

Perbandingan Kinerja Teknik Modulasi Inverter Dua-Level untuk Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga-Fase

I Nyoman Wahyu Satiawan

nwahyus@yahoo.com

Jurusan Teknik Elektro, Fak. Teknik
Universitas Mataram

Ida Bagus Fery Citarsa

gurmanperry@yahoo.com

Jurusan Teknik Elektro, Fak. Teknik
Universitas Mataram

Supriono

suprionomuda@yahoo.com

Jurusan Teknik Elektro, Fak. Teknik
Universitas Mataram

Abstrak

Paper ini membandingkan kinerja tiga teknik modulasi inverter dua-level yakni metode konduksi 180°, metode Sinus-PWM (SPWM) dan metode space vector PWM (SVPWM). Hasil simulasi memperlihatkan bahwa metode konduksi 180° mampu menghasilkan tegangan keluaran yang tinggi tetapi kinerjanya relative paling buruk. Perbandingan komponen fundamental tegangan keluaran maksimum dari metode konduksi 180°, metode SPWM dan metode SVPWM adalah 0.637 : 0.5 : 0.57 p.u. Sedangkan perbandingan THD tegangan keluaran adalah 31% : 68% : 30% dan perbandingan THD arus stator adalah 50% : 24% : 9.6%, untuk masing-masing metode konduksi 180°, metode SPWM dan metode SVPWM. Hubungan torsi dan kecepatan memperlihatkan motor yang dicatu dengan inverter yang dikontrol dengan metode konduksi 180° mampu memutar motor sampai dengan 1765 rpm dibandingkan dengan metode SVPWM sebesar 1685 rpm dan metode SPWM sebesar 1460 rpm. Namun demikian metode SVPWM menunjukkan riak torsi yang paling halus dibanding kedua metode yang lain. Hasil yang didapat membuktikan bahwa metode SVPWM sangat sesuai digunakan untuk pengaturan kecepatan variabel motor induksi tiga-fase.

Kata kunci — Metode konduksi 180°, Metode SPWM, Metode SVPWM, Total Harmonics Distortion (THD), Kecepatan motor induksi tiga-fase.

Abstract

This paper compares various modulation techniques of two-level inverter, i.e. 180° conduction method, Sin-PWM (SPWM) and space vector PWM (SVPWM). Simulation result shows that 180° conduction mode is able to generate the highest voltage output however it results the worse performance. Comparison of fundamental component of the output voltage is 0.637 : 0.5 : 0.57 p.u for 180° conduction method, SPWM and SVPWM respectively. Meanwhile comparison of voltage output THD is 31% : 68% : 30% and comparison of phase stator current THD is 50% : 24% : 9.7% for 180° conduction method, SPWM and SVPWM respectively. Furthermore, relationship of speed - torque shows that when motor is fed by inverter using 180° conduction method, motor is able to reach the highest speed (1765 rpm) but results high torque ripple compare to SVPWM (1685 rpm) and SPWM (1460 rpm). It is also shown that the SVPWM method performs the smoothest torque ripple among the three modulation methods. The results prove that

SVPWM method is the most suitable method for variable speed drive of a three-phase induction motor.

Keywords— 180° conduction method, SPWM method, SVPWM method, Total Harmonics Distortion (THD), Three-phase induction motor speed drive.

I. PENDAHULUAN

Pengaturan kecepatan sebuah motor AC memerlukan inverter yang berfungsi sebagai sumber catu tegangan dengan frekuensi dan magnitude yang variable. Pengaturan kecepatan motor diperlukan diantaranya untuk meningkatkan efisiensi dan jika digunakan sebagai sumber penggerak pada system transportasi, maka kecepatan variable dibutuhkan untuk meningkatkan kenyamanan dan keselamatan. Tegangan keluaran inverter dapat diatur dengan cara merubah gain inverter atau dengan memvariasikan tegangan DC masukan. Pengaturan gain inverter dilakukan dengan cara pengaturan sudut penyalaan saklar-saklar inverter yang dikenal dengan teknik pengaturan lebar pulsa / PWM.

Perkembangan teknik modulasi inverter diawali dengan teknik yang sangat sederhana yang disebut dengan metode konduksi 180°. Selanjutnya terdapat teknik modulasi Sinusoidal PWM (SPWM) yang beroperasi menggunakan prinsip perbandingan sinyal referensi dengan sinyal pembawa (carrier) frekuensi tinggi. Saat ini berkembang teknik modulasi yang disebut space vector PWM (SVPWM). Metode SPWM biasanya direalisasikan secara analog sedangkan algoritma teknik SVPWM lebih sesuai direalisasikan secara digital.

