

PERBANDINGAN TEKNIK MODULASI INVERTER 3-PHASE 2-TINGKAT UNTUK MENGHASILKAN TEGANGAN KELUARAN VARIABEL COMPARISON OF 2 LEVEL THREE PHASE INVERTER MODULATION TECHNIQUE TO PRODUCE VARIABLE OUTPUT VOLTAGE

Ratmiaji¹, I Nyoman Wahyu Satiawan², dan Supriono³

¹Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Mataram, Nusa Tenggara Barat
Email : Ratmiajicubblank@gmail.com ¹ ; nwahyus@yahoo.com ²; suprionomuda@yahoo.com ³

ABSTRAK

Kualitas tegangan keluaran inverter sangat tergantung dari teknik modulasi yang digunakan. Inverter 3-phase 2-tingkat menggunakan enam buah saklar elektronika. Teknik modulasi berkaitan dengan cara mengatur sudut penyalaan saklar-saklar inverter. Penelitian ini membandingkan tegangan keluaran inverter 3-phase 2-tingkat yang dikontrol dengan metode konduksi 180°, metode Sinusoidal PWM (SPWM) dan metoda Space Vector PWM. Ketiga metoda diverifikasi menggunakan Simulasi Matlab / Simulink dan secara eksperimen. Hasil simulasi dan hasil eksperimen memperlihatkan bahwa metode konduksi 180° menghasilkan tegangan keluaran dengan magnitude yang paling besar dibandingkan metode SPWM dan SVPWM. Dengan menggunakan tegangan DC-link inverter sebesar 12 Volt, metode konduksi 180° menghasilkan tegangan rms sebesar 5.23 Volt (rms) pada frekuensi 50 Hz sedangkan untuk metode SPWM dan SVPWM menghasilkan tegangan (rms) masing-masing sebesar 3.98 Volt (rms) dan 4.12 Volt (rms). Metode konduksi 180° juga menghasilkan tegangan dengan THD yang paling rendah dibandingkan metode SPWM dan SVPWM. THD tegangan keluaran inverter dengan metode konduksi 180° sebesar 29 % sedangkan untuk metode SPWM dan SVPWM masing-masing menghasilkan tegangan dengan THD sebesar 49.6 % dan 35.7 %. Namun demikian, salah satu kelemahan utama dari metode konduksi 180° adalah tegangan keluaran mengandung harmonisa rendah yang cukup besar terutama non-triplen harmonisa yakni dari harmonisa ke 5, ke 7, ke 11 dan seterusnya..

Kata kunci : Inverter, Metode konduksi 180°, Sinusoidal PWM, Space Vector VPWM, Total Harmonics Distortion (THD)

ABSTRACT

Output voltage quality of inverters is depended on the applied modulation techniques. The 2-level 3-phase inverter uses 6 electronics switches. Modulation techniques relates with the methods that used to control the switches. This research compares the performance of the 2-level 3-phase using 180° conduction method, Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM), and Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM). The modulations methods are verified using Matlab/Simulink and experiment. Simulation and experiment result shows that the 180° conduction method produces highest output voltage compared with the SPWM and SVPWM methods. By using 12 Volt of DC-link voltage, the 180° conduction method produces 5,23 Volt (rms) at frequency of 50 Hz, while the SPWM and SVPWM produce 3,28 Volt (rms) and 4,12 Volt (rms). Furthermore, the 180° conduction method also generates output voltages with the lowest Total harmonics Distortion (THD) compared with SPWM and SVPWM. THD of the output voltage using 180° conduction method is 29% on 50 Hz fundamental frequency while for SPWM and SVPWM are 49,6% and 35,7% respectively. However, one of the crucial disadvantage of the 180 conduction method is the output voltages contain high value of non-triplen low order harmonics, particularly the harmonics of the 5th, 7th, 11th and so on.

