

Rancang Bangun Modul Trapezium *Pulse Width Modulation (TPWM)*

Indra Muhammad Faizal¹, Dwi Septiyanto², Nanang Mulyono³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung
Jl. Gegerkalong Hilir, Ds Ciwaruga 40012, Bandung, Indonesia
indra.muhamad.tlis18@polban.ac.id

Abstrak

Pemanfaatan elektronika daya sekarang ini banyak digunakan pada industri-industri di dunia, sebagai perangkat utama pada energi terbarukan. Dari banyaknya perangkat elektronika daya yang digunakan salah satunya yaitu inverter. Khususnya di industri, sebuah inverter dapat digunakan sebagai supply sumber tegangan AC dari pembangkit listrik di industri yang sumbernya DC, ataupun untuk pengontrolan motor induksi baik itu motor satu fasa atau motor tiga fasa. Ada berbagai macam metode untuk pengendalian inverter ini salah satunya adalah metode lebar pulsa atau *Pulse Width Modulation (PWM)*. Tujuan dari penelitian ini adalah menghasilkan Modul Trapezium *Pulse Width Modulation 3 Fasa* yang berbeda fasa 120° dengan variable amplitudo dan variabel frekuensi. Metode yang digunakan adalah mengubah sinyal sinusoidal kedalam bentuk trapezium dengan menggunakan rangkaian analog. Sinyal input berupa sinusoidal satu fasa disuapkan ke rangkaian penggeser fasa guna menghasilkan sinyal sinusoidal 3 fasa berbeda fasa 120° . Output modul penggeser fasa kemudian disuapkan ke rangkaian zero crossing untuk menghasilkan sinyal kotak 3 fasa. Sinyal kotak tersebut disuapkan ke modul converter untuk menghasilkan sinyal trapezium 3 fasa. Output modul converter 3 fasa disuapkan ke modul pengatur amplitudo untuk menghasilkan sinyal trapezium 3 fasa yang variable. Output sinyal modul pengatur amplitudo disuapkan ke modul komparator guna menghasilkan sinyal pwm. Output modul komparator kemudian disuapkan ke modul pemisah polaritas guna menghasilkan sinyal pwm yang berbeda polaritas. Hasil yang didapat yaitu sinyal TPWM tiga fasa yang berbeda 120° listrik dengan amplitudo pada saat ON atau pada polaritas positif sebesar 4,142 V dan frekuensinya sebesar 204,734 Hz, dan pada saat OFF atau polaritas negative dengan amplitudonya sebesar 4,196 V dan frekuensinya sebesar 209,720 Hz.

Kata kunci: Trapezium *Pulse Width Modulation*, gelombang sinyal, amplitudo, frekuensi.

I. PENDAHULUAN

Dengan semakin berkembangnya teknologi pada zaman sekarang yang umumnya menggunakan sumber energi listrik sebagai sumber utamanya, tentunya kebutuhan akan sumber energi listrik sangat dibutuhkan oleh masyarakat dan industri. Karena kebutuhan sumber energi listrik yang tinggi, orang-orang mulai mencari sumber energi alternatif. Energi alternative yang sudah dikembangkan antara lain adalah energy surya, geothermal, air dan angina [1]. Sumber nergi yang didapat dari sumber energi alternative tersebut, merupakan sumber tegangan DC (*Direct Current*). Sedangkan perngkat elektronik yang dipakai masyarakat dan peralatan-peralatan di industri, kebanyakan masih menggunakan sumber tegangan AC (*Alternating Current*). Oleh sebab itu

dibutuhkan perangkat elektrik yang bisa merubah sumber tegangan DC menjadi sumber tegangan AC. Perangkat elektrik yang digunakan untuk mengubah tegangan DC ke menjadi tegangan AC disebut juga dengan inverter [2]. Ada berbagai macam pengendalian *switching* untuk inverter ini, salah satunya adalah metode lebar pulsa atau *pulse width modulation*.

Referensi [3] dari penelitian Anamaria MITRAN, Alexandru BIOTOLEANU, Mihaita LINCA yang berjudul "*Energetical Analysis Of Induction Motor And Voltage Inverter With Sinusoidal And Trapezoidal Pwm Control*" dalam penelitian ini analisis energetik sistem telah dilakukan di lingkungan Matlab Simulink, yang mempertimbangkan motor induksi yang ditenagai oleh inverter tegangan, menggunakan modulasi sinusoidal dan trapesium, sebagai strategi perintah.

