

PENGGUNAAN PCI 1710 SEBAGAI MEDIA INTERFACE UNTUK IMPLEMENTASI METODE *DIRECT TORQUE CONTROL* UNTUK PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA PHASA

Endro Wahjono, Epyk Sunarno, Sutedjo

Jurusan Elektro Industri, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Kampus ITS Keputih Sukolilo Surabaya 60111

E-mail : andro@eepis-its.edu

ABSTRAKS

Penelitian ini mengobservasi penggunaan PCI 1710 sebagai interaface untuk implementasi metode pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa berbasis *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 setling time 0.2 detik, sedangkan pada kontroler PI saat terjadi overshoot 27,5%, rise time 0.035 detik dan setling 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, PCI 1710*

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.[2] 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 [1]. 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.

Untuk mewujudkan penggunaan PCI 1710 sebagai media interface untuk implementasi metode Direct Torque Control pada motor induksi 3 phase membutuhkan inverter sebagai driver, akan tetapi inverter yang sudah ada tidak dapat disulut mosfetnya, padahal pada pengaturan kecepatan motor induksi 3 phase dengan FLC metode DTC dibutuhkan inverter yang bisa disulut mosfetnya melalui outputan Direct Torque Control Q_a , Q_b , Q_c . Sedangkan inverter yang sudah ada hanya dapat disulut berdasarkan frekwensinya, tidak dapat disulut mosfetnya. Oleh karena itu pada pembuatan hardware untuk mewujudkan penggunaan PCI 1710 sebagai media interface untuk implementasi metode Direct Torque Control pada motor induksi 3 phase ini dibuatlah inverter 3 phase. 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 dqn. 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.[16] Untuk memperbaiki sistem digunakan suatu kontroler, kontroler yang biasa

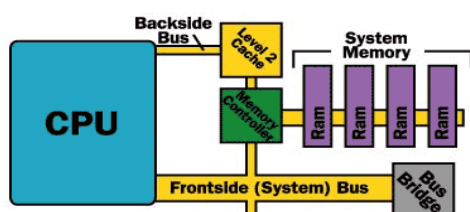
digunakan adalah kontroler *Proporsional Integral Derivative* (PID), namun penggunaan pengontrolan PID sangat tergantung pada pemilihan parameter konstanta mesin yaitu konstanta proposional (kp), konstanta integral (ki) dan konstanta derivativ (kd) yang sesuai. Untuk beban yang berubah-ubah, parameter pengontrol harus selalu disetting 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 dengan kontroller fuzzy logic berbasis *Direct Torque Control* (DTC).

2. PCI

PCI (Peripheral Connection Interface) adalah salah satu jenis bus yang dipasang pada PC untuk proses pengiriman maupun penerimaan data atau informasi dari dan ke peralatan luar.



Gambar1 Device PCI

PCI dibuat oleh intel dan menjadi standart untuk sistem pentium. PCI dapat menukar data dengan CPU pada 32 atau 64-bit per detik dan mensupport bus mastering dalam mengijinkan kartu ‘pintar’ untuk melakukan proses mandiri dari CPU [17]. PCI slot hanya menerima card PCI dan card PCI hanya pas pada PCI slot. PCI memiliki *high I/O counter*, kecepatan pengiriman data yang tinggi. Dalam melakukan proses interfacing, ada beberapa komponen di dalam PCI yang mendukung, diantaranya, sinyal PCI bus. PCI memiliki minimim 47 pin untuk peralatan luar dan 49 pin untuk penyimpanan data, pengalamatan, pengontrolan interface dan fungsi sistem.

3. 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.[2] Persamaan tegangan motor induksi dengan tegangan simetri dalam koordinat d-q-n dinyatakan oleh.

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

Fluksi yang tercakup dalam kumparan adalah:

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_M (i_{qs} + i'_{qr})$$

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

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

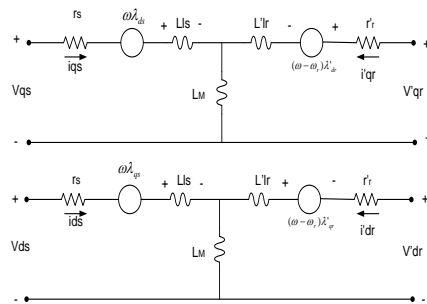
$$T_e - T_L = \frac{2J}{P} \frac{d\omega_r}{dt}\quad (5)$$

dengan,

T_L adalah torka beban
 T_e adalah torka elektromagnetik
 J adalah momen inersia (kg.m²)
 P adalah jumlah kutub

ω_r adalah kecepatan angular rotor (rad/dt)

Diagram dari model motor induksi diperlihatkan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian ekivalen dq dari motor induksi tiga fasa.

