

STUDI PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA PHASA MENGGUNAKAN *DIRECT TORQUE CONTROL* DENGAN BANTUAN MATLAB

Elvira Zondra*

Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lancang Kuning Pekanbaru, Riau

* *corresponding author* : zondrazain@yahoo.com

Abstrak

Tulisan ini membahas tentang metode pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa yang dikendalikan oleh PWM inverter. Apabila motor induksi mendapat tegangan melalui pengaturan konverter daya, maka bentuk gelombang tegangan tidak lagi sinusoidal. Dalam kondisi ini, dibutuhkan pemodelan motor induksi dalam koordinat d-q-n untuk melakukan studi. Pengaturan motor induksi dengan *direct torque control* memungkinkan motor induksi sebagai sumber torka dengan pengaturan torka secara langsung. Metode ini bertujuan mengatur secara langsung fluks dan torka motor induksi. Untuk mendapatkan respon kecepatan motor induksi tiga fasa, maka digunakan simulasi pengaturan kecepatan menggunakan bantuan simulasi dengan software MATLAB. Pengujian terhadap pengaturan kecepatan dilakukan pada kecepatan referensi tertentu pada torka beban nol Nm dan 40 Nm. Dari simulasi yang telah dilakukan diperoleh perbaikan respon pengaturan kecepatan motor induksi dengan lonjakan (*overshoot*) yang kecil yaitu 0,26 % sampai 0.335 % dan waktu pemulihan kecepatan (*settling time*) yang lebih cepat yaitu 0,52 detik sampai 0,532 detik.

Kata Kunci: motor induksi tiga fasa, *direct torque control*.

Abstract

his paper discusses the method of speed control of three -phase induction motor that is controlled by PWM inverter. When the induction motor gets voltage through the power converter controller, the voltage waveforms are no sinusoidal. In these conditions, it takes modeling induction motors in the coordinate DQN to perform the studies . Control induction motors with direct torque control of induction motor allows that serves as the source of the torque with a torque setting directly . This method aims to directly regulate the flux and torque induction motor. To see the response speed three-phase induction motor speed control used simulated using software simulation with the help of MATLAB. Testing the speed setting is done at the speed of a particular reference to the zero load torque Nm and 40 Nm. Of simulation that has been done shows improvement induction motor speed control response with spike (overshoot) is small , namely 0.26 % to 0.335 % and speed recovery time (settling time) faster that 0.52 seconds to 0.532 seconds .

Keywords : three- phase induction motor , *direct torque control*

1. Pendahuluan

Motor induksi merupakan motor yang banyak digunakan pada industri, pusat bisnis transportasi dan lain-lain. Konstruksi motor yang kokoh (robust) merupakan keuntungan yang luar biasa dari motor induksi disamping harga yang murah serta mudah dalam perawatan. Pada umumnya

motor induksi digunakan pada kecepatan putaran tetap. Kecepatan variabel dapat diperoleh dengan mengatur frekuensi dan tegangan. Untuk mendapatkan kecepatan variabel tersebut dibutuhkan konverter daya. Apabila motor induksi mendapat tegangan melalui konverter daya, maka bentuk gelombang tegangan tidak

lagi sinusoidal. Dalam kondisi ini, dibutuhkan pemodelan motor induksi dalam koordinat d-q-n untuk melakukan studi.

Ada beberapa metode untuk pengaturan kecepatan motor induksi. Diantara kontrol tersebut adalah kontrol tegangan/frekuensi (v/f). Kontrol tegangan/frekuensi ini paling sederhana dan banyak digunakan di industri. Pengaturan kecepatan ini dikenal juga sebagai kontrol skalar. Ada juga kontrol vektor, untuk jenis ini terdapat loops kontrol untuk mengontrol torka dan fluks. Pengaturan motor induksi dengan *direct torque control* memungkinkan motor induksi yang berfungsi sebagai sumber torka dengan pengaturan torka secara langsung. Metode ini bertujuan mengatur secara langsung fluks dan torka motor induksi. Perubahan torka sebanding dengan perbedaan antara fluks stator dan fluks rotor

Sasaran dari mengembangkan metode pengaturan kecepatan dari motor induksi 10 hp, 380 volt dan 50 hertz di laboratorium Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lancang Kuning. Selanjutnya memberikan penjelasan tentang pengaturan torsi secara langsung dan memberikan pembahasan simulasinya.

