

SKRIPSI

**ANALISA PERBANDINGAN METODE VEKTOR KONTROL,
METODE VOLT/Hz DAN DIRECT TORQUE CONTROL (DTC)
SEBAGAI KONTROL PADA MOTOR INDUKSI TIGA PHASA DI
LABORATORIUM KONVERSI ENERGI ELEKTRIK ITN MALANG
MENGUNAKAN SOFTWARE MATLAB SIMULINK**



Disusun oleh:

DWI HARTANTO

02.12.056

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

OKTOBER 2008

LEMBAR PERSETUJUAN

**ANALISA PERBANDINGAN METODE VEKTOR KONTROL,
METODE VOLT/Hz DAN DIRECT TORQUE CONTROL
(DTC) SEBAGAI KONTROL PADA MOTOR INDUKSI TIGA
PHASA DI LABORATORIUM KONVERSI ENERGI
ELEKTRIK ITN MALANG MENGGUNAKAN SOFTWARE
MATLAB SIMULINK**

SKRIPSI

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

Disusun Oleh :

DWI HARTANTO

NIM : 02. 12. 056

Diperiksa dan Disetujui

Pembimbing I

Pembimbing II

(Ir. M. Abdul Hamid, MT)
NIP. Y. 101 8800 188

(Bambang Prio H, ST, MT)
NIP. Y. 102 8400 082

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro S-1



(Ir. F. Yudi Limpraptono, MT)
NIP.Y. 103 9500 274

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



INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

BERITA ACARA UJIAN SKRIPSI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

Nama Mahasiswa : Dwi Hartanto
N.I.M : 02.12.056
Jurusan : Teknik Elektro S-1
Konsentrasi : Teknik Energi Listrik
Judul Skripsi : Analisa Perbandingan Metode Vektor Kontrol, Metode V/Hz dan DTC Sebagai Kontrol Pada Motor Induksi Tiga Phasa Di Lab. Konversi Energi Elektrik Menggunakan Software Matlab Simulink.

Dipertahankan dihadapan team penguji skripsi jenjang sarjana (S-1) pada :

Hari : Rabu
Tanggal : 24 September 2008
Dengan hasil : 76 (B+) *by*



Ketua
[Signature]
Ir. Mochtar Asroni, MSME.
NIP. Y. 101 8100 036

PANITIA UJIAN SKRIPSI

Sekretaris

[Signature]
Ir. F. Yudi Limpraptono, MT.
NIP. Y. 103 9500 274

ANGGOTA PENGUJI

Penguji I

[Signature]
Irrine Budi S, ST, MT
NIP. 132 314 400

Penguji II

[Signature]
Ir. H. Choirul Saleh, MT
NIP. Y. 101 8800 190

**INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
ANALISA PERBANDINGAN METODE VEKTOR KONTROL,
METODE V/Hz DAN DIRECT TORQUE CONTROL (DTC) SEBAGAI
KONTROL PADA MOTOR INDUKSI TIGA PHASA DI LABORATORIUM
KONVERSI ENERGI ELEKTRIK ITN MALANG MENGGUNAKAN
SOFTWARE MATLAB SIMULINK**

Dwi Hartanto

Antok_cpu@yahoo.co.id

Jurusan Teknik Elektro S-1, Konsentrasi Energi Listrik
Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Malang
Jl. Raya Karanglo, Km 2 Malang
www.itn@itn.ac.id

ABSTRAK

Motor induksi jenis sangkar adalah mesin yang populer bagi aplikasi industri. Motor induksi mempunyai kelebihan, murah harganya tetapi pengontrolannya terbatas. Pengontrolan kecepatan motor sangat diperlukan apabila motor tersebut akan digunakan pada kecepatan yang diinginkan, pengontrolan dilakukan dengan menggunakan metode *vektor kontrol*, metode *Volt/Hz* dan *Direct Torque Control (DTC)*. Penulisan ini menganalisa hasil arus, kecepatan dan torsi motor menggunakan metode vektor kontrol, metode *Volt/Hz* dan *DTC*.

Vektor kontrol dikenal sebagai kontrol berorientasi medan, arus yang dihasilkan dengan metode ini sebesar 10 Amper untuk kecepatan saat starting sebesar 2800 Rpm dan torsi sebesar 500Rpm. *Volt/Hz* adalah metode pengendalian yang dapat mengontrol variabel besaran dari frekuensi, arus, dan tegangan. Arus yang dihasilkan sebesar 40 Amper untuk kecepatan yang dihasilkan sebesar 3000 Rpm dengan torsi sebesar 190 N.m. Sedangkan *DTC* merupakan pengendalian torsi motor dengan inputan torsi yang menjadi referensi dan fluks yang menjadi referensi. Untuk arus yang dihasilkan sebesar 6.8 Ampere dan kecepatan putar sebesar 1320 rpm sedangkan torsi yang dihasilkan sebesar 5 N.m. Dari hasil penelitian dengan ketiga metode ini dapat disimpulkan dengan menggunakan metode Vektor Kontrol arus yang dihasilkan pada saat starting dapat dikontrol.

Kata Kunci : Motor Induksi, Vektor Kontrol, *Volt/Hz*, *DTC*.

Abstract

Motor induksi hutch type machine which is popular to industrial application. Induction motor have excess, cheap its price but its limited. Control speed of motor very needed if the motor will be used at a speed of which wanted, controlled by using method of vector control, method Volt/ Hz and Direct Torque Control (DTC). This Writing analyze result of current, and speed of torsi motor use method of vector control, method Volt/ Hz of DTC.

Control Vektor known as control oriented field, yield current with this method equal to 10 Ampere for the speed of moment of starting equal to 2800 Rpm and of torsi equal to 500Rpm. Volt / hz method operation of which can control variable of frequency, current, and yield current.equal to 40 Ampere for yielded speed equal to 3000 Rpm with torsi equal to 190 N.M. DTC represent operation of motor torsi with torsi becoming flux and reference becoming yield current referenci. equal to 6.8 Ampere and speed turn around equal to 1320 rpm while yielded torsi equal to 5 N.M. From result of research third this method can be concluded by using method of Vektor Control yieldcurrent at the time of starting can be controlled.

DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN	ii
ABSTRAKSI.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR GRAFIK	xi
DAFTAR TABEL	xii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan	3
1.4. Batasan Masalah	3
1.5. Metode Pembahasan	3
1.6. Sistematika Penulisan	4
1.7. Relevansi	4
BAB II KONSEP DASAR MOTOR INDUKSI TIGA PHASA, TEORI METODE VEKTOR KONTROL, METODE VOLT/Hz DAN DTC	
2.1. Teori Dasar Motor Induksi	6
2.2. Konstruksi Motor Induksi	7

2.2.1. Stator	7
2.2.2. Rotor	7
2.3. Medan Putar	8
2.4. Prinsip Kerja Motor Induksi	9
2.4.1. Slip dan Frekuensi Arus Rotor	11
2.5. Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi	12
2.5.1. Rangkaian Ekuivalen	12
2.5.2. Rangkaian Ekuivalen Stator	13
2.5.3. Rangkaian Ekuivalen Rotor	13
2.5.4. Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi	15
2.6. Pengujian Motor Induksi Tiga Fasa.....	18
2.6.1. Pengujian Arus Searah (<i>DC Test</i>)	18
2.6.2. Pengujian Tanpa Beban (<i>No-Load Test</i>)	19
2.6.3. Pengujian Rotor Tertahan (<i>Blocked Rotor Test</i>)	20
2.7. Model Rangkaian DQ	23
2.8. Operasional Motor Induksi.....	25
2.8.1. Performa <i>Steady State</i>	25
2.8.2. Performa Transient	26
2.9. Teori Dasar Vektor Kontrol.....	29
2.9.1. Blok Kontrol Vektor.....	30
2.10. Teori Dasar Metode <i>Volt/Hz</i>	33
2.10.1. Prinsip Kerja Metode <i>Volt Per Hertz (V/ℓ)</i>	34
2.10.2. Kompensasi Ir.....	35

2.10.3 Kompensasi Slip.....	36
2.10.4. PWM Inverter	37
2.11. Teori Dasar Direct Torque Controller (DTC).....	41
2.11.1. DTC Using Space Vector Modulation	43

**BAB III METODE VEKTOR KONTROL, METODE VOLT/Hz ,DTC SVM ,
dan PARAMETER MOTOR INDUKSI**

3.1. Metode Vektor Kontrol	44
3.3.1. Blok Kontrol Vektor	44
3.3.2. Flowchart Pemecahan Masalah.....	46
3.2. Metode <i>VOLT/Hz</i>	47
3.2.1. Blok Skema Metode <i>Volt/Hertz</i>	47
3.2.2. Flowchart Pemecahan Masalah	49
3.3. DTC SVM.....	50
3.3.1. Blok Skema DTC SVM.....	50
3.3.2. Flowchart Pemecahan Masalah.....	53
3.4. Data Pengujian Parameter Motor Induksi.....	54

BAB IV ANALISA PARAMETER MOTOR INDUKSI 3 PHASA DAN HASIL

SIMULASI

4.1. Pengujian Parameter Motor Induksi.....	56
4.1.1. Alat-alat yang digunakan	56
4.1.2. Pengujian Arus Searah (<i>DC Test</i>).....	57
4.1.3. Pengujian Tanpa Beban (<i>No LoadTest</i>).....	58

4.1.4. Pengujian Rotor Tertahan (<i>Blocked Rotor Test</i>).....	57
4.2. Analisa Parameter Motor Induksi	58
4.3. Simulasi Motor Induksi.....	61
4.3.1. Tampilan Parameter.....	61
4.3.2. Hasil Simulasi Menggunakan Metode Vektor Kontrol dengan kondisi Tanpa Beban $TL = 0$	62
4.3.3. Hasil Simulasi Menggunakan metode Volt/Hz dengan kondisi Tanpa Beban $TL = 0$	63
4.3.4. Hasil Simulasi Menggunakan DTC SVM dengan kondisi Tanpa Beban $TL = 0$	64

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan	66
5.2. Saran	67

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2-1	Konstruksi Motor Induksi.....	7
Gambar 2-2	Motor Induksi Rotor Belitan dan Rotor Sangkar Bajing.....	8
Gambar 2-3	Medan Putar Pada Motor Induksi.....	8
Gambar 2-4	Rangkaian Ekuivalen Stator.....	13
Gambar 2-5	Rangkaian Ekuivalen Rotor.....	14
Gambar 2-6	Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi.....	15
Gambar 2-7	Penyederhanaan Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi.....	17
Gambar 2-8	Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi.....	17
Gambar 2-9	Pengujian Arus Searah (<i>DC Test</i>).....	18
Gambar 2-10	Pengujian Tanpa Beban.....	19
Gambar 2-11	Pengujian Rotor Tertahan.....	21
Gambar 2-12	Rangkaian Ekuivalen DQ Motor Induksi.....	23
Gambar 2-13	Kecadaan Steady State Motor Induksi.....	26
Gambar 2-14	Transient Respons Pada Starting Motor Induksi 3Phasa.....	27
Gambar 2-15	Karakteristik Torsi Motor Pada Beban Berubah.....	27
Gambar 2-16	Hubungan Sumbu 3 fasa, sumbu α - β dan d-q.....	30
Gambar 2-17	Blok Simulink abc to DQ.....	30
Gambar 2-18	Blok Simulink DQ to abc.....	31
Gambar 2-19	Blok Simulink Perhitungan Fluksi.....	32
Gambar 2-20	Blok Simulink Perhitungan Torsi.....	32
Gambar 2-21	Blok Simulink Arus Pada Sumbu Q.....	33

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Motor induksi jenis sangkar adalah mesin yang populer bagi aplikasi industri. Motor induksi mempunyai kelebihan, murah harganya tetapi pengontrolannya terbatas.

Pengontrolan kecepatan motor sangat diperlukan apabila motor tersebut akan digunakan pada kecepatan yang diinginkan. Dalam hal ini pengontrolan dilakukan dengan menggunakan metode *vektor kontrol*, metode *Volt/Hz* dan *Direct Torque Control* (DTC).

Pengontrolan *Vektor kontrol* dikenal sebagai kontrol berorientasi medan, yang diterapkan pada motor induksi sehingga menghasilkan unjuk kerja yang mendekati unjuk kerja motor arus searah. Penelitian dengan metode Vektor Kontrol diteliti oleh Batkauskas^[2]. Untuk pengontrolan *Volt/Hz* untuk *menstartingnya* kita perlu mengatur/merubah tegangan dan juga frekuensi yang akan masuk ke motor. Penelitian dengan menggunakan metode Volt/Hz ini diajukan oleh Alfredo Munoz dan memberikan kesimpulan keefektifan dari simulasi Volt/Hz terhadap kecepatan dapat dicapai^[1]. Sedangkan DTC merupakan pengendalian torsi motor dengan inputan torsi yang menjadi referensi dan fluks yang menjadi referensi. Menurut M.Vasudevan salah satu keuntungan dan kelemahan dari DTC SVM ini adalah respon kecepatan torsi dan penyalaan

frekuensi yang baik sedangkan kelemahannya algoritma kontrol yang sangat rumit untuk dihitung dalam skema kontrol^[4].

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

Dengan menggunakan bantuan software MATLAB versi 7.0.4 kita dapat menganalisa kecepatan, arus, tegangan dan torsi motor dengan membentuk blok-blok *transfer function* dari persamaan matematika motor yang telah diketahui.

1.2. Rumusan masalah

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

1. Bagaimana membentuk simulasi pengontrolan kecepatan motor induksi dengan metode *Vector Control*, metode *Volt/Hz* dan *Direct Torque Control (DTC)*?
 2. Bagaimana menganalisa cara kerja sistem kontrol tersebut dengan menggunakan software Matlab Simulink 7.0.4 ?
 3. Membandingkan penggunaan metode *Vektor control*, metode *Volt/Hz* dan DTC.
-

1.3. Tujuan penulisan

Tujuan dari penulisan ini adalah untuk menganalisa dan membandingkan penggunaan metode *Vektor kontrol*, metode *Volt/Hz* dan *Direct Torque Control* menggunakan software Matlab Simulink 7.0.4

1.4 Batasan Masalah

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

- a. Analisis dilakukan pada motor induksi tiga fasa jenis rotor sangkar DE LORENZO/DL 1021, 1,1 kW, 220/380(Δ /Y) Volt, 4,3/2,5(Δ /Y) Ampere, $\cos \phi$ 0,83, 50 Hz, 2830 rpm, 2 kutub.
Analisa Menggunakan Simulink yang dibentuk menggunakan *transfer function* dari persamaan matematika.
- b. Pembahasan untuk mengetahui penggunaan metode *vector control*, metode *Volt/Hz* dan *Direct Torque Control* (DTC).
- c. Rangkaian DQ hanya digunakan untuk memodelkan motor induksi
- d. Tidak membahas proteksi motor.

1.5 Metodologi Pembahasan

Metodologi yang digunakan dalam penyusunan skripsi ini adalah :

- a. Studi Literature
Pengumpulan bahan yang berkaitan dengan vector control, metode Volt/Hz dan Direct Torque Control (DTC) serta penurunan rumus-

rumus yang digunakan dalam skripsi ini.

b. Pengumpulan Data

Melakukan percobaan dan pengambilan data dari pengukuran yang dilakukan.

c. Melakukan eksperimen dan pengambilan data dari motor induksi yang akan di analisa melalui percobaan dengan metode pengujian arus searah (*DC Test*), Pengujian rotor tertahan (*Block Rotor Test*) dan pengujian tanpa beban (*No Load Test*).

d. Menganalisa hasil pengukuran dan mensimulasikannya dengan menggunakan software *Matlab Simulink 7.0.4*

e. Menampilkan hasil percobaan simulasi berupa starting, torsi pada penggunaan metode *vector control*, metode *Volt/Hz* dan *Direct Torque Control*.

f. Menarik kesimpulan.

