Rancang Bangun Modul *Phase-Shifted Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) Tiga Tingkat

Muhammad Wafi Fakhrul Aiman[1], Nanang Mulyono[2], Febi Ariefka Septian Putra[3]

[1,2,3] Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40559
E-mail : muhammad.wafi.tlis21@polban.ac.id
E-mail : nanang.mulyono@polban.ac.id
E-mail : febi.ariefka@polban.ac.id

ABSTRAK

Sumber energi yang terbarukan menjadi salah satu kebutuhan yang diperlukan oleh kehidupan manusia. Pasokan dari energi listrik terbarukan salah satunya berupa tegangan *output* arus searah (DC). Pada kehidupan sehari-hari maupun industri cenderung menggunakan arus bolak-balik (AC). Karena hal tersebut untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC dapat menggunakan perangkat elektronik inverter. Inverter dapat dibedakan menjadi dua jenis struktur yaitu inverter konvensional dan inverter modern. Pada kenyataanya inverter konvensional THD yang dihasilkan lebih besar dibandingkan inverter modern. Begitu juga dengan inverter modern efisiensi yang dihasilkan lebih tinggi dibanding inverter konvensional. Oleh karena itu permasalahan utama pada inverter yaitu nilai tegangan *output* THD yang relatif besar besarnya THD dapat dipengaruhi oleh Teknik *switching* yang digunakan. Oleh karena itu pada artikel ini akan merancang dan membuat modul penyulutan inverter multilevel yang menggunakan *switching Phase-Shifted* SPWM. Dengan hasil yang diharapkan mampu menghasilkan *output* gelombang *Phase-Shifted Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) dengan keluaran gelombang pwm dengan frekuensi 62.85Hz-626Hz dan amplitudo 10V-14.8V.

Kata Kunci
Inverter, SPWM, Multilevel, Penyulutan, Penggeser Fasa, Switching

ABSTRACT

Renewable energy sources are one of the needs required by human life. One of the supplies of renewable electrical energy is in the form of direct current (DC) output voltage. In everyday life and industry tend to use alternating current (AC). Because of this to convert DC voltage into AC voltage can use inverter electronic devices. Inverters can be divided into two types of structures, namely conventional inverters and modern inverters. In fact, the conventional inverter THD produced is greater than the modern inverter. Likewise, modern inverters produce higher efficiency than conventional inverters. Therefore, the main problem in the inverter is the relatively large THD output voltage value, the magnitude of THD can be influenced by the switching technique used. Therefore, this article will design and make a mosfet ignition module for multilevel inverters that use Phase Shifted SPWM switching. With the expected results of being able to produce Phase-Shifted Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) wave output pwm wave output with frequency of 62.85Hz-626Hz with amplitude of 10V-14.8V.

Keywords
Inverter, SPWM, Multilevel, Starting, Phase Shifted, Switching.

1. PENDAHULUAN

Inverter merupakan rangkaian elektronika yang berfungsi untuk mengubah sumber tegangan arus searah DC (*Dirrect Current*) menjadi tegangan arus bolak-balik AC (*Alternating Current*). Inverter diaplikasikan dalam kehidupan sehari-hari seperti, pengatur kecepatan motor induksi, dan masih banyak lagi [1]. Untuk mengendalikan inverter digunakan teknik *switching*, yaitu PWM digunakan untuk modulasi lebar pulsa. Teknik PWM dapat menghasilkan THD yang lebih rendah, daya yang hilang akibat *switching*, dan harmonik yang lebih baik [2]. Terdapat banyak

jenis teknik PWM yang dapat diaplikasikan pada inverter diantaranya, *Single pulse width modulation* (PWM), *Multiple-pulse width modulation* (MPWM), dan *Sinusoidal Pulsewidth Modulation* (SPWM). Teknik *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) membandingkan sinyal referensi yang berbentuk sinusoidal dengan sinyal carrier yang berbentuk segitiga, frekuensi tegangan *output* dipengaruhi oleh frekuensi modulasi [3].

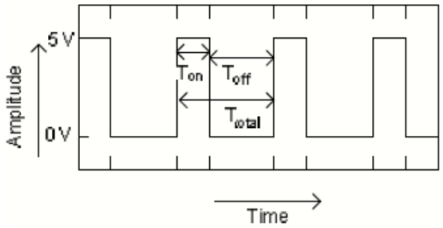
Dari penelitian ini menyajikan model inverter bertingkat menggunakan Cascaded H-Bridge 7 tingkat untuk mengurangi distorsi harmonik total pada inverter DC-AC. Dua teknik modulasi lebar pulsa sinusoidal yang berbeda, yaitu disposisi fase dan disposisi oposisi fase, dieksplorasi dan dibandingkan. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Matlab/Simulink untuk menganalisis dan memverifikasi kinerja inverter bertingkat satu fasa. Hasil simulasi menunjukkan bahwa inverter multilevel H-Bridge 7 tingkat dengan teknik disposisi fase menghasilkan distorsi harmonik total yang lebih rendah dibandingkan dengan teknik disposisi oposisi fase. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan disposisi fase pada modulasi lebar pulsa sinusoidal dapat meningkatkan kualitas keluaran inverter dengan mengurangi distorsi harmonik, sesuai dengan kebutuhan aplikasi di bidang energi listrik yang memerlukan kualitas sinyal AC yang tinggi [4].

