

Desain dan Implementasi Modul Bipolar *Third Harmonic Injection Pulse Width Modulation* (THPWM) untuk Inverter Tiga Fasa

Fani Prasetya Wahyudin¹, Nanang Mulyono², Dwi Septiyanto³
^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Bandung
Email: prasetyafani3@gmail.com

Received 29 Agustus 2023 / Revised 10 September 2023 / Accepted 15 September 2023

ABSTRAK

Pemanfaatan sumber energi terbarukan sedang dimaksimalkan penggunaannya dalam rangka menjaga ketersediaan energi listrik. Berdasarkan bentuk gelombangnya energi yang dihasilkan salah satunya berupa tegangan arus searah (DC). Sedangkan penggunaan energi listrik baik skala rumah tangga maupun industri menggunakan tegangan DC atau arus bulak-balik (AC). Tegangan DC tersebut dapat dikonversi menjadi tegangan AC menggunakan inverter. Penggunaan inverter menyebabkan nilai harmonisa tegangan yang tinggi pada jaringan listrik. Teknik switching yang tepat dapat mengurangi nilai harmonisa tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan modul yang dapat mengeluarkan sinyal untuk memicu inverter tiga fasa. Metode switching yang digunakan yaitu THPWM. Pembuatan desain hingga pengimplementasian modul THPWM dilakukan dengan cara pengolahan sinyal analog. THPWM tersebut bekerja dengan cara membandingkan sinyal carrier dan referensi. Sinyal referensi dibentuk seperti sinyal fundamental dan memiliki frekuensi lebih besar tiga kali dari sinyal fundamentalnya. Pada penelitian ini dihasilkan modul THPWM untuk inverter 3 fasa, memiliki output 6 sinyal THPWM, dengan frekuensi sinyal referensi dan carrier yang dapat divariasikan dengan eror < 5%, sinyal THPWM yang dihasilkan dapat diatur dari 50-1500 Hz dengan tegangan kerja 12 Volt DC.

Kata kunci: Frekuensi, Inverter, Polaritas, THPWM,

ABSTRACT

Utilization of renewable energy sources is being maximized in order to maintain the availability of electrical energy. Based on the waveform, the energy produced is one of them in the form of direct current (DC) voltage. While the use of electrical energy both on a household and industrial scale uses DC voltage or alternating current (AC). This DC voltage can be converted to AC voltage using an inverter. The use of inverters causes high voltage harmonic values in the power grid. Appropriate switching techniques can reduce the value of these harmonics. This study aims to produce a module that can output a signal to trigger a three-phase inverter. The switching method used is THPWM. Making the design to implementing the THPWM module is done by means of analog signal processing. The THPWM works by comparing carrier and reference signals. The reference signal is formed like a fundamental signal and has a frequency three times greater than the fundamental signal. In this study, a THPWM module was produced for a 3-phase inverter, which has an output of 6 THPWM signals, with a reference and carrier signal frequency that can be varied with an error < 5%, the resulting THPWM signal can be adjusted from 50-1500 Hz with a working voltage of 12 Volt DC.

Keywords: Frequency, Inverter, Polarity, THPWM

1. PENDAHULUAN

Berdasarkan data yang dikeluarkan oleh badan pusat statistik (BPS), penggunaan energi listrik satu dekade kebelakang terus mengalami peningkatan. Data terakhir yang dikeluarkan pada tahun 2020, konsumsi listrik mencapai 1,09 MWH/Kapita [1]. Peningkatan jumlah penggunaan energi ini, mengakibatkan banyak pihak yang mulai membangun sumber energi listrik terbarukan. Sumber energi listrik terbarukan diantaranya bersumber dari tenaga surya, biomassa, panas bumi, tenaga air, tenaga angin, ombak, dan pasang surut air laut. Berdasarkan dari bentuk gelombang yang dihasilkan diantaranya tegangan arus searah (DC) atau arus bolak-balik (AC). Tegangan tersebut banyak digunakan di industri dan rumah tangga. Tegangan DC dapat dikonversi menjadi tegangan AC menggunakan inverter. Penggunaan inverter dapat menyebabkan nilai harmonisa tegangan yang tinggi pada jaringan listrik. Penggunaan teknik *switching* yang tepat dapat mengurangi nilai harmonisa tersebut.

Merujuk pada beberapa penelitian sebelumnya terkait dengan perancangan inverter dengan teknik *Switching Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) [2, 3, 4, 5, 6], dan *Trapezium Pulse Width Modulation* (TPWM) [7, 8]. Kedua teknik tersebut memiliki nilai harmonik yang lebih rendah dibandingkan dengan teknik *switching* yang lainnya. Teknik *switching* dengan metode SPWM dan TPWM diperoleh dengan cara membandingkan sinyal referensi dan *carrier*. Pada penelitian perancangan inverter dengan teknik SPWM telah berhasil menghasilkan inverter 1 fasa dengan nilai frekuensi yang dapat divariasikan. Namun pada penelitian tersebut masih menghasilkan nilai THD yang tinggi sehingga masih diperlukan *filter* untuk mereduksi THD tersebut [3]. Pada penelitian lain berhasil merancang sebuah inverter berbasis SPWM menggunakan *zero crossing detector*. Penelitian tersebut berhasil menurunkan nilai THD yang sebelumnya 32% tanpa menggunakan *filter* menjadi 3,8-4,1% setelah menggunakan *filter*. Namun nilai tegangan pada *bus* DC inverter masih terbilang kecil jika ingin digunakan pada beban rumah tinggal [6]. Pada penelitian lain telah berhasil menghasilkan inverter satu fasa dengan teknik TPWM, namun nilai harmonisa yang dihasilkan masih terlampaui tinggi, sehingga diperlukan adanya filter aktif atau pasif [7]. Merujuk sebuah penelitian yang dilakukan dengan cara menambah sinyal referensi harmonisa ketiga dan kesembilan pada SPWM dengan menggunakan simulasi MATLAB. Tujuan menambahkan harmonisa ketiga dan harmonisa kesembilan pada penelitian tersebut adalah untuk meningkatkan pemanfaatan tegangan *bus* DC inverter. Dalam *bus* DC inverter memiliki nilai tegangan maksimum yang bisa digunakan. Pada sebuah kasus inverter SPWM memiliki nilai harmonisa tegangan sebesar 1,27 kali tegangan sumber. Setelah menambahkan harmonisa ketiga dan kesembilan diperoleh harmonisa tegangan 1,15 kali dari tegangan sumber [9].

