

RANCANG BANGUN KENDALI INVERTER BERBASIS ARDUINO DENGAN METODE SPWM

¹ Ikhwan Romadhoni, ² Awan Uji Krismanto, ³ Abraham Lomi
Teknik Elektro S1, Institut Teknologi Nasional Malang, Indonesia

¹ikhwanromadhoni2@gmail.com, ²awan_uji_krismanto@lecturer.itn.ac.id, ³abraham @lecturer.itn.ac.id

Abstrak—Dewasa ini masih banyaknya pembangkit listrik yang masih menggunakan bahan bakar yang berasal dari fosil. Dampak yang dihasilkan dari kegiatan ini membuat suhu yang ada di bumi semakin tinggi dan ekosistem yang semakin buruk, solusi yang bisa dilakukan saat ini adalah beralih dari pembangkitan listrik dengan bahan bakar fosil Menuju pembangkitan listrik dengan energi terbarukan. Salah satunya yaitu PLTS (pembangkit listrik tenaga surya), dalam PLTS (pembangkit listrik tenaga surya) dibutuhkan alat elektronika daya yang bernama inverter ,inverter berfungsi merubah arus searah menjadi arus bolak balik. Inverter yang dibuat dalam penelitian ini memiliki spesifikasi tegangan keluaran 220 volt memiliki frekuensi 50 hz dan nilai THD dibawah 10%

Metode pemodulasian yang dipakai dalam pembuatan inverter adalah metode spwm. metode spwm adalah salah satu teknik pensaklaran yang menghasilkan bentuk gelombang keluaran inverter dengan karakteristik yang mendekati sinusoidal, mikrokontroler yang dipakai dalam penelitian ini adalah Arduino dengan IC atmega328p dan IC atmega 2560

Dalam penelitian ini didapatkan beberapa hasil dari inverter yang sudah dirancang untuk Inverter 1 fasa nilai tegangan sebesar 237,5 volt dengan frekuensi sebesar 49,97 Hz dan nilai THD sebesar 9,23%, untuk inverter 3 fasa masing-masing fasa secara berurutan pada fase a,b,c memiliki nilai tegangan sebesar 230,5 volt, 223,8 volt, 227,9 volt dengan frekuensi 49,48 Hz, 49,70 Hz, 49,50 Hz dan nilai THD sebesar 9,26%, 9,94%, 9,49% hasil ini didapatkan menggunakan inverter dengan metode SPWM.

Kata Kunci: PLTS, Inverter, SPWM, Arduino

I. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki potensi untuk mempunyai pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) yang besar. Energi surya memiliki potensi lebih dari 200 GW (*giga watt*) dengan efisiensi teknologi *photovoltaic* yang tersedia saat ini. Namun, pemanfaatan energi surya dalam pembangkitan listrik masih kurang dari 100 MW. [1]

Dengan berkembangnya zaman pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) tidak hanya dikuasai oleh perusahaan perusahaan besar, dengan teknologi yang sudah berkembang

dan semakin murahnya barang barang yang dibutuhkan untuk membuat plts sendiri di rumah membuat pembangkit listrik tenaga surya dirumah bukanlah hal yang tidak mungkin dengan adanya pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) skala kecil, hal ini diharapkan dapat mengurangi pembangkitan listrik dengan bahan bakar fosil.

Salah satu alat yang akan dibutuhkan dalam pembuatan pembangkit listrik skala kecil ini adalah inverter. Photovoltaic (PV) inverter adalah salah satu peralatan yang penting di Sistem PV. Inverter dapat mengubah tegangan DC dari PV menjadi Daya AC.[2].dari fungsi tersebut terdapat inverter 1 dan 3 fasa dan jenis gelombang outputnya yang berbeda.

Inverter dapat dibedakan dari jenis outputnya, jumlah fasa yang ada di inverter, rangkaian, dan metode pembangkitannya serta tujuannya untuk apa inverter tersebut dibuat. Yang paling umum beredar di masyarakat adalah inverter satu fasa dengan gelombang kotak (*square wave*) gelombang jenis ini memiliki kekurangan jika digunakan untuk beban induksi yang ada di rumah tangga ataupun industri rumahan (*home industry*) yaitu cepat rusaknya beban induksi tersebut.

Salah satu metode pembangkitan pada inverter adalah dengan cara metode *sinusoidal pulse with modulation* (SPWM). SPWM adalah metode pembangkitan gelombang PWM yang membentuk seolah gelombang sinusoidal, yang memiliki variasi *duty cycle* banyak pada satu sinyal PWM yang dibangkitkan[3]. Dalam membangkitkan gelombang sinyal PWM dibutuhkan sebuah pembangkit sinyal, hal ini dapat ditemukan pada mikrokontroler Arduino, salah satu jenis dari Arduino adalah Arduino mega 2560 dan Arduino uno.

Dalam penelitian ini akan dibuat inverter 3 fasa dan 1 fasa, dalam pembuatan inverter 1 fasa yang dibuat menggunakan mikrokontroler Arduino uno dengan ic atmega 328, sedangkan pada inverter 3 fasa akan menggunakan mikrokontroler arduono mega 2560 yang menggunakan ic

atmega 2560, penggunaan mikrokontroler yang berbeda dikarenakan *timer register* yang jumlahnya berbeda pada ic atmega 328 dan ic atmega 2560. Kemudian akan dibahas bagaimana hasil output yang berupa gelombang pada osiloskop yang dihasilkan inverter dengan metode SPWM. dan bagaimana merancang system kendali yang dapat membuat inverter dengan metode SPWM yang nantinya akan dilihat bagaimana bentuk gelombang dan outputnya

