

# SKRIPSI

**PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA  
DENGAN METODE FIELD ORIENTED CONTROL  
DI LABORATORIUM KONVERSI ENERGI ELEKTRIK  
ITN MALANG**



*Disusun Oleh :*

**KHAIRUDDIN**

**01.12.162**

**MILIK  
PERPUSTAKAAN  
ITN MALANG**

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

**SEPTEMBER 2008**

LEMBAR PERSETUJUAN

PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI  
DENGAN METODE FIELD ORIENTED CONTROL  
DI LABORATORIUM KONVERSI ENERGI ELEKTRIK  
ITN MALANG

SKRIPSI

*Disusun dan Diajukan untuk Melengkapi dan  
Memenuhi Syarat-Syarat Guna Mencapai Gelar Sarjana Teknik*

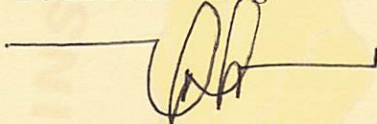
Disusun Oleh :

**KHAIRUDDIN**

**01.12.162**

Diperiksa dan Disetujui,

**Dosen Pembimbing I**



**Ir. Abdul Hamid, MT**  
**NIP.Y. 101 8800 188**

Diperiksa dan Disetujui,

**Dosen Pembimbing II**



**Bambang Prio Hartono, ST, MT.**  
**NIP. Y. 1028400082**

Mengetahui,

**Ketua Jurusan Teknik Elektro**



**(Ir. F. YUDI LEMPRAPTONO, MT)**  
**NIP. Y. 103 950 0274**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1  
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG  
SEPTEMBER 2008**

# A B S T R A K S I

## PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA DENGAN METODE *FIELD ORIENTED CONTROL* DI LABORATORIUM KONVERSI ENERGI ELEKTRIK ITN MALANG

( KHAIRUDDIN, Nim 01.12.162, Teknik Elektro/T.Energi Listrik S-1 )

( Dosen Pembimbing I : Ir. M. Abdul Hamid, MT )

( Dosen Pembimbing II : Bambang Prio Hartono, ST, MT )

**Kata kunci** : *Field Oriented Control*, Mesin Induksi, MATLAB Simulink, Model Dinamik Motor Induksi.

Motor induksi adalah salah satu mesin AC yang banyak digunakan teknologi industri saat ini. Motor induksi sering digunakan karena disamping harganya yang jauh lebih murah dari mesin lainnya, juga konstruksinya yang sangat efisien serta mudah dalam perawatannya. Hal ini mendorong penyediaan motor induksi semakin marak dikembangkan. Pengembangan motor induksi ini merupakan upaya penyempurnaan terhadap mesin yang ada sekarang. Semakin efisien sebuah konstruksi mesin dalam pengendalian, perawatan, serta penggunaannya, maka pengembangan perencanaan mesin induksi telah tercapai. Salah satu kelemahan motor induksi adalah semakin bertambahnya beban yang diberikan maka kecepatan motor induksi akan semakin berkurang juga. Oleh karena itu pengaturan kecepatan motor sangat diperlukan dalam berbagai aplikasi sesuai dengan kebutuhan yang diinginkan.

Pengendalian vektor merupakan metode pengendalian motor induksi yang banyak digunakan dalam industri, salah satunya adalah metode *Field Oriented Control* (FOC). Cara kerja FOC adalah mengubah arus stator ke dalam bentuk rangkaian dinamik d-q, tujuannya adalah untuk membuat pengontrolan secara terpisah terhadap torsi dan *flux* dapat dilakukan. Simulasi dari metode ini dibuat dengan menggunakan software MATLAB SIMULINK 7.0.4. Simulasi ini mempunyai dua masukan setting point kecepatan yaitu 500 rpm dan 750 rpm, serta mengaplikasikan sistem dengan dua jenis beban yaitu tanpa beban dan beban berubah-ubah.

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan dengan menggunakan metode *Field Oriented Control*, pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa berhasil dilakukan. Dari kedua *set point* kecepatan yang diaplikasikan pada sistem baik pada kecepatan 500 rpm dan 750 rpm memperoleh hasil yang seperti diinginkan. Meskipun mengaplikasikan berbagai *set point* beban, motor tetap mampu mengikuti kecepatan referensi..

## KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan puji syukur kehadirat ALLAH SWT, atas rahmat dan karunia-Nya memungkinkan penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul, “**PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA DENGAN METODE *FIELD ORIENTED CONTROL* DI LABORATORIUM KONVERSI ENERGI ELEKTRIK ITN MALANG**”.

Skripsi ini bertujuan untuk memenuhi kurikulum akademik yang harus ditempuh oleh setiap mahasiswa ITN Malang guna menyelesaikan pendidikan pada jenjang strata satu jurusan Teknik Elektro konsentrasi Teknik Energi Listrik di Institut Teknologi Nasional Malang.

Atas segala bimbingan, pengarahan dan bantuan yang diberikan, sehingga tersusunnya skripsi ini, maka penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. **Ir. Mochtar Asroni, MSME**, selaku Dekan FTI ITN Malang.
2. **Ir. F Yudi Limpraptono, MT**, selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro (S1) ITN Malang.
3. **Yusuf Ismail Nakhoda, ST. MT**, selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro (S1) ITN Malang. Hasil Simulasi Motor Induksi Tiga Fasa Pada Setting Point 500 rpm Tanpa Beban
4. **Ir. M. Abdul Hamid, MT**, selaku dosen pembimbing I.
5. **Bambang Prio Hartono, ST, MT**. selaku dosen pembimbing II.



Akhirnya penulis mengharapkan skripsi dapat berguna dan bermanfaat bagi rekan-rekan mahasiswa khususnya pada jurusan Teknik Elektro S-1 konsentrasi Teknik Energi Listrik.

Malang, November 2008

Penulis

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman:</b>
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>LEMBAR PERSETUJUAN</b> .....	ii
<b>ABSTRAKSI</b> .....	iii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	iv
<b>DAFTAR ISI</b> .....	vi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	x
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xiii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	2
1.3. Batasan Masalah .....	2
1.4. Tujuan .....	3
1.5. Metodologi Penelitian .....	3
1.6. Sistematika Penulisan .....	5
<b>BAB II MOTOR INDUKSI TIGA FASA</b>	
2.1. Umum .....	6
2.2. Konstruksi .....	7
2.2.1. Rotor .....	7
2.2.1.1 Rotor Sangkar Tupai .....	8
2.2.1.2 Rotor Belitan .....	8
2.2.2. Stator .....	9

2.3.	Prinsip Kerja Motor Induksi .....	10
2.4.	Slip dan Frekuensi.....	11
2.5.	Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi .....	13
2.5.1	Rangkaian Ekuivalen Rotor.....	14
2.5.2	Rangkaian Ekuivalen Sebenarnya Dari Rangkaian Ekuivalen Pada Gambar 2.11 .....	18
2.5.3.	Daya Motor Induksi .....	20
2.6.	Menentukan Parameter-Parameter Motor Induksi.....	20
2.6.1.	Menentukan Tahanan Stator Motor Induksi (DC test).....	21
2.6.2.	Pengujian Tanpa Beban Motor Induksi.....	22
2.6.3	Pengujian Rotor Tertahan.....	23
2.7.	Operasi Motor Induksi .....	26
2.7.1.	Performa <i>Steady State</i> .....	26
2.7.2.	Performa <i>Transient</i> .....	27
2.8.	Metode <i>Field Oriented Control</i> .....	27
2.8.1	Proyeksi dan Definisi Dari Vektor Ruang (Space Vektor) .....	28
2.8.2	Proyeksi $abc \Rightarrow \alpha-\beta$ (Transformasi Clark) .....	30
2.8.3	Proyeksi $\alpha-\beta \Rightarrow d-q$ (Transformasi Park) .....	30
2.8.4	Proyeksi <i>Inverse</i> .....	32
2.9	Inverter Tiga Fasa .....	32
2.9.1	Umum.....	32
2.9.2	PWM( <i>Pulse Width Modulation</i> ) <i>Inverteir</i> .....	33
2.10	Matlab Simulink .....	36
2.10.1	Pengertian Matlab .....	36

2.10.2 Simulink .....	37
-----------------------	----

### **BAB III PERMODELAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA**

3.1. Model Dinamik Mesin Induksi Tiga Fasa.....	39
3.2. Pengujian Parameter Motor Induksi tiga Fasa.....	44
3.2.1. Alat-Alat Yang Digunakan.....	44
3.2.2 Pengujian Arus Searah .....	45
3.2.3 Pengujian Tanpa Beban.....	46
3.2.4 Pengujian Rotor Tertahan.....	47
3.2.5 Analisa Parameter Motor Induksi .....	48
3.3. Permodelan Metode <i>Field Oriented Control</i> .....	52
3.4. Algoritma Pemrograman .....	59
3.5 Diagram Alir Pemecahan Masalah .....	60

### **BAB IV ANALISIS HASIL SIMULASI**

4.1. Blok Model Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Metode <i>Field Oriented Control</i> .....	61
4.2. Hasil Simulasi .....	62
4.2.1. Analisa Hasil Simulasi Pada Kecepatan 500 rpm Tanpa Beban.....	63
4.2.2 Analisa Hasil Simulasi Pada Kecepatan 500 rpm Berbeban.....	68
4.2.3 Analisa Hasil Simulasi Pada Kecepatan 750 rpm Tanpa Beban.....	74
4.2.4 Analisa Hasil Simulasi Pada Kecepatan 750 rpm Berbeban.....	79



**BAB V KESIMPULAN**

5.1. Kesimpulan..... 85  
5.2. Saran..... 85

**DAFTAR PUSTAKA**

**LAMPIRAN**

## DAFTAR GAMBAR

Gambar :	Halaman :
2.1	Konstruksi Dasar Motor Induksi..... 7
2.2.	Konstruksi Rotor Sangkar Tupai Motor Induksi..... 8
2.3.	Konstruksi Stator Motor Induksi..... 9
2.4.	Karakteristik Slip dan Kecepatan Dari Motor Induksi ..... 12
2.5.	Rangkaian Ekivalen Motor Induksi Per fasa, Dengan Asumsi Ratio a = 1 ..... 13
2.6.	Rangkaian Ekivalen Rotor Motor Induksi ..... 15
2.7.	Rangkaian Ekivalen Lain Dari Rotor Motor Induksi ..... 16
2.8.	Rangkaian Ekivalen Rotor Motor Yang Dibebani ..... 16
2.9.	Rangkaian Ekivalen Motor Induksi..... 17
2.10.	Rangkaian Ekivalen Motor Induksi Per Fasa Dengan Sisi primer Sebagai Referensi ..... 17
2.11.	Rangkaian Ekivalen Lain Motor Induksi Per Fasa Dengan Sisi primer Sebagai Referensi ..... 17
2.12.	Rangkaian Pengujian Tahanan Stator..... 21
2.13.	Rangkaian Ekivalen Pengujian beban Nol ..... 23
2.14	Rangkaian Ekivalen Pengujian Rotor Tertahan ..... 24
2.15	Diagram Fasor Vektor Ruang Arus Stator Beserta Komponen abc..... 29
2.16	Diagram Fasor Vektor Ruang Arus Stator Dengan Komponen $\alpha$ - $\beta$ ..... 30
2.17	Diagram Fasor Vektor Ruang Arus Stator Dengan Komponen $\alpha$ - $\beta$ Dalam Bingkai Referensi Perputaran d-q ..... 31
2.18	Rangkaian Inverter Tiga Fasa ..... 33
2.19	Sinyal Pembangkitan PWM Inverter..... 35
2.20	Tampilan <i>M-Files</i> Matlab ..... 37
2.21	Tampilan <i>Simulink Library Browser</i> ..... 38
3.1.	Gambar Rangkaian Ekivalen d-q ..... 39
3.2.	Rangkaian Pengujian Arus Searah ..... 45
3.3.	Rangkaian Pengujian Tanpa Beban..... 46

3.4.	Rangkaian Pengujian Rotor Tertahan.....	47
3.5	Blok Model Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Dengan Metode <i>Field Oriented Control</i> .....	52
3.6	Blok Parameter motor Induksi .....	53
3.7	Blok <i>Field Oriented Control</i> .....	54
3.8	Blok <i>Speed Controller</i> .....	55
3.9	Blok <i>Iq* Calculation</i> .....	55
3.10	Blok <i>Id* Calculation</i> .....	56
3.11	Blok <i>Theta Calculation</i> .....	56
3.12	Blok <i>Flux Calculation</i> .....	57
3.13	Blok d-q to abc.....	57
3.14	Blok abc to d-q.....	58
3.15	Blok <i>Current Regulator</i> .....	58
4.1	Blok Model Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Dengan Metode <i>Field Oriented Control</i> .....	61
4.2	Hasil Simulasi Kecepatan Pada <i>Setting Point</i> 500 rpm Tanpa Beban .....	63
4.3	Hasil Simulasi Torsi Motor Pada <i>Setting Point</i> 500 rpm Tanpa Beban....	64
4.4	Hasil Simulasi Arus Motor Pada <i>Setting Point</i> 500 rpm Tanpa Beban.....	65
4.5	Hasil Simulasi Tegangan Motor Pada <i>Setting Point</i> 500 rpm Tanpa Beban.....	66
4.6	Hasil Simulasi Fluks Motor Pada <i>Setting Point</i> 500 rpm Tanpa Beban....	67
4.7	Hasil Simulasi Kecepatan Pada <i>Setting Point</i> 500 rpm Berbeban .....	68
4.8.	Hasil Simulasi Torsi Motor Pada <i>Setting Point</i> 500 rpm Berbeban.....	69
4.9	Hasil Simulasi Arus Motor Pada <i>Setting Point</i> 500 rpm Berbeban .....	70
4.10	Hasil Simulasi Tegangan Motor Pada <i>Setting Point</i> 500 rpm Berbeban...	71
4.11	Hasil Simulasi Fluks Motor Pada <i>Setting Point</i> 500 rpm Berbeban .....	72
4.12	Hasil Simulasi Kecepatan Pada <i>Setting Point</i> 750 rpm Tanpa Beban .....	74
4.13	Hasil Simulasi Torsi Motor Pada <i>Setting Point</i> 750 rpm Tanpa Beban....	75
4.14	Hasil Simulasi Arus Motor Pada <i>Setting Point</i> 750 rpm Tanpa Beban.....	76
4.15	Hasil Simulasi Tegangan Motor Pada <i>Setting Point</i> 750 rpm Tanpa Beban.....	77
4.16	Hasil Simulasi Fluks Motor Pada <i>Setting Point</i> 750 rpm Tanpa Beban....	78

4.17	Hasil Simulasi Kecepatan Pada <i>Setting Point</i> 750 rpm Berbeban .....	79
4.18	Hasil Simulasi Torsi Motor Pada <i>Setting Point</i> 750 rpm Berbeban .....	80
4.19	Hasil Simulasi Arus Motor Pada <i>Setting Point</i> 750 rpm Berbeban .....	81
4.20	Hasil Simulasi Tegangan Motor Pada <i>Setting Point</i> 750 rpm Berbeban...	82
4.21	Hasil Simulasi Fluks Motor Pada <i>Setting Point</i> 750 rpm Berbeban .....	83



## DAFTAR TABEL

<b>Tabel :</b>	<b>Halaman :</b>
2.1 Standar Besarnya Reaktansi Berbagai Jenis Desain Rotor.....	25
3.1 Hasil Pengujian Arus Searah (DC Test).....	45
3.2 Data Hasil Pengujian Beban Nol.....	46
3.3 Data Hasil Pengujian Motor Rotor Tertahan .....	47
3.4 Hasil Perhitungan Pengujian Parameter Motor Induksi Tiga Fasa .....	51
4.1 Hasil Simulasi Motor Induksi Tiga Fasa Pada <i>Setting Point</i> 500 rpm Tanpa Beban.....	67
4.2 Hasil Simulasi Motor Induksi Tiga Fasa Pada <i>Setting Point</i> 500 rpm Berbeban.....	73
4.3 Hasil Simulasi Motor Induksi Tiga Fasa Pada <i>Setting Point</i> 750 rpm Tanpa Beban.....	78
4.4 Hasil Simulasi Motor Induksi Tiga Fasa Pada <i>Setting Point</i> 750 rpm Berbeban.....	84







# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Motor induksi adalah salah satu mesin AC yang ada dalam perkembangan teknologi saat ini. Mesin induksi sering digunakan manusia dalam kehidupan rumah tangga sehari-hari maupun dunia industri karena disamping harganya yang jauh lebih murah dari mesin lainnya, juga konstruksinya yang sangat efisien serta mudah dalam perawatannya. Hal ini mendorong penyediaan motor induksi semakin marak dikembangkan. Pengembangan motor induksi ini merupakan upaya penyempurnaan terhadap mesin yang ada sekarang. Semakin efisien sebuah konstruksi mesin dalam pengendalian, perawatan, serta penggunaannya, maka pengembangan perencanaan mesin induksi telah tercapai<sup>[5]</sup>.

Penerapan penggunaan metode FOC (*Field Oriented Control*) telah dengan luas digunakan dalam berbagai aplikasi mesin yang membutuhkan performansi tinggi, karena mempunyai keuntungan dalam respon dan ketepatan kecepatan yang diinginkan serta memberi garansi efisiensi yang optimal pada saat kondisi transient<sup>[7]</sup>. Prinsip dasar *Field Oriented Control* adalah untuk mengubah arus stator untuk diubah menjadi bentuk sumbu d-q yang menghasilkan arus id dan iq. Arus id dan iq merupakan komponen dari fluks dan torsi. Dari arus id dan iq tersebut maka pengontrolan secara terpisah terhadap fluks dan torsi dapat dilakukan<sup>[8]</sup>.

Penerapan penggunaan metode *Field Oriented Control* digunakan untuk membentuk suatu sistem pengaturan dalam mengestimasi kecepatan motor

### 1.3 Batasan Masalah

Agar pembahasan skripsi ini dapat mencapai sasaran yang sesuai dengan latar belakang permasalahan yang telah diuraikan, maka penulis membuat batasan masalah sebagai berikut :

1. Motor yang digunakan adalah motor induksi tiga fasa rotor sangkar tupai DE LORENZO DL 1021.
2. Pengambilan data motor induksi tiga fasa dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Elektrik ITN Malang.
3. Pengaturan kecepatan motor induksi menggunakan sistem *Field Oriented Control*.
4. Analisa pengaturan kecepatan disimulasikan menggunakan *Software MATLAB® SIMULINK®*.
5. Tidak membahas kontrol skalar.
6. Komponen pada rangkaian daya dianggap ideal sehingga walaupun terdapat jatuh tegangan nilainya diabaikan.
7. Tidak membahas proteksi motor dan efisiensi motor.
8. Tidak membahas starting motor induksi.



## 1.5 Metodologi

Metodologi penelitian yang dilakukan dalam skripsi ini meliputi :

- Studi Literatur

Penulis mempelajari literatur-literatur mengenai motor Induksi dan hal-hal yang berhubungan dengan metode *Field Oriented Control*.

- Pengumpulan Data

Penulis melakukan pengambilan data gambar *single line* dan karakteristik-karakteristik yang menyangkut tentang motor induksi dan hal-hal yang berhubungan dengan metode *Field Oriented Control*.

- Analisa Data

Setelah mendapatkan data, penulis akan memasukkan data yang telah didapat untuk dimodelkan di dalam *software MATLAB® SIMULINK®*.

- Pemodelan

Setelah mendapatkan data, penulis akan memasukkan data yang telah didapat untuk dimodelkan di dalam *software MATLAB® SIMULINK®*.

- Simulasi.

Data yang telah dimodelkan akan disimulasikan di dalam *software MATLAB® SIMULINK®*.

- Hasil Analisa

Menganalisa hasil data yang didapat dari simulasi *software MATLAB® SIMULINK®*.

- Kesimpulan.

Setelah *study* dilakukan, maka penulis dapat menarik suatu kesimpulan.

## 1.6 Sistematika Pembahasan

Pada penyusunan skripsi ini terdiri dari lima bab, dengan sistematika pembahasan disusun sebagai berikut :

- BAB I : Pada bab ini berisi pendahuluan yang meliputi latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi serta sistematika pembahasan.
- BAB II : Pada bagian ini diuraikan mengenai motor induksi 3-fasa, aspek-aspek yang digunakan , parameter-parameter yang ada dalam motor induksi, serta pengertian tentang metode *Field Oriented Control* dan *software MATLAB<sup>®</sup> SIMULINK<sup>®</sup>*.
- BAB III : Pada bagian ini akan diuraikan mengenai permodelan motor induksi tiga fasa dengan metode *Field Oriented Control* yang dibentuk dengan menggunakan *software MATLAB<sup>®</sup> SIMULINK<sup>®</sup>* serta perhitungan dari parameter motor induksi tiga fasa.
- BAB IV : Pada bab ini berisikan analisis hasil simulasi motor induksi dengan metode *Field Oriented Control* dengan tampilan data berupa tabel-tabel dan grafik karakteristik untuk lebih memudahkan dalam analisa.
- BAB V : Penutup berisikan kesimpulan dan kontribusi.

induksi saat motor diberi beban yang berubah-ubah, dengan melihat respon kecepatan output yang dihasilkan apakah dapat mengikuti *set point* yang telah ditentukan meskipun diberikan beban yang berubah-ubah. Blok-blok pengaturan kecepatan motor induksi dengan metode *Field Oriented Control* dimodelkan dengan menggunakan software MATLAB SIMULINK 7.0.4.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dengan latar belakang tersebut maka terdapat permasalahan yang perlu dibahas yaitu :

1. Bagaimana cara mengatur kecepatan motor induksi dengan menggunakan metode *Field Oriented Control*?
2. Bagaimana membentuk simulasi sistem pengaturan kecepatan motor induksi dengan metode *Field Oriented Control* ?
3. Bagaimana performansi motor pada saat kondisi tanpa beban dan pada saat kondisi diberi beban yang berbeda dengan *setpoint* kecepatan yang berbeda?

## 1.4 Tujuan

Mengatur kecepatan motor induksi tiga fasa baik dalam keadaan berbeban maupun tak berbeban. Juga menunjukkan analisa arus, tegangan, kecepatan, flux, dan torsi elektromagnetik motor dalam kondisi *transient* dan *steady state*.







## **BAB II**

### **MOTOR INDUKSI TIGA PHASA**

#### **2.1 Umum<sup>[5]</sup>**

Motor induksi adalah jenis motor listrik yang paling kuat, kokoh dan merupakan jenis motor yang paling banyak digunakan dalam dunia industri. Seperti halnya pada motor DC, motor induksi terdiri dari dua buah komponen utama, yaitu stator dan rotor. Rotor mesin induksi ditopang oleh bantalan-bantalan yang terletak pada ujung-ujung poros rotor. Dengan adanya bantalan-bantalan ini, antara rotor dan stator terpisah oleh celah udara. Input arus bolak-balik diberikan secara langsung pada belitan-belitan stator dan rotor. Bedanya, input ke stator diberikan secara langsung dari jaringan sumber, sedangkan pada rotor arus ac muncul dari proses produksi. Itulah sebabnya jenis motor ini dikenal dengan motor induksi.

#### **Keunggulan dan kelemahan motor induksi**

Beberapa keunggulan yang dimiliki oleh motor induksi, adalah:

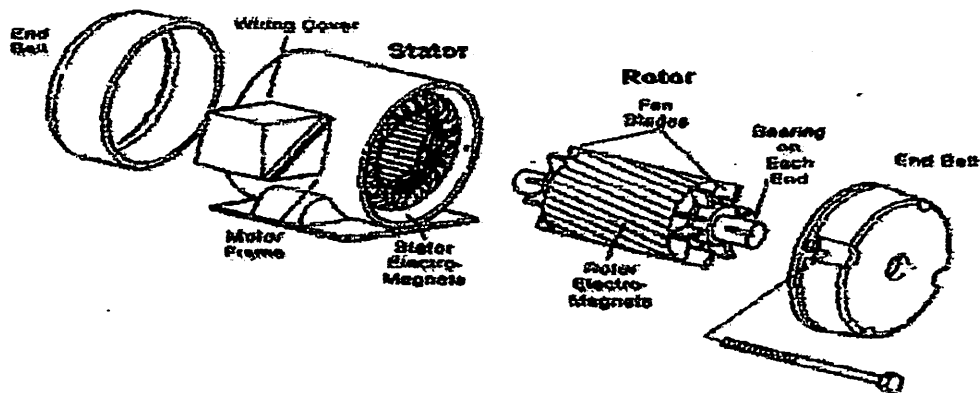
1. Konstruksinya yang sederhana dan kuat/kokoh. ( hampir tak dapat rusak, khususnya jenis rotor sangkar ).
2. Harganya murah, perawatannya minimum, serta keandalannya cukup tinggi.
3. Efisiensi dan faktor daya yang cukup baik pada keadaan operasi normal.
4. Tidak membutuhkan sikat, sehingga mengurangi rugi-rugi gesekan (mekanis)
5. Pengaturan starting yang sederhana khususnya untuk jenis rotor sangkar.

Sedangkan beberapa kelemahan yang dimiliki oleh motor induksi, adalah:

1. Perubahan kecepatan putar motor, biasanya diikuti oleh perubahan efisiensi.
2. Seperti halnya motor DC, kecepatan putar motor induksi akan berkurang seiring bertambahnya beban.
3. Torsi asutnya sedikit lebih rendah dibanding motor DC shunt.

## 2.2 Konstruksi

Seperti halnya motor DC, konstruksi utama motor induksi terdiri dari rotor dan stator, dimana rotor merupakan bagian yang berputar, sedangkan stator merupakan bagian yang diam (statis). Konstruksi dasar motor induksi diperlihatkan pada gambar 2.1 berikut ini :



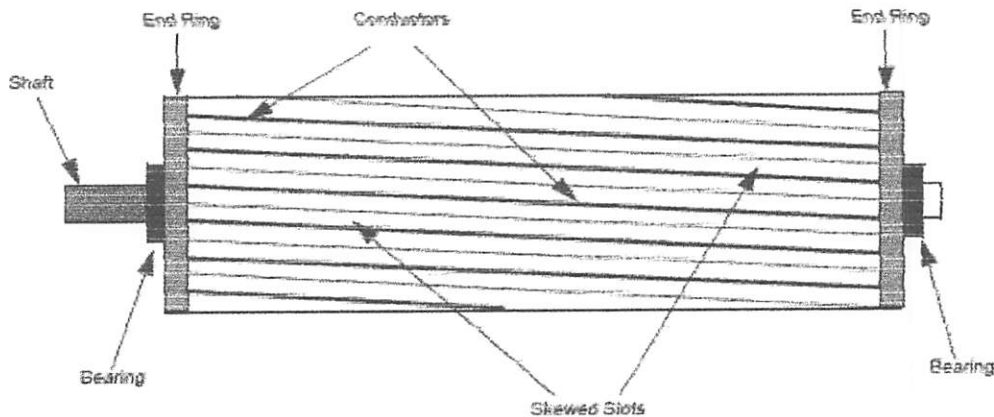
Gambar 2.1  
Konstruksi dasar motor induksi<sup>(1)</sup>

### 2.2.1 Rotor

Konstruksi rotor terdiri dari lapisan bahan-bahan ferromagnetik dan terdapat slot-slot yang digunakan sebagai tempat belitan. Dalam hal konstruksi rotor, motor induksi dibagi atas dua jenis :

### 2.2.1.1 Rotor Sangkar Tupai ( *Squirrel-cage Rotor* )

Hampir 90 % produksi motor induksi dibuat dengan konstruksi rotor sangkar karena jenis ini lebih sederhana, paling kokoh dan tidak mudah rusak. Terdiri dari inti silindris dengan slot-slot parallel yang digunakan sebagai tempat belitan-belitan rotor, dalam hal ini belitan rotor berupa batang-batang tembaga, aluminium atau *alloy* dan bukan kawat penghantar. Setiap batang penghantar ditempatkan pada tiap slot. Batang-batang penghantar ini secara permanen telah terhubung singkat pada ujung-ujung rotor, sehingga tidak memungkinkan untuk menambah lagi resistor luar pada untai rotor untuk kepentingan pengaturan kecepatan. Untuk beberapa pertimbangan, biasanya batang-batang penghantar ini dipasang tidak benar-benar sejajar dengan poros rotor, tetapi agak miring.



**Gambar 2.2**  
Konstruksi rotor sangkar tupai motor induksi<sup>[2]</sup>

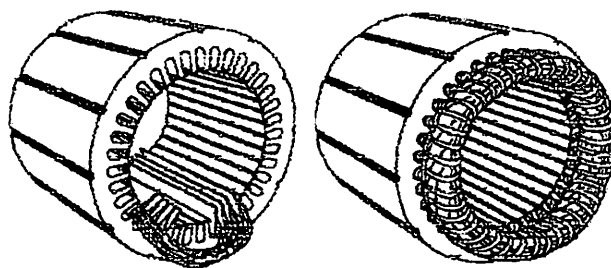
### 2.2.1.2 Rotor Belitan (Wound Rotor)

Jika motor induksi rotor sangkar dikenal dengan *brushless machine* (mesin tanpa sikat), maka untuk jenis rotor belitan dikenal dengan motor *slip ring* (motor dengan cincin geser), sehingga secara otomatis jenis rotor belitan menggunakan sikat karbon.

