

ANALISIS MOTOR INDUKSI 3 FASA DENGAN METODE KERANGKA REFERENSI

Makalah Seminar Tugas Akhir
Isnanto Heru Purnomo (L2F096596)
e-mail : IsHeru@yahoo.com

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, Tembalang, Semarang

Abstrak : Simulasi mengenai analisis motor induksi 3 fasa diperlukan untuk mengetahui karakteristik unjuk kerja motor induksi dalam berbagai kondisi seperti saat starting, saat terjadi perubahan beban maupun saat terjadi gangguan.

Untuk dapat melakukan analisis motor induksi 3 fasa tersebut diperlukan suatu model motor induksi yang luwes. Model motor induksi konvensional yaitu dengan model trafo, memiliki berbagai keterbatasan sehingga tidak dapat digunakan lagi. Oleh karena itu digunakan model motor induksi 3 fasa dengan menggunakan kerangka referensi. Dengan metode kerangka referensi persamaan motor induksi dalam variabel mesin (kerangka abc) akan ditransformasikan menjadi persamaan dalam variabel kerangka referensi (kerangka qd0).

Kata kunci : simulasi, motor induksi 3 fasa, kerangka referensi

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

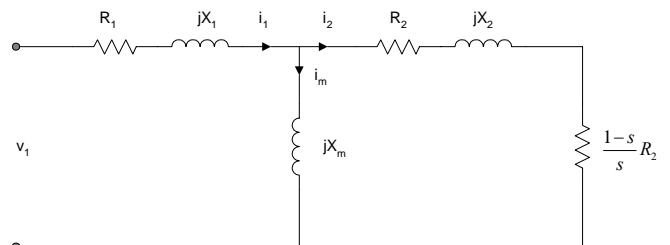
Motor induksi merupakan motor yang paling banyak digunakan dalam berbagai aplikasi mulai dari aplikasi di lingkungan rumah tangga sampai aplikasi di industri-industri besar. Hal ini disebabkan karena motor induksi memiliki berbagai keunggulan dibanding dengan motor listrik yang lain, yaitu diantaranya karena harganya yang relatif murah, konstruksinya yang sederhana dan kuat serta karakteristik kerja yang baik.

Karena begitu luasnya penggunaan motor induksi maka kita memerlukan suatu analisa mengenai unjuk kerja motor induksi tersebut. Pada awalnya motor induksi digambarkan dengan menggunakan model suatu transformator dengan beban yang variabel sesuai dengan Gambar 1. Dengan menggunakan model motor induksi konvensional tersebut, maka terdapat berbagai keterbatasan dalam menganalisis motor induksi^[14], yaitu:

- Tegangan sumber harus sinusoidal
- Parameter beban konstan
- Hanya untuk analisis pada kondisi steady state.

Dalam operasi motor induksi sebenarnya, terdapat berbagai permasalahan yang tidak dapat diselesaikan melalui analisis motor dengan menggunakan model konvensional. Permasalahan tersebut antara lain :

- Tegangan sumber tidak selalu sinusoidal dan simetri
- Parameter beban dapat berubah
- Dapat terjadi perubahan pada : sumber, beban, serta motor itu sendiri.



Gambar 1. Model motor induksi secara konvensional

Oleh karena itu diperlukan suatu model motor induksi yang dapat menyelesaikan analisis motor induksi sesuai dengan permasalahan yang dihadapi dalam operasional motor. Sesuai dengan perkembangan dibidang ilmu pengetahuan, dewasa ini telah digunakan suatu metode yang dapat menyelesaikan persoalan tersebut secara lebih baik yaitu dengan metode kerangka referensi.

1.2. Tujuan

Tujuan yang hendak dicapai dalam penulisan tugas akhir ini yaitu :

- Mengerti dan memahami konsep untuk analisis motor induksi 3 fasa dengan metode kerangka referensi.
- Dapat mensimulasikan analisis motor induksi 3 fasa dalam kerangka referensi dengan menggunakan program komputer.

1.3. Pembatasan Masalah

Karena kompleksnya permasalahan yang ada maka dalam pembahasan tugas akhir ini diberikan pembatasan masalah sebagai berikut :

1. Metode analisis menggunakan metode kerangka referensi dengan mengacu kepada *stationary reference frame*.
2. Analisa dibuat untuk motor induksi 3 fasa simetri, dalam kondisi normal serta kondisi gangguan pada sumbernya. Gangguan tersebut meliputi :
 - gangguan 1 fasa ke tanah
 - gangguan 2 fasa ke tanah
 - gangguan 3 fasa ke tanah
3. Metode *starting* motor yang dapat digunakan, yaitu:
 - *starting direct on line* (DOL)
 - *starting* dengan *2 step primary resistors*
 - *starting* dengan autotrafo
4. Analisis dilakukan untuk motor dari keadaan diam.
5. Rugi-rugi panas, rugi-rugi gesekan, dan rugi-rugi akibat kejenuhan magnetis diabaikan.

II. MOTOR INDUKSI 3 FASA

Motor induksi merupakan motor arus bolak-balik (AC) yang paling luas digunakan karena kesederhanaannya, konstruksinya yang kuat dan karakteristik kerja yang baik^[3]. Motor induksi terdiri dari dua bagian : stator atau bagian yang diam dan rotor atau bagian yang berputar, dimana kedua bagian ini dipisahkan oleh suatu celah udara. Bagian stator dihubungkan ke catu tegangan bolak-balik (AC), sedangkan bagian rotor tidak dihubungkan secara listrik ke pencatu tetapi memiliki arus yang dihasilkan oleh adanya arus induksi yang ditimbulkan dari arus stator, mirip dengan kerja suatu transformator.