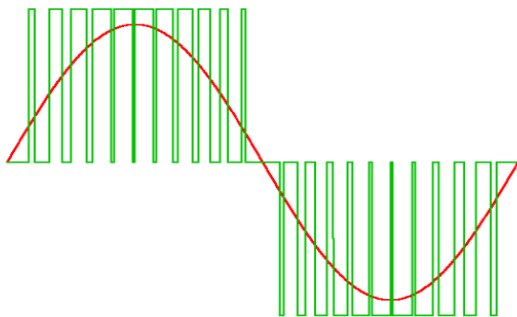
II. KAJIAN PUSTAKA

A. Inverter

Inverter merupakan sebuah alat elektronika daya yang merubah tegangan DC menjadi listrik tegangan AC. Inverter menerima sumber tegangan DC sebagai tegangan masukan yang diperoleh dari akumulator (aki).[4]

B. SPWM

SPWM merupakan metode pembangkitan gelombang PWM yang membentuk seperti sinusoidal, dan memiliki banyak variasi *duty cycle* dalam satu sinyal PWM. Untuk mendapatkan tegangan keluaran yang dapat divariasikan, cukup mengubah - ubah besarnya *duty cycle* pada PWM yang telah dibangkitkan oleh mikrokontroler. Sedangkan frekuensi dapat di variasikan dengan mengubah jarak antar *duty cycle*. [3]



Gambar 1. Sinyal SPWM dengan pengaturan *duty cycle*

C. Gate Driver

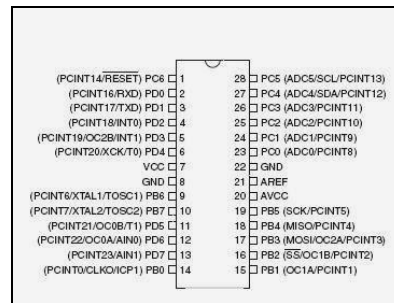
Rangkaian IC driver MOSFET diperlukan untuk memisahkan antara blok rangkaian daya dengan blok rangkaian kontrol. Pemisahan ini memiliki tujuan ketika terjadi masalah pada blok rangkaian daya pada inverter tidak sampai merusak blok rangkaian kontrol.

D. MOSFET

MOSFET adalah perangkat semikonduktor tegangan terkontrol yang berfungsi untuk mengontrol aliran dari arus. MOSFET daya adalah MOSFET yang digunakan untuk beberapa level daya. mosfet ini memiliki kelebihan pada kecepatan switching yang tinggi dan efisiensi yang bagus pada level tegangan rendah.[5]

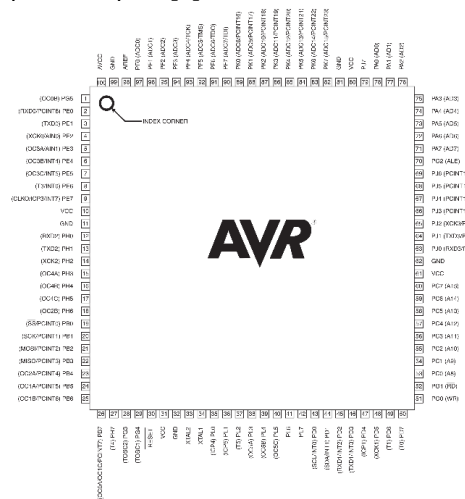
E. Mikrokontroler Atmega

Arduino merupakan sebuah papan mikrokontroler dengan desain skematik dan PCB yang memiliki open source, sehingga dapat melakukan modifikasi pada mikrokontroler tersebut. Untuk memprogram dan menjalankan Arduino diperlukan *software* arduino IDE untuk mengupload program tersebut ke Arduino.



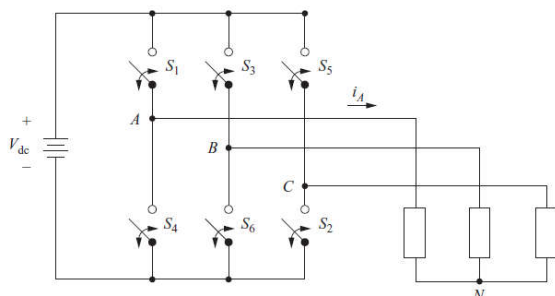
Gambar 2. IC ATmega 328

Board Arduino menggunakan Chip/IC mikrokontroler dimana pada penelitian ini menggunakan ATmega328 dan ATmega 2560. Operasi dengan berbasis waktu dapat dilaksanakan dengan tepat dikarenakan adanya mikroprosesor serta kelengkapan dengan *oscillator* 16MHz serta regulator atau *supply* minimal sebesar 5 volt.[6]. Hal ini juga berlaku untuk Chip/IC atmega 2560 yang berada pada Arduino mega atmega 2560 yang membedakan dari kedua chip ini adalah jumlah pin dan juga banyaknya timer yang dimiliki pada setiap IC.[7]



A. Inverter 3 fasa

Komponen utama dari sebuah sistem inverter, biasanya memerlukan komponen pensaklaran dengan kecepatan pensaklaran tinggi spesifikasi seperti ini biasanya ditemukan pada SCR, MOSFET, dan IGBT. Rangkaian inverter 3 fasa, minimal memerlukan 6 semikonduktor untuk membuat jembatan pada masing-masing fasa pada inverter 3 fasa. Gambar 4 adalah contoh rangkaian inverter 3 fasa.



