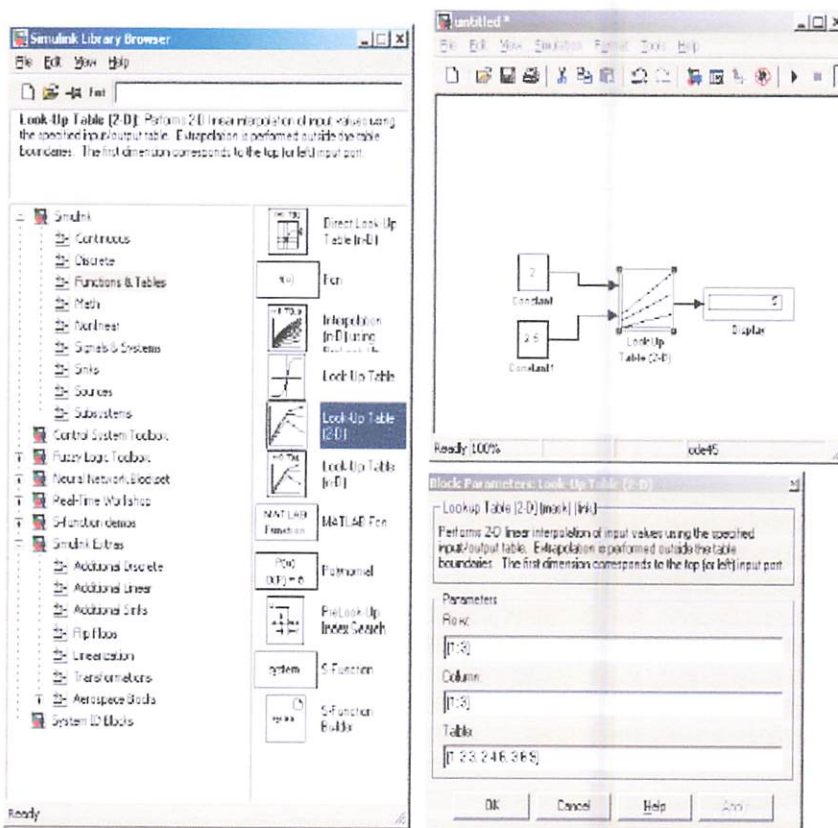
MATLAB merupakan suatu software yang sangat baik untuk digunakan untuk menganalisa berbagai kebutuhan dalam bidang teknik. Didalam matlab terdapat dua bagian penting yaitu M-files yang berfungsi untuk menuliskan listing

programnya dan Simulink yang digunakan untuk melakukan simulasi. Dengan menggunakan Simulink yang merupakan kesatuan dalam program tersebut kita dapat melakukan suatu pemodelan sistem kontrol atau suatu plant yang akan diatur. Hal itu dapat didesain dengan menggunakan blok-blok yang telah tersedia serta setting parameter-parameter akan menjadi lebih mudah. Blok-blok simulink dapat juga dibentuk dari persamaan matematika dengan menggunakan blok *transfer function* sehingga kita dapat menuliskan persamaan dalam blok tersebut sesuai dengan parameter yang akan kita cari.



**Gambar 2-16**  
**Simulink Library Pada MATLAB 7.0**

Dalam simulink tersebut terdapat beberapa blok yang dapat digunakan untuk pemodelan control atau analisa dalam dunia electric. Sebagai contoh penggunaan Blok Fuction dan Tables. Misalnya kita mempunyai soal  $2 * 2.5 = 5$  maka kita dapat menggunakan blok look up table (2-D) seperti dapat dilihat pada gambar di bawah ini



**Gambar 2-17**  
**Contoh Penggunaan Simulink**

Selain Simulink dalam MATLAB juga terdapat M-Files yaitu bagian untuk menuliskan listing program yang dengan hasil program setelah dijalankan akan disimulasikan dengan Blok Simulink yang telah dibuat.

```
R:\C:\Burak\My Papers\Accepted\IEMDC 2003\PARAM.M*
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
[Icons] StdC Base
4  % initialization
5
6  Rr=.39;      %rotor resistance
7  Rs=.19;      %stator resistance
8  Lls=.21e-3;  %stator inductance
9  Llr=.6e-3;   %rotor inductance
10 Lm=4e-3;     %magnetizing inductance
11 fb=100;     %base frequency
12 p=4;        %number of poles
13 J=0.0226;   %moment of inertia
14
15 Lr=Llr+Lm;
16 Tr=Lr/Rr;
17
18 % impedance and angular speed calculations
19
20 wb=2*pi*fb; %base speed
21 Xls=wb*Lls; %stator impedance
22 Xlr=wb*Llr; %rotor impedance
23 Xm=wb*Lm;   %magnetizing impedance
24 Xstar=1/(1/Xls+1/Xm+1/Xlr);
```

script Ln 24 Col 28

Gambar 2-18  
Contoh Tampilan M-Files

## BAB IV

### MENGHITUNG PARAMETER MOTOR DAN ANALISIS HASIL SIMULASI

Untuk menentukan parameter-parameter motor induksi yang akan dianalisa maka dapat dilakukan dengan mengambil parameter dengan melakukan pengujian.

#### 4.1 Menghitung Parameter Motor Induksi

##### 4.1.1 Alat-alat yang digunakan

- a. Motor induksi Tiga Phasa DE LORENZO / DL 1021

Data papan (*Name-Plate*)

<b>TEGANGAN</b>	<b>: 220/380 (<math>\Delta</math>/Y) VOLT</b>
<b>ARUS</b>	<b>: 4.3/2.5 (<math>\Delta</math>/Y) AMPERE</b>
<b>COS <math>\phi</math></b>	<b>: 0.83</b>
<b>FREKUENSI</b>	<b>: 50 HZ</b>
<b>DAYA</b>	<b>: 1.1 KW</b>
<b>PUTARAN</b>	<b>: 2820 RPM</b>
<b>KUTUP</b>	<b>: 2 KUTUP</b>
<b>KELAS ISOLASI</b>	<b>: F</b>

- b. Voltmeter DE LORENZO DL 1031
- c. Amperemeter DE LORENZO DL 1031
- d. Wattmeter 3 phasa DE LORENZO DL 1031
- e. Tachometer DE LORENZO 2026
- f. AC voltage Regulator dan DC Supply DE LORENZO 1013 M2
- g. Current Break DE LORENZO

#### 4.1.2 Pengujian Arus Searah (*DC Test*)

Tabel 4-1

Data Hasil Pengujian Arus Searah

No	Vdc (Volt)	I (Ampere)
1	4	0.75
2	6	1.12
3	8	1.44
4	10	1.78
5	12	2.14

#### 4.1.3 Pengujian Tanpa Beban (*No Load Test*)

Tabel 4-2

Data Hasil Pengujian Beban Nol

I <sub>stator</sub> (Ampere)			P <sub>3 Phasa</sub> (WATT)	V <sub>L-L</sub> (Volt)	Frekuensi (Hz)
a	B	c			
0.59	0.68	0.59	90	220	50

#### 4.1.4 Pengujian Rotor Tertahan (*Blocked Rotor Test*)

Tabel 4-3

Data Hasil Pengujian Motor Rotor Tertahan

I <sub>stator</sub> (Ampere)			P <sub>3 Phasa</sub> (WATT)	V <sub>L-L</sub> (Volt)
a	b	c		
2.01	2.03	1.95	140	65

## 4.2 Analisa Parameter Motor Induksi

- Dari pengujian arus searah besarnya resistansi stator adalah:

Dengan menggunakan persamaan 2.52

$$R_s = R_{dc} = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} = \Omega$$

$$\text{Maka } R_{dc(1)} = \frac{4}{0.75} = 5.33 \Omega$$

$$R_{dc(2)} = \frac{6}{1.12} = 5.35 \Omega$$

$$R_{dc(3)} = \frac{8}{1.44} = 5.55 \Omega$$

$$R_{dc(4)} = \frac{10}{1.78} = 5.61 \Omega$$

$$R_{dc(5)} = \frac{12}{2.14} = 5.61 \Omega$$

$$R_s = \frac{5.33 + 5.35 + 5.55 + 5.61 + 5.61}{5} = 5.49 \Omega / \text{phasa}$$

- Dari pengujian Tanpa Beban (No-load Test)

$$I_{tb} = \frac{I_{ta} + I_{tb} + I_{tc}}{3}$$

$$I_{tb} = \frac{0.59 + 0.68 + 0.59}{3} = 0.62 A$$

$$Z_{tb} = \frac{V}{\sqrt{3} I_{tb}} = \frac{220}{\sqrt{3} \times 0.62} = 205 \Omega$$

$$R_{tb} = \frac{P_{(3\Phi)}}{3 I_{tb}^2} = \frac{90}{3 \cdot (0.62^2)} = 78 \Omega$$

$$X_{tb} = \sqrt{Z_{tb}^2 - R_{tb}^2}$$
$$= \sqrt{205^2 - 78^2} = 189.58 \Omega$$

- Dari Rotor tertahan (Blocked Rotor Test)

$$I_{br} = \frac{I_{bra} + I_{brb} + I_{brc}}{3}$$

$$I_{br} = \frac{2.01 + 2.03 + 1.97}{3} = 2.0A$$

$$Z_{br} = \frac{V}{\sqrt{3}I_{br}} = \frac{65}{\sqrt{3} \times 2} = 18.76\Omega$$

$$R_r = \frac{P_{(3\phi)}}{3I_r^2} = \frac{140}{3 \cdot (2^2)} = 11.78\Omega$$

$$X_{br} = \sqrt{Z_{br}^2 - R_{br}^2}$$

$$= \sqrt{18.76^2 - 11.67^2} = 14.6\Omega$$

$$X_r = X_s + X'_r$$

Motor induksi yang dipakai adalah motor induksi dengan rotor sangkar tunggal kelas A, maka secara umum  $X_s$  dan  $X'_r$  diasumsikan sama, sehingga :

$$X_s = X'_r = \frac{1}{2} X_r = \frac{1}{2} \cdot 14.6 = 7.3\Omega$$

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

$$X_{ss} = X_{tb} = X_s + X_m$$

$$X_m = X_{tb} - X_s$$

$$= 189.58 - 7.3$$

$$= 182.28 \Omega$$

Resistansi stator dapat dipandang sebagai harga DC-nya maka resistansi rotor dapat ditentukan sebagai berikut :

$$R = R_r - R_s$$

$$= 11.67 - 5.49$$

$$= 6.18$$

$$X_r = X'_r + X_m$$

$$X_r = 7.3 + 182.58 = 189.58\Omega$$

$$R'_r = R \left( \frac{X_r}{X_m} \right)^2$$

$$= 6.18 \cdot \left( \frac{189.58}{182.28} \right)^2 = 6.68 \Omega$$

**Tabel 4-4**

**Hasil Perhitungan Pengujian Parameter Motor Induksi Tiga Phasa**

rs	rr	Xls	xlr	xm
5.49	6.68	7.3	7.3	182.28

Untuk menghitung besarnya nilai induktansi stator  $L_s$  nilai, induktansi Rotor  $L_r$  dan nilai induktansi bersama adalah :

$$X_s = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_s$$

maka

$$L_s = \frac{X_s}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

$$= \frac{7.3}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.023 \text{ H}$$

Karena  $X_s = X_r$  maka nilai  $L_s = L_r$

Untuk besarnya nilai induktansi bersama

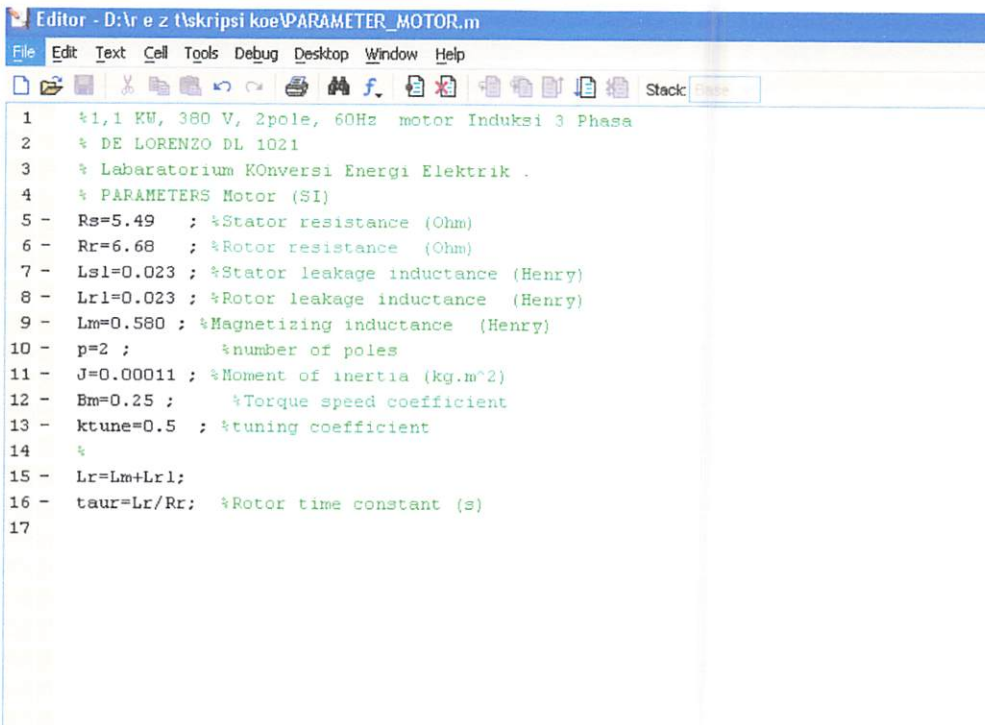
$$L_m = \frac{X_m}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

$$= \frac{182.28}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.580 \text{ H}$$

## 4.3 Analisa Hasil Simulasi

### 4.3.1 Tampilan Program-Mfiles Parameter Motor

Dengan menggunakan parameter yang telah dihitung melalui pengujian dan name plate motor maka kita dapat melakukan analisa untuk melihat respons kecepatan motor terhadap adanya perubahan besarnya inputan torsi beban yang bervariasi dan tanpa adanya torsi beban atau  $T_l = 0$  Nm.

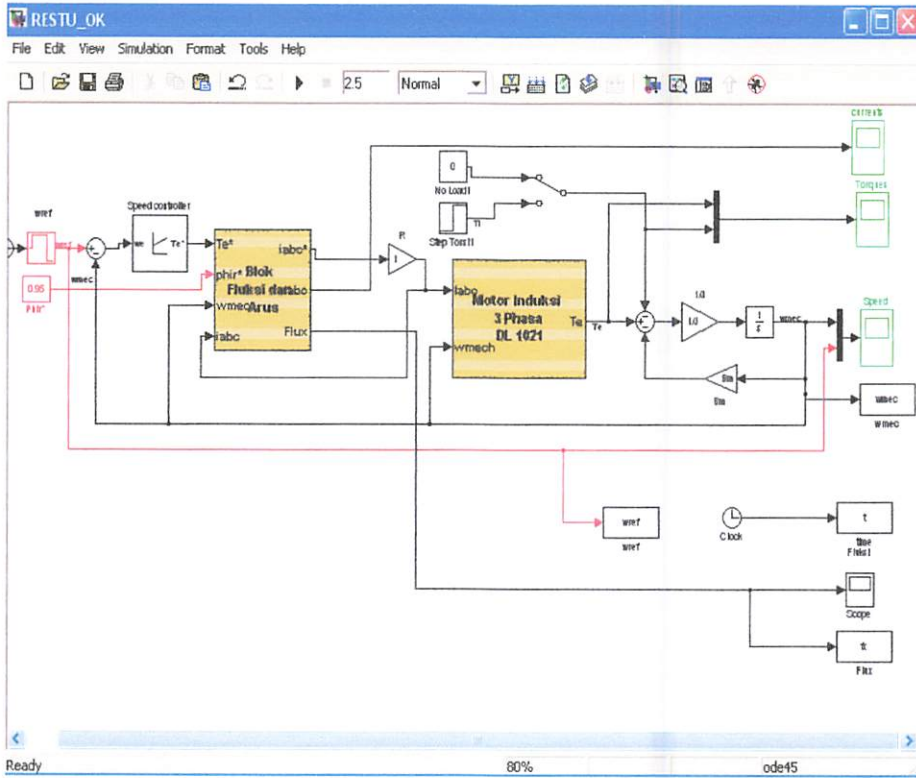


```
Editor - D:\r e z \t\skripsi koe\PARAMETER_MOTOR.m
File Edit Text Cell Tools Debug Desktop Window Help
[Icons] Stack

1 %1,1 KW, 380 V, 2pole, 60Hz motor Induksi 3 Phasa
2 % DE LORENZO DL 1021
3 % Labaratorium KONversi Energi Elektrik .
4 % PARAMETERS Motor (SI)
5 - Rs=5.49 ; %Stator resistance (Ohm)
6 - Rr=6.68 ; %Rotor resistance (Ohm)
7 - Ls1=0.023 ; %Stator leakage inductance (Henry)
8 - Lr1=0.023 ; %Rotor leakage inductance (Henry)
9 - Lm=0.580 ; %Magnetizing inductance (Henry)
10 - p=2 ; %number of poles
11 - J=0.00011 ; %Moment of inertia (kg.m^2)
12 - Bm=0.25 ; %Torque speed coefficient
13 - ktune=0.5 ; %tuning coefficient
14 %
15 - Lr=Lm+Lr1;
16 - taur=Lr/Rr; %Rotor time constant (s)
17
```

