

Rancang Bangun Modul *Discontinue Pulse Width Modulation (DPWM)* Tiga Fasa

Natanael Sihombing¹, Nanang Mulyono², Dwi Septiyanto³

^{1,2,3}Program Studi D3 Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung
Jl. Gegerjalong Hilir, Ciwaruga, Bandung, Indonesia.
natanael.sihombing.tlis18@polban.ac.id

ABSTRAK

Energi alternatif yang berkembang pada saat ini dapat dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari. Untuk memanfaatkan energi tersebut dapat menggunakan sebuah Inverter. Inverter merupakan komponen yang berperan untuk mengkonversi arus listrik searah menjadi arus listrik bolak-balik. Namun pada pengoperasiannya, kerap kali ditemukan gangguan dengan terdeteksinya parasit kapasitansi yang menyebabkan pengoperasiannya gagal. Ada berbagai macam metode yang dapat digunakan untuk mengendalikan inverter, salah satunya yaitu dengan menggunakan metode *Pulse Width Modulation (PWM)*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan modul *Discontinue Pulse Width Modulation (DPWM)* Tiga Fasa. Metode yang digunakan untuk menghasilkan sinyal *Discontinue* ini yaitu dibuat dari sinyal *carrier* segitiga yang dipotong pada sudut 60° s/d 120° dan 240° s/d 300° menggunakan rangkaian analog. Lalu dilanjutkan dengan tahap sinkronisasi beda fasa 120° untuk fasa R, S, T menggunakan rangkaian analog berdasarkan formulasi trigonometri. Hasil yang didapat yaitu sinyal sinusoidal tiga fasa sebagai referensi dengan amplitudo yang dapat diatur dari $1V_{pp}$ sampai $15V_{pp}$ dengan frekuensi sebesar 50Hz sebagai sinyal referensinya. Setelah itu, didapatkan spesifikasi sinyal *Discontinue Pulse Width Modulation* dengan tegangan input sebesar $3V_{pp}$, tegangan output sebesar $5,1V_{pp}$ dan frekuensi sebesar 100Hz yang sudah tiga fasa dan berbeda fasa sebesar 0° , 120° dan 240° .

Kata kunci: *Discontinue, Pulse Width Modulation, Amplitudo, Frekuensi*

I. PENDAHULUAN

Sumber daya energi sangat dibutuhkan oleh masyarakat umum dan industri. Oleh karena kebutuhan energi yang begitu tinggi, manusia mulai mencari pilihan sumber energi. Contoh dari sumber energi tersebut yaitu *wind turbine, solar cell, wind hybrid system* dan lain sebagainya. Energi listrik yang dihasilkan dari sumber energi tersebut masih berupa sumber tegangan searah (DC) [1]. Namun peralatan elektronik yang digunakan pada umumnya menggunakan sumber tegangan bolak-balik (AC) [2].

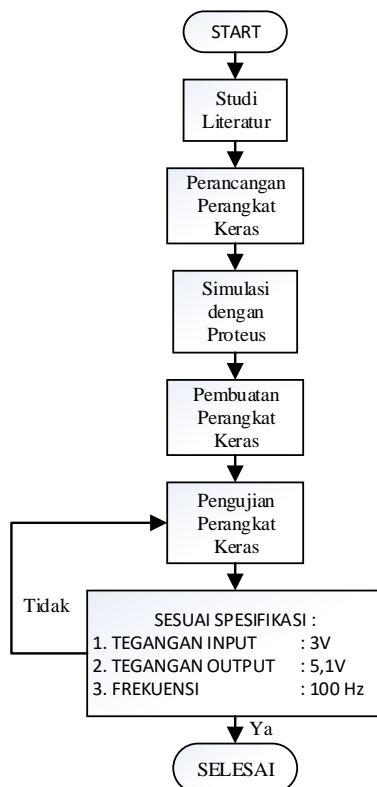
Referensi [3] dari penelitian F. Liu, K. Xin, Y. Liu yang berjudul "*An adaptive Discontinuous Pulse Width Modulation (DPWM) method for three phase inverter*" menyajikan metode *Discontinuous Pulse Width Modulation (DPWM)* adaptif untuk inverter tiga fasa. Sinyal mode umum (CM) disuntikkan dalam gelombang modulasi untuk mewujudkan DPWM dan bentuk gelombang dari sinyal CM yang disuntikkan dimodulasi sesuai

dengan indeks modulasi inverter. Dalam kasus indeks modulasi tinggi, DPWM yang diusulkan dapat mewujudkan efek pengurangan kerugian switching yang sama seperti metode DPWM konvensional. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode DPWM yang diusulkan mencapai keseimbangan antara efisiensi dan stabilitas dalam rentang indeks modulasi lebar. Referensi [4] dari penelitian S. Bhattacharya, D. Mascarella, G. Joos yang berjudul "*Space-Vector-Based Generalized Discontinuous Pulsewidth Modulation for Three-Level Inverters Operating at Lower Modulation Indices*" mengusulkan tiga template DPWM berbasis vektor ruang untuk faktor daya yang lebih rendah dan strategi DPWM umum untuk inverter tiga tingkat yang beroperasi dengan indeks modulasi lebih rendah dari 0,5. Untuk faktor daya yang berbeda, strategi yang diusulkan mengadaptasi urutan pulsa inverter dengan menggabungkan bagian yang berbeda dari template DPWM yang diusulkan dan konvensional dalam satu siklus dasar operasi dan memastikan *instance switching* minimum saat mengubah template. Hasil penelitian

menunjukkan efektivitas strategi DPWM umum tiga tingkat yang diusulkan atas strategi modulasi tiga tingkat konvensional. Referensi [5] dari penelitian J. C. Giacomini, L. Michels, M. C. Cavalcanti, C. Rech yang berjudul "Modified Discontinuous PWM Strategy for Three-Phase Grid-Connected PV Inverters With Hybrid Active-Passive Damping Scheme" mengusulkan strategi *modified discontinuous pulse width modulation (MDPWM)* yang dimodifikasi untuk inverter fotovoltaik (PV) tiga fasa yang terhubung ke jaringan tanpa transformator. Untuk mengaktifkan penerapan MDPWM, skema redaman aktif-pasif hibrid baru diusulkan di mana dinamika mode-umum dan mode-diferensial diredam oleh skema pasif dan aktif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa skema yang diusulkan menghasilkan efisiensi sistem yang lebih tinggi dibandingkan dengan skema diskontinu PWM klasik dengan menjaga arus bocor.

Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk menghasilkan modul *Discontinue Pulse Width Modulation (DPWM)*. Modul DPWM yang dihasilkan memiliki prinsip kerja saat PWM tidak aktif, maka akan dipotong.

II. METODE PENELITIAN



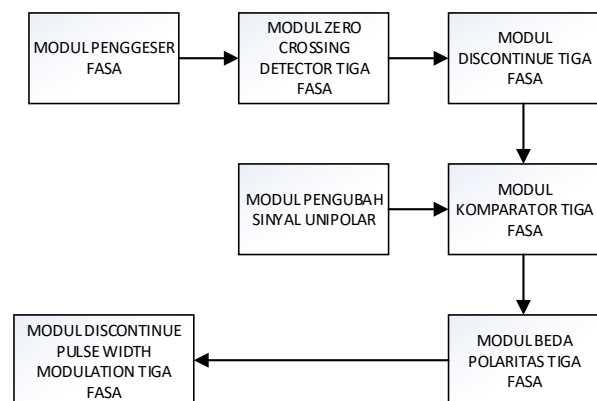
Gambar 1 Diagram Alir Perancangan Sistem

Dalam melakukan tahap perancangan, terdapat tahapan yang harus dilakukan secara sistematis dan

real 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 keras
- 4) Merealisasikan perancangan perangkat keras.
- 5) Membuat perancangan perangkat lunak
- 6) Membuat algoritma program pada sistem.
- 7) Melakukan pengujian

Gambar 2 menunjukkan diagram blok pada Modul *Discontinue Pulse Width Modulation (DPWM)* Tiga Fasa.



Gambar 2 Diagram Blok

Berdasarkan gambar 2, terdapat *supply* tegangan DC 12V dan 6 modul rangkaian. *Supply* tegangan DC berfungsi untuk memberikan catu daya tegangan kepada setiap modul.

Supply tegangan DC 12V mengalirkan tegangan menuju modul Penggeser Fasa. Modul penggeser fasa memiliki sinyal input berupa sinyal sinusoidal satu fasa dan menghasilkan sinyal sinusoidal tiga fasa yang dimana setiap fasanya berbeda fasa 0° , 120° dan 240° . Pada modul penggeser fasa digunakan 2 buah kapasitor, 2 buah resistor yang diserikan dan 4 buah resistor yang diparalelkan, dan 2 buah OP-AMP LM741. Dalam menentukan besaran nilai resistor yang diserikan digunakan rumus (1) dengan nilai kapasitor (C_i) sebesar $10\mu\text{F}$, frekuensi 50 Hz dan sudut fasanya 120° , maka:

$$R_i = \frac{\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}{2 \pi f C_i} (\Omega) \quad (1)$$

$$R_i = \frac{\tan\left(\frac{120^\circ}{2}\right)}{2 \times \pi \times 50 \times 0,0001} (\Omega)$$

$$R_i = 550 \Omega = 0,55 \text{ k}\Omega$$

Untuk besaran nilai resistor yang diparalelkan digunakan besaran nilai resistor $100\text{k}\Omega$. Hal ini

karena resistor tersebut digunakan sebagai penguat dan nilai penguat adalah 1. Oleh karena itu besaran nilai resistor yang digunakan sama.

Setelah modul penggeser fasa, dilanjutkan dengan modul *zero crossing detector* tiga fasa. Modul ini memiliki input sinyal sinusoidal tiga fasa dengan beda fasa sebesar 0° , 120° , 240° dan keluarannya berupa sinyal berbentuk kotak tiga fasa dengan beda fasanya sebesar 0° , 120° dan 240° .

Output yang dihasilkan dari modul *zero crossing detector* tiga fasa dialirkan ke modul *discontinue* tiga fasa. Modul ini memiliki sinyal input berupa sinyal berbentuk kotak tiga fasa dengan beda fasa 0° , 120° , 240° dan sinyal keluarannya berupa sinyal segitiga yang terpotong pada sudut 60° s/d 120° dan 240° s/d 300° .

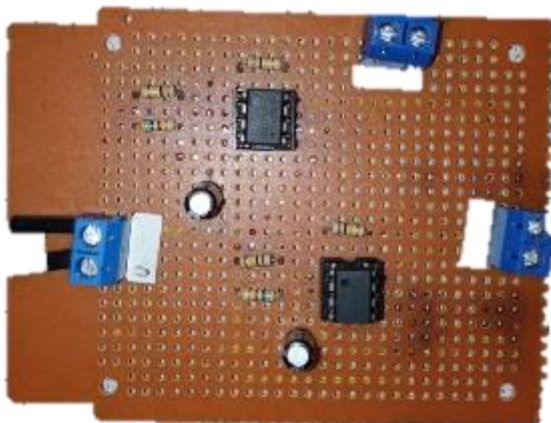
Selanjutnya digunakan modul pengubah sinyal unipolar. Modul ini berfungsi untuk mengubah sinyal unipolar yang berasal dari sumber sinyal segitiga diubah menjadi sinyal bipolar.

Setelah didapatkan sumber sinyal segitiga berupa sinyal bipolar, selanjutnya dilanjutkan dengan modul komparator tiga fasa. Modul ini memiliki sinyal input berbentuk kotak tiga fasa dan menghasilkan sinyal output berupa sinyal pulsa.

Setelah didapatkan sinyal pulsa, selanjutnya dilanjutkan ke modul beda polaritas. Pada modul ini, input sinyal yang masuk dibeda polaritaskan dengan beda sudut fasa 0° , 120° dan 240° .

