

STUDI PERBAIKAN THD PADA MULTILEVEL INVERTER SATU FASA TUJUH TINGKAT

Effendi

Teknik Elektronika Industri Politeknik Aceh
Jl. Politeknik Aceh, Pango Raya, Banda Aceh 23119
email: effendi.bmk@gmail.com

ABSTRACT

Multilevel Inverter (MLI) single phase seven level in this research is constructed by using cascaded H-Bridge modification which consists of three independent DC sources in form of 9 Volt 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 voltage on the resistif load. MOSFET switching circuits was designed by using SPWM Method that has modified from previous Researchers, by using the operational amplifier component that used as comparator between the reference wave in form of sinusoidal wave which having maximum amplitude 9 volts with carrier voltage that has been modified from DC sources as many as three (1.5 Volt, 4.5 Volt and 7.5 Volt) and use analog and digital electronic components which function to activate the gate of each MOSFET in the power circuits. THD that generated in this study by 11.6% while the research [3] produces THD 18.07%, and 18.40% for methods PD (Phase Disposition) PWM, APOD (Alternative Phase Opposition Disposition) PWM, thus this system is able to produce better THD than previous research

Keyword : carrier, Multilevel Inverter, SPWM, and THD

ABSTRAK

Multi level inverter (MLI) satu fasa tujuh tingkat pada penelitian ini dibangun dengan topologi modifikasi cascaded H-Bridge yang terdiri dari tiga buah sumber DC bebas berupa baterai 9 Volt yang disusun secara seri dimana masing-masing sumber dipisahkan oleh MOSFET yang difungsikan sebagai saklar serta menggunakan tiga buah dioda yang selanjutnya dihubungkan dengan rangkaian H-Bridge yang berfungsi untuk membalik arah arus listrik sehingga menghasilkan tegangan bolak-balik pada sisi beban resistif. Rangkaian pensaklaran MOSFET didesain menggunakan metode SPWM yang telah dimodifikasi dari peneliti sebelumnya, dengan menggunakan komponen operational amplifier yang berfungsi sebagai pembanding antara gelombang referensi berupa gelombang sinusoidal yang memiliki amplitudo maksimum sebesar 9 Volt dengan tegangan carrier yang telah dimodifikasi dari sumber DC sebanyak tiga buah (1,5 Volt, 4,5 Volt dan 7,5 Volt) serta menggunakan komponen elektronika analog dan digital yang berfungsi untuk mengaktifkan masing-masing gate MOSFET pada rangkaian daya. Nilai THD yang dihasilkan pada penelitian ini sebesar 11,6 % sementara pada penelitian sebelumnya menghasilkan THD 18,07 %, dan 18,40 % untuk metode PD (Phase Disposition) PWM, APOD (Alternative Phase Opposition Disposition) PWM, dengan demikian sistem ini mampu menghasilkan THD yang lebih baik dari pada penelitian sebelumnya.

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

I. PENDAHULUAN

Inverter merupakan salah satu peralatan elektronika yang banyak digunakan pada dunia industri seperti pada sistem sumber energi terbarukan, sistem penggerak, konveyor dan beberapa peralatan elektronika lainnya dimana masing-masing peralatan tersebut membutuhkan spesifikasi tegangan tersendiri, rangkaian *inverter* dengan gelombang luaran berbentuk kotak masih memungkinkan digunakan pada aplikasi daya rendah, dan menengah [1] sementara untuk aplikasi daya yang tinggi dibutuhkan gelombang luaran yang mendekati bentuk gelombang sinusoidal dengan *Total Harmonic Distortion* (THD) yang lebih baik.

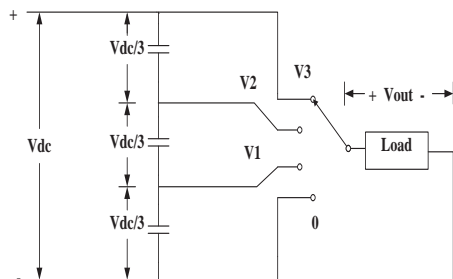
Multilevel Inverter (MLI) merupakan salah satu metode yang dapat menghasilkan gelombang luaran inverter mendekati bentuk gelombang sinusoidal, ada beberapa topologi rangkaian yang dapat digunakan diantaranya topologi *diode clamped multilevel inverter* (DCMLI), *flying capacitor multilevel inverter* (FCMLI) serta *cascade H-Bridge multilevel inverter* (CHBMLI) [2] dimana semakin banyak jumlah *level* yang didesain maka luaran MLI tersebut semakin mendekati gelombang sinusoidal dengan demikian persentase THD yang dihasilkan semakin kecil, MLI satu fasa tujuh tingkat pada rujukan [3] menggunakan metode modulasi lebar pulsa (*Pulse Width Modulation*) berupa PD (*Phase Disposition*) PWM, APOD (*Alternative Phase Opposition Disposition*) PWM yang menghasilkan THD masing-masing sebesar (18,07 %, dan 18,40 %), dimana rangkaian pensaklaran MOSFET (*metal oxide semiconductor field effect transistor*) disusun dengan menggunakan komparator dan kombinasi gerbang logika sementara gelombang *carrier* yang digunakan sebanyak enam buah dimana masing-masing *carrier* memiliki frekuensi.