Penelitian yang berhubungan dengan metode PWM inverter dua-level sudah berlangsung sejak lebih dari dua dekade [1]. Penelitian diantaranya menyangkut pada upaya untuk memperbaiki kualitas tegangan keluaran inverter, penyederhanaan algoritma, realisasi hardware dan perbandingan konseptual dari berbagai teknik modulasi yang ada. [2-7]. Paper ini mendiskusikan teknik modulasi pada inverter dua-level dan perbandingan kinerja tiga teknik modulasi baik dalam keadaan tanpa beban maupun dengan beban (motor induksi). Analisis dilakukan dengan membandingkan kualitas tegangan keluaran, kandungan

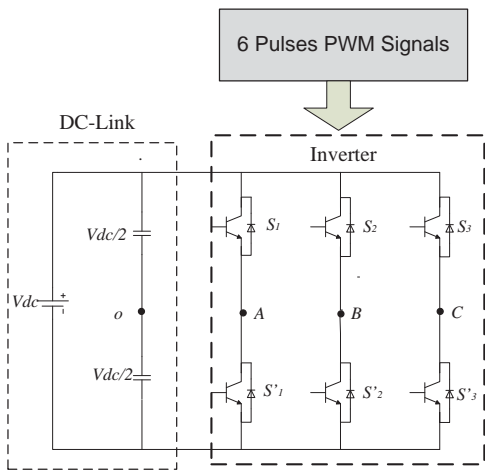
harmonisa, total distorsi harmonisa (THD), riak arus, kecepatan dan torsi dari masing-masing teknik modulasi. Perbandingan kinerja inverter ini berguna untuk menunjukkan kelebihan dan kekurangan masing-masing teknik modulasi sehingga dapat dijadikan sebagai bahan pertimbangan dalam menentukan teknik modulasi yang tepat terutama pada aplikasi yang membutuhkan pengaturan kecepatan variable.

II. TEKNIK MODULASI INVERTER DUA-LEVEL TIGA-FASE

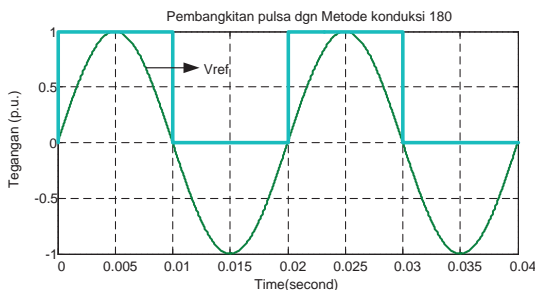
Sebelum membahas berbagai teknik modulasi pada inverter tiga-fase, maka struktur inverter dua-level tiga-fase akan dibahas terlebih dahulu untuk dapat memberikan gambaran yang lengkap tentang sistem konversi daya

A. Struktur Inverter dua-level tiga-fase

Inverter dua-level tiga-fase disusun oleh 6 buah saklar elektronika daya (selanjutnya disebut saklar) yakni terdiri dari 2 saklar pada setiap lengan fasenya seperti terlihat pada Gambar 1. Setiap saklar mempunyai tiga terminal yakni *Source (S)*, *Drain (D)*, *Gate (G)*. Saklar dikontrol dengan cara memberikan pulsa pada terminal *Gate (G)* melalui rangkaian pembangkit pulsa (*PWM*). Pada setiap saklar dipasang diode secara anti paralel yang berfungsi untuk memberikan alternatif jalan arus pada saat diperlukan. Saklar-saklar yang berada pada satu lengan dioperasikan secara komplementer untuk menghindari inverter terhubung singkat.



Gambar 1. Skema sistem inverter dua-level tiga-fase



Gambar 2. Prinsip pembangkitan sinyal dengan metode konduksi 180°.

B. Metode konduksi 180°

Metode konduksi 180° mengontrol inverter dengan logika yang sangat sederhana yakni saklar diperintahkan untuk konduksi (ON) pada setengah siklus positif dari tegangan referensi dan sebaliknya saklar terbuka (OFF) pada setengah siklus negative berikutnya. Pada metode ini, dalam satu periode tegangan referensi hanya terjadi dua kali proses komutasi (sekali ON dan sekali OFF). Karena dioperasikan dengan kecepatan switching yang relatif rendah maka rugi-rugi switching menjadi kecil dimana berpengaruh pada tegangan keluaran inverter. Prinsip kerja metode konduksi 180° dijelaskan pada (1) dan Gambar 2 memperlihatkan hubungan antara tegangan referensi dengan pulsa yang dihasilkan, yang digunakan untuk men-triger saklar bagian atas lengan fase “a”. Pulsa untuk lengan fase “b” dan “c” memiliki bentuk yang sama hanya saja berbeda fase masing-masing 120° dan 240° dengan fase “a” [8].

$$\begin{aligned} \text{if } v_{ref} > 0 \text{ then } m_{x(x=a,b,c)} &= 1 \text{ (High)} \\ \text{else } m_{x(x=a,b,c)} &= 0 \text{ (Low)} \end{aligned} \quad (1)$$

