

Disain SPWM Multilevel Inverter Satu Fasa 15 Level Dengan menggunakan Kendali Arus PLN

(*Design SPWM Multilevel Inverter Single Phase 15 Level by Using PLN Current Control*)

Effendi¹, Rachmad Ikhsan²

Program Studi Teknologi Elektronika Politeknik Aceh

Program Studi Mekatronika Politeknik Aceh

Jl. Politeknik Aceh, Pango Raya, Banda Aceh 23119

email: effendi.bmk@gmail.com, ikhsan@politeknikaceh.ac.id

ABSTRACT

The fifteen level single phase Multilevel Inverter (MLI) in this research is constructed by using three independent DC sources in form of 12, 24, and 48 Volts batteries which arranged in series where each source separated by MOSFET that used as switch and uses three diodes and furthermore connected with H-Bridge circuits which serves to reverse the direction of the electric current to producing alternating current on the resistif load. MOSFET switching circuit is designed by using Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) method which using AC PLN current as control reference system, by using the operational amplifier component that used as comparator between the reference wave with carrier voltage from DC sources as many as seven where use analog and digital electronic components which function to activate the gate of each MOSFET in the power circuits. By using combination of voltage arrangement battery this MLI can produce an output wave not much different from previous research that is equal to 15 levels, THD of 5.6%, and frequency of 50 Hz but the number of switches, diodes and carrier voltages used is less than previous researches.

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

ABSTRAK

Multilevel inverter (MLI) satu fasa lima belas level pada penelitian ini dibangun dengan menggunakan tiga buah sumber DC bebas berupa baterai 12, 24, dan 48 Volt yang disusun secara seri di mana masing-masing sumber dipisahkan oleh MOSFET yang difungsikan sebagai saklar serta menggunakan tiga buah dioda yang disusun secara paralel, selanjutnya dihubungkan dengan rangkaian H-Bridge yang berfungsi untuk membalikan arah arus listrik sehingga menghasilkan arus bolak-balik pada sisi beban resistif. Rangkaian pensaklaran MOSFET didesain dengan metode Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) yang menggunakan gelombang arus listrik AC PLN sebagai referensi untuk mengendalikan sistem, serta komponen operational amplifier yang berfungsi sebagai pembanding antara gelombang referensi dengan tegangan carrier dari sumber DC sebanyak tujuh buah di mana menggunakan komponen elektronika analog dan digital untuk mengaktifkan masing-masing gate MOSFET pada rangkaian daya. Dengan menggunakan kombinasi susunan tegangan baterai MLI ini dapat menghasilkan gelombang output tidak jauh berbeda dengan penelitian sebelumnya yaitu sebesar 15 level, THD sebesar 5,6%, dan frekuensi sebesar 50 Hz namun jumlah saklar, dioda dan tegangan carrier yang digunakan lebih sedikit dari penelitian sebelumnya.

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

I. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara yang sedang berkembang dengan tingkat pertumbuhan penduduk cenderung meningkat hal ini ditandai dengan data hasil sensus kependudukan dari tahun ke tahun, peningkatan jumlah penduduk akan diikuti dengan peningkatan jumlah penggunaan perangkat elektronika sehingga konsumsi energi listrik akan meningkat sementara ketersediaan energi fosil sangat terbatas. Pemanfaatan energi alternatif merupakan

salah satu solusi untuk mengatasi permasalahan kelangkaan tersebut, energi listrik ini disimpan dalam bentuk arus searah (DC) sehingga dibutuhkan rangkaian konverter untuk menghasilkan energi listrik dalam bentuk

arus bolak-balik (AC) [1][2].

Inverter merupakan salah satu peralatan elektronika yang berfungsi untuk mengubah tegangan arus searah (*Direct Current*) menjadi arus bolak-balik (*Alternating Current*) [1][2], rangkaian *inverter* dengan gelombang output berbentuk kotak masih memungkinkan 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 [2].

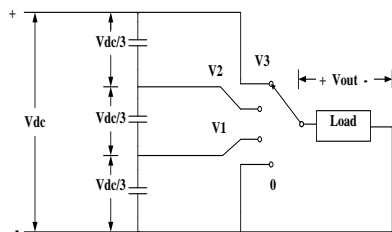
MLI merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menghasilkan gelombang luaran *inverter* mendekati bentuk gelombang sinusoidal, di mana semakin banyak jumlah *level* yang didesain maka luaran MLI tersebut semakin mendekati gelombang sinusoidal dengan demikian

persentase THD yang dihasilkan semakin kecil [1] [3].

