

Pemodelan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Metode *Proportional Integral Anti Wind Up* (Pi-Aw)

Nadya Rizkiana Mulyawan¹, Sofian Yahya², Adnan Rafi Al Tahtawi³
^{1,2,3}Prodi Teknik Otomasi Industri, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung
Jalan Gegerkalong Hilir, Kabupaten Bandung Barat 40559, Indonesia
nadya.rizkiana.toi16@polban.ac.id

Abstrak

Motor induksi 3 Fasa dengan kelebihanannya seperti konstruksi yang sederhana, kokoh, murah serta perawatan mudah, banyak digunakan dalam dunia industri. Namun terdapat kelemahannya yaitu motor induksi tidak dapat mempertahankan kecepatan secara konstan apabila ada perubahan beban. Salah satu cara mengatasi kelemahan tersebut di dunia industri menggunakan Kontrol PI. Kontrol PI merupakan salah satu konfigurasi yang dapat dirancang dari sistem Propotional-Integral-Derivative (PID). Tetapi dalam aplikasinya, masalah yang berhubungan dengan integrator adalah kondisi windup. Hal ini terjadi bila sistem mengalami gangguan dari luar yang besar, integrator akan bertambah dengan menjumlahkan sinyal error secara berkelanjutan. Sehingga dalam prosesnya pengendali propotional menangani keadaan ini mengalami saturasi atau jenuh. Metode Anti WindUp ini dapat menghitung ulang konstanta integral yang terus bertambah. Dengan mengkalikan konstanta dari hasil selisih sinyal kontrol dan batas saturasi. Hasil simulasi pada MATLAB *Simulink* menunjukkan skema PI-AW mampu menghasilkan respon terbaik pada sinyal kendali yang tidak melebihi batas saturasi yaitu pada tegangan 220 V, overshoot tidak lebih dari 5%, respon terbaik pada kecepatan pada setpoint ± 1400 rpm atau pada range kerja motor 146.40 rad/s, risetime kurang dari 3 detik, dan settling time kurang dari 3 detik.

Kata kunci: Motor Induksi Tiga Fasa, PI-AW, Saturasi, MATLAB *Simulink*.

I. PENDAHULUAN

Perindustrian di Indonesia sudah mengalami kemajuan yang meningkat. Sebagian besar peralatan industri menggunakan tenaga listrik sebagai penggerak utamanya, Salah satu penggerak utamanya adalah motor listrik. Motor induksi merupakan salah satu mesin listrik yang paling banyak digunakan dalam dunia industri . Motor induksi banyak digunakan karena performanya, ukurannya yang kecil, kebutuhan perawatan yang lebih sedikit dan membutuhkan biaya yang rendah [1]. Tetapi pengaturan kecepatannya, motor induksi tidaklah mudah. Oleh sebab itu diperlukannya teknologi yang tepat untuk dapat mengatur putaran motor induksi agar tetap stabil [2].

Perkembangan teknologi sekarang ini telah menciptakan berbagai kemajuan di bidang teknologi, khususnya teknologi di bidang kontrol. Kontrol Proportional Integral Derivative (PID) merupakan kontrol klasik yang pemanfaatannya masih diterapkan dan pengembangannya masih berlanjut hingga saat

ini [3]. Dalam kontrol PI yang merupakan bagian dari struktur PID, integrator merupakan elemen kontrol yang menghasilkan sinyal kendali dengan cara mengakumulasi sinyal error. Proses akumulasi komponen integral ini dapat menimbulkan peristiwa windup dan komponen propotional mengalami saturasi dan menjadi on sepenuhnya [3].

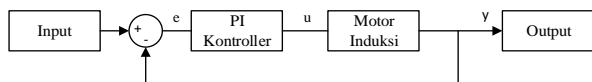
Untuk mengatasi permasalahan tersebut, metode yang digunakan adalah Metode PI-Anti WindUP. Anti-WindUP akan menangani kondisi ketika sinyal kontrol yang dihasilkan melebihi batas saturasi dengan menghitung selisih dari sinyal kontrol dan batas saturasi [4].

Makalah ini bertujuan untuk melihat respon daripada sinyal kendali dan kecepatan pengendalian motor induksi tiga fasa dengan perhitungan metode PI-AW yang akan dimodelkan pada MATLAB *Simulink*.

