

Single Phase Variable Frequency Drive (VFD) Inverter menggunakan Arduino ATmega328

Laurentius Bima Anggoro^{1*}, Judi Prajetno Sugiono²

^{1,2}Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Elektro Institut Sains dan Teknologi Terpadu Surabaya

*Email: jpsugiono@stts.edu

ABSTRAK

Desain peralatan penyedia listrik setidaknya memberikan empat bentuk konversi, yaitu *Rectifier*, Inverter, Chopper dan cyclo-converter. Secara teoritis hanya rectifier dan inverter yang memenuhi kebutuhan umum penyediaan listrik, tetapi dari sisi ukuran ekonomis desain berbasis inverter lebih disukai. Inverter adalah perangkat yang mengubah tegangan input DC menjadi tegangan output AC. Perubahan ini seperti menggunakan sebuah *switch* yang bergetar dengan frekuensi tertentu, mirip dengan proses sampling pada sebuah gelombang. Karena itu inverter seperti ini disebut sebagai Variable Frequency Drive (inverter VFD). Hal yang menarik perhatian adalah menggunakan proses switching dengan gelombang sinusoidal. Bentuk ini disebut dengan Sinusoidal Pulse Width Modulation (s-PWM). Bentuk rancangan s-PWM dalam penelitian ini menggunakan topologi unipolar yang mana cara ini sudah cukup idak derelukan menggunakan topologi bipolar. Sedangkan untuk mencegah terjadinya shoot-through dilakukan dengan menggunakan pergeseran offset suatu nilai SPWM. Pergeseran offset terbaik adalah 11 dengan index modulasi 88. Hasil uji coba perangkat inverter VFD yang dibuat mampu mengatur frekuensi dari 25 Hz sampai dengan 50 Hz, dan menghasilkan efisiensi 78.32% -80.97% dengan THD 1.25% - 1.64%

Kata Kunci: Inverter, VFD, SPWM, THD

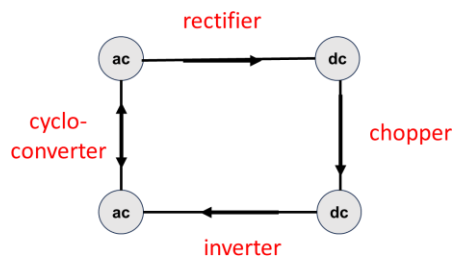
ABSTRACT

The design of electricity supply equipment provides at least four forms of conversion, namely Rectifier, Inverter, Chopper and cyclo-converter. Theoretically, only rectifiers and inverters meet the general needs of electricity supply, but in terms of economical size, inverter-based designs are preferred. An inverter is a device that converts the DC input voltage into the AC output voltage. This change is like using a switch that vibrates at a certain frequency, similar to the sampling process on a wave. Therefore, an inverter like this is referred to as a Variable Frequency Drive (VFD inverter). The thing that attracts attention is the use of a switching process with sinusoidal waves. This form is called Sinusoidal Pulse Width Modulation (s-PWM). The form of s-PWM design in this study uses a unipolar topology which is enough to use a bipolar topology. Meanwhile, to prevent shoot-throughs from occurring, it is carried out by using a shift in the offset of an SPWM value. The best offset shift is The best offset shift is 11 with a modulation index of 88. The results of the VFD inverter device test are able to regulate the frequency from 25 Hz to 50 Hz, and produce an efficiency of 78.32% - 80.97% with a THD of 1.25% - 1.64%

Keywords: Inverter, VFD, PWM, SPWM, THD

1. Pendahuluan

Konsumsi daya Listrik sebuah kota besar mengindikasikan kebutuhan penggunaan peralatan penyedia daya Listrik (*Power Supply*) yang baik dalam arti efisiensi yang lebih baik. Efisiensi dapat ditunjukkan dengan banyak cara. Pertama adalah pemilihan rangkaian dasar konversi energi. Ada 4 bentuk prinsip converter yaitu *Rectifier*, Inverter, *cycloconverter* dan chopper. Dari keempat prinsip tersebut hanya inverter yang memiliki kesesuaian dengan kebutuhan daya yang tinggi



