

PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI SEBAGAI PENGGERAK MOBIL LISTRIK *DENGAN* KONTROLER *FUZZY LOGIC* BERBASIS *DIRECT TORQUE CONTROL*

Endro Wahjono

Jurusan Elektro Industri, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
Kampus ITS Keputih Sukolilo Surabaya 60111
E-mail :endro@pens.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini mengobservasi suatu metode pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa sebagai penggerak mobil listrik menggunakan *Direct torque Control (DTC)*. Respon kecepatan dari sistem diperbaiki dengan *Fuzzy Logic Control (FLC)*. Hasil dari observasi dibandingkan dengan sistem yang dikontrol oleh kontroler PI. Hasil simulasi dengan simulink menunjukkan bahwa dengan kontroler *Fuzzy Logic* berbasis *Direct Torque Control* memberikan respon yang lebih baik dari kontroler PI. Hal ini ditunjukkan pada saat terjadi *overshoot* 2,67%, *rise time* 0.025 detik dan *settling time* 0.2 detik, sedangkan pada kontroler PI saat terjadi *overshoot* 27,5%, *rise time* 0.035 detik dan *settling time* 0.425 detik, untuk kecepatan referensi motor 149,02 rad/detik dan torka beban 12,64 Nm. Dari hasil simulasi terbukti menggunakan kontroler *Fuzzy Logic* berbasis *Direct Torque Control* respon kecepatan motor induksi tiga fasa menjadi lebih baik.

Kata kunci : *DTC*, motor induksi, *fuzzy logic controller*.

ABSTRACT

This research is to investigate a three phase induction motor speed control method as a electric vehicle drive using Direct Torque Control (DTC). Speed response of the system is improved by Fuzzy Logic Control (FLC). The result of this method is compared to PI controller system. Simulink simulation shows that the system using Fuzzy Logic Control base on Direct Torque Control runs better than PI controller. This advantage is shown by simulation result, an overshoot 2,67%, rise time 0.025 second, settling time 0.2 second, inspite of PI overshoot 27,5%, rise time 0,035 second and settling time 0,425 second using motor reference speed at 149,02 rad/sec and load torque at 12,64 Nm. By Simulink simulation proved that speed response of three phase induction motor using Fuzzy Logic Control base on Direct Torque Control is better than PI controller.

KeyWords : *DTC*, induction motor, *fuzzy logic controller*.

1. Pendahuluan

Motor induksi merupakan motor yang banyak digunakan pada industri, bisnis transportasi dan lain-lain. Konstruksinya yang kokoh (*robust*) merupakan keunggulan dari motor induksi disamping harga yang murah dan bebas perawatan, sehingga peranan motor DC sekarang banyak digantikan oleh motor induksi. Pada umumnya motor induksi digunakan pada kecepatan putaran tetap. Berdasarkan survei, konsumsi daya pada motor dengan kecepatan konstan lebih besar dibanding dengan motor kecepatan variabel untuk berbagai beban.

Kecepatan variabel dapat dilakukan dengan mengatur torka [1]. Untuk mendapatkan kecepatan variabel tersebut dibutuhkan konverter daya. Apabila motor induksi mendapat tegangan melalui konverter daya, maka bentuk gelombang tegangan tidak lagi sinusoida. Dalam kondisi ini, pemodelan motor tidak lagi menggunakan model trafo tetapi menggunakan pemodelan dalam koordinat d-q-n untuk melakukan analisa.

Model ini lebih fleksibel dibandingkan dengan model motor induksi menggunakan model trafo. Bentuk tegangan sumber tidak harus sinusoida dan parameter mesin bisa diubah [2]. Selain digunakan untuk analisa kondisi *steady state* pemodelan motor induksi dalam koordinat d-q-n juga bisa untuk kondisi *transient*. Kelemahan motor induksi adalah bahwa motor induksi adalah motor yang tidak linier, dan metoda untuk mengatur kecepatan adalah rumit, disamping itu diperlukan suatu konverter yang akan menimbulkan harmonisa. Dengan perkembangan kemajuan teknologi bidang mikrokontroler, mikrokomputer, *devices*, teori kontrol, dan *artificial intelligence* (AI) memberikan pengaruh dalam operasi dan kinerja dari pengemudian elektrik sehingga motor induksi dapat menggantikan fungsi motor DC di industri.

Apabila motor induksi 3 fasa digunakan sebagai penggerak mobil listrik (*electric vehicle*) akan mengalami kondisi-kondisi seperti kondisi pergerakan mobil listrik itu sendiri yang terdiri dari kondisi *starting*, *accelerating*, *running*, *breaking* dan *decelerating*[7][10]. Oleh karena itu kecepatan

motor induksi 3 fasa harus dapat dikontrol agar kondisi pergerakan mobil tersebut dapat tercapai. Tetapi sebuah motor induksi 3 fasa adalah non-linier, sehingga untuk dapat mengontrolnya perlu dilakukan linierisasi melalui *vector control* atau *field oriented control*[17].

