

**LAPORAN PENELITIAN**  
**INTERNAL STTA TAHUN 2018/2019**  
**Penelitian Pemula**



**Analisis Model Dinamik Motor Induksi Tiga Fase**  
**Dengan Metode Koordinat *Arbitrary Direct Quadrature***

**Oleh:**

**Paulus Setiawan, S.T., M.T.**  
**NIDN: 0505057602**

**Dibiayai melalui Dana Penelitian Internal STTA**  
**Tahun Anggaran 2018/2019**

**DEPARTEMEN TEKNIK AERONAUTIKA**  
**SEKOLAH TINGGI TEKNOLOGI ADISUTJIPTO**  
**2019**

## Halaman Pengesahan

1. Judul Penelitian : **Analisis Model Dinamik Motor Induksi Tiga Fase Dengan Metode Koordinat *Arbitrary Direct Quadrature***
2. Bidang Penelitian : Teknik Elektro
3. Ketua Peneliti
  - a. Nama Lengkap : Paulus Setiawan, S.T., M.T.
  - b. Jenis Kelamin : Laki-laki
  - c. NIP/NIDN : 011406112/0505057602
  - d. Pangkat/Golongan : III/B
  - e. Jabatan Fungsional : Tenaga Pengajar
  - f. Departemen : Teknik Aeronautika
4. Lokasi Penelitian : Laboratorium Elektronika STTA
5. Waktu Penelitian : 3 bulan
6. Jumlah Biaya : Rp. 3.000.000,00  
(Tiga Juta Rupiah)

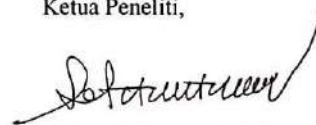
Yogyakarta, November 2019

Mengetahui,  
Ketua STTA  
Yogyakarta



Hermawan, S.T., M.T.  
NIDN: 0521047001

Ketua Peneliti,



Paulus Setiawan, S.T., M.T.  
NIDN: 0505057602

Menyetujui,  
Kepala P3M STTA



Dr. Okto Dinaryanto, S.T., M.M., M.Eng.  
NIDN: 0504107202

## Surat Keterangan Perpustakaan

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Hero Wintolo, S.T., M.Kom.  
NIP : 010303032  
Jabatan : Kepala Perpustakaan  
Unit Kerja/PTS : Perpustakaan STTA

menerangkan bahwa telah menerima hasil penelitian **Paulus Setiawan, S.T., M.T.** dengan judul

### **Analisis Model Dinamik Motor Induksi Tiga Fase Dengan Metode Koordinat *Arbitrary Direct Quadrature***

dan digunakan sebagai Buku Pustaka dan Bahan Bacaan di Perpustakaan Sekolah Tinggi Teknologi Adisutjipto Yogyakarta.

Demikian untuk dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Yogyakarta, November 2019

Kepala Perpustakaan STTA



Hero Wintolo, S.T., M.Kom.

NIP:010303032

### Surat Keterangan Karya Ilmiah

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama & gelar : Freddy Kurniawan, S.T., M.T.  
NIP / NIDN : 010301031 / 05217037601  
Pangkat/Golongan : III/D  
Jabatan Fungsional : Lektor (200 AK)  
Bidang Ilmu : Teknik Elektro  
Unit Kerja / PT : Sekolah Tinggi Teknologi Adisutjipto

Memberikan rekomendasi untuk Karya Ilmiah dengan Judul:

#### **Analisis Model Dinamik Motor Induksi Tiga Fase Dengan Metode Koordinat *Arbitrary Direct Quadrature***

a.n. Saudara di bawah ini:

Nama & gelar : Paulus Setiawan, S.T., M.T.  
NIP / NIDN : 011406112/0505057602  
Pangkat/Golongan : III/B  
Jabatan Fungsional : Tenaga Pengajar  
Bidang Ilmu : Teknik Elektro  
Unit Kerja / PT : Sekolah Tinggi Teknologi Adisutjipto

Isi rekomendasi Karya Ilmiah itu sebagai berikut:

- a. Mutu : ~~Amat Baik~~ / Baik / ~~Cukup~~
- b. Sofistikasi : ~~Amat Baik~~ / Baik / ~~Cukup~~
- c. Kemutakhiran : ~~Amat Baik~~ / Baik / ~~Cukup~~

Demikian untuk dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Yogyakarta, November 2019

Yang memberikan rekomendasi



Freddy Kurniawan, S.T., M.T.  
NIP 010301031

## Daftar Isi

Halaman Sampul.....	i
Halaman Pengesahan Penelitian.....	ii
Surat Keterangan Perpustakaan.....	iii
Surat Keterangan Karya Ilmiah.....	iv
Daftar Isi.....	v
Daftar Gambar.....	vii
Ringkasan Penelitian.....	ix
Bab I. Pendahuluan.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian.....	3
Bab II Tinjauan Pustaka.....	4
2.1 Kajian Pustaka.....	4
2.2 Transformasi Tegangan Tiga Fasa Menjadi Dua Fasa.....	6
2.2.1 Persamaan Transformasi Pada Rangkaian Stator.....	8
2.2.2 Persamaan Transformasi Pada Rangkain Rotor.....	9
2.3 Persamaan Tegangan Dalam Variabel Kerangka Acuan.....	9
2.4 Pemodelan Motor Induksi.....	10
2.5 Persamaan Torsi Elektromagnetik, Kecepatan Rotor, dan Daya Input.....	14
2.6 Definisi Tegangan Tidak Seimbang.....	15
Bab III. Metode Penelitian.....	17
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	17
3.2 Implementasi Blok Sistem Penelitian.....	18
Bab IV. Analisis dan Pembahasan.....	26
4.1 Karakteristik Tegangan Stator.....	26

4.2 Karakteristik Arus Stator dan Arus Rotor.....	27
4.3 Karakteristik Torsi Elektromagnetik dan Kecepatan Putaran Rotor.....	30
4.4 Karakteristik Daya Masukan dan Daya Keluaran Rotor.....	32
Bab V. Kesimpulan.....	35
Daftar Pustaka .....	36

## Daftar Gambar

Gambar 1 Skema Transformasi Ekiivalen.....	6
Gambar 2 Pemodelan Motor Induksi dengan Kerangka Acuan.....	11
Gambar 3 Diagram alir penelitian.....	17
Gambar 4 Implementasi pemodelan motor induksi tiga fasa.....	20
Gambar 5 Implementasi tegangan stator tiga fasa menjadi dua fasa.....	20
Gambar 6 Implementasi tegangan rotor tiga fasa menjadi dua fasa.....	21
Gambar 7 Implementasi subsistem tegangan stator tiga fasa.....	22
Gambar 8 Implementasi fluks lingkup pada stator.....	22
Gambar 9 Implementasi fluks lingkup pada rotor.....	23
Gambar 10 Implementasi fluks lingkup pada md dan mq.....	23
Gambar 11 Implementasi kalkulasi pada arus $i_{qs}, i_{ds}, i_{0s}$ .....	24
Gambar 12 Implementasi kalkulasi pada arus $i_{qr}, i_{dr}, i_{0r}$ .....	24
Gambar 13 Implementasi kalkulasi pada torsi elektromagnetik.....	25
Gambar 14 Implementasi kalkulasi pada arus stator.....	25
Gambar 15 Implementasi kalkulasi pada arus rotor.....	25
Gambar 16 Tegangan tiga fasa abc.....	26
Gambar 17. Tegangan dua fasa dq.....	26
Gambar 18 Karakteristik arus keluaran stator tiga fasa.....	27
Gambar 19 Total harmonik distorsi arus stator saat tegangan seimbang.....	27
Gambar 20 Total harmonik distorsi arus stator saat 5% <i>unbalanced voltage</i> .....	27
Gambar 21 Karakteristik arus stator fasa a pada saat terjadi ketidakseimbangan tegangan.....	28
Gambar 22 Karakteristik arus stator fasa c pada saat terjadi ketidakseimbangan tegangan.....	28
Gambar 23 karakteristik arus keluaran rotor tiga fasa.....	28
Gambar 24 Total harmonik distorsi arus rotor saat tegangan seimbang.....	29
Gambar 25 Total harmonik distorsi arus stator saat 5% <i>unbalanced voltage</i> .....	29
Gambar 26 Karakteristik Torsi elektromagnetik terhadap waktu.....	30
Gambar 27 Karakteristik Kecepatan rotor terhadap waktu.....	30

Gambar 28 Karakteristik torsi elektromagnetik terhadap kecepatan rotor.....	30
Gambar 29 Karakteristik torsi elektromagnetik terhadap ketidakseimbangan tegangan.....	31
Gambar 30 Karakteristik kecepatan rotor terhadap ketidakseimbangan tegangan.....	32
Gambar 31 Karakteristik daya input terhadap waktu.....	32
Gambar 32 Karakteristik daya output terhadap waktu.....	33
Gambar 33 Efisiensi motor terhadap ketidakseimbangan tegangan.....	33



## Ringkasan Penelitian

Motor induksi adalah salah satu jenis motor listrik yang bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik. Masalah yang sering muncul belakangan ini adalah terjadinya ketidakseimbangan tegangan. Tegangan tidak seimbang adalah nilai tegangan yang tidak sama dalam sistem tegangan tiga fase yang terdapat dalam sistem tenaga listrik. Atas dasar permasalahan tersebut, maka perlu dilakukan penelitian yang dapat menganalisis dinamika kinerja motor induksi.

Teori kerangka acuan telah banyak digunakan secara efektif sebagai pendekatan yang efisien untuk menganalisis kinerja pada motor induksi. Penelitian ini menyajikan implementasi langkah demi langkah pada motor induksi dengan menggunakan transformasi pada sumbu natural abc, transformasi pada sumbu  $\alpha\beta 0$ , transformasi pada sumbu *pseudo stationary*, dan transformasi pada sumbu  $dq0$  dari variabel stator dan rotor dalam koordinat kerangka acuan. Untuk tujuan pemodelan ini, persamaan yang relevan dinyatakan di awal, dan kemudian pemodelan secara umum dari motor induksi tiga fase dikembangkan dan diimplementasikan dengan cara yang mudah.

Dalam studi dengan ketidakseimbangan tegangan hingga 5%, torsi elektromagnetik telah menurun sebesar 2,89% menjadi 13,83% dan arus stator dalam satu fase meningkat sebesar 29,1% menjadi 245,8%.

Kata Kunci: sumbu abc, sumbu  $\alpha\beta 0$ , pseudo stationary, dan sumbu  $dq0$ .

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang Permasalahan**

Mesin induksi pada dasarnya adalah mesin listrik *polyphase* yang terhubung ke jaringan listrik bolak balik (ac), baik di stator atau di rotor. Sumber daya listrik ac, secara umum adalah tiga fase tetapi mungkin juga menjadi fase tunggal. Dalam kedua kasus tersebut, susunan belitan pada mesin bagian primer terhubung ke stator dan menghasilkan medan magnet berputar pada celah udara mesin induksi tersebut. Medan magnet yang berputar tersebut akan menyebabkan tegangan pada konduktor pada bagian dari mesin yang tidak terhubung belitan (rotor, atau penggerak secara umum) sekunder. Jika belitan di sekunder (rotor) ditutup, maka akan terjadi arus pada rotor. Interaksi antara medan primer dengan arus sekunder menghasilkan torka dari nol saat rotor kecepatan maju. Kecepatan rotor di mana arus rotor adalah nol, ini yang disebut sebagai kecepatan ideal tanpa-beban atau kecepatan sinkron.

Pada perkembangan selanjutnya, motor induksi rotor sangkar telah banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri. Pada konsep mesin berputar yang telah disebutkan sebelumnya, motor induksi memiliki biaya yang cukup rendah jika dibandingkan dengan motor listrik yang lain. Motor induksi memiliki sistem elektromekanik yang baik dan terdapat standarisasi diantara beragam produsen. Namun demikian, kesederhanaan relatif dari konsep motor listrik ini menyembunyikan kompleksitas fungsional komputasi yang cukup besar, sehingga pemodelan dinamik pada motor induksi dibuat dan ditujukan untuk sistem pengendalian konversi elektromekanik.

Konsep dasar konversi elektromekanis telah diterapkan pada pemodelan mesin dasar, yang terdiri dari kumparan stator dan kumparan rotor. Prinsip-prinsip fisik kemudian diperluas untuk mempelajari motor induksi tiga fase. Model matematika yang telah dibuat, terlepas dari jenis teknologi rotor (mesin dengan rotor belitan yang dapat dihubungkan ke pasokan eksternal atau rotor sangkar tupai yang pada rangkaian rotornya dirangkai secara hubung singkat).

Pertama-tama model mesin listrik ini diklarifikasi dalam kerangka tiga sumbu yang terkait dengan persediaannya, memanfaatkan sebagian besar dalam bentuk matriks. Kemudian, beberapa transformasi persamaan matematika disajikan dan digunakan untuk menggantikan komponen dari kuantitas listrik. Komponen besaran listrik akan membuat perhitungan lebih mudah dan akan menyederhanakan representasi. Pemodelan umum motor induksi ini

kemudian disajikan bersama dengan beberapa model kerangka acuan, yang lebih sesuai untuk desain sistem kendali.

Kita menemukan bahwa beberapa induktansi mesin adalah fungsi dari kecepatan rotor, dimana koefisien dari persamaan diferensial (persamaan tegangan) yang menggambarkan perilaku mesin-mesin ini adalah waktu yang bervariasi kecuali ketika rotor dalam keadaan hubung singkat. Perubahan variabel sering digunakan untuk mengurangi kompleksitas persamaan diferensial ini. Ada beberapa perubahan variabel yang sering digunakan, dan pada awalnya dianggap bahwa setiap perubahan variabel adalah berbeda dan oleh karena itu variabel-variabel tersebut diperlakukan secara terpisah. Belakangan diketahui bahwa semua perubahan variabel yang digunakan untuk mentransformasikan variabel nyata ke *arbitrary* kerangka acuan yang berputar pada kecepatan sudut. Semua transformasi nyata yang diketahui dari transformasi ini diperoleh dengan menetapkan kecepatan rotasi pada kerangka acuan (krause dkk., 2013).

Pada akhir 1920-an, R. H. Park memperkenalkan pendekatan baru untuk analisis mesin listrik. Dia merumuskan perubahan variabel yang pada dasarnya, menggantikan variabel (tegangan, arus, dan hubungan fluks) yang terkait dengan belitan stator dari mesin sinkron dengan variabel yang terkait dengan belitan fiktif yang berputar dengan rotor. Dengan kata lain, ia mengubah atau merujuk variabel stator ke bingkai atau referensi yang dipasang pada rotor. Transformasi Park, yang merevolusi analisis mesin listrik, memiliki sifat unik untuk menghilangkan semua induktansi yang bervariasi waktu dari persamaan tegangan mesin sinkron yang terjadi karena rangkaian listrik dalam gerakan relatif dan rangkaian listrik dengan reluktansi magnetik yang bervariasi (Krause dkk., 2013).

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian diatas, masalah yang dapat dirumuskan adalah bagaimana memodelkan motor induksi tiga fase kedalam penurunan persamaan fluksi lingkup, persamaan umum tegangan, persamaan umum daya, dan persamaan umum daya elektrik berbasis koordinat sumbu  $abc$ . Kemudian kedua, menentukan matriks transformasi basis kerapatan fluksi dengan nilai eigenvalue dan eigenvector, menganalisis fluksi lingkup, tegangan, dan torka kedalam sistem dua fase koordinat sumbu  $\alpha\beta$ . Dan yang terakhir adalah menentukan matriks transformasi basis kerapatan fluksi dari sistem dua fase koordinat sumbu  $\alpha\beta$  kedalam generalisasi persamaan *Park dq*.

### 1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Penelitian ini mempunyai tujuan sebagai berikut:

1. Dapat menganalisis arus pengasutan pada motor induksi tiga fase.
2. Dapat menganalisis arus hubung singkat pada motor induksi tiga fase.
3. Dapat menganalisis motor induksi pada keadaan gejala peralihan dan pada keadaan mantap.
4. Dan dapat menganalisis karakteristik kecepatan putaran motor induksi sebagai dasar pengendalian dengan metode *vector control*.

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Analisis pemodelan motor induksi ini dapat memperbaiki rancangan motor induksi.
2. Analisis pemodelan motor induksi ini dapat menentukan peralatan pengaman pada saat penalaan arus dan tegangan serta waktu kerja operasional.
3. Analisis pemodelan motor induksi ini adalah untuk mendukung dasar pengendalian putaran kecepatan motor dengan metode *vector control*.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Kajian Pustaka**

Teori kerangka acuan telah efektif digunakan sebagai pendekatan yang efisien untuk menganalisis kinerja mesin listrik induksi (Renukadevi dkk., 2012). Makalah ini menyajikan langkah demi langkah implementasi simulink dari mesin induksi menggunakan sumbu dq0 transformasi variabel stator dan rotor dalam *arbitrary* bingkai referensi. Untuk tujuan ini, persamaan yang relevan adalah dinyatakan di awal, dan kemudian pemodelan umum dari tiga fase motor induksi dikembangkan dan diimplementasikan dengan mudah. Hasil simulasi yang diperoleh memberikan hasil yang jelas bukti bahwa teori kerangka acuan merupakan algoritma untuk menunjukkan perilaku mantab dari mesin induksi.

Dalam tulisan ini, implementasi dan pemodelan dinamis dari motor induksi tiga fase menggunakan Matlab / Simulink disajikan secara bertahap. Model ini diuji oleh dua peringkat yang berbeda dari motor induksi kecil dan besar. Dua mesin simulasi telah memberikan *responses* yang memuaskan dalam hal karakteristik torsi dan kecepatan. Model juga dievaluasi oleh program Matlab pengkodean M-file. Kedua metode telah memberikan hasil yang sama untuk spesifikasi yang sama dari motor induksi tiga fase yang digunakan dalam simulasi. Hal ini menyimpulkan bahwa Matlab / Simulink adalah cara yang andal dan canggih untuk menganalisis dan memprediksi perilaku motor induksi menggunakan teori kerangka referensi.

Mesin induksi tiga fase adalah salah satu yang paling dapat digunakan mesin dalam aplikasi industri karena konstruksi yang sederhana dan keuntungan lain seperti operasi yang handal, biaya operasional yang rendah, pengoperasian mesin yang mudah dengan perawatan yang sederhana, efisiensi tinggi dan memiliki sistem kendali untuk pengendalian kecepatan putaran motor. Popularitas motor ini telah menghasilkan kedalam banyak penelitian termasuk perubahan perilaku mesin. Dalam makalah ini kinerja transien tiga fase Motor induksi sangkar tupai kemudian dianalisis dengan pemodelan sumbu dq0 dalam bingkai referensi stasioner, referensi rotor bingkai dan bingkai referensi yang berputar secara sinkron (Kamal dkk., 2013).

Dalam makalah ini Matlab / SIMULINK digunakan untuk analisis kinerja transien motor induksi tiga fasa menggunakan bingkai referensi stasioner, bingkai referensi rotor dan kerangka referensi sinkron dan termasuk rentang waktu yang cukup untuk mempelajari karakteristik kinerja lengkap motor induksi sangkar tupai tiga fase. Hasil yang telah

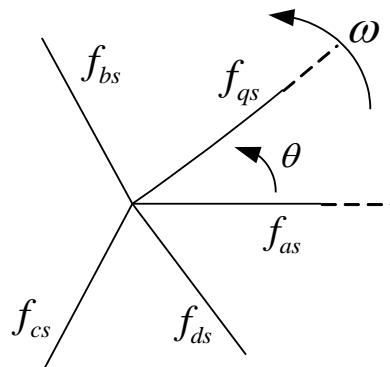
disimulasikan, kemudian disimpulkan seperti pada fase 'A' dan sumbu d, the stator dan arus rotor mengikuti pola yang berbeda di bawah kerangka referensi yang berbeda seperti tidak ada perbedaan antara arus stator ( $I_{as}$ ) dan arus stator d-sumbu ( $I_d$ ), pada kerangka referensi stasioner. Kemudian ditunjukkan pula bahwa tidak ada perbedaan antara fase 'arus stator ( $I_{as}$ ) dan arus stator sumbu-d ( $I_d$ ) pada kerangka rotor referensi. Namun, solusinya bingkai referensi tidak mempengaruhi kenaikan kecepatan, pengaturan waktu, dan arus lonjakan maksimum untuk mesin dan fase 'A' arus rotor yang tidak identik untuk ketiga bingkai referensi.

Studi tentang mesin induksi menjadi penting dalam analisis dinamik sistem tenaga listrik. Algoritma yang tepat untuk menentukan transien mesin induksi adalah disajikan dalam penelitian ini. Model persamaan dengan orde yang lebih tinggi dari mesin induksi dengan sangkar ganda disederhanakan dan diselesaikan menggunakan metode Runge-Kutta, Metode trapesium dan metode Euler pada platform Mat-lab. Analisis dilakukan dengan menghitung kecepatan rotor terhadap profil waktu, stator hubungan fluks arus dan stator untuk berbagai kondisi beban dan suplai tegangan gangguan menggunakan konsep speed-build naik dari mesin induksi. Model orde ke-7 dari mesin induksi sangkar ganda telah direduksi di sini menjadi model orde ke-5 dengan struktur yang berbeda dari model orde 5 reguler untuk mesin induksi sangkar tunggal. Pengurangan Model Order (MOR) menggabungkan seperangkat teknik yang bertujuan menghasilkan berkurang memesan model dengan kompleksitas lebih rendah sambil memastikan I / O respons dan karakteristik lain dari model asli (seperti kapasitan). Untuk mendapatkan stabilitas dalam simulasi digital, belitan flux-linkages digunakan sebagai variabel keadaan yang berbeda dengan arus mengalir. Perbandingan waktu komputasi dalam tiga yang dilaporkan metode dibuat. Kami telah memverifikasi lebih sedikit waktu perhitungan dalam model pesanan berkurang dan peningkatan akurasi juga diamati (Bellure dkk., 2015).