II. METODE PENELITIAN

Pada bagian ini dilakukan dari mendeskripsikan sistem, menentukan spesifikasinya, membuat diagram blok, dan merancang sistem secara keseluruhan.

II.1 Perancangan Blok Diagram Sistem



Perancangan Pengendalian Motor Induksi Tiga Fasa ini terdiri dari Nilai Input atau set-point untuk pengendalian motor, PI kontroler yang akan mengontrol setiap variabel keadaan motor induksi yang terukur untuk diumpankan, dan model matematik dari motor induksi tiga fasa ini yang disederhanakan dengan metode transformasi laplace akan dibentuk menjadi sebuah fungsi alih yang dijadikan sebagai plant. Fungsi alih ini akan dikontrol dengan PI Kontroler.

PI Kontroler ini dirancang dengan menggunakan tiga skema, yaitu (a) PI Linier, (b) PI saturasi, dan (c) PI Anti-WindUp. Untuk PI linier dirancang tanpa adanya batasan pada sinyal dan ini tahapan awal untuk melihat respon agar dapat diketahui nilai Kp dan Ki. Untuk PI saturasi, dirancang dengan menambahkan komponen saturasi dan ditambahkan nilai batasan pada sinyal kendali. Pada PI Anti-WindUp dirancang dengan menghentikan perhitungan integral ketika saturasi, membatasi nilai minimum dan maksimum integral, dan menghitung nilai konstanta waktu (konstanta back-calculation) yang mengumpan balik ke pengendali integral.

Respon dari pengendalian ini akan dirancang dan disimulasikan dengan MATLAB Simulink. Untuk melihat respon diskrit dari pengendalian PI kontroler ini, penulis juga akan memasukan nilai-nilai parameter pada Arduino dan akan disimulasikan pada plant motor induksi tersebut di MATLAB Simulink.

II.2 Pemodelan Motor Induksi Tiga Fasa

Tahap awal pada perancangan pengendalian motor induksi ini, penulis melakukan pemodelan sistem fisik motor induksi. Model rangkaian ini merupakan model paling umum digunakan dalam penganalisaan terhadap motor induksi. Motor Induksi yang akan digunakan pada rancangan ini adalah motor jenis sangkar tupai (squirrel cage).

Persamaan tegangan stator-rotor motor induksi merupakan fungsi dari arus stator dan rotor, serta fungsi dari fluks yang terdistribusi pada kumparan. Untuk pemodelan matematika motor induksi ini

diperoleh melalui proses analisa dinamik dari motor induksi. Persamaan tegangan acuan [5]:

$$V_{sd}(t) = R_s \cdot i_{sd}(t) - n_p \omega_m(t) \cdot \lambda_{sq} + \frac{d}{dt} \lambda_{sd} \dots \dots (1)$$

$$V_{sq}(t) = R_s \cdot i_{sq}(t) - n_p \omega_m(t) \cdot \lambda_{sd} + \frac{d}{dt} \lambda_{sq} \dots \dots (2)$$

$$V_{rd}(t) = 0 = R_r \cdot i_{rd}(t) - n_p \omega_m(t) \cdot \lambda_{rq} + \frac{d}{dt} \lambda_{rd} \dots \dots (3)$$

$$V_{rq}(t) = 0 = R_r \cdot i_{rq}(t) - n_p \omega_m(t) \cdot \lambda_{sq} + \frac{d}{dt} \lambda_{rq} \dots \dots (4)$$

$$V_{rd}(t), V_{rq}(t) = 0$$

Pada tugas akhir ini motor induksi yang digunakan jenis motor *squirrel cage* (sangkar tupai). Untuk persamaan medan putarnya adalah [5]:

$$\lambda_{sd} = L_s \cdot i_{sd}(t) + L_m \cdot i_{rd}(t) \dots \dots \dots (5)$$

$$\lambda_{sq} = L_s \cdot i_{sq}(t) + L_m \cdot i_{rq}(t) \dots \dots \dots (6)$$

$$\lambda_{rd} = L_r \cdot i_{rd}(t) + L_m \cdot i_{sd}(t) \dots \dots \dots (7)$$

$$\lambda_{rq} = L_r \cdot i_{rq}(t) + L_m \cdot i_{sq}(t) \dots \dots \dots (8)$$