Setelah simulasi sistem penggerak untuk kedua metode perintah (sinusoidal dan trapezium modulasi) analisis energi dilakukan, mendapatkan efisiensi, faktor daya dan kerugian total, yang disebabkan oleh setiap metode modulasi. Hasil dari penelitian ini dua metode modulasi yang dianalisis memiliki hasil yang berbeda, untuk frekuensi yang berbeda dan memuat torsi. Modulasi trapesium membawa beberapa keuntungan, terutama dalam hal efisiensi.

Referensi [4] dari penelitian R. Bensraj, S. P. Natarajan melakukan penelitian yang berjudul “MULTICARRIER TRAPEZOIDAL PWM STRATEGIES FOR A SINGLE PHASE FIVE LEVEL CASCADED INVERTER” dalam penelitian ini menyajikan pendekatan baru untuk mengontrol harmonisa keluaran tegangan dari Cascaded Multilevel Inverter (CMLI) yang menggunakan strategi switching PWM trapesium. Metode Carrier Disposition (CD) dan Phase Shift Metode (PS) yang digunakan dievaluasi menggunakan spektrum tegangan keluaran dan ukuran kinerja lainnya seperti faktor puncak, faktor bentuk dll dan penggunaan redundansi status inverter untuk melakukan kontrol khusus aplikasi tambahan tugas-tugas seperti kontrol aliran daya dari setiap sumber DC. Makalah ini berfokus pada Teknik Multicarrier Trapezoidal PWM (MCTPWM) dengan Phase Disposition (PD), Phase Opposition Disposition (POD), Alternative Phase Opposition Disposition (APOD) dan PS carrier untuk CMLI yang dipilih. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB / SIMULINK. Hasil dari penelitian ini indeks kinerja seperti % THD (ukuran kedekatan bentuk antara bentuk gelombang dan komponen fundamentalnya), V_{rms} fundamental, DF (ukuran jumlah harmonisa yang tersisa dalam output setelah mengalami redaman orde dua), CF (digunakan untuk menentukan peringkat arus puncak perangkat) dan FF (ukuran bentuk tegangan keluaran) telah dievaluasi dan ditabulasi. Strategi PWM yang tepat dapat digunakan tergantung pada ukuran kinerja yang diperlukan dalam aplikasi tertentu.

Referensi [5] Subastian Yusuf Panggabean, Arinto Setyawan, dan Syaiful Alam berjudul “Rancang Bangun Inverter Satu Fasa Menggunakan Teknik High Voltage PWM (Pulse Width Modulation)”, jurnal ini bertujuan untuk menghasilkan inverter yang memiliki gelombang output sinyal sinusoidal yang memiliki frekuensi 50Hz dan untuk mengetahui hasil dari implementasi PWM dengan switching tegangan tinggi. PWM didapatkan melalui proses pencuplikan murni dengan cara membandingkan sinyal sinusoidal dengan sinyal segitiga. Rancangan sistem alat ini

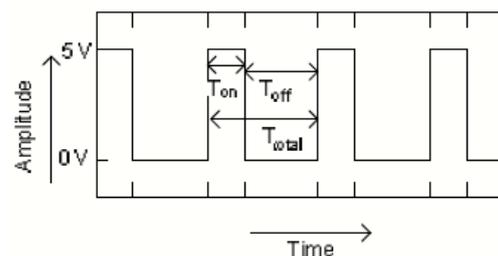
terdiri dari beberapa blok rangkaian yaitu DC-DC booster, Osilator PWM, Gate Driver, Full-Bridge Inverter, dan Low Pass Filter. Dalam proses perancangan ini, ada dua pencapaian keberhasilan yang diharapkan yaitu, keberhasilan pengujian untuk setiap blok dan keberhasilan untuk sistem. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa sistem inverter ini digunakan pada frekuensi modulasi 3.3KHz dan hanya dapat mengubah 12 VDC menjadi tegangan 42VDC yang kemudian dikonversi menjadi 20VAC/50Hz gelombang sinyal sinusoidal. Hasil lain dari penelitian ini yaitu sulit menerapkan PWM dengan *switching* tegangan tinggi pada frekuensi modulasi yang rendah.

Tujuan pada penelitian ini yaitu membuat sebuah alat yang bisa menghasilkan sinyal pulsa untuk pengendalian inverter yang menggunakan metode trapezium *pulse width modulation*, melalui penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan pengendalian untuk inverter yang lebih efisien dari metode pengendalian untuk inverter lainnya.