Berdasarkan uraian diatas penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan modul yang dapat mengeluarkan sinyal untuk mentrigger mosfet pada inverter 3 fasa. Untuk menghasilkan *output* tersebut teknik modulasi lebar pulsa yang digunakan yaitu *Third Harmonic Injection Pulse Width Modulation* (THPWM). THPWM tersebut bekerja dengan cara membandingkan dua sinyal, yaitu sinyal *carrier* dan referensi. Sinyal referensi dibentuk seperti sinyal fundamental dan memiliki frekuensi lebih besar tiga kali dari sinyal fundamentalnya. Proses tersebut dilakukan dengan cara pengolahan sinyal analog.

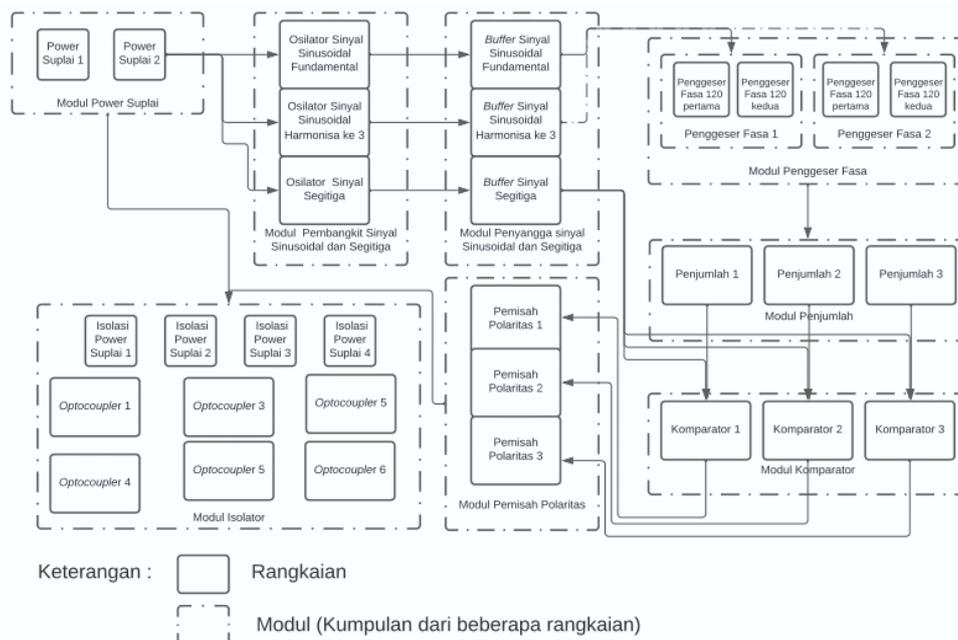
2. METODOLOGI

Pada penelitian ini dibuat modul bipolar THPWM untuk inverter 3 fasa. Modul ini dirancang dalam satu *printed circuit board* (PCB). PCB tersebut berisi 1 modul pembangkit sinyal analog dan 6 modul pengolah sinyal analog menjadi sinyal bipolar THPWM. Pembuatan modul ini terdiri dari proses perancangan dan pembuatan. Modul ini dirancang dengan beberapa karakteristik yang ditetapkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Karakteristik Modul THPWM

No	Spesifikasi	Nilai
1	Tegangan <i>input</i>	12-15 Volt DC
2	Frekuensi sinyal sinusoidal fundamental	40-100 Hz
3	Frekuensi sinyal sinusoidal harmonisa ketiga	53-314 Hz
4	Frekuensi sinyal segituga	50-1500 Hz
5	Tegangan <i>output</i> sinyal sinusoidal fundamental	3 Vpp
6	Tegangan <i>output</i> sinyal sinusoidal harmonisa ketiga	3 Vpp
7	Tegangan <i>output</i> sinyal segituga	4 Vpp
8	Frekuensi sinyal THPWM	50-1500 Hz
9	Tegangan kerja	± 12 Volt DC
10	<i>Margin error</i>	$\leq 5\%$

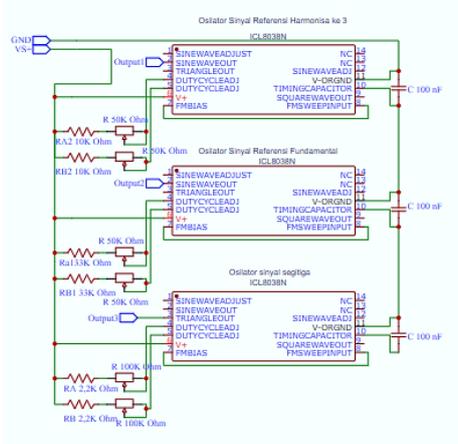
Gambar 1 merupakan diagram blok proses pengolahan sinyal modul bipolar THPWM untuk inverter 3 fasa. Modul tersebut terdiri dari 7 modul. Setiap modul memiliki fungsi masing-masing. Modul pembangkit memiliki fungsi sebagai penghasil sinyal sinusoidal dan sinyal segituga. Sinyal sinusoidal yang dihasilkan berupa sinyal sinusoidal referensi fundamental dan sinyal sinusoidal harmonisa ketiga. Modul penyangga sinyal segituga dan sinusoidal berfungsi untuk mempertahankan bentuk sinyal. Modul penggeser fasa berfungsi untuk menghasilkan sinyal sinusoidal referensi fundamental dan harmonisa ketiga yang bergeser fasa 120° dan 240° . Modul penjumlahan berfungsi untuk menjumlahkan sinyal sinusoidal fundamental dan sinyal sinusoidal harmonisa ketiga yang memiliki sudut fasa sama. Modul komparator berfungsi untuk menghasilkan sinyal kotak (Sinyal THPWM). Sinyal tersebut diperoleh dengan cara membandingkan sinyal referensi dan sinyal *carrier*. Modul pembeda polaritas berfungsi untuk membeda polaritaskan sinyal THPWM menjadi dua sinyal polaritas positif. Modul isolator berfungsi untuk mengisolasi sinyal THPWM. Pengolahan sinyal tersebut bersumber dari catu daya 12 volt DC dan sinyal keluaran merupakan *output* dari modul isolator (rangakaian *optocoupler*).