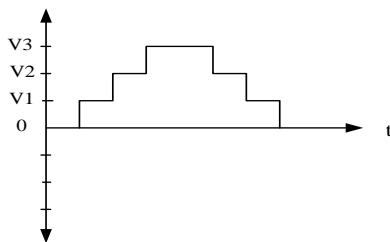
Sistem kerja MLI satu fasa lima belas *level* pada rujukan [4] menggunakan metode modulasi SPWM di mana jumlah tegangan *carrier* yang digunakan sebanyak 14 buah, dengan sumber tegangan sebanyak 7 buah sementara saklar/MOSFET yang digunakan sebanyak 11 serta diode 7 buah dimana nilai THD yang dihasilkan sebesar 5,5%. Disain MLI pada penelitian [4] masih memungkinkan untuk disederhanakan dengan cara memodifikasi jumlah tegangan *carrier* menjadi 7 buah, sementara rangkaian daya pada penelitian [5] dapat dikembangkan untuk menghasilkan output sebanyak 15 level dengan cara menggunakan tegangan baterai yang berbeda yakni 12, 24, dan 48 Volt.

II. METODELOGI

MLI secara umum disusun untuk menghasilkan gelombang luaran yang mendekati gelombang sinusoidal dengan memanfaatkan tegangan DC dari beberapa *level* [1][6], 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 [6] Tegangan luaran dapat didefinisikan sebagai tegangan yang melintasi terminal luaran dari *inverter* terhadap titik *ground* [1] 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*. [1]



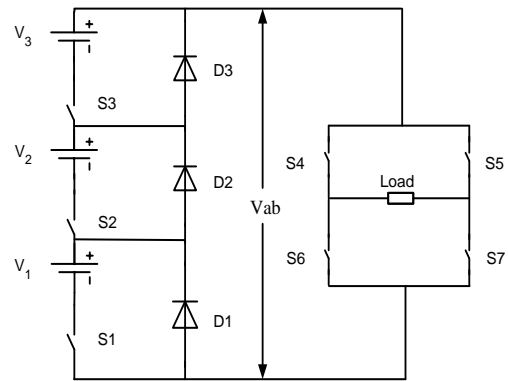
Gambar 2. Gelombang *output* MLI dengan saklar satu *pole*.

a) Rangkaian Daya MLI

Rangkaian MLI yang digunakan seperti pada Gambar 3 yang 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 [5], dengan menggunakan tegangan sumber V_1 , V_2 , dan V_3 sebesar 12, 24, dan 48 Volt.

Dengan menggunakan urutan kombinasi tegangan seperti di tunjukkan pada Tabel1, sistem ini mampu

menghasilkan tegangan output sebanyak lima belas *level*.



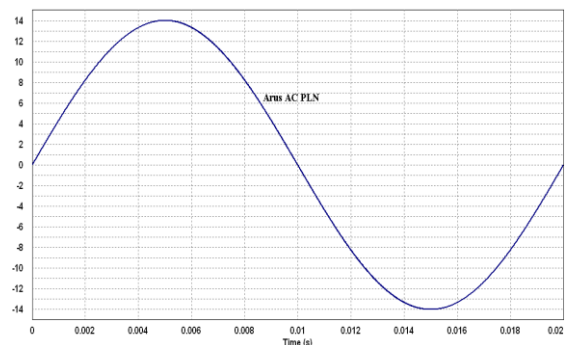
Gambar 3 Rangkaian daya MLI [5]

Tabel 1 Urutan pensaklaran MLI

Voltage Levels	SWITCHES									
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	D1	D2	D3
0	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON
12	ON	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON	ON
24	OFF	ON	OFF	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	ON
36	ON	ON	OFF	ON	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	ON
48	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF
60	ON	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON	OFF
72	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF
84	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF
-12	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON
-24	OFF	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	ON	OFF	ON
-36	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON
-48	OFF	OFF	ON	OFF	ON	ON	OFF	ON	ON	OFF
-60	ON	OFF	ON	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	OFF
-72	OFF	ON	ON	OFF	ON	ON	OFF	ON	OFF	OFF
-84	ON	ON	ON	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF

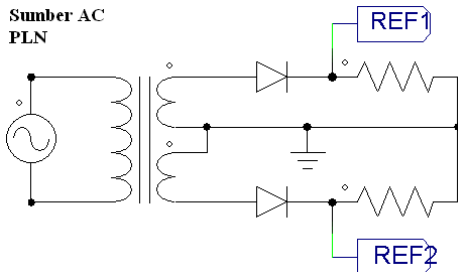
b). Topologi Strategi Modulasi SPWM untuk MLI

Modulasi SPWM merupakan suatu sistem yang digunakan untuk menghasilkan gelombang pulsa dengan lebar modulasinya dapat diatur sesuai dengan perubahan gelombang referensi yang digunakan. Gelombang referensi yang digunakan pada sistem modulasi SPWM *Multilevel inverter* 15 *level* ini bersumber dari gelombang arus sinusoidal yang dihasilkan oleh PLN seperti pada Gambar 4. Dengan menggunakan rangkaian transformator CT (*Center Tap*) dan dua buah diode seperti di tunjukkan pada Gambar 5, gelombang sinusoidal yang bersumber dari PLN ini dapat dipecah menjadi dua bagian yang selanjutnya digunakan untuk mengendalikan pensaklaran MOSFET bagian sisi positif (Ref1) dan bagian sisi negatif (Ref2).

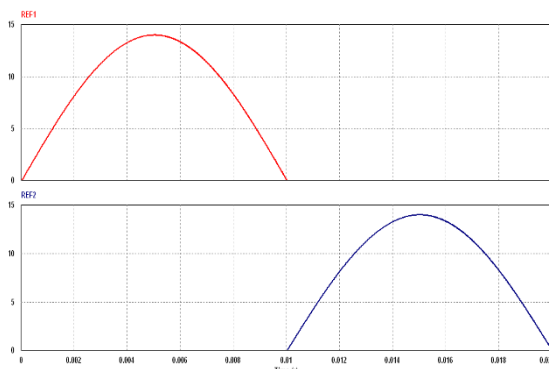


Gambar 4. Gelombang sinusoidal PLN

Sementara bentuk gelombang dapat dilihat pada Gambar 6 dimana gelombang sinusoidal disearahkan sehingga setengah gelombang pertama berada pada sudut 0° hingga 180° dan setengah gelombang berikutnya berada pada sudut 180° hingga 360° .



Gambar 5. Rangkaian pembagi refrensi.



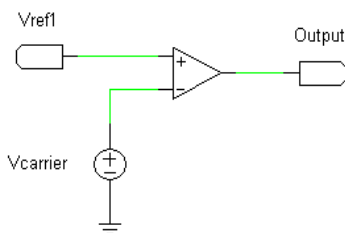
Gambar 6. Gelombang Ref1 dan Ref2

Gelombang Ref1 dan Ref2 selanjutnya dibandingkan dengan tegangan DC ($V_{carrier}$) yang memiliki nilai bervariasi sesuai dengan level masing-masing seperti di tunjukkan pada Tabel 2, dengan menggunakan komponen op-amp seperti pada Gambar 7 dan Gambar 8.

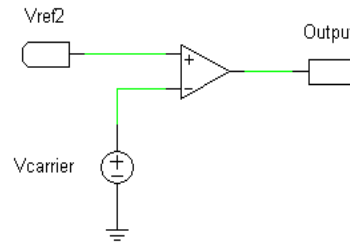
Pada sisi Ref1 jumlah op-amp yang digunakan sebanyak 7 buah untuk menggerakkan pensaklaran pada masing-masing level (L0, L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7), sementara pada sisi Ref2 op-amp yang digunakan sebanyak 6 buah yang difungsikan untuk menggerakkan pensaklaran pada sisi negative (L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6), dengan demikian jumlah level secara keseluruhan sebanyak 15 level.

