

PENGEMBANGAN MODEL FUZZY MAMDANI UNTUK PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA BERBASIS METODE KONTROL FIELD ORIENTED

I Putu Sutawinaya

Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Bali
Bukit Jimbaran, P.O.Box 1064 Tuban Badung-BALI
Phone : (0361)701981, Fax : (0361)701128

Abstrak : Motor induksi banyak digunakan pada industri karena kokoh serta handal jika dibandingkan dengan motor DC. Ini disebabkan oleh konstruksinya sederhana serta kokoh, harganya relatif murah, biaya operasional rendah dan perawatannya mudah. Di samping beberapa keunggulan itu, motor induksi mempunyai beberapa kelemahan, yaitu sulit untuk mempertahankan kecepatannya apabila terjadi perubahan dinamika motor akibat terjadinya perubahan pembebanan. Hal ini dikarenakan fluks rotor dan torsi elektromagnetik sulit untuk dikontrol secara bersamaan

Pada tulisan ini dikembangkan suatu kontrol fuzzy model Mamdani pada sistem pengendalian motor induksi tiga fasa menggunakan metode *field oriented control* sebagai pengendali arus torsi. Harapannya, motor induksi bekerja seperti mesin DC penguat terpisah, torsi dan fluksi dikontrol secara terpisah. Sistem pengendalian ini disimulasikan menggunakan perangkat lunak Matlab / Simulink. Hasil simulasi menunjukkan bahwa dengan menggunakan model fuzzy Mamdani ini, lonjakan dan waktu pemulihan pencapaian *setpoint* relatif kecil.

Kata kunci : Motor Induksi, Kontroler Logika Fuzzy, Field Oriented Control

DEVELOPMENT OF MAMDANI FUZZY MODEL FOR THREE PHASE INDUCTION MOTOR SPEED CONTROL BASED FIELD ORIENTED CONTROL METHOD

Abstract : The induction motors are generally used in the industries, because they are more rugged and reliable than the dc motor. It is caused by its simple construction, relatively cheap and low operating cost, and easy maintenance. Despite some advantages, inducing motor has several disadvantages, one of which is difficulty in maintaining its speed in the case of any dynamics changes since load change. It is caused by difficulty in controlling the rotor flux and electromagnetic torque.

The paper tried to develop fuzzy control of Mamdani model on three phase induction motor control system using field oriented control method as the torque current control. Is it hoped that induction motor works as the separately excited DC machine where torque and flux are controlled separately. The control system is simulated by using Matlab / Simulink software. The simulation results to shown that the overshoot and settling-time of the set point are relative small with the Mamdani fuzzy model.

Keywords : Induction Motor, Fuzzy Logic Controller, Field Oriented Control

I. PENDAHULUAN

Pada umumnya, industri-industri besar seringkali menggunakan motor induksi tiga fasa bila dibandingkan dengan jenis motor listrik lainnya seperti motor DC. Hal ini dikarenakan penggunaan motor induksi membutuhkan perawatan relatif lebih mudah di samping harganya juga relatif lebih murah serta handal. Namun ada beberapa kelemahan dalam penggunaan motor induksi, yakni ketika bebannya berubah-ubah maka kecepatan motor menjadi tidak konstan, Hal ini tidak seperti motor DC yang memiliki kecepatan relatif lebih konstan terhadap perubahan beban. Kelemahan motor induksi ini dapat diantisipasi dengan penambahan rangkaian kontrol yang dapat

mengontrol kecepatannya agar lebih konstan (stabil).

Para peneliti terus menerus berupaya untuk memperbaiki kinerja dari motor induksi melalui pengembangan penelitian secara kontinyu. Seperti apa yang telah dikembangkan oleh Brian Heber, Longya Xu, dan Yifan Tang [IEEE, 1997] dalam makalah ilmiahnya, mereka mencoba mengembangkan suatu metode *field oriented control* (FOC) yang diaplikasikan pada motor induksi tiga fasa. Metode *field oriented control* (FOC) adalah merupakan suatu metode pengaturan arus medan dan arus torsi pada motor induksi tiga fasa. Arus medan dan arus torsi dikontrol secara terpisah seperti halnya pada motor DC.

