

**PENGENDALIAN ADAPTIF FUZZY
UNTUK SELF TUNING PI PADA
KONTROL KECEPATAN MOTOR
INDUKSI TIGA FASA TANPA SENSOR
KECEPATAN DENGAN OBSERVER MRAS**

Kata kunci: *Observer, adaptif fuzzy, MRAS, momen inersia.*

Dr. Ir. Ridwan Gunawan, MT. Fakultas Teknik
Universitas Indonesia Departemen Teknik
Elektro - Kontrol
e-mail : ridwan@eng.ui.ac.id
Kampus Baru UI Depok 16424- Indonesia.
Phone :+62-21-7270078 – Fax :+62-21-7270077

Dr.Ir. Feri Yusivar M.Eng, . Fakultas Teknik
Universitas Indonesia Departemen Teknik
Elektro –Kontrol Industri Universitas Indonesia
e-mail : Yusivar@ee.ui.ac.id
Kampus Baru UI Depok 16424- Indonesia.
Phone :+62-21-7270078 – Fax :+62-21-7270077

Ane Prasetyowati R, ST.MT, Fakultas Teknik
Departemen Teknik Elektro – Teknik Kontrol
Universitas Pancasila Jakarta
ane_prast@yahoo.com

ABSTRAK

Motor Induksi banyak digunakan namun perlu pengendalian putarannya agar dapat mengikuti perubahan beban yang ditanggungnya sehingga banyak *penelitian* mengenai pengendalian putaran motor induksi. Penelitian ini membahas bagaimana swatara dari konstanta proposional dan integral gain bila kecepatan acu diubah dengan menggunakan *adaptif fuzzy*. Perancangan sistem kendali *adaptif fuzzy* ini menggunakan *Observer Model reference adaptif system (MRAS)* untuk estimasi kecepatan motor induksi. Pemodelan motor induksi tiga fasa dan *MRAS* dilakukan dalam kerangka acuan sumbu *direct-quadrature*. yang bertujuan mengurangi kesalahan akibat transformasi, hal ini karena pengendali, fluks model, serta banyak besaran lainnya berada pada sumbu dq. Hasil simulasi dengan *C-MEX S-function Matlab/Simulink 6.5* menunjukkan bahwa penggunaan kendali *Adaptif Fuzzy* untuk *self tuning PI* dapat menala proporsional dan integral gain pada kecepatan acu 147rad/det dengan menggunakan observer *MRAS* tidak mengalami overshoot dibanding dengan respos observer full order. Keadaan tunak dicapai lebih singkat pada observer MRAS Pada parameter motor yang sama, motor dengan nilai momen inersia besar memiliki putaran lebih stabil.

PENGENDALIAN ADAPTIF FUZZY UNTUK SELF TUNING PI PADA KONTROL KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA TANPA SENSOR KECEPATAN DENGAN OBSERVER MRAS

ABSTRAK

Motor Induksi banyak digunakan namun perlu pengendalian putarannya agar dapat mengikuti perubahan beban yang ditanggungnya sehingga banyak penelitian mengenai pengendalian putaran motor induksi. Penelitian ini membahas bagaimana swatara dari konstanta proposional dan integral gain bila kecepatan acu diubah dengan menggunakan *adaptif fuzzy*. Perancangan sistem kendali *adaptif fuzzy* ini menggunakan *Observer Model reference adaptif system (MRAS)* untuk estimasi kecepatan motor induksi. Pemodelan motor induksi tiga fasa dan *MRAS* dilakukan dalam kerangka acuan sumbu *direct-quadrature*, yang bertujuan mengurangi kesalahan akibat transformasi, hal ini karena pengendali, fluks model, serta banyak besaran lainnya berada pada sumbu dq. Hasil simulasi dengan *C-MEX S-function Matlab/Simulink 6.5* menunjukkan bahwa penggunaan kendali *Adaptif Fuzzy* untuk *self tuning PI* dapat menala proporsional dan integral gain pada kecepatan acu 147rad/det dengan menggunakan observer *MRAS* tidak mengalami overshoot dibanding dengan respos observer full order. Keadaan tunak dicapai lebih singkat pada observer *MRAS* Pada parameter motor yang sama, motor dengan nilai momen inersia besar memiliki putaran lebih stabil.

