

DESAIN DAN SIMULASI SPWM MULTILEVEL INVERTER TIGA FASA LIMA BELAS LEVEL DENGAN SUMBER INPUT SIMETRIS TERPISAH

Effendi¹, Zakwansyah²

^{1,2}Program Studi Teknologi Elektronika Politeknik Aceh

Jl. Politeknik Aceh, Pango Raya, Banda Aceh 23119

Email: effendi@politeknikaceh.ac.id, zakwansyah@politeknikaceh.ac.id

ABSTRACT

Design and simulation Multilevel inverter three-phase fifteen-level in this research using modulation technics of sinusoidal pulse width modulation (SPWM) in which input voltage sources that used was arranged as symmetrical and separate for each phase by using free DC source in form of battery 12 Volt, 24 Volt, and 48 Volt as well as uses seven MOSFETs for switching in each phase. To produce fifteen levels, it can be done by using a combination method of battery arrangement by activating the MOSFET switching circuit according to the results of the comparison between the reference wave in the form of a three-phase sinusoidal wave and the carrier wave in the form of a free DC source by using SPWM modulation circuits. SPWM modulation circuits 15 level in this research was constructed by using an Op-Amp as a comparator, AND, NOT and OR gates as well as several other electronic components. The H-Bridge circuits is used to reverse the direction of the electric current so that it can to produce alternating current on the load side which is resistive and arranged in a star connection (Y), by using the PSIM simulation program, the THD value that produced for each phase was relatively the same at 5.6%.

Keywords: Multilevel Inverter, SPWM, Voltage carrier, PSIM and THD

ABSTRAK

Desain dan simulasi Multilevel inverter tiga fasa lima belas level pada penelitian ini menggunakan teknik modulasi *sinusoidal pulse width modulation* (SPWM) dimana sumber tegangan input yang digunakan disusun secara simetris dan terpisah untuk setiap fasanya dengan menggunakan sumber DC bebas berupa baterai 12 Volt, 24 Volt dan 48 Volt serta menggunakan tujuh buah MOSFET untuk pensaklaran disetiap fasanya. Untuk menghasilkan lima belas level dapat dilakukan dengan metode kombinasi susunan baterai dengan cara mengaktifkan rangkaian pensaklaran MOSFET sesuai dengan hasil komparasi antara gelombang referensi berupa gelombang sinusoidal tiga fasa dan gelombang *carrier* berupa sumber DC bebas dengan menggunakan rangkaian modulasi SPWM. Rangkaian modulasi SPWM 15 level pada penelitian ini disusun dengan menggunakan Op-Amp sebagai komparator, gerbang AND, NOT dan OR serta beberapa komponen elektronik lainnya. Rangkaian *H-Bridge* difungsikan untuk membalikan arah arus listrik sehingga menghasilkan arus bolak-balik pada sisi beban yang bersifat resistif dan disusun secara hubungan bintang (Y), dengan menggunakan program simulasi PSIM nilai THD yang dihasilkan untuk masing-masing fasa relatif sama sebesar 5,6 %.

Kata kunci : Multilevel Inverter, SPWM, Tegangan carrier, PSIM dan THD.

1. PENDAHULUAN

Teknologi konversi daya bertingkat adalah inovasi yang dikembangkan dari rekayasa elektronika daya dan sistem tenaga, dimana perbaikan dan pengembangan teknologi sangat dibutuhkan saat ini [1]. Perangkat elektronika yang dapat mengubah tegangan arus searah atau DC (*Direct Current*) menjadi tegangan arus bolak-balik atau AC (*Alternating Current*) dikenal dengan istilah Inverter [2][3]. Perangkat inverter dengan luaran *square wave* (gelombang kotak) masih memungkinkan untuk digunakan pada aplikasi daya rendah dan menengah sementara untuk aplikasi daya yang tinggi dibutuhkan

gelombang luaran yang mendekati bentuk gelombang sinusoidal dengan *Total Harmonic Distortion* (THD) yang lebih baik [3].

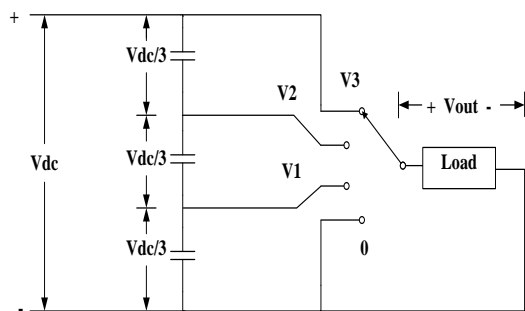
MLI merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menghasilkan gelombang luaran *inverter* mendekati bentuk gelombang sinusoidal, di mana semakin banyak jumlah level yang didisain maka luaran MLI tersebut semakin mendekati gelombang sinusoidal dengan demikian persentase THD yang dihasilkan semakin kecil [2] [4].

