

PERANCANGAN RANGKAIAN PENGENDALI KECEPATAN MOTOR INDUKSI AC TIGA FASE MENGGUNAKAN METODE SPACE VECTOR DAN KENDALI PROPORTIONAL INTEGRAL (PI)

SPEED CONTROL DESIGN OF THREE PHASE AC INDUCTION MO- TOR USING THE SPACE-VECTOR METHOD AND PROPORTIONAL INTEGRAL CONTROLLER (PI)

Slamet

Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan dan Energi Baru Terbarukan
Jln. Cileduk Raya kav. 109, Telp (021)7203530, Cipulir Keb. Lama, Jakarta Selatan
e-mail: slam_ftubl@yahoo.com

ABSTRACT

This research described about speed control of three-phase AC induction motor use space vector method and Proportional Integral (PI) controller. To determine the parameters of PI controller used Tuning Charts for PI Feedback Controllers. Measurement of motor speed used dc motor 12 volts functioned as a generator connected by Op-Amp circuit. Output Voltage Op-Amp interfaced to ADC Microcontroller as signal feedback from actual speed of triphase AC induction motor. Then in empiric is searched transfer function of the motor to determine value of the K_p (proportional gain), K_i (integral gain), θ (dead time), and τ (time constant). Testing system is done for set point maneuver from 480 rpm to 1,080 rpm, and then from 1,200 rpm to 480 rpm. Based on the result of research indicates that control system PI for speed of triphase AC motor can be controlled to reach stable condition, if maneuver set point under specification of nominal speed performance of three phasa AC induction motor for 900 rpm.

Keywords: Space vector, Proportional integral, Induction motor

ABSTRAK

Penelitian ini menguraikan tentang perancangan rangkaian kontrol kecepatan motor induksi AC tiga fase menggunakan metoda space vector dan pengendali Proportional Integral (PI). Untuk menentukan pengendali PI digunakan Tuning Charts for PI Feedback Controllers. Pengukuran kecepatan motor induksi digunakan sensor kecepatan dari motor dc 12 volt yang difungsikan sebagai generator yang dihubungkan kerangkaian Op-Amp. Keluaran tegangan Op-Amp dihubungkan ke ADC microcontroller sebagai sinyal feedback dari kecepatan aktual motor induksi AC tiga fase. Kemudian secara empiris dicari fungsi alih motor untuk menentukan besaran K_p , K_i , θ , dan τ . Pengujian dilakukan untuk set point bermanufer dari 480 rpm ke 1.080 rpm, kemudian dari 1.200 rpm ke 480 rpm. Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem kendali PI untuk kecepatan motor AC tiga fase dapat dikendalikan untuk mencapai kondisi stabil, jika manuver set point di bawah spesifikasi kinerja kecepatan nominal motor AC tiga fase 900 rpm.

Kata Kunci: Space vektor, Proportional integral, Motor induksi

PENDAHULUAN

Motor induksi AC memiliki keunggulan dalam hal kesederhanaan dan murah nya biaya perawatan

sehingga jenis motor ini banyak dipakai, baik di lingkungan industri maupun rumah tangga. Untuk dapat mengatur kecepatan putaran motor AC dapat dilakukan dengan merancang sebuah

rangkaian kontrol yang dapat mengatur besarnya tegangan dan frekuensi keluaran sehingga motor AC dapat dikendalikan dengan fleksibel.¹ Ada beberapa jenis sistem pengaturan, di antaranya adalah inverter *Pulse Width Modulation* (PWM).² Keuntungan operasi Inverter PWM sebagai teknik konversi dibanding dengan jenis inverter lainnya adalah rendahnya distorsi harmonik pada tegangan keluaran dibanding dengan jenis inverter standar. Selain itu, teknik PWM sangat praktis dan ekonomis untuk diterapkan berkat semakin pesatnya perkembangan teknologi semikonduktor terutama teknologi elektronika daya yang mempunyai waktu transisi sangat cepat.³ Pada pengendalian kecepatan motor AC, inverter PWM mempunyai kelebihan yaitu mampu menggerakkan motor induksi AC tiga fase dengan putaran halus dan rentang yang lebar. Untuk merancang inverter PWM dibuat terlebih dahulu pembangkitan sinyal PWM yang dilakukan secara digital agar diperoleh unjuk kerja sistem lebih kebal terhadap derau. Perancangan sebuah pembangkit sinyal PWM menggunakan mikrokontroler yang memiliki beberapa keuntungan yaitu mudah diprogram dan rangkaian inverter PWM menjadi sederhana.⁴

