

Rancang Bangun Inverter Satu Fasa dengan SPWM Bipolar

Aprialdi^{1*} dan Krismadinata¹

¹Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang
Jln. Prof. Dr. Hamka Air Tawar, Padang, Sumatera Barat, Indonesia

*e-mail: chaniagoaprialdi@gmail.com

(Diajukan: 12 November 2023, direvisi: 21 Februari 2024, disetujui: 28 Maret 2024, dipublikasikan: 5 April 2024)

Abstrak

Penelitian ini membahas perancangan dan pembuatan sebuah inverter satu fasa yang menggunakan teknik modulasi lebar pulsa sinusoidal (SPWM) bipolar. Penelitian ini bertujuan untuk menciptakan inverter yang efisien dan mampu menghasilkan gelombang sinusoidal yang murni, cocok untuk aplikasi dalam sistem tenaga listrik. Metode penelitian yang digunakan adalah Research and Development (R&D), yang meliputi tahapan analisis kebutuhan, desain sistem, pengembangan perangkat keras dan perangkat lunak, serta pengujian dan evaluasi. Metode SPWM bipolar digunakan untuk mengatur pulsa-pulsa output inverter dengan memperhatikan efisiensi dan kualitas gelombang keluaran. Penelitian ini mencakup tahapan pemodelan, simulasi, dan implementasi praktis dari inverter. Hasilnya menunjukkan bahwa inverter yang dikembangkan mampu menghasilkan gelombang sinusoidal yang cukup murni. Implementasi praktis dari inverter ini memiliki potensi aplikasi yang luas dalam berbagai sistem tenaga listrik.

Kata Kunci: Inverter Satu Fasa, SPWM Bipolar, Sinusoidal

Abstract

This research discusses the design and manufacture of a single-phase inverter that uses bipolar sinusoidal pulse width modulation (SPWM) technique. This research aims to create an inverter that is efficient and capable of producing pure sinusoidal waves, suitable for applications in electric power systems. The research method used is Research and Development (R&D), which includes the stages of needs analysis, system design, hardware and software development, and testing and evaluation. The bipolar SPWM method is used to regulate the inverter output pulses with respect to efficiency and output wave quality. This research includes the stages of modeling, simulation, and practical implementation of the inverter. The results show that the developed inverter is capable of producing fairly pure sinusoidal waves. The practical implementation of this inverter has wide application potential in various power systems.

Keywords: Single Phase Inverter, Bipolar SPWM, Sinusoidal.

PENDAHULUAN

Inverter adalah perangkat elektronika yang dapat mengubah aliran listrik searah (DC) menjadi arus dengan aliran bolak-balik (AC). Dalam rangkaian inverter, tegangan searah (DC) diubah menjadi tegangan bolak-balik (AC) dengan frekuensi dan tegangan yang sesuai dengan desainnya[1][2].

Inverter merupakan komponen krusial dalam sistem energi terbarukan dan aplikasi industri. Penggunaan inverter dalam energi terbarukan berguna untuk mengubah tegangan DC yang dihasilkan panel surya atau yang telah disimpan ke dalam baterai menjadi tegangan AC, inverter dalam energi terbarukan bisa digunakan untuk mengkonversi bentuk tegangan[3]. Dalam industri inverter digunakan dalam dalam pengendalian motor, *uninterruptible power supply* (UPS), transmisi tegangan tinggi DC, serta dalam memperbaiki faktor daya[4].

Inverter satu fasa gelombang penuh dapat dibangun dengan menggunakan *full bridge* dengan pensaklaran SPWM. *Full bridge* adalah rangkaian yang disusun dengan empat saklar elektronik, biasanya menggunakan mosfet atau IGBT[5]. Prinsip kerja dari rangkaian *full bridge* yaitu empat saklar yang bekerja secara bersilangan. Cara kerja bersilangan yang dimaksud, ketika ada dua saklar berlawanan bersifat *on*, dan dua saklar berlawanan bersifat *off*. Dari dua saklar berlawanan tersebut, arus mengalir dari sumber input searah (DC) menuju saklar searah positif dan sebaliknya searah negatif. Kemudian arus bekerja bolak balik melewati empat saklar hingga timbul tegangan output AC[6].

Inverter yang menggunakan metode *switching* SPWM akan menghasilkan gelombang sinus yang lebih sempurna[7]. Untuk membuat keluaran inverter menjadi sinyal sinusoidal murni maka diperlukan filter pasif, filter ini berperan dalam mereduksi harmonisa, menghilangkan distorsi, menjaga stabilitas tegangan dan arus keluaran, serta menghilangkan gangguan frekuensi yang tidak diinginkan. Dengan penerapan filter pasif yang tepat, inverter dapat mencapai tujuan menghasilkan gelombang sinus murni dengan kualitas yang stabil dan bersih. Hal ini sangat penting untuk berbagai aplikasi, termasuk sistem catu daya yang sensitif terhadap kualitas sinyal dan sistem tenaga terbarukan yang terhubung ke jaringan listrik[8].

