

PEMODELAN PERILAKU DINAMIK MOTOR INDUKSI TIGA FASA

Ahyanuardi ^{*)}

ABSTRACT

Dynamic performance induction motor had been need to analyze behavior induction motor except steady-state. The paper presents an investigation of transient performance of a three-phase squirrel-cage rotor induction motor. The underlying model technique chooses the stator and rotor d-q axis magnetic flux linkages as the state space variables. The simulation of transient performance of the machine is examined for the starting process, and suddenly load. Typical results of the transient simulation are presented to suggest guidelines for really protection and control design problem identification of a squirrel-cage rotor three-phase induction motor.

Key words: dinamic performance, transient performance, induction motor

^{*)} Jurusan Teknik Elektro FT UNP, e-mail : ahyanuardi@yahoo.com

PENDAHULUAN

Motor induksi tiga fasa secara luas digunakan di industri sebagai penggerak beban pada kecepatan tetap. Motor induksi tiga fasa dicatu dari sumber tegangan bolak balik tiga fasa pada kumparan stator dan diinduksikan pada rotor. Motor induksi tiga fasa memiliki beberapa keuntungan jika dibandingkan dengan motor sinkron, antara lain tidak memerlukan sumber arus searah untuk penguatan, konstruksi yang kokoh, rotor sangkar tanpa sikat, biaya pemeliharaan yang rendah, mudah diperoleh, harga yang lebih murah bila dibandingkan dengan mesin sinkron dan mesin arus searah.

Dalam operasinya motor induksi mengalami perubahan-perubahan perilaku yang disebabkan oleh perubahan sumber tegangan, beban atau mesin itu sendiri, sehingga mesin induksi akan beroperasi dalam kondisi transien (peralihan) sebelum mencapai keadaan mantap (steady state). Proses peralihan yang sering dijumpai pada motor induksi adalah saat motor mulai dijalankan (starting), pembebanan yang dilakukan secara mendadak, pemutusan beban dengan mendadak, hilangnya salah satu fasa sumber tegangan atau terjadinya hubung singkat. Perubahan perilaku tersebut terlihat dari nilai arus dan torka pada motor tersebut.

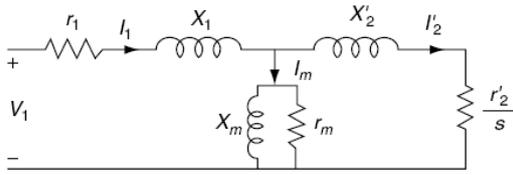
Penelitian yang dilakukan oleh [2,7] tentang kondisi transien motor induksi pada saat mulai dijalankan dalam kondisi tanpa beban, mendapatkan nilai arus awal (starting) yang mengalir pada motor tersebut mencapai 6 sampai

dengan 10 kali dari nilai arus beban penuhnya, serta nilai torka awal mempunyai nilai yang lebih besar dari nilai torka beban penuhnya. Selanjutnya penelitian yang dilakukan [4,8] tentang kondisi transien awal pada pengasutan motor induksi tiga fasa juga mendapatkan nilai arus dan torka yang hampir sama dengan penelitian yang dilakukan [2,7].

Dari kedua referensi tersebut, jelas terlihat bahwa masalah yang diteliti hanya mengenai arus dan torka awal pada saat motor mulai dijalankan (starting) pada kondisi tanpa beban. Sedangkan untuk perilaku dinamik motor induksi saat dibebani dengan mendadak belum diteliti. Oleh sebab itu perlu dilakukan suatu penelitian untuk melihat perilaku dinamik motor induksi tiga fasa mulai dijalankan (start-up) kemudian diberi beban secara mendadak. Penelitian ini berguna untuk mengetahui berapa besar perubahan arus, torka serta berapa lama kondisi transien tersebut berlangsung sebelum motor mencapai keadaan mantap (steady state), jika terjadi perubahan beban secara tiba-tiba (mendadak). Dengan diketahuinya besar arus dan torka motor induksi tiga fasa selama kondisi transien, dapat dirancang penggunaan alat-alat proteksi sehingga motor dapat beroperasi dengan aman dan terhindar dari kerusakan.

Secara konvensional motor induksi dianalisis dengan rangkaian ekuivalen yang dikembangkan berdasarkan model suatu transformator. Analisis dari motor induksi menggunakan rangkaian ekuivalen hanya dapat

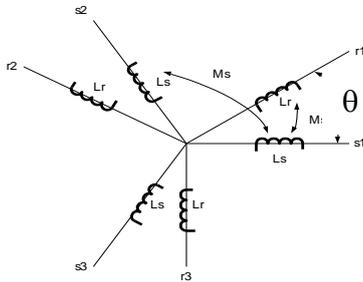
dilakukan untuk kondisi steady state.



