

PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI AWAL SOLAR INVERTER UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA OFF GRID

Levin Halim^{1,*}, Oetomo¹

¹Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Katolik Parahyangan,
Jl. Ciumbuleuit No.94 Bandung, 40141

*Email: halimlevin@unpar.ac.id

Diterima: 28 April 2019

Direvisi: 13 Agustus 2019

Disetujui: 09 Desember 2019

ABSTRAK

Solar Inverter merupakan salah satu komponen utama pada sistem PLTS agar dapat menghasilkan daya yang dapat dikonsumsi oleh beban-beban yang ada. Solar Inverter berperan untuk mengubah energi listrik DC, yang intermittent dari PLTS, menjadi AC untuk suplai ke arah beban. Hal ini menjadikan solar inverter beserta sistem kendali untuk menghasilkan AC yang diinginkan merupakan hal yang esensial pada sistem PLTS. Pada penelitian ini, akan dirancang dan dibuat sebuah teknologi tepat guna berupa solar inverter yang kemudian dibandingkan dengan inverter yang dipakai pada sistem PLTS off-grid. Solar Inverter yang dibuat akan memiliki fitur pure-sine, dan memiliki regulasi output yang baik bagaimanapun input dari solar inverter tersebut. Hasil pembuatan solar inverter tersebut akan dibandingkan dengan inverter yang ada di pasaran untuk kemudian dibandingkan performanya pada sistem PLTS Off-Grid.

Kata kunci: Inverter, PLTS Off-Grid, Solar Inverter, Konversi Energi

ABSTRACT

Solar Inverter is one of the main components in the PV Power Plant system in order to produce power that can be consumed by existing loads. Solar Inverters play a role in converting DC electrical energy, which is intermittent from PV Solar Cell, to become an AC to supply the load. This makes solar inverters and its control systems which have to produce the desired AC power is very essential for PV Power Plant system. In this study, an appropriate technology will be designed and made in the form of solar inverters.. Solar Inverters which is made will have pure-sine features, and have good output regulation no matter what input from the solar inverter. The results of the manufacture of solar inverters will be compared with the existing inverter in the market for later performance compared to the Off-Grid PV Power Plant.

Keywords: Inverter, PLTS Off-Grid, Solar Inverter, Energy Conversion

PENDAHULUAN

Kebutuhan akan energi listrik dari sumber energi primer terbarukan menjadi sangat meningkat. Energi listrik di Indonesia, terutama di Jawa-Bali pada tahun 2016 berdasarkan pada (Indonesia, 2016) dan (Diniardi, Ramadhan, Fithriyah, & Dermawan, 2018) sebagian besar energi listrik berasal dari

bahan bakar fosil yang dihasilkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Uap sekitar lebih dari 50%.

Pembangkitan energi listrik dari bahan bakar fosil akan menghasilkan gas karbon yang menjadi penyebab efek rumah kaca. Terlebih lagi, sebagian besar energi listrik di dunia, terutama yang dihasilkan dari energi

nuklir. Sejak terjadinya kecelakaan reaktor nuklir di Fukushima, Jepang, banyak proyek-proyek pembangkit listrik tenaga nuklir yang dihentikan atau dimatikan lebih awal dari jadwal COD (Commercial Operation Date) ketika PLTN tersebut masih dalam tahap konstruksi. Salah satu dari sumber energi terbarukan yang paling mudah untuk dikonversikan menjadi energi listrik adalah sumber energi dari tenaga surya dengan menggunakan sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS).

Matahari merupakan sumber energi yang ramah lingkungan dan terbarukan. Jumlah radiasi sinar matahari yang dihasilkan oleh matahari sangatlah besar sehingga menjadikan PLTS menjadi alternatif sumber energi terbarukan yang sangat menjanjikan.

Namun, sebagai pembangkit listrik yang bersih dan terbarukan, listrik yang dihasilkan oleh PLTS berlimpah pada siang hari ketika beban listrik yang dibutuhkan tidak terlalu besar.