Multilevel inverter berlandaskan pada kenyataan bahwa gelombang sinusoidal dapat dinyatakan dengan pendekatan gelombang bertingkat dengan jumlah tingkatan yang sangat banyak, dimana tingkatan tersebut dihasilkan dari sumber Tegangan DC yang

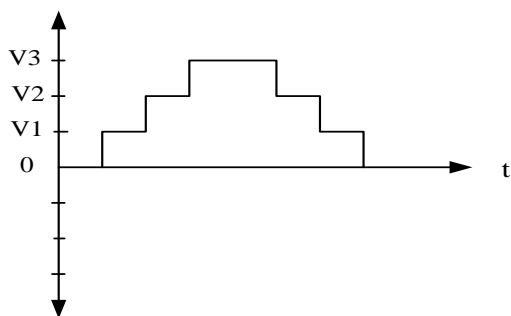
memilik level tegangan yang berbeda[5]. Dalam beberapa tahun terakhir multilevel inverter telah digunakan pada aplikasi daya dan tegangan tinggi [6].

2. METODE PENELITIAN

MLI secara umum disusun untuk menghasilkan gelombang luaran yang mendekati gelombang sinusoidal dengan memanfaatkan tegangan DC dari beberapa level [2][7], di mana gelombang luaran berbentuk seperti gelombang tangga. Konsep dasar MLI dapat dilihat pada Gambar 1 di mana saklar yang digunakan berfungsi untuk memilih *level* tegangan yang akan dihubungkan dengan beban [7] Tegangan luaran dapat didefinisikan sebagai tegangan yang melintasi terminal luaran dari inverter terhadap titik *ground* [2] seperti ditunjukkan pada Gambar 2 di mana bentuk gelombang luarannya berbentuk tangga yang memiliki amplitudo maksimum sebesar V_3 atau sebesar tegangan sumber yang digunakan (V_{dc}).



Gambar 1. Konsep dasar MLI dengan saklar satu *pole*. [2]



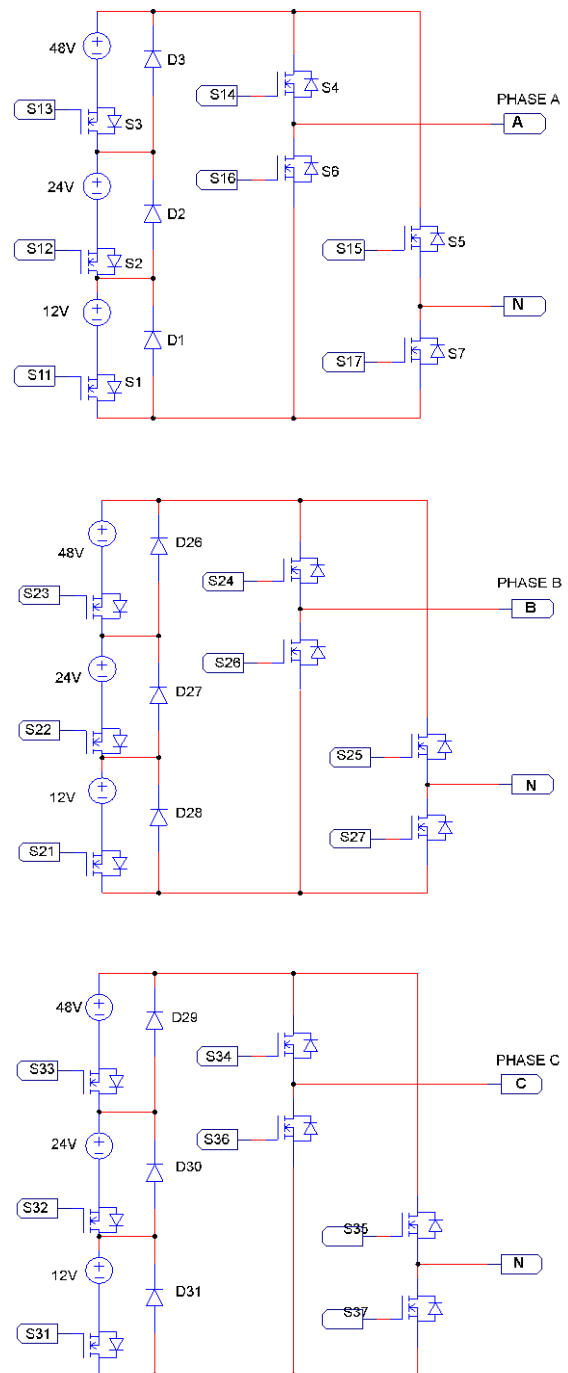
Gambar 2. Gelombang *output* MLI dengan saklar satu *pole* [2].

a) Rangkaian Daya MLI 3 Fasa

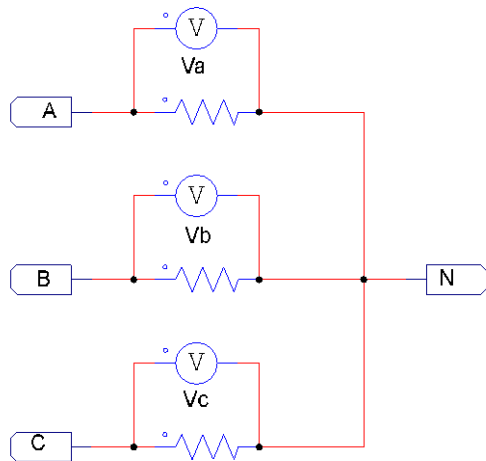
Rangkaian daya MLI 3 fasa yang digunakan seperti ditunjukkan pada Gambar 3, masing-masing fasa terdiri dari satu buah rangkaian *H-Bridge*, tiga buah sumber DC bebas yang disusun secara seri di mana masing-masing sumber DC bebas dipisahkan oleh satu buah saklar serta menggunakan tiga buah dioda, adapun jumlah saklar yang digunakan sebanyak 7 buah saklar [8], dengan menggunakan tegangan sumber V_1 , V_2 , dan V_3 sebesar 12, 24, dan 48 Volt.