- Dimana :
- V_{rd}, V_{rq} = Tegangan rotor pada sumbu d-q (Volt)
 - V_{sq}, V_{sd} = Tegangan stator pada sumbu d-q (Volt)
 - i_{sq}, i_{sd} = Arus stator pada sumbu d - q (Ampere)
 - i_{rq}, i_{rd} = Arus rotor pada sumbu d-q (Ampere)
 - $\lambda_{rq}, \lambda_{rd}$ = Fluks rotor pada sumbu d-q (webber)
 - $\lambda_{sd}, \lambda_{sq}$ = Fluks stator pada sumbu d-q (Webber)
 - R_r = Tahanan rotor (Ohm)
 - R_s = Tahanan stator (Ohm)
 - L_r = Induktansi rotor (Henry)
 - L_s = Induktansi stator (Henry)
 - L_m = Induktansi magnetik (Henry)
 - ω_m = Kecepatan putar mekanik rotor (rad/detik)

Persamaan tegangan acuan masukan (1) dan (4) harus diuraikan,

$$\frac{d}{dt} \lambda_{sd}(t) = \beta \cdot n_p \cdot \omega_m(t) \cdot \lambda_{rq} + \eta \cdot \beta \cdot \lambda_{rq}(t) + \frac{1}{\sigma \cdot L_s} \cdot V_{sd}(t)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_{sq}(t) = \beta \cdot n_p \cdot \omega_m(t) \cdot \lambda_{rd} + \eta \cdot \beta \cdot \lambda_{rd}(t) - \gamma \cdot i_{sq}(t) + \frac{1}{\sigma \cdot L_s} \cdot V_{sq}(t)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_{rd}(t) = -n_p \cdot \omega_m(t) \cdot \lambda_{rq} + \eta \cdot \lambda_{rd}(t) + \eta \cdot L_m i_{rd}(t)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_{rq}(t) = -n_p \cdot \omega_m(t) \cdot \lambda_{rd} + \eta \cdot \lambda_{rq}(t) + \eta \cdot L_m i_{rq}(t)$$

Dimana :

$$\eta = \frac{R_r}{L_r}; \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r}; \beta = \frac{L_m}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r};$$

$$\gamma = \frac{L_m}{\sigma \cdot L_r^2} + \frac{R_s}{\sigma \cdot L_s} \text{ dan } \mu = n_p \frac{L_m}{J_{eq} \cdot L_r}$$

Torsi Elektromagnetiknya adalah:

$$T_{em} = n_p \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{rd} \cdot i_{sq}(t) - \lambda_{rq} \cdot i_{sd}(t)) \dots \dots \dots (9)$$

Sementara persamaan elektrodinamikanya adalah:

$$J_{eq} \frac{d}{dt} \omega_m(t) = T_{em}(t) - T_b(t) - T_L(t) \dots \dots \dots (10)$$

$$T_b(t) = B_m \cdot \omega_m(t) \dots \dots \dots (11)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m(t) = \omega_m(t) \dots \dots \dots (12)$$

Untuk mendapatkan fungsi alih, maka salah satu dari tegangan acuan masukan dan $T_L(t)$ harus sama dengan nol

Dari persamaan (12) di atas :

$$(J_{eq}s + B_m) \cdot \omega_m(s) = T_{em}(s) - T_L(s)$$

$$\omega_m(s) = \frac{T_{em}(s)}{(J_{eq}s + B_m)} = \frac{n_p \cdot L_m (\lambda_{rd} \cdot i_{sq}(s) - \lambda_{rq} \cdot i_{sd}(s))}{L_r (J_{eq}s + B_m)}$$

- : T_{em} = Torsi elektromagnetik (N.m)
- J_{eq} = Momen inersia (kg.m²)
- ω_m = kecepatan putar mekanik rotor (rad/detik)
- θ_m = posisi sudut (rad)

Dari model matematika di atas persamaan-persamaan tersebut disederhanakan untuk memperoleh persamaan keadaan. Ini agar mendapatkan diagram keadaan yang akan membantu kita menentukan diagram blok sistem.

