

Desain Emulator Panel-Surya Berbasis Dua Mode Kontroler

Khusnul Hidayat¹ dan Ermanu Azizul Hakim²

¹Universitas Muhammadiyah Malang, Malang

² Program Profesi Insinyur, Universitas Muhammadiyah Malang, Jl. Raya Tlogomas 246 Malang

Kontak Person:

Khusnul Hidayat

Jl. Raya Tlogomas No. 246 Malang

E-mail: khusnulhidayat@umm.ac.id

Abstrak

Penggunaan energi surya semakin meningkat sebagai solusi ramah lingkungan untuk memenuhi kebutuhan energi global. Namun, pengujian dan pengembangan sistem panel-surya atau dikenal dengan Photovoltaic (PV) di lingkungan sesungguhnya sangat menantang karena ketergantungan pada kondisi cuaca dan iradiasi matahari yang tidak dapat diprediksi. Oleh karena itu, emulator PV yang dapat meniru karakteristik panel-surya menjadi sangat penting (urgensi) untuk menguji dan mengembangkan sistem PV serta algoritma pelacakan titik daya maksimum atau dikenal dengan Maximum Power Point Tracking (MPPT) dengan biaya yang lebih rendah dan dalam kondisi yang terkendali. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menyajikan analisis eksperimental emulator PV yang memiliki respons dinamis yang cepat dan stabilitas tinggi menggunakan mikrokontroler berbiaya rendah untuk mendukung pengujian dan pengembangan sistem PV dan MPPT. Emulator PV yang dikembangkan mampu meniru karakteristik arus-tegangan (I-V) panel-surya dengan akurasi tinggi dalam berbagai kondisi beban, iradiasi, dan suhu. Metode yang diusulkan dalam penelitian ini adalah penggunaan kontroler histerisis berbasis mode ganda, yaitu Current Control Mode (CCM) dan Voltage Control Mode (VCM), kedua kontroler tersebut menggunakan kontrol Proporsional dan Integral (PI). Skema kontrol yang diusulkan memastikan operasi efektif di kedua wilayah, yaitu wilayah arus konstan (Constant Current Region, CCR) dan wilayah tegangan konstan (Constant Voltage Region, CVR) pada karakteristik (I-V) PV. Sistem ini menggunakan konverter Buck DC-DC yang dikendalikan oleh mikrokontroler berbiaya rendah untuk menghasilkan karakteristik (I-V) PV yang sebenarnya. Emulator PV telah diuji untuk mengikuti perubahan radiasi surya, suhu sel, dan beban secara cepat dan simultan secara real-time, berdasarkan resolusi online model matematika dioda tunggal dari modul sel PV. Selain itu, emulator PV telah diuji dengan beban konverter DC-DC berbasis MPPT.

Kata kunci: panel-surya; photovoltaic; emulator; simulator; mppt

1. PENDAHULUAN

Energi surya telah menjadi salah satu sumber energi terbarukan yang paling menjanjikan untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengurangi dampak perubahan iklim. Teknologi panel surya atau dikenal dengan Photovoltaic (PV) memungkinkan konversi langsung sinar matahari menjadi listrik, yang kemudian dapat digunakan untuk berbagai aplikasi, mulai dari skala rumah tangga hingga pembangkit listrik skala besar. Seiring dengan penurunan biaya produksi dan peningkatan efisiensi panel surya, implementasi sistem PV semakin meluas [1],[2].

Namun, pengujian dan pengembangan sistem PV, termasuk algoritma pelacakan titik daya maksimum atau sering dikenal dengan Maximum Power Point Tracking (MPPT), menghadapi tantangan signifikan ketika dilakukan di lingkungan sesungguhnya. Faktor-faktor seperti variabilitas cuaca, perubahan intensitas iradiasi, dan kondisi lingkungan lainnya membuat pengujian menjadi tidak konsisten dan tidak dapat diprediksi. Oleh karena itu, emulator PV (PVE) yang dapat meniru karakteristik arus-tegangan (I-V) dari panel surya sesungguhnya sangat dibutuhkan. Emulator ini memungkinkan pengujian yang terkendali dan dapat diulang dalam berbagai kondisi [3],[4].