Gambar 1. Diagram Blok Perancangan Modul Bipolar THPWM Untuk Inverter 3 Fasa
 Sumber: Dokumentasi 2023

2.1 Modul Pembangkit Sinyal Sinusoidal dan Segitiga

Modul ini diharapkan dapat menghasilkan sinyal sesuai dengan karakteristik yang ada pada Tabel 1 no 1-7.



Gambar 2. Gambar Rangkaian Modul Pembangkit Sinyal Sinusoidal dan Segitiga

Sumber: Dokumentasi 2023

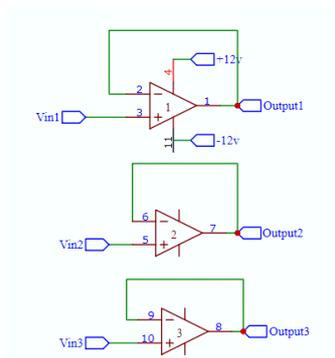
Modul pembangkit sinyal yang dirancang menggunakan rangkain terintegrasi berupa IC 8038. Untuk menghasilkan sinyal menggunakan IC 8038 dengan frekuensi yang diharapkan diperoleh dari perbandingan nilai R dan C. Perbandingan tersebut dihitung berdasarkan persamaan 1.

$$F = \frac{0,33}{R \times C} \dots\dots\dots(1)$$

Jika besar $R_A=R_B=R$, maka untuk menghasilkan sinyal segitiga dipilih R sebesar 2,2 kΩ (R_A dan R_B) trimpot 100 kΩ (R_1 dan R_2). Sinyal referensi sinusoidal dipilih R sebesar 33 kΩ (R_{A1} dan R_{B1}) dan trimpot 50 kΩ (R_3 dan R_4). Untuk membangkitkan sinyal sinusoidal harmonisa ketiga dipilih R sebesar 10 kΩ (R_{A2} dan R_{B2}) dan trimpot 50 kΩ (R_5 dan R_6). Nilai kapasitor (C, C_1 dan C_2) yang dipilih dalam rangkaian tersebut 100 nF.

2.2 Modul Penyangga Sinyal Sinusoidal dan Segitiga

Untuk membuat modul penyangga yang digunakan hanya sebuah Op-Amp dan sumber sinyal DC sebesar ± 12 Volt. Maka dipilihlah IC LM324, dalam IC tersebut terdapat 4 buah Op-Amp sehingga IC yang dibutuhkan 1 buah.



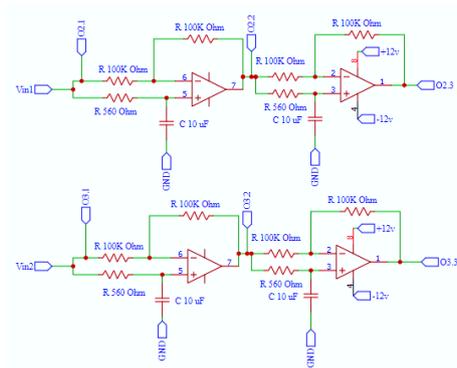
Gambar 3. Rangkaian Modul Penyangga Sinyal Sinusoidal dan Segitiga

Sumber: Dokumentasi 2023

2.3 Modul Penggeser Fasa

Modul ini diharapkan mampu menghasilkan sinyal referesi fundamental dan harmonisa ketiga yang memiliki sudut fasa 0° (Output 2.1 dan Output 3.1), 120° (Output 2.2 dan Output 3.2) dan 240° (Output 2.3 dan Output 3.3).

Rancang Bangun Modul Bipolar Third Harmonic Injection Pulse Width Modulation (THPWM) untuk Inverter 3 Fasa



Gambar 4. Rangkaian Modul Penggeser Fasa
Sumber: Dokumentasi 2023

Untuk menggeser sinyal sejauh 120° listrik dapat dilakukan dengan mengatur nilai R dan C, menggunakan Persamaan 2.

$$\theta = 2 \arctan 2 \pi F R_i C_i \dots \dots \dots (2)$$

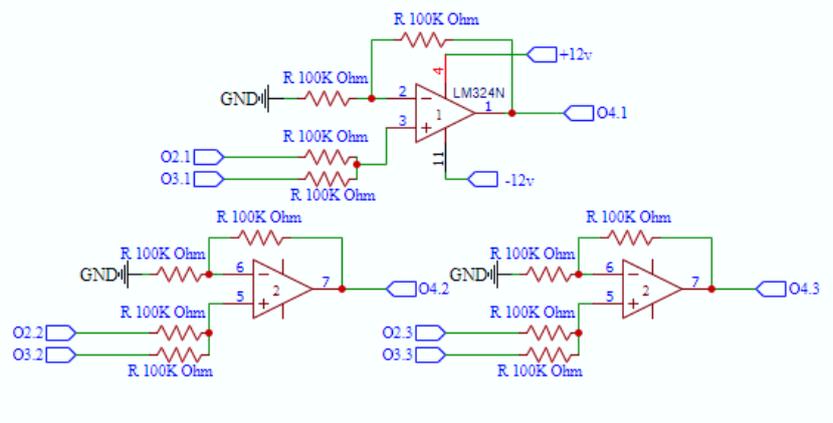
Dengan θ adalah besar sudut pergeseran, π tetapan besaran senilai 3,14, F adalah besar frekuensi jala-jala, R adalah resistansi, dan C adalah kapasitansi. Maka untuk menghasilkan modul dipilih nilai R_1 dan R_2 adalah 560 Ω dengan besar kapasitor C 10 μ F. Agar besar tegangan masuk sama dengan tegangan keluar, sesuai dengan Persamaan 3.

$$V_{out} = \frac{R_f}{R_{in}} V_{in} \dots \dots \dots (3)$$

Untuk menghasilkan perbandingan sama dengan satu maka nilai $R_f=R_{in}$, sehingga besar $R_A=R_B=R_{A'}=R_{B'}=R_{A1}=R_{B1}=R_{A1'}=R_{B1'}$ dipilih sama besar yaitu 100 k Ω .