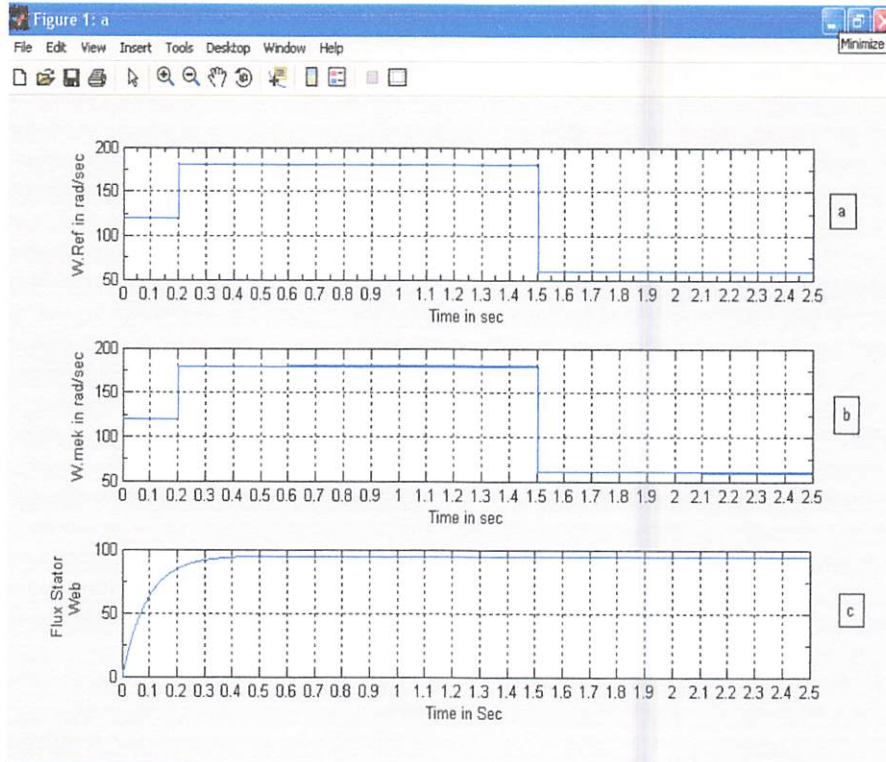
**Gambar 4-1**  
**Tamplan M-Files Parameter Motor**

### 4.3.2 Simulasi Pada saat Torsi Beban = 0



**Gambar 4-2**  
**Blok Simulink Untuk  $T_l = 0$**

### 4.3.3 Analisa Hasil Simulasi Untuk Torsi Beban = 0 Nm

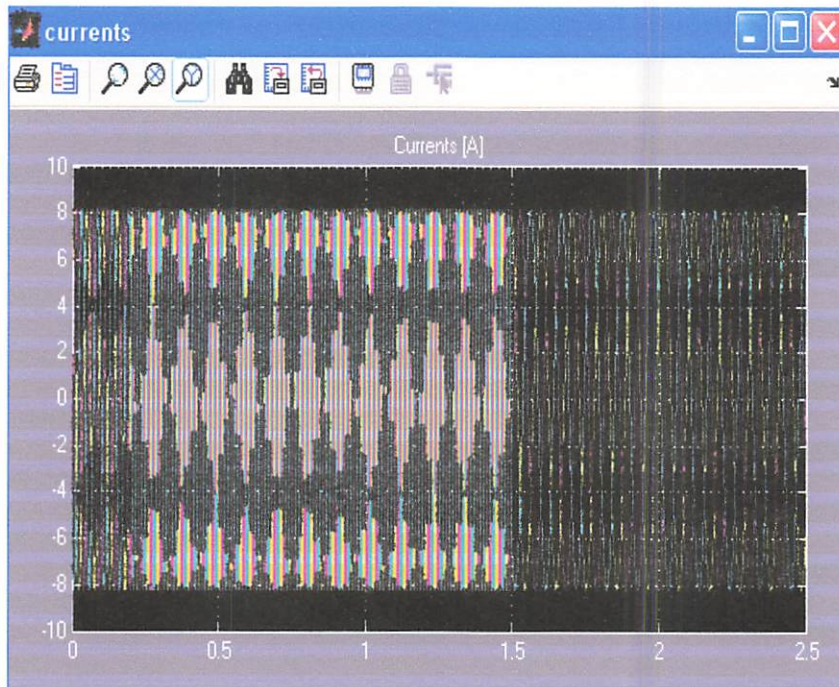


**Gambar 4-3**

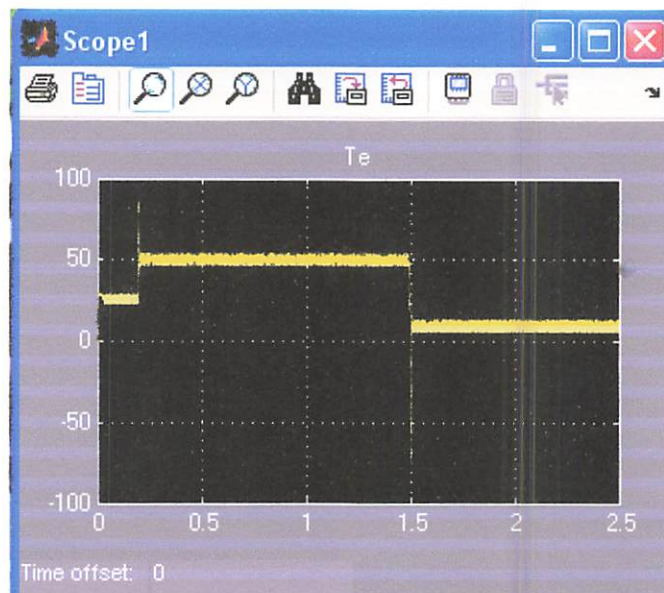
#### **Hasil Simulasi Kecepatan Referensi, Kec Mekanik, dan Flux Stator**

Hasil Simulasi untuk gambar 4-3 a maka dapat dilihat bahwa kecepatan referensi yaitu pada  $t=0$  s sampai dengan  $t=0.2$  s adalah 120 rad/sec dan pada  $t=0.2$  s sampai dengan  $t= 1,5$  s kecepatannya adalah 180 rad/sec dan pada  $t=1.5$  s sampai 2.5 s adalag 60 rad/sec.

Pada gambar 4-3 b kecepatan motor terlihat mengikuti kecepatan referensi sehingga pengaturan kecepatan telah berjalan sesuai dengan yang diinginkan. Untuk gambar 4-3 c terlihat flux dari stator mencapai nilai maximum sebesar 97,75 web.



**Gambar 4-4**  
**Hasil Simulasi Arus Pada Kondisi  $T_l=0$**



**Gambar 4-5**  
**Hasil Simulasi Torsi Eleektik Pada Kondisi  $T_l=0$**

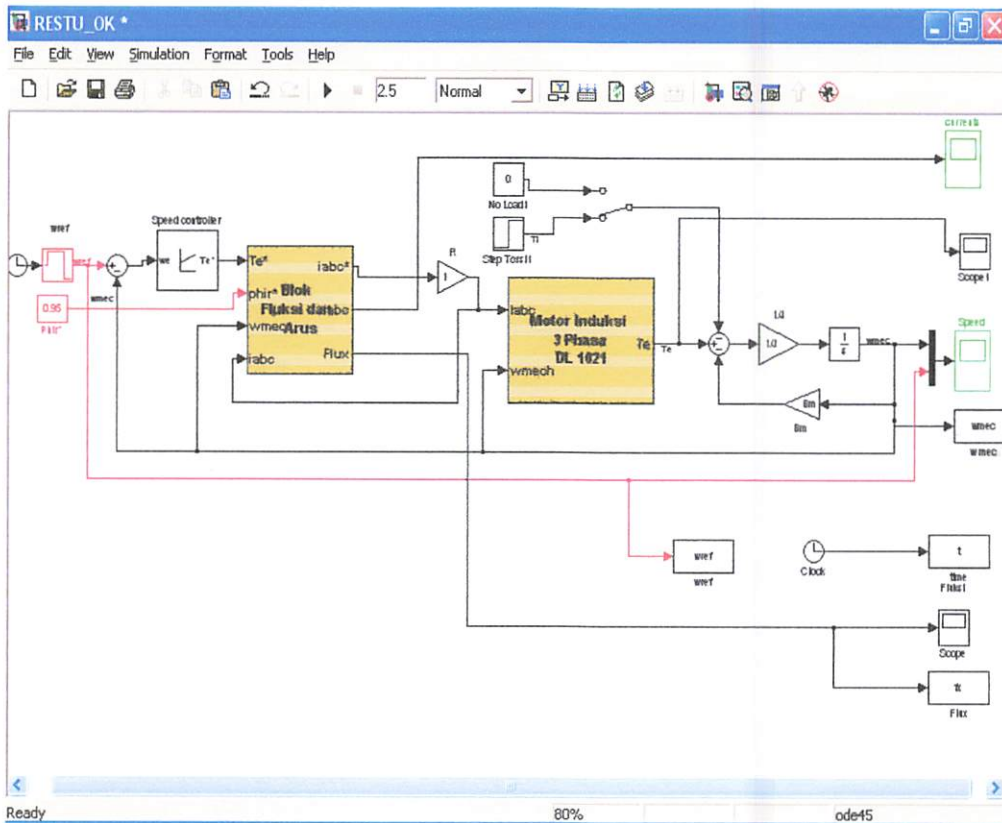
Dari gambar 4-4 Arus fasa motor adalah 8.2 Ampere, dan untuk gambar 4-5 torsi elektrik ketika tanpa beban mengalami transient dari  $t=0$  sampai  $t=0.2s$  sesudah itu menjadi stabil pada  $t=0.2$  sampai  $t=1.5$  sebesar 50 Nm dan pada saat  $t=1.49$  s sampai 1.5 s mengalami transient dan menjadi stabil sebesar 13.9 Nm sampai dengan  $t= 2.5s$ . Perubahan torsi ini dipengaruhi oleh perubahan kecepatan dimana terlihat untuk  $t$  yang sama dengan perubahan kecepatan maka terlihat juga adanya perubahan nilai torsi elektrik dari motor induksi.

**Tabel 4-5**  
**Data Hasil Simulasi Tanpa Beban**

<b>Time (s)</b>	<b>Nr ref (rad/sec)</b>	<b>Nr ( rad/sec )</b>	<b>I (A)</b>	<b>Te (Nm)</b>
<b>0 - 0.2</b>	<b>120</b>	<b>120</b>	<b>8.2</b>	<b>39</b>
<b>0.2 - 0.9</b>	<b>180</b>	<b>180</b>	<b>8.2</b>	<b>50</b>
<b>0.9 - 1.01</b>	<b>180</b>	<b>125-180</b>	<b>8.2</b>	<b>250</b>
<b>1.01 - 1.5</b>	<b>180</b>	<b>180</b>	<b>8.2</b>	<b>250</b>
<b>1.5 - 2.5</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>8.2</b>	<b>200</b>

### 4.3.4 Simulasi Untuk Torsi Luar Yang Berubah-Ubah

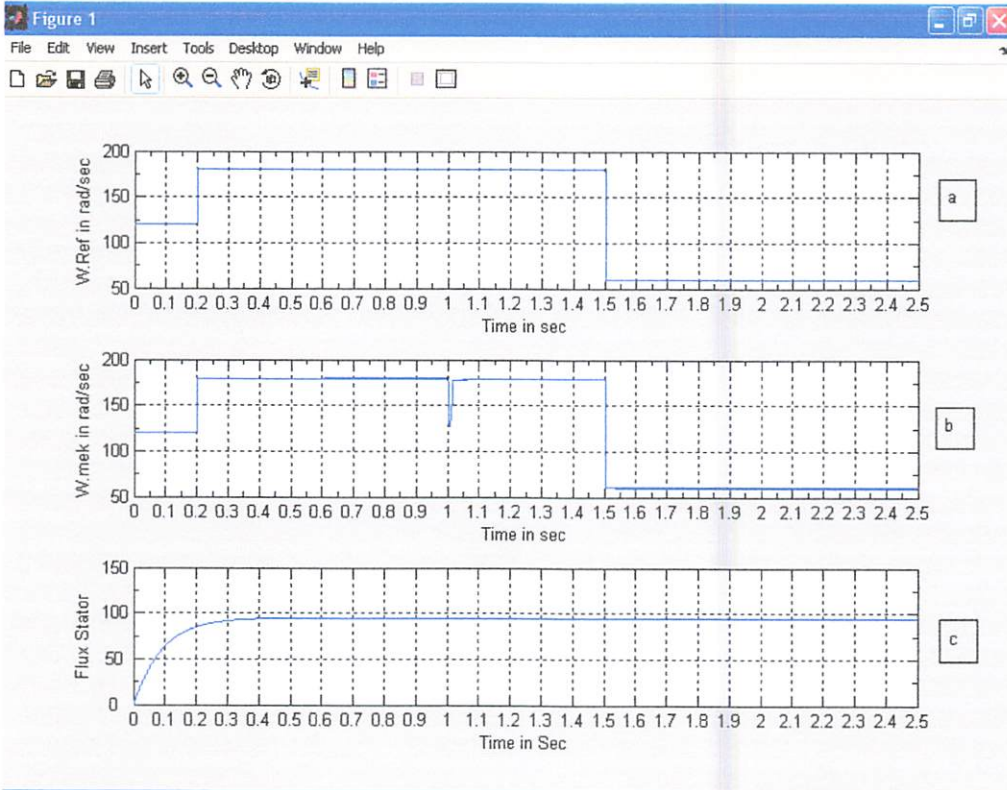
Dengan memberi inputan torsi beban pada motor induksi (0-200 Nm) maka akan dilihat apakah kecepatan motor bisa dijaga konstan atau mengikuti kecepatan referensi pada awal motor dijalankan.



Gambar 4-6

Blok Simulink Untuk Torsi Yang Berubah-Ubah

### 4.3.5 Analisa Hasil Simulasi Untuk Torsi Yang Berubah-Ubah

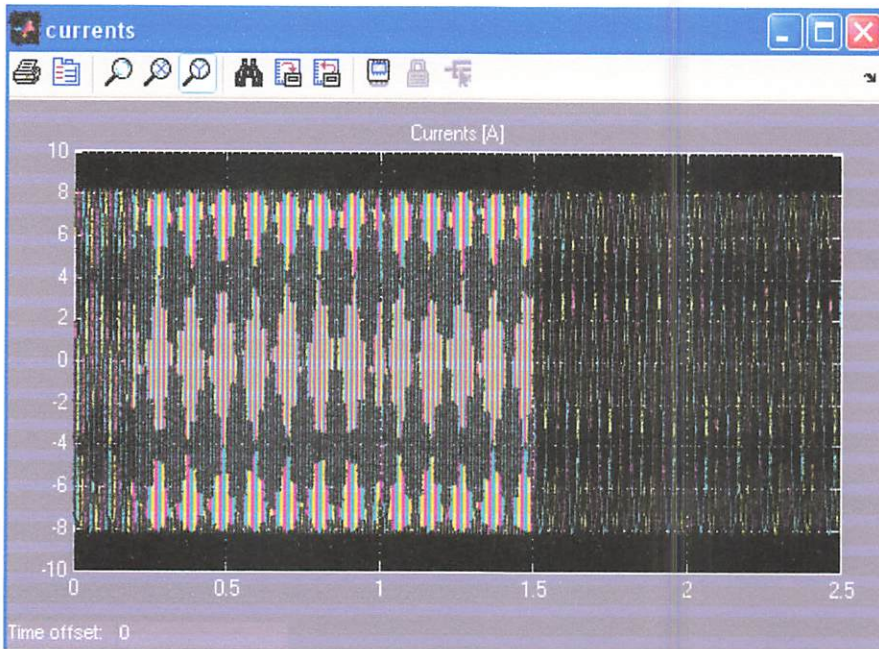


**Grafik 4-7**

#### **Hasil Simulasi Kecepatan Referensi, Kecepatan Mekanik, dan Flux Stator**

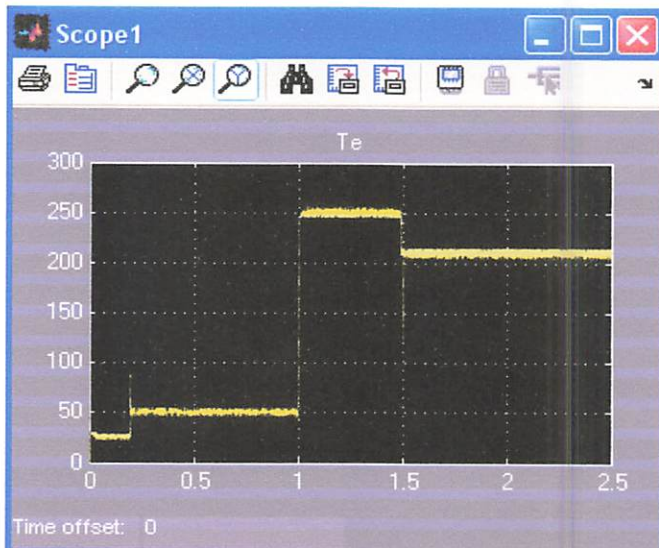
Dari gambar 4-7 a maka dapat dilihat kecepatan referensi sama dengan percobaan pada simulasi yang pertama dimana  $T_l=0$ , Hasil Simulasi untuk gambar 4-3 a dapat dilihat bahwa kecepatan referensi yaitu pada  $t=0$  s sampai dengan  $t=0.2$  s adalah 120 rad/sec dan pada  $t=0.2$  s sampai dengan  $t= 1,5$  s kecepatannya adalah 180 rad/sec dan pada  $t=1.5$  s sampai 2.5 s adalah 60 rad/sec. Pada gambar 4-7 b maka kecepatan motor dapat mengikuti kecepatan referensi. Kecuali pada saat  $t=0.9$  s sampai  $t=1.1$  s kecepatan motor mengalami transient dimana hal ini disebabkan karena adanya torsi luar yang diberi inputan ke motor sebesar 200 Nm setelah  $t=1.2$  s kecepatan motor kembali mengikuti

kecepatan referensi walaupun mengalami sedikit perubahan karena adanya penambahan beban. Untuk fluksi stator mengalami perubahan dari  $t=0$  sampai  $t=0.5$  s dan setelah itu mengalami kondisi yang konstan.