Kata kunci: *Observer, adapif fuzzy, MRAS, momen inersia*

1. PENDAHULUAN

Motor induksi jenis *squirrel-cage* mempunyai banyak kelebihan, namun bermasalah pada pengaturan kecepatannya, sehingga diperlukan suatu sistem pengendalian putaran motor agar pada perubahan beban, putaran dapat dipertahankan. Penggunaan kontroler logika fuzzy adalah salah satu metoda untuk memperbaiki unjuk kerja kontroler PID pada pengaturan kecepatan, kontroler fuzzy yang digunakan untuk menala parameter PI. Pada makalah ini dirancang suatu pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa rotor sangkar dengan kendali adaptif fuzzy. Diharapkan kecepatan motor induksi dapat dikendalikan dengan halus, saat terjadi

perubahan beban, yang seringkali terkait dengan momen inersia motor, sehingga ingin diketahui pengaruh momen inersia motor dan beban terhadap putaran motor.

2. PEMODELAN

Pemodelan motor induksi tiga fasa kerangka acuan dq dilakukan berdasarkan kerangka acuan stator dengan parameter model adalah dengan arus stator dan fluks rotor. Model motor dalam kerangka acuan dq adalah[3]:

$$\frac{d}{dt} i_{sd} = \frac{1}{\sigma L_s} V_{sd} + \left(-\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{(1-\sigma)}{\sigma \tau_r} \right) i_{sd} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau_r} \psi_{rd} + \frac{L_m \omega_r}{\sigma L_s L_r} \psi_{rq} + \omega_e i_{sq} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} i_{sq} = \frac{1}{\sigma L_s} V_{sq} + \frac{1}{\sigma L_s} \left(-R_s - \frac{L_m^2}{\tau_r L_r} \right) i_{sq} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau_r} \psi_{rq} - \frac{L_m \omega_r}{\sigma L_s L_r} \psi_{rd} - \omega_e i_{rd} \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \psi_{rd} = -\frac{R_r}{L_r} \psi_{rd} + \frac{R_r}{L_r} L_m i_{sd} + (\omega_e - \omega_r) \psi_{rq} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \psi_{rq} = -\frac{R_r}{L_r} \psi_{rq} + \frac{R_r}{L_r} L_m i_{sq} - (\omega_e - \omega_r) \psi_{rd} \quad (4)$$

2.1 .Sistem Kendali Adaptif Fuzzy

Pada pengendalian kecepatan motor, metoda kendali *Adaptif fuzzy* diterapkan pada pengendali PI yang akan melakukan *self tuning* dalam menentukan nilai gain proposional kp dan Integral ki, dan ketika parameter motor mengalami perubahan, secara otomatis nilai kp dan ki akan menyesuaikan dengan aturan dari masukan nilai parameter motor. dan aturan metode *adaptif fuzzy* dinyatakan dalam bentuk sebuah himpunan *crisp*.

Algoritma pembelajaran yang digunakan adalah *gradient descent* atau *error backpropagation*. Sistem logika fuzzy proses fuzzyfikasi-singleton, defuzzyfikasi dengan rata-rata tengah, dan fungsi keanggotaan gaussian.

2.2 Algoritma adaptif fuzzy

Adaptif Fuzzy adalah penggabungan mekanisme fuzzy inference system yang digambarkan dalam arsitektur jaringan syaraf. Sistem inferensi fuzzy yang digunakan model Tagaki-Sugeno-Kang (TSK) orde satu, dengan pertimbangan kesederhanaan dan kemudahan komputasi, mekanisme inferensi fuzzy TSK orde

satu dengan dua masukan x dan y ditunjukkan pada gambar 1. dengan dua aturan fuzzy if-then seperti dibawah ini :

Rule 1 : if x is A1 and y is B1 then f1 = p1x + q1y + r1

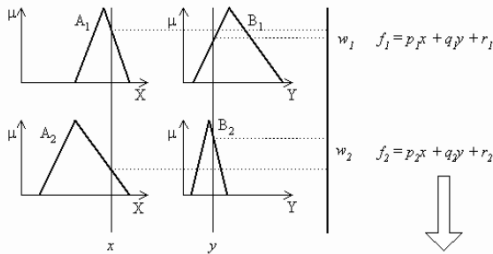
premis consequent

Rule 2 : if x is A2 and y is B2 then f2 = p2x + q2y + r2

premis consequent

Input : x dan y.

