

Pemodelan Maximum Power Point Tracking pada Inverter Hybrid pada Sistem Pengisian Baterai VRLA 12 V 100 Ah dari Sumber PV

I M. A. Nrartha^{a,*}, I M. Ginarsa^b, A. B. Muljono^c, A. Zainuddin^d, Sultan^e, A. Hasibuan^f

^{a,b,c,d,e}Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Mataram, Indonesia

^fDepartment of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Malikussaleh, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 May 2025
Received in revised form
9 June 2025
Accepted 11 June 2024
Available online 30 June 2025

Keywords:

Off-grid Hybrid Inverters
Maximum Power Point Tracking
VRLA battery charging

ABSTRACT

The hybrid inverter is capable of managing various energy sources such as PV and the grid. One of the modes of the hybrid inverter is the battery charging mode using the Maximum Power Point Tracking (MPPT) technique. This technique aims to maximize the power efficiency generated by PV by dynamically adjusting to the maximum power point. This study aims to develop a battery charging system model for a 12 V 100 Ah Valve Regulated Lead Acid (VRLA) battery using Simulink MATLAB. The charging system consists of a DC/DC converter within the hybrid inverter, controlled by the MPPT technique for efficient charging. The VRLA battery charging process involves three stages: constant current, constant voltage, and float charging. The MPPT technique is applied during the constant current stage to utilize the maximum output power from the PV. The charging system model is compared with the battery charging mode of commercially available off-grid hybrid inverters for validation. The results show that the MPPT-based hybrid inverter charging model was successfully developed, and the application of the MPPT technique during the constant current stage improved the PV power tracking efficiency. Validation of the MPPT performance in the off-grid hybrid inverter's battery charging mode showed consistency with the simulation results. This study can be used for simulating the latest MPPT methods and intelligent techniques for VRLA battery charging.

1 Pendahuluan

Energi surya sangat berlimpah di Indonesia. Semua wilayah di Indonesia mendapatkan sinar matahari yang selalu ada sepanjang tahun. Berdasarkan Outlook energi Indonesia, potensi energi surya di Indonesia sekitar 207.8 GWp [1]. Potensi yang besar ini mendorong pemerintah Indonesia untuk mengembangkan energi surya sebagai salah satu energi listrik yang bersumber dari energi terbarukan. Kontribusi energi surya akan meningkat dengan pesat dari 0,05% pada tahun 2020 menjadi 24% pada tahun 2030 [2].

Energi surya dapat dikonversi menjadi energi listrik untuk dapat disimpan di baterai atau langsung dimanfaatkan dengan cara tersambung langsung ke jaringan listrik (on-grid). Penyambungan energi listrik dari energi surya ke jaringan listrik diharuskan mengikuti regulasi yang dikeluarkan pemerintah Indonesia karena keberadaan energi surya bersifat *intermittent* yang tiba-tiba bisa hilang akibat perubahan cuaca yang mendadak. Keberadaan yang bersifat *intermittent* mengakibatkan beban jaringan listrik yang tidak stabil. Regulasi pemerintah Indonesia yang selalu berubah untuk instalasi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) *on-grid* dari peraturan seperti pada [3] persyaratan penyambungan untuk operasi paralel pembangkit dengan berbagai sumber energi dan sudah dicabut sebagian dengan peraturan PLTS atap pada [4]. Perubahan terakhir untuk sistem PLTS *on-grid* untuk kepentingan umum tertuang pada [5] dengan memperhatikan kuota dan kemampuan jaringan dimana PLTS tersebut tersambung.

Kesulitan dalam pengembangan PLTS *on-grid* mendorong pengembangan PLTS *off-grid* yang dapat memberikan manfaat yang lebih besar dan tidak mengganggu sistem kelistrikan yang ada. Energi listrik dari PLTS *off-grid* banyak dimanfaatkan untuk energi listrik bersih mandiri seperti pada pertanian hidroponik [6], pertanian pada kegiatan penyeprotan, pemupukan, penerangan, pendinginan, pengairan, pengendalian PH, dan pengatur suhu [7], sebagai energi alternatif untuk mengurangi pemakaian energi listrik dari penyedia daya dengan kendali *Automatic Transfer Switch* (ATS) [8]. Berangkat dari kenyataan tersebut, berkembang perangkat-perangkat inverter *off-grid* dan hibrida *off-grid* yang dapat memenuhi kebutuhan listrik konsumen. Jenis inverter hibrida *off-grid* adalah inverter *off-grid* yang bisa berfungsi sebagai ATS, sehingga operasi antara sistem AC dari penyedia daya dan sumber energi listrik dari PLTS bekerja secara terpisah. Salah satu mode operasi dari sistem PLTS yang menggunakan inverter hibrida *off-grid* adalah