PLTS memanfaatkan teknologi fotovoltaik pada solar cell yang mengkonversikan radiasi sinar matahari dan temperatur menjadi arus listrik. Namun, energi listrik yang dihasilkan oleh Sistem PLTS tersebut membutuhkan sebuah sistem kendali dan sebuah solar inverter untuk dapat menghasilkan arus listrik yang dapat dipakai pada beban-beban listrik yang ada (beban Alternating Current – AC).

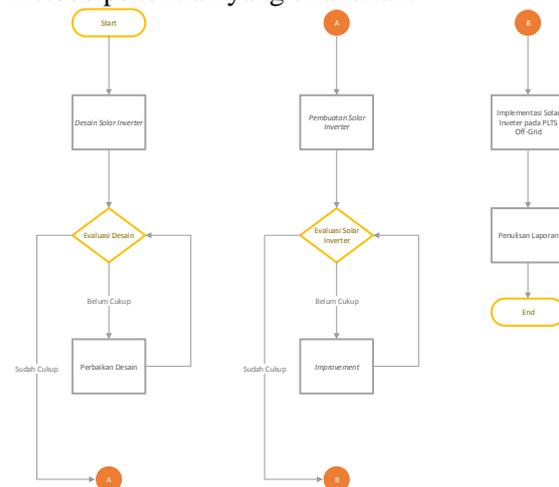
Solar Inverter merupakan salah satu komponen utama pada sistem PLTS agar dapat menghasilkan daya yang dapat dikonsumsi oleh beban-beban yang ada. Solar Inverter berperan untuk mengubah energi listrik DC, yang intermittent dari PLTS, menjadi AC untuk suplai ke arah beban. Hal ini menjadikan solar inverter beserta sistem kendali untuk menghasilkan AC yang diinginkan merupakan hal yang esensial pada sistem PLTS. Teknologi Solar Inverter telah dibahas pada beberapa referensi (Fujita, 2010; González, Gubía, López, & Marroyo, 2008; L. Hassaine, Olias, Quintero, & Haddadi, 2009; M. Fortunato, Giustiniani, Petrone, Spagnuolo, & Vitelli, 2008; Myrzik & Calais, 2003; Razi & Monfared, 2016; S. B. Kjær, 2005) dan (Schauder, 2012; Shimizu, Hashimoto, & Kimura, 2003).

Pada penelitian ini, akan dirancang dan dibuat sebuah teknologi tepat guna berupa solar inverter yang kemudian dibandingkan dengan inverter yang dipakai pada sistem PLTS off-

grid seperti yang telah didesain pada (Halim & Naa, 2016). Solar Inverter yang dibuat akan memiliki fitur pure-sine, dan memiliki regulasi output yang baik bagaimanapun input dari solar inverter tersebut. Ukuran kuantitatif daripada penelitian ini merupakan terbuatnya sebuah teknologi tepat guna berupa solar inverter yang dapat diaplikasikan pada sistem PLTS off-grid. Penelitian akan menghasilkan capaian teknologi tepat guna dan makalah untuk jurnal nasional tidak terakreditasi.

METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini akan dilakukan desain, pembuatan, serta implementasi nyata solar inverter pada sistem PLTS Off-grid. Sehingga Gambar 1 merupakan diagram alir untuk metode penelitian yang dilakukan.



Gambar 1. Diagram Alir Metodologi Penelitian

Desain Solar Inverter

Solar Inverter yang akan diimplementasikan memiliki fungsi tertentu yaitu mengkonversi tegangan DC yang bervariasi akibat keluaran dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya yang *intermittent*. Untuk dapat dengan mudah mensuplai beban yang ada (umumnya beban AC), diperlukan suatu perangkat *solar inverter* khusus yang dapat mengkonversi tegangan DC yang bervariasi, menjadi tegangan AC yang terregulasi dengan baik.