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

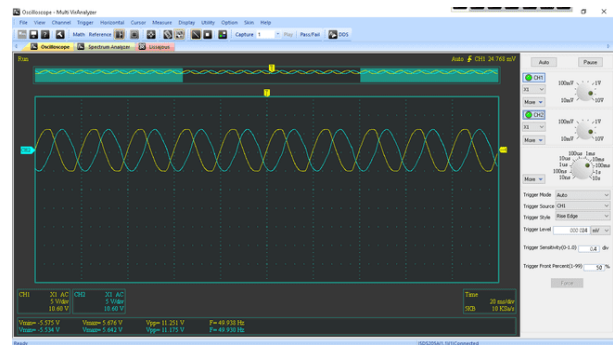
A. Pengujian Modul Penggeser Fasa



Gambar 3 Realisasi Modul Penggeser Fasa

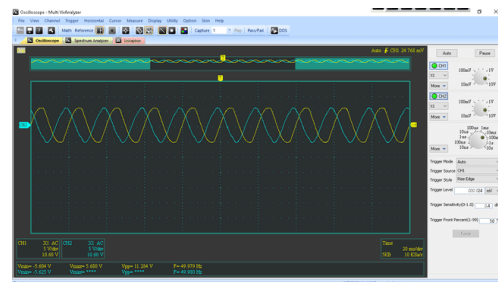
Pengujian modul ini dilakukan dengan memeriksa sinyal output pada oscilloscope. Setelah mendapatkan sinyal sinusoidal, sinyal sinusoidal tersebut diatur berbeda fasa 120° menggunakan rangkaian pembeda fasa. Dibawah ini merupakan hasil sinyal sinusoidal yang sudah berbeda fasa

pada sudut 0° , 120° dan 240° pada oscilloscope.



Gambar 4 Sinyal Output Penggeser Fasa 120°

Gambar 4 merupakan sinyal output yang dihasilkan dari modul penggeser fasa yang ditunjukkan oleh oscilloscope. Berdasarkan hasil pengujian, terbukti bahwa fasa yang bergeser adalah 120° . Sinyal berwarna kuning merupakan fasa A diposisi 0° dan sinyal berwarna biru merupakan fasa B diposisi 120° .

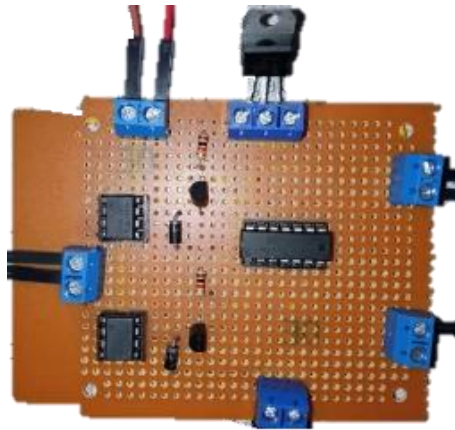


Gambar 5 Sinyal Output Penggeser Fasa 240°

Gambar 5 merupakan hasil dari modul penggeser fasa yang ditunjukkan oleh oscilloscope. Berdasarkan gambar diatas, dapat dilihat bahwa fasa yang bergeser sebesar 120° . Sinyal yang berwarna kuning merupakan fasa A diposisi 0° dan sinyal yang berwarna biru merupakan fasa C diposisi 240° .

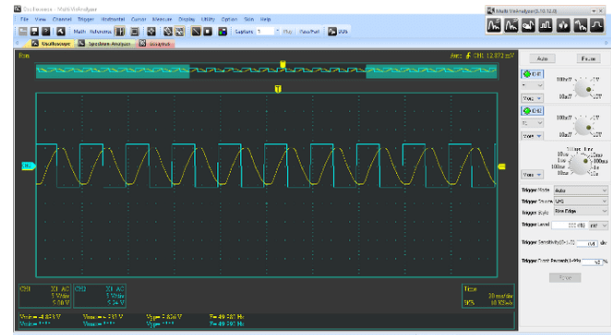
B. Pengujian Modul Zero Crossing

Pengujian pada modul ini dilakukan dengan sumber yang berasal dari modul beda fasa yang terdapat tiga keluaran yaitu fasa A 0° , fasa B 120° , fasa C 240° . Tujuan dari pengujian ini yaitu untuk mengubah sinyal input sinusoidal yang berasal dari modul penggeser fasa menjadi sinyal pulsa berbentuk kotak.

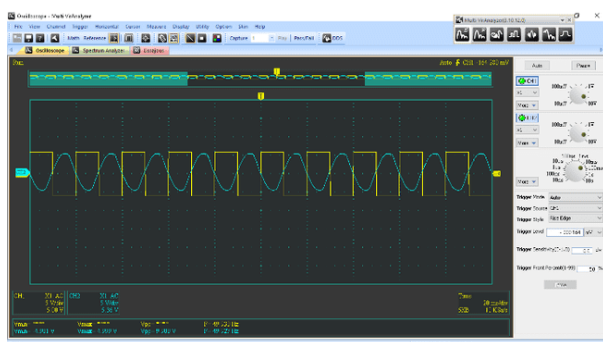


Gambar 6 Realisasi Modul Zero Crossing

modul *zero crossing* yang menunjukkan sinyal pulsa berbentuk kotak. Sinyal berwarna biru merupakan sinyal sinusoidal sebagai sinyal referensinya. Sinyal kotak di atas berasal dari output fasa B yaitu 120° .



Gambar 9 Sinyal Output Zero Crossing Fasa 240°

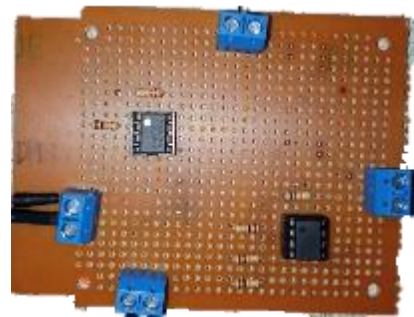


Gambar 7 Sinyal Output Zero Crossing fasa 0°

Gambar 7 merupakan sinyal yang dihasilkan dari modul *zero crossing* yang ditunjukkan oleh oscilloscope. Dapat dilihat bahwa hasil dari modul zero crossing ini menghasilkan sinyal pulsa berbentuk kotak. Sinyal berwarna kuning menunjukkan sinyal output dari modul *zero crossing* yang menunjukkan sinyal pulsa berbentuk kotak. Sinyal berwarna biru merupakan sinyal sinusoidal sebagai sinyal referensinya. Sinyal kotak di atas berasal dari output fasa A yaitu 0° .

