



Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology

Journal homepage: <http://ojs.pnb.ac.id/index.php/JAMETECH>
p-ISSN: 2655-9145; e-ISSN: 2684-8201

Meningkatkan kinerja motor induksi menggunakan teknologi *fuzzy logic controller* berbasis *artificial intelligence*

I Putu Sutawinaya^{1*} dan A.A. Ngurah Made Narottama¹

¹Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bali, Jl. Kampus, Kuta Selatan, Badung Bali 80364, Indonesia

*Email: sutawinaya_putu@pnb.ac.id

Abstrak

Motor induksi adalah merupakan motor listrik arus bolak balik (AC) yang umum digunakan pada industri-industri karena memiliki beberapa keuntungan, diantaranya relatif murah, kokoh serta handal. Namun kelemahan motor induksi saat terjadi perubahan torsi beban secara mendadak, maka akan terjadi penurunan kinerja (performansi) motor. Hal tersebut akan berpengaruh terhadap kestabilan putaran motor, di mana overshoot maupun undershoot relatif tinggi serta risetime relatif lambat. Untuk mengantisipasi hal tersebut dibutuhkan sistem kontrol kecepatan motor induksi yang tentunya dapat meningkatkan kinerja motor induksi tersebut. Dalam penelitian ini dilakukan pengujian terhadap sistem kontrol kecepatan motor induksi menggunakan teknologi Fuzzy Logic Controller (FLC) melalui simulasi perangkat lunak Matlab. Dilakukan pengujian terhadap perubahan kinerja motor induksi melalui pemberian torsi beban serta setpoint yang berubah-ubah. Adapun hasil simulasi menunjukkan bahwa performansi motor induksi, seperti undershoot, overshoot dan steady state error relatif kecil serta peak time, risetime dan settling time relatif cepat. Sistem yang dirancang mampu menurunkan arus start rata-rata sekitar 72,7% dan torsi awal rata-rata sekitar 81,8% terhadap kondisi idealnya.

Kata kunci: Motor induksi, fuzzy logic controller dan matlab/simulink

Abstract: An induction motor is an alternating current (AC) electric motor which is commonly used in industries because it has several advantages, including relatively cheap, sturdy and reliable. However, the weakness of an induction motor when there is a sudden change in load torque, there will be a decrease in motor performance. This will affect the stability of the motor rotation, where the overshoot and undershoot are relatively high and the rise time is relatively slow. To anticipate this, an induction motor speed control system is needed which can certainly improve the performance of the induction motor. In this study, an induction motor speed control system was tested using Fuzzy Logic Controller (FLC) technology through the Matlab software simulation. Performed tests on changes in the performance of the induction motor through the provision of load torque and changing setpoints. The simulation results show that the performance of the induction motor, such as undershoot, overshoot and steady state error, is relatively small and the peak time, rise time and settling time are relatively fast. The system designed is able to reduce the starting current by an average of about 72.7% and an average starting torque of about 81.8% of the ideal conditions.

Keywords: Induction motor, fuzzy logic controller and matlab/simulink

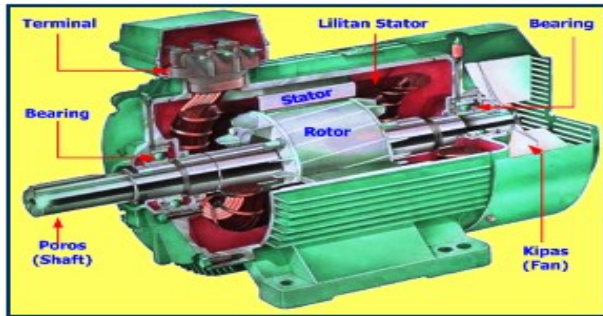
Penerbit @ P3M Politeknik Negeri Bali

1. Pendahuluan

Pada umumnya mesin-mesin penggerak yang digunakan pada industri menggunakan motor induksi tiga fasa dengan daya keluaran di atas 1 PK. Prinsip kerja motor ini berdasarkan proses induksi yang terjadi pada bagian rotor, di mana arus yang mengalir pada kumparan rotor merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan antara putaran rotor dengan medan putar stator yang dihasilkan oleh kumparan stator. Secara singkat prinsip kerja motor induksi tiga fasa dapat dijelaskan sebagai berikut [1]:

- Apabila sumber tegangan tiga fasa disuplai pada kumparan stator, maka akan timbul medan putar dengan kecepatan angular (ω_s).
- Medan putar stator akan memotong batang konduktor pada rotor, sehingga pada kumparan stator akan terbangkitkan gaya gerak listrik (ggl) induksi.
- Karena rangkaian rotor merupakan rangkain tertutup, maka akan timbul arus rotor yang diakibatkan oleh ggl tersebut.
- Adanya arus stator dan arus rotor akan menimbulkan torsi elektromagnetik (T_e) pada motor.

- Bila Torsi mula yang dihasilkan cukup besar untuk memikul beban, maka rotor akan berputar searah dengan medan putar stator.
- Agar tegangan terinduksi, maka diperlukan adanya perbedaan antara kecepatan angular dari medan putar stator (ω_s) dan kecepatan putar rotor (ω_r).



Gambar 1. Konstruksi motor induksi tiga fasa [1]

Kelebihan dari motor induksi bila dibandingkan dengan jenis motor listrik lainnya adalah : konstruksinya yang sederhana, harganya relatif murah, putarannya relatif konstan, perawatan lebih mudah serta tidak membutuhkan motor lain untuk pengasutannya. Kekurangannya : putarannya sulit diatur, arus asut relatif tinggi berkisar 5 sampai 6 kali arus nominalnya serta putaran kecepatan motor tidak konstan bila torsi beban berubah-ubah [1]. Untuk mendapatkan kecepatan motor yang relatif konstan, maka dibutuhkan suatu rangkaian kontrol kecepatan.