C. Metode SPWM

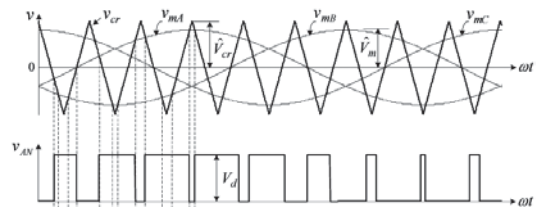
Pada metode SPWM, pulsa dibangkitkan dengan cara membandingkan tegangan referensi sinusoidal dengan sinyal pembawa carrier frekuensi tinggi. Sinyal carier bisa berbentuk gelombang segitiga (*triangular*) atau sinyal gigi gergaji (*sawtooth*). Pulsa PWM dibangkitkan dengan logika seperti pada (2) [9].

$$\begin{aligned} \text{if } v_{mx(x=1,2,3)} \geq v_{cr} \text{ then } m_{x(x=1,2,3)} &= 1 \\ \text{if } v_{mx(x=1,2,3)} < v_{cr} \text{ then } m_{x(x=1,2,3)} &= 0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(2)$$

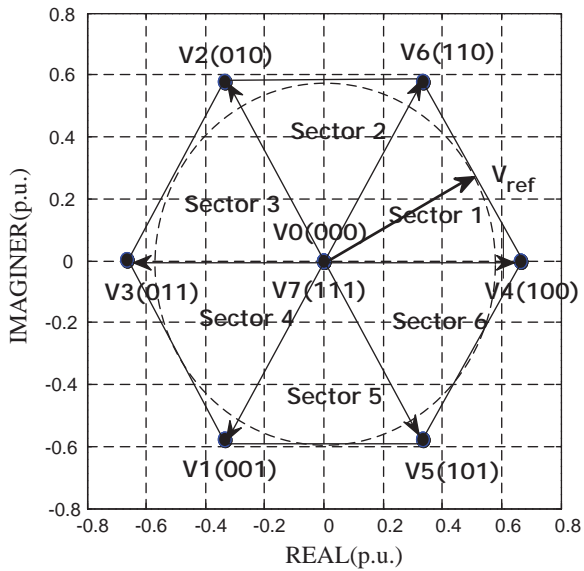
Persamaan (2) menyatakan jika sinyal tegangan referensi (v_{mx}) lebih besar dari sinyal carrier (v_{cr}) maka pulsa PWM bernilai high (1) dan sebaliknya jika sinyal referensi lebih kecil dari sinyal carrier maka pulsa PWM bernilai rendah (0). Bentuk pulsa PWM untuk fase “a” saklar bagian atas diperlihatkan pada Gambar 3.

D. Metode SVPWM

Inverter tiga fase memiliki 8 kondisi switching yang dipetakan pada 7 posisi vector. Hubungan kondisi switching dengan tegangan space vector (selanjutnya disebut tegangan vector) diatur pada (3). Pemetaan tegangan vector pada bidang dua dimensi terlihat pada Gambar 4. Pada Gambar 4, terlihat 6 vektor terpetakan di posisi mengelilingi titik pusat membentuk sebuah bangun hexagonal sedangkan dua vector terpetakan pada titik pusat (origin).



Gambar 3 Prinsip pembangkitan sinyal dengan SPWM. [10]



Gambar 4. Tegangan space vector inverter dua-level tiga-fase

$$v_{\alpha\beta} = v_{\alpha} + jv_{\beta} = 2/3(v_a + \underline{a}v_b + \underline{a}^2v_c) \quad (3)$$

dimana v_x ($x = a, b, c$) adalah tegangan fase dan \underline{a} adalah operator kompleks, $\underline{a} = \exp(j2\pi/3)$, $\underline{a}^2 = \exp(j4\pi/3)$ Hubungan tegangan fase dengan kondisi switching diperlihatkan pada (4) [10].

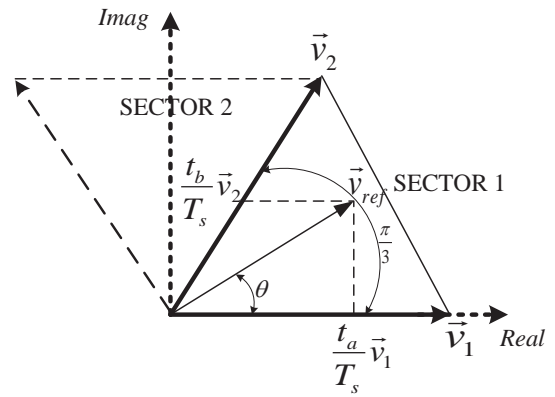
$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} \quad (4)$$

Metode SVPWM menggunakan prinsip keseimbangan tegangan-waktu (*volt-second balance*). Untuk mensintesa tegangan referensi, tiga tegangan vector terdekat dengan tegangan referensi dioperasikan dalam kurun waktu tertentu. Prosedur metode SVPWM secara singkat dirangkum sebagai berikut [10]:

1. Transformasi tegangan referensi tiga-fase menjadi dua-fase dengan menggunakan transformasi Clarke.
2. Menentukan sektor berdasarkan sudut dari tegangan referensi yang sudah ditransformasi ke bidang dua-fase.
3. Menghitung waktu aplikasi dari tegangan vector yang digunakan.

