

PERANCANGAN ESTIMATOR TAHANAN ROTOR MOTOR INDUKSI TIGA FASA PADA PENGENDALIAN TANPA SENSOR KECEPATAN

Akhmad Musafa¹

¹Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Budi Luhur
Jl. Ciledug Raya Petukangan Utara Jakarta Selatan 12260
E-mail : musafa_81@yahoo.com

Abstract— This paper proposed a new simple method for estimation the rotor resistance at vector control as compensation for increasing of rotor resistance in sensorless induction motor control which resulted by increasing of temperature after motor operate. Estimate done by compensation of error signal between magnetization current obtained by the flux model and magnetization current obtained by observer model using concept of IP controller. Model of motor made in stator reference frame with parameter stator current and rotor flux, controller is current vector control, and rotor speed estimation use full order observer. Simulation conducted for sensorless motor control with constant rotor resistance and sensorless motor control with increasing of rotor resistance for 100%, 150% and 200% variation. The simulation result, it can be seen that IP estimator by K_p 0.469 and K_i 0.331 can work better for compensation the rotor resistance increasing until 200%.

KeyWords—Compensation, Increasing of rotor resistance, IP estimator, Sensorless control.

I. PENDAHULUAN

Suatu sistem kendali yang ideal memiliki parameter yang sama dengan parameter motor. Dalam simulasi, pada umumnya model motor dibuat dengan asumsi parameter tahanan rotor adalah konstan. Namun pada kenyataannya, setelah motor beroperasi,

naiknya temperatur motor dapat mengakibatkan tahanan rotor berubah yaitu naik bertambah besar, sehingga terjadi perbedaan nilai parameter tahanan rotor antara pengendali dan motor[1].

Dalam pengendalian motor induksi dengan menggunakan pengendali vektor, kenaikan parameter tahanan rotor yang disebabkan meningkatnya temperatur dapat mengakibatkan beberapa kerugian seperti eksitasi kurang atau berlebih dan dapat merusak kondisi fluks dan torsi motor[2]. Selain itu, kenaikan tahanan rotor pada pengendalian motor induksi tanpa sensor kecepatan juga semakin memperbesar kesalahan kecepatan estimasi yang dihasilkan oleh observer[3]. Kesalahan kecepatan estimasi akan mempengaruhi kondisi posisi sinkron θ_e yang digunakan pada transformasi sehingga akan mempengaruhi respon pengendalian secara keseluruhan.

Untuk itu diperlukan kompensasi sehingga efek kenaikan tahanan rotor ini dapat dikurangi atau bahkan dihilangkan.

Dalam paper ini kompensasi kenaikan tahanan rotor dirancang berdasarkan perbedaan nilai arus magnetisasi yang diperoleh dari fluks model dan arus magnetisasi yang diperoleh dari model observer dengan menggunakan konsep pengendali IP.

II. MODEL MOTOR INDUKSI FULL ORDER OBSERVER DAN FLUKS MODEL

Pada pengendalian motor induksi tanpa sensor kecepatan, informasi kecepatan yang akan diumpan balikkan diestimasi dengan memanfaatkan informasi arus dan fluks motor menggunakan model observer. Observer yang digunakan pada makalah ini adalah full order observer yang diletakkan pada sumbu dq dengan faktor gain G (g1, g2, g3, g4) yang mengacu pada [4] dan dinyatakan dengan persamaan keadaan berikut:

$$\frac{d}{dt} \hat{i}_{ds} = \left[\frac{R}{\sigma L_s} + \frac{(1-\sigma)}{\sigma L_s} \right] \hat{i}_{ds} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \hat{\Psi}_{dr} + \frac{L_m \omega}{\sigma L_s L_r} \hat{\Psi}_{qr} + \omega \hat{i}_{qs} + \frac{1}{\sigma L_s} v_{ds} + g_1 (\hat{i}_{ds} - i_{ds}) - g_2 (\hat{i}_{qs} - i_{qs}) \quad \dots(1)$$

$$\frac{d}{dt} \hat{i}_{qs} = \left[\frac{R}{\sigma L_s} + \frac{(1-\sigma)}{\sigma L_s} \right] \hat{i}_{qs} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \hat{\Psi}_{dr} + \frac{L_m \omega}{\sigma L_s L_r} \hat{\Psi}_{qr} - \omega \hat{i}_{ds} + \frac{1}{\sigma L_s} v_{qs} + g_3 (\hat{i}_{ds} - i_{ds}) + g_4 (\hat{i}_{qs} - i_{qs}) \quad \dots(2)$$