Pendekatan pemecahan masalah yang diusulkan dalam penelitian ini adalah penggunaan pengontrol histerisis berbasis mode ganda untuk memastikan operasi efektif dalam dua wilayah utama karakteristik PV: Constant Current Region (CCR) dan Constant Voltage Region (CVR). Pengontrol ini dirancang untuk bertransisi dengan mulus antara mode kontrol arus (CCM) dan mode kontrol tegangan (VCM) tanpa menghasilkan osilasi yang sering terjadi pada sistem PV konvensional. Untuk validasi eksperimental, penelitian ini menggunakan kontroler sinyal digital (mikrokontroler) STM32F7 yang hemat biaya untuk membuat model PV dan menghasilkan sinyal PWM yang diperlukan untuk mengendalikan konverter Buck DC-DC.

Penelitian sebelumnya telah mengembangkan berbagai jenis PVE dengan pendekatan kontrol yang berbeda. Sebagian besar PVE konvensional menggunakan metode pengendali Proporsional & Integral (PI) atau Proporsional, Integral, dan Derivatif (PID) dengan bandwidth rendah untuk mengurangi osilasi pada sinyal referensi, yang mengakibatkan respons dinamis yang lambat [5]–[11]. Penelitian lain [12] mengusulkan metode kontrol histerisis berbasis mode ganda. Pendekatan ini melibatkan penggunaan kontroler Instantaneous Output Impedance Matching (IOIM) untuk menghasilkan referensi tegangan dan menerapkan kontrol inner-loop dengan metode Boundary Control (BC) menggunakan permukaan switching orde kedua yang dikoreksi, namun metode tersebut meningkatkan kompleksitas kontroler karena memerlukan blok referensi ganda yang terpisah dan algoritma kontrol tambahan untuk meningkatkan kinerja di sekitar titik daya maksimum (MPP).

Penelitian yang dilakukan oleh [13] mengusulkan metode kontrol umpan balik resistansi untuk emulator PV menggunakan model PV berbasis arus-resistansi (I-R) yang dihitung dengan metode pencarian biner untuk mencapai konvergensi cepat. Metode ini digabungkan dengan konverter Buck loop tertutup yang menggunakan pengontrol PI. Kelemahan metode yang diusulkan yaitu metode tradisional seperti metode Newton-Raphson membutuhkan iterasi yang tinggi untuk konvergensi, terutama di wilayah tegangan konstan, yang menyebabkan hasil yang tidak stabil dan tidak akurat pada operasi waktu sesungguhnya. Selain itu, PVE tidak dapat beroperasi dengan benar saat beban terlalu kecil atau terlalu besar karena keterbatasan pengontrol PI dan konverter Buck. Ini membatasi karakteristik I-V yang dapat dihasilkan oleh PVE.

Referensi [14] mengusulkan skema peningkatan efisiensi untuk PVE berdasarkan model sel PV. Meskipun metode yang diusulkan menunjukkan peningkatan efisiensi dan kinerja dinamis, ada beberapa kelemahan yang perlu diperhatikan, yaitu waktu respons dinamis dari PVE yang diusulkan masih memiliki keterlambatan dibandingkan dengan panel PV sesungguhnya. Misalnya, PVE ini tertinggal sekitar 3.5 ms dibandingkan dengan panel PV sesungguhnya dalam pengujian perubahan insolasi 30% hingga 60%. Penelitian yang lain mengusulkan PVE berbasis rangkaian hibrid pasif dan aktif untuk mencapai akurasi, kecepatan, dan efisiensi daya yang lebih tinggi dibandingkan dengan PVE konvensional. Namun, seperti halnya teknologi lainnya, PVE ini memiliki beberapa kelemahan, yaitu pada kondisi tegangan terbuka, suhu dioda serial mengalami kenaikan dari 29.5 °C hingga 94.2 °C tanpa menggunakan pendingin [15].