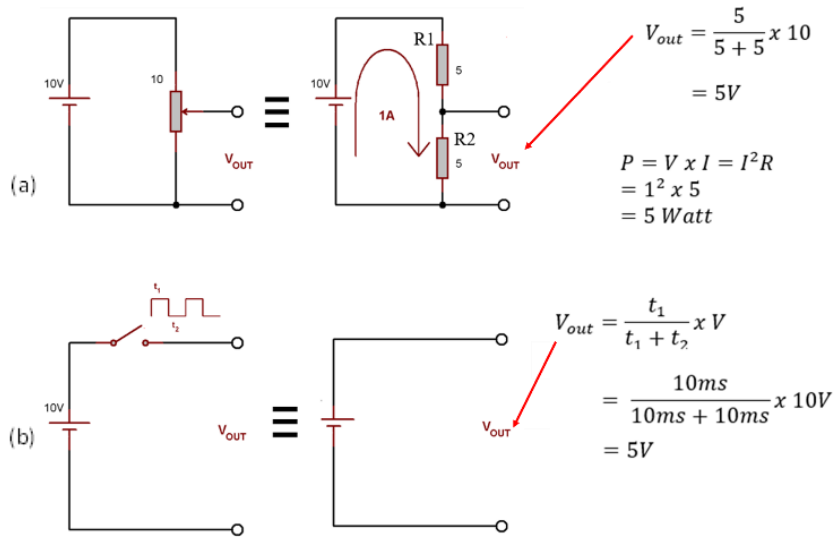
Gambar 1. tipe-tipe converter daya

Inverter, sesuai namanya, akan mengkonversi daya DC ke daya AC banyak dipergunakan dalam mesin pabrik, turbin angin, portable converter juga peralatan rumah tangga. Akan tetapi kebanyakan tingkat kecacatan gelombang yang masih tinggi. Dengan bantuan deret Fourier dapat diketahui besar level harmonisnya. Sebuah rangkaian yang disebut sPWM (sinusoidal PWM) ditambahkan untuk akan mengoptimalkan energi sinyal tanpa mengesampingkan THD.

A. Prinsip Dasar Rangkaian Konverter Daya

Bagaimanakah mengendalikan sebuah daya listrik? Di masa lalu, ketika daya listrik yang dibutuhkan hanya kecil saja (seperti untuk motor mesin jahit), maka cukup dilakukan dengan memasang rheostat (penyebutan resistor variable kuno, terbuat dari kawat nikelin, berdaya besar). Komponen tersebut dirangkai secara seri dengan motor, maka sebagian daya dibuang sebagai panas dalam rheostat. Cara yang tidak efisien, tetapi bisa diterima karena daya total adalah rendah. Cara ini adalah salah satu dari beberapa metode pengendalian daya. Cara lain seperti *autotransformers variable* (untuk AC) yang dipakai untuk penerangan gedung pertemuan. Cukup efisien, tetapi juga relatif mahal.

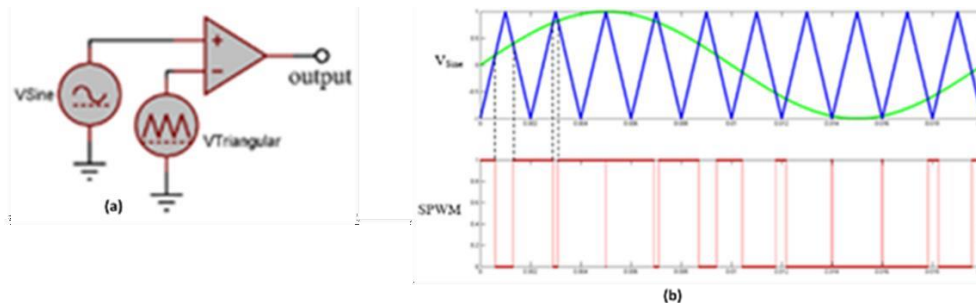
Esensi dasar rangkaian elektronika daya dapat dijelaskan melalui Gambar 2. Gambar 2 (a) merupakan pengaturan sumber tegangan V_{sumber} menjadi sumber tegangan keluaran V_{out} pada beban RL yang nilainya ditentukan oleh pengaturan potensiometer, dimana nilai tegangan V_{out} akan selalu lebih kecil atau maksimum sama dengan tegangan V_{sumber} . Pengaturan tegangan dengan menggunakan potensiometer ini, terdapat rugi daya pada potensiometer sebesar $I^2 \times R_1$. Dalam konsep rangkaian elektronika daya, rugi daya tersebut harus ditiadakan atau dirancang tidak ada rugi daya dalam rangkaian. Untuk keperluan tersebut, potensiometer diganti dengan prinsip electronic switching. Prinsip electronic switching merupakan dasar dari operasi suatu rangkaian elektronika daya seperti ditunjukkan pada Gambar 2(b).