Inverter PWM terdiri atas sakelar semikonduktor atau transistor yang disusun sedemikian rupa dan memerlukan sinyal kendali yang sesuai untuk mengatur waktu transisi pada saat penyakelaran. Metode untuk mengodekan sinyal analog menjadi durasi lebar pulsa dengan logika *high* dan *low* tersebut adalah PWM. Metode *Space Vector* PWM merupakan metode yang bisa diimplementasikan secara digital dan dapat mencapai indeks modulasi yang lebih tinggi.⁵ Untuk merancang dan merealisasikan pengaturan kecepatan motor induksi AC tiga fase menggunakan metode *Space Vector* PWM dan Pengendali *Proportional Integral* (PI) yang digunakan untuk penalaan parameter *proportional integral*. Penerapan Pengendali PI digunakan untuk menghasilkan respons yang lebih cepat dari pengendalian integral tapi mampu menghilangkan *offset* yang ditinggalkan pengendalian *proportional*. Diharapkan pengaturan kecepatan putar motor induksi AC tiga fase akan menghasilkan perubahan kecepatan yang mempunyai hubungan berbanding lurus ketika dilakukan perubahan

frekuensi.⁶ Untuk itu, pada penelitian ini akan dirancang sebuah rangkaian kontrol kecepatan motor induksi AC tiga fase menggunakan metode *Space Vector* dan kendali *Proportional Integral* (PI).⁷

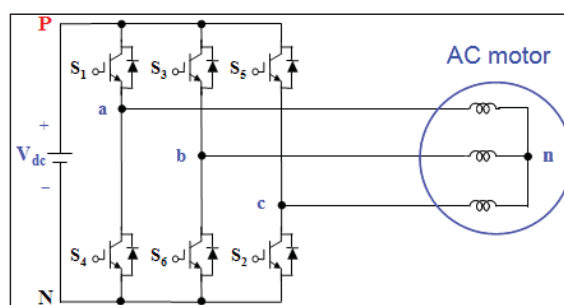
TEORI

Prinsip Kerja Motor Induksi AC Tiga Fase

Motor induksi adalah suatu motor arus bolak-balik yang bekerja berdasarkan induksi elektromagnetis, di mana arus pada rotor berasal dari arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar stator. Prinsip kerja motor induksi tiga fase berdasarkan induksi elektromagnetis. Jika kumparan stator diberi tegangan sinusoida tiga fase maka arus akan mengalir dengan beda fase 120° . Garis-garis gaya fluks stator tersebut akan berputar memotong penghantar rotor sehingga pada penghantar tersebut timbul gaya gerak listrik atau tegangan induksi.³

Space Vector PWM (SV_PWM)

Space Vector PWM didapat dengan mentransformasi tegangan ke ruang vektor dan hasilnya dikeluarkan pada tegangan fase dengan cara merata-rata tiga vektor *state switching* berurutan Van, Vbn, dan Vcn pada waktu interval dari sub-siklus $T_s = 1/f_s$. Permasalahan yang sering terjadi pada motor induksi AC tiga fase adalah distorsi harmonik pada arus fase pada proses *switching*. Struktur khas dari motor induksi AC tiga fase yang terhubung dengan *Voltage Source Inverter* (VSI)⁵ dapat diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur Motor Induksi AC Tiga Fase Terhubung dengan VSI

Ketika dipetakan dalam kerangka dua dimensi, konfigurasi *Space Vector* dalam bidang kompleks yang bukan fase nol ada enam fase tegangan simpul yang membentuk sebuah segi enam seperti terlihat pada Gambar 2.