Dari penelitian ini membahas karakteristik MMC saat menerapkan PSC-SPWM, mengkaji redaman harmonik tegangan output dan arus sirkulasi berdasarkan implementasi PSC-SPWM dengan dua derajat kebebasan dalam perpindahan fase pembawa. Lima skema PSC-SPWM yang berbeda dievaluasi dengan variasi fase pembawa, memberikan analisis komparatif tentang kinerja tegangan output dan karakteristik harmonik arus sirkulasi. Selain itu, dengan menggunakan model transformator ideal, makalah ini juga memeriksa dampak skema PSC-SPWM terhadap tegangan kapasitor. Skema PSC-SPWM yang diusulkan mengintegrasikan konfigurasi SM ganjil dan genap untuk meminimalkan tegangan output dan harmonisa arus. Skema optimal untuk MMC diverifikasi melalui simulasi dan eksperimen prototipe [5].
Dari penelitian ini memberikan kontribusi dalam dua tahap. Pertama, pengembangan modulasi SPWM yang lebih efektif untuk desain inverter tiga tingkat. Kedua, evaluasi kinerja Total Harmonic Distortion (THD) di bawah berbagai kondisi beban menggunakan pengukuran V-I. THD adalah parameter kritis yang hadir dalam sistem akibat penggunaan sakelar. Makalah ini mengevaluasi peningkatan kinerja inverter bertingkat berbasis SPWM yang diusulkan. Penelitian menunjukkan variasi indeks modulasi dari blok SPWM untuk meningkatkan kinerja. Laporan juga menyajikan perbandingan bentuk gelombang keluaran arus dan tegangan, dengan analisis FFT untuk mengevaluasi THD. Dalam kesimpulannya, peningkatan kinerja SPWM dan kondisi operasional dapat signifikan meningkatkan kinerja THD [6].
Hasil yang diharapkan dari penelitian ini mencakup kemampuan untuk menghasilkan sinyal PWM sebagai penyulut inverter dengan bentuk sinusoidal yang mendekati sempurna, serta kemampuan untuk mengatur frekuensi *output* sesuai dengan aplikasi yang diinginkan.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Modulasi Lebar Pulsa

PWM adalah teknik yang digunakan untuk menghasilkan sinyal output dengan periode berulang antara tinggi dan rendah, di mana durasi masing-masing periode dapat dikendalikan sesuai kebutuhan. Duty cycle dalam PWM merupakan persentase dari periode sinyal tinggi terhadap periode total, yang secara langsung mempengaruhi tegangan rata-rata yang dihasilkan [7]. Modulasi lebar pulsa dapat dilakukan menggunakan gelombang kotak, di mana siklus kerja atau duty cycle-nya dapat diubah-ubah untuk mengatur tegangan output yang variabel, yaitu nilai rata-rata dari gelombang tersebut.



Gambar 1 Bentuk Gelombang Pulsa

Pulsa PWM dihasilkan melalui perbandingan antara sinyal referensi (Vref) dan sinyal kontrol (Vcont). Sinyal PWM ini digunakan untuk mengatur durasi Ton (waktu sinyal tinggi) dan Toff (waktu sinyal rendah), yang masing-masing mewakili posisi output tegangan tinggi (1) dan rendah (0). Ttotal merupakan total waktu dari satu siklus PWM, yaitu hasil penjumlahan antara Ton dan Toff, yang juga dikenal sebagai periode gelombang.

$$Ttotal = Ton + Toff \quad (1)$$

Siklus kerja atau duty cycle sebuah gelombang di definisikan dengan persamaan 2

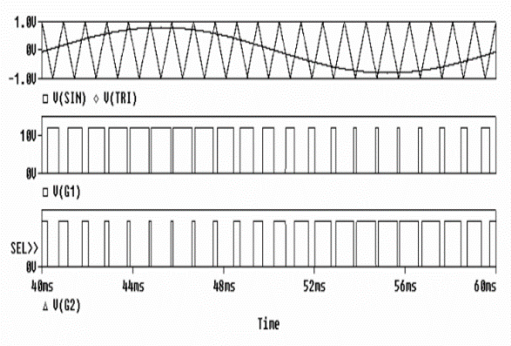
$$D = \frac{Ton}{Ton+Toff} = \frac{Ton}{Ttotal} \quad (2)$$