II. METODE PENELITIAN

II.1 Pulse Width Modulation (PWM)

Sebuah sistem untuk membangkitkan sinyal output yang periodnya berulang antara *high* dan *low* yang mana kita dapat mengontrol durasi sinyal antara *high* dan *low* sesuai yang diinginkan itulah yang dinamakan PWM. *Duty cycle* merupakan persentase dari periode sinyal *high* dan periode sinyal *low*, persentase dari *duty cycle* akan berbanding lurus dengan tegangan rata-rata yang dihasilkan [6]. Modulasi lebar pulsa atau PWM dapat diperoleh dengan bantuan sebuah gelombang kotak yang siklus kerja atau *duty cycle* gelombangnya dapat berubah-ubah untuk mendapatkan suatu tegangan output yang bervariasi, yaitu nilai rata-rata dari gelombang tersebut. Pulsa PWM dibangkitkan dari perbandingan sinyal referensi (V_{ref}) dan sinyal kontrol (V_{cont}). Sinyal PWM ini digunakan untuk melakukan pengontrolan besarnya waktu T_{on} dan T_{off} yang merupakan representasi dari perbandingan kedua sinyal tersebut [7].



Gambar 1 Bentuk Gelombang Pulsa [6]

T_{on} merupakan waktu yang mana tegangan output pada posisi tinggi (*high* atau 1) dan T_{off} merupakan waktu yang mana tegangan output berada di posisi rendah (*low* atau 0). T_{total} merupakan waktu dari satu siklus atau penjumlahan antara T_{on} dengan T_{off} , atau biasa disebut dengan istilah perioda satu gelombang.

$$T_{total} = T_{on} + T_{off} \quad (1)$$

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

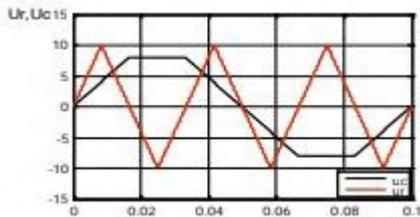
$$D = \frac{T_{on}}{T_{on}+T_{off}} = \frac{T_{on}}{T_{total}} \quad (2)$$

Tegangan *output* dapat bervariasi dengan *duty cycle* dan dapat dirumuskan dalam persamaan 3 [6].

$$V_{out} = D \times V_{in} = \frac{T_{on}}{T_{on}+T_{off}} \quad (3)$$

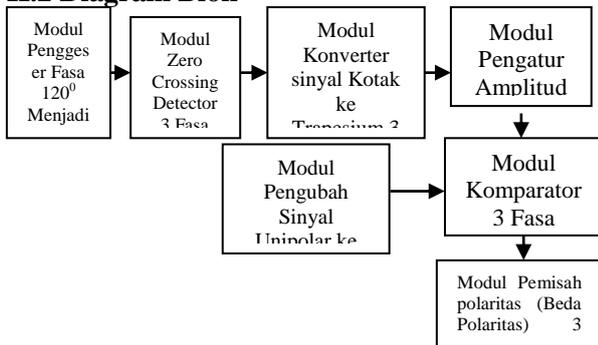
II.1.1 Modulasi Trapesium PWM

Modulasi trapesium dengan metode itu digunakan untuk mendapatkan sinyal kontrol untuk perangkat daya semikonduktor, yang utama komponen inverter statis, metode ini mirip dengan modulasi sinusoidal. Tegangan kontrol dianggap sama kaki trapesium dengan interval waktu yang sama. Jadi, sinyal perintah untuk transistor terletak di cabang inverter, akan diperoleh membandingkan sinyal perintah trapesium, dengan sinyal referensi berbentuk triangular, dengan frekuensi jauh lebih unggul dari frekuensi perintah.[3]



Gambar 2. Prinsip utama dari Modulasi [3].

II.2 Diagram Blok



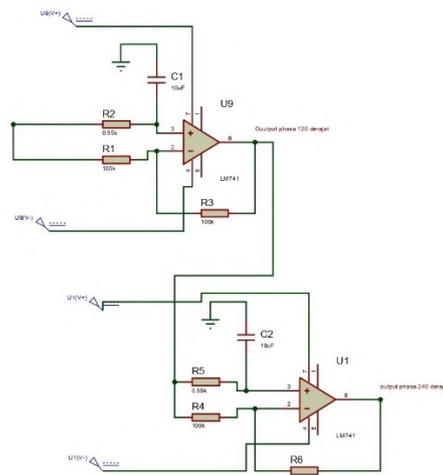
Gambar 3. Diagram Blok Perencanaan Sistem

II.2.1 Modul penggeser fasa 120° Menjadi 3 Fasa

Modul penggeser fasa 120° menjadi 3 fasa seperti ditunjukkan pada gambar 4 ini berfungsi untuk menghasilkan sinyal sinusoidal 3 fasa yang berbeda 120° listrik, dimana rangkaian modul

penggeser fasa 120° menjadi 3 fasa atau rangkaian *phase shifter* menggunakan op-amp LM741 ini dibutuhkan beberapa komponen lain yaitu resistor dan kapasitor [8].