Waktu aplikasi tagangan vector dihitung dengan cara memproyeksikan tegangan referensi pada dua sumbu tegangan vector seperti diilustrasikan pada Gambar 5. Waktu aplikasi untuk setiap sektor dihitung menggunakan (5-7).

$$t_a = \frac{\sqrt{3}T_s |v_{ref}|}{v_{dc}} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta - \frac{k-1}{3}\pi\right) \quad (5)$$



Gambar 5. Perhitungan waktu aplikasi vector yang digunakan [10].

$$t_b = \frac{\sqrt{3}T_s |v_{ref}|}{v_{dc}} \sin\left(\theta - \frac{k-1}{3}\pi\right) \quad (6)$$

$$t_0 = T_s - t_a - t_b \quad (4.4a) \quad (7)$$

dimana t_a dan t_b adalah waktu aplikasi untuk vector v_a , dan vector v_b , k adalah nomor sektor ($k = 1 - 6$), θ adalah sudut tegangan referensi terhadap sumbu real, T_s adalah periode switching dan, $|v_{ref}|$ adalah magnitudo tegangan referensi.

4. Menentukan urutan switching untuk masing-masing sektor.

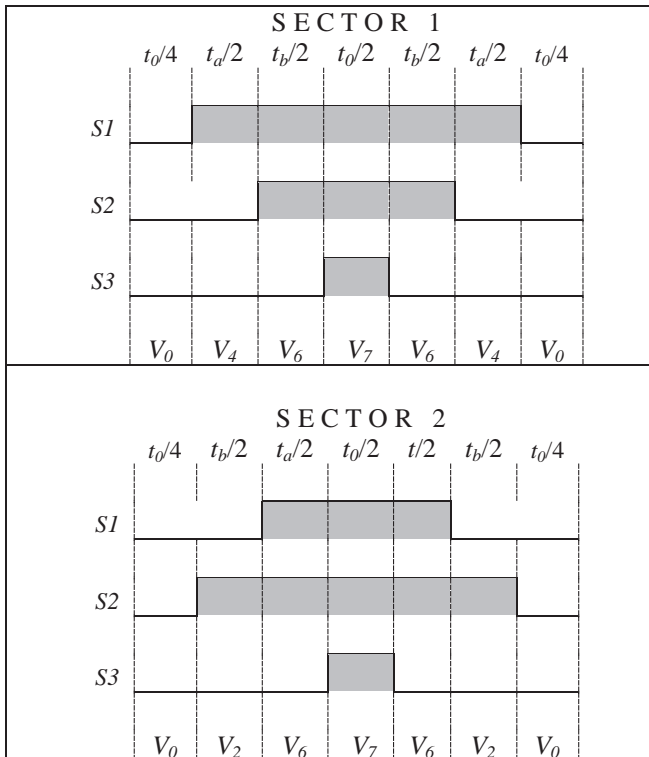
Gambar 6 memperlihatkan urutan switching saklar bagian atas (S_1, S_2, S_3) untuk sektor 1 dan sektor 2. Sektor 1 menggunakan switching dengan urutan $V_0(000), V_4(100), V_6(110), V_7(111), V_6(110), V_4(100), V_0(000)$ yang masing dioperasikan selama $t_0/4, t_a/2, t_b/2, t_0/2, t_b/2, t_a/2, t_0/4$. Sedangkan sektor 2 menggunakan switching dengan urutan $V_0(000), V_2(010), V_6(110), V_7(111), V_6(110), V_2(010), V_0(000)$ yang masing dioperasikan selama $t_0/4, t_b/2, t_a/2, t_0/2, t_a/2, t_b/2, t_0/4$. Selanjutnya untuk sektor ganjil penempatan waktu operasi switching serupa dengan sektor 1 dan sektor genap serupa dengan sektor 2. Urutan switching untuk seluruh sektor di rangkum dalam Tabel 1.

Prosedur metode SVPWM paling kompleks dibandingkan dengan dua metode yang lain. Namun demikian metode SVPWM mempunyai banyak keunggulan diantaranya fleksibilitas pulsa PWM yang dihasilkan dan kesesuaian untuk diaplikasikan secara digital. Pembahasan tentang realisasi digital metode SVPWM dan pengaruh variasi pulsa SVPWM terhadap keluaran inverter diluar skup pembahasan paper ini dan akan dibahas pada kesempatan lain.