Rangkaian kontrol yang umum digunakan adalah kontroler PID (*Proportional-Integral-Derivative*). Namun, kelemahan kontroler PID ini ketika terjadi perubahan dinamika motor maka nilai parameter *gain* proporsional (K_p), integral (K_i), dan derivatif (K_d) perlu ditala (*tuning*) kembali. Untuk mengatasi kelemahan kontroler tersebut, maka dikembangkan suatu metode kontrol menggunakan teknologi fuzzy.

Pada penelitian ini dirancang suatu pemodelan pengaturan kecepatan motor induksi menggunakan *fuzzy logic* model Mamdani. Pemodelan sistem kontrol yang dirancang menggunakan perangkat lunak (*software*) Simulink dari MATLAB 7.04. 1)

II. METODE PENELITIAN

2.1. Kontroler Logika Fuzzy

Kontroler logika fuzzy dikategorikan dalam kontrol cerdas (*intelligent control*). Unit logika fuzzy memiliki *realibity* yang mampu menyelesaikan masalah perilaku sistem yang kompleks dan memiliki ketidakpastian. Pengendali logika fuzzy memiliki unjuk kerja sangat baik dibandingkan dengan sistem kontroler PID. Berbeda dengan sistem kontrol biasa, keluaran yang dihasilkan diolah dan didefinisikan secara pasti atau dengan istilah lain hanya mengenal logika ‘0’ dan ‘1’ atau bekerja pada daerah ON dan OFF sehingga didapatkan perubahan yang kasar.

Pada sistem logika fuzzy, nilai yang berada antara ‘0’ dan ‘1’ dapat didefinisikan, sehingga kontroler dapat bekerja seperti sistem syaraf manusia yang bisa merasakan lingkungan eksternalnya, yakni “kurang”, “agak”, “biasa”, dan “sangat”.

Kontroler yang berbasis logika fuzzy harus melalui beberapa tahapan sebelum sampai ke *plant*. Tahapan-tahapan tersebut kuantisasi, fuzzifikasi, penentuan *rule base* dan *Inference* (*reasoning*), kemudian defuzzifikasi.

Metode sistem inferensi fuzzy (*Fuzzy Inference System* “FIS”) yang dikenal antara lain metode : Mamdani, Sugeno dan Tsukamoto.

1) FIS Model Mamdani

Menurut Sri Kusumadewi [AK045218, Bab 7, hal 23-25] metode mamdani sering dikenal dengan nama metode Max-Min. Metode ini diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani pada tahun 1975. Untuk mendapatkan *output* sistem diperlukan 4 tahapan:

- Variabel *input* maupun *output* dibagi menjadi satu atau lebih himpunan fuzzy.
- Fungsi implikasi yang digunakan adalah Min.
- Dalam melakukan inferensi sistem fuzzy,

metode yang digunakan adalah : metode *max*, metode *additive* (SUM) dan metode *probabilistic* (OR).

- Input dari defuzzifikasi adalah suatu himpunan yang diperoleh dari komposisi aturan-aturan fuzzy. *Output* yang dihasilkan merupakan suatu bilangan pada domain himpunan fuzzy tersebut. Beberapa metode defuzzifikasi aturan Mamdani yang dikenal adalah metode : *Centroid* (*composite moment*), *Bisector*, *Mean of Maximum* (MOM), *Largest of Maximum* (LOM) dan *Smallest of Maximum* (SOM)

2) Fungsi Implikasi Fuzzy

Pada umumnya aturan-aturan fuzzy dinyatakan dalam bentuk logika IF-THEN yang merupakan dasar relasi fuzzy. Relasi fuzzy (R) dalam basis pengetahuan fuzzy didefinisikan sebagai fungsi implikasi fuzzy (*fuzzy implication*).

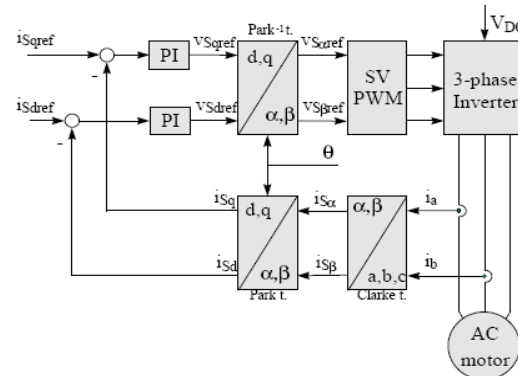
Ada beberapa fungsi implikasi fuzzy yang dikenal, diantaranya seperti pada tabel 1.