Tegangan output dapat bervariasi dengan duty cycle dan dapat dirumuskan dalam persamaan 3

$$Vout = D \times Vin = \frac{Ton}{Ton+Toff} \quad (3)$$

2.1.1 Modulasi Lebar Pulsa Sinusoidal

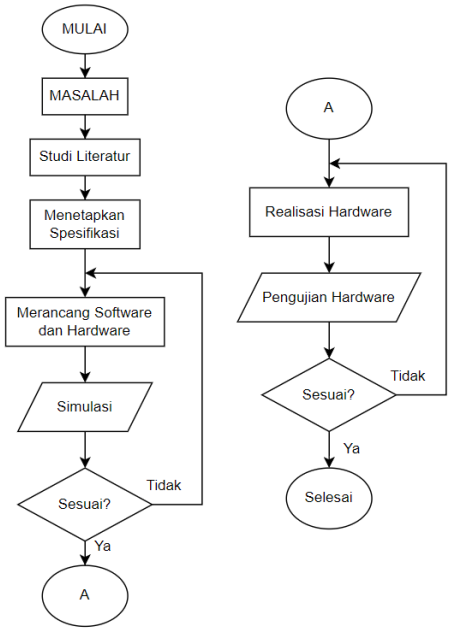
Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) adalah teknik switching yang membandingkan gelombang sinusoidal sebagai sinyal referensi dengan gelombang segitiga sebagai sinyal carrier. Parameter penting dalam SPWM meliputi frekuensi sinyal referensi (fr), frekuensi output (Fo), amplitudo puncak (Ar), dan indeks modulasi (m). Indeks modulasi (M), yang merupakan rasio amplitudo gelombang sinusoidal terhadap gelombang segitiga, mengontrol tegangan keluaran efektif (Vo) [8].



Gambar 2 Sistem Modulasi Lebar Pulsa Sinusoidal

Metode SPWM dapat dibedakan menjadi SPWM bipolar dan unipolar, di mana pulsa keluaran dikendalikan oleh tegangan sinyal carrier untuk mengatur frekuensi SPWM, dan tegangan sinyal reference untuk mengatur lebar pulsa SPWM. Pembangkit sinyal SPWM 3 fasa menggunakan rangkaian analog, dimana terdapat tiga sinyal reference dengan fase berbeda sebesar 120° dan satu sinyal carrier dengan bentuk gelombang segitiga. Karakteristik SPWM meliputi kemampuan untuk menghasilkan sinyal sinusoidal dengan frekuensi dan tegangan yang variabel, serta mampu mengkompensasi harmonisa. Namun, penggunaan frekuensi rendah dalam SPWM dapat menghasilkan kerugian akibat distorsi harmonisa. Secara keseluruhan, SPWM merupakan teknik modulasi yang efektif untuk menghasilkan sinyal keluaran inverter yang stabil dan dapat disesuaikan, dengan kemampuan untuk mengurangi distorsi harmonik serta kompensasi frekuensi yang variable.

2.2 Diagram Blok

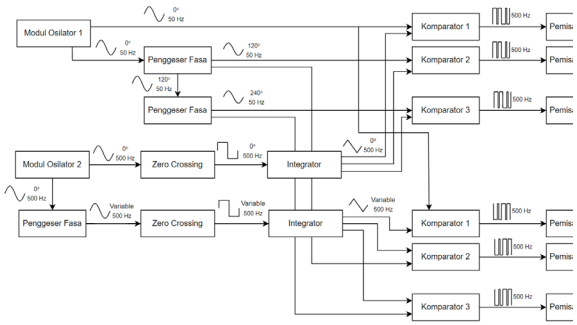


Gambar 3 *Flowchart* Perancangan Sistem

Dalam melakukan tahap perancangan, terdapat tahapan yang harus dilakukan secara sistematis agar alat dapat terselesaikan sesuai dengan rencana, yaitu:

1. Membuat deskripsi kerja pada sistem beserta spesifikasinya.
2. Membuat diagram blok pada sistem.
3. Membuat perancangan perangkat lunak.
4. Melakukan simulasi perangkat lunak.
5. Membuat perancangan perangkat keras.
6. Merealisasikan perancangan perangkat keras.
7. Melakukan pengujian alat.

Gambar 2 menunjukan diagram blok pada modul *Phase-Shifted Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) tiga fasa.



Gambar 4 Diagram Blok Perancangan Sistem

Pada penyulutan modul Phase Shifter Sinusoidal Width Modulation (SPWM) memiliki modul yang dirancang. *Sinusoidal pulse width modulation* menggunakan sinyal sinusoidal dengan frekuensi tetap sebesar 50Hz sebagai *reference* dan 2 sinyal sinuisoidal yang dibangkitkan kemudian salah satu sinyal digeser dan diubah ke bentuk segitiga menggunakan modul *zero crossing* dan integrator dengan frekuensi variabel sebagai *carrier*. Sinyal *reference* dan *carrier* dibangun dari modul osilator berbasis IC (*Integrated Circuit*). Sinyal tersebut dibandingkan menggunakan komparator sehingga dihasilkan sinyal kotak yang sebelumnya telah dipecah menjadi 3 fasa dengan beda antar fasa sebesar 0°, 120°, dan 240°. Sinyal tersebut dimasukan ke rangkaian beda polaritas yang dibedakan pulsa pada siklus positif dan pada siklus negatif yang menghasilkan *output* sinyal PWM sehingga berfungsi sebagai penyulutan untuk menjalankan rangkaian inverter.