TABEL 1.
URUTAN SWITCHING UNTUK SEKTOR 1 – 6

No. Sektor	Vector yang digunakan
1	$V_0 - V_4 - V_6 - V_7 - V_6 - V_4 - V_0$
2	$V_0 - V_2 - V_6 - V_7 - V_6 - V_2 - V_0$
3	$V_0 - V_2 - V_3 - V_7 - V_3 - V_2 - V_0$
4	$V_0 - V_1 - V_3 - V_7 - V_3 - V_1 - V_0$
5	$V_0 - V_1 - V_5 - V_7 - V_5 - V_1 - V_0$
6	$V_0 - V_4 - V_5 - V_7 - V_5 - V_4 - V_0$



Gambar 6. Urutan switching sektor 1 dan sektor 2

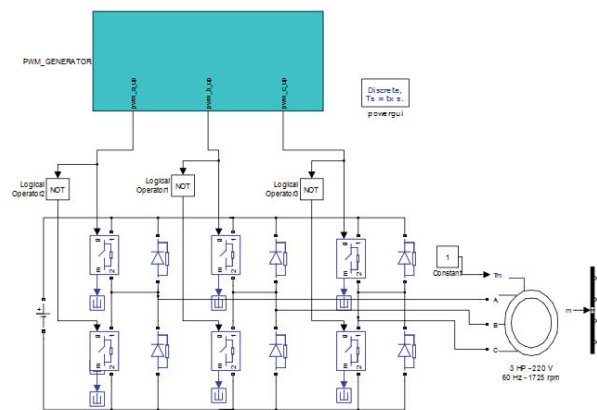
E. Metode Simulasi

Ketiga metode modulasi tersebut, diverifikasi menggunakan program komputer dimana inverter dan motor induksi dimodelkan dengan menggunakan *SimPower BlockSet* dan sinyal PWM dibangkitkan menggunakan Matlab / Simulink. Pada simulasi ini, pengaruh *death-time* diabaikan dan inverter yang dikontrol dengan teknik PWM dioperasikan dengan kecepatan switching 1 kHz. Tegangan masukan DC adalah 1 p.u (setara dengan 400 V). Total Harmonic distortion (THD) dihitung dengan (8) dimana perhitungan melibatkan sampai dengan harmonisa ke 49920 Hz.

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n=1,2,3,\dots}^r V_n^2 - V_1^2}{V_1^2}} \quad (8)$$

TABEL 2.
PARAMETER MOTOR INDUKSI YANG DIGUNAKAN

Machine parameter	Value
Stator resistance, R_s [Ω]	0.435
Rotor resistance, R_r [Ω]	0.816
Stator leakage inductance, L_{ls} [H]	4×10^{-3}
Rotor leakage inductance, L_{lr} [H]	2×10^{-3}
Magnetising inductance, L_m [H]	69.3×10^{-3}
Moment of Inertia, J [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]	0.089
Load torque, T_L [N·m]	10
Magnetic poles pair number, P	2
Input voltage (phase to neutral), [V]	220
Rated frequency, f [Hz]	60



Gambar 7 Blok simulasi sistem pengaturan kecepatan motor induksi tiga fase.

dimana V_n adalah nilai rms dari harmonisa ke- n , V_1 adalah nilai rms komponen fundamental, n adalah orde harmonisa rendah dan r adalah harmonisa maksimum yang digunakan dalam perhitungan.

Kinerja inverter diverifikasi baik dalam keadaan tanpa beban maupun dengan beban. Pada saat berbeban, sebuah motor induksi dengan parameter seperti Tabel 2 dihubungkan dengan inverter. Blok simulasi sistem pengaturan motor menggunakan *Simpower blokset* dan simulink terlihat pada Gambar 7.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Tegangan keluaran inverter

Tegangan keluaran inverter maksimum pada daerah linier yang dapat dihasilkan dengan menggunakan ketiga teknik modulasi berikut spektrum harmonisa diperlihatkan pada Gambar 8. Tegangan keluaran fase ke netral yang dihasilkan dengan menggunakan metode konduksi 180° berbentuk tangga (*stair*) dimana dalam satu periode gelombang dibentuk oleh 6 nilai tegangan DC (Gambar 8 a.) Spektrum harmonisa memperlihatkan nilai fundamental tegangan keluaran yang tinggi (0.637 p.u.) dan kandungan harmonisa orde rendah (ke-5, 7, 11, 13, 17, 19 dan seterusnya) yang juga masih sangat tinggi sedangkan harmonisa kelipatan tiga (3, 9, 15 dan

seterusnya) tidak muncul karena system dianggap dalam keadaan seimbang.

Sementara itu tegangan keluaran yang dihasilkan dengan menggunakan metode SPWM dan SVPWM diperlihatkan pada Gambar 8 (b) dan (c). Terlihat bahwa bentuk gelombang keluaran mendekati sinusoida, yang diindikasikan dengan kandungan harmonisa rendah yang sangat kecil (hampir tidak terlihat). Spektrum harmonisa memperlihatkan harmonisa muncul disekitar frekuensi switching (1 kHz) dan kelipatannya. Komponen fundamental tegangan keluaran yang dihasilkan dengan metode SPWM dan SVPWM adalah masing-masing bernilai 0.5 p.u. dan 0.57 p.u (lebih rendah dari yang dihasilkan dengan metode konduksi 180°). Hal ini terjadi karena metode SPWM dan SVPWM beroperasi dengan kecepatan 1 kHz atau sekitar 20 kali lebih cepat dari metode konduksi 180°. Jadi rugi-rugi konduksi dan rugi-rugi switching metode SPWM dan SVPWM jauh lebih tinggi dari metode konduksi 180°. Dibandingkan dengan metode SPWM, metode SVPWM mampu meningkatkan efisiensi inverter sebesar 15%.