Tabel 2.1 : Beberapa tipe fungsi implikasi fuzzy

NAMA	Operator Implikasi $\phi[\mu_A(x), \mu_B(y)] =$
Zadeh Max-Min	$(\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)) \vee (1 - \mu_A(x))$
Mamdani Min	$\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)$
Larsen Product	$\mu_A(x) \cdot \mu_B(y)$
Arithmetic	$1 \wedge (1 - \mu_A(x) + \mu_B(y))$
Boolean	$(1 - \mu_A(x)) \vee \mu_B(y)$

2.2. Metode Kontrol Field Oriented

Field Oriented Control (FOC) adalah suatu metode pengaturan medan pada motor AC, dari sistem *coupled* dirubah menjadi sistem *decoupled*. Melalui sistem ini arus penguatan dan arus beban motor dapat dikontrol secara terpisah, dengan demikian torsi dan fluksi juga dapat diatur secara terpisah seperti halnya motor DC.



Gambar 2.1. Skema dasar FOC untuk Motor AC
Persamaan Decoupled FOC

Persamaan *decoupled* untuk memperoleh arus stator ($i_{as}^*, i_{bs}^*, i_{cs}^*$) adalah ;

$$\begin{pmatrix} i_{as}^* \\ i_{bs}^* \\ i_{cs}^* \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ds}^* \\ i_{qs}^* \end{pmatrix} \quad (1)$$

di mana arus stator i_{ds}^*, i_{qs}^* (stasioner) dihitung melalui persamaan (2) berikut :

$$\begin{pmatrix} i_{ds}^* \\ i_{qs}^* \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e^*) & -\sin(\theta_e^*) \\ -\sin(\theta_e^*) & \cos(\theta_e^*) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_{ds}^* \\ i_{qs}^* \end{pmatrix} \quad (2)$$

magnitude arus stator (i_{ds}^*, i_{qs}^*) dan slip (ω_{sl}^*) dihitung dari persamaan berikut :

$$i_{ds}^* = \frac{1+s\tau_r}{L_m} \lambda_r^* \quad (3)$$

$$i_{qs}^* = \frac{2}{3} \cdot \frac{2}{p} \cdot \frac{L_r}{L_m} \cdot \frac{T_e^*}{\lambda_r^*} \quad (4)$$

$$\omega_{sl}^* = \frac{2.2 \cdot L_r}{3 \cdot p \cdot \tau_r} \cdot \frac{T_e^*}{|\lambda_r^*|^2} \quad (5)$$

$$\cos(\omega_e t) = \frac{\lambda_{dr}^s}{|\lambda_r^s|} \quad \sin(\omega_e t) = \frac{\lambda_{qr}^s}{|\lambda_r^s|} \quad (6)$$

di mana :

$$\omega_e = \frac{d\theta_e}{dt} \quad (7)$$

$$|\lambda_r^s| = \sqrt{(\lambda_{dr}^s)^2 + (\lambda_{qr}^s)^2} \quad (8)$$

$$\lambda_{qr}^s = \left(1 + \frac{L_{lr}}{M}\right) \lambda_{qs}^s - L_{lr} \left(2 + \frac{L_{lr}}{M}\right) i_{qs}^s \quad (9)$$

$$\lambda_{dr}^s = \left(1 + \frac{L_{lr}}{M}\right) \lambda_{ds}^s - L_{lr} \left(2 + \frac{L_{lr}}{M}\right) i_{ds}^s \quad (10)$$

di mana $\tau_r = L_r / R_r$ adalah konstanta waktu, $s = d/dt$, L_r adalah induktansi rotor, L_m adalah induktansi mutual, R_r adalah resistansi rotor, $|\lambda_r^s|$ adalah flux linkage rotor, dan $p =$ jumlah kutub.

Untuk mentransformasikan arus stator dari sistem tiga fasa (a,b,c) ke sistem dua fasa ortogonal (α, β), serta mengacu pada persamaan *decoupled* di atas, maka digunakan persamaan Transformasi *Clarke* sebagai berikut :

$$i_\alpha = i_a \quad (11)$$

$$i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} i_a + \frac{2}{\sqrt{3}} i_b \quad (12)$$

atau dalam bentuk matrik adalah sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/\sqrt{3} & 2/\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (13)$$

