

PENGEMBANGAN INVERTER FUZZY LOGIC CONTROL UNTUK PENGENDALIAN MOTOR INDUKSI SEBAGAI PENGGERAK MOBIL LISTRIK DENGAN METODA VECTOR KONTROL

Era Purwanto, M. Ashary, Subagio, dan Mauridhi Herry P.

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri,
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Surabaya 60111, Indonesia

E-mail: era@eepis-its.edu

Abstrak

Energi listrik merupakan salah satu energi alternatif untuk menggantikan Bahan Bakar Minyak pada dunia transportasi, salah satu sistem yang saat ini dikembangkan adalah penggunaan motor induksi 3 fasa, untuk membuat sistem yang tangguh maka dikembangkan metoda *vector control* untuk mengatasi kelemahan motor induksi. Pada sistem ini inverter sebagai salah satu komponen yang digunakan pada sistem. Dalam penelitian ini akan diteliti penggunaan kontroler logika fuzzy pada inverter sebagai pengendali kecepatan motor induksi. Kontroler logika fuzzy digunakan sebagai rangkaian *switching* inverter, perancangan inverter ini berdasarkan metode inverter yang telah ada. Inverter kontroler logika fuzzy yang dihasilkan kemudian disimulasikan pada motor induksi sehingga didapatkan suatu bentuk inverter yang dapat mengontrol kecepatan motor induksi dengan respon yang baik.

Abstract

The development of Inverter Fuzzy Logic Control for Induction Motor Control by Vector Control Method in Electric Vehicle. In response to concerns about energy cost, energy dependence, and environmental damage, a rekindling of interest in electric vehicles (EV's) has been obvious. Thus, the development of power electronics technology for EV's will take an accelerated pace to fulfill the market needs, regarding with the problem in this paper is presented development of fuzzy logic inverter in induction motor control for electric vehicle propulsion. The Fuzzy logic inverter is developed in this system to directed toward developing an improved propulsion system for electric vehicles applications, the fuzzy logic controller is used for switching process. This paper is describes the design concepts, configuration, controller for inverter fuzzy logic and drive system is developed for this high-performance electric vehicle.

Keywords: rule base, vector control, dq model

1. Pendahuluan

Pada saat ini energi listrik masih merupakan energi alternatif untuk digunakan pada alat transportasi, pada sistem ini motor listrik akan menggantikan mesin diesel atau mesin konvensional sebagai penggerak utama, mesin listrik yang dapat digunakan pada saat ini sangat banyak sekali mulai dari motor DC sampai dengan motor AC [1]. Secara konvensional motor induksi dioperasikan pada kecepatan yang tetap sesuai dengan frekuensi sumber tegangan serta jumlah kutub dari motor induksi. Pengaturan kecepatan pada motor induksi jauh lebih sulit dibandingkan dengan motor DC karena tidak ada hubungan yang linier antara arus motor dan torsi yang dihasilkan seperti pada motor DC [2].

Suatu metode yang kemudian disebut sebagai *vector control* digunakan untuk mengatur kecepatan motor induksi pada rentang kecepatan yang besar serta presisi dan respon yang cepat. Pada *vector control*, pengaturan motor induksi ini telah diubah seperti pengaturan motor arus searah, sehingga dalam pengaturan motor induksi dapat digunakan berbagai kontroler seperti pada pengaturan kecepatan motor arus searah. Pengaturan kecepatan motor induksi dengan metode *vector control* memerlukan inverter untuk memberikan tegangan pada motor. Pada beberapa paper telah diteliti pengaturan kecepatan motor induksi dengan menggunakan *switching inverter* dimana tegangan yang diberikan pada motor induksi mempunyai perubahan hanya berkisar pada satu, nol dan negatif satu. Dalam paper ini

penelitian dilakukan untuk memperbaiki proses *switching* dari inverter dengan menggunakan kontroler logika fuzzy sehingga diperoleh pengaturan kecepatan motor induksi dengan respon yang lebih cepat dan halus. Untuk dapat merancangnya maka pada penelitian ini dilakukan simulasi untuk mendapatkan gambaran hasil yang akan didapat. Motor induksi yang dipakai sebagai *plant* pada penelitian ini merupakan motor induksi tiga fase rotor sangkar yang terhubung bintang dengan distribusi kumparan yang simetris sinusoidal.