Hubungan antara *Space Vector* dan ko-respondensi *switching state* dapat diuraikan pada model persamaan matematik.⁴

$$\vec{V}_s T_s = \vec{V}_1 T_a + \vec{V}_2 T_b + \vec{V}_0 T_0 \quad (1)$$

$$T_s = T_a + T_b + T_0 \quad (2)$$

$\vec{V}_s$ adalah *vector referensi* dan T_s merupakan *periode sampling* yang merupakan variabel untuk menentukan durasi waktu *switching* masing-masing sektor.

PERANCANGAN

Metode dan prosedur perancangan rangkaian kontrol kecepatan motor induksi AC tiga fase dilakukan dengan cara menentukan durasi waktu *switching* untuk semua sektor, merancang rangkaian inverter sebagai penggerak motor induksi, melakukan penalaan pengendali kecepatan untuk memperoleh fungsi alih pengendali, dan kompensasi penguatan kendali PI.

Menentukan durasi waktu *switching*

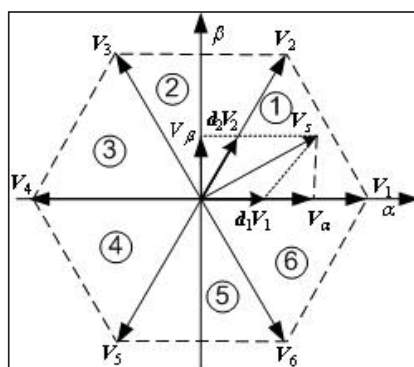
Untuk menentukan durasi *switching* T_a, T_b adalah dengan menentukan vektor referensi pada waktu T_s . Adapun bagian sisa dari siklus $T_0 = T_s - T_a - T_b$ adalah waktu *switching* untuk vektor nol $\vec{V}_0$. Untuk menghitung vektor referensi pada sektor

satu dengan sudut vektor (θ) dapat diilustrasikan pada Gambar 3.

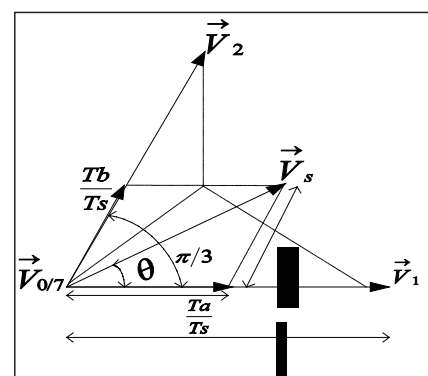
Dari Gambar 3, dapat dihitung nilai $\vec{V}_s$ dan T_s sebagai periode sampling sesuai pada persamaan (1) sampai dengan persamaan (2).⁴ Dari hasil persamaan tersebut diperoleh Tabel durasi waktu *switching* atau *duty cycle* untuk sektor 1,2...6 yang dapat dinyatakan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Persamaan Waktu *Switching* Sektor 1,2...6

Nomor Sektor (k)	θ $[\theta', \theta'']$	d_a	d_b
1	$\left[0, \frac{\pi}{3}\right]$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_s}{E} \sin(\frac{\pi}{3} - \theta)$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_s}{E} \sin(\theta)$
2	$\left[\frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}\right]$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_s}{E} \sin(\frac{\pi}{3} + \theta)$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_s}{E} \sin(\frac{5\pi}{3} + \theta)$
3	$\left[\frac{2\pi}{3}, \pi\right]$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_s}{E} \sin(\theta)$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_s}{E} \sin(\frac{4\pi}{3} + \theta)$
4	$\left[\pi, \frac{4\pi}{3}\right]$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_s}{E} \sin(\frac{5\pi}{3} + \theta)$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_s}{E} \sin(2\pi - \theta)$
5	$\left[\frac{4\pi}{3}, \frac{5\pi}{3}\right]$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_s}{E} \sin(\frac{4\pi}{3} + \theta)$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_s}{E} \sin(\frac{2\pi}{3} + \theta)$
6	$\left[\frac{5\pi}{3}, 2\pi\right]$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_s}{E} \sin(2\pi - \theta)$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_s}{E} \sin(\frac{\pi}{3} + \theta)$