Sistem kontrol kecepatan open loop controller melalui pengaturan frekuensi adalah merupakan sistem kontrol konvensional yang umum digunakan pada industri. Namun kelemahan sistem kontrol ini menghasilkan respon kecepatan yang kurang smooth dan sering kali motor mengalami kejenuhan, sehingga memerlukan tambahan inverter. Kontroler PID (Proportional-Integral-Derivative) merupakan sistem kontrol close loop controller yang juga merupakan sistem kontrol konvensional. Kontroler jenis ini dapat memberikan respon kecepatan yang lebih baik bila dibandingkan dengan open loop controller. Namun kelemahan kontroler PID ini antara lain : membutuhkan perhitungan matematik yang rumit dan kompleks serta sulit mendapatkan performance yang bagus karena overshoot dan undershoot masih relatif tinggi. Apabila terjadi perubahan dinamika proses, seperti perubahan beban atau penggantian motor yang sering kali dialami pada industri-industri, maka parameter kontroler motor (K_p , K_i , dan K_d) perlu ditala (tuning) kembali. Di mana proses pentalaan (tuning) tersebut memerlukan waktu yang relatif lama dan kurang efisien.

Untuk mengatasi kelemahan dari sistem kontrol konvensional seperti yang telah diuraikan di atas, maka mulai dikembangkan sistem kontrol yang berbasis pada teknologi kecerdasan buatan (Artificial Intelligence "AI"). Sistem kontrol berbasis AI yang akhir-kahir ini banyak dikembangkan antara lain: sistem kontrol menggunakan teknologi Fuzzy Logic, Neural Artificial Intelligence maupun Artificial Neural Networks. Sistem kontrol berbasis teknologi Fuzzy Logic yang pernah dikembangkan oleh Penulis diantaranya adalah sistem kontrol menggunakan teknologi ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System)

dan Fuzzy Logic Controller (FLC). FLC yang diaplikasikan pada pengaturan kecepatan motor induksi dapat memenuhi kriteria performance motor yang relatif tinggi. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan menggunakan perangkat lunak Matlab diperoleh hasil : overshoot dan undershoot relatif kecil, serta rise time dan settling time relatif cepat. [2].

2. Pemodelan Motor Induksi dan Perancangan FLC

2.1. Rangkaian Ekvivalen Motor Induksi

Pada Gambar 2 memperlihatkan rangkaian ekvivalen motor induksi tiga fasa simetris bila ditinjau dalam rangkaian rotor yang berputar (*rotating frame*) [3,4]. Rangkaian stator digambarkan sepanjang sumbu-sumbu as, bs, dan es, sedangkan rangkaian rotor digambarkan sepanjang sumbu-sumbu ar, br, dan cr.

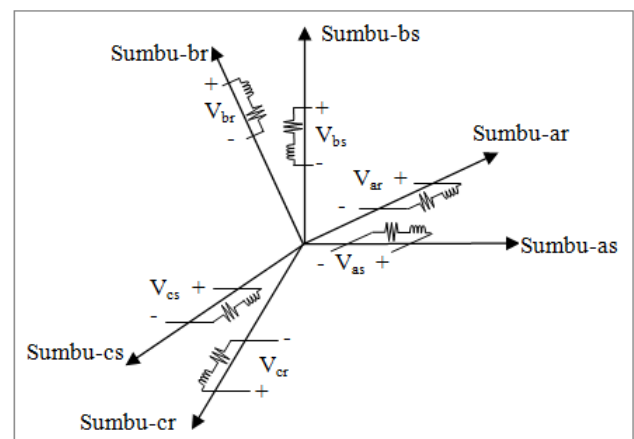
Berdasarkan Gambar 2 dapat dijabarkan persamaan tegangan stator dan rotor sebagai berikut :

$$V_{abcs} = r_s i_{abcs} + p \lambda_{abcs} \quad (1)$$

$$V_{abcr} = r_r i_{abcr} + p \lambda_{abcr} \quad (2)$$

di mana $p = d/dt$, dan selanjutnya persamaan menjadi sebagai berikut;

$$p \lambda_{abcs} = L_s i_{abcs} + L_{s'} i_{abcr} \quad (3)$$



Gambar 2. Ekvivalen stator dan rotor induksi dalam sistem koordinat a-b-c

Bentuk matriks dari L_s dan L_r dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix}$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Gambar 3 menunjukkan rangkaian ekvivalen sebuah motor induksi tiga fasa yang umum digunakan di industri pada sisi stator dalam sistem koordinat d-q.

Untuk mentransformasikan persamaan dari sistem koordinat a-b-c ke sistem koordinat d-q, maka digunakan persamaan:

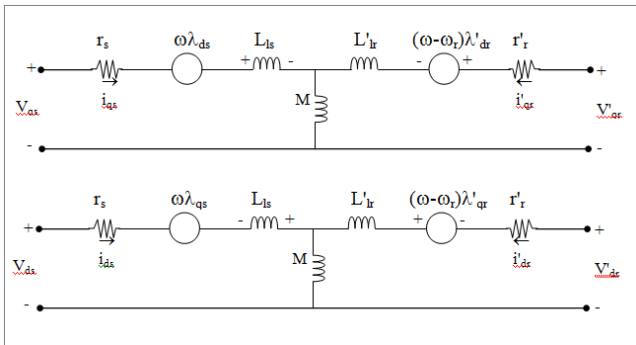
$$f_{qds} = T(\theta) f_{abcs}, \quad (5)$$

di mana variabel f dapat berupa tegangan, arus maupun fluks. Tegangan stator dapat ditulis dengan persamaan :

$$\vec{V}_s = R_s \vec{I}_s + \frac{d}{dt} \vec{\lambda}_s + j\omega_s \vec{\lambda}_s \quad (6)$$

dan tegangan rotor dengan persamaan :

$$\vec{V}_r = R_r \vec{I}_r + \frac{d}{dt} \vec{\lambda}_r + j(\omega_s - \omega_r) \vec{\lambda}_r \quad (7)$$