Output Modul penggeser fasa 120° menjadi 3 fasa ini juga digunakan sebagai input untuk rangkaian Modul *Zero Crossing Detector* (ZCD) 3 fasa, adapun gelombang yang digunakan untuk keperluan ZCD 3 fasa adalah gelombang sinusoidal 3 fasa yang berbeda 120° listrik.

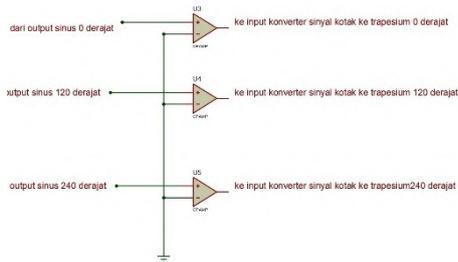


Gambar 4. Rangkaian Modul penggeser fasa 120° Menjadi 3 Fasa

II.2.2 Modul *Zero Crossing Detector* 3 Fasa

Modul *zero crossing detector* 3 fasa seperti ditunjukkan pada gambar 5 ini berfungsi untuk menghasilkan sinyal kotak 3 fasa yang berbeda 120° listrik, ketika rangkaian ini mendeteksi arus sebesar nol maka output dari IC akan menghasilkan output berupa pulsa sempit pada saat terjadi persilangan nol pada tegangan AC yang dideteksi. [9]. Rangkaian modul *zero crossing detector* ini disusun dengan menggunakan komponen IC OP-AMP LM741.

Output modul *zero crossing detector* 3 fasa ini juga digunakan sebagai input untuk rangkaian Modul Konverter Sinyal Kotak ke Trapesium 3 Fasa, adapun gelombang yang digunakan untuk keperluan Modul Konverter Sinyal Kotak ke Trapesium 3 Fasa adalah gelombang kotak 3 fasa yang berbeda 120° listrik.

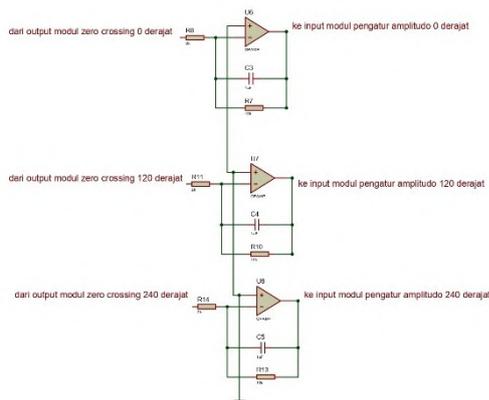


Gambar 5. Rangkaian Modul Zero Crossing Detector 3 Fasa

II.2.3 Modul Konverter sinyal Kotak ke Trapezium 3 Fasa

Modul konverter sinyal kotak ke trapesium 3 fasa seperti ditunjukkan pada gambar 6 ini berfungsi untuk menghasilkan sinyal trapesium 3 fasa yang berbeda 120⁰ listrik, dimana rangkaian modul penggeser fasa 120⁰ menjadi 3 fasa ini disusun dengan menggunakan komponen resistor, kapasitor dan IC OP-AMP LM741.

Output modul konverter sinyal kotak ke trapesium 3 fasa ini juga digunakan sebagai input untuk rangkaian modul pengatur sinyal amplitudo, adapun gelombang yang digunakan untuk keperluan modul pengatur sinyal amplitudo adalah gelombang sinyal trapesium 3 fasa yang berbeda 120⁰ listrik.



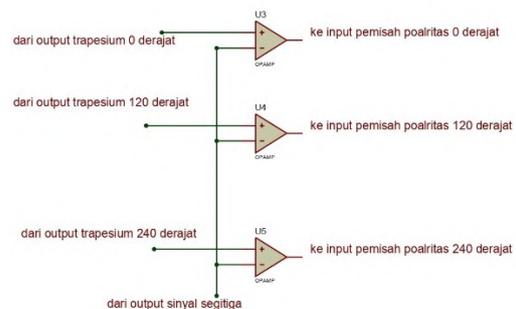
Gambar 6. Rangkaian Modul Konverter Sinyal Kotak Ke Trapezium 3 Fasa

II.2.4 Modul Komparator 3 Fasa

Modul komparator adalah rangkaian elektronik yang membandingkan satu sinyal analog dengan satu sinyal analog lainnya, dan kemudian menghasilkan keluaran berupa logika biner. Logika

biner disini dapat diterjemahkan menjadi keluaran tegangan tinggi atau rendah yang digunakan untuk proses selanjutnya [10]. Proses ini akan menghasilkan sinyal pulsa atau sinyal *pulse width modulation* 3 fasa yang berbeda 120⁰ listrik, dimana rangkaian modul komparator 3 fasa ini disusun dengan menggunakan komponen IC OP-AMP LM741, yang inputnya berasal dari modul pengatur amplitudo yang menghasilkan sinyal trapezium 3 fasa dan dari rangkaian modul pengubah sinyal unipolar ke bipolar. Untuk rangkaian modul komparator 3 Fasa ditunjukkan pada gambar 7.