Gambar 2. Konfigurasi *Space Vector* dalam Bidang Kompleks



Gambar 3. Representasi Vektor $\vec{V}_s$ pada Sektor Pertama⁴

Merancang Rangkaian Inverter

Inverter merupakan suatu alat yang dapat mengubah sinyal tegangan DC menjadi sinyal AC atau tegangan sinusoida dengan frekuensi dan level tegangan yang dapat diatur. Oleh karena itu, alat ini biasa dipakai untuk menjalankan motor induksi tiga fase dengan kecepatan yang dapat dikendalikan. Rangkaian inverter tiga fase yang digunakan pada penelitian ini terdiri atas enam buah komponen *switching* seperti ditunjukkan pada Gambar 4.

Transistor yang digunakan adalah jenis BJT yang memiliki waktu *turn-on* dan *turn-off* sekitar 0,3 μ s sehingga cocok untuk diaplikasikan pada inverter frekuensi tinggi. Pengaturan sinyal PWM pada basis 1 akan menghasilkan pulsa-pulsa untuk fase R positif dan pada basis 2 akan menghasilkan pulsa-pulsa untuk fase R negatif. Pengaturan sinyal PWM pada basis 3 akan menghasilkan pulsa-pulsa untuk fase S positif dan pada basis 4 akan menghasilkan pulsa-pulsa untuk fase S negatif. Pengaturan sinyal PWM pada basis 5 akan menghasilkan pulsa-pulsa untuk fase T positif dan pada basis 6 akan menghasilkan pulsa-pulsa untuk fase T negatif. Dari Gambar 4, tegangan sumber adalah 110 Vac dari tegangan jala-jala 220 Vac yang diturunkan menggunakan trafo *step down*. Untuk mengetahui tegangan antarfase, dilakukan perhitungan manual dengan mengikuti persamaan (3)⁸ didapat tegangan yang mendekati nilai aktualnya.

$$V_{AB_rms} = \frac{M_I V_{dc}}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

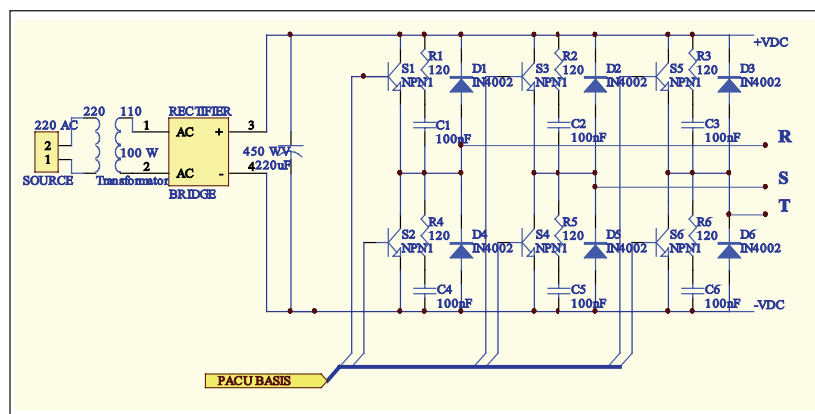
di mana

V_{AB_rms} = tegangan antarfase (*line to line Voltage*)