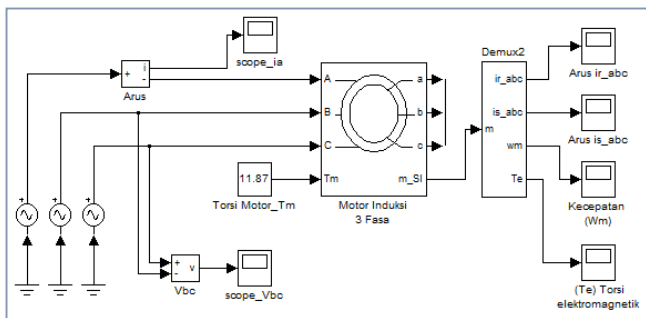
Gambar 3. Rangkaian ekivalen motor induksi tiga fasa dalam sistem koordinat d-q

Torsi elektromagnetik (T_e) merupakan fungsi dari arus stator dan arus rotor, dengan persamaan sebagai berikut:

$$T_e = pM (i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds}) \quad (8)$$

Kecepatan putaran rotor dinyatakan sebagai fungsi dari torsi elektro-magnetik, torsi beban yang dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{J}{p} \frac{d}{dt} \omega_r + K_g \omega_r = T_e - T_l \quad (9)$$



Gambar 4. Pemodelan motor induksi menggunakan simulasi Simulink/Matlab

Tegangan stator yang merupakan fungsi dari arus stator dan arus rotor dalam bentuk matrik adalah sebagai berikut:

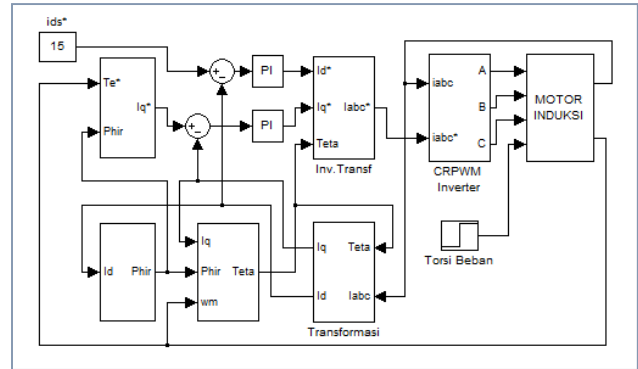
$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega_s L_s & pM & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s + pL_s & \omega_s M & pM \\ pM & -(\omega_s - \omega_r)M & R_r + pL_r & -(\omega_s - \omega_r)L_r \\ (\omega_s - \omega_r)M & pM & (\omega_s - \omega_r)L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$$

Pada Gambar 4 ditampilkan pemodelan motor induksi tiga fasa yang disimulasikan menggunakan perangkat lunak Matlab fasilitas Simulink.

2.2. Metode Field Oriented Control

Field Oriented Control (FOC) adalah suatu metode pengaturan medan pada motor AC, di mana dari sistem *coupled* dirubah menjadi sistem *decoupled*. Pada sistem ini arus penguatan dan arus beban motor dapat dikontrol secara terpisah, dengan demikian torsi dan fluksi juga dapat diatur secara terpisah.[5,6].

Blok diagram yang menunjukkan proses perhitungan aliran arus listrik pada motor induksi dengan menggunakan metode FOC ditunjukkan seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram blok metode FOC Motor Induksi

Torsi referensi (T_e^*) merupakan variabel keluaran dari unit kontroler berupa sinyal kontrol (U), dan merupakan masukan terhadap arus torsi (i_T). Arus torsi referensi (i_T^*) dan arus medan referensi (i_M^*) dikonversikan ke dalam arus fasa referensi (i_a^*, i_b^*, i_c^*) pada inverter. Vektor transformasi untuk mengkonversikan komponen arus stator referensi sumbu d,q (i_{ds}^*, i_{qs}^*) ke dalam sumbu a,b,c sebagai arus stator referensi (i_a^*, i_b^*, i_c^*) dapat ditulis dengan persamaan berikut:

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & -\sin(\theta_e) \\ -\frac{1}{2}\cos(\theta_e) + \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\theta_e) & \left(\frac{1}{2}\sin(\theta_e) + \frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\theta_e)\right) \\ -\frac{1}{2}\cos(\theta_e) - \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\theta_e) & \left(\frac{1}{2}\sin(\theta_e) - \frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\theta_e)\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^* \\ i_{qs}^* \end{bmatrix}$$

2.3. Perancangan Simulasi Fuzzy Logic Controller

Metode yang digunakan pada sistem kontrol *Fuzzy Logic Controller* (FLC) ini adalah metode statik, artinya sifat fungsi keanggotaan (*membership function*) bekerja dengan rentang kerja (*range*) tetap, yaitu antara -6 sampai dengan 6 untuk masukannya (variabel input), dan antara -0,09 sampai dengan 0,09 untuk keluarannya (variabel output). Penentuan rentang kerja tersebut harus dilakukan sefleksibel mungkin, agar sistem mampu melakukan *tracking setpoint* dengan baik [7,8].