Consequent-nya adalah f



Gambar 1 : Sistem inferensi fuzzy TSK dua masukan dengan dua aturan

$$f = \frac{w_1 f_1 + w_2 f_2}{w_1 + w_2}$$

$$= \overline{w_1} f_1 + \overline{w_2} f_2 \quad (5)$$

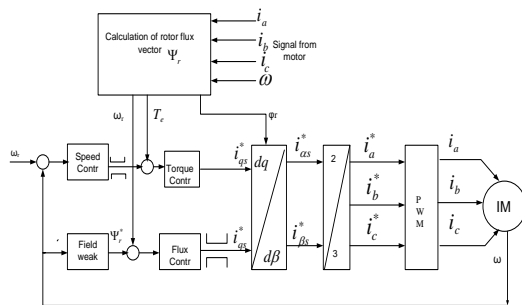
2.3. Fungsi keanggotaan masukan

Fungsi keanggotaan fuzzy masukan (premis) digunakan fungsi Generalized-Bell , untuk menentukan parameter awal a, b, c dan jumlah himpunan fuzzy masukan, parameter premis a,b,c diubah dengan cara pembelajaran. Dinyatakan pada persamaan 6 dibawah ini :

$$gbell(x, a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (6)$$

3. PERANCANGAN

Metode pengendalian yang digunakan didasarkan arus stator dan fluks rotor, dan pengendali vektor *Rotor Fluks Oriented Control*, seperti terlihat pada gambar 3.

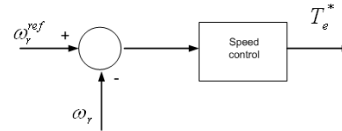


Gambar 3. Diagram blok RFOC dengan Kontrol

Kecepatan

3.1. Pengendali Kecepatan

Pengendali kecepatan menggunakan PI kontroler, yang konstanta kp dan ki ditala dengan *trial error* dan disesuaikan dengan parameter motor. *Adaptif fuzzy* diharapkan dapat menyesuaikan nilai konstanta PI yang ditala bila kecepatan motor dan momen inersia motor diubah dengan beberapa variabel.



Gambar 4. Diagram blok pengendali kecepatan

Keluaran pengendali kecepatan ini torsi elektromagnetik T_e^* , sudut θ_s dan θ_r mengekspresikan perubahan ke sumbu d.

$$T_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} I_m \{I_s \psi_r\} \quad (7)$$

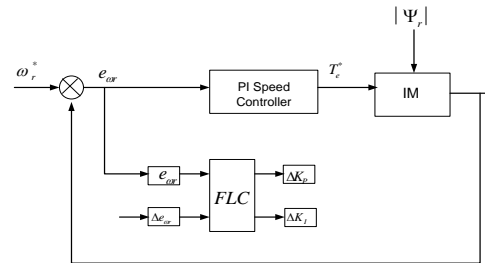
$$\theta_s = \varphi_r; \theta_r = \varphi_r - \theta; \omega_a = \omega_r;$$

$$\omega_r = d\varphi_r / dt \quad (8)$$

3.2 Pengendali fuzzy logic

Pengendali Logika fuzzy untuk *self tuning PI* menggunakan dua buah fuzzy, berfungsi menala konstanta kp dan ki. Masukan kedua fuzzy adalah nilai variable e_ω dan Δe_ω dari nilai konstanta kp dan ki yang diset dengan keluaran fuzzy nilai ΔK_p dan ΔK_i yang akan ditambahkan pada nilai kp dan ki yang telah diset.

Gambar 5. diagram blok FLC untuk menala nilai konstanta PI.



Gambar 5. Fuzzy Self Tuning PI untuk control kecepatan

Metoda yang digunakan pengendali Logika Fuzzy adalah MAMDANI dengan operator AND. Defuzzifikasi menggunakan

metode centroid, dan diharapkan hasil penalaan menghasilkan *error* yang kecil.

3.3 Pendefinisian karakteristik model

Pada pendefinisian karakteristik model ditentukan batas max dan min dari e_ω dan Δe_ω yang telah ditentukan, diharapkan batas max dan min dapat menala gain P dan I seperti yang ditunjukkan tabel 1 dibawah ini :

Tabel 1. Variabel karakteristik model PI

Fungsi	Nama Variabel	Semesta Pembicaraan	Keterangan
Input	error	[(0,0.01)]	nilai error
	delta error	[(0,0.06)]	rata-rata error
Output	delta Kp & delta Ki	[(0,0.06)]	rata-rata nilai Kp

Fungsi keanggotaan pada penelitian ini, untuk fungsi keanggotaan ΔK_p dan ΔK_i menggunakan 9 dan 25 aturan, fungsi keanggotaan akan menala Kp dan Ki dengan trial error, sehingga didapat nilai Kp dan Ki dengan tingkat error kecil.

