

Inverter 5-Tingkat Tiga Fasa Empat Kawat menggunakan STM32F407 untuk Catu Daya Mandiri

IVANILES PUTRA UTAMA DAGOMIS, LEONARDUS HERU PRATOMO

Universitas Katolik Soegijapranata Semarang, Indonesia
Email: ivanilesputra14@gmail.com

Received 26 Agustus 2020 | *Revised* 22 September 2020 | *Accepted* 30 September 2020

ABSTRAK

Salah satu energi terbarukan adalah pembangkit listrik tenaga surya (PLTS), yang menggunakan photovoltaic (PV) sebagai sarana konversi energi. Untuk mendapatkan daya maksimal, menggunakan konverter DC-DC beralgoritma maximum power point tracker (MPPT). Sistem di Indonesia menggunakan tiga fasa empat kawat (TFEK), sehingga sistem perlu diintegrasikan menjadi satu, dikenal dengan nama konversi dua tahap. Masalah yang muncul adalah konverter TFEK lazim diimplementasikan menggunakan konverter daya empat lengan, di mana setiap lengannya terdapat dua buah sakelar daya. Hal ini akan mengakibatkan sistem pensaklaran yang tinggi, tapis dan stress tegangan yang besar untuk mendapatkan THD rendah. Oleh karena itu, telah diteliti inverter TFEK menggunakan 5-level inverter. Metode modulasi lebar pulsa digital sinusoidal (MLPDS) digunakan untuk mengendalikan setiap sakelar (IRFP 460) dengan menggunakan mikrokontrol jenis STM32F407. Verifikasi menggunakan perangkat lunak PSIM dan prototype. Berdasarkan hasil pengujian, metode yang dilakukan mampu menghasilkan arus dan tegangan keluaran inverter TFEK dengan THD tegangan sebesar 4,38%.

Kata kunci: Inverter 5-tingkat, Tiga fasa empat kawat, STM32F407, THD

ABSTRACT

One of the renewable energy is solar power plant (PLTS), which uses photovoltaic (PV) as a means of energy conversion. To get maximum power, use a DC-DC converter with a maximum power point tracker (MPPT). The system in Indonesia uses three-phase four-wires (TPFW), the system needs to be integrated into one, as two-stage conversion. The problem is that TPFW converters are commonly implemented using four-leg power converter, where each leg has two power switches. This will result in high switching system, large filters, and stress voltage to get low THD. Hence, the TPFW inverter 5-level inverter has been investigated. The sinusoidal pulse width modulation (SPWM) method is used to control each switch (IRFP 460) using an STM32F407 microcontroller. Verification with PSIM software and prototype. Based on the results, the method used can produce the current and output voltage of the TPFW inverter with a voltage THD of 4.38%.

Keywords: five-level inverter, three-phase four-wire, STM32F407, THD

1. PENDAHULUAN

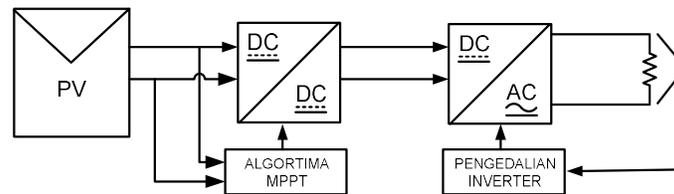
Energi listrik sangatlah penting dalam kehidupan sehari-hari. Dengan meningkatnya jumlah penduduk dan kemajuan teknologi dari tahun ke tahun, keperluan distribusi listrik yang stabil dan merata menjadi sangat penting **(Hakim, dkk, 2018)**. Di beberapa negara berkembang distribusi listrik sangatlah tinggi, karena permintaan pengguna listrik semakin banyak **(Wilson, dkk, 2016)**. Semakin banyak permintaan pengguna listrik energi yang dihasilkan semakin meningkat pula. Pembangkit listrik dirancang berdasarkan sumber energi yang ada pada lokasi geografis **(Ardin, dkk, 2017)**. Banyak generator pembangkit listrik yang memiliki dampak, seperti pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Sisa gas buang dari pembangkit listrik termasuk dalam polusi udara yang utama **(Tran, dkk, 2017)**.

Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dapat di semua tempat, dikarenakan pembangkit listrik ini hanya memerlukan energi radiasi matahari. Di beberapa tempat yang tertinggal, distribusi listrik tidak merata, dengan menggunakan *photovoltaic* (PV) kebutuhan listrik dapat tercukupi **(Sanadeera, dkk, 2015)**. Panel surya mengubah radiasi matahari menjadi listrik, hasil listrik yang dihasilkan adalah arus listrik searah. Oleh karena itu untuk membuat arus selalu maksimal memerlukan konverter daya yang beragoritma kurva maksimal **(Pratomo, dkk, 2020)**. Agar arus dari PV dapat digunakan diperlukan pengubah arus. Pengubah arus searah dari PV menjadi arus bolak-balik memerlukan rangkaian daya yang di sebut *inverter* **(Pratomo, dkk, 2015)** **(Pratomo, dkk, 2020)**. *Inverter* memiliki banyak jenis pensaklaran, seperti unipolar, bipolar **(Hamid, dkk, 2019)**. *Inverter* pada umumnya memiliki dua jenis *Voltage Source Inverter* (VSI) dan *Current Source Inverter* (CSI) **(Neukirchner, dkk, 2017)**. Selain dua jenis itu *inverter* memiliki topologi yang berbeda-beda baik satu fasa maupun tiga fasa **(Rahman, dkk, 2016)** *Inverter* tiga fasa umumnya menggunakan tiga buah lengan **(Trivedi, dkk, 2016)** **(Rahman, dkk, 2016)** sehingga lebih sering munculnya stress tegangan. Karena bekerja pada frekuensi tinggi sehingga membutuhkan tapis induktor yang besar. Pada umumnya kelistrikan di Indonesia menggunakan sistem tiga fasa empat kawat. Masalahnya penggunaan *inverter* dalam pembangkit mandiri, *inverter* tiga fasa empat kawat konvensional memerlukan frekuensi tinggi, tapis daya yang besar untuk mendapatkan nilai *Total Harmonic Distortion* (THD), sehingga dengan menggunakan *inverter* 5-tingkat tiga fasa empat kawat (TFEK) hanya menggunakan frekuensi yang rendah dan tapis yang kecil untuk mendapatkan THD yang rendah. Standart THD yang gunakan yaitu standart THD IEE dengan nilai harmonik 5% untuk tegangan 2.3-69kV **(IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, 2014)**.