Dalam merancang FLC yang perlu diperhatikan adalah variabel *input* (masukan) *error* (e) dan perubahan / *delta error* (Δe), dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$e(k) = sp - y(k) \quad (10)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (11)$$

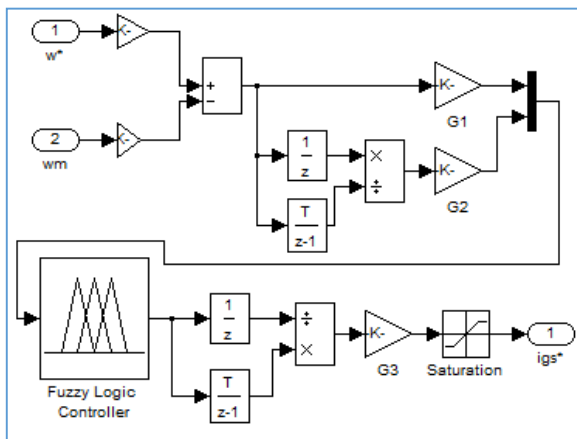
di mana sp adalah *setpoint* (kecepatan referensi ' ω_{ref} ') dan y adalah keluaran (*output*) sistem, sedangkan k dan $k-1$ adalah kejadian urutan dari pencuplikan data sistem.

Pada kasus pengaturan kecepatan motor induksi, himpunan semesta pembicaraan meliputi *error* kecepatan dan perubahan atau delta *error* kecepatan, yang dinyatakan dalam persamaan $e(k)$ dan $\Delta e(k)$ di atas. Sedangkan semesta pembicaraan dari aksi kontrol adalah torsi referensi, yang didefinisikan sebagai berikut :

$$\Delta T_e^*(k) = T_e^*(k) - T_e^*(k-1) \quad (12)$$

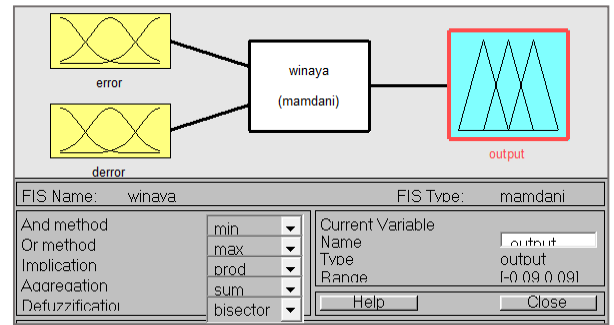
di mana $T_e^*(k)$ adalah torsi referensi, dan ΔT_e^* adalah perubahan torsi referensi pada urutan sampling ke- k .

Pemodelan FLC dengan menggunakan metode *Fuzzy Inference System* (FIS) seperti pada Gambar 6.

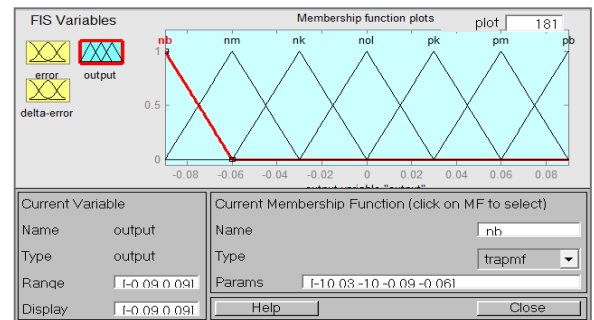


Gambar 6. Pemodelan FLC menggunakan metode FIS

Model *Fuzzy Inference System* (FIS) yang digunakan adalah menggunakan model Mamdani yang dikembangkan dari hasil penelitian sebelumnya [9,10]. Adapun *setting* variabel-variabel *membership function* (fungsi keanggotaan) pada Simulink/Matlab adalah seperti ditunjukkan Gambar 7.

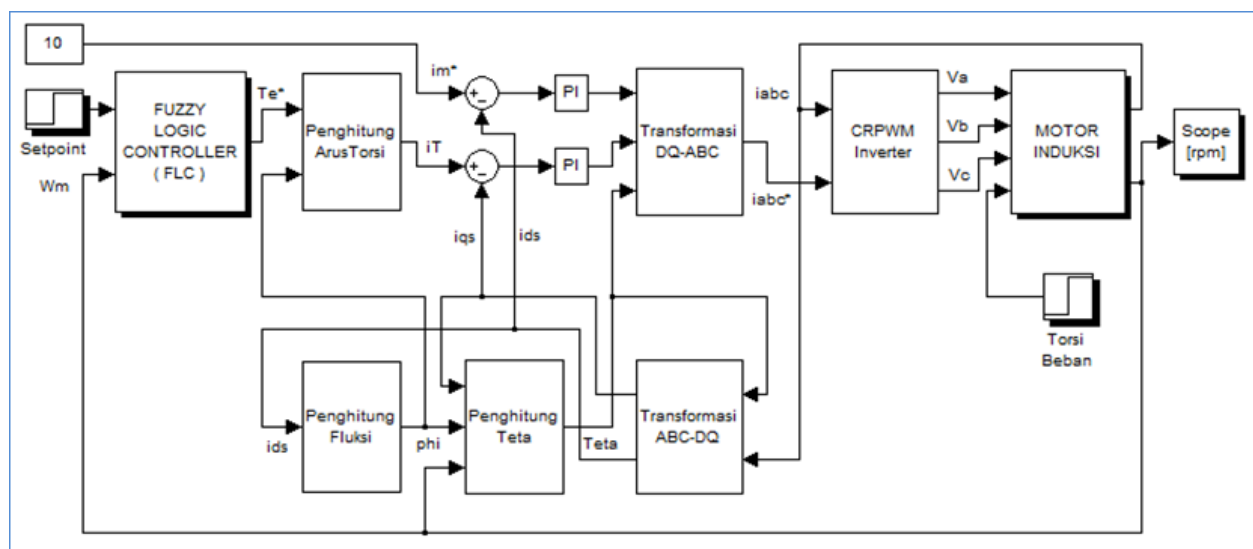


Gambar 7. FIS editor model Mamdani



Gambar 8. Membership function untuk variabel input, output dan delta error

Gambar 8 menunjukkan *membership function* (fungsi keanggotaan) untuk variabel input (*error* dan *delta error*) maupun *output*. Variabel *input* di-*setting* dari rentang kerja antara -6 sampai dengan 6, dan variabel *output* dengan rentang kerja antara -0,09 sampai dengan 0,09 dalam bentuk segitiga untuk (nm, nk, nol, pk, pm) dan trapesium (nb, pb).