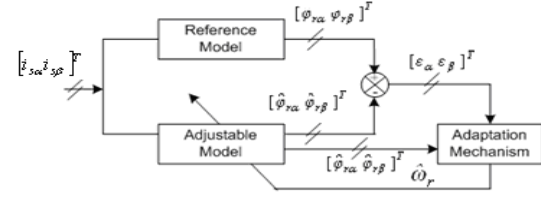
3.4 Proses Pembelajaran

Adaptasi yang dilakukan pada fungsi keanggotaan *masukan*, dengan melakukan akurasi tanggapan sistem terhadap masukan yang diharapkan, dengan cara membuat batas keanggotaan dua kali lipat batas keanggotaan sebelumnya, sehingga mengakibatkan resolusi menurun dengan akurasi dua kalinya.

Adaptasi terhadap fungsi keanggotaan *keluaran* dengan penalaan terhadap fungsi keanggotaannya, dengan pergeseran pusat setiap himpunan keanggotaan yang bertujuan mempercepat proses penyesuaian nilai Kp dan Ki pada parameter motor.

3.5. Model Reference Adaptif System (MRAS)

Algoritma *MRAS* untuk menentukan estimasi kecepatan, model *MRAS* yang digunakan rotor fluks space vector, error antara keluaran kedua sistem yaitu model reference dan model adjustable untuk menala estimasi kecepatan, diagram blok *MRAS* ditunjukkan gambar 6 dibawah ini :



Gambar 6. Model reference adaptive control untuk kontrol kecepatan

Dari gambar 6 terlihat reference model dan adjustable model mendapat masukan tegangan stator V_s dari RFOC, persamaan tegangan reference model dibawah ini:

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_{cr} \\ \dot{\psi}_{\beta s} \end{bmatrix} = \frac{L_r}{L_m} \begin{bmatrix} v_{cs} \\ v_{\beta s} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s + \alpha L_s F & 0 \\ 0 & R_s + \alpha L_s F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cs} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix} \quad (9)$$

dan adjustable model pada persamaan 15

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_{cr} \\ \dot{\psi}_{\beta s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/T_i & -\omega_r \\ \omega_r & -1/T_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{cr} \\ \psi_{\beta r} \end{bmatrix} + \frac{L_r}{L_m} \begin{bmatrix} i_{cs} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix} \quad (10)$$

keluaran reference model dan adjustable model arus i_{cs} dan $i_{\beta s}$ akan menghasilkan ϵ_α dan ϵ_β , dan menjadi masukan pada mekanisme adaptif bersama keluaran adjustable model ψ_{cr} dan $\psi_{\beta s}$. Keluaran mekanisme adaptasi akan menala adjustable model menjadi adaptif.

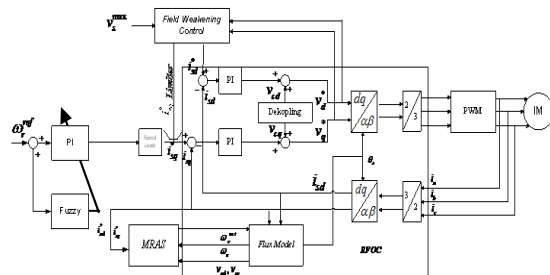
Persamaan estimasi kecepatan rotor dengan kendali PI ditunjukkan persamaan 11.

$$\hat{\omega}_r = K_p \epsilon + K_i \int \epsilon dt \quad (11)$$

$$\hat{\omega}_r = K_p (\epsilon_\beta \hat{\psi}_{r\alpha} - \epsilon_\alpha \hat{\psi}_{r\beta}) + K_i \int_0^t (\epsilon_\beta \hat{\psi}_{r\alpha} - \epsilon_\alpha \hat{\psi}_{r\beta}) dt \quad (12)$$

3.6 Diagram Blok Sistem

Diagram blok sistem ditunjukkan pada gambar 7, di bawah ini:



Gambar 7. Diagram blok system

Sistem diberi masukan kecepatan rotor referensi ω_r^{ref} pada blok pengendali kecepatan, sebelum nilai referensi dikirim ke blok pengendali kecepatan, nilai variabel proposional dan integral diolah melalui proses pembelajaran oleh fuzzy sebagai self tuning PI, diharapkan nilai konstanta PI berubah secara otomatis melalui pembelajaran ketika parameter motor mengalami perubahan rpm, dan keluaran adalah arus referensi i_{sq}^* merupakan masukan RFOC.