Gambar 1. Rangkaian Ekivalen Motor Induksi

Sedangkan untuk menganalisis motor dalam kondisi transient, perlu dibuat suatu pemodelan. Prinsip pemodelan adalah mengganti parameter rangkaian motor dengan rangkaian ekivalen atau dengan cara mentransformasikan parameter rangkaian motor kedalam sistem rujukan tertentu. Pemodelan parameter rangkaian motor bertujuan untuk mengembangkan model matematis supaya perilaku motor dapat dianalisis dan disimulasikan. Simulasi dapat dilakukan dengan bantuan seperangkat komputer digital dan soft-ware tertentu.

Dalam penelitian ini motor induksi 3 fasa dimodelkan menjadi suatu mesin listrik 3 fasa yang mempunyai belitan simetris, 3 belitan simetris pada stator, 3 belitan simetris pada rotor dan mempunyai ruang vektor yang dapat digambarkan seperti pada gambar 2.



Gambar 2. Model Belitan Mesin Listrik 3 Fasa Simetris

Asumsi dasar dalam penelitian ini adalah:

- permeabilitas μ dianggap konstan
- distribusi fluksi sinusoidal
- letak belitan tertentu

Untuk mendapatkan model matematis motor induksi digunakan metoda Park d-q. Metoda Park pada intinya adalah mentransformasikan sistem 3 fasa menjadi sistem 2 fasa, selanjutnya sistem 2 fasa ditransformasikan ke dalam sumbu direct (d) dan sumbu quadrature (q). Setelah ditransformasikan kedalam sumbu d-q akan diperoleh persamaan dalam bentuk matrik sebagai berikut :

Persamaan Tegangan :

$$\begin{bmatrix} V_{sq} \\ V_{sd} \\ V_{rq} \\ V_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \\ i_{rq} \\ i_{rd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega & 0 & 0 \\ -\omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (\omega - \omega_r) \\ 0 & 0 & -(\omega - \omega_r) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{sq} \\ \Phi_{sd} \\ \Phi_{rq} \\ \Phi_{rd} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sq} \\ \Phi_{sd} \\ \Phi_{rq} \\ \Phi_{rd} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

Persamaan Fluksi :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sq} \\ \Phi_{sd} \\ \Phi_{rq} \\ \Phi_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ 0 & M & L_r & 0 \\ M & 0 & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \\ i_{rq} \\ i_{rd} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2)$$

Persamaan Torka Elektromagnetik

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\Phi_{rq} i_{rd} - \Phi_{rd} i_{rq}) \dots\dots\dots(3)$$

Simulasi dapat dilakukan dengan cara menyelesaikan persamaan-persamaan diferensial tersebut setelah dirobah menjadi *Persamaan Keadaan* dalam notasi matrik-vektor.

Persamaan keadaan dari Fluksi dan Torka adalah

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sq} \\ \Phi_{sd} \\ \Phi_{rq} \\ \Phi_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r_s L_r}{s r} & \frac{r_s M}{s} & 0 & 0 \\ D & -\omega & D & 0 \\ \omega & \frac{-r_s L_r}{s r} & 0 & \frac{r_s M}{s} \\ \frac{r_s M}{r} & D & \frac{-r_s L_r}{r s} & -(\omega - \omega_r) \\ D & 0 & D & -(\omega - \omega_r) \\ 0 & \frac{r_s M}{r} & (\omega - \omega_r) & \frac{-r_s L_r}{r s} \\ D & 0 & D & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{sq} \\ \Phi_{sd} \\ \Phi_{rq} \\ \Phi_{rd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{sq} \\ V_{sd} \\ V_{rq} \\ V_{rd} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(4)$$

$$T_e = \frac{P}{2} \cdot \frac{3}{2} (L_{ms} \cdot i_{rd} \cdot i_{sq} - L_{ms} \cdot i_{rq} \cdot i_{sd}) \dots\dots\dots(5)$$

sedangkan persamaan keadaan untuk kecepatan sudut rotor adalah

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \left(\frac{P}{2}\right) \frac{(T_e - T_L)}{J} \dots\dots\dots(6)$$

Untuk menganalisis dan simulasi perilaku dinamik motor induksi tiga fasa sesuai dengan tujuan penelitian ini, diperlukan suatu persamaan kendala, sehingga terlihat perubahan karakteristik-karakteristik selama kondisi transien.