Gambar 9. Blok diagram sistem kontrol pengaturan kecepatan motor induksi menggunakan FLC

Mengembangkan dari beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya [2,3,5], maka blok diagram sistem

kontrol dengan metode FOC menggunakan sistem kontrol FLC disimulasikan menggunakan fasilitas Simulink dan

Power System Blockset dari perangkat lunak MATLAB. Adapun blok diagram sistem kontrol dimaksud adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 9.

Pemodelan dari sistem kontrol FLC yang dirancang menggunakan metode *field oriented control* (FOC-decoupled), di mana torsi elektromagnetik (T_e) diupayakan konstan bila terjadi perubahan parameter-parameter motor maupun perubahan kecepatan. Harapannya, respon kecepatan putar motor induksi tersebut relatif stabil terhadap perubahan parameter-parameter yang akan terjadi selama motor beroperasi.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Umum

Model matematis dari unit motor induksi dan sistem kontrol FLC yang dirancang disimulasikan menggunakan perangkat lunak Matlab fasilitas Simulink. Parameter motor induksi tiga fasa yang digunakan sebagai acuan dalam pengujian sistem meliputi : daya 3 HP, input sumber 220V/fasa, frekuensi 60 Hz, nilai konstanta mekanik (gesekan) 0,06 dan 0,03 dengan torsi beban (TL) konstan 20 N.m.

Langkah pengujian sistem yang dirancang dilakukan dalam 3 tahap pengujian, di mana setiap tahap diamati respon kecepatan putar motor induksi dari hasil simulasi. Tahap pertama dilakukan pengujian sistem dalam kondisi ideal, di sini motor induksi diuji tanpa pengasutan sistem kontrol. Tahap kedua dan tahap ketiga dilakukan pengujian sistem menggunakan pengasutan FLC dengan kecepatan referensi (*setpoint*) tetap (konstan) maupun berubah.

Sebelum proses simulasi dimulai, parameter-parameter sistem harus ditala (*tuning*) terlebih dahulu agar diperoleh respon kinerja motor yang baik. Dalam hal ini *tuning* parameter sistem dilakukan secara coba-coba, perkiraan-perkiraan maupun secara heuristik hingga diperoleh hasil sesuai dengan yang diinginkan. Adapun parameter sistem yang digunakan dari hasil *tuning* motor adalah :

- *Time sampling* sistem kontrol (T_s) = 0,00005 detik.
- *Gain error* (G_1) dan *gain delta error* (G_2) = 0,01.
- Sinyal kontrol (T_e^*) dibatasi maksimum 20 Nm.
- *Setpoint* tetap (konstan) = 1800 rad/s
- *Setpoint* berubah dari 1500-1800 [rad/s].

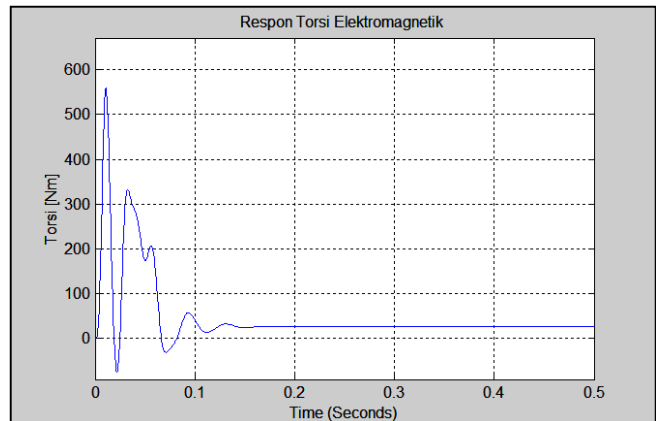
3.2. Pengujian Tanpa Pengasutan

Respon sistem yang diamati dari hasil pengujian tahap pertama, yakni sistem tanpa pengasutan. Dalam hal ini yang diamati bagaimana kinerja motor, diantaranya torsi elektromagnetik, arus stator dan arus rotor maupun putaran motor seperti ditunjukkan pada Tabel 1 dan berturut-turut Gambar 10 sampai Gambar 13.

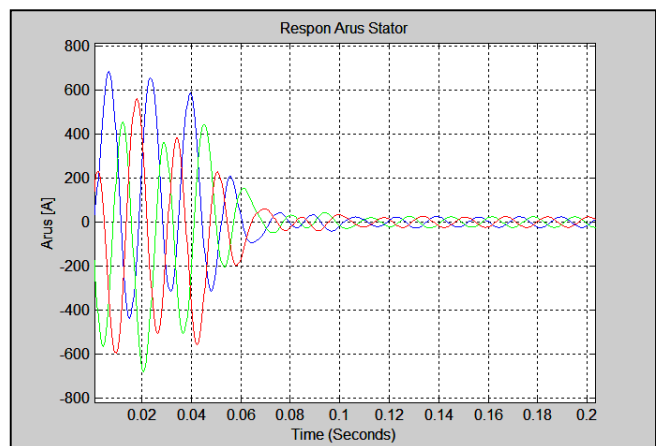
Tabel 1. Respon kecepatan motor induksi

Respon sistem (Kinerja motor)	Tanpa Pengasutan (kondisi ideal)	Pengasutan FLC kondisi <i>setpoint</i> tetap	berubah
Max overshoot [rad/s]	1875	1813	1806
Min undershoot [rad/s]	1745	1798	1795
Steady state [rad/s]	1785	1500	1800
% Overshoot	5,04	0,71	0,33
Peak time [s]	0,06	0,25	0,22
Rise time [s]	0,03	0,15	0,14
Settling time [s]	0,15	0,20	0,20
steady state error [%]	0,1	0,5	0,5