Sementara itu, perbandingan nilai THD tegangan keluaran untuk ketiga teknik modulasi adalah 31% : 68% : 30% untuk masing-masing metode konduksi 180°, SPWM dan SVPWM.

B. Hubungan torsi dan kecepatan

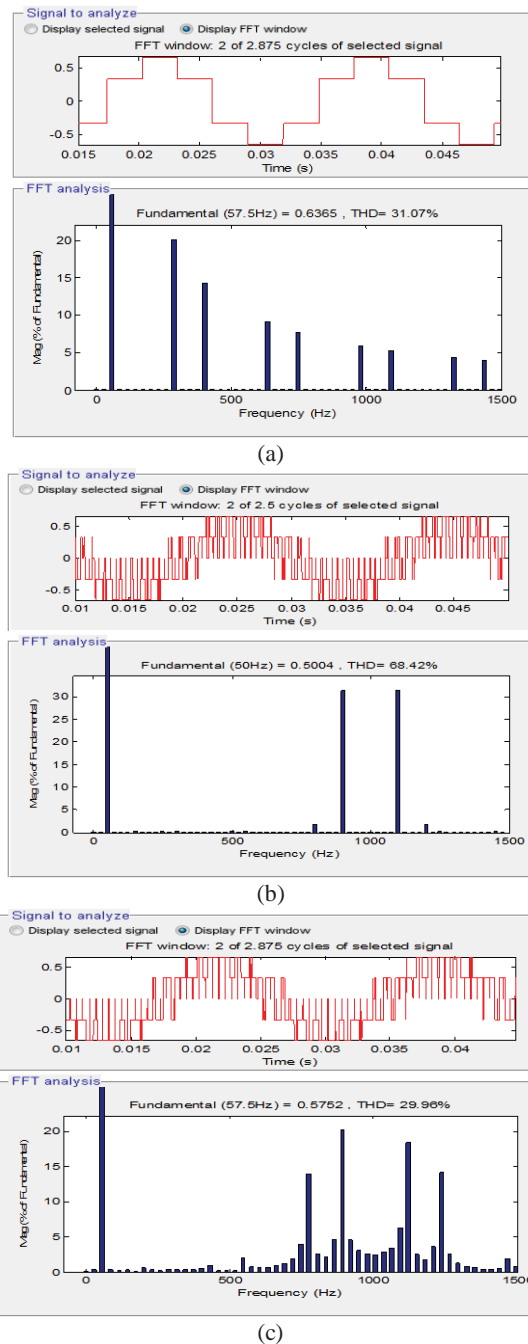
Untuk lebih jauh menunjukkan performasi ketiga teknik modulasi maka sebuah motor induksi tiga-fase dihubungkan dengan inverter dimana kecepatannya diatur secara *open loop* dengan menggunakan prinsip $v/f = \text{konstan}$.

Ketika motor dicatu dengan inverter yang dikendalikan dengan metode konduksi 180° (Gambar 9 (a)), terlihat bahwa kecepatan motor maksimum mencapai 1765 rpm yang mana paling tinggi dibanding kecepatan maksimum motor yang dapat dicapai dengan metode SPWM yang hanya 1460 rpm dan metode SVPWM yang hanya 1685 rpm. Disisi lain, inverter yang dikontrol dengan metode konduksi 180° menghasilkan torsi motor dengan riak yang paling buruk dibandingkan dengan dua metode PWM yang lain Seperti terlihat pada potongan torsi yang diperbesar, dari ketiga teknik modulasi, metode SVPWM menghasilkan riak torsi yang paling kecil sedangkan riak torsi terbesar terjadi ketika inverter dikontrol dengan metode konduksi 180°. Nilai torsi dan kecepatan yang dihasilkan melalui ketiga metode tersebut sesuai dengan kualitas tegangan keluaran yang dihasilkan oleh masing-masing teknik modulasi.