Gambar 4. Rangkaian inverter 3 fasa

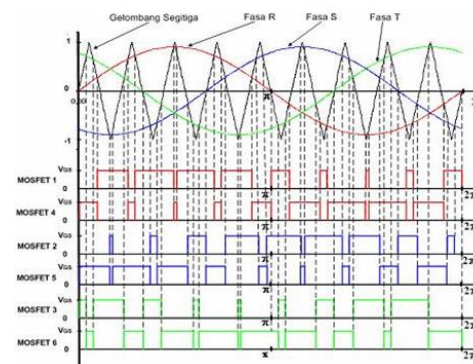
Dari gambar 4, komponen yang terpasang adalah MOSFET, kaki *drain* pada MOSFET 1 (S1) terhubung ke terminal positif dari sumber DC dan kaki *source* pada MOSFET 4 (S4) terhubung ke terminal negatif dari sumber DC, lalu kaki *source* pada MOSFET 1 (S1) terhubung ke kaki *drain* pada MOSFET 4 (S4). Hal ini juga terjadi pada MOSFET 3 (S3) dengan MOSFET 6 (S6), dan MOSFET 5 (S5) dengan MOSFET 2 (S2). Pertemuan kaki *source* MOSFET dengan kaki *drain* MOSFET yang lainnya akan menghasilkan terminal fasa. Dari gambar 4 dapat dilihat fasa A dihasilkan oleh MOSFET 1 (S1) dengan 4 (S4), fasa B dihasilkan oleh MOSFET 3 (S3) dengan 6 (S6), dan fasa C dihasilkan oleh MOSFET 5 (S5) dengan MOSFET 2 (S2).

B. Pembangkitan sinyal SPWM dengan cara analog dan digital

Pembentukan gelombang sinus pada output inverter terjadi akibat dari penyaklaran MOSFET/IGBT yang digunakan. Dari penyaklaran tersebut membentuk sinyal sinusoidal. Metode SPWM adalah salah satu metode penyaklaran yang sering digunakan untuk menghasilkan output inverter yang membentuk sinyal sinusoidal. Dalam penelitian ini peneliti menggunakan pembangkitan sinyal dengan metode SPWM. Pembangkitan sinyal SPWM dapat dilakukan dengan 2 cara yaitu:

• Pembangkitan SPWM secara analog

Pada pembangkitan PWM analog inverter SPWM, sinyal SPWM dihasilkan dengan membandingkan dua sinyal referensi, yaitu sinyal modulasi dalam bentuk gelombang sinusoidal dan sinyal pembawa dalam bentuk gelombang segitiga, menggunakan pembandingan. Rangkaian untuk jembatan analog inverter SPWM ditunjukkan pada Gambar dan bentuk gelombang tegangan keluaran inverter.[8]

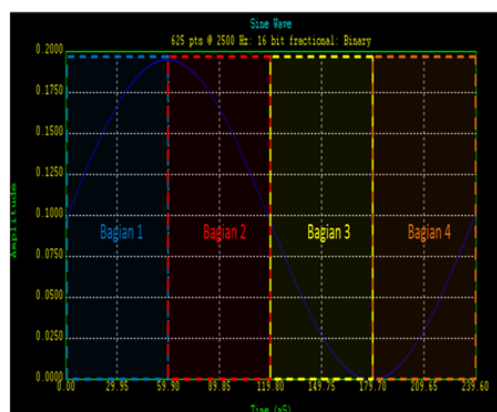


Gambar 5. sinyal carrier dan sinyal referensi pada pembangkitan secara analog

• Pembangkitan SPWM secara digital

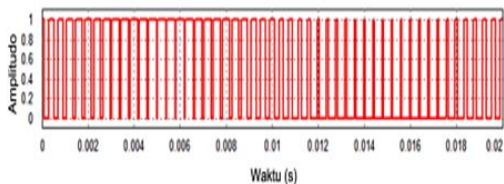
Pada pembangkitan secara digital inverter SPWM bisa juga disebut dengan pembangkitan dengan menggunakan mikrokontroler karena menggunakan mikrokontroler untuk menghasilkan sinyal SPWM secara digital. Inverter jenis ini menyederhanakan rangkaian yang ada pada pembangkitan secara analog inverter SPWM dengan mengganti sinyal modulasi generator, sinyal pembawa generator, dan pembandingan dengan mikrokontroler. Sinyal SPWM yang dihasilkan dari pembangkitan secara digital inverter SPWM memiliki karakteristik yang sama dengan sinyal SPWM dari pembangkitan secara analog inverter SPWM. Amplitudo sinyal SPWM yang dihasilkan akan memiliki besaran yang sama dengan tegangan operasi mikrokontroler yang digunakan.[8]

- Dalam pembangkitan sinyal PWM secara SPWM dengan mikrokontroler pada dasarnya adalah mengubah setengah periode gelombang sinusoidal menjadi beberapa pulsa yang memiliki lebar pulsa berbeda-beda. Contoh, dalam gelombang sinus, tegangannya minimum dimulai dari sudut 0° kemudian mulai naik sampai ke puncaknya, yaitu 90° seperti dalam gambar 6 bagian 1. Kemudian amplitudo tegangan mulai turun namun dalam posisi sebaliknya, yaitu dari 90° turun kembali ke 0° seperti dalam gambar 6 bagian 2.