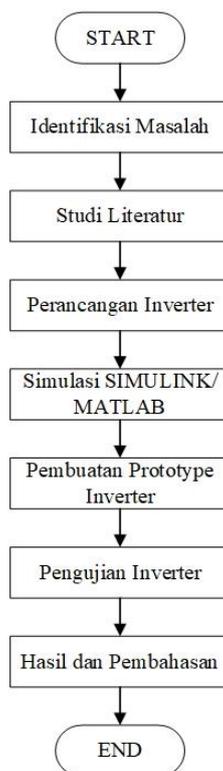
SPWM merupakan singkatan dari *Sinusoidal Pulse Width Modulation* yang memiliki prinsip kerja dengan mengatur lebar pulsa yang mengikuti pola gelombang sinusoidal[9]. Teknik SPWM yang digunakan adalah *bipolar switching*. Secara analog *bipolar switching* memerlukan dua buah sinyal untuk dikomparasi yaitu sinyal segitiga sebagai sinyal *carrier* dan sinyal sinus sebagai referensi, hasil dari komparasi kedua sinyal inilah yang akan menghasilkan SPWM. Secara digital sinyal SPWM bisa dibangkitkan dengan mikrokontroler Atmega328[10].

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membuat rancangan dan membuat *prototype* inverter yang menghasilkan inverter dengan gelombang sinusoidal murni dengan menggunakan *switching* SPWM.

METODE

Jenis penelitian yang dilakukan adalah *Research and Development* (R&D), karena dalam penelitian ini melalui proses merancang, membangun, menguji, dan mengevaluasi sebuah alat. Pada penelitian ini digunakan perangkat lunak MATLAB untuk membuat

desain inverter dan juga disimulasikan dengan SIMULINK untuk mendapatkan gambaran dari keluaran inverter yang menggunakan metode SPWM bipolar. Setelah mendapatkan gambaran output dari hasil simulasi maka langkah selanjutnya adalah membuat *prototype* inverter dengan konfigurasi rangkaian *H-Bridge* sebagai rangkaian utamanya. Penelitian ini melalui beberapa tahapan, untuk lebih jelasnya dapat dilihat diagram alir pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Data yang diambil dalam penelitian ini mencakup data simulasi dan data pengukuran alat secara langsung. Data simulasi diambil langsung dari perangkat lunak MATLAB sedangkan data secara langsung diambil dengan menggunakan multimeter, osiloskop dan *power quality analyzer* (PQA) yang akan digunakan untuk menganalisis kualitas daya dari inverter yang dibuat. Pada gambar 2. dapat dilihat proses pengujian alat yang telah dibuat.



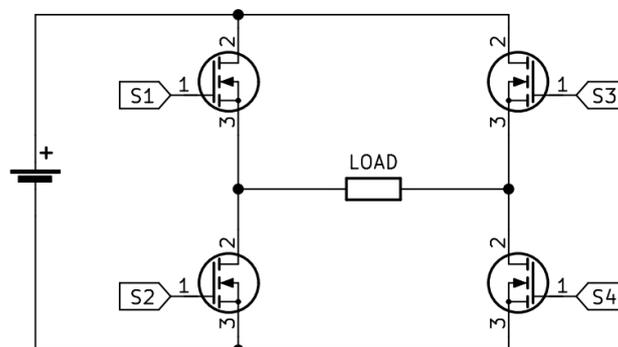
Gambar 2. Proses Pengujian Inverter

Inverter Satu Fasa

Prinsip Prinsip kerja inverter didasarkan pada konversi arus. Pada dasarnya, inverter mengambil masukan arus searah dari sumber seperti baterai atau panel surya, kemudian melalui proses pengolahan elektronik yang kompleks, menghasilkan keluaran arus bolak-balik yang dapat digunakan untuk menggerakkan berbagai peralatan yang memerlukan arus AC[11]. Inverter juga memungkinkan kontrol terhadap tegangan, frekuensi, dan bentuk gelombang keluaran sesuai dengan kebutuhan aplikasi tertentu[12].

Jika dilihat dari keluarannya inverter terdiri dari *square wave* inverter, *modified sine wave* inverter, dan *pure sinewave* inveter. Selain dari bentuk sinyal keluaran, inverter bisa juga dibedakan berdasarkan topologi rangkaiannya. Berdasarkan topologi rangkaiannya, inverter satu fasa dibedakan menjadi *full bridge inverter*, *half bridge*, dan *push pull* inverter[13]. Inverter yang dibuat untuk penelelitian ini adalah inverter dengan topologi *full bridge* atau dikenal juga dengan *H-Bridge* dengan bentuk keluaran pure sinewave dengan metode SPWM bipolar.

Inverter jembatan penuh (full bridge inverter) adalah suatu rangkaian elektronik yang digunakan untuk mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC). Ini adalah salah satu jenis inverter yang paling umum digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk dalam industri, sistem tenaga surya, dan aplikasi rumah tangga. Inverter jembatan penuh bekerja dengan menggunakan empat sakelar elektronik (biasanya transistor IGBT atau MOSFET) yang diatur dalam dua pasangan[14]. Rangkaian inverter dengan topologi H-Brigde dapat dilihat pada gambar 3.