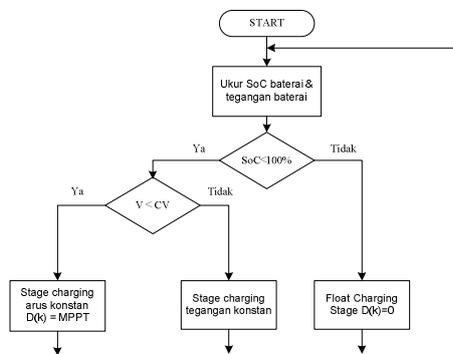
mode operasi PV baterai. Pada mode ini PLTS (modul surya) secara mandiri mengisi baterai. Proses pengisian baterai dari sumber modul PV dapat optimal apabila dalam proses pengisian menggunakan teknik smart charging. Untuk aplikasi smart charging konverter DC ke DC (sumber DC dari modul PV ke baterai) dibutuhkan teknik tracking untuk mendapatkan daya maksimum dari modul PLTS, hal ini karena sel surya bersifat non linear. Teknik tracking pada operasi PLTS disebut dengan teknik Maximum Power Point Tracking (MPPT).

Saat ini perangkat inverter hibrida *off-grid* sudah banyak dijual di pasaran dengan berbagai merek dan kunggulan yang ditawarkan. Salah satu keunggulan yang ditawarkan adalah teknik MPPT yang digunakan untuk mengoptimalkan daya yang dihasilkan modul PV. Penelitian ini bertujuan memodelkan konverter daya DC ke DC yang digunakan pada inverter hibrida *off-grid* yang tersedia di pasaran. Hasil model dari konverter DC ke DC dapat digunakan untuk pengembangan teknik MPPT menggunakan teknik kecerdasan dan optimasi yang selalu berkembang sehingga potensi energi listrik yang begitu besar dari sumber energi surya di Indonesia dapat dioptimalkan. Agar pembahasan hasil penelitian ini lebih komprehensif, artikel ini dibagi dalam beberapa bagian yaitu pendahuluan yang berisi besarnya potensi energi surya di Indonesia, batasan pengembangan pembangkitan energi tersebut akibat sifat *intermittent* dari energi surya dan pentingnya pemodelan sistem sehingga energi surya yang begitu besar dapat dimanfaatkan optimal. Selanjutnya studi literatur yang berisi teori *smart charging*, teknik MPPT konvensional yaitu teknik *Perturb and Observe* (P&O) yang diaplikasikan pada perangkat yang dijual dipasaran, dan konsep desain konverter buck beserta perumusan efisiensi dari konverter tersebut. Dilanjutkan dengan metode penelitian, hasil dan pembahasan, dan diakhiri dengan kesimpulan.

2 Studi Literatur

Inverter hibrida merupakan perangkat yang dikembangkan untuk konversi energi listrik Direct Current (DC) ke Alternating Current (AC) dari berbagai sumber energi listrik yang menghasilkan sumber DC. Konversi ke AC dibutuhkan untuk melayani beban-beban pada sistem kelistrikan. Salah satu inverter hibrida yang dikembangkan adalah inverter hibrida *off-grid*. Inverter ini membutuhkan sumber baterai untuk beroperasi. Inverter ini digunakan sebagai konverter dari sumber energi listrik dari grid (penyedia daya listrik seperti PT. PLN (Persero)), modul PV dan baterai.

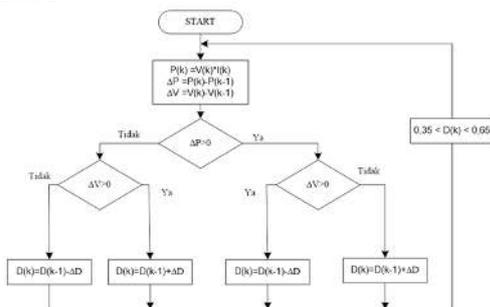
Mode operasi dari inverter hibrida *off-grid* dibagi menjadi tiga yaitu model penyedia listrik AC, PV Baterai (sumber energi dari modul PV dan baterai), dan baterai. Masing-masing model ini bekerja secara terpisah sesuai dengan seting yang diberikan. Model PV baterai adalah mode yang mempunyai teknologi lebih untuk mengoptimalkan pemanfaatan energi surya menjadi energi listrik DC. Pada mode ini baterai diisi oleh modul PV dengan teknik *Pulse Width Modulation* (PWM) atau Maximum Power Point Tracking (MPPT). Pada sistem pengisian baterai pada inverter hibrida *off-grid*, sering kali teknik MPPT menjadi solusi yang optimal untuk berbagai cuaca yang bervariasi. Selain pada inverter hibrida *off-grid* teknik MPPT juga diterapkan pada sistem Solar Charge Controller (SCC). SCC tipe MPPT mampu mengisi baterai lebih cepat dengan arus pengisian yang lebih tinggi dari pada SCC tipe PWM [9]. Pada pengisian baterai cerdas dibagi dalam 3 stage yaitu arus konstan, tegangan konstan dan floating charging [10]. Dalam perkembangannya berdasarkan studi literatur yang dilakukan pada [11] smart charging memberikan banyak keuntungan baik dari segi waktu dan biaya pengisian pada baterai. Pada stage pengisian arus konstan, teknik MPPT dapat diterapkan khususnya pada sistem baterai yang disuplai oleh modul surya. Pada tahap ini MPPT akan melacak daya maksimum dari modul PV untuk dapat memberikan arus pengisian maksimum. Teknik pengisian tiga stage dengan stage arus konstan sebagai pengisian pada mode MPPT adalah ditunjukkan Gambar 1 [12].



