

LAMPIRAN A

PERBANDINGAN SISTEM PENGENDALIAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA DENGAN METODE FIELD ORIENTED CONTROL MENGGUNAKAN PI CONTROLLER DAN FUZZY LOGIC CONTROLLER

Gafur Nugroho^[1]
Ir. Tejo Sukmadi, MT.^[2]
Susatyo Handoko, ST., M.T.^[2]

Abstrak

Seiring dengan persaingan di dunia industri, kebutuhan akan peralatan produksi yang tepat mutlak dibutuhkan agar dapat meningkatkan efisiensi biaya dan waktu. Sebagian besar peralatan yang ada di industri menggunakan mesin listrik sebagai penggerak utama. Pemilihan mesin listrik atau motor listrik menjadi sangat penting bagi industri besar, karena sebagian besar peralatan dalam proses produksi menggunakan penggerak motor listrik.

Pada mulanya motor DC lebih banyak digunakan pada aplikasi penggunaan mesin listrik yang membutuhkan pengaturan kecepatan dan torsi di industri, karena pada motor DC, fluks dan torsi dapat dengan mudah diatur, yaitu dengan mengubah arus medan atau arus jangkarnya. Namun, seiring perkembangan peralatan elektronika daya, motor induksi menjadi motor listrik yang banyak dimanfaatkan pada industri-industri, karena perkembangan teknologi pengaturan menjadi semakin berkembang, salah satunya adalah dengan metode Field Oriented Control, suatu metode pengaturan kecepatan motor induksi dengan mengatur arus medan dan arus torsi yang dilakukan secara terpisah seperti halnya pada motor DC.

Dan seiring dengan perkembangan metode pengaturan kecepatan mesin listrik, semakin berkembang pula jenis controller yang ada. Di antaranya adalah PI controller dan fuzzy logic controller (FLC).

Kata kunci: mesin listrik, motor induksi, field oriented control, PI controller, fuzzy logic controller.

I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sejalan dengan persaingan di dunia industri, kebutuhan akan peralatan produksi yang tepat mutlak dibutuhkan agar dapat meningkatkan efisiensi biaya dan waktu. Sebagian besar peralatan yang ada di industri menggunakan mesin listrik sebagai penggerak utama.

Pada mulanya motor DC lebih banyak digunakan pada aplikasi penggunaan mesin listrik yang membutuhkan pengaturan kecepatan dan torsi di industri, karena pada motor DC, fluks dan torsi dapat dengan mudah diatur, yaitu dengan mengubah arus medan atau arus jangkarnya. Namun motor DC membutuhkan perawatan yang intensive karena memiliki komutator dan sikat arang (*brush*), selain itu harganya relatif lebih mahal jika dibandingkan dengan motor induksi. Konstruksi motor induksi lebih sederhana dibandingkan dengan motor DC, tidak ada bagian stator yang berhubungan atau bersentuhan dengan rotor, sehingga tidak membutuhkan komutator dan sikat arang. Karena itu pemeliharaan motor induksi hanya bagian mekanik saja.

Akan tetapi, dalam hal pengaturan kecepatan dan torsi motor induksi bukanlah suatu hal yang

mudah. Namun, seiring dengan perkembangan peralatan elektronika daya, maka teknologi pengaturan kecepatan mesin listrik semakin berkembang pula. Salah satunya adalah metode *Field Oriented Control*, suatu metode pengaturan kecepatan motor induksi dengan mengatur arus medan dan arus torsi yang dilakukan secara terpisah seperti halnya pada motor DC.

Seiring dengan perkembangan metode pengaturan kecepatan mesin listrik, semakin berkembang pula jenis controller yang ada. Di antaranya adalah *PI controller* dan *fuzzy logic controller* (FLC).

1.2 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Untuk mengetahui nilai rise time, steady state, overshoot, arus starting serta torsi dari pengendalian motor induksi 3 fasa menggunakan *Field Oriented Control*.
2. Untuk membandingkan sistem pengaturan dengan FOC menggunakan *PI controller* dan FOC menggunakan FLC.

[1] mahasiswa di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro (Undip) Semarang

[2] dosen di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro (Undip)

1.3 Pembatasan Masalah

Untuk menyederhanakan permasalahan dalam Tugas Akhir ini maka diberikan batasan-batasan sebagai berikut :

1. *Plan* yang dikontrol adalah motor induksi 3 fasa tipe rotor sangkar tupai (*squirrel cage rotor*)
2. Simulasi yang dilakukan pada kondisi *steady state*.
3. Kontroller yang digunakan adalah *PI controller* dan *fuzzy logic controller (FLC)* menggunakan metode mamdani.

II DASAR TEORI

2.1 Motor Induksi^[3]

2.1.1 Konstruksi

Konstruksi motor induksi secara detail terdiri atas dua bagian, yaitu: bagian stator dan bagian rotor . Stator adalah bagian motor yang diam terdiri: badan motor, inti stator, belitan stator, *bearing*, dan *terminal box*. Bagian rotor adalah bagian motor yang berputar, terdiri atas rotor sangkar, dan poros rotor. Konstruksi motor induksi tidak memiliki komutator dan sikat arang.

Ada dua jenis rotor pada motor induksi, yaitu jenis rotor sangkar tupai (*squirrel-cage rotor*) dan rotor belitan (*wound rotor*). Kedua rotor ini mempunyai konstruksi stator dan prinsip kerja yang sama.

2.1.2 Prinsip Kerja Motor Induksi^[4]

Jika pada belitan stator diberi tegangan tiga fasa, maka pada stator akan dihasilkan arus tiga fasa. Arus ini akan mengalir melalui belitan yang akan menimbulkan fluks dan karena adanya perbedaan sudut fasa sebesar 120^0 antara ketiga fasanya, maka akan timbul medan putar, dengan kecepatan sinkron n_s ,

$$n_s = \frac{120f}{p} \text{ (rpm)} \quad (2.1)$$

dengan n_s : kecepatan sinkron, f : frekuensi, dan p : jumlah kutub

Dalam stator sendiri akan timbul tegangan pada masing-masing fasa yang dinyatakan:

$$E_1 = 4,41fN_1\Phi \quad (2.2)$$

Dalam keadaan rotor masih diam, medan putar stator akan memotong batang konduktor pada rotor. Akibatnya pada kumparan rotor timbul tegangan induksi (e_{gl}) sebesar E_2 :

$$E_2 = 4,41fN_2\Phi_m \quad (2.3)$$

Dengan keterangan:

E_1 : tegangan stator

E_2 : tegangan rotor

N_1 : jumlah kumparan stator

N_2 : jumlah kumparan rotor

Φ_m : fluks maksimum

Perbedaan kecepatan sinkron medan putar stator (n_s) dan kecepatan rotor (n_r) disebut slip. Besarnya slip yang terjadi adalah,

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} 100\% \quad (2.4)$$

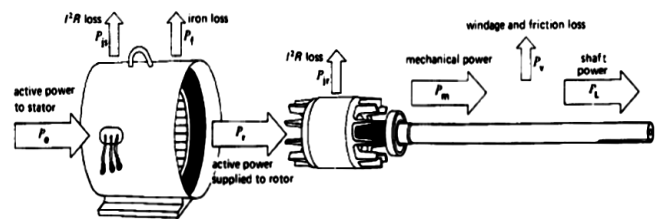
dengan s : slip motor, n_s : kecepatan stator, n_r : kecepatan rotor.