**Gambar 4-8**

**Hasil Simulasi Arus Pada Torsi Yang berubah-ubah**



**Gambar 4-9**

**Hasil Simulasi Torsi Elektrik Pada Torsi Yang berubah-ubah**

Dari gambar 4-8 dapat terlihat arus stator dimana besarnya adalah 8.2 ampere. Untuk Gambar 4-9 torsi elektrik motor menjadi naik akibat adanya perubahan torsi beban yang berubah-ubah dimana pada saat  $t=0$  s sampai  $t=0.2$  torsi elektrik sebesar 39 Nm dan dari  $t=0.21$  s sampai  $t=1$  sebesar 50 Nm dan pada  $t=1$  sampai 1.5 s sebesar 250 Nm dan pada  $t=1.5$  sampai 2.5 s torsi elektrik sebesar 200 Nm.

Dari kedua simulasi yang dijalankan dapat dilihat bahwa ketika motor dijalankan tanpa torsi luar maka kecepatan motor langsung mengikuti kecepatan referensi, tetapi pada saat motor dijalankan dengan inputan torsi luar maka kecepatan motor mengalami sedikit perubahan akibat torsi beban yang berubah-ubah. Pada saat motor dijalankan tanpa beban flux stator mengalami kondisi transient yang lebih cepat yaitu dari  $t=0$  s sampai  $t=0.35$  s, sedangkan ketika motor dibebani dengan torsi luar dari starting awal maka flux stator mengalami kondisi transient yang lebih lama yaitu dari  $t=0$  sampai  $t=0.5$  s.

Adanya inputan torsi luar yang berubah-ubah hanya mempunyai pengaruh yang sedikit terhadap kecepatan motor, hal ini disebabkan karena adanya pengontrolan vektor dimana dengan menjaga besarnya arus dan flux yang masuk dalam motor induksi maka kecepatan motor tetap bisa dijaga konstan. Pengontrolan vektor ini bekerja berdasarkan pengontrolan arus dan flux yang masuk dalam stator motor induksi. Perbandingan kecepatan mekanik motor dengan kecepatan referensi setelah mengalami penyesuaian oleh speed controller maka besarnya arus dan flux dapat dijaga konstan.

**Tabel 4-6**  
**Hasil Simulasi Berbeban**

<b>Time (s)</b>	<b>Nr ref (rad/sec)</b>	<b>Nr ( rad/sec )</b>	<b>I (A)</b>	<b>Te (Nm)</b>
<b>0 - 0.2</b>	<b>120</b>	<b>120</b>	<b>8.2</b>	<b>39</b>
<b>0.2 - 1</b>	<b>180</b>	<b>180</b>	<b>8.2</b>	<b>50</b>
<b>1 - 1.5</b>	<b>180</b>	<b>180</b>	<b>8.2</b>	<b>50</b>
<b>1.5 - 2.5</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>8.2</b>	<b>13.9</b>

## **BAB III**

### **METODE VEKTOR KONTROL**

Pengendalian motor induksi tiga fasa dengan kontrol vektor adalah suatu cara yang digunakan untuk memperbaiki unjuk kerja motor. Unjuk kerja yang buruk menyebabkan penggunaan motor menjadi terbatas. Seperti diketahui motor induksi relatif murah, kokoh dan mudah perawatannya namun mempunyai masalah dalam pengaturan kecepatannya. Metoda kontrol vector dilakukan dengan cara mengestimasi fluks rotor dan posisi rotor , untuk mengendalikan fluks rotor dan kecepatan rotor digunakan pengendali PI. Pengendalian motor induksi tiga fasa dengan kontrol vektor adalah suatu cara yang digunakan untuk memperbaiki unjuk kerja motor.

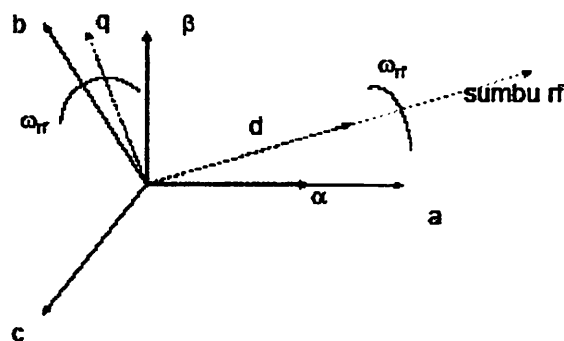
Pengendalian motor induksi dengan kontrol vector mulai diperkenalkan pada periode tahun 1960an hal ini merupakan suatu revolusi dalam pengendalian putaran motor induksi, sehingga menjadikannya suatu pilihan yang ekonomis dalam menggantikan penggunaan motor arus searah. Motor arus searah mempunyai karakteristik yang dapat didekati oleh motor induksi. Tanggapan transien yang serupa dengan motor arus searah, dapat diperoleh pada motor induksi dengan melakukan pemisahan komponen arus penghasil torsi dengan komponen arus penghasil fluks. Konsep pemisahan ini merupakan prinsip pengendalian dengan kontrol vektor. Terdapat dua metoda kontrol vektor, yaitu *direct vector controller* dan *indirect vector controller*. Pada *direct vector controller* , vektor fluks rotor diukur dengan menggunakan sensor, seperti sensor

Hall, sedangkan pada indirect vector controller digunakan sensor posisi rotor seperti encoder, untuk memperkirakan posisi fluks rotor. Pengendali PI digunakan pada pengendalian fluks dan kecepatan motor, dan simulasi dilakukan dengan bantuan MATLAB –Simulink 7.0

Kontrol vektor dikenal sebagai kontrol berorientasi medan, yang diterapkan pada motor induksi sehingga menghasilkan unjuk kerja yang mendekati unjuk kerja motor arus searah. Pada motor arus searah pemisahan hubungan antara torsi dengan fluks dapat dilakukan dengan menyusun model rangkaian penguat motor, sedangkan pada motor induksi, torsi dan fluks hanya dapat dipisahkan dengan membuat rangkaian tambahan diluar sistem, yaitu melalui kontrol vektor [3].  $i_d = \lambda$  Konsep dasar kontrol vektor, bertujuan memisahkan *komponen arus penghasil fluks* dengan *komponen arus penghasil torsi*.

### 3.1 Blok Kontrol Vektor

Untuk mengendalikan arus stator, digunakan sensor kecepatan dan sensor arus fasa, kemudian arus stator yang terukur ditransformasikan dalam sumbu d-q menjadi  $i_d$  dan  $i_q$ , yang digunakan untuk mengatur arus fluks rotor dan arus torsi.



Gambar 3.1. Hubungan Sumbu 3 fasa, sumbu  $\alpha$ - $\beta$  dan d-q<sup>[5]</sup>

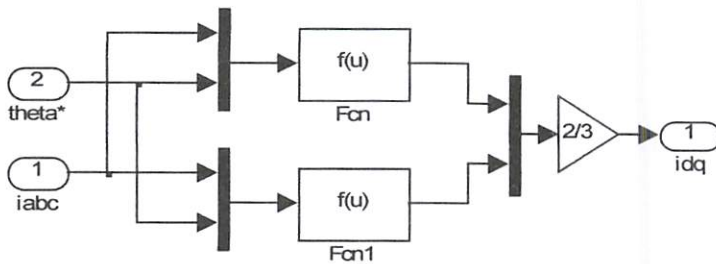
Torsi electric pada motor induksi terjadi karena adanya interaksi antara arus pada rotor dan flux pada stator

1. Abc to Dq Conversion blocks

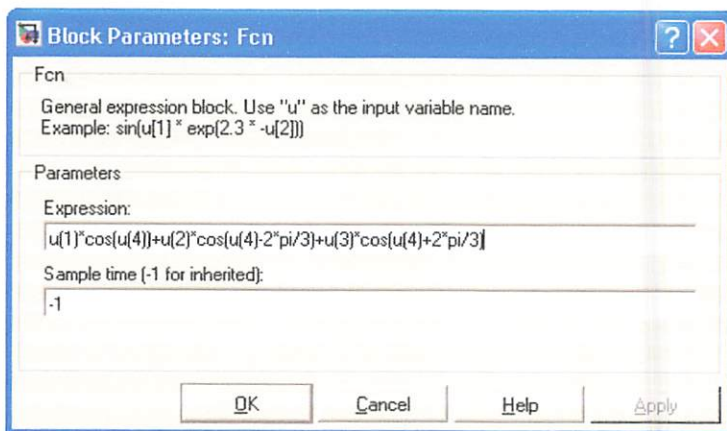
Untuk mengubah tegangan tiga fasa abc menjadi tegangan qd pada model *stator reference frame* dengan menggunakan transformasi *clarke*

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{1}{2}\sqrt{3} & -\frac{1}{2}\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

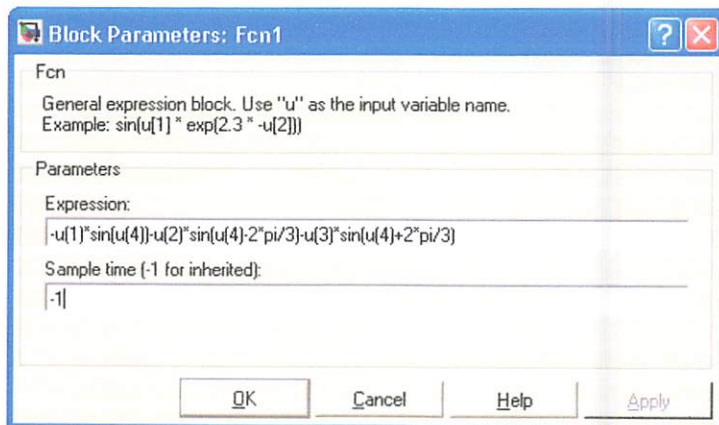
untuk blok smulinknya dibentuk



**Gambar 3.2**  
**Blok Simulink abc to DQ**



**Gambar 3.3**  
**Blok Parameter Fcn**



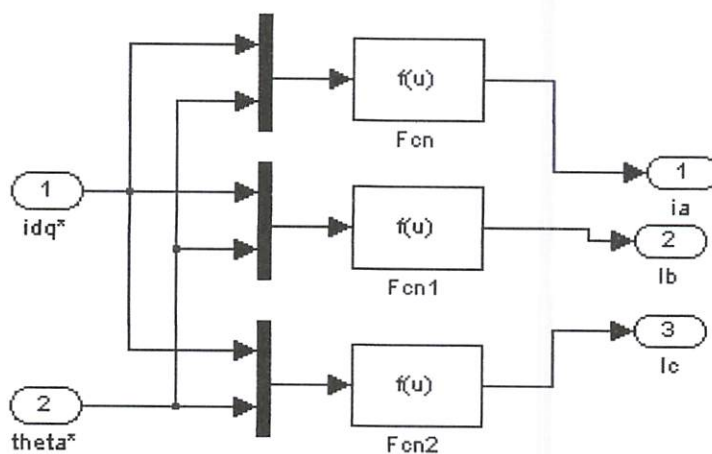
**Gambar 3.4**

**Blok Parameter Fcn 1**

2. DQ to Abc Conversion block

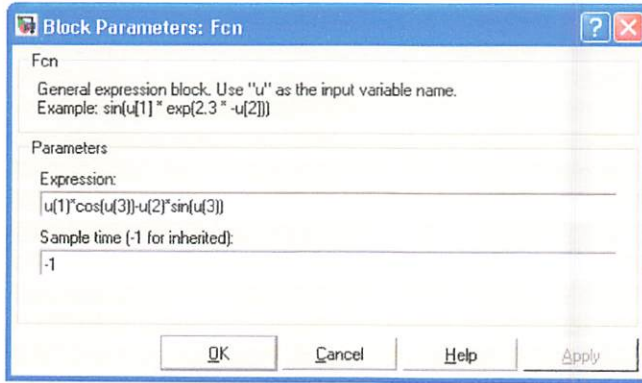
sumber 2 phasa harus ditransformasikan dalam bentuk 3 phasa dengan menggunakan transformasi *park* yaitu:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2}\sqrt{3} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2}\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dq^*} \\ i_{dq^*} \\ i_{dq^*} \end{bmatrix}$$

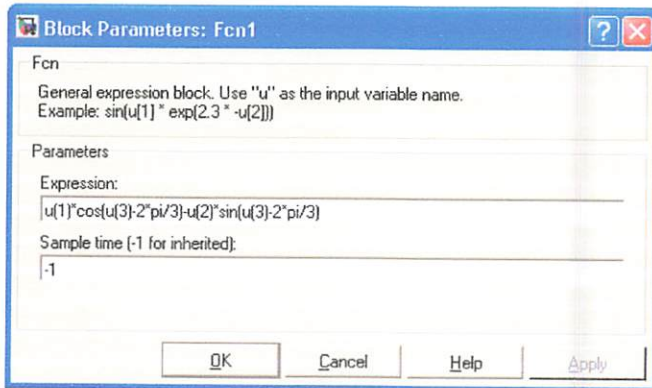


**Gambar 3.5**

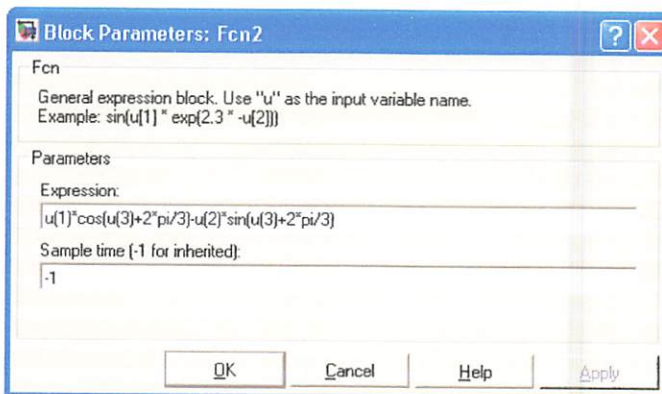
**Blok Simulink DQ to abc**



**Gambar 3.6**  
**Blok Parameter Fcn**



**Gambar 3.7**  
**Blok Parameter Fcn 1**



**Gambar 3.8**  
**Blok Parameter Fcn 2**

Vektor fluks rotor hanya tergantung dari fluks rotor disumbu d,  $\lambda_{dr}^e$  konstan yaitu dengan membuat fluks disumbu q,  $\lambda_{qr}^e$  menjadi nol. Vektor fluks rotor dapat dikendalikan dengan mengatur arus  $i_{sd}^e$  melalui pengendali PI. Arus keluaran yang diinginkan dibatasi sesuai dengan arus nominal motor. Pengendalian kecepatan rotor dilakukan dengan mengatur torsi yaitu dengan mengatur arus  $i_{sd}^e$  melalui pengendali PI. Transformasi kerangka acuan stator  $\alpha\beta$  kedalam kerangka acuan eksitasi d-q, ditunjukkan pada gambar di diatas, sumbu eksitasi d-q berputar berlawanan jarum jam dengan kecepatan  $\omega_r$ .