Untuk merancang pemodelan ini diketahui terlebih dahulu nilai dari parameter-parameter yang dimiliki oleh motor induksi tersebut dengan spesifikasi dan pengukuran seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Asynchronous Motor

n	Tegangan sumber terukur	220	Volt
P	Jumlah pole	4	-
f_s	Frekuensi stator	50	Hz
J_{eq}	Momen inersia stator	0.3	Kg.m ²
R_s	Tahanan stator	0.08	Ohm
R_r	Tahanan rotor	0.04	Ohm
L_s	Induktansi stator	15.4	mH

L_r	Induktansi rotor	16.38	mH
L_m	Induktansi magnetik	14.60	mH
S	Slip	0.02	-
B_m	Koefisien gesekan	-	Nm/rad/sec

Untuk mendapatkan fungsi alih, maka akan dibandingkan $\omega_m(t)$ sebagai keluaran $V_{sd}(t)$ dan $V_{sq}(t)$ sebagai masukan dua koordinat orthogonal dan polar, direct – quadrature (d-q). Untuk mendapatkan fungsi alih tersebut maka tegangan acuan dan $T_L(t)$ harus sama dengan nol. Pemodelan motor induksi dengan mendisubstitusikan nilai parameter-parameter ke dalam bentuk sebuah fungsi alih pada persamaan

$$V_{sd}(t) = n_p \cdot \beta \cdot \omega_m(t) \cdot \lambda_{rq} + \eta \cdot \beta \cdot \lambda_{rd} + \gamma \cdot i_{sd}(t) \cdot \frac{d}{dt} i_{sd}(t) \cdot \sigma \cdot L_s$$

Jika $\beta, \eta,$ dan γ disubstitusikan :

$$V_{sd}(t) = n_p \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \omega_m(s) \cdot \lambda_{rq} + \frac{R_r L_m}{L_r^2} \cdot \lambda_{rd} + \left(\frac{L_m}{L_r} + R_s + \sigma \cdot L_s \cdot s \right) i_{sd}(s)$$

Maka diperoleh fungsi alih :

$$\frac{\omega_m(s)}{V_{sd}(s)} = \frac{n_p \cdot L_m (\lambda_{rd} \cdot i_{sq}(s) - \lambda_{rq} \cdot i_{sd}(s))}{L_r (J_{eq}s + B_m)}$$

$$= \frac{n_p \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \omega_m(s) \cdot \lambda_{rq} + \frac{R_r L_m}{L_r^2} \cdot \lambda_{rd} + \left(\frac{L_m}{L_r} + R_s + \sigma \cdot L_s \cdot s \right) i_{sd}(s)}{1}$$

$$\frac{\omega_m(s)}{V_{sd}(s)} = \frac{1.78}{0.72 \times 10^{-3} s^2 + 0.0157s + 3.168}$$

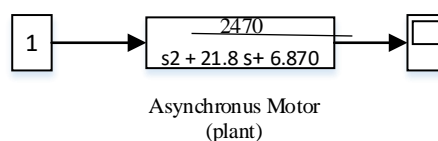
$$\frac{\omega_m(s)}{V_{sd}(s)} = \frac{2470}{s^2 + 21.79s + 4400}$$

Persamaan fungsi alih untuk close-loop nya adalah :

$$G_p(s) = \frac{2470}{s^2 + 21.79s + 6.870}$$

Dari fungsi alih Motor Induksi tersebut dapat dimodelkan dalam bentuk diagram seperti gambar. Diagram ini disimulasikan menggunakan MATLAB Simulink.

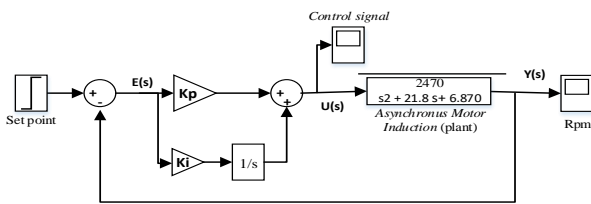
Gambar 1. Fungsi Alih Asynchronous Motor



II.3 Perancangan Sistem Proportional Integral-Anti WindUp

Pada bagian ini akan diuraikan tahap-tahap untuk memperoleh parameter pengendali PI (Kp dan Ki) hingga parameter nilai untuk Anti-WindUp. Untuk perancangan PI-AW tersebut, terdapat tiga skema yaitu (a) PI linier, (b) PI Saturasi (c) PI Anti-Windup. Parameter tersebut didapat dari respon simulasi pada MATLAB Simulink yang diinginkan. Metode yang digunakan pada tahap awal adalah dengan metode Ziegler Nichols pada karakteristik respon open-loop skema PI linier.