$$\frac{d}{dt} \hat{\Psi}_{dr} = \frac{L_m}{T_r} \hat{i}_{ds} - \frac{1}{T_r} \hat{\Psi}_{dr} + (\omega_e - \omega) \hat{\Psi}_{qr} + g_5 (\hat{i}_{ds} - i_{ds}) - g_6 (\hat{i}_{qs} - i_{qs}) \quad \dots(3)$$

$$\frac{d}{dt} \hat{\Psi}_{qr} = \frac{L_m}{T_r} \hat{i}_{qs} - \frac{1}{T_r} \hat{\Psi}_{qr} - (\omega_e - \omega) \hat{\Psi}_{dr} + g_7 (\hat{i}_{ds} - i_{ds}) + g_8 (\hat{i}_{qs} - i_{qs}) \quad \dots(4)$$

$$\hat{\omega}_e = K_p \left(e_{ids} \hat{\Psi}_{qr} - e_{iqs} \hat{\Psi}_{dr} \right) + K_i \int \left(e_{ids} \hat{\Psi}_{qr} - e_{iqs} \hat{\Psi}_{dr} \right) dt \quad \dots(5)$$

Persamaan fluks model yang digunakan pada paper ini mengacu pada [4] dan dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{d}{dt} i_{mr} = \frac{R_r}{L_r} (i_{ds} - i_{mr}) \quad \dots(6)$$

$$\omega_e = p \omega_r + \frac{R_r i_{qs}^*}{L_r i_{mr}} \quad \dots(7)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_e = \omega_e \quad \dots(8)$$

$$T_e = N_p (1 - \sigma) L_s i_{qs} i_{mr} \quad \dots(9)$$

Masukan fluks model adalah kecepatan estimasi dari observer dengan keluaran berupa tegangan stator sumbu d (Vsd) dan sumbu q (Vsqs) serta nilai estimasi posisi θ_e .

III. PERUBAHAN TAHANAN ROTOR MOTOR INDUKSI

Model motor yang digunakan pada simulasi pengendalian tanpa sensor kecepatan pada [4], [5], dan [6] adalah model motor dengan nilai tahanan rotor (Rr) tetap. Pada kenyataannya, setelah beroperasi sejalan dengan bertambahnya waktu, Rr dapat mengalami perubahan yaitu kenaikan nilai tahanan rotor akibat dari naiknya temperatur. Kenaikan nilai tahanan rotor akibat kenaikan temperatur dinyatakan dengan persamaan:

$$R_r = R_{r0}(1 + \alpha(t - t_0)) = R_{r0}(1 + \alpha\Delta t) \quad \dots(10)$$

dengan R_r adalah tahanan rotor aktual (Ω), R_{r0} adalah tahanan rotor awal (Ω), α adalah koefisien suhu R_r (OC-1), t_0 temperatur awal R_r (OC) dan t temperatur akhir R_r (OC). Sinyal kenaikan tahanan rotor pada simulasi ini dibuat dengan asumsi keadaan awal tetap kemudian naik pada $t=7$ detik dan kembali ke keadaan tetap yang baru pada $t=8$ detik, dengan kemiringan (slope) dirumuskan:

$$Slope(s) = \frac{R_r - R_{r0}}{\Delta t} = \frac{\Delta R_r}{\Delta t} \frac{\Omega}{\det} \quad \dots(11)$$

ΔR_r adalah besar kenaikan tahanan rotor (Ω), Δt adalah lama waktu kenaikan tahanan rotor (detik).

IV. PERANCANGAN ESTIMATOR TAHANAN ROTOR

Pada [3] dan [2], kompensasi kenaikan tahanan rotor dapat dilakukan berdasarkan persamaan torsi elektromagnetik. Pada paper ini, pendeteksian efek kenaikan tahanan rotor dilakukan dengan cara melihat perbedaan nilai arus magnetisasi yang diperoleh dari fluks model dan arus magnetisasi yang diperoleh dari model observer sebagai sebuah fungsi karakteristik F_{ref} dan F . Penurunan nilai arus magnetisasi estimasi

yang diperoleh dari model observer sebanding dengan kenaikan tahanan rotor pada motor.