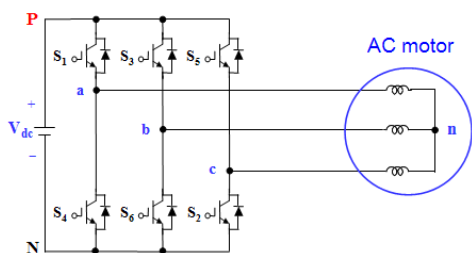
Keywords: Inverter, 180° conduction method, Sinusoidal PWM, Space Vector PWM, Total Harmonics Distortion (THD)

PENDAHULUAN

Penggunaan Inverter saat ini sangat banyak terutama di industri, kantor, maupun di rumah tangga. Bahkan dengan munculnya energi alternatif seperti solar sel, turbin angin, fuel cell, tidak lepas dari penggunaan inverter. Walaupun inverter kini banyak dipasaran namun keluaran yang dihasilkan masih banyak kelemahan, diantaranya bentuk gelombang yang tidak ideal dan adanya kandungan harmonisa yang justru akan merusak peralatan yang disuplainya.

Paper ini membahas pengaruh teknik modulasi terhadap kualitas tegangan keluar inverter 3-fasa 2-tingkat. Teknik modulasi berkaitan dengan metoda yang digunakan untuk mengatur sudut penyalaan saklar-saklar inverter. Teknik modulasi yang diselidiki meliputi metode konduksi 180°, Metoda *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) dan metoda *Space Vector Pulse Width Modulation* (SVPWM).

Gambar 1 merupakan struktur rangkaian inverter 3-fasa 2-tingkat dimana pada rangkaian ini terdiri atas 6 buah MOSFET yang berfungsi sebagai *switching* inverter. Pada rangkaian ini terdiri atas dua bagian MOSFET dan 3 buah fasa saluran yaitu MOSFET bagian atas yang masing-masing terdiri atas S₁, S₃ dan S₅ dan bagian bawah yang terdiri atas S₂, S₄ dan S₆. Sedangkan fasa 1 yaitu fasa a mewakili *switching* S₁ dan S₄, fasa 2 yaitu b mewakili *switching* S₃ dan S₆ dan yang terakhir fasa 3 yaitu fasa c mewakili *switching* S₅ dan S₂. Dimana masing-masing fasa terhubung langsung ke beban.

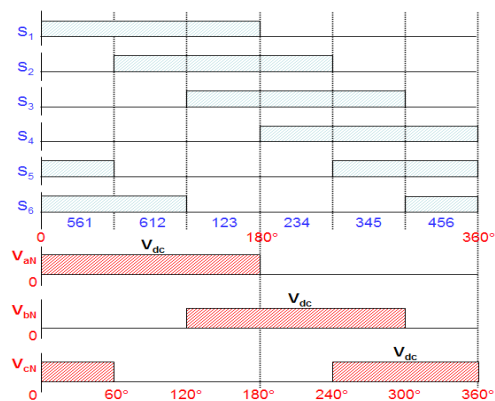


Gambar 1 Rangkaian inverter tiga fasa (Cahya, 2010)

METODOLOGI

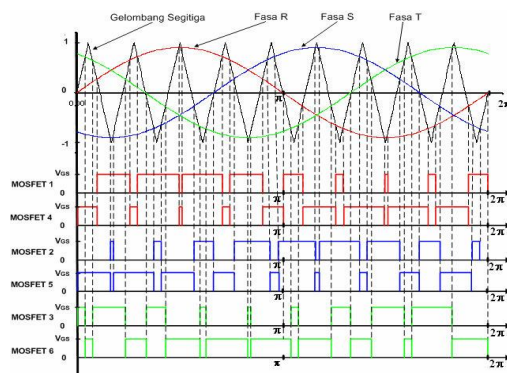
Teknik modulasi yang dapat diterapkan pada inverter 3-phase antara lain metode konduksi 180°, metoda SPWM dan metoda SVPWM. Metode Konduksi 180° atau sering

juga di sebut metode *Six Step mode* inverter merupakan metode yang umum dan masih sering digunakan sampai sekarang sebagai metode penyakelaran atau teknik *switching* pada beberapa beban inverter seperti beban lampu rumah tangga dan beban motor induksi. Dikatakan metode *six-step* karena adanya enam *step* pada bentuk gelombang tegangan *line to netral* atau pada tiap-tiap fasanya. Pada Gambar 2 menunjukkan bentuk sinyal gate atau sinyal *control*, urutan *switching* dan tegangan *line ke negative* dengan metode konduksi 180°.