Gambar 2. Prinsip Dasar Rangkaian Konverter Daya

B. Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)

SPWM adalah PWM yang dihasilkan dengan membandingkan amplitudo sinyal yang diinginkan dengan gelombang segitiga (triangular/saw tooth) yang ditunjukkan pada gambar 3 sehingga akan diperoleh sinyal keluaran berupa gelombang SPWM (Ratmiaji et al.2019).

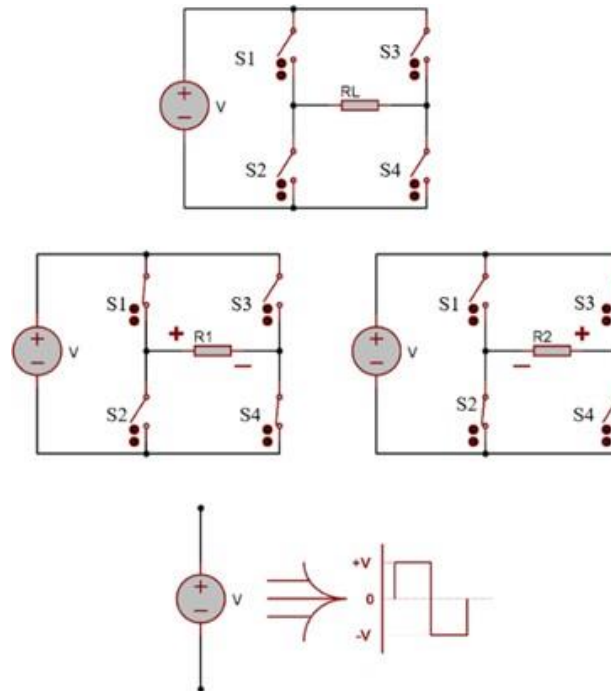


Gambar 3. Pembangkitan Sinyal SPWM
 (a) Rangkaian komparator, (b) Modulasi dengan gelombang triangular

C. H-Bridge

H-bridge adalah sebuah rangkaian elektronik yang memungkinkan tegangan yang akan diterapkan pada beban di kedua arah. Dengan rangkaian tersebut, memungkinkan membalik kutub positif dan kutub negatif pada output. Istilah H-Bridge berasal dari representasi grafis khas seperti Gambar 4. Sebuah H-Bridge dibangun dengan empat switch (solid-state atau mekanis). Pada gambar 4(b), ketika saklar S1 dan S4 ditutup (dan S2 dan S3 terbuka) tegangan positif akan berada di sebelah kiri dan tegangan negatif berada di sebelah kanan. Pada gambar 4(c), dengan membuka saklar S1 dan S4 dan menutup saklar S2 dan S3, tegangan ini dibalik, sehingga terjadi operasi pembalikan tegangan. Dari prinsip tersebut dimungkinkan untuk mengubah tegangan DC (searah)

menjadi tegangan bolak-balik yang berup gelombang kotak, seperti ditunjukkan pada gambar 4(d).



Gambar 4. H-Bridge untuk Membalik Polaritas Tegangan.
 (a) Struktur H-Bridge, (b) Tegangan positif, (c) Tegangan Negatif,
 (d) Perubahan tegangan searah menjadi tegangan bolak-balik.

D. SPWM dengan *Unipolar Switching*

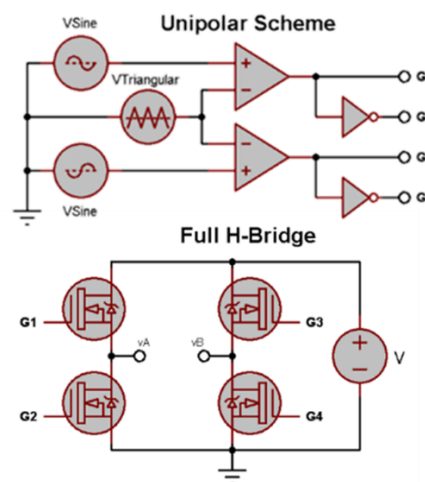
Unipolar Switching (Gambar 5) diperoleh dengan membandingkan 2 gelombang sinus (V_r) yang fasenya berbeda 180° dan gelombang segitiga (V_c , saw tooth/ triangular) yang memiliki rentang frekuensi sampling dari beberapa kHz sampai beberapa puluh kHz. Pola ini kemudian diumpankan ke saklar daya untuk memperoleh sinyal keluaran yang diinginkan

$$G_1 = \begin{cases} 1 & V_r > V_c \rightarrow V_a = V \cdot \text{duty cycles} \\ 0 & \end{cases}$$