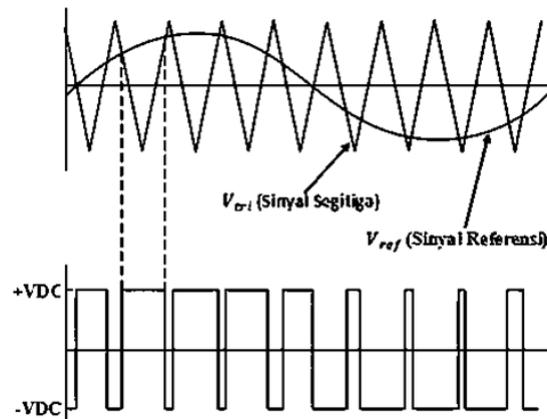
Gambar 3. Rangkaian H-Bridge

Prinsip kerja inverter dengan topologi *H-Bridge* seperti gambar 3 yaitu jika saklar S1 dan S4 dalam keadaan ON, maka arus mengalir dari kiri ke kanan. Sehingga terbentuk setengah gelombang periode pertama (positif).Kemudian jika saklar S2 dan S3 dalam keadaan ON, maka arus mengalir dari kanan ke kiri sehingga terbentuk setengah gelombang periode kedua (negatif). Tegangan output inverter dengan topologi *H-Bridge* dapat dituliskan kedalam persamaan berikut :

SPWM Bipolar

Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) adalah salah satu teknik modulasi lebar pulsa yang digunakan dalam elektronika daya. Tujuan utama dari SPWM adalah menghasilkan sinyal keluaran yang berbentuk gelombang sinusoidal dengan mengatur

lebar pulsa dari sinyal pembawa (biasanya berbentuk gelombang segitiga) sesuai dengan amplitudo sinyal referensi sinusoidal yang diinginkan[15].



Gambar 4. Sinyal SPWM Bipolar

Sinyal SPWM bipolar dapat dilihat pada gambar 4. Prinsip kerjanya Cara kerja SPWM melibatkan perbandingan antara sinyal referensi sinusoidal (yang merupakan sinyal yang ingin dicapai) dengan sinyal pembawa[16]. Hasil perbandingan ini digunakan untuk mengatur lebar pulsa dari sinyal pembawa. Saat amplitudo sinyal referensi lebih besar dari sinyal pembawa, lebar pulsa diperbesar, dan sebaliknya saat amplitudo sinyal referensi lebih kecil. Hal ini menghasilkan sinyal keluaran yang mengikuti bentuk gelombang sinusoidal referensi. Prinsip bipolar yaitu jika nilai sinyal referensi lebih besar dari sinyal carrier, maka output nya ($+VDC$). Jika sinyal referensi kurang dari sinyal carrier, maka output nya ($-VDC$) seperti pada Persamaan 1 dan 2

$$V_o = +V_{dc} \text{ jika } V_{sine} > V_{carr} \quad (1)$$

$$V_o = -V_{dc} \text{ jika } V_{sine} < V_{carr} \quad (2)$$

Dimana

V_o = Tegangan input (V)

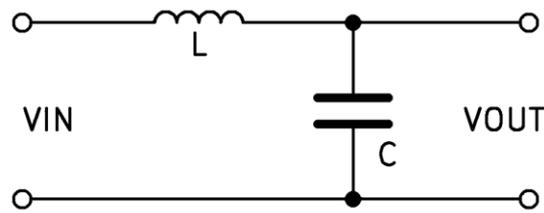
V_{dc} = Tegangan DC (V)

V_{sine} = Tegangan Sinyal Pembawa (V)

V_{carr} = Tegangan Sinyal Carrier (V)

Filter LC

Filter LC dapat dikategorikan sebagai filter pasif, merupakan salah satu metode umum yang digunakan untuk meredam distorsi harmonik pada sinyal keluaran inverter satu fasa. Filter ini terdiri dari komponen induktor (L) dan kapasitor (C), yang disusun sedemikian rupa untuk menyaring frekuensi harmonik yang tidak diinginkan[17]. Induktor dalam filter berperan untuk meredam frekuensi tinggi, sementara kapasitor bertanggung jawab untuk menyaring frekuensi rendah. Kombinasi keduanya membentuk suatu filter yang efektif untuk menstabilkan sinyal keluaran inverter[18]. Induktor memiliki sifat resistif terhadap frekuensi tinggi, sementara kapasitor memiliki sifat resistif terhadap frekuensi rendah. Rangkaian filter LC dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Rangkaian Filter LC