Gambar 2. Bentuk sinyal *gate* MOSFET, urutan *switching* dan tegangan *line ke netral* (Junaidi, 2010)

Metode berikutnya adalah *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM). Metoda SPWM adalah suatu metode yang digunakan untuk menentukan sudut pemucian dengan cara membandingkan gelombang segitiga dengan 3 gelombang sinus (fasa R, fasa S, dan fasa T) yang masing-masing berbeda fasa 120°, seperti ditunjukkan pada Gambar 3. yang merupakan gambar pemucian gelombang SPWM.

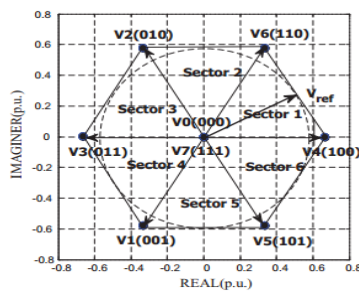


Gambar 3 Pemucian gelombang SPWM (Islam, 2010)

Untuk mendapatkan pemicuan SPWM ada beberapa hal yang diperhatikan dalam perancangan pemicuan SPWM pada inverter tiga fasa adalah :

1. Perbandingan frekuensi gelombang segitiga dan gelombang sinus harus kelipatan 3 dan ganjil. Supaya masing-masing fasa mendapatkan pemicuan yang sama dan memperoleh bentuk tegangan yang simetris serta untuk menghilangkan harmonisa genap.
2. Perbandingan antara amplitudo gelombang sinus dan gelombang segitiga (ma) harus ≤ 1 untuk menjaga agar tidak terjadi *overmodulation*. *Overmodulation* adalah kondisi dimana amplitudo gelombang kontrol melebihi amplitudo gelombang segitiga.

Selanjutnya Metode SVPWM dijelaskan sebagai berikut. Inverter 3-phase memiliki 8 kondisi *switching* yang dipetakan pada 7 posisi vector. Hubungan kondisi *switching* dengan tegangan *space vector* (selanjutnya disebut tegangan vector) diatur pada Persamaan (1). Pemetaan tegangan vector pada bidang dua dimensi terlihat pada Gambar 4. Pada Gambar 4, terlihat 6 vector terpetakan di posisi mengelilingi titik pusat membentuk sebuah bangun hexagonal sedangkan dua vector terpetakan pada titik pusat (origin).



Gambar 4. Tegangan *space vector* inverter 2-level 3 fasa (Satiawan, 2015)

$$\underline{V}_{\alpha\beta} = V_{\alpha} + jV_{\beta} = \frac{2}{3}(V_a + \underline{\alpha}V_b + \underline{\alpha}^2V_c) \dots\dots\dots(1)$$

Dimana $V_x(x = a, b, c)$ adalah tegangan fasa dan $\underline{\alpha}$ adalah operator kompleks, $\underline{\alpha} = \exp(j2\pi/3)$
 $\underline{\alpha}^2 = \exp(j4\pi/3)$. Hubungan tegangan fasa

dengan kondisi *switching* diperlihatkan pada persamaan (2).

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_v \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2)$$

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:

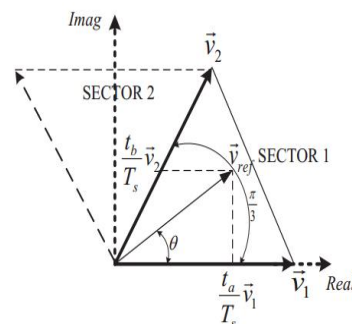
1. Transformasi tegangan referensi tiga-fase menjadi dua phase dengan menggunakan *transformasi Clarke*.
2. Menentukan sector berdasarkan sudut dari tegangan referensi yang sudah ditransformasi ke bidang dua-fase.
3. Menghitung waktu aplikasi dari tegangan vector yang digunakan.

Waktu aplikasi tagangan vector dihitung dengan cara memproyeksikan tegangan referensi pada dua sumbu tegangan vector seperti diilustrasikan pada Gambar 2.8. Waktu aplikasi untuk setiap sector dihitung menggunakan persamaan (3 sampai 5) .