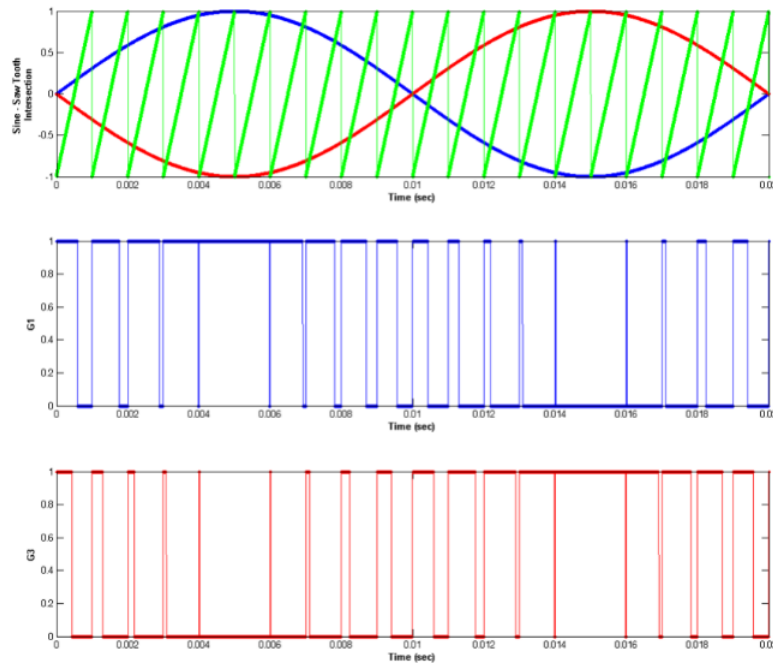
$$G_2 = \begin{cases} 1 & V_r < V_c \rightarrow V_a = 0 \\ 0 & \end{cases}$$

$$G_3 = \begin{cases} 1 & V_r > V_c \rightarrow V_b = V \cdot \text{duty cycles} \\ 0 & \end{cases}$$

$$G_4 = \begin{cases} 1 & V_r < V_c \rightarrow V_b = 0 \\ 0 & \end{cases}$$



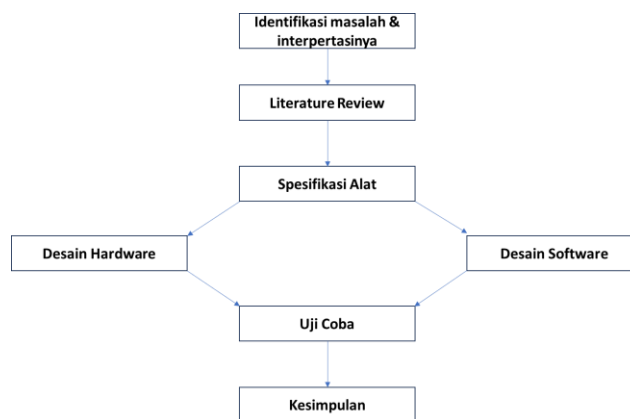
Gambar 5. Topologi Unipolar



Gambar 6. Hasil Modulasi dari 2 Gelombang Sinus yang Berbeda Fasa terhadap Gelombang Segitiga pada Unipolar Switching menghasilkan 2 Gelombang SPWM

2. Metode Penelitian

Penelitian ini termasuk jenis penelitian laboratorium – rekayasa – aplikasi/terapan. Seperti yang diketahui bersama penelitian jenis ini memiliki prediksi keyakinan yang hampir selalu berhasil dilakukan sepanjang teknologi pendukungnya tersedia. Jika teknologi pendukung tidak ada atau belum memadai maka penelitian seperti ini lebih baik dilakukan diarah yang lebih menjanjikan.