2.2.1 Modul Penggeser Fasa

Phase-shifter merupakan rangkaian elektronika yang menggunakan op-amp sebagai penguat inverting, serta resistor dan kapasitor dengan nilai tertentu untuk menghasilkan pergeseran sudut fasa pada gelombang elektromagnetik. Tujuannya adalah untuk memodifikasi sudut fasa tanpa mengubah amplitudo gelombang. Rangkaian ini berguna untuk meningkatkan faktor daya dari beban dengan mencapai nilai faktor daya yang optimal [9]. Nilai resistor dan kapasitor dipilih dengan cermat untuk mencapai sudut fasa yang diinginkan, yang dapat diatur melalui variabel resistor (Ri) dan kapasitor (C). Frekuensi sinyal juga memengaruhi pergeseran fasa yang dihasilkan oleh rangkaian ini.

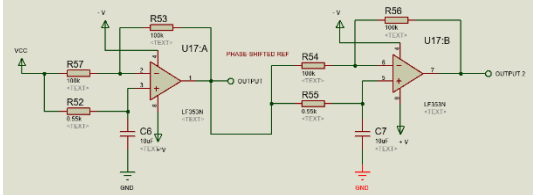
Dalam menentukan besaran nilai resistor yang diserikan dengan nilai kapasitor (Ci) sebesar 10µF, frekuensi 50 Hz dan sudut fasanya 120º dan 240º, maka dapat menggunakan persamaan dibawah

$$\theta = 2\arctan 2\ \pi f\ Ri\ Ci \quad (4)$$

$$120 = 2\ arctan\ 2\ \pi\ f\ Ri\ 10 \times 10^{-6}$$

$$Ri = \frac{arc\tan(\frac{120}{2})}{2\ x\ \pi\ x\ 50\ x\ 10\ x\ 10^{-6}}$$

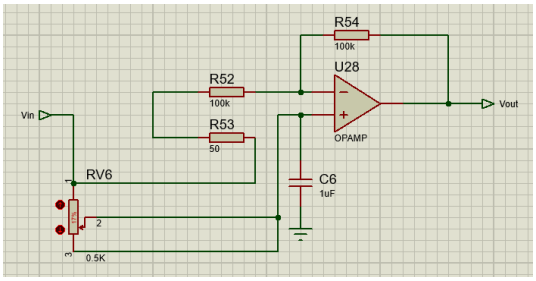
$$Ri = 0.55k$$



Gambar 5 Rangkaian Penggeser Fasa 120º dan 240º

Untuk menentukan nilai resistor dengan nilai kapasitor C sebesar 1uF dan besar sudut penggeseran fasa pada *carrier* yang dapat diatur pergeran fasanya dengan menentukan persamaan sebagai berikut:

Nilai resistor yang digunakan untuk penggeseran fasa sebesar 50 Ω dan potensio 0.5k Ω dan nilai kapasitor yang digunakan untuk penggeseran fasa sebesar 1uF. Resistor yang digunakan untuk penguatan perbandingan 1:1 sehingga nilai resistor yang digunakan sebesar 100K Ω



Gambar 6 Rangkaian Penggeser Fasa Carrier

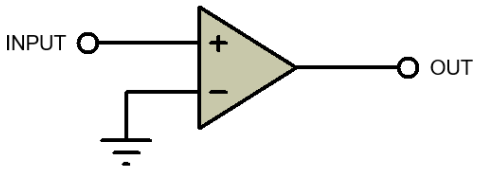
2.2.2 Modul *Zero Crossing Detector*

Modul *zero crossing detector* 3 fasa adalah rangkaian elektronika yang dirancang untuk menghasilkan sinyal kotak 3 fasa dengan perbedaan fase 120º antara setiap gelombangnya. Fungsi utama dari modul ini adalah untuk mendeteksi momen ketika tegangan AC melewati nilai nol pada siklusnya. Ketika ini terjadi, rangkaian akan menghasilkan keluaran berupa pulsa sempit melalui penggunaan OP-AMP, yang merupakan bagian dari rangkaian detector [10].

IC OP-AMP LM324N digunakan untuk mendeteksi persilangan nol pada tegangan AC. Ketika tegangan melewati nol, IC menghasilkan

pulsa singkat sebagai responsnya. Keluaran dari modul zero crossing detector ini kemudian digunakan sebagai input untuk Modul Konverter Sinyal Kotak ke Sinusoidal 3 Fasa. Pentingnya gelombang kotak 3 fasa yang memiliki fase yang berbeda 120º adalah untuk memastikan bahwa dalam proses konversi, sinyal output yang dihasilkan menjadi sinusoidal 3 fasa, sesuai dengan kebutuhan aplikasi elektronik yang menggunakan inverter atau sistem lain yang membutuhkan sinyal sinusoidal sebagai input [11].