Pengontrolan kecepatan motor induksi 3 fasa dapat dilakukan melalui torka atau frekuensi motor. Pengontrolan torka motor dapat dilakukan melalui tegangan dan frekuensi. Untuk keperluan pengaturan tegangan dan frekuensi digunakan catu daya yang berupa konverter. Untuk itu motor harus dimodelkan dalam koordinat d-q-n. Respon pergerakan mobil listrik dengan penggerak motor induksi perlu diperbaiki agar pengendara atau penumpang menjadi nyaman oleh karena itu motor harus dikontrol agar respon menjadi baik. Kontroler yang umum digunakan adalah PI, Fuzzy. Untuk memperbaiki sistem digunakan suatu kontroler, kontroler yang biasa digunakan adalah kontroler *Proporsional Integral Derivative* (PID), namun penggunaan pengontrolan PID sangat tergantung pada pemilihan parameter konstanta mesin yaitu konstanta *proporsional* (k_p), konstanta *integral* (k_i) dan konstanta *derivative* (k_d) yang sesuai. Untuk beban yang berubah-ubah, parameter pengontrol harus selalu di-*setting* ulang dan proses ini akan jadi rumit. Untuk memperbaiki respon kecepatan motor induksi digunakan kontroler *Fuzzy Logic berbasis Direct Torque Control* yang bertujuan untuk mengurangi *overshoot*. [2]

Dengan menggunakan *Metoda Direct Torque Control* memungkinkan untuk mengontrol secara langsung *fluks stator* dan torka [4]. Perubahan *fluks stator* dan torka dikendalikan dengan *FLC* yang berfungsi untuk estimasi dan kendali kecepatan motor induksi. Bila kecepatan motor induksi yang dioperasikan dengan metoda DTC maka tidak perlu menggunakan sensor kecepatan untuk mengamati nilai kecepatan[9]. Kecepatan dari motor dibandingkan dengan kecepatan referensi, kemudian diumpankan ke kontroler untuk bisa mengendalikan kecepatan motor sehingga sesuai dengan harga referensi. Penggunaan sensor kecepatan banyak mengandung kelemahan, antara lain hasil pengukuran kecepatan kurang akurat karena

seringkali letak dari sensor terlalu jauh dari sistem kontrol dan hasil pembacaan sensor banyak terdistorsi sehingga hasil pembacaan belum mencerminkan nilai putaran. Untuk menanggulangi masalah tersebut diperlukan suatu *observer* untuk membaca parameter arus, tagangan motor, tegangan dc, sudut penyulutan guna mengestimasi putaran. Cara ini yang sering disebut dengan *speed sensorless control* atau pengaturan putaran motor tanpa sensor kecepatan. *Observer* berfungsi untuk mengamati besar torka, fluks dan sudut motor sebagai nilai estimasi masing-masing besaran [10].

Sasaran penelitian ini adalah mengembangkan metode pengaturan kecepatan motor induksi 3 HP/2,4 kW, 380 volt dan 50 hertz tanpa sensor kecepatan yang dikemukakan melalui *Space Vector Pulse-Width Modulation (SVPWM) inverter*, dengan kontroler *fuzzy logic* berbasis *Direct Torque Control (DTC)* digunakan untuk menggerakkan mobil listrik (*electrical vehicle*).

2. Model Motor Induksi Tiga Fasa

Secara konvensional untuk menganalisa model motor induksi tiga fasa dikembangkan berdasarkan model trafo, dengan mengasumsikan tegangan sumber adalah sinusoidal dan kondisi *steady state*. Dalam operasi riil ditemui permasalahan tegangan sumber yang tidak sinusoidal dan ada perubahan beban. Karena itu dibutuhkan model lain yang lebih fleksibel untuk menganalisis motor induksi. Model motor induksi dalam koordinat d-q-n digunakan untuk menganalisis motor dan lebih fleksibel[11]. Persamaan tegangan motor induksi dengan tegangan simetri dalam koordinat d-q-n dinyatakan oleh.

$$\begin{aligned} v_{qs} &= r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + p \lambda_{qs} \\ v_{ds} &= r_s i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + p \lambda_{ds} \\ v'_{qr} &= r'_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} + p \lambda'_{qr} \\ v'_{dr} &= r'_r i'_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda'_{qr} + p \lambda'_{dr} \end{aligned} \quad (1)$$

