

PENERAPAN METODE *HYSTERESIS SPACE VECTOR PULSE WIDTH MODULATION* PADA INVERTER TIGA FASA UNTUK PENGATURAN KECEPATAN DAN EFISIENSI MOTOR INDUKSI

Hendi Purnata¹, Anindya Dwi Risdhayanti², Shabrina Adani Putri³, Achmad Komarudin⁴

^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Elektronika, Politeknik Negeri Malang, Malang 65142

E-mail¹: hendipurnata@gmail.com

Abstrak

Pengaturan kecepatan motor induksi relatif sulit, karena torsi dan *fluks* yang dihasilkan saling berkaitan. Selain itu untuk mengatur kecepatan diperlukan inverter sebagai aktuator. Keluaran inverter bukan sinyal sinusoidal murni tetapi hasil dari pensaklaran. Oleh karena itu diperlukan metode pensaklaran untuk dapat memperbaiki sinyal keluaran inverter agar dapat meningkatkan efisiensi dan mengatur kecepatan motor induksi. Pada penelitian ini metode indirect vector control diterapkan untuk pengaturan kecepatan dan menggabungkan metode SVPWM (Space vector pulse width modulation) dengan Hysteresis sehingga menjadi metode hysteresis space vector pulse width modulation (HSVPWM). Hasil simulasi pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa menggunakan metode indirect vector control berhasil diterapkan yaitu dapat mengikuti set point sebesar 600 rpm dengan rise time 0.527 detik, steady state 0.723 detik dengan overshoot sebesar 0.8%. Ripple arus keluaran pada inverter menggunakan metode HSVPWM dapat berkurang 65%. Efisiensi motor induksi menggunakan metode HSVPWM yang semula 91% dapat ditingkatkan menjadi 94% atau kenaikan 3%.

Kata Kunci -Indirect Vector Control, Space vector pulse width modulation, Hysteresis Band, Inverter, Motor Induksi

Abstract

Induction motor speed control is relatively difficult, because the generated torque and flux are related or not free. In addition to adjusting the speed, it requires inverter control. The inverter output is not a pure sinusoidal signal but it is the result of the switching. Therefore, it is necessary to be able to fix the method of switching the inverter output signal that can adjust induction motor speed with load changes. This study applies the indirect method of vector control for setting the speed. The combination of SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) methods and hysteresis known as HSVPWM (Hysteresis Space Vector Pulse Width Modulation) methods. A change of pace on HSVPWM method successfully achieves the set point of 600 rpm with a rise time of 0.5267 seconds, 0.723 seconds steady state and has over shoot of 0.8%. The results show the ripple current at the inverter output using methods HSVPWM can be reduced 65%. The setting speed three phase induction motor vector control using indirect methods are successfully applied. The efficiency of the induction motor using HSVPWM method which was originally 91% could be increased to 94% or 3%.

Keyword - Vector Control, Space Vector Pulse Width Modulation, Hysteresis Band, Induction motor.

1. PENDAHULUAN

Motor induksi merupakan salah satu mesin listrik yang paling banyak digunakan dalam dunia industri. Pengaturan kecepatan motor induksi *squirrel cage* secara umum menggunakan perubahan tegangan pada terminal dan pengaturan frekuensi [1]. Pengaturan kecepatan motor induksi lebih sulit dibandingkan dengan motor DC, Karena *fluks* dan torsi yang dihasilkan saling berkaitan atau tidak bebas. Jika arus yang melewati terminal motor berubah maka *fluks* medan magnet stator dan torsi elektromagnetik yang dibangkitkan juga akan berubah. Faktor ini yang menyebabkan pengaturan motor induksi menjadi lebih kompleks [2].

Kontrol konvensional seperti *proportional integral* (PI) dan *proportional integral*

derivative (PID) digunakan bersama dengan menggunakan metode pengaturan vektor untuk menghasilkan kecepatan motor yang lebih baik. Kelemahan kontrol konvensional (PID) yaitu parameter dari sistemnya bervariasi dan mengakibatkan performanya rendah, dan faktanya ketika menggunakan *gain* yang tetap maka kontroler tidak dapat memberikan kecepatan dan performa yang diperlukan dalam parameter motor [3]. *Space vector width modulation* (SVPWM) merupakan penggabungan antara pengaturan vektor dengan *pulse width modulation*. Pengaturan kecepatan motor induksi menggunakan inverter SVPWM dengan kontroler *PI-Fuzzy Hybrid* dapat menjaga kecepatan motor secara konstan walaupun diberikan beban yang berubah-ubah [4]. SVPWM dengan kontroler *iterative learning control* (ILC) dan PI dapat