Fungsi karakteristik F_{ref} adalah arus magnetisasi yang diperoleh dari fluks model, sehingga:

$$F_{ref} = i_{mr} = \int \frac{R_r}{L_r} (i_{ds} - i_{mr}) dt \quad \dots(12)$$

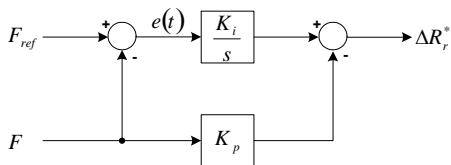
Sedangkan fungsi karakteristik F adalah arus magnetisasi yang diperoleh dari model observer yang diperoleh dengan cara melakukan estimasi terhadap variabel motor yaitu i_{ds} , i_{qs} , v_{ds} , v_{qs} , dan ω_e dari persamaan pengendali vektor. Arus magnetisasi estimasi diperoleh melalui pembagian harga mutlak vektor fluks rotor estimasi dengan induktansi magnetisasi, yaitu:

$$F = i_{mr_est} = \frac{\sqrt{\hat{\Psi}_{dr}^2 + \hat{\Psi}_{qr}^2}}{L_m} \quad \dots(13)$$

Selisih antara fungsi karakteristik pada persamaan (12) dan (13) merupakan fungsi kesalahan yang dapat digunakan untuk melakukan kompensasi kenaikan tahanan rotor. Fungsi kesalahan ini dapat dinyatakan sebagai:

$$e(t) = F_{ref} - F \quad \dots(14)$$

Kompensasi kenaikan tahanan rotor dilakukan dengan menggunakan IP estimator yang akan mengestimasi sinyal kenaikan tahanan rotor dengan menggunakan konsep pengendali IP (Integral & Proportional). Diagram blok IP estimator seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram blok IP estimator

Dari Gambar 1 di atas, keluaran IP estimator adalah sinyal estimasi kenaikan tahanan rotor ΔR_r^* yang dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\Delta R_r^* = Ki \int e(t) dt - Kp.F \quad \dots(15)$$

$$\Delta R_r^* = Ki \int (F_{ref} - F) dt - Kp.F \quad \dots(16)$$

V. SIMULASI DAN ANALISA HASIL

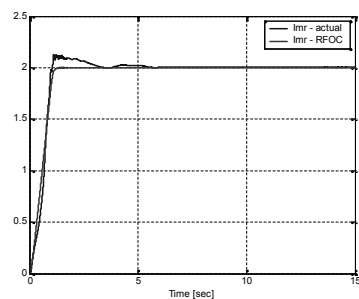
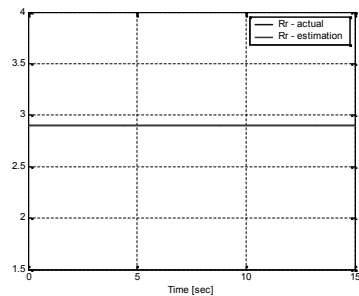
SIMULASI

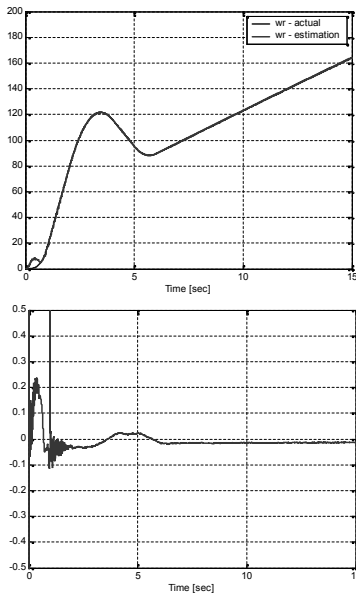
Dalam simulasi, motor induksi yang digunakan adalah motor induksi rotor sangkar tiga fasa 220/380volt Y, 50 Hz dengan parameter motor (tanpa kenaikan R_r) mengacu pada [5]. Konstanta pengendali arus (Td) yang digunakan adalah 1×10^{-3} , dengan asumsi masukan

torsi beban sangat kecil sehingga dapat diabaikan (TL=0). Konstanta observer yang digunakan adalah $K_{obs}=1.33$, dengan $K_p=8$ dan $K_i=650$.