Pada saat rotor dalam keadaan berputar, besarnya tegangan yang terinduksi pada kumparan rotor akan bervariasi tergantung besarnya slip, dan tegangan induksi ini dinyatakan dengan E_{2s} .

$$E_{2s} = 4,41sfN_2\Phi_m \quad (2.5)$$

dengan E_{2s} : tegangan rotor saat keadaan berputar, sf sama dengan f_2 : frekuensi rotor.

2.1.3 Aliran Daya Aktif Motor Induksi^[4]



Gambar 1 Aliran daya pada motor induksi

Kita dapat mengidentifikasi dan menghitung tiga hal penting dari motor induksi tiga fasa berdasarkan diagram aliran daya pada gambar 1, yaitu efisiensi, daya dan torsi dari motor induksi.

1. **Efisiensi.** Dari definisinya, efisiensi merupakan rasio dari daya *output* dengan daya input, di rumuskan dalam persamaan sebagai berikut:

$$\text{efisiensi}(\eta) = \frac{P_L}{P_e} \quad (2.6)$$

2. **Rugi-rugi I^2R pada rotor.** Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.14, rugi-rugi I^2R pada rotor (P_{jr}) berhubungan dengan daya input rotor P_r , dan digambarkan melalui persamaan berikut:

$$P_{jr} = sP_r \quad (2.7)$$

3. **Daya Mekanik.** Daya mekanik P_m yang dihasilkan oleh motor sama dengan daya yang dikirim pada rotor dikurangi rugi-rugi pada rotornya.

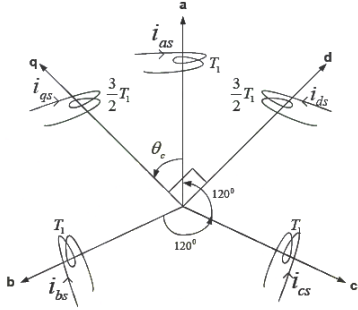
$$P_m = (1 - s)P_r \quad (2.8)$$

4. **Torsi Motor.** Torsi, T_m dihasilkan oleh motor pada semua atau berapapun kecepatan motornya, dengan persamaan:

$$T_m = \frac{9,55P_r}{n_s} \quad (2.9)$$

2.3 Transformasi Tiga Fasa ke Dua Fasa

Model dinamik motor induksi tiga fasa diturunkan dari mesin dua fasa. Kedua model ini ekivalen karena kumparan pada dua fasa dan tiga fasa menghasilkan *mmf* (*magnetomotive force*) dan arus yang sama. Gambar 4 menunjukkan kumparan dua fasa dan tiga fasa.



Gambar 2 Kumparan stator motor dua fasa dan tiga fasa

Mmf pada sumbu d-q didapat dengan memproyeksikan mmf tiga fasa pada sumbu d-q. Dimisalkan sumbu q tertinggal θ_c dari sumbu a, maka hubungan antara arus fasa d-q dengan abc adalah:

$$\begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & \cos \left(\theta_c - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_c + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \theta_c & \sin \left(\theta_c - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta_c + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Persamaan (2.10) dituliskan dengan:

$$i_{qd0} = [T_{abc}] i_{abc} \quad (2.11)$$

Dengan

$$i_{qd0} = [i_{qs} \quad i_{ds} \quad i_o]^t \quad (2.12)$$

$$i_{abc} = [i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs}]^t \quad (2.13)$$

Dan variabel transformasi dari fasa abc ke fasa d-q adalah:

$$[T_{abc}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_c & \cos \left(\theta_c - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_c + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \theta_c & \sin \left(\theta_c - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta_c + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Transformasi dari arus dua fasa ke arus tiga fasa adalah

$$i_{abc} = [T_{abc}]^{-1} i_{qd0} \quad (2.15)$$

$$[T_{abc}]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c & 1 \\ \cos \left(\theta_c - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta_c - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left(\theta_c + \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta_c + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Jika sumbu q pada gambar 4 berimpit dengan fasa α ($\theta_c = 0$), maka transformasi dari sumbu abc ke sumbu d-q menjadi seperti pada persamaan (2.17). kondisi seperti ini disebut model *stator reference-frames*.

$$T_{abc}^s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Sehingga untuk tegangan pada dua fasa:

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_o \end{bmatrix} = T_{abc}^s \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

sehingga,

$$v_{qs} = \frac{2}{3} [v_{as} - 1/2(v_{bs} + v_{cs})] \quad (2.20)$$

Untuk sistem tiga fasa yang seimbang, berlaku:

$$v_{as} + v_{bs} + v_{cs} = 0 \quad (2.21)$$

maka,

$$(v_{bs} + v_{cs}) = -v_{as} \quad (2.22)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.22) ke dalam persamaan (2.20) didapatkan tegangan quadrature stator (v_{qs}) menjadi:

$$v_{qs} = \frac{2}{3} [3/2 v_{as}] = v_{as} \quad (2.23)$$

Dengan cara yang sama, didapatkan

$$v_{ds} = \frac{1}{\sqrt{3}} (v_{cs} - v_{bs}) = \frac{1}{\sqrt{3}} v_{cb} \quad (2.24)$$

Dari persamaan (2.23) dan (2.24) didapatkan hubungan tegangan stator mesin dua fasa dengan mesin tiga fasa. Transformasi ini berlaku juga untuk arus dan juga fluks. Dengan demikian:

$$i_{qs} = i_{as} \quad (2.25)$$

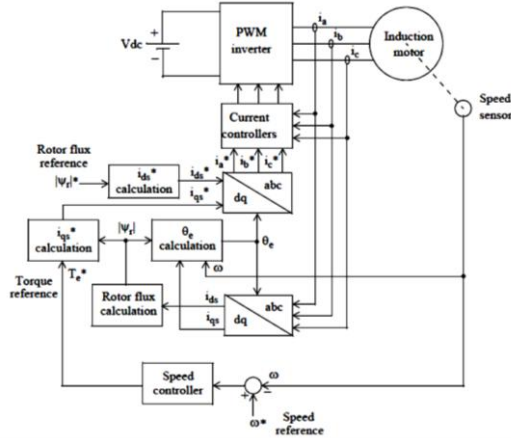
$$i_{ds} = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{cs} - i_{bs}) \quad (2.26)$$

2.4 Prinsip Kerja Field Oriented Control

Field Oriented Control adalah^[8] suatu metode pengaturan medan pada motor AC, di mana

dari sistem coupled diubah menjadi sistem *decoupled*. Dengan 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.