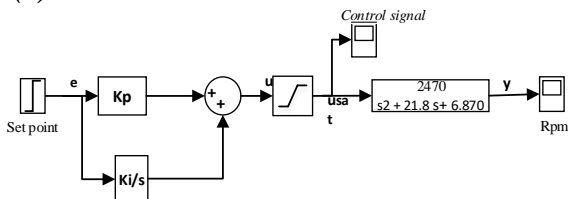
(a) PI linier



Gambar 2. Rangkaian PI Linier

Pada Simulasi Rangkaian PI Linier, menambahkan nilai Kp dan Ki yang sudah didapat yaitu Kp= 0.044 dan Ki= 0.083. Untuk set point diperoleh dengan nilai 350 rad/s, nilai ini didapatkan dari hasil respon Open loop plant fungsi alih Motor Induksi Asinkron.

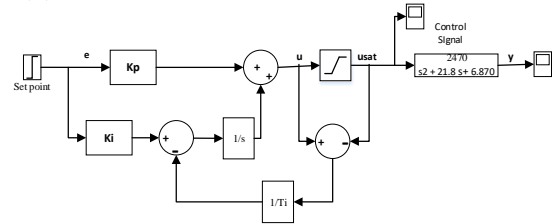
(b) PI saturasi



Gambar 3. Rangkaian PI tersaturasi

Pada Rangkaian PI saturasi, ditambahkan komponen saturasi dengan dipertimbangkannya nilai minimum dan maksimum yaitu dengan limit input 0 dan limit output 1.

(c) PI-AW



Gambar 4. Rangkaian PI -AW

persamaan PI-Anti Windup

$$u = 0.044 \cdot e + \frac{0.083}{s} e - \frac{1.89}{s} (u - u_{sat})$$

$$Ki = \frac{Kp}{Ti} \text{ dimana } Kb = \frac{1}{Ti} = \frac{Ki}{Kp}$$

Konstanta Back-calculation (Kb) ini diperoleh dari perhitungan 1/Ti. Dengan Ti adalah waktu integral. Jika Ti= Ki, maka tidak terjadi perhitungan kembali dan persamaan sama seperti PI linier $u(s) = \left(Kp + \frac{Ki}{s} \right) E(s)$.

II.4 Integral Error Performance Citeria

Penerapan Integral Error Performance Citeria yaitu IAE,ISE, ITAE,dan ITSE akan disimulasikan pada MATLAB Simulink. Dengan Komponen penunjangnya yaitu Absolute, Square, Integrator, Clock, dan Display untuk menunjukkan hasil perhitungan dari kriteria. Berikut persamaan Indeks Kriteria IAE,ISE,ITAE,ITSE;

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \dots \dots \dots (13)$$

$$ISE = \int_0^{\infty} |e^2(t)| dt \dots \dots \dots (14)$$

$$ITSE = \int_0^{\infty} t e^2(t) dt \dots \dots \dots (15)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \dots \dots \dots (16)$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada tahap awal, penulis mensimulasikan fungsi alih (Gambar) secara loop terbuka pada *MATLAB Simulink* dan menganalisis untuk memperoleh nilai K_p dan K_i .

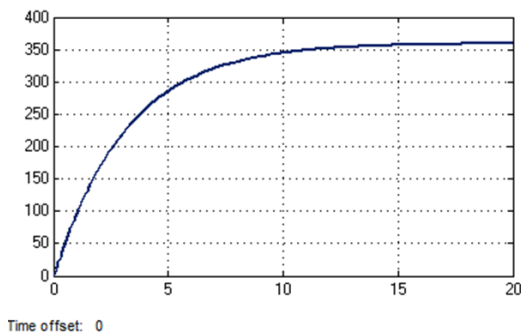
Dengan nilai step input 1 yang diasumsikan sebagai tegangan input pada motor induksi diperoleh Hasil respon loop terbuka seperti pada gambar IV.1 .Dari respon tersebut diperoleh nilai $K= 350$, $T_i= 0.025$, $T_d = 1,46$.Untuk memperoleh nilai K_p dan K_i dilakukan dengan metode Ziegler Nichols 1.

Open-loop Ziegler Nichols

Tabel 2. PI Kontroler Ziegler Nichols (Open Loop)

Kontroler	K_p	T_i
PI	$\frac{0.9 T_i}{K \cdot T_d}$	$3.3 T_d$

Nilai tersebut dimasukan pada rumus dan diperoleh dengan nilai K_p adalah 0.044 dan K_i 0.083.