C. Arus fase stator motor

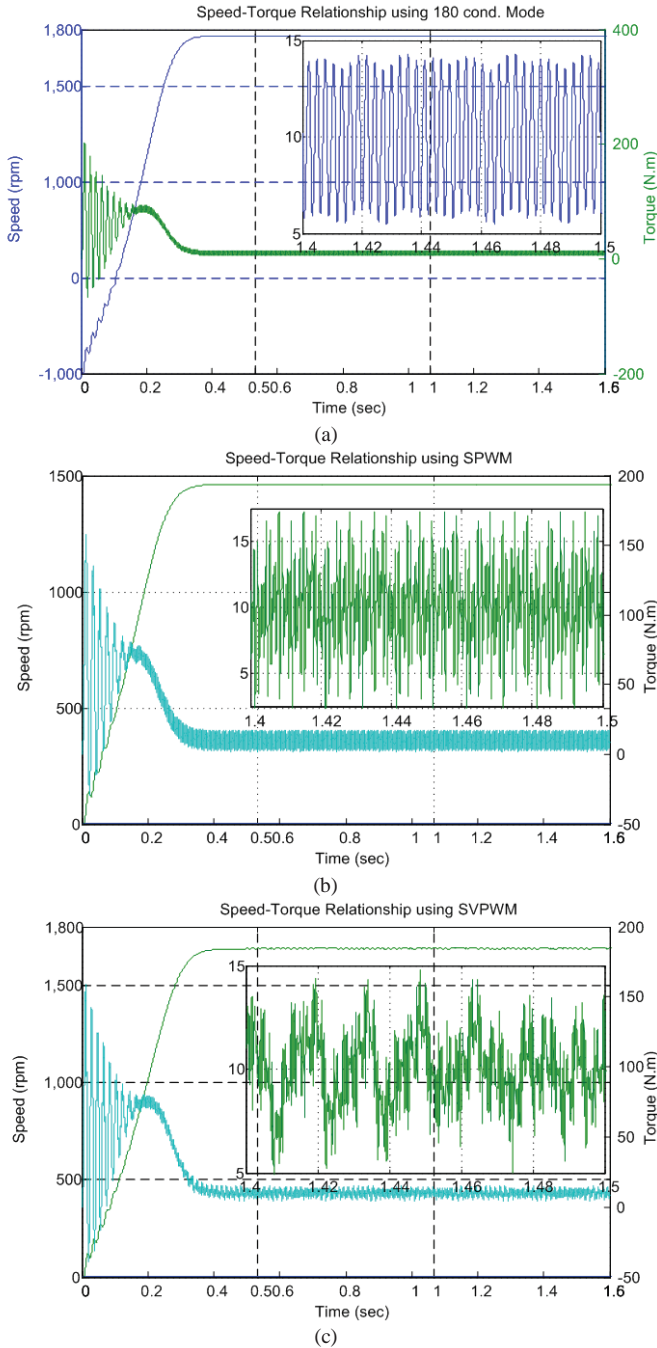
Untuk lebih lanjut membandingkan performasi ketiga teknik modulasi tersebut maka arus motor pada belitan stator selanjutnya dievaluasi. Gambar 10 memperlihatkan arus motor maksimum dan spektrum harmonisa. Dari pengamatan langsung jelas terlihat bentuk gelombang arus yang dihasilkan dengan metode konduksi 180° mengandung ripple yang sangat tinggi yang ditandai dengan kandungan harmonisa rendah dan nilai THD sebesar 50%. Sementara arus motor yang dihasilkan dengan metode SPWM dan SVPWM tidak

mengandung harmonisa orde rendah dengan THD yang lebih kecil yakni sekitar 24 % dan 9.6 % untuk masing-masing metode SPWM dan SVPWM. Hal ini terjadi karena lilitan motor berfungsi sebagai filter (*low pass filter*) dimana komponen harmonisa tinggi disaring sedangkan komponen harmonisa orde rendah dilewatkan. Kondisi arus ini juga memperlihatkan korelasi yang baik dengan tegangan keluaran dan dengan torsi yang dihasilkan karena torsi merupakan fungsi arus.