mengurangi kecepatan *ripple* dibanding kontroler *Hysteresis pulse width modulation* (HPWM) tetapi respon *transient* pada HPWM lebih cepat dibandingkan SVPWM dengan ILC-PI [5]. Metode kontrol *Hysteresis switching* pada frekuensinya tidak *fix* dan akan berubah-ubah berdasarkan perubahan arus [6]. Metode *Indirect Vector Control* banyak digunakan ketika untuk mengatur kecepatan dengan beban yang berubah-ubah [7]. Penelitian selanjutnya mengatur kecepatan motor dengan beban yang berubah-ubah kemudian di implementasikan untuk mengetahui kontroler yang dicapai. Penelitian ini menggunakan pengaturan vektor tidak langsung dengan metode HPWM. Kontroler pada penelitian ini dapat mengatasi beban yang berubah-ubah. Hasil eksperimen pada penelitian ini respon kecepatan dan perubahan torsi belum dapat diatasi karena respon belum bisa mengikut referensi secara sempurna. [8]. Permasalahan yang ingin diatasi pada penelitian ini adalah kontrol kecepatan motor dan efisiensi Motor induksi tiga fasa dengan menggabungkan metode Hysteresis Space Vector Pulse Width Modulation.

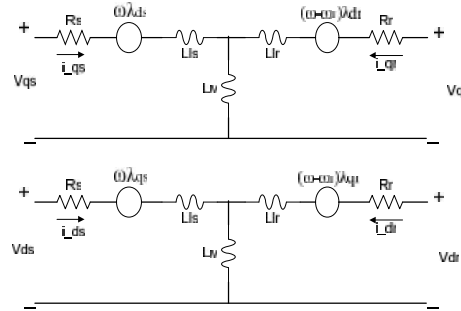
2. METODE

2.1 Model Matematika Motor Induksi Tiga Fasa [9]

Performansi dinamik dari mesin AC agak kompleks karena kumparan rotor 3 fasa bergerak pada lilitan stator 3 fasa. Model dari motor induksi dapat digambarkan dengan persamaan diferensial serta mutual induktansi yang berubah terhadap waktu, akan tetapi model yang lainnya cenderung sangat kompleks.

$$\begin{aligned}
 V_{qs} &= R_s \cdot i_{qs} + \omega \cdot \lambda_{ds} + p \cdot \lambda_{qs} \\
 V_{ds} &= R_s \cdot i_{ds} - \omega \cdot \lambda_{ds} + p \cdot \lambda_{ds} \\
 V_{qr} &= R_r \cdot i_{qr} + (\omega - \omega_r) \cdot \lambda_{dr} + p \cdot \lambda_{qr} \\
 V_{dr} &= R_r \cdot i_{dr} - (\omega - \omega_r) \cdot \lambda_{qr} + p \cdot \lambda_{dr}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Dimana $p = \frac{d}{dt}$



Gambar 1. Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Tiga Fasa

Berdasarkan rangkaian di atas maka dapat dituliskan persamaan tegangan pada stator dan rotor [10]

$$\begin{aligned}
 \lambda_{qs} &= L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qr} \\
 \lambda_{ds} &= L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dr} \\
 \lambda_{qr} &= L_r \cdot i_{qr} + L_m \cdot i_{qs} \\
 \lambda_{dr} &= L_r \cdot i_{dr} + L_m \cdot i_{ds}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Dengan Melakukan substitusi persamaan (2) kedalam persamaan (1) maka dapat di tunjukan dalam bentuk matrik:

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & \omega \cdot L_s & pL_m \\ -\omega \cdot L_s & R_s + pL_s & -\omega \cdot L_m \\ pL_m & (\omega - \omega_r) L_m & R_r + pL_r \\ -(\omega - \omega_r) L_m & pL_m & (\omega - \omega_r) L_r \end{bmatrix}
 \tag{3}$$

Dengan,

$$\begin{aligned}
 L_s &= Ll_s + L_m \\
 L_r &= Ll_r + L_m
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Dimana,

- V_{qs}, V_{ds} = Voltage dq frame (Volt)
- V_{qr}, V_{dr} = Rotor voltage dq frame (Volt)
- i_{qs}, i_{ds} = Current stator of dq frame (Ampere)
- i_{qr}, i_{dr} = Current rotor of dq frame (Ampere)

- $\lambda_{qs}, \lambda_{ds}$ = Stator flux of dq frame (Webber)
- $\lambda_{qr}, \lambda_{dr}$ = Rotor flux of dq frame (Webber)
- R_s = Stator Resistance (Ohm)
- R_r = Rotor Resistance (Ohm)
- L_s = Stator Inductance (Henry)
- L_r = Rotor Inductance (Henry)
- L_M = Mutual Inductance (Henry).