1.6 Sistematika Penulisan

BAB I : Latar Belakang, rumusan masalah, tujuan penulisan, batasan masalah, metodologi pembahasan dan sistematika penulisan

BAB II : Materi yang terkait dengan motor induksi tiga fasa dan Teori dari Metode Vektor Kontrol, Metode Volt/Hz dan DTC

BAB III : Metode Vektor Kontrol, Metode Volt/Hz dan DTC SVM

BAB IV : Pengujian Simulasi dan analisa

BAB V : Kesimpulan Dan Saran

BAB II
KONSEP DASAR MOTOR INDUKSI TIGA PHASA
TEORI METODE VEKTOR KONTROL, METODE VOLT/Hz
DAN DTC

2.1. Teori Dasar Motor Induksi.

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

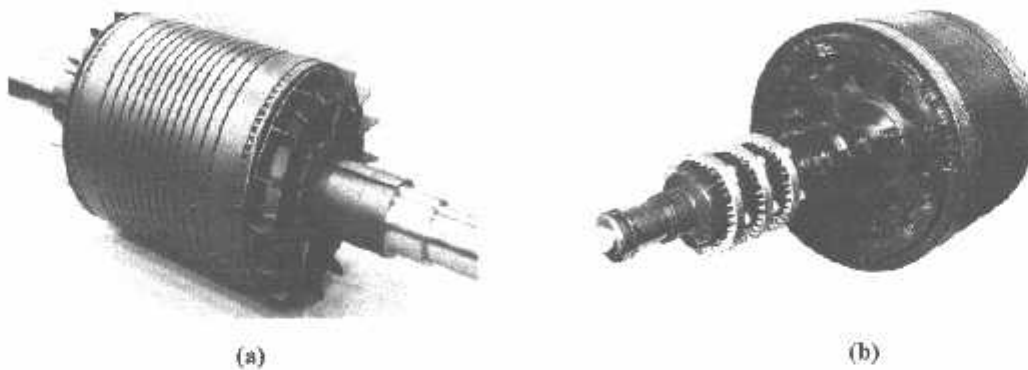
Disebut motor tak serempak karena putaran motor tidak sama dengan putaran fluks magnet stator. Dengan kata lain, bahwa antara putaran rotor dan putaran fluks magnet terdapat selisih putaran yang disebut slip.

Motor induksi *polyphase* banyak dipakai dikalangan industri. Ini berkaitan dengan beberapa keuntungannya.

Keuntungan :

1. Sangat sederhana dan daya tahan kuat (konstruksi hampir tak pernah mengalami kerusakan, khususnya tipe rotor sangkar bajing).
2. Harga relatif murah dan perawatan mudah.
3. Efisiensi tinggi pada kondisi berputar normal, tidak dibutuhkan sikat dan karenanya rugi daya yang ditimbulkan dapat dikurangi.

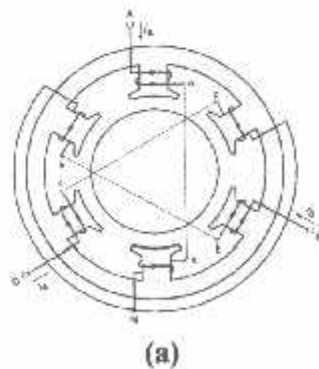
Motor induksi jenis ini mempunyai rotor dengan kumparan yang terdiri atas beberapa batang konduktor yang disusun sedemikian rupa sehingga menyerupai sangkar tupai.

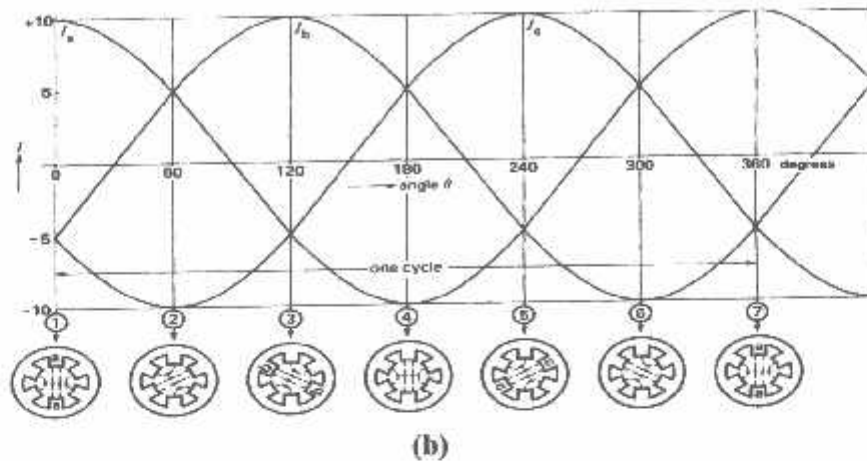


Gambar 2-2
a) Motor Induksi Rotor Belitan b) Rotor Sangkar Bajing

2.3. Medan Putar

Perputaran motor pada mesin arus bolak-balik ditimbulkan oleh adanya medan putar (fluks yang berputar) yang dihasilkan dalam kumparan statornya. Medan putar ini terjadi apabila kumparan stator dihubungkan dalam fasa banyak, umumnya tiga fasa, hubungan bintang atau delta.





Gambar 2-3
Medan Putar Pada Motor Induksi ^[5]

Medan putar terjadi apabila kumparan A-a, B-b, C-c dihubungkan tiga fasa dengan beda fasa masing-masing 120° (hubungan bintang, Y) dan dialiri arus sinusoida. Distribusi i_a , i_b , i_c sebagai fungsi waktu adalah seperti gambar 2-4b. Pada keadaan t_1 fluks resultan mempunyai arah yang sama dengan arah yang dihasilkan oleh kumparan A-a, sedangkan pada t_2 , fluks resultannya dihasilkan oleh kumparan B-b. Untuk t_4 , fluks resultannya berlawanan arah dengan fluks resultan yang dihasilkan pada t_1 . Dari gambar 2-4 b tersebut terlihat bahwa fluks resultan ini akan berputar satu kali.

2.4. Prinsip Kerja Motor Induksi

Motor induksi tiga fasa dapat dibandingkan dengan transformator karena merupakan piranti yang melibatkan perubahan kebocoran fluks pada kumparan stator. Dalam hubungan ini diasumsikan bahwa rotor terdiri atas tipe lilitan dan hubungan bintang. Dengan lilitan rotor dalam keadaan rangkaian terbuka tidak

ada torsi yang dibangkitkan. Dengan demikian pemberian tegangan tiga fasa pada kumparan stator tiga fasa menimbulkan medan magnet putar dan memotong kumparan rotor pada frekuensi f_1 . Nilai rata-rata ggl induksi per fasa dari kumparan rotor dinyatakan dengan persamaan :

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

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

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

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

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

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

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

Untuk menghasilkan torsi mula (dan torsi penggerak berturut-turut) perlu arus yang mengalir dalam kumparan rotor. Mula-mula ggl induksi E_2 mengakibatkan arus rotor I_2 mengalir melalui rangkaian hubung-singkat, menghasilkan distribusi *ampere-conductor* yang berkerja dengan medan fluks untuk menghasilkan torsi mula

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

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

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

2.4.1. Slip dan Frekuensi Arus Rotor

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

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

Pada keadaan diam medan magnet putar yang dihasilkan oleh stator mempunyai kecepatan relatif yang sama dengan kumparan rotor. Pada saat ini frekuensi dari arus rotor sama dengan frekuensi stator ($f_r = f_s$). Frekuensi rotor f_r adalah nol ketika motor berputar pada kecepatan sinkron. Pada saat tersebut tidak terdapat gerakan (putaran) relatif antara medan putar dan rotor. Pada kecepatan yang lain,

frekuensi rotor proporsional dengan slip (s). Hubungan antara slip dan frekuensi dapat dilihat dari persamaan berikut ini :

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

dimana : p = jumlah kutub

f_s = frekuensi stator

Pada rotor berlaku hubungan :

$$f_r = \frac{(n_s - n_r)p}{120} = \frac{(n_s - n_r)n_s p}{n_s 120} \dots\dots\dots (2.7)$$

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

$$\text{Maka : } f_r = s f_s \dots\dots\dots (2.8)$$

2.5. Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi

2.5.1. Rangkaian Ekuivalen

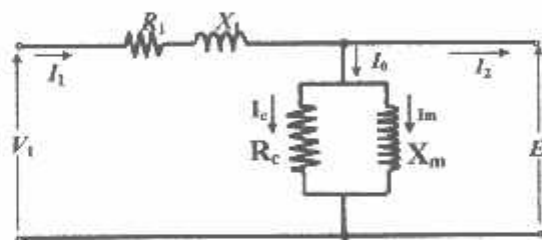
Suatu rangkaian ekuivalen motor induksi tiga fasa diperlukan untuk membantu analisis operasi dan untuk memudahkan penghitungan kinerja. Rangkaian ekuivalen tersebut mengasumsikan suatu bentuk yang identik rangkaian ekuivalen transformator. Oleh karena itu motor induksi dapat dipandang sebagai transformator yang mempunyai ciri-ciri khusus yaitu :

1. Stator sebagai sisi primer.
2. Rotor sebagai sisi sekunder yang penghantar-penghantarnya dihubungkan singkat dan berputar.

2.5.2. Rangkaian Ekuivalen Stator

Apabila kumparan stator diberikan tegangan catu dari jala-jala sebesar V_1 , maka akan mengalir arus putar tiga fase pada kumparan stator yang membangkitkan medan magnet tiga fase. Arus stator (I_1) bercabang menjadi dua komponen arus yaitu :

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



Gambar 2-4
Rangkaian Ekuivalen Stator⁽¹⁾

Dimana :

- V_1 = tegangan terminal
- R_1 = resistansi kumparan
- X_1 = reaktansi bocor kumparan
- E_1 = tegangan induksi (ggl)
- R_c = resistansi tembaga
- X_m = reaktansi magnetisasi

2.5.3. Rangkaian Ekuivalen Rotor

Pada saat rotor diam, medan putar stator akan memotong batang konduktor rotor dengan kecepatan putar sinkron (n_s), sehingga frekuensi arus rotor

sama dengan frekuensi arus stator ($f_s = f_r$) dan slip sama dengan satu ($s=1$). Dengan mengetahui bahwa frekuensi arus / tegangan rotor adalah frekuensi slip, maka reaktansi bocor rotor (*leakage reactance*) adalah :

$$X_2 = sX_2 \dots\dots\dots (2.9)$$

$$X_2 = 2\pi f_s L_2 \dots\dots\dots (2.10)$$

dimana X_2 merupakan reaktansi rotor pada start atau diam.

Tegangan induksi pada rotor :

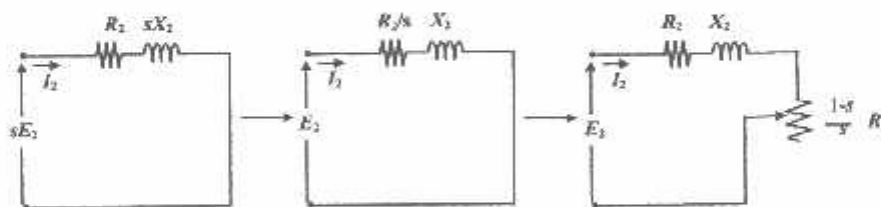
$$E_2 = 4,44f_2 N_2 \Phi_m \dots\dots\dots (2.11)$$

$$f_2 = sf_1$$

$$sE_2 = 4,44sf_1 N_2 \Phi_m \dots\dots\dots (2.12)$$

Dengan memasukkan persamaan (2.7) ke (2.8) maka didapat persamaan :

$$E_2 = sE_2 \dots\dots\dots (2.13)$$



Gambar 2-5
Rangkaian Ekuivalen Rotor^[1]

Dimana :

S = Slip

E_2 = tegangan induksi pada saat rotor dalam keadaan diam

R_2 = resistansi kumparan rotor

X_2 = reaktansi bocor rotor

Berdasarkan persamaan (2.5) dan (2.9) maka diperoleh rangkaian ekivalen rotor seperti pada gambar 2-6.

Besar arus rotor (I_2) saat berputar adalah :

$$I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}} \dots\dots\dots (2.14)$$

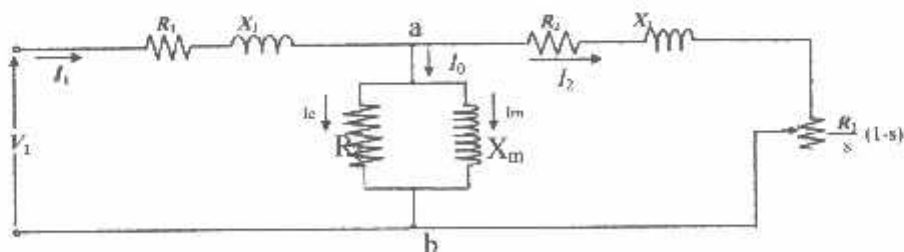
Atau

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}} \dots\dots\dots (2.15)$$

2.5.4. Rangkaian Ekivalen Motor Induksi

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

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



Gambar 2-6
Rangkaian Ekivalen Motor Induksi^[1]

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

$$P_2 = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \dots\dots\dots (2.16)$$

Dengan rugi tembaga rotor :

$$P_{cu2} = 3I_2^2 R_2 \dots\dots\dots (2.17)$$

Maka daya mekanis yang dibangkitkan oleh motor induksi adalah :

$$P_m = P_2 - P_{cu2} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} - 3I_2^2 R_2 = 3I_2^2 R_2 \frac{(1-s)}{s} \dots\dots\dots (2.18)$$

$$P_m = T \cdot \omega_r = T \cdot \omega_s (1-s) \dots\dots\dots (2.19)$$

dimana :

T = Torsi motor dalam N-m

ω_r = kecepatan rotor dalam rad/det

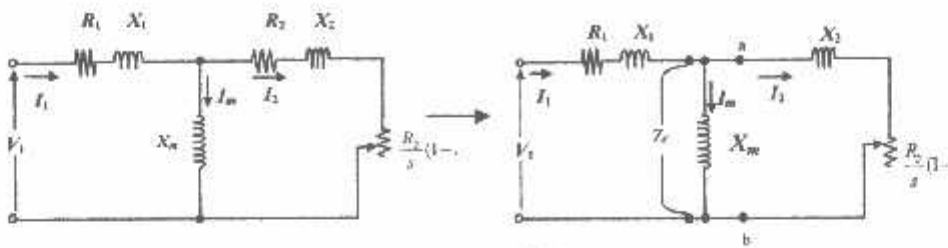
ω_s = kecepatan sinkron stator dalam rad/det

sehingga diperoleh :

$$T = \frac{3}{\omega_s} I_2^2 \frac{R_2}{s} \text{ Nm} \dots\dots\dots (2.20)$$

$$I_2 = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}} \dots\dots\dots (2.21)$$

Dalam analisis rangkaian ekivalen, sering disederhanakan dengan menghilangkan konduktansi (R_c), sehingga rangkaian ekivalen pada gambar (2-6) berubah menjadi :



Gambar 2-7
Penyederhanaan Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi ^[1]

Daya masukan (P_{in}) pada rangkaian ekuivalen adalah :

$$P_{in} = 3(I_1^2) \frac{R_1'}{S} \text{ watt} \dots\dots\dots (2.22)$$

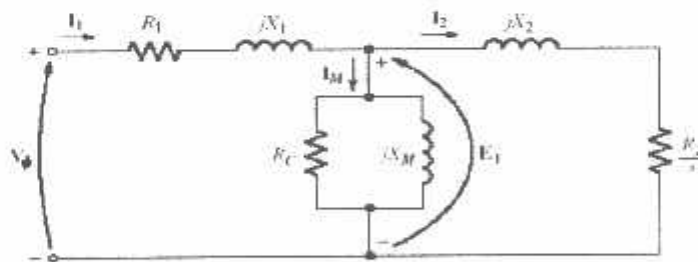
Daya Keluaran (P_{out}) adalah :

$$P_{out} = P_{input} - P_{rukt-mekhanik} \text{ watt} \dots\dots\dots (2.23)$$

Efisiensi(η) didapat dari persamaan :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100\% \dots\dots\dots (2.24)$$

Jadi rangkaian ekuivalen secara keseluruhan ketika motor berjalan adalah sebagai berikut:

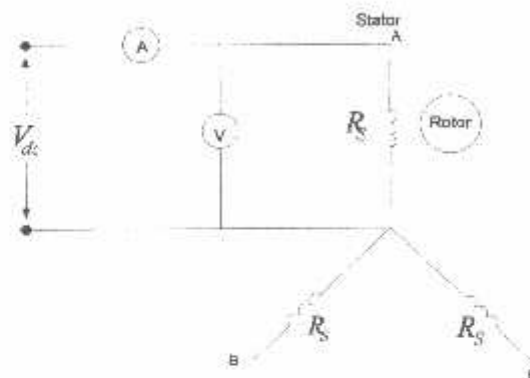


Gambar 2-8
Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi ^[4]

2.6. Pengujian Motor Induksi Tiga Phasa

2.6.1. Pengujian Arus Searah (*DC Test*)

Tujuan dari pengujian arus searah (*DC Test*) adalah untuk menentukan nilai resistansi stator. Diagram pengukuran ditunjukkan pada gambar 2.9.