Nilai i_{sd}^* diberikan oleh kendali "Filed Weakening" yang mengendalikan Vs agar tidak melampaui tegangan maksimum Vm, dan juga membatasi i_{sq} agar tetap dalam daerah batas arus. Nilai kedua arus referensi dq, dikendalikan oleh PI yang akan mendapat umpan balik dari nilai arus stator aktual sumbu d dan q. Keluaran dari blok

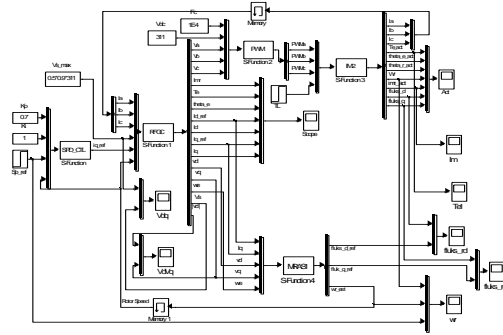
Blok *fluks model* pada RFOC akan melakukan estimasi frekuensi sinkron (ω_e) motor. Yang digunakan blok yang melakukan transformasi $\alpha\beta$ ke dq, diantaranya blok *observer Model reference adaptif system-MRAS* yang akan mengestimasi nilai dari arus, fluks, dan kecepatan motor. Nilai dari kecepatan estimasi akan menjadi nilai umpan balik bagi pengendali kecepatan.

4. SIMULASI

4.1 Simulasi self tuning PI dan observer MRAS

Pengujian rancangan self tuning pengendali PI kontrol kecepatan motor induksi tiga fasa, dilakukan simulasi menggunakan program SIMULINK MATLAB dengan variasi beban dan kecepatan, dan tiga buah motor induksi tiga berdaya 1, 10 dan 50 hp untuk melihat kinerja kerja dari adaptif fuzzy dalam menala kp dan ki.

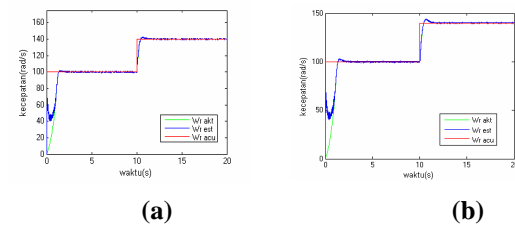
Hal ini juga berlaku untuk pengujian hasil rancangan observer MRAS, dan membandingkan dengan *full order observer*. Blok motor induksi tiga fasa dengan masukan tegangan tiga fasa dari inverter. Arus stator keluaran dari motor dan nilai tegangan dari inverter akan diumpanbalikkan ke blok *observer MRAS*. Umpan balik tersebut memerlukan memori sebelum masuk ke blok *observer MRAS*. Waktu sampling yang digunakan 10^{-4} s.



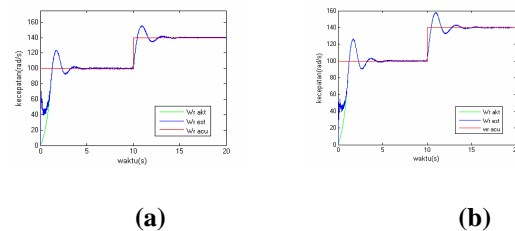
Gambar 8 . Diagram simulasi

4.2 Hasil Simulasi Perbandingan Simulasi Observer MRAS dan Full order

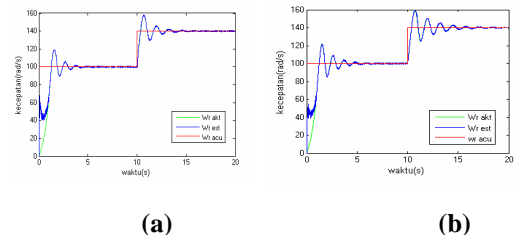
Berikut ini akan diperlihatkan Gambar 8 yang memperlihatkan perbandingan kinerja kedua observer, perbandingan ditunjukkan dengan membandingkan respon dari kecepatan rotor (ω_r), fluks sumbu d (ψ_d), fluks sumbu q (ψ_q) dan Torsi (Te) untuk kedua observer



Gambar 9 : Motor 1hp dengan (a) MRAS dan(b) Full Order observer



Gambar 10 : Motor 10 hp dengan (a) MRAS dan (b) Full Order observer



Gambar 11 : Motor 50 hp dengan (a) MRAS

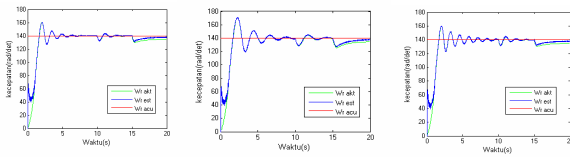
dan (b) Full Order observer

Dari hasil simulasi pada gambar 9-11 dapat dilihat kinerja *observer MRAS*, respon kecepatan motor untuk daya motor 1 hp, pada detik kedua dan ke 13 tidak terjadi *overshoot*, seperti pada *observer full order*, untuk daya motor 10 hp dan 50 hp, pada *observer MRAS* terlihat *ripple* yang terjadi lebih sedikit dan waktu mantap lebih singkat.