Torsi elektromagnetik dibangkitkan dengan menggunakan persamaan (5) [5], dan kecepatan rotor (ω_r) digunakan dengan persamaan (6) [4].

$$T_{em} = \frac{3P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \tag{5}$$

$$T_{em} = T_L + J \frac{d\omega_m}{dt} = T_L + \frac{2}{P} J \frac{d\omega_r}{dt} \tag{5.1}$$

$$\omega_r = \int \frac{T_{em} - T_L}{J} \cdot \frac{P}{2} dt \tag{6}$$

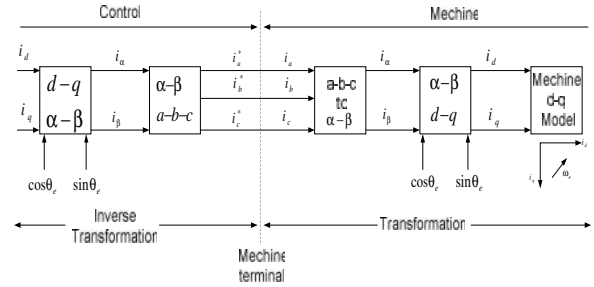
Dimana,

- T_L = Load Torque (N.m)
- T_{em} = Electromagnetic Torque (N.m)
- J = Inertia Momen (kg.m²)
- P = Pole
- ω_r = Speed in rotor (rad/second)
- ω_m = Speed in rotor mechanic (rad/second)

2.2 Kontrol Vektor [11]

Kontrol vektor terdiri dari beberapa komponen arus stator yang ditunjukkan sebagai sebuah vektor, didalam putaran sinkron bentuk referensi *d-q*, dimana diekspresikan pada torsi elektromagnetic seperti halnya motor DC. Teknik ini berdasarkan transformasi tiga fasa kedalam dua koordinasi waktu yang bervariasi, untuk pengendalian kecepatan juga tergantung kepada dua sistem koordinasi tersebut. Arus terminal fasa *Ia*, *Ib*, dan *Ic* diubah dengan menggunakan transformasi *clarke* yaitu dari sinyal tiga fasa sinusoidal ke dua fasa kedalam bentuk komponen ($\alpha\beta$). Dua komponen selanjutnya diubah kedalam bentuk *d-q* dimana komponen tersebut dengan sumbu *direct* dan *quadrature*

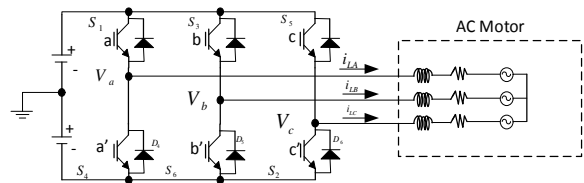
yaitu memisahkan antara torsi dan flux tersendiri.



Gambar 2. Prinsip Kontrol Vektor

2.3 Inverter

Model rangkaian *inverter* tiga fasa secara umum ditunjukkan pada Gambar 2.6. Dimana *S1* sampai *S6* adalah 6 (enam) buah saklar power yang membentuk ukeluaran, yang dikendalikan oleh perubahan pensaklaran *a*, *a'*, *b*, *b'* dan *c*, *c'*. Saklar dapat menggunakan komponen daya seperti MOSFET atau IGBT. Ketika saklar atas (*a*, *b* dan *c*) aktif, maka saklar bawah (*a'*, *b'* dan *c'*) yang berhubungan tidak aktif. Oleh karena itu, perubahan pola *switching* *a*, *b*, *c* dan *a'*, *b'*, *c'* akan menghasilkan 8 (delapan) kemungkinan pola *switching* seperti terlihat pada Gambar 3. Kemudian muncullah delapan buah vektor tegangan yang terdiri dari *V0* sampai dengan *V7*.