Gambar 6. 4 bagian pola sinusoida dalam satu siklus

Proses pembangkitan SPWM secara digital dapat dilakukan dengan dua cara. Pertama dengan membangkitkan gelombang segitiga dan gelombang sinus. Kemudian dilakukan perbandingan antara nilai amplitudo gelombang sinus dan segitiga. Cara ini sama dengan pembangkitan sinyal SPWM secara analog tetapi bedanya hal ini dilakukan secara digital. Cara kedua yaitu dengan mencari/menghitung waktu pada setiap pulsa untuk aktif, hal ini untuk dijadikan data dalam proses pembangkitan setiap sinyal . [9]



Gambar 7. pensaklaran dalam satu siklus dengan variasi duty cycle

Langkah yang digunakan dalam proses pembangkitan sinyal SPWM dengan mikrokontroller:
Menentukan nilai duty cycle per pulsa PWM. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan rumus berikut:

$$y = A \sin (\theta) \tag{1}$$

dimana:

y : adalah lebar duty cycle per pulsa PWM

A : adalah amplitudo gelombang pulsa

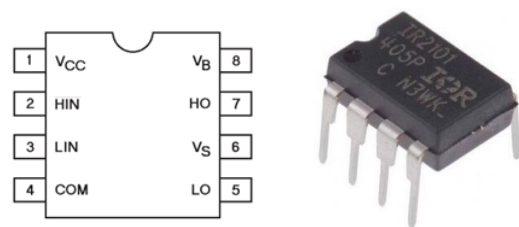
Konversi nilai y ke dalam *duty cycle* PWM. Nilai-nilai *duty cycle* hasil dari perhitungan dengan rumus (1) akan dikalikan dengan nilai maksimum dari *duty cycle* digital yaitu 255. Namun, untuk menghindari on-off yang terlalu berdekatan, diambil nilai maksimum *duty cycle* untuk program yaitu 250 menjadi:

$$y = A \sin (\theta) \times 250 \tag{2}$$

Nilai-nilai yang sudah dihitung akan menjadi tabel sinus dalam main program.

C. Penjelasan gate driver dan mosfet

IR2101 adalah IC dreiver mosfet dengan tegangan offset yang tinggi yaitu 600V maximum sehingga IC driver masih dapat bekerja jika tegangan yang masuk IC IR2101 tidak melebihi 600V. IR2101 memiliki memiliki tegangan keluar 10-20V dengan nilai delay (delay matching sebesar 50ns.[10]



Gambar 5. (a) gambar skematik IC driver IR2101
(b) gambar IC diver 2101

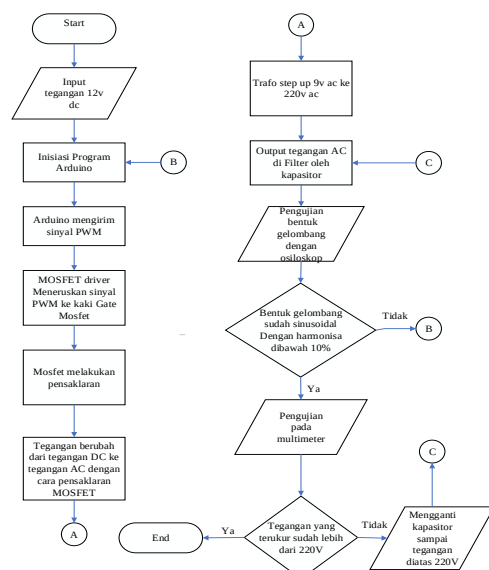
Mosfet yang digunakan dalam penelitian ini adalah IRF540N yaitu mosfet dengan jenis N-channel yang memiliki hambatan maksimum (Rds) sebesar 0,070 ohm, tagangan drain-source (Vds) sebesar 100V, dan tegangan gate-source (Vgs) sebesar 20V. dengan spesifikasi seperti itu IC driver dan mosfet dinilai sudah cukup untuk desain inverter yang akan dibuat.[11]

D. Arduino yang digunakan

Arduino Uno adalah board mikrokontroler berbasis ATmega328. Arduino digunakan untuk pembangkit pulsa, pulsa yang dihasilkan akan memicu switch pada rangkaian inverter untuk bekerja pada rangkaian 1 fasa. Untuk rangkaian 3 fasa memakai Arduino atmega 2560. Perbedaan dari 2 mikro kontroler ini salah satunya adalah jmlah dari timer yang ada pada ic masking masing mikrokontroler. Arduino uno memiliki 3 timer (timer 0,1,2) dan Arduino atmega memiliki 5 timer (timer 0,1,2,3,4). Dalam program yang telah dibuat dibutuhkan setidaknya 1 buah timer sebagai pembangkit sinyal dan 1 buah untuk program interup.[12]

E. Flowchart

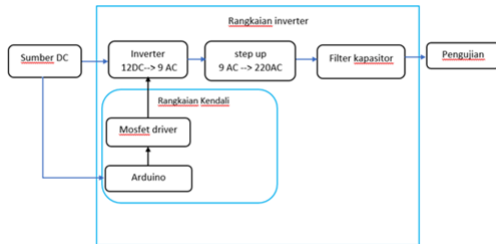
Alur dari penelitian yang akan dilakukan dapat dilihat dari diagram alir dibawah ini:



Gambar 9. Flow chart sistem yang dibuat

F. Bagan sistem yang akan dibuat

Bagan dari alat yang akan dirancang dapat dilihat dari gambar dibawah ini :



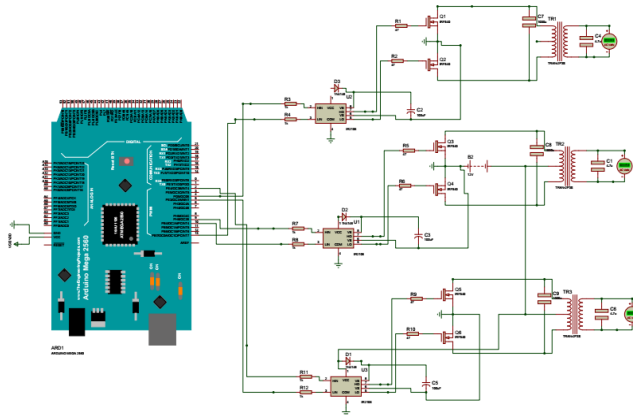
Gambar 6. blok diagram dari sistem yang dibuat

Blok diagram diatas menjelaskan tentang system inverter yang akan dibuat yaitu Arduino akan membangkitkan gelombang PWM dengan metode SPWM dan akan diteruskan ke mosfet driver dan akan diteruskan pada sistem mosfet pada inverter, dari inverter yang sudah dialiri sumber DC 12V akan diubah oleh inverter dari tegangan DC menjadi AC kemudian akan di step up oleh transformator CT dari 9 AC ke 220 AC. Setelah melakukan perubahan tegangan dan step up oleh transformator kemudian akan di filter oleh kapasitor kemudian akan dilakukan analisis pada output yang sudah dihasilkan dari rangkaian.