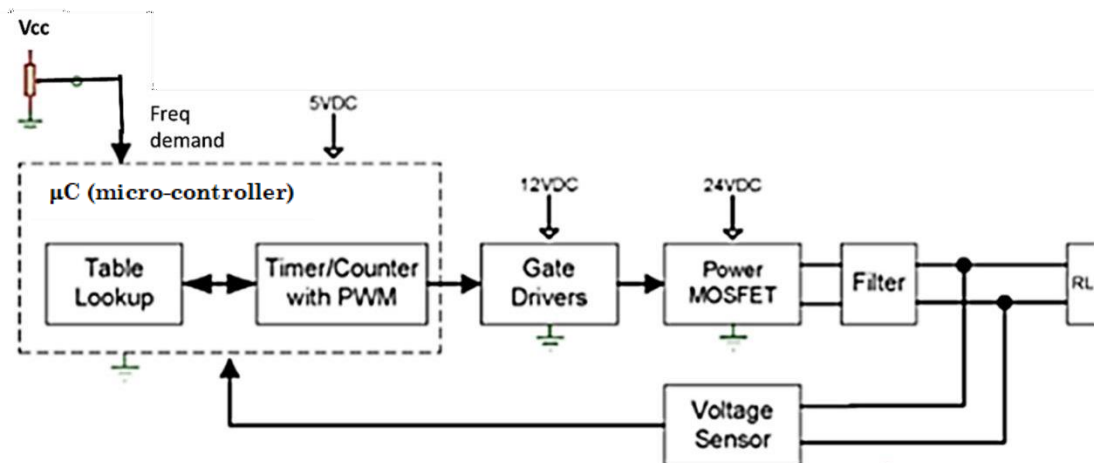


Gambar 7 Flowchart Metode Penelitian

Langkah awal dalam penelitian ini adalah mempelajari proses pembuatan alat, mengetahui alasan yang menjadi dasar dibutuhkannya penelitian ini atau ditemukannya akar masalah, akan membuat arah penelitian menjadi jelas. Tahap ini akan

menghasilkan spesifikasi alat, misalnya tegangan input, frekuensi kerja, dan lain-lain. Setelah tahap ini terselesaikan maka desain alat dapat segera dilakukan. Desain Hardware dan Software sebenarnya bukan kerja yang terpisah. Disatu titik mungkin terlihat berbeda, tetapi di titik lain ternyata tidak bisa dipisahkan. Jika desain sudah dikerjakan maka dilakukan uji coba yang secara formal untuk menguji keakurasian, kepresisian dan parameter lain yang dibutuhkan. Keputusan dapat ditentukan segera setelah uji coba diselesaikan.

Desain Perangkat Keras



Gambar 8 Blok Diagram Perangkat Keras

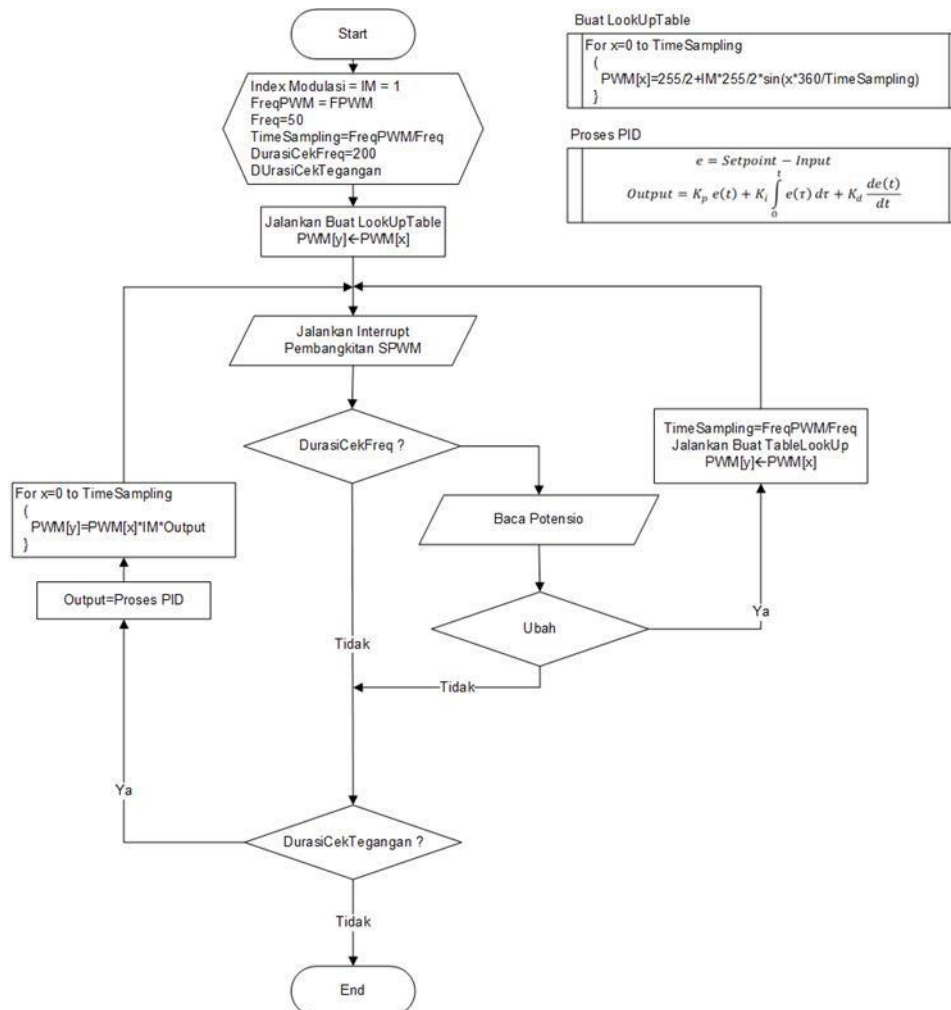
Langkah pertama dalam desain ini adalah menentukan proses yang dikerjakan oleh microcontroller dan yang dikerjakan oleh komponen-komponen diskrit. Mikrokontroler mengatur semua inisialisasi dan melakukan pembacaan nilai *Frequency Demand*, kemudian mikrokontroler segera membangkitkan pola *switching* SPWM untuk *gate drivers* MOSFET (*Metal Oxide Surface – Field Effect Transistor*). MOSFET ini mengendalikan *main switch* dengan konfigurasi *Full H-Bridge*, sehingga output-nya mengeluarkan tegangan sinusoidal. Tegangan ini di-feedback-kan Kembali ke mikrokontroler melalui rangkaian *fullwave rectifier* untuk mendapatkan nilai *Root Mean Square* (RMS) dan dibaca oleh *Analog to Digital Converter* (ADC) dalam mikrokontroler. Mikrokontroler membandingkan hasil pembacaan ADC dengan nilai setting tegangan yang diinginkan. Jika terjadi perbedaan nilai, maka mikrokontroler melakukan perubahan amplitudo pada pola *switching* SPWM dan mengeluarkan pola *switching* SPWM yang baru dihitung hingga dicapai nilai ADC yang sama atau mendekati setting yang diinginkan.