Simulasi dilakukan untuk pengendalian motor induksi dengan kenaikan R_r tanpa adanya estimator dan pengendalian motor induksi dengan kenaikan R_r yang menggunakan estimator. Simulasi dilakukan untuk kenaikan tahanan rotor 100% ($s=2.9\Omega/\text{det}$), 150% ($s=4.35\Omega/\text{det}$) dan 200% ($s=5.8\Omega/\text{det}$) dari nilai awalnya, dengan koefisien temperatur tahanan rotor $\alpha=10C^{-1}$.

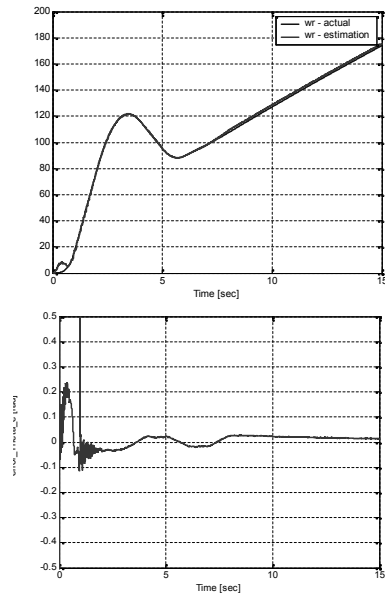
Hasil simulasi pengendalian dengan tahanan rotor tetap ditunjukkan pada Gambar 2.



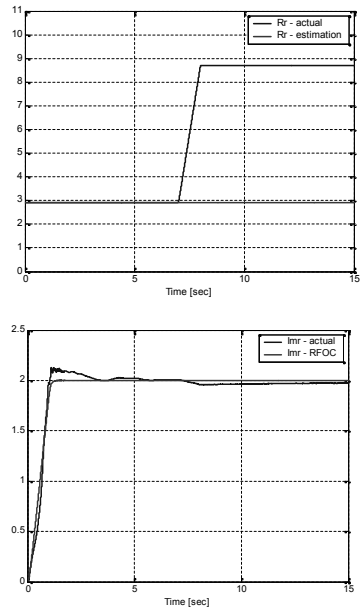
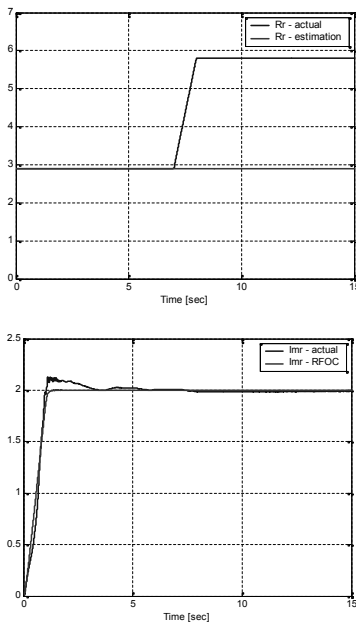


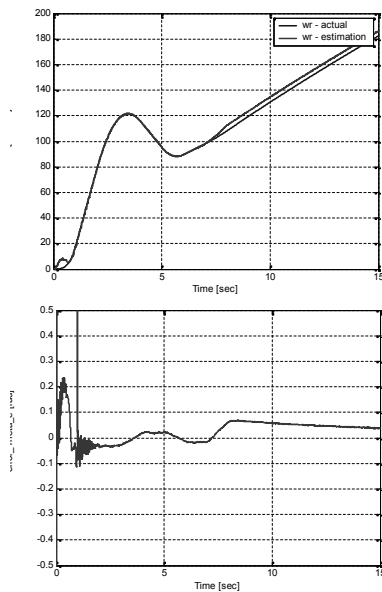
Gambar 2. Hasil simulasi dengan Rr tetap

Hasil simulasi pengendalian tanpa estimator dengan kenaikan tahanan rotor 100% dan 200% ditunjukkan pada 3 dan 4.