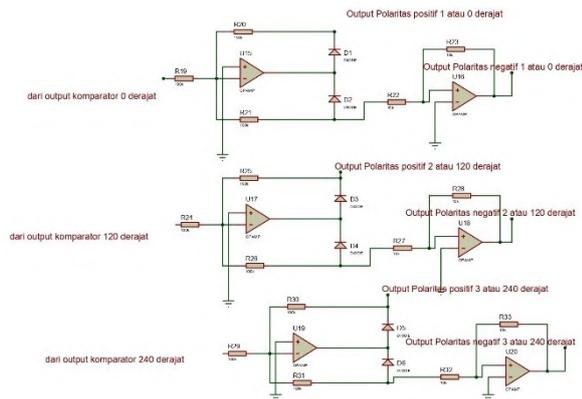
Output modul komparator 3 fasa ini juga digunakan sebagai input untuk rangkaian Modul Pemisah polaritas (Beda Polaritas) 3 Fasa, adapun gelombang yang digunakan untuk keperluan Modul Pemisah polaritas (Beda Polaritas) 3 Fasa adalah gelombang sinyal pulsa atau sinyal *pulse width modulation* 3 fasa yang berbeda 120⁰ listrik.



Gambar 7. Rangkaian Modul Komparator

II.2.5 Modul Pemisah polaritas (Beda Polaritas) 3 Fasa

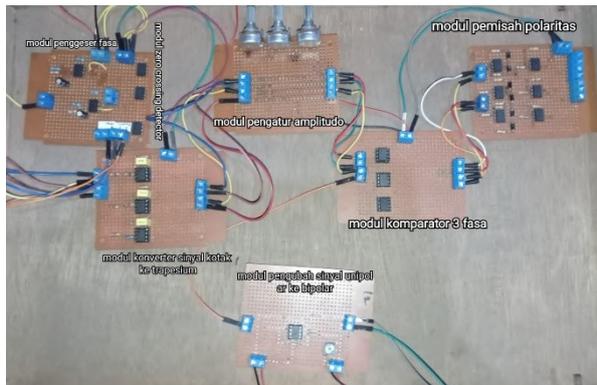
Modul pemisah polaritas (beda polaritas) 3 fasa seperti ditunjukkan pada gambar 8 ini berfungsi untuk menghasilkan sinyal pulsa atau sinyal *pulse width modulation* 3 fasa dengan polaritas berbeda yang berbeda 120⁰ listrik, dimana rangkaian modul pemisah polaritas (beda polaritas) 3 fasa ini disusun dengan menggunakan komponen resistor, diode, dan IC OP-AMP LM741.



Gambar 8. Rangkaian Modul Pemisah polaritas (Beda Polaritas) 3 Fasa

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada gambar 9 dibawah ini merupakan gambar realisasi dari keseluruhan system modul trapezium *pulse width modulation*. Untuk mengambil data pada keseluruhan sistem ini diambil dengan menggunakan oscilloscope digital ISDS205 dengan fitur 2 channel, *vertical resolution* 8 Bit, *bandwith* 16MHz(Max20M), dan *max sample* 48MS/s

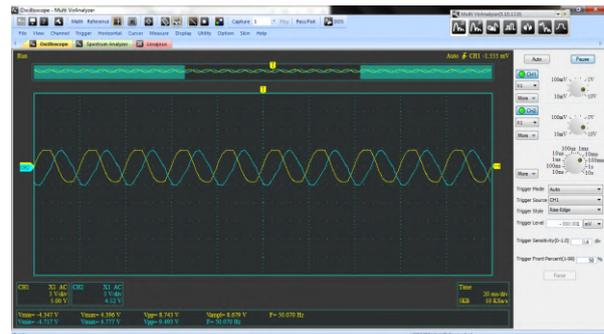


Gambar 9. Gambar realisasi keseluruhan system modul trapezium *pulse width modulation*