Nilai THD pada penelitian [3] masih memungkinkan untuk diturunkan lagi menjadi lebih kecil dengan cara memodifikasi metode modulasi lebar pulsa yang digunakan dimana gelombang *carrier* tidak memiliki frekuensi serta jumlahnya menjadi lebih sedikit dari penelitian

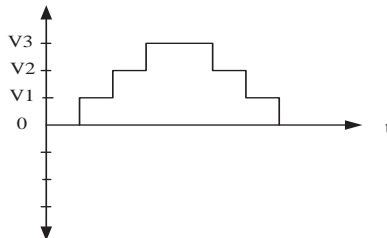
sebelumnya, sementara komponen penyusun rangkaian pensaklaran MOSFET masih tetap sama seperti yang digunakan pada penelitian [3].

II. METODE PENELITIAN

MLI secara umum disusun untuk menghasilkan gelombang luaran yang mendekati gelombang sinusoidal dengan memanfaatkan tegangan DC dari beberapa *level* [4],[5], dimana gelombang luaran berbentuk seperti gelombang tangga. Konsep dasar MLI dapat dilihat pada Gambar 1 dimana saklar yang digunakan berfungsi untuk memilih *level* tegangan yang akan dihubungkan dengan beban [4]. Tegangan luaran dapat didefinisikan sebagai tegangan yang melintasi terminal luaran dari *inverter* terhadap titik *ground* [2] seperti ditunjukkan pada Gambar 2 dimana 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*.



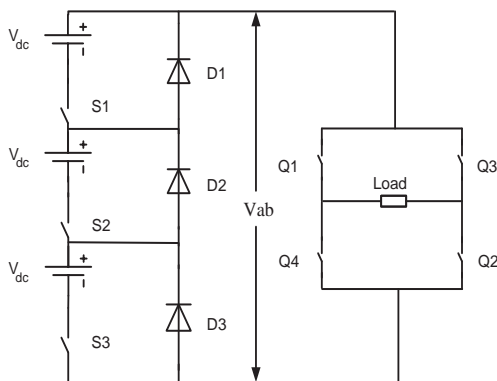
Gambar 2. Gelombang *output* MLI dengan saklar satu *pole*.

1. Rangkaian Daya MLI

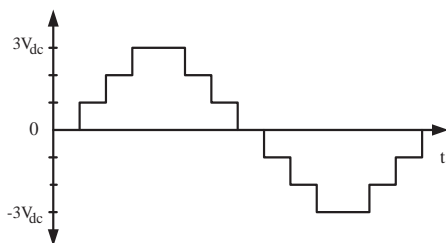
Rangkaian MLI yang telah dimodifikasi seperti ditunjukkan pada Gambar 3 yang

terdiri dari satu buah rangkaian *H-Bridge*, tiga buah sumber DC bebas yang disusun secara seri dimana masing-masing sumber DC bebas dipisahkan oleh satu buah saklar serta menggunakan tiga buah dioda, adapun jumlah saklar yang digunakan sebanyak 7 buah saklar [6].

Urutan pensaklaran pada rangkaian MLI ini dapat dilihat pada Tabel 1 dimana besar tegangan maksimum yang dihasilkan sebesar $3V_{dc}$ atau jumlah dari keseluruhan tegangan sumber DC (baterai) yang digunakan. Gelombang tegangan yang melewati beban dapat dilihat pada Gambar 4 dengan tegangan maksimum sebesar $3V_{dc}$. *Switch* Q1 dan Q2 digunakan untuk menghasilkan tegangan pada sisi positif sementara Q3 dan Q4 berfungsi untuk membalikkan arah tegangan sehingga menghasilkan tegangan sisi negatif pada beban, adapun jumlah *level* yang dihasilkan sebanyak tujuh *level* yang terdiri dari $\pm 3 V_{dc}$, $\pm 2 V_{dc}$, $\pm 1 V_{dc}$, dan 0 Volt [6].



Gambar 3 Rangkaian Daya MLI [6]



Gambar 4. Bentuk gelombang *output* MLI 7 level.