Hasil simulasi menunjukkan bahwa model urutan ke-5 adalah hampir identik dengan model urutan ke-7 yang lengkap. Model persamaan yang dikurangi, juga dapat digunakan untuk menghitung kontribusi mesin induksi terhadap kesalahan sistem daya awal arus termasuk *offset* dc, dan dalam memilih dan mengkoordinasikan perangkat pelindung. Singkatnya, urutan kelima model mesin dapat menjadi pengganti model urutan ketujuh dalam sistem tenaga untuk segala jenis studi simulasi. Itu waktu komputasi sistem menggunakan tiga angka metode karena Runge-Kutta, Trapesium dan Euler miliki telah dibandingkan dan pengurangan waktu komputasi yang signifikan telah diamati.

## 2.2 Transformasi Tegangan Tiga Fasa menjadi Dua Fasa

Untuk melakukan analisis terhadap mesin induksi diperlukan pengetahuan tentang teori kerangka acuan yang dikenalkan oleh R. H. Park sekitar tahun 1920-an, yang merupakan sebuah pendekatan untuk menganalisis mesin-mesin listrik., yang dikenal dengan Transformasi Park. Transformasi Park mengubah variabel-variabel dari sumbu abc ke dalam sumbu *direct* dan *quadrature* atau yang lebih dikenal dengan sumbu dq. Transformasi ini dapat dilukiskan sebagai hubungan trigonometri antara variabel-variabel dalam sumbu abc dengan variabel dalam sumbu dq [13], seperti terlihat dalam Gambar 1.



Gambar 1. Skema Transformasi Ekuivalen

Persamaan tegangan dalam ragam variabel mesin dapat dituliskan sebagai

$$v_{abcs} = r_s i_{abcs} + p \lambda_{abcs} \dots (1)$$

$$v_{abcr} = r_r i_{abcr} + p \lambda_{abcr} \dots (2)$$

Dimana

$$(f_{abcs})^T = [f_{as} \quad f_{bs} \quad f_{cs}] \dots (3)$$

$$(f_{abcr})^T = [f_{ar} \quad f_{br} \quad f_{cr}] \dots (4)$$

Pada persamaan diatas, subscript *s* menyatakan parameter dan variabel yang dikelompokkan kedalam rangkaian stator, dan subscript *r* menyatakan parameter dan variabel yang dikelompokkan kedalam rangkaian rotor. Untuk sistem linear magnetik, fluks lingkup dapat dituliskan sebagai

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abcr} \end{bmatrix} \dots (5)$$

Secara khusus belitan induktansi dapat diturunkan dengan persamaan

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \dots(6)$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \dots(7)$$

$$L_{sr} = L_s \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r \end{bmatrix} \dots(8)$$

$$i'_{abc} = \frac{N_r}{N_s} i_{abc} \dots(9a)$$

$$v'_{abc} = \frac{N_r}{N_s} v_{abc} \dots(9b)$$

$$\lambda'_{abc} = \frac{N_r}{N_s} \lambda_{abc} \dots(9c)$$

$$L_{ms} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr} \dots(9d)$$

$$L'_{sr} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr} \dots(9d)$$

$$L_{mr} = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 L_{ms} \dots(9e)$$

$$L'_r = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 L_r \dots(9f)$$

$$L'_{lr} = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 L_{lr} \dots(9g)$$

$$r'_r = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 r_r \dots(9h)$$

$$L_{sr} = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r \end{bmatrix} \dots(10)$$



Dari persamaan (7), kita dapatkan

$$L'_r = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} \end{bmatrix} \dots(11)$$

Sekarang persamaan fluks lingkup motor dapat kita ekspresikan

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L'_{sr} \\ (L'_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i'_{abcr} \end{bmatrix} \dots(12)$$

Dan terminologi persamaan tegangan yang didasarkan pada belitan stator, dapat kita ekspresikan sebagai

$$\begin{bmatrix} v_{abcs} \\ v'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_s & pL'_{sr} \\ p(L'_{sr})^T & r'_r + pL'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i'_{abcr} \end{bmatrix} \dots(13)$$

### 2.2.1 Persamaan Transformasi Pada Rangkaian Stator

Perubahan variabel-variabel pada persamaan transformasi tiga fasa dari elemen rangkaian stasioner menjadi kerangka acuan *arbitrary* dapat dituliskan sebagai

$$f_{qd0s} = K_s f_{abcs} \dots(14)$$

dimana

$$(f_{qds0s})^T = [f_{qs} \quad f_{ds} \quad f_{0s}] \dots(15)$$

$$(f_{abcs})^T = [f_{as} \quad f_{bs} \quad f_{cs}] \dots(16)$$

$$K_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \dots(17)$$

$$\text{Dimana } \omega = \frac{d\theta}{dt} \dots(18)$$

$$(K_s)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \dots(19)$$

### 2.2.2 Persamaan Transformasi Pada Rangkaian Rotor

Analisis motor induksi juga ditujukan untuk mentransformasikan variabel-variabel yang dikelompokkan kedalam belitan rotor. Perubahan variabel-variabel pada persamaan transformasi tiga fasa rangkaian rotor ke kerangka acuan *arbitrary* dapat dituliskan sebagai

$$f'_{qd0r} = K_r f'_{abcr} \dots (20)$$

dimana

$$(f'_{qds0r})^T = [f'_{qr} \quad f'_{dr} \quad f'_{0r}] \dots (21)$$

$$(f'_{abcr})^T = [f'_{ar} \quad f'_{br} \quad f'_{cr}] \dots (22)$$

$$K_r = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \beta & \cos\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \beta & \sin\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \dots (23)$$

$$\text{dimana, } \beta = \theta - \theta_r \dots (24)$$

$$\text{dan } \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \dots (25), \text{ maka}$$

$$(K_r)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 1 \\ \cos\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \dots (26)$$

### 2.3 Persamaan Tegangan Dalam Variabel Kerangka Acuan

Berdasarkan persamaan (14) sampai dengan (26), diperoleh persamaan tegangan dan fluks lingkup dalam sumbu dq sebagai

$$v_{qd0s} = r_s i_{qd0s} + \omega \lambda_{dqs} + p \lambda_{qd0s} \dots (27)$$

$$v'_{qd0r} = r'_r i'_{qd0r} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dqr} + p \lambda'_{qd0r} \dots (28)$$

Dimana

$$(\lambda_{dqs})^T = [\lambda_{ds} \quad -\lambda_{qs} \quad 0] \dots (29)$$

$$(\lambda'_{dqr})^T = [\lambda'_{dr} \quad -\lambda'_{qr} \quad 0] \dots (30)$$

Substitusi persamaan transformasi kedalam persamaan fluks lingkup yang dituliskan kedalam variabel abc pada persamaan (12) sebelumnya, maka persamaan fluks lingkup untuk sistem magnetik sebagai

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qd0s} \\ \lambda'_{qd0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s L_s (K_s)^{-1} & K_s L'_{sr} (K_r)^{-1} \\ K_r (L'_{sr})^T (K_s)^{-1} & K_r L'_r (K_r)^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qd0s} \\ i'_{qd0r} \end{bmatrix} \dots (31)$$

$$K_s L_s (K_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_M & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_M & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \dots (32)$$

$$L_M = \frac{3}{2} L_{ms} \dots (33)$$

$$K_r L'_r (K_r)^{-1} = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_M & 0 & 0 \\ 0 & L'_{lr} + L_M & 0 \\ 0 & 0 & L'_{lr} \end{bmatrix} \dots (34)$$

$$K_s L'_{sr} (K_r)^{-1} = K_r (L'_{sr})^T (K_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L_M & 0 & 0 \\ 0 & L_M & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dots (35)$$

## 2.4 Pemodelan Motor Induksi

Analisis dinamik motor induksi biasanya dimodelkan dengan rangkaian ekivalen dalam kerangka acuan. Berdasarkan persamaan (27) dan (28) dapat diturunkan persamaan tegangan motor induksi kedalam sumbu dq sebagai

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + p \lambda_{qs} \dots (36)$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + p \lambda_{ds} \dots (37)$$

$$v_{0s} = r_s i_{0s} + p \lambda_{0s} \dots (38)$$

$$v'_{qr} = r'_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} + p \lambda'_{qr} \dots (39)$$

$$v'_{dr} = r'_r i'_{dr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{qr} + p \lambda'_{dr} \dots (40)$$

$$v'_{0r} = r'_r i'_{0r} + p \lambda'_{0r} \dots (41)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (32), (34), dan (35) kedalam persamaan (31), maka untuk persamaan fluks lingkup motor induksi dapat dikembangkan kedalam bentuk

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_M (i_{qs} + i'_{qr}) \dots (42)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_M (i_{ds} + i'_{dr}) \dots (43)$$

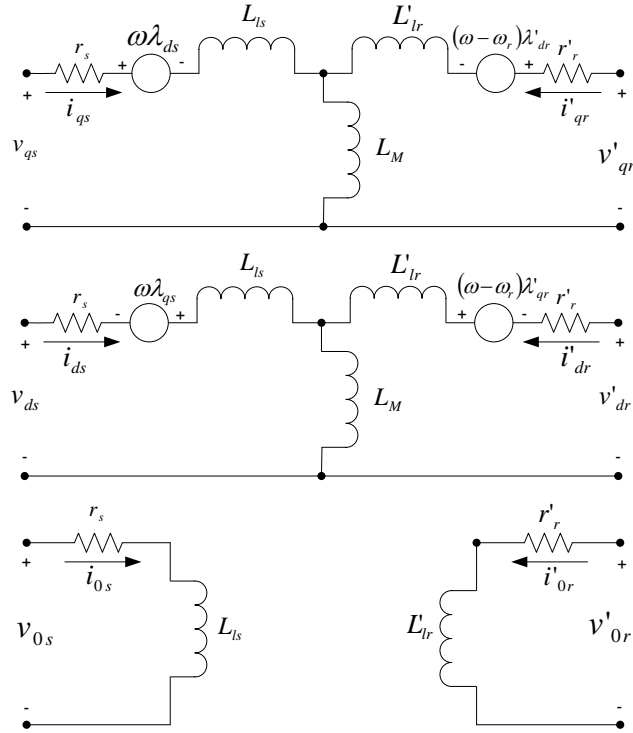
$$\lambda_{0s} = L_{ls} i_{0s} \dots (44)$$

$$\lambda_{qr} = L'_{lr} i'_{qr} + L_M (i_{qs} + i'_{qr}) \dots (45)$$

$$\lambda_{dr} = L'_{lr} i'_{dr} + L_M (i_{ds} + i'_{dr}) \dots (46)$$

$$\lambda_{0r} = L'_{lr} i'_{0r} \dots (47)$$

Kemudian rangkaian ekivalen pada persamaan tegangan dan fluks lingkup motor induksi menjadi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Pemodelan Motor Induksi dengan Kerangka Acuan

Berdasarkan persamaan (36) sampai dengan (41), persamaan tegangan dan fluks lingkup dalam terminologi atau istilah reaktansi induktif dapat dituliskan sebagai

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{ds} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{qs} \dots (48)$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{ds} \dots (49)$$

$$v_{0s} = r_s i_{0s} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{0s} \dots (50)$$

$$v'_{qr} = r'_r i'_{qr} + \left( \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{dr} + \frac{p}{\omega_b} \psi'_{qr} \dots (51)$$

$$v'_{dr} = r'_r i'_{dr} - \left( \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{qr} + \frac{p}{\omega_b} \psi'_{dr} \dots (52)$$

$$v'_{0r} = r'_r i'_{0r} + \frac{P}{\omega_b} \psi'_{qr} \dots (53)$$

Dimana  $\omega_b$  adalah kecepatan sudut elektrik yang digunakan untuk mengkomputasi nilai reaktansi induktif. Maka selanjutnya persamaan fluks lingkup (42) sampai dengan (47) menjadi persamaan fluks lingkup dalam satuan unit tegangan perdetik yaitu

$$\psi_{qs} = X_{ls} i_{qs} + X_M (i_{qs} + i'_{qr}) \dots (54)$$

$$\psi_{ds} = X_{ls} i_{ds} + X_M (i_{ds} + i'_{dr}) \dots (55)$$

$$\psi_{0s} = X_{ls} i_{0s} \dots (56)$$

$$\psi'_{qr} = X'_{lr} i'_{qr} + X_M (i_{qs} + i'_{qr}) \dots (57)$$

$$\psi'_{dr} = X'_{lr} i'_{dr} + X_M (i_{ds} + i'_{dr}) \dots (58)$$

$$\psi'_{0r} = X'_{lr} i'_{0r} \dots (59)$$

Maka persamaan tegangan menjadi

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{0s} \\ v'_{qr} \\ v'_{dr} \\ v'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + \frac{P}{\omega_b} X_{ss} & \frac{\omega}{\omega_b} X_{ss} & 0 & \frac{P}{\omega_b} X_M & \frac{\omega}{\omega_b} X_M & 0 \\ -\frac{\omega}{\omega_b} X_{ss} & r_s + \frac{P}{\omega_b} X_{ss} & 0 & -\frac{\omega}{\omega_b} X_M & \frac{P}{\omega_b} X_M & 0 \\ 0 & 0 & r_s + \frac{P}{\omega_b} X_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{P}{\omega_b} X_M & \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}\right) X_M & 0 & r'_r + \frac{P}{\omega_b} X'_{rr} & \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}\right) X'_{rr} & 0 \\ -\left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}\right) X_M & \frac{P}{\omega_b} X_M & 0 & -\left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}\right) X'_{rr} & r'_r + \frac{P}{\omega_b} X'_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r'_r + \frac{P}{\omega_b} X'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{bmatrix} \dots (60)$$

$$X_{ss} = X_{ls} + X_M \dots (61)$$

$$X'_{rr} = X'_{lr} + X_M \dots (62)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \\ \psi_{0s} \\ \psi'_{qr} \\ \psi'_{dr} \\ \psi'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ss} & 0 & 0 & X_M & 0 & 0 \\ 0 & X_{ss} & 0 & 0 & X_M & 0 \\ 0 & 0 & X_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ X_M & 0 & 0 & X'_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & X_M & 0 & 0 & X'_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{bmatrix} \dots (63)$$

$$\begin{bmatrix} i'_{qs} \\ i'_{ds} \\ i'_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} X'_{rr} & 0 & 0 & -X_M & 0 & 0 \\ 0 & X'_{rr} & 0 & 0 & -X_M & 0 \\ 0 & 0 & \frac{D}{X_{ls}} & 0 & 0 & 0 \\ -X_M & 0 & 0 & X_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & -X_M & 0 & 0 & X_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{D}{X'_{lr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \\ \psi_{0s} \\ \psi'_{qr} \\ \psi'_{dr} \\ \psi'_{0r} \end{bmatrix} \dots(64)$$

$$D = X_{ss}X'_{rr} - X_M^2 \dots(65)$$

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{0s} \\ v'_{qr} \\ v'_{dr} \\ v'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r_{ss}X'_{rr} + p}{D} + \frac{p}{\omega_b} & \frac{\omega}{\omega_b} & 0 & -\frac{r_s X_M}{D} & 0 & 0 \\ -\frac{\omega}{\omega_b} & \frac{r_{ss}X'_{rr} + p}{D} + \frac{p}{\omega_b} & 0 & 0 & -\frac{r_s X_M}{D} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{r_s}{X_{ls}} + \frac{p}{\omega_b} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{r'_r X_M}{D} & 0 & 0 & \frac{r'_r X_{ss} + p}{D} + \frac{p}{\omega_b} & \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} & 0 \\ 0 & -\frac{r'_r X_M}{D} & 0 & -\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} & \frac{r'_r X_{ss} + p}{D} + \frac{p}{\omega_b} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r'_r}{X'_{lr}} + \frac{p}{\omega_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \\ \psi_{0s} \\ \psi'_{qr} \\ \psi'_{dr} \\ \psi'_{0r} \end{bmatrix} \dots(66)$$

Kemudian persamaan untuk mensimulasikan motor induksi yang simetris dengan kerangka acuan *arbitrary*, dapat dibuat dengan terlebih dahulu menyelesaikan persamaan fluks lingkup atau persamaan fluks per detik untuk arus. Sehingga dari persamaan (54 - 59) dapat dituliskan

$$i_{qs} = \frac{1}{X_{ls}} (\psi_{qs} - \psi_{mq}) \dots(67)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{X_{ls}} (\psi_{ds} - \psi_{md}) \dots(68)$$

$$i_{0s} = \frac{1}{X_{ls}} \psi_{0s} \dots(69)$$

$$i'_{qr} = \frac{1}{X'_{lr}} (\psi'_{qr} - \psi'_{mq}) \dots(70)$$

$$i'_{dr} = \frac{1}{X'_{lr}} (\psi'_{dr} - \psi'_{md}) \dots(71)$$

$$i'_{0r} = \frac{1}{X'_{lr}} \psi'_{0r} \dots(72)$$

Di mana  $\psi_{mq}$  dan  $\psi_{md}$ , yang berguna saat mewakili saturasi, didefinisikan sebagai

$$\psi_{mq} = X_M (i_{qs} + i'_{qr}) \dots (73)$$

$$\psi_{md} = X_M (i_{ds} + i'_{dr}) \dots (74)$$

$$\psi_{qs} = \frac{\omega_b}{p} \left[ v_{qs} - \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{ds} + \frac{r_s}{X_{ls}} (\psi_{mq} - \psi_{qs}) \right] \dots (75)$$

$$\psi_{ds} = \frac{\omega_b}{p} \left[ v_{ds} + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{r_s}{X_{ls}} (\psi_{md} - \psi_{ds}) \right] \dots (76)$$

$$\psi_{0s} = \frac{\omega_b}{p} \left[ v_{0s} - \frac{r_s}{X_{ls}} \psi_{0s} \right] \dots (77)$$

$$\psi'_{qr} = \frac{\omega_b}{p} \left[ v'_{qr} - \left( \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{dr} + \frac{r'_r}{X'_{lr}} (\psi_{mq} - \psi'_{qr}) \right] \dots (78)$$

$$\psi'_{dr} = \frac{\omega_b}{p} \left[ v'_{dr} + \left( \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{qr} + \frac{r'_r}{X'_{lr}} (\psi_{md} - \psi'_{dr}) \right] \dots (79)$$

$$\psi'_{0r} = \frac{\omega_b}{p} \left[ v'_{0r} - \frac{r'_r}{X'_{lr}} \psi'_{0r} \right] \dots (80)$$

$$\psi_{mq} = X_{aq} \left( \frac{\psi_{qs}}{X_{ls}} + \frac{\psi'_{qr}}{X'_{lr}} \right) \dots (81)$$

$$\psi_{md} = X_{ad} \left( \frac{\psi_{ds}}{X_{ls}} + \frac{\psi'_{dr}}{X'_{lr}} \right) \dots (82)$$

$$X_{aq} = X_{ad} = \left( \frac{1}{X_M} + \frac{1}{X_{ls}} + \frac{1}{X'_{lr}} \right)^{-1} \dots (83)$$

## 2.5 Persamaan Torsi Elektromagnetik, Kecepatan Rotor, dan Daya Input

Persamaan torsi elektromagnetik dalam variabel kerangka acuan *arbitrary* dapat dituliskan sebagai [13]

$$T_e = \left( \frac{P}{2} \right) \left[ (K_s)^{-1} i_{qd0s} \right]^T \frac{d}{d\theta_r} [L'_{sr}] (K_r)^{-1} i'_{qd0r} \dots (84)$$

$$T_e = \left( \frac{3}{2} \right) \left( \frac{P}{2} \right) L_M (i_{qs} i'_{dr} - i_{ds} i'_{qr}) \dots (85)$$

Persamaan ekivalen dari torsi elektromagnetik lainnya, dapat ditulis sebagai

$$T_e = \left( \frac{3}{2} \right) \left( \frac{P}{2} \right) (\lambda'_{qr} i'_{dr} - \lambda'_{dr} i'_{qr}) \dots (86)$$

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)(\lambda_{ds}i_{qs} - \lambda_{qs}i_{ds})...(87)$$

Berdasarkan persamaan (69) dan (70), persamaan torsi elektromagnetik dalam fluks lingkup kerangka acuan *arbitrary* dapat dituliskan sebagai

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)\left(\frac{1}{\omega_b}\right)(\psi'_{qr}i'_{dr} - \psi'_{dr}i'_{qr})...(88)$$

Hubungan antara torsi elektromagnetik dan kecepatan rotor dapat dituliskan dengan

$$T_e = 2H \frac{d\omega_r}{dt} + T_L...(89)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{\omega_b}{2H}(T_e - T_L)...(90)$$

Untuk dapat mewakili interpretasi yang berarti dalam pemodelan, analisis, dan simulasi, maka daya input untuk motor tiga fasa harus sama dengan daya input pada mesin dua fasa [14]. Sehingga persamaan daya input dapat dinyatakan dengan

$$P_i = \frac{3}{2}(v_{qs}i_{qs} + v_{ds}i_{ds})...(91)$$

## 2.6 Definisi Tegangan Tidak Seimbang

Ada berbagai definisi ketidakseimbangan tegangan dan [4] menegaskan bahwa ada kebutuhan untuk memahami implikasinya menggunakan salah satu definisi, karena ada sedikit variasi antara persentase ketidakseimbangan yang diperoleh menggunakan dua metode yang berbeda untuk rangkaian tegangan yang sama. Perbedaan ini menjadi signifikan untuk tingkat ketidakseimbangan yang tinggi ketika definisi NEMA digunakan. Menurut [3, 4] ketidakseimbangan tegangan dapat didefinisikan sebagai:

a) NEMA

Asosiasi Produsen Listrik Nasional dan Standar Generator (NEMA MG1.1993) mendefinisikannya, dalam hal *Line Voltage Unbalanced in Percentage (LVUP)* pada terminal mesin listrik sebagai

$$LVUP = \frac{(\max \text{inum\_voltage\_deviation\_from\_average\_line\_voltage})}{(\text{average\_line\_voltage\_magnitude})} \times 100\%...(91)$$

$$LVUP = \frac{\text{Max}[|V_{ab} - V_{Lavg}|, |V_{bc} - V_{Lavg}|, |V_{ca} - V_{Lavg}|]}{V_{Lavg}} \times 100\%...(92)$$

$$\text{dimana } V_{Lavg} = \frac{(V_{ab} + V_{bc} + V_{ca})}{3}...(93)$$



b) IEEE

IEEE std 141, mendefinisikan *Phase Voltage Unbalanced in Percentage* (PVUR) pada terminal mesin. Ketidakseimbangan tegangan fasa dalam persentase PVUR didefinisikan sebagai