Pada Pengaturan ini, kecepatan dari motor dimonitor oleh suatu sensor, bisa juga menggunakan tachometer. Kecepatan motor diumpun balikkan kemudian dibandingkan dengan kecepatan referensi oleh suatu komparator. Bila ada error, kemudian error tersebut menjadi input dari kontroller. Selanjutnya kontroller memberikan sinyal kepada sistem FOC, yang akan diteruskan ke rangkaian penyalan dari inverter untuk mengubah tegangan dan arus motor, sehingga diperoleh suatu torsi yang diinginkan. Perubahan torsi ini akan mengubah kecepatan motor sehingga bisa mendekati kecepatan referensi.



Gambar 3 Diagram blok sistem pengaturan kecepatan motor induksi dengan FOC^[9]

Dilihat dari skema atau diagram blok sistem pengaturan kecepatan motor induksi dengan FOC (*Field Oriented Control*)^[9], inverter beroperasi sebagai sumber arus tiga fasa yang kemudian akan menjadi sumber yang akan menggerakkan motor induksi tiga fasa.

Fluks rotor dan torsi dapat dikontrol secara terpisah oleh arus stator *direct-axis* (i_{ds}) dan arus *quadratur-axis* (i_{qs}), secara berurutan. Besar arus *quadratur-axis* referensi i_{qs}^* dapat dihitung dengan torsi referensi T_e^* menggunakan persamaan berikut,

$$i_{qs}^* = \frac{2}{3} \cdot \frac{2}{P} \cdot \frac{L_r}{L_m} \cdot \frac{T_e^*}{\lambda_r^*} \quad (2.27)$$

Dengan L_r adalah induktansi rotor, L_m adalah induktansi mutual, dan λ_r adalah *fluks linkage* rotor estimasi, yang diperoleh dari persamaan berikut,

$$\lambda_r = \frac{L_m i_{ds}}{1 + \tau_r s} \quad (2.28)$$

dengan $\tau_r = L_r / R_r$ adalah konstanta waktu rotor.

Besarnya arus *direct-axis* stator referensi i_{ds}^* adalah tergantung dari input fluks referensi λ_r^* , yaitu

$$i_{ds}^* = \frac{\lambda_r^*}{L_m} \quad (2.29)$$

Sudut fluks rotor θ_e untuk transformasi koordinat diperoleh dari perhitungan antara kecepatan putaran rotor ω_m dan kecepatan slip ω_{sl} , dengan persamaan,

$$\theta_e = \int (\omega_m + \omega_{sl}) dt \quad (2.30)$$

Kecepatan slip diperoleh dari perhitungan arus stator referensi i_{qs}^* dengan parameter motor,

$$\omega_{sl} = \frac{L_m}{\lambda_r^*} \cdot \frac{R_r}{L_r} \cdot i_{qs}^* \quad (2.31)$$

Arus referensi i_{qs}^* dan i_{ds}^* dikonversi ke dalam arus sefasa referensi i_{as}^* , i_{bs}^* , i_{cs}^* yang akan menjadi input regulator arus. Kemudian regulator arus akan memproses arus fasa referensi menjadi sinyal pemecuan yang akan mengontrol inverter.

Sedangkan persamaan yang digunakan untuk mengubah sistem 3 fasa ke sistem dua fasa adalah,

$$\begin{bmatrix} i_{as}^* \\ i_{bs}^* \\ i_{cs}^* \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} i_{ds}^* \\ i_{qs}^* \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

dengan

$$A = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0^*) & -\sin(\theta_0^*) \\ -1/2 \cos(\theta_0^*) + \sqrt{3}/2 \sin(\theta_0^*) & 1/2 \sin(\theta_0^*) + \sqrt{3}/2 \cos(\theta_0^*) \\ -1/2 \cos(\theta_0^*) - \sqrt{3}/2 \sin(\theta_0^*) & 1/2 \sin(\theta_0^*) - \sqrt{3}/2 \cos(\theta_0^*) \end{bmatrix}$$

Dan sebaliknya, persamaan yang digunakan untuk mengubah sistem dua fasa ke tiga fasa kembali adalah,

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Dengan

$$B = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0^*) & -1/2 \cos(\theta_0^*) + \sqrt{3}/2 \sin(\theta_0^*) & -1/2 \cos(\theta_0^*) - \sqrt{3}/2 \sin(\theta_0^*) \\ -\sin(\theta_0^*) & 1/2 \sin(\theta_0^*) + \sqrt{3}/2 \cos(\theta_0^*) & 1/2 \sin(\theta_0^*) - \sqrt{3}/2 \cos(\theta_0^*) \end{bmatrix}$$

2.5 Kontroler PI

Kontroler PI adalah gabungan antara kontroler proporsional dan kontroler integral. Di mana karakteristik dari kontroler proporsional adalah mengurangi rise time, menambah overshoot, dan mengurangi steady state error. Sedangkan kontroler integral memiliki karakteristik mengurangi rise time, menambah overshoot dan settling time, serta menghilangkan steady state error.

Kontroler P dan I memiliki karakteristik yang sama dalam hal *rise time* dan overshoot. Oleh karena itu, nilai K_p harus dikurangi untuk menghindari *overshoot* yang berlebihan. Nilai K_i diambil lebih besar dari K_p , karena diinginkan untuk meniadakan *steady state error*.