2. Pemodelan Motor Induksi

Model *d-q* motor induksi merupakan dasar pengaturan kecepatan motor induksi dengan metode *vector control*. Sistem koordinat tiga fase statis ditransformasikan ke koordinat dinamis *d-q*, koordinat ini berputar mengikuti kecepatan sinkron motor atau medan putar stator. Dengan transformasi ini didapatkan model motor induksi yang lebih sederhana, model tegangan dan arus pada persamaan ini merupakan variabel dengan referensi koordinat *d-q*, transformasi tegangan tiga fase ke koordinat *d-q* menggunakan transformasi Park seperti ditunjukkan pada persamaan berikut [3]:

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(-\theta) & \cos\left(-\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(-\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin(-\theta) & \sin\left(-\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(-\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{ds} \\ \dot{I}_{qs} \\ \dot{I}_{dr} \\ \dot{I}_{qr} \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} -R_s L_r & \omega_r M^2 & R_r M & \omega_r L_r M \\ -\omega_r M^2 & -R_s L_r & -\omega_r L_r M & R_r M \\ R_s M & -\omega_r L_s M & -R_r L_s & -\omega_r L_r L_s \\ \omega_r L_s M & R_s M & \omega_r L_r L_s & -R_r L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$+ \frac{1}{D} \begin{bmatrix} L_r & 0 & -M & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -M \\ -M & 0 & L_s & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix}; D = L_r L_s - M^2$$

dengan persamaan torsi elektromagnetik motor [3]:

$$T_e = \frac{3}{2} PM (i_{dr} i_{qs} - i_{ds} i_{qr}) \quad (3)$$

Kecepatan motor induksi yang merupakan fungsi torsi elektromagnetik dan torsi beban sebagai berikut :

$$\frac{J}{P} \frac{d}{dt} \omega_r + K_d \omega_r = T_e - T_L \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_r = \omega_r \quad (5)$$

Persamaan-persamaan diatas dapat diselesaikan dengan menggunakan simulasi komputer.

3. Pembuatan Program Simulasi

Vector Control Motor Induksi

Vector control merupakan pemisahan (*decoupled*) pengaturan dari fluks dan torsi motor induksi. Dari Gambar 1 dimana fluks $\bar{\lambda}_m$ berhimpit dengan sumbu *d* sehingga fluks dan arus stator dapat dinyatakan [1]:

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_m &= \lambda_m \\ \bar{i}_s &= i_{ds} + j i_{qs} \end{aligned} \quad (6)$$

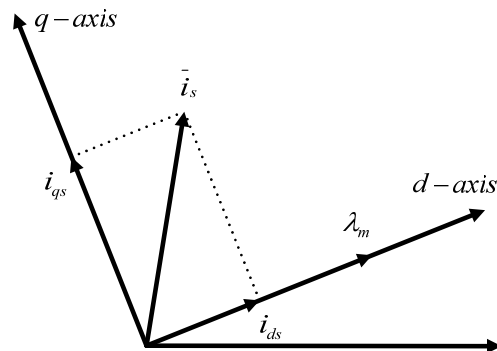
Sehingga persamaan torsi motor dapat dinyatakan berikut [5]:

$$T_e = \frac{3}{2} P \text{Re} (j \bar{\lambda}_m \bar{i}_s) = \frac{3}{2} P \text{Re} (j \lambda_m (i_{ds} - j i_{qs})) = \frac{3}{2} P \lambda_m i_{qs} \quad (7)$$