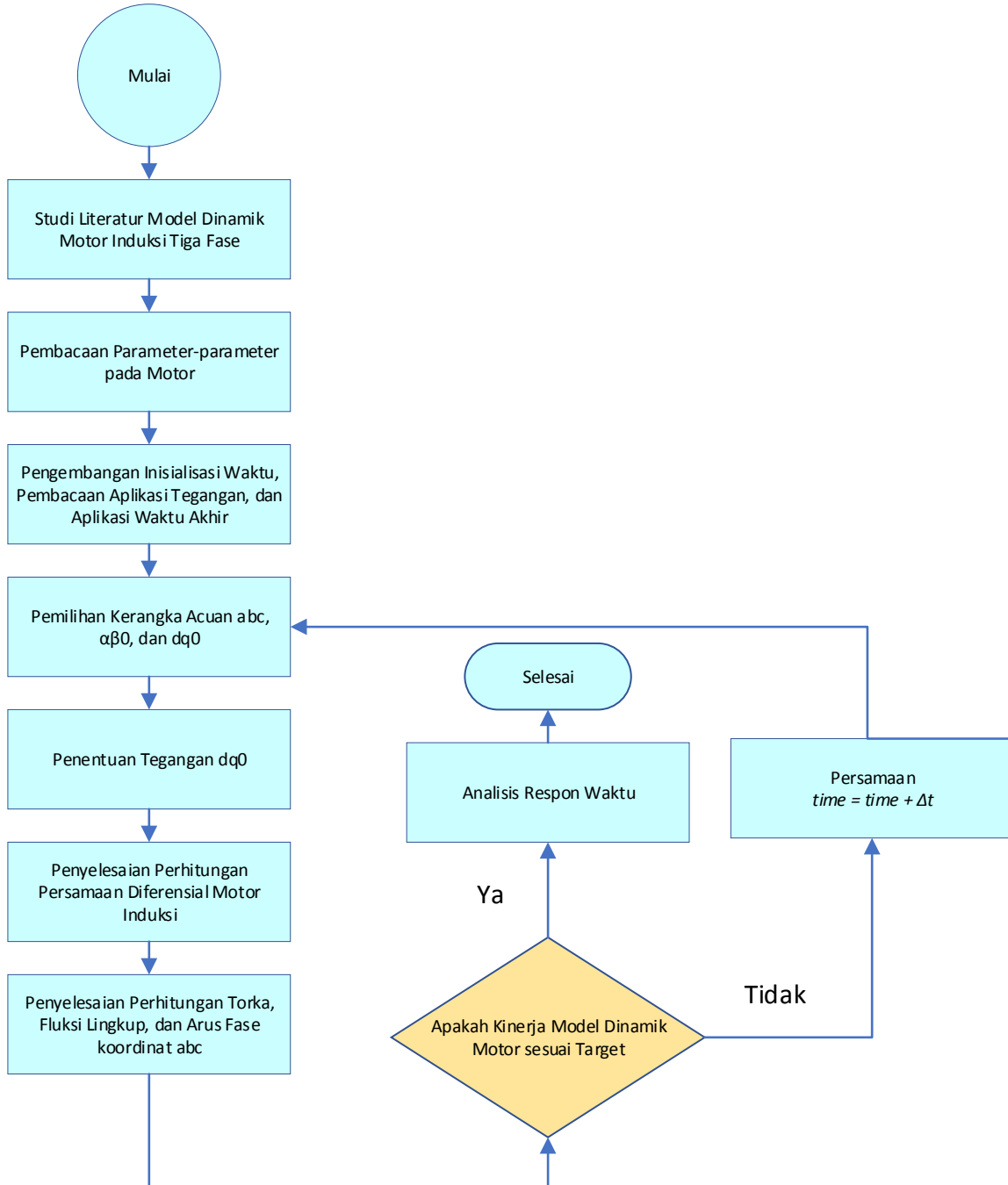
$$PVUR = \frac{\text{Max} \left[ |V_a - V_{pavg}|, |V_b - V_{pavg}|, |V_c - V_{pavg}| \right]}{V_{pavg}} \times 100\% \dots(94)$$

$$\text{dimana } V_{pavg} = \frac{(V_a + V_b + V_c)}{3} \dots(95)$$

# BAB III METODE PENELITIAN

## 3.1 Diagram Alir Penelitian

Urutan kegiatan penelitian ini sesuai dengan diagram alir pada Gambar 3.



Gambar. 3 Diagram alir penelitian

### 3.2 Implementasi Blok Sistem Penelitian

Tes yang dilakukan adalah pengujian tegangan dc, pengujian tanpa beban, dan pengujian rotor hubung singkat. Data pengujian yang diberikan untuk mesin induksi 5 hp, 4 kutub, 220 volt, 3 fase, dan 50 Hz di mana semua tegangan dan arus ac adalah nilai rms.

Pengujian tegangan DC	Pengujian tanpa beban	Pengujian hubung singkat
$V_{dc} = 13,8V$	$V_{nl} = 220V$	$V_{br} = 23,5V$
$I_{dc} = 13,0A$	$I_{nl} = 3,86A$	$I_{br} = 12,9A$
	$P_{nl} = 200W$	$P_{br} = 469W$
	$f = 50Hz$	$f = 15Hz$

Selama pengujian dc, tegangan dc diterapkan pada dua terminal saat mesin tetap diam. Jadi

$$r_s = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{dc}}{I_{dc}} = \frac{13,8}{2 \times 13} = 0,531\Omega \dots\dots(96)$$

Pengujian tanpa beban, yang analog dengan pengujian rangkaian terbuka transformator, dilakukan dengan tegangan 3-fase, 60 Hz pada sistem seimbang, diterapkan pada belitan mekanik stator tanpa beban pada mesin. Input daya selama pengujian tanpa beban ini adalah jumlah dari rugi ohm stator, rugi inti besi karena *hysteresis*, rugi arus eddy, dan rugi rotasi akibat gesekan dan angin. Kehilangan ohm stator adalah ( $I_{nl}$  adalah arus fasa).

$$P_{I^2r_s} = 3I_{nl}^2 r_s = 3 \times (3,86)^2 \times 0,531 = 23,7 \text{ watt} \dots\dots(97)$$

Oleh karena itu rugi-rugi daya yang dikarenakan rugi-rugi gesekan, rugi-rugi angin dan rugi-rugi inti

$$P_{jwc} = P_{nl} - P_{I^2r_s} = 200 - 23,7 = 176,3W \dots\dots(98)$$

Dalam rangkaian ekivalen yang diperlihatkan dalam Gambar 2, rugi-rugi ini diabaikan. Rugi-rugi umumnya kecil, dan dalam banyak kasus sedikit kesalahan yang diperkenalkan dengan mengabaikannya. Hal ini dapat diperhitungkan dengan menempatkan resistor secara paralel dengan reaktansi magnetisasi  $X_M$  atau dengan menerapkan beban mekanis kecil (torsi) ke poros mesin.

Tercatat dari data uji tanpa beban bahwa faktor daya sangat kecil karena daya nyata adalah ( $V_{nl}$  adalah tegangan *line-to-line*).

$$|S_{nl}| = \sqrt{3}V_{nl}I_{nl} = \sqrt{3} \times 220 \times 3,86 = 1470,9V \dots\dots(99)$$

Oleh karena itu, impedansi tanpa-beban sangat induktif dan besarnya diasumsikan sebagai jumlah dari reaktansi bocor pada stator dan reaktansi magnetisasi karena kecepatan rotor pada kecepatan sinkron, dimana  $r'_r / s$  jauh lebih besar dari  $X_M$ . Sehingga

$$\begin{aligned} X_{ls} + X_M &\approx \frac{V_{nl}}{\sqrt{3}I_{nl}} \\ &= \frac{220}{\sqrt{3} \times 3,86} = 32,9 \dots\dots(100) \end{aligned}$$

Selama uji rotor hubung singkat, yang analog dengan uji hubung singkat transformator, rotor dikunci dengan beberapa cara eksternal dan diterapkan tegangan stator 3-fase seimbang. Frekuensi tegangan yang diberikan sering lebih kecil dari nilai untuk mendapatkan nilai representatif dari  $r'_r$  karena, selama operasi normal, frekuensi arus rotor rendah dan hambatan rotor dari beberapa mesin induksi sangat bervariasi dengan frekuensi. Selama *stall*, impedansi  $r'_r + jX'_{lr}$  jauh lebih kecil dalam besarnya daripada  $X_M$ , di mana arus yang mengalir dalam reaktansi magnetisasi dapat diabaikan. Karenanya

$$P_{br} = 3I_{br}^2(r_s + r'_r) \dots\dots(101)$$

$$r'_r = \frac{P_{br}}{3I_{br}^2} - r_s = \frac{469}{3 \times (12,9)^2} - 0,531 = 0,408\Omega \dots\dots(102)$$

Besarnya impedansi input rotor yang dihubungkan singkat adalah

$$|Z_{br}| = \frac{V_{br}}{\sqrt{3}I_{br}} = \frac{23,5}{\sqrt{3} \times 12,9} = 1,052\Omega \dots\dots(103)$$

$$\left| (r_s + r'_r) + j \frac{15}{60} (X_{ls} + X'_{lr}) \right| = 1,052\Omega \dots\dots(104)$$

$$\begin{aligned} \left[ \frac{15}{60} (X_{ls} + X'_{lr}) \right]^2 &= (1,052)^2 - (r_s + r'_r)^2 \\ &= (1,052)^2 - (0,531 + 0,408)^2 \\ &= 0,225\Omega \qquad \dots\dots(105) \end{aligned}$$

Sehingga

$$X_{ls} + X'_{lr} = 1,9\Omega \dots\dots(106)$$

Secara umum,  $X_{ls}$  dan  $X'_{lr}$  diasumsikan sama; Namun, dalam beberapa jenis mesin induksi rasio ada yang berbeda. Dengan menganggap  $X_{ls} = X'_{lr}$ , dimana telah ditentukan parameter mesin. Secara khusus, untuk  $\omega_b = 377 \text{ rad/sec}$  parameternya adalah

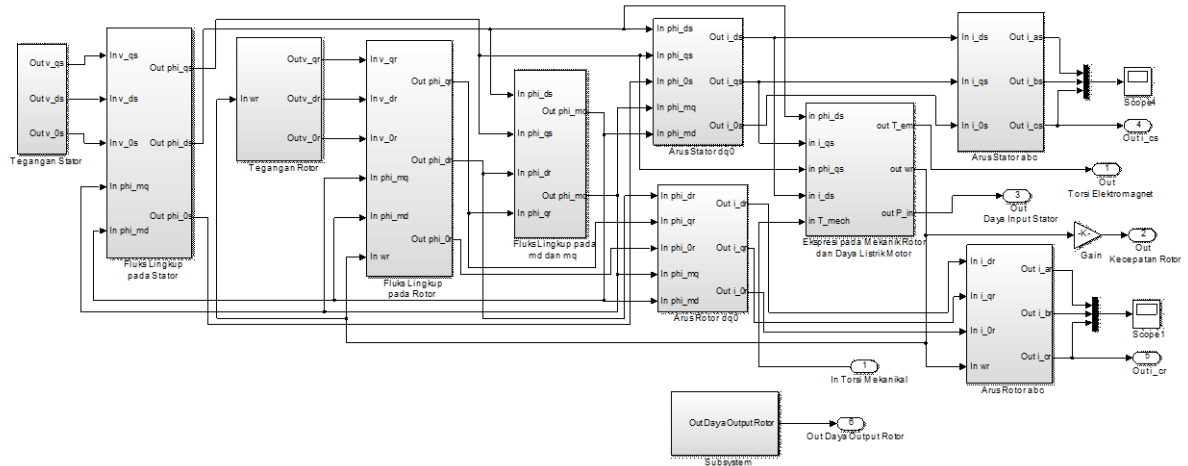
$$r_s = 0,531\Omega$$

$$X_M = 31,95\Omega$$

$$r'_r = 0,408\Omega$$

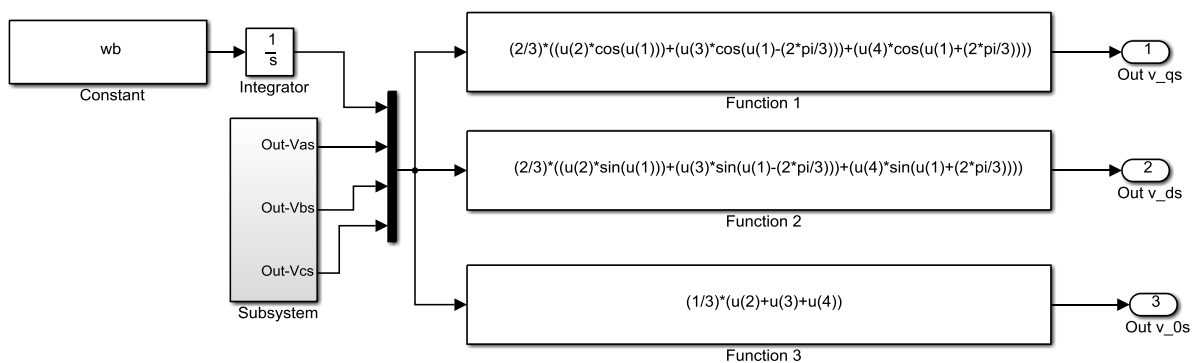
$$X_{ls} = 0,95\Omega$$

$$X'_{lr} = 0,95\Omega$$

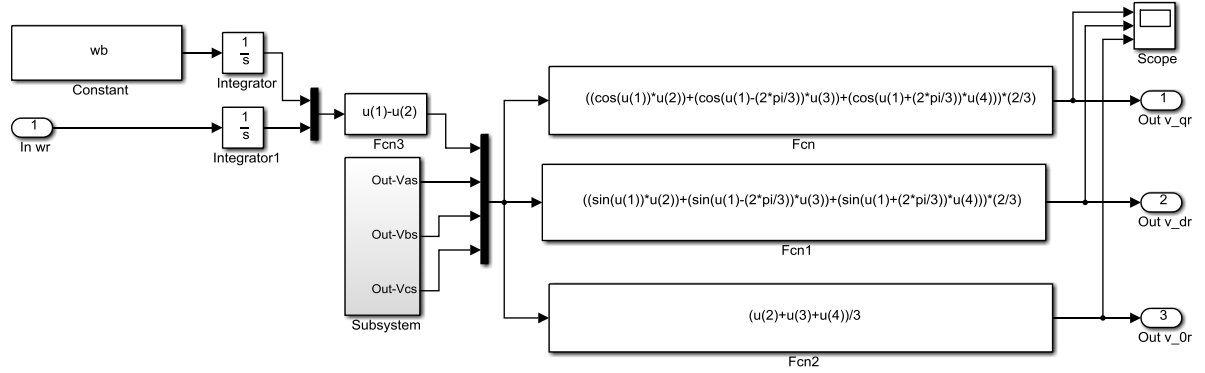


Gambar. 4 Implementasi pemodelan motor induksi tiga fasa

Ada banyak cara untuk menuliskan persamaan motor induksi untuk simulasi pada Matlab. Persamaan-persamaan yang menjadi standar dan yang akan digunakan telah ditulis pada Bab II. Secara khusus, representasi persamaan dari mesin induksi simetris dalam kerangka referensi sewenang-wenang akan digunakan sebagai dasar berbagai mode operasi. Simulasi ini dapat diterima tidak hanya dari sudut pandang mewakili semua mode operasi praktis tetapi juga karena memungkinkan efek kejenuhan untuk disimulasikan dengan mudah (Gambar. 4 dan Gambar. 5). Metode ini juga dapat digunakan untuk mensimulasikan saturasi mesin induksi.



Gambar. 5 Implementasi tegangan stator tiga fasa menjadi dua fasa

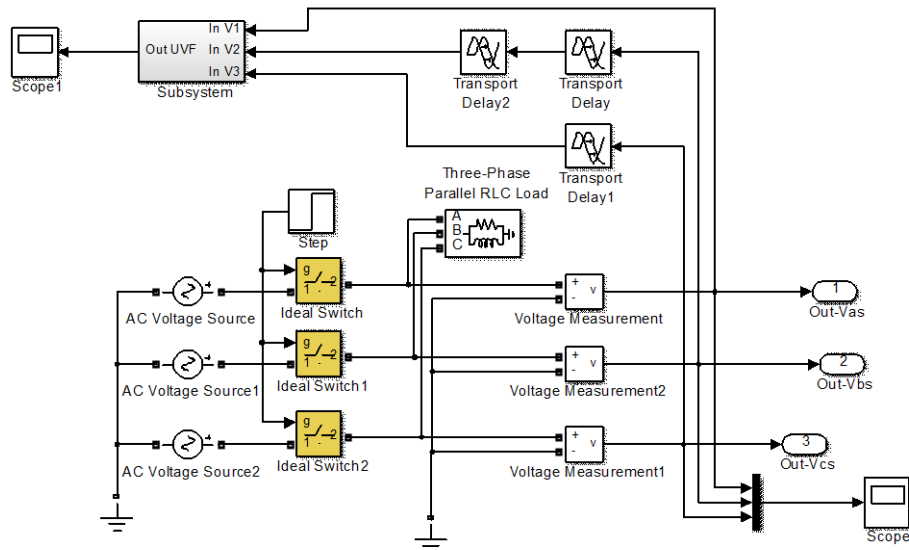


Gambar 6. Implementasi tegangan rotor tiga fasa menjadi dua fasa

Untuk menyederhanakan ekspresi pada persamaan tegangan motor induksi yang diberikan dalam persamaan (1) sampai dengan persamaan (13) dan untuk mendapatkan konstanta koefisien dalam persamaan diferensial, maka kemudian transformasi Park diterapkan. Secara fisik, dapat dipahami dengan mengubah tiga belitan motor induksi menjadi hanya dua belitan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 1. Kemudian pada Gambar. 5 dan Gambar. 6 mesin tiga fase simetris, besaran stator sumbu *direct* dan sumbu *quadrature* adalah fiktif. Kesetaraan untuk besaran *direct* (D) dan *quadrature* (Q) ini dengan besaran per fase adalah sebagai berikut:

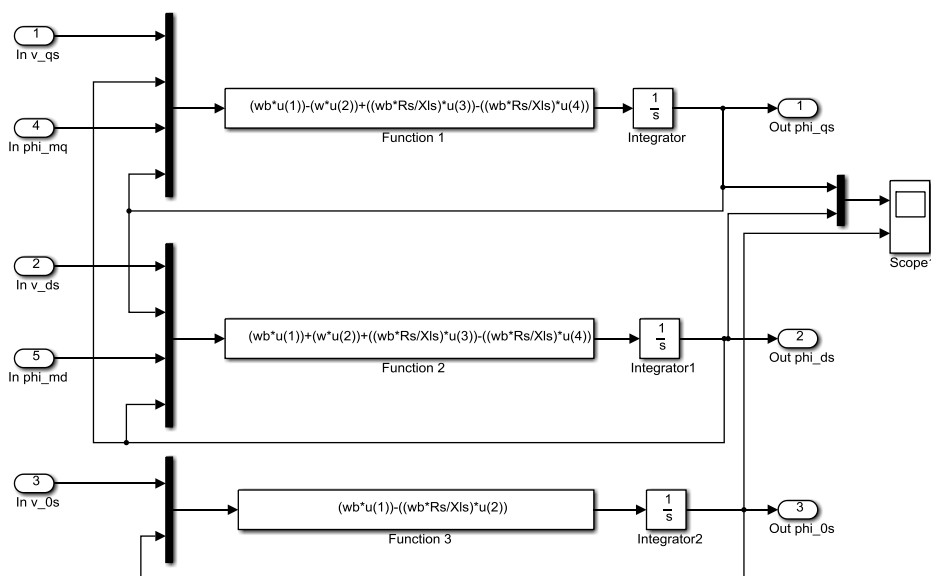
$$\begin{bmatrix} u_{s0} \\ u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{sA} \\ u_{sB} \\ u_{sC} \end{bmatrix} \dots(106)$$

$$\begin{bmatrix} u_{sA} \\ u_{sB} \\ u_{sC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta & -\sin \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{s0} \\ u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} \dots(107)$$

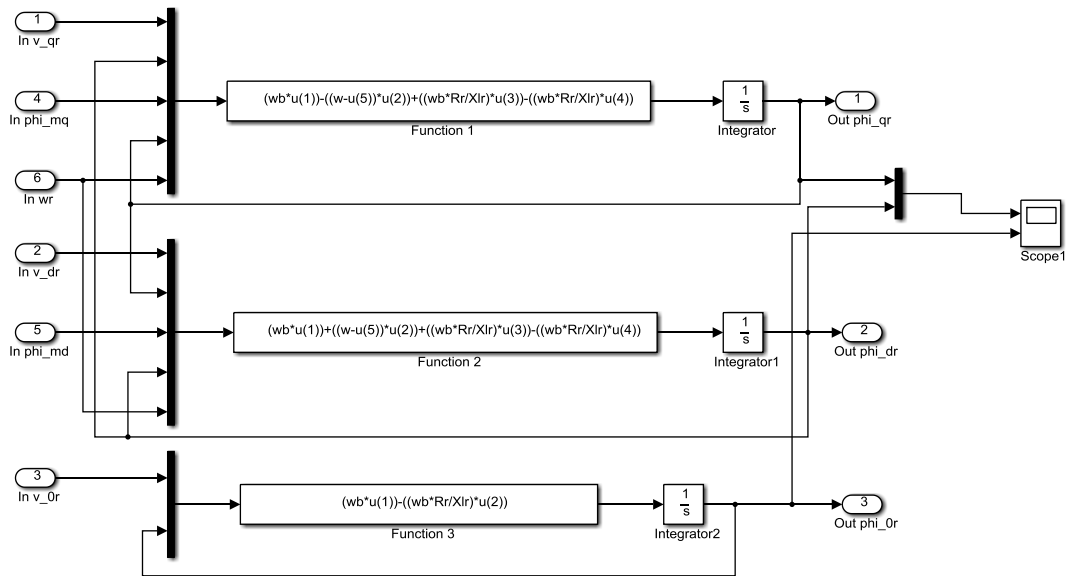


Gambar. 7 Implementasi subsistem tegangan stator tiga fasa

Pada bagian ini, motor induksi tiga fasa dimodelkan dan kemudian disimulasikan dengan Matlab / Simulink. Pemodelan diimplementasikan dengan persamaan-persamaan yang telah dituliskan pada bagian ke-2 metodologi penelitian. Dalam pemodelan ini, simulasi dimulai dengan menghasilkan tegangan stator tiga fasa yang sesuai dengan persamaan (14-35), dan kemudian mengubah tegangan seimbang ini menjadi tegangan dua fasa yang dirujuk pada kerangka acuan secara sinkron menggunakan transformasi  $dq0$  seperti pada persamaan (36-41). Setelah itu, hubungan fluks lingkup  $dq0$  pada persamaan (42-52) diimplementasikan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8 dan Gambar 9.