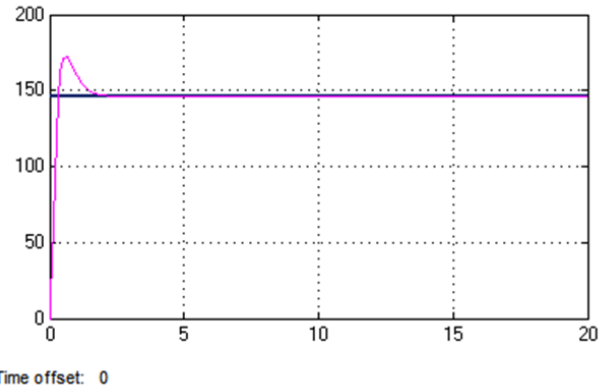
Gambar 5. Respon open loop Fungsi Alih

Dengan fungsi alih untuk PI Kontroler nya yaitu

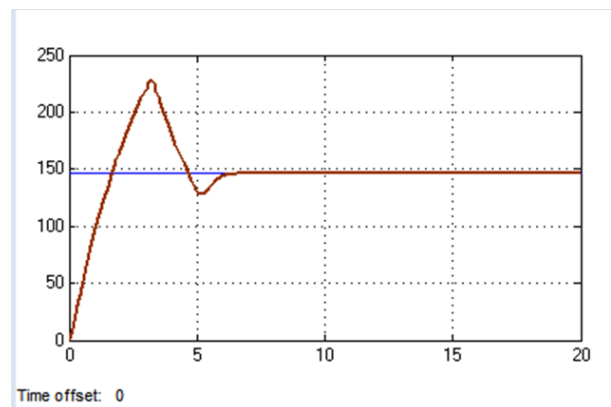
$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{0.044 (0.025 s + 1)}{0.025 s}$$

Kemudian dengan memasukan nilai K_p dan K_i yang sudah diperoleh, nilai dimasukan pada gain rangkaian PI linier, PI saturasi dan PI-AW.