M_I = indeks modulasi

Melakukan Penalaan Pengendali Kecepatan

Penalaan atau *tuning* adalah prosedur untuk menyetel parameter kontroler berumpan balik untuk mendapatkan respons *lup* tertutup yang ditentukan. Dalam penalaan pengendali kecepatan ini menggunakan pengendali *Proportional Integral* yang merupakan dua unit kendali, yaitu *Proportional* dan *Integral*. Sifat pengendali *Proportional* yang selalu meninggalkan *offset* dapat ditutupi oleh kelebihan *Integral*, sedangkan sifat pengendali *Integral* yang lambat dapat ditutupi oleh pengendali *Proportional* sehingga pengendalian *Proportional Integral* diharapkan akan mampu menghasilkan respons yang lebih cepat dari pengendalian *Integral* sekaligus mampu menghilangkan *offset* yang ditinggalkan pengendalian *Proportional*.⁹ Untuk menentukan nilai K_p dan K_i dilakukan pengujian menggunakan sinyal unit step dengan cara **kontroller disetting manual**, kemudian menganalisis perubahan step pada sinyal keluaran dan terakhir mencatat respons sinyal keluaran *transmitter* Δ . Adapun untuk acuan dalam menentukan nilai K_p dan K_i digunakan *Tuning Charts for PI Feedback Controllers* (T. Marlyn) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5, sedangkan untuk menentukan *dead time* dan *time constant* sebagai acuannya

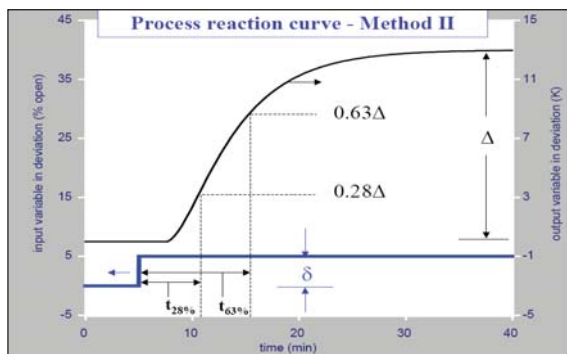


Gambar 4. Rangkaian Inverter Transistor BJT Tiga Fase

menggunakan Gambar 6.

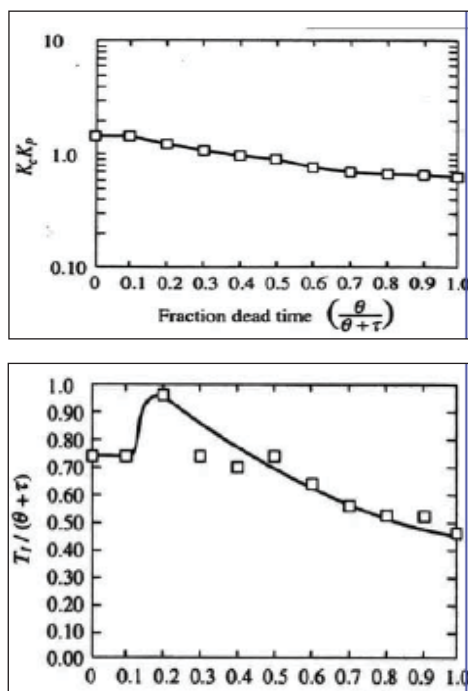
Blok pengendali kecepatan menerima masukan yang berupa kesalahan kecepatan putar rotor, yaitu kecepatan putar acuan dikurang kecepatan putar aktual yang diumpankanbalikkan langsung dari sensor kecepatan. Adapun pengendali PI dirumuskan dengan persamaan (4).

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (4)$$



(T. Marlyn)

Gambar 5. Respons Step Lup Terbuka



Fraction dead time $\left(\frac{\theta}{\theta+\tau}\right)$ Fraction dead time $\left(\frac{\theta}{\theta+\tau}\right)$

Gambar 6. Diagram Tuning PI untuk Mencari Nilai Kc dan Ki (T. Marlyn)

di mana

$U(t)$ = masukan kendali

$e(t)$ = sinyal pembangkit kesalahan

untuk mencari fungsi alih kendali PI, dilakukan transformasi Laplace didapat persamaan (5).