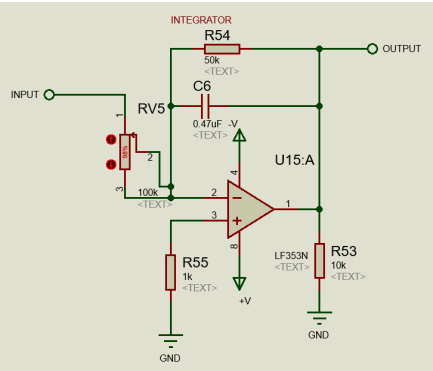
\



Gambar 7 Rangkaian *Zero Crossing Detector*

2.2.3 Modul Integrator

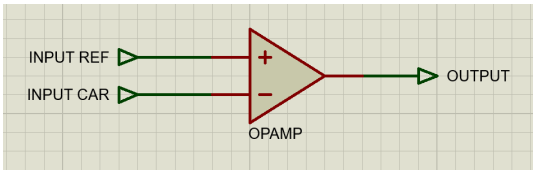
Rangkaian integrator merupakan modul rangkaian dalam bidang elektronika yang berfungsi sebagai prosesor sinyal input dengan menghasilkan keluaran berupa sinyal segitiga dari sinyal masukan. Fungsi utamanya adalah menjalankan operasi matematis yang disebut integrasi terhadap sinyal input terhadap waktu. Integrasi sinyal merujuk pada proses matematis di mana hasil integral dari sinyal input terhadap waktu diperoleh sebagai keluaran. Secara khusus, rangkaian integrator menggunakan komponen seperti kapasitor dan resistor untuk menciptakan efek integrasi ini. Kapasitor di dalam rangkaian mengumpulkan muatan seiring dengan variasi tegangan masukan, yang kemudian dikontrol oleh nilai resistor untuk menentukan tingkat integrasi yang diinginkan [12]. Penerapan integrator dalam konteks elektronika memiliki manfaat yang signifikan dalam berbagai aplikasi, seperti modulasi sinyal, pemrosesan sinyal analog, dan sistem pengendalian. Dalam implementasinya, penyesuaian nilai resistor dan kapasitor yang tepat sangat penting untuk mencapai karakteristik integrasi yang diinginkan, serta untuk menjaga kestabilan dan kinerja operasional rangkaian integrator tersebut.



Gambar 8 Rangkaian Integrator

2.2.4 Modul Komparator

Komparator adalah suatu rangkaian penguat yang menggunakan operasional amplifier (op-amp) untuk membandingkan dua tegangan masukan, yaitu tegangan non-pembalik (non-inverting) dan tegangan pembalik (inverting). Prinsip kerja komparator didasarkan pada perbandingan antara tegangan non-inverting dan inverting [13], hasil perbandingan ini ditranslasikan menjadi keluaran yang menunjukkan apakah tegangan non-inverting lebih tinggi atau lebih rendah dari tegangan inverting.



Gambar 9 Rangkaian Komparator

Secara umum, op-amp dalam rangkaian komparator dioperasikan dalam kisaran tegangan suplai ±Vs, di mana Vs adalah tegangan suplai. Tegangan Vs biasanya ditentukan oleh kebutuhan aplikasi, misalnya ±12 V. Op-amp dalam komparator biasanya digunakan tanpa umpan balik resistor, yang berarti tegangan keluaran op-amp akan segera beradaptasi untuk mencocokkan perbandingan antara tegangan non-inverting dan inverting. Operasi komparator dimulai dengan membandingkan tegangan pada terminal non-inverting (+V) dan inverting (-V) op-amp. Jika tegangan non-inverting lebih tinggi dari tegangan inverting, maka keluaran komparator akan menghasilkan tegangan yang mendekati Vs positif. Sebaliknya, jika tegangan non-inverting lebih rendah dari tegangan inverting, keluaran komparator akan mendekati Vs negative [14].

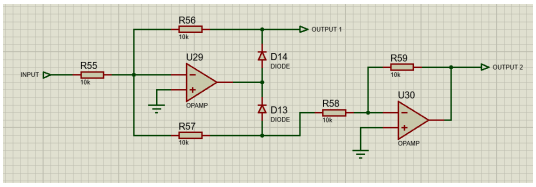
2.2.5 Pemisah Modul Polaritas

Modul pemisah polaritas (beda polaritas) 3 fasa seperti ditunjukan pada gambar 9 ini berfungsi untuk menghasilkan sinyal pulsa atau sinyal *pulse width modulation* 3 fasa dengan polaritas berbeda yang berbeda 120º, dimana rangkaian modul pemisah polaritas (beda polaritas) 3 fasa ini disusun dengan menggunakan komponen resistor, diode, dan IC OP-AMP LM324N.

Untuk nilai tegangan *output* dari komparator dilakukan dengan menentukan nilai resistor Rf (R referensi) dan Rin (R input) [15]. Penguatan (*gain*) menggunakan resistor 10 KΩ untuk mendapatkan perbandingan 1:1 antara *input* dan *output* menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Acl = \frac{Rf}{Ri} \quad (5)$$

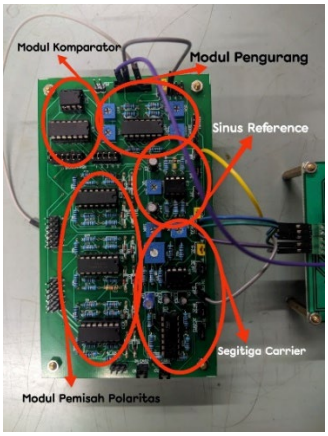
$$1 = \frac{10k\Omega}{10k\Omega}$$



Gambar 10 Rangkaian Pemisah Polaritas

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada gambar 10 dibawah ini merupakan gambar realisasi dari keseluruhan system modul *phase-shifted pulse width modulation*. Untuk mengambil data pada keseluruhan sistem ini diambil dengan menggunakan oscilloscope digital.