2. Metode Penelitian

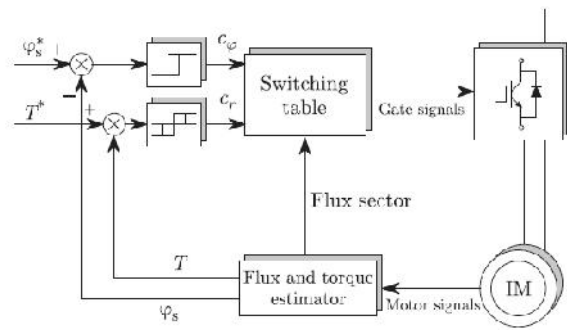
2.1 Pemodelan Pengaturan kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa

Pemodelan keseluruhan untuk sistem pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan menggunakan *direct torque control* adalah pada gambar 1.

Sistem ini terdiri dari:

- Motor induksi 3 fasa
- PWM Inverter
- direct torque control*

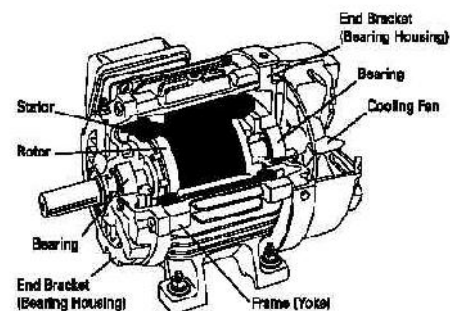
Pada skema ini error antara torka estimasi dan torka referensi menjadi masukan pada komparator histerisis tiga level, sedangkan error antara fluks estimasi dan fluks referensi menjadi masukan komparator histerisis dua level.



Gambar 1. Blok Diagram Pengaturan Kecepatan

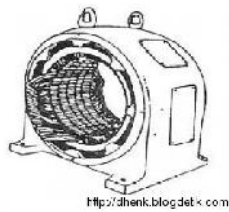
Motor induksi bekerja berdasarkan adanya induksi elektromagnetik. Motor induksi memiliki dua bagian utama yaitu bagian yang berputar (rotor) dan bagian yang diam (stator). Diantara stator dan rotor terdapat celah udara yang sangat kecil.

Stator terletak pada bagian luar dan merupakan bagian dari motor induksi yang tidak berputar. Dibuat dari besi bundar berlaminasi dan mempunyai alur-alur sebagai tempat meletakkan kumparan.

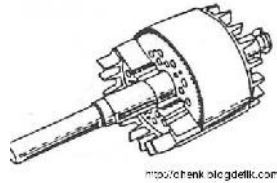


Gambar 2. Konstruksi Motor Induksi

Kumparan dibelitkan untuk sejumlah kutub tertentu. Rotor sangkar terdapat pada bagian dalam dari motor induksi dimana rotor berputar bebas. Rotor terdiri dari sederetan batang-batang penghantar yang terletak pada alur-alur sekitar permukaan rotor. Ujung-ujung batang penghantar dihubungkan dengan menggunakan cincin hubung singkat.



Gambar 3. Stator motor induksi



Gambar 4. Rotor sangkar motor induksi

Jika belitan stator diberi tegangan maka akan timbul fluks yang konstan dan berputar dengan kecepatan medan putar stator n_s (kecepatan sinkron). Kecepatan sinkron dapat diekspresikan dalam British unit dengan konversi (Jimmie, 2001):

$$n_s = \frac{60}{2p} \omega_s = \frac{60}{2p} \left(\frac{2}{p} \right) 2\pi f = \frac{120 f}{p} \quad (1)$$

dengan

n_s = kecepatan sinkron (rpm)