Sesuai dengan tujuan penelitian yang akan diamati adalah perilaku kondisi transien motor induksi tiga fasa selama pengasutan dan saat pembebanan secara tiba-tiba (mendadak).

Persamaan kendala untuk motor induksi tiga-fasa selama pengasutan

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{ac} \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & t \leq t_p \\ \begin{bmatrix} \sqrt{2} V_s \cos \theta_s \\ \sqrt{2} V_s \cos \left(\theta_s - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sqrt{2} V_s \cos \left(\theta_s + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} & t > t_p \end{cases} \dots\dots\dots(7)$$

Dimana t_p adalah waktu saat pengasutan dan v_s adalah tegangan rms (Volt).

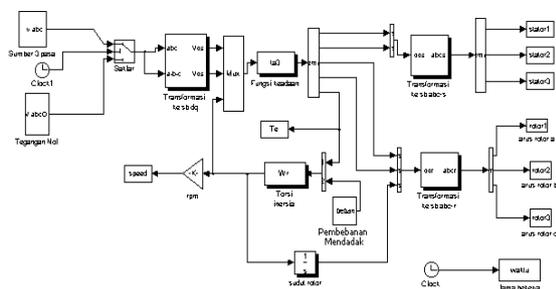
Sedangkan persamaan kendala saat terjadinya pembebanan secara tiba-tiba (mendadak) adalah sebagai berikut :

$$T_L = \begin{cases} 0 & \text{untuk } t \leq t_{b1} \\ k & \text{untuk } t_{b1} \leq t < t_{b2} \\ 0 & \text{untuk } t \leq t_{b2} \end{cases} \dots\dots\dots(8)$$

dimana:

- k = torka beban (N.m)
- tb1 = waktu saat pembebanan (detik)
- tb2 = waktu saat pelepasan beban (detik)

Setelah diperoleh persamaan keadaan dan kendala dari motor induksi tiga fasa pada kondisi dinamik, maka perubahan karakteristik selama kondisi transien dapat disimulasikan dengan simulink-matlab. Skema rangkaian simulasi yang dilakukan adalah sebagai berikut:



Gambar 3. Blok Diagram Simulink Matlab

METODE PENELITIAN

Penelitian yang akan dilakukan ini bersifat pengujian laboratorium dan simulasi. Pengujian laboratorium dilakukan untuk menentukan parameter motor induksi yang akan disimulasikan.

Untuk menentukan parameter motor dilakukan pengujian beban nol dan pengujian rotor ditahan.

Setelah semua parameter motor induksi 3 fasa diketahui, dilakukan simulasi dengan langkah 1) transformasikan parameter rangkaian motor induksi ke dalam sumbu orthogonal d-q, untuk mendapatkan model matematis yang merupakan fungsi waktu, 2) berikan suatu persamaan kendala, sehingga perilaku dinamik motor induksi tiga fasa dapat disimulasikan. Simulasikan dilakukan dengan komputer digital menggunakan Simulink-Matlab.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Variabel yang diamati :

1. Arus stator (I_1) sebagai fungsi waktu,
2. Arus rotor (I_2') sebagai fungsi waktu,
3. Torka elektromagnetik (T) sebagai fungsi waktu,
4. Perubahan kecepatan rotor (n_r) sebagai fungsi waktu,
5. Perubahan torka elektromagnetik terhadap kecepatan rotor.

Parameter motor

Daya motor	: 3 HP
Tegangan (V_L)	: 220 Volt
Frekuensi	: 60 Hz
Arus (I_L)	: 8,5 Amper
Putaran sinkron	: 1.800 rpm
Jumlah Kutub (P)	: 4
R_s	: 0,435 Ω
X_{Ls}	: 0,754 Ω
R_r'	: 0,816 Ω
X_{Lr}'	: 0,754 Ω
X_m	: 26,13 Ω
J	: 0,089 $kg.m^2$
T_L	: 11,9 Nm
T_p	: 0,1 detik
T_{b1}	: 0,8 detik
T_{b2}	: 1,5 detik