Dalam waktu kontinyu, sinyal keluaran kontroler PI dirumuskan sebagai berikut.^[13]

$$co(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right) \quad (2.34)$$

fungsi alih kontroler PI (dalam domain s) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$CO(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} \right] e(s) \quad (2.35)$$

Keterangan:

- $co(t)$ = sinyal keluaran kontroler PI
- K_p = konstanta proporsional
- K_i = konstanta integral
- T_i = waktu integral
- $e(t)$ = sinyal *error* = referensi-keluaran *plant*

2.6 Fuzzy Logic Controller

2.6.1 Operator Dasar Zadeh untuk Operasi Himpunan Fuzzy

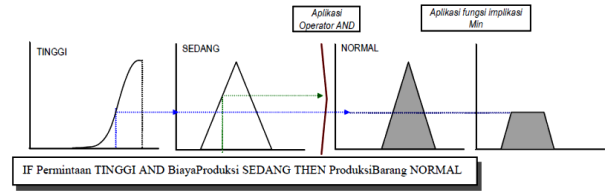
Ada tiga operator dasar yaitu:

- a. Operator *And*
Operasi dengan operator *AND* diperoleh dengan mengambil nilai keanggotaan terkecil antara elemen pada himpunan-himpunan yang bersangkutan.
- b. Operator *OR*
Operasi dengan operator *OR* diperoleh dengan mengambil nilai keanggotaan terbesar antara elemen pada himpunan-himpunan yang bersangkutan.
- c. Operator *NOT*
Operasi dengan operator *NOT* diperoleh dengan mengurangi nilai keanggotaan elemen pada anggota himpunan dengan 1.

2.6.2 Fungsi Implikasi

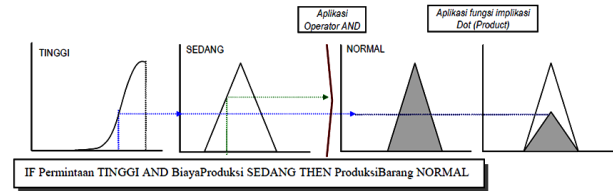
Secara umum, ada 2 fungsi implikasi yang dapat digunakan, yaitu:

1. Min (*minimum*). Fungsi ini akan memotong *output* himpunan fuzzy.



Gambar 4 Fungsi implikasi: MIN

2. Dot (*product*). Fungsi ini akan menskala *output* himpunan fuzzy



Gambar 5 Fungsi implikasi: DOT

2.6.3 Sistem Inferensi Fuzzy

A. Metode Tsukamoto

Pada Metode Tsukamoto, setiap konsekuen pada aturan yang berbentuk *IF-Then* harus direpresentasikan dengan suatu himpunan fuzzy dengan fungsi keanggotaan yang monoton. Sebagai hasilnya, *output* hasil inferensi dari tiap-tiap aturan diberikan secara tegas (*crisp*) berdasarkan α -predikat (*fire strength*). Hasil akhirnya diperoleh dengan menggunakan rata-rata terbobot.

B. Metode Mamdani

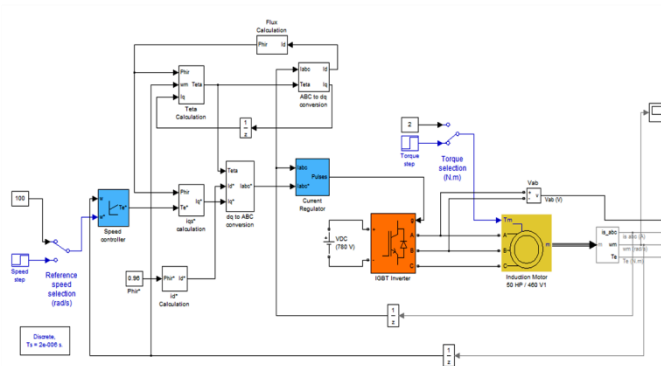
Metode Mamdani sering juga dikenal dengan nama Metode Max-Min. Metode ini diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani pada tahun 1975. Untuk mendapatkan *output*, diperlukan 4 tahapan:

1. Pembentukan Himpunan Fuzzy
2. Aplikasi fungsi implikasi (aturan)
3. Komposisi aturan
4. Penegasan (*defuzzy*)

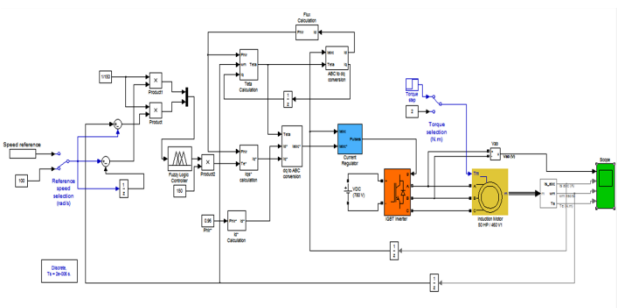
III DESIGN DAN IMPLEMENTASI KONTROL FUZZY DAN KONTROL PI PADA PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI DENGAN FOC

3.1 Model Rangkaian Simulasi

Model rangkaian simulasi pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan metode FOC (*Field Oriented Control*) dapat dilihat pada gambar 6 dan 7



Gambar 6 Blok simulink sistem FOC dengan kontrol PI

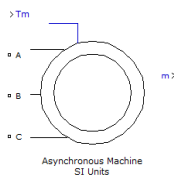


Gambar 7 Blok simulink sistem FOC dengan *fuzzy logic controller*

3.2 Model Komponen Simulasi

3.2.1 Model Motor Induksi Tiga Fasa

Model simulasi mesin induksi yang digunakan merupakan blok *Asynchronous machine* (mesin induksi) dengan *squirrel cage* (motor induksi rotor sangkar tupai).



Gambar 8 Blok motor induksi tiga fasa

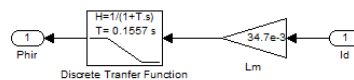
Dalam tugas akhir ini, parameter motor induksi yang digunakan adalah seperti terlihat pada tabel 3.1,

Tabel 3.1 Data parameter mesin induksi

Data Motor Induksi	
Daya	50 Hp
V_{L-L}	460 volt
Frekuensi	60 Hz
R_s	0.087 Ω
L_{ls}	0.8 mH
R_r	0.228 Ω
L_{lr}	0.8 mH
L_m	34.7 mH
Inertia	1.662 $kg.m^2$
pole	2
Friction Factor	0.1

3.2.2 Model Flux Calculation

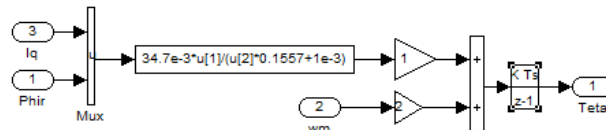
Blok ini digunakan untuk menghitung fluks rotor pada motor induksi. Persamaan yang digunakan pada blok ini adalah persamaan 2.28.



Gambar 9 Blok model subsystem *flux calculation*

3.2.3 Model Teta Calculation (θ_e)

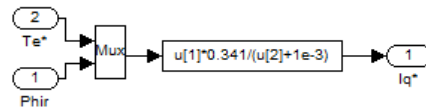
Blok ini berfungsi untuk mengetahui sudut fasa dari putaran medan rotor. Persamaan yang digunakan adalah persamaan 2.30 dan 2.31.



