



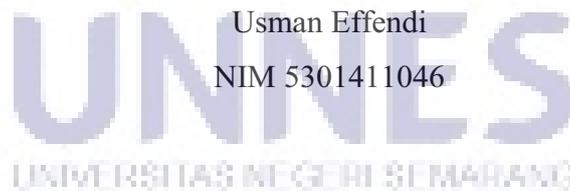
**ANALISIS TORSI DAN PUTARAN MOTOR INDUKSI TIGA PHASA
DENGAN SIMULASI MATLAB**

Skripsi

diajukan sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Pendidikan
Program Studi Pendidikan Teknik Elektro

Oleh

Usman Effendi
NIM 5301411046



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
2017**

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul “Analisis Torsi dan Putaran Motor Induksi Tiga Phasa dengan Simulasi Matlab” telah dipertahankan di depan sidang Panitia Ujian Skripsi Fakultas Teknik Unnes pada tanggal 24 bulan Februari tahun 2017.

Oleh

Nama : Usman Effendi
 NIM : 5301411046
 Program Studi : Pendidikan Teknik Elektro

Panitia :

Ketua Panitia,

Sekretaris,



Dr.-Ing. Dhidik Prastyanto, S.T.,M.T.
 NIP 197805312005011002

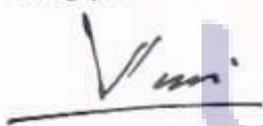


Drs. Agus Suryanto, M.T.
 NIP 196708181992031004

Penguji I,

Penguji II,

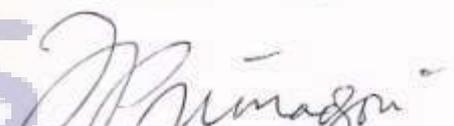
Penguji III/Pembimbing,



Drs. Djoko Adi Widodo, M.T.
 NIP 195909271986011001



Drs. Henry Ananta, M.Pd.
 NIP 195907051986011002



Drs. Yohanes Prinadiyono, M.T.
 NIP 196209021987031002

Mengetahui:
 Dekan Fakultas Teknik Unnes,



Dr. Nur Qudus, M.T.
 NIP 196911301994031001

PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi ini, adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (sarjana, magister, dan/atau doctor), baik di Universitas Negeri Semarang (Unnes) maupun di perguruan tinggi lain.
2. Karya tulis ini adalah murni gagasan, rumusan dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan Pembimbing dan masukan Tim Penguji.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi ini.

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

Semarang, Januari 2017

Yang membuat pernyataan,



Usman Effendi

NIM 5301411046

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

MOTO

“Maka sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan; sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan; maka apabila kamu telah selesai satu urusan; kerjakanlah dengan sungguh-sungguh urusan yang lain” (Qs. Al-Insyirah: 5-7).

PERSEMBAHAN

Tesis ini kupersembahkan kepada.

1. Bapak dan Ibuku;
2. Kakak yang selalu sabar dalam memberikan dukungan;
3. Teman-teman ukm clic dan elektro;

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

KATA PENGANTAR

Puji syukur peneliti panjatkan ke hadirat Allah Swt. yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah sehingga skripsi yang berjudul Analisis Torsi Dan Putaran Motor Induksi Tiga Fasa dengan Menggunakan Simulasi Matlab dapat diselesaikan. Tak lupa peneliti haturkan beribu ucapan terima kasih kepada Drs Yohanes Primadiyono, M.T. yang telah membimbing dan memberikan motivasi kepada peneliti dalam menyelesaikan skripsi ini.

Peneliti menyadari bahwa tersusunnya skripsi ini bukan atas kemampuan dan usaha peneliti semata, melainkan juga berkat bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, peneliti juga mengucapkan terima kasih kepada.

1. Prof. Dr. Fathur Rokhman, M.Hum, Rektor Universitas Negeri Semarang atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menempuh studi di Universitas Negeri Semarang.
2. Dekan Fakultas Teknik Dr. H. Nur Qudus, M.T, Ketua Jurusan Teknik Elektro Dr. Ing- Dhidik Prastiyanto, S.T.M.T, yang telah memberikan ijin dan kemudahan dalam penyusunan skripsi.
3. Drs. Yohanes Primadiyono, M.T selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan dan saran kepada penyusun selama proses penyusunan skripsi.
4. Orang tua, keluarga, dan sahabat yang telah memberikan motivasi.
5. Semua pihak yang telah memberikan bantuan, arahan, dan doa dalam penyelesaian tesis yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Semoga segala amal baik yang telah diberikan kepada peneliti mendapat balasan dari Allah Swt. Mudah-mudahan tesis ini bermanfaat bagi pembaca.

Semarang, 13 Januari 2017

Usman Effendi



ABSTRAK

Usman Effendi. 2017. *Analisis Torsi Dan Putaran Motor Induksi Tiga Fasa dengan Menggunakan Simulasi Matlab*. Skripsi, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang. Drs. Yohanes Primadiyono, M.T.

Motor induksi telah digunakan secara luas untuk beragam pemakaian dalam dunia industri sebagai penggerak mesin. Penelitian ini menjelaskan mengenai simulasi motor induksi tiga fasa yang diperlukan untuk mengetahui karakteristik unjuk kerja motor induksi dalam berbagai kondisi baik sebagai motor dan generator. Untuk analisis motor induksi tiga fasa tersebut diperlukan suatu model yang benar dengan menggunakan kerangka referensi. Dengan metode ini persamaan motor induksi dalam variabel motor (kerangka abc) akan ditransformasikan menjadi persamaan dalam variabel kerangka referensi (kerangka qd0). Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana menganalisa torsi dan putaran motor induksi dengan menggunakan software matlab sehingga menghasilkan data-data berupa nilai torsi dan putaran motor.

Metode yang digunakan dalam analisis ini menggunakan metode simulasi. Adapun langkah-langkah penelitian ini terdiri atas (1) Studi Literatur, (2) Implementasi Pemodelan ke Matlab/Simulink dan Simulasi, (3) Memasukkan data-data motor induksi, (4) Simulasi, (5) Pembahasan dan Penulisan Hasil Simulasi, dan (6) Kesimpulan.

Hasil analisis simulasi memberikan gambaran bahwa pada motor induksi tiga fasa memiliki arus dan torsi dengan nilai yang besar pada saat starting yang berlangsung selama 0-0,6 detik yang bisa mencapai 22 A dan 17 Nm pada motor 1 hp sedangkan pada motor 20 hp nilainya mencapai 434 A dan 276 Nm sebelum mencapai keadaan steady pada 2.7 A dan 2 Nm untuk motor 1 hp serta 49 A dan 40 Nm untuk motor 20 hp dimana saat starting kecepatan putar sangat tinggi dari keadaan diam sampai mencapai keadaan stabil (steady state) dengan kecepatan putar rotor 1 pu. Saran yang direkomendasikan adalah (1) Sebaiknya digunakan software yang dapat menyajikan simulasi dinamik. Contohnya matlab/simulink; (2) Spesifikasi laptop atau pc yang cukup tinggi agar dalam pengoperasiannya lancar; (3) Diharapkan teliti dalam memberikan parameter atau input data agar hasil yang dihasilkan benar-benar sesuai dengan yang diinginkan.

Kata kunci: *analisis, torsi, putaran, motor induksi tiga fasa, simulasi, matlab, Simulink*

DAFTAR ISI

	Halaman
JUDUL	i
PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
PERNYATAAN KEASLIAN	Error! Bookmark not defined.
MOTTO DAN PERSEMBAHAN	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB II	7
LANDASAN TEORI	7
2.1. Motor Induksi	7
2.2. Konstruksi Motor Induksi	9
2.2.1. Bagian stator	9
2.2.2. Bagian rotor	10
2.3 Medan Putar	11
2.4 Prinsip Kerja Motor Induksi	13
2.5 Slip	14
2.6 Daya dan Torsi	15
2.7 Hubungan Antara Kecepatan, Tegangan, dan Frekuensi Terhadap Torsi	17
2.7.1 Hubungan kecepatan dengan torsi	17
2.7.2 Hubungan tegangan dengan torsi	18

2.7.3 Hubungan frekuensi dengan torsi	18
2.8 Pengaturan putaran	19
2.8.1 Mengubah jumlah kutub motor	19
2.8.2 Mengubah frekuensi jala-jala	20
2.8.3 Mengatur tegangan jala-jala	20
2.8.4 Pengaturan tahanan luar motor.....	21
2.9. Generator induksi	21
2.10. Rangkaian ekuivalen motor induksi	22
2.11. Model dinamik motor induksi	28
2.11.1. Model motor induksi dua phasa	28
2.11.2. Transformasi untuk memperoleh matriks yang konstan	32
2.11.3. Transformasi tiga phasa ke dua phasa	37
2.12. Pengenalan Matlab/Simulink	40
2.13. Rangkaian Pemodelan Motor Induksi Tiga Phasa	42
BAB III	52
METODE PENELITIAN.....	52
3.1. Karakteristik Metode Penelitian.....	52
3.2. Tahapan Penelitian	52
3.2.1. Studi Literatur.....	53
3.2.2. Implementasi Pemodelan ke Matlab/Simulink dan Simulasi.....	54
3.2.3. Memasukkan data-data motor induksi.....	54
3.2.4. Simulasi	56
3.2.5. Pembahasan dan Penulisan Hasil Simulasi	56
3.2.6. Kesimpulan.....	57
BAB IV	58
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	58
4.1. Hasil rangkaian keseluruhan blok diagram	58
4.1.1. Diagram keseluruhan.....	58
4.1.2. Blok q-axis.....	60
4.1.3. Blok d-axis	63
4.1.4 Blok zero sequence.....	65
4.1.5 Blok rotor.....	67

4.1.6 Blok transformasi abc ke qd0	71
4.1.7 Blok transformasi qd0 ke abc	72
4.2. Hasil simulasi	74
4.2.1. Hasil simulasi motor induksi tiga fasa 1 hp.....	74
4.2.2. Hasil simulasi motor induksi tiga fasa 20 hp.....	77
4.3. Analisis hasil simulasi	80
4.3.1. Simulasi motor induksi tiga fasa 1 hp	80
4.3.2. Simulasi motor induksi tiga fasa 20 hp	92
BAB V	104
PENUTUP.....	104
5.1 Simpulan.....	104
5.2 Saran.....	104
DAFTAR PUSTAKA	1066
LAMPIRAN.....	1077

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2 1 kumparan stator, rotor belitan, rotor sangkar (Dasar Tenaga Listrik 1989)	8
Gambar 2 2 konstruksi motor induksi (Dasar Tenaga Listrik 1989)	9
Gambar 2 3 motor induksi jenis Phase Wound Rotor (Dasar Tenaga Listrik 1989)	11
Gambar 2 4 diagram medan putar motor induksi (Dasar Tenaga Listrik 1989)	12
Gambar 2 5 prinsip kerja motor induks (Dasar Tenaga Listrik 1989).....	13
Gambar 2 6 tiga macam daya pada motor listrik	16
Gambar 2 7 kurva kecepatan terhadap torsi (Dasar Tenaga Listrik 1989)	18
Gambar 2 8 kurva tegangan terhadap torsi (Dasar Tenaga Listrik 1989).....	18
Gambar 2 9 kurva frekuensi terhadap torsi (Dasar Tenaga Listrik 1989)	19
Gambar 2 10 kutub motor induksi (Dasar Tenaga Listrik 1989).....	20
Gambar 2 11 grafik tegangan jala-jala (Dasar Tenaga Listrik 1989)	21
Gambar 2 12 grafik tahanan luar motor (Dasar Tenaga Listrik 1989).....	21
Gambar 2 13 rangkaian pengganti motor induksi (Jeremia Purba, 2009)	22
Gambar 2 14 rangkaian ekivalen stator (Jeremia Purba, 2009)	24
Gambar 2 15 rangkaian ekivalen rotor (Jeremia Purba, 2009)	26
Gambar 2 16 rangkaian ekivalen motor induksi sisi stator (Jeremia Purba, 2009)	27
Gambar 2 17 kumparan stator dan rotor motor induksi dua fasa (Jeremia Purba, 2009)	29
Gambar 2 18 transformasi variabel rotor dari nilai aktual ke nilai khayalan (Jeremia Purba, 2009)	33
Gambar 2 19 kumparan stator motor dua fasa dan tiga fasa (Jeremia Purba, 2009)	37
Gambar 2 20 diagram keseluruhan dari motor induksi	43
Gambar 2 21 function block parameter tegangan stator	45

	Halaman
Gambar 2 22 diagram blok D-axis.....	46
Gambar 2 23 diagram blok Q-axis.....	47
Gambar 2 24 transformasi abc-dq0 blok.....	48
Gambar 2 25 rotor blok.....	49
Gambar 2 26 transformasi dq0-abc blok.....	50
Gambar 2 27 zero sequence blok.....	51
Gambar 4. 1 keseluruhan diagram blok motor.....	58
Gambar 4. 2 blok q-axis.....	60
Gambar 4. 3 perumusan blok q-axis.....	60
Gambar 4. 5 blok d-axis.....	63
Gambar 4. 4 perumusan blok d-axis.....	64
Gambar 4. 6 blok zero sequence.....	65
Gambar 4. 7 blok rotor.....	67
Gambar 4. 8 perumusan blok rotor.....	67
Gambar 4. 9 blok kecepatan rotor dalam p.u.....	70
Gambar 4. 10 blok transformasi abc ke qd0.....	71
Gambar 4. 11 blok transformasi qd0 ke abc.....	72
Gambar 4. 12 hasil simulasi 1 hp sebagai motor.....	74
Gambar 4. 13 hasil simulasi 20 hp sebagai generator.....	75
Gambar 4. 14 hasil simulasi 20 hp sebagai motor.....	77
Gambar 4. 15 hasil simulasi 20 hp sebagai generator.....	78
Gambar 4. 16 tegangan fasa ke netral, fasa a 1 hp sebagai motor.....	81
Gambar 4. 17 tegangan fasa ke netral, fasa a 1 hp sebagai generator.....	82
Gambar 4. 18 arus starting 1 hp sebagai motor.....	83
Gambar 4. 19 arus starting 1 hp sebagai generator.....	84
Gambar 4. 20 torsi elektromekanis 1 hp saat $t = 0,8$ sebagai motor.....	87
Gambar 4. 21 torsi elektromekanis 1 hp saat $t = 1,2$ sebagai motor.....	87
Gambar 4. 22 torsi elektromekanis 1 hp saat $t = 1,6$ sebagai motor.....	88
Gambar 4. 23 torsi elektromekanis 1 hp saat $t = 0,8$ sebagai generator.....	89
Gambar 4. 24 torsi elektromekanis 1 hp saat $t = 1,2$ sebagai generator.....	89