Gambar 2-9
Pengujian Arus Searah (*DC Test*)

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

$$R_{ek} = 2R_s \quad \Omega \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

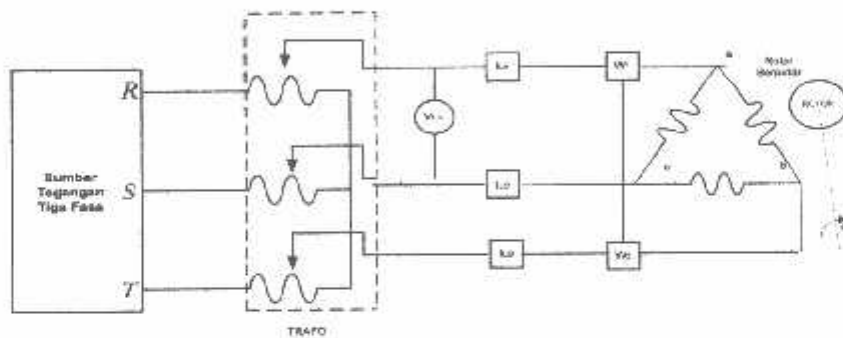
untuk nilai resistansi kumparan stator perphasa (R_s):

$$R_s = R_{dc} = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \quad \Omega \quad \dots\dots\dots (2.26)$$

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

2.6.2. Pengujian Tanpa Beban (No-Load Test)

Pengujian Tanpa Beban (*No-Load Test*) adalah sama dengan pengujian rangkaian terbuka. Pada keadaan tanpa beban, R_c / s adalah sangat tinggi. Sehingga arus rotor sangat kecil dan hanya diperlukan untuk menghasilkan torsi yang cukup untuk mengatasi gesekan dan pelilitan, dengan demikian rugi-rugi I^2R rotor tanpa beban sangat kecil dan dapat diabaikan.



Gambar 2-10
Diagram Pengujian Tanpa Beban

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

$$P_{3-\phi} = W_a + W_b \quad \text{watt} \dots\dots\dots (2.27)$$

I_{nl} , arus phasa stator :

$$I_{nl} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \quad \text{Ampere} \dots\dots\dots (2.28)$$

Rugi-rugi tahanan stator :

$$P_{1-Rs}^2 = 3 I_{nl}^2 \cdot R_s \dots\dots\dots (2.29)$$

Besarnya rugi-rugi putaran :

$$P_{loss} = P_{th} - P_{1-Rs}^2 \dots\dots\dots (2.30)$$

Reaktansi diri stator :

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

Dimana:

I_{tb} = arus tanpa beban

P_{tb} = masukan daya ke stator pada keadaan tanpa beban

P_{rot} = rugi-rugi putaran tanpa beban

Tahanan inti adalah :

$$R_c = \frac{V_{tb}^2}{P_{tb}} \Omega$$

Resistansi tanpa beban adalah :

$$R_{tb} = \frac{P_{tb}}{3 \cdot (I_{tb})^2} \Omega \dots\dots\dots (2.31)$$

Impedansi tanpa beban adalah :

$$Z_{tb} = \frac{V_{tb}}{\sqrt{3} I_{tb}} \Omega \dots\dots\dots (2.32)$$

$$Z_{tb} = R_{tb} - j X_{tb} \dots\dots\dots (2.31)$$

Reaktansi tanpa beban adalah :

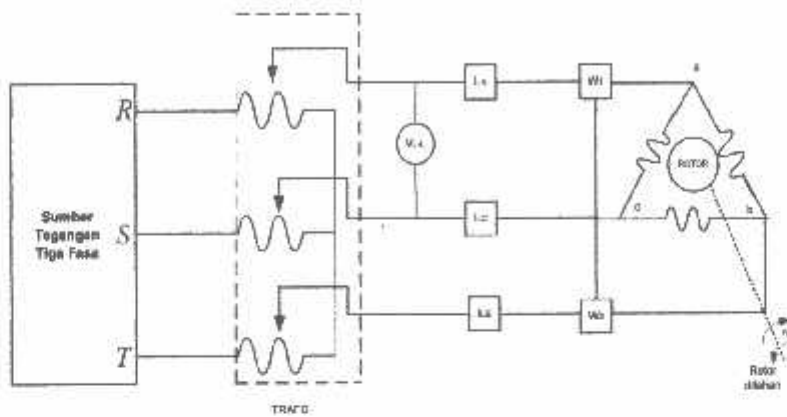
$$X_{tb} = \sqrt{Z_{tb}^2 - R_{tb}^2} \Omega \dots\dots\dots (2.32)$$

$$X_m = X_{tb} - X_l \dots\dots\dots (2.33)$$

2.6.3. Pengujian Rotor Tertahan (*Blocked Rotor Test*)

Tujuan pengujian rotor tertahan adalah untuk menentukan resistansi rotor pada motor induksi. Pada saat pengujian ini perputaran rotor motor induksi dikunci / diblok sehingga slip(s) sama dengan satu. Suplai tegangan tiga fasa motor induksi adalah tegangan yang nilainya di bawah tegangan nominalnya, yakni tegangan yang dapat menghasilkan arus nominalnya. Sebagai pendekatan, diasumsikan bahwa arus pemagnetan (I_m) cukup kecil akibat penurunan suplai

tegangan serta motor dalam keadaan tidak berputar ($s=1$) sehingga rugi-rugi inti dapat diabaikan.



Gambar 2-11
Diagram Pengujian Rotor Tertahan

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

$$P_{3-\phi} = W_a + W_b \quad \text{watt} \dots \dots \dots (2.34)$$

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

I_n , arus fasa stator :

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

Resistansi rotor tertahan adalah :

$$R_{rt} = \frac{P_n}{3 \cdot (I_n)^2} \quad \Omega \dots \dots \dots (2.36)$$

Impedansi rotor tertahan adalah :

$$Z_{rt} = \frac{V_n}{\sqrt{3} \cdot I_n} \quad \Omega \dots \dots \dots (2.37)$$

Reaktansi rotor tertahan adalah :

$$X_{rt} = \sqrt{Z_{r'}^2 - R_{r'}^2} \Omega \dots\dots\dots (2.38)$$

$$X_{ck} = X_1 + X'_2 \dots\dots\dots (2.39)$$

Dimana:

I_{rt} = arus pada keadaan rotor tertahan

P_{rt} = masukan daya ke stator pada keadaan rotor tertahan

V_{rt} = tegangan terminal stator pada keadaan rotor tertahan

Motor induksi yang dipakai adalah motor induksi dengan rotor sangkar tunggal.

Kelas A maka secara umum :

$$\frac{x_1}{x_1 + x_2} = 0.5 \dots\dots\dots (2.40)$$

Besarnya reaktansi yang diukur pada terminal stator pada keadaan tanpa beban

(X_{th}) mendekati sama dengan $X_s + X_m$ yang merupakan reaktansi diri stator,

sehingga :

$$X_{sp} = X_{th} = X_s + X_m \dots\dots\dots (2.41)$$

Resistansi stator dapat dipandang sebagai harga Dcnya. Maka resistansi rotor

dapat ditentukan sebagai berikut :

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

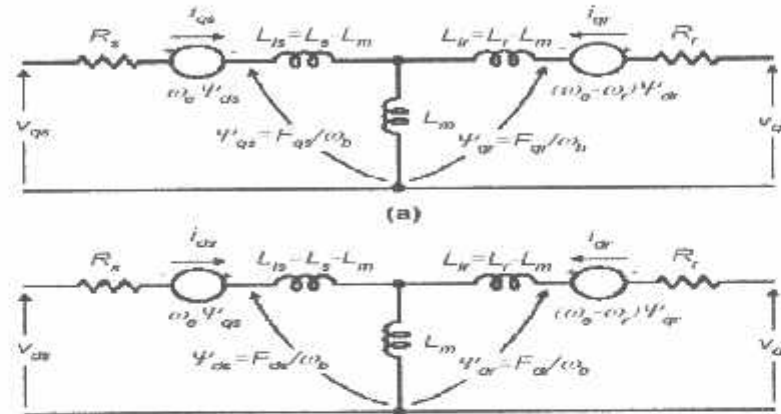
Dengan $X_{rr} = X_r + X_m$ merupakan reaktansi diri rotor maka :

$$X_{rr} = X_r + X_m \dots\dots\dots (2.42)$$

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

2.7 Model Rangkaian DQ

Untuk dapat melakukan menganalisis respons transient pada motor induksi dengan perubahan torsi mekanik yang bervariasi maka rangkaian ekuivalen harus dirubah dalam bentuk rangkaian DQ



Gambar 2-12
Rangkaian Ekuivalen DQ Motor Induksi ^[6]

$$\frac{dF_{qs}}{dt} = \omega_b \left[v_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b} \cdot F_{ds} + \frac{R_s}{x_{ls}} (F_{mq} + F_{qs}) \right] \dots \dots \dots (2.44)$$

$$\frac{dF_{ds}}{dt} = \omega_b \left[v_{ds} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \cdot F_{qs} + \frac{R_s}{x_{ls}} (F_{md} + F_{ds}) \right] \dots \dots \dots (2.45)$$

$$\frac{dF_{qr}}{dt} = \omega_b \left[v_{qr} - \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} \cdot F_{dr} + \frac{R_r}{x_{lr}} (F_{mq} - F_{qr}) \right] \dots \dots \dots (2.46)$$

$$\frac{dF_{dr}}{dt} = \omega_b \left[v_{dr} + \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} \cdot F_{qr} + \frac{R_r}{x_{lr}} (F_{mq} - F_{dr}) \right] \dots \dots \dots (2.47)$$

$$F_{mq} = X_{ml} \left[\frac{F_{qs}}{X_{ls}} + \frac{F_{qr}}{X_{lr}} \right] \dots \dots \dots (2.48)$$

$$F_{md} = X_{ml} \cdot \left[\frac{F_{ds}}{X_{ls}} + \frac{F_{dr}}{X_{lr}} \right] \dots \dots \dots (2.49)$$

$$X_{ml} = \frac{1}{\left(\frac{1}{X_m} + \frac{1}{X_{ls}} + \frac{1}{X_{lr}}\right)} \dots\dots\dots(2.50)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{x_{ij}} \cdot (F_{qs} - F_{mq}) \dots\dots\dots(2.51)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{X_{ls}} \cdot (F_{ds} - F_{md}) \dots\dots\dots(2.52)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{X_{lr}} \cdot (F_{qr} - F_{mq}) \dots\dots\dots(2.53)$$

$$i_{dr} = \frac{1}{X_{lr}} \cdot (F_{dr} - F_{md}) \dots\dots\dots(2.54)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{p}{2}\right) \frac{1}{\omega_b} (F_{ds} \cdot I_{dr} - F_{qr} \cdot I_{ds}) \dots\dots\dots(2.55)$$

$$T_e - T_L = J \cdot \left(\frac{2}{p}\right) \frac{d\omega_r}{dt} \dots\dots\dots(2.56)$$

Dimana

- d : sumbu *direct*
- q : sumbu *quadrature*
- r : rotor variabel
- F_{ij} : fluks
- V_{qs}, V_{ds} : Tegangan stator sumbu q dan d
- F_{mq}, F_{md} : Fluks Magnetic sumbu q dan d
- R_r : Rotor Resistance
- R_s : Stator Resistance
- X_{ls} : Reaktansi Stator
- X_{lr} : Reaktansi Rotor
- I_{qs}, I_{ds} : Arus stator sumbu q dan d
- I_{qr}, I_{dr} : Arus Rotor sumbu q dan d

- P : Jumlah dari Kutub
 T_e : Torsi Output Elektrik
 T_L : Torsi Beban
 J : Moment Inertia
 ω_e : Frekuensi elektrik sudut stator
 ω_s : Frekuensi dasar elektrik sudut motor

Pada umumnya pada sebuah motor induksi telah terdapat informasi pada name plate dimana data informasi itu merupakan dasar dalam pengopersian motor tersebut. Data tersebut berupa:

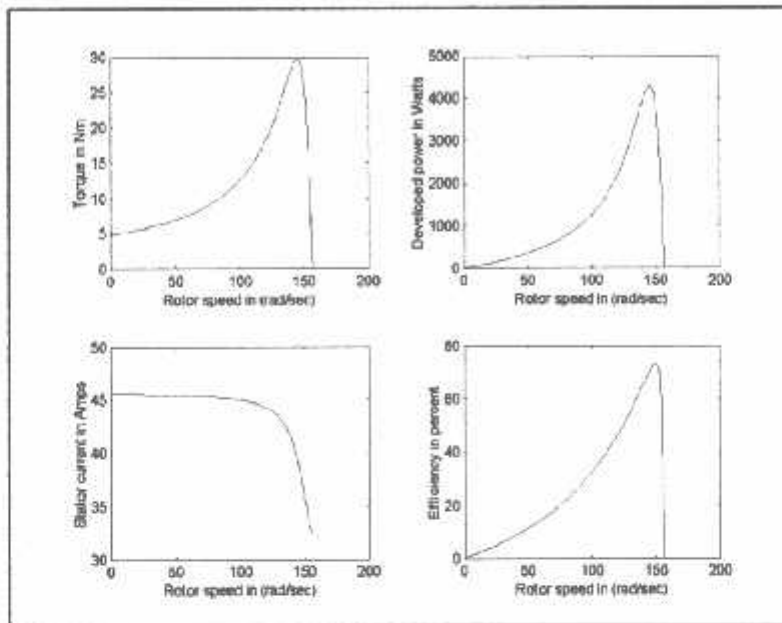
- Daya Output (Hp/KW)
- Tegangan Nominal V_{L-L} (Volt)
- Arus Nominal (Amp)
- Power Faktor
- Kecepatan (rpm) dan Jumlah Kutub

2.8 Operasional Motor Induksi

Menjalankan motor induksi 3 fasa akan mengalami dua keadaan atau kondisi yaitu keadaan yaitu keadaan *transient* (peralihan) dan keadaan *steady state* (mantap).

2.8.1 Performa *Steady State*

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

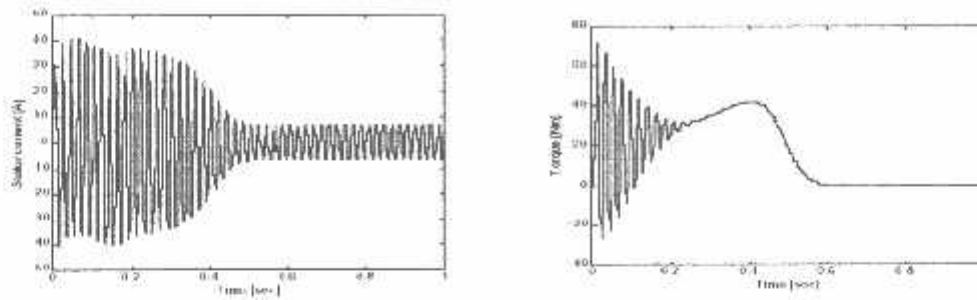


Gambar 2-13
Keadaan Steady State Motor Induksi ^[6]

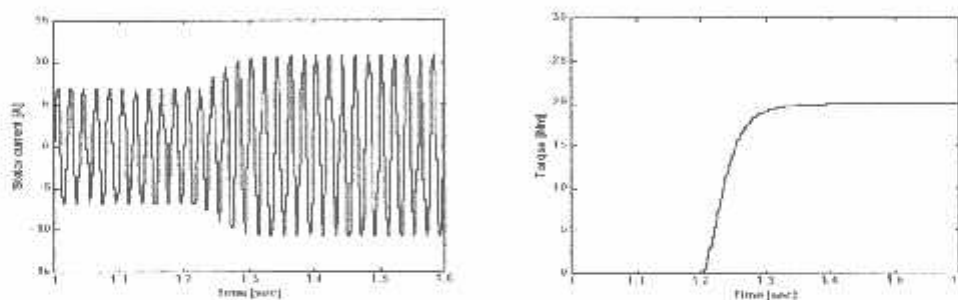
2.8.2. Performa Transient

Keadaan transient atau peralihan merupakan kondisi motor sesaat dimana keadaan berubah-ubah dan dapat menentukan beberapa faktor penting dalam pengendalian motor, sedangkan keadaan *steady state* adalah kondisi dimana motor dalam keadaan mantap.