Inverter di-desain secara khusus untuk aplikasi pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya *Off-Grid* dan akan memiliki fitur sebagai berikut:

- Pure Sine-Wave Output
Inverter akan menghasilkan tegangan output yang murni sinusoidal. Hal ini

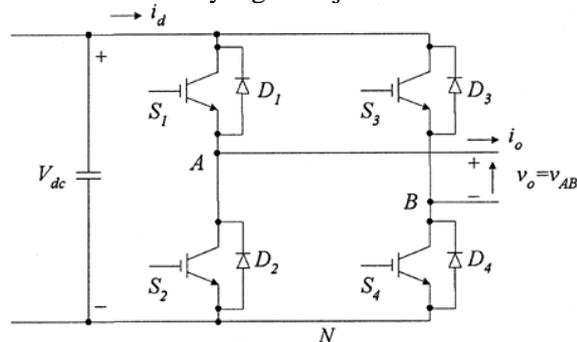
dilakukan agar *output* dari *inverter* tersebut tidak merusak peralatan yang cukup sensitif terhadap bentuk gelombang dari tegangan-nya (seperti motor listrik).

- **Regulasi Input**
Hal ini dilakukan agar mendapatkan tegangan AC 220 V pada sisi output berapapun *inverter* ini dibebani serta berapapun tegangan input yang dihasilkan

Pembuatan Solar Inverter untuk PLTS Off-Grid

Solar Inverter kemudian akan dibuat secara khusus untuk sebuah sistem PLTS *off-grid* yang telah ada. Pembuatan dilakukan dengan konfigurasi sistem kendali yang telah di-desain sebelumnya agar fitur-fitur yang diinginkan untuk *solar inverter* tersebut tercapai dengan baik.

Topologi dari *solar inverter* yang akan dibuat berdasarkan pada topologi umum yang dari inverter tersebut yang ditunjukkan Gambar 1.



Gambar 1. Topologi Inverter

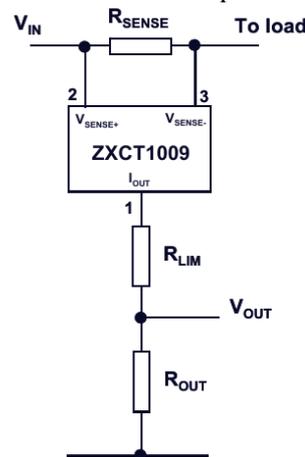
Solar inverter yang merupakan aplikasi khusus *inverter* pada PLTS yang akan dirancang, dilakukan dengan menggunakan topologi umum inverter tersebut dan dimodifikasi sedemikian rupa agar dapat mendapatkan fitur-fitur yang diinginkan sesuai dengan hasil desain dari *solar inverter* yang dilakukan sebelumnya.

Evaluasi terhadap Solar Inverter

Solar inverter yang telah dibuat berdasarkan desain yang telah dilakukan sebelumnya kemudian dievaluasi. Evaluasi terhadap *solar inverter* tersebut dilakukan dengan mengimplementasikan *solar inverter* secara nyata pada PLTS *Off-Grid* yang sudah terpasang dengan beban *dummy*.

Solar inverter dapat disebut baik bila *solar inverter* ini dapat mengeluarkan tegangan AC 220 V berapapun input tegangan dari *Solar Panel* yang dipasangkan pada PLTS *Off-Grid* tersebut.

Selain itu, evaluasi dilakukan dengan membandingkan efisiensi daya *inverter* beserta *solar charge controller* dengan *solar inverter* yang telah dibuat. *Solar inverter* yang dibuat direncanakan akan menggantikan *solar charge controller* dan *inverter* pada PLTS *Off-Grid*.



Gambar 2. Rangkaian Pengukur Arus (Incorporated, 2011)

Pengukuran daya dilakukan dengan mengukur arus dan tegangan input dan output dari modul-modul yang dibandingkan. Sedangkan untuk dapat mengukur daya keluaran dari *inverter* diperlukan beban *dummy*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

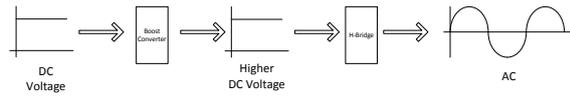
Penelitian ini menghasilkan sebuah teknologi tepat guna berupa *inverter* yang dapat dipakai untuk mendayai beban AC. Oleh karena itu, secara spesifik, hasil dari penelitian ini merupakan teknologi tepat guna dalam bentuk rangkaian-rangkaian listrik untuk *inverter* tersebut.