Fluksi yang tercakup dalam kumparan adalah:

$$\begin{aligned} \lambda_{ds} &= L_{ls} i_{ds} + L_M (i_{ds} + i'_{dr}) \\ \lambda_{qr} &= L'_{lr} i'_{qr} + L_M (i_{qs} + i'_{dr}) \end{aligned} \quad (2)$$

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

Persamaan-persamaan diatas dapat dinyatakan dalam bentuk matriks berikut :

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V'_{qr} \\ V'_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_s & \omega L_s & pL_M & \omega L_M \\ -\omega L_s & r_s + pL_s & -\omega L_M & pL_M \\ pL_M & (\omega - \omega_r)L_M & r'_r + pL'_r & (\omega - \omega_r)L'_r \\ -(\omega - \omega_r)L_M & pL_M & -(\omega - \omega_r)L'_r & R'_r + pL'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Dengan

$$\begin{aligned} L_s &= L_{ls} + L_m \\ L'_r &= L'_{lr} + L_m \end{aligned}$$

Torka elektromagnetik motor induksi dapat ditentukan dengan :

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (4)$$

Persamaan dinamis dari mesin induksi dinyatakan oleh

$$T_e - T_L = \frac{2J}{P} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (5)$$

Dengan :

T_L adalah torka beban

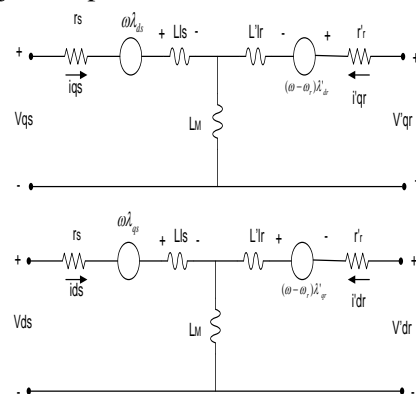
T_e adalah torka elektromagnetik

J adalah momen inersia (kg.m^2)

P adalah jumlah kutub

ω_r adalah kecepatan angular rotor (rad/dt)

Diagram dari model motor induksi dapat ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian Ekuivalen dq Dari MotorInduksiTiga Fasa

3. TeknikSpace Vector Pulse-Width Modulation (SVPWM)

Space vector modulation (SVM) adalah teknik modulasi yang dikembangkan melalui *space vector* (vektor ruang) yang akan menjadi tegangan acuan dengan periode sampling

tertentu ke *inverter*. Dengan menggunakan dua tegangan acuan yaitu v_d, v_q dan sudut. Teknik SVPWM dapat digunakan untuk membangkitkan pola pensaklaran inverter 3 fasa jenis sumber tegangan(VSI). Bila tegangan acuan 3 fasa diberikan dalam bentuk v_a, v_b dan v_c maka diperlukan transformasi dari 3-fasa ke 2-fasa. *Space vector* dengan persamaan 3-fasa dapat dinyatakan dengan $x_a(t), x_b(t)$ dan $x_c(t)$ yang masing-masing mempunyai pergeseran fasa sebesar 120° [12].

Pernyataan dalam vektor terdapat pada persamaan (6), (7) dan (8).

$$\bar{x} = \frac{2}{3} [x_a(t) + ax_b(t) + a^2x_c(t)] \quad (6)$$

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + j\sin\left(\frac{2\pi}{3}\right)$$

$$= 0,5 + j0,8667 \quad (7)$$

$$a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) + j\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right)$$

$$= -0,5 - j0,8667 \quad (8)$$

Fungsi x dapat berupa fungsi tegangan, arus atau *fluks* dan tidak harus dalam bentuk fungsi sinusoida. Bila x sebagai fungsi tegangan, maka persamaan tegangan dapat diberikan dengan persamaan (9).

$$\left. \begin{aligned} v_a(t) &= V_m \sin(\omega t) = x_a(t) \\ v_b(t) &= V_m \sin(\omega t - 120^\circ) = x_b(t) \\ v_c(t) &= V_m \sin(\omega t + 120^\circ) = x_c(t) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Tabel 1. Kombinasi Posisi Saklar Sa, Sb Dan Sc Pada Inverter

VektorTegangan	Sa	Sb	Sc
v_0	0	0	0
v_1	1	0	0
v_2	1	1	0
v_3	0	1	0
v_4	0	1	1
v_5	0	0	1
v_6	1	0	1
v_7	1	1	1