Desain Perangkat Lunak

Kerja Flowchart program dari mikrokontroler dapat dengan mudah dimengerti dengan memperhatikan:

1. Inisialisasi $IM=0.85$
2. Setting interrupt timer yg akan digunakan
3. Membuat tabel sampling untuk masing-masing nilai amplitudo dalam 1 sinyal sinus
4. Membaca setting permintaan frekuensi

5. Menjalankan interrupt
6. Melakukan pembacaan nilai tegangan output inverter dan melakukan koreksi jika tidak sesuai *setting* tegangan yang dikehendaki .

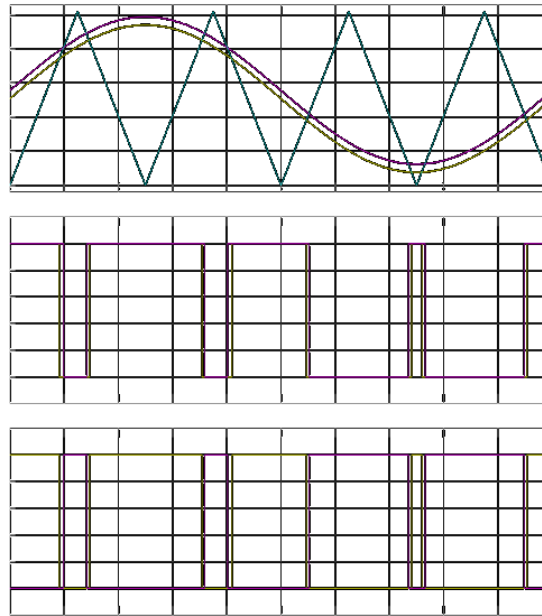


Gambar 9 Flowchart perangkat lunak

7. Melakukan pengecekan dan perubahan jika ada permintaan perubahan frekuensi seperti berikut:
 - (a) Pembangkitan 2 Sinyal SPWM Tanpa Waktu ON yang bersamaan
 - (b) Sinyal SPWM dibangkitkan melalui interrupt timer/counter 1, dimana ATmega328 memang sudah dibekali kemampuan untuk membangkitkan sinyal PWM melalui interrupt timer/counter 0, 1 dan 2. Nilai PWM yang akan dibangkitkan di-setting melalui OCRnA dan OCRnB, dimana nilai n menyatakan timer/counter ke 0, 1 atau 2.
 - (c) Pembangkitan gelombang PWM menggunakan *Phase Correct* PWM, yaitu mengkomparasi dengan gelombang segitiga seperti yang ditunjukkan pada gambar 10.