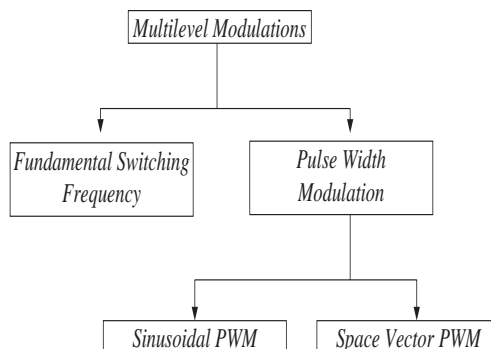
Tabel 1 Urutan pensaklaran MLI [6]

Voltage Levels	Multiconversion Cell		H-Bridge	
	On Switch	Off Switch	On Switch	Off Switch
+ 3V _{dc}	S1 S2 S3	D1 D2 D3	Q1 Q2	Q3 Q4
+ 2V _{dc}	S1 S2 D3	S3 D1 D2	Q1 Q2	Q3 Q4
+ 1V _{dc}	S1 D2 D3	S3 S2 D1	Q1 Q2	Q3 Q4
0 V _{dc}	D1 D2 D3	S1 S2 S3	Q1 Q2	Q1 Q2
-1 V _{dc}	S1 D2 D3	S3 S2 D1	Q3 Q4	Q1 Q2
-2 V _{dc}	S1 S2 D3	S3 D1 D2	Q3 Q4	Q1 Q2
-3V _{dc}	S1 S2 S3	D1 D2 D3	Q3 Q4	Q1 Q2

2. Topologi Strategi Modulasi untuk MLI

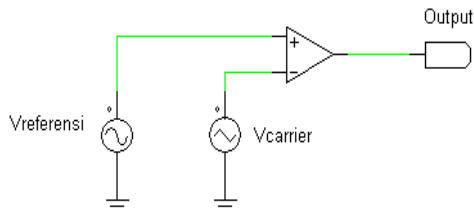
Secara umum topologi modulasi yang digunakan pada MLI dapat dibagi menjadi dua bagian seperti ditunjukkan pada Gambar 5, *fundamental switching frequency* merupakan metode yang digunakan untuk mengaktifkan setiap saklar dalam kondisi *on* dan *off* sekali dalam satu siklus dari frekuensi dasar gelombang luaran dan menghasilkan gelombang berbentuk tangga [7].

Metode *pulse width modulation* (PWM) pada mulanya digunakan untuk sistem *inverter* konvensional yang memiliki bentuk gelombang luaran berbentuk pulsa dengan lebar pulsa dapat diatur sesuai dengan strategi kontrol yang digunakan seperti *Sinusoidal PWM* atau *Space Vector PWM* sistem ini kemudian dikembangkan untuk keperluan *inverter* dengan metode *multilevel* sehingga gelombang luaran yang dihasilkan mendekati gelombang sinusoidal.



Gambar 5 Topologi modulasi MLI [2],[7].

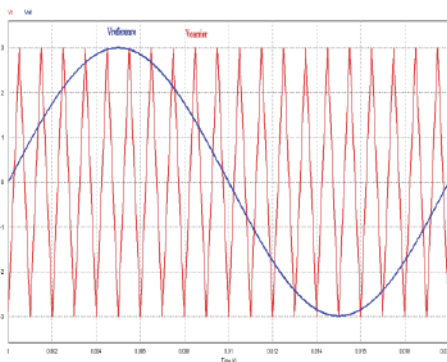
Modulasi SPWM merupakan suatu sistem yang digunakan untuk menghasilkan gelombang pulsa dengan lebar modulasinya dapat diatur sesuai dengan perubahan gelombang referensi yang digunakan, sistem ini menggunakan komparator sebagai pembanding antara $V_{referensi}$ berupa gelombang sinusoidal dengan gelombang $V_{carrier}$ berupa gelombang segitiga seperti ditunjukkan pada Gambar 6 [8].



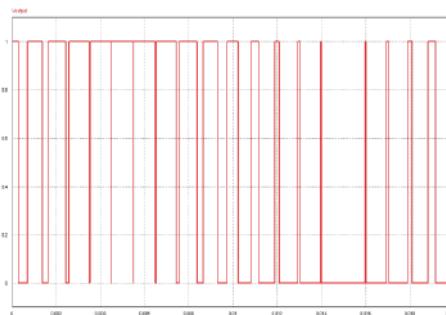
Gambar 6 Rangkaian komparator SPWM

Pada Gambar 6 rangkaian komparator SPWM $V_{referensi}$ dihubungkan dengan masukan komparator yang memiliki polaritas positif (+) sementara $V_{carrier}$ dihubungkan dengan masukan komparator yang memiliki polaritas negatif (-) bentuk gelombang luaran yang dihasilkan dari komparator ini mengikuti ketentuan sebagai berikut:

1. Jika amplitudo $V_{referensi}$ lebih besar atau sama dengan amplitudo $V_{carrier}$ maka bentuk gelombang pulsa pada sisi luaran akan berlogika tinggi.
2. Jika amplitudo $V_{referensi}$ lebih kecil dari amplitudo $V_{carrier}$ maka bentuk gelombang pulsa pada sisi luaran akan berlogika rendah.