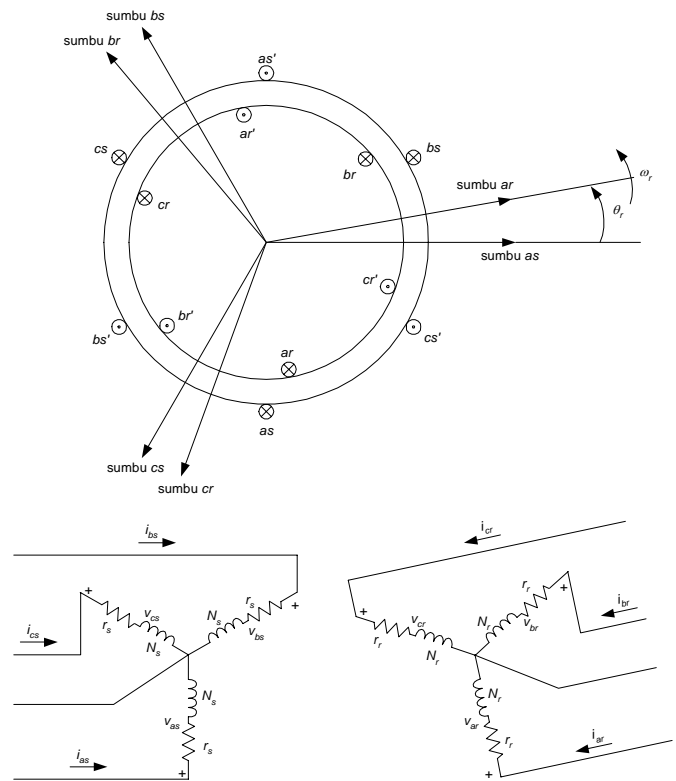
Bekerjanya motor induksi bergantung pada medan magnetik putar yang ditimbulkan dalam celah udara motor oleh adanya arus stator^[3]. Lilitan stator tiga fase dililitkan dengan lilitan fasenya berjarak 120 derajat listrik. Jika lilitan diberi energi dari catu tiga fase maka akan timbul fluksi pada masing-masing fase. Ketiga fluksi tersebut bergabung membentuk fluksi yang bergerak mengelilingi permukaan stator pada kecepatan konstan. Fluksi ini disebut medan magnetik berputar. Dengan adanya medan putar ini akan menyebabkan rotor berputar dengan arah yang sama dengan fluks putar. Kecepatan medan putar dapat dirumuskan sebagai :

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \tag{2.1}$$

dimana : n_s = kecepatan sinkron (rpm)
 f = frekuensi (Hz)
 p = jumlah kutub

Penyusunan belitan untuk mesin induksi 2-kutub, 3-fasa, terhubung *wye*, ditunjukkan dalam Gambar 2. Belitan stator adalah simetris dan disusun secara terpisah sebesar 120⁰, dengan N_s sebagai jumlah lilitan stator dan r_s resistansi stator. Belitan rotor juga dianggap sebagai tiga belitan terdistribusi sinusoidal

identik yang terpisah sebesar 120⁰, dengan N_r jumlah lilitan rotor dan r_r adalah resistansinya.



Gambar 2. Mesin induksi 2-kutub, 3-fasa, terhubung *wye*

Persamaan tegangan untuk mesin induksi seperti dalam Gambar 2 adalah:

$$\begin{aligned} v_{as} &= r_s i_{as} + \frac{d\lambda_{as}}{dt} \\ v_{bs} &= r_s i_{bs} + \frac{d\lambda_{bs}}{dt} \\ v_{cs} &= r_s i_{cs} + \frac{d\lambda_{cs}}{dt} \\ v_{ar} &= r_r i_{ar} + \frac{d\lambda_{ar}}{dt} \\ v_{br} &= r_r i_{br} + \frac{d\lambda_{br}}{dt} \\ v_{cr} &= r_r i_{cr} + \frac{d\lambda_{cr}}{dt} \end{aligned} \tag{2.2}$$

dimana r_s adalah resistansi belitan stator dan r_r adalah resistansi belitan rotor. Selanjutnya fluks gandeng (*flux linkage*) dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \lambda_{as} &= L_{asas} i_{as} + L_{asbs} i_{bs} + L_{ascs} i_{cs} + L_{asar} i_{ar} + L_{asbr} i_{br} + L_{ascr} i_{cr} \\ \lambda_{bs} &= L_{bsas} i_{as} + L_{bsbs} i_{bs} + L_{bscs} i_{cs} + L_{bsar} i_{ar} + L_{bsbr} i_{br} + L_{bscr} i_{cr} \\ \lambda_{cs} &= L_{csas} i_{as} + L_{csbs} i_{bs} + L_{cscs} i_{cs} + L_{csar} i_{ar} + L_{csbr} i_{br} + L_{cscr} i_{cr} \\ \lambda_{ar} &= L_{aras} i_{as} + L_{arbs} i_{bs} + L_{arcs} i_{cs} + L_{arar} i_{ar} + L_{arbr} i_{br} + L_{arcr} i_{cr} \\ \lambda_{br} &= L_{bras} i_{as} + L_{brbs} i_{bs} + L_{brcs} i_{cs} + L_{brar} i_{ar} + L_{brbr} i_{br} + L_{brcr} i_{cr} \\ \lambda_{cr} &= L_{cras} i_{as} + L_{crbs} i_{bs} + L_{crcc} i_{cs} + L_{crar} i_{ar} + L_{crbr} i_{br} + L_{cscr} i_{cr} \end{aligned} \tag{2.3}$$

Kita dapat melihat bahwa persamaan tegangan mesin induksi adalah sangat kompleks dimana induktansi bersama antara rangkaian stator dan rotor

berubah-ubah terhadap waktu karena rangkaian rotor berputar. Dalam bahasan berikutnya kita dapat melihat bahwa pengubahan variabel yaitu dengan menghilangkan induktansi yang berubah-ubah terhadap waktu, sehingga akan mengurangi kompleksnya persamaan tegangan mesin.

III. TEORI KERANGKA REFERENSI

Pada akhir tahun 1920, R.H. Park memperkenalkan pendekatan baru untuk analisis mesin listrik. Beliau merumuskan perubahan variabel dengan menggantikan variabel-variabel mesin yaitu tegangan, arus dan fluks gandeng yang berhubungan dengan belitan stator mesin sinkron dengan variabel yang berhubungan dengan belitan khayalan yang berputar terhadap rotor. Dengan kata lain Park mentransformasikan atau mengubah variabel stator ke kerangka referensi yang tetap dalam rotor (*reference frame fixed in rotor*). Transformasi Park yang merupakan revolusi baru dalam analisis mesin, memiliki kemampuan khusus untuk mengeliminasi semua induktansi yang berubah-ubah terhadap waktu dari persamaan tegangan mesin sinkron yang terjadi dalam rangkaian listrik dalam gerak relatif, dan rangkaian listrik dengan perubahan reluctance magnetik.