Dalam gambar 10, Gelombang sinus kuning adalah sinus awal. Pada gambar (a), sinus merah muda adalah sinus kuning yang digeser offset-nya. Kedua sinus pada

gambar (a) dikomparasi dengan gelombang segitiga biru setinggi -V sampai +V. Hasil komparasi adalah gelombang SPWM seperti ditunjukkan pada gambar (b), kemudian gelombang SPWM merah muda pada gambar (b) di-not-kan. Terjadi dua gelombang SPWM, yaitu SPWM (kuning) dan (SPWM)⁻ (merah muda), seperti yang ditunjukkan pada gambar (c), dimana kedua sinyal SPWM tersebut tidak memiliki waktu ON yang bersamaan (Ikhsan, 2022).



Gambar 10 Sinyal SPWM Tanpa Waktu ON yang Bersamaan

4. Hasil Dan Pembahasan

Tabel 1. Pengaruh Pengaturan Indeks Modulasi (Tanpa Filter)

Freq. 50 Hz											
Bipolar				Var1		Unipolar				RL = 2 Ω	
				IDC (A)						IDC (A)	
IM	SPWM _{peak} (%)	SPWM _{peak} ^(T) (%)	Deadtime Shift	Pulse (max 110)	avg	IM	SPWM _{peak} (%)	SPWM _{peak} ^(T) (%)	Deadtime Shift	Pulse (max 110)	avg
100%	90.0	90.00	0	206.07	44.25	100%	90.0	90.00	0	296.21	14.07
	90.0	90.79	1	180.03	32.51		90.0	90.79	1	281.02	11.83
	90.0	97.87	10	5.89	3.47		90.0	97.87	10	42.28	9.48
	90.0	98.66	11	5.89	3.28		90.0	98.66	11	29.12	5.46
	90.0	99.45	12	5.89	3.11		90.0	99.45	12	27.36	9.50
95%	89.0	97.86	12	5.88	3.11	89%	89.0	97.66	11	29.07	9.41
88%	88.0	95.66	12	5.89	3.12	88%	88.0	95.66	11	29.07	9.28
87%	87.0	95.66	12	5.88	3.09	87%	87.0	95.66	11	30.44	9.21

Var2					
Bipolar			Unipolar		
RL = 2 Ω			RL = 2 Ω		
IDC (A)			IDC (A)		
IM	Pulse (max 110)	avg	IM	Pulse (max 110)	avg
100%	5.88	3.87	100%	24.43	7.57
95%	5.88	3.87	95%	24.39	7.85
90%	5.88	3.84	90%	23.68	7.43
85%	5.88	3.83	85%	22.06	7.25

Seperti diketahui rangkaian full-H Bridge menggunakan empat buah power MOSFET di kemudikan oleh Timer 1 untuk topologi bipolar dan menggunakan Timer 1 + Timer 2. Kemudian uji coba dilakukan dengan mengambil *trace* untuk kontrol SPWM yang berfungsi sebagai trigger masing-masing transistor *switching*, seperti yang ditunjukkan pada tabel 1. Percobaan ini menguji dua buah topologi bipolar dan unipolar dengan indek modulasi 90%. 95% dan 100%. Dalam hal ini juga terjadi pembalikan fasa 180° yang menyebabkan adanya waktu untuk penyaluran/peredaman *back electromotive Force* EMF)

Tabel 2. Kinerja Inverter VFD (Tanpa Pengaturan PI)

		Var1															
Load	Freq. Out	IM (%)	Dead Time	UnFilter				Filter								η (%)	
				vOut		iOut		IDC (A)			vOut		iOut				
				Fund (V)	THD (%)	Fund (V)	THD (%)	max	min	avg	Fund (V)	THD (%)	Fund (V)	THD (%)			
Bipolar	0.8	25	89	12													
		50															
	2	25							46.97	-6.03	4.03	7.60	2.07	3.80	2.07	29.86	
		50							46.94	-6.26	4.11	7.59	1.95	3.79	1.95	29.15	
	3	25															
		50															
Unipolar	0.8	25	88	11	13.63	65.92	17.04	65.92	101.55	-1.00	13.79	13.82	1.46	17.28	1.47	72.16	
		50			13.61	64.72	17.01	64.17	101.55	-1.33	13.65	13.79	1.35	17.24	1.36	72.57	
	2	25			14.74	63.55	7.37	63.55	67.80	-0.24	5.93	14.72	1.61	7.36	1.61	76.12	
		50			14.65	64.12	7.32	64.12	67.88	-0.20	5.99	14.69	1.53	7.34	1.53	75.00	
	3	25			14.96	63.43	4.99	63.43	61.09	-0.09	4.04	14.92	1.70	4.97	1.70	76.48	
		50			14.87	64.03	4.96	64.03	58.52	-0.07	4.07	14.90	1.65	4.97	1.65	75.81	