ω_s = kecepatan mekanik angular (rad/s) = $(2/p)\omega$

ω = frekuensi angular (rad/s) = $2\pi f$

f = frekuensi sumber (Hz)

p = jumlah kutup

fluks ini melalui celah udara, memotong permukaan rotor dan batang-batang rotor yang masih dalam keadaan diam. Dengan adanya kecepatan relatif antara fluks yang berputar dengan batang-batang konduktor yang diam maka pada batang rotor terinduksi suatu emf. Karena batang-batang rotor merupakan rangkaian tertutup maka mengalir arus. Dengan adanya interaksi antara medan putar dan arus yang mengalir maka timbul gaya yang menyebabkan rotor berputar dengan arah yang sama dengan medan putar stator (Bag S, 1988).

Motor induksi ini dihubungkan dengan *inverter* sebagai *driver*-nya. *Inverter* akan merubah arus DC dari menjadi arus AC 3 fasa untuk memutar motor induksi. Perputaran rotor motor induksi tidak dapat mengikuti kecepatan medan putar stator.

Jika kecepatan relatif antara keduanya nol maka emf yang diinduksikan adalah nol sehingga tidak ada arus yang mengalir di rotor dan tidak ada torsi yang dihasilkan. Rotor motor induksi berputar pada kecepatan yang lebih kecil dari stator. Slip s pada motor induksi merupakan perbedaan antara kecepatan sinkron dan kecepatan rotor, dinyatakan dalam persen atau perunit dari kecepatan sinkron. Slip perunit didapatkan dengan persamaan (T Wildi, 1991):

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2)$$

dengan

s = slip

n_s = kecepatan medan putar stator

n_r = kecepatan putar rotor

Persamaan tegangan motor induksi dengan tegangan simetri dalam koordinat qd adalah :

$$v_{qs} = r_s \bar{i}_{qs} + \omega l_{ds} + p l_{qs} \quad (3)$$

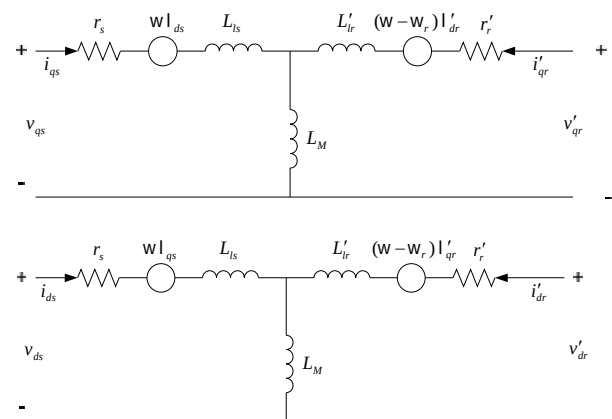
$$v_{ds} = r_s \bar{i}_{ds} - \omega l_{qs} + p l_{ds} \quad (4)$$

$$v'_{qr} = r'_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) l'_{dr} + p l'_{qr} \quad (5)$$

$$v'_{dr} = r'_r i'_{dr} - (\omega - \omega_r) l'_{qr} + p l'_{dr} \quad (6)$$

Torka elektromagnetik motor induksi dapat ditentukan dengan :

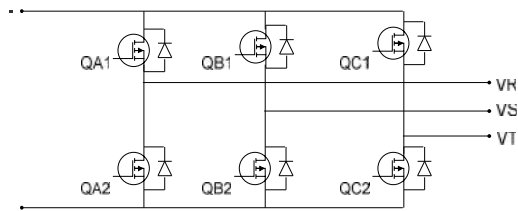
$$T_2 = \left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{P}{2} \right) (l_{ds} i_{qs} - l_{qs} i_{ds}) \quad (7)$$



Gambar 5. Rangkaian ekivalen qd dari motor

2.2 Inverter

Inverter mengubah dari tegangan DC menjadi AC. Inverter biasa digunakan pada *power supply*, UPS (*uninterruptible power supply*), *electric drive*, *active filter*, *power factor correction* dan lain-lain. Teknik PWM (*Pulse Width Modulation*) digunakan untuk membangkitkan tegangan yang diperlukan sebagai sinyal kendali inverter. Rangkaian inverter 3 fasa dapat dilihat pada gambar.6 (M Azhasi, 2006):