2.4 Modul Penjumlah Non Inverting

Modul ini diharapkan menghasilkan sinyal penjumlahan yang sinyal *outputnya* tidak membalik.

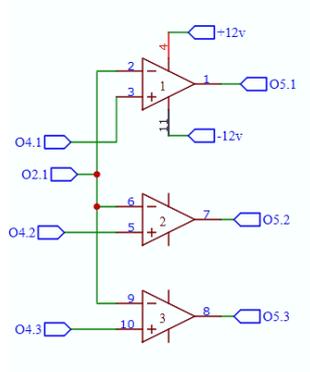


Gambar 5. Rangkaian Modul Penjumlah non Inverting
Sumber: Dokumentasi 2023

Untuk menghasilkan modul penjumlah *non inverting* yang memiliki besar penguatan sama dengan satu, sesuai dengan Persamaan 3 maka dipilih nilai R yang sama besar yaitu 10 k Ω .

2.5 Modul Komparator Sinyal Referensi dan Sinyal Carrier

Modul ini diharapkan mampu menghasilkan sinyal THPWM. Sinyal THPWM dihasilkan dengan cara membandingkan sinyal referensi dan *carrier*.

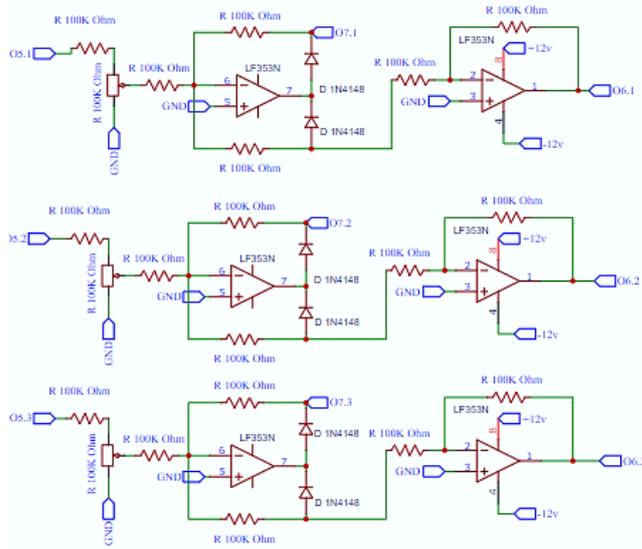


Gambar 6. Rangkaian Modul Komparator
Sumber: Dokumentasi 2023

Untuk menghasilkan modul ini dipilih IC LM 324 sebanyak 1 buah.

2.6 Modul Pemisah Polaritas

Modul ini diharapkan mampu menghasilkan sinyal THPWM yang memiliki polaritas positif. Juga memiliki tegangan *output* 5-8 Volt.



Gambar 7. Rangkaian Modul Pemisah Polaritas
Sumber: Dokumentasi 2023

Untuk menghasilkan modul pemisah polaritas dengan penguatan sama dengan satu, sesuai persamaan 3 maka dipilih nilai R yang sama besar yaitu 100 kΩ. Nilai tegangan *output* yang dihasilkan masih terlalu tinggi yaitu sebesar 13 Volt, maka dibuatlah *voltage divider* dengan besar penurunan tegangan sama dengan 50%. Untuk memperoleh hasil tersebut dapat dihitung dengan Persamaan 4.

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{in} \dots \dots \dots (4)$$

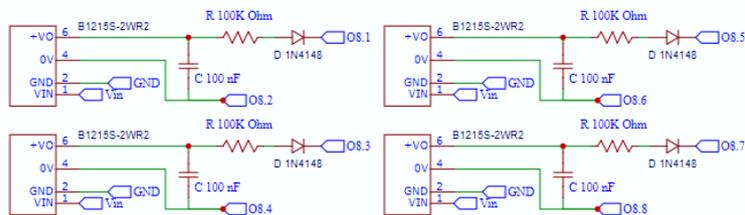
Sesuai persamaan 4 maka dipilih nilai R₁ dan R₂ yang sama besar yaitu 100 kΩ.

2.7 Modul Isolator

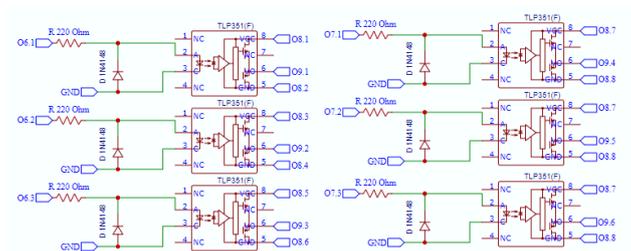
Modul ini diharapkan mampu mengisolasi sinyal THPWM. Sinyal THPWM yang dihasilkan diharapkan sesuai dengan spesifikasi pada tabel 1 no 8-10. Untuk mengisolasi tegangan masukan pada modul ini dapat dilakukan dengan mengatur nilai R maka sesuai dengan Persamaan 5.

$$R = \frac{V_s - V_f}{I_f} \dots \dots \dots (5)$$

Dengan nilai V_s (Reverse Voltage) adalah nilai tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh dioda saat terjadi reverse-bias. V_f (Forward Voltage) adalah nilai tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh dioda saat terjadi forward-bias. I_f adalah kondisi besar arus maksimum yang dapat terjadi ketika terjadi forward-bias. Sesuai dengan persamaan 5, dipilihlah besar resistor untuk rangkaian optocoupler sebesar 220 Ω . Besar resistor untuk rangkaian isolasi cattedaya dipilih sebesar 100 k Ω , dengan besar kapasitor 100 nF.