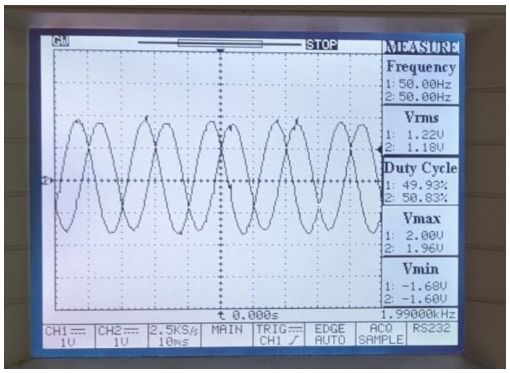


Gambar 11 Realisasi Modul *Phase-Shifted Sinusoidal Pulse Width Modulation*

Pada gambar 9 diatas menunjukan bagaimana alat ini dirangkai dari yang pertama pada sinyal carrier dengan frekuensi 500Hz melewati modul penggeser fasa variabel outputnya disambungkan ke input modul *zero crossing detector*, lalu output dari modul *zero crossing detector* ke input modul integrator, lalu output modul integrator, kemudian output modul integrator masuk ke input modul kompartor pada input negatif (-), output sinyal reference sinusoidal dengan frekuensi 50Hz masuk ke modul penggeser fasa 0º, 120º, 240º output dari penggeser fasa masuk ke input modul komparator pada input bagian positif (+). Kemudian output modul komparator disambungkan ke input pemisah polaritas.

3.1 Pengujian Modul Penggeser Fasa

Bentuk gelombang sinyal reference setelah yang sudah digeser 120º dapat dilihat pada Gambar 11, gelombang ini selanjutnya digeser lagi 120º agar bisa menghasilkan sinyal sinusoidal 3 fasa. Sementara untuk sinyal carrier pergeseran fasanya variable, dan output dari pergeseran fasa variable masuk ke input modul *zero crossing detector.*



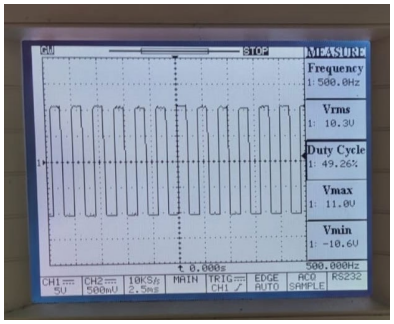
Gambar 12 Gelombang Sinus 120º Reference

Tabel 1 Output Penggeser Fasa Sinyal Reference

Beda Pergeser-an Fasa (°)	Fa-sa	Vm-ax (V)	Vm-in (V)	Freku-ensi (Hz)
120	R	1.92	-1.84	50
120	S	1.88	-1.76	49.77
240	R	2	-1.68	50
240	T	1.96	-1.68	50
120	S	2.36	-1.76	49.75
120	T	1.98	-1.68	49.60

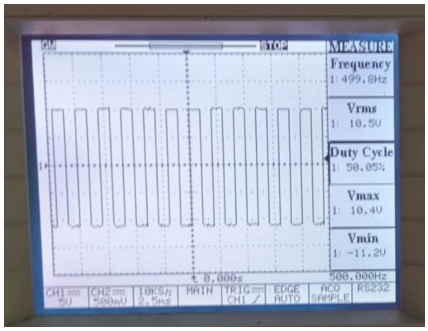
3.2 Pengujian Modul *Zero Crossing Detector*

Hasil pengukuran pada rangkaian ini dapat dilihat pada Gambar 12 *Zero Crossing Detector* dan Gambar 13. Selanjutnya output sinyal *Zero Crossing Detector* ini akan disambungkan ke input modul integrator.



Gambar 13 Gelombang Zero Crossing Carrier 1

Pada hasil pengujian modul *zero crossing* diatas sinyal kotak terbentuk dari perioda pada jaringan jala-jala dengan tegangan input maksimum dengan memperoleh Vmax 11V dan Vmin -10.6V dengan frekuensi 500Hz.

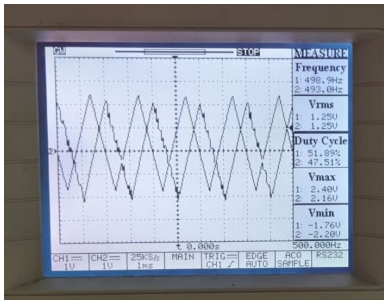


Gambar 14 Gelombang *Zero Crossing* Carrier 2

Pada hasil pengujian modul *zero crossing* diatas sinyal kotak terbentuk dari perioda pada jaringan jala-jala dengan tegangan input maksimum dengan memperoleh Vmax 10.4V dan Vmin -11.2V dengan frekuensi 499Hz.

3.3 Integrator

Pengujian ini dilakukan untuk mengkonfirmasi hasil dari modul integrator yang mengubah sinyal kotak 500 Hz menjadi sinyal segitiga dengan kontrol amplitudo. Pada Gambar 14 hasil pengujian yang ditampilkan pada oscilloscope menunjukkan bahwa setelah proses integrasi, output yang dihasilkan sesuai dengan karakteristik sinyal segitiga yang diinginkan.