Belitan-belitan 3 fasa pada rotor identik dengan belitan-belitan stator. Belitan-belitan ini ditempatkan pada slot-slot rotor yang tersusun dari lapisan-lapisan plat baja. Ujung-ujung belitan rotor dihubung bintang (Y). Ujung-ujung belitan lainnya dihubungkan ke tiga buah cincin tembaga yang terisolasi satu sama lain. Melalui sikat-sikat karbon, ke tiga cincin ini dapat dihubungkan ke untai luar rotor, berupa sebuah reostat 3 fasa yang terhubung bintang. Hal ini memungkinkan adanya penambahan nilai resistan pada untai external rotor selama periode pengasutan untuk memperbesar torsi asut motor serta untuk kepentingan perubahan karakteristik torsi asut.

### 2.2.2 Stator

Stator motor induksi pada prinsipnya sama dengan stator pada mesin sinkron, yang tersusun atas plat-plat baja lembaran high grade yang tersusun secara berlapis-lapis. Susunan ini dibuat sedemikian rupa sehingga membentuk slot-slot stator yang akan digunakan sebagai tempat belitan-belitan 3 fasa stator. Ujung-ujung belitan akan disuplai oleh sumber listrik 3 fasa. Konfigurasi belitan-belitan motor induksi dibuat sedemikian rupa sehingga membentuk kutub-kutub stator motor. Banyaknya jumlah kutub stator motor pada akhirnya akan mempengaruhi kecepatan sinkron motor ( $n_s$ ). Konstruksi stator motor induksi diperlihatkan pada gambar 2.3 berikut ini :



**Gambar 2.3**  
**Konstruksi stator motor induksi<sup>[2]</sup>**

**2.3 Prinsip Kerja Motor Induksi**

Adapun prinsip kerja motor induksi 3 fasa mengikuti langkah-langkah sebagai berikut :

- 1. Jika sumber tegangan 3 phasa disuplai ke kumparan medan stator, maka akan timbul medan putar dengan kecepatan :

$$n_s = \frac{120 f}{p} \dots\dots\dots (2.1)$$

- 2. Medan putar tersebut akan memotong batang-batang penghantar pada rotor (setelah memotong celah udara).
- 3. Akibatnya pada rotor akan timbul tegangan induksi (ggl) sebesar :

$$E_r = 4,44 f_2 N_2 , \text{ dengan}$$

$E_r$  = tegangan induksi pada saat rotor berputar

Karena kumparan rotor merupakan rangkaian tertutup, maka tegangan ggl induksi (E) akan menghasilkan arus (I). Adanya arus (I) di dalam medan magnet menimbulkan gaya (F) pada rotor.

- 4. Bila kopel (torque) mula yang dihasilkan oleh gaya (F) pada rotor cukup besar untuk memikul kopel beban, rotor akan berputar searah dengan medan putar stator.
- 5. Seperti telah dijelaskan pada (3) tegangan induksi timbul karena terpotongnya batang konduktor (rotor) oleh medan putar stator. Artinya, agar tegangan terinduksi diperlukan adanya perbedaan relatif antara kecepatan medan putar stator ( $n_s$ ) dengan kecepatan berputar rotor ( $n_r$ )
- 6. Perbedaan kecepatan antara  $n_r$  dan  $n_s$  disebut *slip* (S) dinyatakan dengan:

$$S (\%) = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\% \dots\dots\dots (2.2)$$

7. Bila  $n_r = n_s$ , maka tegangan tidak akan terinduksi dan arus tidak mengalir pada kumparan jangkar rotor, dengan demikian tidak dihasilkan kopel. Kopel motor akan timbul apabila  $n_r$  lebih kecil dari  $n_s$ .
8. Dilihat dari cara kerjanya, motor induksi disebut juga sebagai motor tak serempak atau asinkron.

#### 2.4 Slip dan frekuensi

Perubahan kecepatan putaran motor induksi ( $n_r$ ) mengakibatkan berubahnya harga slip dari 100% saat start sampai 0% pada saat motor diam ( $n_r = n_s$ ).

Hubungan frekuensi dengan slip dapat didefinisikan sebagai berikut :

Bila  $f_1$  = frekuensi jala-jala,

$$n_s = \frac{120f_1}{p} \quad \text{atau} \quad f_1 = \frac{pn_s}{120}$$

Pada rotor berlaku hubungan :

$$f_2 = \frac{p(n_s - n_r)}{120} \quad \text{atau} \quad f_2 = \frac{pn_s}{120} \times \frac{n_s - n_r}{n_s}; \quad f_2 = \text{frekuensi arus rotor}$$

karena

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad \text{dan} \quad f_1 = \frac{pn_s}{120}, \quad \text{maka} \quad f_2 = f_1 \times S$$

Pada saat start  $S = 100\%$  , maka  $f_2 = f_1$

Dengan demikian terlihat bahwa pada saat start dan rotor belum berputar frekuensi pada stator dan rotor sama. Dalam keadaan rotor berputar, frekuensi arus rotor dipengaruhi oleh slip ( $f_2 = f_1$ ).

Karena tegangan induksi dan reaktansi kumparan rotor merupakan fungsi frekuensi, maka harganya turut pula dipengaruhi oleh slip.

Kenyataan ini dapat didefinisikan oleh persamaan-persamaan :

$$E_r = 4,44 f_2 N_2 \Phi_m$$

$$E_r = 4,44 S f_1 N_2 \Phi_m \quad \text{atau} \quad E_r = E_2$$

Dan  $X_r = 2\pi f_2 L_r$

$$X_r = 2\pi S f_1 L_r \quad \text{atau} \quad X_r = S X_2$$

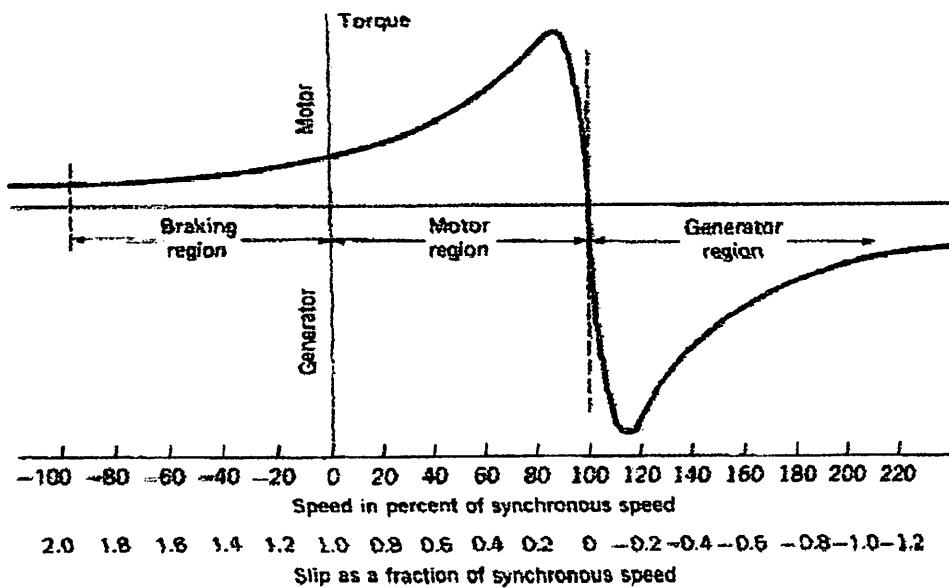
Dengan

$E_2$  = tegangan induksi pada saat start (diam).

$E_r$  = tegangan induksi pada saat rotor berputar.

$X_r$  = reaktansi pada saat rotor berputar.

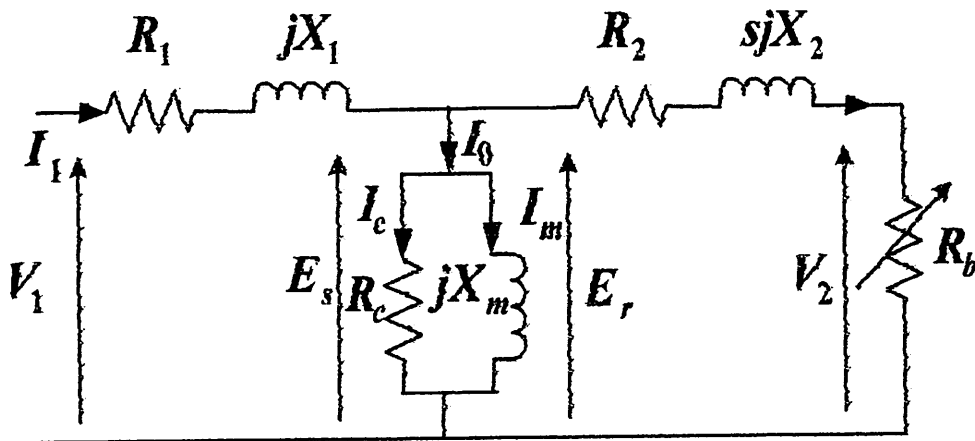
$X_2$  = reaktansi pada saat start (diam).



**Gambar 2.4**  
Karakteristik slip dan kecepatan dari motor induksi tiga fasa<sup>[3]</sup>

## 2.5 Rangkaian ekivalen motor induksi

Pada prinsipnya proses "induksi" yang terjadi pada motor induksi hampir sama seperti pada transformator yang bebahan resistif, sehingga penggambaran rangkaian ekivalen motor induksi berdasarkan rangkaian ekivalen transformator, dimana stator identik dengan sisi primer transformator. Perbedaan yang mendasar antara keduanya adalah transformator merupakan mesin listrik statis, sedangkan motor induksi adalah mesin listrik dinamis. Rangkaian ekivalen motor induksi per fasa diperlihatkan pada gambar 2.5 berikut ini :



Gambar 2.5

Rangkaian ekivalen motor induksi per fasa, dengan asumsi rasio  $a = 1$ <sup>[4]</sup>

Keterangan gambar :

- $V_1$  = Tegangan suplai ke kumparan stator (Volt) per fasa
- $I_1$  = Arus beban yang mengalir pada kumparan stator ( Ampere ) per fasa
- $R_s$  = Resistansi kumparan stator (  $\Omega$  ) per fasa
- $X_1$  = Reaktansi kumparan stator (  $\Omega$  ) per fasa
- $I_0$  = Arus penguatan ( Ampere ) per fasa
- $I_c$  = Arus rugi inti ( Ampere ) per fasa
- $I_m$  = Arus pemagnetan ( Ampere ) per fasa



$R_c$  = Resistansi rugi inti ( $\Omega$ ) per fase

$X_m$  = Reaktansi pemagnetan ( $\Omega$ ) per fase

$E_s$  = Tegangan yang diindusikan ke kumparan stator ( Volt ) per fase

$E_r$  = Tegangan yang diindusikan ke kumparan rotor ( Volt ) per fase

$R_2$  = Resistansi kumparan rotor ( $\Omega$ ) per fase

$X_2$  = Reaktansi kumparan rotor ( $\Omega$ ) per fase

$I_2$  = Arus pada sisi rotor (Ampere) per fase

$V_2$  = Tegangan pada sisi beban (volt) per fase

$R_b$  = Resistansi beban ( $\Omega$ ) per fase

$S$  = Slip

Dari gambar 2.5 di atas (dengan menganggap  $R_b=0$ ), dapat dituliskan persamaan:

$$V_1 = E_s + I_1 (R_1 + jX_1) \dots\dots\dots(2.3)$$

$$E_r = I_2 Z_2 = I_2 (R_2 + jSX_2) \dots\dots\dots(2.4)$$

### 2.5.1 Rangkaian ekuivalen rotor

Ketika motor dibebani, maka akan mengalir arus  $I_2$  sebesar :

$$I_2 = \frac{E_r}{\sqrt{(R_2)^2 + (sX_2)^2}} \dots\dots\dots(2.5)$$

di mana :  $s$  = slip

Persamaan di atas dapat juga ditulis sebagai :

$$I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{(R_2)^2 + (sX_2)^2}} \dots\dots\dots(2.6)$$

di mana :

$R_2$  adalah komponen tetap (*fixed*) dan  $sX_2$  adalah komponen yang bervariasi (*Variable*).

$$E_2 = E_1' = \frac{E_2}{a} \quad \text{dan} \quad a = \frac{N_1}{N_2}$$

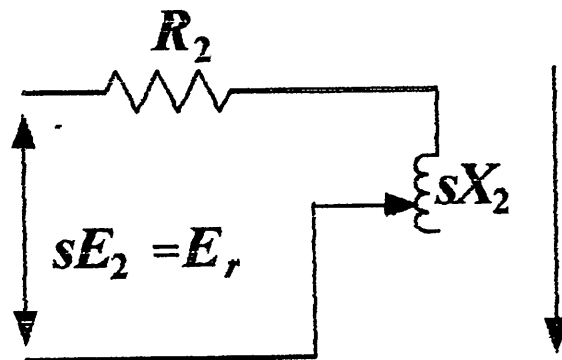
dimana :

$a$  = Perbandingan transformasi

$N_1$  = Banyaknya lilitan kumparan stator

$N_2$  = Banyaknya lilitan kumparan rotor

Rangkaian ekivalen rotor motor induksi diperlihatkan pada gambar 2.7 berikut ini:



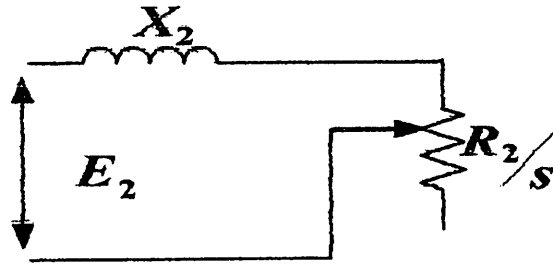
**Gambar 2.6**  
Rangkaian ekivalen rotor motor induksi<sup>[4]</sup>

- Tegangan/ggl induksi ( $E_2 + 4,44 N_2 f \Phi_{maks}$ ) di sisi rotor dipengaruhi oleh perbedaan frekuensi dari sisi stator, karenanya dikalikan slip.

Atau :

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_2)^2}} \dots \dots \dots (2.7)$$

Rangkaian ekivalen lain rotor motor induksi diperlihatkan pada gambar 2.8 berikut ini :



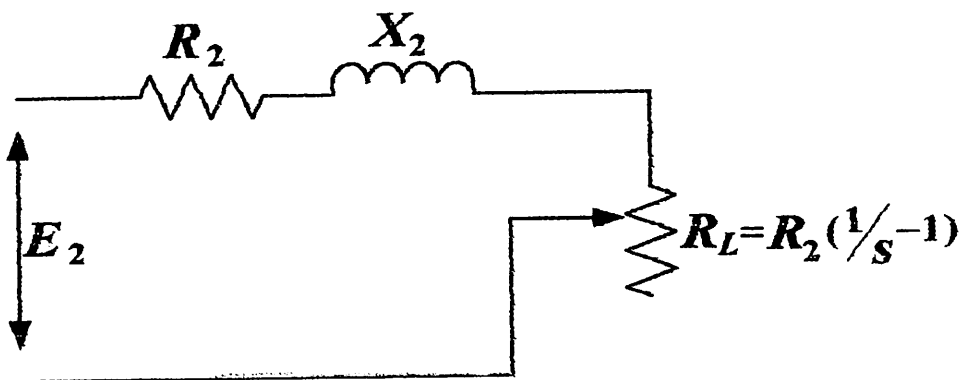
Gambar 2.7  
Rangkaian ekivalen lain dari rotor motor induksi<sup>[4]</sup>

$X_2$  adalah komponen tetap (*fixed*) dan  $R_2/s$  adalah komponen yang bervariasi (*variabel*), karena  $R_2/s = R_2 + R_2(1/s - 1)$ , di mana :

$R_2$  = resistansi rotor

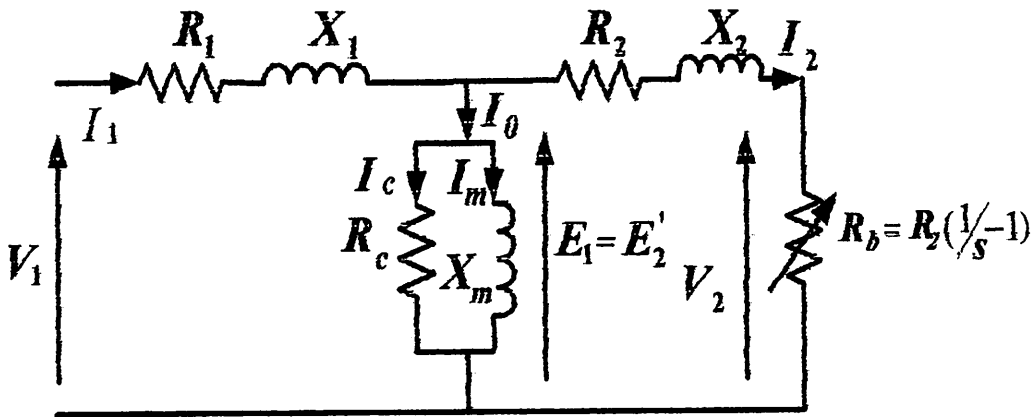
$R_2(1/s - 1)$  = resistansi beban ( $R_b$ ) dengan asumsi beban motor bersifat non-induktif (resistif), sehingga rangkaian ekivalen rotor dapat digambarkan sebagai :

Rangkaian ekivalen rotor motor yang dibebani diperlihatkan pada gambar 2.8 berikut ini :

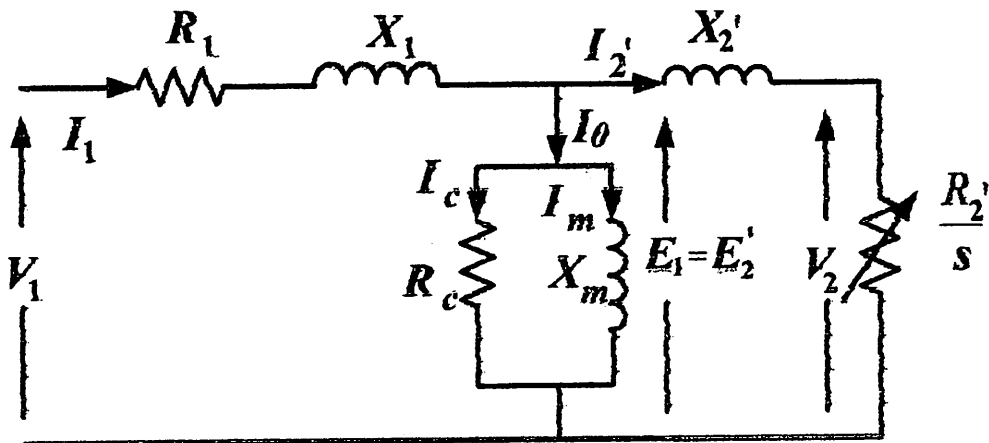


Gambar 2.8  
Rangkaian ekivalen rotor motor yang dibebani<sup>[4]</sup>

Dari gambar 2.8 di atas, rangkaian ekivalen per fasa dari motor induksi 3 fasa dapat digambarkan sebagai berikut :

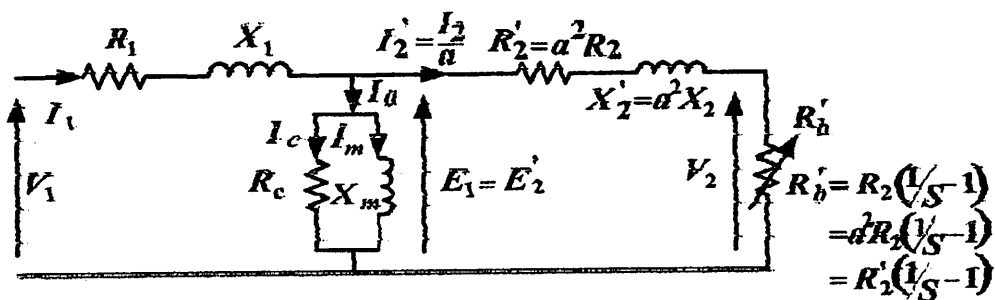


Gambar 2.9  
Rangkaian ekuivalen motor induksi<sup>[4]</sup>



Gambar 2.10  
Rangkaian ekuivalen motor induksi per fasa dengan sisi primer sebagai referensi<sup>[4]</sup>

Atau :



Gambar 2.11  
Rangkaian ekuivalen lain motor induksi per fasa dengan sisi primer sebagai referensi<sup>[4]</sup>

### 2.5.2 Analisa Rangkaian Ekivalen Sebenarnya Dari Rangkaian Ekivalen Pada Gambar 2.11

Dari rangkaian ekivalen gambar 2.11 maka didapat :

1. Impedansi rangkaian stator ( $Z_1$ ):

$$Z_1 = (R_1 + jX_1) = \sqrt{(R_1^2 + X_1^2)} \angle \tan^{-1} \frac{X_1}{R_1} \text{ per fasa dalam ohm} \dots\dots\dots (2.8)$$

2. Impedansi Rangkaian Penguat ( $Z_0$ ):

$$Z_0 = \frac{1}{Y_0} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_0}\right) + j\left(\frac{1}{X_0}\right)} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_0}\right)^2}} \angle \tan^{-1} \frac{X_1}{R_1} \dots\dots\dots (2.9)$$

3. Impedansi Rotor yang dipindahkan ke stator :

$$Z'_2 = \frac{R'_2}{s} + jX'_2 = \sqrt{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X'_2)^2} \angle \tan^{-1} \left[ \frac{X'_2}{\left(\frac{R'_2}{s}\right)} \right] \dots\dots\dots (2.10)$$

4. Impedansi total pada rangkaian yang diberikan ke sumber tegangan  $V_1$  :

$$Z_{total} = Z_1 + \frac{Z_0 \cdot Z'_2}{Z_0 + Z'_2} = |Z_{total}| \angle \phi \text{ per fasa dalam ohm} \dots\dots\dots (2.11)$$

5. Arus stator :

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_{total}} = |I_1| \angle \phi \text{ per fasa dalam ampere} \dots\dots\dots (2.12)$$

6. Daya input stator :

$$P_1 = 3V_1 I_1 \text{ Cos } \phi \text{ per fasa dalam watt} \dots\dots\dots (2.13)$$

7. Faktor daya input :

$$(\text{pf})_{input} = \text{Cos } \phi = \frac{P_1}{3V_1 I_1} \text{ per fasa} \dots\dots\dots (2.14)$$

8. Arus yang mengalir pada rotor :

$$I_2' = I_1 \frac{Z_0}{Z_0 + Z_2} \text{ per fasa dalam ampere ..... (2.15)}$$

9. Arus beban nol :

$$I_0 = I_f \frac{Z_2'}{Z_0 + Z_2'} \text{ per fasa dalam ampere ..... (2.16)}$$

10. Rugi tembaga stator :

$$P_{\text{cus}} = I_1^2 R_1 \text{ per fasa dalam watt ..... (2.17)}$$

11. Rugi inti :

$$P_c = I_0^2 R_0 \text{ per fasa dalam watt ..... (2.18)}$$

12. Daya input rotor :

$$P_2 = (I_2')^2 \frac{R_2'}{s} = I_1^2 \cdot R_{AB} \text{ per fasa dalam watt ..... (2.19)}$$

13. Rugi tembaga rotor :

$$P_{\text{cur}} = (I_2')^2 R_2' = s P_2 \text{ per fasa dalam watt ..... (2.20)}$$

14. Daya output kotor (gross output) :

$$P_{\text{mi}} = (I_2')^2 R_2' \left[ \frac{(1-s)}{s} \right] = (1-s) P_2 \text{ per fasa dalam watt ..... (2.21)}$$

15. Torsi motor:  $T = \frac{P_o}{2\pi \cdot n_r / 60} \text{ ..... (2.22)}$

16. Effisiensi :

$$\eta = \frac{P_o}{P_{\text{in}}} \times 100\% \text{ ..... (2.23)}$$

### 2.5.3 Daya Motor Induksi

Dengan memperhatikan model rangkaian pada gambar 2.12, maka :

Daya masuk stator :

$$P_1 = 3V_1 I_1 \cos \varphi \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

Daya masuk rotor (terdapat pada celah udara) :

$$P_2 = 3E_1 I_2' \cos \varphi \quad \text{atau}$$

$$P_2 = 3(I_2')^2 a^2 \left[ R_2 + R_2 \left( \frac{1-S}{S} \right) \right]$$

$$P_2 = 3(I_2')^2 a^2 \left( \frac{R_2}{S} \right) \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

Daya keluaran rotor (daya mekanik pada rotor termasuk rugi geser dan angin)

$$P_m = 3(I_2')^2 a^2 R_2 \left( \frac{1-S}{S} \right) \quad \dots\dots\dots (2.26)$$

Rugi tembaga rotor :

$$P_{cu} = 3(I_2')^2 a^2 R_2 \quad \dots\dots\dots (2.27)$$

Jadi,

$$P_2 : P_m : P_{cu} = 1 : (1-S) : S \quad \dots\dots\dots (2.28)$$

Dengan demikian diperoleh cara menghitung yang lebih cepat.

Daya keluaran rotor dapat juga diperoleh dari daya masuk rotor dikurangi rugi

tembaga rotor :  $(P_m = P_2 - P_{cu})$ .

### 2.6 Menentukan Parameter-Parameter Motor Induksi

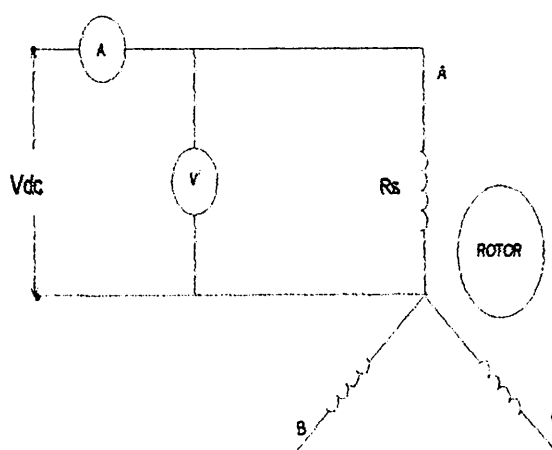
Parameter-parameter yang terdapat dalam untai ekivalen seperti  $R_0$ ,  $X_0$ ,  $R_1$ ,  $X_1$ ,  $R_2$ ,  $X_2$  dapat ditentukan dengan hasil-hasil pengujian tanpa beban motor induksi, pengujian blok rotor dan pengujian tahanan stator motor induksi.

### 2.6.1 Menentukan Tahanan Stator Motor Induksi ( *DC Test* )

Pengujian tahanan stator ini dilakukan pada motor induksi yang akan dijadikan obyek penelitian. Sumber tegangan DC diberikan pada dua buah terminal input motor. Arus DC kemudian akan mengalir ke rangkaian belitan stator motor induksi. Dalam hal ini yang yang mengalir adalah arus DC, maka tidak ada arus yang diinduksikan ke rotor sehingga pada rangkaian rotor pun tidak akan mengalir arus. Dari kondisi ini dapat disimpulkan bahwa yang hanya membatasi aliran arus pada rangkaian stator adalah tahanan belitan stator itu sendiri, sehingga nilainya dapat ditentukan.

Dalam hal ini, rangkaian stator motor terhubung bintang, sehingga sumber DC dihubungkan ke dua dari tiga terminal motor induksi. Arus DC kemudian secara otomatis hanya akan mengalir pada 2 dari 3 belitan stator motor induksi, sehingga nilai resistansi yang terukur adalah 2 kali nilai tahanan belitan ( $2R_1$ ).

Rangkaian pengujian tahanan stator ini menggunakan model rangkaian seperti pada gambar 2.12 berikut ini :



**Gambar 2.12**  
Rangkaian pengujian tahanan stator<sup>[5]</sup>



Dari bentuk rangkaian pengujian di atas terlihat bahwa bentuk hubungan kedua belitan tersebut adalah hubungan seri, sehingga

$$R_s = R_{DC} = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} \dots\dots\dots (2.29)$$

Nilai  $R_s$  yang didapat hanya merupakan nilai pendekatan, karena pada kondisi operasi normal, motor induksi diberikan pasokan tegangan arus bolak-balik yang dapat menimbulkan efek kulit (*skin effect*) yang mempengaruhi besarnya nilai  $R_s$ .

### 2.6.2 Pengujian Tanpa Beban Motor Induksi ( *No Load Test* )

Pengujian tanpa beban motor induksi, seperti halnya pengujian hubung buka pada transformator, akan memberikan informasi mengenai arus eksitasi dan rugi-rugi rotasional. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan suatu nilai tegangan seimbang ke belitan stator pada nilai frekuensi *rated*. Dalam kondisi ini, rotor motor induksi harus tidak terkopel dengan suatu beban mekanis. Nilai-nilai rugi-rugi pada saat beban nol dapat diasumsikan sama dengan nilai rugi-rugi motor pada saat berbeban ringan, dengan besar tegangan dan frekuensi *rated*.