Gambar 10 Blok model subsystem *teta calculation*

3.2.4 Model i_{qs}^* Calculation

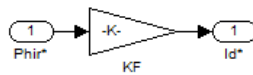
Blok ini digunakan untuk menghitung arus kuadratur-axis referensi (i_{qs}^*). Pada perhitungan i_{qs}^* ini, digunakan persamaan 2.27



Gambar 11 Blok subsystem i_{qs}^* calculation

3.2.5 Model i_{ds}^* Calculation

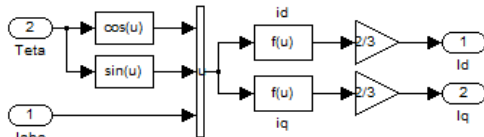
Blok ini digunakan untuk menghitung arus *direct-axis* referensi (i_{ds}^*). Pada perhitungan i_{ds}^* ini, digunakan persamaan 2.28



Gambar 12 Blok subsystem i_{ds}^* calculation

3.2.6 Model Transformasi abc ke dq

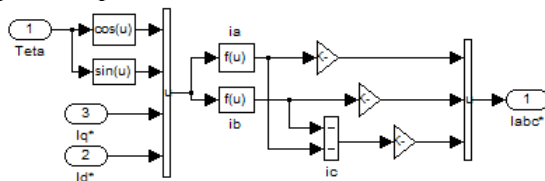
Blok ini digunakan untuk mentransformasikan dari sistem tiga fasa abc, ke sistem dua fasa d, q. Blok ini menggunakan persamaan 2.32.



Gambar 13 Blok subsystem transformasi abc ke dq

3.2.7 Model Transformasi dq ke abc

Blok ini digunakan untuk mentransformasikan dari sistem dua fasa dq ke sistem tiga fasa abc. Untuk mentransformasikan sistem dua fasa dq ke sistem tiga fasa abc, digunakan persamaan 2.33.



Gambar 3.14 Blok subsystem transformasi dq ke abc

3.2.8 Model Fuzzy Logic Controller

Metode *fuzzy logic controller* yang digunakan dalam simulasi ini adalah dengan menggunakan metode mamdani.

Pada metode mamdani, fungsi implikasi yang digunakan adalah MIN, dan komposisi aturannya menggunakan MAX,. Pada simulasi ini, metode defuzzification yang digunakan adalah metode centroid.

Aturan dasar (*rule base*) yang digunakan dalam kontroller fuzzy pada simulasi ini ditunjukkan oleh tabel berikut,

Tabel 3.2 Aturan dasar (*rule base*) fuzzy logic controller

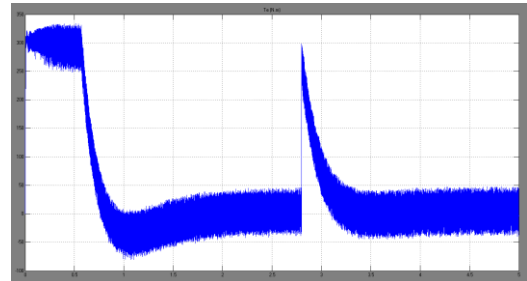
e_{ce}	VS	S	MS	M	MB	B	VB
VS	VS	VS	VS	VS	S	MS	M
S	VS	VS	VS	S	MS	M	MB
MS	VS	VS	S	MS	M	MB	B
M	VS	S	MS	M	MB	B	VB

MB	S	MS	M	MB	B	VB	VB
B	MS	M	MB	B	VB	VB	VB
VB	M	MB	B	VB	VB	VB	VB

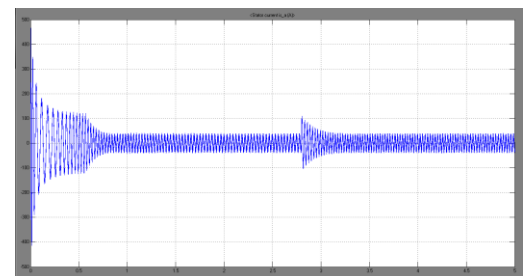
IV HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

4.1 Simulasi *Field Oriented Control* dengan *PI Controller*

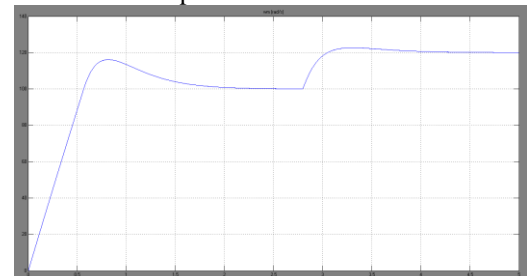
4.1.1 Simulasi Tanpa Beban dengan *PI Controller*



Gambar 4.1 Torsi elektrik motor pada simulasi kecepatan berubah tanpa beban FOC *PI controller*



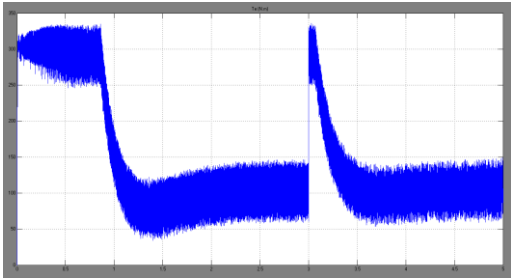
Gambar 4.2 Arus stator ($i_{s,a}$) pada simulasi kecepatan berubah tanpa beban FOC *PI controller*



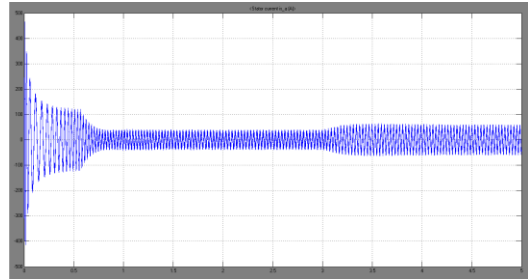
Gambar 4.3 Kecepatan rotor (ω_r) pada simulasi kecepatan berubah tanpa beban FOC *PI controller*

4.1.2 Simulasi dengan Beban Tetap, *PI Controller*

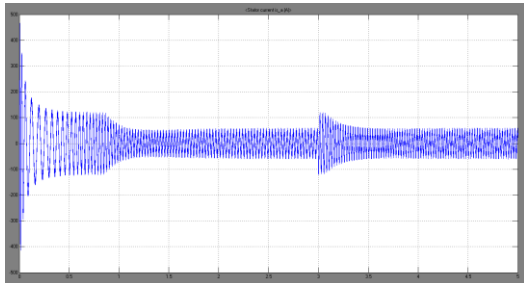
Pada simulasi ini, nilai ω_{ref} awal adalah 100 rad/s, kemudian berubah menjadi 120 rad/s pada $t=3$ s. Besarnya Torsi beban mekanik (T_m) adalah 100 N.m.