Sehingga dalam bentuk persamaan *space vector* untuk persamaan (10) jumlah tegangan menjadi:

$$\bar{v} = \frac{2}{3} [v_a(t) + av_b(t) + a^2v_c(t)] \quad (10)$$

Karena kombinasi $v_0(000)$ dan $v_7(111)$ pada Tabel 1 mempunyai tegangan *output* samadengan nol, maka tinggal 6 (enam) vektor tegangan yang akan membentuk persegi enam dan mempunyai panjang rusuk masing-masing sebesar $\frac{2}{3}V_{dc}$ sesuai dengan persamaan (8). Jika dilihat dari salah satu segitiga yang terbentuk, akan terlihat menjadi segitiga sama kaki dengan garis tinggi sebesar $\frac{1}{\sqrt{3}}V_{dc}$. Untuk merealisasikan SVPWM melalui beberapa langkah berikut:

- Menentukan tegangan V_d, V_q, V_{ref} dan sudut α
- Menentukan lama waktu penyalan saklar dengan T_1, T_2 dan T_0
- Menentukan lama pensaklaran masing-masing transistor (S_1-S_6)

Langkah pertama adalah menentukan transformasi dari 3 fasa ke 2 fasa dengan transformasi sebagai berikut:

$$V_d = V_{an} - V_{bn} \cos 60^\circ - V_{cn} \cos 60^\circ \quad (11)$$

$$V_d = V_{an} - \frac{1}{2}V_{bn} - \frac{1}{2}V_{cn}$$

$$V_q = V_{an} - V_{bn} \cos 30^\circ - V_{cn} \cos 30^\circ$$

$$V_d = 0 - \frac{\sqrt{3}}{2}V_{bn} - \frac{\sqrt{3}}{2}V_{cn}$$

Persamaan (10) dapat dibentuk dalam persamaan matrik seperti persamaan (12), (13) :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

$$V_{ref} = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (12)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{V_q}{V_d}\right) = \omega_s t = 2\pi f_s t \quad (13)$$

Dengan f_s adalah frekuensi dasar, untuk menentukan lama waktu pensaklaran T_1, T_2 dan T_0 adalah melalui persamaan (14) dan (15). $\int_0^{T_z} \bar{V}_{ref} dt = \int_0^{T_1} \bar{V}_1 dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} \bar{V}_2 dt + \int_{T_1+T_2}^{T_z} \bar{V}_0 dt \quad (14)$

Dengan $\bar{v}_0 = 0$, sehingga

$$T_z \cdot \bar{V}_{ref} = T_1 \bar{V}_1 + T_2 \bar{V}_2$$

$$T_z \cdot \bar{V}_{ref} \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix} = T_1 \frac{2}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + T_2 \frac{2}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} \cos(\frac{\pi}{3}) \\ \sin(\frac{\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (15)$$

Dengan nilai $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$, maka nilai T_1 , T_2 dan T_0 adalah sebagai berikut:

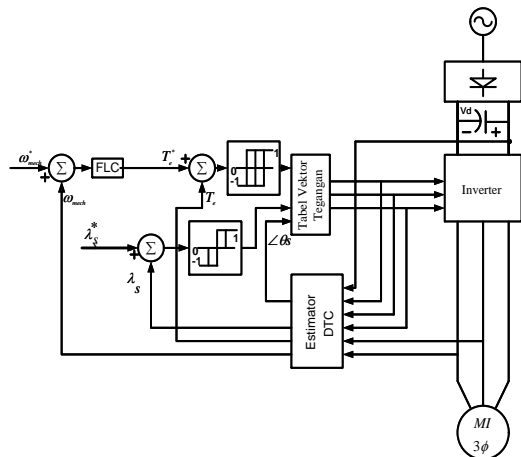
$$T_1 = T_z \cdot a \cdot \frac{\sin(\frac{\pi}{3} - \alpha)}{\sin \frac{\pi}{3}} \quad (16) \quad T_2 = T_z \cdot a \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin \frac{\pi}{3}} \quad (17)$$

4. Fuzzy Logic Controller (FLC)

FLC digunakan untuk estimasi dan kontrol kecepatan motor, sehingga didapatkan respon dinamis yang akurat. FLC digunakan untuk estimasi kecepatan motor dengan masukan perubahan putaran dan putaran estimasi. Hasil dari FLC adalah Torca referensi untuk mendapatkan respon kecepatan yang bervariasi.

Fuzzy logic controller sebagai *error kompensator* merupakan kontroler yang tersusun atas aturan-aturan kontroler yang ditentukan berdasarkan pengetahuan, pengamatan, dan pengenalan respon dari objek yang akan dikendalikan.