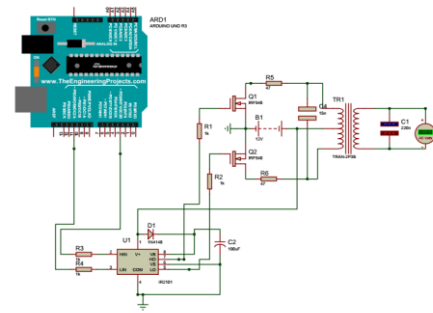
IV. SIMULASI DAN ANALISA

A. Skematik alat inverter 3 fasa dan 1 fasa

Rangkaian 1 fasa menggunakan Arduino UNO sebagai mikrokontroler dan rangkaian 3 fasa menggunakan Arduino ATmega 2560, Kedua rangkaian memakai mikrokontroler yang berbeda karena kebutuhan TIMER pada mikrokontroler yang terbatas pada Arduino UNO.

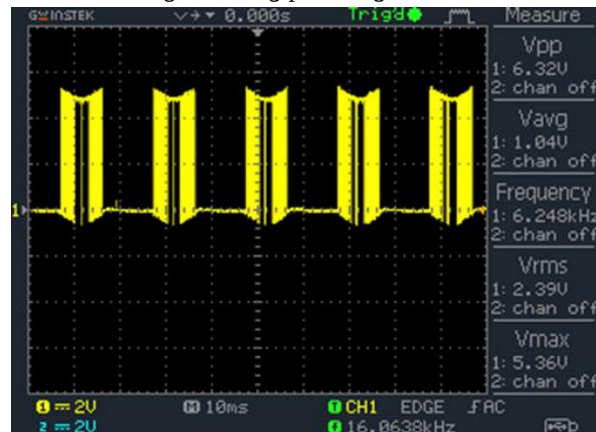


Gambar 7. Desain rangkaian 3 fasa menggunakan Arduino atmega 2560

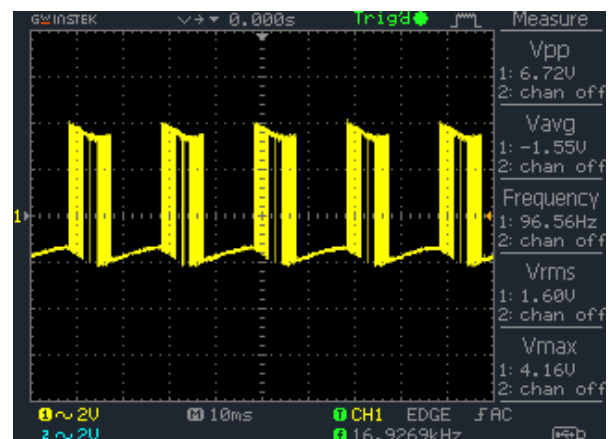


Gambar 8. Desain rangkaian 1 fasa menggunakan arduino uno

B. Hasil dari gelombang pembangkitan arduino



Gambar 9. Pembangkitan Sinyal PWM Dengan Metode SPWM Pada Arduino Mega

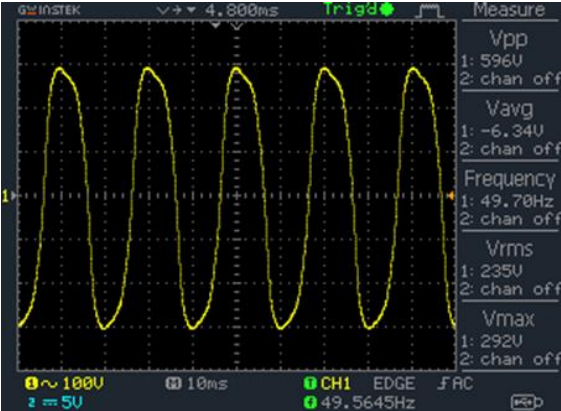


Gambar 10. Pembangkitan Sinyal PWM Dengan Metode SPWM Pada Arduino Uno

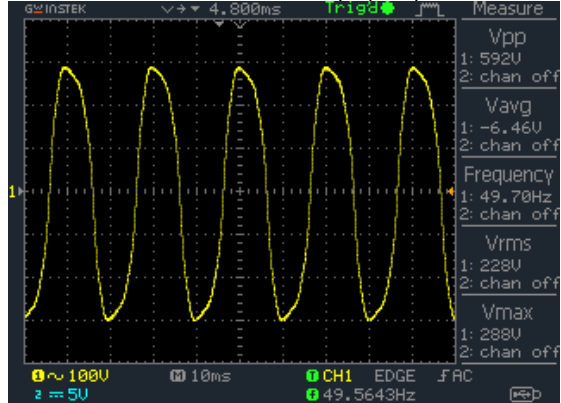
Gambar 13 menunjukkan gelombang pembangkitan PWM dengan metode SPWM oleh Arduino mega 2560 pada pin 9, dan gambar 14 menunjukkan gelombang pembangkitan PWM dengan metode SPWM oleh Arduino uno pada pin 3 bisa dilihat bahwa gelombang pada siklus pertengahan pembangkitan ada jarak dari satu sinyal ke sinyal lainnya. Dari pengujian tersebut didapatkan beberapa data yaitu $V_{pp} = 6.32V$, $V_{avg} = 1.04V$, $V_{rms} = 2.39V$,