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

$$t_b = \frac{\sqrt{3}T_s |V_{ref}|}{V_{dc}} \sin\left(\theta - \frac{k-1}{3}\pi\right) \dots\dots\dots(4)$$

$$T_0 = T_s - t_a - t_b \dots\dots\dots(5)$$



Gambar 5 perhitungan waktu aplikasi vector yang digunakan (Satiawan, 2015)

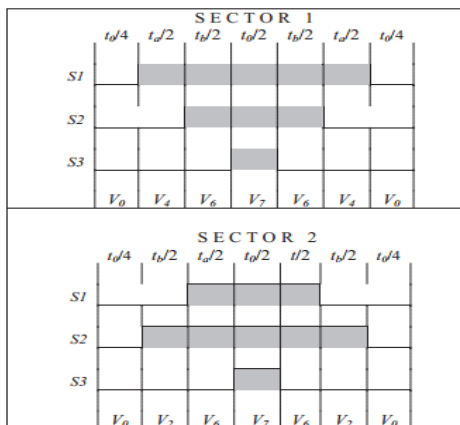
Dimana t_a dan t_b adalah waktu aplikasi untuk vector V_a , dan vector V_b , k adalah nomor sector ($k = 1-6$), θ adalah sudut tegangan referensi terhadap sumbu real, T_s adalah periode *switching* dan, $|V_{ref}|$ adalah magnitude tegangan referensi

4. Menentukan urutan *switching* untuk masing-masing sector.

Gambar 6 memperlihatkan urutan *switching* saklar bagian atas (S_1, S_2, S_3) untuk sector 1 dan sector 2. Sector 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 $t_{o/4}$, $t_a/2$, $t_b/2$, $t_o/2$, $t_b/2$, $t_a/2$, $t_o/4$. Sedangkan sector 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 $t_{o/4}$, $t_b/2$, $t_a/2$, $t_o/2$, $t_a/2$, $t_b/2$, $t_o/4$. Selanjutnya untuk sector ganjil penempatan waktu operasi *switching*serupa dengan sector 1 dan sector genap serupa dengan sector 2. Urutan *switching* untuk seluruh sector 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.

Tabel 1 urutan *switching* untuk sektor 1 sampai 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	$V_0 - V_4 - V_5 - V_7 - V_5 - V_4 - V_0$

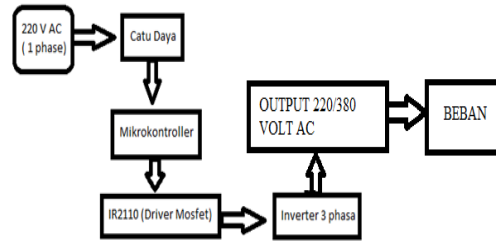


Gambar 6 urutan *switching* untuk sector 1 dan sector 2 (Satiawan, 2015)

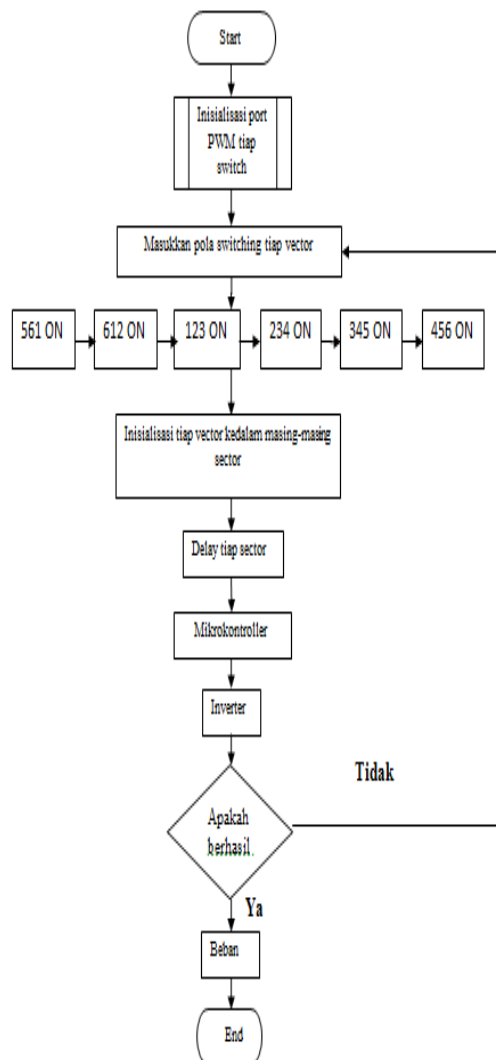
HASIL DAN PEMBAHASAN

Seperti yang telah diuraikan pada sub-bab terdahulu tugas akhir ini menekankan pada realisasi pengaturan sudut penyalan

inverter tiga fasa dua level menggunakan metode Konduksi 180°, SPWM (*Sinusoidal Pulse Width Modulation*), SVPWM (*Space Vector Pulse Width Modulation*) untuk mencatu beban resistif (lampu pijar).