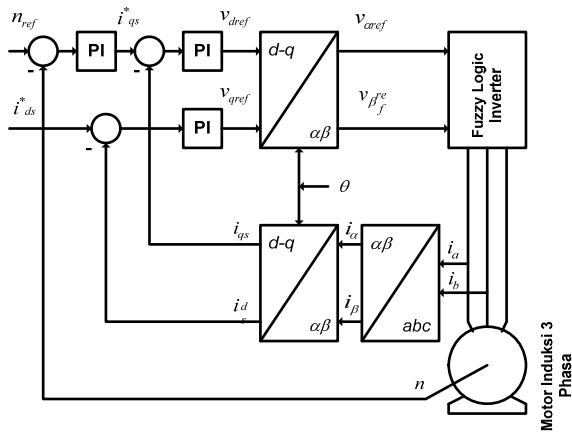
Dari persamaan (7) torsi motor hanya tergantung pada nilai dari arus stator komponen sumbu *q* i_{qs} , serta fluks motor $\bar{\lambda}_m$. Sedangkan komponen arus stator yang lain i_{ds} mempengaruhi besarnya fluks $\bar{\lambda}_m$. Persamaan torsi dari motor induksi ini terlihat seperti persamaan torsi motor arus searah. Dengan mengatur baik fluks maupun arus stator i_{qs} maka kita dapat mengatur torsi motor induksi dengan kata lain dapat mengatur kecepatan dari motor induksi dengan mudah.

Diagram Vector Control Motor Induksi

Secara umum skema dasar dari *vector control* motor induksi ditunjukkan seperti Gambar 2. Pengaturan torsi motor induksi dengan mengatur arus stator pada komponen sumbu *d-q* memerlukan dua input referensi arus stator i_{ds}^* (referensi fluks) disebut juga arus medan i_m^* dan arus stator i_{qs}^* (referensi torsi) disebut juga arus torsi i_t^* . Referensi fluks i_{ds}^* dibuat konstan dengan besar 0.08 A, sedangkan referensi torsi i_{qs}^* merupakan keluaran dari pengaturan referensi kecepatan.



Gambar 1. Vektor fluks dan arus stator [1]



Gambar 2. Skema dasar vector control motor induksi

Dua buah arus fasa i_a dan i_b diukur dari kumparan stator motor, arus ini kemudian ditransformasikan ke sumbu α, β menghasilkan dua arus $i_{s\alpha}$ dan $i_{s\beta}$. Dua komponen arus ini kemudian ditransformasikan ke sistem koordinat putar $d-q$ dengan transformasi Park, didapatkan dua komponen arus stator i_{ds} dan i_{qs} . Kedua komponen arus ini dibandingkan dengan referensi i_{ds}^* (referensi fluks) dan i_{qs}^* (referensi torsi). Hasil dari pengaturan kedua komponen arus yaitu v_{dsref} dan v_{qsref} yang kemudian ditransformasikan kembali ke sumbu α, β . Tegangan $v_{\alpha ref}$ dan $v_{\beta ref}$ merupakan dua input bagi kontroler logika fuzzy, keluaran dari kontroler ini berupa tiga buah output U_a, U_b, U_c , output ini dikalikan dengan konstanta menghasilkan tegangan V_a, V_b, V_c yang di suplai ke motor.

Blok diagram pengaturan motor induksi diatas memerlukan informasi dari motor berupa arus stator fase a dan fase b , kecepatan rotor serta posisi rotor θ yang dipergunakan untuk transformasi vektor. Pada blok diagram diatas terdapat tiga transformasi koordinat, trans-formasi abc ke $\alpha\beta$ (Transformasi Clarke) [4]

$$i_{s\alpha} = i_a$$

$$i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}i_a + \frac{2}{\sqrt{3}}i_b \tag{8}$$

transformasi $\alpha\beta$ ke dq (Transformasi Park) [4]:

$$i_{ds} = i_{s\alpha} \cos \theta + i_{s\beta} \sin \theta$$

$$i_{qs} = -i_{s\alpha} \sin \theta + i_{s\beta} \cos \theta \tag{9}$$

transformasi dq ke $\alpha\beta$ (Transformasi Park inverse) :

$$i_{s\alpha} = i_{ds} \cos \theta - i_{qs} \sin \theta$$

$$i_{s\beta} = i_{ds} \sin \theta + i_{qs} \cos \theta \tag{10}$$

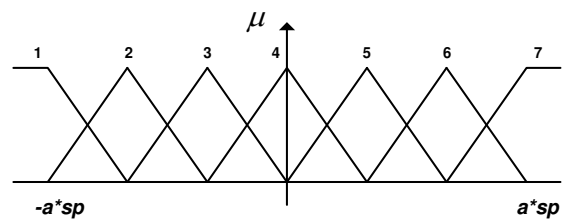
Inverter Menggunakan Kontroler Logika Fuzzy

Inverter merupakan komponen yang berfungsi sebagai driver, inverter yang akan dibuat mempunyai dua input $v_{\alpha ref}$ dan $v_{\beta ref}$ dengan tiga output aksi kontrol U_a, U_b, U_c . Kontroler logika fuzzy diatas mempunyai dua buah input yaitu $v_{\alpha ref}$ dan $v_{\beta ref}$ dengan tiga output U_a, U_b, U_c .