$V_{max} = 5.36V$, frekuensi = 6.248KHz pada Arduino mega 2560 dan pada Arduino uno $V_{pp} = 6.37V$, $V_{avg} = -1.55V$, $V_{rms} = 1.60V$, $V_{max} = 4.16V$, frekuensi = 96.56Hz. perlu diingat ketika melakukan pengujian nilai-nilai yang tertera mengalami perubahan yang sangat cepat hal ini dikarenakan cepatnya mikrokontroler membangkitnya banyak gelombang secara cepat. Tetapi frekuensi tertinggi yang dideteksi oleh osiloskop saat pengujian adalah 32.0Khz pada Arduino mea 2560 dan 32.3Khz pada Arduino uno.

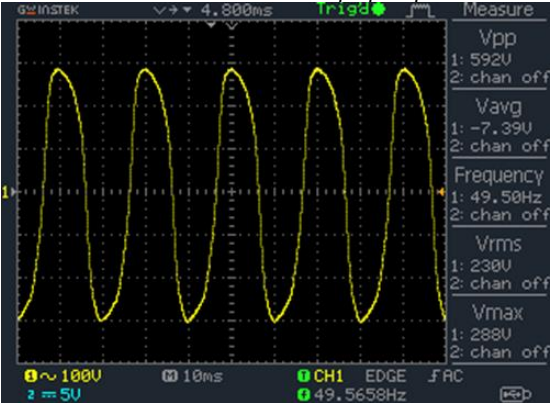
C. output inverter setelah step up trafo



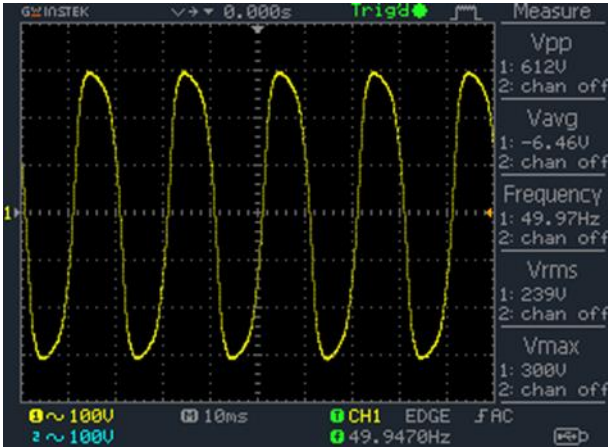
Gambar 11. Gelombang Keluaran 3 Fasa Trafo Pada Fasa 1 setelah step up trafo



Gambar 12. Gelombang Keluaran 3 Fasa Trafo Pada Fasa 1 setelah step up trafo



Gambar 13. Gelombang Keluaran 3 Fasa Trafo Pada Fasa 1 setelah step up trafo



Gambar 14. Output Gelombang inverter 1 Fasa setelah step up Trafo

Dari gambar 15, 16, 17 Dapat dilihat bahwa fasa 1,2,3 bentuk gelombang keluaran sudah membentuk gelombang yang sudah sinusoidal dengan frekuensi mendekati 50 Hz dengan satu siklusnya yang membutuhkan waktu 20ms. Pada pengujian ini data yang ditampilkan pada osiloskop cenderung berubah ubah tetapi tidak secara signifikan.

Tabel 1. Hasil pengukuran pada inverter 3 fasa

No.	Fasa	Vpp	Vavg	Vrms	Vmax	Freq
1	1	596V	-6.34V	235V	292V	49.48Hz
2	2	592V	-6.46V	228V	288V	49.70Hz
3	3	592V	-7.39V	230V	288V	49.50Hz

Dari data tabel yang sudah dibuat diketahui inverter 3 fasa yang sudah dibuat memiliki V_{rms} yang terukur pada tiap fasa dimulai dari fasa 1 sampai 3 adalah 235V, 228V, 230V

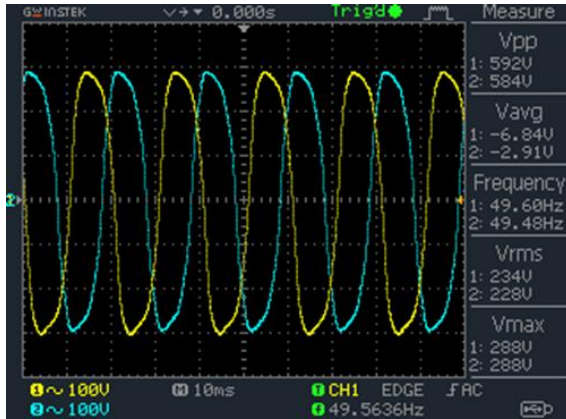
Dari gambar 18 Dapat dilihat bentuk gelombang keluaran sudah membentuk gelombang yang sudah sinusoidal dengan frekuensi mendekati 50 Hz dengan satu siklusnya yang membutuhkan waktu 20ms. Pada pengujian ini data yang ditampilkan pada osiloskop cenderung berubah ubah tetapi tidak secara signifikan contohnya pada frekuensi menampilkan 49.97Hz yang dimana pada saat pengujian dapat mencapai 51 Hz.