Berdasarkan persamaan diatas maka blok simulink nya untuk perhitungan arus dan fluksi sebagai dlok kontrolnya adalah

- Untuk perhitungan Fluksi

$$\phi = \frac{L_m \times i_d}{1 + \tau \cdot s}$$

$$\tau = \frac{L_r}{R_r}$$

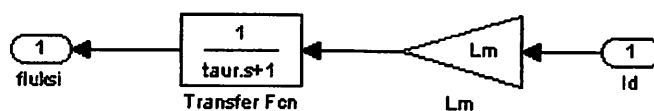
dengan :  $L_m$  = induktansi magnetik

$I_d$  = arus *direct*

$\tau$  = taur

$L_r$  = induktansi rotor

$R_r$  = reaktansi rotor



**Gambar 3.9**  
**Blok Simulink Perhitungan Fluksi**

- Untuk perhitungan posisi rotor

$$\omega_r = \frac{Lm \times Iq}{(\tau \times \phi \times ktune + 1e - 3)}$$

$$\theta = \int(\omega_r + \omega_m) \quad \text{dengan : Ktune = koefisien tuning}$$

$Iq$  = arus *quadrature*

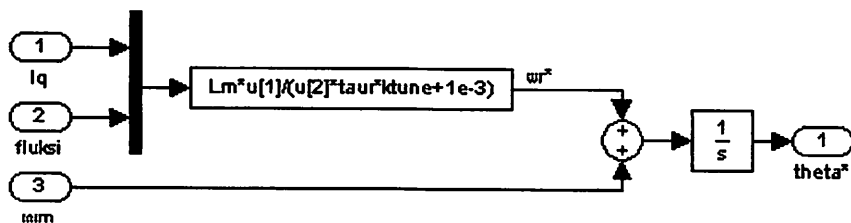
$\tau$  = taur

$\Phi$  = fluksi

$\omega_r$  = Kecaptan sudut rotor

$\omega_m$  = Kecepatan mekanik

maka blok simulink dibentuk



**Gambar 3.10**

### Blok Simulink Perhitungan Torsi

- Untuk arus pada sumbu D ( $I_d$ ) dan arus Q ( $I_q$ )

$$Iq = \left(\frac{2}{3}\right) \times \left(\frac{2}{p}\right) \times \left(\frac{Lr}{Lm}\right) \times \left(\frac{Te}{\phi + 1e - 3}\right)$$

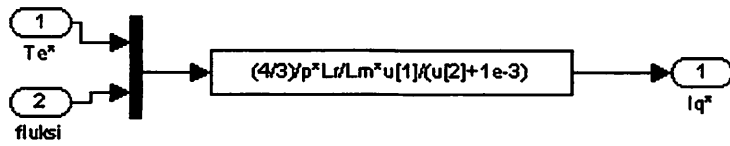
dengan :  $Lm$  = induktansi magnetik

$Te$  = torsi elektromagnetik

$\Phi$  = fluksi

$Lr$  = induktansi rotor

$Rr$  = reaktansi rotor



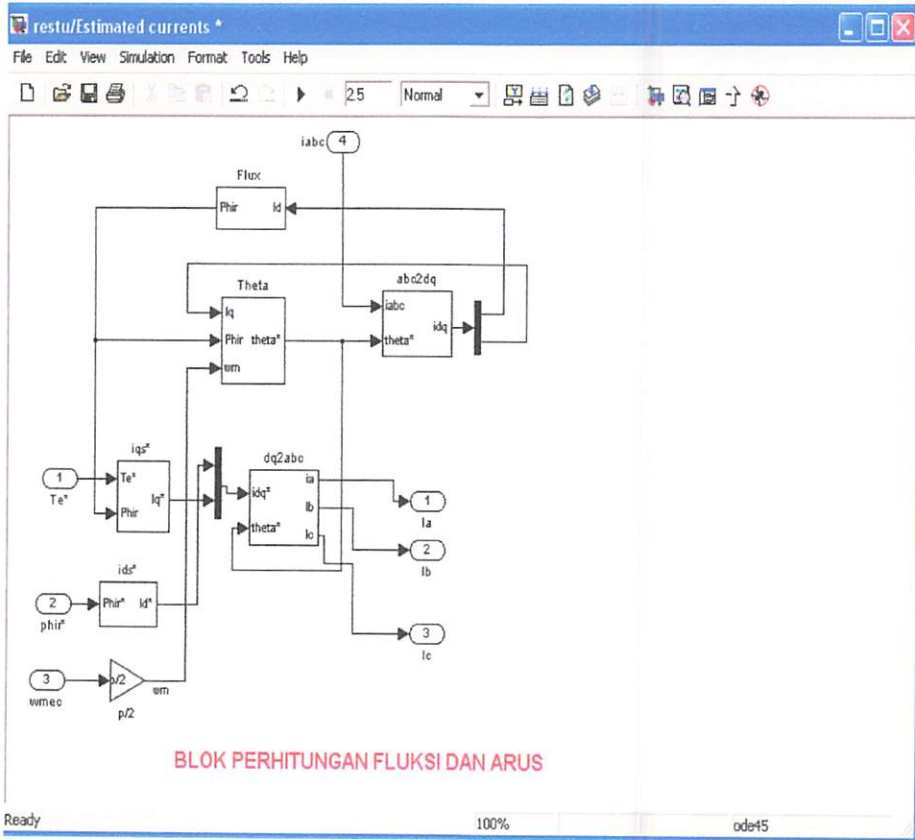
**Gambar 3.11**  
**Blok Simulink Arus Pada Sumbu Q**

$$I_d = \frac{\text{fluksi} *}{L_m}$$



**Gambar 3.12**  
**Blok Simulink Arus Pada Sumbu D**

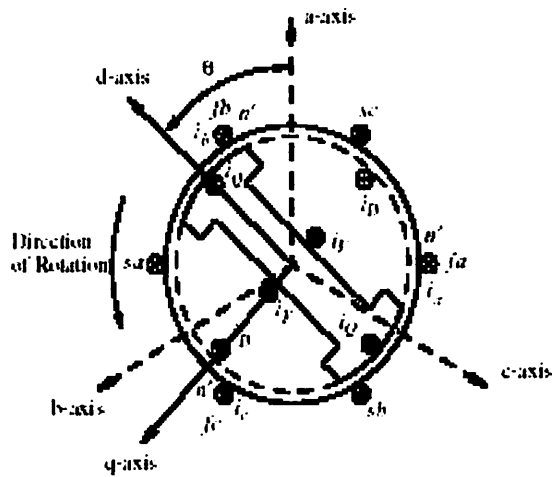
Jadi secara keseluruhan blok untuk perhitungan Fluksi dan Arus adalah sebagai berikut:



**Gambar 3.13**  
**Blok Simulink Perhitungan Fluksi dan Arus**

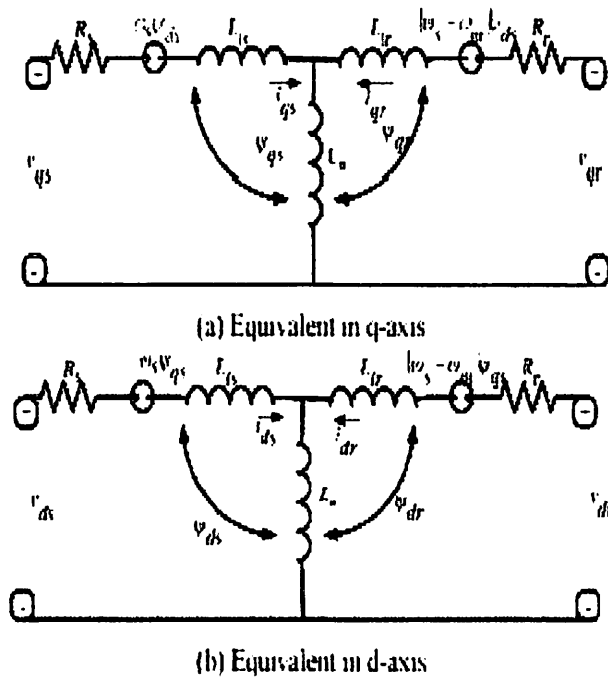
### 3.2 Model Motor Induksi 3 phasa

Untuk mengontrol motor induksi 3 phasa dengan system control vector maka motor induksi harus dimodelkan dalam bentuk persamaan dynamics motor induki 3 phasa. Untuk memeodelkan motor induksi 3 phasa tersebut harus diubah dalam bentuk Dq



**Gambar 3.14**  
**Diagram sumbu DQ motor Induksi 3 fase<sup>[5]</sup>**

Sedangkns untuk persamaan model matematis kontrol vektor motor induksi tiga fase dengan kerangka acuan eksitasi d-q, mempunyai persamaan tegangan stator yang dinyatakan oleh persamaan 16<sup>[2]</sup> :



**Gambar 3.15**  
**Rangkaian Ekivalen DQ Motor Induksi<sup>[2]</sup>**

$$\frac{dF_{qs}}{dt} = \omega_b \left[ v_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b} \cdot F_{ds} + \frac{Rs}{x_{ls}} (F_{mq} + F_{qs}) \right] \dots\dots\dots (2.20)$$

$$\frac{dF_{ds}}{dt} = \omega_b \left[ v_{ds} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \cdot F_{qs} + \frac{Rs}{x_{ls}} (F_{md} + F_{ds}) \right] \dots\dots\dots (2.21)$$

$$\frac{dF_{qr}}{dt} = \omega_b \left[ v_{qr} - \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} \cdot F_{dr} + \frac{Rs}{x_{ls}} (F_{mq} - F_{qr}) \right] \dots\dots\dots (2.22)$$

$$\frac{dF_{dr}}{dt} = \omega_b \left[ v_{dr} + \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} \cdot F_{qr} + \frac{Rs}{x_{ls}} (F_{mq} - F_{dr}) \right] \dots\dots\dots (2.23)$$

$$F_{mq} = X_{ml} \left[ \frac{F_{qs}}{X_{ls}} + \frac{F_{qr}}{X_{lr}} \right] \dots\dots\dots (2.24)$$

$$F_{md} = X_{ml} \cdot \left[ \frac{F_{ds}}{X_{ls}} + \frac{F_{dr}}{X_{lr}} \right] \dots\dots\dots (2.25)$$

$$X_{ml} = \frac{1}{\left( \frac{1}{X_m} + \frac{1}{X_{ls}} + \frac{1}{X_{lr}} \right)} \dots\dots\dots (2.26)$$

$$i_{qs} = \frac{1}{x_{ls}} \cdot (F_{qs} - F_{mq}) \dots\dots\dots (2.27)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{X_{ls}} \cdot (F_{ds} - F_{md}) \dots\dots\dots (2.28)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{X_{lr}} \cdot (F_{qr} - F_{mq}) \dots\dots\dots (2.29)$$

$$i_{dr} = \frac{1}{X_{lr}} \cdot (F_{dr} - F_{md}) \dots\dots\dots (2.30)$$

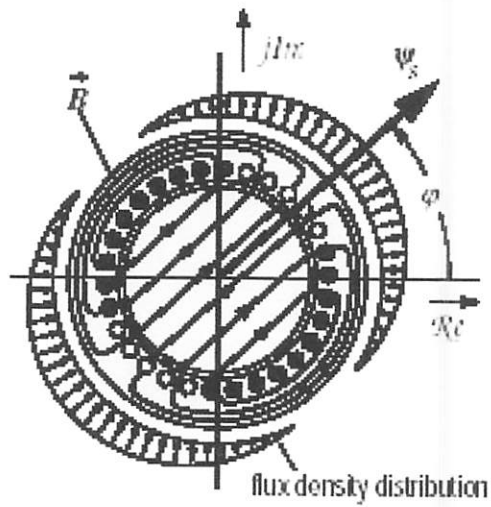
$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{p}{2} \right) \frac{1}{\omega_b} (F_{ds} \cdot I_{ds} - F_{qs} \cdot I_{ds}) \dots\dots\dots (2.31)$$

$$T_e - T_L = J \cdot \left( \frac{2}{p} \right) \frac{d\omega_r}{dt} \dots\dots\dots (2.32)$$

Dimana

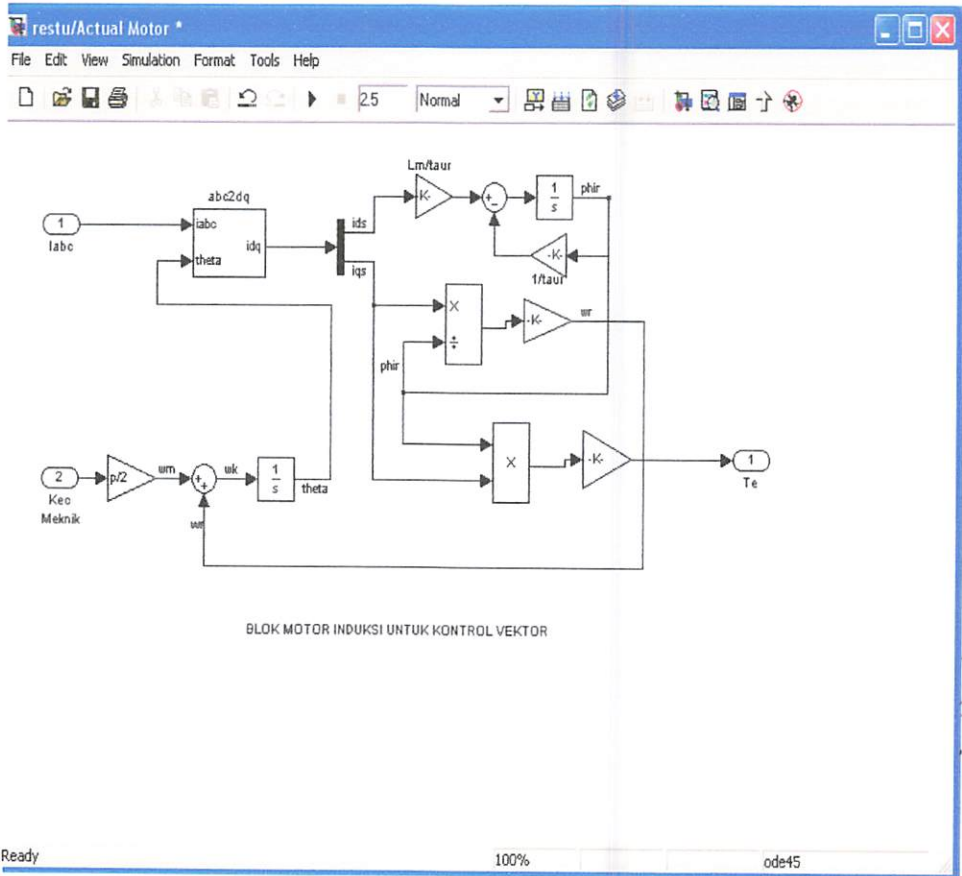
- $d$  : sumbu *direct*
- $q$  : sumbu *quadrature*
- $r$  : rotor variabel
- $F_{ij}$  : fluks
- $V_{qs}, V_{ds}$  : Tegangan stator sumbu q dan d
- $F_{mq}, F_{md}$  : Fluks Magnetic sumbu q dan d
- $R_r$  : Rotor Resistance
- $R_s$  : Stator Resistance
- $X_{ls}$  : Reaktansi Stator
- $X_{lr}$  : Reaktansi Rotor
- $I_{qs}, I_{ds}$  : Arus stator sumbu q dan d
- $I_{qr}, I_{dr}$  : Arus Rotor sumbu q dan d
- $P$  : Jumlah dari Kutub
- $T_e$  : Torsi Output Elektrik
- $T_L$  : Torsi Beban
- $J$  : Moment Inertia
- $\omega_e$  : Frekuensi elektrik sudut stator
- $\omega_r$  : Kecaptan sudut motor
- $\omega_m$  : Kecepatan mekanik
- $L_r$  : Induktansi rotor
- $L_s$  : Induktansi Stator
- $L_m$  : Induktansi Bersama
- $\Theta$  : Posisi Rotor

Karena suatu uraian yang menyangkut motor induksi, mempertimbangkan 3-fasa yang simetris pada celah udara (air gap) dari motor induksi tersebut. fluksi rotor dapat dinyatakan seperti gambar berikut ini:



**Gambar 3.16**  
**Distribusi Flux<sup>[5]</sup>**

Dengan bantuan MATLAB Simulink maka dibentuk blok simulink dari persamaan diatas



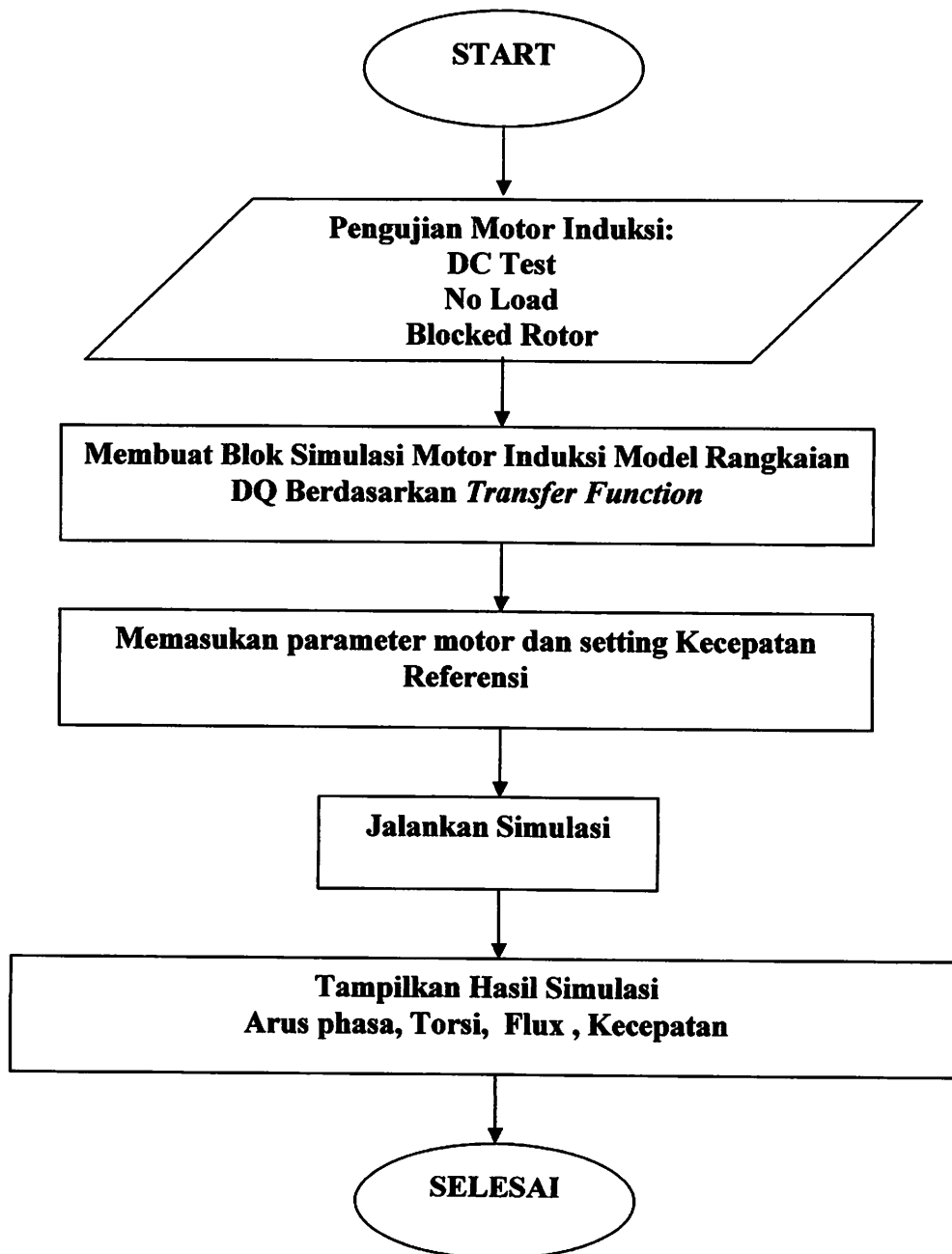
**Gambar 3.17**  
**Blok Simulink Motor Induksi**