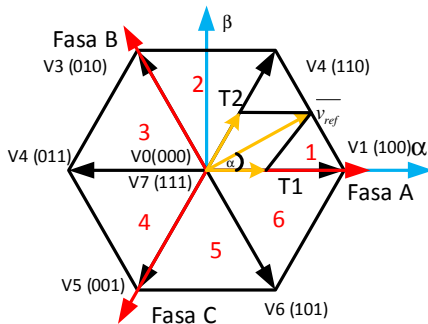


Gambar 3. Skema Dasar Inverter Tiga Fasa

2.4 Space Vector Pulse Width Modulation [12]

SVPWM awalnya dikembangkan sebagai metode pendekatan vektor pada *Pulse Width Modulation* (PWM) untuk *inverter* tiga fasa. Metode SVPWM ini didasarkan adanya vektor ruang pada koordinat *abc* sumber tiga fasa. SVPWM adalah sebuah teknik tingkat lanjut untuk membangkitkan gelombang sinus

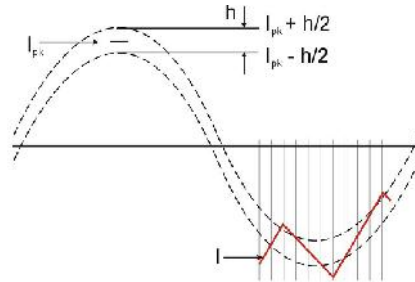
yang menghasilkan bentuk tegangan sumber untuk motor induksi dengan total distorsi harmonik yang rendah. Tujuan utama dari teknik modulasi ini adalah untuk mendapatkan variasi keluaran yang mempunyai komponen fundamental maksimum dengan nilai harmonisa yang minimum. SVPWM adalah metode tingkat lanjut dari metode PWM dengan komputasi khusus untuk aplikasi penggerak elektrik dengan frekuensi yang berubah-ubah. Persamaan tegangan pada kerangka acuan abc harus diubah menjadi kerangka acuan $\alpha\beta$ yang terdiri dari sumbu horisontal α dan sumbu vertikal β . Kemudian diperoleh vektor V_0 hingga V_7 . Vektor tersebut kemudian dibagi menjadi dua yaitu 2 (dua) buah vektor nol dan 6 (enam) buah vektor aktif. Vektor aktif tersebut dapat dipetakan dalam bentuk heksagonal dengan beda sudut 60° seperti terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Dasar Pensaklaran Vektor dan Sektor

2.5 Hysteresis Pulse Width Modulation [13]

Kontroler *Hysteresis* merupakan teknik kontrol arus yang mengaktifkan *switching* pada tegangan fasa yang terhubung sebagai hasil pada bentuk feedback sensor arus. Arus fasa ditentukan apakah nilai dalam toleransi *Hysteresis* bisa memanipulasi disekitar nilai arus yang diinginkan. Kontrol *Hysteresis* ini untuk menyederhanakan dan *robustnes* pada beban parameter yang berubah-ubah sebagaimana untuk mengetahui lebar frekuensi *switching* yang tidak dapat di prediksi dan juga terdapat kesulitan pada keamanan rangkaian untuk sistem *inverter*.

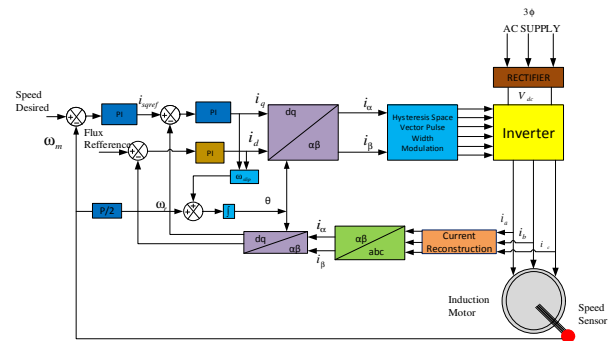


Gambar 5. Bentuk Gelombang Aliran Kontrol Hysteresis

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Perangan Sistem

Sistem dibawah ini terdapat fungsi-fungsi tertentu agar dapat mencapai penelitian yang diinginkan. *Plant* dari sistem ini adalah motor induksi tiga fasa. Sistem ini terdapat *rectifier* (DC Link) yang merupakan penyearah terkendali sehingga menjadi tegangan DC. *Inverter* merupakan suatu alat yang fungsinya untuk merubah dari tegangan DC ke tegangan AC, *Inverter* dikendalikan dengan metode pensaklaran *Hysteresis space vector pulse width modulation*. *Plant* motor induksi menggunakan model d-q yang telah dirubah dari sistem koordinat tiga fasa menjadi dua fasa.