Hasil penelitian dicapai dengan beberapa tahap berikut:

1. Desain Struktur
2. Pemodelan
3. Simulasi
4. Implementasi

Desain Struktur

Secara garis besar, rancangan desain pada struktur konfigurasi daripada *inverter* yang akan dibuat dapat dilihat pada Gambar 3.



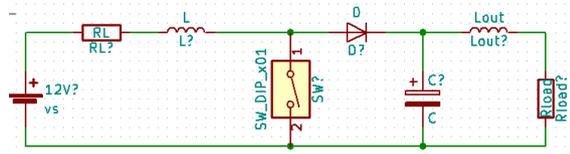
Gambar 3. Desain Solar Inverter

Komponen utama dari *inverter* tersebut adalah *Boost Converter* dan *H-Bridge*. *Boost Converter* merupakan sebuah perangkat elektronik yang mengubah tegangan DC 12 Volt, menjadi tegangan DC yang lebih tinggi (sekitar 310 Volt). Sedangkan *H-Bridge* berfungsi untuk menjadikan tegangan DC tersebut menjadi bolak-balik.

State-of-the-art daripada desain demikian terletak pada *Boost Converter*. *Boost Converter* tersebut dikendalikan sedemikian rupa sehingga yang dihasilkan adalah tegangan DC yang bergunung-gunung (seperti sinyal *sine*) namun tidak bolak-balik. Oleh karena itu, *H-Bridge* disini hanya berperan untuk membolak-balikan tegangan yang bergunung-gunung tersebut menjadi AC yang bolak-balik.

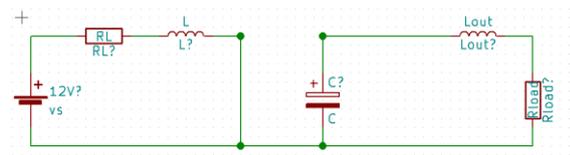
Pemodelan

Pemodelan dilakukan dengan menggunakan melakukan penurunan rumus *Boost Converter* berdasarkan rangkaian dasar *Boost Converter* tersebut yang dapat dilihat pada Gambar 5.

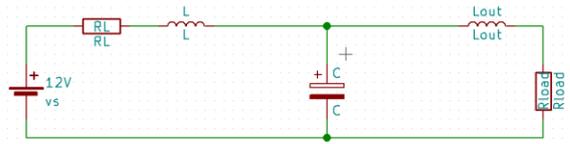


Gambar 4. Rangkaian Boost Converter

Dari rangkaian tersebut, dapat dilihat bahwa sifat rangkaian akan berubah bila sakelar SW = ON dan SW = OFF. Oleh karena itu, rangkaian *Boost Converter* akan menjadi seperti pada Gambar 5 saat SW = ON dan Gambar 6 saat SW = OFF.



Gambar 5. Rangkaian Boost Converter SW=ON



Gambar 6. Rangkaian Boost Converter SW=OFF

Pemodelan dilakukan terhadap kedua rangkaian *Boost Converter* saat SW=ON dan SW=OFF dengan memanfaatkan *state space* sebagai sarana untuk memodelkan rangkaian tersebut.

Pada saat SW = ON, dengan memanfaatkan *loop iL*, didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$v_s = v_{R_L} + v_L$$

$$v_s = R_L i_L + L \frac{di_L}{dt}$$

$$L \frac{di_L}{dt} = v_s - R_L i_L$$

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{R_L}{L} i_L + \frac{1}{L} v_s$$

Dengan memanfaatkan *loop iLout*, didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$0 = v_{L_{out}} + v_c + v_{out}$$

$$-v_{L_{out}} - v_{out} = v_c$$

$$v_c = -L_{out} \frac{di_{L_{out}}}{dt} - R_{load} i_{L_{out}}$$

Kedua persamaan *loop iL* dan *loop iLout* disubstitusi, sehingga

$$i_{L_{out}} = i_C = C \frac{dv_c}{dt}$$

$$i_{L_{out}} = C \frac{d}{dt} \left[-L_{out} \frac{di_{L_{out}}}{dt} - R_{load} i_{L_{out}} \right]$$