### **3.3 Algoritma Program**

#### **3.2.1 Algoritma Pemecahan Masalah Secara Umum**

1. Pengujian Parameter Motor Induksi
  - a. Dc Test
  - b. Beban Nol (*No Load Test*)
  - c. Rotor Tertahan (*Blocked Rotor Test*)
2. Membentuk Blok Simulink Motor Induksi Dalam Bentuk DQ berdasarkan *Transfer Function*.
3. Memasukan parameter motor induksi dan seting kecepatan Referensi untuk Motor
4. Menjalankan simulasi Motor Induksi dengan kecepatan referensi yang telah ditentukan.
5. Menampilkan Hasil Simulasi Arus, Torsi, Kecepatan, Flux Stator

### 3.4 Flowchart penyelesaian masalah secara umum



## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari hasil simulasi dapat ditarik beberapa kesimpulan yaitu :

1. Pada torsi beban sama dengan 0:
  - kecepatan motor terlihat mengikuti kecepatan referensi sehingga pengaturan kecepatan telah berjalan sesuai dengan yang diinginkan.
  - Arus stator adalah 8.2 Ampere, dan ketika tanpa beban torsi elektrik mengalami transient dari  $t=0$  sampai  $t=0.2s$  sesudah itu menjadi stabil pada  $t=0.2$  sampai  $t=1.5$  sebesar 50 Nm dan pada saat  $t=1.49$  s sampai 1.5 s mengalami transient dan menjadi stabil sebesar 13.9 Nm sampai dengan  $t= 2.5s$ . Perubahan torsi ini dipengaruhi oleh perubahan kecepatan dimana terlihat untuk  $t$  yang sama dengan perubahan kecepatan maka terlihat juga adanya perubahan nilai torsi elektrik dari motor induksi.
2. Pada torsi beban yang berubah-ubah:
  - Kecepatan motor dapat mengikuti kecepatan referensi. Kecuali pada saat  $t=0.9$  s sampai  $t=1.1$  s kecepatan motor mengalami transient dimana hal ini disebabkan karena adanya torsi luar

yang diberi inputan ke motor sebesar 200 Nm setelah  $t=1.2$  s kecepatan motor kembali mengikuti kecepatan referensi walaupun mengalami sedikit perubahan karena adanya penambahan beban. Arus stator besarnya adalah 8.2 ampere, dan torsi elektrik motor menjadi naik akibat adanya perubahan torsi beban yang berubah-ubah dimana pada saat  $t=0$  s sampai  $t=0.2$  torsi elektrik sebesar 39 Nm dan dari  $t=0.21$  s sampai  $t=1$  sebesar 50 Nm dan pada  $t=1$  sampai 1.5 s sebesar 250 Nm dan pada  $t=1.5$  sampai 2.5 s torsi elektrik sebesar 200 Nm.

3. Pada saat motor dijalankan tanpa beban, flux stator mengalami kondisi transien pada  $t=0$  s sampai  $t=0.35$  s, sedangkan ketika motor dibebani dengan torsi luar dari starting awal maka flux stator mengalami kondisi transient pada  $t=0$  sampai  $t=0.5$  s. Jadi flux stator pada saat motor dijalankan tanpa beban mengalami kondisi transient lebih cepat dibandingkan saat motor dibebani torsi luar.
4. Pengontrolan vektor ini bekerja berdasarkan pengontrolan arus dan flux yang masuk dalam stator motor induksi. Perbandingan kecepatan mekanik motor dengan kecepatan referensi setelah mengalami penyesuaian oleh speed controller maka besarnya arus dan flux dapat dijaga konstan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, ” **Electric Machinery**”, McGraw-Hill International, fourth edition.
- [2] Burak Ozpineci Leon M. Tobert, **Simulink Implementation of Induction Machine Model – A modular Approach**, IEEE Transacton on Power Electronics 2003,728-734 .
- [3] G K Dubay. **Fundamental of Electrical Drive**.
- [4] G. D. Marques Secção de Máquinas Eléctricas e de Electrónica de Potência Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1096 Lisboa Codex, PORTUGAL **A Computer Application For Teaching And Learning On The Induction Motor Dynamics**.
- [5] Pinewski, peter J. **Implementing A Simple Vector Control, Proceeding of American Control Conference Albuquerque, New Mexico, June 1997**.
- [6] R. Krishan.1998.**Electric Motor Drives Modeling, Analysis and Control**. Prentice hall International Inc.
- [7] Stephen J. Chapman. **Electrical Machinery Fundamentals, McGraw-Hill International Editions,1985**.
- [8] Thomas W. Dwi Hartanto dan Y.W. Agung Prasetyo .2003. **Analisis Dan Desain Sistem Kontrol Dengan MATLAB**. Penerbit ANDI.Yogyakarta.
- [9] www.microchip.com **AC Induction Motor Fundamentals** .
- [10] Zuhail.” **Dasar Teknik Tenaga Listrik**” Penerbit ITB Bandung.

# LAMPIRAN



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

## BERITA ACARA UJIAN SKRIPSI FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

1. **Nama** : Restu Dwi Andika
2. **NIM** : 03.12.059
3. **Jurusan** : Teknik Elektro S-1
4. **Konsentrasi** : Teknik Energi Listrik
5. **Judul Skripsi** : ANALISIS PENGATURAN KECEPATAN MOTOR  
INDUKSI TIGA FASA DENGAN VEKTOR KONTROL  
MENGUNAKAN MATLAB SIMULINK

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

**Hari** : Senin  
**Tanggal** : 03 September 2007  
**Dengan Nilai** : 80,05 (A) *Fy*

### Panitia Ujian Skripsi



Ir. Mochtar Asroni, MSME  
Ketua

Ir. F. Yudi Limpraptono, MT  
Sekretaris

### Anggota Penguji

Ir. Choirul Saleh, MT  
Penguji Pertama

Irrine Budi S., ST. MT  
Penguji Kedua



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

## PERSETUJUAN PERBAIKAN SKRIPSI

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




Hari : Senin  
Tanggal : 03 September 2007

Telah dilakukan perbaikan skripsi oleh :

1. Nama : Restu Dwi Andika
2. NIM : 03.12.059
3. Jurusan : Teknik Elektro
4. Konsentrasi : Teknik Energi Listrik S-1
5. Judul Skripsi : ANALISIS PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA DENGAN VEKTOR KONTROL MENGGUNAKAN MATLAB SIMULINK

Perbaikan meliputi :

No	Materi Perbaikan	Ket.
1	Perbaiki Abstrak, masukkan nilai analisa yang sudah dihasilkan	es
2	Tabelkan Hasil Simulasi	es
3	Pada Kajian pustaka masukkan karaktersistik Motor Induksi	es
4	Judul gambar tidak boleh disingkat	es
5	Dari mana factor koreksi 0,5? Referensi mana? Kenapa?	es

6	Bagaimana hasil simulasi jika tanpa factor koreksi dan di tambah $1e-3$ ?	
7	Diperjelas pembuatan blok transfer functionnya sebelum dimasukkan ke simulink	
8	Transfer finction disesuaikan dengan rumus yang dibuat	

**Anggota Penguji**



**Ir. Choirul Saleh, MT**  
Penguji Pertama



**Irrine Budi S., ST. MT**  
Penguji Kedua

**Dosen Pembimbing**



**Ir. M. Abdul Hamid, MT**  
Pembimbing Pertama



**Ir. Eko Nurcahyo**  
Pembimbing Kedua

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



**ANALISIS PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA  
DENGAN VEKTOR KONTROL MENGGUNAKAN MATLAB SIMULINK**

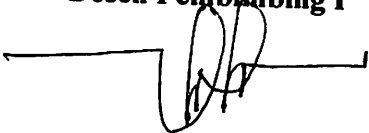
**SKRIPSI**

**Disusun oleh :**  
**RESTU DWI ANDIKA**  
**03.12.059**

**Malang, Agustus 2007**

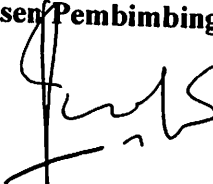
**Diperiksa dan disetujui oleh :**

**Dosen Pembimbing I**



**Ir. M. Abdul Hamid, MT**  
**NIP. Y. 1018800188**

**Dosen Pembimbing II**



**Ir. Eko Nurcahyo**  
**NIP. Y. 1028700172**



## PERMOHONAN PERSETUJUAN SKRIPSI

Yang betanda tangan dibawah ini :

Nama : RESTU DWI ANDIKA  
 NIM : 0212059  
 Semester : VIII (DELAPAN)  
 Fakultas : Teknologi Industri  
 Jurusan : Teknik Elektro S-1  
 Konsentrasi : Teknik Elektronika/ Energi Listrik  
 Alamat :

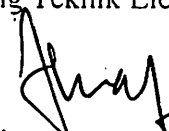
Dengan ini kami mengajukan permohonan untuk mendapatkan persetujuan untuk membuat *SKRIPSI Tingkat Sarjana*. Untuk melengkapi permohonan tersebut, bersama kami lampirkan persyaratan-persyaratan yang harus dipenuhi.

Adapun persyaratan-persyaratan pengambilan *SKRIPSI* adalah sebagai berikut :


1. Telah melaksanakan semua praktikum sesuai dengan konsentrasinya (.....)
2. Telah lulus dan menyerahkan Laporan Praktek Kerja (.....)
3. Telah lulus seluruh mata kuliah keahlian (MKB) sesuai konsentrasinya (.....)
4. Telah menempuh mata kuliah  $\geq 134$  sks dengan IPK  $\geq 2$  dan tidak ada nilai E (.....)
5. Telah mengikuti secara aktif kegiatan seminar skripsi yang diadakan Jurusan (.....)
6. Memenuhi persyaratan administrasi (.....)

Demikian permohonan ini untuk mendapatkan penyelesaian lebih lanjut dan atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

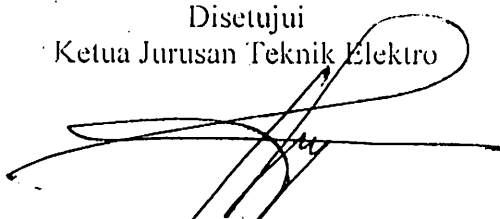
Telah diteliti kebenaran data tersebut diatas  
 Recording Teknik Elektro

  
 (.....)

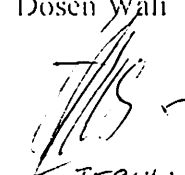
Malang, .....200  
 Pemohon

  
 (.....)

Disetujui  
 Ketua Jurusan Teknik Elektro

  
 Ir. F. Yudi Limpraptono, MT  
 NIP. P. 1039500274

Mengetahui  
 Dosen Wali

  
 (.....)

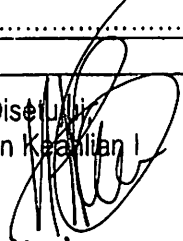
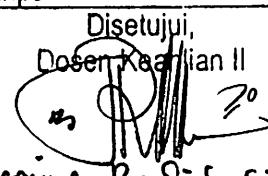
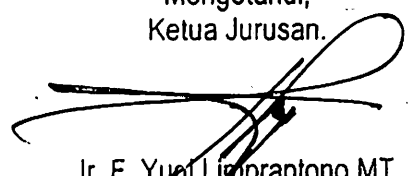
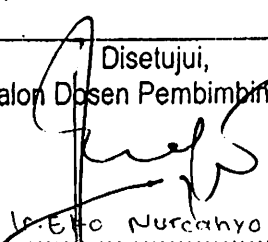
Catatan :

Bagi mahasiswa yang telah memenuhi persyaratan mengambil SKRIPSI agar membuat proposal dan mendapat persetujuan dari Ketua Jurusan/Sekretaris Jurusan T. Elektro S-1

1.  $4.54.5 / 138 = 3.29$  .....
2. -MC .....
3. -pralah kum - huko kontroler .....
- instalasi .....

## BERITA ACARA SEMINAR PROPOSAL SKRIPSI JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1

Konsentrasi : Teknik Energi Listrik/Teknik Elektronika\*)

1.	Nama Mahasiswa: RESTU DWI ANDIKA	Nim: 0312059
2.	Keterangan Pelaksanaan	Tanggal 23 JUNI 2007
		Waktu Tempat Ruang: Seminar
	Spesifikasi Judul (berilah tanda silang**)	
3.	a. Sistem Tenaga Elektrik b. Energi & Konversi Energi c. Tegangan Tinggi & Pengukuran d. Sistem Kendali Industri	e. Elektronika & Komponen f. Elektronika Digital & Komputer g. Elektronika Komunikasi h. lainnya .....
4.	Judul Proposal yang diseminarkan Mahasiswa	PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI 3 FASA DENGAN VEKTOR KONTROL MENGGUNAKAN MATLAB SIMULINK
5.	Perubahan Judul yang diusulkan oleh Kelompok Dosen Keahlian	..... ..... .....
6.	Catatan: .....	
	Catatan: .....	
	Persetujuan Judul Skripsi	
7.	Disetujui, Dosen Keahlian I  Ir. Widodo Pudji M, MT	Disetujui, Dosen Keahlian II  Irine Budi S, ST, MT
	Mengetahui, Ketua Jurusan.  Ir. F. Yuel Limpraptono, MT N.P. P. 1039500274	Disetujui, Calon Dosen Pembimbing ybs  Ir. Eko Nurcahyo

Perhatian:

1. Keterangan: \*) Coret yang tidak perlu  
 \*\*) dilingkari a, b, c, ..... atau g sesuai bidang keahlian



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

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

T. 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

Malang, 24 Juli 2007

Nomor : ITN-400/I.TA/2/2007  
Lampiran : -  
Perihal : **BIMBINGAN SKRIPSI**  
Kepada : Yth. Sdr. Ir. **EKO NURCAHYO**

Dosen Pembimbing  
Jurusan Teknik Elektro S-1  
di  
Malang

Dengan Hormat,  
Sesuai dengan permohonan dan persetujuan dalam proposal Skripsi  
untuk Mahasiswa:

Nama : RESTU DWI ANDIKA  
Nim : 0312059  
Fakultas : Teknologi Industri  
Jurusan : Teknik Elektro S-1  
Kosentrasi : Teknik Energi Listrik S-1

Maka dengan ini pembimbingan tersebut kami serahkan sepenuhnya  
kepada Saudara/I selama masa waktu 6 (enam) bulan, terhitung mulai  
tanggal:

23 Juni 2007 s/d 23 Desember 2007

Sebagai satu syarat untuk menempuh Ujian Sarjana Teknik, Jurusan  
Teknik Elektro-S1

Demikian atas perhatian serta kerjasamanya yang baik kami sampaikan  
terima kasih.



Ketua Jurusan  
Teknik Elektro S-1

Ir. F. Yudi Limpraptono, MT  
NIP. Y. 1039500274

Tembusan Kepada Yth:

1. Mahasiswa Yang Bersangkutan
2. Arsip

Form. S4a



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

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

T. 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

Malang, 24 Juli 2007

Nomor : ITN-399/I.TA/2/2007  
Lampiran : -  
Perihal : **BIMBINGAN SKRIPSI**

Kepada : Yth. Sdr. Ir. **M. ABDUL HAMID, MT**

Dosen Pembimbing  
Jurusan Teknik Elektro S-1  
di  
Malang

Dengan Hormat,  
Sesuai dengan permohonan dan persetujuan dalam proposal Skripsi  
untuk Mahasiswa:

Nama : RESTU DWI ANDIKA  
Nim : 0312059  
Fakultas : Teknologi Industri  
Jurusan : Teknik Elektro S-1  
Kosentrasi : Teknik Energi Listrik S-1

Maka dengan ini pembimbingan tersebut kami serahkan sepenuhnya  
kepada Saudara/I selama masa waktu 6 (enam) bulan, terhitung mulai  
tanggal:

23 Juni 2007 s/d 23 Desember 2007

Sebagai satu syarat untuk menempuh Ujian Sarjana Teknik, Jurusan  
Teknik Elektro-S1

Demikian atas perhatian serta kerjasamanya yang baik kami sampaikan  
terima kasih.



Ketua Jurusan  
Teknik Elektro S-1

Ir. F. Yudi Lingpraptono, MT  
NIP. Y. 1039500274

Tembusan Kepada Yth:

1. Mahasiswa Yang Bersangkutan
2. Arsip

Form. S4a



## FORMULIR BIMBINGAN SKRIPSI

Nama : Restu Dwi Andika  
Nim : 03.12.059  
Masa Bimbingan : 23 Juni 2007 s/d 23 Desember 2007  
Judul Skripsi : Analisis Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 fasa  
Dengan Vektor Kontrol Menggunakan MATLAB  
SIMULINK

NO	Tanggal	Uraian	Paraf Pembimbing
1.	3/8 '07	perbaiki Tujuan; batasan masalah Bab III & Bab IV	RF
2.	7/8 '07	ACC revisi	RF
3.	13/8 '07	ACC masalah seminar	RF
4.	30/8 '07	ACC uraian skripsi	RF
5.			
6.			
7.			
8.			
9.			
10.			