	Halaman
Gambar 4. 25 torsi elektromekanis 1 hp saat $t = 1,6$ sebagai generator	90
Gambar 4. 26 kecepatan putar rotor 1 hp sebagai motor	91
Gambar 4. 27 kecepatan putar rotor 1 hp sebagai generator.....	91
Gambar 4. 28 tegangan fasa ke netral, fasa a 20 hp sebagai motor	93
Gambar 4. 29 tegangan fasa ke netral, fasa a 20 hp sebagai generator.....	93
Gambar 4. 30 arus starting 20 hp sebagai motor	95
Gambar 4. 31 arus starting 20 hp sebagai generator	95
Gambar 4. 32 torsi elektromekanis 20 hp saat $t = 0,8$ sebagai motor	98
Gambar 4. 33 torsi elektromekanis 20 hp saat $t = 1,2$ sebagai motor	99
Gambar 4. 34 torsi elektromekanis 20 hp saat $t = 1,6$ sebagai motor	99
Gambar 4. 35 torsi elektromekanis 20 hp saat $t = 0,8$ sebagai generator	100
Gambar 4. 36 torsi elektromekanis 20 hp saat $t = 1,2$ sebagai generator	101
Gambar 4. 37 torsi elektromekanis 20 hp saat $t = 1,6$ sebagai generator	101
Gambar 4. 38 kecepatan putar rotor 20 hp sebagai motor	102
Gambar 4. 39 kecepatan putar rotor 20 hp sebagai generator.....	102

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Motor induksi tiga phasa memiliki beberapa parameter dan karakteristik yang perlu diketahui. Beberapa analisis ditunjukkan bahwa karakteristik yang perlu diketahui dan dominan adalah torsi keluaran dan putarannya. Kecepatan motor induksi dapat diubah dengan beberapa cara yaitu; (1) merubah banyaknya kutub, (2) mengubah frekuensi jala-jala, (3) mengubah tegangan jala-jala, dan (4) mengubah tahanan luar (Fitzgerarld, 1990). Perubahan tegangan jala-jala sangat berpengaruh terhadap torsi, karena torsi merupakan fungsi tegangan. Torsi yang dihasilkan suatu motor induksi besarnya sebanding dengan pangkat dua tegangan yang diberikan pada terminal-terminal primernya (Fitzgerarld, 1990).

Untuk keperluan penyesuaian, antara sistem penggerak dan beban yang akan digerakkan harus diketahui besarnya torsi pada sumbu motor yang dipakai untuk menggerakkan motor tersebut. Seperti diketahui bahwa daya atau energi yang terdapat pada sumbu motor berupa daya mekanis, yaitu berupa torsi dan putaran. Jadi besarnya torsi motor listrik tergantung dari besarnya daya keluar dari motor tersebut. Oleh sebab itu untuk menghitung besarnya torsi pada poros motor yang akan dipakai untuk mengangkat beban harus diketahui lebih dulu besarnya daya keluaran dari motor. Jadi daya keluaran dari motor yang bersifat elektris tersebut diubah menjadi daya mekanis berupa torsi dan putaran pada poros dan selanjutnya dipakai untuk memutar beban. Dengan demikian dalam bidang perencanaan yang akan menggunakan motor listrik perlu diketahui hal-hal

tersebut dengan jalan melakukan penelitian mengenai daya-daya yang bekerja pada motor induksi untuk mendapatkan pemahaman dari permasalahan dan gambaran kinerjanya.

Sejauh ini kebanyakan penelitian mengenai daya-daya yang bekerja pada motor induksi dilakukan secara manual dengan cara melakukan pengukuran secara langsung. Dengan metode seperti ini rugi-rugi daya sulit untuk diketahui melalui pengukuran. Demikian juga rugi-rugi daya yang bersifat mekanik seperti rugi gesek dan angin serta daya keluaran yang bersifat mekanik pada poros motor sulit untuk diketahui melalui pengukuran. Untuk itu perlu dicari cara lain untuk menghitung besarnya daya-daya tersebut.

Pada skripsi ini dicoba menganalisa keluaran torsi dan putaran dari motor induksi tiga fasa dengan batasan asumsi tertentu. Karakteristik motor induksi tiga fasa ditentukan oleh kemampuan motor untuk memikul beban atau kemampuan motor untuk membangkitkan torsi yang digunakan untuk memutar beban. Pada skripsi ini dianalisis torsi dan putaran pada motor induksi dengan menggunakan alat bantu software matlab dan simulink. Dari modeling simulasi dan hasil analisis diharapkan diperoleh data-data percobaan dan pengamatan yang dapat menggambarkan kinerja motor induksi tiga fasa. Hal ini tujuannya agar dapat membantu untuk memberikan pemahaman dari permasalahan dan gambaran kinerjanya. Selain itu, pemodelan perangkat lunak matlab dapat digunakan sebagai bahan kajian lebih lanjut sebagai alat bantu pada proses belajar mengajar di laboratorium Teknik Elektro. Hal tersebut yang melatarbelakangi penulis membahas tentang torsi dan putaran motor induksi dengan judul **“ANALISIS**

TORSI DAN PUTARAN MOTOR INDUKSI TIGA PHASA DENGAN MENGGUNAKAN SIMULASI MATLAB”.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan dari penjelasan latar belakang di atas maka rumusan masalah yang diambil dari penelitian ini adalah bagaimana menganalisis torsi dan putaran motor induksi dengan menggunakan software matlab.

1.3 Batasan Masalah

Dalam skripsi ini permasalahan dibatasi dengan maksud untuk mempersempit masalah sesuai dengan judul dan menghindari pembahasan yang terlalu luas. Yakni diberikan batasan-batasan sebagai berikut:

1. Tabel 1.1 untuk parameter motor 1 Hp [*“Dynamic Simulations of Electric Machinery Using Matlab”*. 1997]

Daya	1 Hp
Tegangan Rata-rata	200 V
Frekuensi (f)	60 Hz
Jumlah Pasang Kutub (Np)	4
Resistansi Stator (Rs)	3.35 Ohm
Resistansi Rotor (Rr)	1.99 Ohm
Induktansi Stator (Ls)	6.94 mH
Induktansi Rotor (Lr)	6.94 mH
Induktansi Magnetik (Lm)	163.73 mH

Momen Inersia (J)	0.1 kgm ²
-------------------	----------------------

2. Tabel 1.2 untuk parameter motor 20 Hp [*“Dynamic Simulations of Electric Machinery Using Matlab”*. 1997]

Daya	20 Hp
Tegangan Rata-rata	220 V
Frekuensi (f)	60 Hz
Jumlah Pasang Kutub (Np)	4
Resistansi Stator (Rs)	0.1062 Ohm
Resistansi Rotor (Rr)	0.0764 Ohm
Induktansi Stator (Ls)	0.2145 mH
Induktansi Rotor (Lr)	0.2145 mH
Induktansi Magnetik (Lm)	5.8339 mH
Momen Inersia (J)	2.8 kgm ²

3. Belitan pada setiap fasa stator adalah identik, demikian pula belitan rotor
4. Rangkaian magnet linier sehingga tidak terjadi kejenuhan inti besi
5. Rugi – rugi inti besi dan gesek diabaikan
6. Pemrograman dan simulasi dilakukan dengan paket perangkat lunak matlab dan simulink
7. Pengamatan hanya dilakukan pada putaran dan torsi keluaran

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah untuk menganalisis simulasi torsi dan putaran motor induksi tiga fasa dengan menggunakan simulasi matlab dengan menampilkan hasil simulasi dalam bentuk grafik torsi dan putaran rotor.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Bagi penulis

Memberi masukan kepada penulis dalam meningkatkan pengetahuan dan pemahaman terhadap torsi dan putaran dengan menggunakan simulasi matlab.

2. Bagi akademik

Dapat menambah kepustakaan dalam kajian analisis torsi dan putaran motor induksi dengan menggunakan simulasi matlab.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan digunakan untuk memudahkan penyusunan laporan penelitian dan memudahkan pembaca memahami isi penelitian, maka sistematika penulisannya adalah sebagai berikut

Bab I pendahuluan

Menjelaskan tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian dan sistematika penulisan.

Bab II landasan teori

Menjelaskan tentang motor induksi, persamaan mengenai torsi dan putaran serta rangkaian ekivalen motor induksi tiga fasa, pemrograman simulasi matlab dan simulink.

Bab III metodologi penelitian

Menjelaskan metode yang digunakan dalam pengambilan data.

Bab IV pembahasan

Menjelaskan tentang hasil analisis torsi dan putaran motor induksi

Bab V penutup

Menjelaskan hasil analisis dari simulasi dan saran-saran.

Daftar pustaka

Lampiran



BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Motor Induksi

Motor induksi merupakan motor arus bolak-balik (ac) yang paling banyak digunakan. Penamaannya berasal dari arus rotor motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus stator.

Belitan stator yang dihubungkan dengan suatu sumber tegangan tiga fasa akan menghasilkan medan magnet yang berputar dengan kecepatan sinkron ($ns = 120f/2p$). Medan putar pada stator tersebut akan memotong konduktor-konduktor pada rotor, sehingga terinduksi arus; dan sesuai dengan Hukum *Lorentz*, rotor pun akan turut berputar mengikuti medan putar stator. Perbedaan putaran relative antara stator dan rotor disebut slip. Bertambahnya beban, akan memperbesar kopel motor, yang oleh karenanya akan memperbesar pula arus induksi pada rotor, sehingga slip antara medan putar stator dan putaran rotor pun akan bertambah besar. Jadi, bila beban motor bertambah, putaran rotor pun akan bertambah besar. Jadi, bila beban motor bertambah, putaran rotor cenderung menurun. Dikenal dua tipe motor induksi yaitu motor induksi dengan rotor belitan dan motor induksi dengan rotor sangkar.



Gambar 2 1 kumparan stator, rotor belitan, rotor sangkar (Dasar Tenaga Listrik 1989)

Motor induksi banyak dipakai dikalangan industri, ini berkaitan dengan beberapa keuntungan dan kerugian.

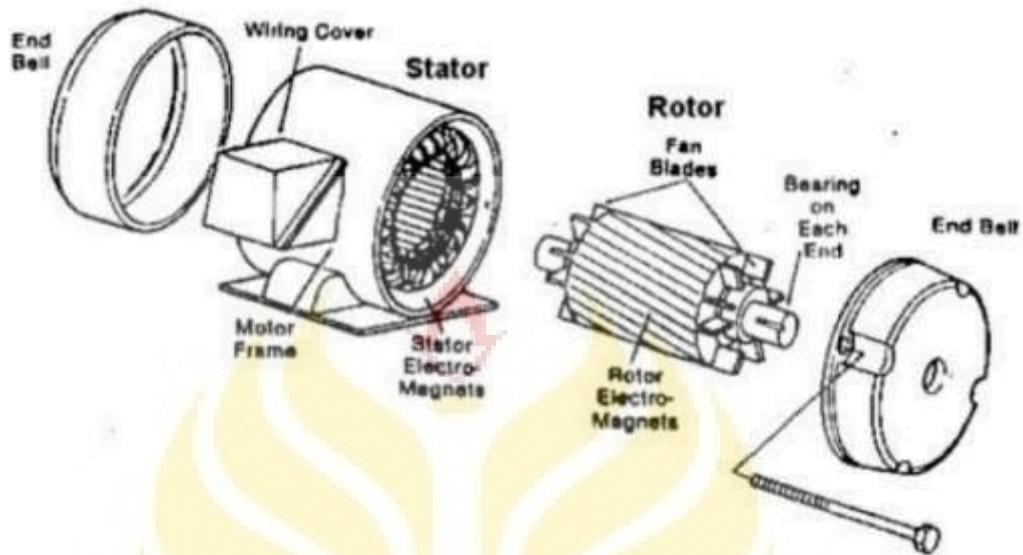
Keuntungan:

1. Sangat sederhana dan daya tahan kuat (konstruksi hampir tidak pernah terjadi kerusakan, khususnya tipe *squirrel cage*).
2. Harga relatif murah dan perawatan mudah.
3. Efisiensi tinggi. Pada kondisi berputar normal, tidak dibutuhkan sikat karenanya rugi daya yang diakibatkannya dapat dikurangi.
4. Tidak memerlukan starting tambahan dan tidak harus sinkron.

Kerugian:

1. Kecepatan tidak dapat berubah tanpa pengorbanan efisiensi.
2. Tidak seperti motor DC atau motor shunt, kecepatannya meurun seiring dengan tambahan beban.
3. Kopel awal mutunya rendah disbanding dengan motor DC shunt.

2.2. Konstruksi Motor Induksi



Gambar 2.2 konstruksi motor induksi (Dasar Tenaga Listrik 1989)

Prinsip dasar motor induksi terdiri atas:

2.2.1. Bagian stator

Stator adalah bagian dari motor induksi yang diam. Konstruksi stator terdiri atas:

1. Rumah stator dari besi tuang
2. Inti stator dari besi lunak atau baja silicon
3. Alur dan gigi, materialnya sama dengan inti, alur (slot) tempat meletakkan belitan
4. Belitan stator dari tembaga

Pada bagian stator terdapat beberapa slot yang merupakan tempat kawat (konduktor) dari tiga fasa yang disebut kumparan stator, yang masing – masing kumparan mendapatkan suplai arus tiga fasa.

Jika kumparan stator mendapatkan *supply* arus tiga *phasa*, maka pada kumparan tersebut segera timbul *flux* magnet putar. Karena adanya *flux* magnet putar pada kumparan stator, mengakibatkan rotor berputar karena adanya induksi magnet dengan kecepatan putar rotor sinkron dengan kecepatan putar stator ($n_s = 120f/p$).

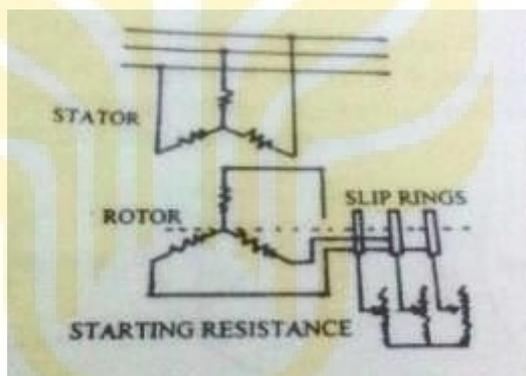
2.2.2. Bagian rotor

Rotor adalah bagian dari motor induksi yang berputar. Rotor terhubung ke beban mekanis melalui poros. Konstruksi rotor terdiri atas:

1. Inti rotor, bahannya sama dengan inti stator
2. Alur dan gigi materialnya sama dengan inti, alur tempat meletakkan belitan
3. Belitan rotor bahannya dari tembaga, dari konstruksi lilitan akan memberikan dua macam rotor yaitu:
 - a. Motor induksi dengan rotor sangkar atau kurung
 - b. Motor induksi dengan belitan
4. Poros atau as

Bagian rotor yang merupakan tempat kumparan rotor adalah bagian yang bergerak atau berputar. Ada dua jenis kumparan rotor yaitu *squirrel cage rotor* dan *phase wound rotor*. Hampir 90% kumparan

rotor dari motor induksi menggunakan jenis *squirrel cage* motor. Ini karena bentuk kumparannya sederhana dan tahan terhadap goncangan. Ciri khusus dari *squirrel cage motor* adalah ujung-ujung kumparan rotor terhubung singkat secara permanen. Lain halnya pada jenis *phase wound rotor* yang ujung-ujung kumparan rotor akan akan terhubung langsung bilakecepatan putar rotor telah mencapai kecepatan putar normalnya secara otomatis melalui slip ring yang terpasang pada bagian rotor.