Gambar 1. Diagram alir tiga stage pengisian baterai

Gambar 1 menunjukkan pengisian floating (floating charging) terjadi apabila State of Charge (SoC) baterai sudah 100%. Apabila belum tegangan baterai akan dicek, apakah tegangan baterai lebih kecil dari tegangan pengisian konstan, apabila ya maka teknik MPPT untuk mendapatkan daya maksimum dari panel surya diterapkan pada proses pengisian. Apabila tidak maka pengisian baterai dijaga pada tegangan konstan sampai diperoleh SoC 100%.

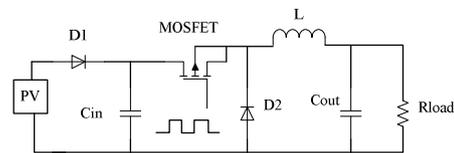
Teknik MPPT telah banyak dikembangkan dari teknik konvensional maupun teknik soft computing dan kecerdasan buatan untuk mengoptimalkan daya output modul PV karena berbagai kondisi cuaca, keestkaman lingkungan dan bayangan langsung atau tidak langsung yang diterima modul PV. Salah satu teknik MPPT yang umum dan sudah banyak diterapkan pada peralatan SCC maupun inverter hibrida adalah MPPT Perturb and Observe (P&O). Algoritma MPPT P&O salah satu teknik tracking online untuk madapatkan daya maksimum dari modul PV [13] dan digunakan sebagai rujukan atau pembandingan untuk pengembangan teknik MPPT lainnya seperti pada [14], [15], [16] dan [17]. Teknik MPPT metoda P&O dijelaskan pada Gambar 2.



Gambar 2. Algoritma MPPT P&O

Teknik MPPT P&O sederhana dan mudah diimplementasikan dalam perangkat keras maupun perangkat lunak. Berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus dapat dihitung daya output dari PV. Perubahan daya output digunakan untuk mengontrol duty cycle (D) pada konverter buck untuk menghasilkan daya maksimum pada iradiasi tertentu sehingga arus pengisian baterai maksimum (stage pengisian baterai pada arus konstan).

Inverter hibrida pada model PV baterai menggunakan konverter DC ke DC jenis buck untuk suplai daya dari modul PV ke baterai. Konverter DC ke DC jenis buck ditunjukkan pada Gambar 3. Pada sisi input konverter dihubungkan ke modul PV sedangkan di sisi output dihubungkan dengan beban dalam hal ini ada baterai. Konverter bekerja berdasarkan lebar pulsa (Duty Cycle) yang diberikan pada MOSFET. Komponen lain yang penting pada buck untuk pengisian baterai adalah dioda *blocking* (D1) untuk menjamin tidak terjadi arus balik dari baterai ke modul PV pada saat tegangan modul PV lebih rendah dari baterai. D2 adalah freewiling diode untuk melewati arus yang disimpan induktor ke beban pada saat MOSFET off (terbuka). Kapasitor pada sisi kiri dan kanan untuk menekan ripple (frekuensi tinggi) yang mungkin terjadi pada proses pengisian. Beberapa persamaan yang dibutuhkan untuk mendapatkan parameter konverter buck berdasarkan kapasitas daya dan mode pengisian MPPT yang ditetapkan oleh pabrik. Persamaan 1 sampai dengan 4 adalah persamaan yang digunakan untuk memperoleh parameter konverter buck untuk kebutuhan pengisian baterai yang melibatkan teknik MPPT.



Gambar 3. Konverter buck untuk pengisian baterai

Konverter buck didesain pada inveter hibrida *off-grid* dengan kapasitas X kW dengan arus MPPT maksimum Y Ampere, maka desain besar beban untuk konverter buck adalah:

$$R_{beban} = \frac{X10^3}{Y^2} \quad (1)$$

Dimana: R adalah tahanan beban dalam satuan ohm.