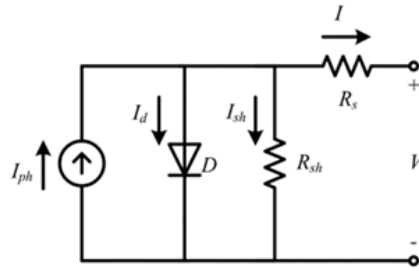
PVE menggunakan konverter DC-DC yang dikendalikan oleh algoritma kontrol mode geser untuk mereplika karakteristik I-V (arus-tegangan) dan P-V (daya-tegangan) dari modul PV sesungguhnya. Metode yang diusulkan berhasil dalam mereplika karakteristik I-V dan P-V modul PV dengan tingkat akurasi yang tinggi, terutama untuk aplikasi pendidikan dan pengujian dalam kondisi laboratorium. Namun, terdapat beberapa kelemahan yang perlu diperhatikan seperti ketergantungan pada model matematis, keterbatasan kapasitas pengukuran, respons dinamis yang terbatas, ketergantungan pada mikrokontroler tertentu, dan kompleksitas implementasi hardware [16].

Metode model dioda tunggal yang diusulkan [17] berhasil dalam mereplika karakteristik I-V dari panel PV dengan tingkat kesesuaian yang tinggi. Namun, terdapat beberapa kelemahan yang perlu diperhatikan seperti kesulitan dalam mereproduksi kurva ekstrem, kerugian daya pada transistor kontrol, respons transien yang lambat, keterbatasan kapasitas pengukuran, dan keterbatasan operasional pada daya tinggi [17].

Kebaruan dari penelitian ini terletak pada penggunaan kontroler histerisis berbasis mode ganda untuk menyimulasikan karakteristik PV secara akurat. Kontroler ini mampu beroperasi secara efektif di kedua wilayah CCR dan CVR, yang merupakan tantangan utama dalam menyimulasikan karakteristik PV yang sebenarnya dengan menggunakan mikrokontroler STM32F4 yang berbiaya rendah.

2. METODE PENELITIAN

Rangkaian ekuivalen model sel PV yang digunakan pada penelitian ini adalah rangkaian ekuivalen dioda tunggal, model tersebut paling umum digunakan pada model sel PV untuk menghasilkan karakteristik PV seperti ditunjukkan pada Gambar 3 (23).



Gambar 3 Rangkaian ekuivalen dioda tunggal sel surya.

Relasi antara tegangan terminal dan arus sel PV dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{AkT} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

Arus PV I_{ph} bergantung pada radiasi matahari dan suhu sel sebagai berikut:

$$I_{ph} = (I_{sc} + k(T_c - T_r)) \frac{G}{1000} \quad (2)$$

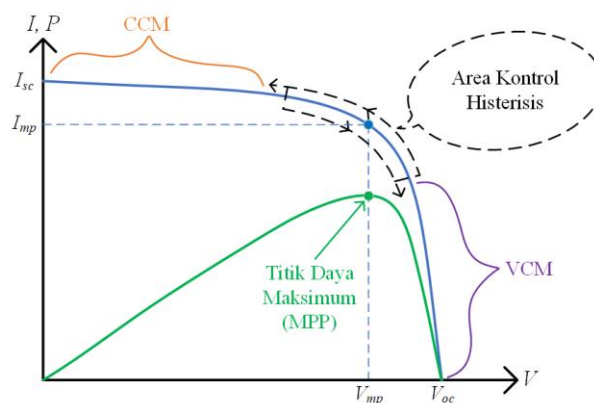
di mana I_{sc} adalah arus hubung singkat sel dalam Ampere; k adalah koefisien suhu; T_c adalah suhu sel dalam Kelvin; T_r adalah suhu referensi sel dalam Kelvin, dan G adalah iradiasi surya dalam W/m^2 .

Arus saturasi balik I_S dapat dihitung dari arus saturasi balik sel I_{rr} pada suhu referensi dan tegangan gap pita V_g sebagai berikut:

$$I_S = I_{rr} \left(\frac{T}{T_r} \right)^{3/A} \exp \left(\frac{V_g q}{Ak} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_c} \right) \right) \quad (3)$$

Nilai I_{rr} dalam bentuk arus hubung singkat I_{sc} dan tegangan rangkaian terbuka V_{oc} pada suhu referensi yang sama adalah