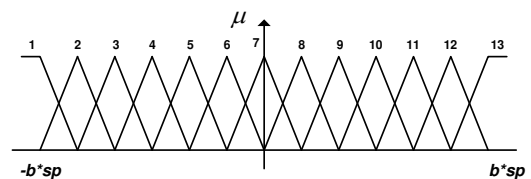
Fungsi keanggotaan input dan output dibuat dinamis berdasarkan referensi atau setpoint, bentuk fungsi keanggotaan kedua input seperti Gambar 3, dengan distribusi segitiga simetris sebanyak 7 jenis himpunan fuzzy.

Fungsi keanggotaan ketiga output seperti Gambar 4, dengan distribusi segitiga simetris sebanyak 13 jenis himpunan fuzzy, referensi atau sp dibuat sama dengan arus medan $i_m = 0.08$.

Aturan dasar (*rules base*) yang mendasari inverter merupakan hal terpenting dari desain, pada penelitian ini aturan dasar dibuat berdasarkan algoritma *space vector inverter*, algoritma inverter ini seperti Gambar 5, tegangan yang diberikan pada motor induksi berdasarkan posisi tegangan input $v_{\alpha ref}$ dan $v_{\beta ref}$, dimana besarnya tegangan output seperti Tabel 1. Pada posisi 1 dimana $v_{\beta ref} = 0$ dan $v_{\alpha ref} < 0$ maka tegangan output inverter berdasar tabel diatas untuk $U_a = 2/3$, nilai ini



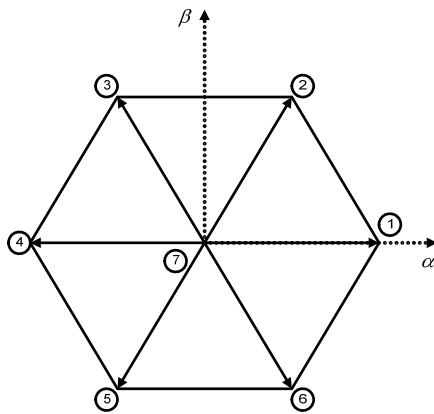
Gambar 3. Fungsi keanggotaan input $v_{\alpha ref}$ dan $v_{\beta ref}$



Gambar 4. Fungsi Keanggotaan Output U_a, U_b, U_c

Tabel 1. Tegangan output inverter *space Vector* [5]

Posisi input	Tegangan output		
	U _a	U _b	U _c
1	2/3	-1/3	-1/3
2	1/3	1/3	-2/3
3	-1/3	2/3	-1/3
4	-2/3	1/3	1/3
5	-1/3	-1/3	2/3
6	1/3	-2/3	1/3
7	0	0	0



Gambar 5. Algoritma inverter *space vector* [5]

tidak akan berubah untuk berapapun nilai dari v_{aref} kecuali nilainya nol, dari sini terlihat jelas bahwa tegangan keluaran inverter ini kurang halus.

Dengan menggunakan dasar inverter tersebut maka dapat kita susun suatu aturan dasar untuk KLF, dimana untuk $v_{bref} = 0$ maka tegangan output akan berubah sesuai dengan nilai dari v_{aref} . Untuk keadaan diatas dimana $v_{bref} = 0$ (himpunan fuzzy 4), untuk tegangan v_{aref} besar (himpunan fuzzy 7) maka tegangan outputnya juga besar atau maksimal sesuai dengan tabel 1 diatas yaitu $U_a = 2/3$ (himpunan fuzzy 13). Untuk nilai tegangan v_{aref} yang lebih kecil maka output tegangan juga kecil, hal ini dapat dinyatakan sebagai berikut :

Jika $v_{aref} = 7$ dan $v_{bref} = 4$ maka $U_a = 13$

Jika $v_{aref} = 6$ dan $v_{bref} = 4$ maka $U_a = 12$

Jika $v_{aref} = 5$ dan $v_{bref} = 4$ maka $U_a = 11$

demikian seterusnya, hal ini juga diterapkan pada tegangan output U_b dan U_c . Jumlah aturan dasar yang dibuat sebanyak 49 buah, hal ini bertujuan agar aturan dasar dapat mencakup keseluruhan input referensi yang mungkin.