Perubahan variabel yang merumuskan transformasi variabel 3 fasa dari rangkaian stasioner ke kerangka referensi yang berubah-ubah (*arbitrary reference frame*) dapat dinyatakan sebagai :

$$\mathbf{f}_{qd0s} = \mathbf{K}_s \mathbf{f}_{abcs} \tag{3.1}$$

dimana :

$$\begin{aligned} (\mathbf{f}_{qd0s})^T &= [f_{qs} \quad f_{ds} \quad f_{0s}] \\ (\mathbf{f}_{abcs})^T &= [f_{as} \quad f_{bs} \quad f_{cs}] \\ \mathbf{K}_s &= \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{3.2}$$

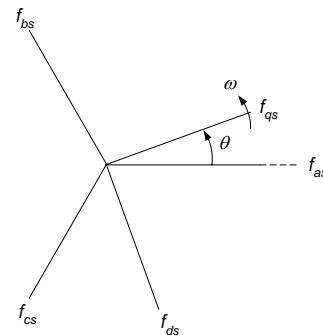
Kemudian transformasi baliknya adalah :

$$(\mathbf{K}_s)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

dalam persamaan diatas fungsi f dapat berupa fungsi tegangan, arus, fluks gandeng, atau muatan listrik. Subskrip s menunjukkan bahwa variabel tersebut berhubungan dengan rangkaian stasioner. Pergeseran sudut θ merupakan fungsi yang kontinyu. Kerangka

referensi dapat berputar secara konstan atau berubah-ubah.

Gambaran mengenai transformasi dari kerangka abc ke kerangka $qd0$ secara trigonometris dapat dilihat dalam Gambar 3. Dari gambar tersebut terlihat bahwa transformasi akan mengubah variabel f_{as}, f_{bs}, f_{cs} yang masing-masing berbeda 120° ke dalam variabel f_{qs} dan f_{ds} yang berjalan pada suatu bidang yang lain dan berputar pada kecepatan sudut ω . Apabila f_{as}, f_{bs}, f_{cs} diterapkan dalam persamaan (3.1) maka akan diperoleh variabel f_{qs}, f_{ds} dan f_{0s} . Perlu dicatat bahwa variabel θ_s tidak berhubungan dengan kerangka referensi yang digunakan. Variabel θ_s ini hanya berhubungan dengan perhitungan dari variabel abc , dan tidak terpengaruh oleh variabel θ . Perlu juga dicatat bahwa f_{as}, f_{bs} dan f_{cs} merupakan besaran sesaat yang mungkin berupa fungsi waktu. Transformasi variabel seperti yang terlihat pada Gambar 3 dapat diterapkan dalam mesin AC, dimana arah f_{as}, f_{bs} dan f_{cs} adalah sesuai dengan arah sumbu magnetik dari belitan stator mesin. Selanjutnya arah f_{qs} dan f_{ds} dapat dianggap sebagai arah sumbu magnetik dari belitan baru yang dihasilkan dari perubahan variabel tersebut.



Gambar 3. Transformasi rangkaian stasioner digambarkan secara trigonometris

Transformasi variabel pada rangkaian stasioner dalam kerangka referensi untuk elemen resistif adalah :

$$\mathbf{v}_{qd0s} = \mathbf{r}_s \mathbf{i}_{qd0s} \tag{3.4}$$

sedangkan untuk elemen induktif :

$$\mathbf{v}_{qd0s} = \omega \boldsymbol{\lambda}_{dqs} + p \boldsymbol{\lambda}_{qd0s} \tag{3.5}$$

dimana :

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

Ada 4 tipe kerangka referensi yang biasa digunakan dalam analisis mesin listrik dan komponen sistem tenaga, yaitu :

1. Kerangka referensi yang berubah-ubah (*arbitrary reference frame*)
2. Kerangka referensi stasioner (*stationary reference frame*), $\omega = 0$
3. Kerangka referensi rotor (*rotor reference frame*), $\omega = \omega_r$
4. Kerangka referensi sinkron (*synchronous reference frame*) $\omega = \omega_s$

IV. PERSAMAAN MOTOR INDUKSI 3 FASA

4.1. Persamaan Motor Induksi dalam Variabel Kerangka Referensi

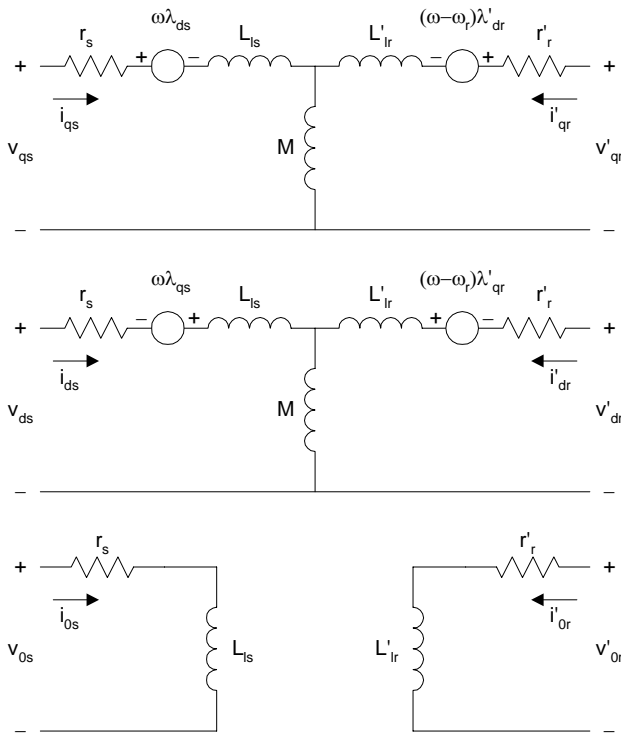
Persamaan tegangan motor induksi 3 fasa dalam kerangka referensi dinyatakan sebagai :

$$\begin{aligned}
 v_{qs} &= r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + p \lambda_{qs} \\
 v_{ds} &= r_s i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + p \lambda_{ds} \\
 v_{0s} &= r_s i_{0s} + p \lambda_{0s} \\
 v'_{qr} &= r'_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} + p \lambda'_{qr} \\
 v'_{dr} &= r'_r i'_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda'_{qr} + p \lambda'_{dr} \\
 v'_{0r} &= r'_r i'_{0r} + p \lambda'_{0r}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

dimana fluks gandeng dinyatakan dengan :

$$\begin{aligned}
 \lambda_{qs} &= L_{ls} i_{qs} + M(i_{qs} + i'_{qr}) \\
 \lambda_{ds} &= L_{ls} i_{ds} + M(i_{ds} + i'_{dr}) \\
 \lambda_{0s} &= L_{ls} i_{0s} \\
 \lambda'_{qr} &= L'_{lr} i'_{qr} + M(i_{qs} + i'_{qr}) \\
 \lambda'_{dr} &= L'_{lr} i'_{dr} + M(i_{ds} + i'_{dr}) \\
 \lambda'_{0r} &= L'_{lr} i'_{0r}
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

Persamaan tegangan dan fluks gandeng menghasilkan rangkaian ekivalen yang diperlihatkan dalam Gambar 4.