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



Grafik 2-14
Transient Respons Pada Starting Motor Induksi 3Phasa^[6]



Grafik 2-15
Karakteristik Torsi Motor Pada Beban Berubah^[6]

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

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

Perubahan arus torsi dan tegangan yang terjadi misalnya pada keadaan penambahan torsi beban yang berubah-ubah merupakan informasi yang diperlukan oleh teknisi di bidang kontrol sehingga dapat menentukan jenis

pengaman yang akan digunakan dan peralatan kontrol yang mana akan digunakan. Keadaan *transient* berlangsung dalam waktu yang cukup singkat tetapi jika diperhatikan secara baik akan menyebabkan bahaya pada motor tersebut. Jadi adanya *transient* respons ini sangat berhubungan dengan waktu..

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

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

2.9. Teori Dasar Vektor Kontrol

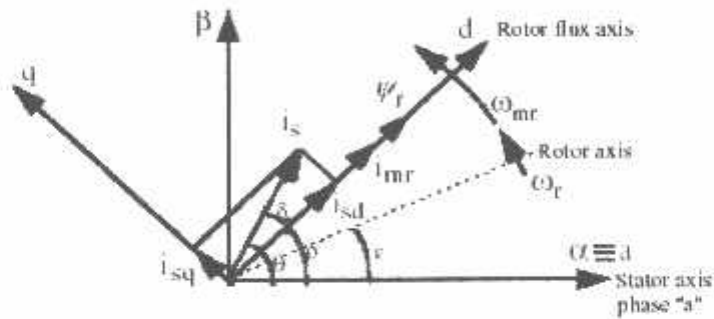
Pengendalian motor vektor kontrol adalah induksi tiga fasa dengan suatu cara yang digunakan untuk memperbaiki unjuk kerja motor. Unjuk kerja yang buruk menyebabkan penggunaan motor menjadi terbatas. Seperti diketahui motor induksi relatif murah, kokoh dan mudah perawatannya namun mempunyai masalah dalam pengaturan kecepatannya.

Pengendalian motor induksi dengan vektor kontrol mulai diperkenalkan pada periode tahun 1960an hal ini merupakan suatu revolusi dalam pengendalian putaran motor induksi, sehingga menjadikannya suatu pilihan yang ekonomis dalam menggantikan penggunaan motor arus searah. Motor arus searah mempunyai karakteristik yang dapat didekati oleh motor induksi. Tanggapan transien yang serupa dengan motor arus searah, dapat diperoleh pada motor induksi dengan melakukan pemisahan komponen arus penghasil torsi dengan komponen arus penghasil fluks. Konsep pemisahan ini merupakan prinsip pengendalian dengan kontrol vektor.

Vektor kontrol dikenal sebagai kontrol berorientasi medan, yang diterapkan pada motor induksi sehingga menghasilkan unjuk kerja yang mendekati unjuk kerja motor arus searah. Pada motor arus searah pemisahan hubungan antara torsi dengan fluks dapat dilakukan dengan menyusun model rangkaian penguat motor, sedangkan pada motor induksi, torsi dan fluks hanya dapat dipisahkan dengan membuat rangkaian tambahan diluar sistem, yaitu melalui vektor kontrol.

2.9.1. Blok Kontrol Vektor

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



Gambar 2-16
Hubungan Sumbu 3 fasa, sumbu α - β dan d-q^[8]

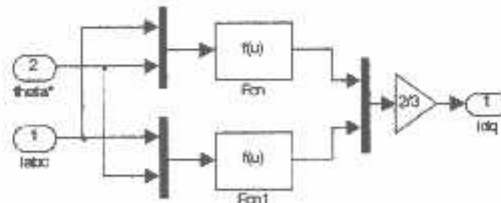
Torsi electric pada motor induksi terjadi karena adanya interaksi antara arus pada rotor dan flux pada stator

1. Abc to Dq Conversion blocks

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

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

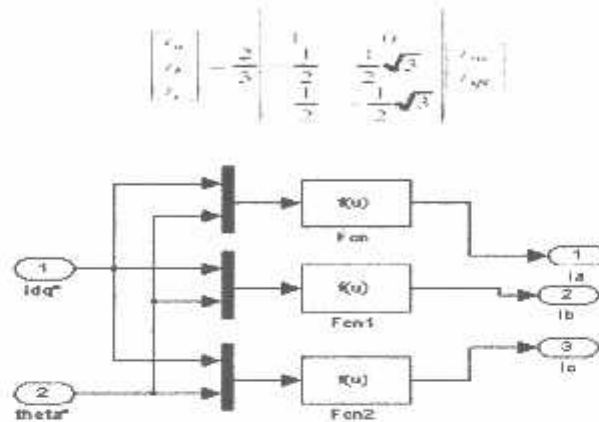
untuk blok simulinknya dibentuk



Gambar 2-17
Blok Simulink abc to DQ

2. DQ to Abc Conversion block

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



Gambar 2-18
Blok Simulink DQ to abc

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

Kerangka acuan untuk vektor kontrol motor induksi untuk mewakili hubungan total fluks rotor, termasuk fluks mutual dan arus I_m serta kebocoran fluks rotor X'_2 .

Arus rotor pada kerangka acuan stator pada persamaan

$$I_{r(z)} = \frac{I_{mr(z)} - I_{z(z)}}{1 + \sigma}$$

Persamaan torsi I_{mr} dapat digantikan dengan hubungan fluks dan arus dengan persamaan yang telah diberikan, tetapi pada kordinat stator:

$$T = KMI_{mr(s)} \times \frac{I_{mr(z)} - I_{z(z)}}{1 + \sigma}$$

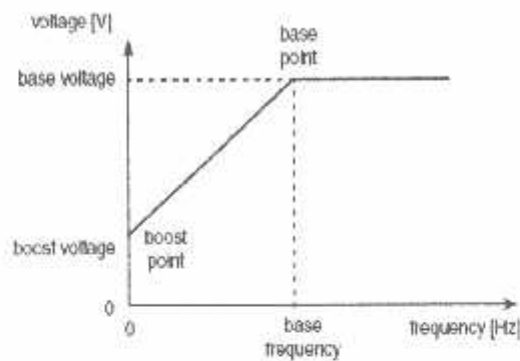
Karena arah vector fluks bersama dan arus sama maka hasil Cross product $I_{mr(s)}$ sama dengan nol, maka persamaan untuk torsi dituliskan sebagai persamaan

$$T = KMI_{mr(s)} \times \frac{-I_{z(z)}}{1 + \sigma}$$

2.10 Teori Dasar Metode Volt/Hz

Volt Per Hertz (V/f) adalah metode pengendalian yang dapat mengontrol variabel besaran dari frekuensi, arus, dan tegangan. Metode *volt per hertz* mempunyai variabel perintah dan sinyal umpan balik yang sama dengan motor DC^[1].

Disebut dengan metode *volt per hertz* karena tegangan yang diaplikasikan secara langsung dapat dihitung dengan frekuensi yang diaplikasikan pada motor untuk menjaga agar *flux air-gap* (celah udara antara stator dan rotor) tetap konstan. Pada saat keadaan mantap, celah udara motor diasumsikan sama dengan perbandingan V_s/f_s , dimana V_s adalah amplitude tegangan fasa motor dan f_s adalah Frekuensi yang diaplikasikan pada motor. Karakteristik pengontrolan digambarkan pada titik *Base Point* pada motor seperti gambar dibawah ini



Gambar 2-22
Metode *control Volt per Hertz*^[5]

2.10.1 Prinsip Kerja Metode *Volt Per Hertz* (V/f)

Tegangan yang diaplikasikan pada motor induksi tiga fasa adalah gelombang *sinusoidal*, dengan mengabaikan jatuh tegangan terhadap resistansi stator. Kemudian kita dapatkan, pada saat kondisi mantap^[2]:

$$\hat{V} \approx j\omega\hat{\phi} \dots\dots\dots(2.57)$$

$$V \approx \omega\phi \dots\dots\dots(2.58)$$

Dimana \hat{V} dan $\hat{\phi}$ adalah fasor dari tegangan stator dan flux stator, sedangkan V dan ϕ adalah besaran. Oleh karena itu, maka kita dapatkan :

$$\phi \approx \frac{V}{\omega} = \frac{1}{2\pi} \frac{V}{f} \dots\dots\dots(2.59)$$

Dari rumus diatas jika V/f tetap konstan walaupun dengan perubahan f, maka $\hat{\phi}$ akan konstan juga dan torsi akan berdiri sendiri tanpa suplai dari frekuensi f. Pada implementasi pada aplikasi yang nyata, perbandingan antara besaran dan frekuensi dari tegangan stator selalu didasarkan pada variabel tersebut

$$V_S = \frac{\sqrt{2}}{3} I_{s(R_e)} \tau_s + \sqrt{\left(\frac{V_{s0} f_c^*}{f_R} \right)^2 + \frac{2}{9} (I_s (R_e) \tau_s)^2 - (I_s \tau_s)^2} \dots \dots \dots (2.60)$$

V_{s0} : Tegangan fasa stator pada frekuensi dasar.

f_R : Frekwensi yang dinilai

\hat{R}_e : Tahanan yang diinginkan.

I_s adalah Arus Rms yang didapatkan dari

$$I_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{ia(ia + ic) + i^2 c} \dots \dots \dots (2.61)$$

2.10.3 Kompensasi Slip

Pada dasarnya, motor induksi terjadi karena kecepatan rotor lebih rendah dari kecepatan sinkron. Untuk mendapatkan kecepatan yang diinginkan, frekuensi yang diaplikasikan haruslah ditingkatkan sesuai dengan frekuensi *slip*. Metode koreksi inilah yang umum digunakan untuk mengasumsikan hubungan linear yang ada antara torsi dan kecepatan dalam cakupan yang diinginkan, karenanya slip dapat dikompensasikan dengan mengetahui hubungan ini. Pendekatan ini dapat memberikan hasil yang baik apabila gangguan pada torsi tidak didapatkan. Bagaimanapun, untuk beban yang lebih tinggi persamaannya akan menjadi non-linear.

$$f_{slip} = \frac{1}{2 - AP_{gap}} \cdot \left(\sqrt{(f_m^*)^2 + \frac{K \cdot S_{lin}}{2K_0} P_{gap} - B P_{gap}^2} - f_m^* \right) \dots \dots \dots (2.62)$$

dimana f_c^* adalah frekuensi referensi

$$A = \left(\frac{p}{4\pi K K_0 T_R S_R f_R} \right) \dots \dots \dots (2.63)$$

dan

$$B = \left(\frac{P}{4\pi K_o T_R} \right)^2 \dots\dots\dots(2.64)$$

dan P adalah banyaknya kutub motor. Bagian linear dari kurva torsi-kecepatan adalah

$$s_{lin} = \left(\frac{P}{\pi} \right) \frac{s_R f_R}{T_R} \dots\dots\dots(2.65)$$

dan terakhir Pgap adalah

$$P_{gap} = 3V_s I_s PF - 3I_s^2 \tau_s - P_{core} \dots\dots\dots(2.66)$$

dimana P core pada frekuensi yang dinilai didapatkan dari

$$P_{core} = P_{inR} \left(1 - \frac{\eta_R}{1 - s_R} \right) - 3I_{sR}^2 \tau_s \dots\dots\dots(2.67)$$

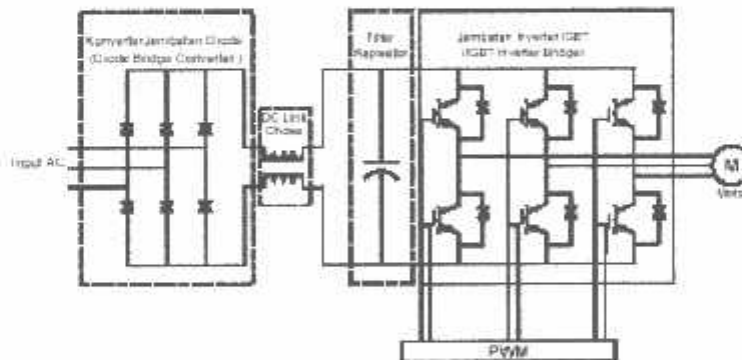
dimana simbol “^” adalah menunjukkan bahwa nilai tersebut adalah yang diinginkan. parameter s_R , f_R , η_R , I_{sR} , P_{inR} dan T_R berturut – turut adalah nilai dari frekuensi slip, frekwensi , efisiensi, Arus stator, Daya masuk, dan Torsi. Semua nilai – nilai tersebut dapat diperoleh dari nameplate motor.

2.10.4 PWM Inverter

Untuk membalik arus searah ke arus bolak-balik dikenal sebagai inverters. Fungsi dari suatu inverter adalah untuk mengubah suatu masukan tegangan Dc ke suatu tegangan keluaran arus bolak-balik simetris dari amplitud dan frequency yang diinginkan. Tegangan keluaran bisa ditetapkan atau pada suatu variabel diperbaiki atau frekwensi variabel. Suatu tegangan keluaran variabel dapat diperoleh dengan bermacam-macam masukan tegangan dc dan memelihara

penguatan inverter tetap. Pada sisi lain, jika masukan tegangan DC ditetapkan dan tidak dapat diawasi, suatu tegangan keluaran variabel dapat diperoleh dengan bermacam-macam penguatan dari inverter, yang mana adalah secara normal terpenuhi oleh berdenyut modulasi lebar (PWM) kendali di dalam inverter itu. Penguatan inverter digambarkan sebagai perbandingan tegangan keluaran arus bolak-balik ke tegangan masukan DC.

Gambar dibawah menggambarkan skema dari struktur sistem AC drive PWM modern yang terdiri dari tiga bagian atau tingkat. Bagian pertama berfungsi untuk mengkonversi sumber tiga fasa AC ke DC. Bagian pertama ini disebut *converter*.



Gambar 2-24
Struktur dari PWM AC drive^[7]

Jika bagian ini dipisah dari struktur yang lain, didapatkan tegangan DC dengan *ripple* tertentu, dikenal dengan istilah DC link.

Filter diperlukan untuk meratakan *ripple* pada DC link. Umumnya merupakan *capacitor bank* yang kadang ditambahkan induktor atau *Link Choke*.

2.11 Teori Dasar Direct Torque Controller (DTC)

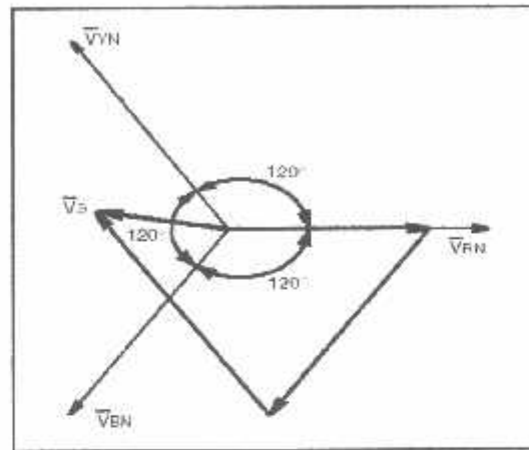
Torsi motor secara sederhana dapat dikontrol dengan menggunakan Field Orient Control (FOC). Ini meliputi transformasi arus stator ke sebuah bentuk synchronous referensi DQ yang merupakan tipe untuk mengontrol fluksi rotor. Pada metode ini torsi dan fluksi menghasilkan komponen arus stator .Dengan menggunakan PI controller yang berfungsi untuk mengatur output tegangan yang dipakai arus stator kemudian menghasilkan torsi.