Urutan pensaklaran MOSFET dari masing-masing fasa mengikuti aturan pada Tabel1, dimana x menyatakan fasa yang akan digunakan. Pada penelitian ini beban yang digunakan bersifat resistif dan terhubung secara bintang (Y) seperti pada Gambar

4, adapun pengukuran output dilakukan pada fasa terhadap netral, V_a menyatakan tegangan yang diukur dari fasa A ke netral, V_b menyatakan tegangan yang diukur dari fasa B ke netral, sementara V_c menyatakan tegangan yang diukur dari fasa C ke titik netral sistem (N).



Gambar 3 Rangkaian daya MLI 3 Fasa



Gambar4 Rangkaian Beban

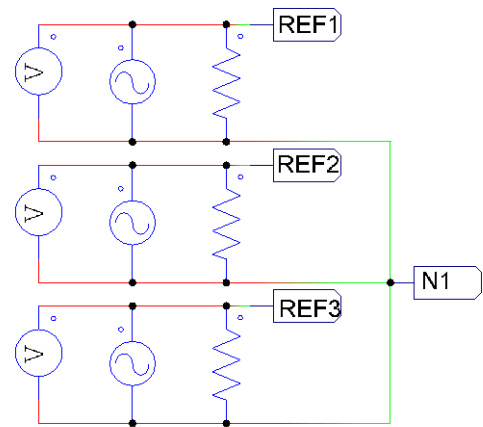
Tabel 1. Urutan pensaklaran MLI

Voltage Level	SWITCHS						
	Sx1	Sx2	Sx3	Sx4	Sx5	Sx6	Sx7
0	0	0	0	1	0	0	1
12	1	0	0	1	0	0	1
24	0	1	0	1	0	0	1
36	1	1	0	1	0	0	1
48	0	0	1	1	0	0	1
60	1	0	1	1	0	0	1
72	0	1	1	1	0	0	1
84	1	1	1	1	0	0	1
-12	1	0	0	0	1	1	0
-24	0	1	0	0	1	1	0
-36	1	1	0	0	1	1	0
-48	0	0	1	0	1	1	0
-60	1	0	1	0	1	1	0
-72	0	1	1	0	1	1	0
-84	1	1	1	0	1	1	0

b). Topologi Strategi Modulasi SPWM untuk MLI 3 Fasa

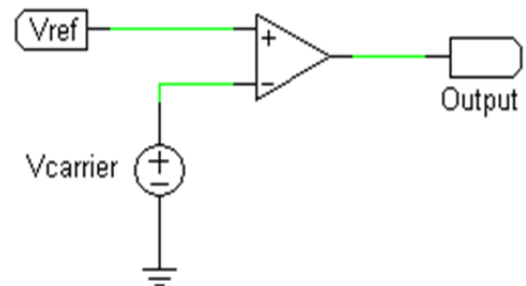
Modulasi SPWM merupakan suatu sistem yang digunakan untuk menghasilkan gelombang pulsa dengan lebar modulasinya dapat diatur sesuai dengan perubahan gelombang referensi yang digunakan. Pada metode SPWM bentuk gelombang sinyal referensi pada umumnya adalah gelombang dalam bentuk sinusoidal murni [9]. Gelombang referensi yang digunakan pada penelitian ini bersumber dari gelombang arus sinusoidal tiga fasa, sementara sumber tegangan $V_{carrier}$ berupa sumber DC bebas.

Gelombang tegangan pada fasa 1 digunakan sebagai referensi 1 (Ref1), begitu juga dengan gelombang tegangan pada fasa 2 dan 3 digunakan sebagai referensi 2 dan 3 (Ref 2 dan Ref 3) seperti di tunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Rangkaian Refrensi 3 Fasa.

Gelombang Ref1 selanjutnya dibandingkan dengan tegangan $V_{carrier}$ yang memiliki nilai bervariasi sesuai dengan level masing-masing seperti di tunjukkan pada Tabel 2, dengan menggunakan komponen op-amp seperti pada Gambar 6.

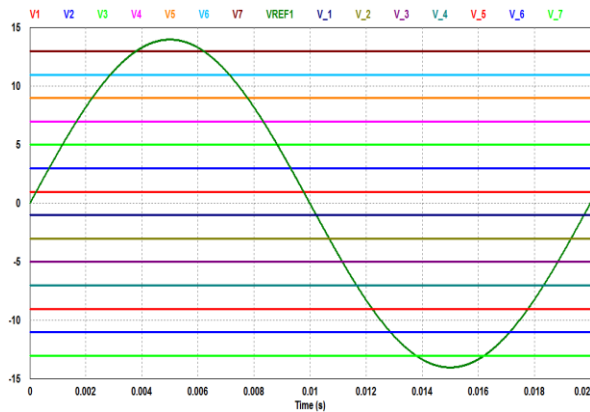


Gambar 6. Rangkaian komparator

Adapun jumlah op-amp yang digunakan sebanyak 7 buah untuk menggerakkan pensaklaran pada sisi level positif (L01, L11, L21, L31, L41, L51, L61, L71), sementara pada sisi level negatif op-amp yang digunakan sebanyak 6 buah (L_11, L_21, L_31, L_41, L_51, L_61), dengan demikian jumlah level secara keseluruhan sebanyak 15 level pada fasa A, dengan menggunakan metode yang sama akan didapatkan jumlah level sebanyak 15 pada fasa B dan juga sebanyak 15 level pada fasa C.