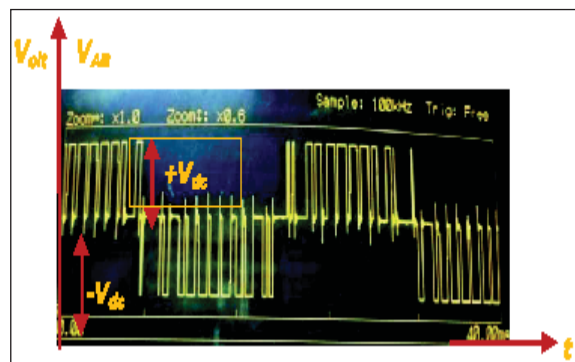
$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (5)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 7 merupakan hasil pengujian sinyal PWM dengan frekuensi 50 Hz, Amplitudo 90%, dan frekuensi Carrier 490 Hz dengan beban lampu 5 watt, di mana V_{AB} adalah tegangan antarfase inverter. Hasil aktual pengukuran tegangan antarfase inverter adalah 66 Vac. Adapun V_{dc} adalah tegangan sumber yang berasal dari *rectifier*. Tegangan sumber yang digunakan adalah 110 Vac dari tegangan jala-jala 220 Vac yang diturunkan menggunakan trafo *step down*. Jika dilakukan perhitungan manual dengan mengikuti persamaan (3),⁸ akan didapat nilai tegangan yang mendekati nilai aktualnya sebesar 70 volt.

Dari Gambar 7 terlihat bahwa dengan menggunakan sampel *rate* 100 KHz, maka *frequency switching* atau *frequency carier* sudah sesuai dengan frekuensi pada jala-jala listrik sebesar 40 ms. Untuk frekuensi referensi yang berasal dari jala-jala listrik dengan mengalikan jumlah periode dibagi waktu selama periode tersebut tepat diperoleh frekuensi sebesar 50 Hz.¹⁰

Pada Gambar 8 ditampilkan grafik kecepatan motor dengan frekuensi masukan secara bertahap dari frekuensi 10 Hz sampai 125 Hz. Dari hasil

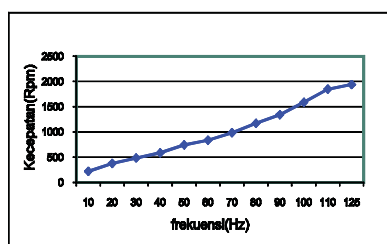


Gambar 7. Sinyal Pulse Width Modulation V_{AB}

pengukuran kecepatan motor terhadap frekuensi dan tegangan masukan mempunyai hubungan berbanding lurus dengan kecepatan motor. Tegangan minimal yang mampu menggerakkan motor AC 3 fase sebesar 0,4 volt dari *set point* yang berasal dari potensiometer dengan kecepatan minimal untuk *start* awal putar motor sebesar 224 rpm pada frekuensi 10 Hz. Kecepatan maksimal terjadi pada tegangan dan frekuensi maksimal sekitar 4,32 volt dan 125 Hz.

Dari hasil pengujian terlihat bahwa kecepatan putar motor belum sebanding atau bergerak secara linear dengan adanya perubahan data masukan berupa variabel frekuensi dan tegangan. Penyebab ketidaklinearan tersebut karena adanya faktor konversi putaran motor ke bentuk data digital yang berubah akibat ketidakseimbangan kopel *tachogenerator* yang berfungsi sebagai sensor dalam membaca kecepatan putar motor induksi secara *real time system*. Data frekuensi masukan menghasilkan konversi yang lebih baik dari data analog tegangan

Pada Gambar 9 ditampilkan grafik kalang terbuka sistem kendali kecepatan motor induksi AC tiga fase dengan sistem *hup* terbuka atau tanpa pengendali untuk menentukan besaran PI yaitu K_p dan K_i . *Plant* yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebuah motor induksi AC tiga fase yang dilengkapi dengan sensor kecepatan. Kedua komponen tersebut digunakan untuk mencari tanggapan kalang terbuka dari motor induksi AC tiga fase tanpa beban. Pengujian *plant* ini dilakukan dengan menggerakkan motor induksi AC tiga fase dengan membuat program untuk mengirimkan data PWM dan menghitung kecepatan motor AC yang dihasilkan sampai nilai PWM maksimal. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui hubungan antara kecepatan motor dengan frekuensi masukan yang berfungsi sebagai



Gambar 8. Grafik Kecepatan Motor dengan Frekuensi Masukan

set point dalam pengaturan kecepatan motor. Pengambilan data respons terbuka bertujuan untuk identifikasi *plant* dan mengetahui perilaku sistem tanpa pengontrol seperti grafik hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 9.