Tabel 2. Tabel 1. Hasil pengukuran pada inverter 1 fasa

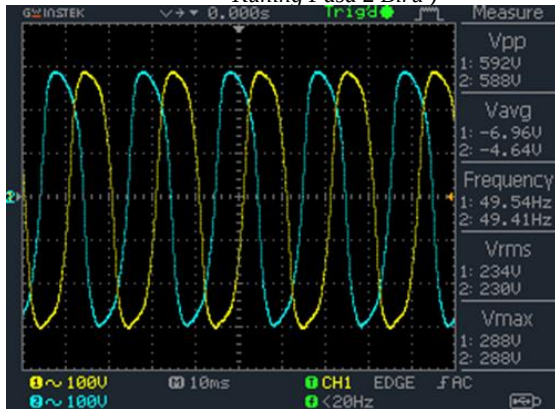
No.	Fasa	Vpp	Vavg	Vrms	Vmax	Freq
1	1	612V	-6.46V	239V	300V	49.97Hz

Dari data tabel yang sudah dibuat diketahui inverter 1 fasa yang sudah dibuat memiliki V_{rms} yang terukur pada output inverter adalah 239V

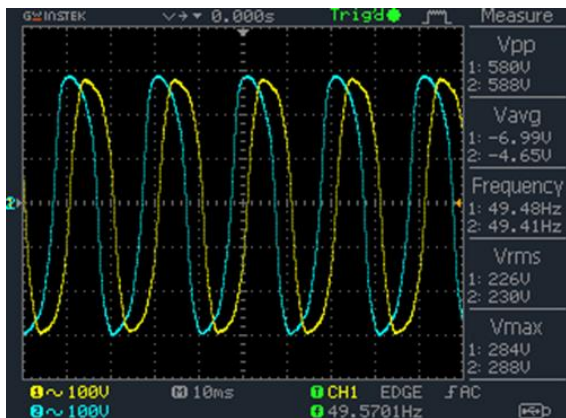
D. hubungan antar fasa pada inverter 3 fasa



Gambar 15. Gelombang Keluaran 3 Fasa Pada Trafo (Fasa 1 Kuning Fasa 2 Biru)



Gambar 16. Gelombang Keluaran 3 Pada Fasa Trafo (Fasa 1 Kuning Fasa 3 Biru)

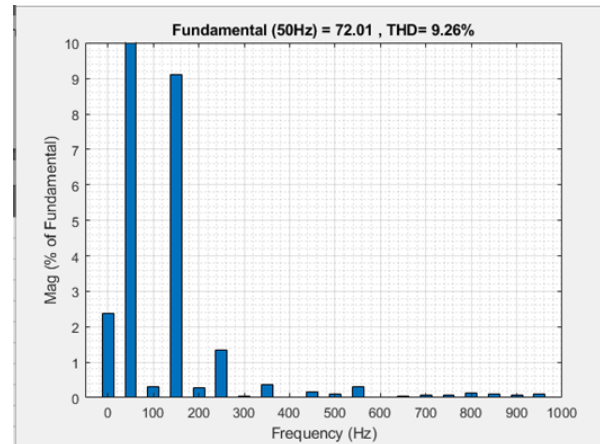


Gambar 17. Gelombang Keluaran 3 Fasa Pada Trafo (Fasa 2 Kuning Fasa 3 Biru)

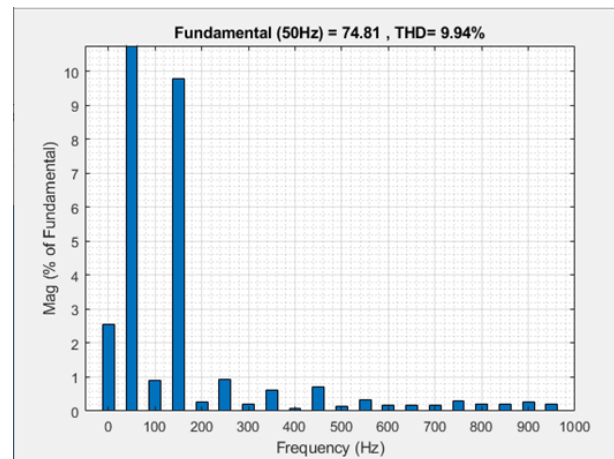
Dari gambar 19, 20, 21 diketahui hubungan antara gelombang fasa 1, 2, 3. Gambar 4.22 Menunjukkan gelombang fasa 1 terhadap fasa 2 dapat dilihat bahwa pembangkitan gelombang pada fasa 2 pada sudut 0° terjadi sebelum fasa 1 mencapai titik 180° atau detik ke 10 ms dengan keterangan gelombang kuning adalah fasa 1

sedangkan fasa 2 adalah gelombang warna biru. Hal ini juga terjadi pada gambar 20, 21 yang menunjukkan hal serupa dengan penjelasan diatas.