Tabel 2 Nilai $V_{carrier}$

$V_{carrier}$	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
Volt	1	3	5	7	9	11	13



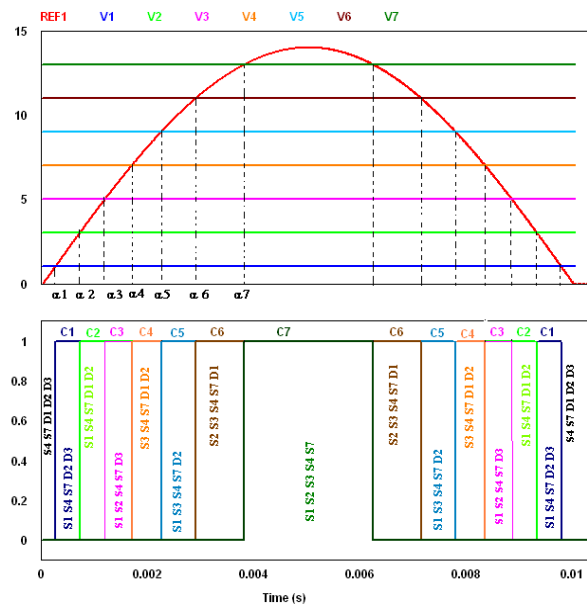
Gambar 7. Rangkaian komparator sisi positif



Gambar 8 Rangkaian komparator sisi negatif

Output rangkaian komparator dari hasil perbandingan antara Ref1 dengan $V_{carrier}$ selanjutnya digunakan untuk menggerakkan rangkaian *switch* (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7) berupa MOSFET secara bertahap sesuai dengan level masing-masing seperti di tunjukkan pada Gambar 9.

Pada saat gelombang Ref1 bergerak dari titik sudut 0° maka sistem akan mengaktifkan S4, S7, D1, D2, D3 untuk menghasilkan gelombang pada sisi output sebesar 0 Volt, sedangkan pada saat tegangan Ref1 sama dengan V1 akan menghasilkan sudut sebesar α_1 dan selanjutnya sistem akan mengaktifkan S1, S4, S7, D2, D3 atau pada posisi C1. Pada posisi C2 sistem akan mengaktifkan S1, S4, S7, D1, D2 di mana sudut yang dihasilkan sebesar α_2 .



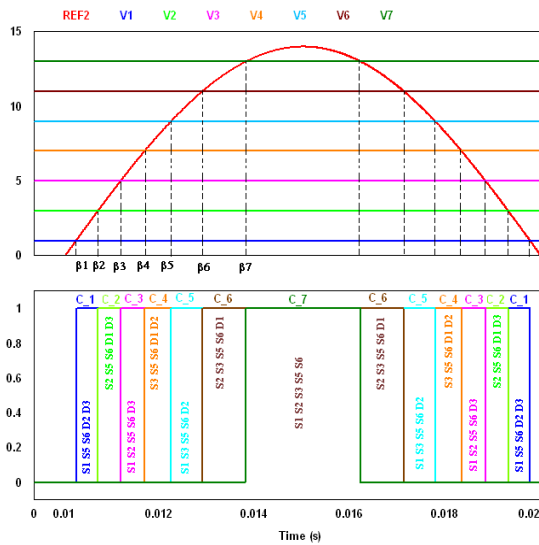
Gambar 9. Gelombang V_{ref1} , $V_{carrier}$ dan Output komparator sisi positif.

Sistem akan melakukan perbandingan antara Ref1 dan $V_{carrier}$ yang berikutnya untuk menggerakkan saklar pada posisi C4, C5, C6, C7, dan kembali lagi ke posisi C6, C5, C4, C3, C2, C1, selanjutnya sistem akan mencapai titik 0° .

Pada setengah siklus berikutnya sistem akan melakukan perbandingan antara Ref2 dengan tegangan *carrier* sebagaimana proses yang terjadi pada tahap sebelumnya yang ditunjukkan pada Gambar 10.

Sudut β_1 merupakan hasil perbandingan antara Ref2 dan tegangan *carrier* V1 yang selanjutnya akan digunakan untuk mengaktifkan S1, S5, S6, D2, D3 atau seperti ditunjukkan pada posisi C_1, proses ini akan berlangsung untuk posisi berikutnya C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7,

C₆, C₅, C₄, C₃, C₂, C₁.