Tabel 2. Nilai $V_{carrier}$

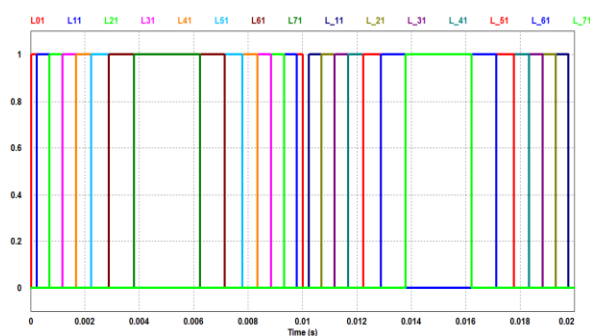
$V_{carrier}$	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
Volt	1	3	5	7	9	11	13
$V_{carrier}$	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7
Volt	-1	-3	-5	-7	-9	-11	-13



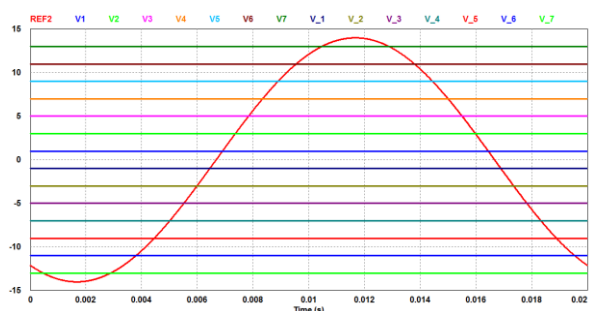
Gambar 7. Gelombang Vref1 & Vcarrier

Perbandingan antara Vref dan Vcarrier serta output dari masing-masing komparator dapat dilihat pada Gambar 7 sampai dengan Gambar 12, dimana setengah siklus positif pertama gelombang sinusoidal (Vref) maka Vcarrier yang digunakan V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 dimana nilai tegangan DC-nya berharga positif dan bervariasi sesuai dengan tabel 2, sementara untuk setengah siklus negatif berikutnya digunakan Vcarrier V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7, dan memiliki nilai tegangan DC berharga negatif.

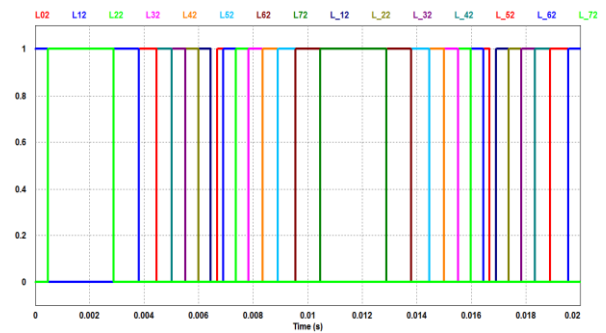
Output dari masing-masing Op-amp berbentuk pulsa dimana lebar pulsanya berbeda-beda untuk setiap level yang dihasilkan sesuai dengan perpotongan antara Vref dan Vcarrier, selanjutnya gelombang pulsa ini digunakan untuk menggerakkan/menrigger gate MOSFET pada rangkaian daya untuk masing-masing fasa baik untuk fasa A, fasa B, maupun fasa C.



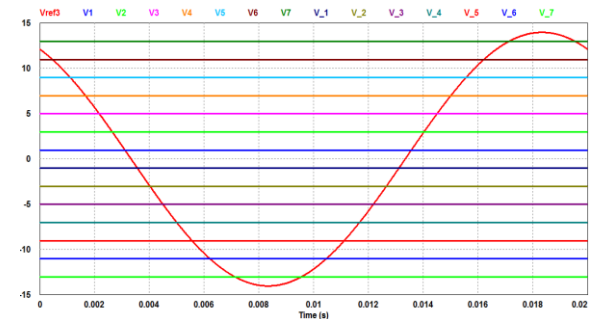
Gambar 8. Output komparator fasa A.



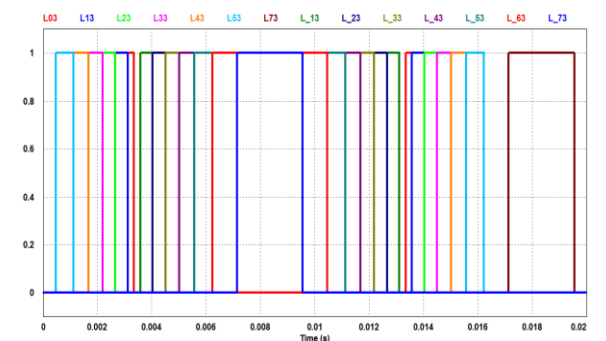
Gambar 9. Gelombang Vref2 & Vcarrier



Gambar 10. Output komparator fasa B.