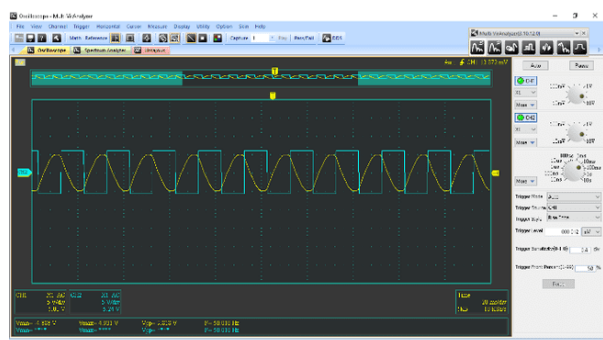
Gambar 9 merupakan hasil dari modul *zero crossing* yang ditunjukkan oleh oscilloscope. Dapat dilihat bahwa hasil dari modul zero crossing ini menghasilkan sinyal pulsa berbentuk kotak. Sinyal berwarna kuning menunjukkan sinyal output dari modul *zero crossing* yang menunjukkan sinyal pulsa berbentuk kotak. Sinyal berwarna biru merupakan sinyal sinusoidal sebagai sinyal referensinya. Sinyal kotak di atas berasal dari output fasa C yaitu 240° .

C. Pengujian Modul Discontinue



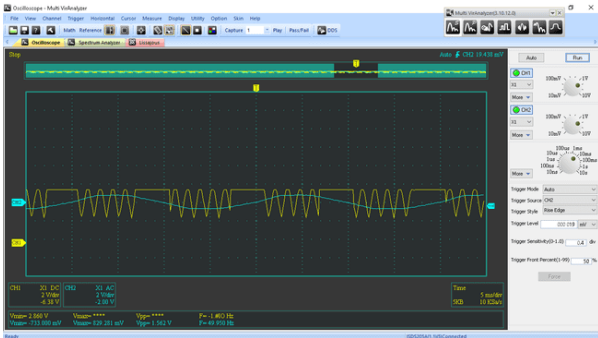
Gambar 10 Realisasi Modul Discontinue

Pengujian ini dilakukan dengan sumber yang berasal dari modul *zero crossing*. Tujuan dari pengujian ini yaitu untuk mengubah sinyal segitiga yang berasal dari sumber pembangkit sinyal segitiga menjadi sinyal *discontinue*. Sinyal sinusoidal dari *power supply* digunakan sebagai sinyal referensinya.



Gambar 8 Sinyal Output Zero Crossing fasa 120°

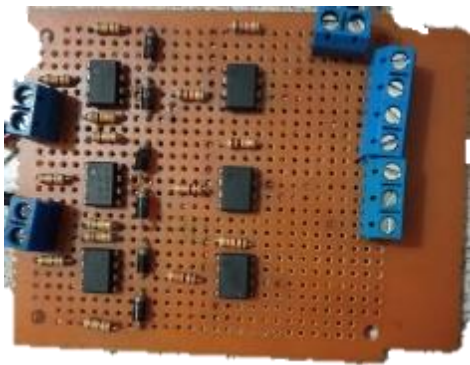
Gambar 8 merupakan hasil dari modul *zero crossing* yang ditunjukkan oleh oscilloscope. Dapat dilihat bahwa hasil dari modul zero crossing ini menghasilkan sinyal pulsa berbentuk kotak. Sinyal berwarna kuning menunjukkan sinyal output dari



Gambar 11 Sinyal Discontinue

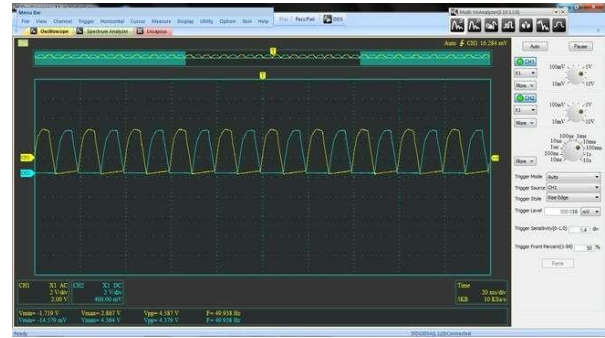
Berdasarkan gambar 11, sinyal berwarna biru merupakan sinyal sinusoidal sebagai sinyal referensi. Sementara itu, sinyal berwarna kuning merupakan sinyal segitiga sebagai sinyal *carrier* yang mengalami saturasi pada sudut fasa 60° s/d 120° dan 240° s/d 300° . Dengan itu, sinyal yang dihasilkan merupakan sinyal *Discontinue*.

D. Pengujian Modul Beda Polaritas



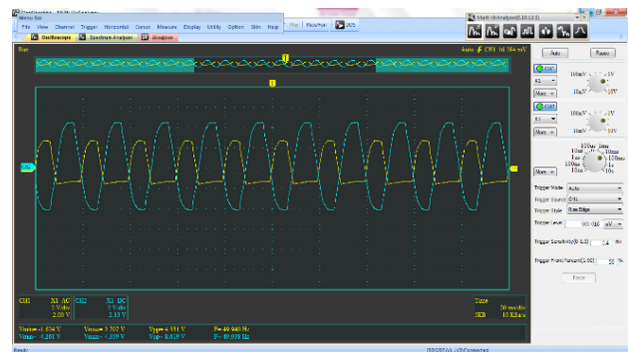
Gambar 12 Realisasi Modul Beda Polaritas

Pada pengujian ini dilakukan dengan sumber yang berasal dari modul *zero crossing*. Terdapat 6 output dari modul beda polaritas ini karena setiap fasanya dibeda polaritaskan. Tujuan dari pengujian ini yaitu dapat membuktikan bahwa setiap sinyal pulsa berbentuk kotak yang berasal dari modul *zero crossing* dapat dibeda polaritaskan sehingga nantinya akan terdapat suatu kondisi dimana pada saat sinyal 1 naik maka sinyal 2 nya tidak bertegangan, begitupun sebaliknya.