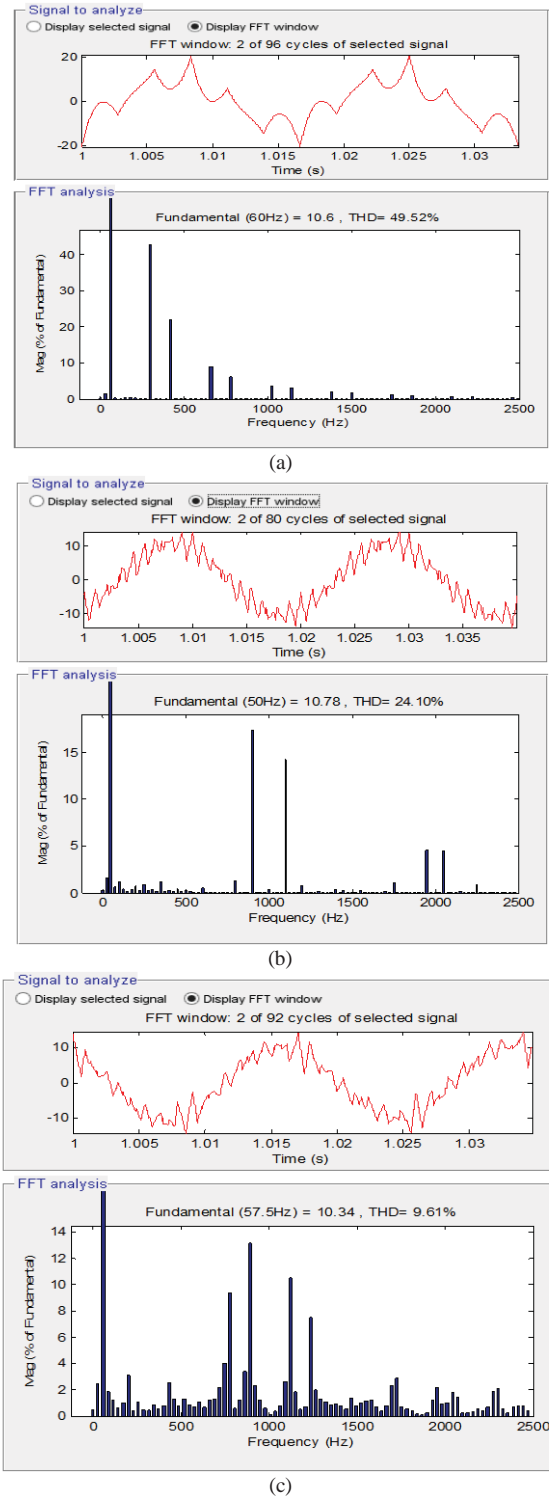


Gambar 8 Tegangan keluaran inverter dan spektrum harmonisa: (a) Metode konduksi 180°, (b) Metode SPWM, (c) Metode SVPWM.

Hasil perbandingan memperlihatkan bahwa secara teknis metode SVPWM sangat sesuai digunakan untuk mengatur kecepatan motor sedangkan sebaliknya metode konduksi 180° tidak direkomendasikan untuk digunakan mengatur kecepatan motor karena tegangan keluaran (dan juga arus motor) mengandung harmonisa orde rendah yang tinggi. Harmonisa orde rendah dapat berpengaruh buruk pada lilitan dan isolasi motor.



Gambar 9 Grafik hubungan kecepatan dan torsi motor yang dicatu dengan inverter menggunakan (a) Metode konduksi 180°, (b) Metode SPWM, (c) Metode SVWM



Gambar 10. Arus fase stator maksimum menggunakan (a) Metode konduksi 180°, (b) Metode SPWM, (c) Metode SVWM



IV. KESIMPULAN (PENUTUP)

Paper ini membahas perbandingan kinerja tiga teknik modulasi inverter dua-level yang digunakan untuk mencatu motor induksi tiga-fase. Hasil simulasi menunjukkan bahwa inverter yang dikontrol dengan metode SVPWM mempunyai performansi yang paling baik. Hal ini dibuktikan dengan kandungan THD tegangan maupun arus yang paling rendah. Perbandingan THD dari metode konduksi 180°, SPWM dan SVPWM adalah masing-masing 31% : 68% : 30% (untuk tegangan keluaran) dan 50% : 24% : 9.6 % (untuk arus stator). Selanjutnya dari hubungan torsi dan kecepatan terlihat, metode konduksi 180° mampu memutar motor sampai dengan 1765 rpm dibandingkan dengan metode SPWM sebesar 1460 rpm dan metode SVPWM sebesar 1685 rpm. Sementara itu metode SVPWM memperlihatkan riak torsi yang paling kecil dibandingkan dua metode yang lain. Riak torsi sesuai dengan kualitas arus fase pada stator yang dihasilkan.

REFERENSI

- [1] J. Holtz, "Pulse Width Modulation – A Survey," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 39, no. 5, pp. 410 – 420, 1992.
- [2] S. Kuswah, A.K. Wadhvani, "Space Vector Pulse Width Modulation for Two-Level using MATLAB," *International Journal of Engineering Research and Application (IJERA)*, vol. pp. 181-184, 2004.
- [3] A.K. Bilhan, E. Akbal, "Modelling and Simulation of Two-level Space Vector PWM Inverter Using Photovoltaic Cells as DC Source," *International Journal of Electronics ; Mechanical and Mechatronics Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 311 – 317,
- [4] A. Cataliotti, F. Genduso, A. Raciti, and G. R. Galluzzo, "Generalized PWM-VSI Control Algorithm Based on a Universal Duty-Cycle Expression: Theoretical Analysis, Simulation Results, and Experimental Validations," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 3, Pp. 1569 – 1579, 2007.
- [5] G. Durgasukumar, M.K. Pathak, "Comparison of adaptive Neural Fuzzy-based space-vector modulation for two-level inverter Electrical," *Power and Energy Systems* vol. 38, pp. 9 – 19, 2012
- [6] A. Hava, "A High-performance Generalized Discontinuous PWM Algorithm," *IEEE Trans. Industry Application*, vol. 34, no.5, pp. 1059 -1071, 1998.
- [7] V. Blasko, "Analysis of Hybrid PWM Based on Modified Space Vector and Triangle-Comparison Methods," *IEE Trans. Industry Application*, vol. 33, no. 3, pp. 756 – 764, 1997.
- [8] M. Rajashekar, I.V.N.G. Swamy, T.A. Kumar, "Modeling and Simulation of Discontinuous Current Mode Inverter Fed Permanent Magnet Synchronous Motor Drive," *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 1, pp. 86 –94, 2011.
- [9] R.H. Zope, P.G. Bhangale, P. Sonare, S.R. Suralkar, "Desain and Implementation of Carrier Based Sinusoidal PWM Inverter," *Int. Journal of Advanced Research in Electrical Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 1, no.43, pp.230 –236, 2012.
- [10] B. Wu, "High-Power Converter and AC Drives," A John Wiley and Son Inc., 2006.