$$i_{L_{out}} = -CL_{out} \frac{d^2 i_{L_{out}}}{dt^2} - CR_{load} \frac{di_{L_{out}}}{dt}$$

$$CL_{out} \frac{d^2 i_{L_{out}}}{dt^2} = -i_{L_{out}} - CR_{load} \frac{di_{L_{out}}}{dt}$$

$$\frac{d^2 i_{L_{out}}}{dt^2} = -\frac{1}{CL_{out}} i_{L_{out}} - \frac{R_{load}}{L_{out}} \frac{di_{L_{out}}}{dt}$$

dan

$$v_s = v_{R_L} + v_L$$

$$v_s = R_L i_L + L \frac{di_L}{dt}$$

$$L \frac{di_L}{dt} = v_s - R_L i_L$$

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{R_L}{L} i_L + \frac{1}{L} v_s$$

State Space untuk rangkaian *Boost Converter* SW=ON:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{L_{out}} \\ i_{L_{out}} \\ i_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{1}{CL_{out}} & -\frac{R_{load}}{L_{out}} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_L}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L_{out}} \\ i_{L_{out}} \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} v_s$$

Pada saat SW = OFF, dengan memanfaatkan loop i_{Lout} , didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$i_{Lout} = i_L + i_C$$

$$i_{Lout} = i_L + C \frac{dV_c}{dt}$$

dan

$$0 = v_{Lout} + v_c + v_{out}$$

$$-v_{Lout} - v_{out} = v_c$$

$$v_c = -L_{out} \frac{di_{Lout}}{dt} - R_{load} i_{Lout}$$

Kedua persamaan tersebut disubstitusi, sehingga menghasilkan:

$$i_{Lout} = i_L + i_C$$

$$i_{Lout} = i_L + C \frac{d}{dt} \left[-L_{out} \frac{di_{Lout}}{dt} - R_{load} i_{Lout} \right]$$

$$i_{Lout} = i_L - CL_{out} \frac{d^2 i_{Lout}}{dt^2} - CR_{load} \frac{di_{Lout}}{dt}$$

$$CL_{out} \frac{d^2 i_{Lout}}{dt^2} = -i_{Lout} + i_L - CR_{load} \frac{di_{Lout}}{dt}$$

$$\frac{d^2 i_{Lout}}{dt^2} = -\frac{1}{L_{out}C} i_{Lout} + \frac{1}{L_{out}C} i_L - \frac{R_{load}}{L_{out}} \frac{di_{Lout}}{dt}$$

Dengan memanfaatkan loop i_L dan substitusi dengan persamaan diatas, didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$v_s - v_c = v_{R_L} + v_L$$

$$v_s = R_L i_L + L \frac{di_L}{dt} + v_c$$

$$L \frac{di_L}{dt} = v_s - R_L i_L - v_c$$

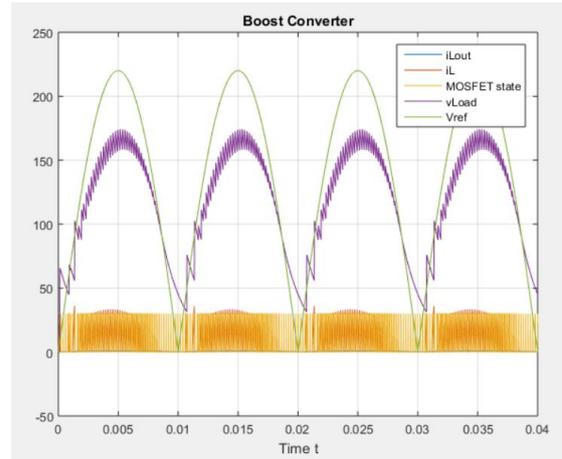
$$L \frac{di_L}{dt} = v_s - R_L i_L - \left(L_{out} \frac{di_{Lout}}{dt} + R_{load} i_{Lout} \right)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} v_s - \frac{R_L}{L} i_L - \frac{L_{out}}{L} \frac{di_{Lout}}{dt} - \frac{R_{load}}{L} i_{Lout}$$