Tujuan dari penelitian ini adalah memberi solusi untuk menghasilkan sinyal keluaran *inverter* TFEK dengan tapis induktor yang kecil sehingga *inverter* lebih sederhana. Dengan menghubungkan menggunakan konverter berbasis *Maxmimun Power Point Tracker* (MPPT) daya yang dihasilkan dari PV selalu maksimal. Langkah kedua menggunakan *inverter* sebagai pengkonversi arus searah ke arus bolak-balik. Dengan menggunakan *inverter* 5-tingkat TFEK pada aplikasi *off grid* *inverter* hanya memerlukan tapis yang kecil. Pengimplementasi perangkat keras sistem menggunakan mikrokontroler STM32F407. Sebagai tahap awal penelitian membahas prinsip kerja *inverter* 5-tingkat *off grid* dan pada bagian kedua dari jurnal ini membahas prinsip kerja dari *inverter* 5-tingkat TFEK. Untuk Simulasi, implementasi dan pembahasan ada di bagian tiga.

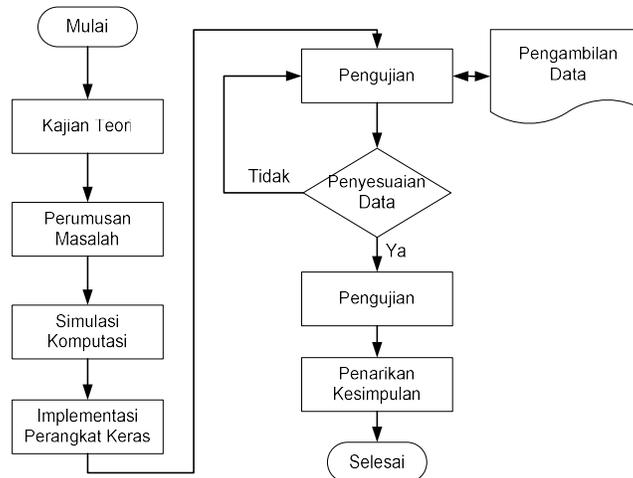
2. METODE PENELITIAN

PLTS mandiri menggunakan dua tahap konversi, dari PV dimaksimalkan dengan konverter berbasis algoritma MPPT menjadi arus searah kemudian di ubah menjadi arus bolak balik seperti Gambar 1. Pada umumnya kelistrikan di Indonesia menggunakan sistem tiga fasa empat kawat. Pada prinsipnya *inverter* 5-tingkat TFEK terdiri dari tiga buah *inverter* 5-tingkat yang di susun secara paralel. Sehingga memiliki tiga fasa yang masing-masing bergeser 120° dan memiliki kabel netral.



Gambar 1. PLTS Dua Tahap Konversi

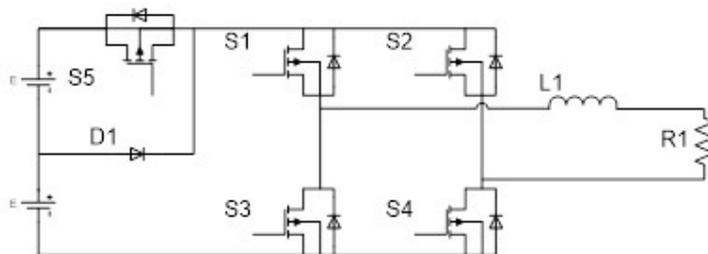
Penelitian ini menggunakan metode seperti diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 2. Pertama mengkaji pengaturan *inverter 5-tingkat* TFEK sebagai pembentuk gelombang sinusiudal. Dengan menggunakan metode satu panjang gelombang sebagai acuan pembentuk gelombang keluaran tiap fasa menggunakan STM32F407. Setelah itu merumuskan masalah yang ada dan membuat simulasi untuk mengatasi hal tersebut. Verifikasi dilakukan dengan implementasi perangkat keras serta melakukan pengujian dan pengambilan data. Pada bagian terakhir membuat kesimpulan mengenai masalah yang ada.



Gambar 2. Flow Chart Metode Penelitian

2.1 Inverter 5-Tingkat

Pada prinsipnya *inverter* 5-tingkat yang digunakan merupakan hasil modifikasi dari *inverter Full-Bridge*. *Inverter Full-Bridge* memiliki empat buah sakelar daya yang beroperasi pada pengaplikasian daya besar (Hamid, dkk, 2019). Keempat buah sakelar daya dalam *Inverter Full-bridge* dapat di kendalikan secara bipolar maupun unipolar (Algaddafi, dkk, 2017) (Hamid, dkk, 2019) (Maheshri, dkk, 2014). Topologi *Inverter* 5-Tingkat yang digunakan seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Topologi *Inverter* 5-tingkat

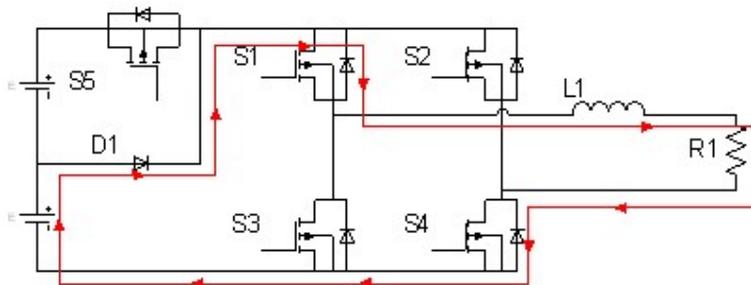
Prinsip kerja *inverter* 5-tingkat dibagi menjadi 5 mode operasi termasuk mode *freewheeling*:

1. Mode Operasi 1

Ketika sakelar daya S1 dan D1 konduktansi maka arus dari sumber DC (E) akan mengalir ke beban dan kembali ke sumber DC (E) sakelar daya S4. Gambar 4 menunjukkan mode operasi pertama. Model matematika dari mode operasi ini ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$E = v_L + V_o$$

$$E = L \frac{di_L}{dt} + V_o \tag{1}$$



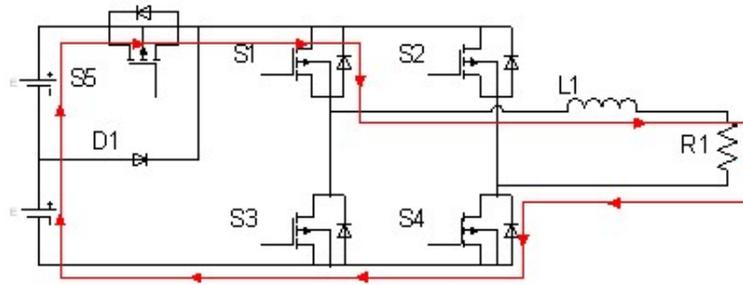
Gambar 4. Mode Operasi Satu

2. Mode Operasi 2

Ketika sakelar daya S5 dan S1 konduktansi maka arus dari sumber DC (E+E) akan mengalir ke beban dan kembali ke sumber DC (E+E) melalui sakelar daya S4. Gambar 5 menunjukkan mode operasi kedua. Model matematika dari mode operasi ini ditunjukkan pada Persamaan (2).

$$E + E = v_L + V_o$$

$$2E = L \frac{di_L}{dt} + V_o \tag{2}$$



Gambar 5. Mode Operasi Dua

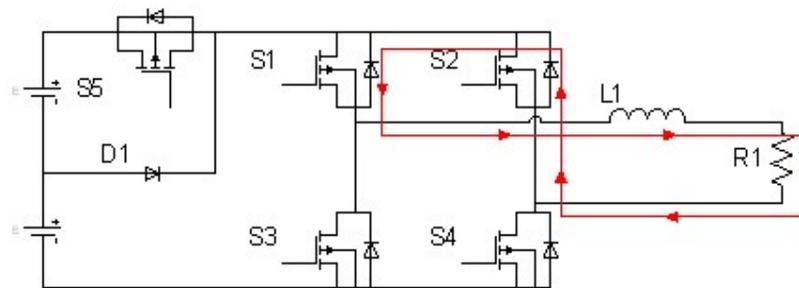
3. Mode Operasi 3

Ketika sakelar daya S1 dan S2 konduktansi, arus *freewheeling* mengalir ke beban dengan nilai positif dan jika kombinasi sakelar daya S3 dan S4 konduktansi akan menghasilkan arus dengan nilai negatif. Gambar 6 menunjukkan mode operasi ketiga. Model matematika dari mode operasi ini ditunjukkan pada Persamaan (3).

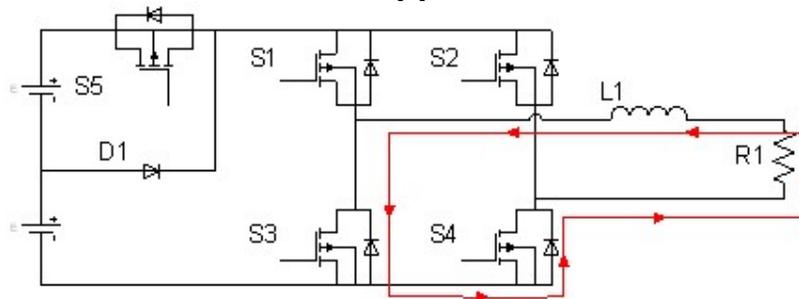
$$v_L = V_o - v_d$$

$$L \frac{di_L}{dt} = V_o - 0$$

$$V_o = L \frac{di_L}{dt} \tag{3}$$



(a)



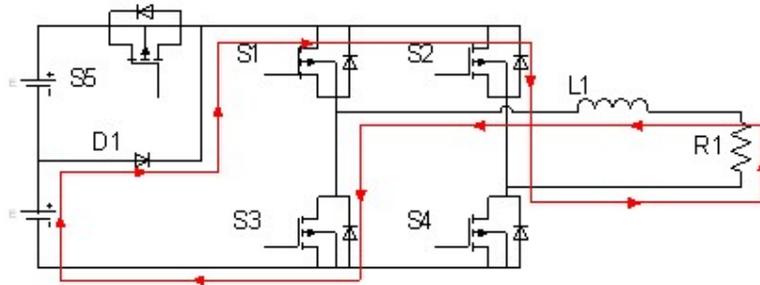
(b)

Gambar 6. (a) Freewheeling positif (b) Freewheeling negatif

4. Mode Operasi 4

Ketika D1 dan sakelar daya S1 konduktansi maka arus dari sumber DC (E) akan mengalir ke beban dan Kembali ke sumber DC (E) melalui sakelar daya S3. Gambar 7 menunjukkan mode operasi keempat. Model matematika dari mode operasi ini ditunjukkan pada Persamaan (4).

$$\begin{aligned}
 -E &= v_L + V_o \\
 -E &= L \frac{di_L}{dt} + V_o
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

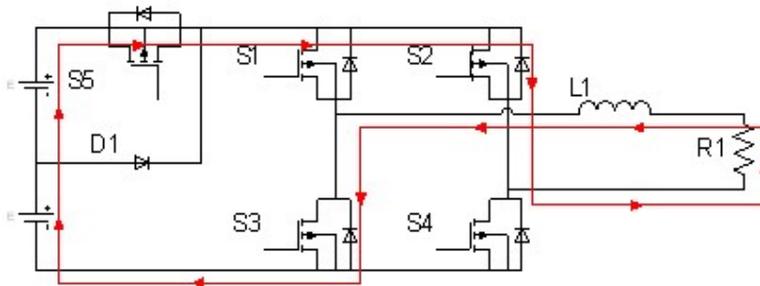


Gambar 7. Mode Operasi Empat

5. Mode Operasi 5

Ketika sakelar daya S5 dan S2 konduktansi maka arus dari sumber DC (E+E) akan mengalir ke beban dan Kembali ke sumber DC (E+E) melalui sakelar daya S3. Gambar 8 menunjukkan mode operasi keempat. Model matematika dari mode operasi ini ditunjukkan pada Persamaan (5).