5. Model Sistem Pengaturan Kecepatan Motor Induksi



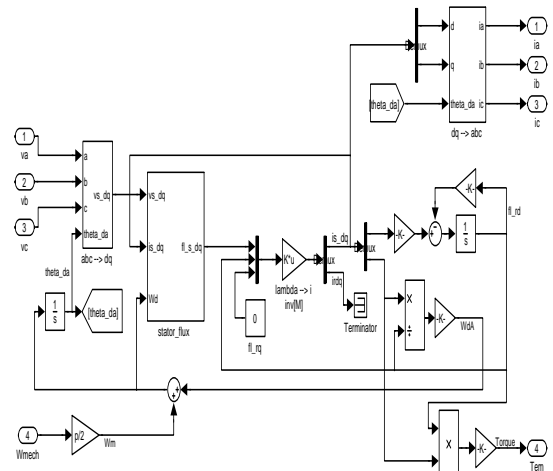
Gambar 2. Blok Diagram Pemodelan Sistem

Dari Gambar 2 secara keseluruhan dapat dibagi dalam beberapa blok:

1. Model motor induksi tiga fasa
2. Model rangkaian inverter 3 fasa
3. Model estimator *Direct Torque Control (DTC)*

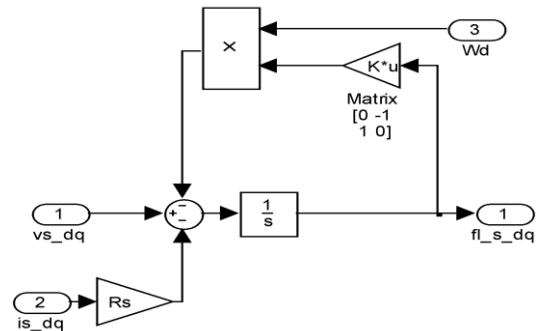
4. Model Fuzzy Logic Controller (FLC)

A. Model Motor Induksi tiga fasa

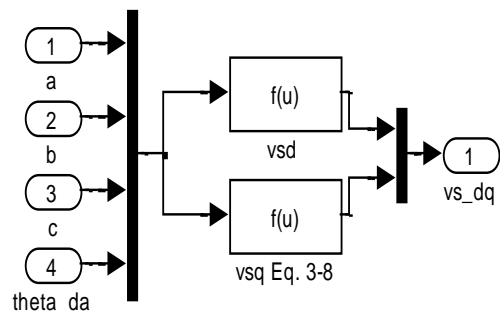


Gambar 3. Model Motor Induksi Tiga Fasa

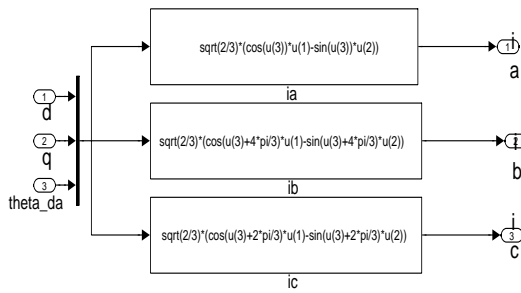
Dari Gambar 3 terlihat bahwa blok *fluk stator* (model *fluks stator*) dan model transformasi abc ke sumbu d-q atau sebaliknya dapat diperlihatkan pada Gambar 4,5, dan 6.



Gambar 4. Model Fluks Stator Motor



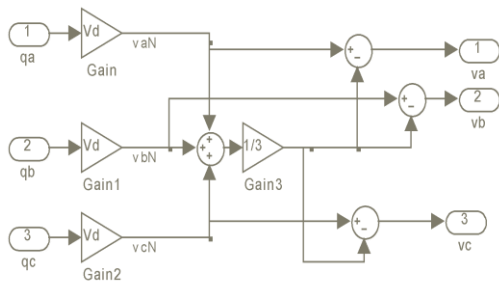
Gambar 5. Transformasi Besaran Sumbu abc ke dq



Gambar 6. Transformasi Besaran Sumbudq ke abc

B. Model Rangkaian Inverter

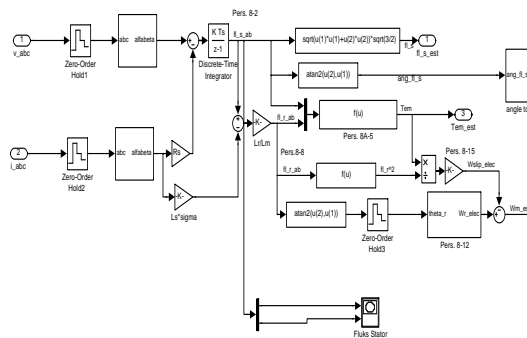
Model simulasi rangkaian inverter ditunjukkan pada Gambar 7 dengan input sinyal dari qa, qb dan qc untuk mengaktifkan kombinasi saklar inverter sehingga menghasilkan sinyal va, vb dan vc.