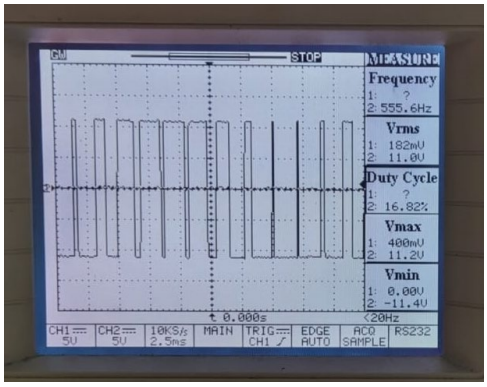


Gambar 15 Gelombang Modul Integrator Carrier 1&2

Pada gambar 15 merupakan hasil akhir dari pembentukan sinyal carrier dengan bentuk gelombang segitiga dengan gelombang *input* sinusoidal yang diubah melalui beberapa modul yaitu modul penggeser fasa variable, modul *zero crossing* dan modul integrator, sehingga terbentuk sinyal segitiga dengan salah satu carriernya menggunakan metode Phase Shifted.

3.4 Komparator

Pengujian ini bertujuan untuk mengidentifikasi gelombang keluaran dari modul komparator yang telah dirancang. Modul ini mengambil sinyal sinusoidal referensi berfrekuensi 50 Hz sebagai input, dan membandingkannya dengan sinyal segitiga carrier berfrekuensi 500 Hz. Tujuannya adalah untuk menghasilkan sinyal keluaran berbentuk sinyal pwm dari modul komparator.



Gambar 16 Gelombang Komparator 1

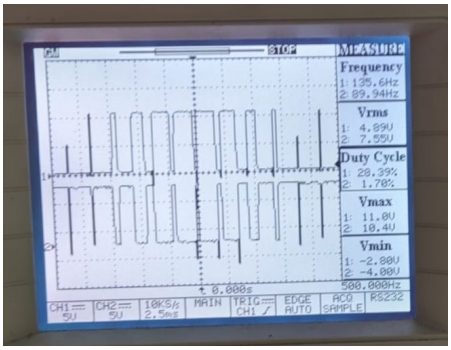
Dari hasil pengujian modul komparator diatas merupakan hasil sinyal sinusoidal R *reference* dengan sinyal segitiga *carrier* 1 yang sudah dibandingkan. Maka hasil yang diperoleh dari hasil perbandingan tersebut berupa sinyal kotak dengan Vmax 11.2V dan Vmin -11.4V frekuensi 555.6 Hz.

Tabel 2 Output Modul Komparator

Penguji-an	Perban-dingan Sinyal	Vmax (V)	Vmin (V)	Freku-ensi (Hz)
1	R – *Carrier 1*	11.2	-11.4	555.6
2	S – *Carrier 1*	11.2	-11.6	555.6
3	T – *Carrier 1*	11.2	-11.6	526.3
4	R – *Carrier 2*	11.2	-11.6	558.6
5	S – *Carrier 2*	11.8	-10.8	553.1
6	T – *Carrier 2*	11.8	-10,8	555.5

3.5 Pemisah Polaritas

Pengujian ini bertujuan agar mengetahui gelombang keluaran dari modul pemisah polaritas yang telah direalisasikan yaitu berupa gelombang kotak yang sudah dipisahkan polaritasnya, yang berasal dari sinyal carrier *Phase Shifter* dan sinusoidal *reference.* Sehingga sinyal dapat bekerja pada siklus positif dan juga siklus negatif.



Gambar 17 Gelombang PWM 1&2

Dari hasil pengujian pemisah polaritas dapat dilihat dengan memperoleh gelombang kotak yang polaritasnya sudah dipisahkan sehingga sinyal bekerja pada siklus positif dan siklus negatif. Dengan polaritas 1 memiliki Vmax 11V dan Vmin -2.8V frekuensi 135.6Hz, polaritas 2 memiliki Vmax 10.4V dan Vmin -4V frekuensi 89.94Hz

Tabel 3 Pengujian Modul Pemisah Polaritas

Polaritas	Vmax (V)	Vmin (V)	Frekuensi (Hz)
1	11	-2.8	135.6
2	10.4	-4	89,94
3	11	-2.6	62.85
4	10.6	-2.4	558.8
5	11	-3.4	436.7
6	10.4	-3.4	217.8
7	11	-3.2	562.1
8	10.4	-4.4	284.7
9	10.4	-1.6	496.6
10	10.6	-1.2	496.1
11	10.4	-2.8	626
12	10	0	122