Untuk mendapatkan operasi arus kontinyu dari konverter buck maka ditetapkan rasio duty cycle (D) dari perbandingan tegangan modul PV yang digunakan pada operasi konverter buck. Persamaan D ditunjukkan pada Persamaan (2).

$$D = \frac{V_o}{V_s} \quad (2)$$

Dimana; V_o dan V_s adalah tegangan output pada beban dan tegangan sumber dari modul PV.

Berikutnya ditetapkan frekuensi switching dari MOSFET berdasarkan rentang kerja frekuesinya, sehingga nilai induktor (L) minimum dapat diperoleh untuk mendapatkan operasi arus kontinyu dari konverter buck menggunakan persamaan (3).

$$L_{min} = \frac{(1-D)R_{beban}}{2f} \quad (3)$$

Dimana: f adalah frekuensi switching dari MOSFET.

Nilai kapasitor (C) dipilih untuk mengurangi ripple (frekuensi tinggi) pada sisi output menggunakan Persamaan (4).

$$C = \frac{1-D}{8L(\frac{\Delta V_o}{V_o})^2} \quad (4)$$

Dimana: ΔV_o adalah tegangan output ripple dari konverter buck.

Efisiensi konverter buck dapat diukur berdasarkan daya yang dihasilkan modul PV terhadap daya yang diberikan pada baterai. Persamaan 5 adalah persamaan daya DC untuk output modul PV dan output konverter buck (daya input ke baterai). Persamaan efisiensi dapat dihitung menggunakan persamaan 6.

$$P_{DC} = V_{DC}I_{DC} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \quad (6)$$

Dimana P_{out} dan P_{in} adalah daya output dan daya input dari konverter buck.

3 Metodologi

Penelitian ini memodelkan MPPT pada inverter hibrida *off-grid* pada mode PV dan baterai. Pada mode ini, PV dan baterai sebagai sumber utama dalam melayani beban listrik. Apabila beban listrik tidak ada, maka PV akan mengisi baterai dengan tiga stage yaitu pengisian dengan daya maksimum berbasis MPPT, tegangan konstan dan pengisian mengambang. Data dan parameter PV, inverter hibrida *off-grid* mode PV dan baterai, dan parameter baterai ditabelkan pada Tabel 1, 2, dan 3.

Tabel 1. Spesifikasi modul PV monokristalin

Parameter modul PV	Kapasitas
Daya maksimum (P_{max})	300 Wp
Toleransi Daya Maksimum	$\pm 3\%$
Tegangan rangkaian terbuka (V_{oc})	41,04 V
Arus hubung singkat (I_{sc})	9,30 A
Tegangan daya maksimum (V_{mp})	34,20 V
Arus pada daya maksimum (I_{mp})	8,77 A

Tabel 2. Spesifikasi inverter hibrida *off-grid*

Parameter inverter	Kapasitas
Daya inverter	1,25 kVA, 1 kW
Daya maksimum	3 kVA
Daya input PV maksimum	840 W
Tegangan input PV maksimum	120 Volt
Tegangan baterai	12 Volt
MPPT	Built-in 60 Ampere

Tabel 3. Spesifikasi baterai VRLA

Parameter baterai	Kapasitas
Tegangan nominal	12 V
Kapasitas nominal	100 Ah
Kapasitas	100 Ah/10 A (10 hr, 1,8 V/cell, 25°C/77°F)
Arus discharge mak.	1200 A (5s)
Resistansi Internal	4,8 mOhm

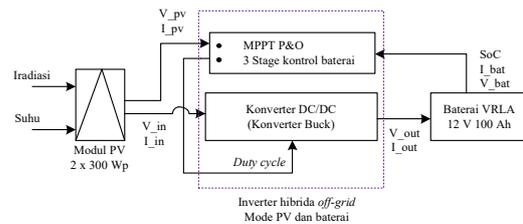
Baterai VRLA 12 Volt terdiri dari 6 sel, masing-masing sel mempunyai tegangan antara 1,8 – 2,2 Volt. Sehingga tegangan minimum dan maksimum antara 10,8 – 13,2 Volt.

Langkah-langkah penelitian untuk mendapatkan model inverter hibrida *off-grid* pada mode PV dan baterai pada proses pengisian baterai menggunakan teknik MPPT dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Mengecek rangkaian inverter hibrida *off-grid* pada mode PV dan baterai,
2. Mendapatkan parameter rangkaian yang digunakan untuk simulasi,
3. Menentukan 3 stage pengisian baterai dengan teknik MPPT, tegangan konstan, dan pengisian mengambang.
4. Membuat rangkaian sistem pada Simulink MATLAB,
5. Melakukan simulasi pengujian pengisian baterai dengan 3 stage, pengisian teknik MPPT, tegangan konstan dan pengisian mengambang,
6. Mengecek efisiensi inverter pada mode pengisian baterai dari PV dengan teknik MPPT dari hasil simulasi dengan pengukuran langsung,
7. Menarik kesimpulan hasil penelitian.