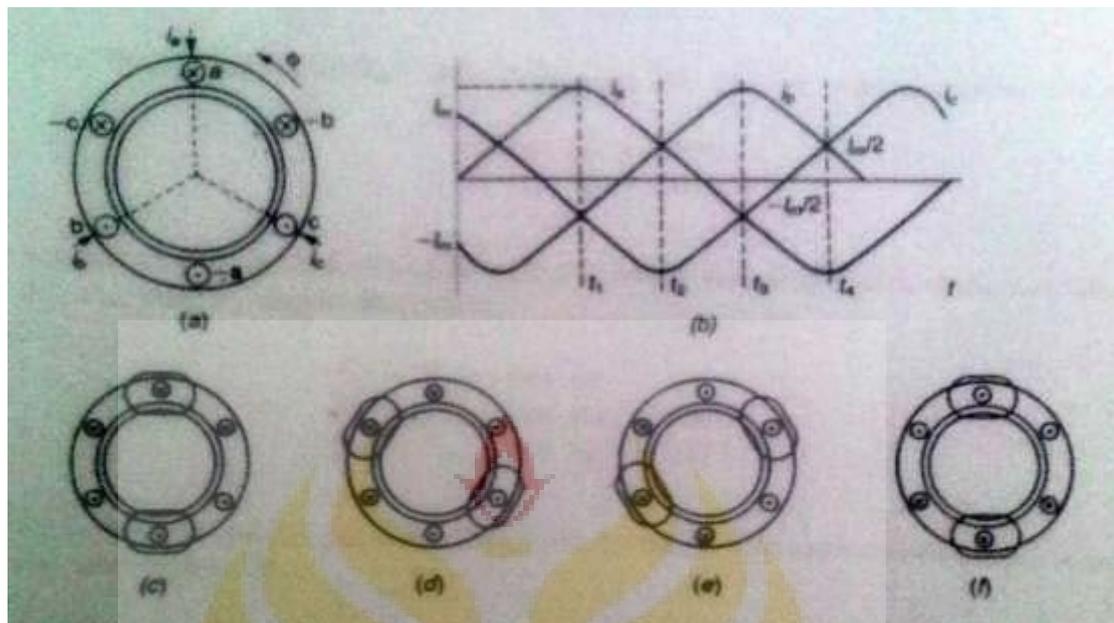


2.3 Medan Putar

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 kumpalan stator dihubungkan dalam fasa banyak, umumnya fasa 3. Hubungan dapat berupa hubungn bintang atau delta.

Disini akan dijelaskan bagaimana terjadinya medan putar itu. Perhatikanlah gambar berikut.

*Gambar 2 3 motor induksi jenis Phase Wound Rotor
(Dasar Tenaga Listrik 1989)*



Gambar 2.4 diagram medan putar motor induksi (Dasar Tenaga Listrik 1989)

Misalnya kumparan a-a; b-b; c-c dihungkan tiga fasa, dengan beda fasa masing-masing 120° (gambar 2.4a) dan dialiri arus *sinusoid*. Distribusi i_a , i_b , i_c sebagai fungsi waktu adalah seperti gambar 2.4b. Pada keadaan t_1 , t_2 , t_3 dan t_4 , fluks resultan yang ditimbulkan oleh kumparan tersebut masing-masing adalah seperti gambar 2.4c, d, e, dan f. pada t_1 fluks resultan mempunyai arah sama dengan arah fluks 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 .

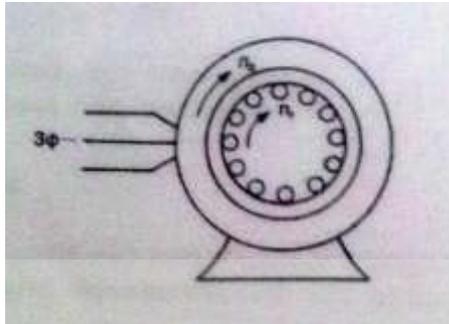
Dari gambar 2.4c, d, e, dan f tersebut terlihat bahwa fluks resultan ini akan berputar satu kali. Oleh karena itu, untuk mesin dengan jumlah kutub lebih dari dua, kecepatan sinkron dapat diturunkan sebagai berikut:

$$N_s = 120f/p \dots\dots\dots(2.1)$$

F = frekuensi

P = jumlah kutub

2.4 Prinsip Kerja Motor Induksi



Gambar 2.5 prinsip kerja motor induksi
(Dasar Tenaga Listrik 1989)

Ada beberapa prinsip kerja motor induksi:

1. Apabila sumber tegangan tiga fasa dipasang pada kumparan stator akan timbul medan putar dengan kecepatan $n_s = 120 f/p$
2. Medan putar stator tersebut akan memotong batang konduktor pada rotor.
3. Akibatnya pada kumparan rotor timbul tegangan induksi (ggl) sebesar:

$$E_{2s} = 4.44 f_2 N_2 \phi_m$$
 (untuk satu fasa).
 E_{2s} adalah tegangan induksi pada saat rotor berputar.
4. Karena kumparan rotor merupakan rangkaian yang tertutup, maka ggl (E) akan menghasilkan arus (I).
5. Adanya arus (I) didalam medan magnet menimbulkan gaya (F) pada rotor.
6. Bila kopel mula yang dihasilkan oleh gaya (F) pada rotor yang cukup besar untuk memikul kopel beban, rotor akan berputar searah dengan medan putar stator.
7. Seperti yang telah dijelaskan pada (3) tegangan induksi timbul karena terpotongnya batang konduktor (rotor) oleh medan putar stator. Artinya agar tegangan terinduksi diperlukan adanya perbedaan *relative* antara kecepatan medan putar stator (n_s) dengan kecepatan berputar rotor (n_r).

8. Perbedaan kecepatan antara n_r dan n_s disebut slip (S) dinyatakan dengan:

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\%$$

9. Bila $n_r = n_s$, tegangan tidak akan terinduksi dan arus tidak mengalir pada kumparan jangkar rotor, dengan demikian tidak dihasilkan kopel. Kopel motor akan ditimbulkan apabila n_r lebih kecil dari n_s .

10. Dilihat dari cara kerjanya, motor induksi disebut juga sebagai motor tak serempak atau asinkron.

2.5 Slip

Berubah-ubahnya kecepatan motor induksi (n_r) mengakibatkan berubahnya harga slip dari 100% pada saat start sampai 0% pada saat motor diam ($n_r = n_s$). Hubungan frekuensi dengan slip dapat dilihat sebagai berikut:

Bila f_1 = frekuensi jala-jala,

$$n_s = 120f_1/p \text{ atau } f_1 = pn_s/120 \dots\dots\dots(2.2)$$

Pada rotor berlaku hubungan:

$$f_2 = \frac{p(n_s - n_r)}{120} \dots\dots\dots(2.3)$$

f_2 = frekuensi arus motor

Atau

$$f_2 = \frac{pn_s}{120} \times \frac{n_s - n_r}{n_s} \dots\dots\dots(2.4)$$

Karena

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \text{ dan } f_1 = \frac{pn_s}{120} \dots\dots\dots(2.5)$$

Maka

$$f_2 = f_1 \times S \dots\dots\dots(2.6)$$

Pada saat start:

$$S = 100\%; f_2 = f_1 \dots\dots\dots(2.7)$$

Demikianlah terlihat bahwa pada saat start dan rotor belum berputar, frekuensi pada stator dan rotor sama. Dalam keadaan rotor berputar, frekuensi arus motor dipengaruhi oleh slip ($f_2 = Sf_1$). Karena tegangan induksi dan reaktansi kumparan rotor merupakan fungsi frekuensi, maka harganya turut pula dipengaruhi oleh slip.

$$E_{2s} = 4.44f_2N_2\phi_m \dots\dots\dots(2.8)$$

$$E_{2s} = 4.44f_1N_2\phi_m \dots\dots\dots(2.9)$$

$$E_{2s} = SE_2 \dots\dots\dots(2.10)$$

E_2 = tegangan induksi pada saat start (diam)

E_{2s} = tegangan induksi pada saat motor berputar.

$$X_{2s} = 2\pi f_2 L_{2s} \dots\dots\dots(2.11)$$

$$X_{2s} = 2\pi f_1 L_{2s} \dots\dots\dots(1.12)$$

$$X_{2s} = SX_2 \dots\dots\dots(2.13)$$

X_{2s} = adalah reaktansi pada saat rotor berputar

X_2 = adalah reaktansi pada saat start (diam)

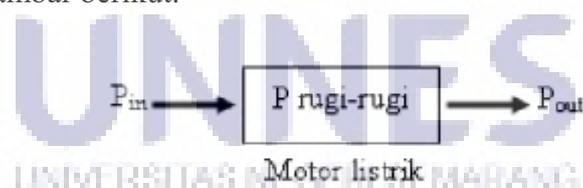
2.6 Daya dan Torsi

Motor induksi sebagai penggerak mula (*primeover*) mempunyai banyak kelebihan dibandingkan dengan motor jenis lain khususnya bila dibandingkan dengan motor DC. Sehingga dalam pergerakan beban dengan mesin-mesin listrik

yang berdaya besar banyak digunakan motor listrik jenis motor induksi sangkar tupai sebagai penggerak utama.

Ditinjau dari rotornya motor induksi dibagi dua yaitu motor induksi sangkar tupai (*squirrel cage induction motor*) dan motor induksi rotor lilit (*wound rotor induction motor*). Motor induksi sangkar tupai mempunyai kecepatan putar dan torsi yang konstan atau sulit diatur, sedangkan motor induksi rotor lilit mempunyai kecepatan putar dan torsi yang dapat diatur (*adjustable*). Sebenarnya dengan menggunakan motor induksi rotor lilit, kelemahan motor induksi sangkar tupai dapat diperbaiki, tetapi karena konstruksi motor induksi rotor lilit tidak sederhana maka pengoperasiannya cukup sulit, perlu peralatan tambahan dan harganya lebih mahal bila dibandingkan dengan motor induksi sangkar tupai.

Karena daya masuk ke motor bersifat elektrik maka setelah dikurangi dengan seluruh rugi daya yang ada di dalam motor, keluarannya juga akan bersifat elektrik, lihat gambar berikut.



Gambar 2.6 tiga macam daya pada motor listrik

Apabila diketahui besarnya daya keluar maka akan dapat dihitung besarnya torsi pada poros motor dengan korelasi seperti yang ditunjukkan pada rumus:

$$P = \frac{T \cdot n}{9,55} \dots \dots \dots (2.14)$$

Dengan:

P : daya keluar (Watt)

T : torsi (N-m) dan n putaran (rpm) pada poros motor

Dari gambar 2.6 terlihat bahwa untuk menghitung besarnya daya keluar motor, perlu diketahui terlebih dahulu besarnya seluruh rugi daya yang ada di dalam motor. Terdapat banyak rugi-rugi daya yang ada pada motor induksi yaitu meliputi rugi inti stator, rugi lilitan stator, rugi inti rotor, rugi lilitan rotor, rugi fluks bocor, rugi gesek dan rugi angin. Jadi untuk menghitung daya keluaran motor harus diketahui seluruh rugi daya yang ada.

2.7 Hubungan Antara Kecepatan, Tegangan, dan Frekuensi Terhadap Torsi

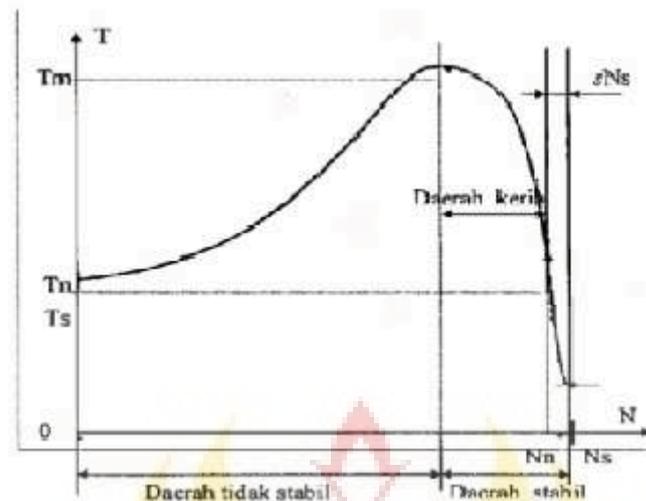
2.7.1 Hubungan kecepatan dengan torsi

Berdasarkan rumus $P_m = \omega \cdot T$ jika daya mekanik (P_m) dianggap konstan maka besarnya torsi tergantung dari kecepatan sudut (ω).

$$\omega = 2\pi \frac{n_r}{60} \dots\dots\dots(2.15)$$

Jika putaran rotor dipercepat, maka torsi yang dihasilkan kecil, sedangkan jika torsinya besar maka kecepatannya lambat. Gambar 2.7 menggambarkan hubungan antara kecepatan dengan torsi.

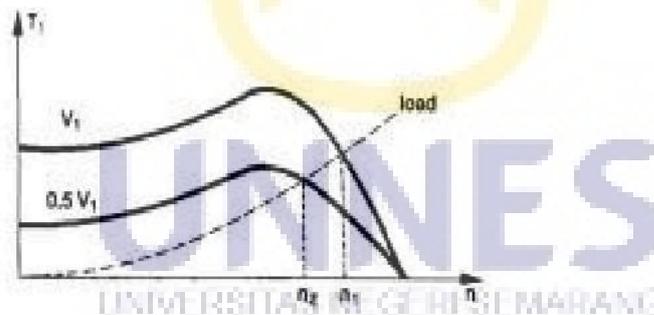
Pada beban penuh motor berputar pada kecepatan N_n . Pada saat beban mekanik meningkat, kecepatan motor menurun sampai torsi maksimum sama dengan torsi beban. Bila torsi beban melebihi T_m , maka motor akan berhenti.