Gambar 7. Perbandingan gelombang $V_{referensi}$ dengan $V_{carrier}$

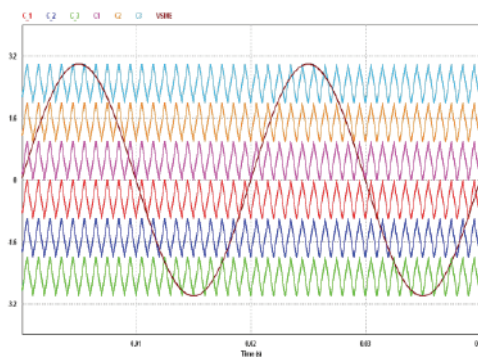


Gambar 8 Bentuk gelombang SPWM

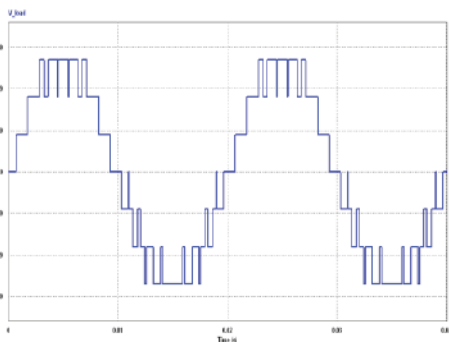
Bentuk gelombang luaran dari rangkaian komparator SPWM pada Gambar 7 dapat dilihat pada Gambar 8 dimana lebar pulsa yang dihasilkan mengacu terhadap hasil dari perbandingan antara gelombang sinusoidal dengan gelombang segitiga yang digunakan, untuk *inverter* yang menggunakan sistem MLI maka jumlah gelombang $V_{carrier}$ yang digunakan lebih dari satu buah.

3. Phase Disposition PWM (PD PWM)

Pada metode PD PWM ini semua gelombang *carrier* yang digunakan memiliki frekuensi dan fasa yang sama namun memiliki perbedaan pada sisi DC *offset* yang digunakan hal ini bertujuan untuk menghasilkan *level* yang berbeda-beda. Gelombang *carrier* tersebut selanjutnya dibandingkan dengan gelombang referensi berupa gelombang sinusoidal menggunakan rangkaian komparator.



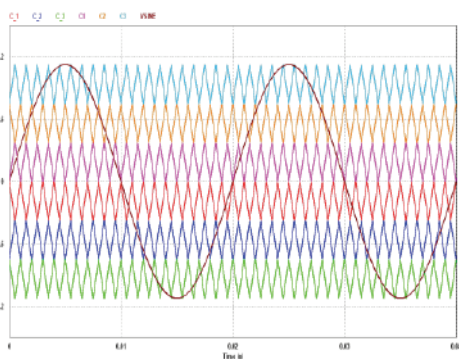
Gambar 9 Gelombang referensi dan *carrier* untuk PD PWM [3].



Gambar 10 Gelombang luaran MLI 7 Level dengan metode PD PWM [3].

Hasil perpotongan antara gelombang referensi dan *carrier* ini digunakan untuk mentrigger rangkaian pensaklaran secara berurutan [9], pada penelitian [3] jumlah gelombang *carrier* yang digunakan sebanyak enam buah seperti ditunjukkan pada Gambar 9 sementara gelombang luaran dari MLI dengan metode PD PWM ini dapat dilihat pada Gambar 10.

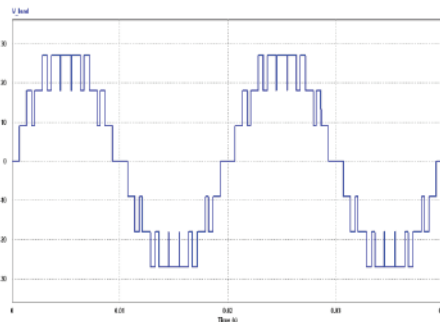
4. Alternative Phase Opposition Disposition PWM (APOD PWM)



Gambar 11 Gelombang referensi dan *carrier* untuk APOD PWM [3].

Seluruh gelombang *carrier* yang digunakan pada metode APOD PWM memiliki frekuensi yang sama namun berbeda dengan DC *offset* dari masing-masing gelombang *carrier* tersebut, sementara untuk sudut fasa memiliki pergeseran sejauh 180° diantara gelombang *carrier* yang saling berdekatan [9], pada penelitian [3] jumlah gelombang *carrier* yang digunakan sebanyak enam buah seperti

ditunjukkan pada Gambar 11 sementara gelombang luaran dari MLI dengan metode APOD PWM ini dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12 Gelombang luaran MLI 7 level dengan metode APOD PWM [3].

5. Total Harmonic Distortion (THD)

THD dapat didefinisikan sebagai hasil perbandingan total nilai *root mean square* (rms) dari keseluruhan komponen harmonik gelombang luaran terhadap nilai rms komponen dasarnya, secara matematika persamaan umumnya dapat dilihat pada persamaan (1) [10].

$$THD = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_{1(rms)}^2}}{V_{1(rms)}} \quad (1)$$

$$V_{(rms)} = \sqrt{V_{1(rms)}^2 + V_{3(rms)}^2 + \dots + V_{n(rms)}^2} \quad (2)$$

dimana:

$V_{1(rms)}^2$ = nilai tegangan rms untuk harmonik ke 1

$V_{n(rms)}^2$ = nilai tegangan rms untuk harmonik ke n

Nilai tegangan rms pada harmonik ke n dapat dicari dengan menggunakan analisis deret Fourier seperti pada persamaan (3) hingga (6) [2],[10].