Pengujian ini untuk mengukur rugi-rugi putaran dan arus magnetisasi. Pada keadaan tanpa beban (beban nol), beban yang dipikul hanyalah rugi-rugi angin dan gesekan. Dari data *instrument* ukur dapat ditentukan parameter-parameter (per fasa) :

Untuk arus tanpa beban ( $I_{TB}$ ) diperoleh persamaan :

$$I_{TB} = \frac{I_{TB1} + I_{TB2} + I_{TB3}}{3} \dots\dots\dots (2.30)$$

sedangkan impedansi tanpa beban persamaannya adalah :

$$Z_{tb} = \frac{V_{tb}}{\sqrt{3} \cdot I_{tb}} \dots \dots \dots (2.31)$$

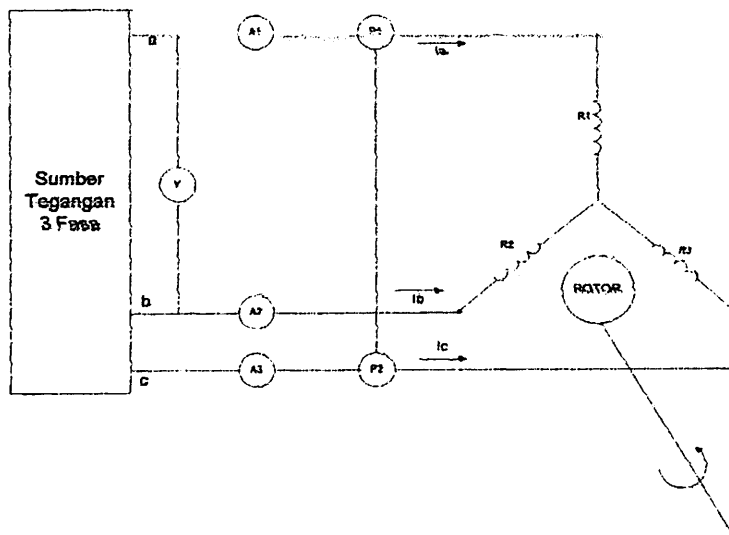
Untuk persamaan resistansi dalam keadaan tanpa beban diperoleh :

$$R_{TB} = \frac{P_{3\phi}}{3 \cdot I_{TB}^2} \dots \dots \dots (2.32)$$

sedangkan reaktansi dalam keadaan tanpa beban diperoleh :

$$X_{TB} = \sqrt{Z_{TB}^2 - R_{TB}^2} \dots \dots \dots (2.33)$$

Rangkaian ekivalen pengujian beban nol ditunjukkan pada gambar 2.13 berikut ini

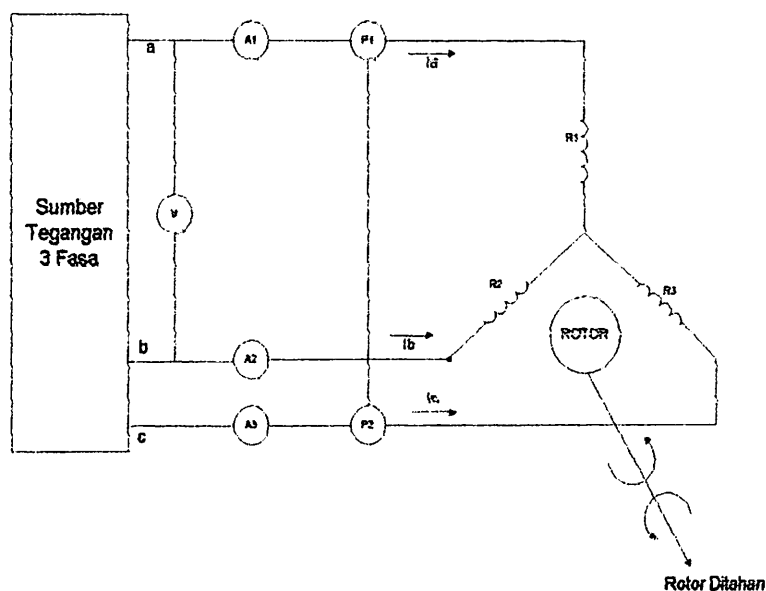


**Gambar 2.13**  
**Rangkaian ekivalen pengujian beban nol<sup>[5]</sup>**

### 2.6.3 Pengujian Rotor Tertahan Motor Induksi (*Blocked Rotor Test*)

Pengujian blok rotor dimaksudkan untuk mendapatkan beberapa parameter dalam rangkaian ekivalen motor induksi, antara lain arus, daya serta faktor daya. Waktu hubung singkat juga karakteristik dari daya dan arus hubung singkat sebagai fungsi tegangan yang disuplai ke rotor.

Rangkaian ekivalen pengujian rotor tertahan dapat diamati pada gambar 2.14 berikut ini :



**Gambar 2.14**  
**Rangkaian ekivalen pengujian rotor tertahan<sup>[5]</sup>**

Untuk mendapatkan arus rotor tertahan ( $I_{RT}$ ) dari pengujian didapatkan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$I_{RT} = \frac{I_{RT1} + I_{RT2} + I_{RT3}}{3} \dots\dots\dots (2.34)$$

untuk impedansi rotor tertahan ( $Z_{RT}$ ) dapat ditentukan dengan:

$$Z_{RT} = \frac{V}{\sqrt{3} I_{RT}} \dots\dots\dots (2.35)$$

Resistansi rotor tertahan dapat ditentukan dengan persamaan :

$$R_{RT} = \frac{P_{3\phi}}{3 I_{RT}^2} \dots\dots\dots (2.36)$$

Tahanan rotor dapat ditentukan :

$$R_{br} = \frac{P_m}{3I_1^2} \dots\dots\dots (2.37)$$

Besarnya reaktansi rotor tertahan dapat ditentukan dengan persamaan :

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

Karena motor induksi yang dipakai adalah motor induksi dengan rotor sangkar tunggal kelas A, maka secara umum  $X_s = X_r = \frac{1}{2} X_{RT}$ .

Selanjutnya, hubungan antara  $X_s$  dan  $X_r$  sebagai fungsi dari  $X_{RT}$  berdasarkan desain rotor dapat dilihat pada tabel 2.1 berikut ini :

**Tabel 2.1**  
**Standar besarnya reaktansi berbagai jenis desain rotor**

Desain Rotor	$X_1$	$X_2$
Rotor belitan	$0,5X_{RT}$	$0,5X_{RT}$
Kelas A	$0,5X_{RT}$	$0,5X_{RT}$
Kelas B	$0,4X_{RT}$	$0,6X_{RT}$
Kelas C	$0,3X_{RT}$	$0,7X_{RT}$
Kelas D	$0,5X_{RT}$	$0,5X_{RT}$

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

$$X_{TB} = X_s + X_m \dots\dots\dots (2.39)$$

$$X_m = X_{TB} - X_s \dots\dots\dots (2.40)$$

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

$$R_r = R_{RT} - R_s \dots\dots\dots(2.41)$$

$$X_{rr} = X'_r + X_m \dots\dots\dots(2.42)$$

$$R'_r = R \left( \frac{X_{rr}}{X_m} \right)^2 \dots\dots\dots(2.43)$$

Untuk menghitung besarnya nilai induktansi stator ( $L_s$ ), nilai induktansi rotor ( $L_r$ ), dan nilai induktansi bersama ( $L_m$ ) adalah :

$$X_s = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_s \dots\dots\dots(2.44)$$

Maka

$$L_s = \frac{X_s}{2\pi f} \dots\dots\dots(2.45)$$

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

Untuk besarnya nilai induktansi bersama ( $L_m$ )

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f} \dots\dots\dots(2.46)$$

## 2.7 Operasi Motor Induksi

### 2.7.1 Performa *Stedy State*

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



### 2.7.2 Performa *Transient*

Keadaan *transient* atau peralihan merupakan kondisi sesaat motor dimana keadaan berubah-ubah dan dapat menentukan beberapa faktor penting dalam pengendalian motor. Misalnya dalam keadaan *start* motor induksi dengan kapasitas besar akan menghasilkan arus *starting* yang besar dimana besarnya 3 sampai 8 kali arus nominal yang tertera pada nameplate motor.

### 2.8 Metode *Field Oriented Control* (FOC)<sup>[3][8]</sup>

*Field Oriented Control* (FOC) adalah metode pengendalian yang terdiri dari pengendalian arus stator yang dipersembahkan oleh suatu garis vektor. Kendali ini didasarkan pada proyeksi yang mengubah bentuk tiga fasa ke dalam suatu bentuk koordinat d-q (*Direct* dan *Quadrature*). Proyeksi ini mendorong kearah suatu struktur yang serupa dengan suatu pengendalian mesin DC. Metode *Field Oriented Control* ini memerlukan dua tetapan sebagai masukan acuan yaitu:

1. Komponen *flux* yang digambarkan dengan koordinat d (*Direct*)
2. Komponen torsi (tenaga putaran) yang digambarkan dengan koordinat q (*Quadrature*).

Metode *Field Oriented Control* hanya didasarkan pada proyeksi struktur kendali yang menangani jumlah daya. Ini membuat pengendalian lebih akurat pada setiap operasi pekerjaan yaitu saat kondisi mantap (*steady state*) dan pada saat kondisi berubah-ubah (*transient*) dan tidak terikat pada model matematika luas bidang yang terbatas.

Dengan melihat amplitudo dari rotor flux ( $\psi_r$ ) pada suatu nilai yang ditetapkan kita mempunyai suatu hubungan linier antara torsi dan komponen torsi ( $i_{sq}$ ). Kemudian kita bisa mengendalikan torsi itu dengan pengendalian komponen torsi dari vektor arus stator.

Prinsip Kerja Dari metode *Field Oriented Control* :

1. Meregulasi kecepatan motor ( $\omega_r$ ) dan kecepatan motor referensi ( $\omega_r^*$ ) untuk mendapatkan Torsi referensi ( $T_e^*$ ).
2. Mengubah arus  $i_{abc}$  kedalam bentuk sumbu d-q untuk mendapatkan arus  $I_d$  dan  $I_q$ . Arus  $I_d$  ini digunakan untuk mendapatkan perhitungan flux rotor ( $\Psi_r$ ).
3. Dari hasil no.1 dan no. 2 yaitu dari hasil perhitungan dari  $T_e^*$  dan  $\Psi_r$  akan digunakan untuk mendapatkan Arus  $I_q^*$ .
4. Flux referensi ( $\Psi_r^*$ ) digunakan untuk mendapatkan arus  $I_d$  referensi ( $I_d^*$ ).
5. Dari langkah no.2 arus  $I_q$  bersama dengan masukan dari kecepatan motor ( $\omega_r$ ) dan flux rotor ( $\Psi_r$ ) digunakan untuk mendapatkan sudut theta ( $\theta$ ).
6. Dari hasil No.3 , 4, dan 5, didapatkan hasil perhitungan Arus  $i_{abc}$  referensi ( $i_{abc}^*$ ).
7. Hasil dari  $i_{abc}^*$  akan diregulasi dengan  $i_{abc}$  untuk mendapatkan arus yang digunakan oleh motor.

### 2.8.1 Proyeksi dan Definisi Dari Vektor Ruang (Space Vector)<sup>[8]</sup>.

Tegangan 3 fasa, arus dan flux motor AC dapat dianalisa dalam kaitan dengan garis vektor ruang yang kompleks. Dengan arus ini, garis vektor ruang dapat digambarkan. Di asumsikan bahwa  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  adalah arus yang mengalir di

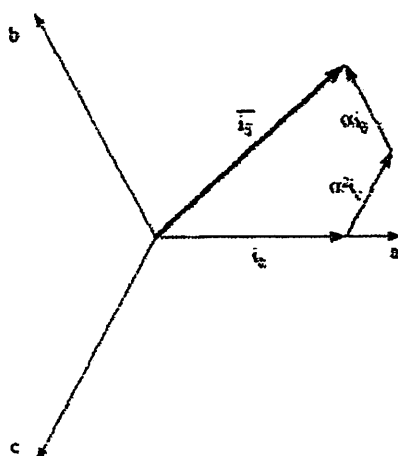
dalam fasa stator, kemudian vektor arus stator yang kompleks  $\bar{i}_s$  digambarkan oleh:

$$\bar{i}_s = i_a + \alpha i_b + \alpha^2 i_c \dots\dots\dots (2.47)$$

dimana  $\alpha = e^{j\frac{2}{3}\pi}$  dan  $\alpha^2 = e^{j\frac{4}{3}\pi}$ , menghadirkan operator vektor ruang itu.

Diagram berikut menunjukkan garis vektor ruang kompleks arus stator: di mana (a,b,c) adalah ke tiga garis fasa sistem. Arus garis vektor ruang arus ini melukiskan sistem sinusoidal tiga fasa. namun perlu untuk diubah ke dalam suatu perkalian dari dua koordinat sistem. Perubahan bentuk ini dapat dipecah jadi dua langkah-langkah :

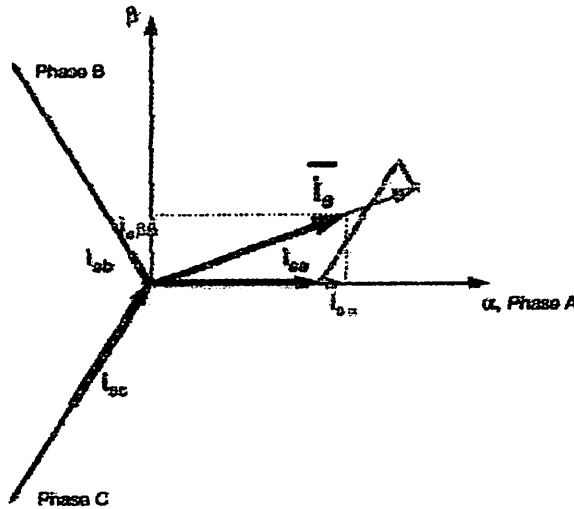
- ( a,b,c)  $\Rightarrow$  ( $\alpha$ - $\beta$ ) ( Transformasi Clarke) merupakan keluaran dari perkalian dua sistem koordinat.
- (  $\alpha$ - $\beta$ )  $\Rightarrow$  (d-q) ( Transformasi Park) merupakan keluaran dari perkalian dua sistem koordinat .



**Gambar 2.15**  
**Diagram Fasor Vektor Ruang Arus Stator Beserta komponen a b c<sup>[3]</sup>**

**2.8.2. Proyeksi abc ⇒ α-β ( Transformasi Clarke )<sup>[3][8]</sup>**

Garis vektor ruang dapat diberikan melalui bingkai acuan yang lain dengan hanya menggunakan dua poros orthogonal (α,β). Asumsi bahwa poros a dan poros α mempunyai arah yang sama dapat kita lihat pada diagram garis vektor yang berikut:



**Gambar 2.16**  
**Diagram Fasor Vektor Ruang Arus Stator Dengan Komponen α β<sup>[3]</sup>**

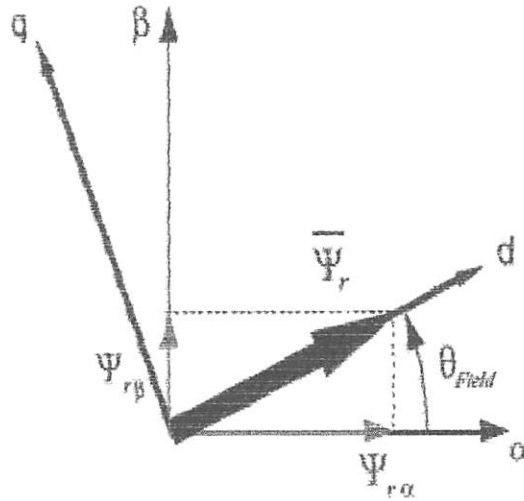
Proyeksi yang memodifikasi sistem 3 fasa ke dalam ( α,β) dimensi sistem orthogonal diberikan dari :

$$\begin{cases} i_{S\alpha} = i_a \\ i_{S\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}i_a + \frac{2}{\sqrt{3}}i_b \end{cases} \dots\dots\dots(2.48)$$

**2.8.3 Proyeksi α-β ⇒ d-q ( Transformasi Park )<sup>[3][8]</sup>**

Transformasi ini adalah yang paling penting dari metode *Field Oriented Control*. Pada intinya, proyeksi ini memodifikasi sistem orthogonal dua fasa (α,β) di dalam bingkai acuan putaran d-q Jika kita membandingkan

bahwa poros d segaris dengan *flux* rotor ( $\Psi_R$ ), diagram dibawah ini akan menunjukkanya, untuk vektor arus, hubungan dari bingkai referensi :



**Gambar 2.17**

**Diagram Fasor Vektor Ruang Arus Stator Dengan Komponen  $\alpha$   $\beta$  Dalam Bingkai Referensi Perputaran d-q<sup>[3]</sup>**

dimana  $\theta$  adalah posisi *flux* rotor. *Flux* dan komponen torsi dari vektor arus diberikan dari persamaan berikut :

$$\begin{cases} i_{sd} = i_{s\alpha} \cos\theta + i_{s\beta} \sin\theta \\ i_{sq} = -i_{s\alpha} \sin\theta + i_{s\beta} \cos\theta \end{cases} \dots\dots\dots(2.49)$$

komponen ini tergantung dari vektor arus yaitu komponen ( $\alpha, \beta$ ) dan posisi *flux* rotor; jika kita mengetahui posisi *flux* rotor dengan benar kemudian, dengan proyeksi ini, komponen d-q akan menjadi ketetapan.



### 2.8.4 The (d,q)-> ( $\alpha,\beta$ ) projection (inverse Park transformation) <sup>[3][8]</sup>

Disini, dari transformasi inverse Park Transformation kita mengenalkan perhitungan yang memodifikasi arus bingkai acuan perputaran d-q menjadi kedalam bentuk sumbu  $\alpha$ - $\beta$ . Persamaannya adalah:

$$\begin{aligned} I_{s\alpha} &= I_{sd} \cos \theta - I_{sq} \sin \theta \\ I_{s\beta} &= I_{sd} \sin \theta + I_{sq} \cos \theta \end{aligned} \dots\dots\dots(2.50)$$

keluaran dari rumus diatas adalah komponen arus stator dalam sumbu  $\alpha$ - $\beta$  yang bias digunakan untuk mencari arus stator fasa a,b,c.

## 2.9 Inverter Tiga Fasa <sup>[5]</sup>

### 2.9.1 Umum

Saat ini *inverter* membutuhkan desain yang mampu menyuplai torsi pada motor terutama pada kondisi *transient*. Karena pada saat kondisi *transient* sangat menentukan performansi dari *inverter*. Pada saat tersebut, motor membutuhkan perubahan arus yang cepat dan tegangan akan naik secara linear terhadap frekuensi, sedangkan torsi dipastikan cukup untuk melakukan *start* awal

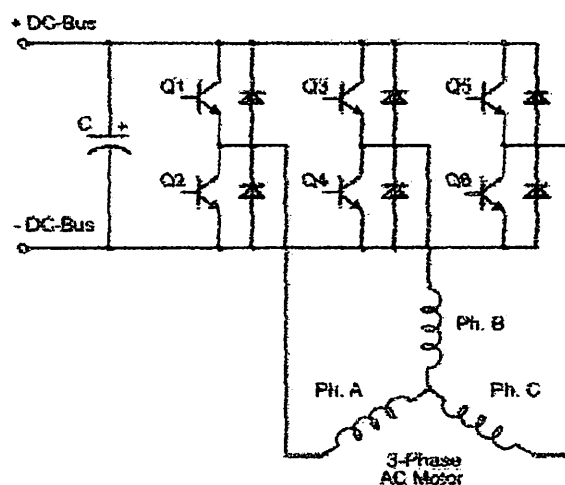
Secara umum pembalik (*inverter*) adalah rangkaian listrik yang digunakan untuk mengubah tegangan searah (DC) menjadi tegangan bolak balik (AC).

Ada dua jenis inverter yang umum digunakan pada sistem tenaga listrik yaitu :

- a. *Inverter* dengan frekuensi dan tegangan keluaran yang konstan CVCF (*Constant Voltage Constant Frequency*).
- b. *Inverter* dengan frekuensi dan tegangan keluaran yang berubah-ubah.

Perubahan tegangan keluaran dari *inverter* ditentukan oleh perubahan tegangan masukan DC dan yang terpenting disini adalah penguat *inverter* harus konstan. Disisi lain jika tegangan masukan DC tetap dan tidak bervariasi, perubahan tegangan keluaran dapat ditentukan oleh perubahan penguat pada *inverter*. Penguat *inverter* dapat didefinisikan sebagai perbandingan tegangan keluaran AC dengan tegangan masukan DC.

Bentuk gelombang keluaran yang ideal adalah murni gelombang *sinusoidal*, untuk penggunaan daya rendah dan menengah gelombang kotak bisa digunakan tetapi untuk penggunaan daya besar diharapkan gelombangnya adalah gelombang *sinusoidal* dengan distorsi rendah. Dengan penggunaan komponen elektronika daya yang mempunyai respon tinggi maka faktor harmonisa dapat ditekan seminimal mungkin.



**Gambar 2.18**  
**Rangkaian Inverter Tiga Fasa<sup>[3]</sup>**

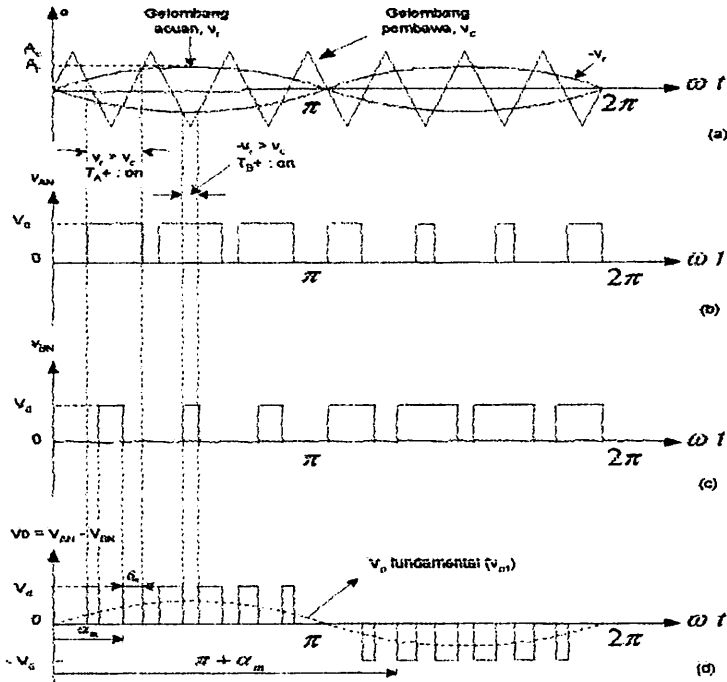
## 2.9.2 PWM ( Pulse Width Modulation ) Inverter

*Pulse Width Modulation Inverter* adalah rangkaian pengubah tegangan searah menjadi tegangan bolak balik. Pembangkitan sinyal PWM secara digital

dapat memberikan unjuk kerja sistem yang bagus karena lebih kebal terhadap gangguan. Perancangan sebuah pembangkit sinyal PWM menggunakan mikrokontroler memiliki beberapa keuntungan yaitu mudah diprogram dan rangkaian inverter menjadi sederhana. Dengan menggunakan inverter ini, maka pengendalian kecepatan motor AC dapat dilakukan dengan lebih teliti. Rangkaian inverter ini dirancang supaya ringkas, oleh karena itu pada sistem minimal mikrokontroler hanya mengandalkan ragam chip tunggal.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa rancangan pembangkit PWM telah berfungsi dengan baik. Sinyal PWM yang dibangkitkan memiliki 24 pulsa setiap periode dan rentang frekuensi antara 20 – 60 Hz dengan kenaikan dan penurunan setiap 1 Hz.

Untuk menghasilkan sinyal PWM tersebut dapat menggunakan 2 buah sinyal sinus dan 1 sinyal segitiga atau dengan menggunakan 1 buah sinyal sinus dan 2 buah sinyal segitiga. Pada proses pembangkitan SPWM dengan menggunakan 2 buah sinyal sinus dan sebuah sinyal segitiga, dilakukan perbandingan amplitudo antara sinyal segitiga dengan sinyal sinus. Sinyal penggerak akan dibangkitkan apabila amplitudo sinyal sinus lebih besar daripada amplitudo sinyal segitiga. Masing-masing sinyal penggerak digunakan untuk penyaklaran sehingga diperoleh sinyal PWM. Proses pembangkitan SPWM tersebut dapat dilihat pada gambar 2.19.



**Gambar 2.19.**

**(a) Proses perbandingan antara sinyal pembawa dengan sinyal referensi, (b) Sinyal penggerak  $V_{AN}$ , (c) Sinyal penggerak  $V_{BN}$ , (d) Sinyal SPWM**

Proses pembangkitan SPWM secara digital dapat dilakukan dengan 2 cara, yaitu:

1. Dengan membangkitkan gelombang segitiga dan gelombang sinus secara diskret dengan metode *look up table*. Kemudian dilakukan perbandingan untuk masing-masing nilai amplitudo gelombang sinus dan segitiga seperti pada gambar 2.19. Cara ini sama halnya dengan membangkitkan gelombang sinus analog dan gelombang segitiga analog secara digital.
2. Dengan mencari terlebih dahulu waktu untuk setiap pulsa masing-masing sinyal penggerak, untuk dijadikan data dalam proses pembangkitan sinyal penggerak secara *look up table*. Cara inilah yang dipakai dalam perancangan tugas akhir ini.

Di dalam rencana skema sinusoidal-PWM, ada dua perbandingan karakteristik yang menjadi faktor penting di dalam disain pengontrol. Perbandingan modulasi amplitudo  $m_a$  yang digambarkan sebagai perbandingan amplitudo puncak dari sinyal pengontrol kepada amplitudo puncak sinyal carrier (pembawa).

$$m_a = \frac{\hat{V}_{\text{control}}}{\hat{V}_{\text{tri}}}$$

Perbandingan modulasi frekuensi  $M_f$  digambarkan sebagai perbandingan frekuensi sinyal pembawa kepada perbandingan frekuensi sinyal control.

$$m_f = \frac{f_{\text{control}}}{f_{\text{tri}}}$$

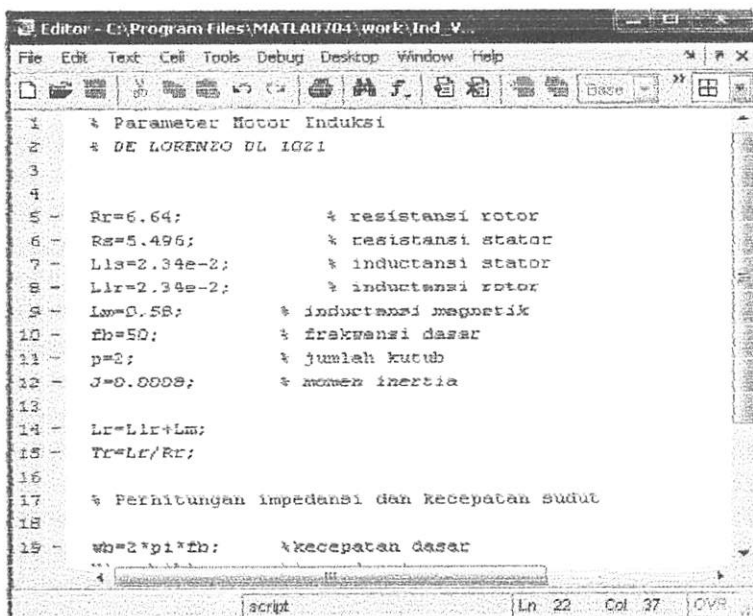
## 2.10 Matlab Simulink

### 2.10.1. Pengertian MATLAB

MATLAB merupakan suatu *software* yang sangat baik untuk digunakan dalam menganalisa berbagai kebutuhan dalam bidang teknik. Mencakup didalamnya adalah perhitungan, visualisasi, dan pemrograman yang dengan mudah dapat diimplementasikan dimana permasalahan dan solusinya diekspresikan ke dalam bentuk persamaan matematika yang telah dikenal luas. Fungsi – fungsi yang ada dalam MATLAB adalah :

- Pehitungan matematika
- Pembuatan algoritma
- Akuisisi data.
- Permodelan, simulasi, dan pembuatan *prototype*.
- Analalisa data, eksplorasi, dan visualisasi.
- Pembuatan aplikasi yang berorientasi dengan *Graphical User Interface*.