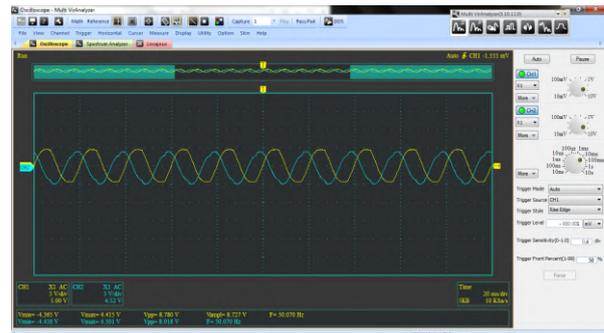
Pada gambar 9 diatas menunjukkan bagaimana alat ini dirangkai dari yang pertama modul penggeser fasa outputnya disambungkan ke input modul *zero crossing detector*, lalu output dari modul *zero crossing detector* ke input modul pengubah atau konverter sinyal kotak ke trapezium, lalu output modul pengubah atau konverter sinyal kotak ke trapezium disambungkan ke input modul pengatur amplitudo, kemudian output modul pengatur amplitudo masuk ke input modul kompartor pada input positif (+), output modul pengubah sinyal unipolar ke bipolar juga masuk ke input modul kompartor pada input bagian negative (-). Kemudian output modul kompartor disambungkan ke input pemisah polaritas.

III.1 Pengujian Modul Penggeser Fasa 120⁰ Menjadi Tiga Fasa

Bentuk gelombang sinyal setelah yang sudah digeser 120⁰ listrik dapat dilihat pada Gambar 10 yang berwarna biru, gelombang ini selanjutnya digeser lagi 120⁰ listrik agar bisa menghasilkan sinyal sinusoidal 3 fasa yang ditunjukkan pada gambar 11 yang berwarna biru . Gelombang sinyal sinusoidal 3 fasa ini selanjutnya akan digunakan untuk input modul *Zero Crossing Detector* 3 fasa untuk menghasilkan sinyal kotak 3 fasa



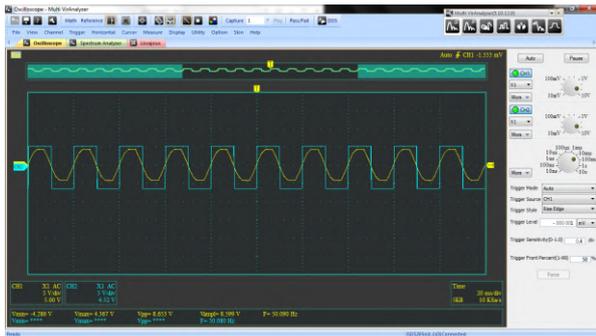
Gambar 10. Gelombang sinusoidal yang sudah digeser 120⁰ listrik



Gambar 11. Gelombang sinusoidal yang sudah digeser 240⁰ listrik

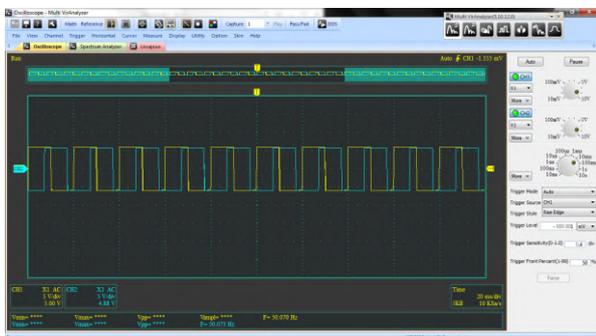
III.2 Pengujian Modul Zero Crossing Detector 3 Fasa

Hasil pengukuran pada rangkaian ini dapat dilihat pada Gambar 12 yang berwarna biru dapat dilihat proses dimana rangkaian *Zero Crossing Detector* 3 Fasa. Selanjutnya output sinyal *Zero Crossing Detector* 3 Fasa ini akan disambungkan ke input modul converter sinyal kotak ke trapezium 3 fasa.



Gambar 12. Output Zero Crossing Detector pada fasa 0°

Pada Gambar 13 pada channel 2 yang berwarna biru dibawah ini merupakan output dari rangkain modul Zero Crossing Detector yang sudah digeser sebesar 120° .



Gambar 13. Output Zero Crossing Detector pada fasa 120°

Pada Gambar 14 pada channel 2 yang berwarna biru dibawah ini merupakan output dari rangkain modul Zero Crossing Detector yang sudah digeser sebesar 240° .