Inverse Transformasi *Clarke* digunakan untuk mentransformasi balik dari komponen α, β ke komponen a,b,c melalui persamaan berikut :

$$i_a = i_\alpha \quad (14)$$

$$i_b = -\frac{1}{2} i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta \quad (15)$$

$$i_c = -\frac{1}{2} i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta \quad (16)$$

atau dalam bentuk matrik adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (17)$$

Untuk mentransformasikan arus stator dari sistem dua fasa ortogonal (α, β) ke sistem dua fasa (d-q) menggunakan Transformasi *Park*, secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$i_{ds} = i_\alpha \cdot \cos(\theta) + i_\beta \cdot \sin(\theta) \quad (18)$$

$$i_{qs} = -i_\alpha \cdot \sin(\theta) + i_\beta \cdot \cos(\theta) \quad (19)$$

atau dalam bentuk matrik adalah :

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (20)$$

Inverse Transformasi *Park* digunakan untuk mentransformasi balik dari komponen d-q ke komponen α, β melalui persamaan berikut :

$$i_\alpha = i_{ds} \cdot \cos(\theta) - i_{qs} \cdot \sin(\theta) \quad (21)$$

$$i_\beta = i_{ds} \cdot \sin(\theta) + i_{qs} \cdot \cos(\theta) \quad (22)$$

atau dalam bentuk matrik adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \quad (23)$$

2.3. Persamaan Matematis Motor Induksi

Persamaan motor induksi dalam koordinat dq

1) Persamaan tegangan

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + p \lambda_{qs} + \omega \lambda_{ds} \quad (24)$$

$$V_{ds} = r_s i_{ds} + p \lambda_{ds} - \omega \lambda_{qs} \quad (25)$$

$$V'_{qr} = r'_r i'_{qr} + p \lambda'_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} \quad (26)$$

$$V'_{dr} = r'_r i'_{dr} + p \lambda'_{dr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{qr} \quad (27)$$

2) Persamaan fluksi

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) \quad (28)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) \quad (29)$$

$$\lambda'_{qr} = L'_{lr} i'_{qr} + L'_m (i'_{qs} + i'_{dr}) \quad (30)$$

$$\lambda'_{dr} = L'_{lr} i'_{dr} + L'_m (i'_{ds} + i'_{dr}) \quad (31)$$

3) Persamaan torsi elektromagnetik

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{k}{2} \tilde{\lambda}_m \tilde{i}_{qds} \quad (32)$$

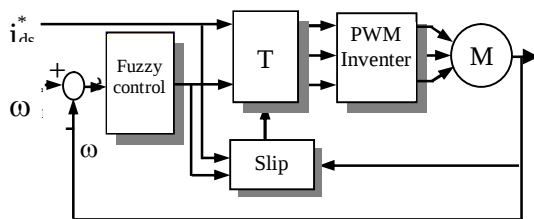
4) Persamaan dinamika motor induksi

$$T_e - T_l = \frac{2J}{k} \frac{d\omega_r}{dt} + B_m \frac{2}{k} \omega_r \quad (33)$$

III. PEMBAHASAN DAN ANALISIS

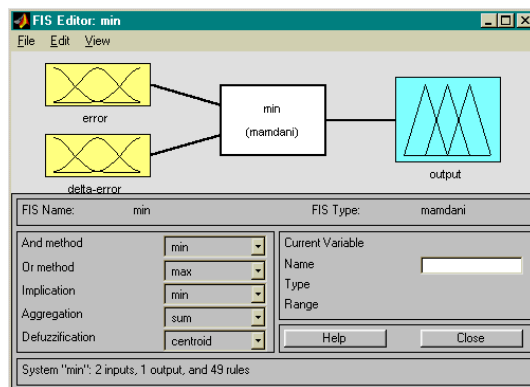
3.1. Perancangan Simulasi Kontrol Fuzzy

Mengembangkan dari beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, maka blok diagram sistem pengaturan kecepatan motor induksi menggunakan metode FOC dengan kontroler logika fuzzy yang dirancang, ditunjukkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1. Sistem Kontrol Fuzzy dengan FOC

Menggunakan *Fuzzy Inference System* (FIS) model Mamdani dengan defuzzifikasi tipe Centroid, maka blok FIS editor dari Simulink/Matlab dapat dirancang seperti tampilan gambar 3.2. di bawah.