Gambar 3. Hasil simulasi dengan kenaikan Rr 100%





Gambar 4. Hasil simulasi dengan kenaikan R_r 200%

Dari hasil simulasi pengendalian motor induksi tanpa sensor kecepatan dengan R_r tetap, respon i_{ds} dan i_{qs} mampu mengikuti masukan acuan. Persen kesalahan keadaan tunak estimasi i_{ds} adalah 1.9666% dan i_{qs} sebesar 9.3386%. Pada kondisi awal i_{mr} terjadi lonjakan sebesar 6.65% mencapai nilai 2.133 A pada $t=1.1dt$ dan mencapai keadaan tunak pada $t=5.5dt$. Hal ini disebabkan model motor yang digunakan dalam simulasi merepresentasikan keadaan sebenarnya. Setelah $t=5.5dt$ i_{mr} aktual motor mampu mengikuti i_{mr} pengendali dengan persen kesalahan sebesar 0.25%. Respon ψ_{dr} estimasi mampu mengikuti ψ_{dr} pengendali dengan persen kesalahan estimasi sebesar 0.8734%. Nilai keadaan

tunak ψ_{qr} adalah 0 Wb, sedangkan ψ_{qr} estimasi sebesar 0.005 Wb. Kecepatan rotor hasil estimasi mampu mengikuti kecepatan rotor aktual dengan persen kesalahan sebesar 0.2436%, dan menghasilkan kecepatan dasar motor sebesar 121.75 rad/dt (1163 rpm).

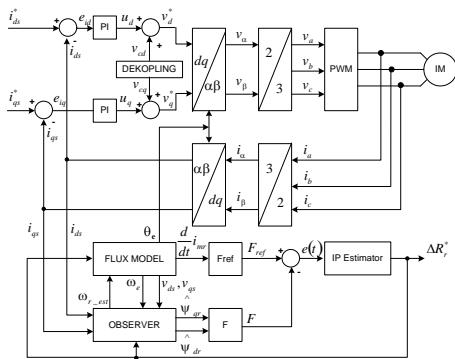
Dari hasil simulasi untuk ketiga variasi kenaikan tahanan rotor di atas terlihat bahwa kenaikan tahanan rotor yang semakin besar semakin mempengaruhi respon pengendalian. Setiap kenaikan tahanan rotor sebesar 50% mengakibatkan ψ_{dr} aktual rata-rata turun 0.002 Wb (0.4366%), ψ_{dr} estimasi rata-rata turun 0.0055 Wb (1.1905%), ψ_{qr} estimasi rata-rata naik 0.0015 Wb, i_{mr} aktual rata-rata turun 0.012A (0.5985%), dan persen kesalahan i_{r} estimasi rata-rata naik 0.9816%. Akibat pengaruh kenaikan tahanan rotor terhadap kecepatan rotor estimasi mengakibatkan besar kesalahan kondisi posisi sinkron θ_e semakin besar. Perbandingan pengaruh kenaikan tahanan rotor 100%, 150%, dan 200% seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Diagram blok pengendalian tanpa sensor kecepatan dengan estimator tahanan rotor seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Simulasi pengendalian dengan IP estimator dilakukan untuk kenaikan tahanan rotor 100%, 150%, dan 200%

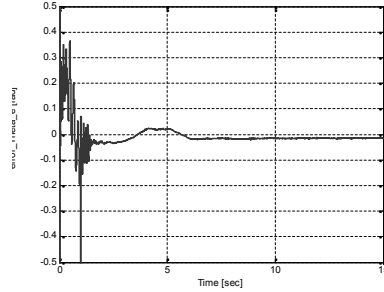
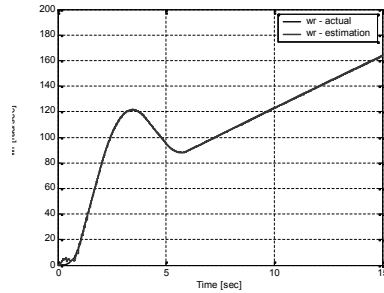
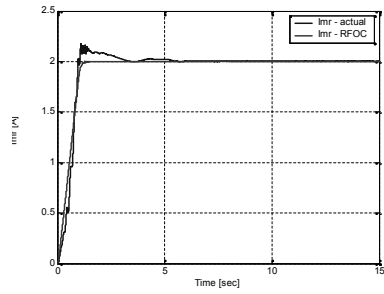
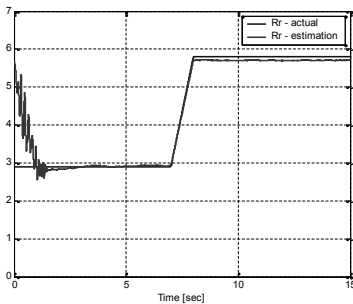
dengan hasil ditunjukkan pada Gambar 6 dan 7.