Gambar 10. Gelombang Vref1, Vcarrier dan Output comparator sisi negatif

Tabel 3 Nilai sudut α dan β

Sudut	Vref (Volt)	Vcarrier (Volt)	Nilai (Derajat)
α_1	14	1	4,09
α_2	14	3	12,37
α_3	14	5	20,92
α_4	14	7	30
α_5	14	9	40
α_6	14	11	51,78
α_7	14	13	68,21
β_1	14	1	184,09
β_2	14	3	192,37
β_3	14	5	200,92
β_4	14	7	210
β_5	14	9	220
β_6	14	11	231,78
β_7	14	13	248,21

Besar sudut α dan β untuk masing-masing level dapat dicari dengan menggunakan persamaan (1), (2) di mana Vmak merupakan tegangan puncak dari Vref1 atau Vref2, adapun pada penelitian ini tegangan maksimum yang digunakan sebesar 14 Volt. Besar nilai masing-masing sudut dapat dilihat pada Tabel 3.

$$\alpha_n = \sin^{-1}\left(\frac{V_{carrier}}{V_{mak}}\right) \quad (1)$$

$$\beta_n = 180^\circ + \left| \sin^{-1}\left(\frac{V_{carrier}}{V_{mak}}\right) \right| \quad (2)$$

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) [1][2][3].

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

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

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) [1][2][3].

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

di mana:

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

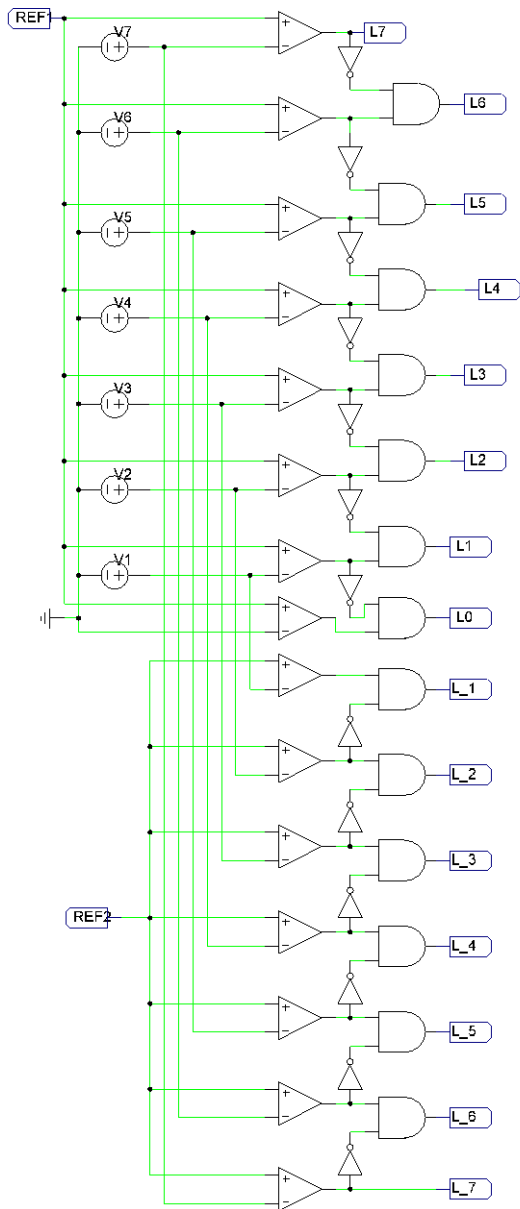
$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega_0 t dt \quad (7)$$

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

d. Rangkaian Modulasi SPWM MLI 15 Level

Rangkaian modulasi sistem MLI 15 level ini disusun dengan menggunakan komponen elektronika seperti op-amp yang difungsikan sebagai komparator antara tegangan Ref dan tegangan carrier, di mana jumlah yang digunakan sebanyak 15 gerbang sementara tegangan carrier yang digunakan sebanyak tujuh buah.