Gambar 2 7 kurva kecepatan terhadap torsi
(Dasar Tenaga Listrik 1989)

2.7.2 Hubungan tegangan dengan torsi

Besarnya torsi suatu motor induksi tergantung pada tegangan dan frekuensi yang diberikan ke stator. Bila f dibuat tetap maka $T \approx V_2$.

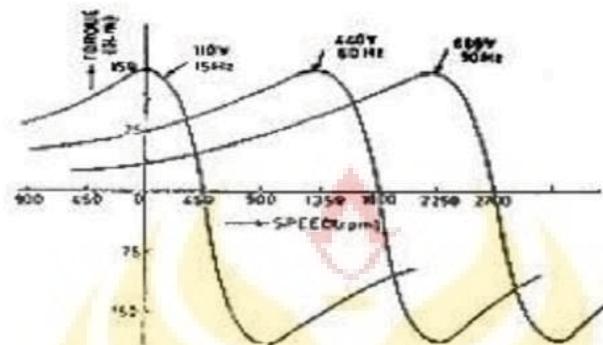


Gambar 2 8 kurva tegangan terhadap torsi
(Dasar Tenaga Listrik 1989)

2.7.3 Hubungan frekuensi dengan torsi

Kecepatan sinkron motor induksi tergantung pada frekuensi input. Untuk menjaga agar konstan, maka tegangan dan frekuensi input bervariasi sama

dan sebanding. Jika frekuensi dibuat dua kali, maka frekuensi juga dibuat dua kali. Jika frekuensi dan tegangan input dinaikkan, maka kecepatan putar motor akan semakin cepat.



Gambar 2 9 kurva frekuensi terhadap torsi (Dasar Tenaga Listrik 1989)

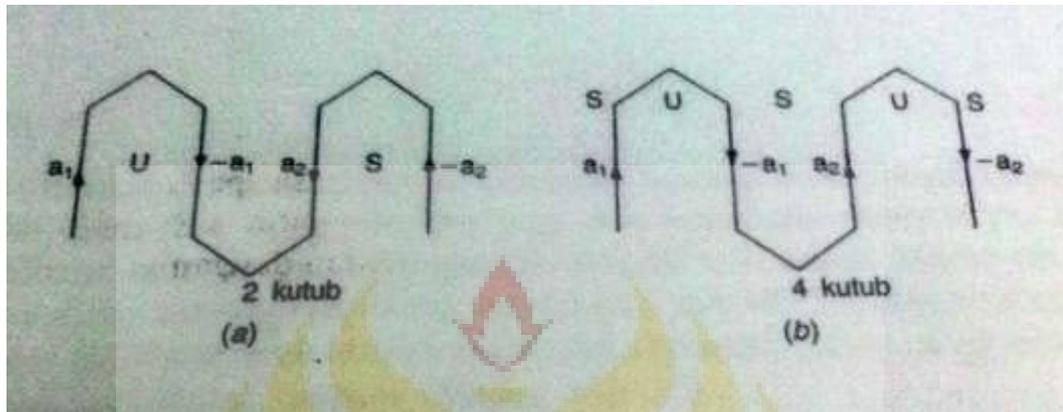
2.8 Pengaturan putaran

Motor induksi pada umumnya berputar dengan kecepatan konstan, mendekati kecepatan sinkronnya. Meskipun demikian pada penggunaan tertentu dikehendaki juga adanya pengaturan putaran. Pengaturan motor induksi memerlukan biaya yang agak tinggi. Biasanya pengaturan ini dapat dilakukan dengan beberapa cara yaitu dengan mengubah jumlah kutub motor, mengubah frekuensi jala-jala, mengatur tegangan jala-jala, dan mengatur tahanan luar.

2.8.1 Mengubah jumlah kutub motor

Karena $n_s = 120f/p$, maka perubahan jumlah kutub (p) atau frekuensi (f) akan mempengaruhi putaran. Jumlah kutub dapat diubah dengan merencanakan kumparan stator dengan sedemikian rupa sehingga dapat menerima tegangan masuk pada posisi kumparan yang berbeda-

beda. Biasanya diperoleh dua perubahan kecepatan sinkron dengan mengubah jumlah kutub dari 2 menjadi 4, seperti pada gambar berikut.



Gambar 2 10 kutub motor induksi (Dasar Tenaga Listrik 1989)

2.8.2 Mengubah frekuensi jala-jala

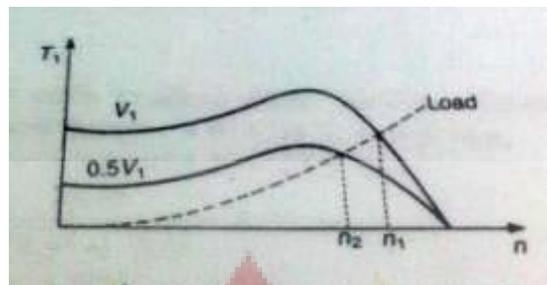
Pengaturan putaran motor induksi dapat dilakukan dengan mengubah-ubah harga frekuensi jala. Hanya saja untuk menjaga keseimbangan kerapatan fluks, perubahan tegangan harus dilakukan bersamaan dengan perubahan frekuensi. Persoalannya sekarang adalah bagaimana mengatur frekuensi dengan menggunakan *solid state frequency converter*.

2.8.3 Mengatur tegangan jala-jala

$$T = \frac{3}{w} (V_1)^2 \frac{S a^2 R_2}{(a^2 R_2)^2 + S^2 (a^2 X_2)^2} \dots \dots \dots (2.16)$$

Dari persamaan kopel motor induksi diatas diketahui bahwa kopel sebanding dengan pangkat dua tegangan yang diberikan. Untuk karakteristik beban seperti terlihat pada gambar 2.11, kecepatan akan berubah dari n_1 ke n_2 untuk tegangan masuk setengah tegangan semula.

Cara ini hanya menghasilkan pengaturan putaran yang terbatas (daerah pengaturan sempit).

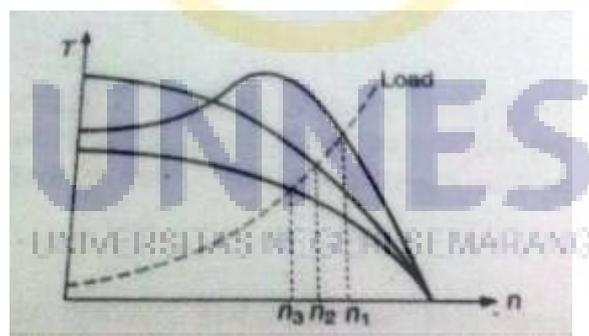


Gambar 2 11 grafik tegangan jala-jala
(Dasar Tenaga Listrik 1989)

2.8.4 Pengaturan tahanan luar motor

Tahanan luar motor induksi rotor brlitan dapat diatur, dengan demikian karakteristik kopel kecepatan berbeda-beda seperti pada gambar

Putaran akan berubah dari n_1 ke n_2 dan dari n_2 ke n_3 dengan bertambahnya tahanan luar yang dihubungkan ke rotor.



Gambar 2 12 grafik tahanan luar motor
(Dasar Tenaga Listrik 1989)

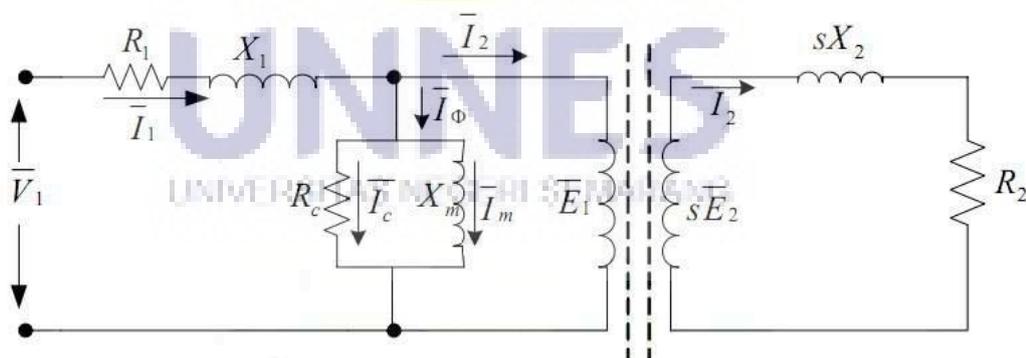
2.9. Generator induksi

Dengan menghubungkan sumber tegangan tiga fasa pada kumparan stator dihasilkan medan putar. Penggerak utama dipakai untuk memutar rotor searah

dengan arah medan putar. Bila slip dibuat negatif atau dengan kata lain kecepatan berputar rotor (n_r) lebih besar daripada kecepatan medan putar (n_s), maka mesin akan berfungsi sebagai generator dan energi listrik akan dikembalikan pada sistem jala-jala. Generator induksi jarang dipakai sebagai pembangkit tenaga listrik, penggunaannya yang penting adalah sebagai pengereman regeneratif. Untuk pemakaian motor induksi, yang pada saat-saat tertentu motor berputar melebihi kecepatan sinkronnya, maka secara otomatis motor akan bekerja sebagai generator dan berlangsunglah proses pengereman.

2.10. Rangkaian ekivalen motor induksi

Kerja motor induksi seperti juga kerja transformator adalah berdasarkan prinsip induksi-elektromagnetik. Oleh karena itu, motor induksi dapat dianggap sebagai transformator dengan rangkaian sekunder yang berputar. Rangkaian pengganti motor induksi dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.13 rangkaian pengganti motor induksi (Jeremia Purba, 2009)

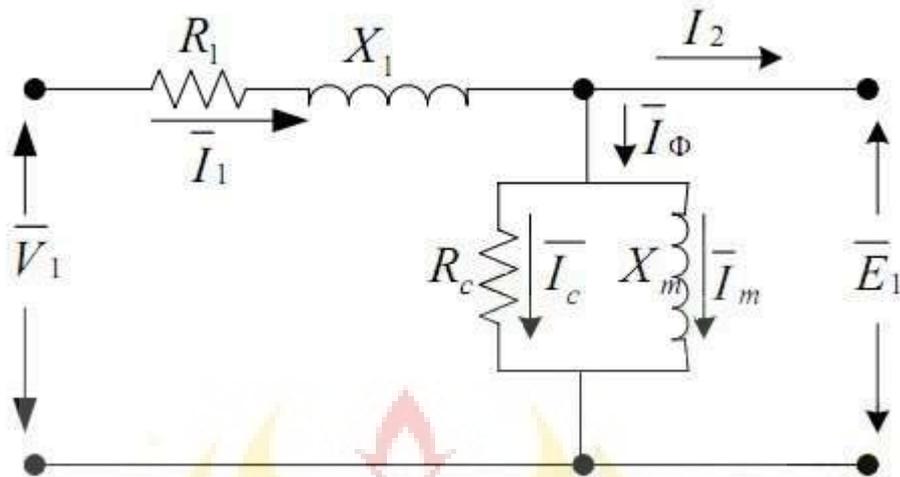
Untuk menentukan rangkaian ekivalen dari motor induksi tiga fasa, pertama-tama perhatikan keadaan pada stator. Gelombang fluks pada celah udara yang berputar sinkron membangkitkan ggl lawan tiga fasa yang seimbang di

dalam fasa-fasa stator. Besarnya tegangan terminal stator berbeda dengan ggl lawan sebesar jatuh tegangan pada impedansi bocor stator, sehingga dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\bar{V}_1 = \bar{E}_1 + \bar{I}_1(R_1 + jX_1)\text{Volt} \dots\dots\dots(2.17)$$

Dimana: $= \bar{V}_1$ tegangan terminal stator (Volt)
 $= \bar{E}_1$ ggl lawan yang dihasilkan oleh fluks celah udara resultan (Volt)
 $= \bar{I}_1$ arus stator (Ampere)
 $= R_1$ resistansi efektif stator (Ohm)
 $= jX_1$ reaktansi bocor stator (Ohm)

Seperti halnya transformator, arus stator dapat dipecah menjadi dua komponen, komponen beban dan komponen peneralan. Komponen beban \bar{I}_2 menghasilkan suatu fluks yang akan melawan fluks yang diakibatkan arus rotor. Komponen peneralan \bar{I}_ϕ , merupakan arus stator tambahan yang diperlukan untuk menghasilkan fluks celah udara resultan. Arus peneralan dapat dipecah menjadi komponen rugi-rugi inti I_C yang sephas dengan \bar{E}_1 dan komponen magnetisasi I_m yang tertinggal dari \bar{E}_1 sebesar 90° . Sehingga dapat dibuat rangkaian ekuivalen pada stator, seperti gambar 2.14.



Gambar 2 14 rangkaian ekivalen stator (Jeremia Purba, 2009)

Pada rotor belitan, jika belitan yang dililit sama banyaknya dengan jumlah kutub dan phasa stator. Jumlah lilitan efektif tiap phasa pada lilitan stator banyaknya a kali jumlah lilitan rotor. Bandingkan efek magnetis rotor ini dengan yang terdapat pada rotor ekivalen magnetic yang mempunyai jumlah lilitan yang sama seperti stator. Untuk kecepatan dan fluks yang sama, hubungan antara tegangan \bar{E}_{rotor} yang diimbaskan pada rotor yang sebenarnya dan tegangan \bar{E}_{2s} yang diimbaskan pada rotor ekivalen adalah

$$\bar{E}_{2s} = a\bar{E}_{rotor} \dots\dots\dots(2.18)$$

Bila rotor-rotor akan diganti secara magnetis, lilitan-ampere masing-masing harus sama dan hubungan antara arus rotor sebenarnya I_{rotor} dan arus I_{2s} , pada rotor ekivalen haruslah

$$\bar{I}_{2s} = \frac{\bar{I}_{rotor}}{a} \dots\dots\dots(2.19)$$

Akibatnya hubungan antara impedansi bocor frekuensi slip Z_{2s} dari rotor ekuivalen dan impedansi bocor frekuensi slip Z_{rotor} dari rotor yang sebenarnya haruslah sebagai berikut

$$Z_{2s} = \frac{\bar{E}_{2s}}{\bar{I}_{2s}} = \frac{a^2 \bar{E}_{rotor}}{\bar{I}_{rotor}} = a^2 Z_{rotor} \dots\dots\dots(2.20)$$

Karena rotor terhubung singkat, hubungan fasor antara ggl frekuensi slip \bar{E}_{2s} yang dibangkitkan pada phasa patokan dari rotor patokan dan arus \bar{I}_{2s} pada phasa tersebut adalah

$$\frac{\bar{E}_{2s}}{\bar{I}_{2s}} = Z_{2s} = R_2 + jsX_2 \dots\dots\dots(2.21)$$

Dimana: Z_{2s} = impedansi bocor rotor frekuensi slip/fasa (Ohm)

R_2 = tahanan rotor (Ohm)

sX_2 = reaktansi bocor patokan pada frekuensi slip (Ohm)

Reaktansi yang didapat pada persamaan (2.21) dinyatakan dalam cara yang demikian karena sebanding dengan frekuensi rotor dan slip. Jadi X_2 didefinisikan sebagai harga yang akan dimiliki oleh reaktansi bocor pada rotor dengan patokan pada frekuensi stator.