4.3 Simulasi Perubahan Parameter Momen Inersia

Pada simulasi ini dilakukan perubahan nilai momen inersia pada motor 1, 10 dan 50 hp, yaitu saat t=0 momen inersia $J = 0.005 \text{ kgm}^2$, pada detik ke5, $J = 0.01 \text{ kgm}^2$ detik ke10 $J = 0.2 \text{ kgm}^2$, dan didetik ke 15 $J = 1 \text{ kgm}^2$ dan saat didetik ke 20, momen inersianya sesuai dengan parameter motor induksi $J = 0.0436, 0.05$ dan 1.622 kgm^2 .

Gambar 12 memperlihatkan respon motor 1, 10 dan 50 hp dengan perubahan momen inersia.



(a) motor 1 hp (b) motor 10 hp (c) motor 50 hp

Gambar 12. Kecepatan motor dengan perubahan momen inersia.

Tabel 2. Data motor dengan daya 1, 10 dan 50 hp

Daya hp	1	10	50 P
Jumlah Pasang Kutub(Np)	2	2	2
Resistansi Stator (Rs)-ohm	2.76	0.6	0.087
Resistansi Rotor (Rr)ohm	2.90	0.4	0.228
Induktansi Stator (Ls)-H	0.2349	0.123	0.0355
Induktansi Rotor (Lr)-H	0.2349	0.1274	0.0355
Induktansimagnetik(Lm)H	0.2279	0.12	0.0347
Momen Inersia (J)-Kgm ²	0.0436	0.05	1.622
Koef. Gesek(f) Nms	0.0005	0.005	0.1

KESIMPULAN

Adapun kesimpulan percobaan ini sebagai berikut:

- 1 Pengendali PI *adaptif fuzzy* dapat

menala gain $k_p = 0.375$ dan $k_i = 0.95$ dengan daya motor 1, 10 dan 50 hp.

- 2 Pada motor 1 hp dengan *Observer MRAS* tidak terjadi *overshoot* pada detik kedua seperti pada respon dengan *full order observer* terjadi *overshoot*.
- 3 Waktu *settle* untuk ketiga jenis motor lebih cepat dicapai pada sistem yang menggunakan *observer MRAS*
- 4 Pada motor 50 hp, respon kecepatan dengan menggunakan *observer MRAS* tidak menunjukkan banyaknya *ripple* sebelum mencapai keadaan tunak pada $t = 13$ detik, dibandingkan *Observer full order*.
- 5 Dengan parameter motor yang sama, motor dengan nilai momen inersia besar memiliki putaran lebih stabil dibanding dengan motor dengan nilai momen inersia kecil.
- 6 Dalam percobaan dengan motor 1, 10 dan 50 hp, nilai momen inersia terbaik berturut-turut adalah $1 \text{ kgm}^2, 2$ dan 5 kgm^2 .

DAFTAR PUSTAKA

1. Yusivar, Fery dan S. Wakao, *Minimum Requirements of Motor Vector Control Modeling and Simulation Utilizing C MEX S-function in MATLAB/SIMULINK*, IEEE journal, 2001..
2. S.-H. Kim, S.-K. Sul, *Voltage Control Strategy for Maximum Torque Operation of an Induction Machine in the Field Weakening region*, IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 44, hal. 512-518, Aug. 1997.
3. Vas, Peter, *Electric Machine and Drives: A Space Vector Theory Approach*, Oxford University, New York, 2003.
4. J-SRIang, C-T Sun and E Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Prentice-Hall International, Inc, 1997.
5. Truc Pham-Dinh, *Effects Of Iron Loss On Adaptive Speed Control In Rotor Flux Oriented Control Of Induction Motor*, Vietnam National University, 2007.
6. Youssef Agrebi, *Moncef Triki, Rotor speed estimation for indirect stator flux oriented induction motor drive based on MRAS scheme*, J. Electrical Systems 3-3, 2007.