Gambar 11. Gelombang Vref3 & Vcarrier



Gambar 12. Output komparator fasa C.

c. Total Harmonic Distortion (THD)

THD dapat didefinisikan sebagai hasil perbandingan total nilai tegangan root mean square (rms) dari keseluruhan komponen harmonik gelombang luaran terhadap nilai tegangan rms komponen dasarnya, secara matematika persamaan umumnya dapat dilihat pada persamaan (3) dan (4) [2][3][4].

$$THD = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_1^2(rms)}}{V_1^2(rms)} \quad (3)$$

$$V_{(rms)} = \sqrt{V_1^2(rms) + V_3^2(rms) + \dots + V_n^2(rms)} \quad (4)$$

di mana:

$V_1^2(rms)$ = nilai tegangan rms untuk harmonik ke 1

$V_n^2(rms)$ = nilai tegangan rms untuk harmonik ke n

Nilai tegangan rms pada harmonik ke n dapat dicari dengan menggunakan analisis deret Fourier seperti pada persamaan (5) hingga (8) [2][3][4].

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \quad (5)$$

di mana:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (6)$$

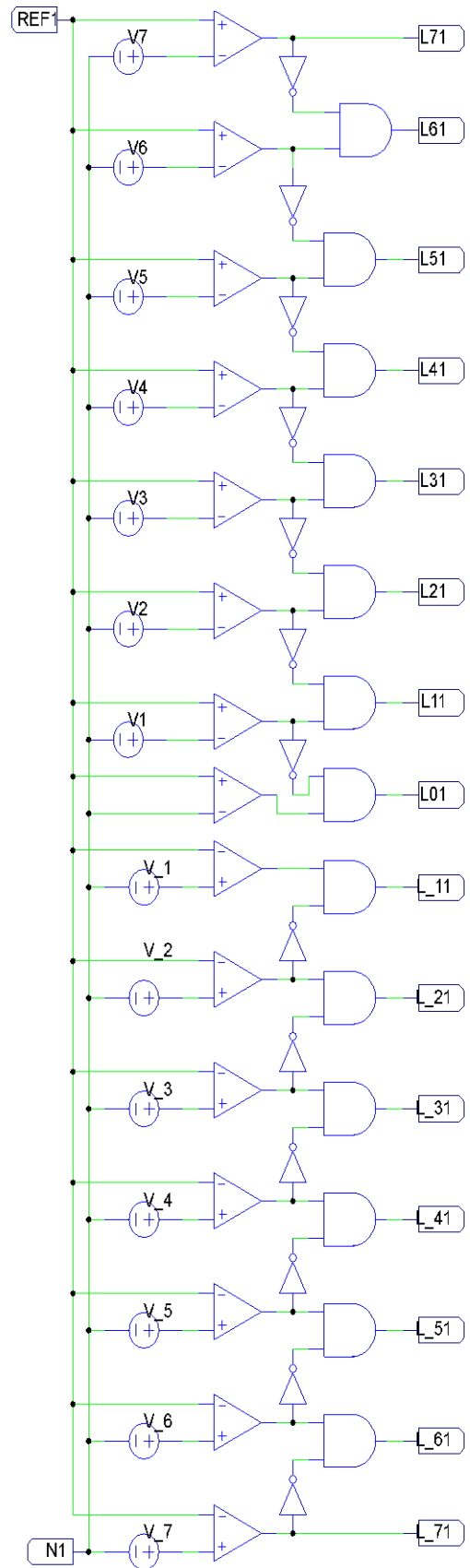
$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega_0 t dt \quad (7)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega_0 t dt \quad (8)$$

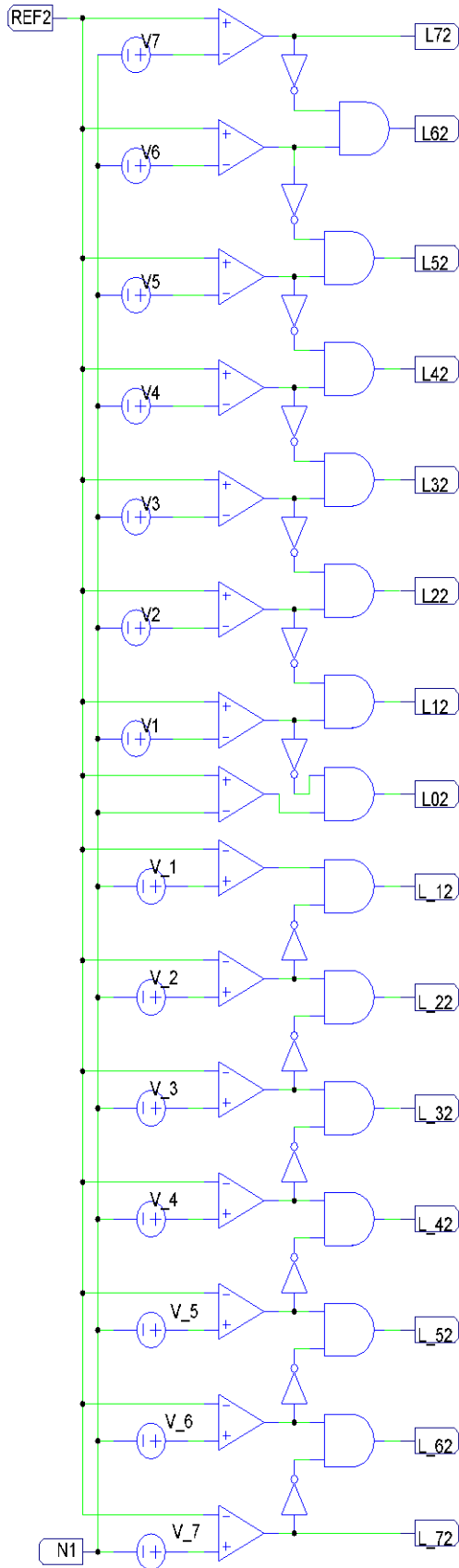
d. Rangkaian Modulasi SPWM MLI Tiga Fasa 15 Level