$$\begin{aligned}
 -(E + E) &= v_L + V_o \\
 -2E &= L \frac{di_L}{dt} + V_o
 \end{aligned}
 \tag{5}$$



Gambar 8. Mode Operasi Lima

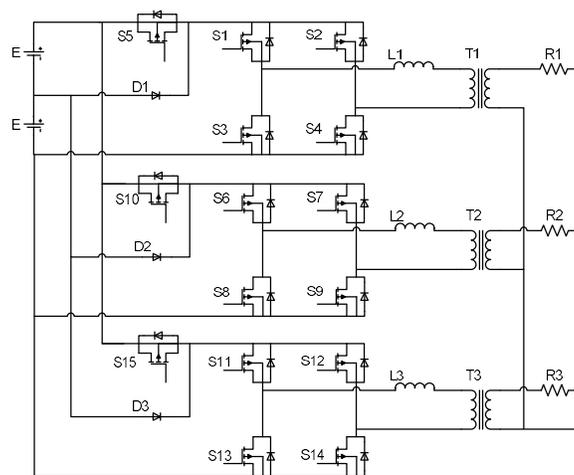
Mode operasi (1-5), polaritas pensaklaran selalu 50 Hz untuk menghasilkan setengah siklus positif dan setengah siklus negatif. Logika pensaklaran dari mode oprasi (1-5) ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Konfigurasi Pensaklaran 5-Tingkat

Pembentuk Polaritas		Pembentuk Level			Tegangan Keluaran
S2	S4	S1	S3	S5	
0	1	1	0	0	E
0	1	1	0	1	2E
1	0	1	0	0	0
0	1	0	1	0	0
1	0	0	1	1	-2E
1	0	0	1	0	-E

2.2 Inverter 5-Tingkat Tiga Fasa Empat Kawat (TFEK)

Topologi *Inverter* 5-Tingkat Tiga Fasa Empat Kawat (TFEK) ditunjukkan pada Gambar 9. *Inverter* 5-Tingkat Tiga Fasa Empat Kawat (TFEK) ini memiliki konstruksi yang terdiri dari tiga buah *inverter* 5-tingkat.



Gambar 9. Topologi *Inverter* 5-Tingkat Tiga Fasa Empat Kawat

Trafo yang digunakan memiliki dua lilitan, lilitan primer, dan lilitan sekunder. Berdasarkan jumlah perbandingan antara lilitan sekunder dan lilitan primer, dapat menentukan tegangan primer dan tegangan sekunder pada trafo. Untuk menentukan nilai lilitan dan tegangan trafo di tunjukan dengan Persamaan (6).

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} \quad (6)$$

N_1 = Jumlah Lilitan Primer

N_2 = Jumlah Lilitan Sekunder

V_p = Tegangan Primer

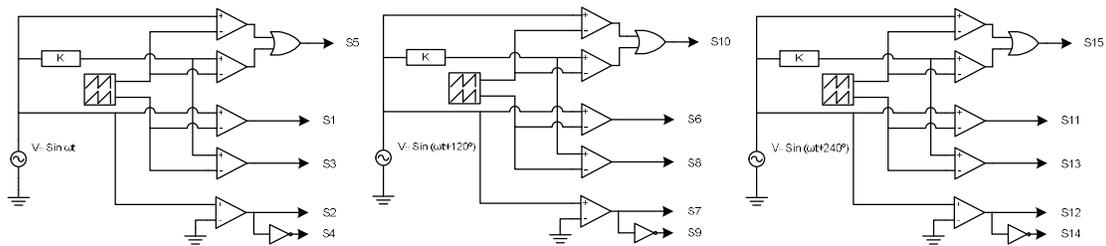
V_s = Tegangan Sekunder

Pada Gambar 9 masing – masing *inverter* memiliki arus keluaran dengan pergeseran sudut sebesar 120 derajat. Pada sisi kelauran *inverter* agar setiap fasa terhubung, menggunakan sisi primer trafo (T1, T2, dan T3) dan pada keluaran sisi sekunder trafo di hubungkan dengan rangkaian *Wye*. Sisi sekunder trafo (T1) untuk fasa pertama yaitu 0 derajat, untuk fasa kedua

yaitu 120 derajat pada sisi sekunder trafo (T2) dan untuk fasa ketiga yaitu 240 derajat pada sisi sekunder keluaran trafo (T3).

2.3 Modulasi Lebar Pulsa Digital Sinusoidal (MLPDS)

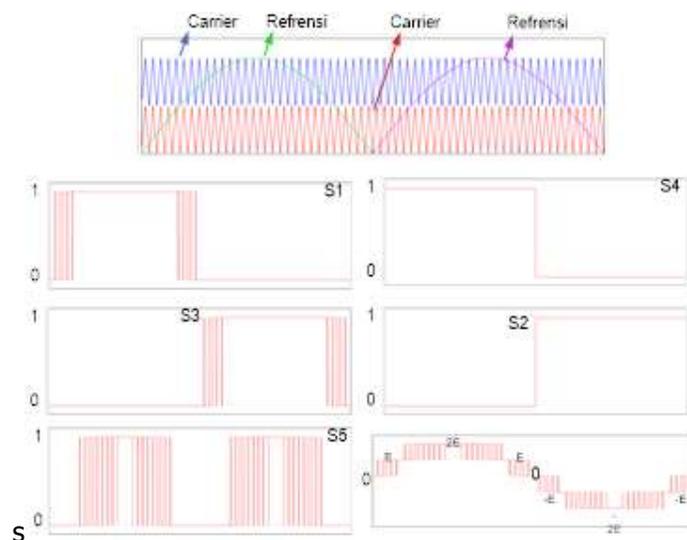
Pengendalian inverter dapat dilakukan dengan berbagai metode, pada umumnya inverter di kendalikan dengan metode *on* dan *off* sehingga arus keluaran berbentuk kotak (**Ahmad, dkk, 2019**). Agar keluaran *inverter* berbentuk sinusoidal maka di perlukan MLPDS untuk mengendalikan sakelar daya. Gambar 10 menunjukkan rangkaian komparator pembentuk MLPDS untuk *inverter* 5-Tingkat TFEK. Dengan membandingkan dua buah sinyal, yang berbentuk segitiga (*carrier*) dan sinyal referensi yang berbentuk sinusoidal maka akan menghasilkan hasil sinyal keluaran MLPDS yang akan di gunakan untuk pensaklaran sakelar daya.