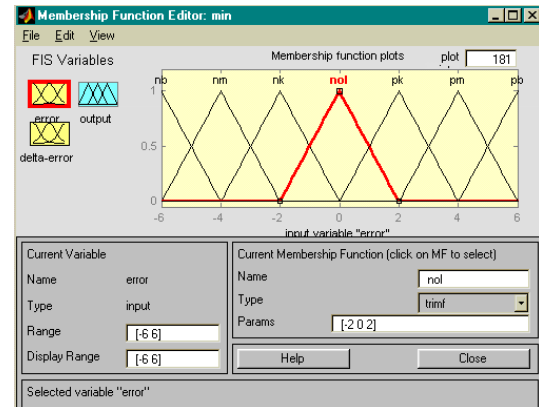
Gambar 3.2. Blok FIS model Mamdani

Sinyal keluaran dari kontroler logika fuzzy berupa torsi referensi (T_s^*) dipakai untuk mengatur arus torsi. Persamaan arus torsi yang dipakai adalah :

$$i_T = \frac{L_r}{pM^2 i_M} T_r^* \quad (34)$$

di mana: i_T = Arus torsi (A), dan i_M = arus medan (A).

Metode yang digunakan pada kontroler logika fuzzy ini adalah metode statik, artinya sifat fungsi keanggotaan (*membership function* "MF") bekerja dengan rentang kerja (*range*) tetap, yaitu antara -6 sampai dengan 6 untuk variabel *input*, dan antara -0,09 sampai dengan 0,09 untuk variabel *output*.



Gambar 3.3. Blok MF variable input "Error"

Di dalam merancang kontroler logika fuzzy yang perlu diperhatikan adalah variabel *input* (masukan) *error* (e) dan perubahan / *delta error* (Δe), dinyatakan melalui persamaan :

$$e(k) = sp - y(k) \quad (36)$$

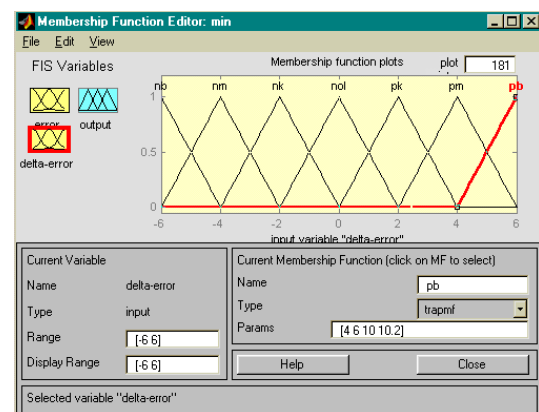
$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (37)$$

di mana sp adalah *setpoint* (kecepatan referensi ' ω_{ref} ') dan y adalah keluaran (*output*) sistem, sedangkan k dan $k-1$ adalah kejadian urutan dari pencuplikan data sistem.

Pada kasus pengaturan kecepatan motor induksi, himpunan semesta pembicaraan meliputi *error* kecepatan dan *delta error* kecepatan dinyatakan melalui persamaan (36) dan (37). Sedangkan semesta pembicaraan dari aksi kontrol adalah torsi referensi, yang didefinisikan sebagai berikut :

$$\Delta T_e^*(k) = T_e^*(k) - T_e^*(k-1) \quad (38)$$

di mana $T_e^*(k)$ adalah torsi referensi, dan ΔT_e^* adalah perubahan torsi referensi pada urutan sampling ke- k .

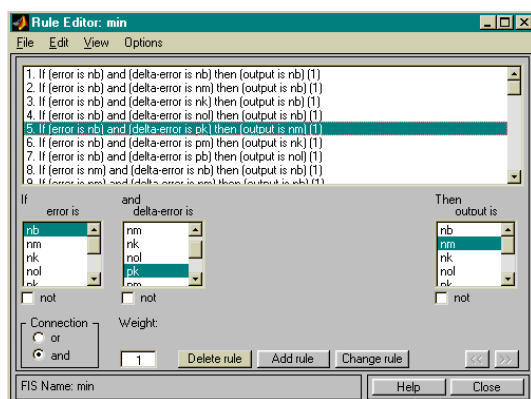


Gbr 3.4. Blok MF variable input "delta Error"

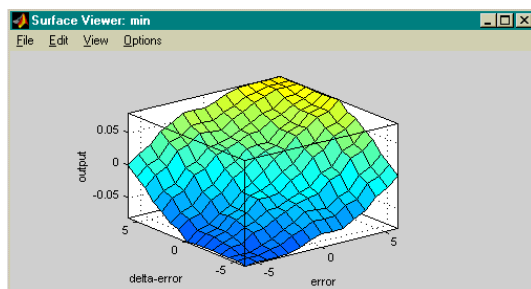
Error dan *delta error* yang terjadi selama sistem dioperasikan terlebih dahulu dikuantisasi atau dipetakan melalui interpolasi biasa menjadi error terkuantisasi (Qe) dan *delta error* terkuantisasi (dQe). Pengkuantisasian melalui interpolasi bertujuan untuk memetakan *error* dan *delta error* ke dalam semesta pembicaraan dengan rentang kerja yang telah ditetapkan di atas.