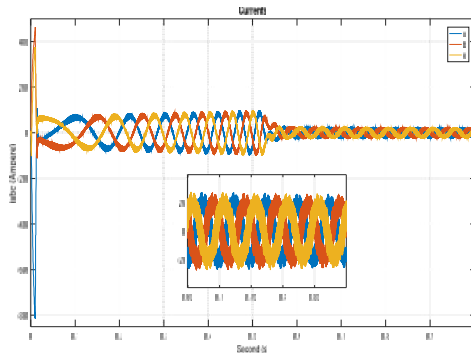
Gambar 6. Blok Diagram

3.2 Simulasi Dan Analisa

Tahapan ini menampilkan hasil simulasi perancangan metode *hysteresis* pensaklaran pada inverter. Data yang ditampilkan meliputi grafik sinyal arus dan tegangan pada metode *Hysteresis*, SVPWM, perbandingan kedua metode dan HSVPWM.

3.3 Hysteresis Pulse Width Modulation

Dibawah ini merupakan simulasi arus menggunakan metode *Hysteresis* di *Inverter*:



Gambar 7. Respon Arus pada Hysteresis

Gambar 7 diatas merupakan grafik sinyal arus pada metode *hysteresis*. Hasil menunjukkan bahwa pada awal mula motor diberi sumber kemudian arus yang mengalir sebesar 462A, setelah waktu di 0.635 detik sinyal berubah dengan amplitude sebesar 26A atau saat *steady state*. Metode ini menghasilkan ripple sebesar 29.7A saat sinusoidal, saat puncak ripple sebesar 5.82A dan saat lembah sebesar 5.3A.

3.4 Space Vector Pulse Width Modulation

SVPWM merupakan gabungan antara kontrol vektor dengan teknik PWM. Sub bab ini menampilkan arus dan tegangan pada keluaran inverter dengan menggunakan metode SVPWM.

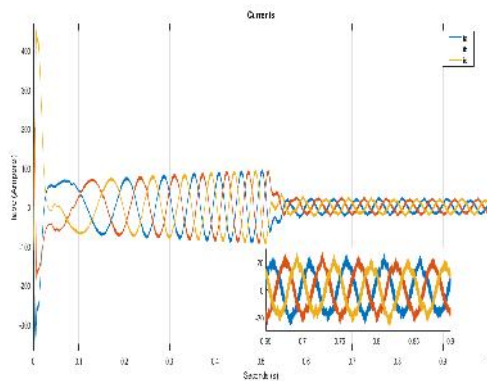
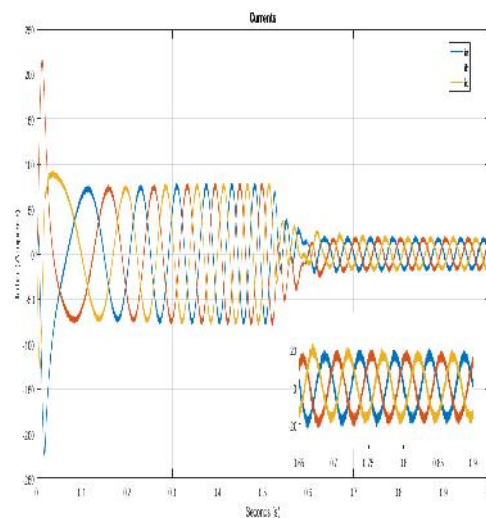


Figure 8. Respon Arus SVPWM

Tahapan ini membahas metode SVPWM dimana grafik sinyal yang ditampilkan berupa arus dan tegangan pada keluaran inverter. Gambar 8 menampilkan arus tiga fasa *iabc* yang mana saat awal mula motor diberi sumber tenaga kemudian puncak arusnya mencapai 454A tetapi saat waktu 0.65 detik arus mengalir sebesar 24A. Metode ini masih menghasilkan ripple sebesar 9.68 A saat sinusoidal, saat puncak *ripple* sebesar 4A dan saat lembah sebesar 4A.