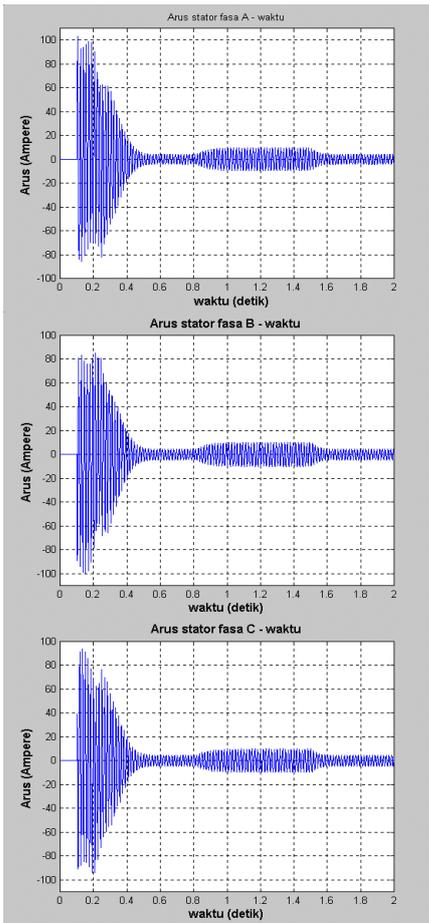
Klasifikasi waktu simulasi (t, detik)

- $t < 0.1$: Motor belum bekerja
- $t = 0$: Motor mulai diasut
- $0,1 < t < 0,62$: Waktu transient pengasutan
- $0,62 \leq t < 0,8$: Motor dalam kondisi steady state tanpa beban
- $t = 0,8$: Motor dibebani secara tiba-tiba (mendadak)

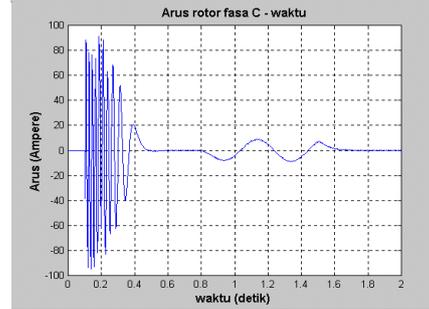
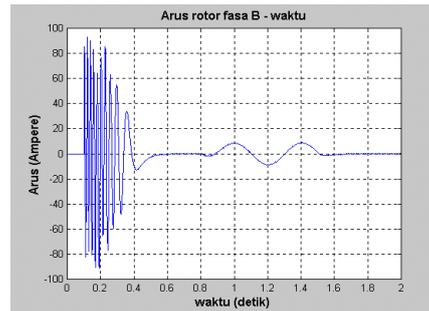
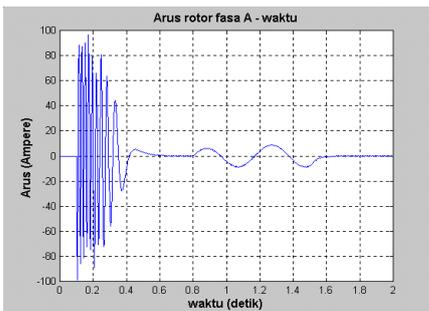
- 0,8 < t < 1,15 : Waktu transient pembebanan
- t = 1,5 : Beban motor dilepas
- 1,5 < t < 1,85 : Waktu transient pelepasan beban
- 1,85 ≤ t : Motor dalam kondisi steady state tanpa beban

Hasil Simulasi

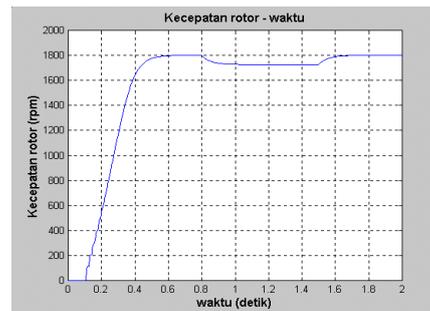
1. Arus stator (I_1) masing-masing fasa sebagai fungsi waktu



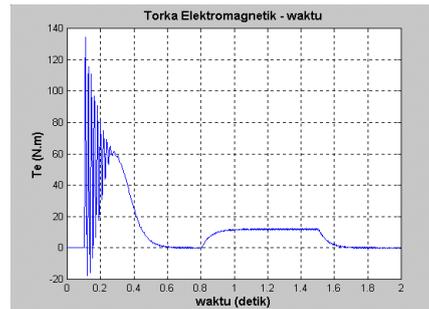
2. Arus rotor (I_2) masing-masing fasa sebagai fungsi waktu