Gambar 4. Rangkaian ekivalen mesin induksi 3 fasa dalam kerangka referensi

Apabila induktansi dinyatakan dalam ohm (reaktansinya) maka persamaan tegangan dan fluks gandeng menjadi :

$$\begin{aligned}
 v_{qs} &= r_s i_{qs} + \frac{\omega}{\omega_b} \Psi_{ds} + \frac{p}{\omega_b} \Psi_{qs} \\
 v_{ds} &= r_s i_{ds} - \frac{\omega}{\omega_b} \Psi_{qs} + \frac{p}{\omega_b} \Psi_{ds} \\
 v_{0s} &= r_s i_{0s} + \frac{p}{\omega_b} \Psi_{0s} \\
 v'_{qr} &= r'_r i'_{qr} + \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \Psi'_{dr} + \frac{p}{\omega_b} \Psi'_{qr} \\
 v'_{dr} &= r'_r i'_{dr} - \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \Psi'_{qr} + \frac{p}{\omega_b} \Psi'_{dr} \\
 v'_{0r} &= r'_r i'_{0r} + \frac{p}{\omega_b} \Psi'_{0r}
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

dimana ω_b adalah kecepatan sudut listrik dasar. Selanjutnya fluks gandeng menjadi :

$$\begin{aligned}
 \Psi_{qs} &= X_{ls} i_{qs} + X_M (i_{qs} + i'_{qr}) \\
 \Psi_{ds} &= X_{ls} i_{ds} + X_M (i_{ds} + i'_{dr}) \\
 \Psi_{0s} &= X_{ls} i_{0s} \\
 \Psi'_{qr} &= X'_{lr} i'_{qr} + X_M (i_{qs} + i'_{qr}) \\
 \Psi'_{dr} &= X'_{lr} i'_{dr} + X_M (i_{ds} + i'_{dr}) \\
 \Psi'_{0r} &= X'_{lr} i'_{0r}
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

4.2. Persamaan Torsi

Energi tersimpan dalam medan kopling motor induksi dinyatakan dengan :

$$\begin{aligned}
 W_f &= \frac{1}{2} (\mathbf{i}_{abc})^T (\mathbf{L}_s - L_{ls} \mathbf{I}) \mathbf{i}_{abc} + (\mathbf{i}_{abc})^T \mathbf{L}'_{sr} \mathbf{i}'_{abc} \\
 &+ \frac{1}{2} (\mathbf{i}'_{abc})^T (\mathbf{L}'_r - L'_{lr} \mathbf{I}) \mathbf{i}'_{abc}
 \end{aligned}$$

\mathbf{I} adalah matrik identitas.

Perubahan energi mekanik dalam sistem yang berputar dirumuskan sebagai :

$$dW_m = -T_e d\theta_{rm}$$

dimana T_e adalah torsi elektromagnetik dan θ_{rm} adalah besarnya sudut pergeseran rotor.

Torsi elektromagnetik dapat dirumuskan sebagai :

$$T_e = \left(\frac{p}{2} \right) (\mathbf{i}_{abc})^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} [\mathbf{L}'_{sr}] \mathbf{i}'_{abc}$$

Selanjutnya persamaan torsi dalam variabel kerangka referensi dinyatakan dengan :

$$T_e = \left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{p}{2} \right) \left(\frac{1}{\omega_b} \right) (\Psi'_{qr} i'_{dr} - \Psi'_{dr} i'_{qr}) \tag{4.5}$$

Hubungan antara torsi dan kecepatan rotor diberikan oleh persamaan :

$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m + T_L$$

dimana ω_m adalah kecepatan sudut mekanis rotor dan untuk mesin dengan p kutub:

$$\omega_m = \frac{2}{p} \omega_r$$

sehingga :

$$T_e = J \left(\frac{2}{p} \right) \frac{d\omega_r}{dt} + B_m \frac{2}{p} \omega_r + T_L \quad 4.6$$

dimana : T_e = torsi elektromagnetik (N.m)
 J = momen inersia rotor (kg.m²)
 ω_r = kecepatan sudut listrik dari rotor (rad/detik)
 B_m = koefisien gesekan (N.m.det/rad)
 T_L = torsi beban (N.m)

V. SIMULASI MOTOR INDUKSI 3 FASA

5.1. Persamaan untuk Simulasi

Persamaan yang sesuai untuk simulasi motor induksi dalam kerangka referensi dapat dibentuk dengan menyelesaikan persamaan fluks gandeng untuk memperoleh arus. Dari persamaan (4.4) arus dapat dinyatakan sebagai :

$$i_{qs} = \frac{1}{X_{ls}} (\Psi_{qs} - \Psi_{mq})$$

$$i_{ds} = \frac{1}{X_{ls}} (\Psi_{ds} - \Psi_{md})$$

$$i_{0s} = \frac{1}{X_{ls}} \Psi_{0s}$$

$$i'_{qr} = \frac{1}{X'_{lr}} (\Psi'_{qr} - \Psi_{mq})$$

$$i'_{dr} = \frac{1}{X'_{lr}} (\Psi'_{dr} - \Psi_{md})$$

$$i'_{0r} = \frac{1}{X'_{lr}} \Psi'_{0r}$$

dimana :

$$\begin{aligned} \Psi_{mq} &= X_M (i_{qs} + i'_{qr}) \\ \Psi_{md} &= X_M (i_{ds} + i'_{dr}) \end{aligned} \quad 5.2$$