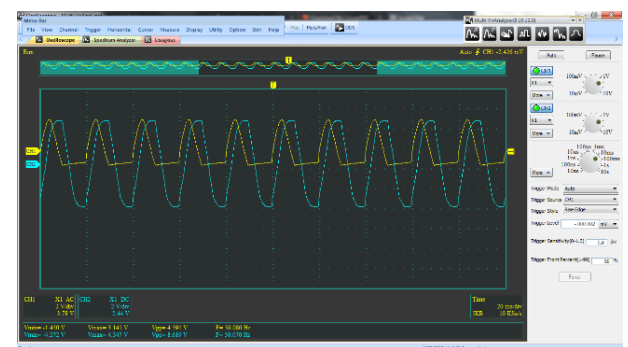
Gambar 13 Output Sinyal Beda Polaritas Fasa 0°

Berdasarkan gambar 13, sinyal beda polaritas berada pada fasa yang sama. Dapat dilihat bahwa sinyal 1 yang ditunjukkan oleh sinyal berwarna kuning pada posisi on, maka sinyal 2 yang ditunjukkan oleh sinyal berwarna biru akan off, begitupun sebaliknya.



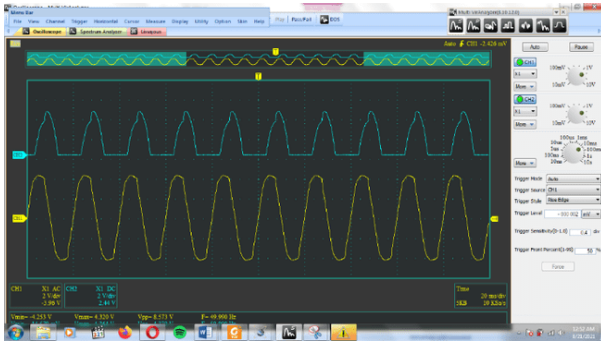
Gambar 14 Output Sinyal Beda Polaritas fasa 0°

Berdasarkan gambar 14, sinyal referensi ditunjukkan dengan sinyal berwarna biru dan polaritas pertama pada fasa A 0° ditunjukkan sinyal yang berwarna kuning.



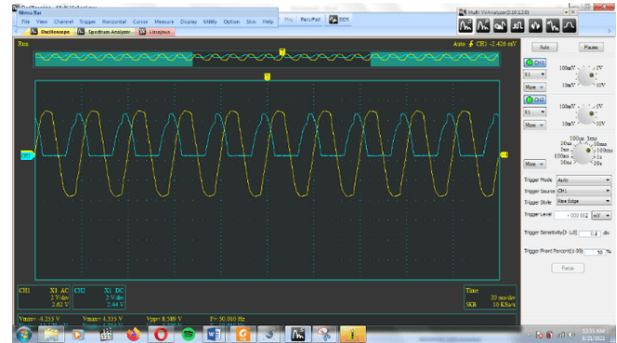
Gambar 15 Output Sinyal Beda Polaritas Fasa 120°

Berdasarkan gambar 15, sinyal referensi ditunjukkan dengan sinyal berwarna biru dan polaritas pertama pada fasa B 120° ditunjukkan sinyal yang berwarna kuning.



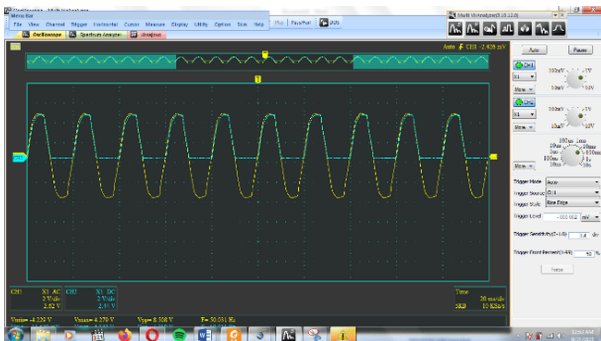
Gambar 16 Output Sinyal Beda Polaritas Fasa 240°

Berdasarkan gambar 16, sinyal referensi ditunjukkan dengan sinyal berwarna kuning dan polaritas pertama pada fasa C 240° ditunjukkan sinyal yang berwarna biru.



Gambar 19 Output Sinyal Beda Polaritas Fasa 240°

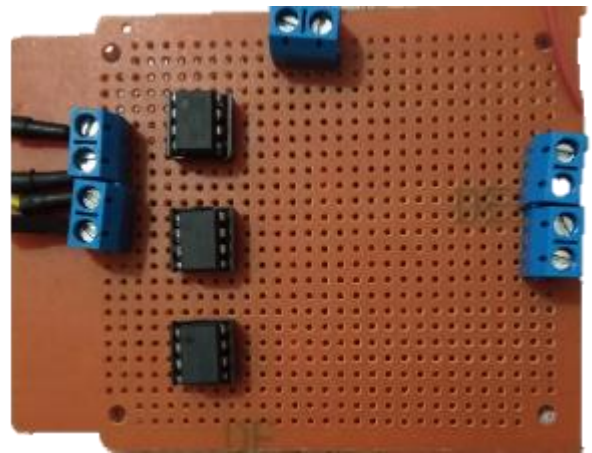
Berdasarkan gambar 19, sinyal referensi ditunjukkan dengan sinyal berwarna kuning dan polaritas kedua pada fasa C 240° ditunjukkan sinyal yang berwarna biru.