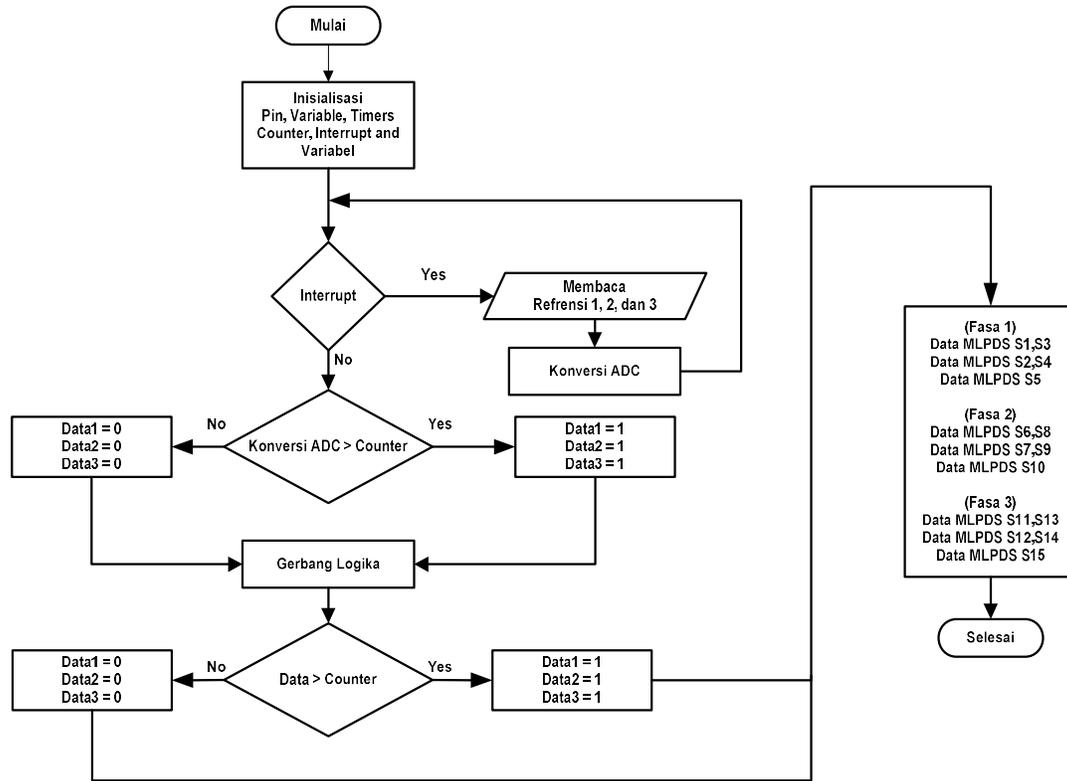
Gambar 10. Rangkaian Komparator *Inverter* 5-Tingkat TFEK

2.4 Algoritma Pemrograman

Pola pensaklaran MLPDS seperti pada Gambar 11. Pola ini menggunakan satu periode gelombang sinusoidal dengan periode 0.02 detik atau 50 Hz sebagai gelombang informasi yang akan digunakan untuk pensaklaran. Pada Gambar 12 S2 dan S4 digunakan sebagai pembentuk polaritas dan untuk mengurangi desipasi panas, karena memiliki waktu jeda disebut dengan *one-leg control*. Gambar 11 menunjukkan pola pensaklaran dari satu fasa, maka dapat dibuat suatu diagram alir pemrograman seperti Gambar 12, untuk fasa kedua dan ketiga menggunakan metode yang sama, dengan pergeseran 120°.



Gambar 11. Pola Pensaklaran MLPDS



Gambar 12. Diagram Alir Pemrograman

Pada Gambar 12 menggunakan *timer counter* untuk menjalankan fungsi *interrupt* dan pembangkit sinyal *carrier*. Konsep pembangkit sinyal *carrier* menggunakan metode up counter dan down counter. Seperti Gambar 11 menggunakan dua buah sinyal *carrier* bertingkat hanya dengan menggunakan satu buah *timer counter* dapat menghasilkan dua buah *carrier* bertingkat. Pada mikrokontroler STM32F407 menggunakan tiga pin ADC yang di fungsikan sebagai pembacaan sinyal refrensi untuk dikomparasi. Hasil konversi nilai ADC digunakan sebagai sinyal refrensi yang nantinya akan dikomparasi dengan sinyal *carrier* yang menggunakan *timer counter*. Hasil komparator yang sudah dihubungkan dengan beberapa gerbang logika seperti Gambar 10 akan digunakan untuk pensaklaran sesuai dengan sakelar daya. Pada algoritma tersebut menggunakan 15 pin yang nantinya digunakan untuk mensaklar setiap sakelar sesuai dengan alur diagram pemrograman yang akan menghasilkan sinyal keluaran inverter 5-Tingkat TFEK.

Program pada mikrokontroler tahap awal yang dilakukan adalah pendeklarasaan semua variabel sesuai dengan tipe data yang digunakan. Pengambilan data ADC dilakukan setiap 0.2ms yang disimpan pada variable tipe data *int*. Pada bagian *setup* program dilakukan inisialisasi ADC, *port*, *timer*, dan *sfinterrupt*. *Interrupt* akan aktif ketika *timer overflow* dan ketika *timer overflow* akan membaca refrensi berupa ADC. Pada bagian *looping* program nilai ADC dibandingkan dengan nilai *counter* dengan menggunakan perintah *if else*.