4 Hasil dan Pembahasan

Rangkaian inverter hibrida *off-grid* pada mode PV dan baterai untuk pengisian baterai ditunjukkan pada Gambar 4. Terdapat dua blok utama pada pengisian baterai pada Gambar 4, yaitu teknik kontrol 3 stage pengisian dan konverter DC/DC. Rangkaian konverter DC/DC adalah jenis konverter buck, konverter untuk menurunkan tegangan DC sesuai dengan kebutuhan tegangan untuk pengisian baterai. Rangkaian konverter buck ditunjukkan pada Gambar 3. Parameter-parameter dari rangkaian konverter buck ditampilkan pada Tabel 4.



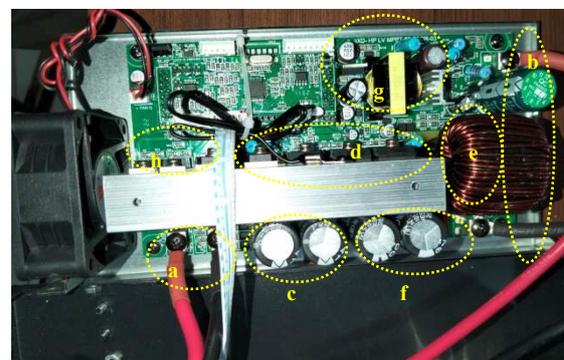
Gambar 4. Diagram blok inverter hibrida *off-grid* pada proses pengisian baterai

Rload pada rangkaian konverter buck dalam Gambar 3 berdasarkan spesifikasi inverter hibrida *off-grid* adalah $\frac{10^3}{60^2} = 0,278$ Ohm. Beban yang diberikan pada inverter adalah baterai VRLA 12 V 100 Ah dengan tahanan internal sebesar 4,8 mOhm. MOSFET pada inverter hibrida *off-grid* mode PV baterai adalah MOSFET HY3215 untuk pensaklaran sehingga mendapatkan tegangan output yang dibutuhkan oleh baterai.

Tabel 4. Spesifikasi konverter buck

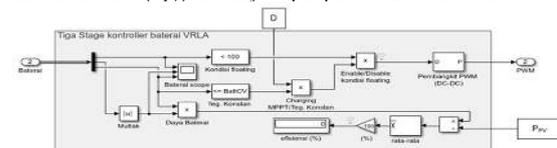
Parameter konverter	Kapasitas
Cin	940 μ F
Cout	940 μ F
L	10mH
Rload	0,0048 Ohm
Fws	1000 Hz
Duty cycle (D)	0,35

Fws adalah frekuensi switching dari MOSFET HY3215 untuk konverter DC-DC yang mencapai 100 kHz – 300 kHz. Berdasarkan hasil perhitungan, *duty cycle* (D) untuk mendapatkan tegangan baterai (12 Volt) dari tegangan pada daya maksimum modul PV adalah sebesar 0,35. Gambar 5 adalah bentuk fisik dari konverter buck pada inverter hibrida *off-grid*. Gambar 5.a, b, c, d, e, f, g dan h adalah input DC dari modul PV, output konverter menuju terminal baterai, kapasitor sisi input, MOSFET N-Channel HY3215, induktor untuk arus sampai dengan 60 A, kapasitor sisi output, modul MPPT, dan dioda *blocking* dan dioda *freewheeling*.



Gambar 5. Bentuk fisik konverter buck dilengkapi MPPT

Model pengisian baterai tiga stage pada Simulink MATLAB ditunjukkan pada Gambar 6. Pada Simulink, pengukuran arus dan tegangan baterai dilakukan untuk mendapatkan daya pengisian baterai yang dipergunakan untuk menghitung efisiensi pengisian baterai berdasarkan daya output dari modul PV (P_{pv}) atau daya input pada konverter buck.