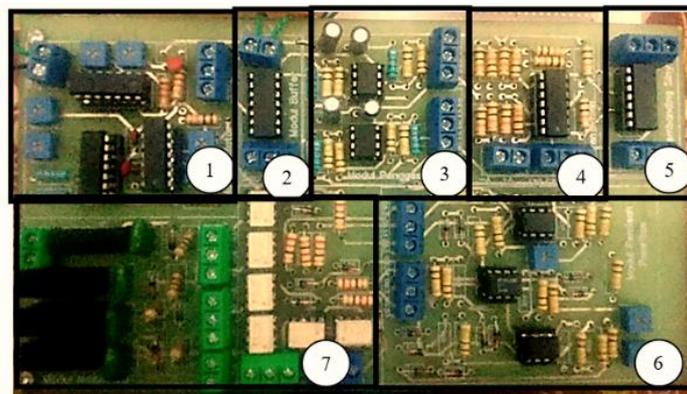
(a)



(b)

Gambar 8(a) Rangkaian Catu Daya Terisolasi 8(b) Rangkaian *Optocoupler*
Sumber: Dokumentasi 2023

Setelah melakukan tahapan pembuatan sesuai dengan proses diatas maka implementasi dari sitem yang dibuat dapat dilihat sesuai dengan Gambar 9.



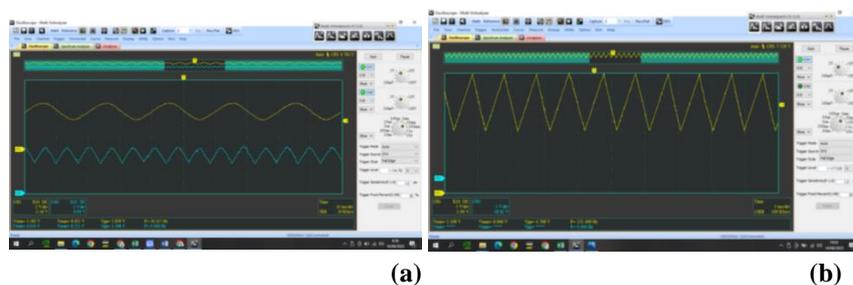
Gambar 9. Realisasi Modul THPWM

- (1) Modul Pembangkit Sinyal (2) Modul Penyangga (3) Modul Penggeser Fasa (4) Modul Penjumlah Non Inverting (5) Modul komparator (6) Modul Pemisah Polaritas (7) Modul Isolator.
 Sumber: Dokumentasi 2023

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Modul bipolar THPWM telah direalisasikan di uji secara langsung untuk dilihat karakteristik serta seberapa besar tingkat kesalahannya. Pengujian gelombang dan frekuensi gelombang keluaran dilakukan dengan menggunakan PC osiloskop. Pengujian tegangan keluaran menggunakan multimeter.

3.1 Modul Pembangkit Sinyal Sinusoidal dan Sinyal Segitiga



Gambar 10. Gelombang Hasil Modul Pembangkit Sinyal
 Sumber: Dokumentasi 2023

Berdasarkan Gambar 10(a) ditunjukkan bahwa pada *channel* satu (berwarna kuning) merupakan gelombang keluaran modul pembangkit sinyal sinusoidal dengan frekuensi 50 Hz (Sinyal referensi fundamental) dan tegangan V_{pp} 2,8 Volt. Gambar pada *channel* dua (berwarna biru) merupakan gelombang keluaran modul pembangkit sinyal sinusoidal dengan frekuensi 150 Hz (Sinyal referensi harmonisa ketiga) dan tegangan V_{pp} 2,9 Volt. Gambar 10(b) merupakan gelombang keluaran modul pembangkit sinyal segitiga dengan tegangan yang dihasilkan V_{pp} 4,8 Volt dan frekuensi 620 Hz. Ketiga sinyal tersebut memiliki frekuensi variabel sesuai dengan Tabel 2 hingga Tabel 4.

Tabel 2. Hasil Pengujian Modul Pembangkit Sinyal Sinusoidal Fundamental

No	R (kΩ)	Kapasitor (nF)	Frekuensi		Error %
			Hasil Perhitungan (Hz)	Hasil Pengukuran (Hz)	
1	33,1	100	99,69	98,12	1,61
2	34,1	100	96,77	94,97	1,86
3	36,4	100	90,65	88,63	2,27
4	39,1	100	84,61	82,54	2,53
5	41,6	100	79,33	77,16	2,81
6	43,9	100	75,17	73,24	2,57
7	50,4	100	65,48	63,96	2,32
8	55,4	100	59,57	57,62	3,28
9	66,2	100	49,85	48,34	3,03
10	80,9	100	40,79	39,32	3,66

Tabel 3. Hasil Pengujian Modul Pembangkit Sinyal Sinusoidal Harmonisa Ketiga

No	Frekuensi	Error %
----	-----------	---------

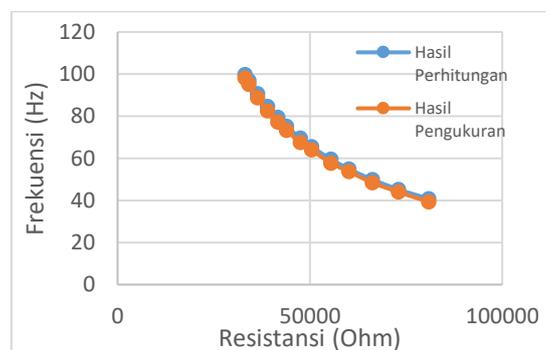
*Rancang Bangun Modul Bipolar Third Harmonic Injection Pulse Width Modulation (THPWM)
untuk Inverter 3 Fasa*

	R (kΩ)	Kapasitor (nF)	Hasil Perhitungan (Hz)	Hasil Pengukuran (Hz)	
1	10,2	100	323,53	313,84	3,01
2	11,1	100	298,91	295,82	1,04
3	12,8	100	257,81	256,73	0,43
4	16,1	100	205,86	200,81	2,46
5	22,1	100	149,32	146,32	2,02
6	33,2	100	99,39	96,74	2,71
7	36,6	100	90,16	88,43	1,95
8	41,3	100	79,90	77,52	3,01
9	47,6	100	69,33	66,34	4,37
10	60,4	100	54,64	52,13	4,64