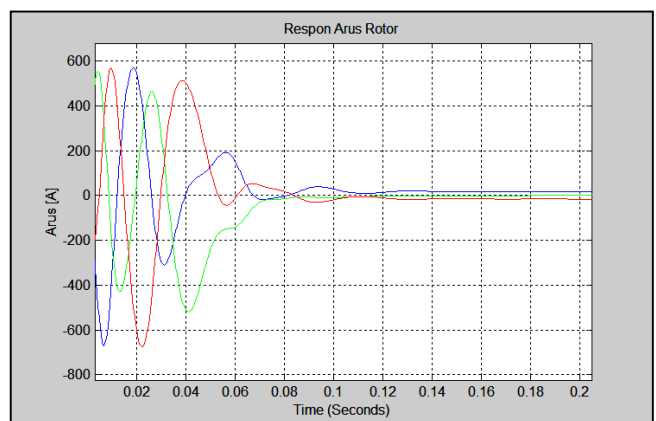
Pada Gambar 10 menunjukkan hasil simulasi terhadap torsi elektromagnetik, di mana saat awal motor di-*start* terjadi lonjakan torsi hingga mencapai 550 Nm dan berangsur-angsur turun hingga mencapai stabil 20 Nm sesuai *setting* awal dalam kurun waktu 0,2s. Arus stator maupun arus rotor pada saat awal (arus *start*) relatif tinggi seperti ditunjukkan pada Gambar 11 dan Gambar 12. Arus *start* mencapai rata-rata sekitar 525 A setelah 0,07s, selanjutnya turun hingga mencapai stabil sekitar 20 A sesuai arus nominalnya.



Gambar 10. Respon Torsi Elektromagnetik

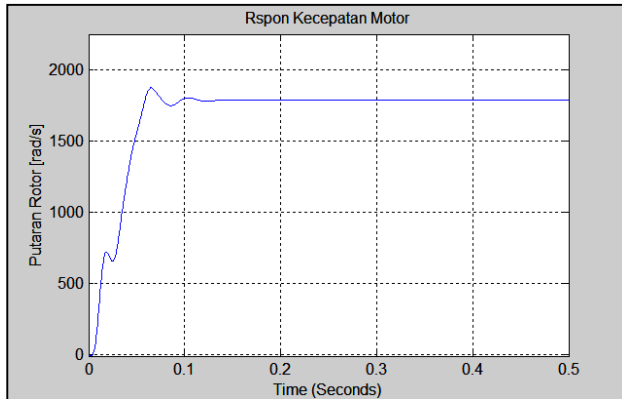


Gambar 11. Respon Arus Stator Motor Induksi



Gambar 12. Respon Arus Rotor Motor Induksi

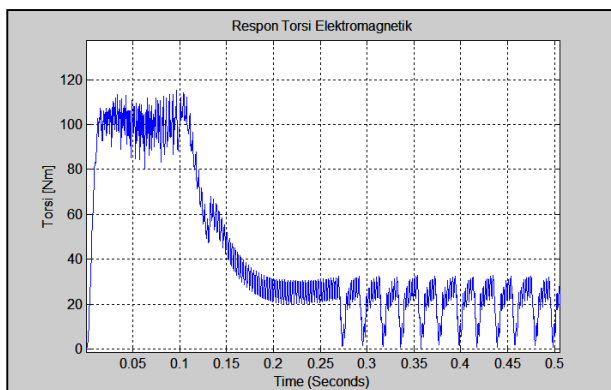
Sedangkan pada Gambar 13 menunjukkan respon kecepatan motor induksi, di mana pada kondisi ini yang dapat diamati adalah : *max overshoot* mencapai 1875 rad/s dan *min undershoot* 1745 rad/s pada posisi *steady state* 1785 rad/s atau % *overshoot* sekitar 5,04%. *Peak time*, *rise time* dan *settling time* secara berturut-turut adalah 0,06 s, 0,03 s dan 0,15 s dengan *steady state error* sekitar 0,1 %.



Gambar 13. Respon kecepatan Motor Induksi ideal

3.3. Pengujian dengan Pengasutan FLC

Tahap kedua dilakukan pengujian menggunakan pengasutan sistem kontrol FLC dengan *setpoint* tetap 1800 rad/s. Respon sistem yang diamati bagaimana kinerja motor terhadap torsi elektromagnetik, arus rotor maupun respon kecepatannya. Adapun respon yang ditunjukkan adalah berturut-turut seperti pada Gambar 14, Gambar 15 dan Gambar 16.