4. TEKNIK SPACE VECTOR PULSE-WIDTH MODULATION (SVPWM).

Space vector modulation (SVM) adalah teknik modulasi yang dikembangkan melalui Space vector (vector 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^o.

Persamaan dalam vector dapat dinyatakan sebagai berikut :

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

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + j\sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) = 0,5 + j0,8667\quad (6)$$

$$a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) + j\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) = -0,5 - j0,8667\quad (7)$$

Fungsi x dapat berupa fungsi tegangan, arus atau fluks dan tidak harus dalam bentuk fungsi sinusoidal. Bila x sebagai fungsi tegangan, maka persamaan tegangan dapat diberikan dengan persamaan berikut:

$$\left. \begin{aligned}v_a(t) &= V_m \sin(\omega t) = x_a(t) \\ v_b(t) &= V_m \sin(\omega t - 120^\circ) = x_b(t) \\ v_c(t) &= V_m \sin(\omega t + 120^\circ) = x_c(t)\end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Sehingga dalam bentuk persamaan space vector untuk persamaan jumlah tegangan menjadi:

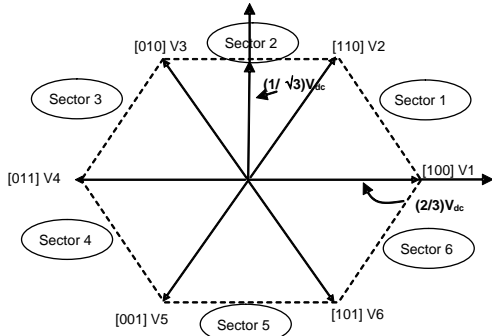
$$\bar{v} = \frac{2}{3} [v_a(t) + av_b(t) + a^2 v_c(t)]\quad (9)$$

Tabel 1. Kombinasi posisi saklar Sa, Sb dan Sc

Vektor Tegangan	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

Karena kombinasi v₀(000) dan v₇(111) pada tabel 1 mempunyai tegangan output sama dengan 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 $\frac{1}{\sqrt{3}}V_{dc}$. Gambar 3

menunjukkan vektor tegangan dengan masing-masing pergeserannya dan menghasilkan sektor.



Gambar 3. Mode sektor switching inverter

Untuk merealisasikan SVPWM melalui beberapa langkah berikut:

- Menentukan besar tegangan V_d, V_q, V_{ref} dan sudut α
- Menentukan lama waktu penyalakan 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:

$$V_d = V_{an} - V_{bn} \cos 60^\circ - V_{cn} \cos 60^\circ \quad (10)$$

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

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

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

Persamaan 9 dapat dibentuk dalam persamaan matrik sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

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

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

Dengan f_s adalah frekuensi dasar, untuk menentukan lama waktu pensaklaran T_1, T_2 dan T_0 adalah melalui persamaan berikut:

$$\int_0^{T_z} \bar{V}_{ref} dt = \int_0^{T_1} \bar{V}_1 dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} \bar{V}_2 dt + \int_{T_1+T_2}^{T_z} \bar{V}_0 dt \quad (13)$$

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

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

$$T_z |\bar{V}_{ref}| \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix} = T_1 \frac{2}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + T_2 \frac{2}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} \cos(\pi/3) \\ \sin(\pi/3) \end{bmatrix} \quad (14)$$

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

$$T_1 = T_z \cdot a \cdot \frac{\sin(\pi/3 - \alpha)}{\sin \pi/3} \quad (15)$$

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

$$T_0 = T_z - (T_1 + T_2)$$

dengan

$$T_z = \frac{1}{f_s} \quad \text{dan} \quad a = \frac{|V_{ref}|}{\frac{2}{3}V_{dc}}$$

Secara umum nilai T_1, T_2 dan T_0 untuk semua sektor adalah sebagai berikut:

$$T_1 = \frac{\sqrt{3}T_z |\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin \left(\frac{\pi}{3} - \alpha + \frac{n-1}{3} \pi \right) \right) = \frac{\sqrt{3}T_z |\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin \left(\frac{n\pi}{3} - \alpha \right) \right)$$

$$T_1 = \frac{\sqrt{3}T_z |\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin \frac{n\pi}{3} \cos \alpha - \cos \frac{n\pi}{3} \sin \alpha \right)$$