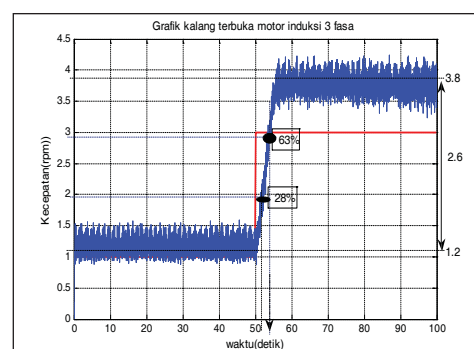
Respons sistem yang ditunjukkan pada Gambar 9. merupakan hasil dari uji kalang terbuka di mana keluaran sistem belum mampu mengikuti nilai *set point*. Untuk membuat sistem kendali bekerja sesuai dengan nilai masukannya maka dicari parameter pengendali PI, di mana diperoleh parameter *process value* sebesar 2,6 volt dan *manipulated value* sebesar 2 volt sehingga besarnya penguatan *Proportional* sebesar 1,3 dan penguatan Integral sebesar 0,28. Untuk menentukan fungsi alih pengendali PI maka digunakan persamaan (4) dan sebagai acuannya digunakan persamaan 5 sementara nilai K_c dan K_i digunakan diagram berdasarkan *tuning* Pengendali PI yang didapat dari perpotongan titik temu antara besaran $K_c K_p$ terhadap *fraction dead time*

$$\left(\frac{\theta}{\theta + \tau} \right)$$

dan besaran K_i , didapat dari perpotongan titik temu antara besaran $T_i / (\theta + \tau)$ terhadap *fraction dead time*.

$$\left(\frac{\theta}{\theta + \tau} \right)$$

Gambar 10 merupakan hasil pengujian sistem terkendali PI untuk *set point* bermanuver dari 480 rpm ke 1.080 rpm menunjukkan bahwa kinerja kecepatan motor induksi AC tiga fase pada *set point* kecepatan 480 rpm respons sistem dalam kondisi stabil dan ketika dilakukan manuver



Gambar 9. Grafik Kalang Terbuka Motor Induksi 3 Fase

dengan *set point* 1.080 rpm respons sistem mengalami *steady state error* sebesar 5% dari *set point* acuannya. Hal ini dikarenakan manuver kecepatan motor dilakukan melebihi kecepatan nominal motor yaitu 900 rpm.

Kinerja sistem dengan perubahan nilai *set point* dari 480 rpm kemudian dinaikkan menjadi 1.080 rpm respons sistem mencapai keadaan tunak atau stabil lebih cepat dicapai dengan menggunakan metode kurva reaksi dengan masukan *unit step*. Untuk manuver *set point* dari 1.200 rpm yang diturunkan menjadi nilai *set point* 480 rpm waktu yang diperlukan untuk mencapai kondisi tunak atau stabil adalah 2 detik, sedangkan waktu turun untuk mencapai kondisi tunak atau stabil pada kecepatan rendah waktu yang diperlukan sangat cepat sekitar 0.25 detik.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, realisasi, pengujian dan analisis terhadap sistem pengendalian kecepatan motor induksi AC tiga fase menggunakan metode *space vector* dan pengendali