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \quad (3)$$

dimana:

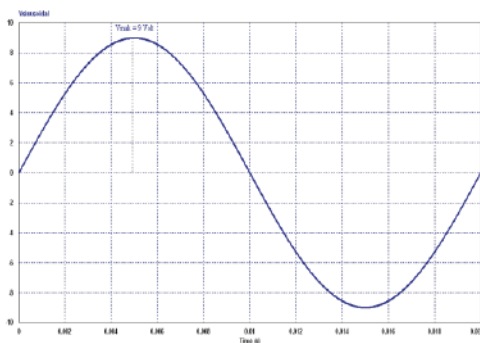
$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (4)$$

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

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

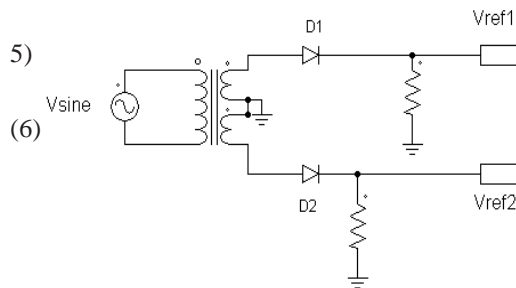
6. Modulasi SPWM Modifikasi

Gelombang referensi yang digunakan pada sistem modulasi SPWM modifikasi ini menggunakan gelombang sinusoidal yang bersumber dari PLN seperti pada Gambar 13. Gelombang *carrier* yang digunakan pada penelitian [3] berjumlah sebanyak enam buah dengan bentuk gelombang segitiga dan memiliki frekuensi, pada penelitian ini gelombang segitiga pada penelitian [3] diganti dengan tegangan DC dan jumlahnya setengah dari penelitian [3] yaitu tiga buah.

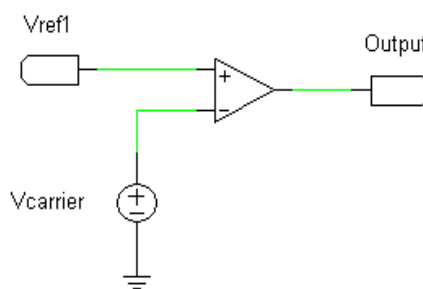


Gambar 13 Gelombang referensi sinusoidal

Pengurangan jumlah *carrier* ini dapat dilakukan dengan menggunakan metode penyearah setengah gelombang sebanyak dua buah yang selanjutnya dihubungkan dengan transformator CT (*center tap*) seperti ditunjukkan pada Gambar 14. rangkaian ini akan menghasilkan dua buah gelombang referensi yakni Vref1 dan Vref2, Vref1 digunakan sebagai gelombang referensi untuk menghasilkan luaran MLI pada sisi siklus positif sementara Vref2 berfungsi sebagai gelombang referensi untuk menghasilkan luaran MLI pada sisi siklus negatif.



Gambar 14. Penyearah setengah gelombang untuk Vref1 dan Vref2

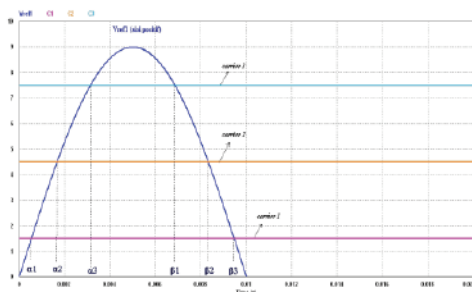


Gambar 15. Rangkaian komparator sisi positif

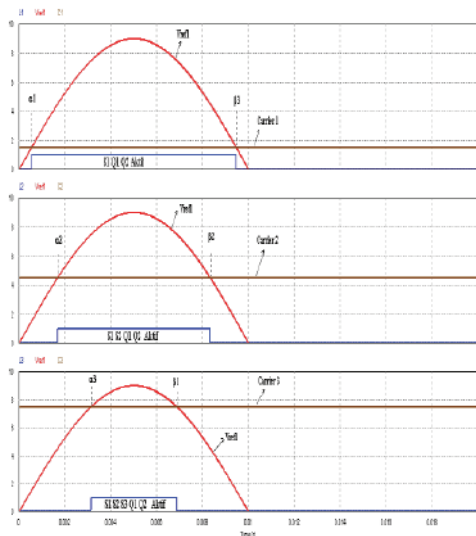
Gelombang Vref1 pada Gambar 14 selanjutnya dikomparasikan dengan Vcarrier yang menggunakan rangkaian komparator seperti pada Gambar 15 sebanyak tiga buah, dimana masing-masing Vcarrier pada rangkaian tersebut menggunakan tegangan yang berbeda-beda sesuai dengan ketentuan yang berbeda-beda sesuai dengan ketentuan seperti pada Tabel 2 dimana Vmak merupakan amplitudo maksimum dari gelombang referensi yang digunakan yaitu sebesar 9 Volt, sementara perbandingan antara gelombang Vref1 dan Vcarrier dapat dilihat pada Gambar 16.