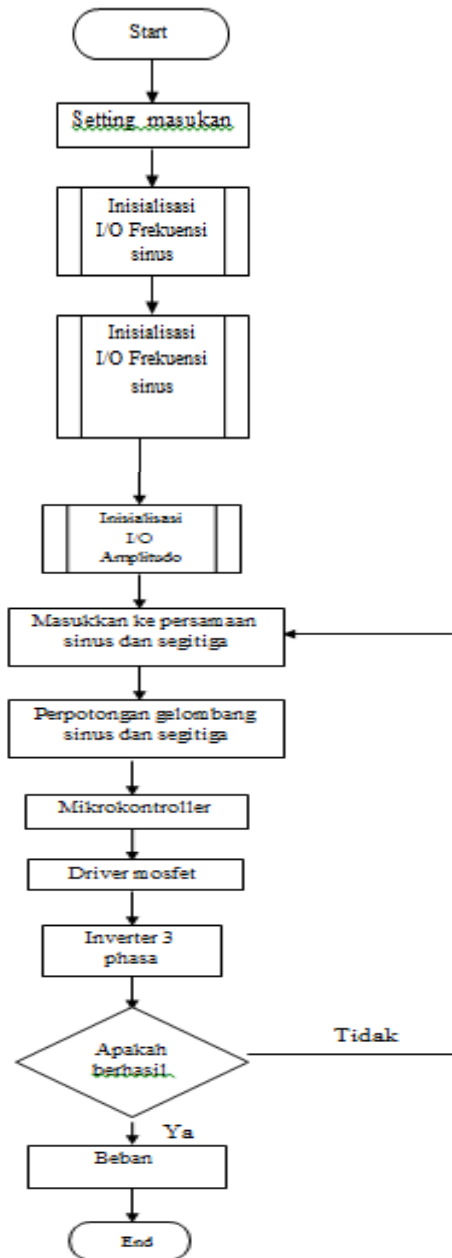
Gambar 7 Block diagram keseluruhan system



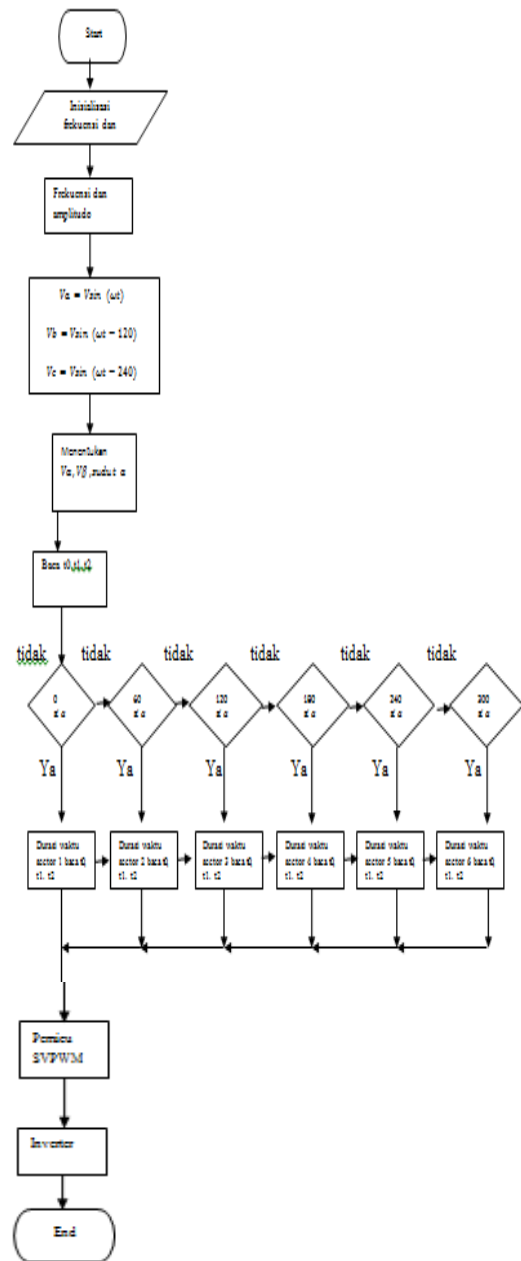
Gambar 8. Diagram alir metode konduksi 180°