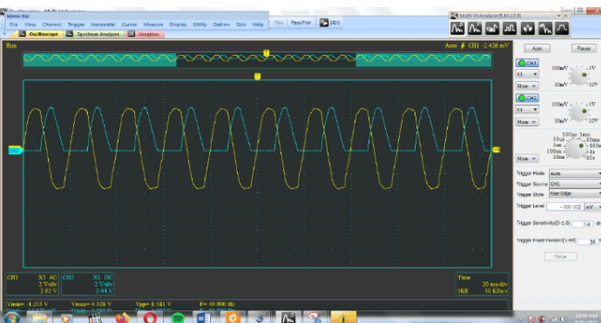
Gambar 17 Output Sinyal Beda Polaritas Fasa 0°

Berdasarkan gambar 17, sinyal referensi ditunjukkan dengan sinyal berwarna kuning dan polaritas kedua pada fasa A 0° ditunjukkan sinyal yang berwarna biru.

E. Pengujian Keseluruhan

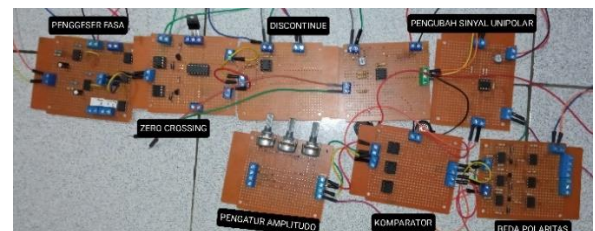


Gambar 20 Realisasi Modul Komparator



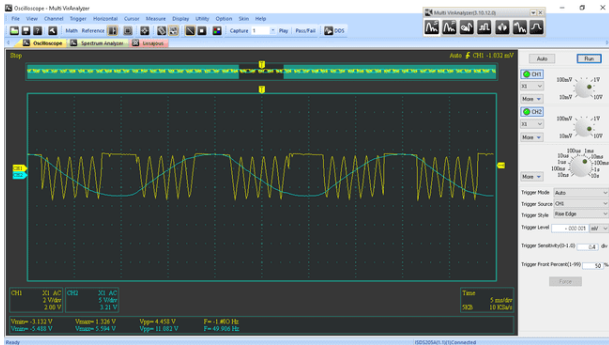
Gambar 18 Output Sinyal Beda Polaritas 120°

Berdasarkan gambar 18, sinyal referensi ditunjukkan dengan sinyal berwarna kuning dan polaritas kedua pada fasa B 120° ditunjukkan sinyal yang berwarna biru.



Gambar 21 Realisasi Modul Discontinue PWM

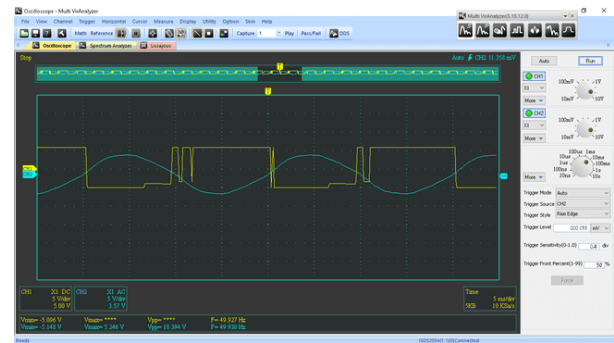
Pada tahap pengujian ini dilakukan dengan menghubungkan seluruh modul yang sudah dibuat. Tujuan dari pengujian ini yaitu untuk melihat hasil akhir dari modul DPWM ini, yaitu bentuknya berupa sinyal pulsa yang berasal dari modul komparator, lalu dibedakan polaritasnya menggunakan modul pembeda polaritas.



Gambar 22 Sinyal Input Pada Modul Komparator 240°

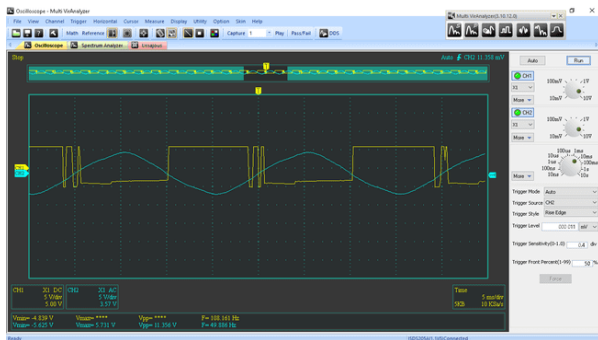
Gambar 22 merupakan sinyal masukan pada modul komparator tiga fasa. Sinyal berwarna biru merupakan sinyal sinusoidal sebagai sinyal referensi. Sinyal berwarna kuning merupakan sinyal discontinue. Sinyal discontinue dihasilkan melalui modul rangkaian penjumlah yang menghasilkan sinyal segitiga yang sudah bipolar.

referensi. Sinyal berwarna kuning merupakan sinyal discontinue. Sinyal discontinue dihasilkan melalui modul rangkaian penjumlah yang menghasilkan sinyal segitiga yang sudah bipolar.



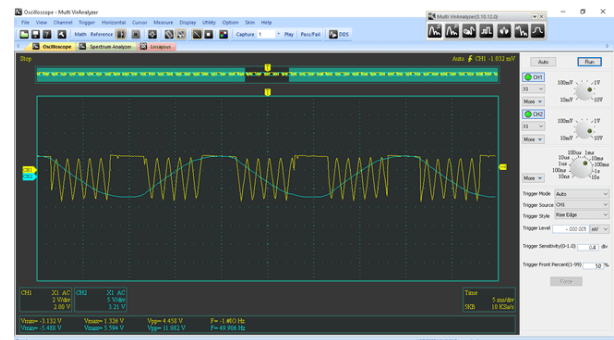
Gambar 25 Output Sinyal Pada Modul Komparator 120°

Gambar 25 merupakan sinyal output dari modul komparator yang sudah menghasilkan sinyal pulsa pada fasa S atau yang sudah bergeser fasanya menjadi 120° .