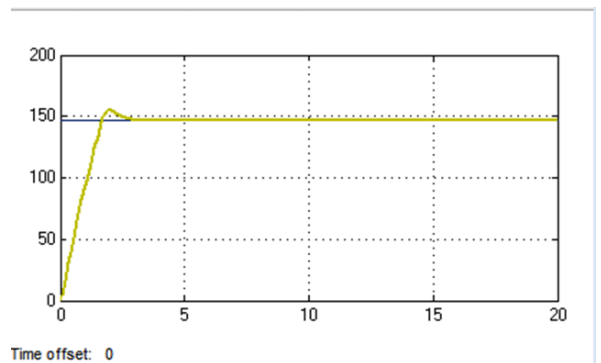
- a. Respon Kecepatan



Gambar 6. Respon Kecepatan PI-Linier

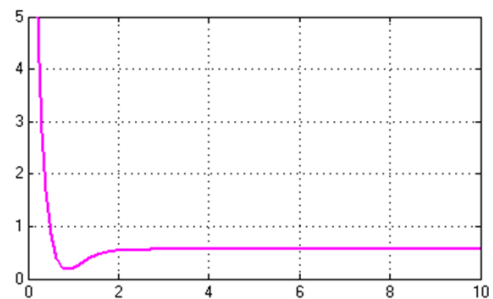


Gambar 7. Respon Kecepatan PI tersaturasi

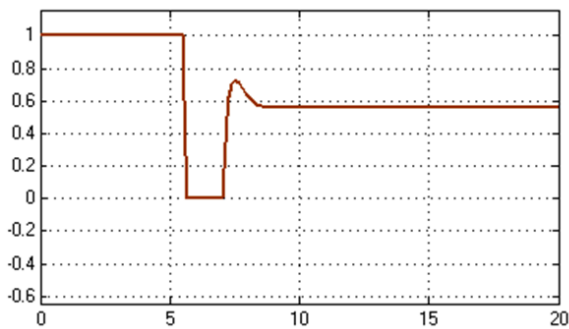


Gambar 8. Respon Kecepatan PI-AW

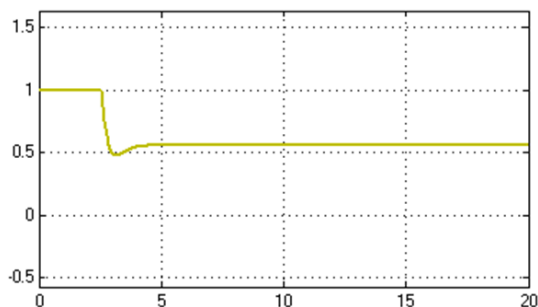
- a. Respon Sinyal Kendali



Gambar 9. Respon Sinyal Kendali PI Linier



Gambar 10. Respon Sinyal Kendali PI tersaturasi



Gambar 11. Respon Sinyal Kendali PI-AW

Bedasarkan hasil simulasi pada MATLAB *Simulink*, PI –AW memiliki kinerja yang baik dibandingkan dengan PI linier. PI-AW memiliki overshoot 2.15% yang lebih kecil dari PI Linear tetapi dengan rise time yang lebih lambat yaitu 2.6 detik dan 0.22 detik untuk PI linear. Sedangkan dengan ditambahkan komponen saturasi, terjadi overshoot yang cukup tinggi 34% dengan settling time yang lebih lambat 6.92 detik dibandingkan dari PI Linear dan PI-AW. Kinerja PI-AW sangat baik dalam respon pada sinyal kendali dimana stabil pada nilai 1 yang diasumsikan dengan tegangan nominal 220 V, sedangkan PI linier menghasilkan sinyal kendali yang melebihi maksimum sebelum menjadi stabil pada waktu 2s detik. Ketika komponen saturasi ditambahkan, terjadinya drop pada waktu ke 5s detik dan mencapai nilai ke 0 semula kemudian stabil kembali pada waktu ke 9s detik. Sedangkan penambahan Konstanta back-calculation pada mekanisme Anti Windup ini, respon sinyal kendali lebih baik dikarenakan drop hanya terjadi pada detik ke 3s kemudian stabil kembali.

Nilai asumsi tersebut didapatkan dari hasil open loop Plant Motor Induksi. Hasil open loop plant menunjukkan bahwa kecepatannya *steady state* berada pada nilai kecepatan 350 rad/sec . *Set point* yang

dimasukkan untuk kerja motor induksi tidak lebih dari nilai tersebut, maka dari itu *set point* yang ditentukan adalah 146.40 rad/s .

Hasil Simulasi Integral Error Performance Criteria

Tabel 3. Hasil Simulasi Integral Error Performance Criteria

Kontroler	IAE	ISE	ITAE	ITSE
PI Linier 4	56.5	5026	23.96	397.8
PI saturasi 5	475.	4.573e+04	142.5	4.461e+05
PI -AW 3	234.	2.926e+04	199.4	1.8588e+04

Dari tabel 3 Hasil Simulasi Integral Error Performance Citeria menunjukkan bahwa kiteria ITAE (Integral time-weighted absolute error) memiliki nilai yang paling baik pada pngendalian PI Linier,PI-saturasi maupun PI-AW . Bedasarkan hasil perbandingannya, dapat diketahui bahwa PI-linier memiliki indeks performansi error terkecil.

IV. KESIMPULAN

Dalam pemodelan dan mesimulasikan motor induksi tiga fasa ini didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Modeling dan mesimulasikan respon kecepatan motor induksi tiga fasa menggunakan metode PI-AW pada *MATLAB Simulink* telah dilakukan dengan hasil respon daripada PI-AW yang memiliki respon paling baik dalam sinyal kendali dengan tidak melebihi set point 220 V yang diasumsikan sebagai nilai 1 dan respon kecepatan yang tidak melebihi *set point* range kerja *plant* 146.40 rad/s.
2. Perbandingan dari respon ketiga skema, PI-AW berhasil memperoleh hasil respon yang baik pada sinyal kendali yaitu tidak melebihi tegangan 220V, tidak terjadi drop tegangan hingga ke semula, 2.15% untuk *overshoot* respon kecepatannya, dengan *rise time* 2.6 detik walupun pada hasil respon settling time nya lebih 1 detik dari respon PI Linier. Dengan demikian skema PI-AW mampu

menghasilkan respon terbaik untuk pengendalian kecepatan motor induksi dengan sinyal kendali yang tidak melebihi batas.

3. Hasil Simulasi Integral Error Performance Criteria menunjukan bahwa kriteria ITAE (Integral time-weighted absolute error) memiliki nilai yang paling baik pada pengendalian PI Linier, PI-saturasi maupun PI-AW .

V. SARAN

Untuk pengembangan yang berkaitan dengan penelitian ini penulis memberikan saran :

1. Penelitian selanjutnya bisa dilakukan secara eksperimental untuk dapat melihat respon sinyal kendali dan kecepatan secara langsung pada plant motor induksi tiga fasa. Pengujiannya dilakukan dengan cara konfigurasi pengendali PI-AW ke mikrokontroler dan pengujian dengan beban.