Malang,  
Dosen pembimbing

**Ir. M. Abdul Hamid, MT**  
NIP. Y. 1018800188



## FORMULIR BIMBINGAN SKRIPSI

Nama : Restu Dwi Andika  
Nim : 03.12.059  
Masa Bimbingan : 23 Juni 2007 s/d 23 Desember 2007  
Judul Skripsi : Analisis Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 fasa  
Dengan Vektor Kontrol Menggunakan MATLAB  
SIMULINK

NO	Tanggal	Uraian	Paraf Pembimbing
1.	26/07 '07	Revisi Bab I	
2.	27/07 '07	ACC BAB I	
3.	28/07 '07	Revisi BAB II	
4.	01/08 '07	ACC Bab II	
5.	02/08 '07	Revisi Bab III	
6.	03/08 '07	ACC Bab III	
7.	05/08 '07	Revisi Bab IV, V	
8.	07/08 '07	ACC Bab IV, V	
9.	16/08 '07	ACC material hasil	
10.	29/08 '07	ACC ujian skripsi	

Malang,  
Dosen pembimbing

**Ir. Eko Nurcahyo**  
NIP. Y. 1028700172

# RATINGS AND PERFORMANCE

**EFF I** "HIGH EFFICIENCY" MOTORS TO CEMEP  
 3-phase, 400 V, 50 Hz.(Eurovolt)  
 Duty type : S1 (continuous)  
 Degree of protection : IP 55 (TEFV)  
 Insulation class : F (105K)  
 Temp. Rise : Class B (80K)

Speed, Power Factor, Efficiency, Locked-rotor current  
 Torque values are quoted at 400V, 50 Hz

Type	Full-load data								Starting data				Breakdown torque ratio $M_K/M_N$	Moment of inertia J kgm <sup>2</sup>	Weight approx. B3 kg
	Speed n min <sup>-1</sup>	Current $I_N$ A			Torque $M_N$ Nm	Power Factor Cos φ	Efficiency η %		Locked-rotor current ratio $I_A/I_N$		Locked-rotor torque ratio $M_A/M_N$				
		At 380V	At 400V	At 415V			At 4/4	At 3/4	D.O.L.	Y/Δ	D.O.L.	Y/Δ			

Speed, 3000 min<sup>-1</sup>

AGME 80 2b	2900	2.34	2.31	2.32	3.6	0.82	84.0	83.9	6.2	-	2.7	-	3.3	0.0008	10.4
AGME 90 S 2	2900	3.43	3.42	3.58	4.9	0.74	85.0	85.0	6.3	-	3.1	-	3.7	0.0014	13.5
AGME 90 L 2	2900	4.55	4.48	4.50	7.2	0.82	86.5	86.5	6.6	-	2.9	-	3.5	0.0017	16
AGME 100 L 2	2900	6.1	6.0	5.9	9.9	0.83	87.2	87.2	7.6	-	3.4	-	4.0	0.0031	21
AGME 112 M 2	2910	7.7	7.4	7.2	13	0.88	88.5	88.4	7.2	2.3	2.8	0.9	3.5	0.0048	30
AGME 132 S 2a	2930	11.0	10.7	10.8	18	0.83	89.2	89.2	7.3	2.3	2.8	0.9	3.5	0.0120	39
AGME 132 S 2b	2910	14.1	13.6	13.3	25	0.89	89.8	89.6	7.2	2.3	3.0	1.0	3.4	0.014	44
GME 160 M 2a	2945	20.1	19.5	18.6	36	0.89	91.1	91.0	8.5	2.8	3.4	1.1	3.6	0.034	107
GME 160 M 2b	2945	29.7	28.3	27.6	49	0.83	91.7	91.7	7.5	2.4	3.0	1.0	3.5	0.041	115
GME 160 L 2	2950	33.1	32.3	31.1	60	0.89	92.5	92.6	7.5	2.4	3.1	1.0	3.2	0.051	140
GME 180 M 2	2960	40.3	38.3	37.1	71	0.90	92.6	92.5	8.2	2.6	3.0	1.0	3.5	0.075	179
GME 200 L 2a	2970	54	52	50	96	0.89	93.2	93.1	8.3	2.7	2.7	0.9	3.0	0.13	240
GME 200 L 2b	2970	68	65	63	119	0.88	93.7	93.5	9.1	2.9	3.0	1.0	3.4	0.15	275
GME 225 M 2	2975	80	77	75	144	0.90	93.9	93.7	8.7	2.8	2.7	0.9	3.1	0.23	343
GME 250 M 2	2980	99	94	91	176	0.90	94.1	93.8	8.7	2.8	2.9	0.9	3.0	0.41	450
GME 280 S 2	2980	133	127	124	240	0.90	94.7	94.4	8.0	2.6	2.9	0.9	3.2	0.62	567
GME 280 M 2	2980	156	151	144	288	0.91	95.1	94.9	8.5	2.7	2.7	0.9	3.0	0.74	640

Speed, 1500 min<sup>-1</sup>

AGME 90 S 4	1430	2.70	2.60	2.60	7.3	0.73	84.0	84.0	5.5	-	3.0	-	3.3	0.0025	13.7
AGME 90 L 4	1430	3.60	3.50	3.50	10	0.73	85.0	85.0	5.9	-	3.3	-	3.5	0.0033	17
AGME 100 L 4a	1435	5.0	5.0	5.0	15	0.74	86.5	86.6	5.9	-	2.9	-	3.4	0.0052	20.8
AGME 100 L 4b	1435	6.8	6.6	6.5	20	0.75	87.4	87.6	6.2	-	2.9	-	3.4	0.0068	27.7
AGME 112 M 4	1455	8.4	8.2	8.2	26	0.79	88.6	88.7	6.6	2.1	2.5	0.8	3.3	0.012	36
AGME 132 S 4	1465	11.5	11.2	11.1	36	0.79	89.8	89.0	7.0	2.3	2.8	0.9	3.5	0.026	46
AGME 132 M 4	1465	15.7	15.4	15.2	49	0.78	90.4	90.6	7.1	2.3	2.7	0.9	3.4	0.032	56
GME 160 M 4	1470	22.2	21.0	20.2	71	0.83	91.2	91.3	6.9	2.2	2.8	0.9	3.1	0.072	133
GME 160 L 4	1470	30.1	29.3	29.0	97	0.80	92.0	91.9	7.5	2.4	2.6	0.8	3.5	0.092	161
GME 180 M 4	1475	36.3	34.5	34.0	120	0.84	92.4	92.5	7.7	2.5	3.2	1.0	3.4	0.15	188
GME 180 L 4	1475	43.6	42.5	41.8	142	0.81	92.8	92.8	8.3	2.7	3.7	1.2	3.8	0.17	204
GME 200 L 4	1475	58	55	53	194	0.85	93.4	93.5	8.0	2.6	3.1	1.0	3.6	0.23	260
GME 225 S 4	1475	70	67	66	240	0.85	93.6	93.6	7.2	2.3	3.0	1.0	3.0	0.35	314
GME 225 M 4	1475	84	80	79	291	0.86	94.1	94.1	7.3	2.3	3.0	1.0	3.0	0.44	360
GME 250 M 4	1480	101	96	91	355	0.88	94.3	94.4	7.6	2.5	3.1	1.0	2.9	0.78	451
GME 280 S 4	1485	137	133	131	482	0.86	94.7	94.8	7.9	2.6	2.6	0.8	2.8	1.11	586
GME 280 M 4	1485	164	158	152	579	0.87	95.0	95.2	7.4	2.4	2.9	0.9	3.0	1.32	660





3-phase, 400 V, 50 Hz. (Eurovolt)  
 Duty type : S1 (continuous)  
 Degree of protection : IP 55 (TEFV)  
 Insulation class : F (105K)  
 Temp. Rise : Class B (80K)

# STARTING AND PERFORMANCE

Speed, Power Factor, Efficiency, Locked-rotor current  
 Torque values are quoted at 400V, 50 Hz

Type	Full-load data								Starting data				Breakdown torque ratio M <sub>K</sub> /M <sub>N</sub>	Moment of inertia J	Weight approx. B3 kg
	Speed n	Current			Torque M <sub>N</sub>	Power factor Cos φ	Efficiency		Locked-rotor current ratio		Locked-rotor torque ratio				
		I <sub>N</sub> A					η %		I <sub>A</sub> /I <sub>N</sub>		M <sub>A</sub> /M <sub>N</sub>				
	min <sup>-1</sup>	At 380V	At 400V	At 415V	Nm	At 4/4	At 3/4	D.O.L.	Y/Δ	D.O.L.	Y/Δ				

Speed, 3000 min<sup>-1</sup>

09	AGM 56 2a	2800	0.26	0.26	0.29	0.31	0.74	65.3	65.0	4.1	-	2.7	-	2.8	0.00011	2.7
12	AGM 56 2b	2800	0.39	0.35	0.37	0.41	0.72	66.4	66.0	4.2	-	2.5	-	2.8	0.00012	2.9
18	AGM 63 2a	2820	0.50	0.49	0.50	0.61	0.80	66.3	66.0	4.6	-	2.9	-	2.9	0.00011	3.3
25	AGM 63 2b	2840	0.65	0.66	0.61	0.85	0.79	69.2	69.0	4.5	-	2.5	-	2.9	0.00013	3.7
37	AGM 71 2a	2800	1.10	1.05	1.02	1.26	0.73	67.8	67.5	4.0	-	2.4	-	2.6	0.00026	5.1
55	AGM 71 2b	2780	1.30	1.27	1.25	1.90	0.84	73.5	73.2	4.5	-	2.4	-	2.6	0.00034	6.3
75	AGM 80 2a	2780	1.90	1.80	1.80	2.60	0.83	71.6	71.3	4.5	-	2.4	-	2.6	0.00053	7.8
1	AGM 80 2b	2800	2.50	2.45	2.35	3.80	0.83	78.1	78.0	4.8	-	2.5	-	2.6	0.00066	8.9
5	AGM 90 S 2	2800	3.45	3.30	3.30	5.10	0.84	79.2	79.0	4.9	-	2.2	-	2.5	0.0011	11.4
2	AGM 90 L 2	2840	4.90	4.65	4.60	7.40	0.84	81.6	81.5	5.2	-	2.5	-	2.6	0.0014	13.8
	C.AGM 90 L 2	2840	6.50	6.20	6	10	0.84	83.7	83.6	6.1	-	2.8	-	2.9	0.0017	16
	AGM 100 L 2	2850	6.60	6	6.10	10	0.87	83.2	83.1	6.2	-	2.9	-	3.0	0.0024	17.3
	C.AGM 100 L 2	2870	8.20	8	7.60	13.3	0.85	84.8	84.7	7.0	2.2	3.0	0.97	3.2	0.0031	21
	AGM 112 M 2	2850	8.20	7.80	7.70	13.4	0.87	84.8	84.8	5.9	1.9	2.6	0.84	3.0	0.0039	27
5	C.AGM 112 M 2	2870	11	10.8	10.6	18.3	0.86	86.1	86.0	6.9	2.2	3.0	0.97	3.2	0.0048	30
5	AGM 132 S 2a	2870	11.3	11	10.8	18.4	0.84	85.9	85.8	5.5	1.8	2.5	0.81	2.7	0.0090	33
5	AGM 132 S 2b	2890	15.4	14.7	14.3	24.8	0.85	87.6	87.5	5.8	1.9	2.6	0.84	2.9	0.012	39
	C.AGM 132 M 2	2915	22	21.5	21	36	0.84	89.1	89.2	6.8	2.2	2.8	0.90	2.9	0.018	59
	GM 160 M 2a	2935	22.4	21.5	21	36	0.84	88.5	88.5	7.2	2.3	2.9	0.94	3.0	0.026	96
	GM 160 M 2b	2940	28.5	28	27	49	0.86	89.5	89.5	7.6	2.5	2.8	0.90	3.2	0.034	107
5	GM 160 L 2	2940	35	34	33	60.4	0.87	90.5	90.5	7.6	2.5	2.8	0.90	2.9	0.041	122
	C. GM 160 L 2	2930	41	39	38	71.7	0.88	91.3	91.3	7.3	2.4	2.7	0.87	2.8	0.051	140
	GM 180 M 2	2950	41.5	40	39	71.5	0.88	91.0	91.0	7.6	2.5	2.8	0.90	3.1	0.064	164
	C. GM 180 L 2	2940	56	54	52	97	0.88	92.2	92.2	7.0	2.3	2.7	0.87	2.8	0.082	190
	GM 200 L 2a	2940	56	54	52	97	0.88	91.8	91.7	7.2	2.3	2.6	0.84	2.8	0.10	220
	GM 200 L 2b	2955	68	65	63	120	0.89	92.5	92.5	7.7	2.5	2.6	0.84	2.8	0.13	240
	C. GM 200 L 2	2960	82	78	76	145	0.90	93.0	93.0	8.0	2.6	2.6	0.84	2.8	0.15	275
	GM 225 M 2	2960	82	78	76	145	0.90	93.0	93.0	6.9	2.2	2.3	0.74	2.7	0.19	315
	C. GM 225 M 2	2965	100	95	92	177	0.90	93.3	93.2	7.7	2.5	2.6	0.84	2.9	0.23	343
	GM 250 M 2	2970	100	95	92	177	0.90	93.3	93.2	6.8	2.2	2.4	0.74	2.5	0.32	390
	C. GM 250 M 2	2970	134	128	123	241	0.90	93.9	93.9	6.8	2.2	2.2	0.71	2.4	0.41	450
	GM 280 S 2	2975	136	129	125	241	0.90	93.8	93.8	7.0	2.3	2.3	0.74	2.6	0.50	540
	GM 280 M 2	2970	161	152	148	289	0.91	94.0	94.0	7.0	2.3	2.6	0.84	2.8	0.62	590
	C. GM 280 M 2	2975	196	186	180	353	0.91	94.0	94.0	7.3	2.4	2.2	0.71	2.4	0.74	640
	GM 315 S 2	2980	196	186	180	353	0.91	93.8	93.8	8.3	2.7	1.9	0.61	2.9	1.3	787
	GM 315 M 2a	2980	235	223	216	423	0.91	93.9	93.9	7.5	2.4	1.9	0.61	2.8	1.5	895
	GM 315 M 2b	2980	280	266	258	513	0.92	94.4	94.4	7.4	2.4	1.8	0.58	2.5	2.0	1020
	GM 315 L 2a	2900	320	304	295	593	0.93	94.5	94.4	7.5	2.4	2.0	0.65	2.4	2.2	1120
	GM 315 L 2b	2900	341	330	320	641	0.93	94.5	94.4	6.7	2.2	1.7	0.55	2.1	2.3	1150
	GM 355 M 2a	2980	438	416	401	801	0.91	95.0	95.0	6.7	2.2	1.1	0.37	2.2	2.8	1310
	GM 355 M 2b	2975	545	518	499	1011	0.92	95.0	95.0	7.3	2.4	1.3	0.43	2.3	3.6	1460
	GM 355 M 2c	2980	610	580	563	1138	0.93	95.0	95.0	8.0	2.6	1.3	0.43	2.3	4.2	1620
	GM 355 L 2	2980	690	656	632	1282	0.92	95.1	95.0	8.0	2.6	1.3	0.43	2.3	4.7	1850

Motors with dark base are within the limits of efficiency class to CEMEP.

# CHARACTERISTICS AND PERFORMANCE



3-phase, 400 V, 50 Hz. (Eurovolt)  
 Duty type : S1 (continuous)  
 Degree of protection : IP 55 (TEFV)  
 Insulation class : F (105K)  
 Temp. Rise : Class B (80K)

Speed, Power Factor, Efficiency, Locked-rotor current  
 Torque values are quoted at 400V, 50 Hz

Type	Full-load data								Starting data				Breakdown torque ratio $M_K/M_N$	Moment of inertia J	Weight approx. B3
	Speed n	Current			Torque $M_N$	Power factor Cos $\phi$	Efficiency		Locked-rotor current ratio		Locked-rotor torque ratio				
		A					$\eta$	$\eta$	$I_A/I_N$		$M_A/M_N$				
	At 380V	At 400V	At 415V	At 4/4	At 3/4	D.O.L.			Y/ $\Delta$	D.O.L.	Y/ $\Delta$	kgm <sup>2</sup>			