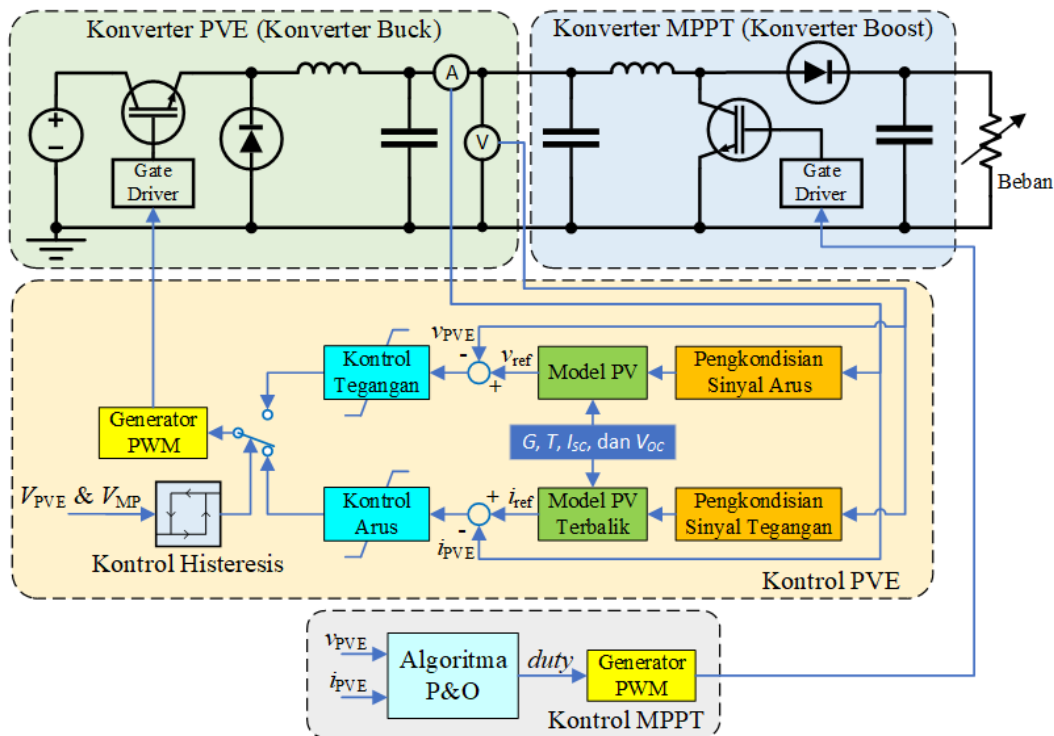
$$I_{rr} = \frac{I_{sc}}{\exp \left(\frac{qV_{oc}}{AkT_r} - 1 \right)} \quad (4)$$



Gambar 4 Skema kontrol emulator berdasarkan model sel PV.

Gambar 4 menunjukkan skema kontrol yang diusulkan menggunakan metode histerisis berbasis mode operasi ganda berdasarkan model PV. Terdapat dua mode operasi utama, yaitu: Current Control Mode (CCM) dan Voltage Control Mode (VCM). CCM dan VCM dipilih dengan memantau tegangan panel PV dan tegangan pada titik daya maksimum V_{mp} . Ketika tegangan PV terukur lebih rendah dari

V_{mp} , pengontrol beroperasi dalam CCM, dan ketika tegangan PV terukur lebih besar dari V_{mp} , pengontrol beroperasi dalam VCM.



Gambar 5 Konfigurasi sistem emulator PV yang diusulkan.