Kemudian dari substitusi persamaan (5.1) dalam persamaan (4.3) fluks gandeng dapat dinyatakan sebagai :

$$\frac{d\Psi_{qs}}{dt} = \omega_b \left[v_{qs} - \frac{\omega}{\omega_b} \Psi_{ds} + \frac{r'_s}{X_{ls}} (\Psi_{mq} - \Psi_{qs}) \right]$$

$$\frac{d\Psi_{ds}}{dt} = \omega_b \left[v_{ds} + \frac{\omega}{\omega_b} \Psi_{qs} + \frac{r'_s}{X_{ls}} (\Psi_{mq} - \Psi_{ds}) \right]$$

$$\frac{d\Psi_{0s}}{dt} = \omega_b \left[v_{0s} - \frac{r'_s}{X_{ls}} \Psi_{0s} \right]$$

$$\frac{d\Psi'_{qr}}{dt} = \omega_b \left[v'_{qr} - \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \Psi'_{dr} + \frac{r'_r}{X'_{lr}} (\Psi_{mq} - \Psi'_{qr}) \right]$$

$$\frac{d\Psi'_{dr}}{dt} = \omega_b \left[v'_{dr} + \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \Psi'_{qr} + \frac{r'_r}{X'_{lr}} (\Psi_{mq} - \Psi'_{dr}) \right]$$

$$\frac{d\Psi'_{0r}}{dt} = \omega_b \left[v'_{0r} - \frac{r'_r}{X'_{lr}} \Psi'_{0r} \right]$$

Persamaan (5.2) sekarang dinyatakan :

$$\Psi_{mq} = X_{aq} \left(\frac{\Psi_{qs}}{X_{ls}} + \frac{\Psi'_{qr}}{X'_{lr}} \right) \quad 5.4$$

$$\Psi_{md} = X_{ad} \left(\frac{\Psi_{ds}}{X_{ls}} + \frac{\Psi'_{dr}}{X'_{lr}} \right)$$

dimana :

$$\begin{aligned} X_{aq} &= X_{ad} \\ &= \left(\frac{1}{X_M} + \frac{1}{X_{ls}} + \frac{1}{X'_{lr}} \right)^{-1} \end{aligned} \quad 5.5$$

Persamaan untuk torsi elektromagnetik mengacu pada persamaan (4.5) yaitu :

$$T_e = \left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{p}{2} \right) \left(\frac{1}{\omega_b} \right) (\Psi'_{qr} i'_{dr} - \Psi'_{dr} i'_{qr}) \quad 5.6$$

Kecepatan sudut listrik rotor dirumuskan dari persamaan (4.6) sebagai :

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{p}{2J} (T_e - T_L) - \frac{B_m}{J} \omega_r \quad 5.7$$

5.2. Penyelesaian Persamaan Diferensial

Untuk menyelesaikan persamaan diferensial dalam analisis motor induksi ini digunakan metode Runge-Kutta Fehlberg. Rumus iterasi untuk metode Runge-Kutta Fehlberg adalah :

$$y_{i+1} = y_i + \left(\frac{25}{216} k_1 + \frac{1408}{2665} k_3 + \frac{2197}{4104} k_4 - \frac{1}{5} k_5 \right) h \quad 5.8$$

dimana :

$$k_1 = f(x_i, y_i)$$

$$k_2 = f\left(x_i + \frac{1}{4}h, y_i + \frac{1}{4}hk_1\right)$$

$$k_3 = f\left(x_i + \frac{3}{8}h, y_i + \frac{3}{32}hk_1 + \frac{9}{32}hk_2\right)$$

$$k_4 = f\left(x_i + \frac{12}{13}h, y_i + \frac{1932}{2197}hk_1 - \frac{7200}{2197}hk_2 + \frac{7296}{2197}hk_3\right)$$

$$k_5 = f\left(x_i + h, y_i + \frac{439}{216}hk_1 - 8hk_2 + \frac{3680}{513}hk_3 - \frac{845}{4104}hk_4\right)$$

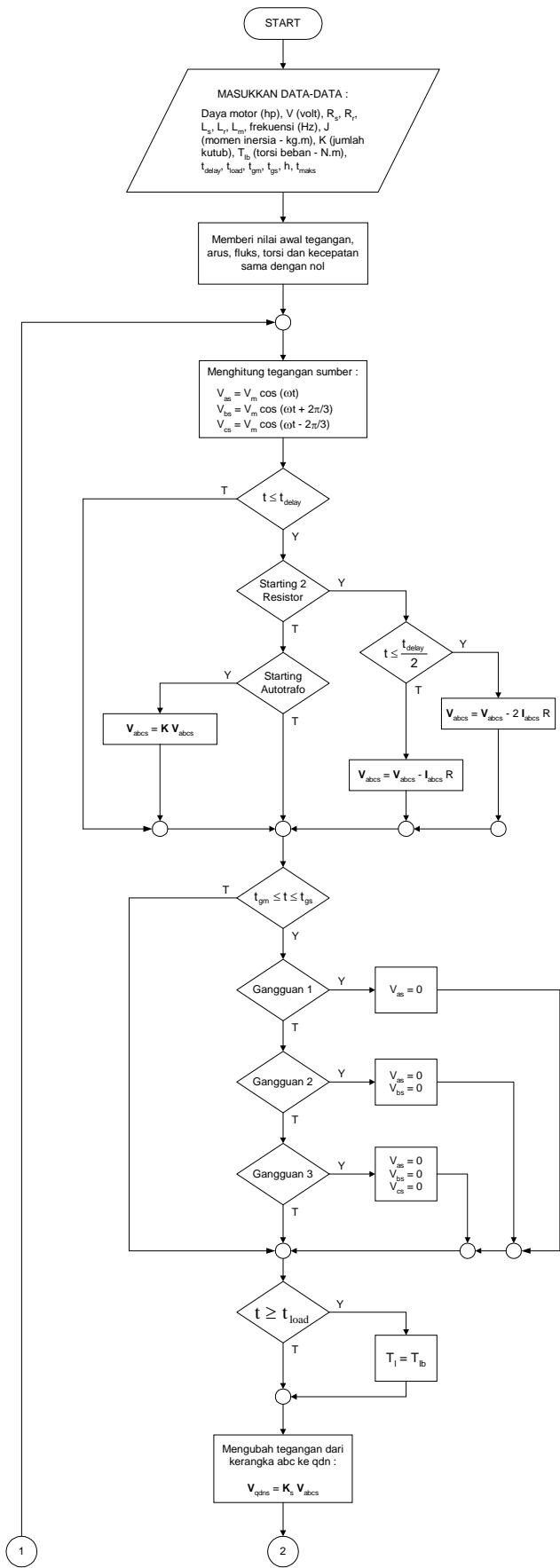
$$k_6 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i - \frac{8}{27}hk_1 + 2hk_2 - \frac{3544}{2565}hk_3 + \frac{1859}{4104}hk_4 - \frac{11}{40}hk_5\right)$$

Perkiraan kesalahan (*error estimate*) dirumuskan dengan :