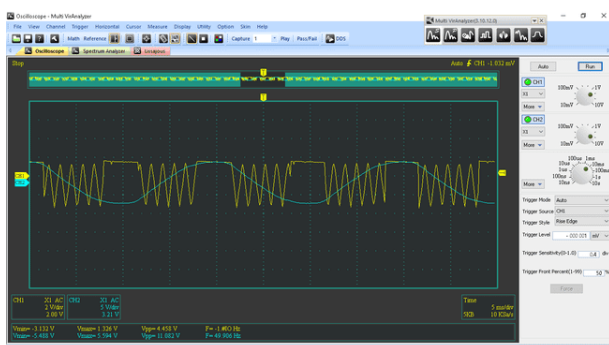
Gambar 23 Output Sinyal Pada Modul Komparator 240°

Gambar 23 merupakan sinyal output dari modul komparator yang sudah menghasilkan sinyal pulsa pada fasa T atau yang sudah bergeser fasanya menjadi 240° .



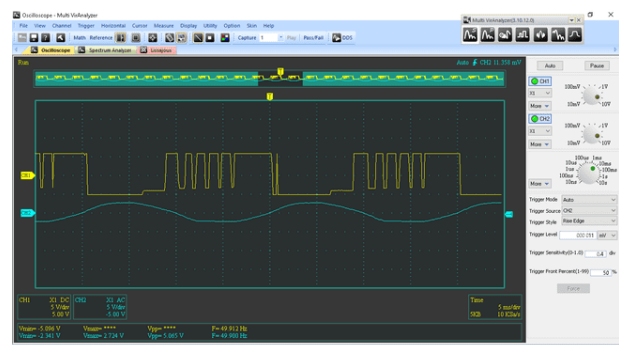
Gambar 26 Input Sinyal Pada Modul Komparator 0°

Gambar 26 merupakan sinyal masukan pada modul komparator tiga fasa. Sinyal berwarna biru, merupakan sinyal sinusoidal sebagai sinyal referensi. Sinyal berwarna kuning merupakan sinyal discontinue. Sinyal discontinue dihasilkan melalui modul rangkaian penjumlah yang menghasilkan sinyal segitiga yang sudah bipolar.



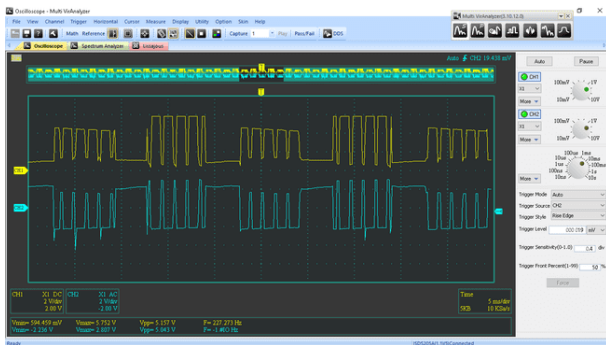
Gambar 24 Sinyal Input Pada Modul Komparator 120°

Gambar 24 merupakan sinyal masukan pada modul komparator tiga fasa. Sinyal berwarna biru merupakan sinyal sinusoidal sebagai sinyal



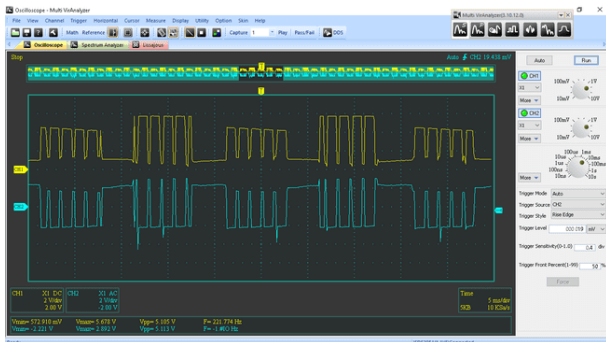
Gambar 27 Output Sinyal Pada Modul Komparator 0°

Gambar 27 merupakan sinyal output dari modul komparator yang sudah menghasilkan sinyal pulsa pada fasa R atau yang sudah bergeser fasanya menjadi 0° .



Gambar 28 Output Sinyal Pada Modul Beda Polaritas 0°

Gambar 28 merupakan sinyal output pada modul beda polaritas yang masukannya berasal dari keluaran modul komparator dari fasa R atau 0° .



Gambar 29 Output Sinyal Pada Modul Beda Polaritas 120°

Gambar 29 merupakan sinyal output pada modul beda polaritas yang masukannya berasal dari keluaran modul komparator dari fasa S atau 120° .

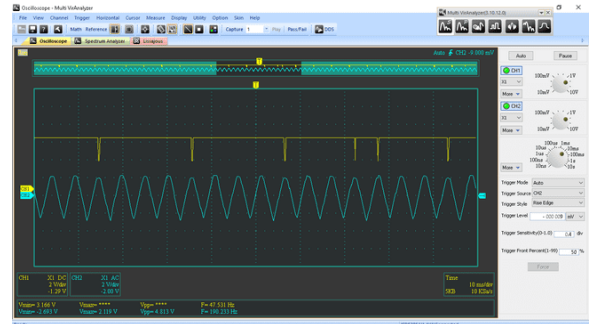


Gambar 30 Output Sinyal Pada Modul Beda Polaritas 240°

Gambar 30 merupakan sinyal output pada modul beda polaritas yang masukannya berasal dari keluaran modul komparator dari fasa T atau 240° .