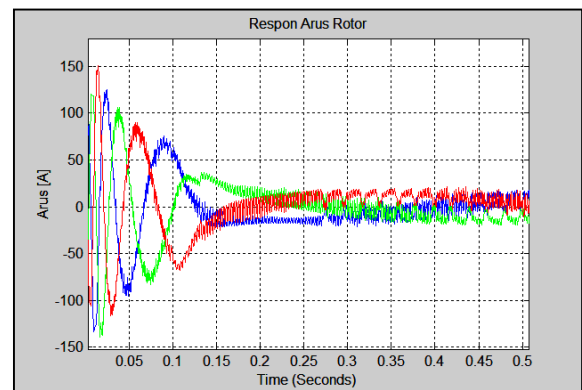


Gambar 14. Respon torsi elektromagnetik saat *setpoint* tetap

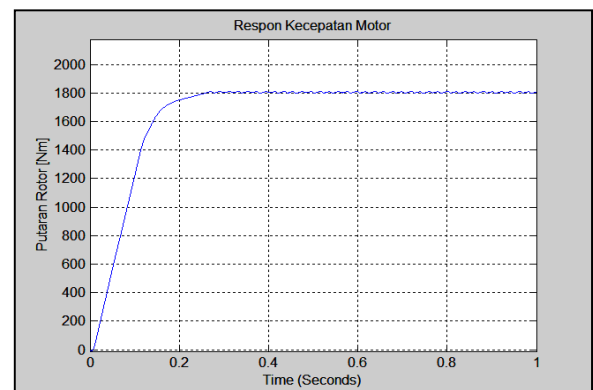
Hasil simulasi seperti ditampilkan pada Gambar 14, menunjukan torsi elektromagnetik saat awal (*start*) mencapai rata-rata sekitar 100 Nm. Torsi berangsur-angsur turun hingga mencapai stabil rata-rata sekitar 20 Nm saat 0,27s. Sedangkan arus rotor saat *start* mencapai sekitar 150 A dan turun mencapai stabil rata-rata sekitar 20 A saat 0,27s.

Begitu juga terhadap respon kecepatan motor seperti ditampilkan pada Gambar 16 dan Tabel 1. Pada kondisi ini yang dapat diamati adalah : *max overshoot* mencapai 1813 rad/s dan *min under-shoot* 1798 rad/s pada *steady state* 1800 rad/s atau *overshoot* sekitar 0,71%. *Peak time*, *rise time* dan

settling time secara berturut-turut adalah 0,25 s, 0,15 s dan 0,20 s dengan *steady state error* sekitar 0,5 %.

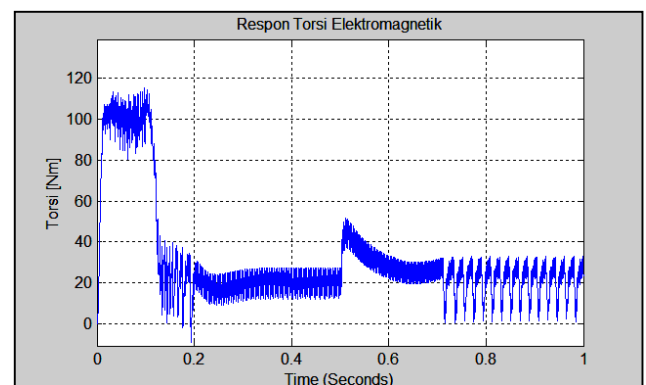


Gambar 15. Respon arus rotor saat *setpoint* tetap



Gambar 16. Respon kecepatan motor saat *setpoint* tetap

Pengujian tahap ketiga adalah untuk menguji keandalan (*reability*) sistem kontrol FLC yang dirancang dengan *setpoint* berubah, dari 1500 rad/s ke 1800 rad/s. Adapun hasil pengujian adalah seperti ditampilkan secara berturut-turut pada Gambar 17, Gambar 18 dan Gambar 19.



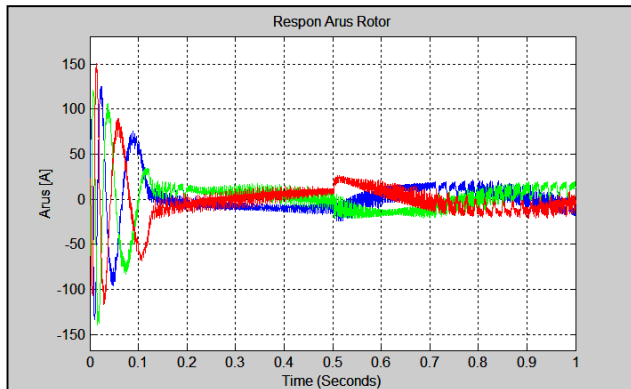
Gambar 17. Respon torsi elektromagnetik saat *setpoint* berubah dari 1500 ke 1800 rad/s

Hasil simulasi seperti ditampilkan pada Gambar 17, menunjukan torsi elektromagnetik saat awal (*start*) mencapai rata-rata sekitar 100 Nm. Torsi berangsur-angsur turun hingga mencapai stabil rata-rata sekitar 20 Nm saat 0,27s. Namun naik kembali hingga mencapai sekitar 50 Nm ketika

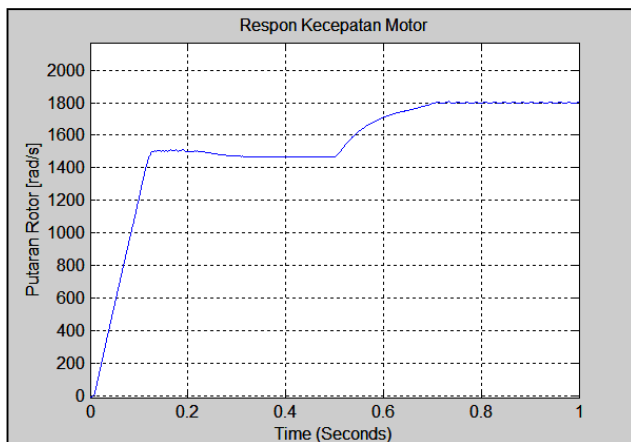
setpoint berubah dari 1500 rad/s ke 1800 rad/s saat 0,5s, dan turun ke posisi stabil sekitar 20 Nm saat 0,7s.

Sedangkan arus rotor saat *start* mencapai sekitar 150 A dan turun mencapai stabil rata-rata sekitar 20 A saat 0,15s. Namun arus naik kembali hingga mencapai sekitar 30 A ketika *setpoint* berubah dari 1500 rad/s ke 1800 rad/s saat 0,5s, dan turun ke posisi stabil sekitar 20 A saat 0,7s.