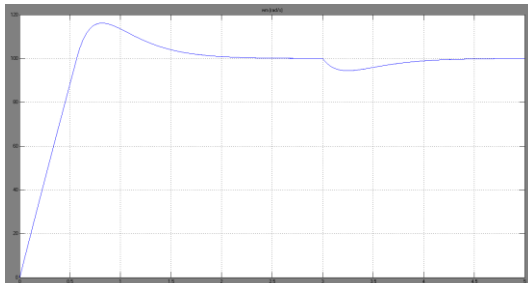
Gambar 4.4 Torsi elektrik motor pada simulasi kecepatan berubah dengan beban tetap, FOC *PI controller*



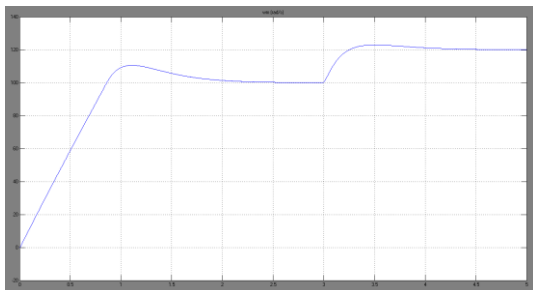
Gambar 4.8 Arus stator (i_{s_a}) pada simulasi kecepatan tetap dengan beban berubah FOC *PI controller*



Gambar 4.5 Arus stator (i_{s_a}) pada simulasi kecepatan berubah dengan beban tetap FOC *PI controller*



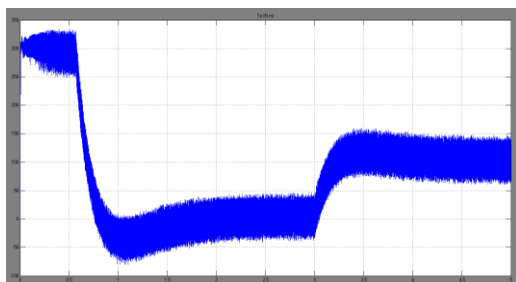
Gambar 4.9 Kecepatan rotor (ω_r) pada simulasi kecepatan tetap dan beban berubah, FOC *PI controller*



Gambar 4.6 Kecepatan rotor (ω_r) pada simulasi kecepatan berubah dan beban tetap, FOC *PI controller*

4.1.3 Simulasi dengan Beban Berubah, *PI Controller*

Pada simulasi ini, nilai ω_{ref} awal 100 rad/s. Besarnya torsi beban mekanik (T_m) adalah 0 N.m kemudian pada $t=3s$, torsi beban diubah menjadi 100 N.m.

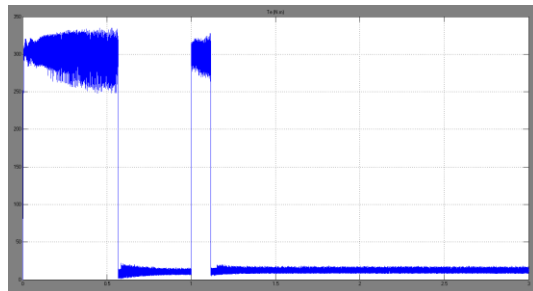


Gambar 4.7 Torsi elektrik motor pada simulasi kecepatan tetap dengan beban berubah, FOC *PI controller*

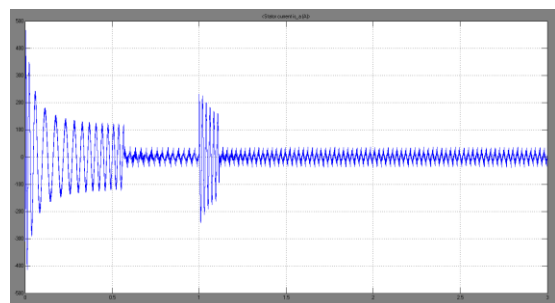
4.2 Simulasi *Field Oriented Control* dengan *Fuzzy Logic Controller* (FLC)

4.2.1 Simulasi Tanpa Beban dengan FLC

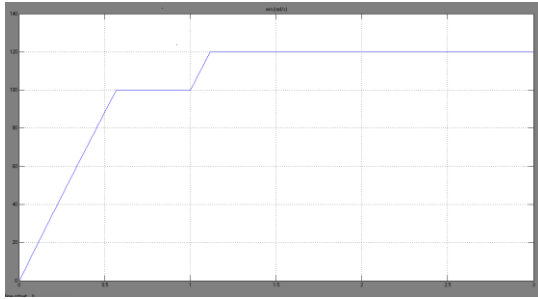
Pada simulasi ini, nilai ω_{ref} awal adalah 100 rad/s, kemudian berubah menjadi 120 rad/s pada $t=1$ s. Besarnya Torsi beban mekanik (T_m) adalah 0 N.m.



Gambar 4.10 Torsi elektrik motor pada simulasi kecepatan berubah tanpa beban FOC *fuzzy logic controller*



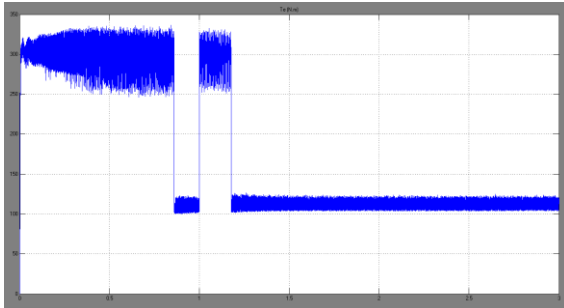
Gambar 4.11 Arus stator (i_{s_a}) pada simulasi kecepatan berubah tanpa beban FOC *fuzzy logic controller*



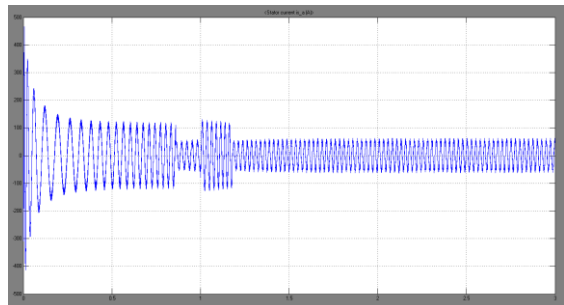
Gambar 4.12 Kecepatan rotor (ω_r) pada simulasi kecepatan berubah tanpa beban FOC *fuzzy logic controller*