REFERENSI

- [1] S. P.J dan A. E. Daniel, "An Intellegent Speed Controller Design for Indirect Vector Controlled Induction Motor Drive System," *Procedia Technology 25, Recent Advancement and Effectual Researches in Engineering, Science and Technology (RAEREST)*, p. 801, 2016.
- [2] N. Evalina, A. A. H dan Zulfikar, "Pengaturan Kecepatan Putaran Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Programmable Logic Controller," *Journal of Electrical Technology*, vol. Vol.3, 2018.
- [3] R. F. Iskandar, R. Putra dan A. Suhendi, "Analisis Pengaruh Kontrol PI Dengan Integral Anti-WindUp Sebagai Upaya Reduksi Lonjakan Respon pada Sistem Ruang Termal," *Komputika: Jurnal Sistem Komputer*, vol. vol.08, p. 54, 2019.
- [4] S. Yahya, A. R. Al-Tahtawi, K. Wijaya dan B. Asriatul, "Liquid Flow Control Design Based on PID-Fuzzy Controller with anti-Windup Compensator," *Int. Conf. on information Tech. Computer and Electrical Engineering (ICTACEE)*, p. 9, 2020.
- [5] R. Saputra, "Rancang Bangun Alat Pengatur Kecepatan Motor Induksi Satu Fasa Melalui Pengaturan Frekuensi Menggunakan Multivibrator Astable," *Tugas Akhir*, p. 16, 2015.
- [6] C. A. G.A. Olarinoye, G. Atuman dan Z. Abdullahi, "Speed Control of a Three Phase Induction Motor using a PI Controller," *International Conference of the Nigeria Computer Chapter*, pp. 1-7, 2019.
- [7] D. Ibrahim, "Saturation and Windup," dalam *Microcontroller Based Applied Digital Control*, England, John Wiley & Sons Ltd., 2006, p. 233.
- [8] Y. Zhetpissov, A. Kaibaldiyev dan T. D. Do, "PI-anti Windup speed control of Permanent Magnet Synchronous Motor based on feedforward compensation," *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) IEEE*, pp. 1-4, 2019.
- [9] A. R. A. Tahtawi dan A. S. Rohman, "Perancangan Pengendali Proportional Integral Anti-WindUp (Pi-Aw) pada Simulator Mobil Listrik untuk Kendali Kecepatan dan Torsi," vol. Vo.14, no. no. 1, p. 1, 2016.
- [10] Baisrum, A. R. A.-. Tahtawi dan S. W. Jadmiko, "Pengendali Kecepatan Motor DC Berbasis WCNS Menggunakan Pengendali PI Anti-Windup," *ITERA (Jurnal Teknologi Rekayasa)*, vol. Vol.4, no. No.2, 2019.
- [11] M. N. Faizi, M. Rameli dan E. Iskandar, "Perancangan Sistem Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Direct Torque Control (DTC) Menggunakan Sliding Model Control (SMC) Berbasis Algoritma Genetik," *Jurnal Inovtek POLBENG*, vol. vo.07, 2017.
- [12] M. N. Azrina, "Rancang Bangun Pengatur Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Fuzzy Logic Kontroler Berbasis PLC CJ1M," *Tugas Akhir*, pp. 10-14, 2019.
- [13] S. Yahya, A. Mashar dan P. Sumardjati, Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik JILID 2, Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Departemen Pendidikan Nasional, 2008.
- [14] Hartanto, A. Rochmansyah, Kadaryono dan H. Nurohmah, "Desain Optimasi Kecepatan Motor Induksi Menggunakan Hybrid Anfis (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System) Dengan PID-PSO (Propotional Integral Derivative - Particle Swarm Optimization) Controller," *Prosiding SENTIA , Politeknik Negeri Malang*, vol. vol.8,

pp. 2085-2347, 2016.

PID optimization algorithms,” *Journal of Advanced Research* , 2015.

[15] R. Iqbal, “Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Metode Vektor Kontrol Berbasis Jaringan Syaraf Tiruan Radial Basis Function - PD (JST RBF - PD) Hybrid,” *Tugas Akhir*, pp. 31-32, 2015.

[16] M. A. Sahib dan B. S. Ahmed, “A new multiobjective performance criterion used in