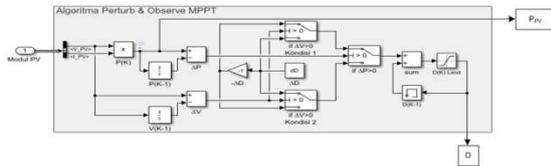


Gambar 6. Model tiga stage pengisian baterai pada Simulink MATLAB

Duty cycle dibatasi pada rentang 0,35 sampai dengan 0,65, seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Rentang ini untuk menjaga tegangan pengisian baterai VRLA 12 volt untuk perubahan

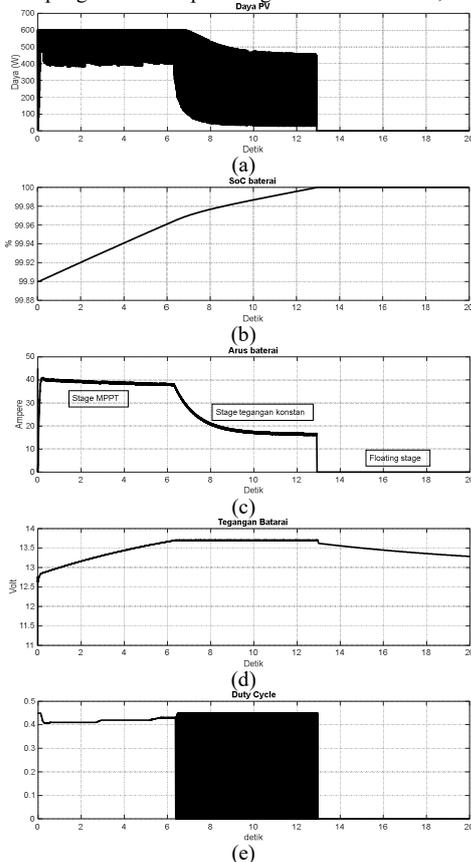
tegangan modul PV antara 18,46 – 34,2 Volt (tegangan modul PV pada daya maksimum).

Algoritma P&O pada Simulink MATLAB ditunjukkan pada Gambar 7. Tegangan dan arus output dari modul PV diukur untuk menentukan daya PV dan besar *duty cycle* yang diperlukan untuk mendapatkan daya maksimum PV pada proses pengisian baterai mode MPPT (stage arus konstan).



Gambar 7. Algoritma P&O MPPT pada Simulink MATLAB

Simulasi menggunakan iradiasi 1000 W/m² dan suhu 25 derajat celsius. Parameter awal baterai VRLA 12 V 100 Ah untuk simulasi, SoC 99,9%, dengan waktu simulasi 20 detik. Tegangan konstan pada stage ke-2 diset 13,7 Volt. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 8.(a) sampai dengan (e). Efisiensi pengisian baterai pada stage MPPT sebesar 93,93%.



Gambar 8. Hasil simulasi pengisian baterai 3 stage pada inverter hibrida *off-grid*

Gambar 8.a adalah hasil simulasi daya output dari modul PV. Stage ke-1, MPPT bekerja mentracking daya maksimum sebesar maksimum 600 Wp pada iradiasi 1000 W/m² dan suhu 25 derajat celsius sesuai dengan spesifikasi modul PV. Pada daya tersebut arus yang diberikan panel sekitar 40 Ampere seperti ditunjukkan pada Gambar 8.c. Nilai SoC (Gambar 8.b), tegangan baterai (Gambar 8.d) terus naik, sedangkan *duty cycle* (D) antara 3,5 sampai dengan 4,5 (Gambar 8.e) sesuai dengan batasan kerja seting D pada simulasi MPPT P&O.

Stage ke-2 pada saat tegangan baterai mencapai 13,7 V daya dari modul PV bervariasi untuk menjaga tegangan pengisian baterai 13,7 V. Pada stage ini SoC baterai terus naik sampai 100%. Arus baterai berkurang karena MPPT sudah tidak bekerja untuk pengisian tegangan konstan. Pada stage ini D bervariasi untuk menjaga tegangan pengisian 13,7 Volt. Pada stage ke-3

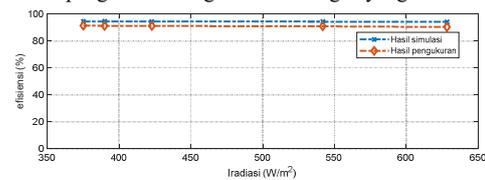
SoC sudah penuh (100%), sehingga arus pengisian nol untuk menghindari *over charging* pada baterai.

Validasi hasil simulasi dicek dengan cara melakukan pengukuran secara langsung efisiensi inverter hibrida *off-grid* pada stage MPPT (pengisian arus konstan) sebelum tegangan mencapai 13,7 V. Pengukuran iradiasi menggunakan Solar Power Meter SM 206, voltmeter dan ampere meter pada sisi output modul PV (sisi input inverter hibrida *off-grid*) dan sisi output inverter hibrida *off-grid* yang menuju baterai untuk mendapatkan tegangan dan arus, sehingga efisiensi inverter hibrida *off-grid* pada mode PV baterai dapat diketahui. Tabel 5 menunjukkan hasil perbandingan efisiensi hasil simulasi dan pengukuran langsung pada stage MPPT (arus konstan).