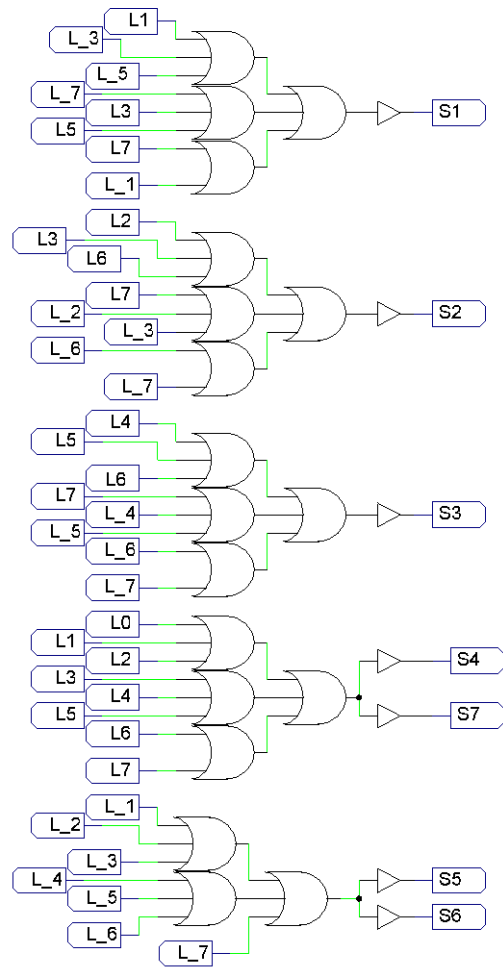
Gerbang logika NOT dan AND seperti pada Gambar 11 didesain untuk mengatur agar sistem bekerja secara berurutan dan hanya melakukan pensaklaran satu kali untuk setiap tahapan dan disesuaikan dengan perubahan amplitudo gelombang referensi dengan demikian gelombang output yang dihasilkan akan membentuk gelombang anak tangga.



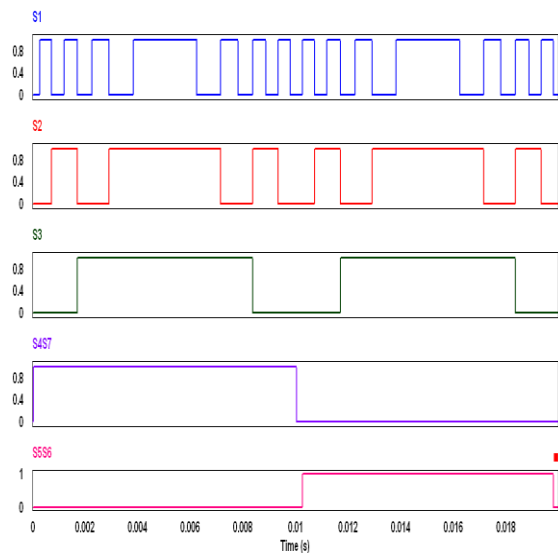
Gambar 11 Rangkaian modulasi SPWM 15 level

Rangkaian pensaklaran MOSFET seperti ditunjukkan pada Gambar 12 disusun dari gerbang OR di mana S1 digunakan untuk mengaktifkan baterai 12 Volt, S2 untuk mengaktifkan baterai 24 Volt dan S3 untuk baterai 48 Volt.

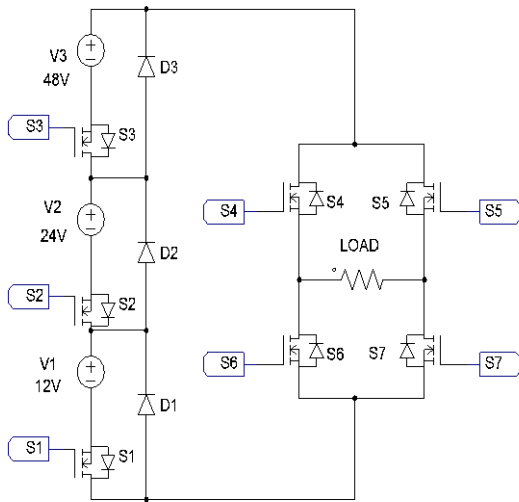
Sementara S4 dan S7 difungsikan untuk mengaktifkan pada siklus positif antara sudut 0° hingga 180° , adapun rangkaian pensaklaran S5 dan S6 digunakan untuk membalikkan arah arus pada beban antara 180° hingga 360° sehingga menghasilkan bentuk gelombang output dalam bentuk arus bolak-balik. Adapun bentuk gelombang pulsa rangkaian pensaklaran MOSFET dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 12 Rangkaian pensaklaran MOSFET



Gambar 13 Gelombang pulsa rangkaian pensaklaran MOSFET.