Direct Torque Controller pada motor induksi dipergunakan untuk memprediksi tegangan untuk menyuplai torsi ouput. Jadi untuk pengontrolan dengan metode Direct Torque Controller merupakan pengendalian torsi motor dengan inputan torsi yang menjadi referensi dan fluks yang menjadi referensi.. Dengan sebuah rangkaian closed loop maka dapat dibandingkan nilai torsi elektrik yang menjadi refrensi dan nilai torsi elektrik ketika motor diberi beban luar, adanya torsi error kemudian dengan menggunakan metode DTC maka akan mengatur tegangan dan masuk ke dalam motor Induksi sehingga dapat mengikuti torsi beban. Direct torque Controler merupakan suatu metode pengontrol torsi motor induksi yang menghasilkan respons yang cepat dan jelas.

Pada prinsipnya DTC suatu metode dengan memilih satu dari inverter 6 vektor control dan dua vektor nol untuk tetap menjaga torsi tetap sesuai dengan referensi.. Torsi pada motor induksi dapat ditulis dengan persamaan dibawah ini:

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{L_s} \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot |\lambda_r| \cdot |\lambda_s| \cdot \sin \alpha \dots\dots\dots (2.68)$$

Dari persamaan diata torsi yang dihasilakn bergantung pada stator fluksi, magnitude dan sudut antara stator dan rotor fluks vectors.



Dari gambar diatas maka jumlah ketiga vector tersebut adalah nol, sehingga dapat dekspresikan sebagai satu vector referensi.(V_s), dengan demikian dapat mengontrol tegangan atau frekuensi, cara ini dikenal dengan nama Space Vector Modulation. Untuk hubungan antara torsi dan arus dapat dilihat pada persamaan

$$\Delta T_{em} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} (\lambda_s \Delta I_s) \dots \dots \dots (2.69)$$

Dari persamaan diatas dapat terlihat perubahan torsi dipengaruhi oleh Fluks Stator (λ_s) dan arus stator (I_s). Untuk merubah fluks hanya bergantung dari V berdasarkan persamaan

$$\lambda_s = V_s \cdot \Delta t \dots \dots \dots (2.70)$$

Maka untuk menyelesaikan ini maka diperlukan dua persamaan lagi yaitu

$$\Delta T_{em} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \frac{\Delta t}{L_s} (\lambda_s \times (V - E)) \dots \dots \dots (2.71)$$

$$\Delta \lambda_s = V \cdot \Delta t \dots \dots \dots (2.72)$$

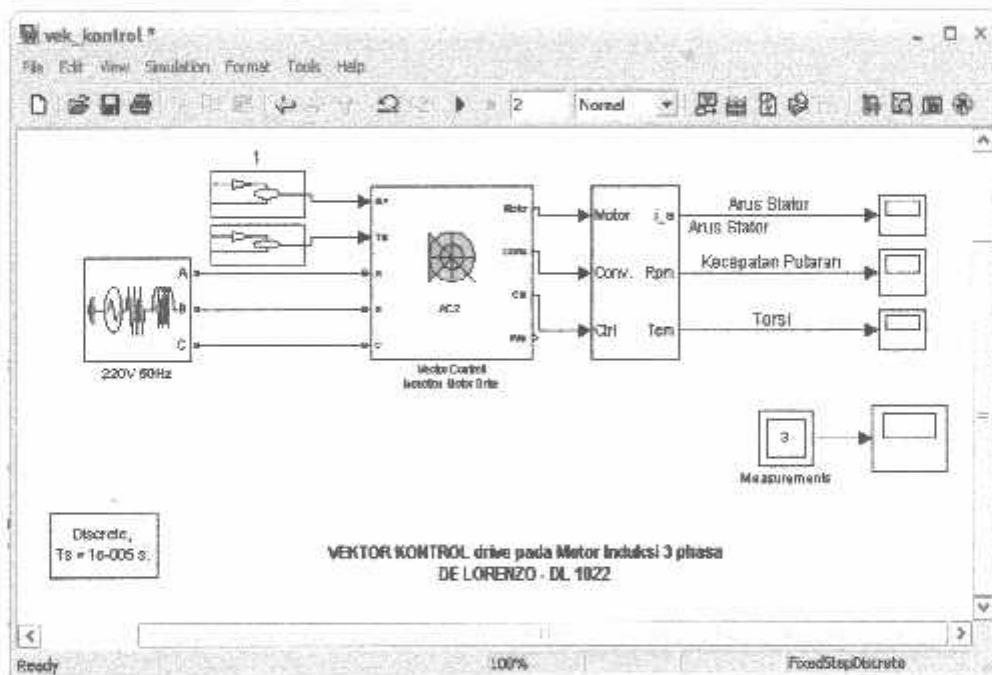
BAB III

METODE VEKTOR KONTROL, METODE VOLT/Hz DTC SVM, dan PARAMETER MOTOR INDUKSI

3.1. Metode Vektor Kontrol

3.1.1. Blok Skema Kontrol Vektor

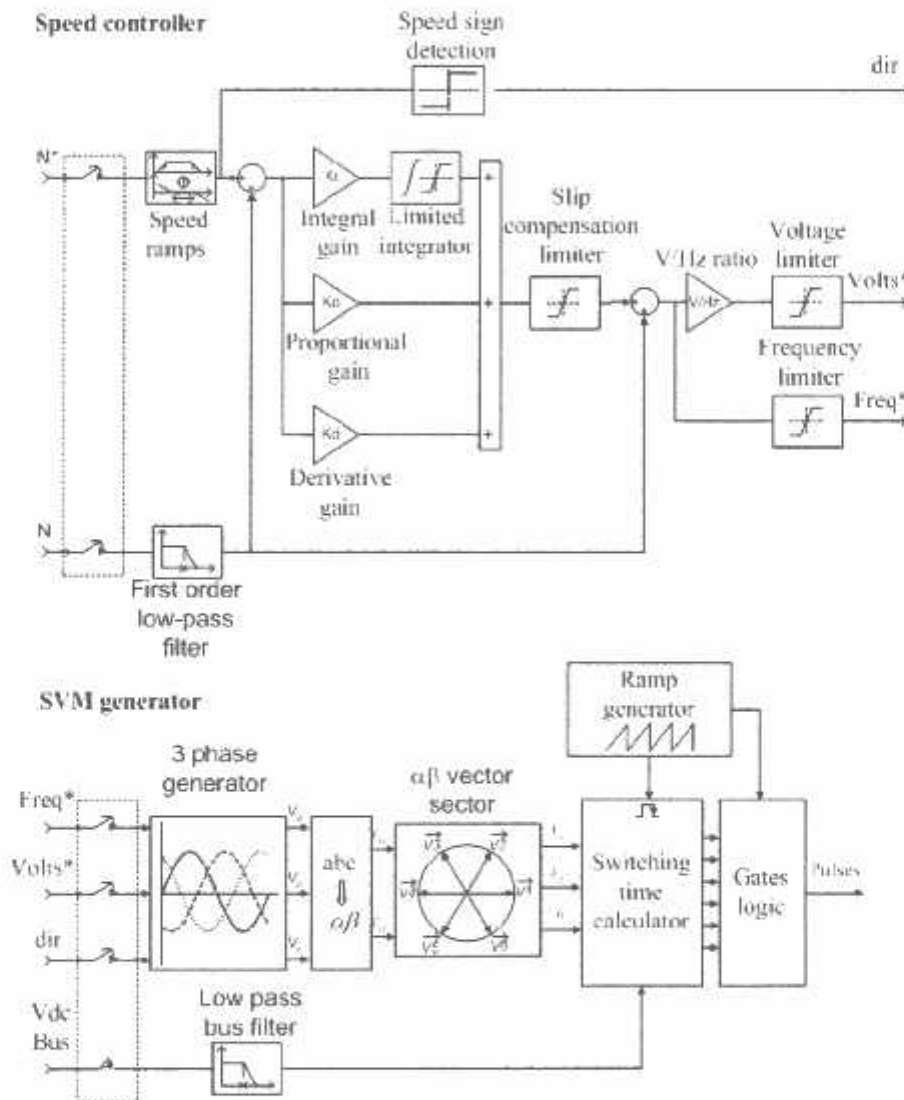
Secara umum pengontrol kecepatan motor induksi tiga fasa dengan Vektor Kontrol dapat dilihat pada gambar.



Gambar 3-1
Blok Simulink dari Metode Vektor Kontrol

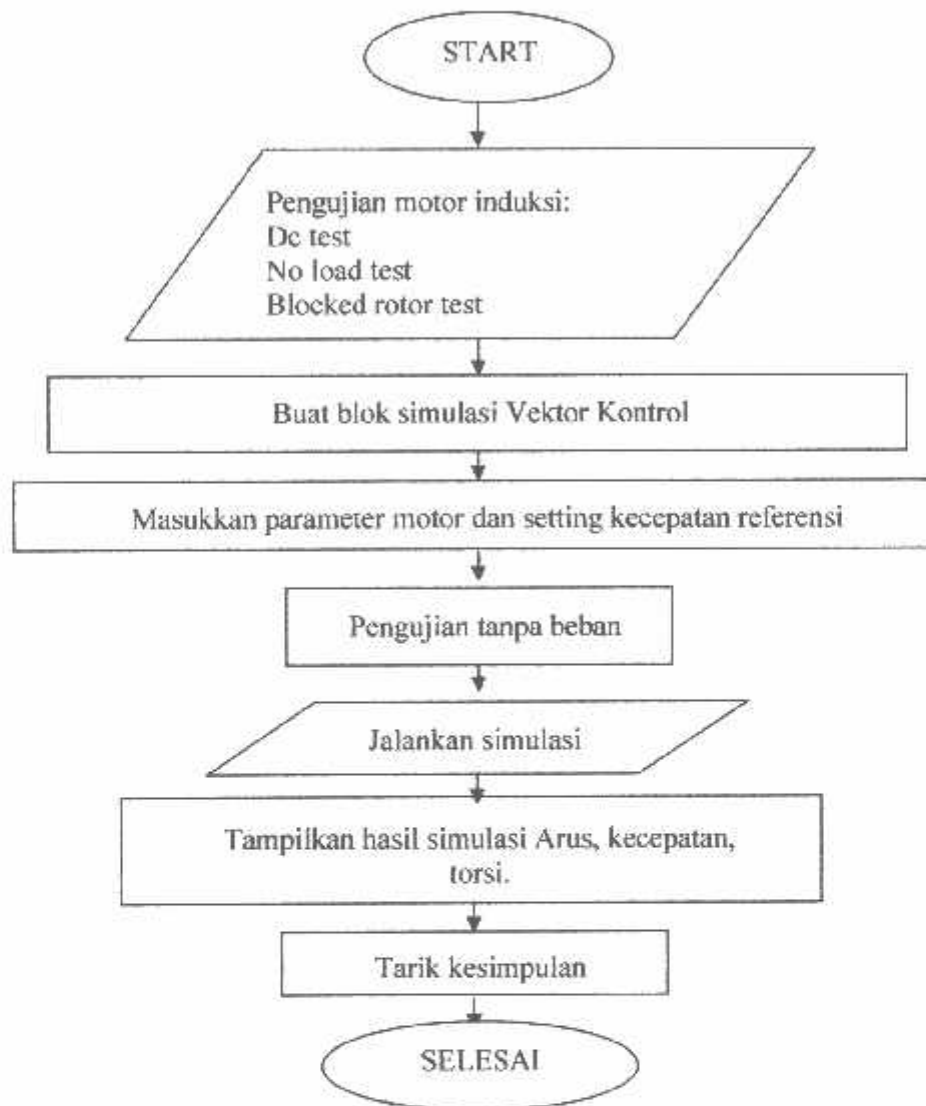
Pengendalian secara vektor menghasilkan keluaran *torsi elektromagnetik*, arus, tegangan dan kecepatan, hasil yang diperoleh dapat mencapai nilai referensi sistem pengendalian motor induksi tiga fasa. Pengendalian kecepatan dilakukan

dengan mengendalikan *fluksi* melalui arus stator, *amplitude* dan *fasa* dari arus stator.



Gambar 3-2
Blok Skema Metode Vektor Kontrol pada Matlab 7.0.4

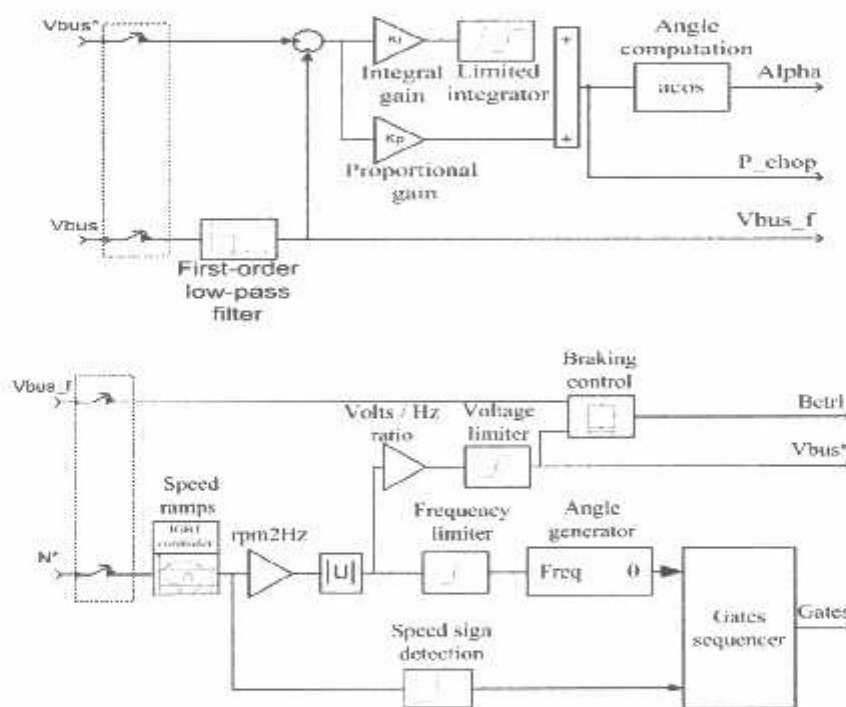
3.1.2 Flowchart Pemecahan Masalah



3.2. METODE *VOLT per Hz*

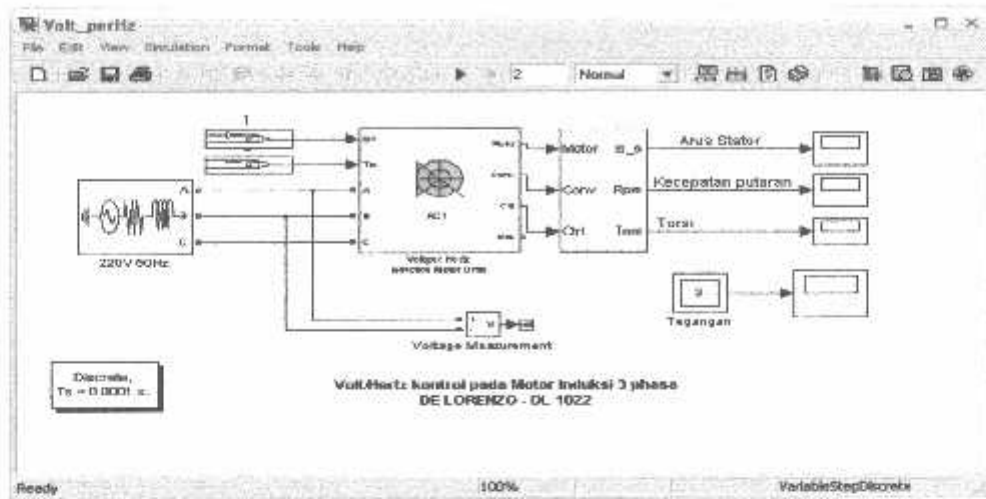
3.2.1 Blok Skema Metode *Volt per Hertz*.