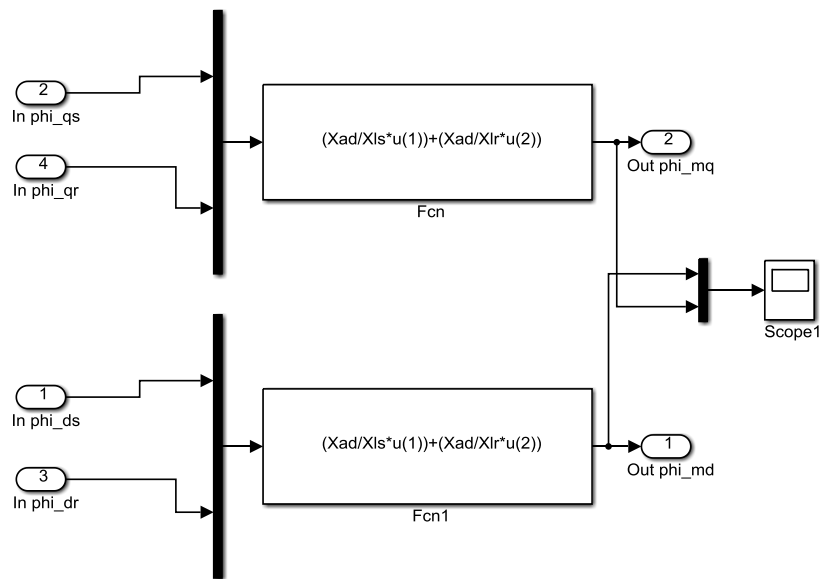


Gambar. 8 Implementasi fluks lingkup pada stator



Gambar. 9 Implementasi fluks lingkup pada rotor

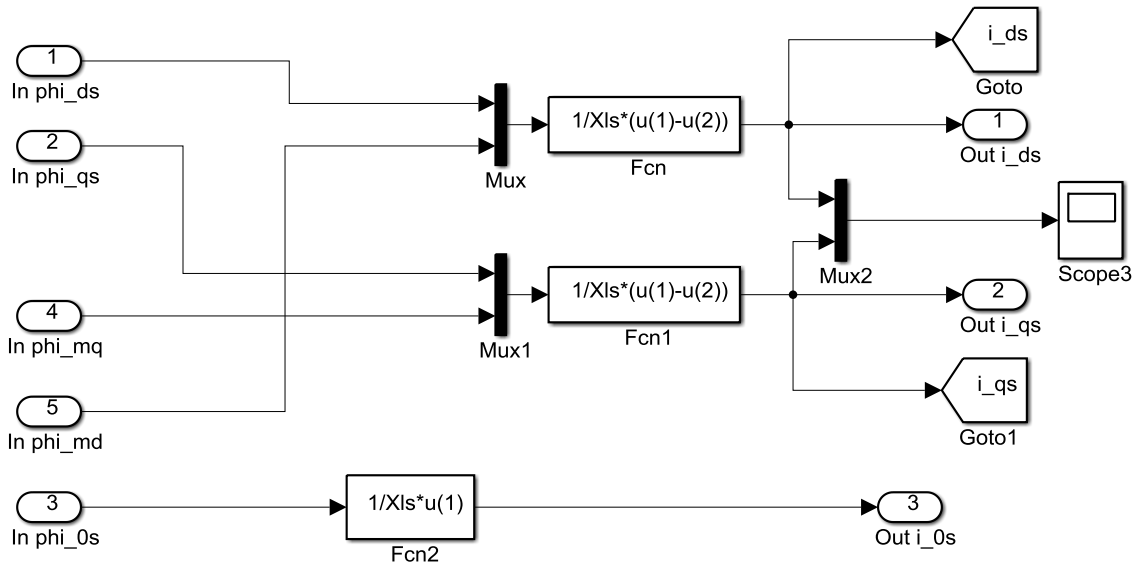
Pada Gambar 4., menunjukkan blok Simulink yang digunakan untuk menghitung arus  $i_{qs}, i_{ds}, i_{qr}, i_{dr}$  sesuai dengan persamaan (53-58), dan menghitung  $\lambda_{mq}, \lambda_{md}$  seperti pada persamaan (59,60).



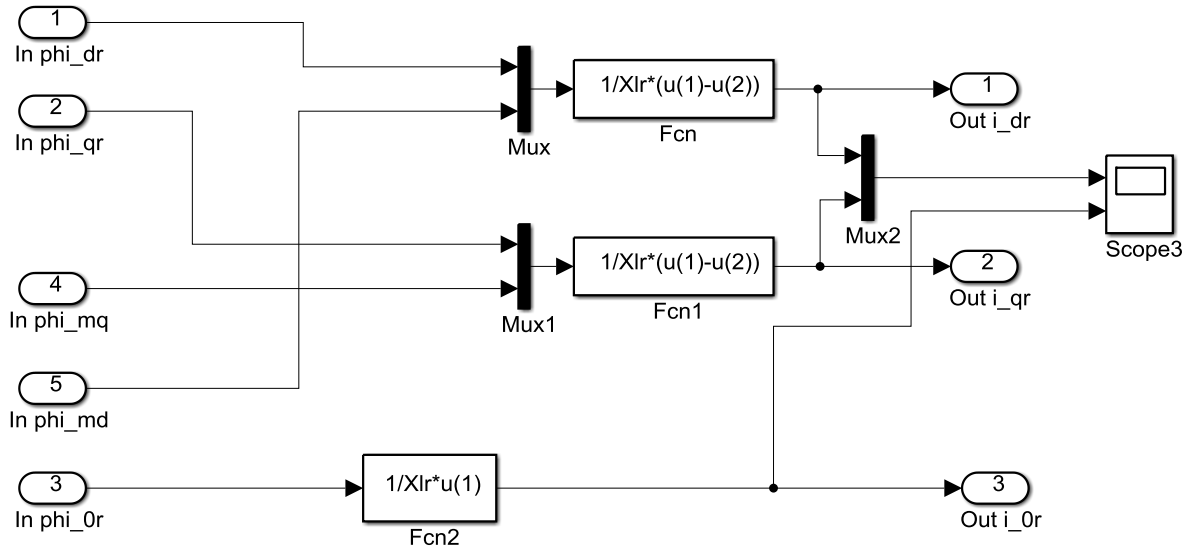
Gambar. 10 Implementasi fluks lingkup pada md dan mq



Pada Gambar 11 dan Gambar 12, menunjukkan blok Simulink yang digunakan untuk menghitung arus  $i_{qs}, i_{ds}, i_{qr}, i_{dr}$  sesuai dengan persamaan (67-72), dan menghitung  $\lambda_{mq}, \lambda_{md}$  seperti pada persamaan (73,74).

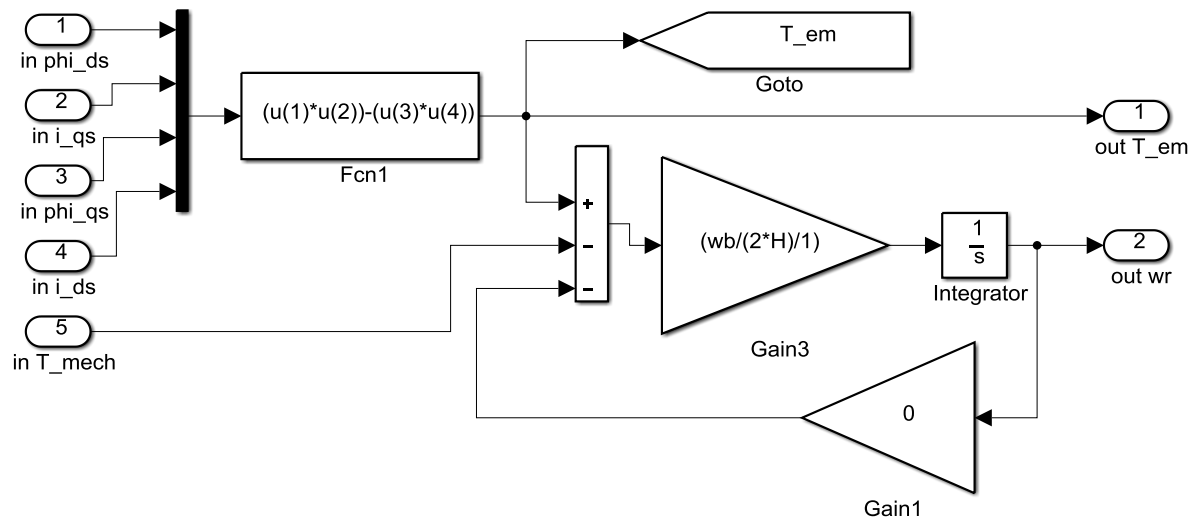


Gambar. 11 Implementasi kalkulasi pada arus  $i_{qs}, i_{ds}, i_{qr}, i_{dr}$

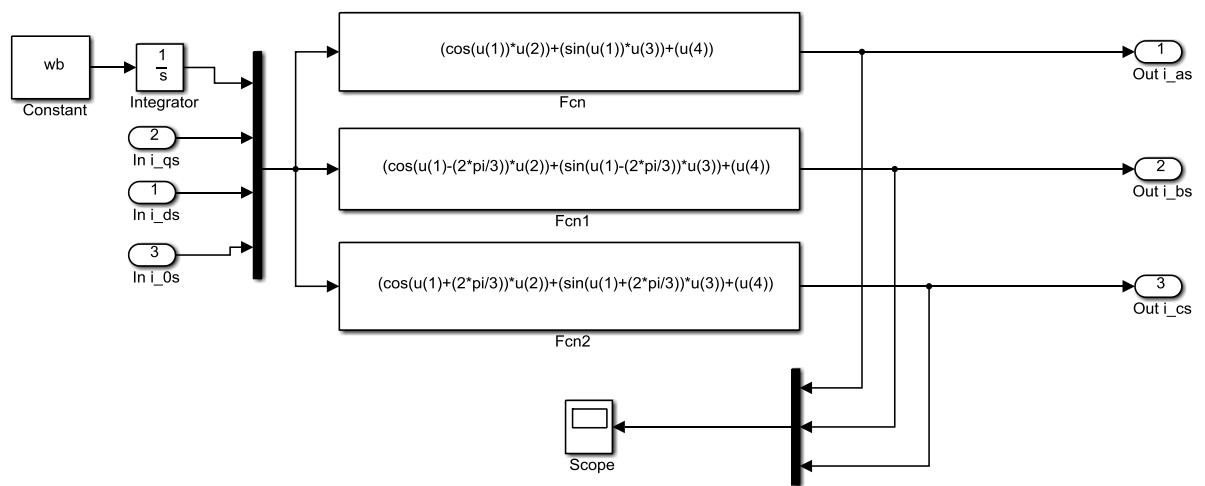


Gambar. 12 Implementasi kalkulasi pada arus  $i_{qs}, i_{ds}, i_{qr}, i_{dr}$

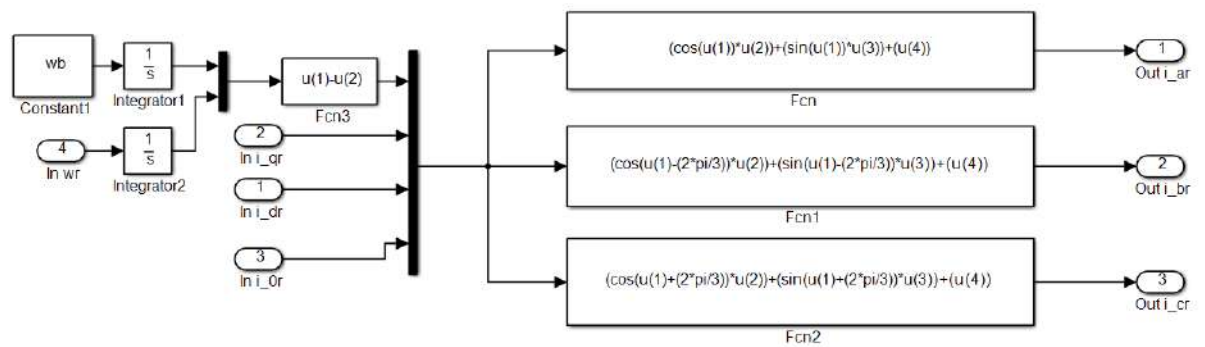
Pada Gambar 13, menunjukkan blok Simulink yang digunakan untuk menghitung torsi elektromagnetik  $T_e$  dan kecepatan rotor  $\omega_r$  sesuai dengan persamaan (84-90), serta untuk menghitung daya input  $p_i$  seperti pada persamaan (91).



Gambar. 13 Implementasi kalkulasi pada Torsi elektromagnetik, Kecepatan rotor, dan Daya input



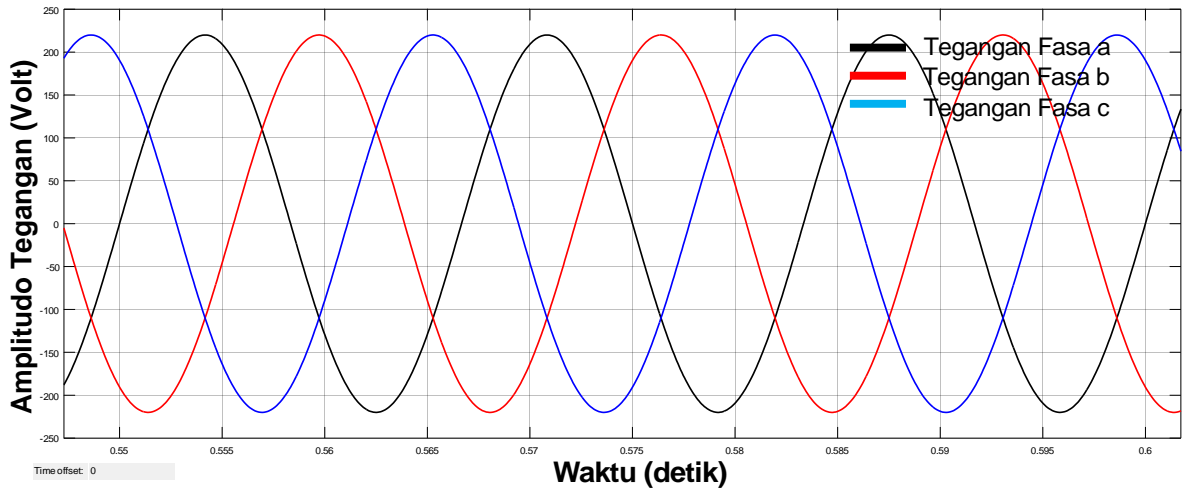
Gambar. 14 Implementasi kalkulasi pada arus stator



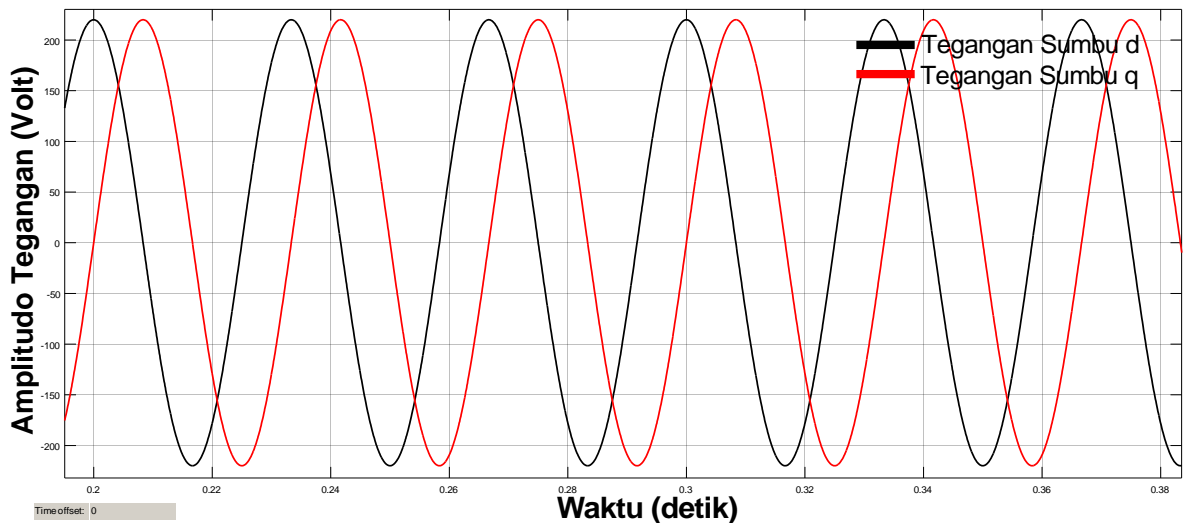
Gambar. 15 Implementasi kalkulasi pada arus rotor

## BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Karakteristik Tegangan Stator



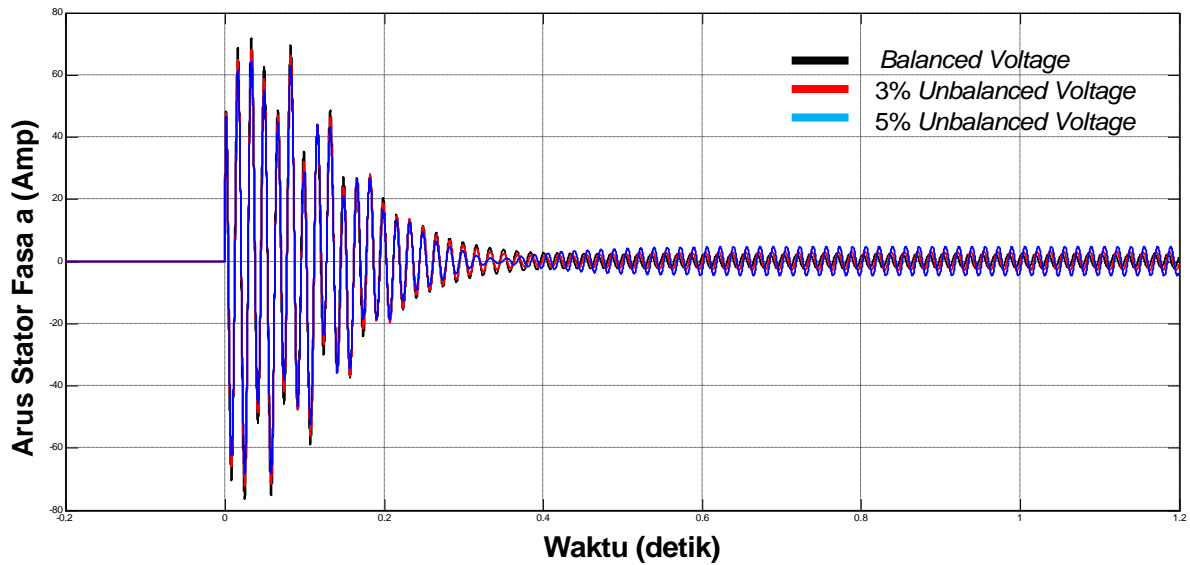
Gambar 16. Tegangan tiga fasa abc



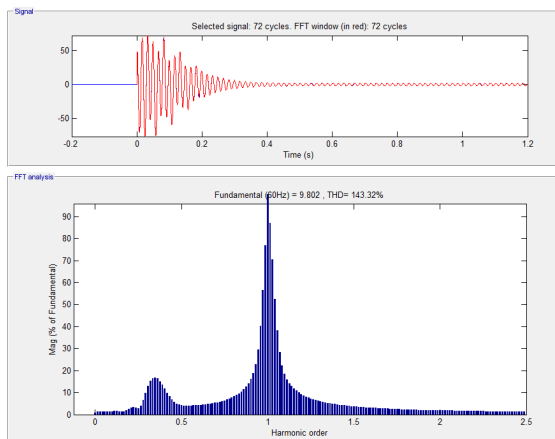
Gambar 17. Tegangan dua fasa  $dq$

Tegangan input dari pemodelan motor induksi tiga fasa adalah tegangan tiga fasa. Untuk dapat mempermudah analisis kinerja motor induksi tersebut maka diperlukan pemodelan dinamik dengan menggunakan pemodelan kerangka acuan atau metode transformasi  $dq0$ . Pemodelan dinamik ini dibentuk dari transformasi tegangan tiga fasa abc ( $\angle 120^\circ$ ) menjadi tegangan dua fasa  $dq$  ( $\angle 90^\circ$ ).