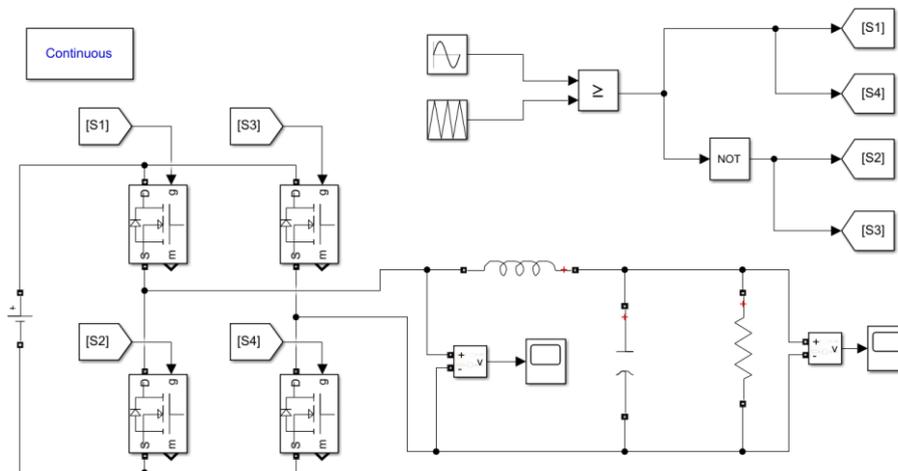
Keunggulan filter LC meliputi desain yang relatif sederhana dan kemampuan untuk bekerja pada berbagai frekuensi. Dengan pemilihan nilai komponen kapasitor dan induktor yang tepat maka sinyal keluaran akan semakin mendekati target yang akan dicari. Nilai kapasitor dan induktor dapat dihitung berdasarkan persamaan 2 dan 4[19]

$$L = \frac{R}{2\pi f c} \quad (3)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f c R} \quad (4)$$

Model Simulasi

Inverter satu fasa yang dirancang menggunakan topologi *H-Bridge* atau *full bridge*. Rangkaian dengan topologi ini minimal menggunakan empat saklar elektronik, pada inverter ini menggunakan empat buah mosfet sebagai saklar elektronik[20]. Model simulasi dibuat dengan menggunakan perangkat lunak matlab. Simulasi diperlukan untuk mengetahui karakteristik output dari inverter yang menggunakan metode *switching* SPWM bipolar. Model simulasi inverter satu fasa dengan spwm bipolar dapat dilihat pada gambar 6.



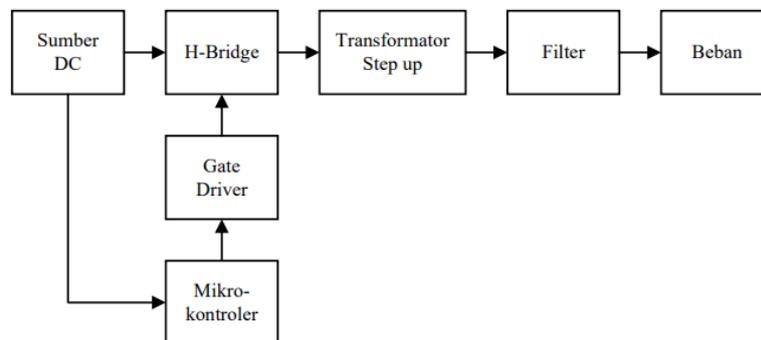
Gambar 6. Rangkaian Inverter dengan SPWM Bipolar

Dapat dilihat gambar 6 menunjukkan simulasi inverter dengan SPWM bipolar dengan menggunakan matlab. Terdapat dua rangkaian dalam simulasi tersebut, yaitu rangkaian pembangkit sinyal SPWM dan rangkaian *H-Bridge* yang terdiri dari empat mosfet.

Blok Diagram

Rancangan inverter dan alur kerjanya dapat digambarkan dengan sebuah blok diagram. Rancangan inverter meliputi sebuah rangkaian *H-Bridge* yang sebagai rangkaian utama. Rangkaian *H-bridge* akan mengubah suplai DC menjadi AC melalui proses *switching*. Mikrokontroler akan memberi sinyal *switching* ke rangkaian *H-bridge* melalui

gatedriver. Tegangan keluaran *H-bridge* akan dinaikkan dengan transformator *step up*. Untuk menghasilkan gelombang sinusoidal murni maka setelah transformator akan diberi filter baru selanjutnya ke beban. Blok diagram dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7. Blok Diagram Sistem

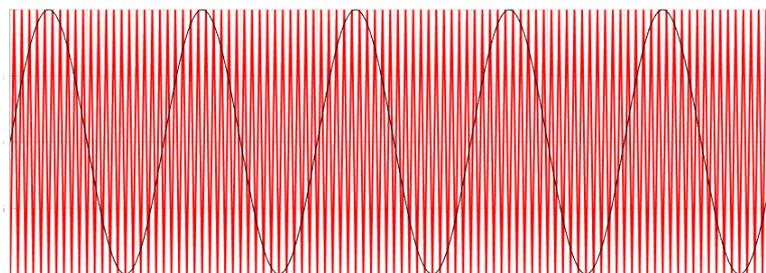
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini dilakukan pengujian simulasi inverter yang telah dirancang pada perangkat lunak matlab. Selain melakukan pengujian simulasi, juga dilakukan pengujian secara langsung terhadap prototype inverter dengan SPWM bipolar.