Tabel 5. Perbandingan efisiensi hasil simulasi dan pengukuran

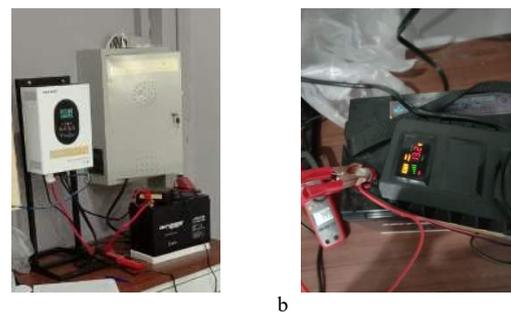
Iradiasi (W/m ²)	Efisiensi inverter hibrida <i>off-grid</i>		
	model PV Baterai		
	Simulasi	Pengukuran	
375.2	94.45	91.2800	
390.0	94.40	91.1300	
422.8	94.33	91.0200	
541.9	94.25	90.7800	

Hasil perbandingan efisiensi yang ditunjukkan pada Tabel 4, efisiensi inverter turun seiring dengan kenaikan iradiasi, hal ini karena pada simulasi dan pengukuran, model MOSFET (simulasi) dan MOSFET fisik mempunyai resistansi internal pada saat MOSFET on. Semakin besar iradiasi, arus yang mengalir pada MOSFET saat on semakin besar sehingga rugi daya akibat switching semakin besar. Gambar 9 menunjukkan perbandingan efisiensi hasil simulasi dan pengukuran. Grafik pada Gambar 9 menunjukkan efisiensi inverter menurun dengan naiknya iradiasi dan efisiensi hasil simulasi lebih tinggi dari pada hasil pengukuran dengan kecenderungan yang sama.



Gambar 9. Perbandingan hasil simulasi dan pengukuran

Gambar 10 adalah foto dokumentasi pengukuran pada mode arus konstan (mode MPPT) pengisian baterai VRLA 12 V 100 Ah dari sumber modul PV 600 Wp menggunakan inverter hibrida *off-grid* 1 kW. Gambar 10.a dan b adalah sistem PLTS dengan inverter hibrida *off-grid* dan pengukuran arus dan tegangan output inverter pada baterai.



Gambar 10. Dokumentasi pengukuran pengisian baterai VRLA mode MPPT

5 Kesimpulan

Penelitian ini berhasil membuat model inverter hibrida *off-grid* pada mode PV baterai. Hasil simulasi menunjukkan model yang dibuat menggunakan Simulink MATLAB dapat mempresentasikan kerja pengisian baterai VRLA 12 Volt dari total kapasitas modul PV 600 Wp pada tiga stage (stage arus konstan (MPPT), tegangan konstan, dan floating charging). Hasil simulasi menunjukkan efisiensi pengisian stage MPPT sebesar 93,93% pada iradiasi 1000 W/m² dan suhu 25°C. Hasil simulasi divalidasi dengan pengukuran diperoleh efisiensi

inverter hibrida off-grid pada mode PV baterai saat pengisian baterai, mempunyai kecenderungan yang sama yaitu cenderung menurun untuk kenaikan iradiasi. Hasil pengukuran langsung relatif memiliki efisiensi yang lebih rendah dari pada hasil simulasi untuk iradiasi yang sama.

Kontribusi Penulis

Setiap penulis pada artikel ini mempunyai kontribusi masing-masing. Penulis ke-1 memberikan ide penulisan berdasarkan proyek penelitian PLTS hibrida *off-grid* yang terinstal pada Gedung B, Fakultas Teknik, Universitas Mataram. Penulis ke-2 membantu mencari referensi pendukung untuk kelancaran penelitian dan publikasi. Penulis ke-3 membantu melakukan pengukuran di lapangan dan mendata perangkat PLTS hibrida *off-grid*. Penulis ke-4 membantu membuat model pada Simulink MATLAB. Penulis ke-5 membantu simulasi sistem dan membantu membuat artikel publikasi. Penulis ke-6 membantu pada proses editing dan saran perbaikan artikel.

Ucapan Terima Kasih

Penulis berterima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Mataram yang telah memberikan bantuan pendanaan melalui skema PNPB Fakultas Teknik Tahun 2024 untuk biaya pembangunan sistem PLTS hibrida *off-grid* 1,25 kVA dan proses penelitian, sehingga artikel penelitian ini dapat diselesaikan.