Tabel 4. Hasil Pengujian Modul Pembangkit Sinyal Segitiga

No	R (kΩ)	Kapasitor (nF)	Frekuensi		Error %
			Hasil Perhitungan (Hz)	Hasil Pengukuran (Hz)	
1	2,2	100	1513,76	1510,12	0,24
2	2,7	100	1195,65	1190,03	0,47
3	3,1	100	1096,35	1069,06	2,49
4	3,4	100	964,91	918,71	4,78
5	4,3	100	771,03	735,83	4,56
6	4,7	100	706,63	695,04	1,64
7	6,1	100	549,54	525,41	4,37
8	10,1	100	327,71	317,08	3,26
9	30,1	100	109,56	105,03	4,13
10	41,7	100	79,16	77,18	2,49
11	58,8	100	56,16	53,72	4,38

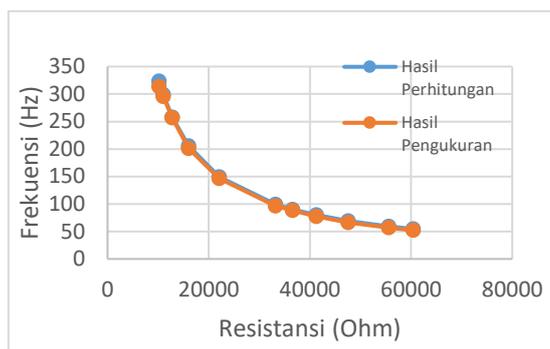
Berdasarkan Tabel 2 nilai frekuensi yang dihasilkan berbanding terbalik dengan nilai resistor yang digunakan. Semakin tinggi nilai resistor yang digunakan nilai frekuensi yang dihasilkan semakin kecil. Nilai frekuensi hasil pengukuran dan hasil perhitungan memiliki nilai selisih yang sangat kecil dengan *error* kurang dari 5%. Perbandingan nilai frekuensi hasil perhitungan dan pengukuran dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Grafik perbandingan nilai frekuensi fundamental hasil perhitungan dan pengukuran
Sumber: Dokumentasi 2023

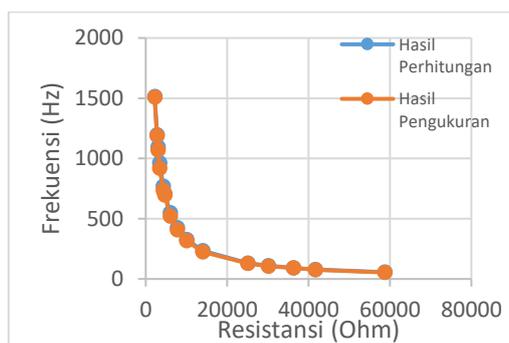
Berdasarkan Tabel 3 nilai frekuensi yang dihasilkan berbanding terbalik dengan nilai resistor yang digunakan. Semakin tinggi nilai resistor yang digunakan nilai frekuensi yang dihasilkan semakin kecil. Nilai frekuensi hasil pengukuran dan hasil perhitungan memiliki nilai selisih yang sangat kecil dengan

error kurang dari 5%. Perbandingan nilai frekuensi hasil perhitungan dan pengukuran dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Grafik perbandingan nilai frekuensi harmonisa ke 3 hasil perhitungan dan pengukuran
Sumber: Dokumentasi 2023

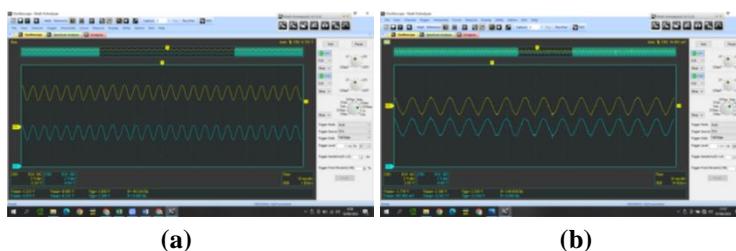
Berdasarkan Tabel 4 nilai frekuensi yang dihasilkan berbanding terbalik dengan nilai resistor yang digunakan. Semakin tinggi nilai resistor yang digunakan nilai frekuensi yang dihasilkan semakin kecil. Nilai frekuensi hasil pengukuran dan hasil perhitungan memiliki nilai selisih yang sangat kecil dengan *error* kurang dari 5%. Perbandingan nilai frekuensi hasil perhitungan dan pengukuran dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 13. Grafik perbandingan nilai frekuensi sinyal segitiga hasil perhitungan dan pengukuran
Sumber: Dokumentasi 2023

3.2 Modul Penyangga Sinyal Sinusoidal dan Segitiga

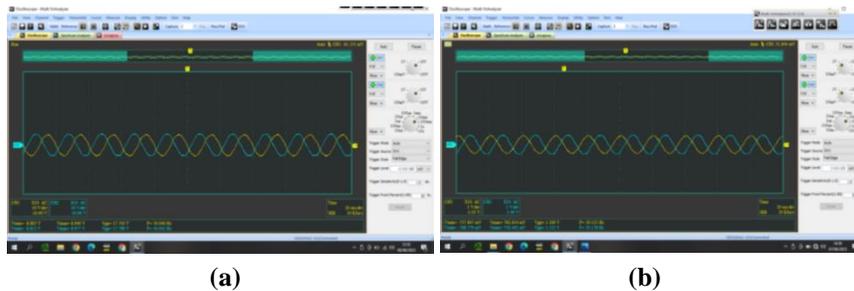
Gambar 14 (a) merupakan sinyal *Input* dan *Output* Modul Penyangga. Sinyal *input* dtunjukkan pada CH1 (berwarna kuning) dan sinyal *output* CH2 (berwarna biru). Sinyal diatas memiliki frekuensi yang sama yaitu 50 Hz dengan tegangan V_{pp} 2,8 Volt Gambar 14 (b) merupakan sinyal *Input* dan *Output* Modul Penyangga. Sinyal *input* dtunjukkan pada CH1 (berwarna kuning) dan sinyal *output* CH2 (berwarna biru). Sinyal diatas memiliki frekuensi yang sama yaitu 149,8 Hz dengan tegangan V_{pp} 3,4 Volt.