State Space untuk rangkaian Boost Converter SW=OFF:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{Lout} \\ i_{Lout} \\ i_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{1}{CL_{out}} & -\frac{R_{load}}{L_{out}} & \frac{1}{CL_{out}} \\ -\frac{R_{load}}{L} & -\frac{L_{out}}{L} & -\frac{R_L}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Lout} \\ i_{Lout} \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} v_s$$

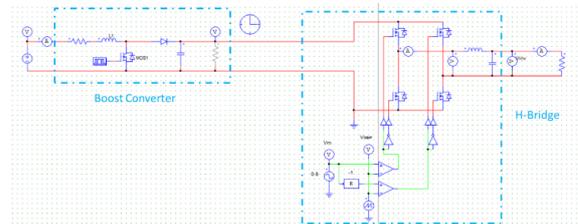
Pemodelan tersebut diverifikasi dengan memanfaatkan perangkat lunak MATLAB. Dengan kendali yang cukup sederhana, pemodelan tersebut menghasilkan keluaran Boost Converter yang cukup baik seperti yang terlihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Verifikasi Pemodelan Boost Converter

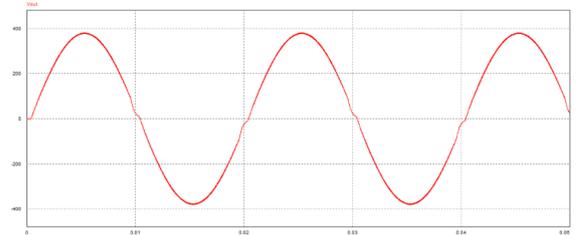
Simulasi

Berdasarkan hasil pemodelan yang telah dibahas sebelumnya, inverter yang telah didesain kemudian disimulasikan dengan memanfaatkan perangkat lunak PSIM untuk mendapatkan hasil arus bolak-balik yang diinginkan. Rangkaian untuk simulasi dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Rangkaian Simulasi Inverter

Hasil simulasi untuk rangkaian tersebut cukup baik, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 9 dimana sudah menghasilkan tegangan bolak-balik AC.

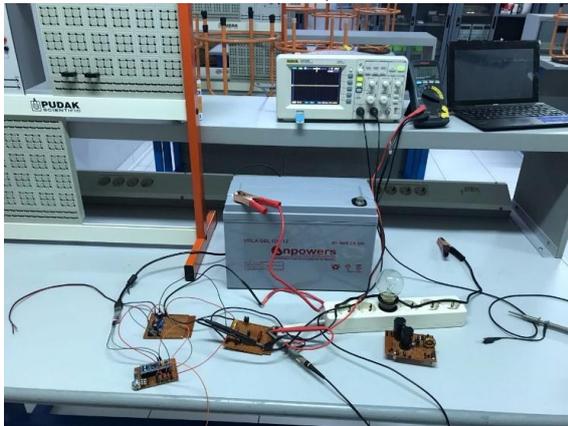


Gambar 9. Hasil Simulasi Inverter

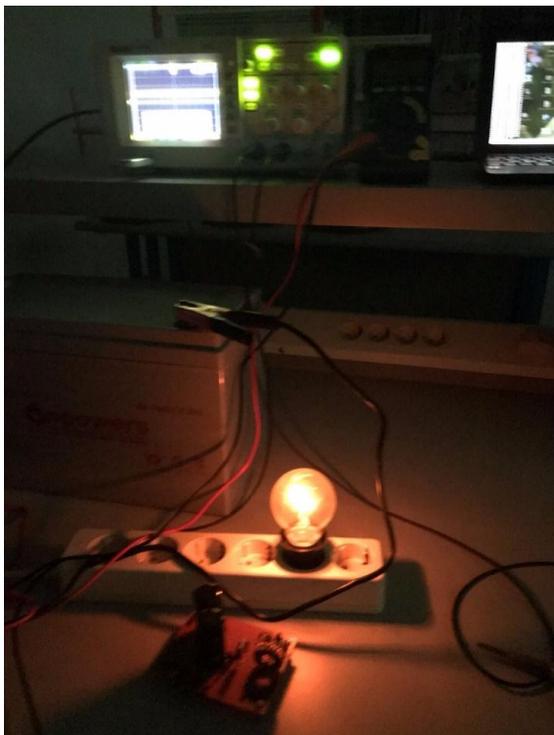
Implementasi Awal

Seluruh rangkaian tersebut kemudian diimplementasikan dengan memanfaatkan input DC dari baterai accumulator VLRA 12 Volt untuk mendayai lampu pijar 100 Watt.