Rangkaian modulasi SPWM MLI tiga fasa 15 level dengan sumber input terpisah ini disusun dengan menggunakan komponen elektronika seperti op-amp yang berfungsi sebagai komparator antara tegangan Ref dan tegangan carrier, di mana jumlah yang digunakan sebanyak 15 gerbang sementara tegangan carrier yang digunakan sebanyak tujuh buah untuk setiap fasanya seperti di tunjukkan pada Gambar 13 sampai dengan Gambar 15.

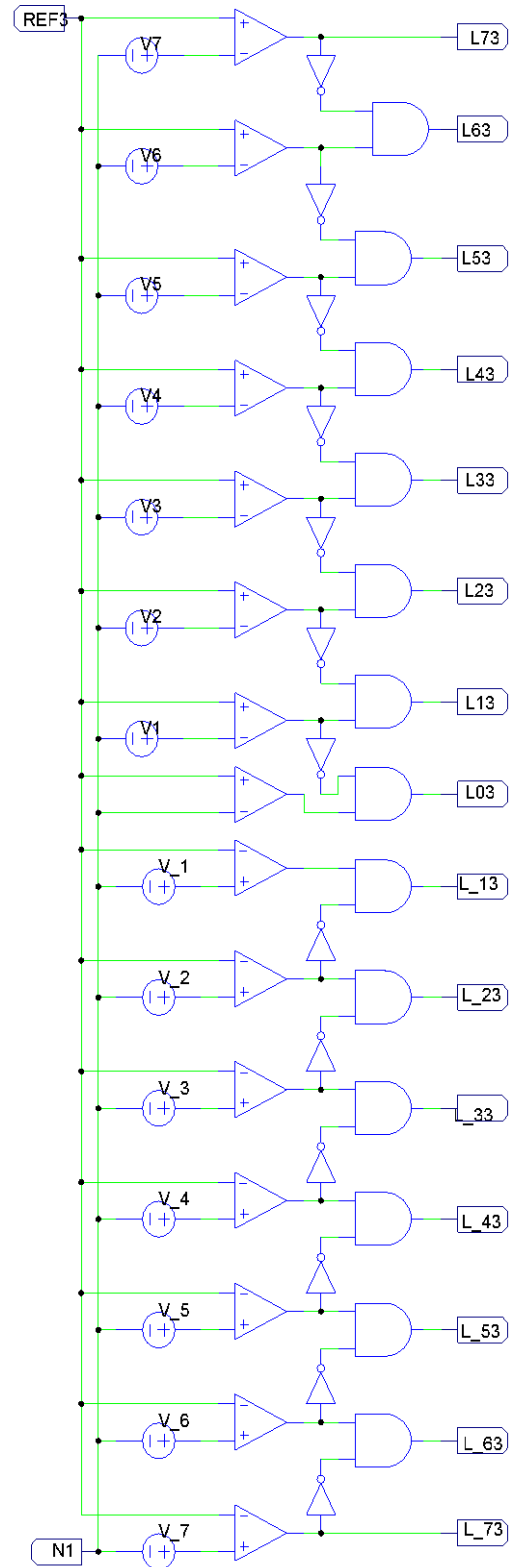
Gerbang logika NOT dan AND seperti pada Gambar tersebut diatas didisain untuk mengatur agar sistem bekerja secara berurutan dan hanya melakukan pensaklaran satu kali untuk setiap tahapan dan disesuaikan dengan perubahan amplitudo gelombang referensi dengan demikian gelombang output yang dihasilkan akan membentuk gelombang anak tangga. Output dari rangkaian modulasi SPWM ini selanjutnya dihubungkan dengan rangkaian pensaklaran MOSFET.



Gambar 13 Rangkaian modulasi SPWM 15 level Fasa A



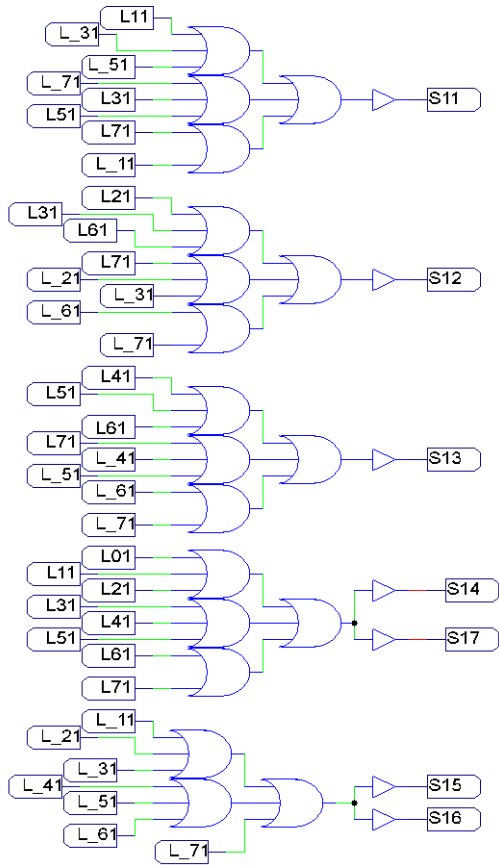
Gambar 14 Rangkaian modulasi SPWM 15 level Fasa B