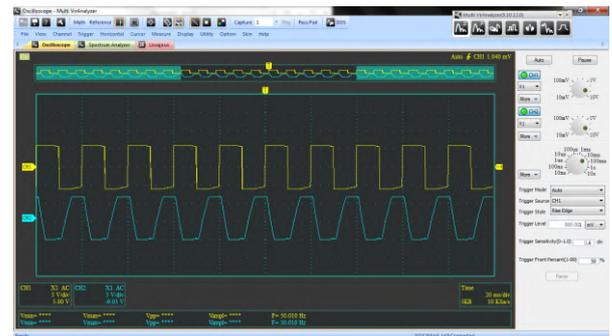


Gambar 14. Output Zero Crossing Detector pada fasa 240°

III.1.3 Modul Konverter sinyal Kotak ke Trapesium 3 Fasa

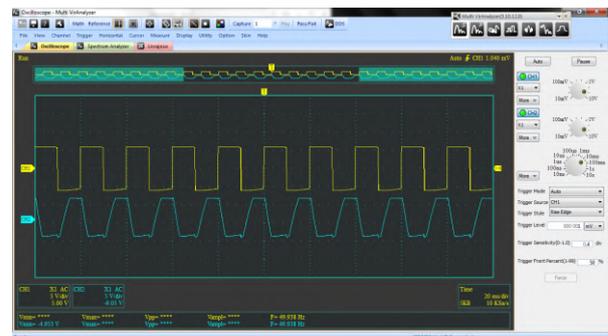
Hasil sinyal output trapesium ditunjukkan pada Gambar 15 pada channel 2 yang berwarna biru, dimana inputnya berasal dari modul Zero Crossing Detector 3 fasa, yang mana output sinyal trapesium

ini akan disambungkan ke modul pengatur amplitudo guna diatur amplitudonya.



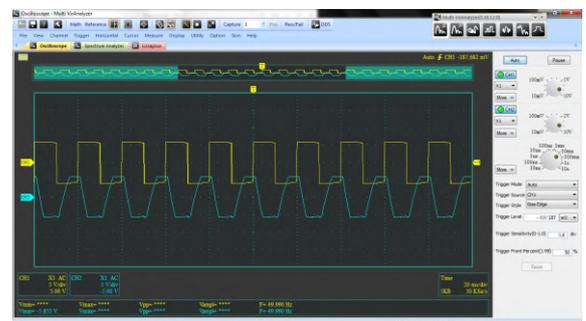
Gambar 15. Output Konverter Sinyal Kotak ke Trapesium pada fasa 0°

Pada Gambar 16 pada channel 2 yang berwarna biru dibawah ini merupakan output dari rangkain modul Konverter Sinyal Kotak ke Trapesium yang sudah digeser sebesar 120° .



Gambar 16. Output Konverter Sinyal Kotak ke Trapesium pada fasa 120°

Pada Gambar 17 pada channel 2 yang berwarna biru dibawah ini merupakan output dari rangkain modul Konverter Sinyal Kotak ke Trapesium yang sudah digeser sebesar 240° .



Gambar 17. Output Konverter Sinyal Kotak ke Trapesium pada fasa 240°

III.1.4 Modul Komparator 3 Fasa

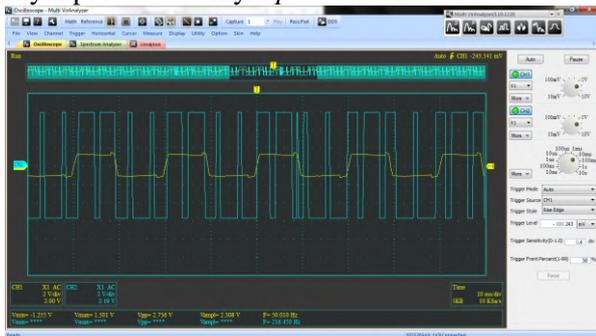
Input pada modul komparator 3 Fasa pada Gambar 18 ini berasal dari output sinyal trapesium yang amplitudonya sudah diatur pada tegangan

2,298 V dengan frekuensi 50 Hz dan dari sinyal segitiga yang sinyalnya sudah bipolar yang amplitudonya 3,291 V dengan frekuensi sebesar 208,507 Hz.



Gambar 18. Input pada rangkaian modul komparator

Output gelombang sinyal pada modul komparator ditunjukkan pada Gambar 19 pada channel 2 yang berwarna biru yang hasilnya berupa sinyal pulsa atau sinyal *pulse width modulation*.

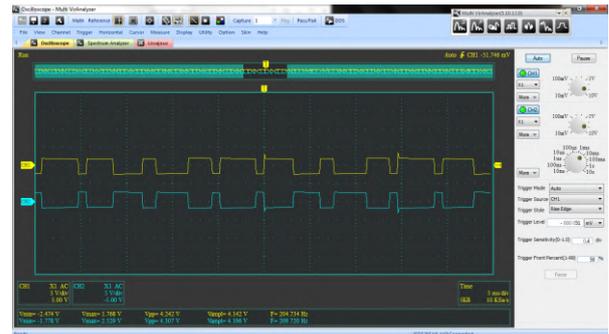


Gambar 18. Output pada rangkaian modul komparator

Terlihat pada Gambar 18 output pulsanya atau *pulse width modulation* frekuensinya menjadi 216,450 Hz dan amplitudonya juga menjadi bertambah.