Tabel 1. Perbandingan respon pengendalian akibat kenaikan Rr

Respon Keadaan Tunak		Rr Tetap	Kenaikan Rr		
			100%	150%	200%
Ψ_{dr} (Wb)	Aktual	0.458	0.452	0.450	0.448
	Estimasi	0.462	0.453	0.4475	0.442
Ψ_{qr} (Wb)	Aktual	0	0	0	0
	Estimasi	0.005	0.008	0.0095	0.011
I_{mr} (A)	Aktual	2.005	1.984	1.975	1.96
	Estimasi	2	2	2	2
ω_r (rad/s)	% error	0.2436	1.8829	2.6927	3.8461

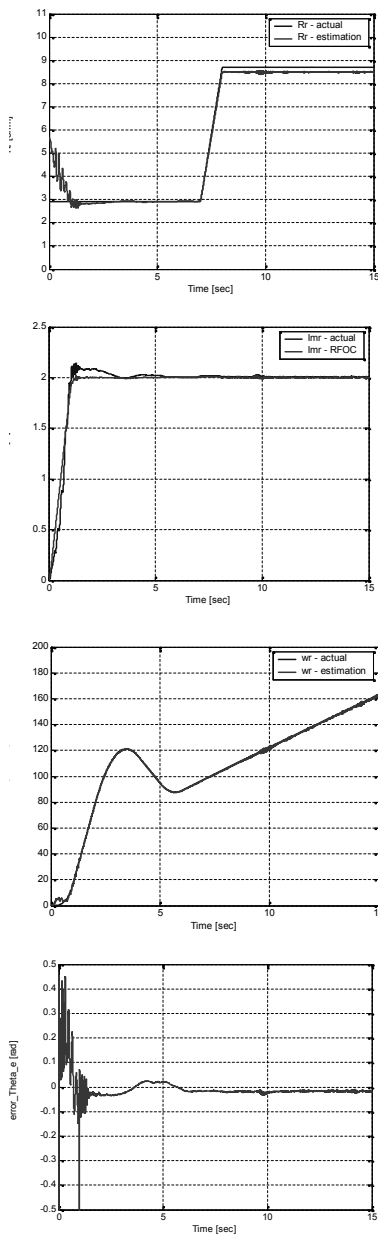


Gambar 5. Diagram blok pengendalian motor induksi tanpa sensor kecepatan dengan estimator tahanan rotor



Gambar 6. Hasil pengendalian dengan IP estimator untuk kenaikan Rr100%

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, konstanta IP estimator terbaik yang digunakan adalah $K_p = 0.469$ dan $K_i = 0.331$, karena untuk nilai K_p dan K_i yang lain dapat mengakibatkan respon pengendalian beresilasi dan cenderung menjadi tidak stabil.



Gambar 7. Hasil pengendalian dengan IP estimator untuk kenaikan Rr 200%

Dari hasil simulasi dengan IP estimator untuk ketiga variasi kenaikan tahanan rotor di atas terlihat bahwa secara keseluruhan estimator mampu mengkompensasi kenaikan tahanan rotor

pada motor sehingga tahanan rotor estimasi mampu mengikuti kenaikan yang terjadi. Hasil kompensasi kenaikan tahanan rotor 150% terlihat mempunyai ripple yang lebih besar dibandingkan dengan hasil kompensasi kenaikan tahanan rotor 100%, sedangkan kompensasi kenaikan tahanan rotor 200% mempunyai ripple lebih besar dari pada kompensasi 100% dan 150%. Hal ini disebabkan oleh semakin besarnya nilai tahanan rotor yang digunakan dalam perhitungan. Hasil kompensasi juga mengakibatkan kesalahan yang terjadi pada posisi sinkron rotor θ_e menjadi semakin kecil. Perbandingan hasil kompensasi kenaikan tahanan rotor 100%, 150%, dan 200% seperti ditunjukkan pada Tabel 2 di bawah ini.