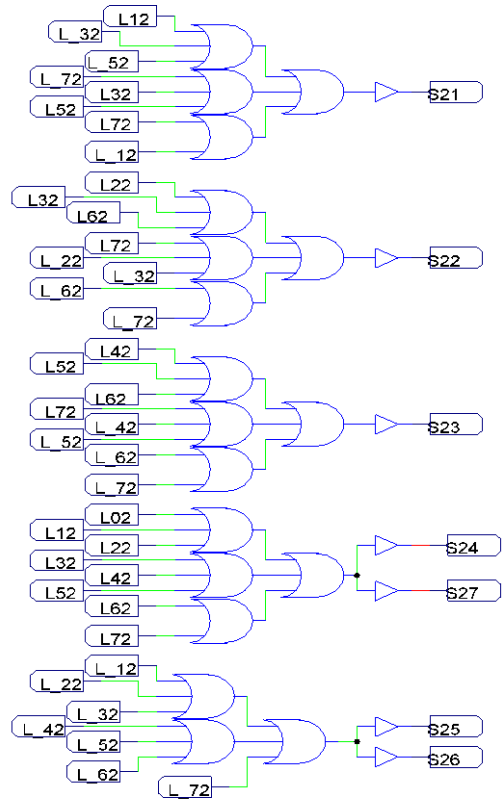
Gambar 15 Rangkaian modulasi SPWM 15 level Fasa C

Rangkaian pensaklaran MOSFET seperti ditunjukkan pada Gambar 16 sampai dengan Gambar 18, rangkaian ini disusun dari gerbang OR di mana S11 digunakan untuk mengaktifkan baterai 12 Volt,

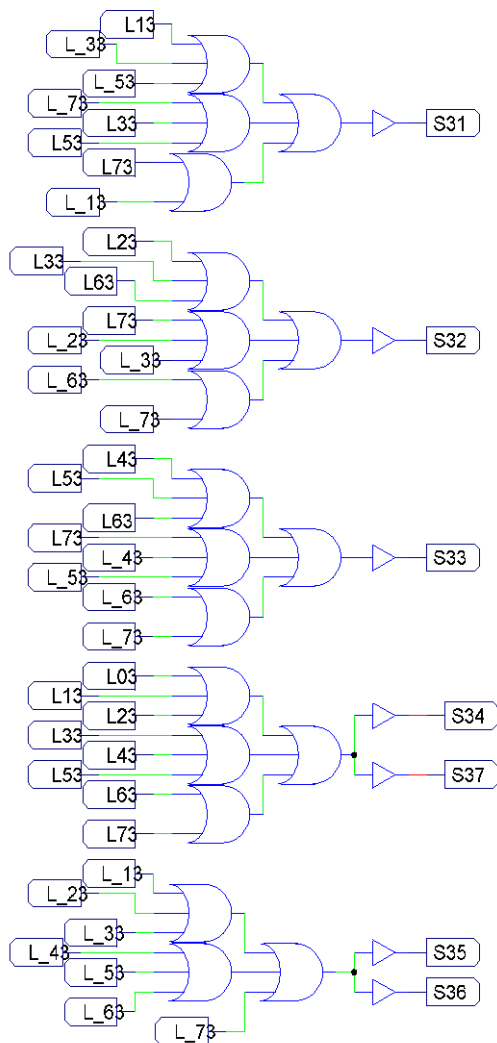
S2 untuk mengaktifkan baterai 24 Volt dan S13 untuk baterai 48 Volt.



Gambar 16 Rangkaian pensaklaran MOSFET Fasa A



Gambar 17 Rangkaian pensaklaran MOSFET Fasa B



Gambar 18. Rangkaian pensaklaran MOSFET Fasa C

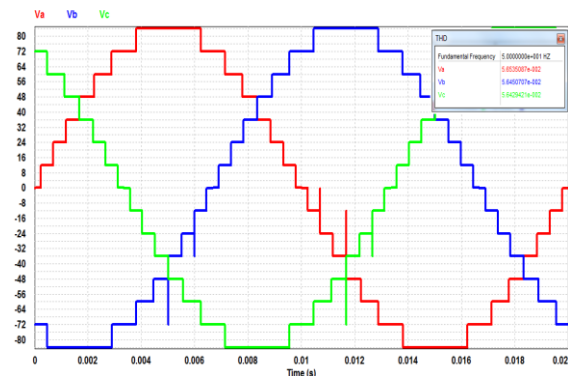
Selanjutnya S14 dan S17 difungsikan untuk mengaktifkan pada siklus positif antara sudut 0° hingga 180° , adapun rangkaian pensaklaran S15 dan S16 digunakan untuk membalikkan arah arus pada beban antara 180° hingga 360° sehingga menghasilkan bentuk gelombang output dalam bentuk arus bolak-balik pada fasa A, dengan metode yang sama proses ini juga akan berlaku untuk fasa B dan C.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