Referensi

- [1] S. DEN, "Indonesia Energy Outlook 2019," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2019.
- [2] IESR, *Indonesia Energy Transition Outlook 2022. Tracking Progress of Energy Transition in Indonesia: Aiming for Net-Zero Emissions by 2050*. Jakarta: Institute for Essential Services Reform (IESR), 2021.
- [3] M. Energi, D. A. N. Sumber, D. Mineral, and R. Indonesia, *BERITA NEGARA*, no. 40. 2017.
- [4] M. Energi, D. A. N. Sumber, D. Mineral, and R. Indonesia, *BERITA NEGARA*, no. 948. 2021.
- [5] Menteri ESDM, *Peraturan Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia nomor 2 Tahun 2024 Tentang Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap Yang Terhubung Pada Jaringan Tenaga Listrik Pemegang Izin Usaha Penyediaan Tenaga Listrik Untuk Kepentingan Umum*, vol. 2024. 2024, pp. 1–35. [Online]. Available: <https://jdih.esdm.go.id/storage/document/PermenESDM Nomor 2 Tahun 2024.pdf>
- [6] R. Wicaksono, Y. Prasetyo, B. Triyono, and G. K. S. Saputra, "Sistem Monitoring Pertanian Hidroponik Tenaga Surya Berbasis Arduino dan IoT," vol. 5, no. 1, pp. 49–54, 2023, doi: <https://doi.org/10.30996/elsains.v5i1.8514>.
- [7] T. Fuadiyah and S. Sudarti, "Potensi Pemanfaatan Sel Surya untuk Mendukung Energi di Bidang Pertanian," *J. Teknol. Pertan. Gorontalo*, vol. 7, no. 2, pp. 75–79, 2022, doi: [10.30869/jtpg.v7i2.960](https://doi.org/10.30869/jtpg.v7i2.960).

- [8] A. R. Tsamarah, M. Widyartono, W. Aribowo, and A. L. Wardani, "Sistem Kendali Automatic Transfer Switch dan Monitoring Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya Untuk Usaha Mikro Laundry," vol. 6, no. 1, pp. 1–8, 2024, doi: [10.30996/elsains](https://doi.org/10.30996/elsains).
- [9] N. F. Wahidin, E. Yadie, and M. A. Putra, "Analisis Perbandingan Charging SCC Jenis PWM Dan MPPT Pada Automatic Handwasher with Workstation Bertenaga Surya Politeknik Negeri Samarinda," *PoliGrid*, vol. 03, no. 01, pp. 12–20, 2022.
- [10] M. Hakim, F. Latif, M. Khan, and A. Basir, "Design and implementation of three-stage battery charger for lead-acid battery," in *2016 3rd International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT)*, Sep. 2016, pp. 1–5. doi: [10.1109/CEEICT.2016.7873052](https://doi.org/10.1109/CEEICT.2016.7873052).
- [11] S. Deb, M. Pihlatie, and M. Alsaadi, "Smart Charging: A Comprehensive Review," *IEEE Access*, vol. PP, p. 1, Jan. 2022, doi: [10.1109/ACCESS.2022.3227630](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3227630).
- [12] R. H. G. Tan, C. K. Er, and S. G. Solanki, "Modeling of Photovoltaic MPPT Lead Acid Battery Charge Controller for Standalone System Applications," *E3S Web Conf.*, 2020, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:226686961>
- [13] M. Abdel-Salam, M.-T. EL-Mohandes, and M. Goda, "History of Maximum Power Point Tracking," in *Modern Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems*, 2019, pp. 1–29. doi: [10.1007/978-3-030-05578-3_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05578-3_1).
- [14] P. Slamet, S. Yuliananda, and S. Santoso, "Simulasi Desain Kontrol MPPT Sistem Photovoltaic," *JEEE-U (Journal Electr. Electron. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 40–56, 2019, doi: [10.21070/jee-u.v3i1.2019](https://doi.org/10.21070/jee-u.v3i1.2019).
- [15] I. M. A. Nrartha, I. M. Ginarsa, and A. B. Muljono, *Proceedings of the First Mandalika International Multi-Conference on Science and Engineering 2022, MIMSE 2022 (Mechanical and Electrical)*. Atlantis Press International BV, 2023. doi: [10.2991/978-94-6463-078-7](https://doi.org/10.2991/978-94-6463-078-7).
- [16] F. Hadj, M. Moussa, A. Morsli, A. Tlemçani, H. Belmili, and H. Nouri, "Performance analysis of perturb & observe, incremental conductance, and fuzzy logic MPPT controllers for grid-connected PV systems," in *The 6th International Conference on Electrotechnics*, Jan. 2024, vol. 1, pp. 1–6.
- [17] N. B. Malla and V. Parajuli, "Comparison of Incremental Conductance and Perturb and Observe Techniques of Maximum Power Point Tracking for PV Systems," *Int. J. Res. Sci. Eng.*, vol. 4, no. 01, pp. 13–21, 2024, doi: [10.55529/ijrise.41.13.21](https://doi.org/10.55529/ijrise.41.13.21).

Halaman ini sengaja dikosongkan