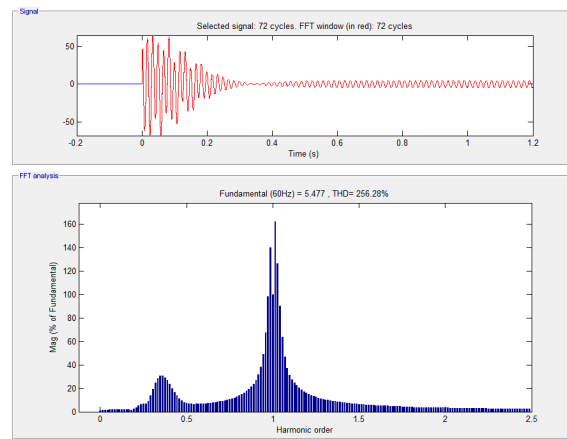
## 4.2 Karakteristik Arus Stator dan Arus Rotor



Gambar 18. Grafik karakteristik arus keluaran stator tiga fasa

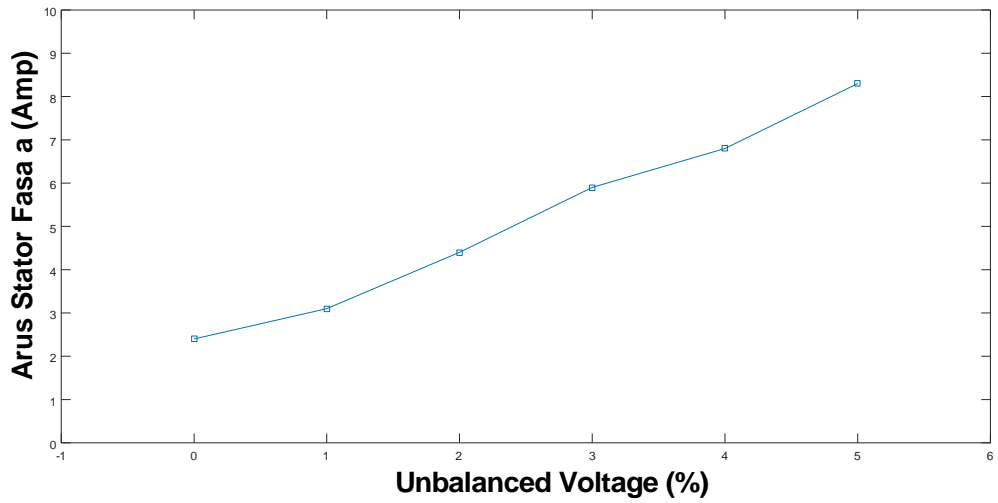


Gambar 19. Total harmonik distorsi Arus stator saat tegangan seimbang

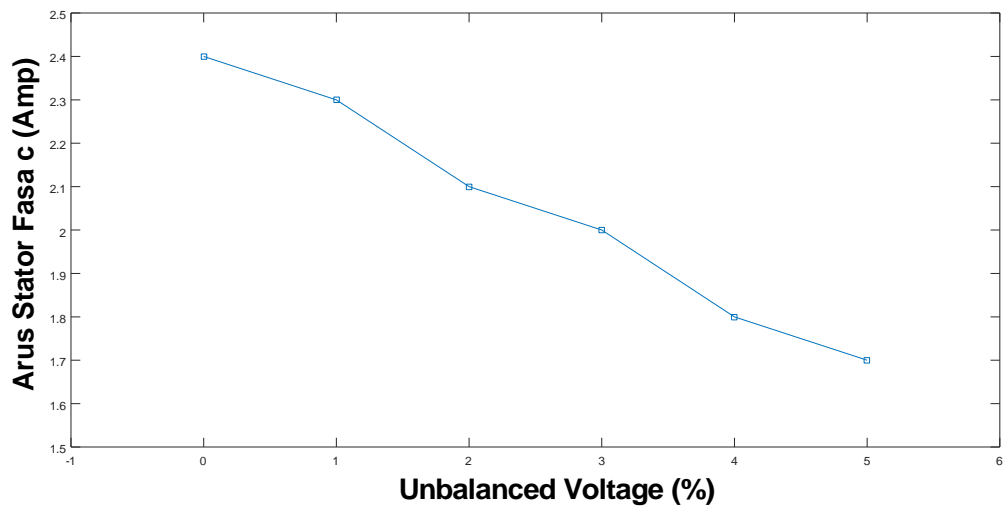


Gambar 20. Total harmonik distorsi arus stator saat 5% unbalanced voltage

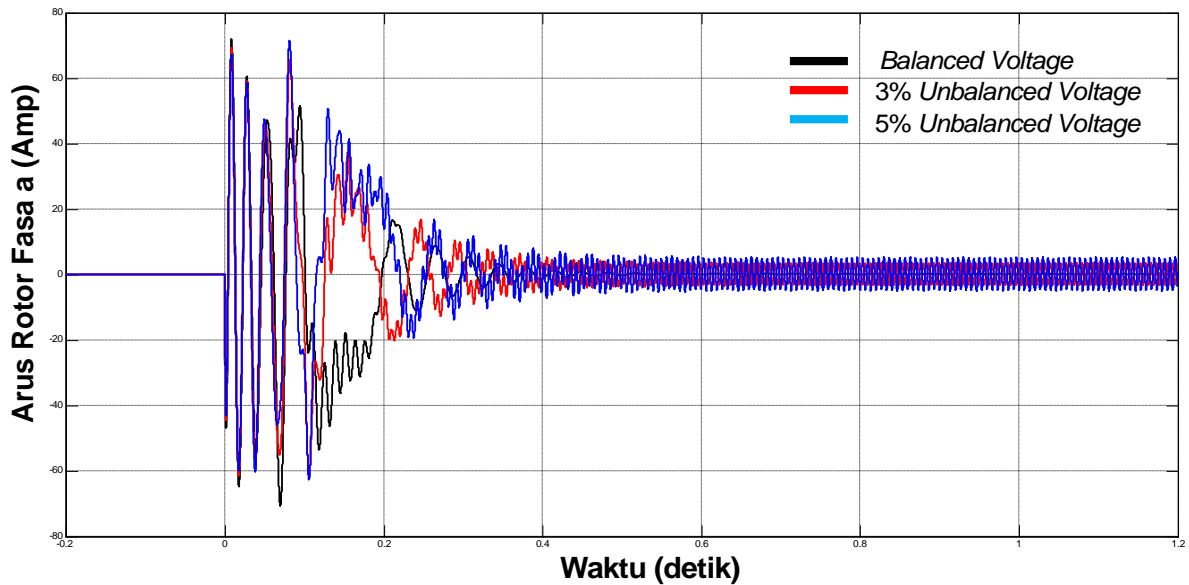
Gambar 18, 19, dan 20, memperlihatkan karakteristik arus stator motor induksi pada saat pengasutan sampai dengan pada saat kondisi *steady state*. Pada saat keadaan tegangan seimbang, ketiga arus stator mempunyai nilai maksimum sebesar 69,2 Ampere dengan rentang waktu sebesar 0,37 detik untuk mencapai keadaan *steady state* sebesar 2,4 Ampere. Tetapi pada saat terjadi keadaan tegangan tidak seimbang sebesar 1%, sampai dengan 5%, arus stator pada salah satu fasa (fasa a) mengalami kenaikan nilai amplitudo sebesar 3,1 Ampere sampai dengan 8,3 Ampere atau mengalami kenaikan sebesar 29,1% sampai dengan 245,8%. Dan pada arus stator fasa yang lain (fasa c) terjadi penurunan nilai arus sebesar 0,1 Ampere sampai dengan 0,7 Ampere, sehingga hal ini dapat dikatakan bahwa terjadi arus pembebanan yang tidak seimbang diantara ketiga fasa pada saat tegangan tidak seimbang. Untuk lebih jelasnya hal ini dapat dilihat pada Gambar 21 dan Gambar 22.



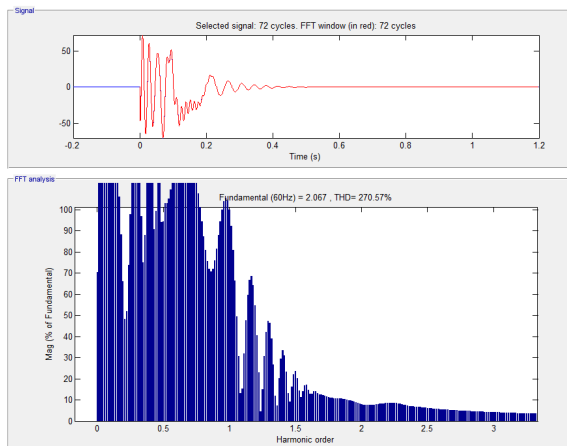
Gambar 21. Karakteristik arus stator fasa a pada saat terjadi ketidakseimbangan tegangan



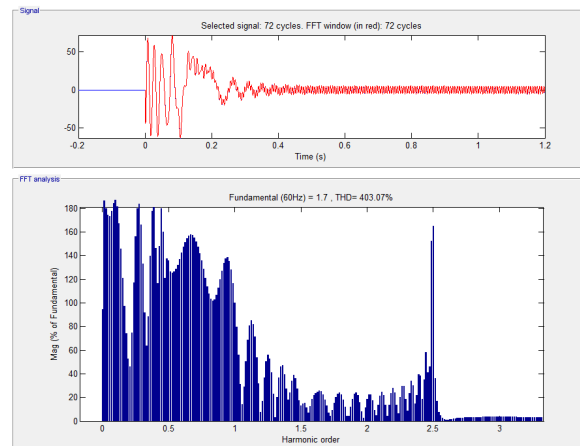
Gambar 22. Karakteristik arus stator fasa c pada saat terjadi ketidakseimbangan tegangan



Gambar 23. Grafik karakteristik arus keluaran rotor tiga fasa



Gambar 24. Total harmonik distorsi Arus rotor saat tegangan seimbang

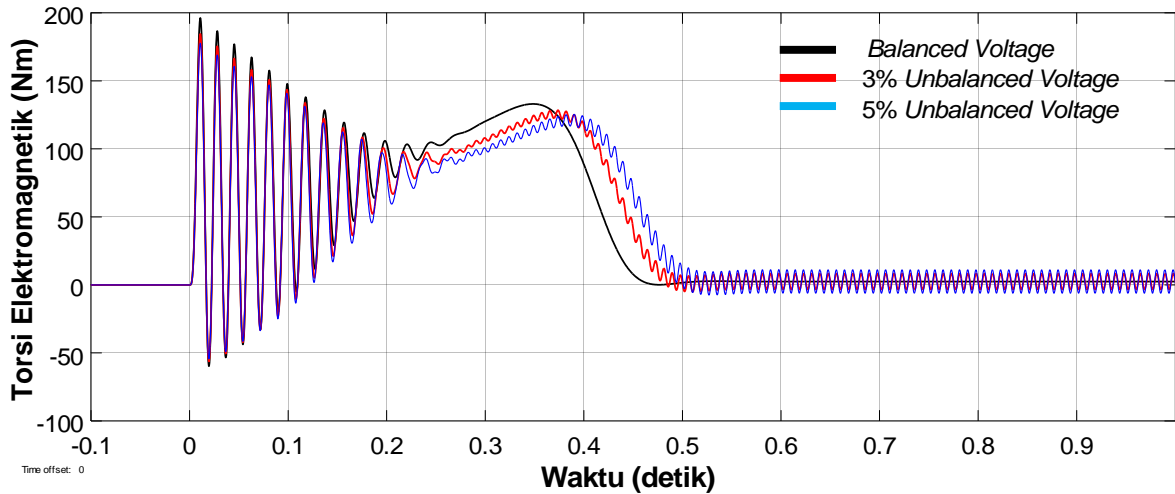


Gambar 25. Total harmonik distorsi arus rotor saat 5% unbalanced voltage

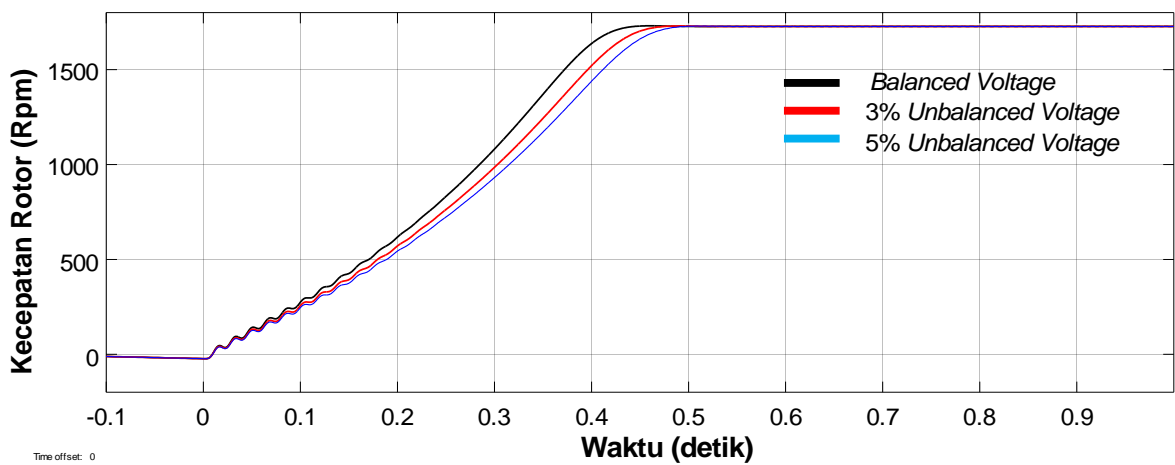
Gambar 23, 24, dan 25, memperlihatkan karakteristik arus rotor motor induksi pada saat pengasutan sampai dengan pada saat kondisi *steady state*. Pada saat keadaan tegangan seimbang, ketiga arus rotor mempunyai nilai maksimum sebesar 68,7 Ampere dengan rentang waktu sebesar 0,37 detik untuk mencapai keadaan *steady state* sebesar 1,4 Ampere. Tetapi pada saat terjadi keadaan tegangan tidak seimbang sebesar 1%, sampai dengan 5%, arus rotor pada ketiga fasa tersebut mengalami kenaikan nilai amplitudo sebesar 3,3 Ampere sampai dengan 6,7 Ampere atau mengalami kenaikan sebesar 135,7% sampai dengan 378,6%. Fenomena lain yang terjadi pada arus rotor saat tegangan tidak seimbang adalah terdapatnya osilasi gelombang pada arus dan distorsi harmonik. Distorsi harmonik ini mengalami kenaikan sebesar 48,9% saat ketidakseimbangan tegangan terjadi sebesar 5%.

Efek dari timbulnya osilasi gelombang dan distorsi harmonik inilah yang dapat menimbulkan efek pemanasan pada rotor motor induksi selain kenaikan arus rotor.

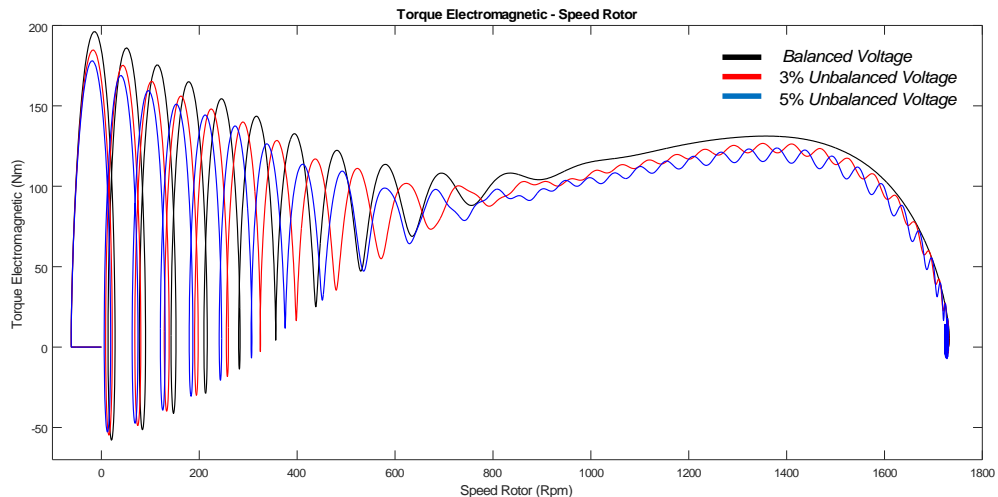
### 4.3 Karakteristik Torsi Elektromagnetik dan Kecepatan Putaran Rotor



Gambar 26. Grafik karakteristik Torsi elektromagnetik terhadap waktu



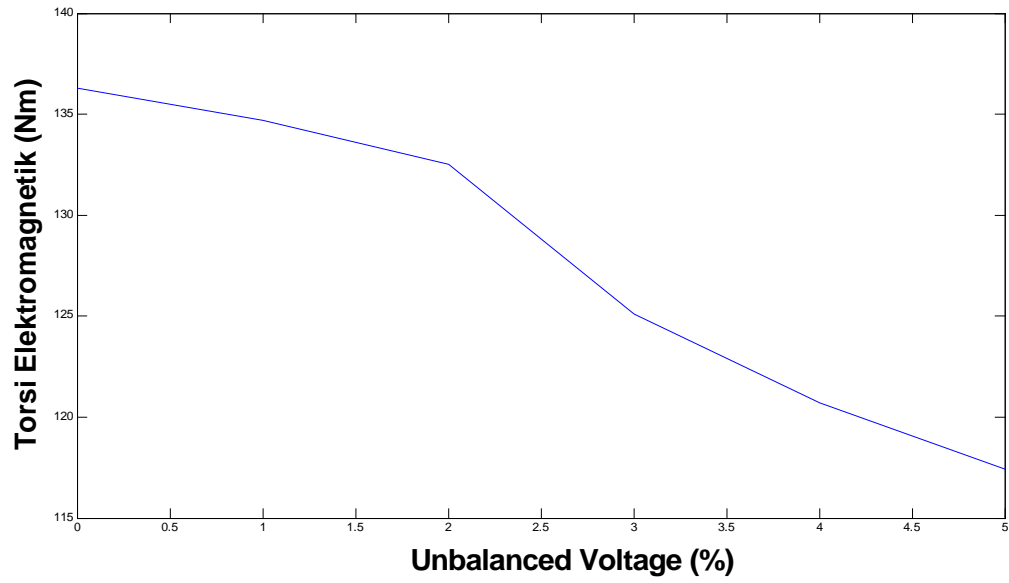
Gambar 27. Grafik karakteristik Kecepatan rotor terhadap waktu



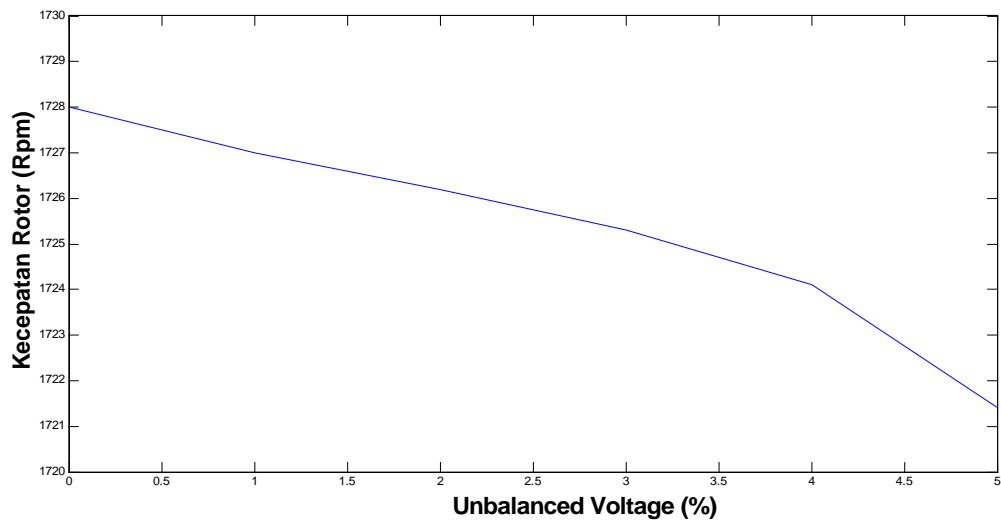
Gambar 28. Grafik karakteristik torsi elektromagnetik terhadap kecepatan rotor

Gambar 26 dan Gambar 28, memperlihatkan karakteristik torsi elektromagnetik motor induksi pada saat pengasutan sampai dengan kondisi *steady state*. Pada gambar tersebut torsi elektromagnetik mengalami kenaikan sampai pada keadaan nilai maksimum dan kemudian turun sampai pada keadaan *steady state*. Hal ini seiring dengan kecepatan putaran rotor, dimana karakteristik kecepatan putaran rotor mempunyai karakteristik yang sama dengan torsi elektromagnetik. Pada saat keadaan tegangan seimbang, torsi elektromagnetik mempunyai nilai maksimum sebesar 136,3 Nm dengan rentang waktu sebesar 0,37 detik untuk mencapai keadaan *steady state*. Tetapi pada saat keadaan tegangan tidak seimbang sebesar 1%, sampai dengan 5%, torsi elektromagnetik mengalami penurunan nilai maksimum sebesar 3,95 Nm sampai dengan 18,85 Nm dan mengalami rentang waktu yang lebih lama untuk mencapai keadaan *steady state* sebesar 0,01 detik sampai dengan 0,02 detik, dan untuk lebih jelasnya hal ini dapat dilihat pada Gambar 29. Pada Gambar 27 dan Gambar 28, memperlihatkan karakteristik kecepatan putaran rotor pada saat pengasutan sampai dengan keadaan *steady state*. Pada keadaan tegangan seimbang, kecepatan putaran rotor mempunyai nilai sebesar 1727,4 Rpm dengan rentang waktu sebesar 0,37 detik untuk mencapai keadaan *steady state*. Tetapi pada saat keadaan tegangan tidak seimbang sebesar 1%, sampai dengan 5%, kecepatan putaran rotor mengalami penurunan nilai sebesar 1 Rpm sampai dengan 6,6 Rpm dan mengalami rentang waktu yang lebih lama untuk mencapai keadaan *steady state* sebesar 0,01 detik sampai dengan 0,02 detik, dan untuk lebih jelasnya hal ini dapat dilihat pada Gambar 30.