Gambar 7. Model Simulasi Rangkaian Inverter

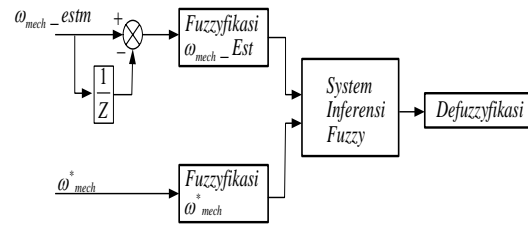
C. ModelEstimator DTC

Sinyal tegangan v_abc dan arus i_abc dari stator dengan besaran 3 fasa ditransformasikan menjadi besaran 2 fasa pada sumbu-d dan sumbu-q, kemudian digunakan untuk menghitung fluk stator (fl_s_est), sector, torka (Tem_est), dan putaran (Wmech_est) estimasi seperti ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Estimator Fluk, Torka , Putaran Dan Sudut

D. Model Fuzzy Logic Controller (FLC)



Gambar 9. Model Fuzzy Logic Controller

Proses pertama didalam FLC adalah fuzzyfikasi setiap inputFLC dari proses ini didapatkan nilai fungsi keanggotaan dari tiap himpunan fuzzy yang ada untuk tiap input, setelah semua input telah melalui proses fuzzyfikasi maka untuk mengambil suatu keputusan dari hasil fuzzyfikasi akan dimasukkan kedalam sistem pengambil keputusan yang lebih dikenal dengan aturan-aturan dasar (rule base). Setelah keputusan telah diambil adalah proses selanjutnya adalah melakukan proses defuzzyfikasi. Proses defuzzifikasi adalah proses pemetaan dari hasil aksi kontrol inferensi fuzzy. Tujuan dari defuzzifikasi adalah untuk menghasilkan aksi kontrol non fuzzy (crisp) yang mewakili distribusi kemungkinan dari hasil kontrol inferensi fuzzy.

6. Hasil Simulasi Dan Analisa

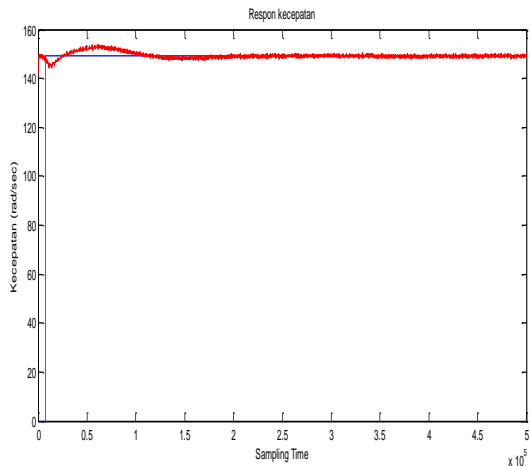
Melakukan peniruan dari keadaan riil suatu sistem disebut dengan melakukan simulasi. Kemiripan hasil simulasi dengan sistem yang sebenarnya sangat tergantung dari model matematik yang digunakan. Simulasi program dilakukan dengan menggunakan fasilitas simulink pada Matlab.

Pada simulasi pengaturan putaran motor motor induksi tiga fasa ini akan dilakukan dengan uji pada kondisi start, putaran referensi turun 50% dan beban turun 50%. Hal ini difungsikan untuk melihat performa dari motor induksi apabila terjadi setting putaran turun dan beban turun dan kenaikan beban.

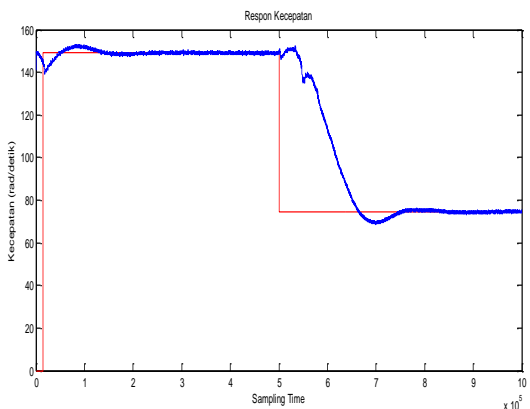
Disamping menggunakan kontrol fuzzy logic berbasis DTC akan dilakukan puladengan kontrol PI untuk melihatperforma putaran motor induksi tiga fasa. Data teknis dari motor induksi tiga fasa untuk simulasi dalam penelitian ini dapat ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Teknik Motor Induksi Tiga Fasa