Tabel 2. Aturan dasar untuk output Uc

V _β	V _α	1	2	3	4	5	6	7
1	13	12	11	10	9	8	7	6
2	12	11	10	9	8	7	6	5
3	11	10	9	8	7	6	5	4
4	10	9	8	7	6	5	4	3
5	9	8	7	6	5	4	3	2
6	8	7	6	5	4	3	2	1
7	7	6	5	4	3	2	1	0

Tabel 3. Aturan dasar untuk output Ua

V _β	V _α	1	2	3	4	5	6	7
1	4	5	6	7	8	9	10	11
2	3	4	5	7	9	10	11	12
3	2	3	4	7	10	11	12	13
4	1	2	3	7	11	12	13	14
5	2	3	4	7	10	11	12	13
6	3	4	5	7	9	10	11	12
7	4	5	6	7	8	9	10	11

Tabel 4. Aturan dasar untuk output Ub

V _β	V _α	1	2	3	4	5	6	7
1	7	6	5	4	3	2	1	0
2	8	7	6	5	4	3	2	1
3	9	8	7	6	5	4	3	2
4	10	9	8	7	6	5	4	3
5	11	10	9	8	7	6	5	4
6	12	11	10	9	8	7	6	5
7	13	12	11	10	9	8	7	6

4. Simulasi Program dan Analisa

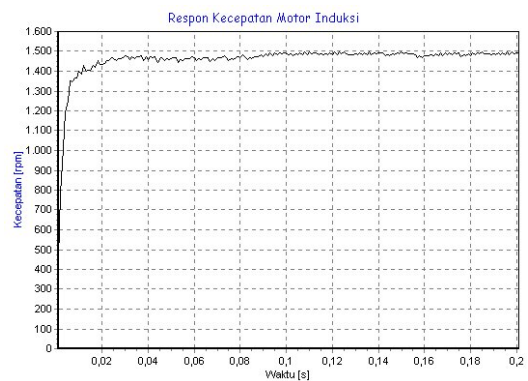
Karakteristik dasar respon *plant* motor yang disimulasikan pada penelitian ini ditunjukkan seperti pada Gambar 6, dengan frekuensi tegangan input 50 Hz, motor memiliki waktu naik (*rise time*) 0.015 detik dengan *overshoot* sekitar 27 % dari setpoint dan *settling time* 0.1 detik, respon motor menjadi tidak stabil pada frekuensi tegangan input diatas 60 Hz. Dari sini terlihat pengaturan kecepatan motor induksi secara *open loop* terbatas pada kecepatan tertentu dengan respon output yang kurang baik.

Hasil simulasi program pada kecepatan 1500 rpm dengan kondisi tanpa beban nilai $K_p : 0.00008$, $K_i : 0.5$, faktor pengali fuzzy $a : 4$, $b : 0.3$ seperti Gambar 7, respon motor memiliki waktu naik 0.006 detik, *settling time* 0.008 detik tanpa *overshoot* dengan kesalahan tunak 5 rpm.

Perbandingan dengan Switching Inverter

Salah satu inverter sederhana yang sering digunakan pada pengaturan kecepatan motor induksi adalah *switching inverter*, tegangan output dari inverter ini hanya tiga macam yaitu satu, nol atau negatif satu. Respon dari *switching inverter* seperti pada Gambar 8, dengan kecepatan input 1500 rpm dan konstanta kontroler PI, $K_p : 0.00008$, $K_i : 0.5$, sama dengan yang digunakan pada inverter kontroler logika fuzzy dengan respon seperti Gambar 7.