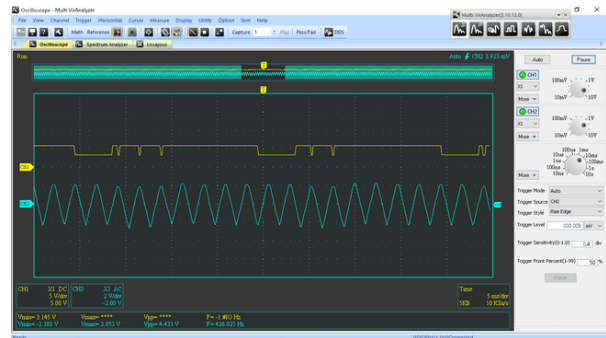
F. Pengujian Penentuan Spesifikasi Alat

Dalam menentukan spesifikasi pada alat dilakukan dengan cara mengatur beberapa variabel. Sumber sinyal sinusoidal dan segitiga menjadi acuan dalam menentukan spesifikasi pada alat. Untuk mengetahui spesifikasi pada alat, dilakukan pengujian pada modul komparator agar besaran atau spesifikasi dari sumber sinyal segitiga dapat ditentukan. Hasil dari pengujian dapat dilihat seperti dibawah ini:



Gambar 31 Sinyal Referensi dan Sinyal Pulsa dengan Frekuensi Terendah

Berdasarkan gambar 31, dapat dijelaskan bahwa jika frekuensi diturunkan kurang dari 100Hz dengan V_{pp} sebesar $4,4V_{pp}$ maka pulsa yang dihasilkan tidak sesuai dengan yang diharapkan.



Gambar 32 Sinyal Referensi dan Sinyal Pulsa dengan Frekuensi Tertinggi

Berdasarkan gambar 32, dapat dijelaskan bahwa jika frekuensi dinaikan lebih dari 426 Hz dengan V_{pp} sebesar $4,4V_{pp}$ maka sinyal pulsa yang dihasilkan tidak sesuai dengan yang diharapkan.

Berdasarkan hasil pengujian, sumber sinyal sinusoidal menunjukkan bentuk sinyal pulsa yang diinginkan. Oleh karena itu, tegangan pada sumber sinyal dibatasi sebesar 15V sesuai dengan tegangan input maksimal pada IC yang digunakan. Berdasarkan hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa spesifikasi dari sumber sinyal seperti pada table 1.

Table 1 Spesifikasi Sumber Sinyal

Nama	Nilai
Output Gelombang Sinus (<i>peak to peak</i>)	15V
Output Gelombang Segitiga (<i>peak to peak</i>)	4,4 V
Frekuensi Gelombang Sinus	50 Hz
Frekuensi Gelombang Segitiga	100-426 Hz

Setelah spesifikasi pada sumber sinyal ditentukan, maka dapat ditentukan spesifikasi dari modul *Discontinue Pulse Width Modulation* seperti pada table 2.

Table 2 Spesifikasi Alat

Nama	Besaran
Tegangan Input (<i>peak to peak</i>)	3 V
Tegangan Output (<i>peak to peak</i>)	5,1 V
Frekuensi	100 Hz

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dari perancangan sistem, realisasi alat dan pengujian, maka dapat disimpulkan bahwa telah dihasilkan sinyal sinusoidal tiga fasa sebagai referensi dengan amplitudo yang dapat diatur dari $1V_{pp} - 15V_{pp}$ frekuensi sebesar 50Hz, sinyal *Discontinue Pulse Width Modulation* dengan tegangan input sebesar $3V_{pp}$, tegangan output sebesar $5,1 V_{pp}$ dan frekuensi sebesar 100Hz. Untuk mengembangkan penelitian ini, penulis memberi saran agar sumber sinyal yang dihasilkan berasal dari mikrokontroler Arduino UNO dengan menggunakan modul AD9833 dan dalam pembuatan inverter tiga fasa menggunakan modul *Discontinue Pulse Width Modulation* sebagai pengendali.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tim peneliti mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bandung, melalui Wakil Direktur Bidang Akademik atas bantuan pendanaan

penyusunan penelitian nomor B/402/PL1.R1/EP.00.08/2021 kelompok A1).

REFERENSI

- [1] S. Y. Kim, S. G. Song and S. J. Park, "Minimum Loss Discontinuous Pulse-Width Modulation Per Phase Method for Three-Phase Four-Leg Inverter," in *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 122923-122936.
- [2] F. Liu, K. Xin and Y. Liu, "An adaptive Discontinuous Pulse Width Modulation (DPWM) method for three phase inverter," in *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2017, pp. 1467-1472.
- [3] T. Xu, R. Wei, K. Zhou and F. Gao, "Global synchronous discontinuous pulse width modulation method with fast calculation capability for distributed three-phase inverters," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 103-112, 2016.
- [4] S. Bhattacharya, D. Mascarella and G. Joos, "Space-Vector-Based Generalized Discontinuous Pulsewidth Modulation for Three-Level Inverters Operating at Lower Modulation Indices," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, no. 2, pp. 912-924, 2017.
- [5] G. Gabriele, J. Loncarski, and M. Srdovic, "Analysis and Minimization of Output Current Ripple for Discontinuous Pulse-Width Modulation Techniques in Three-Phase Inverters" *Energies* 9, no. 5: 380, 2016.
- [6] J. C. Giacomini, L. Michels, M. C. Cavalcanti and C. Rech, "Modified Discontinuous PWM Strategy for Three-Phase Grid-Connected PV Inverters With Hybrid Active–Passive Damping Scheme," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 8, pp. 8063-8073, 2020.
- [7] Mandrioli, Riccardo, A. Viatkin, M. Hammami, M. Ricco, and G. Grandi, "A Comprehensive AC Current Ripple Analysis and Performance Enhancement via Discontinuous PWM in Three-Phase Four-Leg Grid-Connected Inverters" *Energies* 13, no. 17: 4352, 2020.
- [8] Hossameldin, Ahmed A., Ahmed K. Abdelsalam, Ahmed A. Ibrahim, and Barry W. Williams, "Enhanced Performance Modified Discontinuous PWM Technique for Three-Phase Z-Source Inverter" *Energies* 13, no. 3: 578, 2020.
- [9] Y. Ko, M. Andresen, G. Buticchi, J. Lee and M. Liserre, "Modulation strategy for highly reliable cascade H-Bridge inverter based on discontinuous PWM," in *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2017, pp. 3241-3246.
- [10] B. Zhang, C. Zhang, X. Xing, X. Li and Z. Chen, "Novel Three-Layer Discontinuous PWM Method for Mitigating Resonant Current and Zero-Crossing Distortion in Vienna Rectifier With an LCL Filter," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, vol. 36, no. 12, pp. 14478-14490.