Dengan menggunakan bantuan MATLAB 7.0.4 maka dapat dibentuk blok pengontrolan untuk mengatur kecepatan motor induksi tiga fasa dengan metode *Volt per Hertz*. Gambar dibawah ini menunjukkan skema kontrol dari metode Volt/Hz



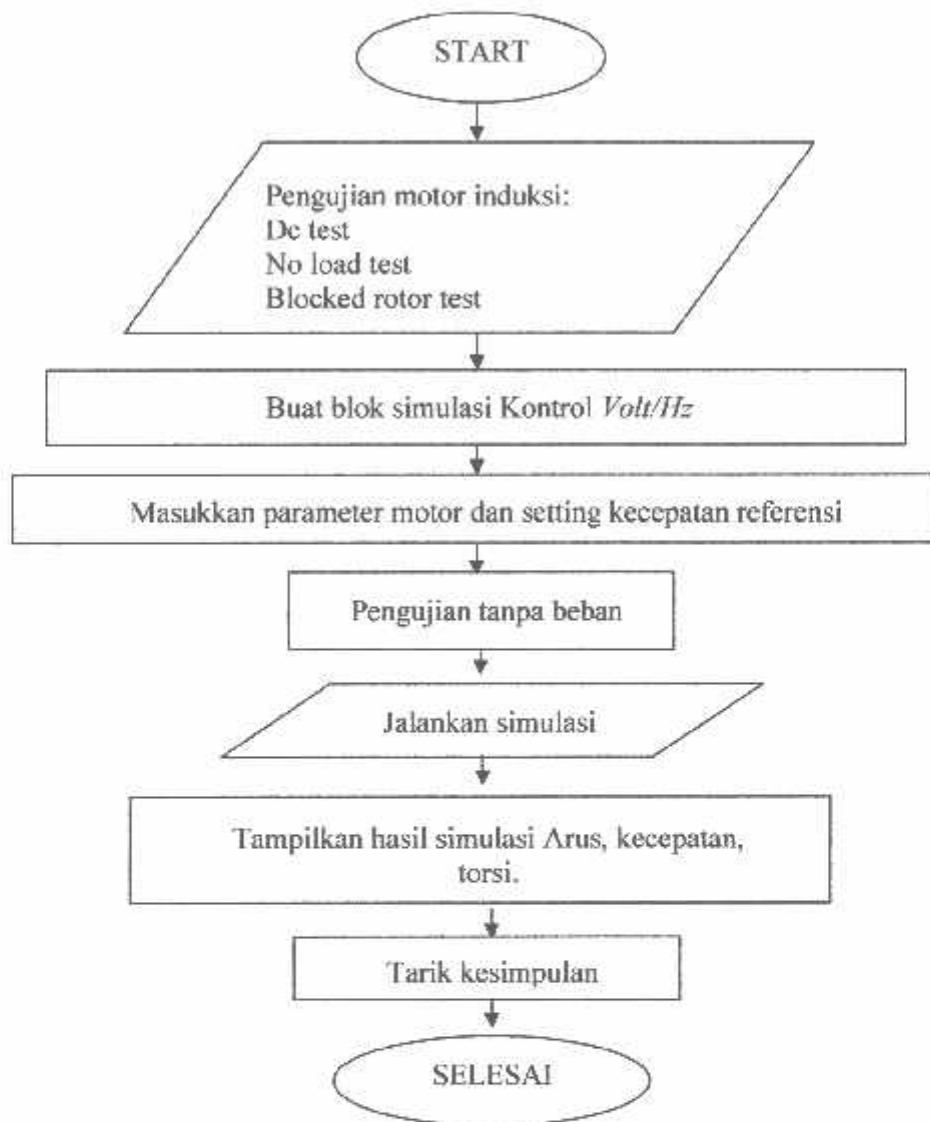
Gambar 3-3
Blok Skema Kontrol Metode Volt/Hz pada Matlab 7.0.4

Sehingga pemodelan blok secara keseluruhan dari metode Volt/Hz adalah seperti pada gambar dibawah ini



Gambar 3-4
Blok Simulink dari Metode *Volt per Hertz*

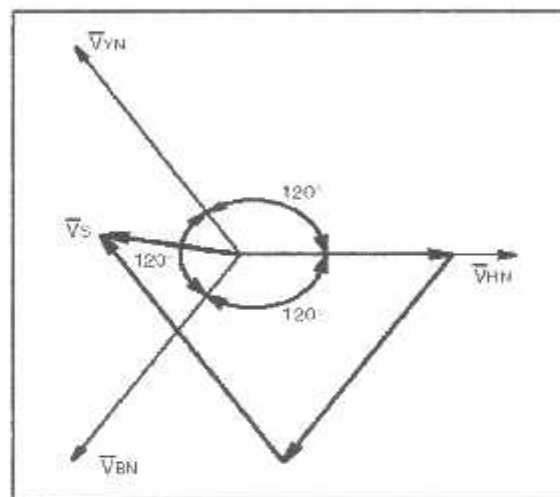
3.2.2 Flowchart Pemecahan Masalah



3.3. DIRECT TORQUE CONTROL (DTC)

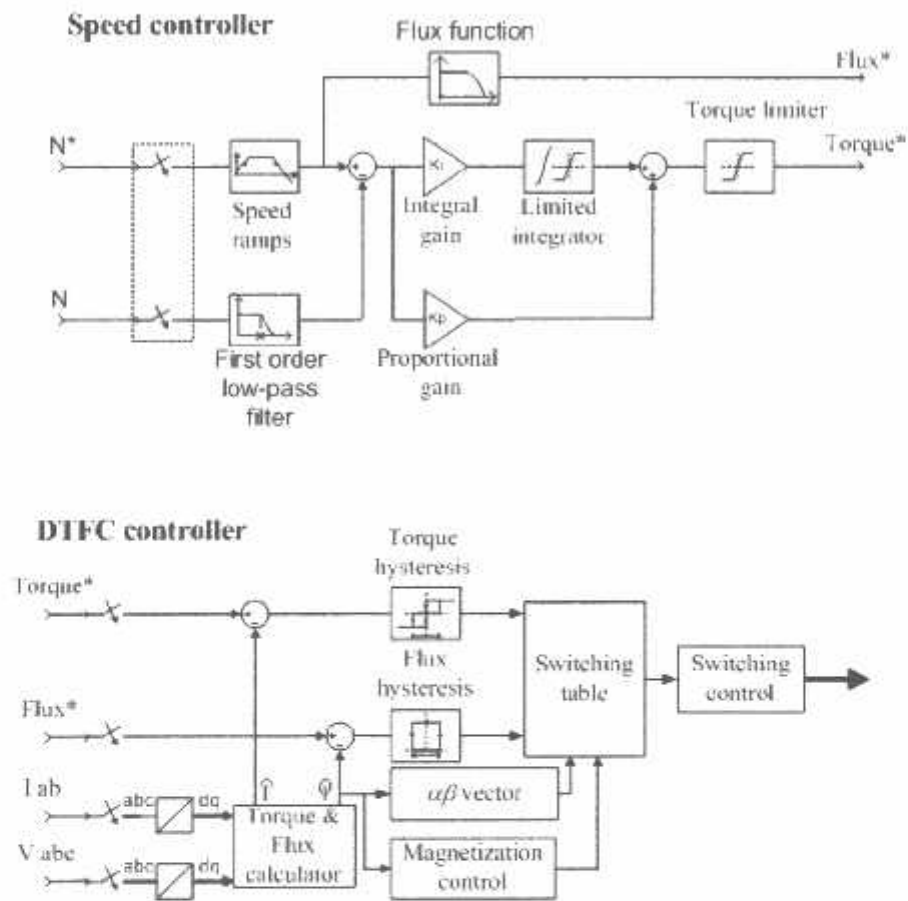
3.3.1. Permodelan Direct Torque Control (DTC)

Seperti pada tujuan DTC yaitu untuk mengatur tegangan input motor sehingga dapat mengontrol torsi. Setelah tegangan vector yang merupakan output dari DTC kemudian vector tegangan ini dihitung lagi menggunakan metode Space Vektor Modulation. Untuk tiga fasa simetris sudut antara fasa yang satu dengan yang lain adalah 120° (V_{rn} , V_{yn} , V_{bn}) seperti terlihat pada gambar dibawah ini.



Dari gambar diatas maka jumlah ketiga vector tersebut adalah nol, sehingga dapat dekspresikan sebagai satu vector referensi. (V_s), dengan demikian dapat mengontrol tegangan atau frekuensi, cara ini dikenal dengan nama Space Vector Modulation.

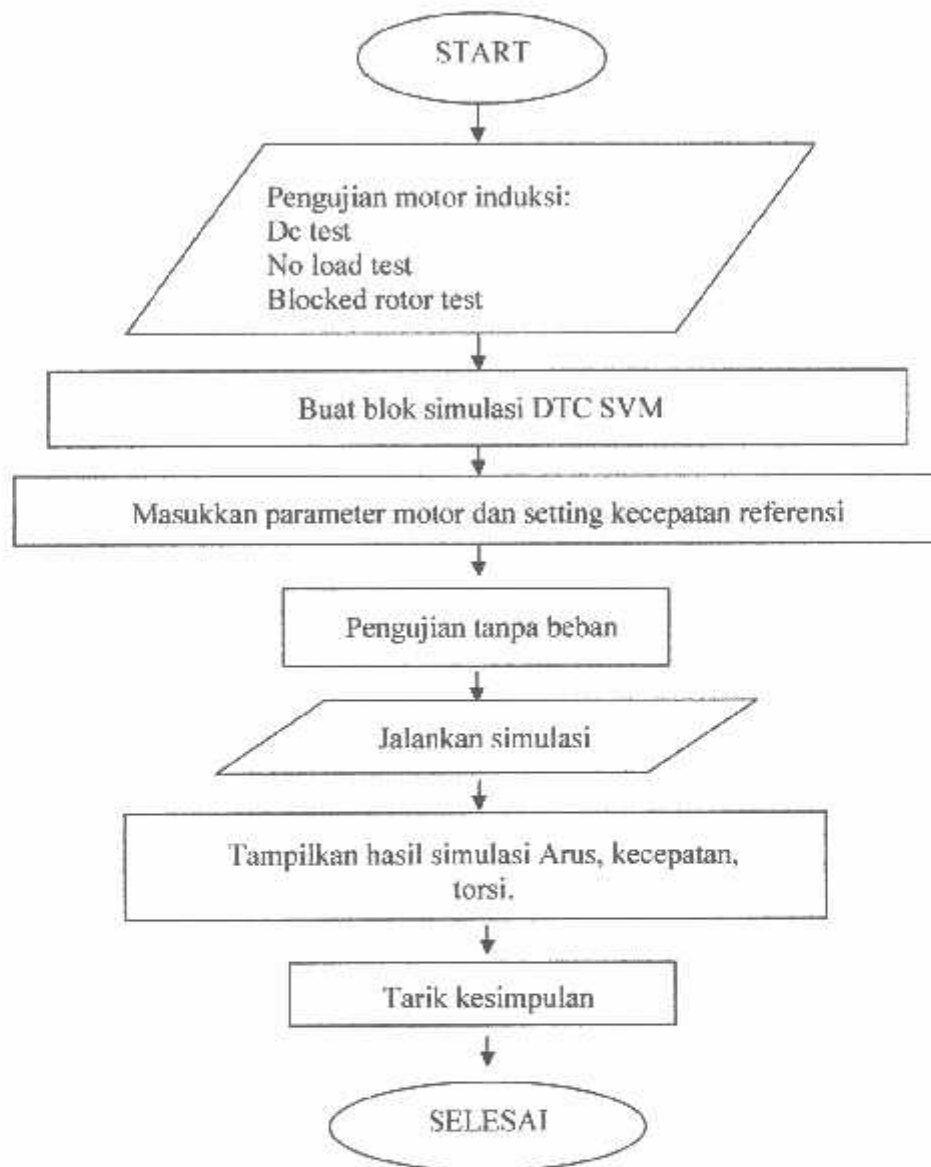
Untuk penggunaan DTC-SVM maka setelah vector tegangan yang merupakan keluaran dari DTC akan kembali dihitung dengan menggunakan Space Vector Modulation.



Gambar 3-5
Blok Skema Kontrol DTC SVM pada Matlab 7.0.4

Secara umum pengontrol kecepatan motor induksi tiga fasa dengan DTC SVM dapat dilihat pada gambar dibawah.

3.3.2 Flowchart Pemecahan Masalah



3.4 Pengujian Parameter Motor Induksi

3.4.1 Alat-alat yang digunakan

- a. Motor induksi Tiga Phasa DE LORENZO / DL 1022

Data papan (*Name-Plate*)

TEGANGAN	: 220/380 (Δ/Y) VOLT
ARUS	: 4.3/2.5 (Δ/Y) AMPERE
COS ϕ	: 0.83
FREKUENSI	: 50 HZ
DAYA	: 1.1 KW
PUTARAN	: 2820 RPM
KUTUP	: 2 KUTUP
KELAS ISOLASI	: F

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

3.4.2 Pengujian Arus Searah (*DC Test*)

Tabel 3-1
Data Hasil Pengujian Arus Searah

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

3.4.3 Pengujian Tanpa Beban (*No Load Test*)

Tabel 3-2
Data Hasil Pengujian Beban No

I_{motor} (Ampere)			$P_{3 \text{ Phase}}$	V_{L-L}	Frekuensi
a	b	c	(WATT)	(Volt)	(Hz)
0.59	0.68	0.59	90	220	50

3.4.4 Pengujian Rotor Tertahan (*Blocked Rotor Test*)

Tabel 3-3
Data Hasil Pengujian Motor Rotor Tertahan

I_{motor} (Ampere)			$P_{3\text{ Phasa}}$ (WATT)	V_{L-L} (Volt)
a	b	c		
2.5	2.5	2.5	230	78

BAB IV
ANALISA PARAMETER MOTOR
DAN HASIL SIMULASI

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

4.1 Pengujian Parameter Motor Induksi

4.1.1 Alat-alat yang digunakan

- a. Motor induksi Tiga Phasa DE LORENZO / DL 1022

Data papan (*Name-Plate*)

TEGANGAN	: 220/380 (Δ/Y) VOLT
ARUS	: 4.3/2.5 (Δ/Y) AMPERE
COS ϕ	: 0.83
FREKUENSI	: 50 HZ
DAYA	: 1.1 KW
PUTARAN	: 2820 RPM
KUTUP	: 2 KUTUP
KELAS ISOLASI	: F

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

4.1.2 Pengujian Arus Searah (*DC Test*)

Tabel 4-1
Data Hasil Pengujian Arus Searah

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

4.1.3 Pengujian Tanpa Beban (*No Load Test*)

Tabel 4-2
Data Hasil Pengujian Beban Nol

I_{motor} (Ampere)			$P_{3\text{ Phasa}}$ (WATT)	V_{L-L} (Volt)	Frekuensi (Hz)
a	b	c			
0.59	0.68	0.59	90	220	50

4.1.4 Pengujian Rotor Tertahan (*Blocked Rotor Test*)

Tabel 4-3
Data Hasil Pengujian Motor Rotor Tertahan

I_{motor} (Ampere)			$P_{3\text{ Phasa}}$ (WATT)	V_{L-L} (Volt)
a	b	c		
2.5	2.5	2.5	230	78

2.2 Analisa Parameter Motor Induksi

- Dari pengujian arus searah besarnya resistansi stator adalah:

Dengan menggunakan persamaan 2.52

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

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

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

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

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

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

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

B. Dari pengujian Tanpa Beban (No-load Test)

$$I_{th} = \frac{I_{ua} + I_{ub} + I_{uc}}{3}$$

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

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

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

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

$$= \sqrt{205^2 - 78^2} = 189.58\Omega$$

C. Dari Rotor tertahan (Blocked Rotor Test)

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

$$I_{br} = \frac{2.5 + 2.5 + 2.5}{3} = 2.5A$$

$$Z_{br} = \frac{V}{\sqrt{3}I_{br}} = \frac{78}{\sqrt{3} \times 2.5} = 18.01\Omega$$

$$R_{r'} = \frac{P_{(3\phi)}}{3I_{r'}^2} = \frac{230}{3 \cdot (2.5^2)} = 12.267\Omega$$

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

$$= \sqrt{18.01^2 - 12.267^2} = 13.08\Omega$$

$$X_{r'} = X_s + X_r'$$

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

$$X_s = X_r' = \frac{1}{2} X_{r'} = \frac{1}{2} \cdot 13.08 = 6.54\Omega$$

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

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

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

$$= 189.58 - 6.54$$

$$= 183.04 \Omega$$

4.3 Simulasi Motor Induksi

4.3.1 Tampilan Parameter

Dengan menggunakan parameter yang telah dihitung melalui pengujian dan *name plate* motor maka kita dapat melakukan analisa untuk mendapatkan beberapa data dari simulasi motor induksi. Matlab yang di gunakan pada skripsi ini adalah matlab fersi 7.0.4 Berikut adalah bentuk hasil tampilan parameter motor induksi 3 fasa.