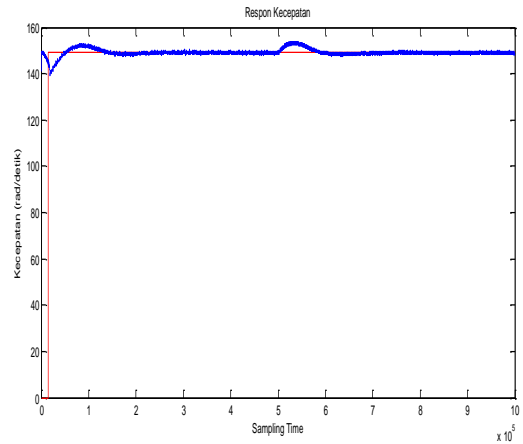
Daya (P)	3 HP/2.4 kW
Tegangan (V)	380 V(L-L,rms)
Frekuensi (f)	50 Hz
Fasa (F)	3
Jumlah kutub (p)	4
Arus beban penuh (I)	4 A
Tahanan stator (Rs)	1,77 Ω
Tahanan rotor (Rr)	1,34 Ω
Reaktansi stator (Xs)	5,25 Ω
Reaktansi rotor (Xr)	4,75 Ω
Reaktansi gandeng (Xm)	1,39 Ω
Slip beban penuh (s)	1,72 %
Momen enersia motor (J)	0,025kg.m ²



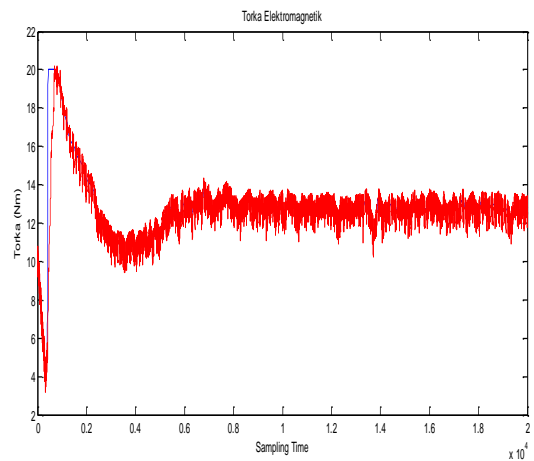
Gambar 10. Putaran Motor Induksi Pada Saat Start



Gambar 11. Putaran Pada Saat Referensi Turun 50%

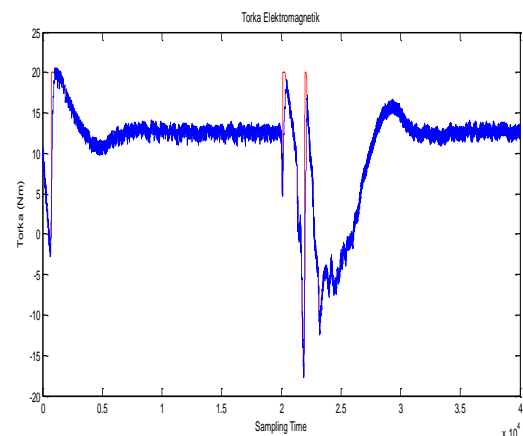


Gambar 12. Putaran Saat Beban Turun 50%

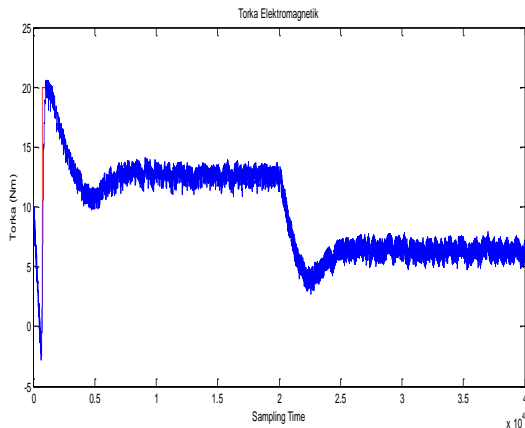


Gambar 13. Torka Elektromagnetik Motor Pada Saat Start

Torka elektromagnetik motor dapat ditunjukkan pada gambar 13 pada kondisi start, akan stabil setelah 0,8 detik. Torka elektromagnetik motor pada saat $t=0,5$ detik terjadi putaran referensi turun 50%, akan stabil setelah 0.12 detik. Seperti ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 14. Torka Elektromagnetik Motor



Gambar 15. Torka elektromagnetik motor saat beban turun 50% putaran referensi turun 50%

Torka elektromagnetik dapat dilihat pada gambar 15 pada kondisi beban turun 50% akan stabil setelah 0,05 detik.

Untuk melihat performansi putaran motor induksi tiga fasa, hasil pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa menggunakan *Direct Torque Control* dengan kontroler *Fuzzy Logic* dan PI dapat ditabelkan menjadi satu untuk ketiga percobaan seperti pada Tabel 3.