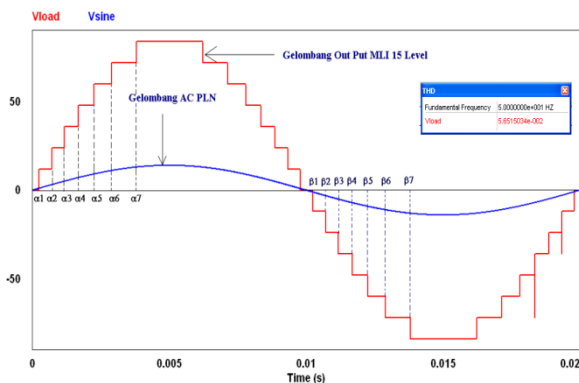


Gambar 14 Rangkaian pensaklaran daya

Rangkaian daya pada MLI ini menggunakan 7 buah MOSFET dan tiga buah diode dengan sumber tegangan yang berbeda-beda seperti ditunjukkan pada Gambar 14.

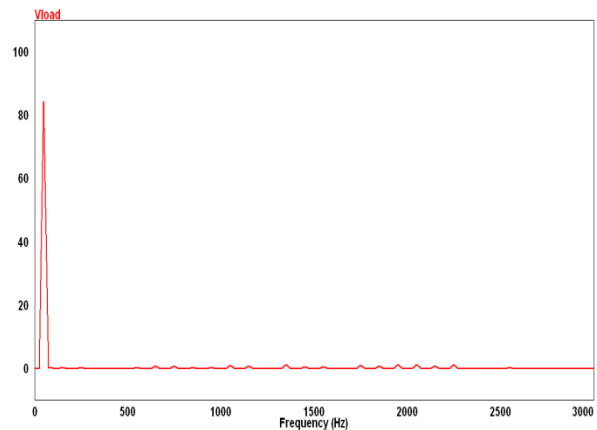
1. HASIL DAN PEMBAHASAN

Disain MLI ini mampu menghasilkan *level* tegangan sebanyak 15 tingkat di mana rangkaian daya yang digunakan sama dengan penelitian yang dilakukan oleh penelitian [5] hal ini dapat dilakukan dengan cara mengganti nilai baterai menjadi 12V, 24 V, 48V serta melakukan kombinasi dari susunan baterai tersebut sesuai dengan gelombang referensi berupa arus sinusoidal PLN. Adapun bentuk gelombang output dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15. Gelombang output MLI 15 Level

THD yang dihasilkan pada disain MLI 15 level ini memiliki nilai yang hampir sama dengan penelitian [4] yakni sebesar 5,6%. Pada penelitian tersebut menggunakan $V_{carrier}$ sebanyak 14 buah sementara pada penelitian ini penulis mendisain $V_{carrier}$ yang digunakan sebanyak 7 buah, adapun gelombang harmonisa MLI ini dapat dilihat pada Gambar 16 dengan frekuensi dasar yang digunakan sebesar 50 Hz.



Gambar 16. Gelombang Harmonisa MLI 15 Level

2. KESIMPULAN

Disain MLI pada penelitian ini mampu meminimalkan penggunaan MOSFET dan dioda sementara THD yang dihasilkan hampir sama dengan penelitian sebelumnya dimana frekuensi gelombang output tegangan sesuai dengan frekuensi PLN.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. H Rashid, "Power Electronics circuits, devices, and applications", 3th Ed, New Jersey, Person Prentice Hall, 2004.
- [2] M. D. Singh, K. B. Khanchandani, "Power Electronics", 2nd Ed, New Delhi, Tata McGraw Hill, 2007.
- [3] Hart, Daniel W, "Power Electronics", New York, Mc Graw-Hill, 2010.
- [4] Effendi, I.D. Sara, R. S. Lubis, " Disain SPWM Multilevel inverter Satu Fasa Lima Belas Level", Journal Rekayasa Elektrika, Volume 12, No.2, pp. 60-66, Agustus 2016
- [5] M. Murugesan, R. Sakthivel, E. Muthukumar, 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.
- [6] 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.