Space Vector PWM VSI Induction Motor Drive

Space Vector PWM VSI Induction Motor Drive

The AC motor parameters are specified in the AC Machine tab. The braking chopper, the diode rectifier and the inverter switches parameters are specified in the Converter and DC bus tab. Speed regulator and drive limits are specified in the Controller Tab.

Asynchronous Machine Converters and DC bus Controller

Electrical parameters

Reference frame: Stationary

Nominal values

Power (VA):	Voltage (Vrms):	Frequency (Hz):
1100	220	50

Equivalent circuit values

	Resistance (ohm):	Leakage inductance (H):	Mutual inductance (H):
Stator:	5.49	0.0208	0.05823
Rotor:	7.02	0.0208	

Initial currents

	Phase A:	Phase B:	Phase C:
Magnitude (A):	0	0	0
Phase (deg):	0	120	240

Mechanical parameters

Rotor values

Inertia (kgm²): 0.089

Friction (N-m-s): 0.05

Pole pairs: 2

Initial values

Slip: 1

Angle (deg): 0

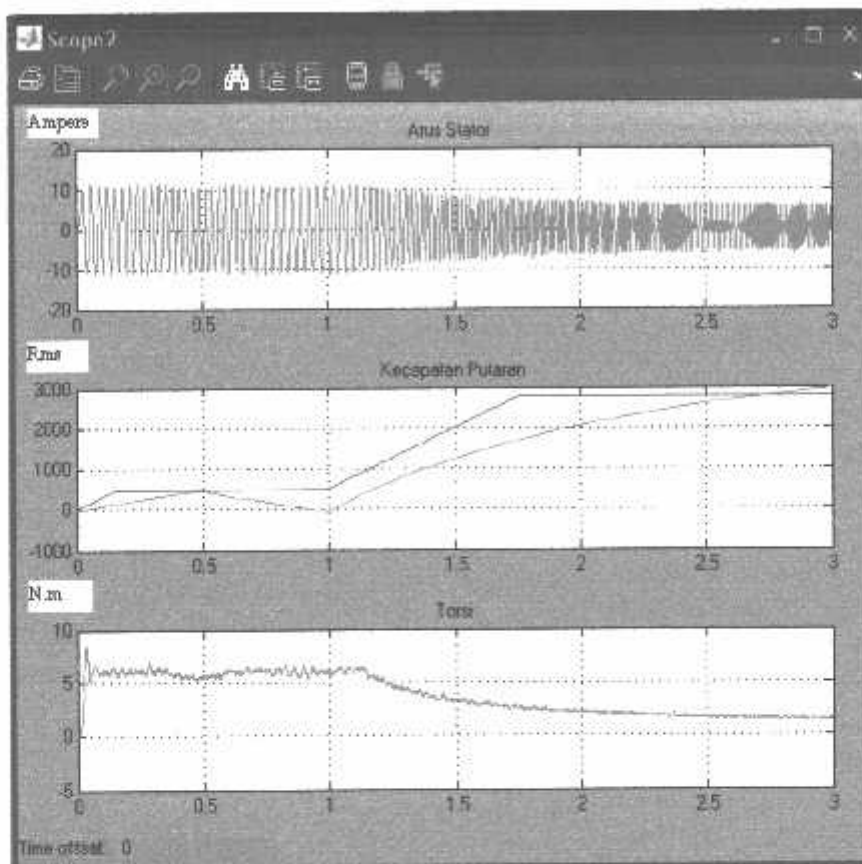
Parameters file options

Load Save

OK Cancel Help Apply

Gambar 4-1
Parameter Motor Induksi

4.3.2 Hasil Simulasi Menggunakan Metode Vektor Kontrol dengan kondisi Tanpa Beban TL = 0.



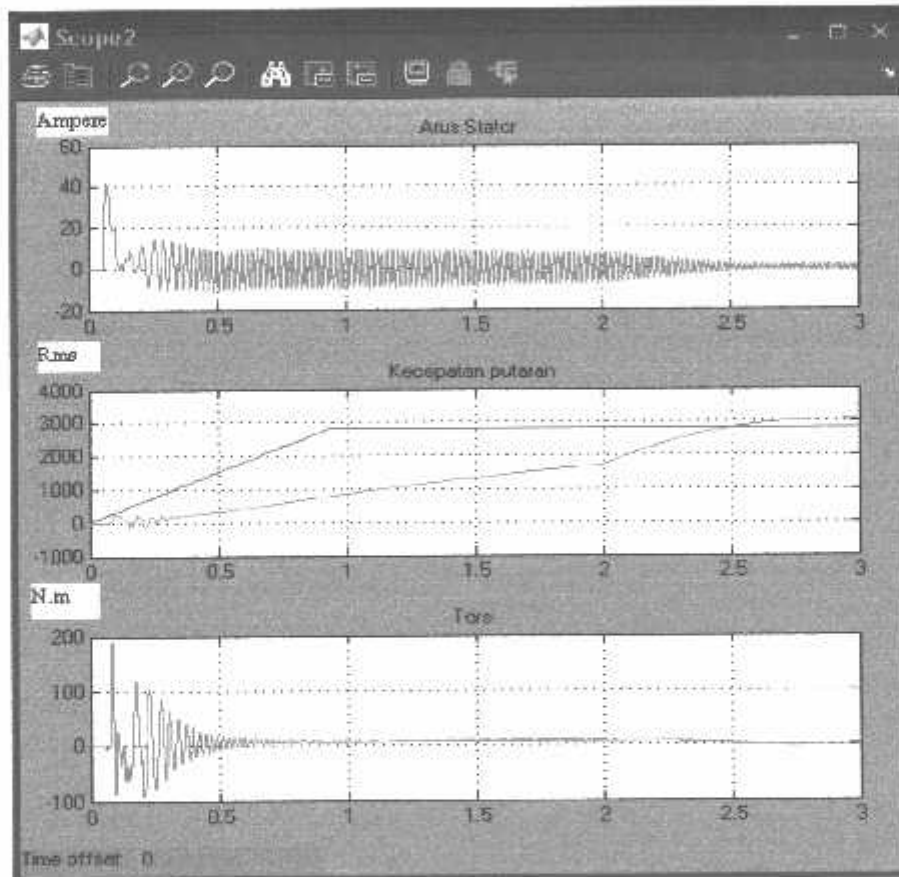
Gambar 4-2
Hasil Simulasi Arus,Kecepatan dan Torsi
Menggunakan Metode Vektor Kontrol

Pada gambar 4-2 menunjukkan arus starting pada waktu 0.03 detik sebesar 10 Ampere, dan pada waktu 2.5 detik arus menjadi stabil yaitu sebesar 0.14 Ampere. Setting Kecepatan putaran rotor saat starting mengalami dua tahapan yaitu pada waktu 0.16 detik sebesar 500 rpm sampai dengan waktu 1 detik dan pada waktu 1.7 detik kecepatan putar rotor dalam kondisi stabil sebesar 2800 rpm. Sedangkan untuk motor itu sendiri pada 0.5 detik kecepatan putar sebesar 500rpm kemudian turun pada waktu 1 detik dengan kecepatan 0 rpm kemudian mengalami keadaan stabil pada waktu 3 detik dengan

kecepatan sebesar 3000 rpm. Hal ini disebabkan adanya inputan arus dan Torsi yang besar pada saat starting. Torsi saat starting pada waktu 1.14 detik sebesar 8 N.m dan mengalami keadaan stabil pada waktu 3 detik sebesar 1.8 N.m

4.3.2 Hasil Simulasi Menggunakan metode Volt/Hz dengan kondisi Tanpa Beban

$TL = 0$.



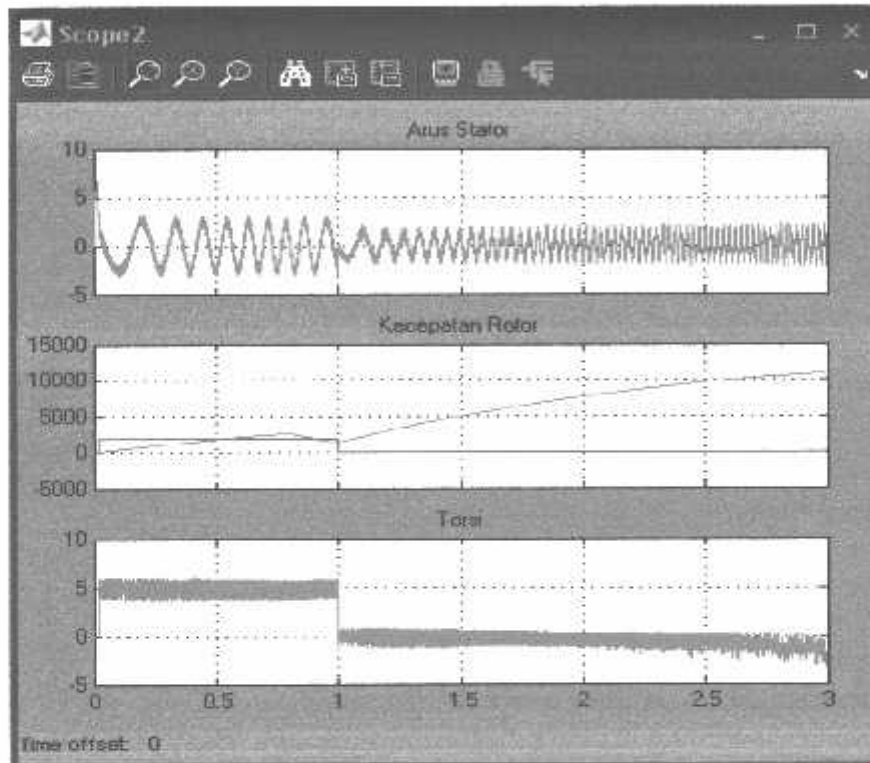
Gambar 4-3
Hasil Simulasi Arus, Kecepatan dan Torsi
Menggunakan Metode Volt/Hz

Pada gambar 4.2 menunjukkan arus starting pada waktu 0.07 detik sebesar 40 Ampere dan arus menjadi stabil pada waktu 2.5 detik yaitu sebesar 10 Ampere. Untuk kecepatan putar pada waktu starting mengalami peningkatan mencapai 3000 rpm dan

stabil pada waktu 3 detik. Torsi pada saat starting pada waktu 0.92 sebesar 190 N.m dan menjadi stabil pada waktu 0.85 sebesar 10 N.m.

4.3.3 Hasil Simulasi Menggunakan DTC SVM dengan kondisi Tanpa Beban

$TL = 0$.



Gambar 4-4
Hasi Simulasi Arus, Kecepatan dan Torsi Menggunakan DTC SVM

Pada gambar 4.3 menunjukkan arus starting pada waktu 0.02 detik sebesar 6.8 Ampere dan mengalami keadaan stabil pada waktu 0.2 detik sebesar 3 Ampere. Kecepatan pada saat starting pada waktu 0.8 sebesar 500 rpm dan mengalami penurunan pada waktu 1 detik sebesar 1320 rpm. Hal ini dikarenakan adanya penurunan arus pada detik ke 1 sebesar 3 ampere. Untuk Torsi pada saat starting pada waktu 1 detik sebesar 5 N.m dan mengalami keadaan stabil kemudian turun dan keadaan stabil sampai detik ke 3.

Tabel 4-5
Hasil Perbandingan Arus Menggunakan Metode Vektor Kontrol,
Metode Volt/Hz dan DTC SVM

Waktu	Arus (Ampere)		
	Vektor Kontrol	Volt/Hz	DTC SVM
0-0.5	10	40	6.8
0.5-1	10	15	6.8
1.5-2	8	15	4
2.5-3	0.14	10	4

Tabel 4-6
Hasil Perbandingan Kecepatan Menggunakan Metode Vektor Kontrol,
Metode Volt/Hz dan DTC SVM

Waktu	Kecepatan (Rpm)		
	Vektor Kontrol	Volt/Hz	DTC SVM
0-0.5	500	600	500
0.5-1	100	1000	2000
1.5-2	2800	2000	2500
2.5-3	2800	2800	2800

Tabel 4-6
Hasil Perbandingan Torsi Menggunakan Metode Vektor Kontrol,
Metode Volt/Hz dan DTC SVM

Waktu	Torsi (N.m)		
	Vektor Kontrol	Volt/Hz	DTC SVM
0-0.5	8	190	5
0.5-1	8	10	5
1.5-2	1.8	10	2
2.5-3	1.8	10	2

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Dari analisis pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan metode vektor kontrol, metode Volt/Hz dan DTC SVM dapat ditarik beberapa kesimpulan yaitu :

Pada saat kondisi tanpa beban:

1. Untuk Metode Vektor Kontrol arus yang dihasilkan pada saat starting sebesar 10 Ampere dan mempunyai respon waktu yang lebih cepat yaitu 0.03 detik dibandingkan dengan metode lainnya.
2. Untuk Metode Volt/Hz arus yang dihasilkan pada saat start besar dan mempunyai waktu yang lama yaitu sebesar 40 Ampere dalam waktu 0.07 detik. Kecepatan yang dihasilkan semakin cepat sehingga waktu steady state akan tercapai yaitu sebesar 2800 rpm pada waktu 2.5 detik.
3. Torsi yang dihasilkan oleh DTC SVM lebih bagus dari pada metode Volt/Hz dan Vektor Kontrol karena dengan kontrol DTC SVM torsi yang dihasilkan dapat disetting secara langsung yaitu sebesar 5 N.m pada waktu 1 detik.