2.5 Kontrol *Boost* Pengisian untuk MPPT

Konverter *Boost* terintegrasi dengan MPPT untuk memaksimalkan daya keluaran PV ke baterai (Pratomo, dkk, 2019). Topologi *boost* converter ditunjukkan pada Gambar 13. Persamaan (7) menunjukkan algoritma dari MPPT.

$$\left(\frac{dP}{dV}\right)_{MPPT} = 0 \quad (7)$$

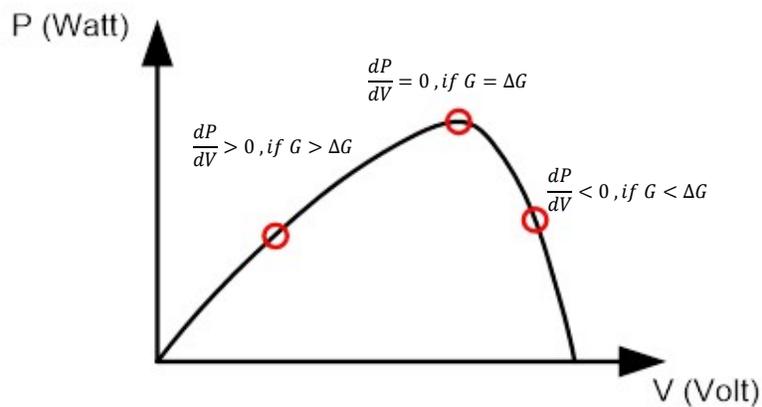
Berdasarkan pada Persamaan (7), sistem kontrol selalu berkerja seperti kondisi di bawah :

$$\frac{dP}{dV} > 0, \text{ if } G > \Delta G \quad (8)$$

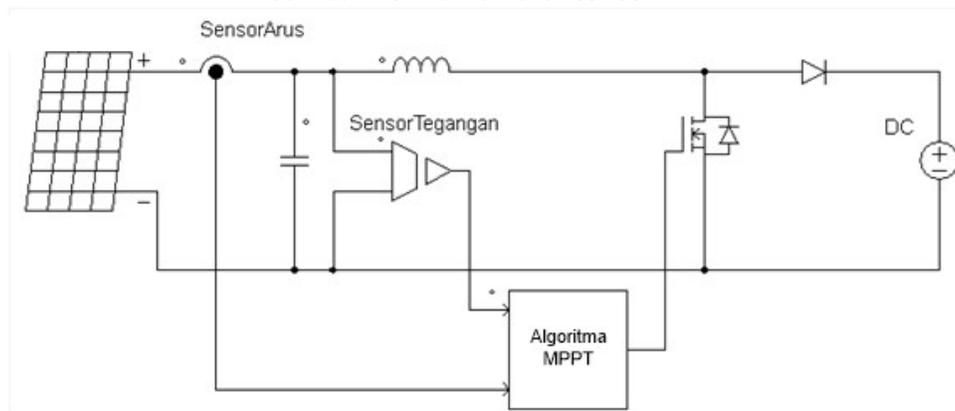
$$\frac{dP}{dV} = 0, \text{ if } G = \Delta G \quad (9)$$

$$\frac{dP}{dV} < 0, \text{ if } G < \Delta G \quad (10)$$

Gambar 13 menunjukkan kurva karakteristik PV untuk MPPT yang ditunjukkan untuk mengatur konverter yang seperti pada Gambar 14.



Gambar 13. Kurva Karakteristik PV



Gambar 14. Rangkaian *Boost* MPPT

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan pembahasan tentang mode operasi dapat diuraikan dalam bentuk simulasi komputasi dengan *software* Power Simulator (PSIM) dengan parameter seperti Tabel 2 dan dilakukan implementasi perangkat keras dengan menggunakan parameter seperti Tabel 3.

Tabel 2. Parameter Simulasi

No	Parameter	Nilai
1	Photovoltaic	240 WP
2	Baterai	74 Volt
3	Induktor	6 mH
4	Beban	24 Ohm
5	Trafo	1 : 1

Gambar 15 menunjukkan hasil simulasi daya keluaran dari konverter dengan algoritma MPPT menghasilkan daya selalu maksimal dengan menggunakan PV 120 WP. Dengan menggunakan dua buah MPPT sebagai sumber *inverter* 5-tingkat TFEK dengan tapis inductor 2mH pada tiap fasa dan beban 8 Ohm. Gambar 17 (a). Memperlihatkan tegangan keluaran inverter sebelum tapis induktor. Gambar 18 (a). memperlihatkan tegangan setelah tapis induktor dan arus keluaran inverter pada salah satu fasa. Gambar 19 (a). menunjukkan hasil simulasi dengan tegangan 61 Volt pada setiap fasa. Gambar20 (a). menunjukkan arus keluaran tiap fasa dengan nilai 7.63 Ampere. Sudut 0° ditunjukkan pada tegangan R dan arus R, sudut 120° ditunjukkan pada tegangan S dan arus S, dan Sudut 240° ditunjukkan pada tegangan T dan arus T.



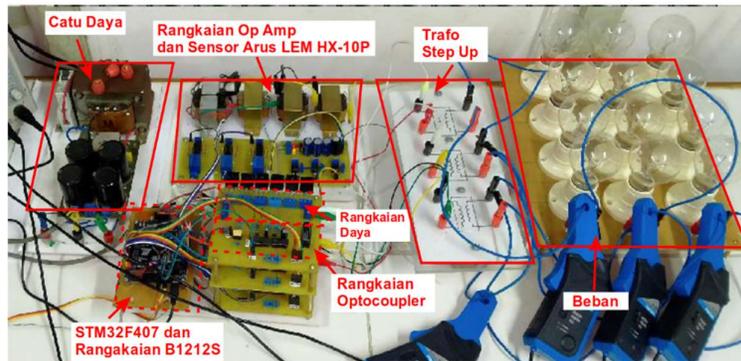
Gambar 15. Daya Keluaran PV dan MPPT

Tabel 3. Parameter Implementasi

No	Parameter	Nilai
1	Tegangan DC (E)	32 Volt
2	Tegangan DC (E)	32 Volt
3	Induktor	1 mH
4	Beban	1200 Watt
5	Saklar	IRFP 460
6	Trafo step up	1 : 6,29
7	Frekuensi Pensaklaran	5 KHz