Tabel 2. Vcarrier modifikasi SPWM

No	Vcarrier
1	Vc1=1/6 Vmak
2	Vc2=3/6 Vmak
3	Vc3=5/6 Vmak



Gambar 16. Perbandingan Vref1 dan Vcarrier pada sisi positif



Gambar 17. Bentuk luaran SPWM modifikasi berdasarkan level untuk sisi positif

Hasil perbandingan gelombang Vreferensi dan Vcarrier pada metode SPWM modifikasi untuk masing-masing level pada sisi positif dapat dilihat pada Gambar 17 dimana pulsa yang dihasilkan berfungsi untuk mengaktifkan saklar (MOSFET) sesuai dengan urutan yang telah ditetapkan, pada saat level 1 (L1) saklar yang akan aktif yaitu S1, Q1, dan Q2, untuk level 2 (L2) saklar yang aktif yakni S1, S2, Q1, dan Q2. Sementara S1, S2, S3, Q1, dan Q2 akan aktif pada saat mencapai level 3 (L3). Besar sudut α untuk masing-masing level pada luaran SPWM modifikasi dapat dicari dengan menggunakan persamaan (7) hingga persamaan 3.3 sebagai berikut.

$$\alpha_1 = \sin^{-1}\left(\frac{V_{c1}}{V_{mak}}\right) \quad (7)$$

$$\alpha_2 = \sin^{-1}\left(\frac{V_{c2}}{V_{mak}}\right) \quad (8)$$

$$\alpha_3 = \sin^{-1}\left(\frac{V_{c3}}{V_{mak}}\right) \quad (9)$$

$$\beta_1 = \pi - \alpha_3 \quad (10)$$

$$\beta_2 = \pi - \alpha_2 \quad (11)$$

$$\beta_3 = \pi - \alpha_1 \quad (12)$$

dimana :

V_{c1} = nilai tegangan Vcarrier ke 1

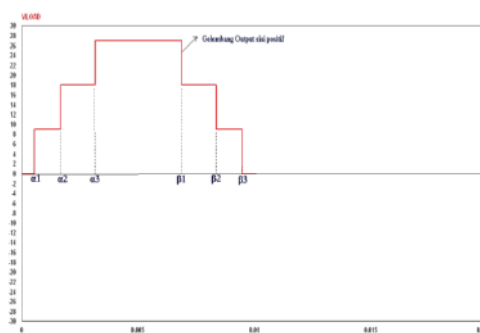
V_{c2} = nilai tegangan Vcarrier ke 2

V_{c3} = nilai tegangan Vcarrier ke 3

V_{mak} = nilai amplitudo maksimum

Vreferensi

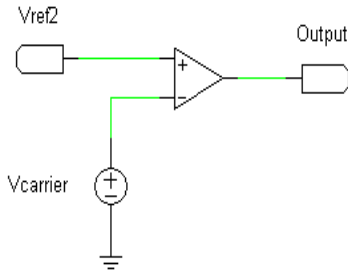
Bentuk luaran MLI pada sisi positif dengan menggunakan metode SPWM modifikasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 18, dimana tegangan maksimum (V_{mak}) yang dihasilkan sebesar 3Vdc atau sejumlah nilai baterai yang digunakan, sementara waktu yang diperlukan untuk setengah gelombang atau pada sisi siklus positif sebesar 0,01 detik.



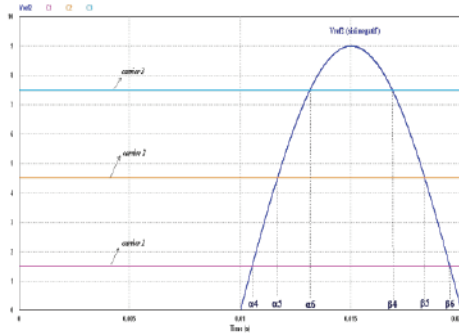
Gambar 18. Luaran MLI pada sisi positif dengan metode SPWM Modifikasi.

Gelombang Vref2 pada Gambar 14 selanjutnya dikomparasikan dengan Vcarrier menggunakan rangkaian komparator seperti pada Gambar 19 untuk menghasilkan PWM pada sisi negatif luaran MLI, dimana

rangkaian komparator yang digunakan sebanyak tiga buah, sementara $V_{carrier}$ yang digunakan pada sisi negatif sama dengan $V_{carrier}$ yang digunakan pada sisi positif sesuai dengan *level* masing-masing seperti yang ditunjukkan pada Gambar 20



Gambar 19. Rangkaian komparator sisi negative



Gambar 20. Perbandingan Vref2 dan Vcarrier pada sisi negative

Hasil perbandingan gelombang Vref2 dan Vcarrier pada SPWM modifikasi untuk masing-masing *level* pada sisi positif dapat dilihat pada Gambar 21 dimana pulsa yang dihasilkan berfungsi untuk mengaktifkan saklar (MOSFET) sesuai dengan urutan yang telah ditetapkan, pada saat *level* 4 (L_1) saklar yang akan aktif yaitu S1, Q3, dan Q4, untuk *level* 5 (L_2) saklar yang aktif yakni S1, S2, Q3, dan Q4 sementara S1, S2, S3, Q3, dan Q4 akan aktif pada saat mencapai *level* 6 (L_3).