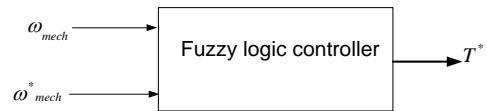
$$T_2 = \frac{\sqrt{3}T_z |\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin \left(\alpha - \frac{n-1}{3} \pi \right) \right)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3}T_z |\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(-\cos \alpha \sin \frac{(n-1)\pi}{3} + \sin \alpha \cos \frac{(n-1)\pi}{3} \right)$$

$$T_0 = T_z - T_1 - T_2 \quad \left(\begin{array}{l} \text{untuk } n=1-6 \text{ (sektor 1 sampai 6)} \\ 0 \leq \alpha \leq 60^\circ \end{array} \right)$$

5. FUZZY LOGIC CONTROLLER (FLC)

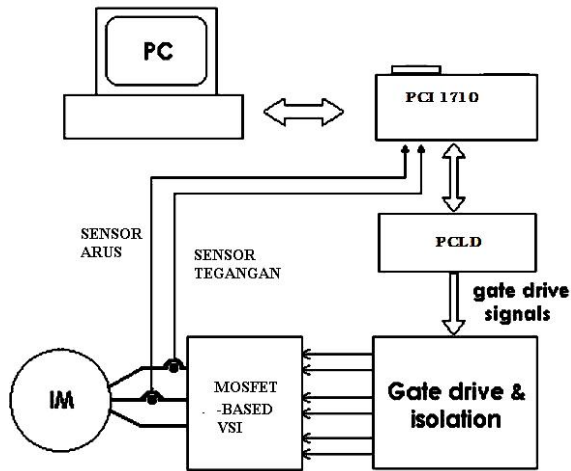
FLC digunakan untuk estimasi dan kontrol kecepatan motor, sehingga didapatkan respon dinamis yang akurat. FLC digunakan untuk estimasi kecepatan motor dengan masukan perubahan putaran dan putaran estimasi. Hasil dari FLC adalah Torka referensi untuk mendapatkan respon kecepatan yang bervariasi.



Gambar 4. Skema FLC untuk switching table

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

6. MODEL PERENCANAAN SISTEM

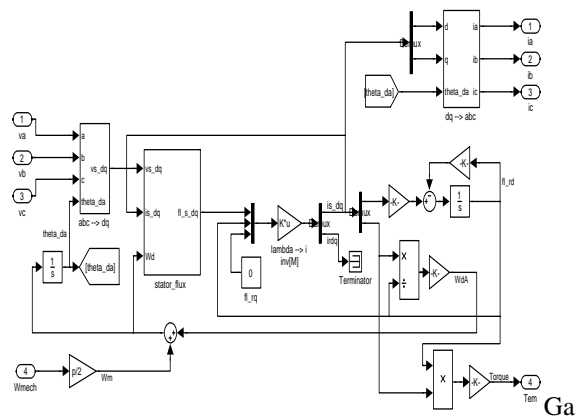


Gambar 5. Blok diagram pemodelan sistem

Dari gambar diatas secara keseluruhan dapat dibagi dalam beberapa blok:

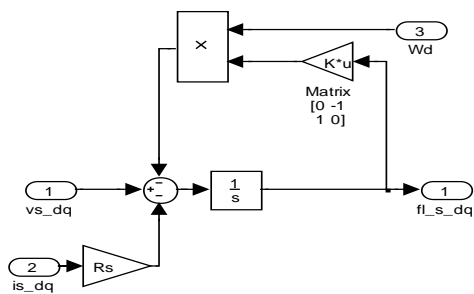
1. Model motor induksi tiga fasa
2. Model estimator *Direct Torque Control (DTC)*
3. Model *Fuzzy Logic Controller (FLC)*

6.1 Model Motor Induksi tiga fasa



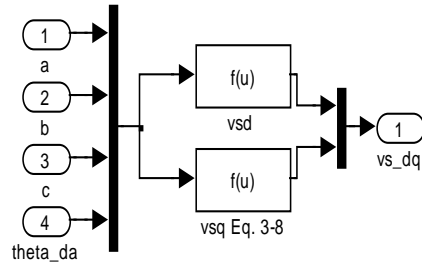
Gambar 6. Model Motor Induksi 3 fasa

Dari gambar 6 terlihat bahwa blok fluks stator (model fluks stator) dapat diperlihatkan pada gambar 7.