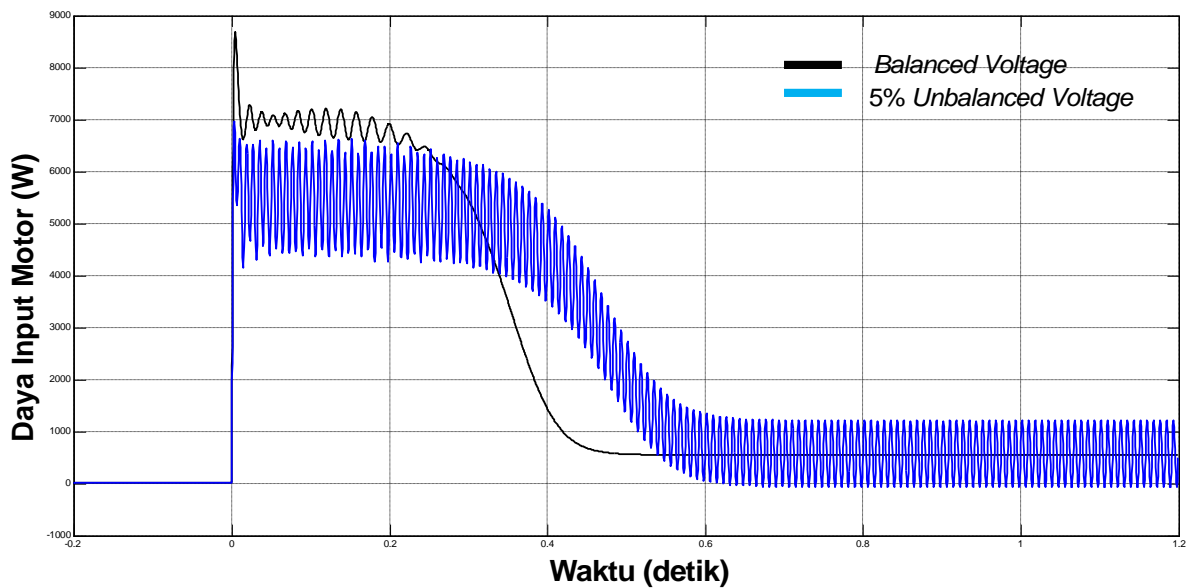


Gambar 29. Karakteristik torsi elektromagnetik terhadap ketidakseimbangan tegangan



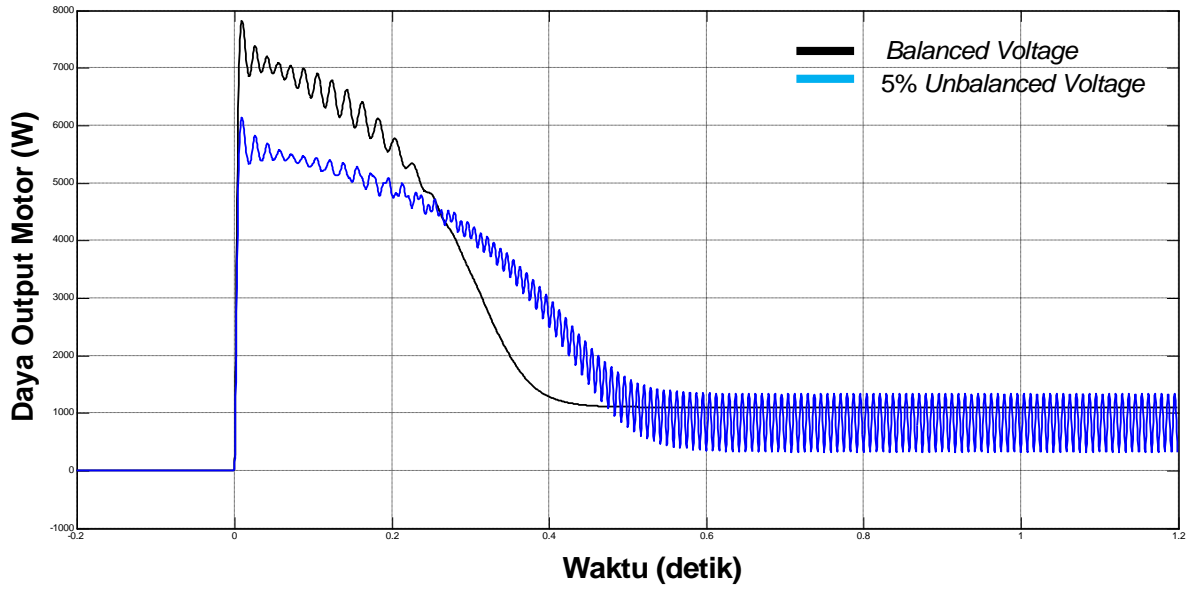
Gambar 30. Karakteristik kecepatan rotor terhadap ketidakseimbangan tegangan

#### 4.4 Karakteristik Daya Masukan dan Daya Keluaran Motor

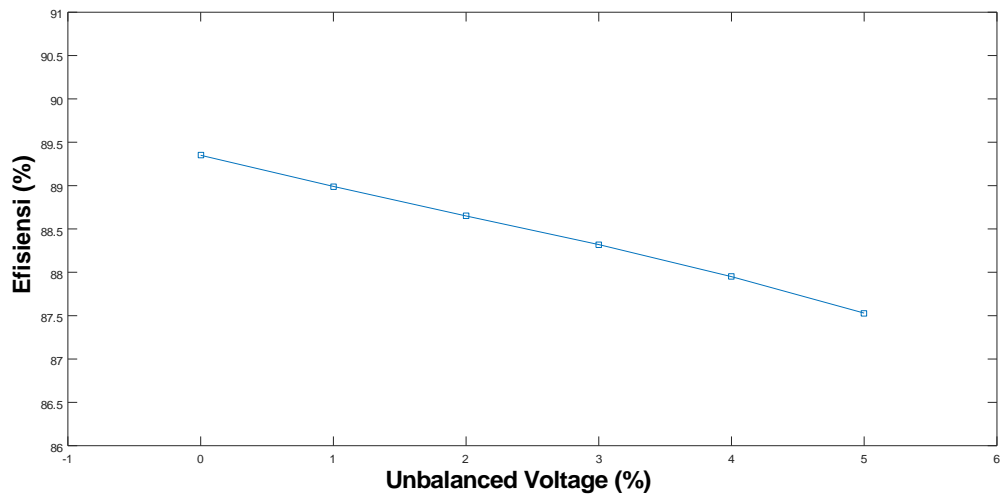


Gambar 31. Karakteristik daya input terhadap waktu

Gambar 31 dan Gambar 32, memperlihatkan karakteristik daya pada motor induksi. Pada saat keadaan tegangan seimbang, daya input motor (Gambar 31) mempunyai nilai maksimum sebesar 8,76 Kw. Tetapi pada saat terjadi keadaan tegangan tidak seimbang sebesar 1%, sampai dengan 5%, daya input maksimum pada motor tersebut mengalami penurunan nilai sebesar 1,23 Kw sampai dengan 6,97 Kw atau mengalami penurunan sebesar 16,33% sampai dengan 25,68%. Untuk daya output motor (Gambar 32) mempunyai nilai maksimum sebesar 7,46 Kw. Tetapi pada saat terjadi keadaan tegangan tidak seimbang sebesar 1%, sampai dengan 5%, daya input maksimum pada motor tersebut mengalami penurunan nilai sebesar 930 w sampai dengan 6,14 Kw atau mengalami penurunan sebesar 14,24% sampai dengan 21,5%. Dari hasil daya input dan daya output motor, maka didapatkan nilai efisiensi motor yang mengalami penurunan antara 89,35% sampai 87,42% (Gambar 33).



Gambar 32. Karakteristik daya output terhadap waktu



Gambar 33. Efisiensi motor terhadap ketidakseimbangan tegangan

## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

Pada makalah pengaruh kinerja motor induksi pada tegangan tak seimbang dengan metode transformasi direct quadrature dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Implementasi dan pemodelan dinamik dari motor induksi tiga fasa menggunakan Matlab/Simulink disajikan secara bertahap. Simulasi pemodelan kinerja motor induksi dengan metode kerangka acuan telah memberikan respons yang memuaskan, dalam hal dapat menganalisis karakteristik torsi elektromagnetik, kecepatan putaran rotor, arus stator, arus rotor, dan daya motor.
2. Pada saat terjadi ketidakseimbangan tegangan mencapai 5%, karakteristik arus stator pada salah satu fasa dapat mengalami kenaikan hingga 245,8%. Hal ini dapat mengakibatkan efek pemanasan yang tidak merata pada ketiga fasa tersebut.
3. Pada karakteristik torsi elektromagnetik dan arus rotor, terdapat fenomena osilasi gelombang yang semakin besar jika terjadi ketidakseimbangan tegangan yang semakin besar. Hal ini dapat mengakibatkan terjadinya getaran pada motor yang semakin besar, sehingga NEMA membatasi untuk pengoperasian motor induksi tidak boleh melampaui 5% dari nilai ketidakseimbangan tegangan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mirabbasi, D., Seifossadat, G., & Heidari, M. (2009, November). Effect of unbalanced voltage on operation of induction motors and its detection. In *2009 International Conference on Electrical and Electronics Engineering-ELECO 2009* (pp. I-189). IEEE.
- [2] Ansari, A. A., & Deshpande, D. M. (2009, July). Investigation of performance of 3-phase asynchronous machine under voltage unbalance. In *Journal of Theoretical and applied information Technology*.
- [3] Aderibigbe, A., Ogunjuyigbe, A., Ayodele, R., & Samuel, I. (2017). The performance of a 3-phase induction machine under unbalance voltage regime. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, *10*(5), 136-143.
- [4] Pillay, P., & Manyage, M. (2001). Definitions of voltage unbalance. *IEEE Power Engineering Review*, *21*(5), 50-51.
- [5] Lee, R. J., Pillay, P., & Harley, R. G. (1984). D, Q reference frames for the simulation of induction motors. *Electric power systems research*, *8*(1), 15-26.
- [6] Shah, S., Rashid, A., & Bhatti, M. K. L. (2012). Direct quadrate (dq) modeling of 3-phase induction motor using matlab/simulink. *Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering*, *3*(5), 237-243.
- [7] Bellure, A., & Aspalli, M. S. (2015). Dynamic dq model of Induction Motor using Simulink. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, *24*(5), 252-257.
- [8] Patel, H. K. (2009). Steady state and transient performance analysis of three phase induction machine using MATLAB simulations. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, *1*(3), 266.
- [9] Kamal, A., & Giri, V. K. (2013). Mathematical modelling of dynamic induction motor and performance analysis with bearing fault. *International Journal of Innovative Technology and Research*, *1*(4), 336-340.
- [10] Deb, P. B., & Sarkar, S. (2016). Dynamic model analysis of three phase induction motor using Matlab/Simulink. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, *7*(3), 572.
- [11] Ratnani, P. L., & Thosar, A. G. (2014). Mathematical Modelling of an 3 Phase Induction Motor Using MATLAB/Simulink. *International Journal Of Modern Engineering Research (IJMER)*, *4*(6), 62-67.

- [12] Sarma Sunilkumar, M., & Patel, A. T. (2016). Mathematical Modelling of an 3 Phase Induction Motor Using MATLAB/Simulink.
- [13] Krause, P. C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D., & Pekarek, S. (2002). *Analysis of electric machinery and drive systems* (Vol. 2). New York: IEEE press.
- [14] Krishnan, R. (2001). *Electric motor drives: modeling, analysis and control*. Prentice Hall.

## Analisis Pengaruh Tegangan Tidak Seimbang pada Kinerja Motor Induksi Menggunakan Metode Transformasi *Direct Quadrature*

Paulus Setiawan

Departemen Aeronautika, Sekolah Tinggi Teknologi Adisutjipto, Yogyakarta  
email: paulussetiawanstta@gmail.com

### **Abstract**

*Induction motors are one type of electric motors that work based on electromagnetic induction. The problem that often arises lately is the occurrence of voltage imbalances. Unbalanced voltage is a voltage value that is not the same in a three-phase voltage system contained in the electrical power system. On the basis of these problems, it is necessary to conduct research that can analyze the dynamics of the performance of an induction motor. Dynamic analysis is done by modeling a three-phase induction motor using an arbitrary reference frame with the direct quadrature transformation method in Matlab/Simulink. In studies with voltage imbalances up to 5%, electromagnetic torque has decreased by 2.89% to 13.83% and stator current in one phase has increased by 29.1% to 245.8%.*

*Keywords — dq0 transformation, Matlab/Simulink, reference frame arbitrary, three phase induction motor, unbalanced voltage.*

### **1. Pendahuluan**

Motor induksi adalah salah satu jenis dari motor-motor listrik yang bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik. Motor induksi memiliki sebuah sumber energi listrik yaitu di sisi stator, sedangkan sistem kelistrikan di sisi rotornya diinduksikan melalui celah udara dari stator dengan media elektromagnet, sehingga hal inilah yang dapat menyebabkan motor tersebut diberi nama motor induksi. Adapun penggunaan motor induksi di industri adalah sebagai penggerak blower, kompresor, pompa, penggerak utama proses produksi atau *mill*, dan lain sebagainya.

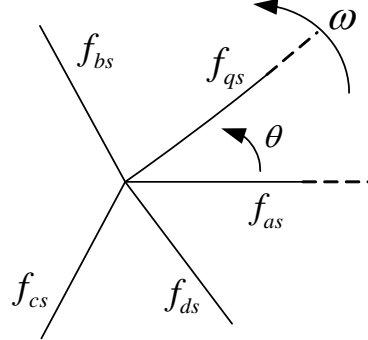
Permasalahan yang sering muncul belakangan ini adalah terjadinya ketidakseimbangan tegangan. Tegangan tidak seimbang adalah suatu nilai tegangan yang tidak sama pada sistem tegangan tiga fasa yang terdapat dalam sistem distribusi daya listrik. Tegangan yang tidak seimbang tersebut dapat menyebabkan masalah serius pada motor induksi [1-3] dan perangkat induktif lainnya. Selain masalah tersebut, ketidakseimbangan tegangan juga dapat menyebabkan arus pada motor induksi menjadi tidak seimbang dan mengalami kenaikan beberapa kali, dan juga dapat memberikan efek pemanasan kepada motor sehingga efisiensi motor induksi menjadi turun.

Atas dasar permasalahan tersebut, perlu dilakukan penelitian yang dapat menganalisis dinamika kinerja motor induksi. Analisis dinamik dilakukan dengan memodelkan motor induksi tiga fasa menggunakan kerangka acuan *arbitrary*. Dalam kerangka acuan tersebut, metode yang digunakan adalah metode transformasi *direct quadrature*. Metode transformasi *direct quadrature* adalah metode transformasi yang mengubah dari sistem tiga fasa *abc* ke bentuk sistem dua fasa dengan konfigurasi *dq0* [5-12], sebagai tujuan untuk memudahkan perhitungan parameter-parameter dan komponen dari suatu motor induksi yang kemudian disimulasikan dengan Matlab Simulink. Untuk hasil luaran yang akan dicapai adalah dapat menganalisis dan mengetahui karakteristik dari arus stator, arus rotor, torsi elektromagnetik, kecepatan putaran rotor, daya masukan motor, daya keluaran motor, dan efisiensi saat terjadi gangguan tegangan tidak seimbang.

## 2. Metodologi Penelitian

### 2.1 Transformasi Tegangan Tiga Fasa menjadi Dua Fasa

Untuk melakukan analisis terhadap mesin induksi diperlukan pengetahuan tentang teori kerangka acuan yang dikenalkan oleh R. H. Park sekitar tahun 1920-an, yang merupakan sebuah pendekatan untuk menganalisis mesin-mesin listrik, yang dikenal dengan Transformasi Park. Transformasi Park mengubah variabel-variabel dari sumbu  $abc$  ke dalam sumbu  $direct$  dan  $quadrature$  atau yang lebih dikenal dengan sumbu  $dq$ . Transformasi ini dapat dilukiskan sebagai hubungan trigonometri antara variabel-variabel dalam sumbu  $abc$  dengan variabel dalam sumbu  $dq$  [13], seperti terlihat dalam Gambar 1.



Gambar 1. Skema Transformasi Ekuivalen

Persamaan tegangan dalam ragam variabel mesin dapat dituliskan sebagai

$$v_{abcs} = r_s i_{abcs} + p \lambda_{abcs} \quad (1)$$

$$v_{abcr} = r_r i_{abcr} + p \lambda_{abcr} \quad (2)$$

dimana:

$$(f_{abcs})^T = [f_{as} \quad f_{bs} \quad f_{cs}] \quad (3)$$

$$(f_{abcr})^T = [f_{ar} \quad f_{br} \quad f_{cr}] \quad (4)$$

Pada persamaan di atas, subscript  $s$  menyatakan parameter dan variabel yang dikelompokkan ke dalam rangkaian stator, dan subscript  $r$  menyatakan parameter dan variabel yang dikelompokkan ke dalam rangkaian rotor. Untuk sistem linear magnetik, fluks lingkup dapat dituliskan sebagai

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abcr} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Secara khusus belitan induktansi dapat diturunkan dengan persamaan

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$L_{sr} = L_s \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Dari persamaan (7), didapatkan

$$L'_r = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Sekarang persamaan fluks lingkup motor dapat diekspresikan

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L'_{sr} \\ (L'_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i'_{abcr} \end{bmatrix} \quad (10)$$



Dan terminologi persamaan tegangan yang didasarkan pada belitan stator, dapat diekspresikan sebagai

$$\begin{bmatrix} v_{abc} \\ v'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_s & pL'_{sr} \\ p(L'_{sr})^T & r'_r + pL'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i'_{abcr} \end{bmatrix} \quad (11)$$

### 2.1.1 Persamaan Transformasi Pada Rangkaian Stator

Perubahan variabel-variabel pada persamaan transformasi tiga fasa dari elemen rangkaian stasioner menjadi kerangka acuan *arbitrary* dapat dituliskan sebagai

$$f_{qd0s} = K_s f_{abc} \quad (12)$$

Di mana

$$(f_{qds0s})^T = [f_{qs} \quad f_{ds} \quad f_{0s}] \quad (13)$$

$$(f_{abc})^T = [f_{as} \quad f_{bs} \quad f_{cs}] \quad (14)$$

$$K_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

### 2.1.2 Persamaan Transformasi Pada Rangkaian Rotor

Analisis motor induksi juga ditujukan untuk mentransformasikan variabel-variabel yang dikelompokkan ke dalam belitan rotor. Perubahan variabel-variabel pada persamaan transformasi tiga fasa rangkaian rotor ke kerangka acuan *arbitrary* dapat dituliskan sebagai

$$f'_{qd0r} = K_r f'_{abcr} \quad (16)$$

Di mana

$$(f'_{qds0r})^T = [f'_{qr} \quad f'_{dr} \quad f'_{0r}] \quad (17)$$

$$(f'_{abcr})^T = [f'_{ar} \quad f'_{br} \quad f'_{cr}] \quad (18)$$

$$K_r = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \beta & \cos\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \beta & \sin\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (19)$$

## 2.2 Persamaan Tegangan Dalam Variabel Kerangka Acuan

Berdasarkan persamaan (12), (13), (14), (16), (17), dan (18), diperoleh persamaan tegangan dan fluks lingkup dalam sumbu *dq* sebagai

$$v_{qd0s} = r_s i_{qd0s} + \omega \lambda_{dqs} + p \lambda_{qd0s} \quad (20)$$

$$v'_{qd0r} = r'_r i'_{qd0r} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dqr} + p \lambda'_{qd0r} \quad (21)$$

Di mana

$$(\lambda_{dqs})^T = [\lambda_{ds} \quad -\lambda_{qs} \quad 0] \quad (22)$$

$$(\lambda'_{dqr})^T = [\lambda'_{dr} \quad -\lambda'_{qr} \quad 0] \quad (23)$$

Substitusi persamaan transformasi ke dalam persamaan fluks lingkup yang dituliskan ke dalam variabel *abc* pada persamaan (10) sebelumnya, maka persamaan fluks lingkup untuk sistem magnetik sebagai

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qd0s} \\ \lambda'_{qd0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s L_s (K_s)^{-1} & K_s L'_{sr} (K_r)^{-1} \\ K_r (L'_{sr})^T (K_s)^{-1} & K_r L'_r (K_r)^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qd0s} \\ i'_{qd0r} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$K_s L_s (K_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_M & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_M & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\text{Di mana, } L_M = \frac{3}{2} L_{ms} \quad (26)$$

maka

$$K_r L'_r (K_r)^{-1} = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_M & 0 & 0 \\ 0 & L'_{lr} + L_M & 0 \\ 0 & 0 & L'_{lr} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$K_s L'_{sr} (K_r)^{-1} = K_r (L'_{sr})^T (K_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L_M & 0 & 0 \\ 0 & L_M & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

### 2.3 Pemodelan Motor Induksi

Analisis dinamik motor induksi biasanya dimodelkan dengan rangkaian ekuivalen dalam kerangka acuan. Berdasarkan persamaan (20) dan (21) dapat diturunkan persamaan tegangan motor induksi ke dalam sumbu  $dq$  sebagai

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + p \lambda_{qs} \quad (29)$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + p \lambda_{ds} \quad (30)$$

$$v_{0s} = r_s i_{0s} + p \lambda_{0s} \quad (31)$$

$$v'_{qr} = r'_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} + p \lambda'_{qr} \quad (32)$$

$$v'_{dr} = r'_r i'_{dr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{qr} + p \lambda'_{dr} \quad (33)$$

$$v'_{0r} = r'_r i'_{0r} + p \lambda'_{0r} \quad (34)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (25), (27), dan (28) ke dalam persamaan (24), maka untuk persamaan fluks lingkup motor induksi dapat dikembangkan ke dalam bentuk