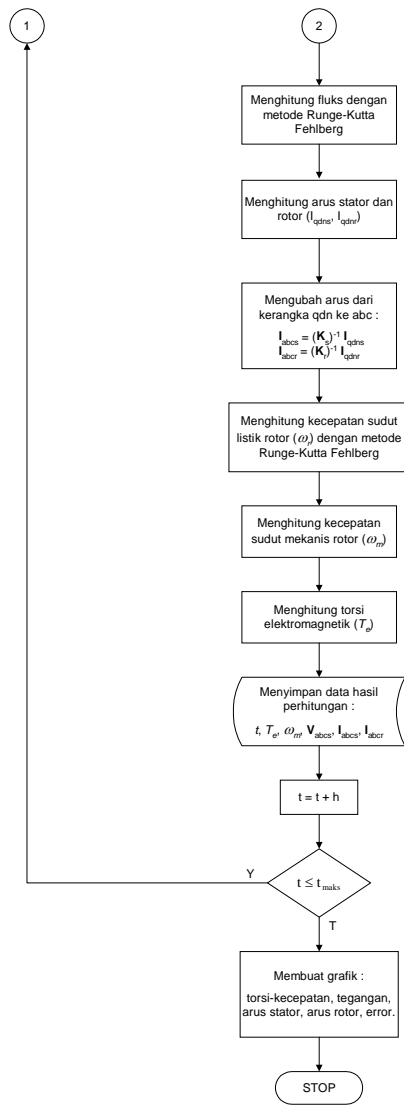
$$E_a = \left(\frac{1}{360} k_1 - \frac{128}{4275} k_3 - \frac{2197}{75240} k_4 + \frac{1}{50} k_5 + \frac{2}{55} k_6 \right) h \quad 5.9$$

5.3. Diagram Alir

Diagram alir program simulasi motor induksi 3 fasa adalah seperti terlihat dalam Gambar 5.



Gambar 5. Diagram alir program simulasi motor induksi 3 fasa



Lanjutan Gambar 5

5.4. Grafik Hasil Simulasi

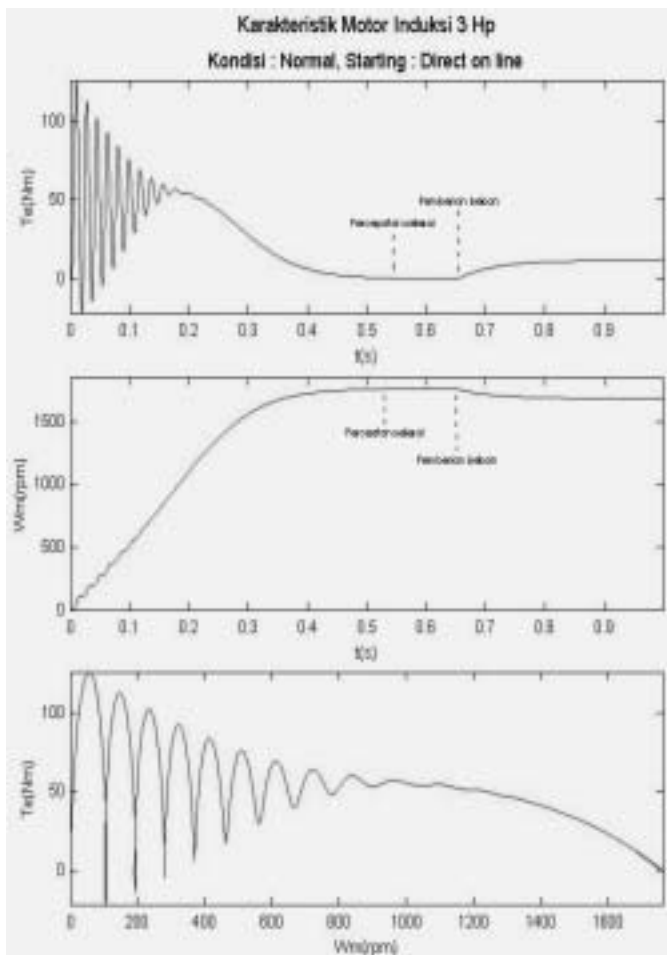
Dari simulasi yang dilakukan diperoleh grafik karakteristik percepatan motor induksi berdaya 3 hp seperti terlihat dalam Gambar 6.

Kemudian grafik karakteristik motor induksi 3 hp berdasarkan perbedaan metode *starting* dapat dilihat dalam Gambar 7 dan 8. Data perbedaan karakteristik motor 3 hp dengan 3 metode *starting* yang berbeda tercantum dalam Tabel 5.1.

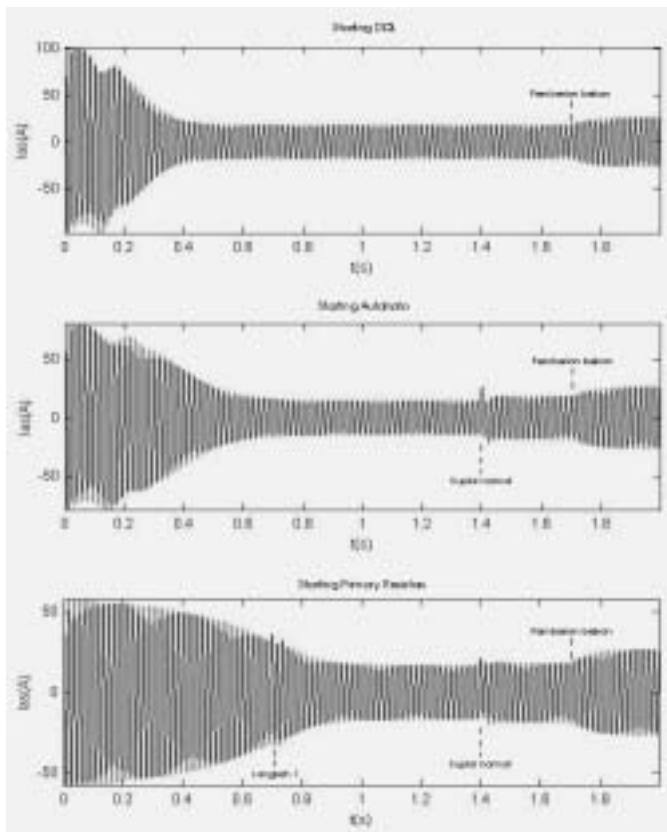
Tabel 5.1 Perbedaan karakteristik motor 3 hp untuk 3 metode *starting*