Gambar 8 menunjukkan diagram alir metode konduksi 180° dimana untuk mendapatkan tegangan keluaran yang

diinginkan dapat dilakukan dengan mengatur sudut penyalan sakelar S1, dimana S1 konduksi (ON) pada setengah siklus positif. Sementara itu diagram alir untuk membuat program SPWM dan SVPWM diperlihatkan pada Gambar 9 dan Gambar 10.



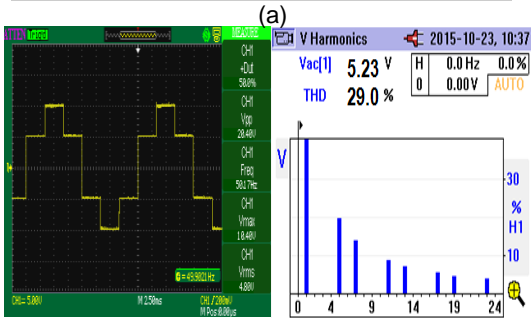
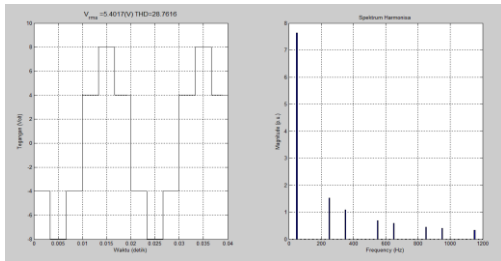
Gambar 9 Diagram alir metode Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)



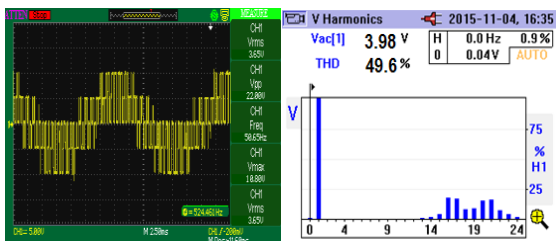
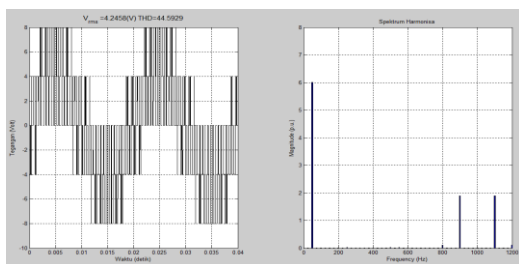
Gambar 10. Diagram Alir metode SVPWM

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tegangan keluaran yang dihasilkan oleh inverter untuk berbagai teknik modulasi baik dengan simulasi maupun eksperimen diperlihatkan pada Gambar 11, Gambar 12 dan Gambar 13 masing-masing untuk metode konduksi, metoda SPWM dan metoda SVPWM.

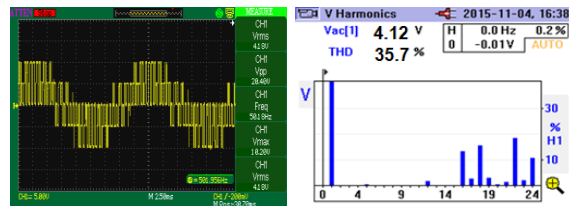
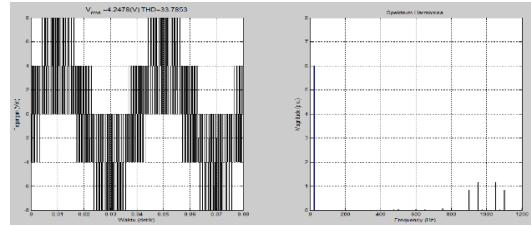


Gambar 11. Tegangan phase ke netral (V_{an}) dengan metoda konduksi 180° pada frekwensi 50 Hz (a) Simulasi, (b) Ekperimen