Gambar 14. Sinyal *Input* dan *Output* Modul Penyangga
Sumber: Dokumentasi 2023

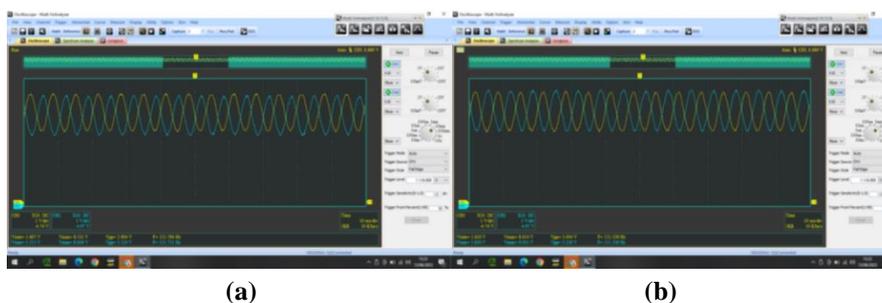
3.3 Modul Penggeser Fasa

Gambar 15(a) CH 1 (berwarna kuning) merupakan sinyal untuk fasa sebelum digeser atau pada sudut 0° . Besar frekuensi dan tegangan yang terukur adalah 49,8 Hz dan tegangan Vpp 2,6 Volt. Pada CH 2 (berwarna biru) merupakan sinyal untuk fasa setelah digeser atau pada sudut 120° . Besar Frekuensi dan tegangan yang terukur adalah 49,4 Hz dan tegangan Vpp 2,7 Volt Gambar 15(b) sinyal pada CH 1 (berwarna kuning) merupakan sinyal untuk fasa setelah digeser atau pada sudut 120° . Besar frekuensi dan tegangan yang terukur adalah 49,3 Hz dan tegangan Vpp 2,5 Volt. Pada CH 2 (berwarna biru) merupakan sinyal untuk fasa setelah digeser atau pada sudut 240° . Besar Frekuensi dan tegangan yang terukur adalah 49,4 Hz dan tegangan Vpp 2,7 Volt.



Gambar 15. Sinyal keluaran 0° , 120° dan 240° Pada Sinyal Fundamental
Sumber: Dokumentasi 2023

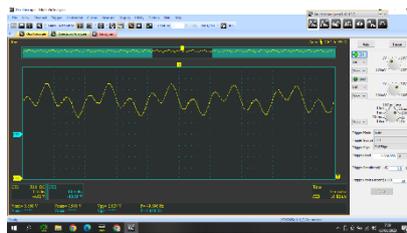
Gambar 16(a) CH 1 (berwarna kuning) merupakan sinyal untuk fasa sebelum digeser atau pada sudut 0° . Besar frekuensi dan tegangan yang terukur adalah 49,8 Hz dan tegangan Vpp 2,6 Volt. Pada CH 2 (berwarna biru) merupakan sinyal untuk fasa setelah digeser atau pada sudut 120° . Besar Frekuensi dan tegangan yang terukur adalah 49,4 Hz dan tegangan Vpp 2,7 Volt Gambar 16(b) sinyal pada CH 1 (berwarna kuning) merupakan sinyal untuk fasa setelah digeser atau pada sudut 120° . Besar frekuensi dan tegangan yang terukur adalah 49,3 Hz dan tegangan Vpp 2,5 Volt. Pada CH 2 (berwarna biru) merupakan sinyal untuk fasa setelah digeser atau pada sudut 240° . Besar Frekuensi dan tegangan yang terukur adalah 49,4 Hz dan tegangan Vpp 2,7 Volt.



Gambar 16 Sinyal keluaran 0° , 120° dan 240° Pada Sinyal Harmonisa Ke 3
Sumber: Dokumentasi 2023

3.4 Modul Penjumlah Non Inverting

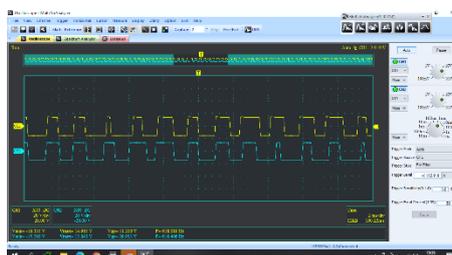
Gambar 17 menunjukkan hasil keluaran modul penjumlahan. Sinyal tersebut memiliki frekuensi 49,7 Hz dan tegangan Vpp 2,7 volt.



Gambar 17. Gelombang Hasil Penjumlahan Sumber: Dokumentasi 2023

3.5 Modul Komparator

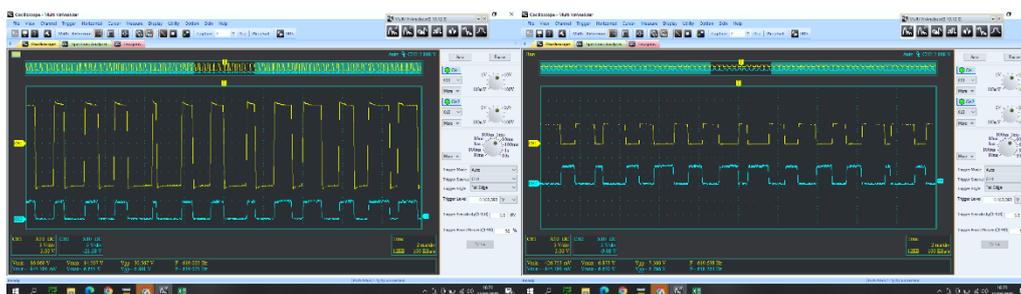
Gambar 18 sinyal pada CH 1 (berwarna kuning) merupakan sinyal THPWM hasil keluaran dari modul komparator. Pada CH 2 (berwarna biru) merupakan sinyal THPWM hasil keluaran modul komparator dengan nilai frekuensi dan tegangan yang terukur adalah 618,4 Hz, tegangan V_{pp} 31,2 Volt, dari sinyal *input carrier* sebesar 620 Hz.



Gambar 18. Sinyal Hasil Keluaran Modul Komparator Sumber: Dokumentasi 2023

3.6 Modul Pembeda Polaritas

Gambar 19(a) sinyal pada CH 1 (berwarna kuning) merupakan sinyal *output* dari modul komparator yang belum dibedakan polaritasnya. Pada CH 2 (berwarna biru) merupakan sinyal keluaran polaritas positif dengan nilai frekuensi dan tegangan yang terukur adalah 618,7 Hz dan tegangan V_{pp} 5,6 Volt
Gambar 19(b) sinyal pada CH 1 (berwarna kuning) merupakan sinyal polaritas pertama dengan besar tegangan V_{pp} 7,1 Volt dan frekuensi 619,6 Hz. Pada CH2 (berwarna biru) merupakan sinyal sinyal polaritas kedua dengan besar tegangan V_{pp} 6,7 Volt dan frekuensi 618,2 Hz.