Hasil Simulasi

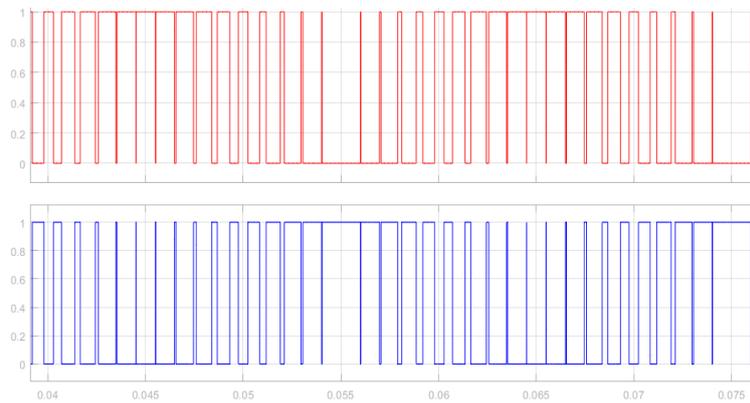
Simulasi bertujuan untuk melihat output dari sebuah rangkaian atau alat yang akan dibuat. Simulasi juga bisa menjadi acuan dalam proses pengerjaan alat. Dengan simulasi proses pembuatan alat akan lebih terstruktur dan jelas[21].

Sinyal SPWM bipolar dihasilkan dari komparasi dua sinyal, yaitu sinyal referensi dan *carrier*. Sinyal referensi berupa sinus sedangkan sinyal *carrier* bisa berupa sinyal segitiga. Komparasi tersebut dapat dilihat pada gambar 8.



Gambar 8. Komparasi Sinyal Referensi dengan Sinyal Carrier

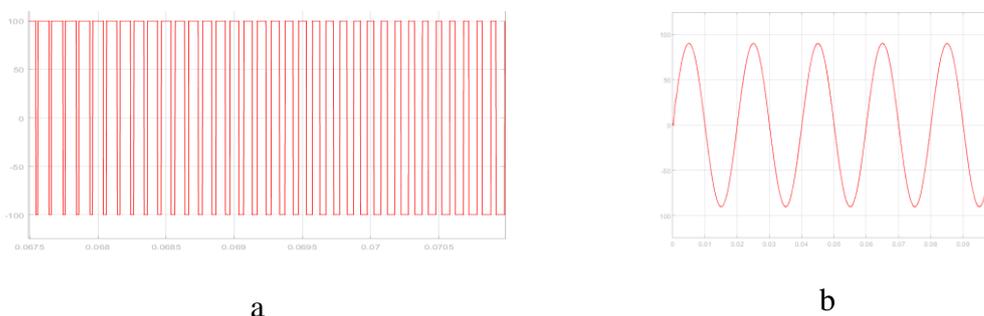
Pada gambar 8. terlihat komparasi sinyal sinus dengan segitiga. Tujuan dibalik komparasi dari sinyal sinusoidal dan sinyal segitiga adalah membangkitkan sinyal SPWM. Sinyal SPWM tersebut nantinya akan digunakan pada rangkaian full bridge untuk *switching* mosfet. Hasil dari komparasi kedua sinyal tersebut dapat dilihat pada gambar 9.



Gambar 9. Sinyal SPWM Hasil Komparasi

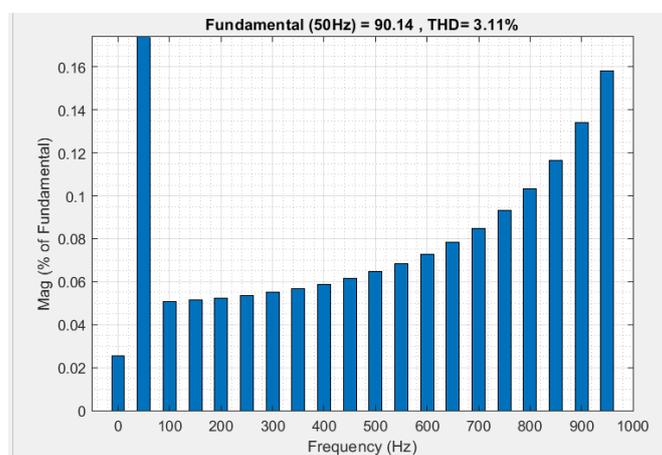
Gambar 9. menunjukkan hasil komparasi sinyal sinus dengan segitiga. Sinyal dengan warna merah akan digunakan untuk S1 dan S4, sedangkan sinyal dengan warna biru akan digunakan untuk S2 dan S3. Saat S1 dan S4 aktif maka S2 dan S3 mati, begitu juga sebaliknya. S1 dan S2 atau S3 dan S4 tidak boleh aktif secara bersamaan karena akan menyebabkan short pada rangkaian.

Hasil Keluaran inverter sebelum filter dan sesudah filter akan berbeda. Hasil gelombang keluaran sebelum filter tidak terlihat seperti gelombang sinus namun lebih seperti gelombang kotak. Keluaran inverter akan terlihat seperti gelombang sinus murni setelah melewati filter LC[22]. Bentuk keluaran sebelum dan sesudah filter dapat dilihat pada gambar 10.



Gambar 10. Output Inverter, a) Output Sebelum difilter b) Output Sesudah Filter

Selain melihat bentuk sinyal keluaran inverter hasil simulasi, juga dapat dilihat THD yang dihasilkan. Berikut THD yang dihasilkan simulasi dapat dilihat pada gambar 11.