Didalam MATLAB terdapat dua bagian penting yaitu *M-files* yang berfungsi untuk menuliskan listing programnya dan simulink yang digunakan untuk melakukan simulasi.



```

Editor - C:\Program Files\MATLAB704\work\Ind_V...
File Edit Text Cell Tools Debug Desktop Window Help
% Parameter Motor Induksi
% DE LORENZO DL IGZI
1
2
3
4
5 - Rr=6.64;           % resistansi rotor
6 - Rs=5.496;        % resistansi stator
7 - Lls=2.34e-2;    % inductansi stator
8 - Llr=2.34e-2;    % inductansi rotor
9 - Lm=0.58;        % inductansi magnetik
10 - Fb=50;         % frekwensi dasar
11 - p=2;           % jumlah kutub
12 - J=0.0008;     % momen inertia
13
14 - Lr=Llr+Lm;
15 - Tr=Lr/Rr;
16
17 % Perhitungan impedansi dan kecepatan sudut
18
19 - w0=2*pi*Fb;    % kecepatan dasar
...
script |Ln 22 Col 37 |OVR

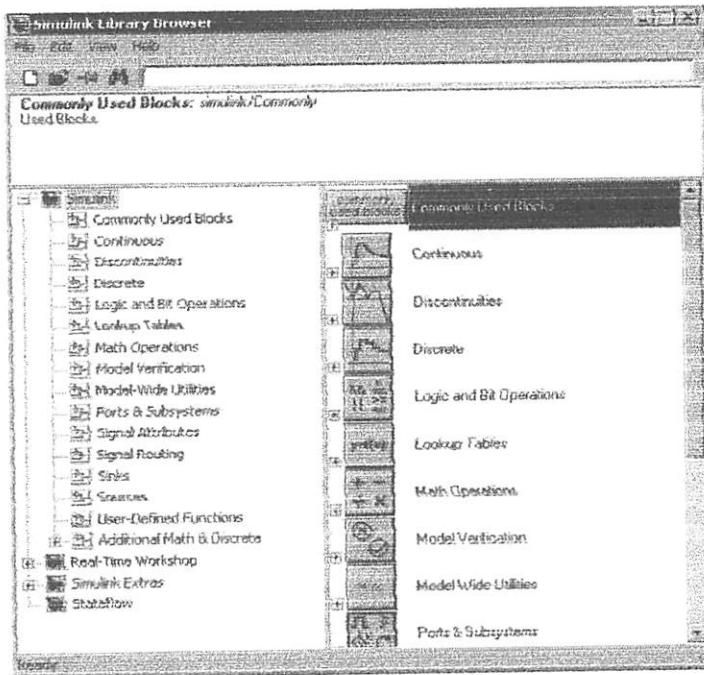
```

**Gambar 2.20**  
Tampilan *M-Files* Matlab

### 2.10.2 Simulink

Simulink adalah suatu *software* yang digunakan untuk memodelkan, mensimulasikan, dan menganalisa suatu sistem yang dinamis. Simulink mendukung sistem linear dan non linear, permodelan secara kontinyu, dan permodelan dengan menggunakan *sample time*.

Dengan menggunakan simulink yang merupakan satu kesatuan dalam program tersebut kita dapat melakukan suatu permodelan sistem kontrol atau suatu *plant* yang akan diatur. Hal itu dapat didesain dengan menggunakan blok-blok yang telah tersedia dalam *Simulink Library* sehingga *setting* parameter-parameter akan menjadi lebih mudah. Dalam *Simulink Library* telah tersedia berbagai macam permodelan-permodelan blok-blok yang lengkap. Kita hanya perlu melakukan *drag and drop* pada lembar kerja simulink untuk memodelkan sesuai dengan permodelan yang kita inginkan dan mengisi blok – blok persamaan yang sesuai .



**Gambar 2.21**  
**Tampilan *Simulink Library Browser***

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.



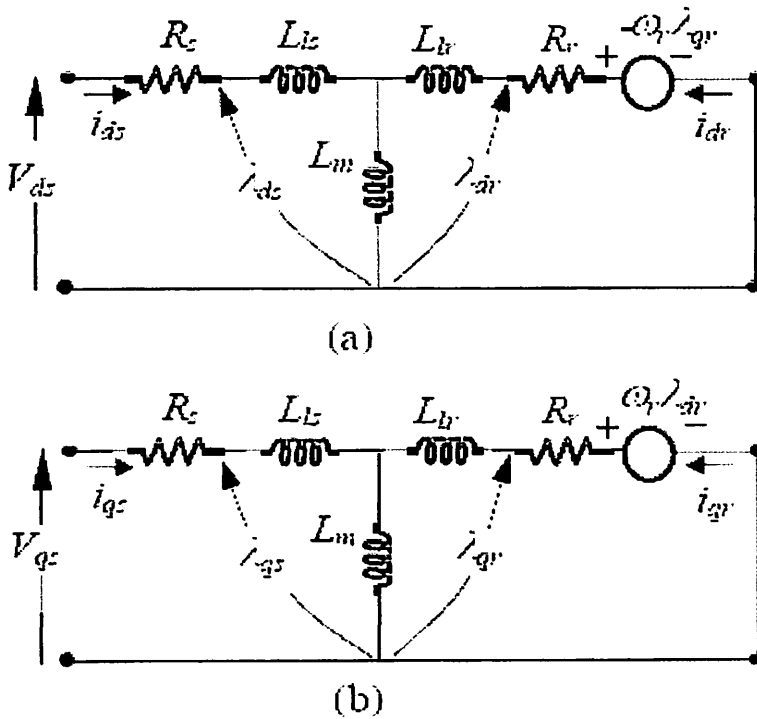




## BAB III

### PERMODELAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA

#### 3.1 Model Dinamik Mesin Induksi Tiga Fasa<sup>[6]</sup>



**Gambar 3.1**  
**Gambar Rangkaian Ekuivalen d-q<sup>[6]</sup>**

Model dinamik dari mesin induksi tiga fasa terhubung bintang (Y), dapat di ekspresikan dalam bentuk referensi *Stationary* d-q (*direct* dan *quadrature*)<sup>[9]</sup>.

$$\frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \cdot \left( - \left( R_s + \left( \frac{L_m}{L_r} \right)^2 R_r \right) i_{ds} + \sigma L_s \omega_e i_{qs} + \frac{L_m R_r}{L_r^2} \psi_{qr} \omega_r + V_{ds} \right) \dots \dots \dots (3.1)$$

$$\frac{di_{qs}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left( -\sigma L_s \omega_e i_{ds} - \left( R_s + \left( \frac{L_m}{L_r} \right)^2 R_r \right) i_{qs} - \frac{L_m}{L_r} \psi_{dr} \omega_r + \frac{L_m R_r}{L_r^2} \psi_{qr} + V_{qs} \right) \dots \dots \dots (3.2)$$

$$\frac{d\psi_{dr}}{dt} = \frac{L_m \cdot R_r}{L_r} \cdot i_{ds} - \frac{R_r}{L_r} \cdot \psi_{dr} + (\omega_e - \omega_r) \psi_{dr} \dots \dots \dots (3.3)$$

$$\frac{d\psi_{qr}}{dt} = \frac{L_m \cdot R_r}{L_r} \cdot i_{qs} - (\omega_e - \omega_r) \psi_{dr} - \frac{R_r}{L_r} \cdot \psi_{qr} \dots \dots \dots (3.4)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P^2 \cdot L_m}{L_r \cdot J} \left( i_{qs} \cdot \psi_{dr} - i_{ds} \cdot \psi_{qr} - \frac{f_c}{J} \cdot T_l \right) \dots \dots \dots (3.5)$$

Dimana koefisien Leakage  $\sigma$  didefinisikan dengan :

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r} \dots \dots \dots (3.6)$$

$L_s, L_r, L_m$  : Induktansi Stator, Induktansi Rotor, Induktansi Mutual.

$R_s, R_r$  : Resistansi tator, dan resistansi rotor.

$\omega_e, \omega_r$  : Kecepatan sudut elektrik dan rotor.

$\omega_{sl}$  : Kecepatan sudut slip ( $\omega_e - \omega_r$ ).

$\Psi_{dr}, \Psi_{qr}$  : *Flux* rotor dalam sumbu *direct*, *flux* rotor dalam sumbu *quadrature*.

$I_{ds}, i_{qs}$  : Arus stator dalam sumbu *direct*, arus stator dalam sumbu *quadrature*.

$\tau_r$  : Kostanta waktu rotor.

$P$  : Jumlah pasang kutub.

Tujuan utama dalam sistem *Field Oriented Control* adalah pengaturan seperti pada mesin DC, yang dapat mengatur *torsi* dan *flux* secara terpisah. Hal ini dapat dilakukan dengan mengubah ke dalam bentuk referensi *Stationary* sumbu

d-q, dengan vektor ruang *flux* rotor. Dalam sistem *Field Oriented Control* yang ideal, sumbu pertalian *flux* rotor diasumsikan sebaris dengan sumbu d, dan dapat didefinisikan :

$$\psi_{rq} = \frac{d\psi_{rq}}{dt} = 0 \dots\dots\dots (3.7)$$

$$\psi_{rd} = \psi_r = \text{Konstan} \dots\dots\dots (3.8)$$

mengaplikasikan dari persamaan (3.7) dan (3.8). Torsi elektromagnetik dapat dideskripsikan sebagai berikut :

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p \cdot L_m}{L_r} \cdot \psi_r \cdot i_{qs} \dots\dots\dots (3.9)$$

$$\tau_r = \frac{L_r}{R_r} \dots\dots\dots (3.10)$$

dan kecepatan sudut slip dan sudut theta didapat :

$$\omega_{sl} = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{i_{qs}^*}{i_{ds}^*} \dots\dots\dots (3.11)$$

$$\theta_e = \int (\omega_r + \omega_{sl}) dt \dots\dots\dots (3.12)$$

Sebagai konsekuensi dari persamaan (3.1), (3.2), (3.3), (3.4), (3.5) maka :

$$\frac{di_{ds}}{dt} = - \left( \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma \tau_r} \right) i_{ds} + \omega_e \cdot i_{qs} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau_r} \cdot \psi_{rd} + \frac{1}{\sigma L_s} \cdot V_{ds} \dots\dots\dots (3.13)$$

$$\frac{di_{qs}}{dt} = - \left( \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma \tau_r} \right) i_{qs} - \omega_e \cdot i_{ds} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau_r} \cdot \psi_{rd} + \frac{1}{\sigma L_s} \cdot V_{ds} \dots\dots\dots (3.14)$$

$$\frac{d\psi_r}{dt} = \frac{L_m}{\tau_r} \cdot i_{ds} - \frac{1}{\tau_r} \psi_{rd} \dots\dots\dots (3.15)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{3 P^2 L_m}{2 J L_r} i_{qs} \psi_{rd} \frac{f_c}{J} \omega_r - \frac{P}{J} T_i \dots \dots \dots (3.16)$$

Maka untuk mendapatkan  $\psi_{rd}$  dari persamaan (3.7) dan (3.8) didapat :

$$\psi_{rd} = \frac{L_m / \tau_r}{s + (1/\tau_r)} \dots \dots \dots (3.17)$$

Untuk parameter pengendali PI secara umum adalah<sup>[5]</sup> :

$$u_{ds} = v_{ds} - v_{dc} = R_s i_{ds} + L_s \sigma \frac{d}{dt} i_{ds} \dots \dots \dots (3.18)$$

$$u_{qs} = v_{qs} - v_{qc} = R_s i_{qs} + L_s \sigma \frac{d}{dt} i_{qs} \dots \dots \dots (3.19)$$

$$u_{ds} = \left( K_{idp} + \frac{K_{idi}}{s} \right) (i_{ds}^* - i_{ds}) \dots \dots \dots (3.20)$$

$$u_{qs} = \left( K_{iqp} + \frac{K_{iqi}}{s} \right) (i_{qs}^* - i_{qs}) \dots \dots \dots (3.21)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (3.18) ke persamaan (3.20), maka :

$$\left( K_{idp} + \frac{K_{idi}}{s} \right) i_{ds}^* = i_{ds} \left( R_s + L_s \sigma + L_{idp} + \frac{K_{idi}}{s} \right) \dots \dots \dots (3.22)$$

Dengan asumsi respon  $i_{ds}$  adalah *first order delay* dari sinyal acuan  $i_{ds}^*$ , maka :

$$i_{ds} = \frac{1}{T_{ds} s + 1} i_{ds}^* \dots \dots \dots (3.23)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (3.22) ke persamaan (3.23), maka dapat diperoleh :

$$K_{idp} T_d \cdot s + K_{idi} T_d = R_s + L_s \tau_s \dots \dots \dots (3.24)$$

Dari persamaan (3.24) diperoleh penguatan  $K_{idp}$  dan  $K_{idi}$  sebagai berikut:

$$K_{idp} = \frac{L_s \sigma}{T_d}; \text{ dan } K_{idi} = \frac{R_s}{T_d} \dots\dots\dots (3.25)$$

sedangkan dengan mensubtitusikan persamaan (3.19) ke persamaan (3.21) diperoleh persamaan :

$$\left( K_{iqp} + \frac{K_{idq}}{s} \right) i_{qs}^* = i_{qs} \left( R_s + L_s \sigma + L_{iqp} + \frac{K_{idq}}{s} \right) \dots\dots\dots (3.26)$$

Dengan asumsi respon  $i_{qs}$  adalah *first order delay* dari sinyal acuan  $i_{qs}^*$ , maka :

$$i_{qs} = \frac{1}{T_{ds} + 1} i_{qs}^* \dots\dots\dots (3.27)$$

Dengan mensubtitusikan persamaan (3.26) ke persamaan (3.27) diperoleh persamaan :

$$K_{iqp} T_d .s + K_{iqi} T_d = R_s + L_s \tau_s \dots\dots\dots (3.28)$$

Dari persamaan (3.28) diperoleh penguatan  $K_{iqp}$  dan  $K_{iqi}$  sebagai berikut:

$$K_{iqp} = \frac{L_s \sigma}{T_d}; \text{ dan } K_{iqi} = \frac{R_s}{T_d} \dots\dots\dots (3.29)$$

## 3.2 Pengujian Parameter Motor Induksi Tiga Fasa

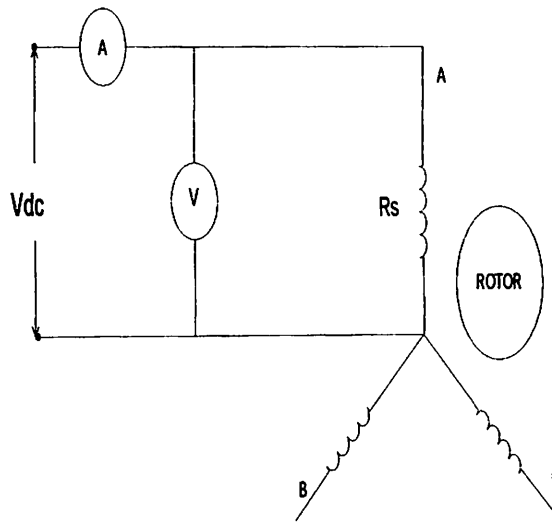
### 3.2.1 Alat-alat Yang Digunakan

Data papan nama motor induksi DL 1021 (*nameplate*):

TEGANGAN	: 220/380 ( $\Delta/Y$ ) VOLT
ARUS	: 4.3/2.5 ( $\Delta/Y$ ) A
COS $\phi$	: 0.83
FREKUENSI	: 50 HZ
DAYA	: 1.1 KW
PUTARAN	: 2820 RPM
KUTUB	: 2 KUTUB
KELAS ISOLASI	: F

- a. Motor induksi 3 fasa DE LORENZO/DL 1021
- b. Voltmeter DE LORENZO 1031
- c. Amperemeter DE LORENZO DL 1031
- d. Wattmeter 3 fasa DE LORENZO DL 1031
- e. Tachometer DE LORENZO 2026
- f. AC Voltage Regulator dan DC Supply DE LORENZO 1013 M2
- g. Current Break DE LOENZO

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

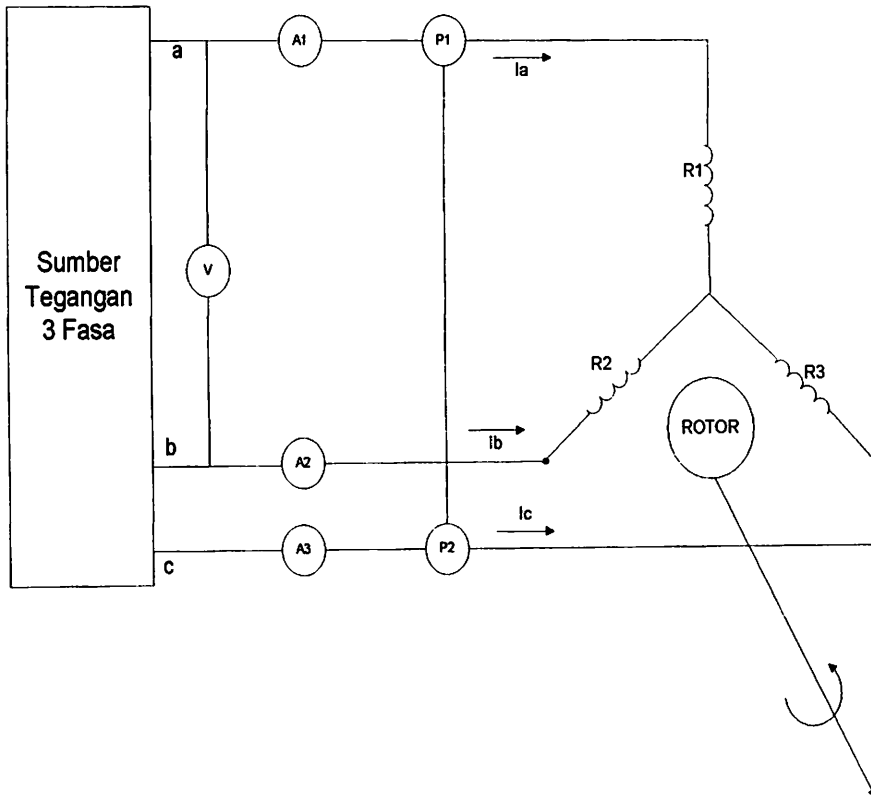


**Gambar 3.2**  
Rangkaian pengujian Arus searah (*DC Test*)

**Tabel 3.1**  
Data Hasil Pengujian Arus Searah

NO.	$V_{DC}$ (VOLT)	I (AMPERE)
1	4	0.75
2	6	1.12
3	8	1.44
4	10	1.78
5	12	2.14

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



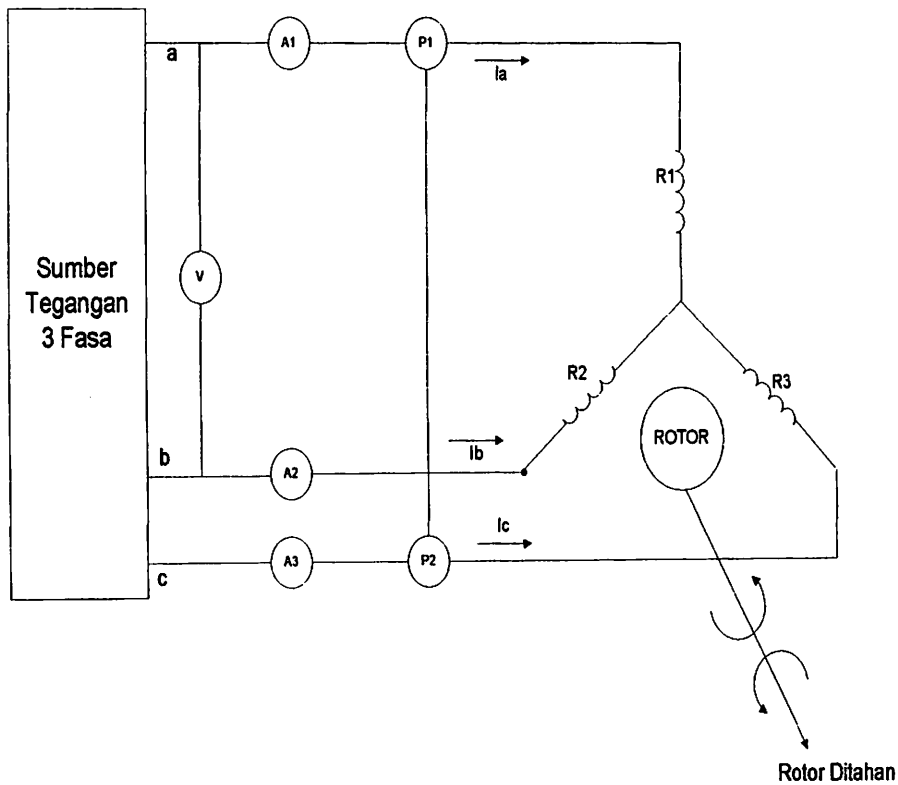
**Gambar 3.3**  
Rangkaian ekivalen pengujian Tanpa Beban (*No Load Test*)

**Tabel 3.2**  
Data Hasil Pengujian Beban Nol

$I_{\text{MOTOR}}$ (AMPERE)			$P_{3 \text{ FASA}}$ (WATT)	$V_{L-L}$ (VOLT)	FREKUENSI (HZ)
R	S	T			
0.59	0.68	0.59	90	220	50



### 3.2.4 Pengujian Rotor Tertahan (*Blocked Rotor Test*).



**Gambar 3.4**  
Rangkaian ekivalen pengujian Rotor Tertahan (*Blocked Rotor Test*)

**Tabel. 3.3**

**Data Hasil Pengujian Motor Rotor Tertahan**

I <sub>MOTOR</sub> (AMPERE)			P <sub>3 FASA</sub> (WATT)	V <sub>L-L</sub> (VOLT)
R	S	T		
2.01	2.03	1.95	140	65

### 3.2.5 Analisa Parameter Motor Induksi

- Torsi Nominal

$$T_{nom} = \frac{P_{nom}}{\left(\frac{2\pi \cdot n_{nom}}{60}\right)} = \frac{1100W}{\left(\frac{2.314.2820rpm}{60}\right)} = 3.73 \text{ N.m}$$

- Dari Pengujian Arus Searah (*DC Test*).

Besarnya resistansi stator adalah :

Dengan menggunakan persamaan (2.29) maka resistansi stator diperoleh:

$$R_s = R_{DC} = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} = \dots \Omega$$

Maka  $R_{DC1} = \frac{V_{DC1}}{I_{DC1}} = \frac{4}{0.75} = 5.33\Omega$

$$R_{DC2} = \frac{V_{DC2}}{I_{DC2}} = \frac{6}{1.12} = 5.36\Omega$$

$$R_{DC3} = \frac{V_{DC3}}{I_{DC3}} = \frac{8}{1.44} = 5.56\Omega$$

$$R_{DC4} = \frac{V_{DC4}}{I_{DC4}} = \frac{10}{1.78} = 5.62\Omega$$

$$R_{DC5} = \frac{V_{DC5}}{I_{DC5}} = \frac{12}{2.14} = 5.61\Omega$$

$$\begin{aligned} R_s &= \frac{R_{DC1} + R_{DC2} + R_{DC3} + R_{DC4} + R_{DC5}}{5} \\ &= \frac{5.33 + 5.36 + 5.56 + 5.62 + 5.61}{5} \\ &= \frac{27.48}{5} = 5.496\Omega \end{aligned}$$

- Dari Pengujian Tanpa Beban (*No Load Test*).

Dengan menggunakan persamaan (2.30) arus tanpa beban adalah :

$$I_{TB} = \frac{I_{TB1} + I_{TB2} + I_{TB3}}{3}$$

$$I_{TB} = \frac{0.59 + 0.68 + 0.59}{3} = \frac{1.86}{3} = 0.62 A$$

Dengan menggunakan persamaan (2.31) maka impedansi tanpa beban

$$\text{diperoleh : } Z_{TB} = \frac{V}{\sqrt{3}I_{TB}} = \frac{220}{\sqrt{3} \times 0.62} = 204.87 \Omega$$

sedangkan dengan menggunakan persamaan (2.32) dan (2.33) berturut-turut untuk mencari resistansi tanpa beban dan reaktansi tanpa beban adalah :

$$R_{TB} = \frac{P_{3\phi}}{3.I_{TB}^2} = \frac{90}{3 \times (0.62)^2} = 78.04 \Omega$$

$$X_{TB} = \sqrt{Z_{TB}^2 - R_{TB}^2} = \sqrt{(204.87)^2 - (78.04)^2}$$

$$X_{TB} = 189.42 \Omega$$

- Dari Pengujian Rotor Tertahan (*Blocked Rotor Test*)

Dengan menggunakan persamaan (2.34) arus rotor tertahan adalah :

$$I_{RT} = \frac{I_{RT1} + I_{RT2} + I_{RT3}}{3}$$

$$I_{RT} = \frac{2.01 + 2.03 + 1.97}{3} = \frac{6.01}{3} = 2.003 A$$

Dengan menggunakan persamaan (2.35) maka impedansi rotor tertahan diperoleh :

$$Z_{RT} = \frac{V}{\sqrt{3} \cdot I_{RT}} = \frac{65}{\sqrt{3} \times 2.003} = 18.74 \Omega$$

sedangkan dengan menggunakan persamaan (2.36) dan (2.37) berturut-turut untuk mencari resistansi tanpa beban dan reaktansi tanpa beban adalah :

$$R_{RT} = \frac{P_{3\phi}}{3 \cdot I_{RT}^2} = \frac{140}{3 \times (2.003)^2} = 11.63 \Omega$$

$$X_{RT} = \sqrt{Z_{RT}^2 - R_{RT}^2} = \sqrt{(18.74)^2 - (11.63)^2}$$

$$X_{RT} = 14.69 \Omega$$

Karena motor induksi yang dipakai adalah motor induksi dengan rotor sangkar tunggal kelas A, maka secara umum  $X_s = X'_r = \frac{1}{2} X_{RT} = \frac{1}{2} \cdot 14.69 = 7.345 \Omega$

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

$$X_{TB} = X_s + X_m$$

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

$$= 189.42 - 7.345 = 182.075 \Omega$$

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

$$R = R_{RT} - R_s$$

$$= 11.63 - 5.496 = 6.134 \Omega$$

$$X_{rr} = X'_r + X_m$$

$$= 7.345 + 182.075 = 189.42 \Omega$$

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

$$= 6.134 \left( \frac{189.42}{182.075} \right)^2 = 6.64 \Omega$$

Untuk menghitung besarnya nilai induktansi stator ( $L_s$ ), nilai induktansi rotor ( $L_r$ ), dan nilai induktansi bersama ( $L_m$ ) adalah :

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

Maka

$$L_s = \frac{X_s}{2\pi f} = \frac{7.345}{2 \times 3.14 \times 50} = 0.0234 H$$

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

Untuk besarnya nilai induktansi bersama ( $L_m$ )

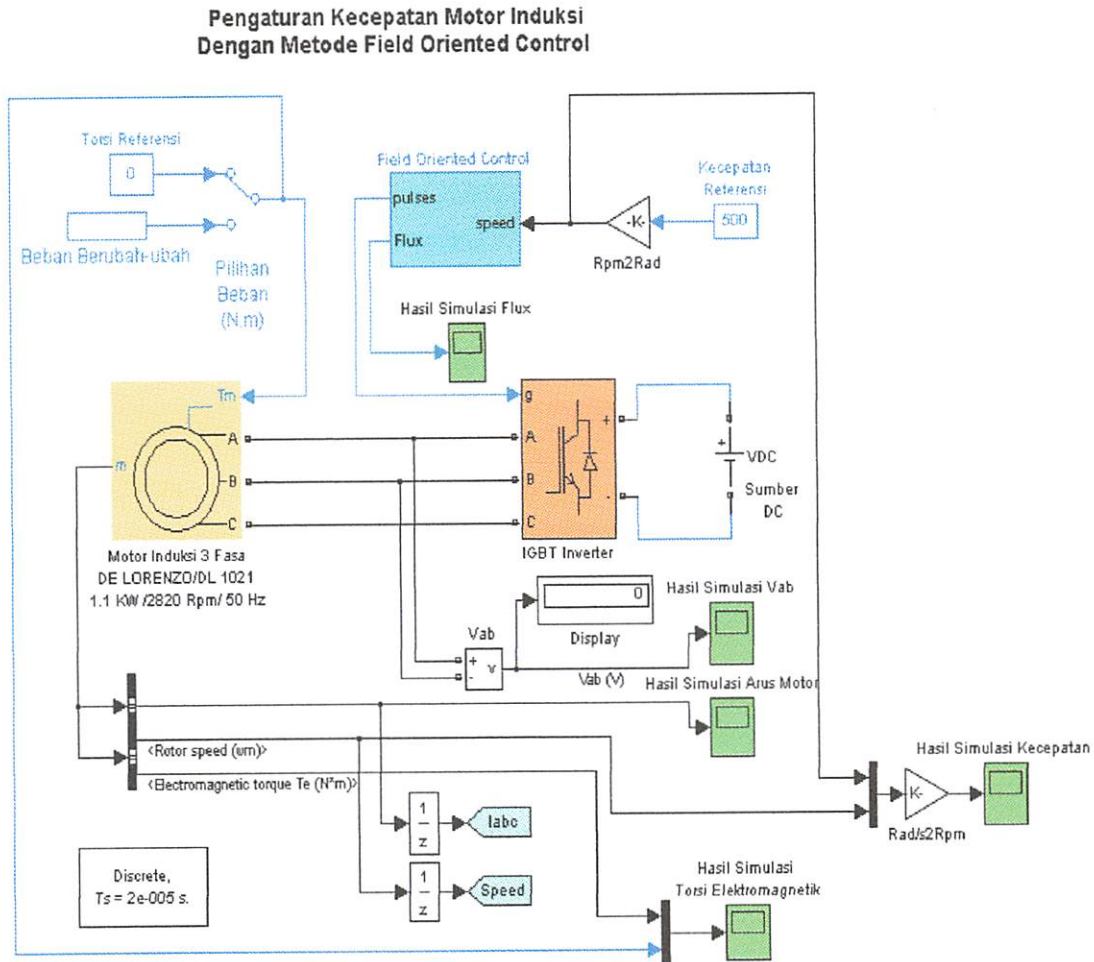
$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f} = \frac{182.075}{2 \times 3.14 \times 50} = 0.58 H$$

**Tabel 3.4**  
**Hasil Perhitungan Pengujian Parameter Motor Induksi Tiga fasa**

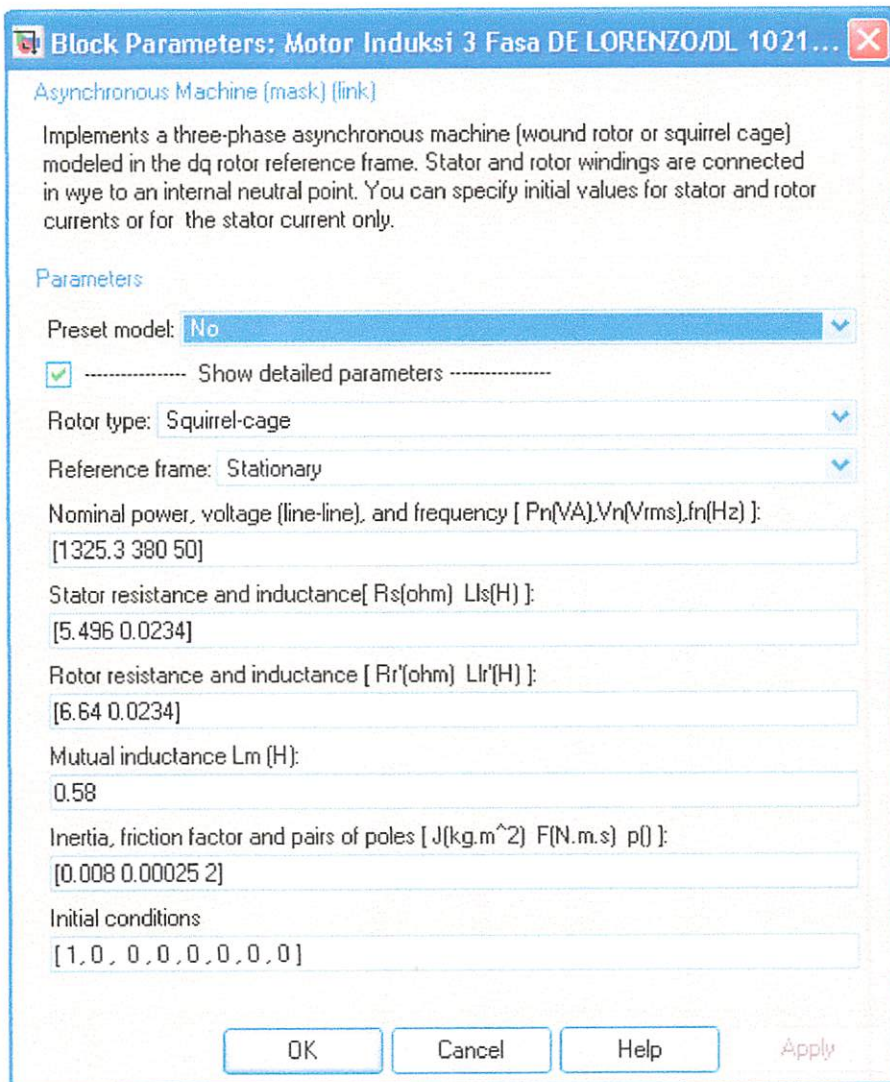
$R_s$ ( $\Omega$ )	$L_s$ (H)	$R_r$ ( $\Omega$ )	$L_r$ (H)	$X_s$ ( $\Omega$ )	$X_r$ ( $\Omega$ )	$X_m$ ( $\Omega$ )	$L_m$ (H)
5.496	0.0234	6.64	0.0234	7.345	7.345	182.075	0.58

### 3.3 Permodelan Metode *Field Oriented Control*

Dengan menggunakan bantuan MATLAB 7.0.4 maka dapat dibentuk blok pengontrolan untuk mengatur kecepatan motor induksi tiga fasa dengan metode FOC (*Field Oriented Control*) seperti yang tampak pada gambar 3.2.