Gambar 6. Rangkaian inverter 3 fasa

Direct Torque Control (DTC) merupakan salah satu teknik kontrol yang mengarah pada pengaturan dengan torka yang berubah-ubah sesuai dengan kebutuhan beban pada motor induksi. Ada beberapa keunggulan bila menggunakan DTC dalam mengontrol torka, yaitu respon yang baik dan dapat dilakukan pengaturan motor tanpa menggunakan sensor kecepatan. Fluks dan torsi dihitung dari tegangan dan arus stator yang diukur pada motor. *Error* fluks dan torka didapatkan dari persamaan 8.

$$\begin{aligned}\Delta T_e &= T_{ref} - T_{est} \\ \Delta \lambda &= \lambda_{ref} - \lambda_{est}\end{aligned}\quad (8)$$

Berdasarkan *state* komparator histerisis didapatkan blok bersama dengan penentuan nomor sektor (Anders K, 2012).

Tabel 1. Tabel Switching DTC dasar

		Sektor					
		1	2	3	4	5	6
$d\lambda = +1$	$dT = +1$	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	$dT = 0$	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7
	$dT = -1$	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
$d\lambda = -1$	$dT = +1$	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
	$dT = 0$	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0
	$dT = -1$	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4

Untuk mempermudah penyelesaian penelitian ini maka digunakan metode penelitian sebagai berikut :

1. Melakukan studi literatur dari berbagai sumber baik jurnal-jurnal dan buku-buku penunjang tentang pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan mengembangkan metode *direct torque control* dalam pengaturan kecepatan dari Motor Induksi.
2. Studi pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dilakukan dalam bentuk simulasi dengan menggunakan *software MATLAB*.
3. Data motor induksi untuk simulasi diambil dari data motor induksi laboratorium Teknik Elektro dan melakukan percobaan pada motor induksi tersebut.
4. Menganalisis data hasil percobaan di laboratorium untuk mendapatkan parameter motor induksi.

$$I_r = \frac{V / \sqrt{3}}{(R_s + \frac{R_r}{s}) + j(X_1 + X_2)}$$

$$P_g = 3(I_r)^2 \frac{(R_r)}{s}$$

$$P_m = (1 - s)P_g$$

$$\omega_s = \frac{n_s}{60} 2\pi$$

$$T = P_m / \omega_s$$

5. Menganalisa hasil simulasi pada motor induksi tiga fasa dengan menentukan nilai lonjakan (*overshoot*), waktu pemulihan kecepatan

(*settling time*), waktu menuju kecepatan setting (*rise time*) dan *error steady state*.

3. Hasil Dan Pembahasan

3.1 Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah Motor induksi 3 pha :

Pout : 10HP
Tegangan : 380 Volt
Arus : 16,2 Ampere
Frekuensi : 50 Hz
Kecepatan : 1450 rpm
Kutub : 4 kutup

3.2 Simulasi, Hasil dan Analisis

Untuk kebutuhan simulasi dibutuhkan data parameter motor induksi yang lebih lengkap. Parameter ini dapat diperoleh dengan melakukan percobaan langsung pada motor induksi, yaitu percobaan motor tanpa beban dan percobaan motor rotor tertahan. Selain itu dilakukan juga pengukuran langsung pada stator dan rotor untuk mendapatkan tahanan stator dan rotor tersebut. Tahanan stator dan rotor yang didapatkan dari hasil pengukuran adalah 0,74 ohm dan 0,59 ohm.