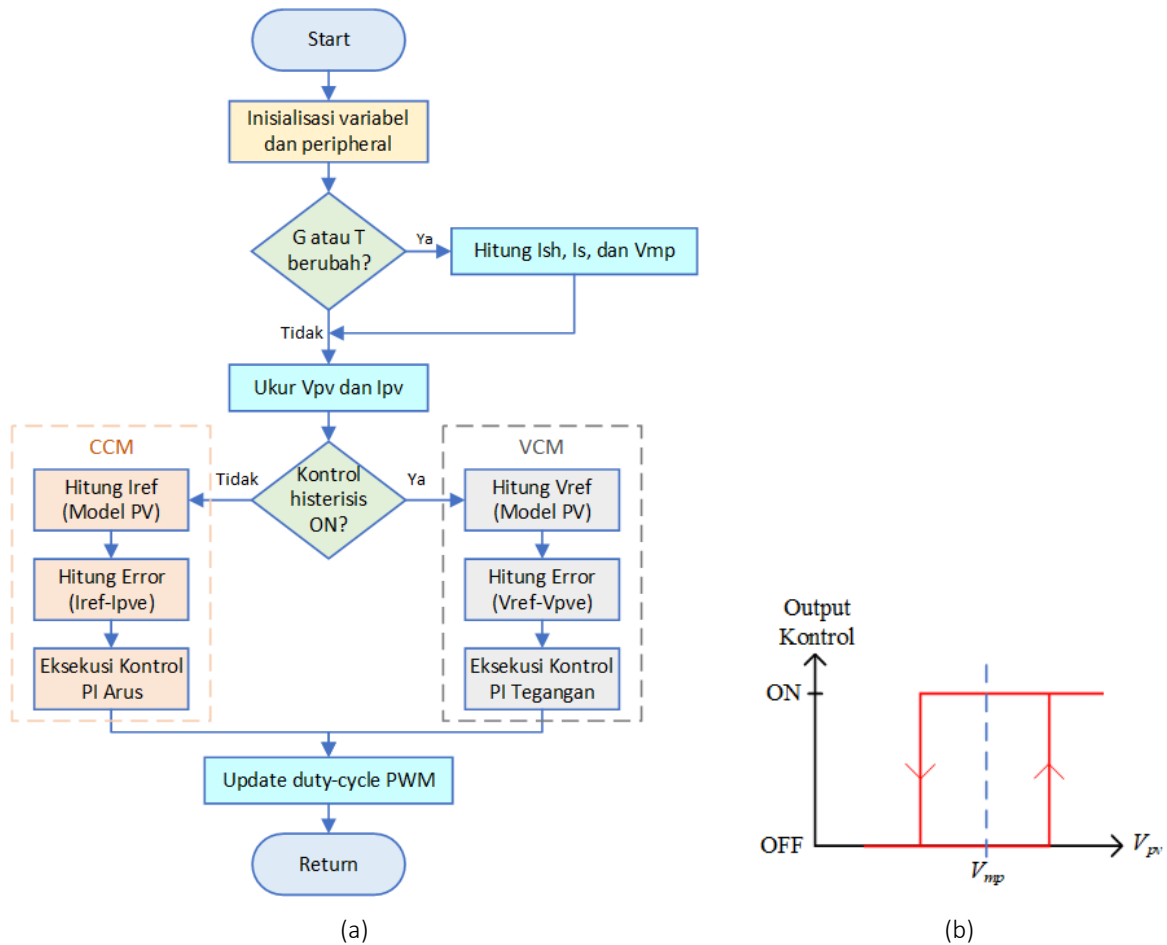
Konfigurasi sistem dan diagram alir skema kontrol PVE yang diusulkan dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6. Proses penghitungan arus referensi PV i_{ref} diperoleh dengan cara mengabaikan resistansi shunt R_{sh} pada Persamaan 1, sehingga didapat persamaan sebagai berikut:

$$i_{ref} = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{q(v_{PVE} + i_{PVE}R_s)}{AkT} \right) - 1 \right) \quad (5)$$

Metode numerik seperti metode iteratif Newton-Raphson dapat digunakan pada Persamaan 5 untuk menghitung arus PV berdasarkan tegangan PV saat simulator berada dalam mode CCM. Persamaan yang sama dapat digunakan untuk menghitung tegangan referensi PV v_{ref} dari arus PV yang terukur ketika simulator berada dalam mode VCM.

$$v_{ref} = v_{PVE} \log_e \left[1 + \frac{i_{PVE} - I_{ph}}{I_s} \right] - i_{PVE}R_s \quad (6)$$

Selama waktu operasi, pengontrol digital mengukur tegangan keluaran atau arus keluaran konverter emulator PV serta arus referensi PV atau tegangan referensi PV berdasarkan persamaan karakteristik PV.



Gambar 6 (a) Diagram alir skema kontrol PVE yang diusulkan dan (b) kontrol histerisis.