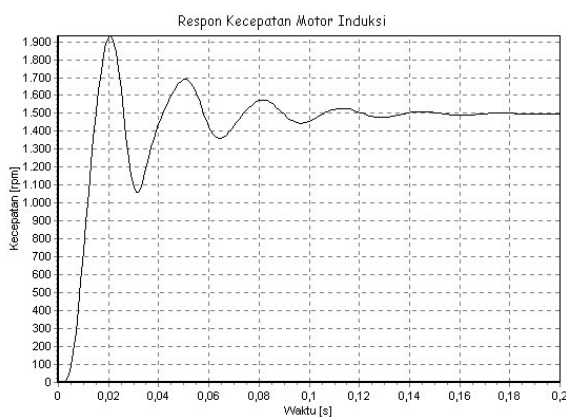
Respon sistem memiliki waktu naik 0.01 detik dengan *settling time* 0.02 detik dengan kesalahan tunak sekitar 10 rpm. Dari Gambar terlihat respon sistem yang dihasilkan memiliki performansi yang kurang baik bila dibandingkan dengan inverter menggunakan kontroler logika fuzzy, respon lebih lambat serta tidak halus dengan kesalahan tunak yang besar.



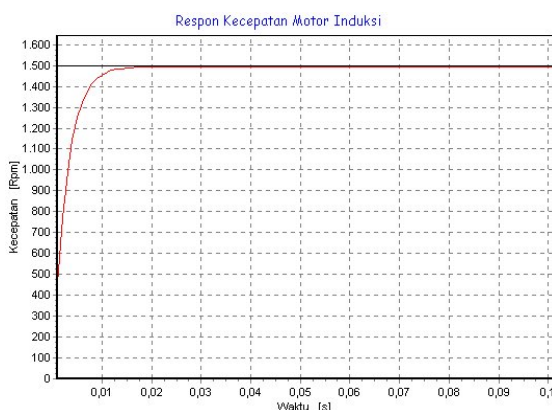
Gambar 8. Respon sistem dengan *switching inverter*

Tabel 5. Karakteristik respon untuk perubahan kontroler PI, Kecepatan input : 1500 rpm

Kontroler PI		Tr [s]	Ts [s]	Ess [rpm]	Ket.
Kp	Ki				
0.00008	0.1	0.038	0.055	31.765	-
0.00008	0.5	0.006	0.008	5.976	-
0.00008	1	0.002	0.003	3.059	-
0.00008	2	0.001	0.001	1.480	Over
0.08	0.5	0.006	0.008	5.972	-
0.5	0.5	0.007	0.010	5.956	-
1	0.5	0.01	0.012	5.949	Osilasi



Gambar 6. Respon Open loop dengan $f : 50$ Hz



Gambar 7. Respon sistem dengan $K_p : 0.00008$, $K_i : 0.5$, $a : 4$, $b : 0.3$

Simulasi dengan Perubahan Nilai Kontroler Proporsional Integral

Pada bagian ini simulasi dilakukan dengan perubahan kombinasi nilai konstanta proporsional K_p dan konstanta integral K_i . Secara lengkap hasil simulasi seperti pada Tabel 2, dengan kecepatan input 1500 rpm faktor pengali fungsi keanggotaan fuzzy $a : 4$ dan $b : 0.3$. Secara umum semakin besar konstanta integral K_i karakteristik respon semakin baik dimana waktu naik dan *settling time* semakin cepat serta kesalahan tunak E_{ss} semakin kecil, tetapi bila K_i diperbesar terjadi *overshoot*. Perubahan nilai K_p berpengaruh pada kecepatan respon sistem dimana semakin besar K_p respon semakin lambat dan bila diperbesar menimbulkan osilasi, sedangkan nilai kesalahan tunak tidak mengalami perubahan. Respon terbaik didapatkan pada nilai $K_p : 0.00008$ dan $K_i : 1$. Respon yang dihasilkan tetap untuk kecepatan 750 rpm maupun kecepatan 3000 rpm.