III.1.5 Pengujian Modul Pemisah polaritas (Beda Polaritas) 3 Fasa

Pada gambar 19 dibawah ini adalah sinyal output pada modul pemisah polaritas yang sinyal pada saat ON atau positif ditunjukkan pada channel 1 yang berwarna kuning yang sudah 3 fasa dan berbeda fasa 120° listrik dengan amplitudonya sebesar 4,142 V dan frekuensinya sebesar 204,734 Hz, dan pada saat OFF atau polaritas negative pada channel 2 yang berwarna kuning yang sudah 3 fasa dan berbeda fasa 120° listrik dengan amplitudonya sebesar 4,196 V dan frekuensinya sebesar 209,720 Hz.



Gambar 19. Output pada rangkaian modul pemisah polaritas

IV. KESIMPULAN

Setelah dilaksanakannya percangan sistem, realisasi alat dan pengujian serta pengambilan hasil, maka penulis dapat menarik kesimpulan yang pertama yaitu telah dihasilkannya sinyal trapezium 3 fasa dengan beda fasa sebesar 120° listrik. Kemudian telah menghasilkan sinyal *pulse width modulation* dengan amplitudo pada saat ON atau pada polaritas positif sebesar 4,142 V dan frekuensinya sebesar 204,734 Hz, dan pada saat OFF atau polaritas negative dengan amplitudonya sebesar 4,196 V dan frekuensinya sebesar 209,720 Hz. Pengembangan yang akan dilakukan dipenelitian selanjutnya, penulis memberi saran yang pertama adalah pembuatan inverter 3 fasa dengan menggunakan metode TPWM. Selanjutnya sumber sinyal yang dihasilkan berasal dari Mikrokontroler Arduino Uno dengan menggunakan *shield* AD9833.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tim peneliti mengucapkan terimakasih kepada Politeknik Negeri Bandung, melalui wakil Direktur Akademik atas bnatuan pendanaan penyusunan tugas akhir nomor B/402/PL1.R1/EP.00.08/2021 kelompok A1.

REFERENSI

- [1] Pertiwi, F. D., & Kawano, D. S. (2013). Pengaruh Penambahan PWM (Pulse Width Modulation) Pada Generator HHO Tipe Dry Cell. *JURNAL TEKNIK POMITS*, 2(2).
- [2] Hutagalung, Siti Nurhabibah, and Melda Panjaitan. "Protype rangkaian inverter dc ke ac 900 watt." *Pelita Informatika: Informasi dan Informatika* 6.1 (2017): 64-66.
- [3] Mitran, A., Biotoleanu, A., & Linca, M. (2012). *Energetical Analysis Of Induction Motor And Voltage Inverter With Sinusoidal And*

Trapezoidal Pwm Control. Buletinul Agir, 379-384.

- [4] Bensraj, R., & Natarajan, S. P. (2010). *Multicarrier Trapezoidal Pwm Strategies For A Single Phase Five Level Cascaded Inverter. Journal Of Engineering Science And Technology, 5(4), 400-411.*
- [5] Subastian Yusuf Panggabean, Arinto Setyawan, Syaiful Alam "Rancang Bangun Inverter Satu Fasa Menggunakan Teknik High Voltage PWM (Pulse Width Modulation)," Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro, Vol. 11, no.2. 2017.
- [6] Pujiono, A. (2014). *Pemasangan Motor Dc Pada Sekuter Dengan Pengendali Pulse Width Modulation.* Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- [7] Adam, Ahmad Antares. "Perbandingan Konsumsi Daya oleh Alat Pengatur Kecepatan Motor Universal yang Menggunakan Metode Modulasi Lebar Pulsa (Pwm) dan Metode Tahanan Depan." *SMARTek 9.3* (2011).
- [8] Heryanto, P. A. (2019). *Rancang Bangun Alat Uji Power Factor Controller berbasis Variasi Arus dan Beda Fasa.* Politeknik Negeri Bandung.
- [9] Effendi, & Fitriady. (2019). *Disain Dan Aplikasi Rangkaian Triger Scr Untuk Penyearah Terkendali Satu Fasa(Design and Implementation SCR Trigger Circuit For Single Phase Controlled Rectifiers).* *JurnalJ-Innovation, 8(1), 25-29.*
- [10] Asmara, Andik. "Pengaman Hubung Singkat Tegangan Searah Menggunakan Komparator Pada Modul Rangkaian Elektronik Untuk Pembelajaran." *Jurnal Edukasi Elektro 2.1* (2018).