Gambar 12. Tegangan phase ke netral (V_{an}) dengan metoda SPWM pada frekwensi 50 Hz (a) Simulasi, (b) Ekperimen

Seperti terlihat pada Gambar 11, tegangan keluaran inverter menggunakan method konduksi 180° memiliki magnitudo yang relative lebih tinggi dan THD yang relative lebih rendah dibandingkan dengan tegangan keluaran dikontrol dengan metode SPWM dan SVPWM seperti terlihat pada Gambar 12 dan Gambar 13. Namun demikian spectrum tegangan keluaran inverter dengan metode konduksi 180° mengandung harmonisa rendah yang cukup

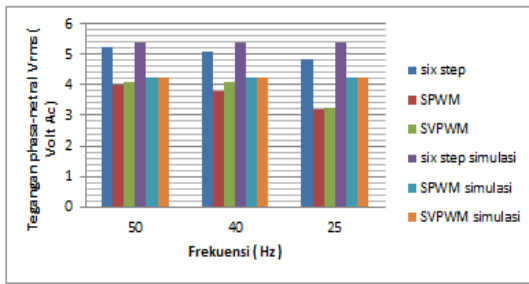


Gambar 13. Tegangan phase ke netral (V_{an}) dengan metoda SVPWM pada frekwensi 50 Hz (a) Simulasi, (b) Ekperimen

tinggi. Terlihat pada Gambar 12 (b) disamping komponen fundamental, semua harmonisa rendah kecuali harmonisa kelipatan 3 (harmonisa ke 5, ke 7 ke 11 dan seterusnya), muncul dengan magnitudo yang cukup signifikan. Sedangkan spectrum tegangan keluaran inverter dengan menggunakan metoda SPWM dan SVPWM (Gambar 13 (b) dan Gambar 14 (b)) memperlihatkan tegangan yang bebas dari harmonisa rendah. Harmonisa rendah digeser ke sekitar frekwensi switching dan kelipatannya. Hasil yang didapat dengan menggunakan experimen sangat mendekati dengan hasil yang diperoleh dengan menggunakan simulasi. Hal ini menandakan keakuratan hasil yang telah dicapai. Nilai-nilai tegangan dan THD untuk ketiga metoda tersebut pada berbagai frekwensi fundamental dirangkum pada Tabel 2 dan Tabel 3. Perbandingan kualitas tegangan untuk ketiga metoda yang digunakan juga dibandingkan seperti terlihat pada Gambar 14 dan Gambar 15.

Tabel 2. Perbandingan tegangan phase netral (V_{an})

F (Hz)	Tegangan Phase ke Netral (V_{an})					
	Ekperimen (V)			Simulasi (V)		
	Kond. 180	SPW M	SVPW M	Kond. 180	SPWM	SVPW M
50	5,23	3,98	4,12	5,402	4,246	4,248
40	5,1	3,81	5,1	5,402	4,241	4,24
30	4,78	3,22	3,25	5,4	4,244	4,23



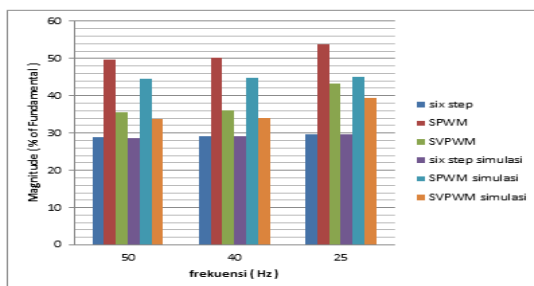
Gambar 14. Perbandingan tegangan fase ke netral untuk ketiga methoda pada berbagai frekwensi

Pada Tabel 2 dan Gambar 14 didapatkan bahwa tegangan fase ke netral untuk metode konduksi 180° mempunyai nilai yang paling tinggi dibandingkan metode SPWM dan SVPWM pada frekuensi 50 Hz, 40 Hz dan 25 Hz dengan tegangan masukan yang sama yaitu 12 Volt Dc begitu juga dengan nilai tegangan fase ke netral dengan ketiga metode pada simulasi.