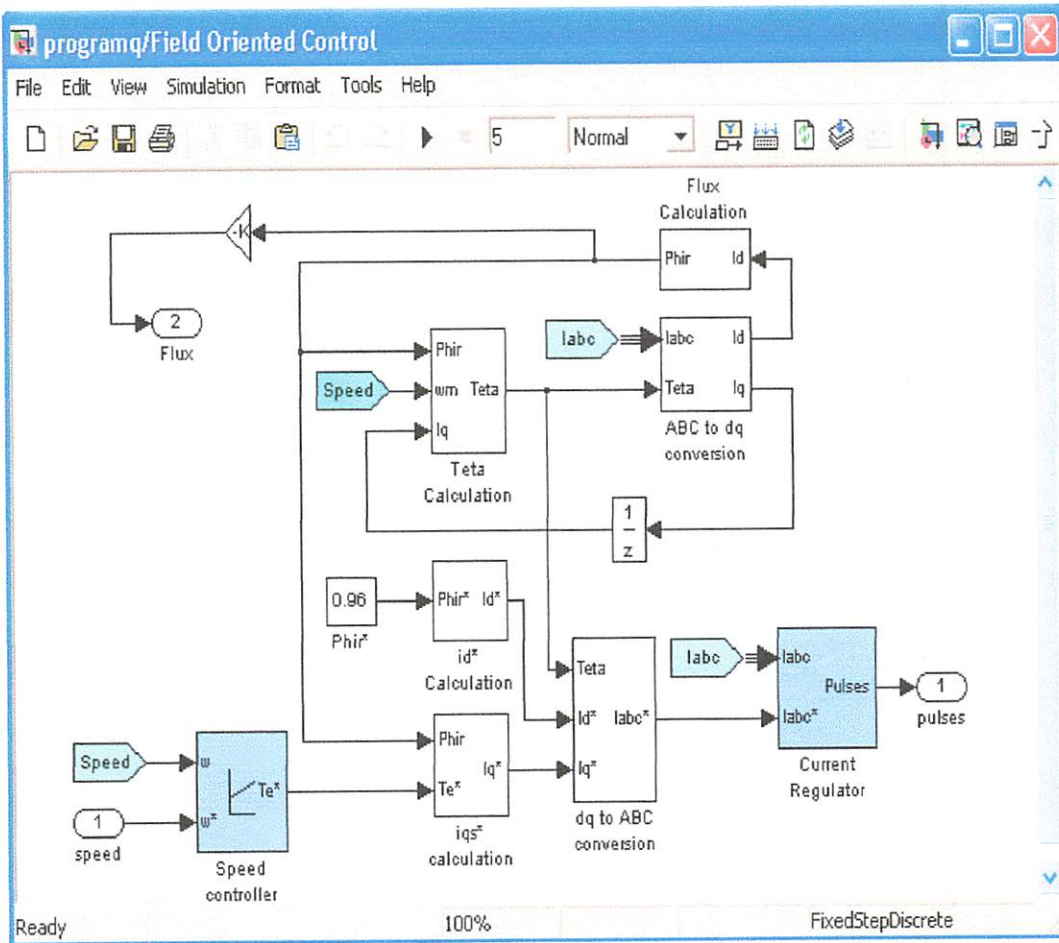


Dari gambar 3.5 terlihat blok simulasi pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan metode *Field Oriented control*. Dari blok tersebut kita dapat memasukkan data-data yang diperlukan seperti parameter-parameter motor induksi dan juga *setting point* dari beban maupun dari kecepatan.



**Gambar 3.6**  
**Blok Parameter Motor Induksi**

Dalam blok simulasi ini *setting point* beban dibuat dalam berbagai macam *setting* diantaranya adalah tanpa beban, dan beban berubah-ubah. *Setting point* ini diberikan karena mempunyai tujuan untuk mengetahui performansi dari motor induksi baik dalam keadaan *transient* maupun pada keadaan *steady state*.

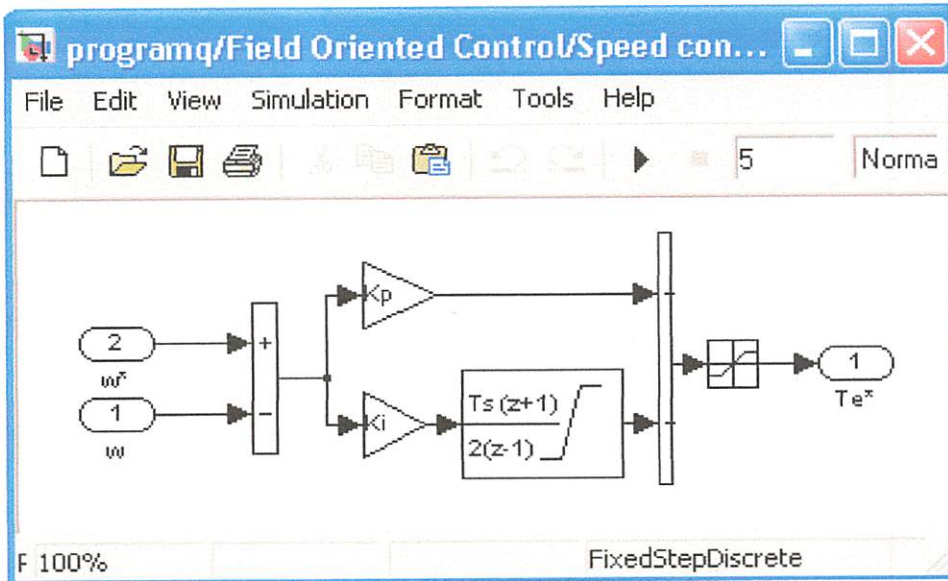


**Gambar 3.7**  
**Blok Field Oriented Control**

Gambar 3.7 adalah merupakan blok *Field Oriented control*. Dari blok ini dibuat berbagai macam fungsi dan persamaan yang diperlukan untuk simulasi. Diantaranya adalah :

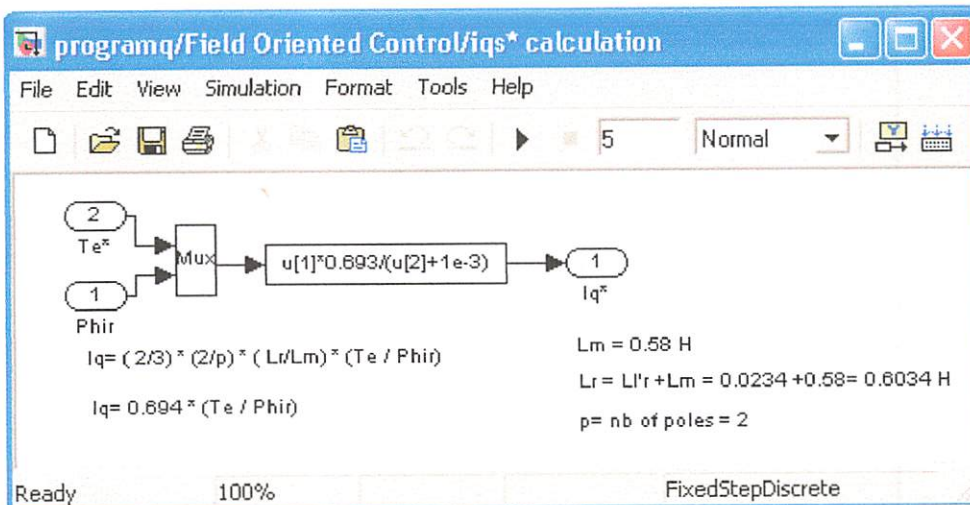
1. Blok *Speed Controller*, blok ini berfungsi untuk mengontrol kecepatan referensi dan kecepatan motor serta mengubahnya untuk mendapatkan torsi acuan. Blok ini dibuat berdasarkan persamaan (3.25) dan (3.29).





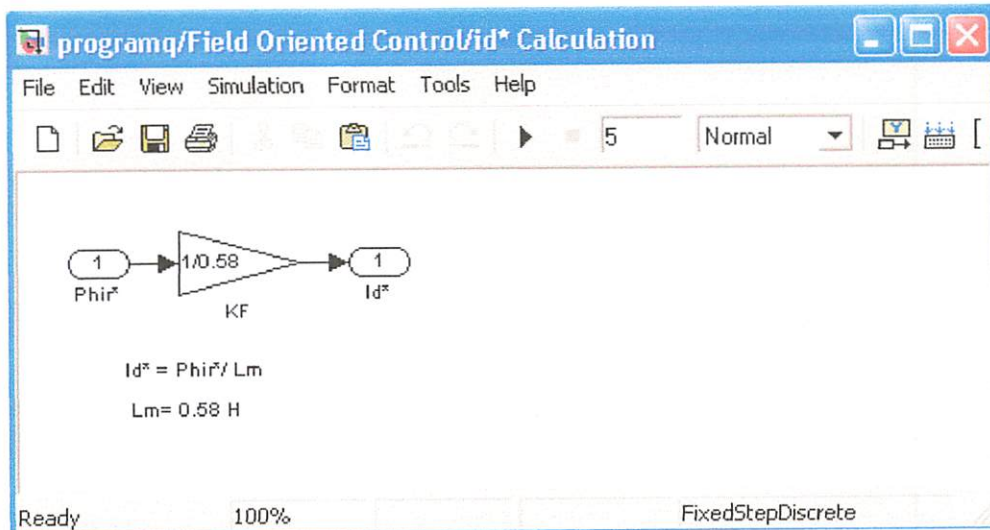
**Gambar 3.8**  
**Blok Speed Controller**

2. Blok  $I_q^*$  Calculation, blok ini mempunyai fungsi untuk mendapatkan arus  $I_q$  referensi yang didapatkan dari perhitungan dari masukan torsi referensi dan flux rotor. Blok ini dibuat berdasarkan persamaan (3.9).



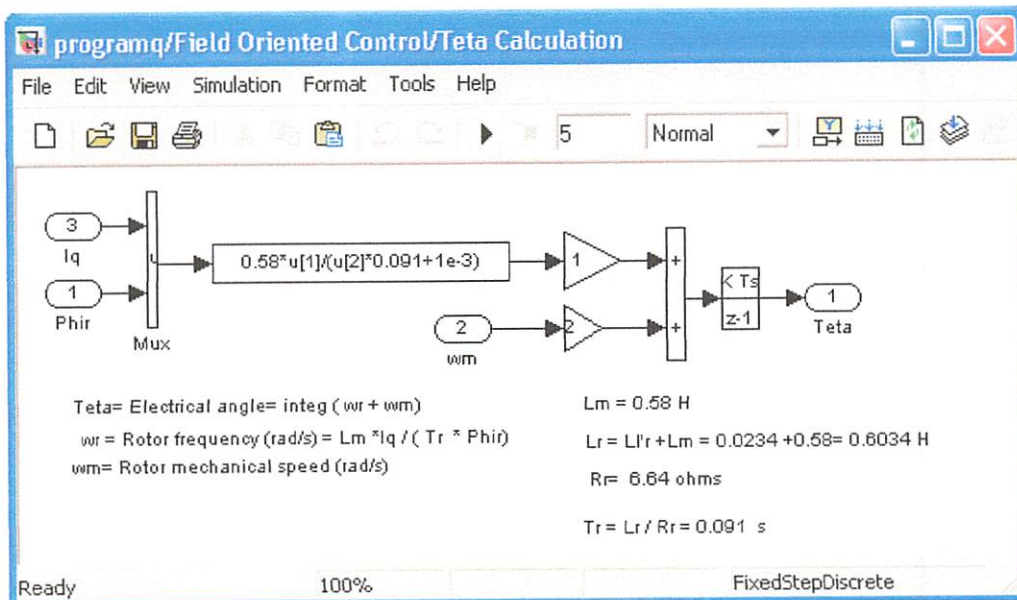
**Gambar 3.9**  
**Blok  $I_q^*$  Calculation**

3. Blok  $I_d^*$  Calculation, blok ini mempunyai fungsi untuk mendapatkan arus  $I_d$  referensi. Blok ini dibuat berdasarkan persamaan (3.15).



**Gambar 3.10**  
**Blok  $I_d^*$  Calculation**

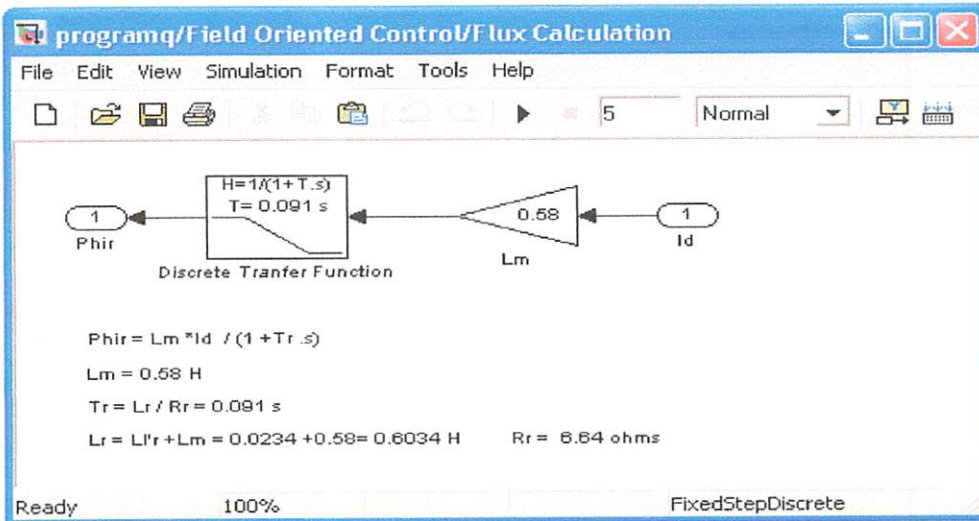
4. Blok *Theta Calculation*, blok ini mempunyai fungsi untuk mendapatkan sudut theta. Blok ini dibuat berdasarkan persamaan (3.12).



**Gambar 3.11**  
**Blok *Theta Calculation***

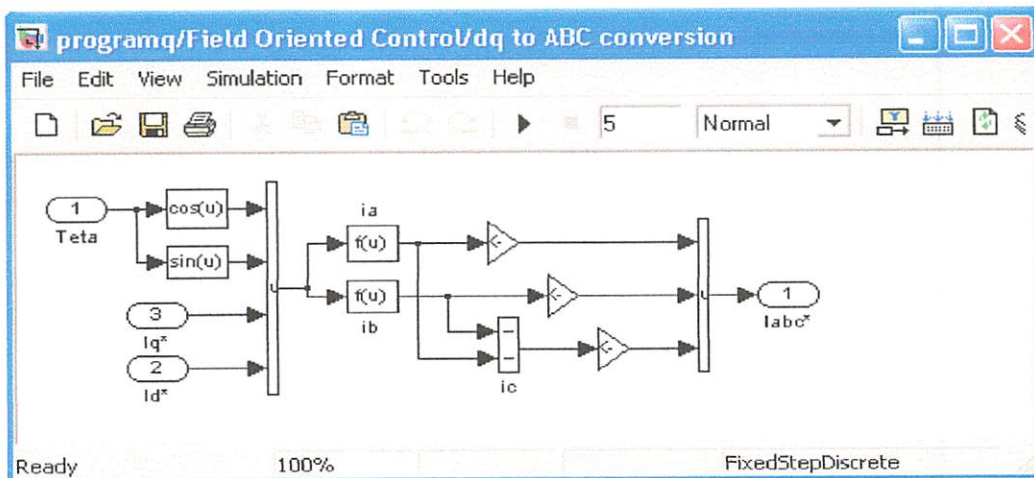
5. Blok *Flux Calculation*, blok ini berfungsi untuk mendapatkan perhitungan hasil flux yang digunakan untuk dijadikan masukan untuk blok *Theta*

*Calculation* dan  $I_d^*$  *Calculation*. Blok ini dibuat berdasarkan persamaan (3.17)



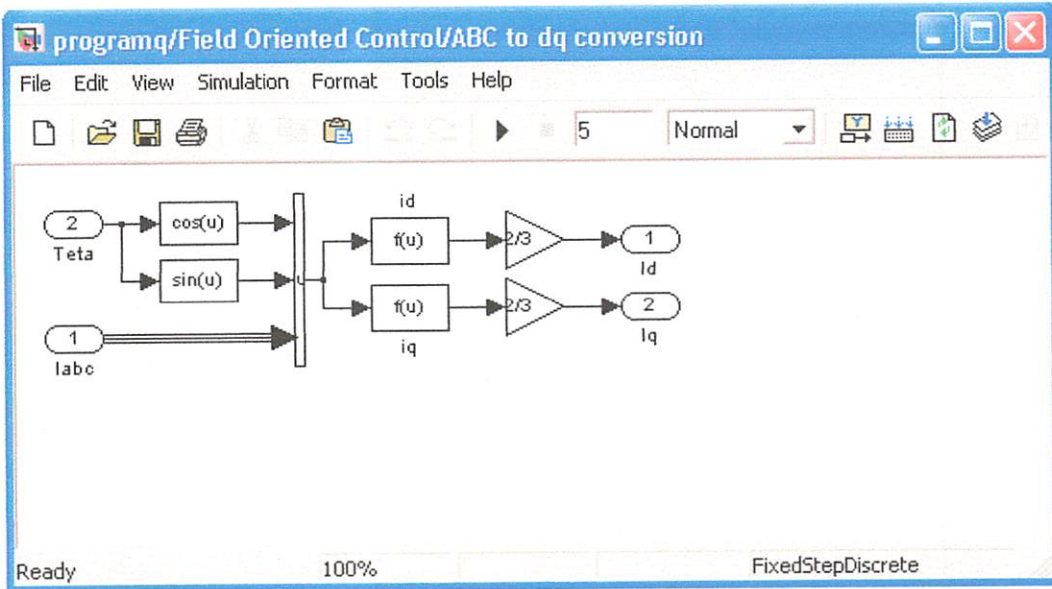
**Gambar 3.12**  
**Blok Flux Calculation**

6. Blok *dq to ABC*, blok ini berfungsi untuk mendapatkan persamaan Arus  $I_{ABC}$  referensi. Blok ini dibuat berdasarkan persamaan (2.50)



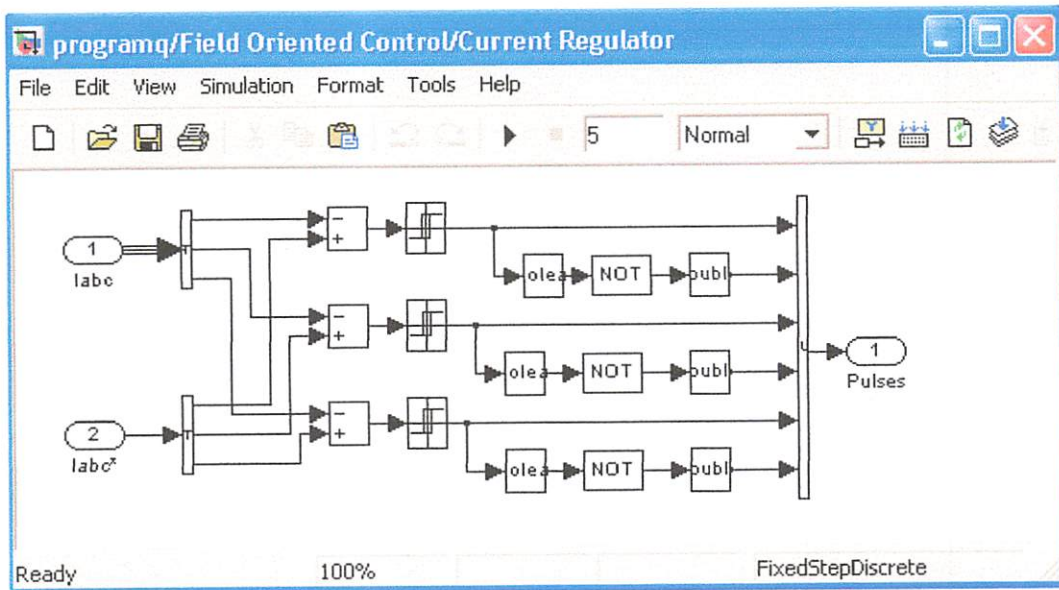
**Gambar 3.13**  
**Blok d-q to ABC**

7. Blok *ABC to dq*, blok ini berfungsi untuk mendapatkan persamaan arus  $I_d$  dan  $I_q$ . Blok ini dibuat berdasarkan persamaan (2.49).



**Gambar 3.14**  
**Blok *ABC to dq***

8. Blok *Current Regulator*, blok ini berfungsi untuk mengatur arus  $I_{ABC}^*$  dan  $I_{ABC}$  yang menghasilkan arus yang dipakai oleh motor.



**Gambar 3.15**  
**Blok *Current Regulator***

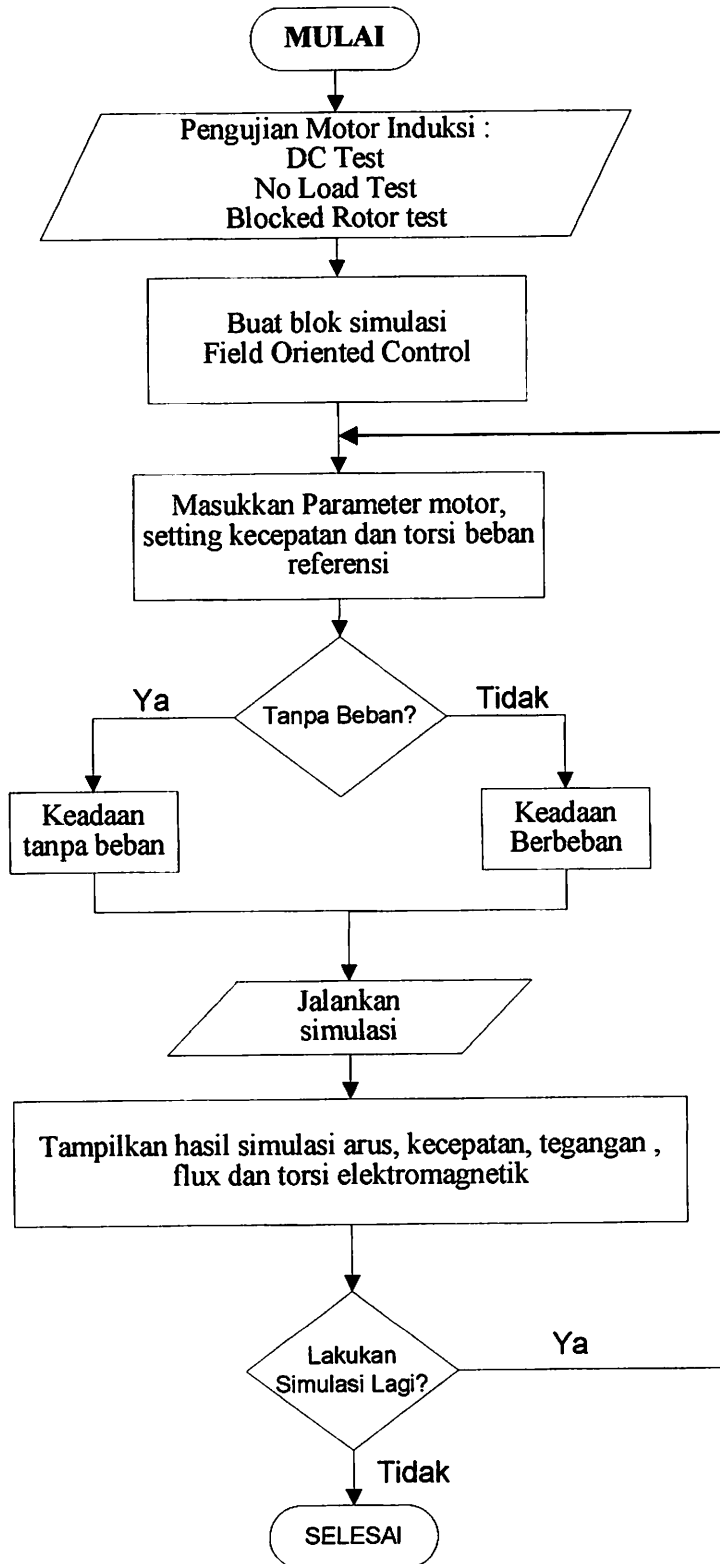
### 3.4 Algoritma Pemrograman

Algoritma penyelesaian masalah pengautran kecepatan motor induksi tiga fasa dengan metode *Field Oriented Control*.

1. Mulai
2. Pengujian parameter motor induksi
  - a. Pengujian DC test.
  - b. Pengujian beban nol ( *No Load Test* ).
  - c. Pengujian rotor tertahan ( *Blocked Rotor Test* ).
3. Buat blok simulasi *Field Oriented Control*.
4. Masukkan parameter motor induksi dan setting kecepatan serta torsi beban referensi.
5. Pilih keadaan berbeban atau keadaan tidak berbeban.
6. Jalankan simulasi.
7. Menampilkan hasil simulasi
8. Lakukan simulasi lagi Jika Ya kembali ke langkah empat, jika tidak ke langkah nomer sembilan.
9. Selesai.