		Var2															
Load	Freq. Out	IM (%)	Dead Time	UnFilter				Filter								η (%)	
				vOut		iOut		IDC (A)			vOut		iOut				
				Fund (V)	THD (%)	Fund (V)	THD (%)	max	min	avg	Fund (V)	THD (%)	Fund (V)	THD (%)			
Bipolar	0.8	25	85	0													
		50															
	2	25							31.13	-9.53	3.12	6.82	3.34	3.41	3.33	31.07	
		50							31.37	-9.52	3.12	6.81	3.20	3.40	3.40	30.89	
	3	25															
		50															
Unipolar	0.8	25	85.0	0													
		50															
	2	25							75.75	-21.35	5.32	14.15	0.33	7.07	0.33	78.35	
		50							75.43	-21.12	5.37	14.13	0.57	7.06	0.57	77.40	
	3	25															
		50															

Tabel 2 dibuat dengan data yang sama dari tabel 1, tetapi melepaskan kendali PI dari rangkaian. Kendali PI secara normative dipergunakan untuk mereduksi error dalam sistem kendali yang menggunakan kecepatan yang bervariasi. Dalam konteks yang sama sistem ini menjadi tidak stabil dan menghasilkan panas berlebih,

4. Kesimpulan

Kesimpulan yang diambil dari penelitian ini adalah:

1. Penggeseran *deadtime* bisa digunakan sebagai salah satu cara untuk menghindari kerusakan transistor *switching* rangkaian *H-Bridge* akibat terjadinya panas berlebih
2. Penggunaan PID mampu menstabilkan output keluaran inverter antara 11.9-12.1 VAC
3. Hasil pengukuran prototipe inverter VFD dengan R_{Beban}=2Ω, diperoleh η > 78.32% - 80.97% dengan rentang THD 1.25% - 1.64%

5. Daftar Pustaka

- Ratmiaji et,al. (2019) Perbandingan Teknik Modulasi Inverter 3-Phasa 2-Tingkat untuk Menghasilkan Tegangan Keluaran Variabel (Dielektrika Vol 6, No 1:67-74, Februari 2019)
- Ikhsan H.et.al, (2022) Analisis Perbandingan Inverter Satu Phasa PWM dan SPWM dengan Trafo (Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering, Vol 4 No 1, Januari 2022)
- Anonymous, (2023). How should I select TVS diodes (ESD protection diodes) according to the voltage level of a signal line to be protected?. https://toshiba.semicon-storage.com/eu/semiconductor/knowledge/faq/diode_tvs-diodes/how-should-i-select-tvs-diodes-esd-protection-diodes-according-to-the-voltage-level-of-a-signal-line-to-be-protected.html [accessed 17 Juni 2023]
- Anonymous, (2023) . What is Power MOSFET?. [online] available at: <https://www.eeguide.com/what-is-power-mosfet/> [accessed 17 Juni 2023]
- Wan, Martin, (2023) Efficient LED Control: Exploring PWM Dimming.: <https://www.ledlighting.com/led-pwm-dimming/> [accessed 17 Juni 2023]
- Anonymous, (2023) . Voltage Control of Single Phase Inverter | PWM at: <https://electricalguide360.com/voltage-control-of-single-phase-inverter-pwm-techniques-of-inverters/> [accessed 17 Juni 2023]
- Anonymous, (2023). MOSFET as a Switch. [online] available at: https://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_7.html [accessed 17 Juni 2023]
- Anonymous, (2023), IR2110 Datasheet (PDF) - International Rectifier [online] available at:<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/82793/IRF/IR2110.html> [accessed 17 Juni 2023]
- Arduino Uno Rev3, (2023), <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3.png> [accessed 19 Juni 2023]
- Beauregard, Brett, (2017). Proportional on Measurement – The Code. [online] available at: <http://www.brettbeauregard.com> [accessed 19 Juni 2023]
- Veinott, Timothy L. Skvarenina. (2002). The Power Electronics Handbook. CRC Press-LLC, Purdue University West Lafayette, Indiana
- Mohan, Undeland, and Robbins (2003). Power Electronics, 3rd Edition. John Wiley & Sons, Inc. New York
- Ogata, Katsuhiko (1970). Modern Control Engineering. Englewood Cliffs: Prentice-Hall. New Jersey
- Michael Margolis. (2011). Arduino Cookbook, 2nd Edition. O'Reilly Media, Inc., 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 95472 [17] <http://www.atmel.com/Images/doc2545.pdf>