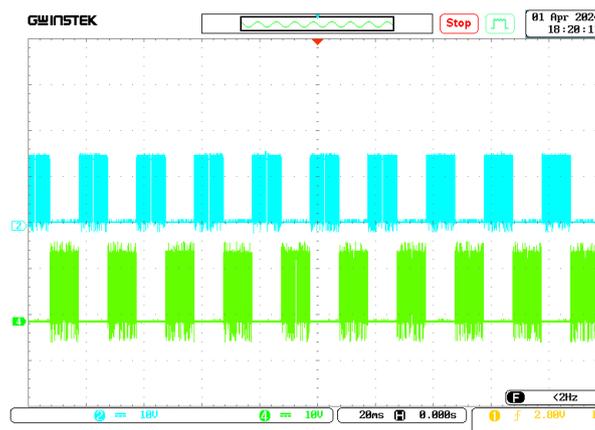


Gambar 11. THD Simulasi Inverter

Hasil Percobaan

Hasil percobaan dilihat dari keluaran sinyal SPWM, keluaran *H-Bridge* sebelum difilter dan sesudah difilter. Selain melihat keluaran gelombang, juga dilihat THD (*Total Harmonic Distortion*). THD merupakan ukuran dari jumlah distorsi harmonik yang terkandung dalam sinyal[23]. THD digunakan untuk mengevaluasi seberapa baik kualitas daya dari inverter sinyal[24].

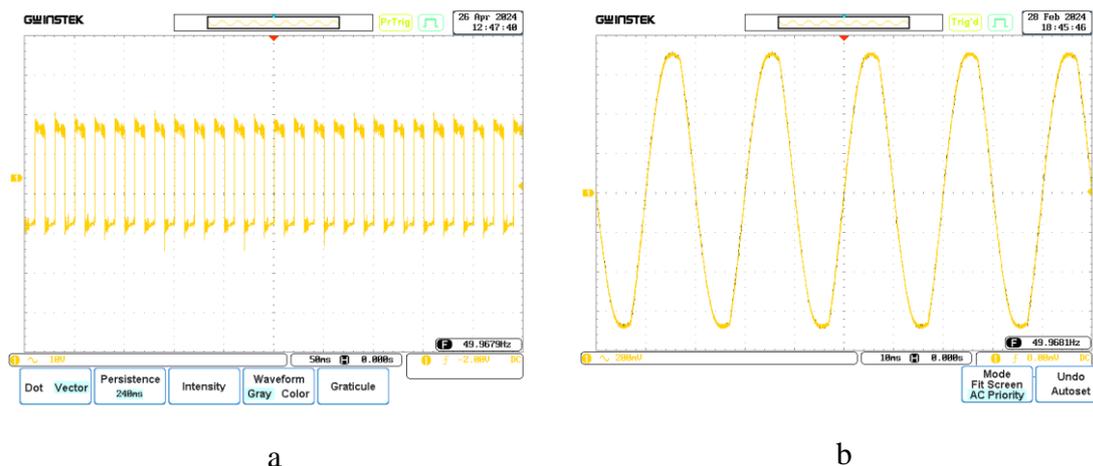
Sinyal SPWM pada inverter dibangkitkan menggunakan *board* Arduino. Dalam proses ini, pengaturan lebar pulsa sinyal PWM disesuaikan secara proporsional dengan amplitudo gelombang sinusoidal yang diinginkan. Ini dicapai melalui penerapan algoritma kontrol yang telah diprogram di dalam mikrokontroler, yang umumnya melibatkan perhitungan matematis untuk menentukan lebar pulsa yang tepat untuk setiap siklus PWM[25]. Pendekatan ini memungkinkan fleksibilitas dalam mengatur frekuensi dan amplitudo gelombang sinusoidal sesuai kebutuhan aplikasi tertentu, seperti dalam sistem inverter untuk menghasilkan tegangan AC yang stabil dan berkualitas. Dengan menggunakan kemampuan pemrosesan dan pengaturan yang dimiliki oleh mikrokontroler, pembangkitan sinyal SPWM dapat dilakukan dengan efisien dan akurat untuk berbagai aplikasi dalam bidang elektronika daya. Bentuk sinyal SPWM yang telah dibangkitkan dapat dilihat pada gambar 11.



Gambar 11. Sinyal SPWM dari mikrokontroler

Hasil keluaran rangkaian *H-Bridge* mendekati hasil simulasi yang telah dilakukan di perangkat lunak matlab. Gelombang keluaran akan berbentuk *sinusoidal* ketika telah melewati filter pasif. Hal ini menunjukkan peran penting filter pasif dalam meredam distorsi dan menjaga keluaran inverter sesuai dengan apa yang diinginkan. Bentuk keluaran inverter sebelum dan sesudah filter dapat dilihat pada gambar 12.

Selain bentuk keluaran gelombang yang menjadi indikator kualitas daya dalam sebuah inverter. Perlu juga melakukan pengujian berbeban terhadap inverter. Pengujian berbeban pada inverter merupakan proses penting untuk menilai kinerja dan keandalannya di bawah kondisi operasi yang realistis. Inverter, yang berfungsi mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC), perlu diuji dengan berbagai beban untuk memastikan bahwa perangkat tersebut dapat menangani variasi dalam permintaan daya tanpa kehilangan efisiensi atau stabilitas. Inverter diuji dengan beban resistif yang divariasikan. Berikut hasil pengukuran inverter dengan beban R yang bervariasi. Hasil pengukuran inverter dapat dilihat pada tabel 1.