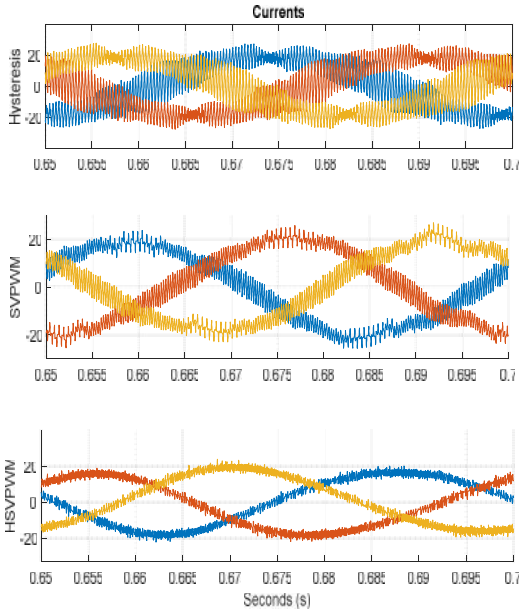
3.5 Hysteresis Space Vector Pulse Width Modulation

Tahap ini akan menampilkan data grafik usulan yaitu HSVPWM. Data yang akan ditampilkan berupa grafik sinyal arus dan tegangan pada keluaran inverter.



Gambar 9. Respon Arus

Tahapan ini gabungan pada kedua metode menunjukkan sinyal arus keluaran dapat diperbaiki yaitu ripple pada sinyal arus. Metode ini menghasilkan ripple sebesar 4.2A saat sinusoidal, saat puncak ripple sebesar 4.5A dan saat lembah sebesar 4.5A



Gambar 10. Perbandingan Respon Arus

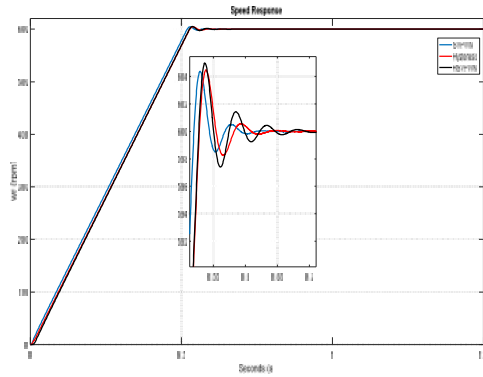
Gambar 10 diatas merupakan perbandingan arus keluaran inverter pada tiap metode. Perbandingan ripple pada ketiga metode dapat dilihat pada Tabel 1 data diambil saat ripple sinusoidal, puncak dan lembah pada luaran inverter. Data diatas juga berupa *ripple* efektif dan sinyal efektif.

Table 1. Perbandingan Tiap Metode

	Effektif Ripple	Effektif Signal
Hysteresis	33.1017	33.8467
SVPWM	19.32	27.57
HSPWM	1.6071	27.6113

3.6 Respon Kecepatan

Sub bab ini menampilkan grafik respon kecepatan dengan perbandingan antara ketiga metode.



Gambar 10. Perbandingan Respon Kecepatan

Hasil respon pada perbandingan kecepatan menunjukan bahwa untuk mencapai keadaan *steady state* metode SVPWM lebih cepat yaitu membutuhkan waktu 0.628 detik. Metode HSPWM lebih lamban dibandingkan metode SVPWM yaitu membutuhkan waktu sebesar 0.723 detik untuk mencapai *steady state*. Nilai konstanta waktu (τ) pada ketiga metode perbedaanya tidak terlihat secara signifikan antara 0.33 detik. Karakteristik respon terlihat pada tabel 4.3 dimana *delay time* disekitar 0.227 detik, *Settling time* sekitar 0.6 detik kemudian *rise time* disekitar 0.5 detik.

3.7 Perhitungan Efisiensi

Setelah mengetahui daya masuk yang berupa tegangan dan arus pada tiap metode dan kemudian diketahui juga daya keluaran yang berupa torsi dan kecepatan. Sub bab ini menghitung seberapa besar efisiensi motor induksi tiga fasa dengan menggunakan tiap metode.