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (35)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (36)$$

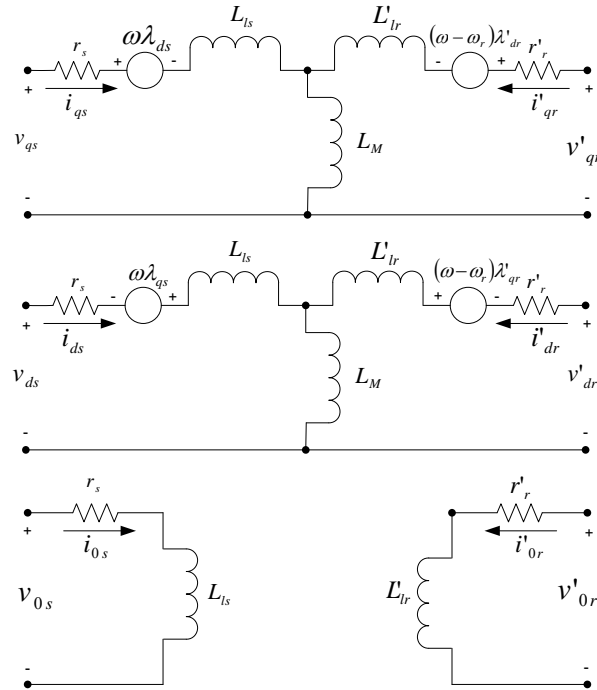
$$\lambda_{0s} = L_{ls} i_{0s} \quad (37)$$

$$\lambda_{qr} = L'_{lr} i'_{qr} + L_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (38)$$

$$\lambda_{dr} = L'_{lr} i'_{dr} + L_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (39)$$

$$\lambda_{0r} = L'_{lr} i'_{0r} \quad (40)$$

Kemudian rangkaian ekuivalen pada persamaan tegangan dan fluks lingkup motor induksi menjadi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Pemodelan Motor Induksi dengan Kerangka Acuan

Berdasarkan persamaan (29) sampai dengan (34), persamaan tegangan dan fluks lingkup dalam terminologi atau istilah reaktansi induktif dapat dituliskan sebagai

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{ds} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{qs} \quad (41)$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{ds} \quad (42)$$

$$v_{0s} = r_s i_{0s} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{0s} \quad (43)$$

$$v'_{qr} = r'_r i'_{qr} + \left( \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{dr} + \frac{p}{\omega_b} \psi'_{qr} \quad (44)$$

$$v'_{dr} = r'_r i'_{dr} - \left( \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{qr} + \frac{p}{\omega_b} \psi'_{dr} \quad (45)$$

$$v'_{0r} = r'_r i'_{0r} + \frac{p}{\omega_b} \psi'_{0r} \quad (46)$$

Di mana  $\omega_b$  adalah kecepatan sudut elektrik yang digunakan untuk mengkomputasi nilai reaktansi induktif. Maka selanjutnya persamaan fluks lingkup (35) sampai dengan (40) menjadi persamaan fluks lingkup dalam satuan unit tegangan per detik yaitu

$$\psi_{qs} = X_{ls} i_{qs} + X_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (47) \quad \left| \quad \psi'_{qr} = X'_{lr} i'_{qr} + X_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (50) \right.$$

$$\psi_{ds} = X_{ls} i_{ds} + X_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (48) \quad \left| \quad \psi'_{dr} = X'_{lr} i'_{dr} + X_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (51) \right.$$

$$\psi_{0s} = X_{ls} i_{0s} \quad (49) \quad \left| \quad \psi'_{0r} = X'_{lr} i'_{0r} \quad (52) \right.$$

Kemudian persamaan untuk mensimulasikan motor induksi yang simetris dengan kerangka acuan *arbitrary*, dapat dibuat dengan terlebih dahulu menyelesaikan persamaan fluks lingkup atau persamaan fluks per detik untuk arus. Sehingga dari persamaan (47-52) dapat dituliskan

$$i_{qs} = \frac{1}{X_{ls}} (\psi_{qs} - \psi_{mq}) \quad (53) \quad \left| \quad i'_{qr} = \frac{1}{X'_{lr}} (\psi'_{qr} - \psi_{mq}) \quad (56) \right.$$

$$i_{ds} = \frac{1}{X_{ls}} (\psi_{ds} - \psi_{md}) \quad (54) \quad \left| \quad i'_{dr} = \frac{1}{X'_{lr}} (\psi'_{dr} - \psi_{md}) \quad (57) \right.$$

$$i_{0s} = \frac{1}{X_{ls}} \psi_{0s} \quad (55) \quad \left| \quad i'_{0r} = \frac{1}{X'_{lr}} \psi'_{0r} \quad (58) \right.$$

Di mana  $\psi_{mq}$  dan  $\psi_{md}$ , yang berguna saat mewakili saturasi, didefinisikan sebagai

$$\psi_{mq} = X_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (59)$$

$$\psi_{md} = X_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (60)$$

#### 2.4 Persamaan Torsi Elektromagnetik, Kecepatan Rotor, dan Daya Input

Persamaan torsi elektromagnetik dalam variabel kerangka acuan *arbitrary* dapat dituliskan sebagai [13]

$$T_e = \left( \frac{P}{2} \right) \left[ (K_s)^{-1} i_{qd0s} \right]^T \frac{d}{d\theta_r} [L'_{sr}] (K_r)^{-1} i'_{qd0r} \quad (61)$$

$$T_e = \left( \frac{3}{2} \right) \left( \frac{P}{2} \right) L_M (i_{qs} i'_{dr} - i_{ds} i'_{qr}) \quad (62)$$

Persamaan ekivalen dari torsi elektromagnetik lainnya, dapat ditulis sebagai

$$T_e = \left( \frac{3}{2} \right) \left( \frac{P}{2} \right) (\lambda'_{qr} i'_{dr} - \lambda'_{dr} i'_{qr}) \quad (63)$$

$$T_e = \left( \frac{3}{2} \right) \left( \frac{P}{2} \right) (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (64)$$

Berdasarkan persamaan (55) dan (56), persamaan torsi elektromagnetik dalam fluks lingkup kerangka acuan *arbitrary* dapat dituliskan sebagai

$$T_e = \left( \frac{3}{2} \right) \left( \frac{P}{2} \right) \left( \frac{1}{\omega_b} \right) (\psi'_{qr} i'_{dr} - \psi'_{dr} i'_{qr}) \quad (65)$$

Hubungan antara torsi elektromagnetik dan kecepatan rotor dapat dituliskan dengan

$$persamaan \quad T_e = 2H \frac{d}{dt} \frac{\omega_r}{\omega_b} + T_L \quad (66)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{\omega_b}{2H} (T_e - T_L) \quad (67)$$

Untuk dapat mewakili interpretasi yang berarti dalam pemodelan, analisis, dan simulasi, maka daya input untuk motor tiga fasa harus sama dengan daya input pada mesin dua fasa [14]. Sehingga persamaan daya input dapat dinyatakan dengan

$$P_i = \frac{3}{2}(v_{qs}i_{qs} + v_{ds}i_{ds}) \quad (68)$$

## 2.5 Definisi Tegangan Tidak Seimbang

Ada berbagai definisi ketidakseimbangan tegangan dan [4] menegaskan bahwa ada kebutuhan untuk memahami implikasinya menggunakan salah satu definisi, karena ada sedikit variasi antara persentase ketidakseimbangan yang diperoleh menggunakan dua metode yang berbeda untuk rangkaian tegangan yang sama. Perbedaan ini menjadi signifikan untuk tingkat ketidakseimbangan yang tinggi ketika definisi NEMA digunakan. Menurut [3, 4] ketidakseimbangan tegangan dapat didefinisikan sebagai:

### a) NEMA

Asosiasi Produsen Listrik Nasional dan Standar Generator (NEMA MG1.1993) mendefinisikannya, dalam hal *Line Voltage Unbalanced in Percentage (LVUP)* pada terminal mesin listrik sebagai

$$LVUP = \frac{(\text{maximum\_voltage\_deviation\_from\_average\_line\_voltage})}{(\text{average\_line\_voltage\_magnitude})} \times 100\% \quad (69)$$

$$LVUP = \frac{\text{Max} \left[ |V_{ab} - V_{Lavg}|, |V_{bc} - V_{Lavg}|, |V_{ca} - V_{Lavg}| \right]}{V_{Lavg}} \times 100\% \quad (70)$$

$$\text{dimana } V_{Lavg} = \frac{(V_{ab} + V_{bc} + V_{ca})}{3} \quad (71)$$

### b) IEEE

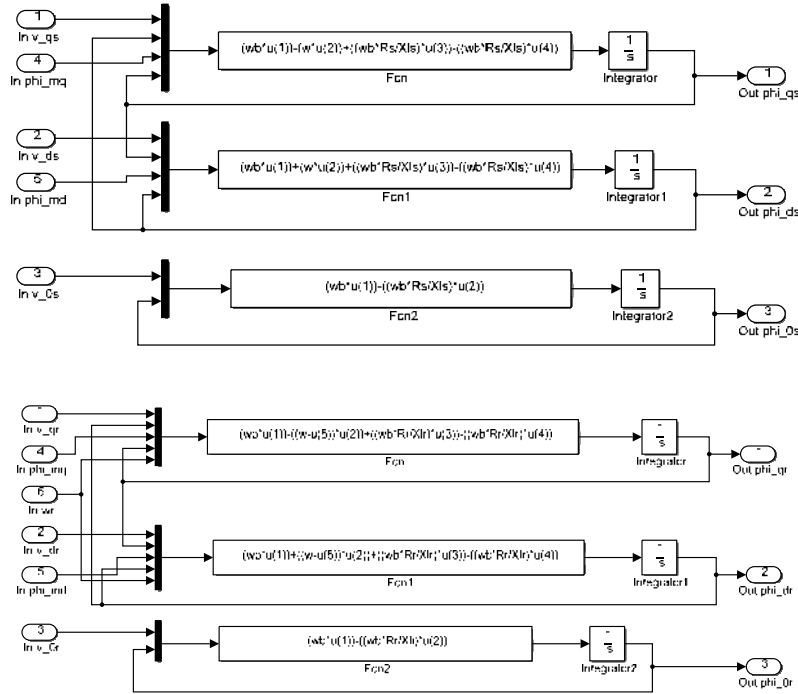
IEEE std 141, mendefinisikan *Phase Voltage Unbalanced in Percentage (PVUR)* pada terminal mesin. Ketidakseimbangan tegangan fasa dalam persentase PVUR didefinisikan sebagai

$$PVUR = \frac{\text{Max} \left[ |V_a - V_{pavg}|, |V_b - V_{pavg}|, |V_c - V_{pavg}| \right]}{V_{pavg}} \times 100\% \quad (72)$$

$$\text{dimana } V_{pavg} = \frac{(V_a + V_b + V_c)}{3} \quad (73)$$

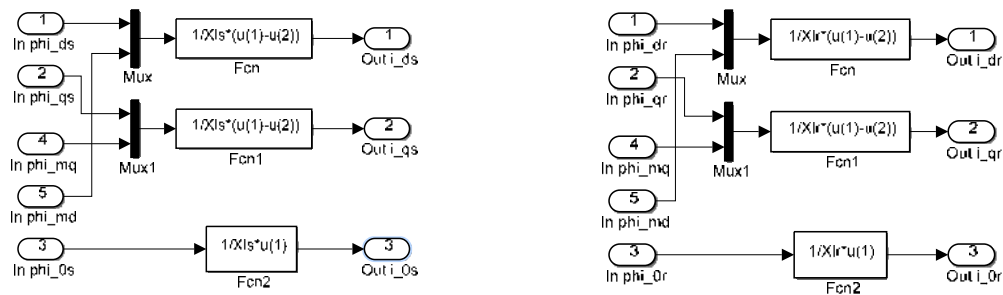
### 3. Hasil Penelitian dan Analisis

#### 3.1 Perancangan dengan simulasi



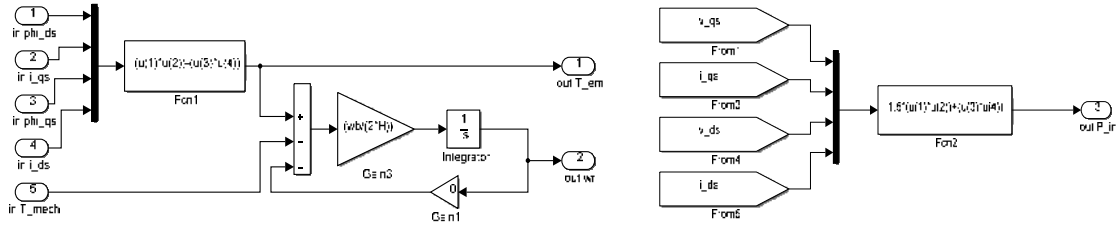
Gambar 3. Implementasi Fluks Lingkup pada Stator dan Rotor

Pada bagian ini, motor induksi tiga fasa dimodelkan dan kemudian disimulasikan dengan Matlab / Simulink. Pemodelan diimplementasikan dengan persamaan-persamaan yang telah dituliskan pada bagian ke-2 metodologi penelitian. Dalam pemodelan ini, simulasi dimulai dengan menghasilkan tegangan stator tiga fasa yang sesuai dengan persamaan (1-28), dan kemudian mengubah tegangan seimbang ini menjadi tegangan dua fasa yang dirujuk pada kerangka acuan secara sinkron menggunakan transformasi  $dq0$  seperti pada persamaan (29-34). Setelah itu, hubungan fluks lingkup  $dq0$  pada persamaan (35-46) diimplementasikan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



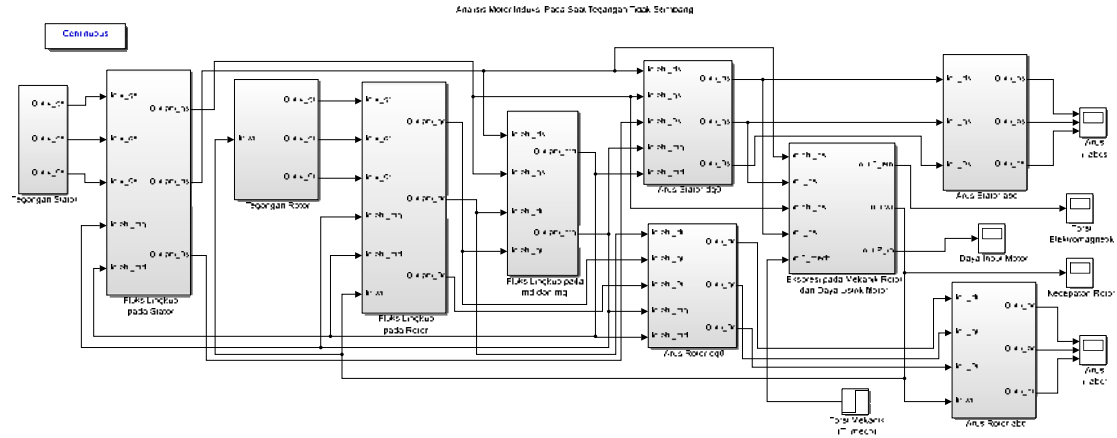
Gambar 4. Implementasi Kalkulasi pada Arus  $i_{qs}, i_{ds}, i_{qr}, i_{dr}$

Pada Gambar 4., menunjukkan blok Simulink yang digunakan untuk menghitung arus  $i_{qs}, i_{ds}, i_{qr}, i_{dr}$  sesuai dengan persamaan (53-58), dan menghitung  $\lambda_{mq}, \lambda_{md}$  seperti pada persamaan (59,60).



Gambar 5. Implementasi Kalkulasi pada Torsi Elektromagnetik, Kecepatan Rotor, dan Daya input

Pada Gambar 5., menunjukkan blok Simulink yang digunakan untuk menghitung torsi elektromagnetik  $T_e$  dan kecepatan rotor  $\omega_r$ , sesuai dengan persamaan (61-67), serta untuk menghitung daya input  $p_i$  seperti pada persamaan (68). Sehingga pada Gambar 6., menunjukkan pemodelan simulink secara lengkap yang dapat digunakan untuk menganalisis dinamika motor induksi tiga fasa.



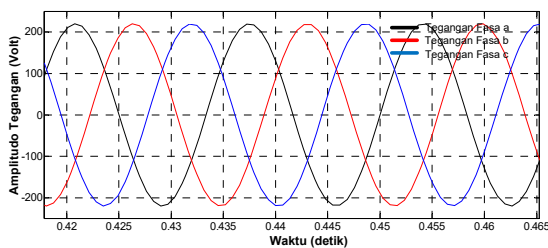
Gambar 6. Pemodelan Motor Induksi Tiga Fasa

3.2 Hasil dan Pembahasan

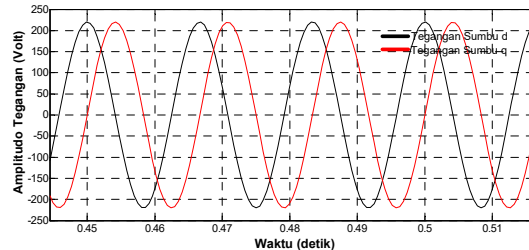
Untuk inialisasi model simulasi, digunakan motor induksi tiga fasa dengan mengikuti spesifikasi sebagai berikut [13]:

Power: 5Hp      Frekuensi: 60Hz      Jumlah kutub: 4      Tegangan: 220 Volt  
 $r_s = 0,531\Omega$        $r'_r = 0,408\Omega$        $X_{ls} = X'_{lr} = 0,95\Omega$        $X_M = 31,95\Omega$

3.2.1 Karakteristik Tegangan Stator



Gambar 7. Tegangan Tiga Fasa abc

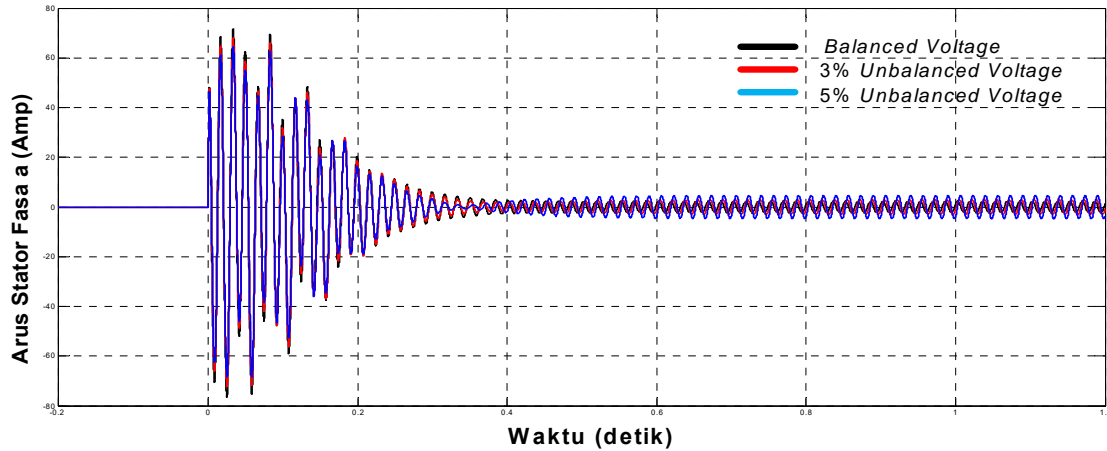


Gambar 8. Tegangan Dua Fasa dq

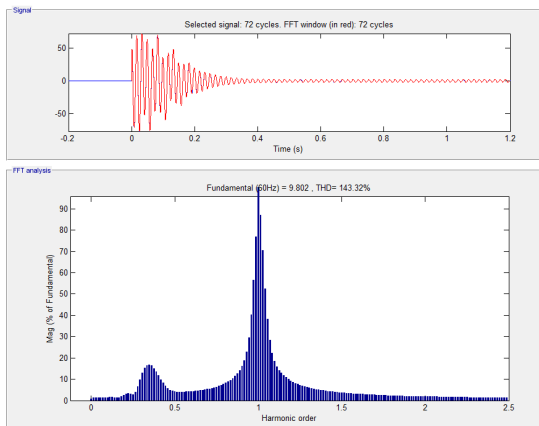
Tegangan *input* dari pemodelan motor induksi tiga fasa adalah tegangan tiga fasa. Untuk dapat mempermudah analisis kinerja motor induksi tersebut maka diperlukan pemodelan dinamik dengan menggunakan pemodelan kerangka acuan atau metode

transformasi  $dq0$ . Pemodelan dinamik ini dibentuk dari transformasi tegangan tiga fasa  $abc$  ( $\angle 120^\circ$ ) menjadi tegangan dua fasa  $dq$  ( $\angle 90^\circ$ ).