(a) (b)

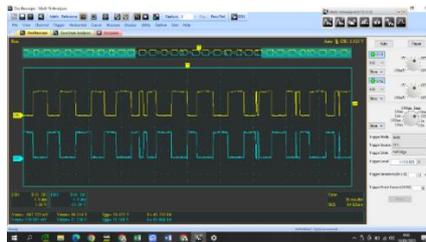
Gambar 19. Sinyal Keluaran Modul Pemisah Polaritas
Sumber: Dokumentasi 2023

3.7 Hasil Pengujian Modul Isolator

Modul Isolator terdiri dari satu daya terisolasi dan *switching* secara optik. Pengujian modul ini dilakukan dengan menggunakan multimeter digital, adapun tegangan yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pengujian Catu Daya terisolasi pada Modul Osilator

No	Rangkaian yang Diuji	Vout (Volt)
1	Rangkaian isolasi catu daya 1	11,99
2	Rangkaian isolasi catu daya 2	11,95
3	Rangkaian isolasi catu daya 3	11,96
4	Rangkaian isolasi catu daya 4	11,95



Gambar 20. Gambar Hasil Keluaran Optocoupler
Sumber: Dokumentasi 2023

Gambar 20 sinyal pada CH 1 (berwarna kuning) merupakan sinyal THPWM pertama dengan tegangan V_{pp} 10,8 Volt dan frekuensi 49,7 Hz. Pada CH2 (berwarna biru) merupakan sinyal THPWM kedua dengan tegangan V_{pp} 11,3 Volt dan frekuensi 49,8 Hz.

3.8 Diskusi hasil penelitian

Berdasarkan hasil pengujian Tabel 2 diperoleh tingkat kesalahan kurang dari 5%, pengujian Tabel 3 diperoleh tingkat kesalahan kurang dari 5%, dan pengujian Tabel 4 diperoleh tingkat kesalahan kurang dari 5%. Hal ini disebabkan oleh nilai toleransi pada resistor. Pada modul pembangkit sinyal nilai R pada kaki 4 dan 5 tidak seimbang hal ini mengakibatkan sinyal pengisian dan pengosongan tidak sama. Pada modul pembangkit sinyal dalam rentang waktu yang lama menimbulkan panas, hal ini disebabkan karena kualitas komponen yang tidak mampu dialiri arus yang cukup tinggi, sehingga diperlukan pergantian IC yang mempunyai kualitas lebih baik daripada IC 8038. Pada rangkaian modul penjumlahan hasil penguatan tidak sama dengan 1, hal ini disebabkan karena nilai R_f dan R_{in} yang terpasang memiliki selisih. Output dari modul pemisah polaritas mengalami *drop* tegangan hal ini dikarenakan kualitas komponen yang digunakan kurang baik.

4. KESIMPULAN

Kesimpulan hasil penelitian ini yaitu telah dihasilkan modul bipolar THPWM untuk inverter 3 fasa. Modul tersebut memiliki output 6 sinyal THPWM. Dengan frekuensi yang dapat divariasikan baik frekuensi fundamental maupun carrier nya dengan eror kurang dari 5%. Frekuensi sinyal THPWM 50 - 1500 HZ, tegangan kerja ± 12 Volt DC.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tim peneliti mengucapkan terimakasih kepada Politeknik Negeri Bandung, Melalui keputusan direktur Politeknik Negeri Bandung atas bantuan pendanaan biaya penelitian tugas akhir mahasiswa program sarjana terapan dan diploma III nomor B/275/PL1/HK.02.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] (2020). *Konsumsi Listrik per Kapita*. Jakarta: Badan Pusat Statistik.
- [2] Murtadha R. Sadeq, H. A., (2022). "FPGA-Based Single-Phase PV Inverter Using Unipolar and Bipolar SPWM Control Techniques", *Engineering and Technology Journal*, pp. 386-395.
- [3] Laili Fadihilah, N. M., (2022). "Rancang Bangun Inverter Fasa Tunggal Variabel Frekuensi Berbasis Bipolar Sinusoidal Pulse Width Modulation", *Prosiding The 13th Industrial Research Workshop and National Seminar*, Bandung.
- [4] Mohammad Luqman, A. K., (2021). "Pembangkit Sinusoidal Pulse Width Modulation Berbasis Arduino untuk Inverter", *Jurnal Teknik Ilmu dan Aplikasi*, III, pp. 42-46.
- [5] Rendy Muhammad, D. S., & Mulyono, N., (2022). "Rancang Bangun Inverter 3 Fasa Berbasis Bipolar Sinusoidal Pulse Width Modulation", *Prosiding The 13th Industrial Research Workshop and National Seminar*, Bandung.
- [6] Ervin Mey Hermawan, S., (2021). "Implementasi Sinkronisasi Jaringan dengan Inverter Berbasis SPWM Menggunakan Zero Crossing Detector", *CYCLOTRON*, IV, pp. 5-12.
- [7] Bela Ulina Ambarsani, N. M., & Septiyanto, D., (2022). "Rancang Bangun Inverter Satu Fasa Berbasis Bipolar Trapezium Pulse Width Modulation (TPWM)", *Prosiding SEMNASTERA (Seminar Nasional Teknologi dan Riset Terapan)*, Sukabumi.
- [8] Indra Muhamad Faizal, D. S., & Mulyono, N., (2021). "Rancang Bangun Modul Trapezium Pulse Width Modulation (TPWM)", *Prosiding SEMNASTERA (Seminar Nasional Teknologi dan Riset Terapan)*, Sukabumi.
- [9] AMRUTHA G Nair, A. K., Ismayil, I., Suresh, & T. A. T., (2022). "Comparative Study of Third and Ninth Harmonics Injected Sinusoidal Pulse Width Modulation for Induction Motor Application", *Proceedings of the International Conference on Systems*, London.