Pada percobaan tanpa beban, diberikan tegangan nominal pada motor induksi dan rotor tidak diberikan beban mekanis. Hasil pengukuran percobaan tanpa beban didapatkan data:

$$\begin{aligned} I_{NL} &= 1,52 \text{ A} & V_{NL(L-L)} &= 369 \text{ V} \\ P_{NL} &= 470 \text{ W} & \cos \phi &= 0,83 \end{aligned}$$

Parameter dari hasil pengukuran adalah :

$$\begin{aligned} R_{NL} &= \frac{P_{NL}}{3i_{NL}^2} = \frac{470}{3 \times 1,52^2} = 67,81 \Omega \\ Z_{NL} &= \frac{V_{NL(L-L)}}{i_{NL}} = \frac{V_{NL(L-L)}}{\sqrt{3}i_{NL}} = \frac{369}{\sqrt{3} \times 1,52} \\ &= 140,159 \Omega \\ X_{NL} &= \sqrt{Z_{NL}^2 - R_{NL}^2} = \sqrt{140,159^2 - 67,81^2} \\ &= 122,66 \Omega \end{aligned}$$

Pada percobaan rotor tertahan tegangan yang diberikan kecil. Hasil pengukuran percobaan ini didapatkan data :

$$I_{LR} = 4 \text{ A} \quad V_{LR(L-L)} = 49 \text{ V} \quad P_{LR} = 327 \text{ W}$$

Dari hasil pengukuran didapatkan parameter :

$$\begin{aligned} R_{LR} &= \frac{P_{LR}}{3i_{LR}^2} = \frac{327}{3 \times 4^2} = 6,8125 \Omega \\ Z_{LR} &= \frac{V_{LR(L-L)}}{\sqrt{3}i_{LR}} = \frac{49}{\sqrt{3} \times 4} = 7,07 \Omega \\ X_{LR} &= \sqrt{Z_{LR}^2 - R_{LR}^2} = \sqrt{7,07^2 - 6,8125^2} = 1,89 \Omega \end{aligned}$$

Pada model motor induksi rotor sangkar

$$X_{LR} = X_1 + X_2$$

$$X_1 = X_2 = 0,5 \times X_{LR} = 0,945 \text{ ohm}$$

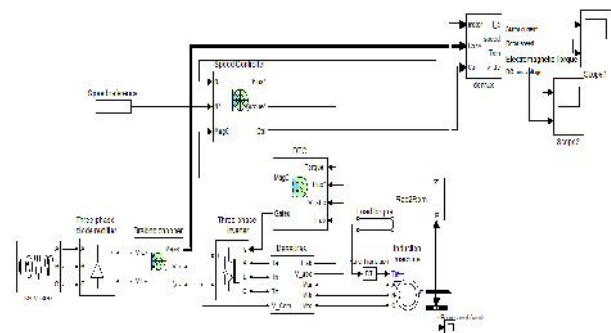
Induktansi stator dan rotor adalah :

$$\begin{aligned} L_s &= \frac{X_1}{2\pi f} = \frac{0,945}{2 \times 3,14 \times 50} = 0,003 \text{ H} \\ L_r &= \frac{X_2}{2\pi f} = \frac{0,945}{2 \times 3,14 \times 50} = 0,003 \text{ H} \end{aligned}$$

Dari kedua percobaan ini didapatkan Induktansi bersama :

$$\begin{aligned} X_{nl} &= X_m + X_1 \\ X_m &= X_{nl} - X_1 \\ &= 122,66 - 0,945 = 121,715 \Omega \\ L_m &= \frac{X_m}{2\pi f} = \frac{121,715}{2 \times 3,14 \times 50} = 0,3876 \text{ H} \end{aligned}$$

Blok simulasi dengan menggunakan metode *direct torque control* dalam pengaturan kecepatan dari Motor Induksi dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7. Studi pengaturan kecepatan motor induksi dengan menggunakan metode *direct torque control*.

Dari data motor induksi didapatkan kecepatan sinkron dan slip motor induksi :

$$n_s = \frac{120f}{p} = 1500 \text{ rpm}$$

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 1450}{1500} = 0.03$$

Arus rotor :

$$I_r = \frac{380/\sqrt{3}}{(0.74 + \frac{0.59}{0.03}) + j1.88} = \frac{219.39}{20.4 + j1.88}$$

$$= \frac{219.39}{20.48 \angle 5.26^\circ} = 10.71 \angle -5.26^\circ \text{ A}$$

$$P_g = 3(10.71)^2 \frac{(0.59)}{0.03} = 6770.58 \text{ W}$$

$$P_m = (1 - s)P_g = (1 - 0.03)6770.58$$

$$= 6567.46 \text{ W}$$

$$\omega_s = \frac{n_s}{60} 2\pi = 157 \text{ rad / sec}$$

$$T = 6567.46 / 157 = 41.83 \text{ Nm}$$

Arus rotor saat start adalah :

$$I_r = \frac{380/\sqrt{3}}{(0.74 + 0.59) + j1.88} = \frac{219.4}{2.3 \angle 54.7^\circ}$$