Metode <i>starting</i>	V _{st maks LN}	I _{as maks}	I _{ar maks}	T _{e maks}	Ket
DOL	179,6292	101,3259	92,3312	125,6765	
Auto trafo	143,7034	80,2770	71,4261	81,0358	
Primary resistors	133,0478	57,5659	50,9424	36,3469	Step 1
	167,1611	36,3951	8,7439	22,4762	Step 2

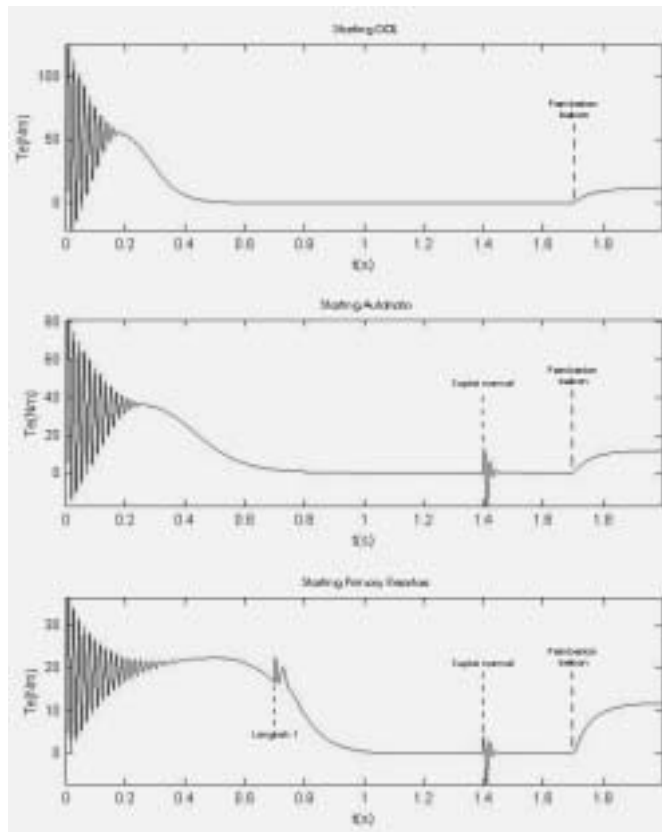
Dari simulasi juga dapat dilihat karakteristik motor induksi saat terjadi gangguan pada tegangan sumbernya seperti tampak dalam Gambar 9 dan 10.



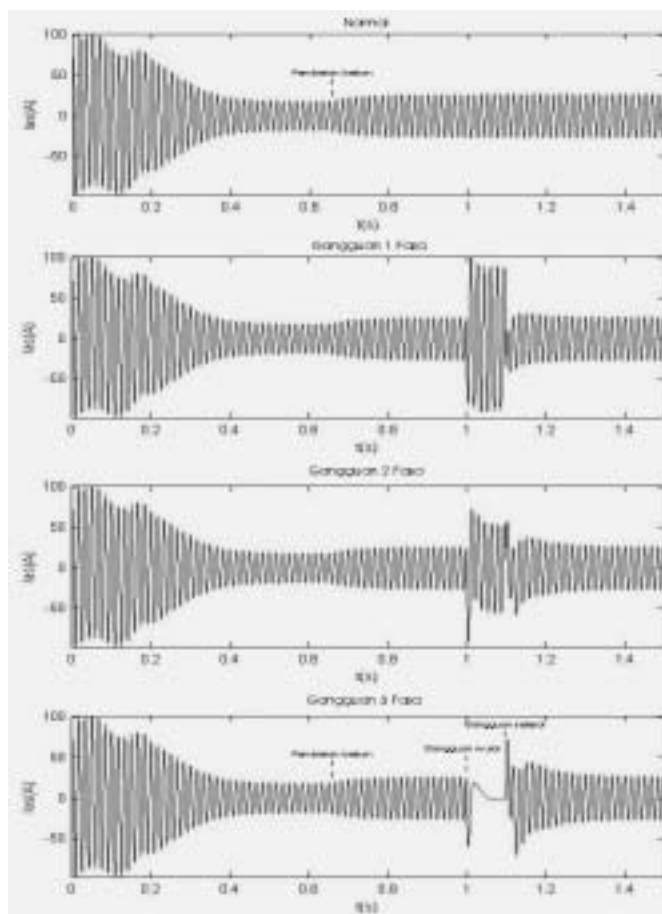
Gambar 6. Karakteristik torsi-kecepatan selama percepatan motor induksi 3 hp



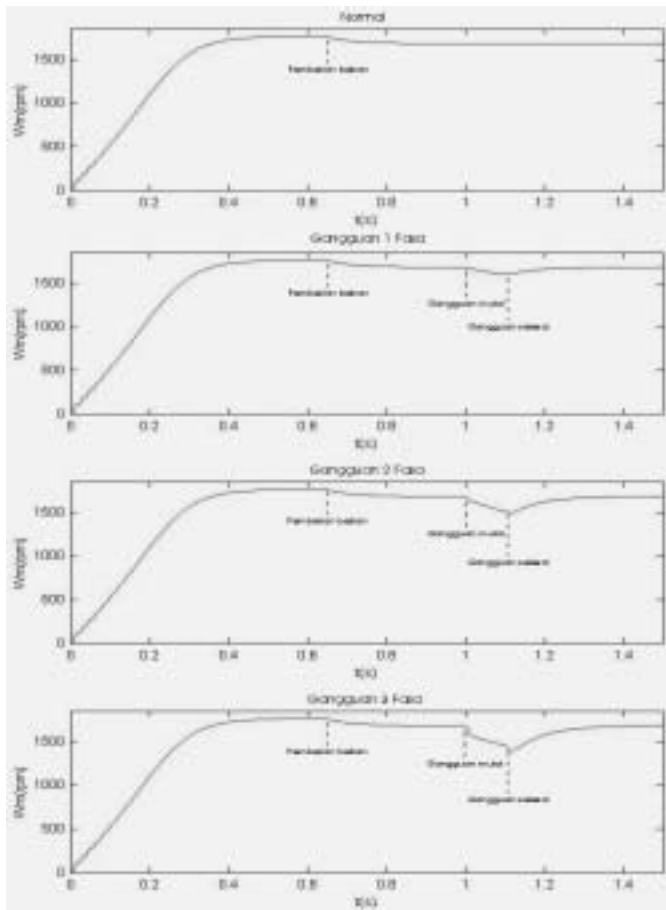
Gambar 7. Grafik arus stator motor induksi 3 hp untuk 3 metode starting