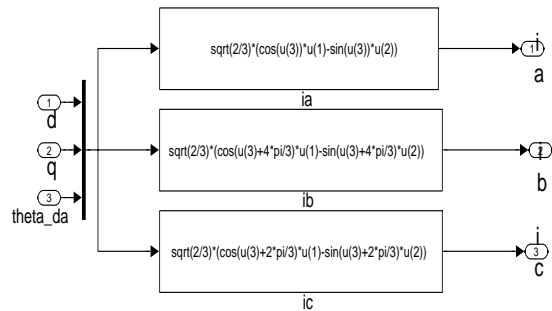


Gambar 7. Model fluks stator motor

Untuk model transformasi abc ke sumbu dq atau sebaliknya dapat dilihat pada gambar 8 dan 9.



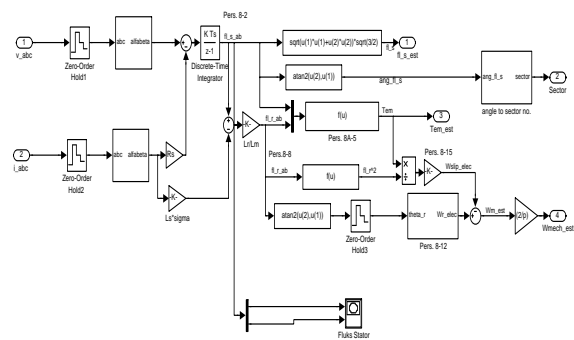
Gambar 8. Transformasi besaran sumbu abc ke dq



Gambar 9. Transformasi besaran sumbu dq ke abc

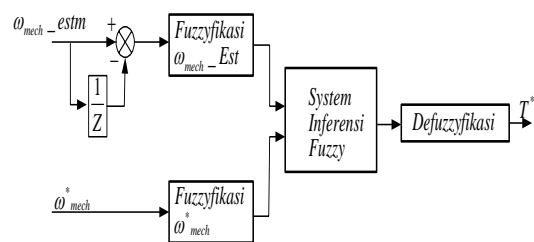
6.2 Model Estimator DTC

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 fluks stator (fl_s_est), sector, torka (Tem_est), dan putaran ($Wmech_est$) estimasi seperti pada gambar 10.



Gambar 10. Estimator fluks, torka, putaran dan sudut

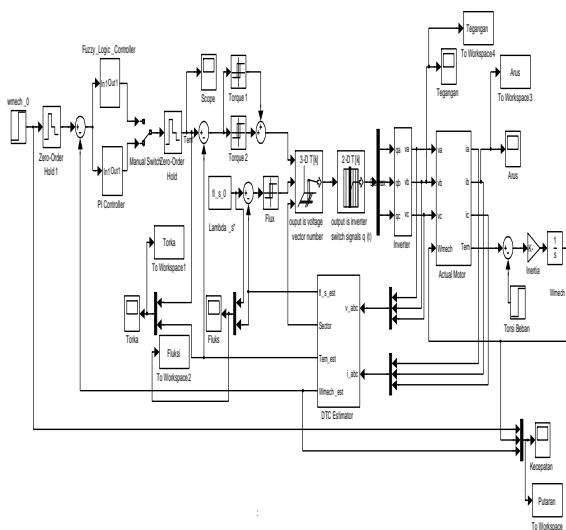
6.3 Model Fuzzy Logic Controller (FLC)



Gambar 11. Model Fuzzy Logic Controller

Proses pertama didalam *FLC* adalah fuzzyfikasi setiap input *FLC* 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.

7. Model Simulasi Pengaturan Kecepatan Motor Induksi secara keseluruhan.



8. Hasil Simulasi dan Analisa.

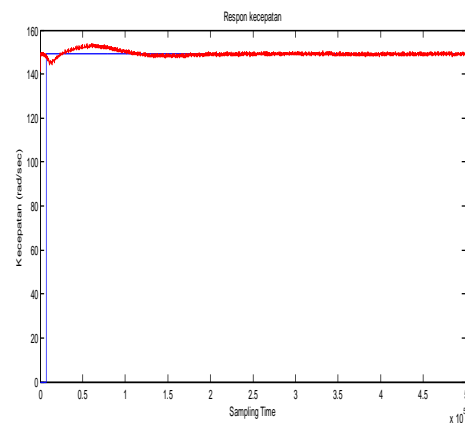
Melakukan peniruan dari keadaan riil suatu sistem disebut dengan melakukan simulasi. Kemiripan hasil simulasi dengan sistem yang sebenarnya sangat tergantung dari model matematik yang digunakan. Simulasi program dilakukan dengan menggunakan fasilitas simulink pada Matlab.