Tabel 3. Perbandingan THD fase ke netral (V_{an})

F (Hz)	THD Tegangan Phase ke Netral (V_{an})					
	Ekperimen (%)			Simulasi (%)		
	Kond. 180	SPW M	SVPW M	Kond. 180	SPWM	SVPW M
50	29	49,6	35,7	28,76	44,59	33,78
40	29,1	50,2	36	29,04	44,94	34,02
30	29,7	53,9	43,2	29,67	45,04	39,30

Pada Tabel 3 dapat dilihat bahwa tegangan fase ke netral untuk metode konduksi 180° mempunyai nilai THD yang paling rendah dibandingkan metode SPWM dan SVPWM semua frekuensi yang di selidiki (50 Hz, 40 Hz dan 25 Hz) sedangkan metode SPWM mempunyai nilai THD yang paling besar diantara metoda yang lain pada setiap frekwensi yang diselidiki. Hasil yang didapat sangat mendekati dengan yang diperoleh dengan menggunakan simulasi.



Gambar 15. Perbandingan THD tegangan fase ke netral pada berbagai frekwensi fundamental

KESIMPULAN

- Berbagai teknik modulasi pada inverter tiga fase 2-tingkat yakni metode Konduksi 180°, *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM), dan *Space Vektor Pulse Width Modulation* (SVPWM) berhasil direalisasikan baik melalui simulasi dan eksperimen.
- Metode konduksi 180° menghasilkan tegangan fundamental yang paling tinggi dibandingkan metode SPWM dan SVPWM yaitu sebesar 5.23 Volt pada frekuensi 50 Hz sedangkan untuk metode SPWM dan SVPWM masing-masing menghasilkan tegangan dengan magnitude sebesar 3.98 Volt dan 4.12 Volt Ac.
- Spektrum tegangan yang dihasilkan menggunakan metode konduksi 180° mengandung THD yang paling rendah dibandingkan metode SPWM dan SVPWM yaitu sebesar 29 % pada frekuensi 50 Hz dibanding 49.6 % dan 35.7 % masing-masing dengan metode SPWM dan SVPWM.
- Tegangan keluaran yang dihasilkan dengan menggunakan metode SPWM dan SVPWM tidak mengandung harmonisa rendah (lebih mendekati bentuk sinusoidal) sedangkan spektrum tegangan dengan metode konduksi 180° masih mengandung harmonisa rendah diluar harmonisa kelipatan 3 (yakni harmonisa ke 5, ke 7, ke 11 dan seterusnya) yang cukup dominan. Harmonisa pada tegangan keluaran inverter yang kendalikan dengan menggunakan metoda SPWM dan SVPWM digeser ke sekitar frekwensi switching dan kelipatannya.

DAFTAR PUSTAKA

- Cahya, A., 2011, *Rancang Bangun Inverter tiga fase Untuk Pengaturan Kecepatan Motor Induksi, Proyek Akhir PENS*, Surabaya : Institut Teknologi Surabaya.
- Usman, H., 2006, *Aplikasi Mikrokontroler ATmega8535 Sebagai Pembangkit PWM Sinusoidal 1 Phase Untuk Mengendalikan Putaran Motor Sinkron*, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

- Nugroho, A. Emmanuel., 2012, *Kajian Sistem Kendali Space Vektor Pulse Width Modulation Sebagai Pengendali Motor Induksi 3 Fasa*, Universitas Diponegoro Semarang.
- Panda, S., 2009, *Control of Voltage Source Inverters using PWM/SVPWM for Adjustable Speed Drive Applications*, Department of Electrical Engineering National Institute Of Technology Rourkela, Rourkela.
- Dr.Zainal, S., 2002, *Power Electronics and Drives (version 2)*, Jakarta : PTGramedia Pustaka Utama.
- Hart, D .W., 1997, *Introduction To Power Electronics*, Prentice Hall.
- Rashid, H. M., 2004, *Power Electronics, Circuit Devices, and Applications*, Prentice Hall .
- Satiawan, I.N.W, Citarsa, I.B.F, Supriono, 2015, *Perbandingan kinerja teknik modulasi inverter 2-level untuk pengaturan kecepatan motor induksi tiga phase*, *Jurnal Arus Elektro Indonesia (eJAEI) vol.1 no.1*, pp. 35-41.
- Wijayacitra, P., 1996 , *Buku Data IC Catu Daya*, Elex Media Komputindo : Jakarta
- Zuhal., 1995, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*, PT.Gramedia Pustaka Utama : Jakarta.