Besar sudut α_4 , α_5 , dan α_6 pada luaran SPWM modifikasi dapat dicari dengan menggunakan persamaan (12) hingga (17).

$$\alpha_4 = \pi + \left| \sin^{-1} \left(\frac{V_{c1}}{V_{mak}} \right) \right| \quad (12)$$

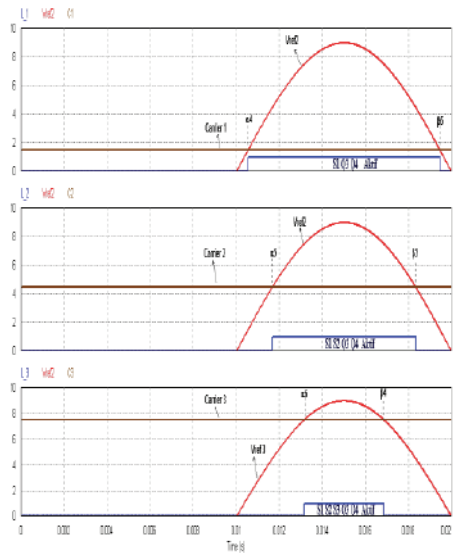
$$\alpha_5 = \pi + \left| \sin^{-1} \left(\frac{V_{c2}}{V_{mak}} \right) \right| \quad (13)$$

$$\alpha_6 = \pi + \left| \sin^{-1} \left(\frac{V_{c3}}{V_{mak}} \right) \right| \quad (14)$$

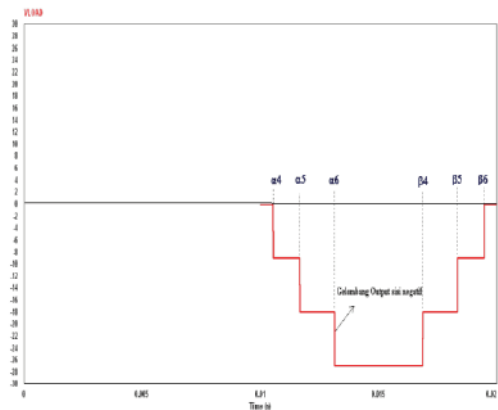
$$\beta_4 = 2\pi - \alpha_6 \quad (15)$$

$$\beta_5 = 2\pi - \alpha_5 \quad (16)$$

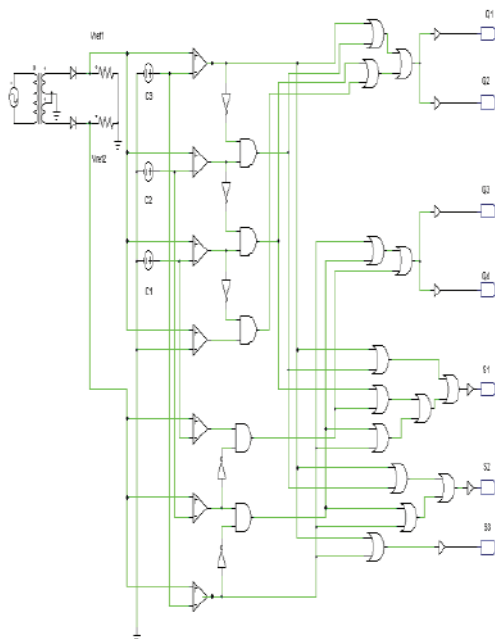
$$\beta_6 = 2\pi - \alpha_4 \quad (17)$$



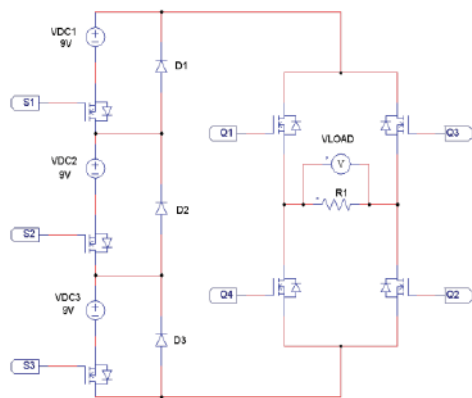
Gambar 21. Bentuk luaran SPWM modifikasi berdasarkan *level* untuk sisi negatif.