Pada stator ada gelombang fluks yang berputar pada kecepatan sinkron. Gelombang fluks ini akan mengimbaskan tegangan pada rotor dengan frekuensi slip sebesar \bar{E}_{2s} , dan ggl lawan stator \bar{E}_1 . Bila bukan karena efek kecepatan, tegangan rotor akan sama dengan tegangan stator, karena lilitan rotor identic dengan lilitan stator. Karena kecepatan relative gelombang fluks terhadap rotor

adalah s kali kecepatan terhadap stator, hubungan antara ggl efektif pada stator dan rotor adalah

$$\bar{E}_{2s} = s\bar{E}_2 \dots\dots\dots(2.22)$$

Gelombang fluks magnetic pada rotor oleh fluks magnetic yang dihasilkan komponen beban \bar{I}_2 dari arus stator, dan karenanya untuk harga efektif

$$\bar{I}_{2s} = \bar{I}_2 \dots\dots\dots(2.23)$$

Dengan membagi persamaan (2.22) dengan persamaan (2.23) didapatkan

$$\frac{\bar{E}_{2s}}{\bar{I}_{2s}} = \frac{s\bar{E}_2}{\bar{I}_2} \dots\dots\dots(2.24)$$

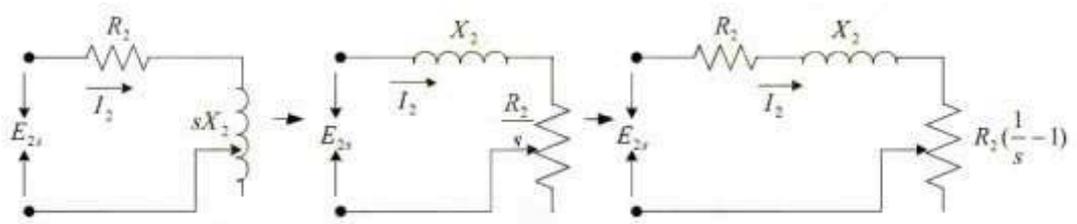
Didapat hubungan antara persamaan 2.24 dengan persamaan 2.21, yaitu

$$\frac{\bar{E}_{2s}}{\bar{I}_{2s}} = \frac{s\bar{E}_2}{\bar{I}_2} = R_2 + jsX_2 \dots\dots\dots(2.25)$$

Dengan membagi persamaan (2.25) dengan s , maka didapat

$$\frac{\bar{E}_2}{\bar{I}_2} = \frac{R_2}{s} + jX_2 \dots\dots\dots(2.26)$$

Dari persamaan (2.21), (2.22) dan (2.26) maka dapat digambarkan rangkaian ekivalen pada rotor seperti pada gambar berikut

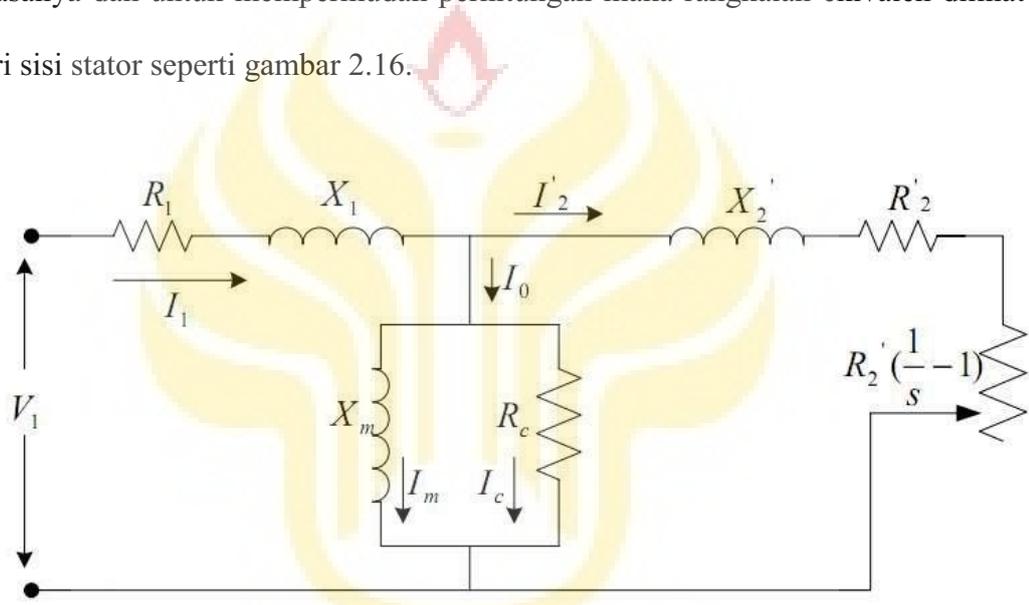


Gambar 2 15 rangkaian ekivalen rotor (Jeremia Purba, 2009)

$$\frac{R_2}{s} = \frac{R_2}{s} + R_2 - R_2 \dots\dots\dots(2.27)$$

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + R_2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \dots\dots\dots(2.28)$$

Dari penjelasan mengenai rangkaian ekuivalen pada stator dan rotor diatas, maka dapat dibuat rangkaian ekuivalen motor induksi tiga fasa pada masing-masing phasanya dan untuk mempermudah perhitungan maka rangkaian ekuivalen dilihat dari sisi stator seperti gambar 2.16.



Gambar 2 16 rangkaian ekuivalen motor induksi sisi stator (Jeremia Purba, 2009)

Dimana: $X'_2 = a^2 X_2 \dots\dots\dots(2.29)$

$R'_2 = a^2 R_2 \dots\dots\dots(2.30)$

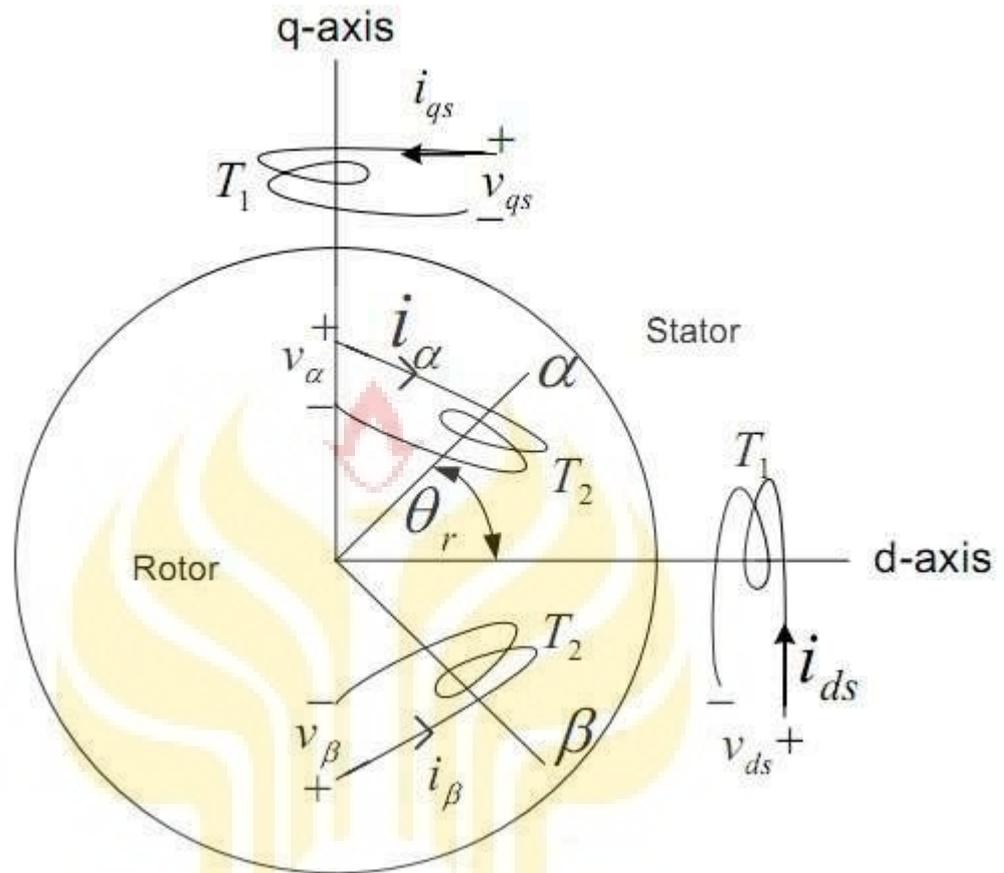
2.11. Model dinamik motor induksi

2.11.1. Model motor induksi dua fasa

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

1. Celah udara yang seragam (*uniform air gap*)
2. Kumputan stator dan rotor motor seimbang dengan *sistribusi magnetomotive force* (mmf) yang sinusoidal.
3. Induktansi bervariasi secara sinusoidal terhadap posisi rotor.
4. Perubahan parameter motor dan saturasi diabaikan.

Model dinamik motor induksi ini didapat dengan menggunakan model rotor induksi dua fasa dalam koordinat d (*direct*) dan q (*quadrature*). Motor induksi dua fasa dengan kumputan stator dan rotor ditunjukkan pada gambar 2.15.



Gambar 2 17 kumparan stator dan rotor motor induksi dua fasa (Jeremia Purba, 2009)

Tegangan terminal pada kumparan stator dan rotor merupakan penjumlahan tegangan jatuh pada resistansi dengan rata-rata perubahan fluks (persamaan 2.31 s/d 2.34), perubahan fluks ini merupakan perkalian arus dengan induktansi.

$$v_{qs} = R_q i_{qs} + p(L_{qq} i_{qs}) + p(L_{qd} i_{ds}) + p(L_{qa} i_a) + p(L_{qb} i_b) \dots\dots\dots(2.31)$$

$$v_{ds} = p(L_{dq} i_{qs}) + (R_d i_{ds}) + p(L_{dd} i_{ds}) + p(L_{da} i_a) + p(L_{db} i_b) \dots\dots(2.32)$$

$$v_a = p(L_{aq} i_{qs}) + p(L_{ad} i_{ds}) + R_a i_a + p(L_{aa} i_a) + p(L_{ab} i_b) \dots\dots\dots(2.33)$$

$$v_{\beta} = p(L_{\beta q}i_{qs}) + p(L_{\beta d}i_{ds}) + p(L_{\beta\alpha}i_{\alpha}) + R_{\beta}i_{\beta} + p(L_{\beta\beta}i_{\beta}) \dots\dots\dots(2.34)$$

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

$$L_{\alpha\alpha} = L_{\beta\beta} = L_{rr} \quad (L_{rr} = \text{Induktansi rotor}) \dots\dots\dots(2.35)$$

$$L_{dd} = L_{qq} = L_s \quad (L_s = \text{Induktansi stator}) \dots\dots\dots(2.36)$$

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

$$L_{\alpha\beta} = L_{\beta\alpha} = 0 \dots\dots\dots(2.37)$$

$$L_{dq} = L_{qd} = 0 \dots\dots\dots(2.38)$$

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

$$L_{\alpha d} = L_{d\alpha} = L_{sr} \cos\theta_r \dots\dots\dots(2.39)$$

$$L_{\beta d} = L_{d\beta} = L_{sr} \sin\theta_r \dots\dots\dots(2.40)$$

$$L_{\alpha q} = L_{q\alpha} = L_{sr} \sin\theta_r \dots\dots\dots(2.41)$$

$$L_{\beta q} = L_{q\beta} = -L_{sr} \cos\theta_r \dots\dots\dots(2.42)$$

Dengan L_{sr} adalah nilai puncak induktansi bersama kumparan stator dengan kumparan rotor. Persamaan 2.42 bernilai negatif karena arus yang bernilai positif pada kumparan β menghasilkan fluks linkage yang bernilai negative pada kumparan q . Dengan mensubstitusikan persamaan 2.35 s/d 2.42 ke dalam persamaan 2.31 s/d 2.34 dihasilkan persamaan differensial dengan induktansi yang bervariasi terhadap waktu. Persamaan tersebut menjadi:

$$v_{ds} = (R_s + L_s p) i_{qs} + L_{sr} p (i_{\alpha} \sin\theta_r) - L_{sr} p (i_{\beta} \cos\theta_r) \dots\dots\dots(2.43)$$

$$v_{ds} = (R_s + L_s p)i_{ds} + L_{sr} p(i_{\alpha} \cos \theta_r) + L_{sr} p(i_{\beta} \sin \theta_r) \dots \dots \dots (2.44)$$

$$v_{\alpha} = L_{sr} p(i_{qs} \sin \theta_r) + L_{sr} p(i_{ds} \cos \theta_r) + (R_{rr} + L_{rr} p)i_{\alpha} \dots \dots \dots (2.45)$$

$$v_{\beta} = -L_{sr} p(i_{qs} \cos \theta_r) + L_{sr} p(i_{ds} \sin \theta_r) + (R_{rr} + L_{rr} p)i_{\beta} \dots \dots \dots (2.46)$$

Dengan $R_s = R_q = R_d =$ tahanan stator

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

$L_{rr} =$ induktansi rotor

$L_s =$ induktansi rotor

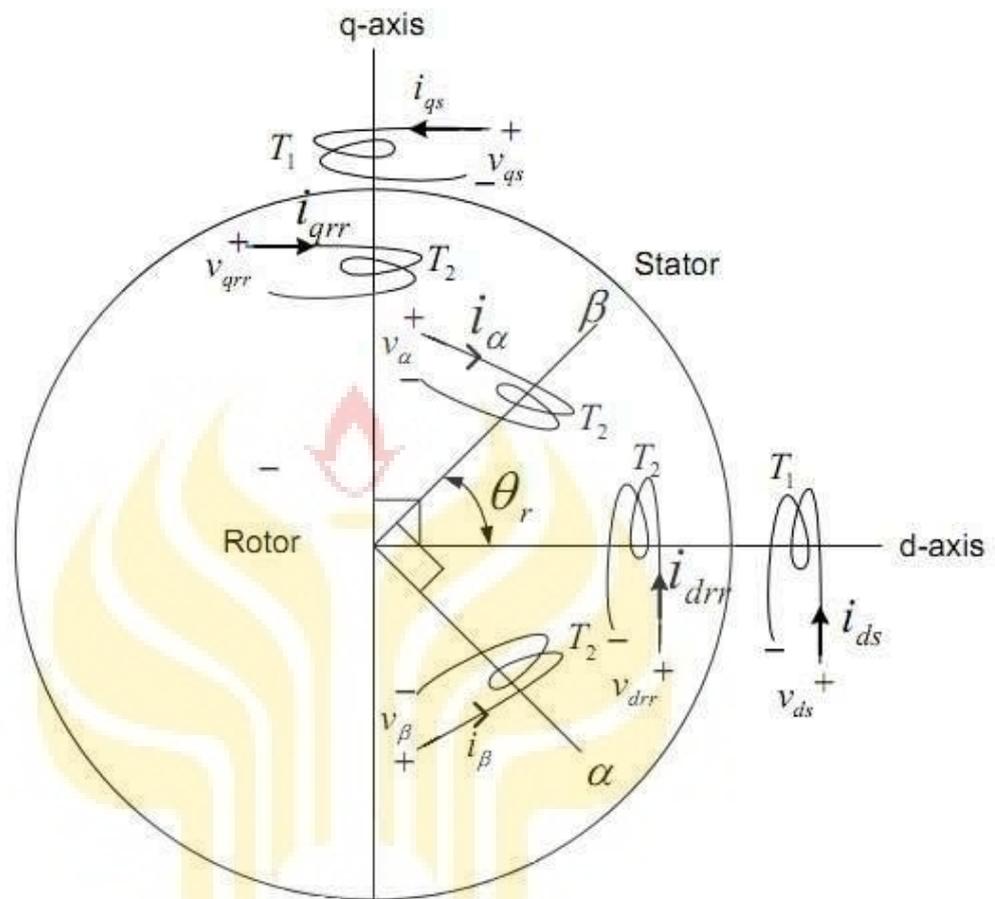
$L_{sr} =$ induktansi bersama kumparan stator dengan rotor

Persamaan 2.43 s/d 2.46 berubah-ubah menurut waktu karena dipengaruhi oleh posisi sesaat rotor (θ_r). Oleh karena itu untuk mempermudah menganalisis performansi motor dibutuhkan persamaan yang lebih sederhana yang besarnya tidak tergantung pada posisi pada rotor.