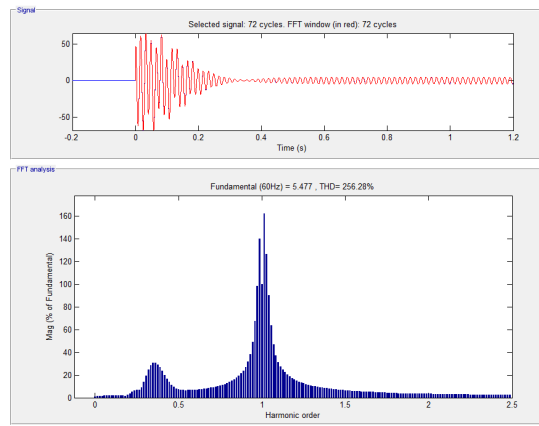
3.2.2 Karakteristik Arus Stator dan Arus Rotor



Gambar 9. Grafik Karakteristik Arus Keluaran Stator Tiga Fasa

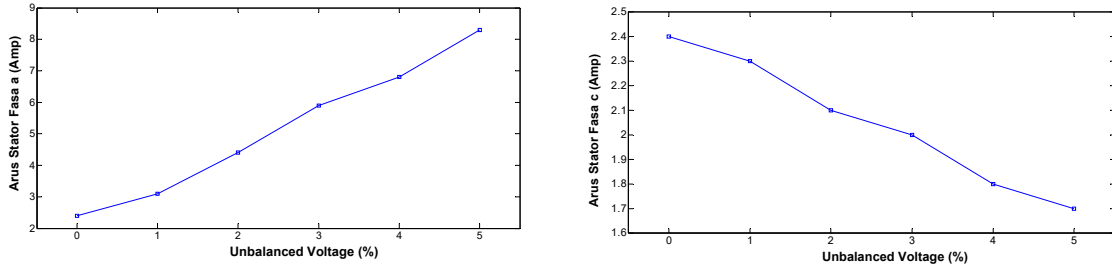


Gambar 10. Total Harmonik Distorsi Arus Stator saat Tegangan Seimbang

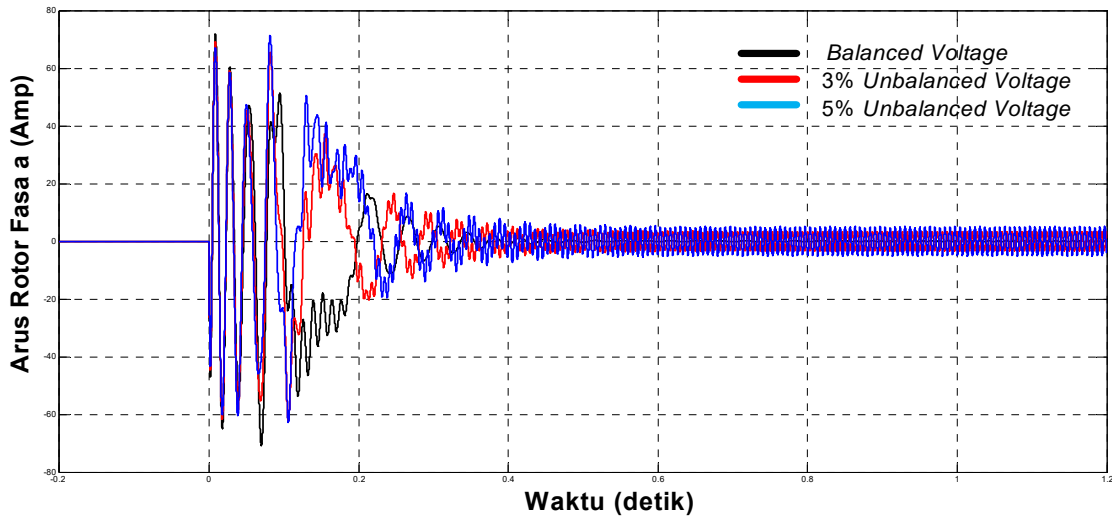


Gambar 11. Total Harmonik Distorsi Arus Stator saat 5% Unbalanced Voltage

Gambar 9, 10, dan 11, memperlihatkan karakteristik arus stator motor induksi pada saat pengasutan sampai dengan pada saat kondisi *steady state*. Pada saat keadaan tegangan seimbang, ketiga arus stator mempunyai nilai maksimum sebesar 69,2 Ampere dengan rentang waktu sebesar 0,37 detik untuk mencapai keadaan *steady state* sebesar 2,4 Ampere. Tetapi pada saat terjadi keadaan tegangan tidak seimbang sebesar 1%, sampai dengan 5%, arus stator pada salah satu fasa (fasa *a*) mengalami kenaikan nilai amplitudo sebesar 3,1 Ampere sampai dengan 8,3 Ampere atau mengalami kenaikan sebesar 29,1% sampai dengan 245,8%. Dan pada arus stator fasa yang lain (fasa *c*) terjadi penurunan nilai arus sebesar 0,1 Ampere sampai dengan 0,7 Ampere, sehingga hal ini dapat dikatakan bahwa terjadi arus pembebanan yang tidak seimbang diantara ketiga fasa pada saat tegangan tidak seimbang. Untuk lebih jelasnya hal ini dapat dilihat pada Gambar 12.



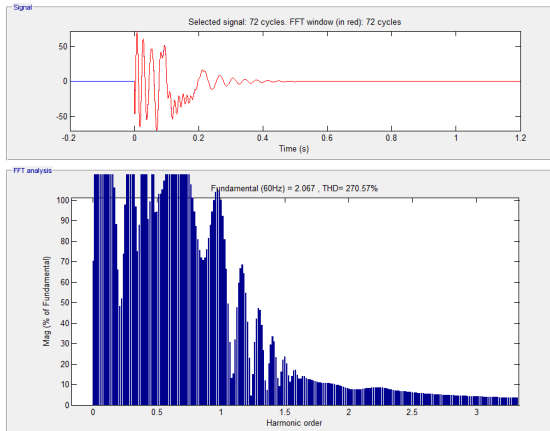
Gambar 12. Karakteristik Arus Stator Fasa *a* dan Fasa *c* saat Terjadi Ketidakeimbangan Tegangan



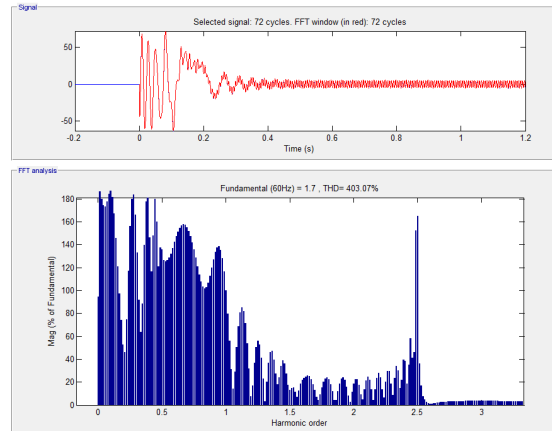
Gambar 13. Grafik Karakteristik Arus Keluaran Rotor Tiga Fasa

Gambar 13, 14, dan 15, memperlihatkan karakteristik arus rotor motor induksi pada saat pengasutan sampai dengan pada saat kondisi *steady state*. Pada saat keadaan tegangan seimbang, ketiga arus rotor mempunyai nilai maksimum sebesar 68,7 Ampere dengan rentang waktu sebesar 0,37 detik untuk mencapai keadaan *steady state* sebesar 1,4 Ampere. Tetapi pada saat terjadi keadaan tegangan tidak seimbang sebesar 1%, sampai dengan 5%, arus rotor pada ketiga fasa tersebut mengalami kenaikan nilai amplitudo sebesar 3,3 Ampere sampai dengan 6,7 Ampere atau mengalami kenaikan sebesar 135,7% sampai dengan 378,6%. Fenomena lain yang terjadi pada arus rotor saat tegangan tidak seimbang adalah terdapatnya osilasi gelombang pada arus dan distorsi harmonik. Distorsi harmonik ini mengalami kenaikan sebesar 48,9% saat ketidakeimbangan tegangan terjadi sebesar 5%. Efek dari timbulnya osilasi gelombang dan distorsi harmonik inilah yang dapat menimbulkan efek pemanasan pada rotor motor induksi selain kenaikan arus rotor.



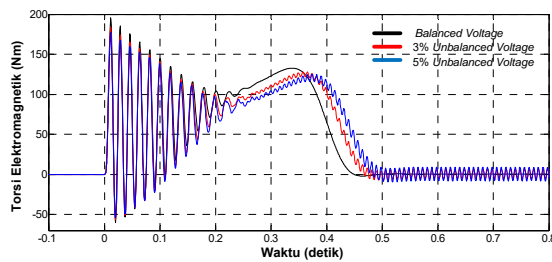


Gambar 14. Total Harmonik Distorsi Arus Rotor saat Tegangan Seimbang

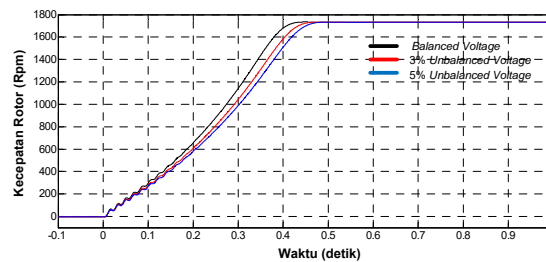


Gambar 15. Total Harmonik Distorsi Arus Rotor saat 5% Unbalanced Voltage

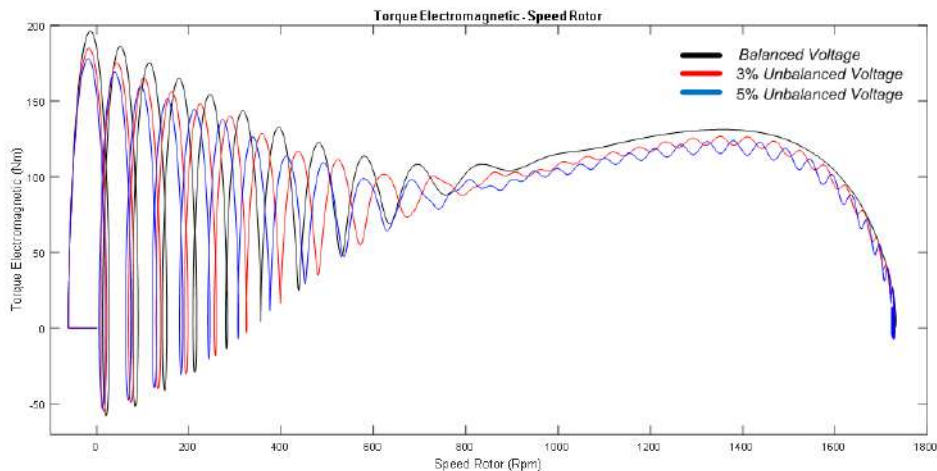
### 3.2.3 Karakteristik Torsi Elektromagnetik dan Kecepatan Putaran Rotor



Gambar 16. Grafik Karakteristik Torsi Elektromagnetik terhadap Waktu



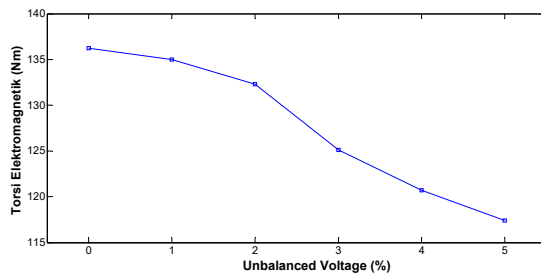
Gambar 17. Grafik Karakteristik Kecepatan Rotor terhadap Waktu



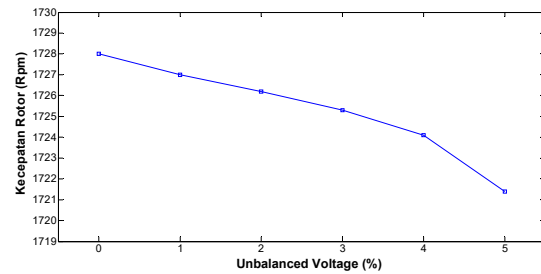
Gambar 18. Grafik Karakteristik Torsi Elektromagnetik terhadap Kecepatan Rotor

Gambar 16 dan Gambar 18, memperlihatkan karakteristik torsi elektromagnetik motor induksi pada saat pengasutan sampai dengan kondisi *steady state*. Pada gambar tersebut torsi elektromagnetik mengalami kenaikan sampai pada keadaan nilai maksimum dan kemudian turun sampai pada keadaan *steady state*. Hal ini seiring dengan kecepatan putaran rotor, dimana karakteristik kecepatan putaran rotor mempunyai karakteristik yang sama dengan torsi elektromagnetik. Pada saat keadaan tegangan seimbang, torsi elektromagnetik mempunyai nilai maksimum sebesar 136,3 Nm dengan rentang waktu sebesar 0,37 detik

untuk mencapai keadaan *steady state*. Tetapi pada saat keadaan tegangan tidak seimbang sebesar 1%, sampai dengan 5%, torsi elektromagnetik mengalami penurunan nilai maksimum sebesar 3,95 Nm sampai dengan 18,85 Nm dan mengalami rentang waktu yang lebih lama untuk mencapai keadaan *steady state* sebesar 0,01 detik sampai dengan 0,02 detik, dan untuk lebih jelasnya hal ini dapat dilihat pada Gambar 19. Pada Gambar 17 dan Gambar 18, memperlihatkan karakteristik kecepatan putaran rotor pada saat pengasutan sampai dengan keadaan *steady state*. Pada keadaan tegangan seimbang, kecepatan putaran rotor mempunyai nilai sebesar 1727,4 Rpm dengan rentang waktu sebesar 0,37 detik untuk mencapai keadaan *steady state*. Tetapi pada saat keadaan tegangan tidak seimbang sebesar 1%, sampai dengan 5%, kecepatan putaran rotor mengalami penurunan nilai sebesar 1 Rpm sampai dengan 6,6 Rpm dan mengalami rentang waktu yang lebih lama untuk mencapai keadaan *steady state* sebesar 0,01 detik sampai dengan 0,02 detik, dan untuk lebih jelasnya hal ini dapat dilihat pada Gambar 20.

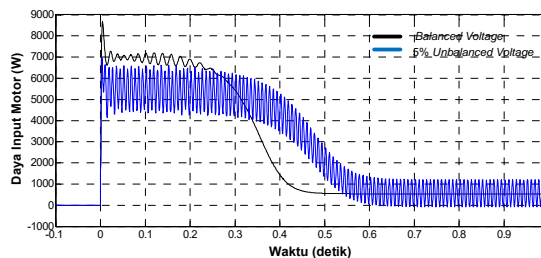


Gambar 19. Karakteristik Torsi Elektromagnetik terhadap Ketidakseimbangan Tegangan

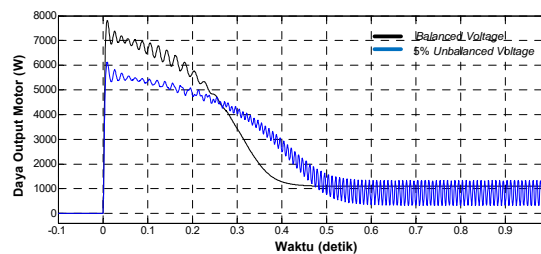


Gambar 20. Karakteristik Kecepatan Rotor terhadap Ketidakseimbangan Tegangan

### 3.2.4 Karakteristik Daya Masukan dan Daya Keluaran Motor

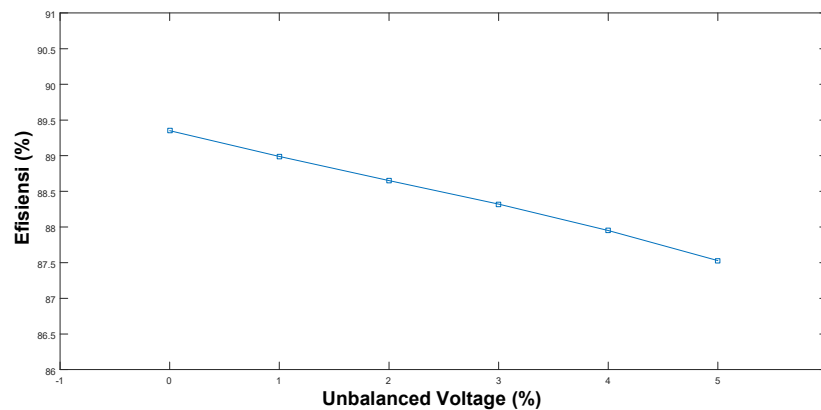


Gambar 21. Karakteristik Daya *Input* terhadap Waktu



Gambar 22. Karakteristik Daya *Output* terhadap Waktu

Gambar 21 dan Gambar 22, memperlihatkan karakteristik daya pada motor induksi. Pada saat keadaan tegangan seimbang, daya *input* motor (Gambar 21) mempunyai nilai maksimum sebesar 8,76 Kw. Tetapi pada saat terjadi keadaan tegangan tidak seimbang sebesar 1%, sampai dengan 5%, daya *input* maksimum pada motor tersebut mengalami penurunan nilai sebesar 1,23 Kw sampai dengan 6,97 Kw atau mengalami penurunan sebesar 16,33% sampai dengan 25,68%. Untuk daya *output* motor (Gambar 22) mempunyai nilai maksimum sebesar 7,46 Kw. Tetapi pada saat terjadi keadaan tegangan tidak seimbang sebesar 1%, sampai dengan 5%, daya *input* maksimum pada motor tersebut mengalami penurunan nilai sebesar 930 w sampai dengan 6,14 Kw atau mengalami penurunan sebesar 14,24% sampai dengan 21,5%. Dari hasil daya *input* dan daya *output* motor, maka didapatkan nilai efisiensi motor yang mengalami penurunan antara 89,35% sampai 87,42% (Gambar 23).



Gambar 23. Efisiensi motor terhadap Ketidakseimbangan Tegangan

#### 4. Kesimpulan

Pada makalah pengaruh kinerja motor induksi pada tegangan tak seimbang dengan metode transformasi direct quadrature dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Implementasi dan pemodelan dinamik dari motor induksi tiga fasa menggunakan Matlab/Simulink disajikan secara bertahap. Simulasi pemodelan kinerja motor induksi dengan metode kerangka acuan telah memberikan respons yang memuaskan, dalam hal dapat menganalisis karakteristik torsi elektromagnetik, kecepatan putaran rotor, arus stator, arus rotor, dan daya motor.
2. Pada saat terjadi ketidakseimbangan tegangan mencapai 5%, karakteristik arus stator pada salah satu fasa dapat mengalami kenaikan hingga 245,8%. Hal ini dapat mengakibatkan efek pemanasan yang tidak merata pada ketiga fasa tersebut.
3. Pada karakteristik torsi elektromagnetik dan arus rotor, terdapat fenomena osilasi gelombang yang semakin besar jika terjadi ketidakseimbangan tegangan yang semakin besar. Hal ini dapat mengakibatkan terjadinya getaran pada motor yang semakin besar, sehingga NEMA membatasi untuk pengoperasian motor induksi tidak boleh melampaui 5% dari nilai ketidakseimbangan tegangan.

#### 5. Daftar Pustaka

- [1] Mirabbasi, D., Seifossadat, G., & Heidari, M. (2009, November). Effect of unbalanced voltage on operation of induction motors and its detection. In *2009 International Conference on Electrical and Electronics Engineering-ELECO 2009* (pp. I-189). IEEE.
- [2] Ansari, A. A., & Deshpande, D. M. (2009, July). Investigation of performance of 3-phase asynchronous machine under voltage unbalance. In *Journal of Theoretical and applied information Technology*.
- [3] Aderibigbe, A., Ogunjuyigbe, A., Ayodele, R., & Samuel, I. (2017). The performance of a 3-phase induction machine under unbalance voltage regime. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, *10*(5), 136-143.
- [4] Pillay, P., & Manyage, M. (2001). Definitions of voltage unbalance. *IEEE Power Engineering Review*, *21*(5), 50-51.
- [5] Lee, R. J., Pillay, P., & Harley, R. G. (1984). D, Q reference frames for the simulation of induction motors. *Electric power systems research*, *8*(1), 15-26.
- [6] Shah, S., Rashid, A., & Bhatti, M. K. L. (2012). Direct quadrature (dq) modeling of 3-phase induction motor using matlab/simulink. *Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering*, *3*(5), 237-243.
- [7] Bellure, A., & Aspalli, M. S. (2015). Dynamic dq model of Induction Motor using

- Simulink. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 24(5), 252-257.
- [8] Patel, H. K. (2009). Steady state and transient performance analysis of three phase induction machine using MATLAB simulations. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 1(3), 266.
- [9] Kamal, A., & Giri, V. K. (2013). Mathematical modelling of dynamic induction motor and performance analysis with bearing fault. *International Journal of Innovative Technology and Research*, 1(4), 336-340.
- [10] Deb, P. B., & Sarkar, S. (2016). Dynamic model analysis of three phase induction motor using Matlab/Simulink. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7(3), 572.
- [11] Ratnani, P. L., & Thosar, A. G. (2014). Mathematical Modelling of an 3 Phase Induction Motor Using MATLAB/Simulink. *International Journal Of Modern Engineering Research (IJMER)*, 4(6), 62-67.
- [12] Sarma Sunilkumar, M., & Patel, A. T. (2016). Mathematical Modelling of an 3 Phase Induction Motor Using MATLAB/Simulink.
- [13] Krause, P. C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D., & Pekarek, S. (2002). *Analysis of electric machinery and drive systems* (Vol. 2). New York: IEEE press.
- [14] Krishnan, R. (2001). *Electric motor drives: modeling, analysis and control*. Prentice Hall.

### Tata Nama

$H$	<i>inertia constant</i>	$r_s$	<i>stator resistance</i>
$i_{ds}, v_{ds}$	<i>stator d-axis current dan voltage</i>	$r'_r$	<i>rotor resistance</i>
$i_{dr}, v_{dr}$	<i>rotor d-axis current dan voltage</i>	$T_e$	<i>torque electromagnetic</i>
$i_{qs}, v_{qs}$	<i>stator q-axis current dan voltage</i>	$T_L$	<i>load torque</i>
$i_{qr}, v_{qr}$	<i>rotor q-axis current dan voltage</i>	$X_{ls}$	<i>stator leakage reactance</i>
$J$	<i>inertia of motor</i>	$X'_{lr}$	<i>rotor leakage reactance</i>
$L_{ls}$	<i>stator self inductance</i>	$X_M$	<i>magnetizing reactance</i>
$L'_{lr}$	<i>rotor self inductance</i>	$\lambda, \psi$	<i>flux linkage</i>
$L_M$	<i>mutual inductance</i>	$\omega_b$	<i>nominal speed rad / sec</i>
$P$	<i>number of poles</i>	$\omega_r$	<i>rotor speed rad / sec</i>
$p$	<i>derivative operator <math>\frac{d}{dt}</math></i>		