Gambar 12. Keluaran H-Bridge, a)Sebelum difilter b)Setelah difilter

Tabel 1. Hasil Pengukuran Inverter Berbeban

Beban R(Ohm)	Input		Output		
	Vin(VDC)	I(A)	Vout(VAC)	I(A)	Frekuensi(Hz)
15k	20	0,768	209,8	0,100	49,96
10k	20	0,815	204,8	0,103	49,96
7,5k	20	0,857	200	0,110	49,96
4,7k	20	0,963	198,1	0,121	49,96
2,2k	20	0,991	189,5	0,122	49,96
1k	20	1,176	178,5	0,132	49,96

Berdasarkan tabel diatas dapat kita lihat jika semakin besar arus yang pada inverter maka tegangan output akan mengalami penurunan. Jadi beban mempengaruhi tegangan keluaran, semakin besar beban semakin turun tegangan output inverter. Untuk frekuensi variasi beban tidak berpengaruh, frekuensi konstan terhadap beban. Bentuk gelombang dengan beban resistif bervariasi masih seperti gelombang sinusoidal, beban resistor hanya mempengaruhi amplitudo gelombang.

Selain bentuk keluaran gelombang yang menjadi indikator kualitas daya dalam sebuah inverter, perlu juga diperhatikan besaran THD yang timbul pada inverter. Inverter yang dibangun pada penelitian ini dengan SPWM bipolar memiliki THD tegangan sebesar 5,19%. THD pada inverter diukur menggunakan *power quality analyzer*, untuk nilainya dapat dilihat pada gambar 12.



Gambar 13. Nilai THD Pada Alat

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, inverter dengan SPWM bipolar berhasil dirancang dan dibangun baik dengan simulasi lalu dilanjutkan dengan implementasi kedalam *hardware*. Metode SPWM memungkinkan pengendalian switching yang presisi, sehingga inverter dapat menghasilkan tegangan keluaran yang mendekati bentuk gelombang *sinusoidal*. Dalam penelitian ini, Arduino Uno digunakan untuk menghasilkan sinyal SPWM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa inverter satu fasa dengan SPWM bipolar dapat menghasilkan tegangan keluaran yang dengan bentuk gelombang mendekati sinusoidal murni. Penggunaan teknik ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi dan kualitas sistem konversi energi dari DC ke AC.

Hasil pengukuran THD pada simulasi dan *hardware* memiliki perbedaan, pada simulasi THD yang terukur sebesar 3,11% sedangkan pada *hardware* langsung THD yang terukur sebesar 5,19%. Perbedaan Total Harmonic Distortion (THD) antara simulasi dan *hardware* dapat disebabkan oleh berbagai faktor, model simulasi sering kali menggunakan asumsi dan penyederhanaan yang tidak sepenuhnya merefleksikan kondisi nyata, seperti impedansi komponen yang ideal. Toleransi komponen pada perangkat keras sebenarnya dapat menyebabkan variasi dalam performa yang tidak terdeteksi dalam simulasi, misalnya resistansi, kapasitansi, dan induktansi yang berbeda sedikit dari nilai nominalnya.

Berdasarkan kesimpulan yang diperoleh, terdapat beberapa saran untuk pengembangan lebih lanjut dan peningkatan kualitas dari inverter satu fasa dengan SPWM bipolar ini. Salah satu peningkatan yang diperlukan adalah penambahan fitur feedback pada agar inverter bisa mempertahankan kestabilan tegangan pada kondisi beban yang tidak tetap. Selain itu perlunya perancangan filter yang lebih baik agar menghasilkan sinyal sinusoidal yang lebih akurat.

REFERENSI

- [1] D. B. Rathnayake *dkk.*, “Grid Forming Inverter Modeling, Control, and Applications,” *IEEE Access*, vol. 9, hlm. 114781–114807, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3104617.
- [2] D. Nugraha, “JTEV (JURNAL TEKNIK ELEKTRO DAN VOKASIONAL) Rancang Bangun Inverter Satu Fasa Dengan Dengan Modulasi Lebar Pulsa PWM Menggunakan Antarmuka Komputer”, [Daring]. Tersedia pada: <http://ejournal.unp.ac.id/index.php/jtev/index>
- [3] R. B. P. Simanjuntak, M. Safii, F. Anggraini, S. Sumarno, dan I. Gunawan, “Rancang Bangun Inverter Mengubah Arus Listrik DC ke AC Berbasis Arduino Uno,” *Journal of Computer System and Informatics (JoSYC)*, vol. 2, no. 4, hlm. 295–299, Agu 2021, doi: 10.47065/josyc.v2i4.838.
- [4] R. Muhammad, D. Septiyanto, dan N. Mulyono, “Rancang Bangun Inverter 3 Fasa Berbasis Bipolar Sinusoidal Pulse Width Modulation.”
- [5] H. Obara, K. Wada, K. Miyazaki, M. Takamiya, dan T. Sakurai, “Active Gate Control in Half-Bridge Inverters Using Programmable Gate Driver ICs to Improve Both Surge Voltage and Converter Efficiency,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 54, no. 5, hlm. 4603–4611, Sep 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2835812.