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

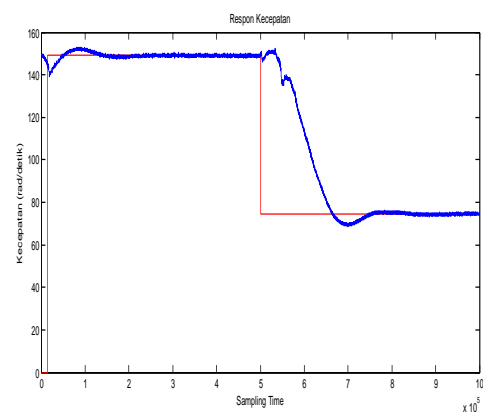
Disamping menggunakan kontrol fuzzy logic berbasis DTC akan dilakukan pula dengan kontrol PI untuk melihat performansi putaran motor induksi tiga fasa. Data teknis dari motor induksi tiga fasa yang dipakai untuk simulasi dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Data teknik motor induksi tiga fasa

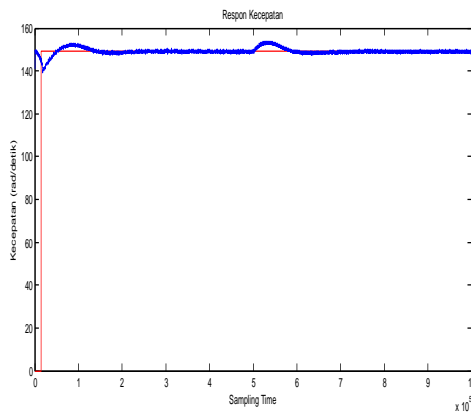
Daya (P)	3 HP/2.4 kW
Tegangan (V)	380 V(L-L,rms)
Frekuensi (f)	50 Hz
Fasa (F)	3
Jumlah kutub (p)	4
Arus beban penuh (I)	4 A
Tahanan stator (Rs)	1,77 Ω
Tahanan rotor (Rr)	1,34 Ω
Reaktansi stator (Xs)	5,25 Ω
Reaktansi rotor (Xr)	4,75 Ω
Reaktansi gandeng (Xm)	1,39 Ω
Slip beban penuh (s)	1,72 %
Momen enersia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



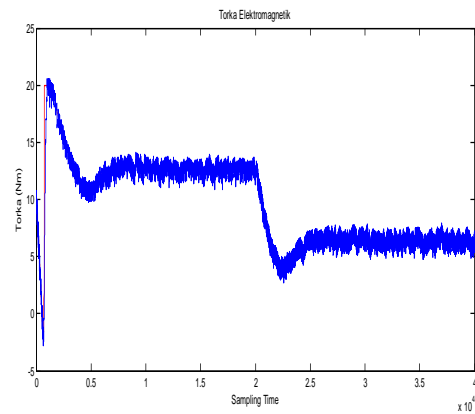
Gambar 12. Putaran motor induksi pada saat start



Gambar 13. Putaran pada saat referensi turun 50%

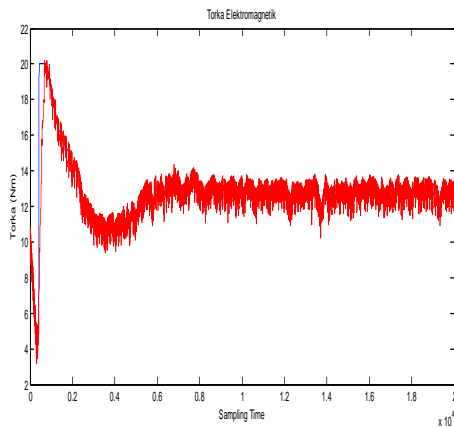


Gambar 14. Putaran pada saat beban turun 50%



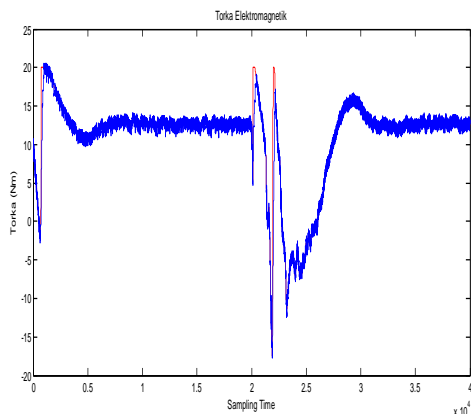
Gambar 17. Torka elektromagnetik motor pada saat beban turun 50%