Gambar 8. Grafik torsi motor induksi 3 hp untuk 3 metode starting



Gambar 9. Grafik arus stator fasa a motor induksi 3 hp saat kondisi normal dan gangguan



Gambar 10. Grafik kecepatan motor induksi 3 hp saat kondisi normal dan gangguan

VI. PENUTUP

6.1. Kesimpulan

- Karakteristik unjuk kerja dari motor induksi 3 fasa dalam kondisi dinamis, dimana tegangan sumber kemungkinan tidak selalu simetri demikian pula beban yang terpasang dapat berubah-ubah, dapat disimulasikan secara baik dengan menggunakan model motor induksi dalam kerangka referensi.
- Dari analisis yang dilakukan pada motor induksi 3 hp untuk berbagai metode *starting* diketahui bahwa masing-masing metode *starting* akan menghasilkan karakteristik arus, torsi serta kecepatan yang berbeda-beda.
 - Metode *starting* dengan *primary resistors* menarik arus *starting* paling kecil dibanding dengan metode *starting* yang lain yakni 57,56 A atau 57 % dari arus yang ditarik saat motor *starting* secara DOL.
 - Metode *starting* dengan *primary resistors* akan menghasilkan torsi awal yang paling kecil yaitu sebesar 36,35 Nm atau 28,92 % dari torsi awal yang dihasilkan saat motor *starting* secara DOL.
 - Metode *starting* dengan autotrafo memerlukan waktu yang lebih sedikit untuk mencapai kecepatan normal dibanding dengan metode

starting dengan *primary resistors* yaitu selama 0,9 detik atau 1,5 kali lebih lama jika dibanding dengan saat motor *starting* secara DOL.

- Dari hasil simulasi yang dilakukan pada motor induksi 3 hp untuk saat terjadi gangguan pada tegangan sumber diketahui bahwa adanya gangguan hubung singkat pada sumber akan menyebabkan arus dan torsi berayun. Kondisi terparah terjadi pada saat gangguan 3 fasa dimana torsi dan arus akan mencapai nol, dan juga mengakibatkan pengurangan kecepatan yang paling besar yaitu sampai mencapai 1382 rpm atau 82 % dari kecepatan normal.

6.2. Saran

Salah satu kendala dalam melakukan analisis yaitu bahwa untuk menjalankan simulasi analisis motor induksi 3 fasa ini diperlukan waktu yang cukup lama. Oleh karena itu untuk meningkatkan unjuk kerja programnya maka perlu dilakukan perbaikan antara lain dengan cara :

- Membuat kompilasi program dari *m.file programming* (program berbasis MATLAB) menjadi program yang dapat dieksekusi langsung. Di sini MATLAB-6 juga telah menyediakan fasilitasnya.
- Membuat besarnya langkah (*incremental step*) pada proses iterasi Runge-Kutta Fehlberg menjadi variabel sehingga memungkinkan proses perhitungan menjadi berjalan lebih cepat. Hal ini dimungkinkan dengan menggunakan metode iterasi *adaptive step size*.

DAFTAR PUSTAKA

- Paul C. Krause, *Analysis of Electric Machinery*, McGraw-Hill Book Company.
- B.L. Theraja, *A Text-Book Of Technology*, Publication Division of Nirja Construction & Development Co. (P) Ltd RAM Nagar, New Delhi, 1980.
- Eugene C. Lister, Jr. Drs. Hanapi Gunawan, *Mesin Dan Rangkaian Listrik*, Penerbit Erlangga, 1997.
- M.L. Soni, Dhanpat Rai & Sons, *Electrical Technology*, Nai Sarak, Delhi.
- S.A. Nasar & L.E. Unnewehr, *Electromechanics and Electric Machines*, John Wiley & Sons Inc, 1983.
- George Mc Pherson, *An Introduction to Electrical Machines and Transformer*, John Wiley & Sons Inc, 1981.
- Theodore Wildi, *Electrical Machines, Drives, And Power System* third edition, Prentice Hall International Inc, 1997.
- Fritzgerald, Kingsley, Umans, *Electric Machinery* third edition, Mc Graw Hill International Book Company, 1971.
- Duane Hanselman and Bruce Littlefield, *The Student Edition of MATLAB Version 4*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ 07632.
- Dr. Ir. Soebagio MS.E.E, *Model Mesin Induksi Dalam Koordinat DQN*, SMED 2000 UGM Yogyakarta.
- Steven C. Chapra, Ph.D, Raymond P.Canale, Ph.D, *Numerical Methods for Engineers*, Second Edition.
- Runge Kutta Fehlberg Method*, www.sali.freeservers.com/engineering/fortran_codes/fehlberg.html.

- [13] T.A. Lippo, *Representation of Induction Motor in Reference Frame Theory*, A Class Note, University of Winconsin USA, 1984.
- [14] C.W. Brice, E. Santi, X. Kang, L.U. Gökdere, *Reference Frames for Simulation of Electric Motors and Drives*, Dept. of Electrical Engineering University of South Carolina Columbia, USA.
- [15] *MATLAB The Language of Technical Computing, Creating Graphical User Interfaces*, Version 1, The Math Work Inc. , November 2000.
- [16] Karmila Esmeralda S, Ferdy Thamsil Thim, *Simulasi Komputer Perilaku Motor Induksi Tiga Fasa Selama Gangguan pada Sistem Tenaganya*, Jurusan Teknik Elektro UNHAS, 1996.
- [17] John R. Smith, *Response Analysis of AC Electrical Machine : Computer Models and Simulation*, John Wiley & Sons Inc. , 1990.
- [18] John R. Smith, Meng-Jen Chen, *Three-Phase Electrical Machine System (Computer Simulation)*, John Wiley & Sons Inc. , 1993.



Isnanto Heru Purnomo, lahir di Kulon Progo, Yogyakarta pada 23 Juli 1978. Sejak tahun 1996 penulis berkesempatan menjadi mahasiswa S1 Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro Semarang, dan pada semester ke-5 mengambil konsentrasi di Bidang Ketenagalistrikan. Bidang ilmu yang ditekuni penulis yaitu berkaitan dengan sistem ketenagalistrikan khususnya mengenai PLC dan motor listrik.

Pengesahan,

Mengetahui/Mengesahkan
Pembimbing II :

Mochammad Facta, S.T. M.T.

NIP. 132 321 134