Gambar 22 Luarannya MLI pada sisi negatif dengan metode SPWM Modifikasi



Gambar 23. Rangkaian Pensaklaran MLI



Gambar 24. Rangkaian Daya MLI

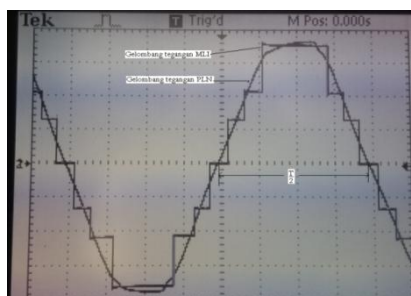
Bentuk gelombang luaran MLI pada sisi negatif dengan menggunakan metode SPWM modifikasi ditunjukkan pada Gambar 22, dimana tegangan maksimum (V_{mak}) yang dihasilkan sebesar 3Vdc atau sejumlah nilai baterai yang digunakan, sementara waktu yang diperlukan untuk setengah gelombang atau pada sisi siklus negatif sebesar 0,01 detik. Rangkaian pensaklaran MOSFET yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 23, sementara untuk rangkaian daya ditunjukkan

pada Gambar 23. Rangkaian prototipe MLI inverter dengan metode SPWM Modifikasi ini dapat dilihat pada Gambar 24.

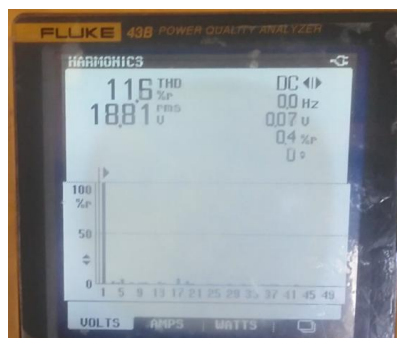
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bentuk gelombang luaran MLI pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 25, dimana nilai THD yang didapat sebesar 11,6 % seperti ditunjukkan pada Gambar 26, adapun alat ukur yang digunakan yaitu *Fluke power quality analyzer 3B* yang memiliki keterbatasan pengukuran THD hingga harmonik ke 51 [11].

THD yang dihasilkan pada penelitian ini memiliki nilai yang lebih baik dari penelitian [3], adapun perbandingan antara hasil penelitian yang dilakukan oleh penulis dengan peneliti sebelumnya dapat dilihat pada Tabel 3, pada penelitian [3] menggunakan 6 buah *carrier* pada PD PWM dan APOD PWM, sementara penelitian yang dilakukan oleh penulis menggunakan SPWM yang telah dimodifikasi dan menggunakan 3 buah *carrier* dimana komponen rangkaian pensaklaran yang digunakan masih tetap sama.



Gambar 25. Gelombang tegangan PLN dan output MLI



Gambar 26. Harmonisa MLI PDPWM

Tabel 3 Perbandingan hasil penelitian MLI tujuh tingkat

Peneliti	Metode Modulasi	Komponen Pensaklaran	THD (%)
S. Umashankar [3]	PD PWM, 6 carrier	Analog & Digital	18,07
	APOD PWM, 6 carrier	Analog & Digital	18,40
Penulis	SPWM Modifikasi, 3 carrier	Analog & Digital	11,6%

IV. KESIMPULAN

Metode SPWM yang telah dimodifikasi ini mampu meningkatkan nilai THD dari MLI satu fasa tujuh tingkat pada penelitian [3] dimana rangkaian pensaklaran yang digunakan masih berupa komponen elektronika analog dan digital seperti pada penelitian sebelumnya.

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. D. Singh, K. B. Khanchandani, "Power Electronics", 2nd Ed, New Delhi, Tata McGraw Hill, 2007.

[2] M. H Rashid, "Power Electronics circuits, devices, and applications", 3th Ed, New Jersey, Person Prentice Hall, 2004.

[3] S. Umashankar, T. S. Sreedevi, V . G. Nithya, dan D. Vijayakumar, "A-New 7-Level Symmetric Multilevel Inverter with Minimum Number OF Switches", Hindawi Publishing Corporation, ISRN Electronics, Article ID 476876, Volume 2013.

[4] 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.

[5] A. Kumar, P. Bansal, " A Novel Symmetrical Multilevel Inverter Topology with Reduced Switching Devices Using Different PWM Techniques", IEEE Conference Publications, pp. 1-6, 2015.

[6] 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.

[7] J. Sabarad, G. H. Kulkarni, "Comparative Analysis of SPWM and SVPWM Techniques for Multilevel Inverter", IEEE Conference Publications, pp. 232-237, 2015.

[8] P. H. Zope, P. G. Bhangale, P. Sonare, S. R. Surlkar, "Design and Implementation of Carrier Based Sinusoidal PWM Inverter", International Journal of Advaced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, vol.1, issue.4, pp.230-236, Oct 2012.

[9] S. Vadhiraaj, K. N. Swamy, dan B.P .Divakar, "Generic SPWM Technique for Multilevel Inverter", IEEE Conference Publications, 2013.

[10] W. L. Cyril, "Power Electronics", 3th Ed, London, Mc Graw- Hill, 1993.

[11] Data sheet FLUKE 43B, Available: <https://www.instrumart.com/assets/Fluke-43B-Datasheet.pdf>