Tabel 2. Perbandingan respon hasil pengendalian dengan adanya IP estimator

Respon Keadaan Tunak	Rr Tetap	Kenaikan Rr						
		100%		150%		200%		
		Tanpa Komp. penalar	Dengan Komp. penalar	Tanpa Komp. penalar	Dengan Komp. penalar	Tanpa Komp. penalar	Dengan Komp. penalar	
ψ/θ_r	Act	0.432	0.422	0.432	0.432	0.438	0.448	0.438
	Est	0.462	0.423	0.462	0.475	0.462	0.442	0.462
ψ/ϕ_r	Act	0	0	0	0	0	0	0
	Est	0.005	0.002	0.005	0.002	0.005	0.011	0.005
i_{mp}	Act	2.005	1.964	2.005	1.972	2.005	1.96	2.005
	Est	2	2	2	2	2	2	2
ω_r /err		1.2436	1.8829	0.2041	2.6927	0.2041	3.8461	0.2041

VI. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi dan analisa dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Semakin besar kenaikan tahanan rotor, maka kesalahan keadaan tunak arus magnetisasi rotor aktual terhadap

acuan dan kesalahan estimasi kecepatan rotor juga semakin besar, sehingga menyebabkan terjadinya kesalahan nilai θ_e yang semakin besar pula.

2. Setiap kenaikan tahanan rotor sebesar 50% mengakibatkan ψ_{dr} aktual turun 0.4366%, ψ_{dr} estimasi turun 1.1905%, ψ_{qr} estimasi naik 0.0015 Wb, i_{mr} aktual turun 0.5985%, dan persen kesalahan ω_r estimasi naik 0.9816%.
3. Kompensasi kenaikan tahanan rotor dapat dilakukan dengan melakukan kompensasi kesalahan arus hasil perbandingan antara arus magnetisasi dari fluks model dan arus magnetisasi dari model observer dengan konsep pengendali IP.
4. Kompensasi kenaikan tahanan rotor 100%, 150% dan 200% menghasilkan i_{mr} aktual keadaan tunak 2.005 A, fluks rotor sumbu d aktual 0.458 Wb, fluks rotor sumbu d estimasi 0.462 Wb, fluks rotor sumbu q estimasi 0.005 Wb, dan persen kesalahan kecepatan estimasi 0.2041%.
5. Kompensator IP dengan konstanta K_p sebesar 0.469 dan K_i sebesar 0.331 mampu bekerja dengan baik untuk mengkompensasi kenaikan tahanan rotor sampai dengan 200%.
6. Konstanta K_p sebesar 0.469 dan K_i sebesar 0.331 pada kompensator IP

merupakan nilai yang sudah tepat karena terbukti mampu bekerja dengan baik untuk mengkompensasi kenaikan tahanan rotor sampai 200% pada aplikasi sistem pengendalian kecepatan.

REFERENSI

- [1] H. Ouadi, F. Giri, "**Induction Motor Robust Adaptive Control**", Proceedings of the 10th Mediterranean conference on control and Automation–MED2002, Lisbon Portugal, 2002.
- [2] Y. Miloud, A. Draou, "**Performance Analysis of a Fuzzy Logic Based Rotor Resistance Estimator of an Indirect Vektor Controlled Induction Motor Drive**", Turk J Elec Engin, VOL . 13, NO. 2, 2005.
- [3] Kubota, K. Matsue, "**Speed Sensorless Field Oriented Control of Induction Motor with Rotor Resistance Adaptation**", in Conf. Rec. Of 1993, IEEE.
- [4] Ridwan Gunawan, "**Pengendalian Motor Induksi Tanpa Sensor Kecepatan Dengan Orientasi Fluks Rotor Pada Performansi Kecepatan di luar Kecepatan Nominal**", Disertasi, Universitas Indonesia, 2006.

- [5] F. Yusivar and S. Wakao, "*Minimum Requirement of Motor Vector Control Modelling and Simulation Utilizing C-Mex S-function in MATLAB/SIMULINK*", IEEE.
- [6] Fery, "*Pengendali Vektor Arus dan Perbaikan Kesalahan Estimasi Pada Motor Induksi Tanpa Sensor Kecepatan*", Skripsi, Universitas Indonesia, 2004.