KESIMPULAN

Telah berhasil dirancang dan dirakit modul *Phase-Shifted* SPWM. Modul ini menghasilkan sinyal penyulut presisi untuk inverter 3 fasa, fokus pada kontrol fase untuk mengurangi distorsi harmonik dan meningkatkan efisiensi energi. Sinyal referensi sinusoidal 50Hz dan sinyal carrier segitiga 500Hz dengan *phase-shifted* telah berhasil dibangkitkan untuk optimalisasi karakteristik output. Modul menghasilkan gelombang PWM dengan frekuensi 62.85Hz-626Hz dan amplitudo 10V-14.8V, memberikan fleksibilitas dalam mengatur tegangan dan frekuensi output inverter. Dengan demikian, modul penyulut ini merupakan langkah penting untuk meningkatkan kinerja inverter multilevel dalam aplikasi yang membutuhkan stabilitas dan kualitas daya yang tinggi. Pengembangan yang akan dilakukan dipenelitian selanjutnya, penulis memberi saran yang pertama adalah menentukan komponen yang tepat untuk memaksimalkan output yang dihasilkan dari setiap modul, selanjutnya pembuatan inverter multilevel 3 fasa dengan menggunakan metode *Phase-Shifted* SPWM.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Politeknik Negeri Bandung melalui dosen pengajar yang telah memberikan bimbingan serta pengetahuan lebih sehingga penulis bisa menyelesaikan karya ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Moez Youssef, "*Simulation and Design of A Single Phase Inverter with Digital PWM Issued by An Arduino Board," International Journal of Engineering Research and*, vol. V9, no. 08, Aug. 2020, doi: 10.17577/IJERTV9IS080237.

[2] N. Sihombing, N. Mulyono, D. Septiyanto, "Rancang Bangun Modul *Discontinue Pulse Width Modulation*

(DPWM) Tiga Fasa," Prosiding SEMNASTERA (Seminar Nasional Teknologi dan Riset Terapan) Politeknik Sukabumi, 2021.

[3] "*Review of Different PWM Techniques*," 2018.

[4] W. M. Utomo, A. A. Bakar, S. Alias, S. S. Yi, M. I. Setiawan, S. W. Mudjanarko, A. Sukoco, M. B. Yonis and T. Taufik, "*Modeling of A Single Phase 7-Level Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter", International Journal of Engineering & Technology*, 7 (2.6) (2018) 327-330.

[5] Q. Cheng, C. Wang and J. Wang, "*Analysis on Displacement Angle of Phase-Shifted Carrier PWM for Modular Multilevel Converter". IEEE Energy Conversion Congress and Exposition* (ECCE), Baltimore, MD, USA, 2020; pp. 4801–4807.

[6] A. Sharma, A. Singhal, "*Designing of Three Level 3 Phase Inverter Using Improved SPWM Modulation for different Loads*" Turkish Journal of Computer and Mathematics Education Vol.12 No.3(2021), 4513-4520.

[7] E. J. Lee, K. B. Lee, "*Modulation Methods based on Phase-Shifted PWM for H- Bridge Multilevel Inverters*," IEEE , 2020.

[8] G. P. M. Wirsuyana, M. N. Habibi, N. A. Windarko, Suryono, "*Desain dan Simulasi UPS Multilevel Inverter Dengan Metode Modulasi Phase Disposition-PWM*", SEMESTA TEKNIKA Vol.23, No.1, 63-74, Mei 2020.

[9] A. S. Rahimi, A. Subki, Z. Manap, M. Z. Tumari, A. Z. Jidin, S. Saat, A. F. Z. Abidin, M. S. Saealal, "*Analysis On Three Phase Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter Based On Sinusoidal And Third Harmonic Injected Pulse Width Modulation Via Level Shifted And Phase Shifted Modulation Technique", International Journal of Power Electronics and Drive System* (IJPEDS) Vol. 12, No. 1, Mar 2021, pp. 160~169.

[10] L. Chaturvedi, D. K. Yadav, and G. Pancholi, "*Comparison of SPWM, THIPWM and PDPWM Technique Based Voltage Source Inverters For Application In Renewable Energy," Journal of Green Engineering*, vol. 7, no. 1–2, pp. 83–98, Jan. 2017, doi: 10.13052/jge1904-4720.7125.

[11] A. Vijayakumar, A. A. Stonier, P. Geno, A. K. Loganathan, V. Ganji, "*Power Quality Enhancement In Asymmetrical Cascaded Multilevelinverter Using Modified Carrier Level Shifted Pulse Width Modulation Approach*", 2022 IET Power Electronics, DOI: 10.1049/pel2.12429.

[12] L. Zhang, X. Wang, "*Influence of Carrier Phase Shifted SPWM on Output Voltage of Multilevel Converter for Rail Transit", Journal of Science and Technology in Transportation* Volume 1 Issue 1, 2020 ISSN: 2710-XXXX DOI: 10.XXXX/jstit.202002_1(1).0001.

[13] M. Revathi, M. Divya, Dr. K. Rama Sudha, "*A Modified Design of Multilevel Inverter Using Sinusoidal Pulse Width Modulation" Turkish Journal of Computer and Mathematics Education* Vol.12 No.10 (2021), 2165-2174.

[14] K. V. Kumar, A. Michael, J. P. John, and S. S. Kumar, "*Simulation and comparison of SPWM and SVPWM control for three phase inverter Spectrum Analysis of Sidebands in Industrial Drives View project Simulation And Comparison Of SPWM And SVPWM Control For Three Phase Inverter*," vol. 5, no. 7, 2010.

[15] Y. S. Kanigolla, A. C. Kiran, S. R. Teja, B. Jyothi, "*Reduced Switch Topologies For Multi Level Inverters With M-Carrier SPWM*", Journal of Critical Reviews ISSN- 2394-5125 Vol 7, Issue 2, 2020.