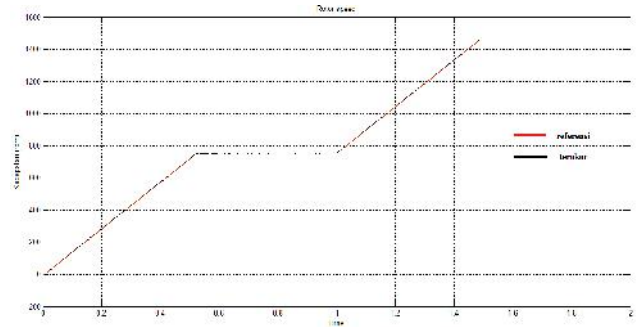
$$= 95.39 \angle -54.7^\circ \text{ A}$$

Torka motor saat start adalah :

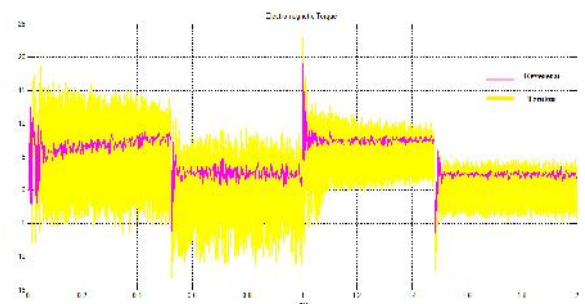
$$P_{gs} = 3(95.39)^2 0.59 = 16105.67 \text{ W}$$

$$T = 16105.67 / 157 = 102.59 \text{ Nm}$$

Simulasi pengaturan kecepatan motor dilakukan dengan menggunakan software Matlab. Kecepatan referensi masukan yang diberikan adalah 750 rpm yang kemudian dinaikkan menjadi 1450 rpm pada saat $t = 1,5$ detik. Simulasi awal dilakukan pada torka beban nol Nm. Simulasi dilanjutkan dengan torka beban 40 Nm. Hasil dari simulasi dengan torka beban nol Nm diperlihatkan pada gambar 8 dan gambar 9.



Gambar 8. Torka elektromagnetik saat torka beban 40



Gambar 9. Torka elektromagnetik saat torka beban nol Nm

Performansi sistem pada saat beban nol Nm adalah:

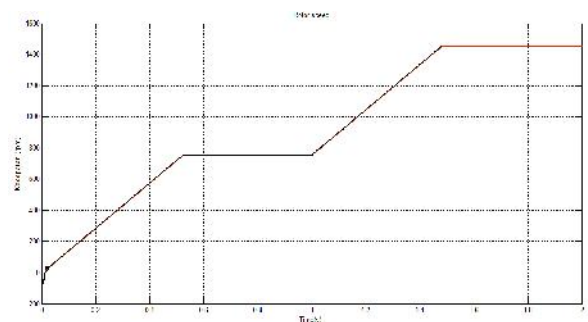
Settling Time = 0.52 detik

Rise time = 0.5 detik

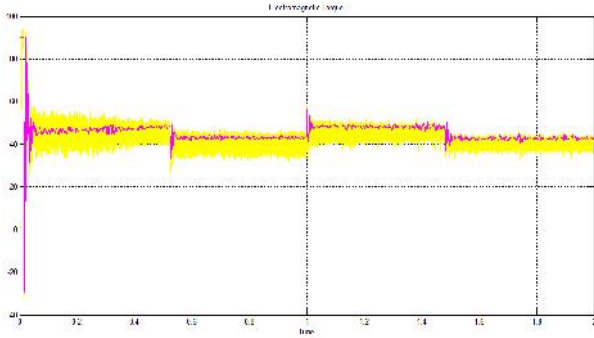
Maksimum overshoot = 0.26 %

Error steady state = 0.1 %

Hasil dari simulasi dengan torka beban 40 Nm diperlihatkan pada gambar 10 dan gambar 11.