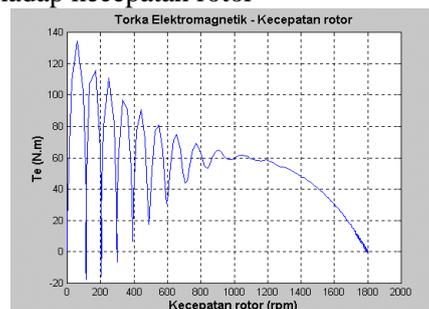
3. Kecepatan rotor (n_r) sebagai fungsi waktu



4. Torka elektromagnetik (T) sebagai fungsi waktu



5. Perubahan torka elektromagnetik (T) terhadap kecepatan rotor



Pembahasan

Dari hasil simulasi dapat dilihat perubahan karakteristik motor induksi tiga fasa selama pengasutan dan pembebanan mendadak. Pada saat motor mulai dijalankan (starting), arus stator, arus rotor dan torka awal lebih besar bila dibandingkan dengan arus stator, arus rotor serta torka pada keadaan mantap (steady-state). Berdasarkan gambar 1 rangkaian ekuivalen motor induksi, dapat dihitung :

$$Arus\ stator(I_1) = \frac{V_1}{\sqrt{(r_1 + a^2 r_2 / s)^2 + (X_1 + a^2 X_2 / s)^2}} \dots(9)$$

$$Arus\ rotor(I_2) = \frac{E_2}{\sqrt{(r_2 / s)^2 + (X_2)^2}} \dots\dots\dots(10)$$

$$Torka(T) = \frac{3}{\omega} V_1^2 \frac{sa^2 r_2}{(a^2 r_2)^2 + s^2 (a^2 X_2)^2} \dots\dots\dots(11)$$

$$Slip(s) = \frac{n_s - n_r}{n_s} \dots\dots\dots(12)$$

$$n_r = n_s - sn_s \dots\dots\dots(13)$$

Pada saat motor mulai dijalankan (starting) pada kondisi tanpa beban sampai motor beroperasi secara normal, kecepatan putaran rotor akan berubah dari nol sampai mendekati kecepatan sinkronnya. Perubahan kecepatan putaran rotor tersebut, akan menyebabkan terjadinya perubahan nilai slip (s) dari satu menjadi lebih kecil dari satu. Perubahan nilai slip (s) ini akan mengakibatkan perubahan arus stator, arus rotor, torka dan kecepatan putaran rotor. Nilai slip (s) saat motor mulai dijalankan sama dengan satu, sedangkan pada kondisi steady state harga slip (s) lebih kecil dari satu. Perubahan nilai slip (s) ini akan mengakibatkan arus stator, arus rotor dan torka Dari kedua kondisi tersebut diperoleh nilai denominator pada persamaan (9), (10) dan (11) saat motor mulai dijalankan akan lebih kecil dari kondisi steady state, sehingga arus dan torka pada kondisi saat mulai dijalankan (starting) akan lebih besar bila dibandingkan dengan kondisi steady state.

Dari hasil simulasi yang dilakukan saat $0 < tp < 0,1$ detik motor masih dalam keadaan diam, tak bertegangan dan dalam kondisi tanpa beban. Saat $0,1 \leq t < 0,62$ detik motor diberi tegangan, sehingga mengalami perubahan karakteristik yang sangat besar sekali dimana arus stator dan arus rotor saat itu mendekati 90 A dan torka elektromagnetik mendekati nilai 130 N-m. Pada

saat $t > 0,62$ detik motor akan bergerak menuju keadaan steady state (mantap) dan motor beroperasi dalam kondisi steady state (mantap) dengan nilai arus pada stator sebesar 5 A.

Setelah motor beroperasi dalam keadaan steady state kemudian diberi beban secara mendadak, maka akan terjadi kenaikan arus, penurunan kecepatan rotor dan kenaikan torka. Kenaikan arus dan torka serta penurunan kecepatan motor pada saat diberi beban secara mendadak ini tidak sebesar perubahan yang terjadi saat motor mulai dijalankan (starting). Hal ini disebabkan karena pada saat diberi beban secara tiba-tiba, kecepatan putaran rotor akan menurun yang mengakibatkan perubahan nilai slip (s) menjadi lebih besar dari kondisi setelah beroperasi secara normal. Sesuai dengan persamaan (9), (10) dan (11), maka arus stator, arus rotor dan torka mengalami kenaikan dari kondisi sebelumnya. Namun perubahan nilai arus dan torka yang terjadi tidak sebesar pada saat motor mulai dijalankan.