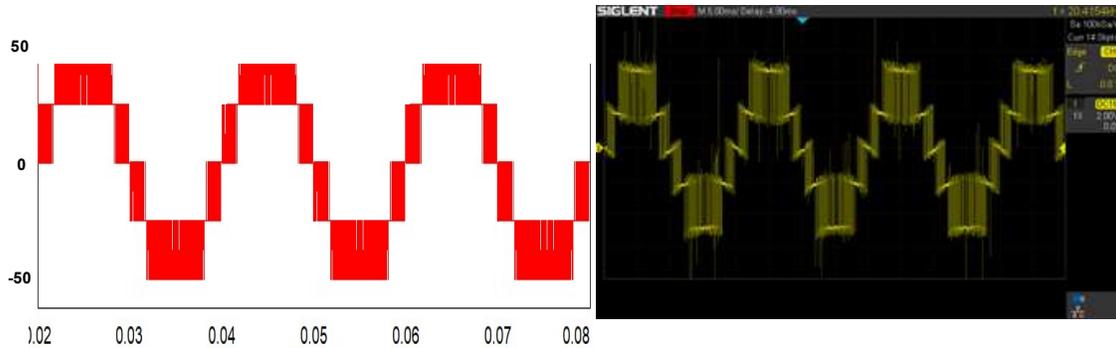
Dari parameter Tabel 3 merupakan parameter pengujian perangkat keras. Implementasi perangkat keras dilakukan guna membuktikan bahwa sistem yang dirancang dapat bekerja dengan baik. Implementasi menggunakan dua sumber *DC* sebagai pemodelan dari keluaran

MPPT. Penerapan perangkat keras dilakukan seperti Gambar 9 sedangkan Hasil penerapan perangkat keras dapat dilihat pada Gambar 16.

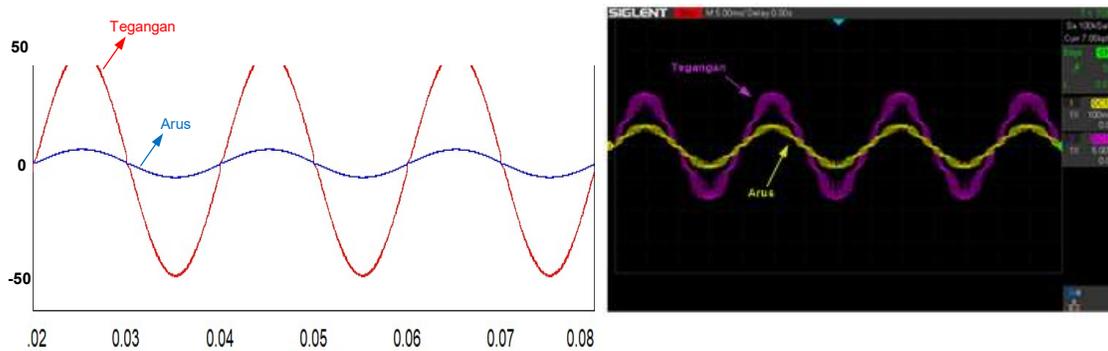


Gambar 16. Implementasi Perangkat Keras *Inverter* 5-Tingkat Tiga Fasa Empat Kawat

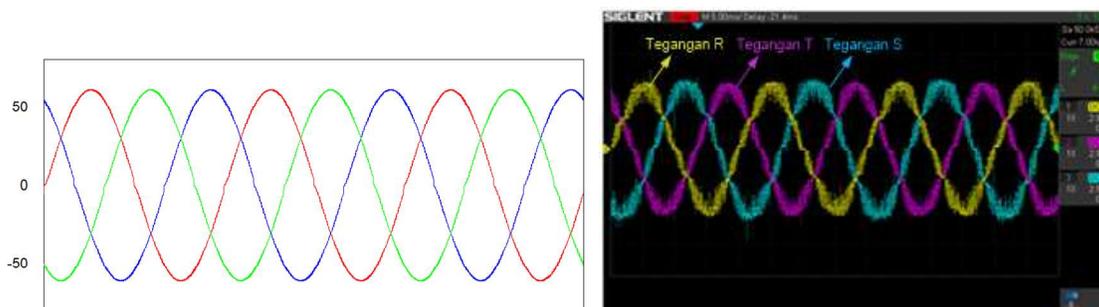
Berdasarkan diagram alir pemrograman seperti Gambar 12. Tegangan keluaran *inverter* sebelum tapis daya ditunjukkan pada Gambar 17 (b). Gambar 18 (b). menunjukkan keluaran arus dan tegangan *inverter* setelah tapis daya. Tegangan keluaran *inverter* setelah di *step-up* menggunakan trafo menghasilkan tegangan 200 VPP AC dengan beban 400 Watt. Dengan beban 400 Watt didapatkan arus sebesar 4 Ampere di setiap fasa dan arus netral yang bernilai mendekati 0 ampere. Sudut 0° ditunjukkan pada tegangan R dan arus R, sudut 120° ditunjukkan pada tegangan S dan arus S, dan Sudut 240° ditunjukkan pada tegangan T dan arus T.



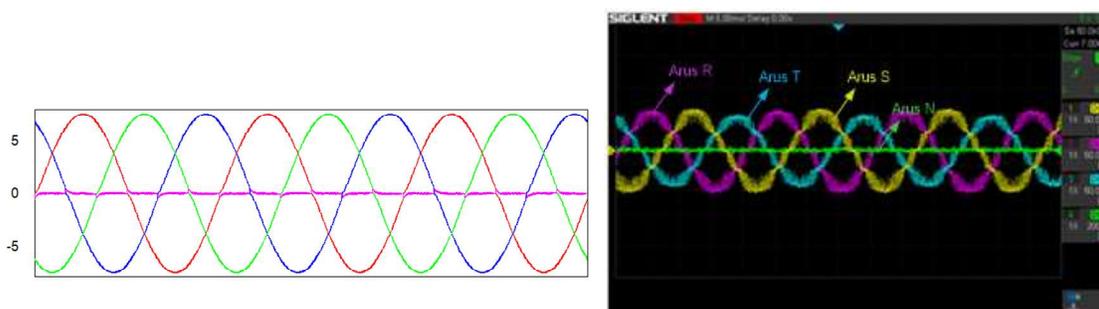
Gambar 17. Tegangan Keluaran Inverter (a) Simulasi (b) Implementasi