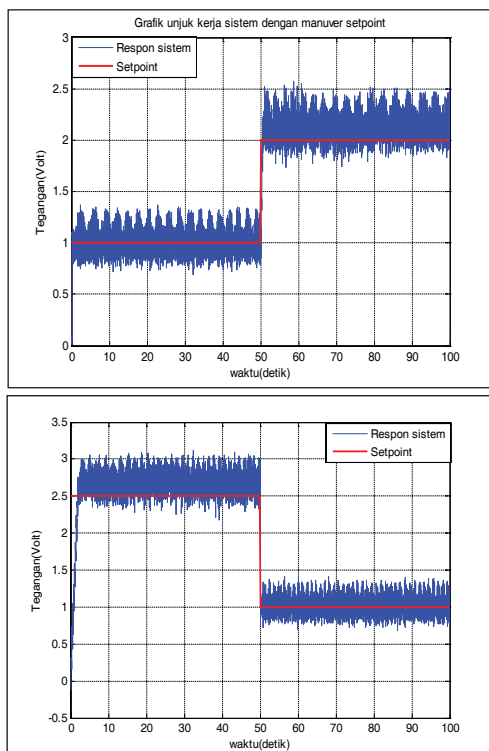
PI, dapat disimpulkan bahwa respons kecepatan motor dapat selalu mengikuti perubahan *set point* bermanuver dari 480 rpm dinaikkan 1.080 rpm dalam waktu sekitar 2 detik dan manuver *set point* dari 1.200 rpm yang diturunkan menjadi nilai *set point* 480 rpm memerlukan waktu menuju kondisi *steady state* sekitar 0,25 detik. Manuver *set point* kecepatan motor yang melebihi kecepatan nominal motor 900 rpm, respons kecepatan motor memiliki kesalahan tunak atau *steady state error* sekitar 5%. Dengan demikian, perubahan kecepatan motor dapat dikendalikan untuk mencapai kondisi stabil, jika manuver *set point* di bawah spesifikasi kinerja kecepatan nominal motor AC tiga fase yang digunakan yaitu sebesar 900 rpm.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Dr. Masno Ginting, M.Sc. atas bimbingan dan sarannya dalam penulisan karya tulis ilmiah (KTI) ini dan pembimbing penelitian, Dr.Ir. Feri Yusivar, M.Eng. serta staf Laboratorium Kendali Universitas Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- ¹Krause, Paul C. 1986. *Analysis of Electrical Machinery*. McGraw-Hill, Inc.
- ²Bin Wu. 2006. *High-Power Converters and AC Drives*. IEEE Press. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- ³Zuhal. 1995. *Dasar Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama.
- ⁴Atmel AVR495. 2005. *AC Induction Motor Control Using the Constant V/f Principle and a Space-vector Pulse Width Modulation Algorithm*, Paper 7546A–AVR–12/05, Atmel Corporation.
- ⁵K. Zhou, D. Wang, February. 2002. Relation between space-vector modulation and three-phase carrier-based Pulse Width Modulation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49 (1) 186–196.
- ⁶Akin Acar. 2004. *Implementation Of A Vector Controlled Induction Motor Drive*. A Thesis Submitted, The Middle East Technical University.
- ⁷Remus Teodorescu. 1999. *Space Vector Modulation Applied to Modular Multilevel Converters*. Department of Electrical Engineering, Texas A&M University.



Gambar 10. Grafik Kecepatan motor induksi dengan manuver *set point* dari 480 ke 1.080 rpm dan 1.200 ke 480 rpm

⁸Zaenal Salam. 2004. *The Design and Development of a High performance Bi-directional Inverter Photovoltaic Application*. Proyek penyelidikan IRPA, Universiti Teknologi Malaysia.

⁹Tianchai Suksri, October 15, 2007. *T-DOF PI Controller Design for a speed Control of Induction Motor*. *International Journal of Mathematical*.

¹⁰Mohd Wazir Bin Mustafa. 2006. *Static And Dynamic Impacts Of Three To Six-Phase Conversion Of Selected Transmission Line In An Electric Energy System*. Research vote no:74164, Universiti Teknologi Malaysia.

PUSTAKA PENDUKUNG

Krishnan, R., 2001, *Electric Motor Drives Modeling, Analysis, and Control*, Prentice Hall, Inc.