Dalam rancangan ini, pengkuantisasian dibagi menjadi tujuh tingkat kuantisasi dengan variabel linguistik, yaitu negatif besar (nb), negatif menengah (nm), negatif kecil (nk), nol (nol), positif kecil (pk), positif menengah (pm), positif besar (pb).

Aturan dasar fuzzy (*rule base*) dari kontroler logika fuzzy pada penelitian ini yang diturunkan dengan metode pendekatan heuristik ditunjukkan pada blok fuzzy *rule base* di bawah..



Gambar 3.5 Blok fuzzy rule editor



Gambar 3.6 Tampilan fuzzy rule model surface

3.2. Hasil Simulasi dan Analisis

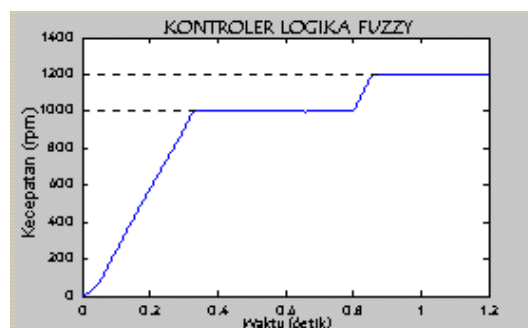
Untuk menguji ketangguhan dari sistem kontrol yang dirancang, maka simulasi program dilakukan pada dua kondisi dinamik, yaitu simulasi pada kondisi terjadi perubahan kecepatan (*setpoint*) dan kondisi pemberian beban (torsi elektromagnetik). Pada masing-masing kondisi tersebut diamati dan dianalisis kinerja motor induksi seperti *overshoot*,

undershoot, *rise time*, *settling time* dan *steady state error* melalui tampilan karakteristik kecepatan motor induksi pada blok "Scope [rpm]".

1) Kondisi perubahan kecepatan

Pada kondisi ini, model yang dirancang diuji melalui perubahan kecepatan (*setpoint*) dari 1000 rpm ke 1200 rpm ketika waktu 0,8 detik dengan kondisi sistem tanpa beban.

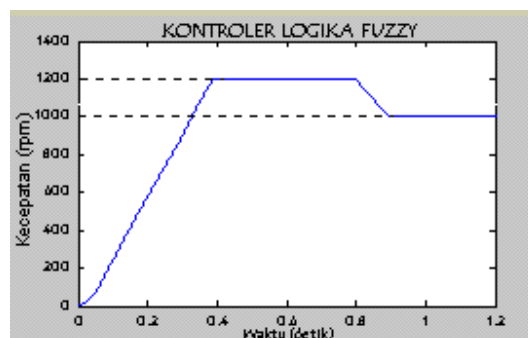
Hasil pengujian dan respon seperti yang terlihat pada gambar 3.7. Menunjukkan bahwa *settling time* berkisar 0,12 detik, *rise time* berkisar 0,33 detik, *overshoot* I kurang 3 % dan *overshoot* II berkisar 5 % serta *error steady state* di bawah 1 %.



Gambar 3.7 Respon sistem kondisi perubahan kecepatan (1000-1200 rpm) tanpa beban

Selanjutnya, model yang dirancang diuji melalui perubahan kecepatan (*setpoint*) dari 1200 rpm ke 1000 rpm ketika waktu 0,8 detik dengan kondisi sistem tanpa beban.

Hasil pengujian dan respon seperti yang terlihat pada gambar 3.8. menunjukkan bahwa *settling time* berkisar 0,12 detik, *rise time* berkisar 0,33 detik, *undershoot* I kurang 2 % dan *undershoot* II berkisar 3 % serta *error steady state* di bawah 1 %.