UNNES

2.11.2. Transformasi untuk memperoleh matriks yang konstan

Transformasi untuk memperoleh induktansi yang konstan diperoleh dengan cara menggantikan model rotor yang sebenarnya (*actual*) dengan model khayalan pada koordinat d, q seperti ditunjukkan pada gambar 2.16



Gambar 2 18 transformasi variabel rotor dari nilai aktual ke nilai khayalan (Jeremia Purba, 2009)

Pada proses ini nilai khayalan rotor setiap fasanya memiliki jumlah belitan yang sama dan juga menghasilkan mmf (*magnetomotif force*) yang sama dengan kumparan aktual rotor. Dengan memproyeksikan kumparan α dan β ke sumbu d-axis dan q-axis, maka akan didapatkan arus pada kumparan khayalan i_{drr} dan i_{qrr} (persamaan 2.47).

$$\begin{bmatrix} i_{drr} \\ i_{qrr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \sin\theta_r \\ \sin\theta_r & -\cos\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.47)$$

Transformasi ini berlaku untuk tegangan, arus dan fluks *linkages* pada sebuah mesin. Persamaan 2.47 ditulis menjadi:

$$i_{dqrr} = [T_{\alpha\beta}]i_{\alpha\beta} \dots\dots\dots(2.48)$$

Dengan,

$$i_{dqrr} = [i_{drr} \quad i_{qrr}]^t \dots\dots\dots(2.49)$$

$$i_{\alpha\beta} = [i_{\alpha} \quad i_{\beta}]^t \dots\dots\dots(2.50)$$

Dan,

$$T_{\alpha\beta} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \sin\theta_r \\ \sin\theta_r & -\cos\theta_r \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.51)$$

Transformasi dari bentuk $\alpha - \beta$ axis ke d-q axis berlaku juga untuk sebaliknya karena:

$$T_{\alpha\beta} = T_{\alpha\beta}^{-1} \dots\dots\dots(2.52)$$

Dengan demikian diperoleh:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \sin\theta_r \\ \sin\theta_r & -\cos\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{drr} \\ i_{qrr} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.53)$$

Dan untuk persamaan tegangan diperoleh:

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \sin\theta_r \\ \sin\theta_r & -\cos\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{drr} \\ v_{qrr} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.54)$$

Dengan memasukkan transformasi pada persamaan 2.47 ini kedalam persamaan 2.43 dan 2.44 didapatkan

$$v_{qs} = (R_s + L_s p)i_{qs} + (L_{sr} p)i_{qrr} \dots\dots\dots(2.55)$$

$$v_{ds} = (R_s + L_s p)i_{ds} + L_{sr} p(i_{drr}) \dots\dots\dots(2.56)$$

Dengan memasukkan nilai i_α dari persamaan 2.53 kedalam persamaan 2.45 didapatkan

$$\begin{aligned} v_\alpha = & L_{sr} p(i_{qs} \sin \theta_r) + L_{sr} p(i_{ds} \cos \theta_r) + (R_{rr} + L_{rr} p)[i_{drr} \cos \theta_r + \\ & i_{qrr} \sin \theta_r] = L_{sr} \sin \theta_r p i_{qs} + L_{sr} i_{qs} \theta_r \cos \theta_r + L_{sr} \cos \theta_r p i_{ds} - \\ & L_{sr} i_{ds} \theta_r \sin \theta_r + R_{rr} [i_{drr} \cos \theta_r + i_{qrr} \sin \theta_r] + L_{rr} \cos \theta_r p i_{drr} - \\ & L_{rr} i_{drr} \theta_r \sin \theta_r + L_{rr} \sin \theta_r p i_{qrr} + L_{rr} i_{qrr} \theta_r \cos \theta_r \dots\dots\dots(2.57) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_\alpha = & [L_{sr} p i_{qs} - L_{sr} \theta_r i_{ds} - L_{rr} \theta_r i_{drr} + (R_{rr} + L_{rr} p) i_{qrr}] \sin \theta_r + \\ & [L_{sr} \theta_r i_{qs} + L_{sr} p i_{ds} + L_{rr} \theta_r i_{qrr} (R_{rr} + L_{rr}) i_{drr}] \cos \theta_r \dots\dots\dots(2.58) \end{aligned}$$

Dengan θ_r adalah turunan dari θ_r terhadap waktu.

Dari persamaan transformasi 2.55 bahwa $v_\alpha = v_{drr} \cos \theta_r + v_{qrr} \sin \theta_r$ sehingga:

$$v_{drr} = [L_{sr} \theta_r i_{qs} + L_{sr} p i_{ds} + L_{rr} \theta_r i_{qrr} (R_{rr} + L_{rr}) i_{drr}] \dots\dots\dots(2.59)$$

$$v_{qrr} = [L_{sr} p i_{qs} - L_{sr} \theta_r i_{ds} - L_{rr} \theta_r i_{drr} + (R_{rr} + L_{rr} p) i_{qrr}] \dots\dots\dots(2.60)$$

Dari 2.55, 2.56, 2.58 dan 2.59 persamaan vektor tegangan tersebut dituliskan dalam bentuk matriks yaitu:

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{qrr} \\ v_{drr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & 0 & L_{sr} p & 0 \\ 0 & R_2 + L_2 p & 0 & L_{sr} p \\ L_{sr} p & -L_{sr} \theta_r & R_{rr} + L_{rr} p & -L_{rr} \theta_r \\ L_{sr} \theta & L_{sr} p & L_{rr} \theta_r & R_{rr} + L_{rr} p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qrr} \\ i_{drr} \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

Seperti halnya pada rangkaian ekivalen trafo, jika dilihat dari sisi stator persamaan 2.60 menjadi:

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{qr} \\ v_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & 0 & L_m p & 0 \\ 0 & R_2 + L_2 p & 0 & L_m p \\ L_m p & -L_m \theta_r & R_r + L_r p & -L_r \theta_r \\ L_m \theta & L_m p & L_r \theta_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(2.62)$$

Dengan:

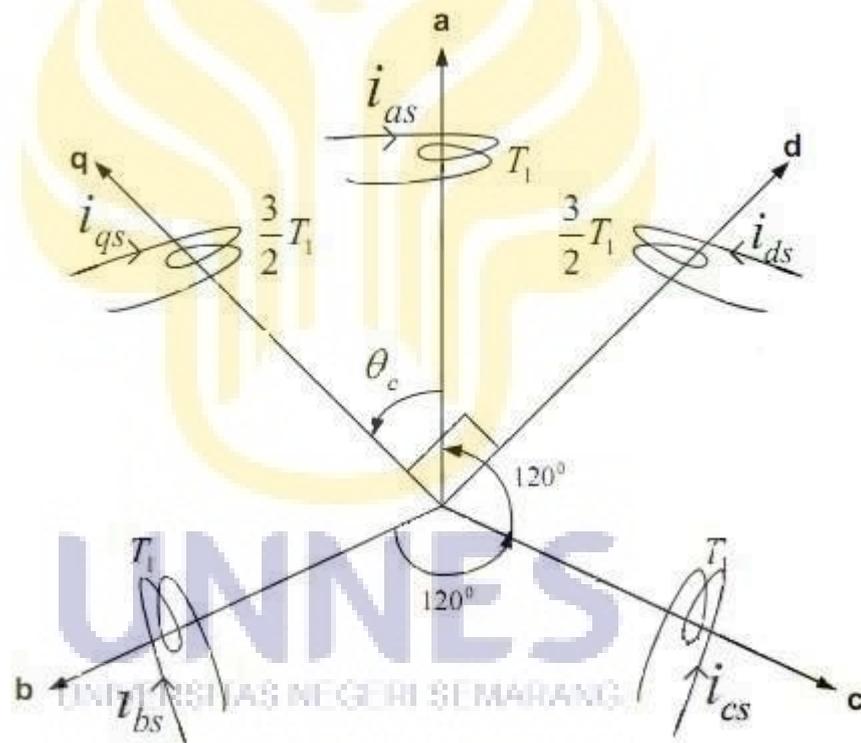
$$R_r = a^2 R_{rr}, i_{qr} = \frac{i_{qrr}}{a}, v_{qr} = a v_{qrr}, a = \frac{T_1}{T_2} \quad \dots\dots\dots(2.63)$$

$$L_r = a^2 L_{rr}, i_{dr} = \frac{i_{drr}}{a}, v_{dr} = a v_{drr}, L_m = a L_{sr} \quad \dots\dots\dots(2.64)$$

Persamaan 2.61 menunjukkan bahwa vector tegangan merupakan perkalian maatriks impedansi dengan vektor arus. Disini induktansi pada matriks konstan dan tidak tergantung lai pada posisi rotor. Sebagian elemen matriks impedansi bergantung pada kecepatan rotor, sehingga persamaan 2.61 linier jika matriks impedansi konstan. Matriks impedansi yang konstan terjadi jika kecepatan konstan (*steady state*). Jika kecepatan rotor berubah-ubah (dinamik) sehingga perubahan ini bergantung kepada arus maka persamaan tersebut menjadi nonlinier.

2.11.3. Transformasi tiga fasa ke dua fasa

Model motor induksi yang dibahas sebelumnya adalah untuk mesin dua fasa. Mesin induksi dua fasa jarang sekali digunakan dalam aplikasi industri. Model dinamik motor induksi tiga fasa diturunkan dari mesin dua fasa. Kedua model ini ekuivalen karena kumparan pada dua fasa dan tiga fasa menghasilkan mmf (*magnetomotive force*) dan arus yang sama. Gambar 2.17 menunjukkan kumparan dua fasa dan tiga fasa.



Gambar 2 19 kumparan stator motor dua fasa dan tiga fasa (Jeremia Purba, 2009)

Dengan menganggap kumparan tiga fasa masing-masing memiliki jumlah belitan (T_1) per-fasa. Untuk menghasilkan mmf yang sama maka kumparan dua fasa mempunyai jumlah belitan ($3T_1/2$) per-fasa. Mmf

pada sumbu d - q didapat dengan memproyeksikan mmf (*magnetomotive force*) tiga fasa pada sumbu d - q . Dimisalkan sumbu q tertinggal θ_c dari sumbu a , maka hubungan antara arus fasa d - q dengan fasa abc adalah:

$$\begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_c & \cos\left(\theta_c - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_c + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\theta_c & \sin\left(\theta_c - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_c + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.65)$$

Arus i_o menyatakan ketidakseimbangan arus fasa a , b , dan c yang dikenal sebagai arus urutan nol. Persamaan diatas dituliskan dengan:

$$i_{qdo} = [T_{abc}]i_{abc} \dots\dots\dots(2.66)$$

Dengan,

$$i_{qdo} = [i_{qs} \quad i_{ds} \quad i_o]^t \dots\dots\dots(2.67)$$

$$i_{abc} = [i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs}]^t \dots\dots\dots(2.68)$$

Dan variabel transformasi dari fasa abc ke fasa d - q adalah:

$$[T_{abc}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta_c & \cos\left(\theta_c - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_c + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\theta_c & \sin\left(\theta_c - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_c + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.69)$$

Transformasi dari arus dua fasa ke arus tiga fasa adalah:

$$i_{abc} = [T_{abc}]^{-1}i_{qdo} \dots\dots\dots(2.70)$$

$$[T_{abc}]^{-1} \begin{bmatrix} \cos\theta_c & \sin\theta_c & 1 \\ \cos\left(\theta_c - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_c - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_c + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_c + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.71)$$

Jika sumbu q pada gambar 2.19 berimpit dengan fasa a ($\theta_c = 0$), maka transformasi dari sumbu abc ke sumbu d-q menjadi seperti pada persamaan 2.72. kondisi seperti ini disebut model *stator reference frames*.

$$T_{abc}^s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.72)$$

Sehingga untuk tegangan pada dua fasa:

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_0 \end{bmatrix} = T_{abc}^s \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.73)$$

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.74)$$

Sehingga,

$$v_{qs} = \frac{2}{3} \left[v_{as} - \frac{1}{2}(v_{bs} + v_{cs}) \right] \dots\dots\dots(2.75)$$

Untuk sistem tiga fasa yang seimbang berlaku:

$$v_{as} + v_{bs} + v_{cs} = 0 \dots\dots\dots(2.76)$$

Maka

$$(v_{bs} + v_{cs}) = -v_{as} \dots\dots\dots(2.77)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.77 kedalam persamaan 2.75 didapatkan tegangan *quadrature stator* (v_{qs}) menjadi:

$$v_{qs} = \frac{2}{3} \left[\frac{3}{2} v_{as} \right] = v_{as} \dots\dots\dots(2.78)$$

Dengan cara yang sama didapatkan

$$v_{ds} = \frac{1}{\sqrt{3}} (v_{cs} - v_{bs}) = \frac{1}{\sqrt{3}} v_{cb} \dots\dots\dots(2.79)$$

Dari persamaan 2.78 dan 2.79 didapatkan hubungan tegangan stator mesin dua phasa dengan mesin tiga phasa. Transformasi ini berlaku juga untuk arus dan juga fluks. Dengan demikian:

$$i_{qs} = i_{as} \dots\dots\dots(2.80)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{cs} - i_{bs}) \dots\dots\dots(2.81)$$

2.12. Pengenalan Matlab/Simulink

Matlab (*Matrix Laboratory*) adalah sebuah program untuk analisis dan komputasi numerik dan merupakan suatu bahasa pemrograman matematika lanjutan yang dibentuk dengan dasar pemikiran menggunakan sifat dan bentuk matriks. Pada awalnya, program ini merupakan *interface* untuk koleksi rutin-rutin numerik dari proyek linpack dan eispack, dan dikembangkan menggunakan bahasa fortran namun sekarang merupakan produk komersial dari perusahaan Mathworks, Inc. yang dalam perkembangan selanjutnya dikembangkan

menggunakan bahasa C++ dan assembler (utamanya untuk fungsi-fungsi dasar matlab).