### 3.5 Diagram Alir Pemecahan Masalah













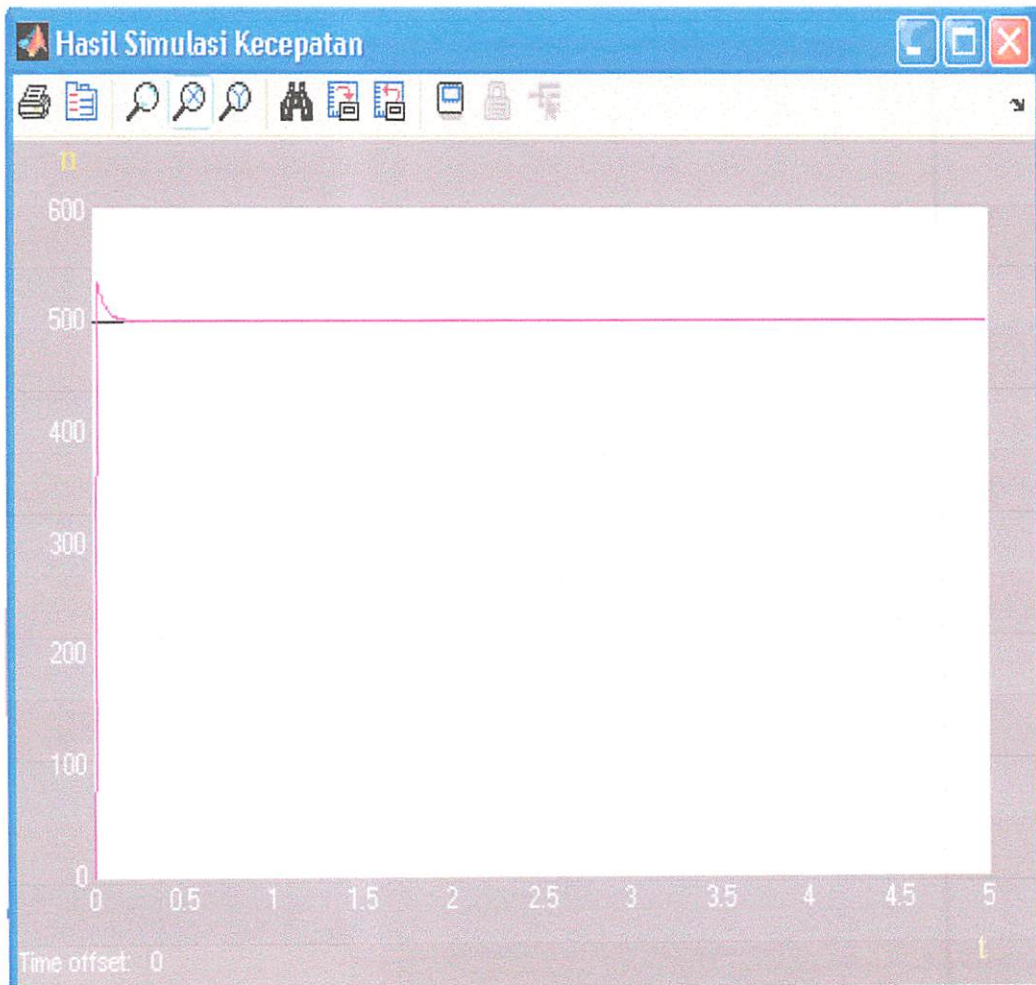
## 4.2 Hasil Simulasi

Simulasi pengaturan kecepatan motor induksi ini meliputi beberapa pengujian yang bertujuan untuk mengetahui performansi dari motor. Motor Induksi De Lorenzo DL1021 mempunyai torsi nominal sebesar 3.73 N.m.

Pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut ::

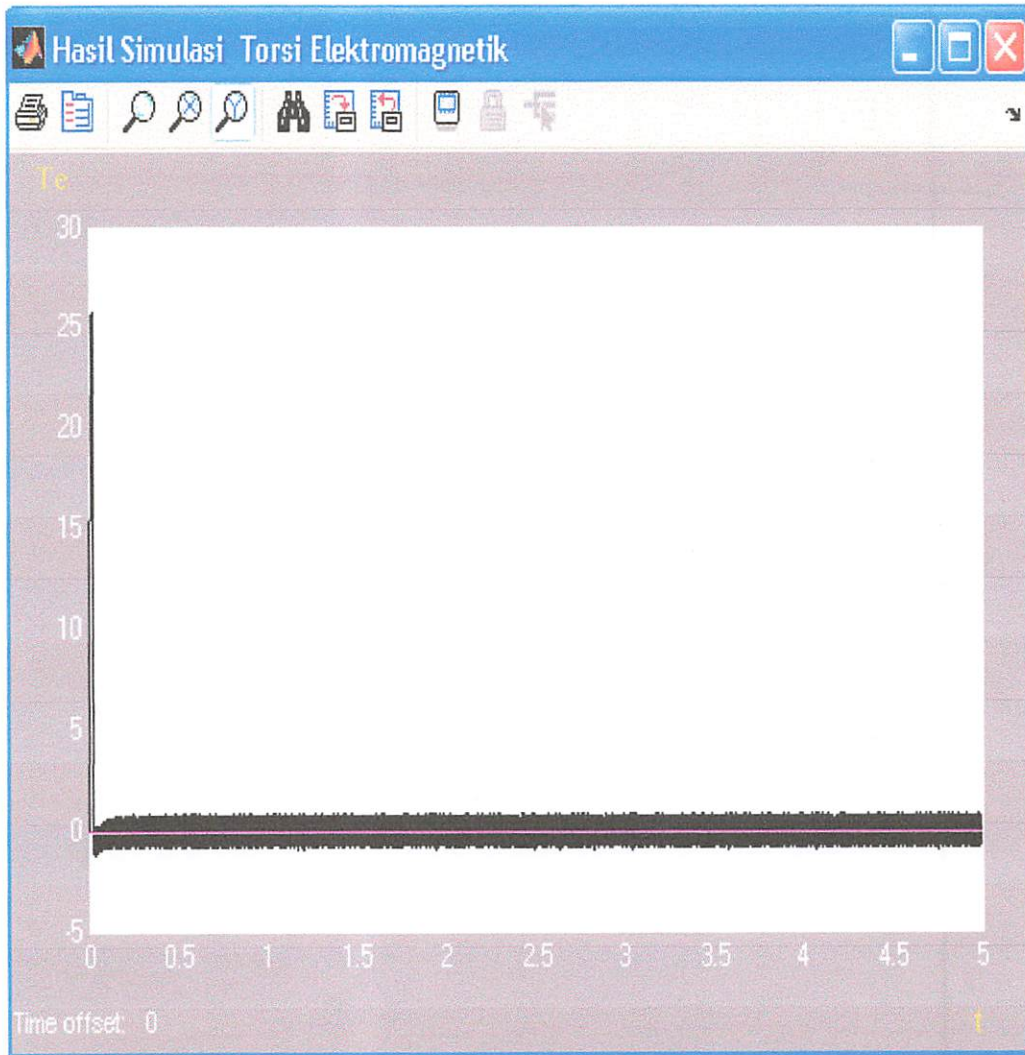
1. Pengujian motor induksi tiga fasa dengan kecepatan 500 rpm tanpa beban.
2. Pengujian motor induksi tiga fasa dengan kecepatan 500 rpm dengan beban berubah-ubah dengan setting pada  $t = 0$  s beban sebesar 0 N.m,  $t = 1$  s beban sebesar 50 %  $T_{nom}$  atau 1.865 N.m,  $t = 2$  s beban sebesar 100 %  $T_{nom}$  atau 2.73 N.m,  $t = 3$  s beban sebesar 150%  $T_{nom}$  atau 4.095 N.m,  $t = 4$  s beban sebesar 200%  $T_{nom}$  atau 5.46 N.m.
3. Pengujian motor induksi tiga fasa dengan kecepatan 750 rpm tanpa beban.
4. Pengujian motor induksi tiga fasa dengan kecepatan 750 rpm dengan beban berubah-ubah dengan setting pada  $t = 0$  s beban sebesar 0 N.m,  $t = 1$  s beban sebesar 50 %  $T_{nom}$  atau 1.865 N.m,  $t = 2$  s beban sebesar 100 %  $T_{nom}$  atau 2.73 N.m,  $t = 3$  s beban sebesar 150%  $T_{nom}$  atau 4.095 N.m,  $t = 4$  s beban sebesar 200%  $T_{nom}$  atau 5.46 N.m.

#### 4.2.1 Analisa Simulasi Pada kecepatan 500 rpm Tanpa Beban



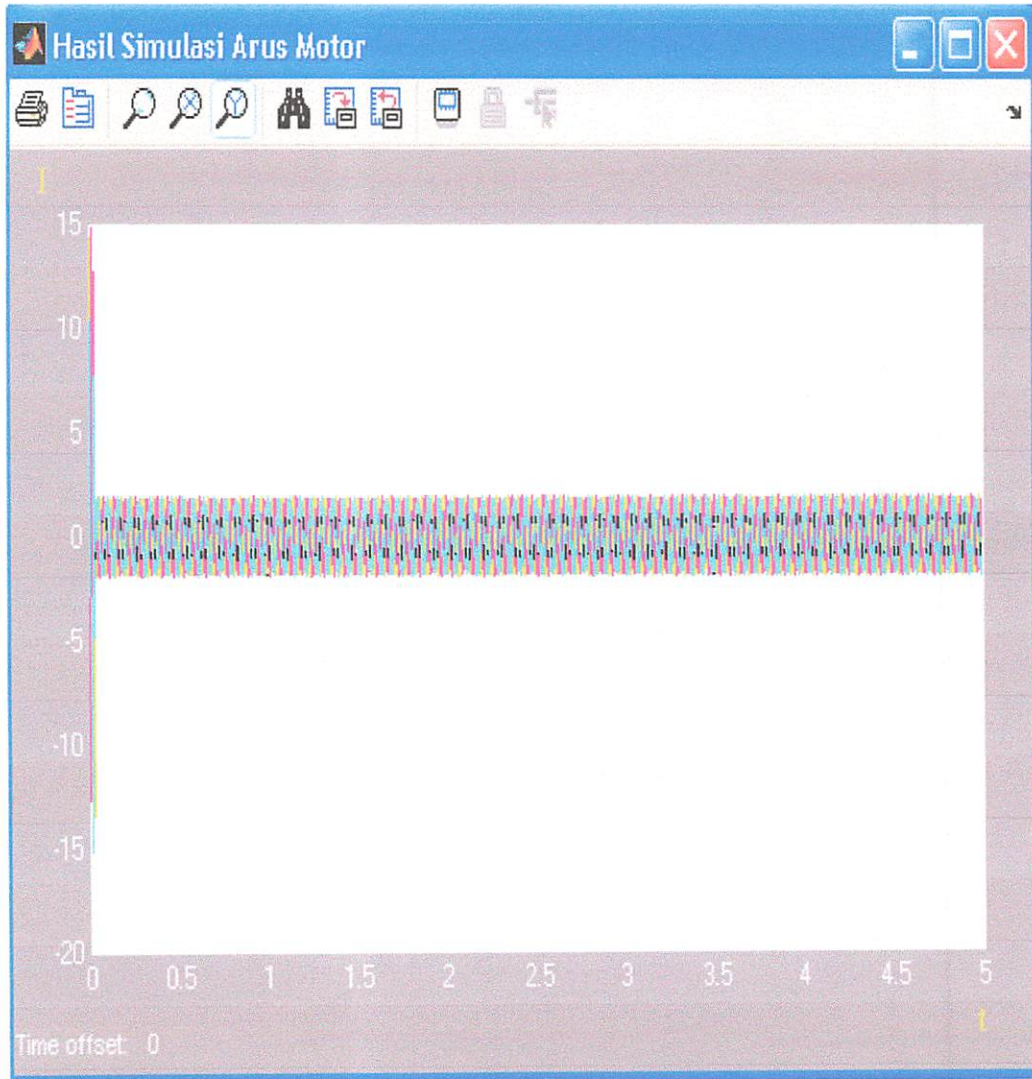
**Gambar 4.2**  
**Hasil Simulasi Kecepatan Pada *Setting Point* 500 rpm Tanpa Beban**

Dari hasil simulasi pada Gambar 4.2 terlihat bahwa kecepatan motor mengalami kondisi *transient* pada saat  $t = 0 - 0.45$  detik. Setelah itu kecepatan motor dapat mengikuti kecepatan referensi 500 rpm setelah  $t = 0.45$  s.



**Gambar 4.3**  
**Hasil Simulasi Torsi Motor Pada *Setting Point* 500 rpm Tanpa Beban**

Dari hasil simulasi pada Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa motor memerlukan torsi sebesar 25.87 N.m untuk melakukan *starting*. Dengan metode *Field Oriented Control* torsi motor secara responsif dapat mengikuti torsi beban referensi pada saat  $t = 0.3$  s.



**Gambar 4.4**  
**Hasil Simulasi Arus Motor Pada *Setting Point* 500 rad/s Tanpa Beban**

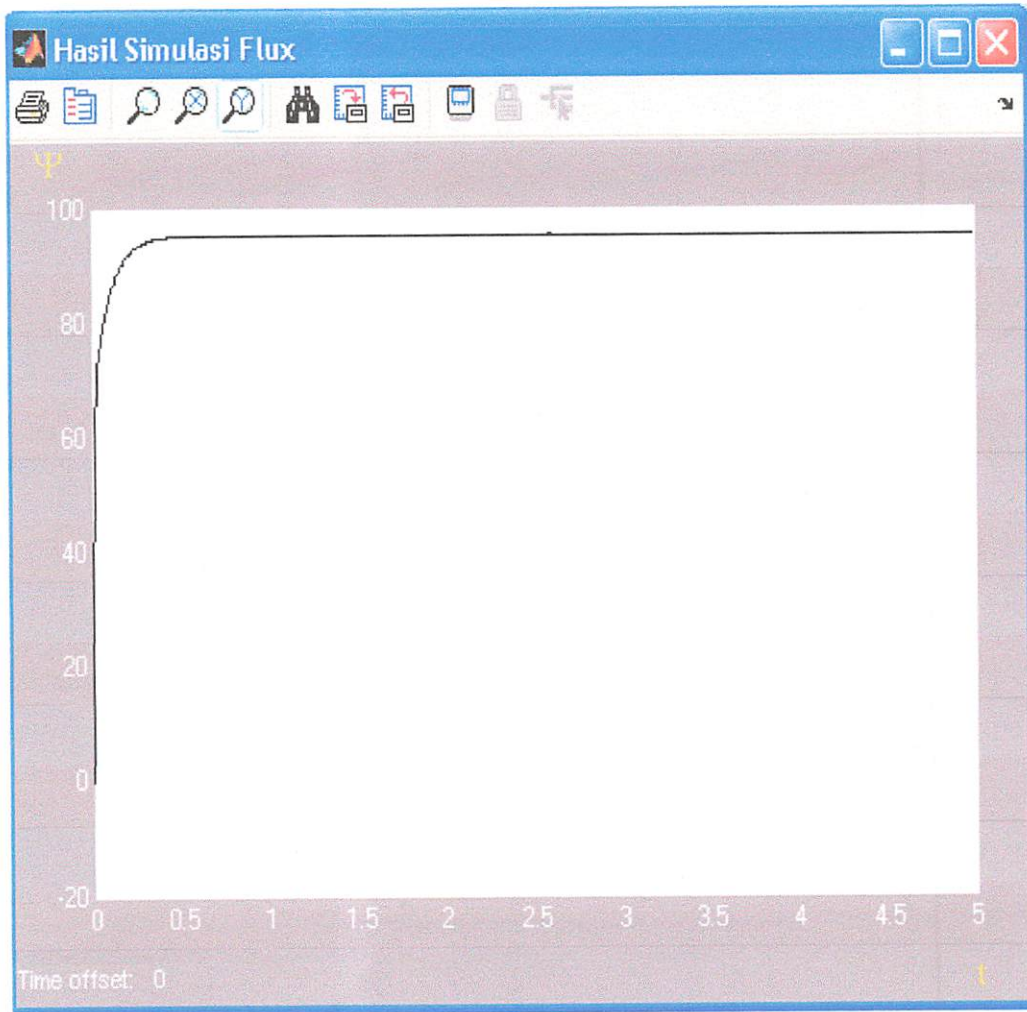
Dari hasil simulasi pada Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa motor memerlukan arus sebesar 14.75 Ampere untuk melakukan *starting*. Setelah mencapai kondisi *steady state* motor mempunyai nilai arus sebesar 1.9 Ampere.





**Gambar 4.5**  
**Hasil Simulasi Tegangan Motor Pada *Setting Point* 500 rpm Tanpa Beban**

Hasil dari simulasi pada Gambar 4.5 menunjukkan hasil simulasi dari tegangan motor yang mempunyai nilai sebesar 380 V. Karena penggunaan dari *inverter* tiga fasa, maka tegangan motor tetap dijaga pada nilai 380 Volt.



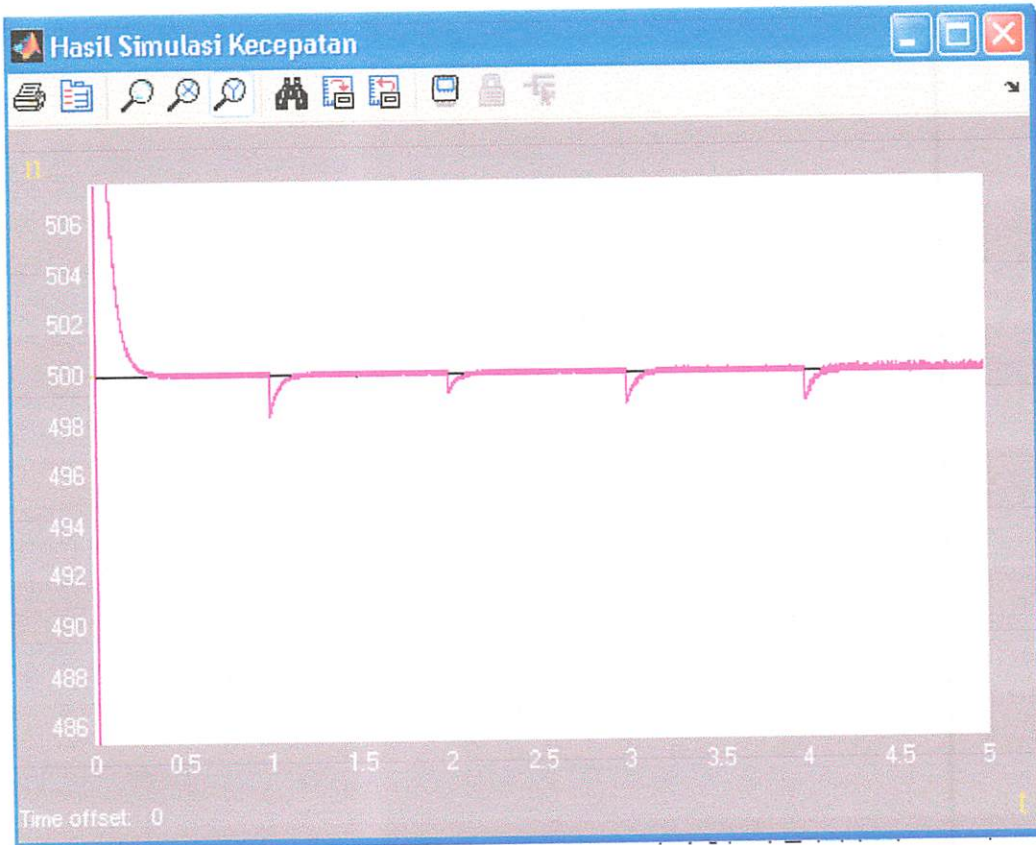
**Gambar 4.6**  
**Hasil Simulasi *Flux* Motor Pada *Setting Point* 500 rpm Tanpa Beban**

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan terlihat pada Gambar 4.6 bahwa motor mempunyai nilai fluks sebesar 95.5 Wb.

**Tabel 4.1**  
**Hasil Simulasi Motor Induksi Pada *Setting Point* 500 rpm Tanpa Beban**

KECEPATAN (rpm)	<i>STEADY STATE</i> (s)	FLUX (WB)	ARUS (AMPERE)	TEGANGAN (VOLT)
500	0.45	95.5	1.9	380

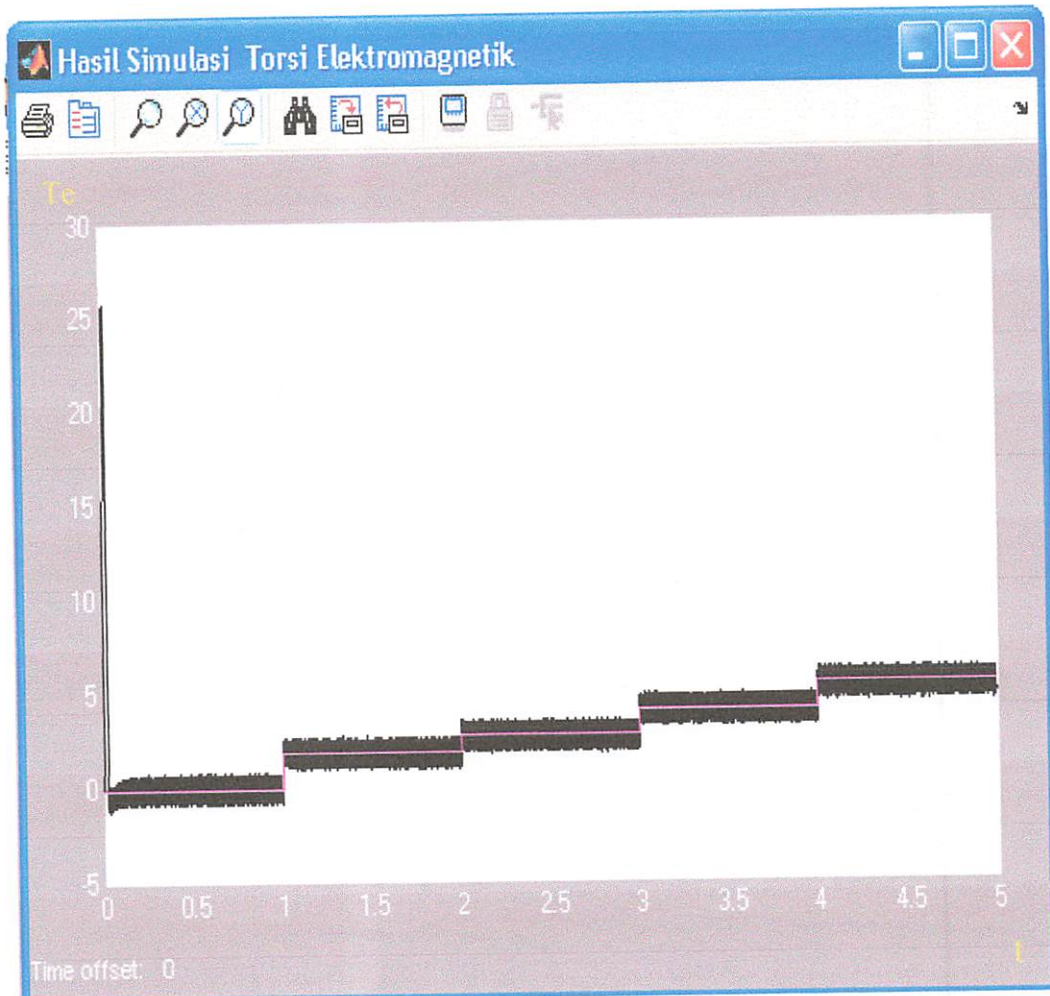
#### 4.2.2 Analisa Simulasi Pada kecepatan 500 rpm Dengan Beban Berubah – ubah



**Gambar 4.7**  
**Hasil Simulasi Tegangan Motor Pada *Setting Point* 500 rpm Dengan Beban Berubah – ubah**

Pada hasil simulasi dengan beban berubah – ubah yang terlihat pada Gambar 4.7, saat *setting point* torsi beban diaplikasikan kepada motor, maka kecepatan motor mengalami penurunan, tetapi kecepatan motor akan kembali mengikuti *setting point* kecepatan referensi. Pada beban 1.865 N.m, motor mengikuti kecepatan referensi kembali setelah 0.25 s. pada beban 2.73 N.m mengikuti setelah 0.25 s. Pada beban 4.095 N.m mengikuti setelah 0.25 s. dan beban 5.46 N.m mengikuti kecepatan referensi setelah 0.25 s.

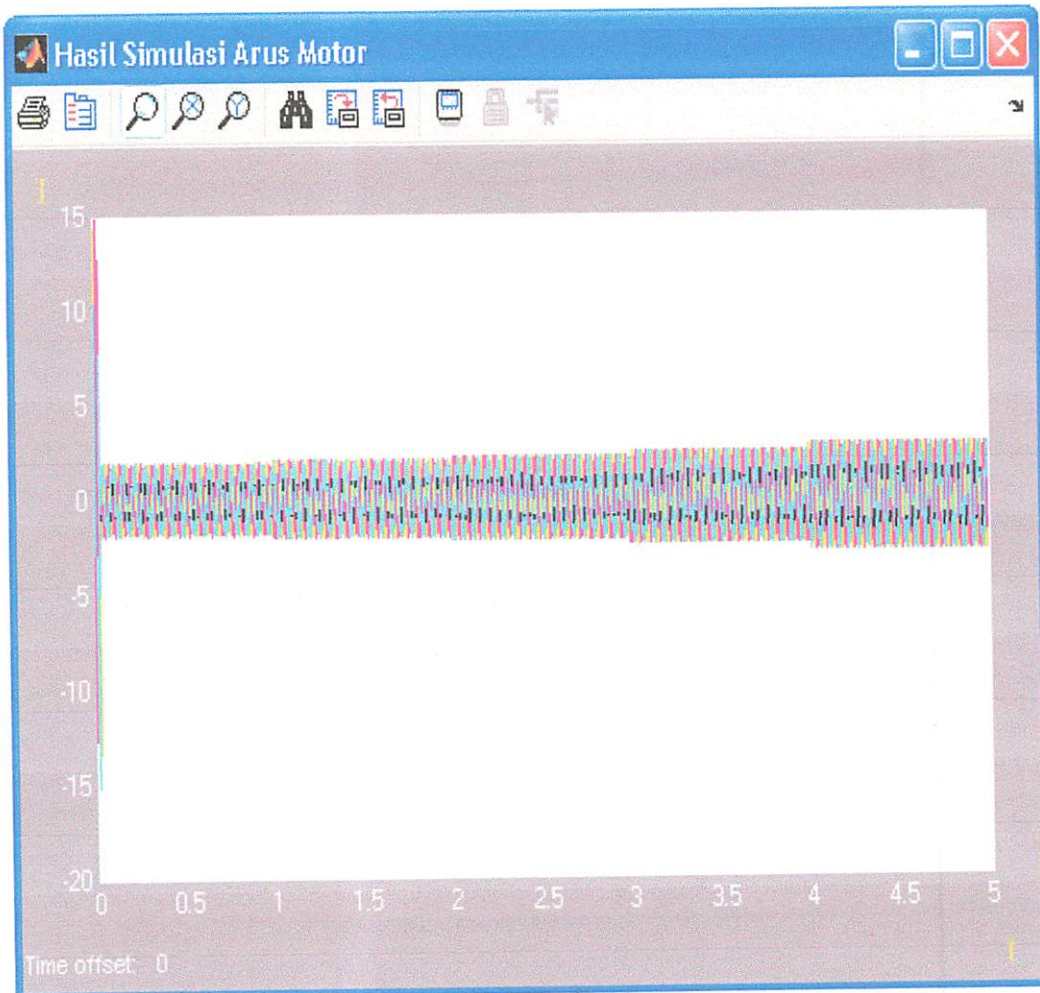




**Gambar 4.8**  
**Hasil Simulasi Torsi Motor Pada *Setting Point* 500 rpm Dengan Beban Berubah – ubah**

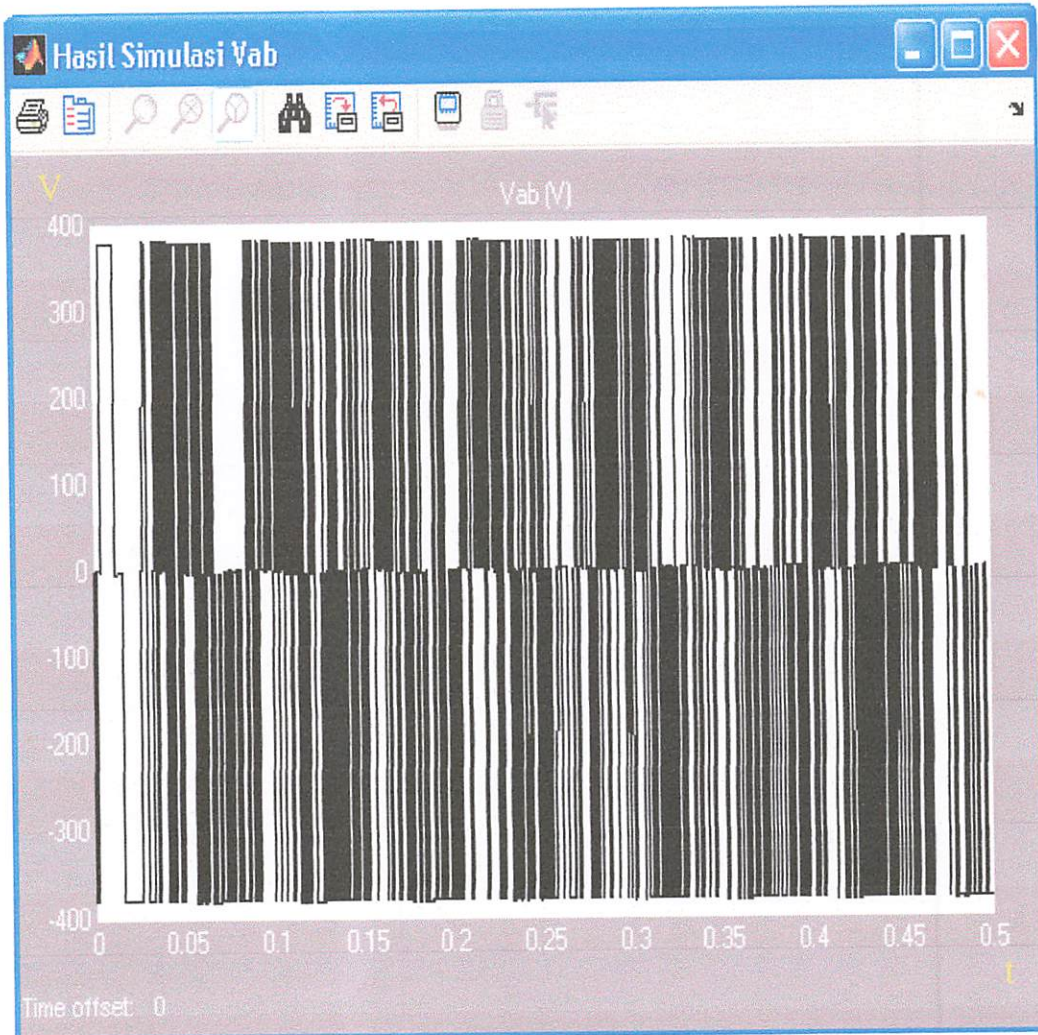
Dari hasil simulasi pada Gambar 4.8 dapat dilihat, meskipun sistem diberikan *setting* dengan torsi beban berubah – ubah, torsi motor dapat mengikuti torsi beban referensi dengan baik. Dengan metode *Field Oriented Control* pengontrolan terhadap torsi motor dapat menghasilkan respon torsi motor sangat bagus dalam mengikuti torsi beban referensi,