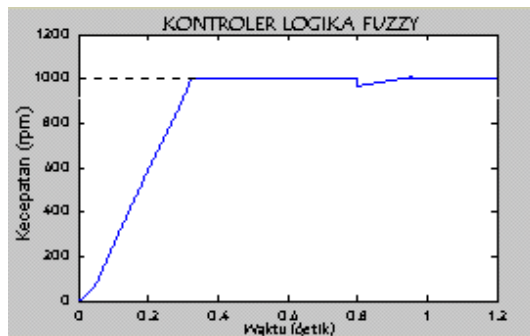


Gambar 3.8. Respon sistem kondisi perubahan kecepatan (1200-1000 rpm) tanpa beban

2) Kondisi Berbeban

Pada kondisi ini, model yang dirancang diuji dengan memasukkan torsi elektromagnetik sebesar 20 Nm pada waktu 0,8 detik. Sistem dibebani sesaat dalam waktu 0,01 detik.

Hasil pengujian dan respon seperti yang terlihat pada gambar 3.9. menunjukkan bahwa *settling time* berkisar 0,27 detik, *rise time* berkisar 0,29 detik, lonjakan *overshoot* berkisar 2,7 % , *undershoot* 0,5% serta *error steady state* berkisar 2 %.



Gambar 3.9. Respon sistem kondisi berbeban

IV. SIMPULAN DAN SARAN

4.1 Simpuln

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat ditarik suatu kesimpulan sebagai berikut :

- 1) Dari simulasi perubahan kecepatan (*setpoint*) seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.8. terlihat bahwa penggunaan kontroler logika fuzzy model Mamdani mampu memberikan kriteria performansi sistem kontrol yang tinggi, dengan menekan *overshoot* dan *steady state error* mendekati nol, serta *rise time* dan *settling time* relatif cepat.
- 2) Untuk simulasi kondisi pembeban (memasukkan torsi elektromagnetik) ketika sistem berjalan 0,8 detik seperti ditunjukkan pada gambar 3.9. terlihat bahwa sistem mampu mengatasi kondisi pembebanan (sesaat) dengan kembali ke posisi *setpoint* relatif cepat.

4.2. Saran

Kelemahan dari kontroler logika fuzzy yang dikembangkan pada penelitian ini adalah, dalam menentukan aturan dasar fuzzy (*rule base*) dan parameter sistem masih menggunakan metode coba-coba (*heuristic*), sehingga bila terjadi perubahan kondisi sistem maka *rule base* harus disesuaikan kembali. Untuk mengatasi kelemahan ini perlu dicoba dikembangkan

metode kontrol lain yang bersifat adaptif terhadap penentuan aturan dasarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Heber Brian, Xu Longya, Tang Yifan, 1997, " Fuzzy Logic Enhanced Speed Control of an Indirect Field Oriented Induction Machine Drive", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 12, No. 5, pp. 772-773.
- [2] Kuswadi Son, "Kendali Cerdas (Intelligent Control)", EEPIS Press, Surabaya, September, 2000.
- [3] Literature Number : BPRA073, "Field Oriented Induction of 3-Phase AC-Motors", Texas Instruments Europe, February, 1998.
- [4] Literature Number: BPRA048, "Clarke & Park Transforms", on the TMS320C2xx Application Report, Texas, February, 1998.
- [5] Razzouk A.Ba, Cheriti A., 1997, "Field-Oriented Control of Induction Motors Using Neural-Network Decouplers", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 12, No. 4.
- [6] Robyns Benoit, Berthereau Frederique, Hautier Jean-Paul, and Buyse Herve, 2000, "A Fuzzy-Logic-Based Multimodel Field Orientation in an Indirect FOC of an Induction Motor", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vo. 47, No. 2.
- [7] Sutawinaya I Putu dan Narottama, 2010, " Simulasi Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Menggunakan Kontroler PI dengan Observer ANFIS", *LOGIC*, volume 10 no. 1. PNB, Denpasar.
- [8] Sutawinaya I Putu, 2013, " Pengembangan Model Transformasi "Clarke-Park" pada Pengendalian Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Matlab/Simulink", *LOGIC*, volume 13 no. 1. PNB, Denpasar.
- [9] Zhen Li, and Xu Longya, 2000, " Fuzzy Learning Enhanced Speed Control of an Indirect Field-Oriented Induction Machine Drives", *IEEE Transactions Control Systems Technology*, Vol. 8, No. 2.