Hasil daripada implementasi tersebut cukup baik untuk tahap awal (diperlihatkan pada Gambar 10 dan Gambar 11).



Gambar 10. Rangkaian Implementasi Inverter



Gambar 11. Hasil Implementasi Inverter

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Desain *Inverter* mempunyai struktur konfigurasi yang memanfaatkan dua jenis perangkat elektronik, yaitu *Boost Converter* dan *H-Bridge*
2. *Boost Converter* dikendalikan sedemikian rupa sehingga

menghasilkan tegangan DC yang berbentuk gunung-gunung.

3. *H-Bridge* hanya berperan sebagai pembolak-balik daripada tegangan berbentuk gunung-gunung tersebut.
4. Hasil Pemodelan dan Simulasi menunjukkan bahwa dengan memanfaatkan *Boost Converter* dan *H-Bridge*, *Inverter* sudah dapat menghasilkan tegangan AC bolak-balik.
5. Hasil Implementasi menunjukkan bahwa *inveter* sudah mampu menyalakan lampu pijar 100 Watt dengan baik.

Selain itu, terdapat beberapa saran sebagai berikut:

1. Rangkaian Implementasi diberikan *packaging* yang baik agar dapat dimanfaatkan masyarakat dengan mudah.
2. Melakukan implementasi pada sistem PLTS *Off-Grid* yang sesungguhnya.
3. Merancang dan melakukan desain serta implementasi *Grid-Tied Solar Inverter* sebagai keberlanjutan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Diniardi, E., Ramadhan, A. I., Fithriyah, N. H., & Dermawan, E. (2018). ANALISIS DAYA PIEZOELEKTRIK MODEL HYBRID SOLAR CELL-, *10*(2), 139–146.
- Fujita, H. (2010). A high-efficiency solar power conditioner using a zigzag-connected chopper converter. In *2010 Int. Power Electron. Conf.* (pp. 1681–1687).
- González, R., Gubía, E., López, J., & Marroyo, L. (2008). Transformerless single-phase multilevel-based photovoltaic inverter. *IEEE Trans. Ind. Electron*, *55*(7), 2694–2702.
- Halim, L., & Naa, C. F. (2016). *Sistem Pendayaan Energi Listrik pada Rumah Kaca dengan Menggunakan Pembangkit Listrik Tenaga Surya*. LPPM UNPAR.
- Incorporated, D. (2011). ZXCT1009.
- Indonesia, E. (2016). *RUPTL PLN 2016 - 2025*.
- L. Hassaine, Olias, E., Quintero, J., & Haddadi, M. (2009). Digital power factor control and reactive power regulation for grid-connected photovoltaic inverter.

- Renew. Energy*, 34(1), 315–321.
- M. Fortunato, Giustiniani, A., Petrone, G., Spagnuolo, G., & Vitelli, M. (2008). Maximum power point tracking in a one-cycle-controlled single-stage photovoltaic inverter. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 55(7), 2684–2693.
- Myrzik, J. M. A., & Calais, M. (2003). String and module integrated inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems - A review. In *2003 IEEE Bol. PowerTech* (pp. 430–437).
- Razi, R., & Monfared, M. (2016). Multi-loop control of stand-alone inverters with minimum number of sensors. *IET Power Electron.*, 9(12), 2425–2433.
- S. B. Kjær. (2005). Design and Control of an Inverter for Photovoltaic Applications.
- Schauder, C. (2012). Impact of FERC 661-A and IEEE 1547 on photovoltaic inverter design. In *IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib.*
- Shimizu, T., Hashimoto, O., & Kimura, G. (2003). A novel high-performance utility-interactive photovoltaic inverter system. *IEEE Trans. Power Electron.*, 18(2), 704–711.