Begitu juga terhadap respon kecepatan motor seperti ditampilkan pada gambar 19 dan tabel 1. Pada pengujian tahap ketiga ini lebih difokuskan mengamati perubahan sistem saat terjadi perubahan kecepatan (*setpoint*), yakni dari 1500 rad/s ke 1800 rad/s.



Gambar 18. Respon arus rotor saat *setpoint* berubah dari 1500 ke 1800 rad/s



Gambar 19. Respon kecepatan motor saat *setpoint* berubah dari 1500 ke 1800 rad/s

Adapun respon kecepatan motor yang dapat diamati seperti ditunjukkan pada gambar 19 adalah kecepatan putar motor relatif stabil. Respon sistem menunjukkan bahwa pencapaian posisi *steady state* sekitar 1500 rad/s saat *setpoint* 1500 rad/s dan sekitar 1800 rad/s saat *setpoint* 1800 rad/s. *Max overshoot* mencapai 1806 rad/s dan *min undershoot* 1795 rad/s atau *overshoot* sekitar 0,33%. *Peak time*, *rise time* dan *settling time* secara berturut-turut adalah 0,22 s, 0,14 s dan 0,20 s dengan *steady state error* sekitar 0,5 %.

4. Kesimpulan

Untuk memperbaiki kinerja dari sebuah motor induksi, maka dibutuhkan adanya penambahan pengasutan berupa rangkaian sistem kontrol kecepatan. Telah dilakukan

pengujian menggunakan sistem kontrol FLC berbasis AI untuk pengasutan kecepatan motor induksi dengan hasil seperti yang telah diuraikan di atas.

Untuk dapat menganalisis keandalan (*reliability*) sistem kontrol FLC yang dirancang, sistem diuji melalui beberapa tahap pengujian yang diawali dari mengamati kinerja motor dalam kondisi tanpa pengasutan (*ideal*). Selanjutnya motor induksi diberikan pengasutan menggunakan sistem kontrol FLC melalui dua kondisi dinamik, yakni kondisi *setpoint* tetap (*konstan*) dan kondisi *setpoint* berubah.

Berdasarkan hasil analisis dari respon kecepatan motor sebelum maupun setelah diberikan pengasutan, secara umum dapat disimpulkan bahwa penggunaan sistem kontrol FLC mampu memperbaiki kinerja motor induksi yang diuji. Sistem kontrol FLC yang dirancang mampu menunjukkan performansi yang lebih baik, di mana respon sistem kembali ke posisi *setpoint* relatif cepat dengan *overshoot* relatif kecil. Disamping itu, penggunaan sistem kontrol FLC pada motor induksi tersebut mampu menurunkan arus start rata-rata sekitar 72,7% dan torsi awal rata-rata sekitar 81,8% terhadap kondisi idealnya.

Namun sistem yang dirancang masih menunjukkan kelemahan, di mana posisi *peak time*, *rise time* dan *settling time* relatif lambat serta *steady state error* lebih besar bila dibandingkan dengan kondisi idealnya. Respon sistem belum mampu menunjukkan performansi yang optimal dan kurang smooth. Hal ini ditengarai karena kesulitan mengatur nilai *membership function* pada Fuzzy Logic untuk mendapatkan nilai yang relatif tepat, disamping itu karena dalam penentuan *rule base* masih secara coba-coba atau heuristik.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada tim redaksi Jametech atas diterima dan diterbitkan artikel ini. P3M selaku pengelola serta para peneliti lain atas masukannya. Semoga artikel ini dapat menginspirasi dan dikembangkan kembali oleh para peneliti lainnya. Harapannya, dari ide yang sederhana berkembang menjadi lebih luas sehingga bermanfaat untuk kemajuan teknologi ke depan.

Daftar Pustaka

- [1] P. Sumardjati, S. Yahya dan A. Mashar, "Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik jilid 3", Departemen Pendidikan Nasional, Jakarta, 2008.
- [2] I.P. Sutawinaya, "Pengembangan Model Transformasi Clarke-Park pada Pengendalian Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Matlab/Simulink", Logic, 13, 2013, h. 1-8
- [3] W.R. Ardana dan I.P. Sutawinaya "Pemodelan Sistem Kontroler Logika Fuzzy pada Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Menggunakan Perangkat Lunak Matlab/Simulink", Matrix, 7, 2017, h. 1-6
- [4] Heber, L. Xu, and Y. Tang, "Fuzzy Logic Enhanced Speed Control of an Indirect Field Oriented Induction Machine Drive", IEEE Transactions on Power Electronics, 12, 1997, pp. 772-773.
- [5] I.P. Sutawinaya, "Pengembangan model Fuzzy Mamdani untuk Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Berbasis Metode Kontrol Field Oriented", Logic, 13, 2013, h. 74
- [6] Z. Li and L. Xu, "On-Line Fuzzy Tuning of Indirect Field-Oriented Induction Machine Drives", IEEE

- Transactions on Power Electronics, 13, 1998, pp. 134-141.
- [7] Z. Li and L. Xu, "Fuzzy Learning Enhanced Speed Control of an Indirect Field-Oriented Induction Machine Drives", IEEE Transactions Control Systems Technology, 8, 2000, pp. 270-278.
- [8] A. Ba-Razzouk, A. Cheriti, G. Olivier and P. Sicard, "Field Oriented Control of Induction Motor Using Neural Network De-couplers", IEEE Transactions on Power Electronics, 12, 1997, pp. 752-763.
- [9] Zerek, R. Amer and B. Mostafa, "Implementation of Fuzzy Logic in Engineering Management", Academic Publication Center of Tunis, Tunisia, SSI-403, 2008, pp. 1-9.
- [10] Moraga, Caludio, "An Engineering View of Fuzzy Logic", Facta Universitatis, Serie E.E., Serbia, 18, 2005