Table 2. Perhitungan Efisiensi

	Pout	Pin	Effisiensi (%)
Hysteresis	10800	11960	90
SVPWM	10062	11040	91
HSPWM	7414	7820	94

Tabel diatas merupakan perhitungan parameter untuk menghitung efisiensi motor. Metode *Hysteresis* menghasilkan 90% efisiensi motor dimana daya masuk dengan tegangan sebesar

460 Volt, arus 26 Ampere dan daya keluaran motor yaitu torsi sebesar 18 Nm dan kecepatan 600 rpm. Metode SVPWM menghasilkan 91% efisiensi motor dimana daya masuk dengan tegangan sebesar 460 Volt, arus 24 Ampere dan daya keluaran motor yaitu torsi sebesar 16.77 Nm dan kecepatan 600 rpm. Metode HSVPWM menghasilkan 94% efisiensi motor dimana daya masuk dengan tegangan sebesar 460 Volt, arus 17 Ampere dan daya keluaran motor yaitu torsi sebesar 12.36 Nm dan kecepatan 600 rpm. Pada data diatas menunjukkan bahwa metode HSVPWM lebih efisien yaitu meningkat sebesar 3% dengan persentase sebesar 94%.

4. KESIMPULAN

Hasil menunjukkan pengaturan Kecepatan sukses dilakukan dengan menggunakan metode *indirect vector control*. Ripple arus pada inverter dapat berkurang sebesar 65%, Perubahan kecepatan pada metode HSVPWM berhasil mencapai *set point* 600 rpm dengan rise time 0.5267 detik, *steady state* 0.628 detik dan mempunyai *over shoot* sebesar 0.8%. Metode HSVPWM menghasilkan 94% efisiensi motor dimana daya masuk dengan tegangan sebesar 460 Volt, arus 17 Ampere dan daya keluaran motor yaitu torsi sebesar 12.36 Nm dan kecepatan 600 rpm. Pada data diatas menunjukkan bahwa metode HSVPWM lebih efisien yaitu meningkat sebesar 3% dengan persentase sebesar 94%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih saya berikan kepada Program Studi Teknik Elektronika, Politeknik Negeri Malang yang telah memberikan dukungan, sehingga terselesainya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Parekh, R., 2003. AC Induction Motor Fundamentals. Microchip Technology Inc.
- [2] Mohan, N., 2014. Advanced electric drives: analysis, control, and modeling using MATLAB/Simulink. John wiley & sons.
- [3] Chengaiah, C. and Prasad, S., 2013. Performance of Inductoin Motor Drive by Indirect vector controlled method using PI and Duzzy Controllers. International Journal of Science, Environment, 2(3), pp.475-469.
- [4] Arulmozhiyal, R. and Baskaran, K., 2009. Space Vector Pulse Width Modulation BasedSpeed Control of Induction Motor using FuzzyPI Controller. International Journal of Computer and Electrical Engineering, 1(1), p.98.
- [5] Lakshmi, N.S., Adhavan, B., Jagannathan, V. and Ravichandran, C.S., 2013, March. Reduction of transient and steady state speed pulsation in permanent magnet synchronous motor using Space Vector Pulse Width Modulation control. In Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT), 2013 International Conference on (pp. 252-257). IEEE.
- [6] Yi, H., Zhuo, F., Zhang, Y., Li, Y., Zhan, W., Chen, W. and Liu, J., 2014. A source-current-

- detected shunt active power filter control scheme based on vector resonant controller. IEEE Transactions on Industry Applications, 50(3), pp.1953-1965.
- [7] Arulmozhiyal, R., Baskaran, K. and Manikandan, R., 2010, December. An intelligent speed controller for indirect vector controlled induction motor drive. In Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC), 2010 IEEE International Conference on (pp. 1-5). IEEE.
- [8] Singh, M. and Hussain, M.S.S., Implementation of an Intelligent Controller for Three Phase Vector Controlled Induction Motor Drive.
- [9] Bimal, K., 2002. Bose. Modern power electronics and AC drives.
- [10] Behera, P.K., Behera, M.K. and Sahoo, A.K., 2014. Comparative Analysis of scalar & vector control of Induction motor through Modeling & Simulation. international journal of innovative research in electrical, electronics, instrumentation and control engineering, 2(4), pp.1340-1344.
- [11] Jung, J.W. and DStudent, P.H., 2005. PROJECT# 2 Space vector PWM inverter. Mechatronic Systems Laboratory, Dept. of Electrical and Computer Engg., The Ohio State University.
- [12] Dos Santos, E. and da Silva, E.R., 2014. Advanced Power Electronics Converters: PWM Converters Processing AC Voltages (Vol. 46). John Wiley & Sons.
- [13] Arulmozhiyal, R., Baskaran, K. and Manikandan, R., 2010, December. An intelligent speed controller for indirect vector controlled induction motor drive. In Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC), 2010 IEEE International Conference on (pp. 1-5). IEEE.