Dari hasil simulasi yang dilakukan, pada saat $tb1 = 0,8$ detik motor diberi beban secara mendadak sehingga terjadi proses peralihan sampai $t = 1,15$ detik, setelah itu motor yang berbeban ini bekerja dalam kondisi mantap. Pada kondisi peralihan arus yang mengalir pada stator lebih kurang 14 A, torka elektromagnetik lebih kurang 12 N-m serta kecepatan rotor 1730 rpm. Setelah motor mencapai kondisi steady state (mantap), arus yang mengalir pada stator kembali sebesar 8 A.

Pada waktu $tb2 = 1,5$ detik beban motor dihilangkan dan terjadi lagi proses peralihan sampai $t = 1,85$ detik. Pada saat ini arus pada stator turun menjadi 5 A dan arus pada rotor dan torka menjadi nol. Pada kondisi ini kecepatan putaran rotor mendekati kecepatan sinkron sebesar 1800 rpm.

SIMPULAN

Dari hasil simulasi motor induksi tiga fasa selama pengasutan dan pemberian beban secara mendadak dan memutuskan beban dengan menggunakan simulink matlab maka dapat ditarik beberapa kesimpulan:

1. Saat motor induksi tiga fasa mulai dijalankan dalam kondisi tanpa beban, maka arus dan torka akan mempunyai nilai yang sangat besar untuk beberapa saat sebelum menuju keadaan mantapnya.
2. Setelah motor beroperasi secara normal,

- kemudian diberi beban secara mendadak, maka akan terjadi kenaikan arus dan torka dari kondisi sebelumnya, namun kenaikan ini tidak sebesar pada saat motor mulai dijalankan.
3. Setelah motor diberi beban dan beroperasi dalam kondisi steady state (mantap), kemudian beban dilepaskan, maka terjadi lagi proses peralihan yang menyebabkan perubahan nilai arus dan torka seperti motor telah beroperasi secara normal pada kondisi tanpa beban.
 4. Dengan menggunakan simulasi dapat diperkirakan besar arus mula dan torka mula dari motor induksi sebelum dioperasikan.
 5. Program simulasi dapat digunakan langsung untuk menghitung berapa besar arus rotor dan perubahan karakteristiknya, hal ini sulit dilakukan dalam percobaan laboratorium, sebab posisi rotor yang selalu berputar.

DAFTAR RUJUKAN

- Haroen, Yanuarsyah., (1989), *Analisa Transien Motor Tak Serempak Tiga Fasa Dengan Metode Park Komplek*, **Proceeding ITB** Vol 22 No. 1/2/3.
- Haryono., (2001), **Transien Awal pada Pengasutan Motor Induksi**, Jurusan Teknik Elektro UGM; Yogyakarta.
- Kermit Sigmon, Timothy A. Davis, (2002), **Matlab Primer, Six Edition**, CRC Academic Press, New York, Washington DC.
- Krismadinata, (2000), **Simulasi Motor Induksi Tiga-fasa selama Pengasutan dengan Menggunakan Simulink Matlab**, Jurusan Teknik Elektro Universitas Andalas; Padang.
- Natarajan, Ramasamy, (1988), *Starting Transient Current of Induction Motors Without and with Terminal Capacitors*, **IEEE Transaction on Energy Conversion**
- Nurdin, Muhammad, (1989), **Pemodelan Mesin Elektrik dengan Bantuan Komputer untuk Keperluan Analisis dan Desain**, Jurusan Teknik Elektro ITB, Bandung.
- Pedra, J., (2006), *Estimation of Typical Squirrel-cage Induction Motor Parameter for Dynamic Performance Simulation, Generation Transmission and Distribution*, **IEE Proceeding**, volume 153, 16 Maret 2006, hal 137-146.
- Piromthum, P.; Kunakorn, A., (2003), *Study of Starting Current Due to a Group of Induction Motor Using an Aggregation Model*, *Power Electronics and Drive System, PEDS 2003. The Fifth International Conference on*, Volume 2, 17-20 Nov 2003, halaman 1054-1057.
- Soebagio, (2000), **Simulasi Motor Induksi Tiga-fasa dalam Sumbu d-q**, ITS, Surabaya.
- _____, **Simulink, Dynamic System Simulation Software**, The Math Work Inc.
- Wai-Kai Chen, (2004), **The Electrical Engineering Handbook**, Elsevier Academic Press, Singapore.