Speed, 1500 min<sup>-1</sup>

06	AGM 56	4a	1370	0.24	0.25	0.27	0.42	0.56	58.7	58.6	3.0	-	2.4	-	2.6	0.00011	2.7
09	AGM 56	4b	1375	0.35	0.36	0.38	0.63	0.54	64.4	64.2	3.2	-	2.2	-	2.4	0.00012	2.8
12	AGM 63	4a	1365	0.40	0.41	0.42	0.84	0.65	58.8	58.8	3.1	-	2.0	-	2.2	0.00017	3.2
18	AGM 63	4b	1340	0.58	0.60	0.60	1.28	0.65	61.4	61.4	3.0	-	1.8	-	1.9	0.00021	3.7
25	AGM 71	4a	1380	0.81	0.81	0.82	1.73	0.68	63.6	63.5	3.3	-	1.9	-	2.2	0.00040	4.9
37	AGM 71	4b	1390	1.20	1.15	1.15	2.54	0.69	70.0	70.0	3.7	-	2.2	-	2.5	0.00054	5.9
55	AGM 80	4a	1365	1.60	1.60	1.55	3.90	0.71	70.9	70.8	3.4	-	1.8	-	2.0	0.00083	7.6
75	AGM 80	4b	1370	2.10	2.00	2.00	5.20	0.74	72.2	72.2	3.8	-	1.9	-	2.0	0.0011	8.7
	AGM 90 S	4	1380	2.70	2.60	2.55	7.60	0.79	76.8	76.7	4.6	-	2.1	-	2.3	0.0019	11.5
	AGM 90 L	4	1390	3.60	3.50	3.40	10.3	0.78	78.6	78.5	4.5	-	2.2	-	2.3	0.0024	13.6
	AGM 100 L	4a	1400	5.30	5.10	5.20	15	0.77	81.3	81.2	4.9	-	2.5	-	2.6	0.0040	17.3
	AGM 100 L	4b	1405	6.60	6.45	6.35	20.4	0.81	82.9	82.9	5.4	-	2.2	-	2.4	0.0052	20.8
	AGM 112 M	4	1420	8.70	8.20	8.20	27	0.82	84.7	84.7	5.8	1.9	2.4	0.78	2.7	0.0092	28.7
	AGM 132 S	4	1430	11.8	11.3	11	36.7	0.82	86.2	86.2	5.9	1.9	2.4	0.78	2.5	0.019	39
	AGM 132 M	4	1430	15.8	15.3	15	50	0.80	87.4	87.2	6.0	1.9	2.5	0.81	2.5	0.026	47
	C.AGM 132 M	4	1445	19	18	17.5	59.5	0.82	88.4	88.0	6.9	1.9	2.5	0.81	2.6	0.032	56
	GM 160 M	4	1455	22.5	21.5	21	72.2	0.84	88.6	88.5	6.6	2.2	2.5	0.81	2.6	0.054	108
	GM 160 L	4	1460	30.5	29	28.5	98	0.83	89.5	89.5	6.9	2.1	2.5	0.81	2.6	0.072	140
	C. GM 160 L	4	1450	37	35	34.5	122	0.83	90.1	90.1	6.2	2.0	2.3	0.74	2.5	0.084	150
	GM 180 M	4	1460	38	36	35	121	0.82	90.1	90.1	6.4	2.1	2.6	0.84	2.7	0.11	160
	GM 180 L	4	1460	44	42	40.5	144	0.83	90.7	90.7	6.4	2.1	2.5	0.81	2.5	0.13	185
	GM 200 L	4	1460	57	54	52	196	0.88	91.5	91.5	6.5	2.1	2.5	0.81	2.7	0.19	240
	C. GM 200 L	4	1465	69	66	64	241	0.88	92.1	92.1	7.2	2.3	2.7	0.87	2.8	0.23	260
	GM 225 S	4	1465	70	66	64	241	0.87	92.2	92.2	6.3	2.0	2.4	0.78	2.6	0.29	275
	GM 225 M	4	1465	84	80	77	293	0.87	92.7	92.7	6.6	2.1	2.5	0.84	2.7	0.35	320
	C. GM 225 M	4	1470	101	96	93	357	0.88	93.2	93.2	6.8	2.2	2.5	0.81	2.6	0.44	360
	GM 250 M	4	1470	102	97	94	357	0.88	93.0	93.0	6.8	2.2	2.4	0.78	2.5	0.54	400
	C. GM 250 M	4	1470	138	131	127	487	0.87	93.3	93.6	6.8	2.2	2.6	0.84	2.5	0.72	455
	GM 280 S	4	1475	140	133	128	485	0.87	93.6	93.6	6.4	2.1	2.2	0.71	2.4	0.90	530
	GM 280 M	4	1480	166	158	152	581	0.88	93.9	93.9	7.2	2.3	2.4	0.77	2.6	1.1	610
	C. GM 280 M	4	1480	204	194	183	710	0.87	94.0	94.0	6.6	2.1	2.2	0.71	2.3	1.3	660
	GM 315 S	4	1480	205	195	189	710	0.87	94.0	94.0	6.3	2.0	1.8	0.58	2.0	1.9	770
	GM 315 M	4a	1485	245	233	225	849	0.87	94.0	94.0	6.6	2.1	2.0	0.65	2.0	2.4	890
	GM 315 M	4b	1485	295	280	272	1029	0.88	94.3	94.2	7.1	2.3	2.0	0.65	2.3	3.1	1015
	GM 315 L	4a	1485	340	323	312	1190	0.88	94.4	94.3	7.2	2.3	2.1	0.68	2.2	3.6	1115
	GM 315 L	4b	1485	368	350	339	1286	0.87	94.4	94.3	7.5	2.4	2.3	0.75	2.4	3.9	1165
	GM 355 M	4a	1485	450	428	415	1608	0.88	95.8	95.8	6.9	2.2	1.7	0.55	2.2	6.5	1450
	GM 355 M	4b	1485	560	532	515	2026	0.89	96.2	96.2	7.3	2.3	1.6	0.58	2.0	8.1	1657
	GM 355 M	4c	1485	635	603	582	2283	0.88	96.3	96.3	7.3	2.3	1.8	0.58	2.0	9.4	1800
	GM 355 L	4	1485	710	675	650	2572	0.89	96.3	96.3	7.2	2.3	2.2	0.71	2.5	10	1965

with dark base are within the limits of efficiency class **EFF 2** to CEMEP.

# RATING AND PERFORMANCE

Speed, Power Factor, Efficiency, Locked-rotor current and Torque values are quoted at 400V, 50 Hz

3-phase, 400 V, 50 Hz.(Eurovolt)  
 Duty type : S1 (continuous)  
 Degree of protection : IP 55 (TEFV)  
 Insulation class : F (105K)  
 Temp. Rise : Class B (80K)

Rated output kW	Type			Full-load data						Starting data				Breakdown torque ratio  $M_K/M_N$	Moment of inertia  J  kgm <sup>2</sup>	Weight approx.  B3  kg	
				Speed  min <sup>-1</sup>	Current  $I_N$			Torque  $M_N$  Nm	Power factor  Cos $\phi$	Efficiency  $\eta$  %	Locked-rotor current ratio  $I_A/I_N$		Locked-rotor torque ratio  $M_A/M_N$				
					At 380V	At 400V	At 415V				D.O.L.	Y/ $\Delta$	D.O.L.				Y/ $\Delta$

4 pole, 1000 min<sup>-1</sup>

0.18	AGM	71	6a	920	0.60	0.61	0.62	1.87	0.64	67.0	3.6	-	1.8	-	2.2	0.00064	5.4
0.25	AGM	71	6b	910	0.83	0.83	0.85	2.62	0.66	65.3	3.6	-	2	-	2.3	0.00086	6.3
0.37	AGM	80	6a	910	1.10	1.10	1.10	3.90	0.65	74.9	3.8	-	2	-	2.4	0.0017	8.1
0.55	AGM	80	6b	890	1.50	1.50	1.50	5.90	0.73	72.3	3.7	-	1.8	-	2	0.0022	9.5
0.75	AGM	90	S 6	910	2.20	2.10	2.10	7.90	0.70	74.0	3.8	-	1.8	-	1.9	0.0029	11.4
1.1	AGM	90	L 6	915	3.10	3.00	3.00	11.5	0.69	76.8	3.9	-	1.9	-	2.1	0.0038	13.7
1.5	AGM	100	L 6	925	3.60	3.50	3.60	15.5	0.77	76.9	4.6	-	2	-	2.2	0.0084	19.4
2.2	AGM	112	M 6	940	5.30	5.10	5.00	22.4	0.75	82.6	4.6	-	2.1	-	2.4	0.013	26.5
3	AGM	132	S 6	945	7.00	6.90	6.80	30.5	0.76	82.6	5.5	1.8	2.2	0.71	2.4	0.022	36
4	AGM	132	M 6a	940	9.40	9.00	8.80	41	0.78	82.6	4.7	1.5	2	0.65	2.4	0.028	43.5
5.5	AGM	132	M 6b	945	13	12.3	12	55.6	0.76	84.4	5	1.6	2.3	0.75	2.3	0.043	49.6
7.5	GM	160	M 6	960	16	15.2	14.3	74.6	0.82	87.1	6.4	2.1	2.4	0.77	2.9	0.079	115
11	GM	160	L 6	955	23	22	21.5	110	0.83	86.6	7	2.2	2.5	0.81	3	0.11	131
15	GM	180	L 6	960	30.5	29	28	149	0.83	89.7	6.2	2	2.2	0.71	2.7	0.16	187
18.5	GM	200	L 6a	970	38	36	35	182	0.83	89.6	6.2	2	2.1	0.68	2.9	0.21	216
22	GM	200	L 6b	975	45	43	41	216	0.82	90.5	7.3	2.4	2.3	0.75	3.4	0.26	240
30	GM	225	M 6	970	61	58	56	294	0.82	91.0	5.9	1.9	3.1	1	2.3	0.57	330
37	C. GM	225	M 6	980	75	71	69	363	0.82	91.6	6.2	2	2.6	0.84	2.4	0.71	365
47	GM	250	M 6	970	75	71	69	364	0.82	91.6	4.5	1.5	2.2	0.71	1.8	0.77	400
55	C. GM	250	M 6	975	90	88	83	441	0.82	91.8	6.8	2.2	2.5	0.81	2.1	0.99	450
75	GM	280	S 6	980	93	90	85	439	0.80	91.8	5.4	1.8	2.6	0.84	1.9	1.2	530
95	GM	280	M 6	985	113	107	104	533	0.80	92.7	5.9	1.9	3	0.97	2.1	1.5	605
125	C. GM	280	M 6	985	150	143	138	727	0.81	93.3	5.8	1.9	2.7	0.87	1.9	1.6	700
155	GM	315	S 6	985	146	139	134	727	0.83	93.3	6.6	2.1	2	0.65	2.1	3.3	740
200	GM	315	M 6a	985	175	166	161	873	0.85	92.5	6.6	2.1	2	0.65	2.1	4.1	850
240	GM	315	M 6b	990	208	198	191	1061	0.85	94.5	7	2.3	2.2	0.71	2.3	5.4	975
320	GM	315	L 6	990	247	235	227	1273	0.86	94.2	6	1.9	1.9	0.61	1.9	6.4	1040
400	GM	355	M 6a	990	305	290	281	1543	0.84	94.6	6.5	2.1	1.9	0.61	2.1	7.1	1350
500	GM	355	M 6b	990	380	361	350	1929	0.85	94.4	6.8	2.2	2.4	0.78	2.3	8.9	1540
600	GM	355	M 6c	990	474	450	431	2388	0.85	94.5	6.1	2.1	1.7	0.55	2	11	1720
750	GM	355	L 6	990	600	570	550	3039	0.84	94.5	6.8	2.2	1.9	0.61	2	13	2100

# CHARACTERISTICS AND PERFORMANCE

3-phase, 400 V, 50 Hz. (Eurovolt)  
 Duty type : S1 (continuous)  
 Degree of protection : IP 55 (TEFV)  
 Insulation class : F (105K)  
 Temp. Rise : Class B (80K)

Locked-rotor current  
 Torque values are quoted at 400V, 50 Hz

Speed rpm	Type	Full-load data					Starting data				Breakdown torque ratio $M_R/M_N$	Moment of inertia J	Weight approx. B3
		Current			Torque $M_N$	Power factor $\cos \phi$	Efficiency $\eta$	Locked-rotor current ratio $I_a/I_N$	Locked-rotor torque ratio $M_a/M_N$				
		$I_N$	A										
min <sup>-1</sup>		At 380V	At 400V	At 415V	Nm	%	At 4/4	D.O.L.	V/A	D.O.L.	V/A	kgm <sup>2</sup>	kg

rpm, 750 min<sup>-1</sup>

09	AGM 71 8a	690	0.41	0.41	0.42	1.3	0.54	58.2	2.3	-	1.7	-	1.9	0.00064	5.4
12	AGM 71 8b	670	0.60	0.60	0.62	1.7	0.49	58.4	2.2	-	1.9	-	2	0.00086	6.3
18	AGM 80 8a	695	0.85	0.90	0.92	2.5	0.47	62.0	3	-	2.8	-	3	0.0017	8.1
25	AGM 80 8b	680	1.15	1.14	1.18	3.5	0.49	64.8	2.9	-	2.6	-	2.8	0.0022	9.4
37	AGM 90 S 8	690	1.35	1.33	1.37	5.1	0.59	68.5	3.2	-	1.8	-	2	0.0029	11.3
55	AGM 90 L 8	670	1.90	1.82	1.85	7.8	0.61	71.4	3	-	1.4	-	1.7	0.0038	13.5
75	AGM 100 L 8a	700	2.45	2.40	2.40	10.5	0.61	74.0	3.4	-	1.8	-	2.1	0.0062	17.4
111	AGM 100 L 8b	680	3.45	3.30	3.30	15.4	0.66	72.9	3.2	-	1.7	-	1.8	0.0084	19.3
155	AGM 112 M 8	700	4.50	4.40	4.20	20.5	0.63	77.6	3.6	-	1.9	-	2.2	0.013	26.5
222	AGM 132 S 8	700	5.70	5.40	5.30	30	0.74	79.0	3.8	1.2	2.1	0.68	2.4	0.024	35
311	AGM 132 M 8	690	7.70	7.30	7.20	41.5	0.74	79.9	3.6	1.2	2.2	0.71	2.2	0.033	43
425	GM 160 M 8a	710	9.60	9.10	9.00	53.8	0.76	84.0	4.8	1.6	2.1	0.68	2.4	0.060	97
575	GM 160 M 8b	720	13.2	12.5	12.3	73	0.75	84.4	5.3	1.7	2.2	0.71	2.7	0.083	107
775	GM 160 L 8	715	18	17	16.8	100	0.74	86.3	5.8	1.9	2.4	0.77	2.9	0.12	138
1075	GM 180 L 8	720	25	24	23.5	146	0.76	86.9	6.8	2.2	2.7	0.87	3	0.20	180
1475	GM 200 L 8	725	33	31.5	30.8	197	0.77	88.9	6	1.9	2.1	0.68	2.9	0.29	234
2025	GM 225 S 8	725	39.5	37.5	37	244	0.79	89.6	5.8	1.9	2	0.65	2.7	0.43	265
2775	GM 225 M 8	725	47	45	44	290	0.80	88.7	5.8	1.9	2	0.65	2.6	0.52	310
3725	GM 250 M 8	735	62	59	58	390	0.80	91.4	6.1	2	1.8	0.58	2.6	0.92	405
5025	GM 280 S 8	730	77	73	72	484	0.80	91.3	4.7	1.5	2	0.65	2	1.3	500
6825	GM 280 M 8	730	90	86	84	589	0.81	92.9	4.9	1.6	1.9	0.61	1.8	1.6	565
9225	GM 315 S 8	740	110	105	103	710	0.81	93.7	5.7	1.8	1.8	0.58	1.9	3.3	740
12525	GM 315 M 8a	740	153	145	142	968	0.81	92.7	5.9	1.9	1.9	0.61	2	4.1	850
16925	GM 315 M 8b	740	180	171	168	1162	0.81	93.6	6.2	2	1.9	0.61	2	5.4	975
22925	GM 315 L 8	740	220	209	205	1420	0.81	93.6	6.5	2.1	1.9	0.61	2	6.4	1040
30925	GM 355 M 8a	740	275	261	256	1704	0.77	94.5	6	1.9	1.9	0.61	2	7.1	1350
41925	GM 355 M 8b	740	325	309	302	2065	0.79	94.2	6	1.9	1.9	0.61	2	8.9	1540
56425	GM 355 M 8c	740	408	388	380	2581	0.79	94.4	6	1.9	1.9	0.61	2	11	1720
75425	GM 355 L 8	740	500	475	458	3226	0.79	94.5	6	1.9	1.9	0.61	2	13	2100

# OPTIMAL VECTOR CONTROL OF THREE-PHASE INDUCTION MACHINE

Jasem M. Kh. Tamimi  
Electronics and Computer Department  
Alquds University  
P.O. Box 242.  
Hebron, Palestine  
jmt\_tam@yahoo.com

Hussein M. Jaddu  
Electronics and Computer Department  
Alquds University  
P.O. Box 20002, Abu Dies  
Jerusalem, Palestine  
jaddu@eng.alquds.edu

## ABSTRACT

This paper presents the optimal solutions of the induction motor (IM) fluxes and currents that minimize the total energy of the motor. A second order model based on vector control approach relating motor fluxes (states) and currents (controls) is considered. Optimal state and control trajectories of IM are obtained by solving algebraic Riccati equation. In addition, the simulation results for different weight are presented. Also this paper considers and compares between two cases based on the second order model.

## KEY WORDS

Induction machine, vector control, optimal control.

## 1. Introduction

The Induction motors (IM) for many years have been regarded as the workhorse in industry.

Recently, the induction motors were evolved from being a constant speed motors to a variable speed. In addition, the most famous method for controlling induction motor is by varying the stator voltage or frequency. To use this method, the ratio of the motor voltage and frequency should be approximately constant. With the invention of Field Orientated Control [1-12, 17-20], the complex induction motor can be modeled as a DC motor by performing simple transformations.

These transformations are known as the *abc-dq* transformations, where the stator currents are transformed into two dc currents using *Clarke* transformation. The two dc currents are then transformed into a rotating reference frame using *Park* transformation.

Transforming the stator currents allows the motor to be modelled as a DC motor and not a complex three-phase motor.

Using the vector control approach, several methods have been proposed in the literature to control the IM, for example, H. Zidan *et al* successfully applied the model, section 3 formulate the optimal control problem of the induction motor modeled by vector control. Section 4 presents the two cases based on the linear model that have

estimation method to control the induction motor drives without using speed sensors; they used simple speed estimation method for IM drive at low speed, this method uses the current and the input voltages in closed loop for rotor parameter estimation [1].

While, B. Hovingh, *et al* presented an algorithm to estimate the rotor's speed and torque from the terminal voltage and input current to the motor. They showed that measurement of the stator voltage and currents are sufficient to determine the rotor position, speed and torque of an induction motor during any conditions, whether transient or steady state. Their work is being performed to analyze the response of a Field Orientated Control system when the estimated waveforms are used as an input into the control loop [2].