Tabel. 3 Perbandingan Kontroler *Fuzzy Logic* Dengan Kontroler PI

Performansi	PI			FLC		
	1	2	3	1	2	3
Over shoot (%)	27.5	161.7	30.85	2,67	94,6	3,37
Rise time (sec)	0,035	0,025	0,037	0,025	0,018	0,02
Settling Time (sec)	0,425	0,45	0,435	0,2	0,325	0,15
Peak Time (sec)	0,022	0,026	0,025	0,052	0,025	0,05
Peak (rad/sec)	195	195	195	155	155	160

Pada kolom PI dan FLC angka 1 menunjukkan hasil simulasi motor pada saat *start* diberi beban sebesar 12,64 Nm dengan kecepatan referensi 149,02 rad/detik, angka 2 menunjukkan hasil simulasi motor pada saat *start* diberi beban sebesar 12,64 Nm dengan

kecepatan referensi diturunkan 50 % sebesar 74,51 rad/detik dan angka 3 menunjukkan hasil simulasi motor pada diberi beban diturunkan 50 % sebesar 6,32 Nm dengan kecepatan referensi sebesar 149,02 rad/detik.

7. Kesimpulan

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Pada saat *start* motor dengan beban 12,64 N-m dan putaran nominal 149.02 rad/detik terjadi *overshoot* 2,67 %, *rise time* 0,025 detik dan *settling time* 0,2 detik.
2. Pada saat motor terjadi perubahan referensi putaran menjadi 74.51 rad/detik dengan beban 12,64 N-m terjadi *overshoot* 94,6 %, *rise time* 0.018 detik dan *settling time* 0.325 detik.
3. Pada saat motor terjadi penurunan beban dari 12,64 N-m menjadi 6,32 N-m maka terjadi *overshoot* 7,37 %, *rise time* 0.02 detik dan *settling time* 0,15 detik.

Dengan membandingkan kontroler PI dengan FLC, maka hasil untuk parameter *overshoot*, *rise time*, *settling time* dan *peak time* kontroler dengan *Fuzzy Logic* lebih baik dibanding dengan kontroler PI.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Soebagio, [2006], "Model mesin AC pada koordinat d-q-n", Materi Mesin Listrik Lanjut, ITS.
- [2] D. Casadei, Giovanni Serra,[2002], "FOC and DTC: two variable scheme for induction motors torque control", Trans. On Power Electronics, Vol. 17, No. 5.
- [3] I. Takahashi, T. Noguchi, [1996], "A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor", IEEE, Tran. Ind. Appl, IA-22(5): 820-827.
- [4] D. Casadei, G. Serra, A. Tani, and L.Zarri, [2006], "Assessment of direct torque control for induction motor drives", Buletin of the Polish academy of science tech. sciences, vol. 54, No.3.

- [5] H. Tajima and Y. Hori, [1993], "*Speed sensorless field oriented control of induction motor*", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 29, pp. 175–180.
- [6] A. Damiano, P. Vas et al., [1997], "*Comparison of speed sensorless DTC induction motor drives*", in Proc. PCIM, Nuremberg, Germany, pp. 1-11.
- [7] Jawad Faiz, Mohammad Bagher Bannae Sharifian, Ali Keyhani, Amulin Bogda Proca, [2003], "Sensorless Direct Torque Control of Induction Motors Used in Electric Vehicle," IEEE Transaction on Energy Conversion, vol.18.
- [8] Nuno M. Silva, Antonio P. Martin, Adriano S. Carvalho, [2002], "Torque And Speed Modes Simulation of A DTC-Controlled Induction Motor", Proceeding of the 10th Mediterranean Conference on Control and Automation-MED 2002 Lisbon, Portugal.
- [9] P. Tiitinen, P. Pohjalainen, J. Lalu, [1995], "The next generation motor control method : Direct torque control (DTC)," EPEJ, vol.5, pp.14-18.
- [10] Ned Mohan, [2003], "*Electric drives an integrated approach*", MNPERE, Minneapolis.
- [11] Ned mohan, [2001], "*Advance electric drives analysis, control and modeling using simulink*", MNPERE, Minneapolis.
- [12] Bimal K. Bose, [2002], "Modern Power Electronics and AC drives", Prentice Hall PTR.
- [13] Petar R. Matic, Branko D. Blanus, Slobodan N Vukosavic, [2003], "*A novel direct torque control and flux control algorithm for the induction motor*", IEEE.
- [14] Pradeep Chatterjee, B.M. Karan, P.K. Sinha, [2007], "Fuzzy Control of Induction Motor with Reduced Rule Base" Serbian Journal of Electrical Engineering, Vol 4, No.2, 147-159.
- [15] Riad Toufouti, Salima Meziane, Hocine Benalla, [2007], "Direct Torque Control Strategi of Induction Motor", Acta Electrotechnica et Informatica No.1, Vol.7.
- [16] Riad Toufouti, Salima Meziane, Hocine Benalla, [2007], "Direct Torque Control for Induction Motors Based on Discrete Space Vector Modulation", International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-562 Volume 2, Number 3, pp.453-466