4.2.2 Simulasi Kecepatan Berubah dengan Beban Tetap dengan FLC

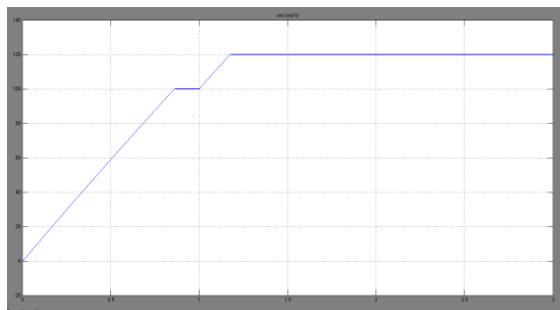
Pada simulasi ini, nilai ω_{ref} awal adalah 100 rad/s, kemudian berubah menjadi 120 rad/s pada $t=1$ s. Besarnya Torsi beban mekanik (T_m) adalah 100 N.m.



Gambar 4.13 Torsi elektrik motor pada simulasi kecepatan berubah dan beban tetap, FOC *fuzzy logic controller*



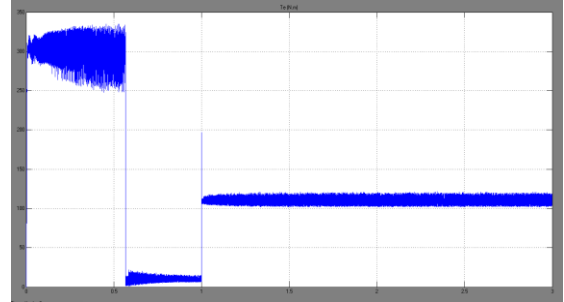
Gambar 4.14 Arus stator (i_{s_a}) pada simulasi kecepatan berubah dan beban tetap, FOC *fuzzy logic controller*



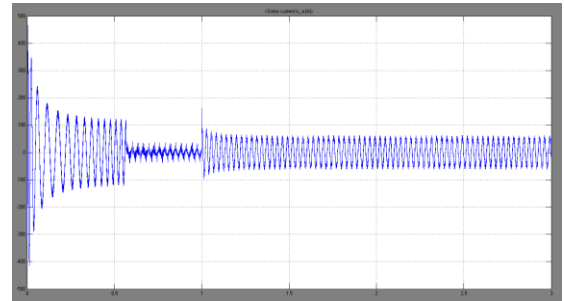
Gambar 4.15 Kecepatan rotor (ω_r) pada simulasi kecepatan berubah dan beban tetap, FOC *fuzzy logic controller*

4.2.3 Simulasi Beban Berubah dengan FLC

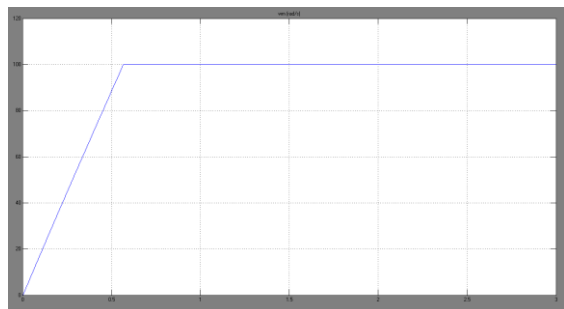
Pada simulasi ini, nilai ω_{ref} adalah 100 rad/s dan T_m adalah 0 N.m. yang kemudian dinaikkan menjadi 100 N.m.



Gambar 4.16 Torsi elektrik motor pada simulasi kecepatan tetap dan beban berubah, FOC *fuzzy logic controller*



Gambar 4.17 Arus stator (i_{s_a}) pada simulasi kecepatan tetap dan beban berubah, FOC *fuzzy logic controller*



Gambar 4.18 Kecepatan rotor (ω_r) pada simulasi kecepatan tetap dan beban berubah, FOC *fuzzy logic controller*

4.3 Perbandingan Performansi FOC dengan PI Controller dan Fuzzy Logic Controller

4.3.1 Perbandingan Performansi pada Kondisi Tanpa Beban

Pada kondisi tanpa beban, baik saat kecepatan dibuat tetap ataupun saat terjadi perubahan, menunjukkan performansi seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.7. Terlihat bahwa nilai *rise time* dan *steady state* dari motor induksi yang

menggunakan *fuzzy logic controller* sebagai pengendali menunjukkan respon yang lebih cepat dibandingkan dengan motor yang menggunakan *PI controller*.

Tabel 4.1 Perbandingan PI dan FLC pada kondisi tanpa beban

No	Performansi	PI Controller	Fuzzy Logic Controller
1	Rise Time (s)		
	Putaran 0-100	0.567	0.567
	Putaran 100-120	0.538	0.1155
2	Steady State (s)		
	Putaran 0-100	2.65	0.583
	Putaran 100-120	1.95	0.146
3	Over Shoot (%)		
	Putaran 0-100	16.347	0.02
	Putaran 100-120	13.448	0.028
4	Arus Starting (A)	465.73	465.73

4.3.2 Perbandingan Performansi pada Kondisi diberi Beban Tetap

Tabel 4.2 Perbandingan PI dan FLC pada kondisi diberi beban tetap

No	Performansi	PI Controller	Fuzzy Logic Controller
1	Rise Time (s)		
	Putaran 0-100	0.8604	0.8604
	Putaran 100-120	0.254	0.1768
2	Steady State (s)		
	Putaran 0-100	2.95	0.866
	Putaran 100-120	1.75	0.1808
3	Over Shoot (%)		
	Putaran 0-100	10.547	0.0097
	Putaran 100-120	14.685	0.0088
4	Arus Starting (A)	466.137	466.137

Pada kondisi diberi beban tetap, hasil simulasi menunjukkan performansi seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.8. Dapat dilihat bahwa nilai *rise time* dan *steady state* dari motor induksi yang menggunakan *fuzzy logic controller* sebagai pengendali menunjukkan respon yang lebih cepat dibandingkan dengan motor yang menggunakan *PI controller*.