Torka elektromagnetik motor dapat ditunjukkan pada gambar 15 pada kondisi start, akan stabil setelah 0,8 detik.



Gambar 15. Torka elektromagnetik motor pada saat start

Torka elektromagnetik motor pada saat $t=0,5$ detik terjadi putaran referensi turun 50%, akan stabil setelah 0.12 detik. Seperti ditunjukkan pada gambar 16.



Gambar 16. Torka elektromagnetik motor saat terjadi putaran referensi turun 50%

Torka elektromagnetik dapat dilihat pada gambar 17 pada kondisi beban turun 50% akan stabil setelah 0,05 detik.

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 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.

9. 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.] D. Casadei, Giovanni Serra, "FOC and DTC: two variable scheme for induction motors torque control", Trans. On Power Electronics, Vol. 17, No. 5, September 2002.
- [2.] I. Takahashi, T. Noguchi, "A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor", IEEE, Tran. Ind. Appl, IA-22(5): 820-827, 1996.
- [3.] D. Casadei, G. Serra, A. Tani, and L.Zarri, "Assessment of direct torque control for induction motor drives", Buletin of the Polish academy of science tech. sciences, vol. 54, No.3,2006.
- [4.] H. Tajima and Y. Hori, "Speed sensorless field oriented control of induction motor", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 29, pp. 175-180, Jan./Feb. 1993.
- [5.] A. Damiano, P.Vas et al, "Comparison of speed sensorless DTC induction motor drives, "in Proc. PCIM, Nuremberg, Germany, 1997, pp. 1-11.
- [6.] Jawad Faiz, Mohammad Bagher Bannae Sharifian, Ali Keyhani, Amulin Bogda Proca, Sensorless Direct Torque Control of Induction Motors Used in Electric Vehicle,"IEEE Transaction on Energy Conversion, vol.18, March 2003.
- [7.] Nuno M.Silva, Antonio P, Martin, Adriano S.Carvalho,"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, July 2002.
- [8.] P. Tiitinen, P. Pohkalainen, J. Lalu,"The next generation motor control method : Direct torque control (DTC),"EPEJ, vol.5, pp.14-18, Marc.1995.
- [9.] Ned Mohan, "Electric drives an integrated approach", MNPERE, Minneapolis, 2003.
- [10.] Ned mohan, "Advance electric drives analysis, control and modeling using simulink", MNPERE, Minneapolis, 2001.
- [11.] Bimal K. Bose, "Modern Power Electronics and AC drives", Prentice Hall PTR, 2002.
- [12.] Petar R. Matic, Branko D. Blanus, Slobodan N Vukosavic, "A novel direct torque control and flux control algorithm for the induction motor",IEEE, 2003. Pradeep Chatterjee, B.M.Karan, P.K. Sinha,"Fuzzy Control of Induction Motor with Reduced Rule Base"Serbian Journal of Electrical Engineering, Vol 4, No.2, November 2007, 147-159.
- [13.] Pradeep Chatterjee, B.M.Karan, P.K. Sinha,"Fuzzy Control of Induction Motor with Reduced Rule Base"Serbian Journal of Electrical Engineering, Vol 4, No.2, November 2007, 147-159.
- [14.] Riad Toufouti, Salima Meziane, Hocine Benalla,"Direct Torque Control Strategi of Induction Motor", Acta Electrotechnica et Informatica No.1, Vol.7, 2007.
- [15.] Riad Toufouti, Salima Meziane, Hocine Benalla,"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 (2007), pp.453-466.
- [16.] "User's Manual PCI-1710/1710HG". Diakses 20 Desember 2008. <http://www.bb-elec.com/bb-elec/literature/manual/Advantech/pci-1710.pdf>
- [17.] "User's Manual PCLD-8710". Diakses 20 Desember 2008. <http://www.isr.uc.pt/~rui/str/PCLD-8710.pdf>