On the other hand, Jose Ramirez and Carlos Canudas de Wit presented experimental results of a nonlinear torque-flux optimal control for induction motor drives. This controller minimizes the stored magnetic energy and the coil losses, while satisfying torque tracking control objectives [3].

In addition, H. Rasmussen used an adaptive approach leading to a completely new method called Field Angle Adaptation (FAA). The new contribution to the conventional current control system in rotor field oriented dq-coordinates is a signal added to the field angle in the transformation from rotor field coordinates to stator fixed coordinates. This signal adapts the field angle estimate to the correct rotor field angle [4].

In this paper, the optimal control method is applied to induction motor modelled by vector control or field oriented control (FOC). Based on the second order model for induction motor, which presented in [5, 7], two cases have been considered in this paper. The optimal controls and the optimal states of each case are obtained using the algebraic Riccati equation. To show the effectiveness of the proposed method simulations results are shown in this paper.

The paper organized as follows: Section 2 reviews the vector control and induction motor's second order linear model. Section 3 presents the optimal control problem of the induction motor modeled by vector control. Section 4 presents the two cases based on the linear model that have

## 1. Vector control and induction motor model

### 1.1 Direct and Quadrature axis transformation (d-q)

The vector control technique uses the dynamic equivalent circuit of the induction motor, and this technique enables the induction motor to be controlled in a method similar to DC motor [2]. The conversion of three-stator currents into two DC currents enables the speed and torque of the motor to be calculated in a manner similar to DC motor (figure 1). The direct and quadrature axis transformation (abc-dq) converts a three-phase signal of three different vectors in two dimensional frame using *Clarke* and *Park* transformations [2, 7].

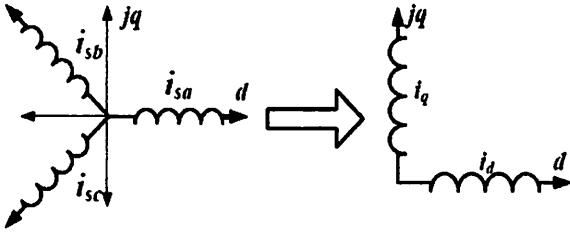


Figure 1: 3-phase to dq equivalents

A d-q axis transformation eliminates the mutual magnetic coupling of the phase winding, making the magnetic flux linkage of the current independent to each other.

The transformation from three-phase system to two phase system and vice versa is as given in equations (1) and (2), respectively [6-9]:

$$\begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \\ i_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \\ i_o \end{bmatrix} \quad (2)$$

Moreover, the stator voltages are related to the d-q rotating frame of induction motor (IM) as given in equation (3):

$$\begin{bmatrix} v_{sq} \\ v_{sd} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Where  $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$  are the stator currents in abc frame,  $v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}$  are stator voltages in abc frame,  $i_{sq}, i_{sd}$  are the stator currents in dq rotating frame, and  $v_{sq}, v_{sd}$  are stator voltages in dq rotating frame,  $\theta$ : the phase angle between rotating frame and stationary frame.

### 2.2 Induction motor model

Figure 2 shows the d-q equivalent circuits for a three phase symmetrical squirrel cage induction motor in arbitrary rotating frame with zero sequence component neglected [6, 7, 9, 10].

From the dynamic equivalent circuit, the induction motor parameters can be expressed in matrix equation (4), assuming that the rotor bars in squirrel cage induction motor are shorted out and the rotor voltages equal zero.

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & \omega_s L_s & pL_m & \omega_s L_m \\ -\omega_s L_s & R_s + pL_s & -\omega_s L_s & pL_m \\ pL_m & (\omega_s - \omega_m)L_m & R_r + pL_r & (\omega_s - \omega_m)L_r \\ -(\omega_s - \omega_m)L_r & pL_m & -(\omega_s - \omega_m)L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Where  $R_s, R_r$  are the stator and the rotor resistance per phase respectively,  $L_s, L_r$  are the stator, and the rotor inductance per phase, respectively,  $p = \frac{d}{dt}$  operator,  $\omega_s, \omega_m$  are synchronous and rotor speeds respectively.

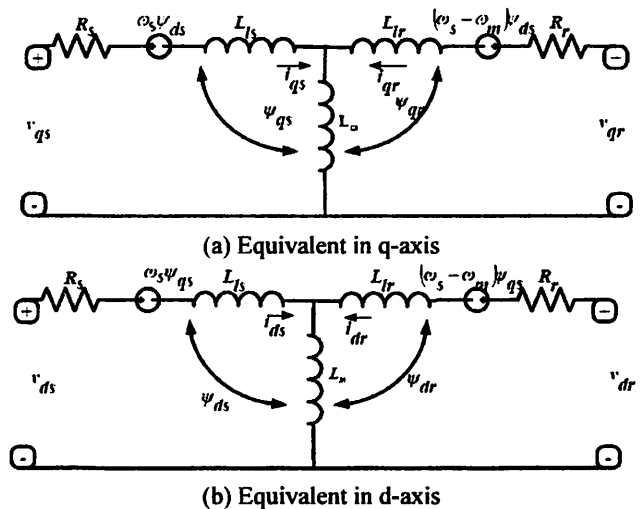


Figure 2: Dynamic equivalent circuit for induction motor.

Moreover, the rotor flux linkages are given by equation (5 & 6):

$$\begin{bmatrix} \psi_{qr} \\ \psi_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{qr} & i_{qs} \\ i_{dr} & i_{ds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_r \\ L_m \\ L_r \end{bmatrix} \quad (5)$$

Solving for  $i_{qr}, i_{dr}$  we obtain:

$$\begin{bmatrix} i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{qr} & i_{qs} \\ \psi_{dr} & i_{ds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{L_r} \\ -\frac{L_m}{L_r} \\ \frac{1}{L_r} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Substituting equation (5) in equation (4) and using the equation (6), the following state equation model can be obtained [7]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_{qr} \\ \dot{\psi}_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{L_r}{R_r} & -(\omega_s - \omega_m) \\ (\omega_s - \omega_m) & -\frac{L_r}{R_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qr} \\ \psi_{dr} \end{bmatrix} + \frac{L_m}{L_r} R_r \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Equation (7) represents a second order model for the induction motor in terms of the flux parameter and the currents. This equation can be rewritten in a compact form as:  $\dot{x} = Ax + Bu$ .

Where  $x = [x_1 \ x_2]^T = [\psi_{qr} \ \psi_{dr}]^T$  (Flux components), and  $u = [u_1 \ u_2]^T = [i_{qs} \ i_{ds}]^T$  (Current components).

### 3. Optimal Control problem

The standard theory of the optimal control is presented in [14,15,16]. For linear time invariant system with state vector ( $x$ ) and control vector ( $u$ ), the optimal control problem is given by:

Find the optimal control vector  $u^*$  that minimizes the performance index

$$J = \frac{1}{2} \int_0^t (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (8)$$

subject to state equation constraints

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (9)$$

Where  $Q$  is a positive semi-definite real symmetric state weighting matrix and  $R$  is positive definite real symmetric control weighting matrix.

The choice of the element  $Q$  and  $R$  allows the relative weighting of individual state variables of fluxes and individual control inputs of current components as well as relative weighting state vector (fluxes) and control vector current components) against each other.

In case of the time invariant system  $A$ , the optimal control feedback matrix  $K$  results in constant -gain state

feedback comparable to multivariable P- controller with currents.

It is well known that the optimal state feedback control that solves this problem is given by

$$u^*(x) = -Kx(t) \quad (10)$$

And matrix gain  $K$  is given by

$$K = R^{-1} B^T P \quad (11)$$

For the case of the time invariant system, and  $t \rightarrow \infty$  the optimal control feedback gain matrix  $K$  is constant. And  $P$  is the solution of the algebraic Riccati equation

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (12)$$

And  $P > 0$ ,  $A - BR^{-1}B^T P = (A - BK)$  stable (all eigenvalues in the open left half-plane) [13].

For our problem we consider the following performance index:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (\psi_r^T Q \psi_r + i_s^T R i_s) dt \quad (13)$$

which minimizes total energy in the induction motor which is the sum of the stored magnetic energy in the inductance, the dissipated energy in the rotor and stator resistances, the dissipated energy due to core losses (Foucault currents and magnetic hysteresis), and mechanical energy [11, 16, 17].

### 4. Problem Formulation

Based on the second order model of the induction motor shown in equation 6, we will consider the following two cases:

- **Case I:** The frequency difference between the synchronous speed and the mechanical speed [5, 20], i.e.  $\omega_s - \omega_m = 0$ . Therefore, equation (7) become

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_{qr} \\ \dot{\psi}_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{L_r}{R_r} & 0 \\ 0 & -\frac{L_r}{R_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qr} \\ \psi_{dr} \end{bmatrix} + \frac{L_m}{L_r} R_r \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix} \quad (14)$$

And the optimal control problem is to determine the optimal feedback control vector  $[i_{qs} \ i_{ds}]$ , that minimizes the performance index

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (\psi_r^T Q \psi_r + i_s^T R i_s) dt \quad (15)$$

Subject to state equation (14).

This problem is solved using the optimal control technique presented in section 3.

**Case II:** The difference between the synchronous speed and the mechanical speed is given by:

$$\omega_s - \omega_m = sl \cdot \omega_s \quad (16)$$

Where  $sl$ : represent the induction motor slip [7, 18].

By substituting (16) into equation (7) will get:

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_{qr} \\ \dot{\psi}_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{L_r}{R_r} & -sl\omega_s \\ sl\omega_s & -\frac{L_r}{R_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qr} \\ \psi_{dr} \end{bmatrix} + \frac{L_m}{L_r} R_r \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \quad (17)$$

And the optimal control problem is to find the optimal feedback control vector that minimizes (15) subject to (17).

Also, this problem is solved using the method presented in section 3.

## 5. Simulation

To show the solution of the two problems given in the previous section, a simulation program using MATLAB and SIMULINK is implemented. Different weighting matrices have been considered.

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 \\ 0 & q_2 \end{bmatrix} \text{ and } R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_2 \end{bmatrix} \text{ with their}$$

eigenvalues  $q_1, q_2 \geq 0$ , and  $r_1, r_2 > 0$ .

The simulation has been performed using five sets of  $Q$  and  $R$ ;  $q_1, q_2 = 0.01, 0.1, 1, 10, 100$ , and  $r_1, r_2 = 0.01, 0.1, 1, 10, 100$ , respectively.

In addition, we show the simulation of the rotor speed given by [19]:

$$\dot{\omega}_m = \frac{z^2 L_m}{I L_r} (i_{sq} \psi_{rd} - i_{sd} \psi_{rq}) - \frac{F}{I} \omega_m - \frac{z}{I} T_l \quad (18)$$

Where  $z$  is the number of the poles of the induction motor,  $I$  is the moment of inertia,  $F$  is the viscous friction coefficient,  $T_l$  is the torque load.

Figure 3 shows the simulation result of (case I) presented in section 4. Figure 3.a shows the state feedback control vector, figure 3.b shows the states, and figure 3.c for the motor speed under load torque 1.5 Nm, rated speed = 1440 rpm,  $z = 2$  poles,  $R_s = 1.15 \Omega$ ,  $R_r = 1.44 \Omega$ ,  $L_m = 0.144$  H,  $L_s = L_r = 0.156$  H,  $J = 0.013$  km.m<sup>2</sup>,  $\tau = 0.002$  Nm.s/rad and initial states [-5 -5] weber.

While Figure 4 shows the simulation result of the (case II) of section 4. Where figure 4.a shows the state feedback control vector, figure 4.b shows the states, and figure 4.c for the motor speed under load torque 1.5 Nm and with same previous motor parameters.

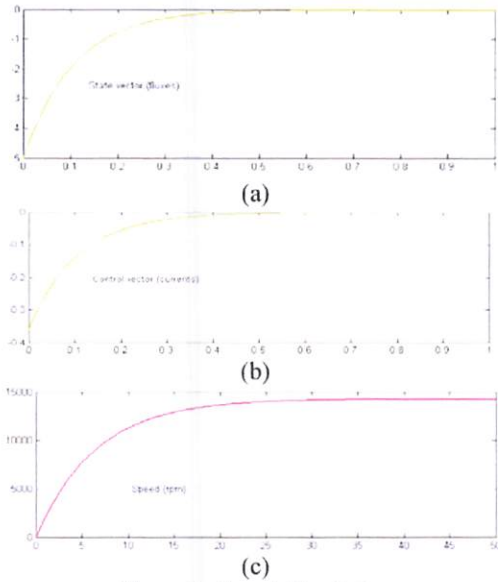


Figure 3: Case I Simulation

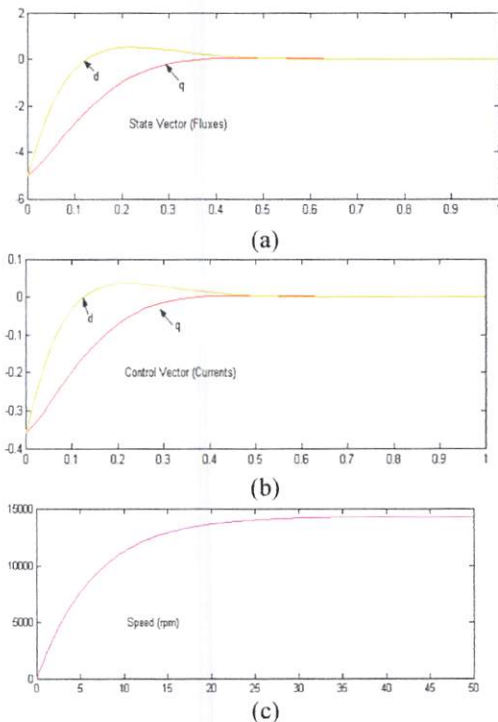


Figure 4: Case II Simulation

From the previous simulation, we noticed that changing the weighting matrices do not effect the optimal control or the optimal states.

## 5. Conclusion

In this paper, we obtained the optimal trajectories of states (IM fluxes) and controls (IM currents). These trajectories are obtained by minimizing the quadrature performance measure or total energy of the induction motor.

The simulation is carefully done to obtain the controls, states trajectories using matlab and simulink programs.

Using different state and control weighting matrices (Q and R) didn't affect the response as shown in the figures 3a, 3b, 4a, 4b), so that the speed response wasn't affected too as shown in figures (3c and 4c).

Moreover, the speed responses of the different cases presented in section 4 are not different as shown in figures 3c and 4c).

## References

- [1] H. Zidan, S. Fujii, T. Hanamoto & T. Tsuji, Simple sensorless vector control for variable speed induction motor drives, *T IEE, 120-D(10)*, 2000, 1165-1170.
- [2] B. Hovingh, W.W.L. Keerthipala, & W. Y. Yan, Sensorless speed estimation of an induction motor in a field oriented control system, *School of Electrical and Computer Engineering Curtin University of Technology, Australia*, In Press.
- [3] J. Ramirez & C. Canudas de Wit, Performance evaluation of induction motors under optimal-energy control, *Laboratoire d'Automatique de Grenoble*, Submitted to the *IEEE Trans. on control systems technology*, In Press.
- [4] H. Rasmussen, Adaptive field oriented control of induction motors, *Aalborg University*, 2002.
- [5] Z. Ismail, L. Luc, & F. Christophe, An extended filter and appropriate model for the real time estimation of the induction motor variables and parameters, *LEC, UTC*, In Press.
- [6] O. I. Okoro, MATLAB simulation of induction machine saturable leakage and magnetizing inductance, *Pacific Journal of science and technology*, 5(1), 2003, 5-5.
- [7] M. H. Rashid, *Power electronics circuit, devices and applications*, Pearson Prentice Hall, 2004.
- [8] O. Barambones, A.J. Garrido & F.J. Maseda, A sensorless robust vector control of induction motor drives, *Universidad del País Vasco*. In Press, 1 -6.
- [9] R. Marino, S. Peresada, & P. Valigi, Adaptive input output linearizing control of induction motor, *IEEE Tran. Automatic Control*, 38(2), 1993, 208-221.
- [10] B. Ozpineci and L. M. Tolbert, Simulink implementation of induction machine model- a modular approach, *IEEE*, 2003, 728-734.
- [11] O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, I. G. Hansen, & L. M. Taylor, A maximum torque per ampere control strategy for induction motor drives, *NASA Lewis Research Center*, In Press.
- [12] S. H. Kim, T. S. Park, J. Y. Yoo, & G. T. Park, Speed-sensorless vector control of an induction motor using neural network speed estimation, *IEEE Tran. on Industrial Electronics*, 48(3), 2001, 609-615.
- [13] A. E. Rryson, Jr & Y. C. Ho, *Applied Optimal control*, Hemisphere publication corporation.1975.
- [14] F. L. Lewis and V. L. Syrmos, *Optimal Control theory*, A Wiley Interscience Publication, 1995.
- [15] D. E. Kirk, *Optimal Control*, Prentice Hall Inc., 1970.
- [16] J. Ramirez & C. Canudas de Wit, Optimal torque control for current-fed induction motors, *Submitted to the IEEE Trans. on control systems technology*, In Press.
- [17] D. Georges, J. Ramirez & Carlos Canudas de Wit, Nonlinear H<sub>2</sub> and H<sub>∞</sub> optimal controllers for current-fed induction motors, *Submitted to the IEEE Trans. on control systems technology*, In Press.
- [18] G K Dubey, *Fundamentals of electrical drives*, Narosa Publishing House, 1995.
- [19] M. A. Ouhrouche & C. Volat., Simulation of a direct field-oriented controller for an induction motor using MATLAB/SIMULINK software package, *Proc. of the IASTED International Conf. on modeling and simulation, Pennsylvania, USA*, 2000, 082-087.
- [20] MATLAB (6.5) and SIMULINK (5.5) tutorials, 2002.