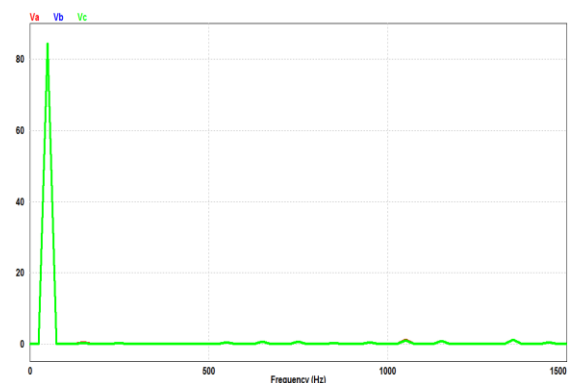
MLI tiga fasa dengan modulasi SPWM yang di disain ini mampu menghasilkan *level* tegangan sebanyak 15 tingkat di mana rangkaian daya yang digunakan sama dengan yang dilakukan oleh penelitian [8], metode ini dapat dilakukan dengan cara mengganti nilai masing-masing baterai menjadi 12V, 24 V, 48V serta melakukan kombinasi dari susunan baterai tersebut sesuai dengan perubahan gelombang referensi berupa gelombang arus sinusoidal dari sumber tiga fasa sehingga system mampu menghasilkan sumber tiga fasa. Bentuk gelombang output fasa terhadap netral dari system inverter tiga

fasa dengan metode SPWM ini berbentuk gelombang anak tangga seperti ditunjukkan pada Gambar 19, dimana pengukuran dilakukan pada beban yang tersusun secara bintang.

Total Harmonic Distortion yang dihasilkan pada penelitian MLI 15 level yang menggunakan metode modulasi SPWM dengan menggunakan simulasi PSIM didapat sebesar 5,6 % untuk setiap fasanya, dimana masing-masing fasa memiliki bentuk gelombang yang sama. V_a , V_b , V_c merupakan gelombang output dengan referensi terhadap netral. Adapun bentuk gelombang harmonisa MLI 3 fasa ini dapat dilihat pada Gambar 20 dengan frekuensi dasar yang digunakan sebesar 50 Hz.



Gambar 19. Gelombang output MLI Tiga Fasa 15 Level



Gambar 20. Grafik Harmonisa MLI 15 Level 3 Fasa

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Disain MLI tiga fasa dengan sumber input simetris terpisah pada penelitian ini mampu menghasilkan gelombang output tiga fasa, dengan mengganti nilai baterai yang berbeda-beda dan melakukan kombinasi pensaklaran maka jumlah levelnya dapat ditingkatkan menjadi 15 level, sementara nilai THD yang dihasilkan masing-masing fasa relatif sama sebesar 5,6 % dengan menggunakan program simulasi PSIM.

Pada penelitian ini beban yang digunakan masih bersifat resistif, untuk menghasilkan nilai THD yang sama pada beban yang bersifat induktif maupun beban yang bersifat kapasitif maka diperlukan pengembangan lebih lanjut pada rangkaian modulasi SPWM yang digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Singh, G. Lal Jat, A. Poonia, “*Design of a Novel Three Phase Multilevel Inverter*”, International Conference on Innovation in Power and Advanced Computing Technologies, 2017.
- [2] M. H Rashid, “*Power Electronics circuits, devices, and applications*”, 3th Ed, New Jersey, Person Prentice Hall, 2004.
- [3] M. D. Singh, K. B. Khanchandani, “*Power Electronics*”, 2nd Ed, New Delhi, Tata McGraw Hill, 2007.
- [4] Hart, Daniel W, “*Power Electronics*”, New York, Mc Graw-Hill, 2010.
- [5] K. Jain, P. Chaturvedi, “*Matlab-based Simulation & Analysis of Three-Level SPWM Inverter*”, International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE), Volume-2, Issue-1, pp. 56-59, March 2012.
- [6] D. Mohan, S. B. Kurub, “*A Comparative Analysis of Multi Carrier SPWM Control Strategies using Fifteen level Cascade H-bridge Multilevel Inverter*”, International Journal of Computer Application, Volume 41, No.21, pp. 7-11, March 2012
- [7] R. Mechouma, H. Aboub, B. Azoui, “*Multicarrier wave dual reference very low frequency PWM control of a nine levels NPC multi- string three phase inverter topology for photovoltaic system connected to a medium electric grid*”, IEEE Conference Publications, pp. 1-6, 2014.
- [8] M. Murugesan, R. Sakthivel, E. Muthukumaran, dan R. Sivakumar, “*Sinusoidal PWM Based Modified Cascaded Multilevel Inverter*”, International Journal of Computational Engineering Research, vol. 2, no. 2, pp. 529-539, Mar-Apr. 2012.
- [9] S. Banerjee, B. Pal, “*Design of A Three Phase Reduced Switch Multilevel Inverter Based on Different SPWM Techniques*”, International Journal of Engineering Research & Technology, Volume 4, Issue 04, pp. 1418-1424, ISSN:2278-0181, April 2015.