Gambar 10. Kecepatan rotor saat torka beban 40 Nm



Gambar 11. Torka elektromagnetik saat torka beban

Performansi sistem pada saat beban 40 Nm adalah:

<i>Settling Time</i>	= 0.532 detik
<i>Rise time</i>	= 0.52 detik
Maksimum <i>overshoot</i>	= 0.335 %
<i>Error steady state</i>	= 0.174 %

Respon kinerja dari pengaturan kecepatan motor induksi *direct torque control* dapat dilihat pada tabel 2 berikut.

Tabel 2. Respon kinerja pengaturan kecepatan motor induksi

Respon	Beban nol	Beban 40 Nm
<i>Settling Time</i> (detik)	0,52	0,532
<i>Rise time</i> (detik)	0,5	0,52
Maksimum <i>over-shoot</i> (%)	0,26	0,335
<i>Error steady state</i> (%)	0,1	0,174

4. Kesimpulan

Dari hasil pengaturan kecepatan dan simulasi yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dilakukan melalui pengaturan torka langsung dengan kendali PWM inverter. Berdasarkan hasil simulasi menggunakan *direct torque control*, *settling time* (waktu menuju *steady state*) dan *rise time* antara 0.52 sampai 0.532 detik dan antara 0.5 sampai 0.52 detik.

Overshoot pada respon DTC juga kecil yaitu antara 0.26 % sampai 0.335 %.

2. Dari analisis yang dilakukan dapat dinyatakan bahwa pengaturan kecepatan motor induksi dengan menggunakan *direct torque control* yang dibuat mempunyai kemampuan untuk mengatur kecepatan motor induksi tiga fasa dengan baik.

Saran

1. Dalam penelitian ini *ripple* dari torka masih belum kecil dan ini bisa diperbaiki dengan penelitian lanjut untuk mendapatkan kinerja pengaturan kecepatan menjadi lebih baik dalam mengatur kecepatan motor induksi tiga fasa.
2. Penelitian ini bisa dilanjutkan dengan menambahkan kontrol lain agar lebih memperkecil *settling time* (waktu menuju *steady state*) dan *rise time* pengaturan kecepatan motor induksi.

Daftar Acuan

Anders Kronberg, *Design and Simulation of Field Oriented Control and Direct Torque Control for a Permanent Magnet Synchronous Motor with Positive Saliency*, Uppsala University Examensarbete 15 hp, Available at: < URL: <http://www.teknat.uu.se/student> , [Akses May 2012].

Brag S. Guru, 1988, *Electric Machinery and transformers*, HBJ Harcourt Brace Jovanovich Publishers Technology publications.

D. Casadei, G. Serra, A. Tani, and L. Zarri, 2006, *Assessment of direct torque control for induction motor drives*, bulletin of the polish academy of sciences technical sciences vol. 54, no. 3.

Marian P, 2005, *Space Vector Modulated-Direct Torque Controlled (DTC – SVM) Inverter-Fed Induction Motor Drive*, Ph.D. Thesis Faculty of Electrical Engineering Institute of Control and Industrial Electronics Warsaw University of Technology.

Mochamad Ashari, 2006, Inverter 3 fasa dan Rectifier 3 fasa, Materi kuliah Elektronika Daya Lanjut, ITS-Unilak.

M.V.Deshpande, 1990, *Electric Motor Applications and Control*, Wheeler.

Paul C.Krause, Oleg Wasynczuk, Scott d.Sudhoff ,
2002, *Analysis Of Electric Machinery And Drive Systems*, A John Wiley & Sons, Inc.
Publication.

Soebagio, 2006, Model mesin AC pada koordinat QDN, Materi kuliah Mesin Listrik lanjut, ITS-Unilak.

Theodore Wildi, 1991, *Electrical Machines, Drives, and Power System*, Prentice-Hall International Editions.