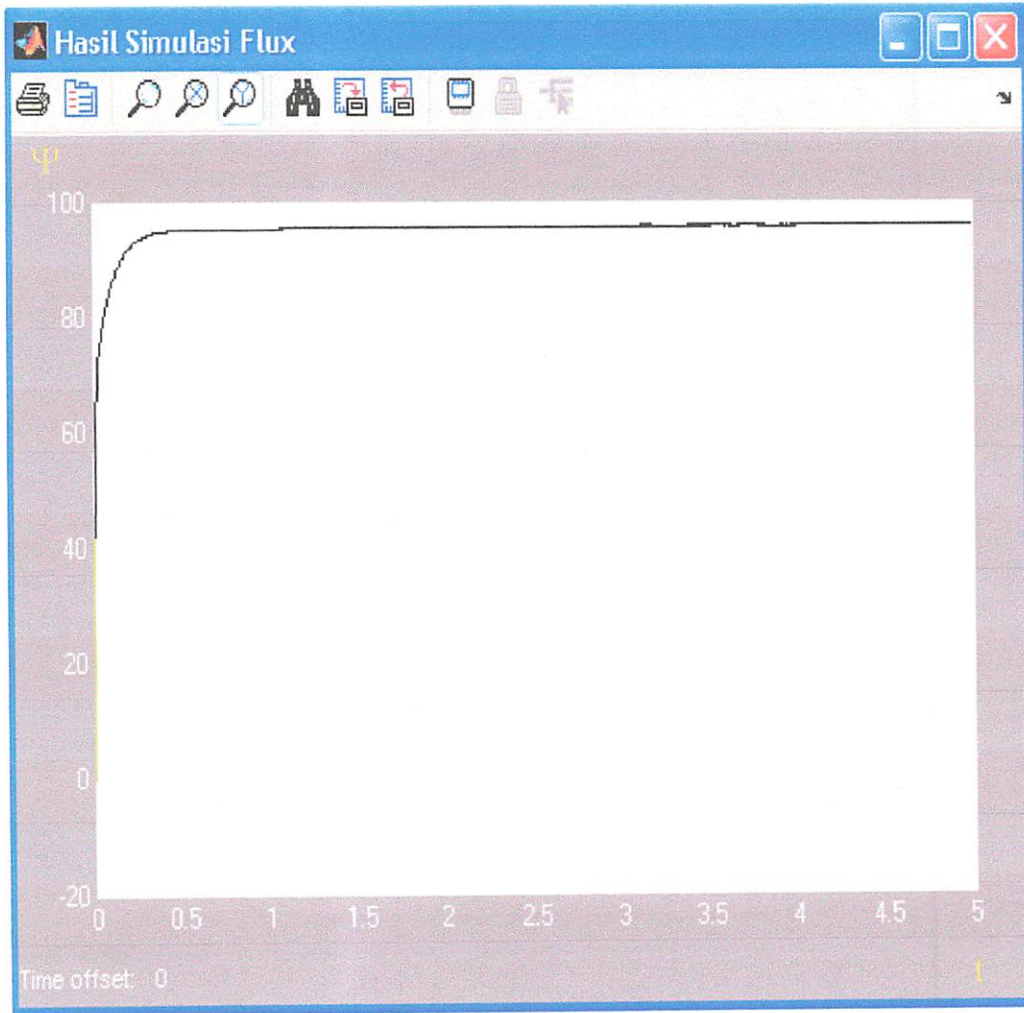
**Gambar 4.9**  
**Hasil Simulasi Arus Motor Pada *Setting Point* 500 rpm Dengan Beban Berubah – ubah**

Pada hasil simulasi dengan beban berubah – ubah yang terlihat pada Gambar 4.9, saat *setting point* torsi beban berubah-ubah diaplikasikan kepada motor, maka kecepatan motor mengalami penurunan, untuk menjaga kecepatan motor akan kembali mengikuti *setting point* kecepatan referensi metode *Field Oriented Control* dapat mengontrol besar arus yang sesuai agar kecepatan kembali mengikuti kecepatan referensi. Pada beban 1.865 N.m arus sebesar 2.05 A, Pada beban 2.73 N.m mempunyai arus sebesar 2.2 A. Pada beban 4.095 N.m arus sebesar 2.49 A. dan beban 5.46 N.m mempunyai arus sebesar 2.85 A.



**Gambar 4.10**  
**Hasil Simulasi Tegangan Motor Pada *Setting* 500 rpm Dengan Beban Berubah – ubah**

Hasil dari simulasi pada Gambar 4.10 menunjukkan hasil simulasi dari tegangan motor yang mempunyai nilai sebesar 380 V. Karena penggunaan dari *inverter* tiga fasa, maka tegangan motor tetap dijaga pada nilai 380 Volt.



**Gambar 4.11**  
**Hasil Simulasi Tegangan Motor Pada *Setting Point* 500 rpm Dengan Beban Berubah – ubah**

Pada hasil simulasi dengan beban berubah – ubah yang terlihat pada Gambar 4.11, saat *setting point* torsi beban berubah-ubah diaplikasikan kepada motor, maka fluks motor cenderung mempunyai nilai yang semakin tinggi sesuai dengan bertambahnya beban. Pada beban 1.865 N.m mempunyai nilai fluks sebesar 95.6 wb, Pada beban 2.73 N.m mempunyai fluks sebesar 95.7 wb. Pada beban 4.095 N.fluks sebesar 95.95 wb. dan beban 5.46 N.m mempunyai fluks sebesar 96.05 wb.

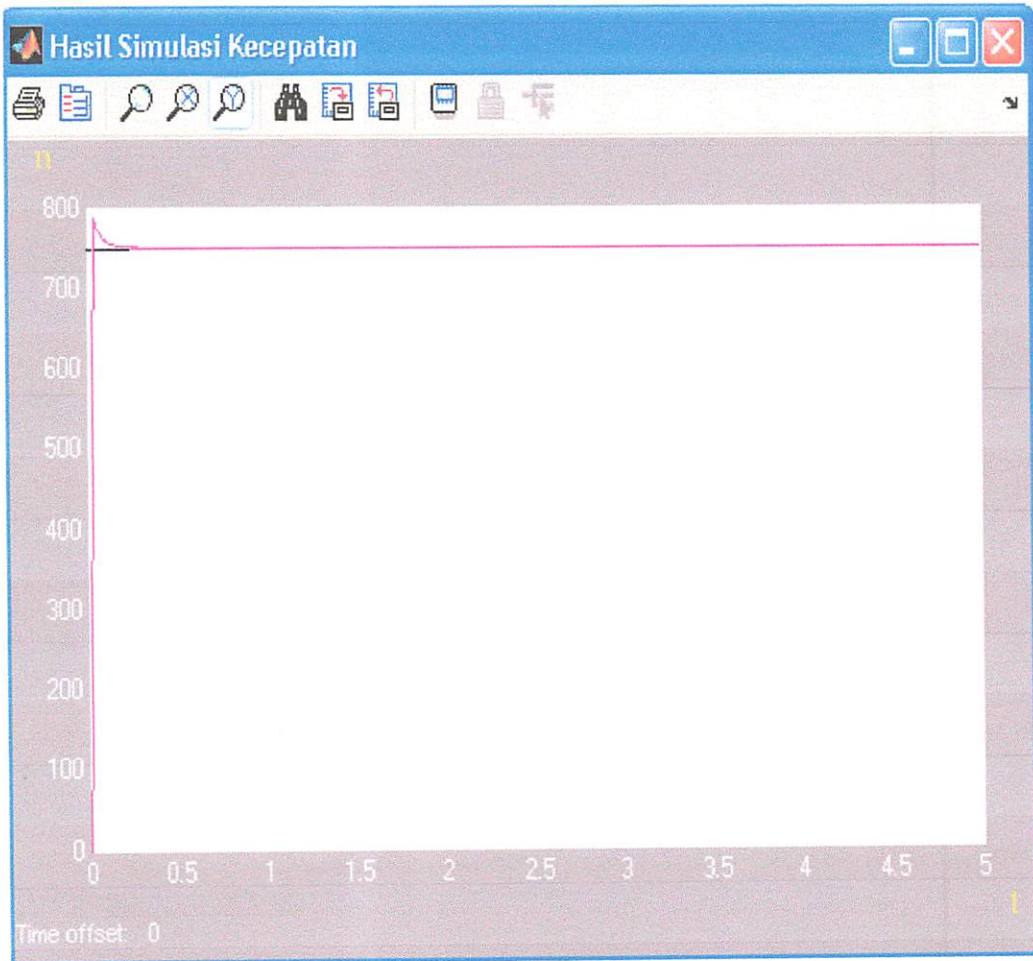


**Tabel 4.2**  
**Hasil Simulasi Motor Induksi Pada *Setting Point* 500 rpm Berbeban**  
**( $T_{nom} = 2.73 \text{ N.m}$ )**

Time (s)	Beban (N.m)	$N_r$ Ref (Rad/s)	$N_r$ (Rad/s)	I (Ampere)	Flux (Wb)	V (Volt)
0 – 1	0	500	500	1.9	95.5	380
1 – 2	1.865	500	500	2.05	95.6	
2 – 3	2.73	500	500	2.2	95.7	
3 - 4	4.095	500	500	2.49	95.95	
4 - 5	5.46	500	500	2.85	96.05	

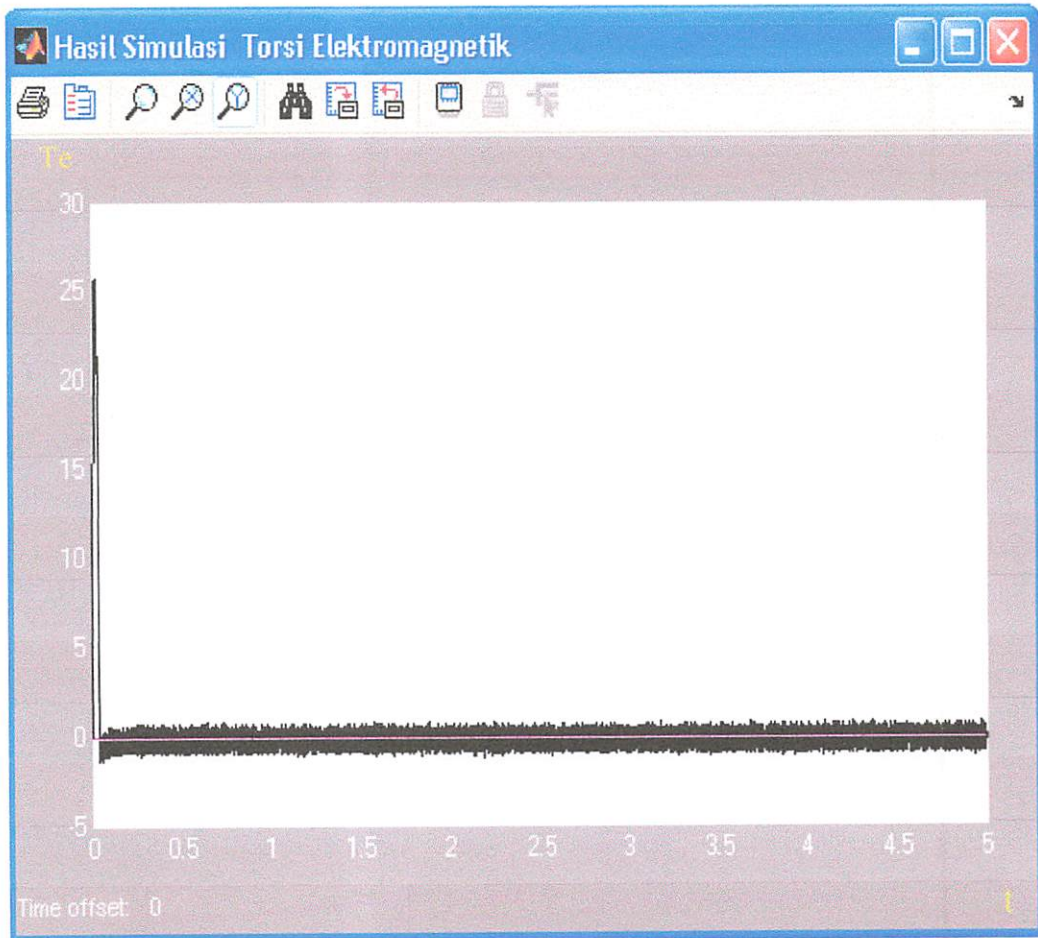
Dari Tabel 4.2 dapat dilihat hasil pengujian dari simulasi 500 rpm berbeban. Pada  $t = 0-1$  s dengan beban nol menghasilkan kecepatan motor yang sesuai dengan kecepatan referensi yaitu 500 rpm dengan besar arus senilai 1.9 A dan flux sebesar 95.5 wb. Pada  $t = 1-2$  s dengan beban 1.865 N.m menghasilkan kecepatan motor yang sesuai dengan kecepatan referensi yaitu 500 rpm dengan besar arus senilai 2.05 A dan flux sebesar 95.6 wb. Pada  $t = 2-3$  s dengan beban 2.73 N.m menghasilkan kecepatan motor yang sesuai dengan kecepatan referensi yaitu 500 rpm dengan besar arus senilai 2.2 A dan flux sebesar 95.7 wb. Pada  $t = 3-4$  s dengan beban 4.095 N.m menghasilkan kecepatan motor yang sesuai dengan kecepatan referensi yaitu 500 rpm dengan besar arus senilai 2.49 A dan flux sebesar 95.95 wb. Pada  $t = 4-5$  s dengan beban 5.46 N.m menghasilkan kecepatan motor yang sesuai dengan kecepatan referensi yaitu 500 rpm dengan besar arus senilai 2.85 A dan flux sebesar 96.05 wb.

### 4.2.3 Analisa Simulasi Pada kecepatan 750 rpm Tanpa Beban



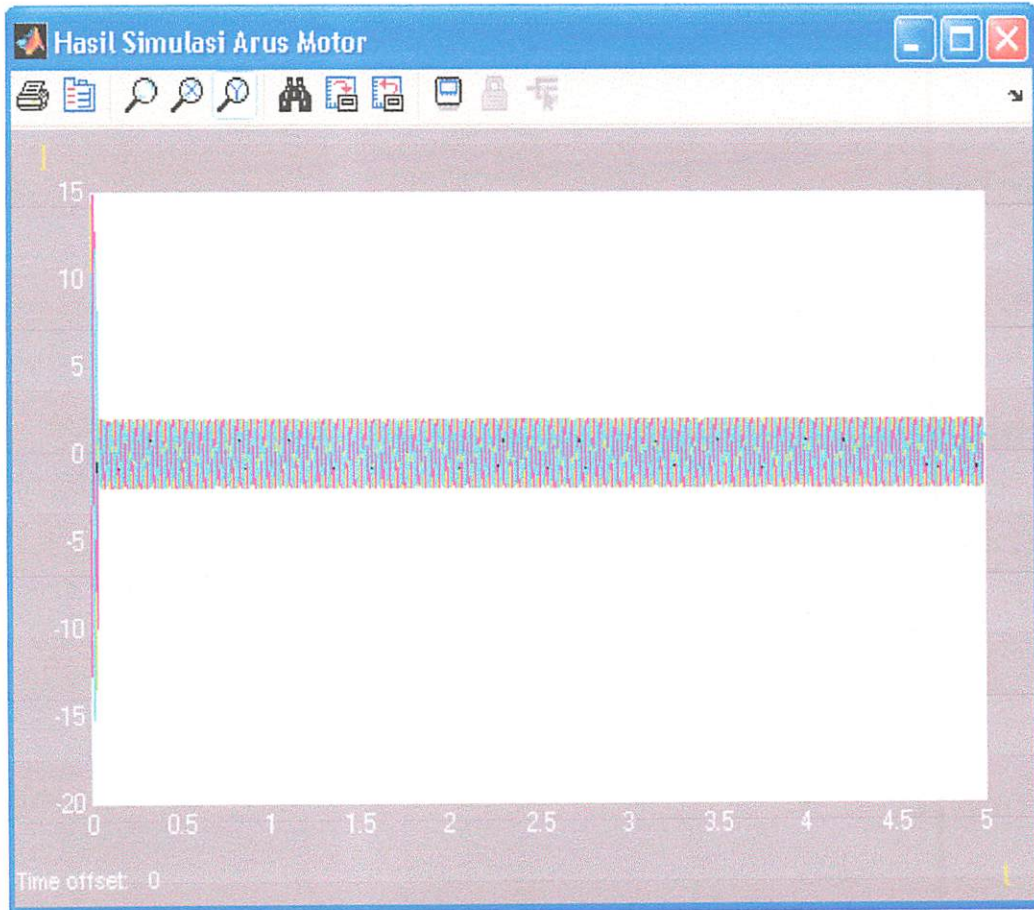
**Gambar 4.12**  
**Hasil Simulasi Kecepatan Motor Pada *Setting Point* 750 rpm Tanpa Beban**

Dari hasil simulasi pada Gambar 4.12 terlihat bahwa kecepatan motor mengalami kondisi *transient* pada saat  $t = 0 - 0.55$  detik. Setelah itu kecepatan motor dapat mengikuti kecepatan referensi 500 rpm setelah  $t = 0.55$  s.



**Gambar 4.13**  
**Hasil Simulasi Torsi Motor Pada *Setting Point* 750 rpm Tanpa Beban**

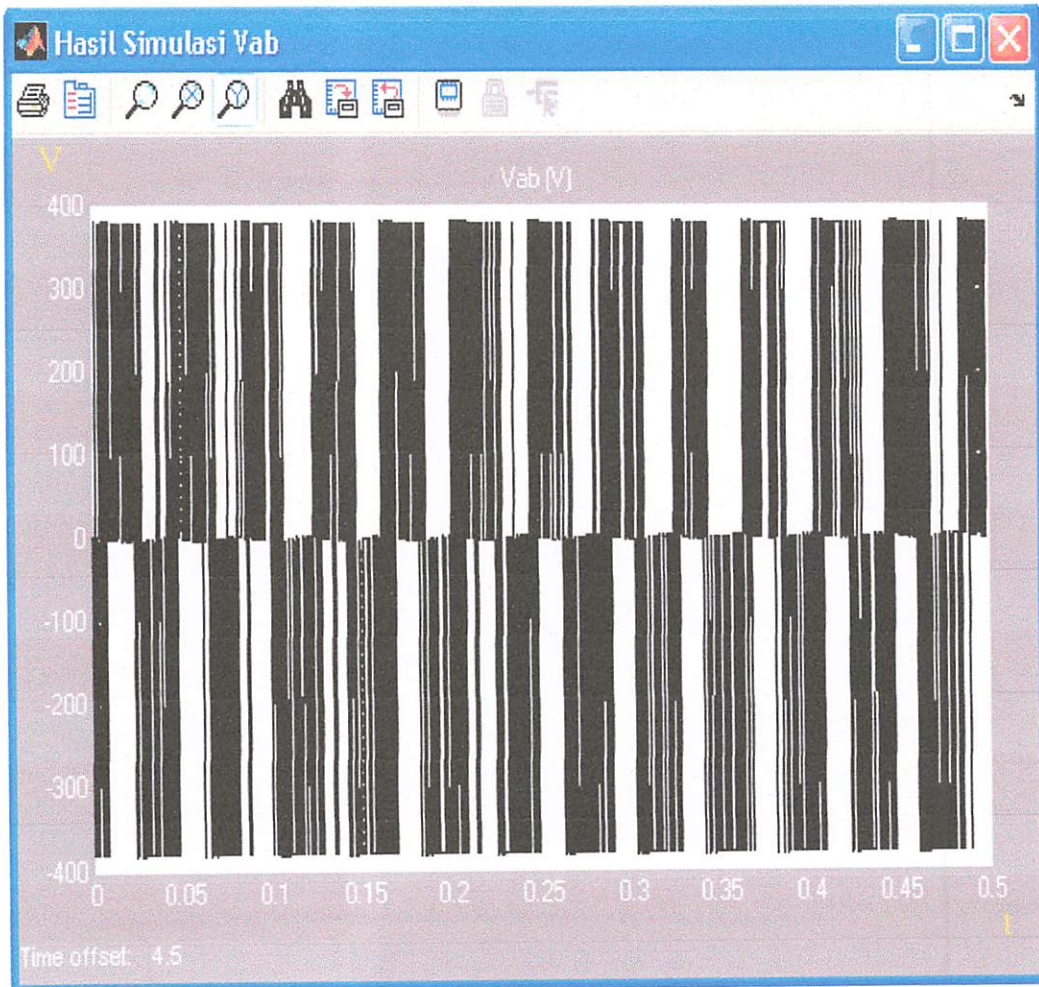
Dari hasil simulasi pada Gambar 4.13 dapat dilihat bahwa motor memerlukan torsi sebesar 25.87 N.m untuk melakukan *starting*. Dengan metode *Field Oriented Control* torsi motor secara responsif dapat mengikuti torsi beban referensi pada saat  $t = 0.4$  s.



**Gambar 4.14**  
**Hasil Simulasi Arus Motor Pada *Setting Point* 750 rpm Tanpa Beban**

Dari hasil simulasi pada Gambar 4.14 dapat dilihat bahwa motor memerlukan arus sebesar 14.75 Ampere untuk melakukan *starting*. Setelah mencapai kondisi *steady state* motor mempunyai nilai arus sebesar 1.95 Ampere.

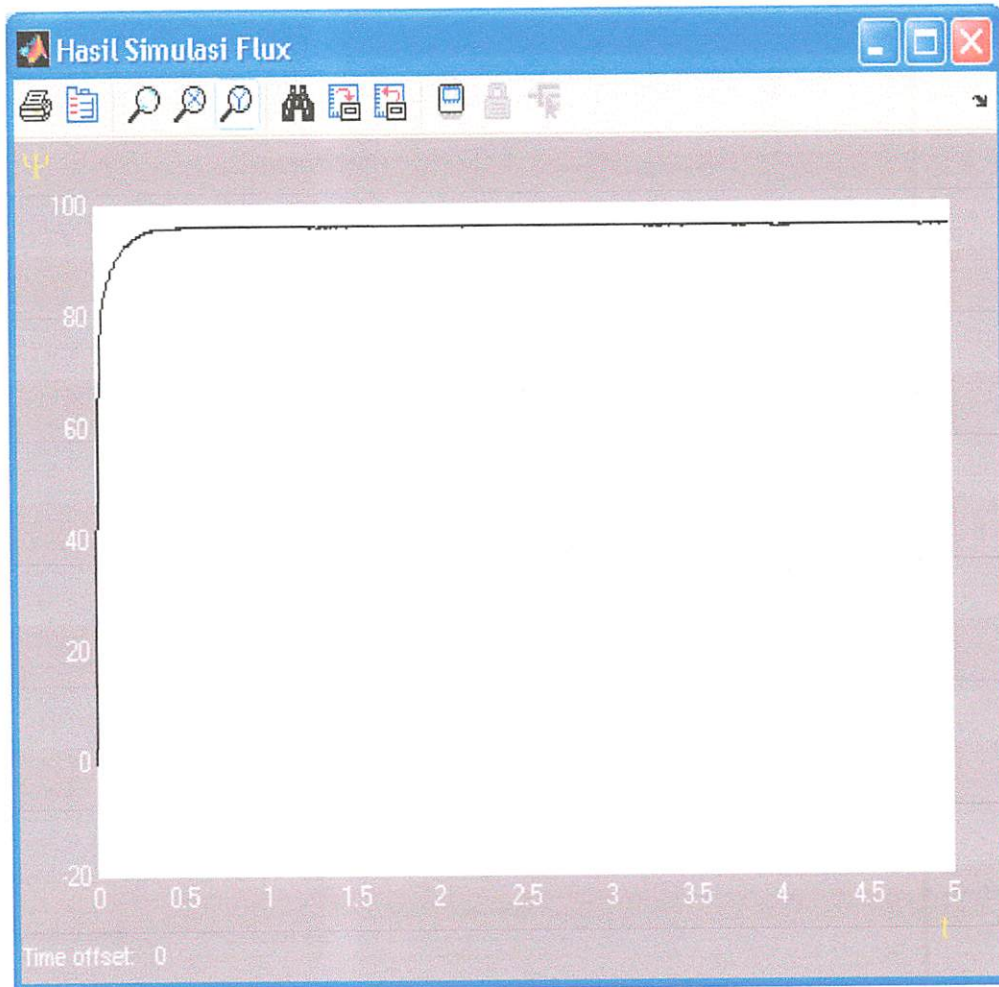




**Gambar 4.15**  
**Hasil Simulasi Tegangan Motor Pada *Setting Point* 750 rpm Tanpa Beban**

Hasil dari simulasi pada Gambar 4.15 menunjukkan hasil simulasi dari tegangan motor yang mempunyai nilai sebesar 380 V. Karena penggunaan dari *inverter* tiga fasa, maka tegangan motor tetap dijaga pada nilai 380 Volt.





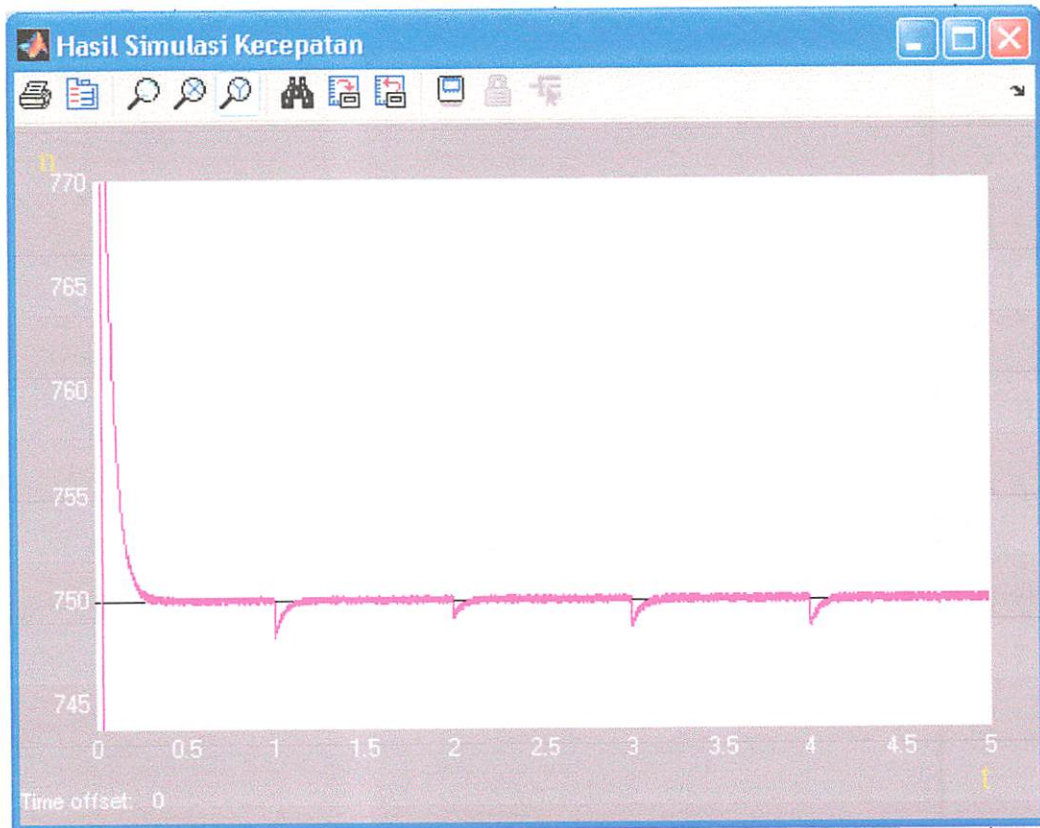
**Gambar 4.16**  
**Hasil Simulasi *Flux* Motor Pada *Setting Point* 750 rpm Tanpa Beban**

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan terlihat pada Gambar 4.16 bahwa motor mempunyai nilai fluks sebesar 96 Wb.