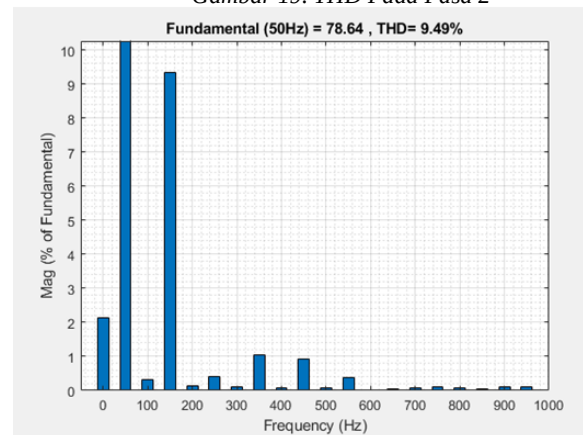
E. hasil analisa THD pada inverter



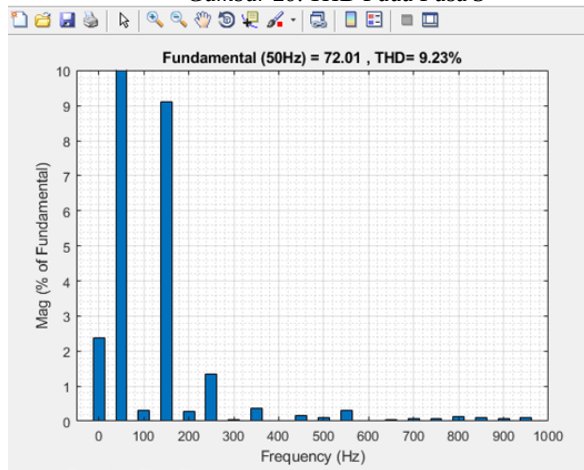
Gambar 18. THD Pada Fasa 1



Gambar 19. THD Pada Fasa 2



Gambar 20. THD Pada Fasa 3



Gambar 21. THD Pada Inverter 1 Fasa

Dari data-data yang sudah didapatkan dapat disimpulkan bahwa program yang digunakan dan rangkaian yang sudah dibuat lebih baik bekerja dengan rangkaian system 3 fasa karena pada setiap fasanya memiliki nilai THDv yang lebih rendah dari system 1 fasa yang mendapatkan THDv sebesar 4,58% sedangkan pada system 3 fasa mendapatkan nilai THDv sebesar 2,71% untuk fasa a , 2,74% untuk fasa b , 2,15 untuk fasa c dan Metode SPWM dapat bekerja dengan baik dengan rangkaian yang sudah dibuat.

V. KESIMPULAN

Dalam penelitian “Rancang Bangun Kendali Inverter Berbasis Arduino Dengan Metode Spwm”, di dapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Dari pengujian tegangan yang dihasilkan oleh inverter sebelum dan setelah di step up oleh trafo didapat tegangan yang keluar dari inverter adalah diatas 19V pada semua kit inverter dan pengukuran dilakukan dengan kabel pengukur plus (+) dan minus (-) berada pada kedua output inverter, setelah di step up oleh trafo tegangan yang dihasilkan diatas 220V pada setiap kit inverter.
2. Dari Pengujian gelombang keluaran pada trafo didapatkan hasil yang diharapkan yaitu gelombang berbentuk sinusoidal dan memiliki frekuensi yang mendekati 50Hz.
3. Dari pengujian harmonisa pada alat dengan software matlab didapatkan nilai THD pada semua fasa dibawah 10 %

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Terpasang, P. Pembangkit, and L. Energi, “Laporan Status Energi Bersih Indonesia.”
- [2] T. K. Chakraborty, A. Anan, and S. H. Rakib, “Experimental Investigation on Single-Phase Multilevel Inverter for Generating 21-Level Output Voltage Using Four H-Bridge Units,” *2018 IEEE 4th South. Power Electron. Conf. SPEC 2018*, pp. 1–4, 2019,
- [3] F. Hidayat and K. Krismadinata, “Rancang Bangun VVVF Inverter 3 Fasa untuk Operasi Motor Induksi Tiga Fasa dengan Antarmuka Komputer,” *INVOTEK J. Inov. Vokasional dan Teknol.*, vol. 19, no. 2, pp. 47–56, 2019,
- [4] A. Saputra and F. E. Yandra, “Rancang Bangun Inverter Menggunakan IC CD4047 INPUT Batrai 12 VDC Ke Output Lampu 220 VAC Frekuensi 50-60 HZ,” *J. Electr. Power Control Autom.*, vol. 2, no. 1, p. 1, 2020,
- [5] K. Azmi, I. D. Sara, J. Tengku, S. Abdur, R. No, and B. Aceh, “Desain dan Analisis Inverter Satu Fasa dengan Menggunakan Metode SPWM Berbasis Arduino,” vol. 2, no. 4, pp. 36–44, 2017.
- [6] D. Nugraha, “Rancang Bangun Inverter Satu Fasa Dengan Dengan Modulasi Lebar Pulsa PWM Menggunakan Antarmuka Komputer,” vol. 06, no. 01, pp. 340–351, 2020.
- [7] Atmel *et al.*, “Harte und weiche Echtzeitsysteme Material zur Vorlesung Echtzeitsysteme I + II im Studienfach Technische Informatik an der,” *Linux-Mag.*, no. November, p. 66, 2015, [Online]. Available: <http://beagleboard.org/about%5Cnhttp://beagleboard.org/boards%5Cnhttps://www.raspberrypi.org/about/%5Cnhttp://redpitaya.com/about/%5Cnhttp://de.rs-online.com/web/p/digitalspeicher-oszilloskope/9010302/%5Cnhttp://www.linux-magazin.de/NEWS/Arduino-LLC-und-A.>
- [8] A. Giyantara, R. S. Tjiang, and D. Ph, “Desain Inverter Satu Fasa 12V DC ke 220V AC Menggunakan Rangkaian H-Bridge MOSFET,” no. February, pp. 1–11, 2019.
- [9] L. R. Aliyan, R. N. Hasanah, and M. A. Muslim, “Desain Inverter Tiga Fasa dengan Minimum Total Harmonic Distortion Menggunakan Metode SPWM,” vol. 8, no. 1, pp. 79–84, 2014.
- [10] L. O. W. S. Driver, “Ir2101 /ir2102,” *Test*, vol. 2101, pp. 1–14.
- [11] P. Field and E. Transistor, “Irf540-D.Pdf,” pp. 1–6, 1998.
- [12] J. Teknik *et al.*, “Desain dan analisis inverter satu fasa berbasis arduino menggunakan metode spwm 123,” vol. 13, pp. 128–135, 2019.