Gambar 18. Tegangan dan Arus Keluaran Inverter (a) Simulasi (b) Implementasi



Gambar 19. Tegangan Keluaran *Inverter* 5-TFEK (a) Simulasi (b) Implementasi



Gambar 20. Arus Keluaran *Inverter* 5-Tingkat TFEK (a) Simulasi (b) Implementasi

Tegangan keluaran *inverter* 5-Tingkat TFEK ditunjukkan seperti Gambar 19 (b). Gambar 20 (b). menunjukkan arus keluaran tiap fasa dan arus netral. Nilai THD yang tinggi menyebabkan resiko rusaknya peralatan. Berdasarkan pengujian lebih lanjut, dapat dihasilkan nilai THD tegangan sebesar 4,38%. Hasil pengujian ini sesuai dengan standart *IEEE* 519 sebesar dibawah 5%.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis dan pengujian di laboratorium, algoritma yang disarankan dapat membentuk keluaran *inverter* yang diinginkan. Dengan menggunakan MLPDS dapat menghasilkan arus dan tegangan keluaran *inverter* TFEK dengan frekuensi pensaklaran sebesar 5KHz, dan tapis daya yang kecil menghasilkan nilai THD tegangan 4,38%, menandakan sudah sesuai dengan standart *IEEE* 519. Nilai THD yang tinggi menyebabkan resiko rusaknya peralatan. Oleh karena itu *Inverter* TFEK sangat disarankan untuk catu daya mandiri. Kelebihan menggunakan algoritma ini sakelar daya yang digunakan tidak mudah panas karena memiliki jeda waktu pergantian pensaklaran, sehingga rugi-rugi daya pada *inverter* berkurang dan kinerja *inverter* optimal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti ini dibiayai oleh Kementerian Riset dan Teknologi/Badan Riset dan Inovasi Nasional Sesuai dengan Kontrak Penelitian Tahun Anggaran 2020. Dengan Nomor Adendum 010/LL6/PG/SP2H.1/AMD/PENELITIAN/2020.

DAFTAR RUJUKAN

- Aheshri, S., & Khampariya, P. (2014). Simulation of Single Phase SPWM (Unipolar) Inverter. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE)*, 1(9), 12–18.
- Ahmad, A., & Maqbool, S. (2019). Square Wave Inverters – A Performance Comparison with Pure Sine Wave Inverters. *International Journal Of Research in Electronics and Computer Engineering*, 7(1), 237–39.
- Algaddafi, A., Elnaddab, K., Al Ma'Mari A., & Esgiar, A.N. (2017). Comparing the Performance of Bipolar and Unipolar Switching Frequency to Drive DC-AC Inverter. *Proceedings of 2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2016*, (pp. 680–85).
- Ardin, F., Rahardjo, A., & Hudaya, C. (2017). Electricity Price and Subsidy Scenario for Hybrid Power Generations on Off-Grid System. *ICCREC 2017 - 2017 International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy, and Communications*, (pp. 132–38).
- IEEE Standards Association. (2014). *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*.
- Hakim, A.R., Handoyo, W.T., & Wullandari, P. (2018). An Energy and Exergy Analysis of Photovoltaic System in Bantul Regency, Indonesia Arif.
- Hamid, N. F. A. I, Jalil, M.A.A., & Mohamed, N.S.S. (2019). Design and Simulation of Single Phase Inverter Using SPWM Unipolar Technique. *Journal of Physics: Conference Series* 1432(1), 1–9.
- Neukirchner, L., & Magyar, A. (2017). Modelling a Three-Phase Current Source Inverter. *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*, 44(2), 105–11.
- Pratomo, L.H., & Tjokro, C. (2019). Hardware Implementation of an Asymmetrical 11-Level Inverter with Automatic Boost Charge Control in PV Applications. *Proceedings - 2019 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication: Industry 4.0: Retrospect, Prospect, and Challenges, iSemantic 2019*. (pp. 336–41).
- Pratomo, L.H., Wijaya, F.D., & Firmansyah, E. (2015). Capacitor Bank Voltage Equilibrium for MPPT in Single-Phase Single-Stage Capacitor Bank Voltage Equilibrium for MPPT in Single- Phase Single-Stage Five-Level Inverter for PV-Grid Application.
- Pratomo, L.H., & Riyadi, S. (2020). Desain Dan Implementasi Algoritma Korelasi Daya Dan Tegangan Di Kapasitor Untuk Maximum Power Point Trackking Pada Photovoltaic Menggunakan Arduino Uno. *Jurnal Teknik Elektro*, 12(1), 9–16.

- Rahman, T., Motakabber, S.M.A., & Ibrahimy, M.I. (2016). Design of a Switching Mode Three Phase Inverter. *Proceedings - 6th International Conference on Computer and Communication Engineering: Innovative Technologies to Serve Humanity, ICCCE 2016* (pp. 155–60).
- Sanadeera, M, & Miller, W. (2015). Residential Electricity Costs — Assessment Of Queensland Electricity Tariffs For Solar Households. *IEEE PES Asia-Pacific Power Engineering Conference (APPEC)*, (pp. 6–9).
- Tran, V.R., Nguyen, M.K., Yoo M.H., Choi, Y.O., & Cho, G.B. (2017). A Three-Phase Cascaded H-Bridge Quasi Switched Boost Inverter for Renewable Energy. *2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2017*.
- Trivedi, J., Shah, M., & Shah, J. (2016). Three Phase 150 Degree Mode of Conduction Voltage Source Inverter Using Arduino. *International Journal of Engineering Research And* 5(12), 272–75.
- Wilson, A.O.M., & Jiménez, J.B. (2016). Electricity Demand Modeling for Rural Residential Housing: A Case Study in Colombia. *2015 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America, ISGT LATAM 2015*. Colombia: IEEE. (pp. 614-618).