4.3.3 Perbandingan Performansi pada Kondisi Beban Berubah

Tabel 4.3 Kondisi kecepatan tetap, beban berubah

No	Performansi	PI Controller	Fuzzy Logic Controller
1	Rise Time (s)		
	Beban 0 N.m	0.567	0.567
	Beban 100 N.m	1.85	0.013
2	Steady State (s)		
	Beban 0 N.m	2.65	0.583
	Beban 100 N.m	1.85	0.013
3	Over/under Shoot (%)		
	Beban 0 N.m	16.374	0.02
	Beban 100 N.m	5.58	0.01
4	Arus Starting (A)	465.73	465.73

Pada kondisi kecepatan tetap dan diberi beban yang berubah menunjukkan performansi seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.9. Terlihat bahwa nilai *rise time* dan *steady state* dari motor induksi yang menggunakan *fuzzy logic controller* sebagai pengendali menunjukkan respon yang lebih cepat dibandingkan dengan motor yang menggunakan *PI controller*.

V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Field Oriented Control* (FOC) berhasil diterapkan untuk mengatur torsi dan fluks dari motor induksi secara terpisah seperti pada pengaturan motor arus searah (DC).
2. Penggunaan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) dan *PI controller* sebagai pengendali memberikan respon yang robust terhadap perubahan parameter dan perubahan beban.
3. Penggunaan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) pada kondisi tanpa beban, menunjukkan performansi respon yang lebih baik dari *PI controller* saat kecepatan 100 rad/s, dengan menghasilkan nilai *rise time*, *steady state* dan *overshoot* berturut-turut adalah 0.567 s, 0.583 s dan 0.02%, sedangkan *PI controller* menghasilkan nilai *rise time*, *steady state* dan *over shoot* sebesar 0.5672s, 2.65s dan 16.374%. Ketika terjadi perubahan kecepatan dari 100 rad/s ke 120 rad/s, *FLC* menunjukkan performansi yang lebih cepat pula, dengan nilai *rise time*, *steady state* dan *overshoot* berturut-turut adalah 0.1155 s,

0.146 s dan 0.028 %. Sedangkan *PI controller* menghasilkan *rise time*, *steady state* dan *over shoot* sebesar 0.0538s, 1.95s dan 13.448%.

4. Penggunaan *Fuzzy Logic Controller (FLC)* pada kondisi diberi beban sebesar 100 N.m, menunjukkan performansi respon yang lebih baik dari *PI controller* saat kecepatan 100 rad/s, dengan menghasilkan nilai *rise time*, *steady state* dan *over shoot* berturut-turut adalah 0.8604s, 0.866s dan 0.0097%, sedangkan *PI controller* menghasilkan nilai *rise time*, *steady state* dan *over shoot* sebesar 0.8604 s, 2.95 s dan 10.547 %. Dan ketika terjadi perubahan kecepatan dari 100 rad/s ke 120 rad/s, *FLC* menunjukkan performansi yang lebih baik pula, dengan nilai *rise time*, *steady state* dan *over shoot* berturut-turut adalah 0.1768 s, 0.866 s dan 0.0088 %. Sedangkan *PI* menghasilkan *rise time*, *steady state* dan *over shoot* sebesar 0.254s, 1.75s dan 14.685%.
5. Saat kondisi kecepatan tetap sebesar 100 rad/s, namun terjadi perubahan beban dari 0 menuju 100 N.m, *FLC* menunjukkan performansi yang lebih cepat pula dari *PI controller*, yaitu dengan nilai *rise time*, *steady state* dan *over shoot* 0,013 s, 0.013 s dan 0.01 %, sedangkan nilai *rise time*, *steady state* dan *under shoot* dari *PI controller* adalah 1.85s, 1.85s, dan 5.58%.

5.2 Saran

Saran yang dapat penulis sampaikan demi pengembangan pada penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Penggunaan metode control fuzzy lain, yang lebih kompleks dan lebih baik, seperti ANFIS.
2. Dilakukan simulasi yang tidak hanya mengubah parameter eksternalnya (kecepatan dan pembebanan), namun juga dilakukan dengan mengubah parameter pada motor induksi itu sendiri.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ashok Kusagur, S. F. Kodad, B V. Sankar Ram, "Modelling, Design, and Simulation of an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) for Speed Control of Induction Motor" International Journal of Computer Application, 2010.
- [2] Ben Hamed M., Sbitya L., "Fuzzy Logic Speed Controller for Direct Vector Control of Induction Motor" International Journal of Electrical and Engineering, 2009.
- [3] Bimal K. Bose, "Power Electronics and Motor Drives", Academic Press is an imprint of Elsevier, USA, 2006.
- [4] Ion Boldea and Syed A. Nasar, "The Induction Machine Handbook", CRC Press LLC Boca Raton, London, New York, Washington D.C., 2002.
- [5] Iwan Setiawan, "Kontrol PID Untuk Proses Industri", Elex Media Komputindo, Jakarta, 2008.
- [6] I Wayan Raka Ardana, "Simulasi Sistem Kontroler PID untuk Motor Induksi Menggunakan Perangkat Lunak Matlab/Simulink", Politeknik Negeri Bali.
- [7] Jeremia Purba, "Simulasi Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa dengan DTC", Universitas Sumatera Utara, 2009.
- [8] Jusagemal Aria Endra Luthfi, "Analisis dan Simulasi Shell Heavy Oil Fractionator (SHOF) Menggunakan Metode Kontrol PI dan PID", Tugas Akhir, Teknik Elektro Universitas Diponegoro, 2011.
- [9] Mohammad Bagher Bannae Sharifian and Ebrahim Babaei and Ali Eslami, "Comparison of Two Torque Control Methods for Induction Motor", Tabriz niversity, Iran.
- [10] Richard Crowder, "Electrical Drives and Electromecanical Systems", Elsevier, 2006.
- [11] R. Krishnan. "Electric Motor Drives, Modelling, Analysis, and Control", Prentice Hall, 2001.
- [12] Sudrajat, "Modul Kuliah Logika Fuzzy". Fakultas MIPA UNPAD, Bandung, 2008.

- [13] Wildi, Theodore, "Electrical Machines Drives and Power System". Prentice Hall, 1989.
- [14] Zoran Vukic, "Lectures On PID Controllers", Faculty of Electrical Engineering and Computing University of Zagreb, 2002.
- [15] _____, "SimPowerSystem User's Guide", TransEnergie Technologies Inc, 2003.

BIODATA



Gafur Nugroho

Putra kelahiran Cirebon, menyelesaikan pendidikan dasar hingga menengah di Cirebon. Saat ini sedang menempuh pendidikan di jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro, Semarang pada Bidang Konsentrasi Teknik Energi Listrik. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail : gafur.nugroho@gmail.com

Semarang, Januari 2012

Menyetujui,

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. Tejo Sukmadi, MT.
NIP.196111177198803100
Tanggal: _____

Susatyo Handoko, ST., M.T.
NIP. 197305262000121001
Tanggal: _____