**Tabel 4.3**  
**Hasil Simulasi Motor Induksi Pada *Setting Point* 750 rpm Tanpa Beban**

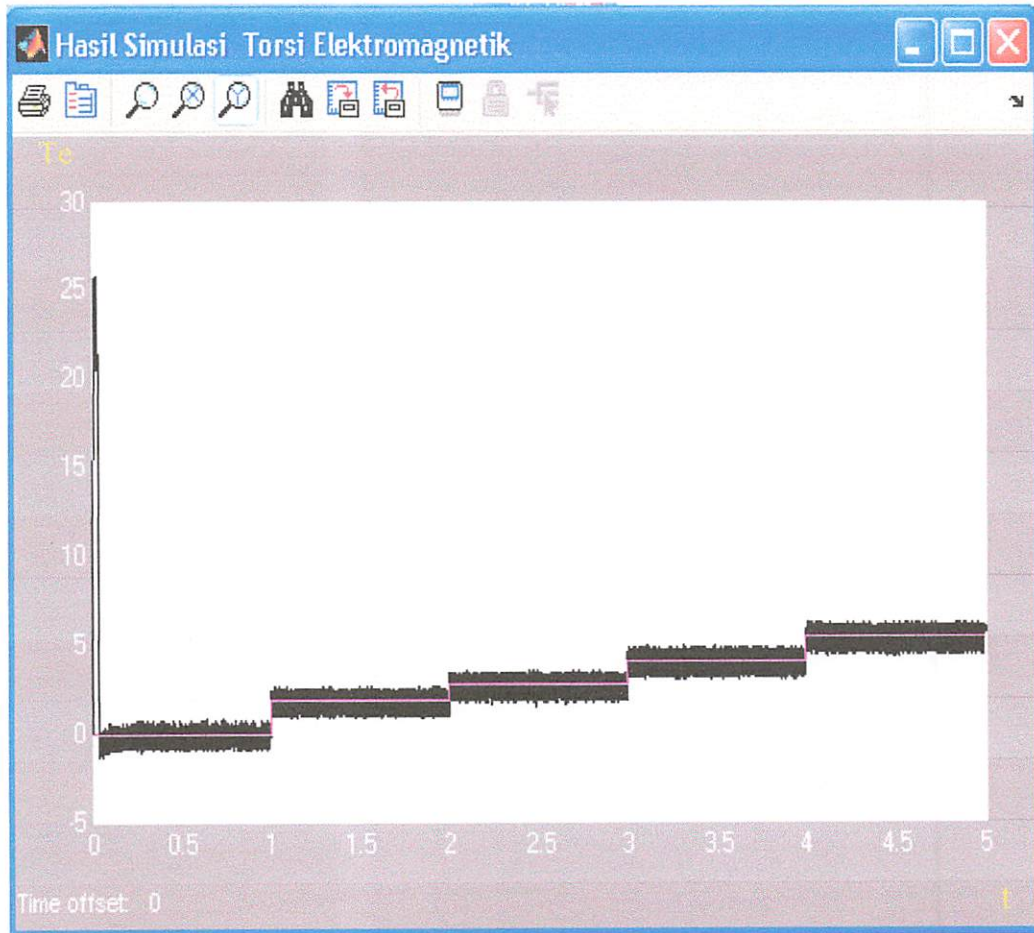
KECEPATAN (rpm)	<i>STEADY STATE</i> (s)	FLUX (wb)	ARUS (Ampere)	TEGANGAN (Volt)
750	0.55	96	1.95	380

#### 4.2.4 Analisa Simulasi Pada kecepatan 750 rpm Dengan Beban Berubah – ubah



**Gambar 4.17**  
**Hasil Simulasi Kecepatan Motor Pada *Setting Point* 750 rpm Dengan Beban Berubah – ubah**

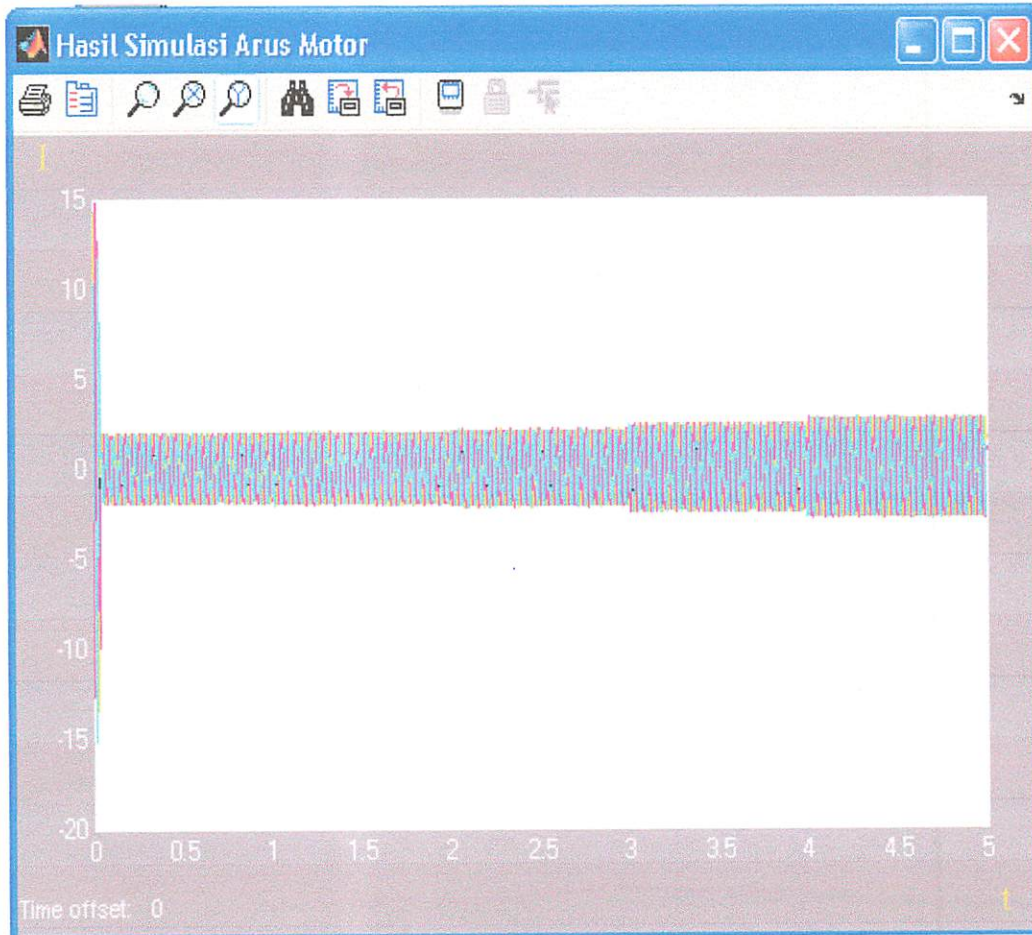
Pada hasil simulasi dengan beban berubah – ubah yang terlihat pada Gambar 4.17, saat *setting point* torsi beban diaplikasikan kepada motor, maka kecepatan motor mengalami penurunan, tetapi kecepatan motor akan kembali mengikuti *setting point* kecepatan referensi. Pada beban 1.865 N.m, motor mengikuti kecepatan referensi kembali setelah 0.3 s. pada beban 2.73 N.m mengikuti setelah 0.3 s. Pada beban 4.095 N.m mengikuti setelah 0.3 s. dan beban 5.46 N.m mengikuti kecepatan referensi setelah 0.3 s.



**Gambar 4.18**  
**Hasil Simulasi Torsi Motor Pada *Setting Point* 750 rpm Dengan Beban Berubah – ubah**

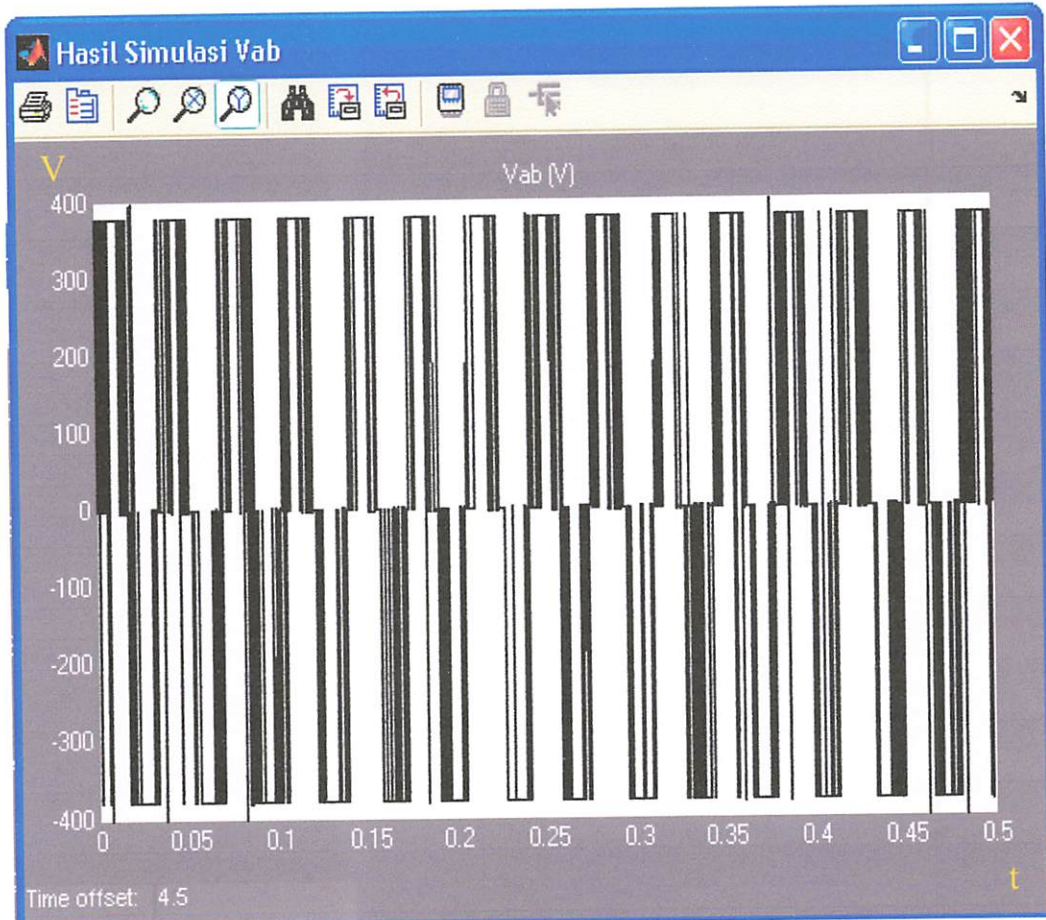
Dari hasil simulasi pada Gambar 4.18 dapat dilihat, meskipun sistem diberikan *setting* dengan torsi beban berubah –ubah, torsi motor dapat mengikuti torsi beban referensi dengan baik. Dengan metode *Field Oriented Control* pengontrolan terhadap torsi motor dapat menghasilkan respon torsi motor sangat bagus dalam mengikuti torsi beban referensi,





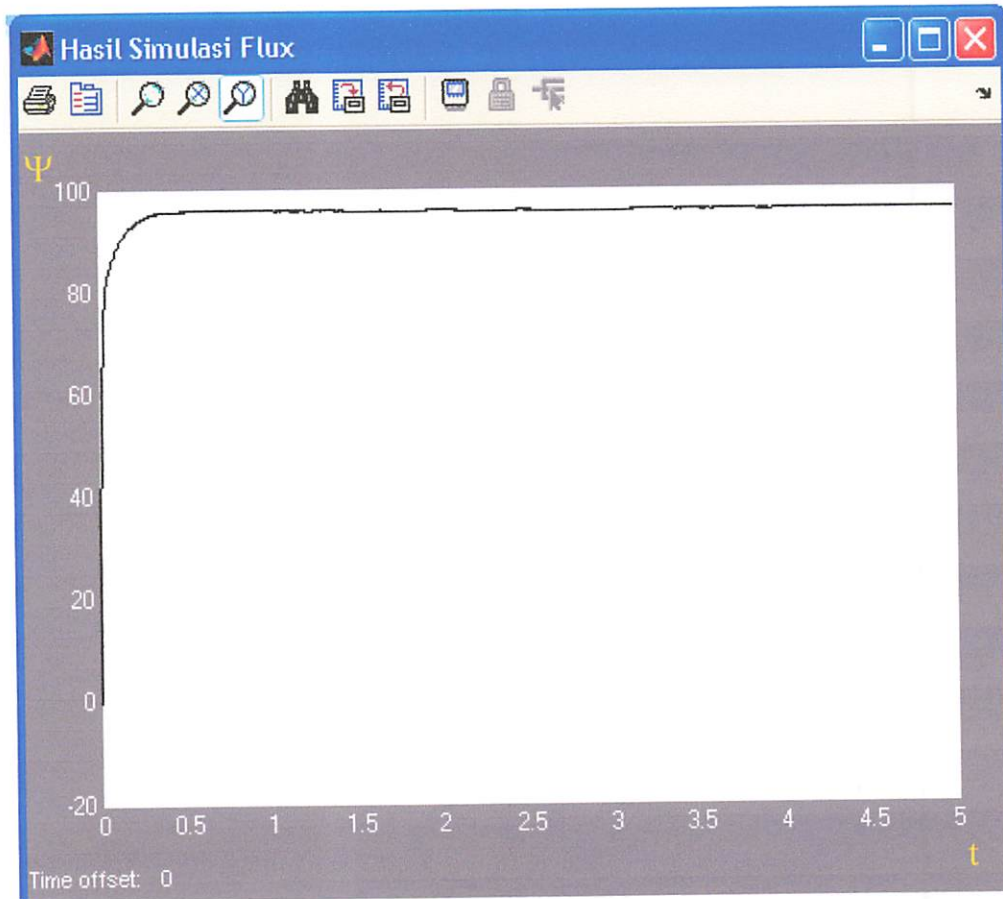
**Gambar 4.19**  
**Hasil Simulasi Arus Motor Pada *Setting Point* 750 rpm Dengan Beban Berubah – ubah**

Pada hasil simulasi dengan beban berubah – ubah yang terlihat pada Gambar 4.19, saat *setting point* torsi beban berubah-ubah diaplikasikan kepada motor, maka kecepatan motor mengalami penurunan, untuk menjaga kecepatan motor akan kembali mengikuti *setting point* kecepatan referensi metode *Field Oriented Control* dapat mengontrol besar arus yang sesuai agar kecepatan kembali mengikuti kecepatan referensi. Pada beban 1.865 N.m arus sebesar 2 A, Pada beban 2.73 N.m mempunyai arus sebesar 2.05 A. Pada beban 4.095 N.m arus sebesar 2.42 A. dan beban 5.46 N.m mempunyai arus sebesar 2.8 A.



**Gambar 4.20**  
**Hasil Simulasi Tegangan Motor Pada *Setting Point* 750 rpm Dengan Beban Berubah – ubah**

Hasil dari simulasi pada Gambar 4.20 menunjukkan hasil simulasi dari tegangan motor yang mempunyai nilai sebesar 380 V. Karena penggunaan dari *inverter* tiga fasa, maka tegangan motor tetap dijaga pada nilai 380 Volt.



**Gambar 4.21**  
**Hasil Simulasi *Flux* Motor Pada *Setting Point* 750 rpm Dengan Beban Berubah – ubah**

Pada hasil simulasi dengan beban berubah – ubah yang terlihat pada Gambar 4.21, saat *setting point* torsi beban berubah-ubah diaplikasikan kepada motor, maka fluks motor mempunyai nilai yang fluktuatif pada tiap bebannya. Pada beban 1.865 N.m mempunyai nilai fluks sebesar 95.9 wb, Pada beban 2.73 N.m mempunyai fluks sebesar 95.8 wb. Pada beban 4.095 N.fluks sebesar 96 wb. dan beban 5.46 N.m mempunyai fluks sebesar 96.2 wb.

**Tabel 4.4**  
**Hasil Simulasi Motor Induksi Pada *Setting Point* 750 rpm Berbeban**  
**( $T_{nom} = 2.73 \text{ N.m}$ )**

Time (s)	Beban	$N_r$ Ref (Rad/s)	$N_r$ (Rad/s)	I (Ampere)	Flux (Wb)	V (Volt)
0 – 1	0	750	750	1.95	96	380
1 – 2	1.865	750	750	2	95.9	
2 – 3	2.73	750	750	2.05	95.8	
3 – 4	4.095	750	750	2.42	96	
4 – 5	5.46	750	750	2.8	96.2	

Dari Tabel 4.4 dapat dilihat hasil pengujian dari simulasi 750 rpm berbeban. Pada  $t = 0-1$  s dengan beban nol menghasilkan kecepatan motor yang sesuai dengan kecepatan referensi yaitu 750 rpm dengan besar arus senilai 1.95 A dan flux sebesar 96 wb. Pada  $t = 1-2$  s dengan beban 1.865 N.m menghasilkan kecepatan motor yang sesuai dengan kecepatan referensi yaitu 750 rpm dengan besar arus senilai 2 A dan flux sebesar 95.9 wb. Pada  $t = 2-3$  s dengan beban 2.73 N.m menghasilkan kecepatan motor yang sesuai dengan kecepatan referensi yaitu 750 rpm dengan besar arus senilai 2.05 A dan flux sebesar 95.8 wb. Pada  $t = 3-4$  s dengan beban 4.095 N.m menghasilkan kecepatan motor yang sesuai dengan kecepatan referensi yaitu 750 rpm dengan besar arus senilai 2.42 A dan flux sebesar 96 wb. Pada  $t = 4-5$  s dengan beban 5.46 N.m menghasilkan kecepatan motor yang sesuai dengan kecepatan referensi yaitu 750 rpm dengan besar arus senilai 2.8 A dan flux sebesar 96.2 wb.







## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1. Kesimpulan

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan dengan menggunakan metode *Field Oriented Control* dapat diambil beberapa kesimpulan, yaitu :

1. Pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa berhasil dilakukan. Dari kedua *set point* kecepatan yang diaplikasikan pada sistem baik pada kecepatan 500 rpm dan 750 rpm memperoleh hasil yang seperti diinginkan. Meskipun mengaplikasikan berbagai *set point* beban, motor tetap mampu mengikuti kecepatan referensi. Pada saat diberi beban kecepatan motor mengalami *overshoot* kurang lebih antara 0.25 – 0.3 s dan kemudian dapat mengikuti kecepatan referensi.
2. Pada saat motor diberi beban yang lebih besar, Metode *Field Oriented Control* memberikan hasil arus yang semakin besar. Hal itu untuk memberikan garansi agar kecepatan motor tetap dijaga sesuai dengan kecepatan referensi yang diberikan.
3. Penggunaan inverter tiga fasa pada metode ini mempunyai fungsi untuk mengatur agar keluaran tegangan yang diaplikasikan pada motor tetap seimbang.

#### 5.2 Saran

1. Untuk mendapatkan keluaran yang lebih bagus dan dapat disesuaikan dengan yang diinginkan dapat menggunakan metode-metode penambahan lain seperti Neural-networks ataupun dengan fuzzy.

2. Pengetahuan tentang motor induksi merupakan suatu keharusan baik itu berupa teori – teori pendukung dan hal yang lainnya.
3. Implementasi di lapangan dari metode bisa menggunakan DSP ( *Digital Signal Processor* ). Pengetahuan tentang DSP merupakan hal yang mutlak diperlukan agar metode yang digunakan dapat menciptakan suatu pengendalian yang sesuai dengan yang diinginkan.
4. Perbandingan hasil dari metode *Field Oriented Control* dengan metode yang lain diperlukan demi terciptanya perkembangan kearah yang lebih baik dan terciptanya teknik-teknik baru dalam sistem kontrol pengaturan kecepatan motor induksi.







## DAFTAR PUSTAKA

1. **“Pedoman Efisiensi Energi untuk Industri di Asia”**, [www.EnergyEfficiencyAsia.org](http://www.EnergyEfficiencyAsia.org).
2. Rakesh Parekh, **“AC Induction Motor Fundamentals”**, Microchip Technology Inc, 2003.
3. Jaroslav Lepka, Petr Stekl, **“3-Phase AC Induction Motor Vector Control Using a 56F80x, 56F8100 or 56F8300 Device”**, Freescale Semiconductor, Application Note, AN1930, Re, 2, 2/2005.
4. A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, **“Electric Machinery”**, McGraw-Hill International, fourth Edition.
5. Lauhil Mahfudz Hayusman, **“Analisis Pengaturan kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Flux Vector Control Inverter Menggunakan Software Matlab Simulink Di Laboratorium Konversi Energi Elektrik”**, Skripsi, Teknik Elektro S-1 ITN Malang, April 2008.
6. Burak Ozpineci, Leon M. Tolbert, **“Simulink implementation of induction Machine Model- A Modular Approach”**, IEEE Transaction on Power Electronics, 2003, 728-734.
7. R. Rinkevičienė, V. Batkauskas, **“Modeling and Investigation of Vector Controlled Induction Drive”**. Department of Automation, Vilnius Gediminas Technical University, Electronics And Electrical Engineering, ISSN 1392 – 1215 2008. No. 1(81).
8. **“Field Orientated Control of 3-Phase AC-Motors”**, Literature Number: BPRA073, Texas Instruments Europe February 1998.
9. I.K. Bousserhane, A. Hazzab, M. Rahli, M. Kamli, B. Mazari. **“Direct Field-Oriented Control Using Backstepping Strategy With Fuzzy Rotor Resistance Estimator For Induction Motor Speed Control”**, Issn 1392 – 124x Information Technology And Control, 2006, Vol.35, No.4.
10. **“Digital Signal Processing Solution for AC Induction Motor”**, Application Note BPRA043, Texas Instrument, 1996.







*Lampiran*



Lampiran



# LEMBAR PERSEMBAHAN



Pertama - tama aku ingin mengucapkan puja dan puji syukur ke hadirat Allah SWT karena hanya dari Berkah, Rahmat, dan Hidayah-Nya aku bisa menyelesaikan skripsi ini..... tidak lupa aku juga mengucapkan Sholawat Serta Salam Nabi besar dan junjunganku Muhammad SAW karena dari beliau lah aku menemukan jalan yang terang.

Kepada kedua orang tuaku aku mengucapkan terima kasih yang tak terkira karena berkat doa dan dukungan dan kasih sayangmu aku akhirnya bisa menyelesaikan studiku.. (Maafkan anakmu yang selama ini selalu menyusahkan)... Tidak kalah penting untuk Indri "Kutik Q"

terima kasih sayang... atas dukungannya selama ini tanpa kenal salah dikala senang maupun susah (Kau memang yang Terbaik...).



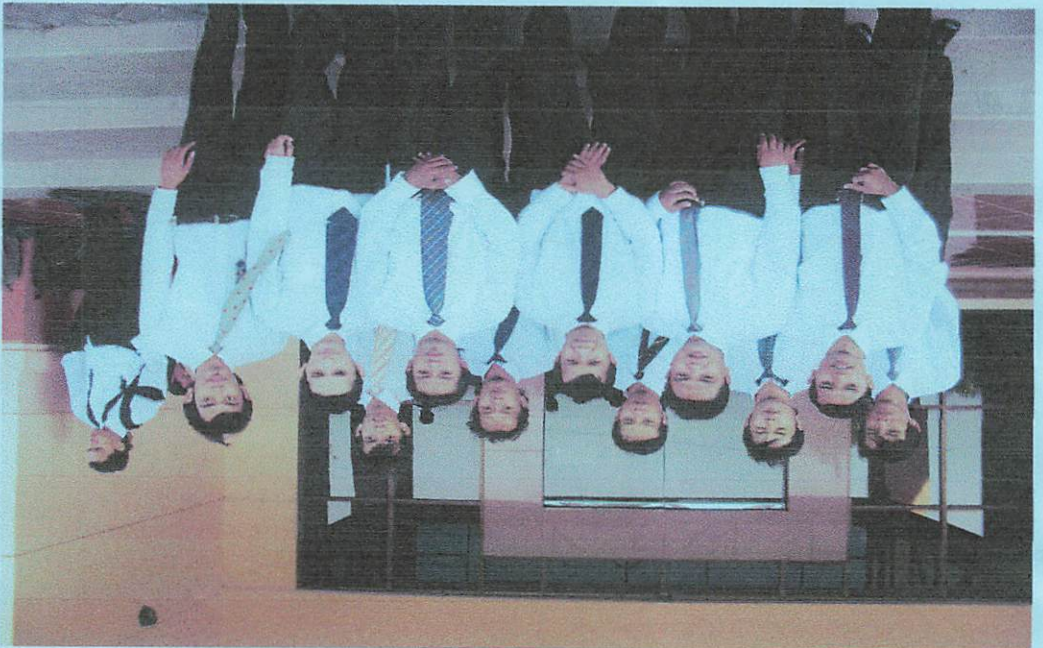




*Bayes - Ceos*



*Ayo Ayo... Cepet dan Oleh Keryo... Nang Lagi.....  
Untuk Andre, Awan, Dwi, n temen-temen yang lain yang belum  
mengikuti jejak kita jangan bersekih friend.. tetap semangat ayo cepet  
susus.....*



*To all my friend seperjuangan..... (Especially Denis @-1 2001)  
"Janganlah kau cepat puas atas yang kau capai sampai hari  
ini... Teruslah belajar n belajar sampai hayat meritemput  
kita...."*







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

## BERITA ACARA UJIAN SKRIPSI FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

Nama Mahasiswa : KHAIRUDDIN  
N.I.M. : 01.12.162  
Jurusan : Teknik Elektro S-1  
Konsentrasi : Teknik Energi Listrik  
Judul Skripsi : PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI  
TIGA FASA DENGAN METODE FIELD ORIENTED  
CONTROL DI LABORATORIUM KONVERSI  
ENERGI ELEKTRIK ITN MALANG

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

Hari : Kamis  
Tanggal : 25 September 2008  
Dengan Nilai : 80.2 (A) *guy*

### Panitia Ujian Skripsi



**Ketua Majelis Penguji**

**(Ir. Mochtar Asroni, MSME)**  
NIP. P. 1018100036

**Sekretaris Majelis Penguji**

**(Ir. F. Yudi Limpraptono, MT)**  
NIP. P. 1039500274

### Anggota Penguji

**Penguji Pertama**

**(Irrine Budi Sulistiawati, ST, MT)**  
NIP. 132314400

**Penguji Kedua**

**(Ir. Eko Nurcahyo)**  
NIP. Y. 102 870 0172



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 : Kamis  
Tanggal : 25 September 2008

Telah dilakukan perbaikan skripsi oleh :

1. Nama : KHAIRUDDIN
2. NIM : 01.12.162
3. Jurusan : Teknik Elektro
4. Konsentrasi : Teknik Energi Listrik
5. Judul Skripsi : PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA DENGAN METODE *FIELD ORIENTED CONTROL* DI LABORATORIUM KONVERSI ENERGI ELEKTRIK ITN MALANG

Perbaikan meliputi :

No	Materi Perbaikan	Ket
1.	Blok proses perhitungan k untuk inputkan FOCnya	

Anggota Penguji

Irrine Budi Sulistiawati, ST, MT  
NIP. 132314400

Dosen Pembimbing I

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

Dosen Pembimbing II

Bamang Prio Hartono, ST, MT  
NIP. Y. 1028400082





**FORMULIR BIMBINGAN SKRIPSI**

Nama : KHAIRUDDIN  
 Nim : 01.12.162  
 Masa Bimbingan : 16 Juni 2008 s/d 16 Desember 2008  
 Judul Skripsi : **PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA DENGAN METODE *FIELD ORIENTED CONTROL* DI LABORATORIUM KONVERSI ENERGI ELEKTRIK ITN MALANG**

No.	Tanggal	Uraian	Parap Pembimbing
1.		BAB I dibetulkan	
2.		BAB II ditambahkan Teori pada di Bab III, IV	
3.		BAB III revisi data	
4.		BAB IV Pembahasan hasil diuraikan	
5.		BAB IV Revisi	
6.		BAB V (lihat hasil) revisi	
7.		BAB V Disempurnakan	
8.			
9.			
10.			

Malang, 2008  
 Dosen Pembimbing,

**Bambang Prio Hartono, ST, MT**  
 Nip. Y. 1028400082



**INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO**

**FORMULIR BIMBINGAN SKRIPSI**

Nama : KHAIRUDDIN  
Nim : 01.12.162  
Masa Bimbingan : 16 Juni 2008 s/d 16 Desember 2008  
Judul Skripsi : **PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA DENGAN METODE *FIELD ORIENTED CONTROL* DI LABORATORIUM KONVERSI ENERGI ELEKTRIK ITN MALANG**

No.	Tanggal	Uraian	Parap Pembimbing
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			
6.			
7.			
8.			
9.			
10.			

Malang, 2008  
Dosen Pembimbing,

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