Matlab telah berkembang menjadi sebuah *environment* pemrograman yang canggih yang berisi fungsi-fungsi *built-in* untuk melakukan tugas pengolahan sinyal, aljabar linier, dan kalkulasi matematis lainnya. matlab juga berisi *toolbox* yang berisi fungsi-fungsi tambahan untuk aplikasi khusus. Matlab bersifat *extensible*, dalam arti bahwa seorang pengguna dapat menulis fungsi baru untuk ditambahkan pada *library* ketika fungsi-fungsi *built-in* yang tersedia tidak dapat melakukan tugas tertentu. Kemampuan pemrograman yang dibutuhkan tidak terlalu sulit bila Anda telah memiliki pengalaman dalam pemrograman bahasa lain seperti *C*, *pascal*, atau *fortran*.

Matlab merupakan merk software yang dikembangkan oleh Mathworks.Inc. (lihat <http://www.mathworks.com>) merupakan software yang paling efisien untuk perhitungan numeric berbasis matriks. Dengan demikian jika di dalam perhitungan kita dapat menformulasikan masalah ke dalam format matriks maka matlab merupakan software terbaik untuk penyelesaiannya.

Matlab (*Matrix Laboratory*) yang merupakan bahasa pemrograman tingkat tinggi berbasis pada matriks sering digunakan untuk teknik komputasi numerik, yang digunakan untuk menyelesaikan masalah-masalah yang melibatkan operasi matematika elemen, matrik, optimasi, aproksimasi dll. Sehingga Matlab banyak digunakan pada :

- Matematika dan Komputansi

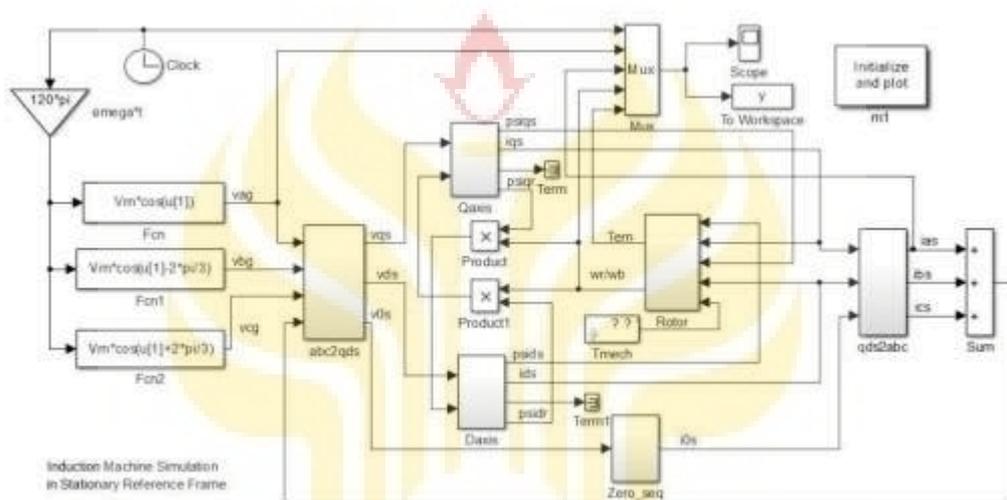
- Pengembangan dan Algoritma
- Pemrograman modeling, simulasi, dan pembuatan prototipe
- Analisa Data , eksplorasi dan visualisasi
- Analisis numerik dan statistik
- Pengembangan aplikasi teknik

Simulasi dapat dilakukan dengan berbagai alat bantu atau perangkat lunak, salah satu perangkat lunak yang lengkap dan mempunyai fasilitas berbagai pendukung perhitungan matematis, modeling, *stateflow* dan *toolbox* adalah Simulink. Simulink merupakan bagian tambahan dari software matlab. Simulink dapat digunakan sebagai sarana pemodelan, simulasi dan analisa dari sistem dinamik dengan menggunakan antarmuka grafis (GUI). Simulink terdiri dari beberapa kumpulan *toolbox* yang dapat digunakan untuk analisa sistem linier dan non-linier. Beberapa library yang sering digunakan dalam sistem kontrol antara lain *math*, *sinks* dan *sources*.

2.13. Rangkaian Pemodelan Motor Induksi Tiga Fasa

Simulasi keadaan dinamik motor induksi tiga fasa dilakukan dengan menggunakan program Simulink, Matlab versi R2014b yang merupakan program berorientasi pada blok yang berfungsi untuk mensimulasikan keadaan dinamik suatu sistem. Di dalam simulink terdapat dua bagian utama yaitu blok dan garis, blok digunakan untuk membuat, memodifikasi serta menggabungkan output ataupun signal, sedangkan garis berfungsi untuk memindahkan signal dari blok satu ke blok lainnya. Prinsip kerja dari perangkat lunak Simulink

ini ialah penggabungan blok yang didasarkan pada persamaan matematik dari suatu sistem yang akan digambarkan respon sistemnya. Dalam pemodelan ini dilakukan simulasi karakteristik mesin dengan sinyal input yang sama (amplitudo tetap). Berikut blok diagram pemodelan mesin induksi tiga fasa dengan matlab/simulink:



Gambar 2 20 diagram keseluruhan dari motor induksi

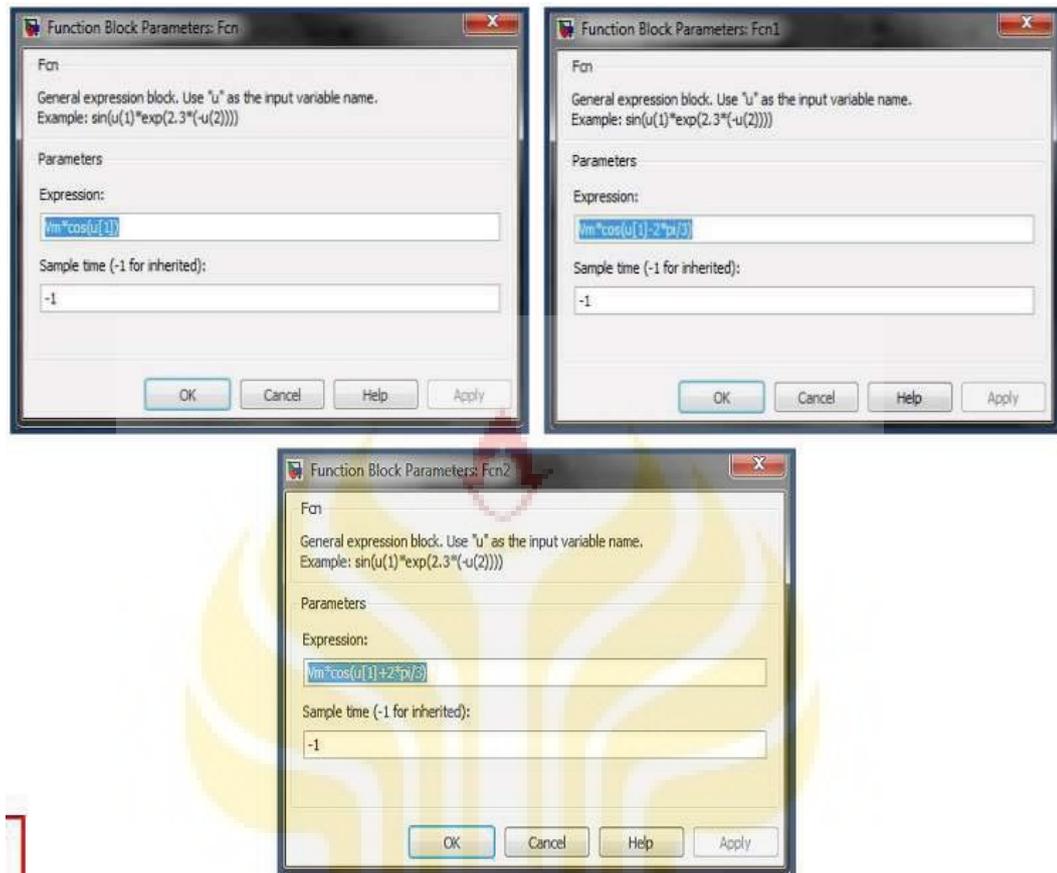
Pada gambar 2.20 menunjukkan blok diagram secara menyeluruh dari simulasi mesin induksi tiga fasa dengan kerangka acuan tetap dengan amplitudo yang sama. Blok-blok tersebut meliputi Blok F_{cn} , F_{cn1} , dan F_{cn2} merupakan *Function Blok Parameter* (F_{cn}) yang meliputi tegangan stator dengan amplitudo yang sama dengan mewakili persamaan :

$$F_{cn} \Rightarrow v_{as} = V_{ms} \cos(\omega_e t) \dots\dots\dots(2.82)$$

$$F_{cn1} \Rightarrow v_{bs} = V_{ms} \cos\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right) \dots\dots\dots(2.83)$$

$$F_{cn2} \Rightarrow v_{cs} = V_{ms} \cos\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right) \dots\dots\dots(2.84)$$



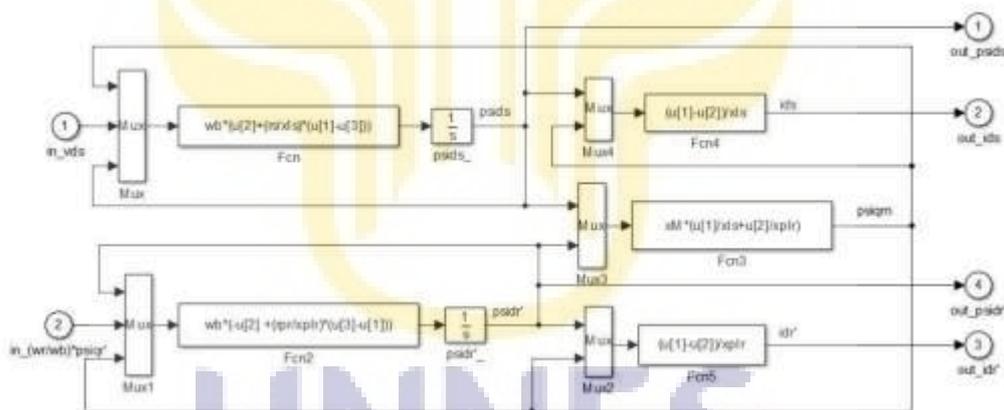


Gambar 2 21 function block parameter tegangan stator

Sedangkan pada blok tersebut terdapat pula beberapa sub blok di dalamnya, yang meliputi *d-axis* blok, *q-axis* blok, transformasi abc ke dq0, rotor blok, transformasi dq-abc blok, dan *zero sequence* blok. Blok-blok tersebut tersusun berdasarkan persamaan matematis. Berikut blok-blok sub sistem tersebut :

- D blok axis

D-axis blok merupakan blok yang mengimplementasikan persamaan-persamaan stator dan rotor hasil dari transformasi abc-dq0 pada sumbu d. Persamaan matematis tersebut meliputi :



Gambar 2 22 diagram blok D-axis

$$F_{cn} \rightarrow \psi_{ds}^s = \omega_b \int \left\{ v_{ds}^s + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{md}^s - \psi_{ds}^s) \right\} dt \dots\dots\dots(2.85)$$

$$F_{cn2} \rightarrow \psi_{ds}^s = \omega_b \int \left\{ v_{dr}^s - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{qr}^s + \frac{r_r}{x_{lr}} (\psi_{md}^s - \psi_{dr}^s) \right\} dt \dots\dots\dots(2.86)$$

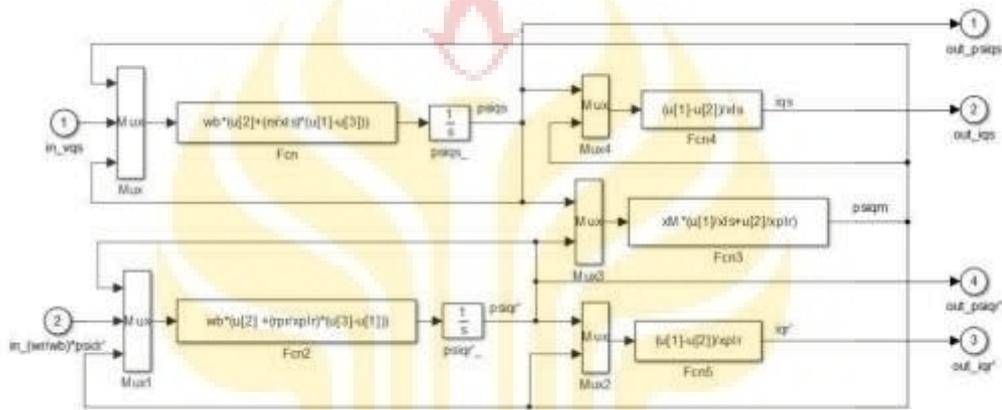
$$F_{cn3} \rightarrow \psi_{mdq}^s = X_M \left\{ \frac{\psi_{dqs}^s}{x_{ls}} + \frac{\psi_{dqr}^s}{x_{lr}} \right\} \dots\dots\dots(2.87)$$

$$F_{cn4} \rightarrow i_{qs}^s = \frac{\psi_{ds}^s - \psi_{md}^s}{x_{ls}} \dots\dots\dots(2.88)$$

$$F_{cn5} = i_{qr}^s = \frac{\psi_{dr}^s - \psi_{md}^s}{x'_{lr}} \dots\dots\dots(2.89)$$

- Q blok axis

Q-axis blok merupakan blok yang mengimplementasikan persamaan-persamaan stator dan rotor hasil dari transformasi abc-dq0 pada sumbu q. Persamaan matematis tersebut meliputi :