5.2 Saran

Setelah melakukan penyusunan skripsi ini kami mempunyai beberapa masukan untuk dikembangkan yaitu:

1. Untuk lebih mempermudah analisa dapat digunakan MATLAB dengan versi terbaru.
 2. Sistem kontrol yang digunakan dapat diganti dengan model sistem kontrol motor induksi 3 phasa lainnya.
-

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chapman, Stephen J. 1985. "*Electrical Machinery Fundamentals*". :McGraw-Hill Inc Second Editons.
 - [2] Chce-Mun Ong "**Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab / Simulink**".
 - [3] R. Rinkevičienė, V. Batkauskas *Department of Automation, Vilnius Gediminas Technical University*, **Modeling and Investigation of Vector Controlled Induction Drive**
 - [4] Alfredo Muñoz-García, Thomas A. Lipo, *Fellow, IEEE*, and Donald W. Novotny, **A New Induction Motor V/f Control Method Capable of High-Performance Regulation at Low Speeds**
 - [5] M.Vasudevan* and Dr.R.Arumugam,Department of Electrical and Electronics Engineering, Anna University, Chennai.**New Direct Torque Control Scheme of Induction Motor for Electric Vehicles**
 - [6] Zuhail. "**Dasar-dasar Teknik Tenaga Listrik**". Penerbit ITB Bandung.
 - [7] Purnomo, Hery, 2005. "Diktat Kuliah Mesin Elektrik II". : Institut Teknologi Nasional Malang.
 - [8] Abdul Kadir, "Mesin Induksi" Penerbit Djambatan Cetakan ke 12, 2003.
 - [9] Peter Stekl Freescale Semiconductor, Inc. **Washing Machine Three-Phase AC Induction Motor Drive Based on MC56F8013**
 - [10] **Constant Volts/Hertz Operation for Variable Speed Control of Induction Motors** Software example of an Space Vector Modulation driven Volts/Hertz converter with the ADMC401
 - [11] **AC Induction Motor Control Using Constant V/Hz Principle and Space Vector PWM Technique** with TMS320C240
 - [12] A.E. Fitzgerald, "**Electric Machinery**". Fourth Edition, McGraw Hill Inc.
-

LAMPIRAN



PERSETUJUAN PERBAIKAN SKRIPSI



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

Hari : Rabu
Tanggal : 24 September 2008

Telah dilakukan perbaikan skripsi oleh :

1. Nama : DWI HARTANTO
2. NIM : 02.12.056
3. Jurusan : Teknik Elektro
4. Konsentrasi : Teknik Energi Listrik
5. Judul Skripsi : "ANALISA PERBANDINGAN PENGGUNAAN METODE VEKTOR KONTROL, METODE VOLT/Hz DAN DTC SEBAGAI KONTROL PADA MOTOR INDUKSI 3 PHASA DI LAB.KONVERSI ENERGI ELEKTRIK ITN MALANG"

Perbaikan meliputi :

No	Materi Perbaikan	Paraf
1.	Judul Tabel di Tulis di Atas	
2.	Samakan Ploting metode DTC SVM dengan metode lainnya	

Anggota Penguji

Penguji I

Irrine Budi S, ST, MT
NIP. 132 314 400

Pembimbing I

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

Pembimbing II

Bambang Prio H, ST, MT
NIP. Y. 102 8400 082



PERSETUJUAN PERBAIKAN SKRIPSI

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

Hari : Rabu
Tanggal : 24 September 2008

Telah dilakukan perbaikan skripsi oleh :

1. Nama : DWI HARTANTO
2. NIM : 02.12.056
3. Jurusan : Teknik Elektro
4. Konsentrasi : Teknik Energi Listrik
5. Judul Skripsi : "ANALISA PERBANDINGAN PENGGUNAAN METODE VEKTOR KONTROL, METODE VOLT/Hz DAN DTC SEBAGAI KONTROL PADA MOTOR INDUKSI 3 PHASA DI LAB.KONVERSI ENERGI ELEKTRIK ITN MALANG"

Perbaikan meliputi :

No	Materi Perbaikan	Paraf
1.	Perbaiki Abstrak	
2.	Perbaiki Kesimpulan	
3.	Perbaiki Saran	

Anggota Penguji

Penguji II

Ir.H. Choirul Saleh, MT
NIP.Y. 101 8800 190

Pembimbing I

Ir. M. Abdul Hamid, MT
NIP. 132 314 400

Pembimbing II

Bambang Prio H, ST, MT
NIP. Y. 102 8400 082

LEMBAR DATA HASIL PENGUJIAN
I LABORATORIUM KONVERSI ENERGI ELEKTRIK ITN MALANG

1. Pengujian DC Test

Tabel
Data Hasil Pengujian Arus Searah

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

2. Pengujian Tanpa Beban (No Load Test)

Tabel
Data Hasil Pengujian Beban Nol

I_{motor} (Ampere)			$P_{3\text{ Phasa}}$ (WATT)	V_{L-L} (Volt)	Frekuensi (Hz)
a	b	c			
0.59	0.68	0.59	90	220	50

3. Pengujian Rotor Tertahan (Blocked Rotor Test)

Tabel
Data Hasil Pengujian Motor Rotor Tertahan


I_{motor} (Ampere)			$P_{3\text{ Phasa}}$ (WATT)	V_{L-L} (Volt)
a	b	c		
2.5	2.5	2.5	230	78

Asisten Pendamping



Husen Sufianto
Nim. 02.12.010

Ka. Lab. Konversi Energi Elektrik



Ir. M. Abdul Hamid, MT
Nip. 101 880 00188

Pemohon





Dwi Hartanto
Nim. 02.12.056



LEMBAR PENGAJUAN JUDUL SKRIPSI JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1

Konsentrasi : Teknik Energi Listrik/Teknik Elektronika/Teknik Komputer & Informatika*)

1.	Nama Mahasiswa: DWI HARTANTO	Nim: 02.12.056								
2.	Waktu Pengajuan	Tanggal: 18 Bulan: JUNI Tahun: 2008								
Spesifikasi Judul (berilah tanda silang)**)										
3.	<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; border: none;">a. Sistem Tenaga Elektrik</td> <td style="width: 50%; border: none;">e. Elektronika & Komponen</td> </tr> <tr> <td style="border: none;"><input checked="" type="checkbox"/> b. Energi & Konversi Energi</td> <td style="border: none;">f. Elektronika Digital & Komputer</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">c. Tegangan Tinggi & Pengukuran</td> <td style="border: none;">g. Elektronika Komunikasi</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">d. Sistem Kendali Industri</td> <td style="border: none;">h. lainnya</td> </tr> </table>		a. Sistem Tenaga Elektrik	e. Elektronika & Komponen	<input checked="" type="checkbox"/> b. Energi & Konversi Energi	f. Elektronika Digital & Komputer	c. Tegangan Tinggi & Pengukuran	g. Elektronika Komunikasi	d. Sistem Kendali Industri	h. lainnya
a. Sistem Tenaga Elektrik	e. Elektronika & Komponen									
<input checked="" type="checkbox"/> b. Energi & Konversi Energi	f. Elektronika Digital & Komputer									
c. Tegangan Tinggi & Pengukuran	g. Elektronika Komunikasi									
d. Sistem Kendali Industri	h. lainnya									
4.	Konsultasikan judul sesuai materi bidang ilmu kepada Dosen*) <i>Ir. M. Abd. Hamid, MT</i>	Ketua Jurusan  Ir. F. Yudi Limpraptono, MT NIP. P. 1039500274								
5.	Judul yang diajukan mahasiswa:	ANALISIS EFISIENSI PENGGUNAAN METODE V/H_2 VEKTOR KONTROL PADA MOTOR INDUKSI 3 PHASA DI LAB. KONVERSI ENERGI LISTRIK ITA MALANG MENGGUNAKAN SOFTWARE MATLAB								
6.	Perubahan judul yang disetujui Dosen sesuai materi bidang ilmu	ANALISIS PENGGUNAAN METODE VEKTOR KONTROL DAN METODE V/H_2 Sebagai kontrol pada motor induksi 3 PHASA DI LAB. KONVERSI E-ELEKTRIK ITA MALANG MENGGUNAKAN SOFTWARE MATLAB								
Catatan:										
7.	Persetujuan Judul skripsi yang dikonsultasikan kepada Dosen materi bidang ilmu	Disetujui Dosen 18-6-2008 								

Perhatian:

1. Formulir pengajuan ini harap dikembalikan kepada jurusan paling lambat satu minggu setelah disetujui kelompok dosen keahlian dengan dilampirkan proposal skripsi beserta persyaratan skripsi sesuai form S-1
2. Keterangan: *) Coret yang tidak perlu
**) dilingkari a, b, c, atau g sesuai bidang keahlian

PERNYATAAN KESEDIAAN DALAM PEMBIBINGAN SKRIPSI

Sesuai permohonan dari mahasiswa/i :

Nama : Dwi Hartanto

Nim : 02.12.056

Semester : 12

Jurusan : Teknik Elektro S-1

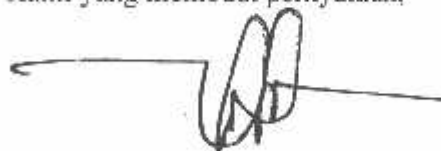
Konsentrasi : Teknik Elektronika/Energi Listrik

Dengan ini menyatakan bersedia / tidak bersedia*) Membimbing Skripsi dari mahasiswa tersebut, dengan judul :

ANALISIS ~~EFFISIENSI~~ PENGGUNAAN METODE VEKTOR KONTROL DAN METODE V/Hz SEBAGAI KONTROL PADA MOTOR INDUKSI TIGA PHASA DI LABORATORIUM KONVERSI ENERGI LISTRIK ITN MALANG MENGGUNAKAN SOFTWARE MATLAB SIMULINK.

Demikian surat pernyataan ini kami buat agar dapat dipergunakan seperlunya.

Malang, 24 Juni 2008
Kami yang membuat pernyataan,



Ir. M. Abdul Hamid, MT
Nip.Y.101 880 188

Catatan :

Setelah disetujui agar formulir ini
Diserahkan mahasiswa/i yang bersangkutan
Kepada Jurusan untuk diproses lebih lanjut.

*) Coret yang tidak perlu



BERITA ACARA SEMINAR PROPOSAL SKRIPSI JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1

Konsentrasi : Teknik Energi Listrik/Teknik Elektronika*)

1.	Nama Mahasiswa: <u>DWI HARTANTO</u>		Nim: <u>02.12.056</u>	
2.	Keterangan	Tanggal	Waktu	Tempat
	Pelaksanaan	<u>25 Juli 2008</u>		Ruang:
Spesifikasi Judul (berilah tanda silang)**)				
3.	a. Sistem Tenaga Elektrik		e. Elektronika & Komponen	
	<input checked="" type="checkbox"/> b. Energi & Konversi Energi		f. Elektronika Digital & Komputer	
	c. Tegangan Tinggi & Pengukuran		g. Elektronika Komunikasi	
	d. Sistem Kendali Industri		h. lainnya	
4.	Judul Proposal yang diseminarkan Mahasiswa	<u>ANALISIS PENGGUNAAN METODE VEKTOR KONTROL DAN METODE V/f SEBAGAI KONTROL PADA MOTOR INDUKSI TIGA PHASA DI LABORATORIUM KONVERSI ENERGI ELEKTRIK ITN MALANG MENGGUNAKAN SOFTWARE MATLAB SIMULINK</u>		
5.	Perubahan Judul yang diusulkan oleh Kelompok Dosen Keahlian	<u>"Analisa perbandingan"</u>		
6.	Catatan:	<u>perbandingan beberapa metode kontrol kecepatan.</u>		
	Catatan:	 		

Pei 1

PERNYATAAN KESEDIAAN DALAM PEMBIBINGAN SKRIPSI

Sesuai permohonan dari mahasiswa/i :

Nama : Dwi Hartanto

Nim : 02.12.056

Semester : 12

Jurusan : Teknik Elektro S-1

Konsentrasi : Teknik Elektronika/Energi Listrik

Dengan ini menyatakan bersedia / tidak bersedia*) Membimbing Skripsi dari mahasiswa tersebut, dengan judul :

ANALISIS PENGGUNAAN METODE VEKTOR KONTROL DAN METODE V/Hz SEBAGAI KONTROL PADA MOTOR INDUKSI TIGA PHASA DI LABORATORIUM KONVERSI ENERGI ELEKTRIK ITN MALANG MENGGUNAKAN SOFTWARE MATLAB SIMULINK.

Demikian surat pernyataan ini kami buat agar dapat dipergunakan seperlunya.

Malang, Juni 2008
Kami yang membuat pernyataan,



Catatan :

Setelah disetujui agar formulir ini
Diserahkan mahasiswa/i yang bersangkutan
Kepada Jurusan untuk diproses lebih lanjut.

*) Coret yang tidak perlu

Bambang Prio Hartono, ST,MT
Nip.Y.102 8400 082

Form S-3b



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

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

DI MALANG
MALANG

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

Malang, 04 Agt, 2008

ITN-186/I.TA/2/08

BIMBINGAN SKRIPSI

Yth. Sdr. **IR. M. ABDUL HAMID, MT**
Dosen Institut Teknologi Nasional Malang

Dosen Pembimbing
Jurusan Teknik Elektro S-1
di
Malang

Dengan hormat
Sesuai dengan permohonan dan persetujuan dalam Proposal Skripsi
Untuk Mahasiswa :

Nama : DWI HARTANTO
Nim : 0212056
Fakultas : Teknologi Industri
Jurusan : Teknik Elektro S-1
Konsentrasi : Teknik Energi Listrik

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

26 Juli 2008 s/d 26 Januari 2009

Sebagai satu syarat untuk menempuh ujian Sarjana Teknik,
Jurusan Teknik Elektro S-1

Demikian agar maklum dan atas perhatian serta bantuannya kami sampaikan
terima kasih



Ketua Jurusan
Teknik Elektro S-1

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

Tembusan Kepada Yth :

1. Mahasiswa Yang Bersangkutan
2. Arsip

Form. S 4a



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

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

KAMPUS I MALANG
KAMPUS II MALANG

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

Malang, 04 Agt, 2008

n : ITN-187/I.TA/2/08
: -
: BIMBINGAN SKRIPSI

: Yth. Sdr. **BAMBANG PRIO H, ST, MT**
Dosen Institut Teknologi Nasional Malang

Dosen Pembimbing
Jurusan Teknik Elektro S-1
di
Malang

Dengan hormat
Sesuai dengan permohonan dan persetujuan dalam Proposal Skripsi
Untuk Mahasiswa :

Nama : DWI HARTANTO
Nim : 0212056
Fakultas : Teknologi Industri
Jurusan : Teknik Elektro S-1
Konsentrasi : Teknik Energi Listrik

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

26 Juli 2008 s/d 26 Januari 2009

Sebagai satu syarat untuk menempuh ujian Sarjana Teknik,
Jurusan Teknik Elektro S-1

Demikian agar maklum dan atas perhatian serta bantuannya kami sampaikan
terima kasih



Ketua Jurusan
Teknik Elektro S-1

Ir. F. Yudi Lampraptono, MT
Nip. Y. 1039500274

Tembusan Kepada Yth :

1. Mahasiswa Yang Bersangkutan
2. Arsip

Form. S 4a



FORMULIR BIMBINGAN SKRIPSI

Nama : Dwi Hartanto
Nim : 02.12.056
Masa Bimbingan : 25 Juli 2008 s/d 25 Januari 2009
Judul Skripsi : ANALISA PERBANDINGAN METODE VEKTOR KONTROL, METODE V/Hz DAN DIRECT TORQUE CONTROL (DTC) SEBAGAI KONTROL PADA MOTOR INDUKSI TIGA PHASA DI LABORATORIUM KONVERSI ENERGI ELEKTRIK ITN MALANG MENGGUNAKAN SOFWARE MATLAB SIMULINK

NO	Tanggal	Uraian	Paraf Pembimbing
1.	24/08 ²⁰⁰⁸	Perbaiki Tujuan BAB I	
2.	24/08 ²⁰⁰⁸	BAB II Teori ditambahkan	
3.	24/08 ²⁰⁰⁸	BAB III Perbaiki Teori dan Data Dipisah	
4.	26/08 ²⁰⁰⁸	ACC BAB I, II, III	
5.	09/09 ²⁰⁰⁸	ACC BAB IV, V	
6.			
7.			
8.			
9.			
10.			

Malang,
Dosen Pembimbing

(Ir. M. Abdul Hamid, MT)
NIP.Y. 1018800108



FORMULIR BIMBINGAN SKRIPSI

Nama : Dwi Hartanto
Nim : 02.12.056
Masa Bimbingan : 25 Juli 2008 s/d 25 Januari 2009
Judul Skripsi : ANALISA PERBANDINGAN METODE VEKTOR KONTROL, METODE V/Hz DAN DIRECT TORQUE CONTROL (DTC) SEBAGAI KONTROL PADA MOTOR INDUKSI TIGA PHASA DI LABORATORIUM KONVERSI ENERGI ELEKTRIK ITN MALANG MENGGUNAKAN SOFWARE MATLAB SIMULINK

NO	Tanggal	Uraian	Paraf Pembimbing
1.	24/08/2008	Uraian belakany disempurnakan BAB I Pustaka	
2.	24/08/2008	BAB II Teori diasusikan ditambahkan Pafby Pustaka	
3.	24/08/2008	BAB III diperbaiki Teori dan data dipprate.	
4.	25/08/2008	ACC BAB I, II, III	
5.	02/09/2008	Perbaiki BAB IV, V	
6.	09/09/2008	ACC BAB IV, V	
7.			
8.			
9.			
10.			

Malang,
Dosen Pembimbing

(Bambang Prio H. ST. MT)
NIP.Y. 1018800108