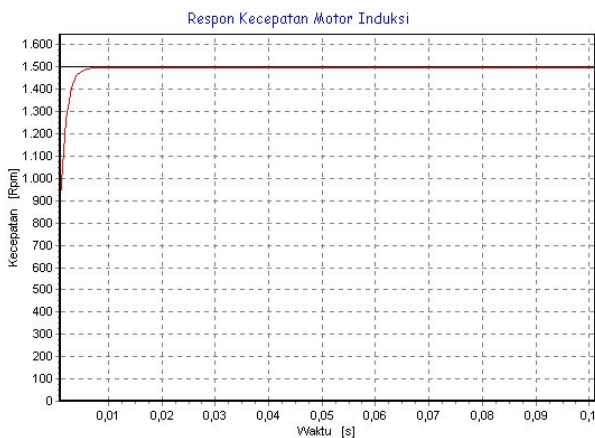
Simulasi dengan Perubahan Nilai Pengali Fungsi Keanggotaan Fuzzy

Pada bagian ini simulasi dilakukan dengan perubahan kombinasi nilai faktor pengali fungsi keanggotaan fuzzy a dan b . Secara lengkap hasil simulasi seperti pada tabel 6, dengan kecepatan input 1500 rpm nilai konstanta proporsional $K_p : 0.00008$ dan $K_i : 0.5$. Perubahan nilai b berpengaruh pada nilai kesalahan tunak dimana semakin kecil nilai b kesalahan tunak semakin kecil, kesalahan tunak tidak mengalami penurunan berarti pada nilai b dibawah 0.1. Osilasi pada respon diatas

terjadi pada nilai b yang besar. Perubahan nilai a tidak begitu mempengaruhi respon sistem, perubahan kecil terjadi pada kesalahan tunak. Respon terbaik didapatkan pada nilai $a : 4$ dan $b : 0.1$. Respon yang dihasilkan tetap untuk kecepatan 750 rpm dan 3000 rpm. Respon terbaik sistem dihasilkan pada nilai $K_p : 0.00008$, $K_i : 1$, $a : 4$ dan $b : 0.1$, sistem pada nilai parameter ini memiliki respon kecepatan yang cepat tanpa terjadi *overshoot* dengan waktu naik 0.002, *setling time* 0.003 dan kesalahan tunak sekitar 2 rpm pada kecepatan input 1500 rpm seperti terlihat pada Gambar 9.

Tabel 6. Karakteristik respon untuk perubahan faktor pengali fuzzy, Kecepatan input : 1500 rpm

Faktor Pengali		Tr [s]	Ts [s]	Ess [rpm]	Ket.
A	b				
4	0.1	0.006	0.008	4.822	-
4	0.3	0.006	0.008	5.976	-
4	1	0.006	0.008	19.693	-
4	5	0.026	0.035	60.814	Osilasi
0.5	0.3	0.006	0.008	6.004	-
1	0.3	0.006	0.008	5.975	-
8	0.3	0.006	0.008	6.054	-



Gambar 9. Respon terbaik sistem dengan $K_p : 0.00008$, $K_i : 1$, $a : 4$, $b : 0.1$

5. Kesimpulan

Penggunaan kontroler logika fuzzy pada inverter motor induksi dapat memperbaiki respon yang dihasilkan oleh *switching inverter*, respon yang dihasilkan lebih cepat serta lebih halus dengan kesalahan tunak lebih kecil. Perubahan nilai faktor pengali fungsi keanggotaan fuzzy a dan b hanya mempengaruhi kesalahan tunak respon sistem, semakin kecil nilai b kesalahan tunak semakin kecil dan pada nilai b yang besar sistem berosilasi, kesalahan tunak tidak mengalami perubahan berarti pada perubahan nilai a . Respon kecepatan motor terbaik dicapai pada nilai parameter kontroler proporsional integral $K_p: 0.00008$, $K_i : 1$ sedangkan nilai pengali fuzzy $a : 4$ dan $b : 0.1$.

Daftar Acuan

- [1] Z. Mounir, B.M.E. Hachemi, D. Demba, IEEE Trans, On Vehicular Technology, vol. 55, No. 6, 2006.
- [2] G.K. Singh, D.K.P. Singh, S.K. Lim, IEEE. Transc. On Industrial Electronic, vol. 52, No. 6, 2005.
- [3] I. Boldea, S.A. Nasar, Vector Control of AC Drives, CRC Press Inc., 1992.
- [4] Anonim, Field Oriented Control of 3-Phase AC-Motors, Texas Instruments Europe, <http://www.ti.com>, 1998.
- [5] Z. Yu, D. Figoli, AC Induction Motor Control Using Constant V/Hz Principle and Space Vector PWM Technique with TMS320C240, Texas Instruments, <http://www.ti.com>, 1998.