- [6] N. Desiwantiyani dan F. N. Budiman, “Rancang Bangun Inverter SPWM.”
- [7] A. Singh dan J. Vs, “Voltage Fed Full Bridge DC-DC and DC-AC Converter for High-Frequency Inverter Using C2000,” 2021. [Daring]. Tersedia pada: www.ti.com
- [8] H. Prasetyo, P. Prisantoro, W. H.P., dan I. Irunowo, “Analisa Pemasangan Filter Pasif Sebagai Peredam Harmonisa Akibat Beban Non Linier,” *JRST (Jurnal Riset Sains dan Teknologi)*, vol. 7, no. 1, hlm. 109, Mar 2023, doi: 10.30595/jrst.v7i1.16677.
- [9] Ikhsan Hidayat, Al Mahdali, dan M. Afandy, “Analisis Perbandingan Inverter Satu Fasa PWM dan SPWM dengan Trafo,” *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 4, 2022.
- [10] R. I. Putri, F. Maulana, dan H. Haryadi, “Desain Inverter Full-Bridge 1 Fasa dengan DSP F28069M Menggunakan Teknik SPWM,” *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, vol. 20, no. 2, hlm. 257, Des 2021, doi: 10.24843/mite.2021.v20i02.p09.
- [11] S. P. Gautam, L. Kumar, dan S. Gupta, “Single-phase multilevel inverter topologies with self-voltage balancing capabilities,” *IET Power Electronics*, vol. 11, no. 5, hlm. 844–855, Mei 2018, doi: 10.1049/iet-pel.2017.0401.
- [12] E. Kabalcı, “Review on novel single-phase grid-connected solar inverters: Circuits and control methods,” *Solar Energy*, vol. 198. Elsevier Ltd, hlm. 247–274, 1 Maret 2020. doi: 10.1016/j.solener.2020.01.063.
- [13] A. Singh dan J. Vs, “Voltage Fed Full Bridge DC-DC and DC-AC Converter for High-Frequency Inverter Using C2000,” 2021. [Daring]. Tersedia pada: www.ti.com
- [14] U. A. Khan dan J. W. Park, “Full-Bridge Single-Inductor-Based Buck-Boost Inverters,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 36, no. 2, hlm. 1909–1920, Feb 2021, doi: 10.1109/TPEL.2020.3011462.
- [15] T. Bhattacharjee, M. Jamil, dan A. Jana, “Design of SPWM Based Three Phase Inverter Model.”
- [16] A. Marzuki, B. Hermanto, J. T. Elektro, dan N. Pontianak, “ELIT JOURNAL (Electrotechnics And Information Technology) Rancang Bangun Bipolar SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) Pada Beban Non Linier Pada Inverter 1 Phase,” vol. 1, no. 1, 2020.
- [17] S. Adak, “Harmonics Mitigation of Stand-Alone Photovoltaic System Using LC Passive Filter,” *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 16, no. 5, hlm. 2389–2396, Sep 2021, doi: 10.1007/s42835-021-00777-7.
- [18] M. Al dan E. Zondra, “ANALISIS HARMONISA MENGGUNAKAN FILTER PASIF PADA VSD DENGAN BEBAN MOTOR ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMP DI PT. CPI,” 2021.
- [19] Algaddafi A, Elnaddab K, dan Ma'mari A, “Comparing the performance of bipolar and unipolar switching frequency to drive DC-AC Inverter,” 2016.
- [20] H. Mhiesan, Y. Wei, Y. P. Siwakoti, dan H. A. Mantooth, “A Fault-Tolerant Hybrid Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 35, no. 12, hlm. 12702–12715, Des 2020, doi: 10.1109/TPEL.2020.2996097.

- [21] H. Nazif, “PENGEMBANGAN MODEL DAN SIMULASI INVERTER SATU FASA PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA DENGAN METODE KONTROL ARUS RAMP COMPARISON CURRENT CONTROL,” 2019.
- [22] P. Mishra dan R. Maheshwari, “Design, Analysis, and Impacts of Sinusoidal LC Filter on Pulsewidth Modulated Inverter Fed-Induction Motor Drive,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 4, hlm. 2678–2688, Apr 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2913824.
- [23] N. A. Ramli, A. Jidin, Z. Rasin, dan T. Sutikno, “Reduction of total harmonic distortion of three-phase inverter using alternate switching strategy,” *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 12, no. 3, hlm. 1598–1608, Sep 2021, doi: 10.11591/ijpeds.v12.i3.pp1598-1608.
- [24] K. Krismadinata, I. Husnaini, A. Asnil, R. Lapisa, dan R. Omar, “COMPARISON OF VARIOUS CONDUCTION MODES FOR THREE-PHASE INVERTER,” *J Theor Appl Inf Technol*, vol. 15, no. 7, 2022, [Daring]. Tersedia pada: www.jatit.org
- [25] E. Noorsal, A. Rongi, I. R. Ibrahim, R. Darus, D. Kho, dan S. Setumin, “Design of FPGA-Based SHE and SPWM Digital Switching Controllers for 21-Level Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter Model,” *Micromachines (Basel)*, vol. 13, no. 2, Feb 2022, doi: 10.3390/mi13020179.

Halaman ini sengaja dikosongkan