Gambar 2 23 diagram blok Q-axis

$$F_{cn} \rightarrow \psi_{qs}^s = \omega_b \int \left\{ v_{qs}^s + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{mq}^s - \psi_{qs}^s) \right\} dt \dots\dots\dots(2.90)$$

$$F_{cn2} \rightarrow \psi'_{qr}^s = \omega_b \int \left\{ v'_{qr}^s - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi'_{dr}^s + \frac{r'_r}{x'_{lr}} (\psi_{mq}^s - \psi'_{qr}^s) \right\} dt \dots\dots(2.91)$$

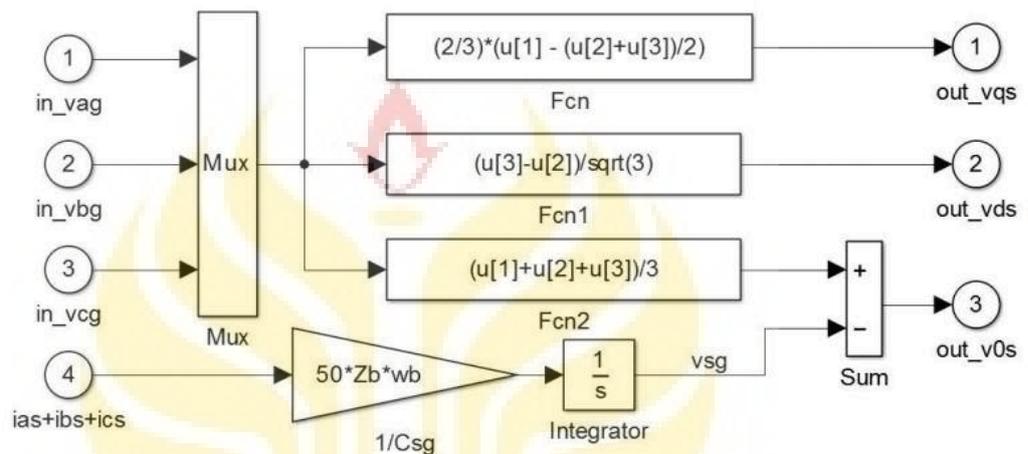
$$F_{cn3} \rightarrow \psi_{mdq}^s = X_M \left\{ \frac{\psi_{dqs}^s}{x_{ls}} + \frac{\psi'_{dqr}^s}{x'_{lr}} \right\} \dots\dots\dots(2.92)$$

$$F_{cn4} \rightarrow i_{qs}^s = \frac{\psi_{qs}^s - \psi_{mq}^s}{x_{ls}} \dots\dots\dots(2.93)$$

$$F_{cn5} = i_{qr}^s = \frac{\psi_{qr}^s - \psi_{mq}^s}{x'_{lr}} \dots\dots\dots(2.94)$$

- Transformasi abc-dq0 blok

Transformasi abc-dq0 blok merupakan blok yang mengimplementasikan persamaan tegangan stator dan rotor yang ditransformasi dari abc ke dq0. Persamaan matematis tersebut meliputi :



Gambar 2 24 transformasi abc-dq0 blok

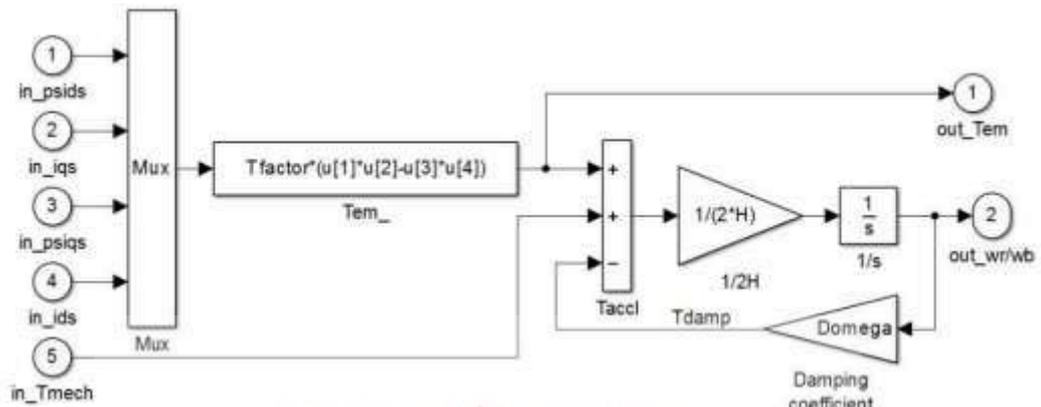
$$F_{cn} \rightarrow v_q = \frac{2}{3}v_a - \frac{1}{3}v_b - \frac{1}{3}v_c = \frac{2}{3}v_a - \frac{1}{3}v_b - \frac{1}{3}v_c - v_g \dots\dots(2.95)$$

$$F_{cn2} \rightarrow v_d = \frac{1}{\sqrt{3}}(v_c - v_b) \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{v_{cg}}{n} - \frac{v_{bg}}{n} \right) \dots\dots\dots(2.96)$$

$$F_{cn3} \rightarrow v_0 = \frac{1}{3}(v_a + v_b + v_c) \frac{1}{3} \left(\frac{v_{ag}}{n} + \frac{v_{bg}}{n} + \frac{v_{cg}}{n} \right) - v_g \dots\dots(2.97)$$

- Rotor blok

Rotor blok merupakan blok yang mengimplementasikan persamaan torsi elektromagnetik dari mesin induksi. Persamaan matematis tersebut meliputi :



Gambar 2.25 rotor blok

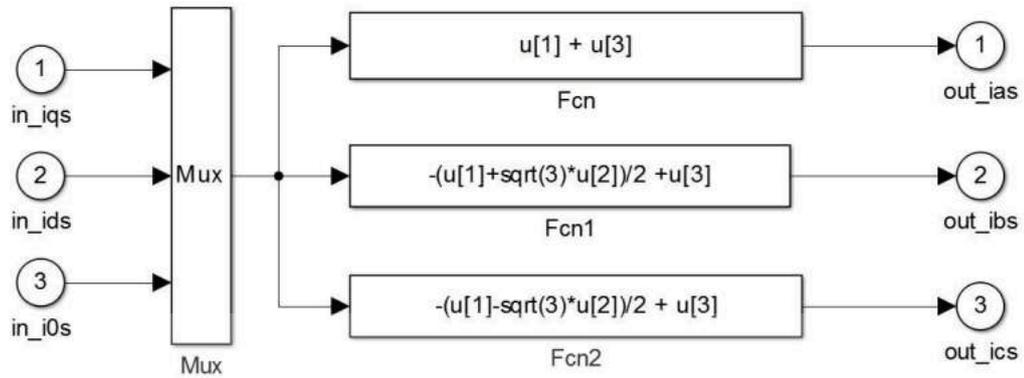
$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\psi_{ds}^s i_{qs}^s - \psi_{qs}^s i_{ds}^s) \dots\dots\dots(2.98)$$

$$T_{em} + T_{mech} - T_{damp} = \frac{2J\omega_b d(\omega_r/\omega_b)}{dt} \dots\dots\dots(2.99)$$

- Transformasi dq-abc blok

Transformasi dq-abc blok merupakan blok yang mengimplementasikan persamaan arus pada rotor yang ditransformasi dari dq0 ke abc. Persamaan matematis tersebut meliputi :





Gambar 2 26 transformasi dq0-abc blok

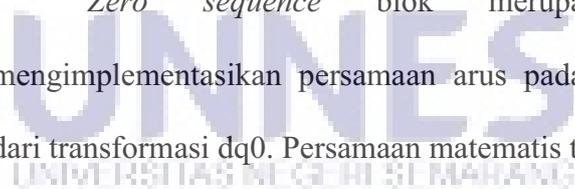
$$F_{cn} \rightarrow i'_{ar} = i'_{qr} + i'_{or} \dots\dots\dots(2.100)$$

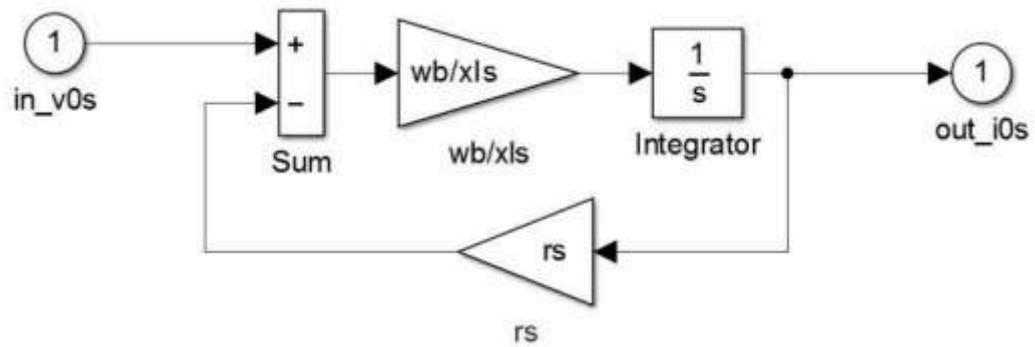
$$F_{cn2} \rightarrow i'_{br} = -\frac{1}{2}i'_{qr} - \frac{\sqrt{3}}{2}i'_{dr} + i'_{or} \dots\dots\dots(2.101)$$

$$F_{cn2} \rightarrow i'_{br} = -\frac{1}{2}i'_{qr} + \frac{\sqrt{3}}{2}i'_{dr} + i'_{or} \dots\dots\dots(2.102)$$

- Zero sequence blok

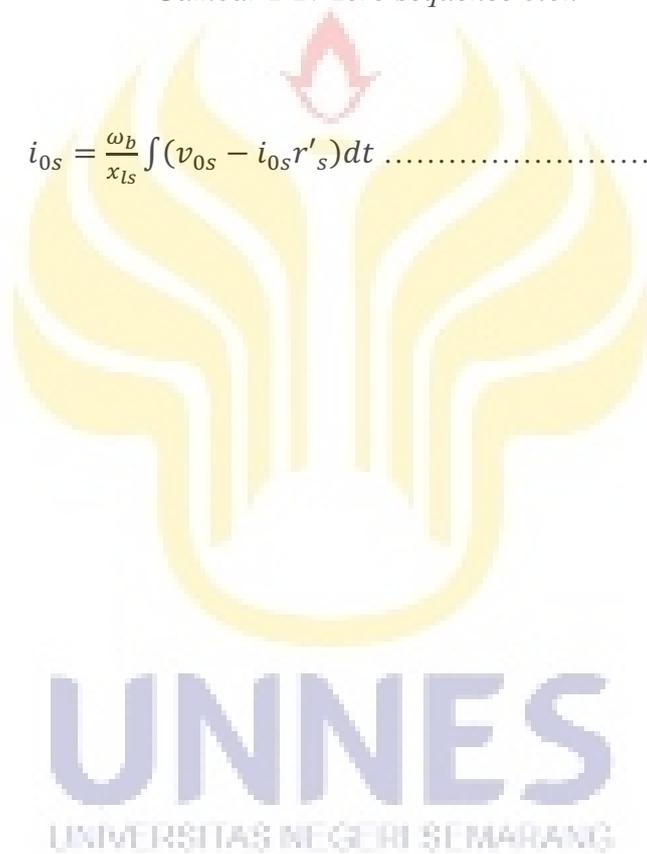
Zero sequence blok merupakan blok yang mengimplementasikan persamaan arus pada stator yang berasal dari transformasi dq0. Persamaan matematis tersebut yaitu:





Gambar 2 27 zero sequence blok

$$i_{0s} = \frac{\omega_b}{x_{1s}} \int (v_{0s} - i_{0s} r'_s) dt \dots\dots\dots(2.103)$$



BAB V

PENUTUP

5.1 Simpulan

Berdasarkan pemaparan hasil penelitian simulasi motor induksi tiga fasa dengan menggunakan matlab, dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Hasil analisis simulasi memberikan gambaran bahwa pada motor induksi tiga fasa memiliki arus dan torsi dengan nilai yang besar pada saat starting yang berlangsung selama 0-0,6 detik yang bisa mencapai 22 A dan 17 nm pada motor 1 hp sedangkan pada motor 20 hp nilainya mencapai 434 A dan 276 nm sebelum mencapai keadaan steady pada 2.7 A dan 2 nm untuk motor 1 hp serta 49 A dan 40 nm untuk motor 20 hp dimana saat starting kecepatan putar sangat tinggi dari keadaan diam sampai mencapai keadaan stabil (steady state) dengan kecepatan putar rotor 1 pu.

5.2 Saran

Dari hasil penelitian tersebut, saran yang dapat direkomendasikan antara lain sebagai berikut.

1. Untuk mempermudah dalam mempelajari analisis mesin-mesin listrik, sebaiknya digunakan software yang dapat menyajikan simulasi dinamik. Contohnya matlab/simulink.
2. Dalam penelitian ini menggunakan matlab versi R2014b dimana software ini cukup berat sehingga membutuhkan spesifikasi laptop atau pc yang cukup tinggi agar dalam pengoperasiannya lancar.

3. Diharapkan teliti dalam memberikan parameter atau input data agar hasil yang dihasilkan benar-benar sesuai dengan yang diinginkan.
4. Perbanyak referensi dalam penelitian dan analisis.



DAFTAR PUSTAKA

1. _____, MATLAB, The Mathworks Inc.USA,1993
2. Fitzgerald, Kingsley, Kusko, *Electric Machinery*, Third Edition, Me Graw Hill Kogakhusa Ltd, Tokyo, 1971.
3. Ong, Chee-Mun. 1997. *Dynamic Simulations of Electric Machinery Using Matlab. School of Electrical & Computer Engineering*. West Lafayette. Indiana,
4. Puba, Jeremia. 2009. *Analisis Karakteristik Beban Nol Motor Induksi Rotor Sangkar Saat Pengasutan Menggunakan Toolbox Power System Blockset Program Simulasi Matlab Simulink*. Tugas Akhir. Universitas Sumatera Utara.
5. Isdiyarto. 2010. *Dampak Perubahan Putaran Terhadap Unjuk Kerja Motor Induksi 3 Fasa Jenis Rotor Sangkar dalam Jurnal Kompetensi Teknik Vol.1, No.2, Mei 2010*.
6. Suyamto. 2009. *Analisis Daya dan Torsi pada Motor Induksi dalam Seminar Nasional V SDM Teknologi Nuklir Yogyakarta, 5 November 2009*.
7. Sulistiana. 2013. *Pemodelan Mesin Induksi 3 Fasa Menggunakan Matlab/Simulink*. Skripsi. Universitas Hassanudin.
8. Zuriman, Antony. 2005, *Motor induksi*, Padang : Institut Teknologi Padang.
9. Zuhail, *Dasar Tenaga Listrik*, Cetakan ke 6, ITB , Bandung 1989.