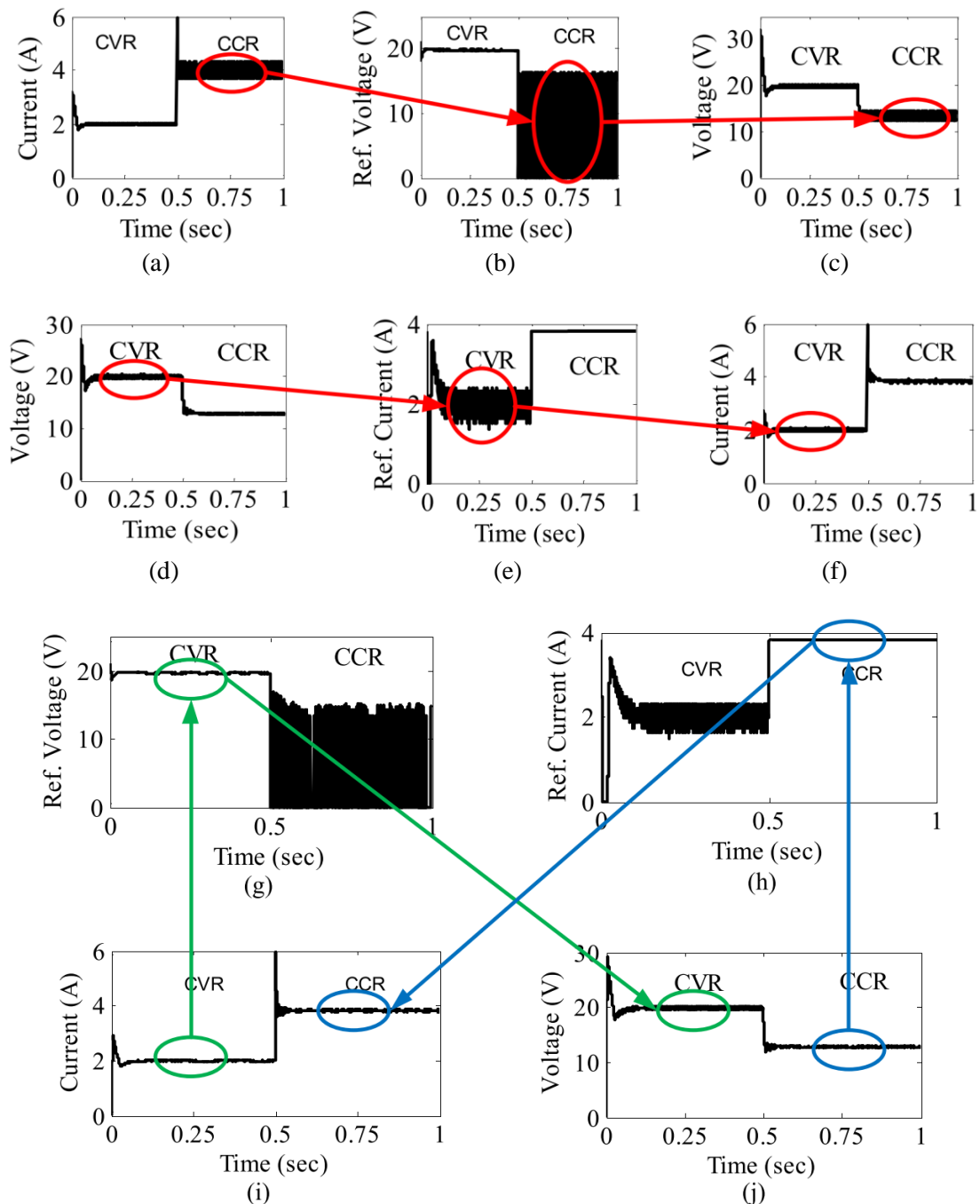
Tabel I menunjukkan parameter modul sel PV yang diusulkan untuk implementasi atau validasi skema kontrol ke dalam perangkat keras.

Tabel I Parameter model PV

Parameter	Simbol	Nilai
Suhu referensi	T_r	25 °C
Jumlah sel surya (seri)	N_s	36
Tegangan rangkaian terbuka	V_{OC}	21,06 V
Arus hubung singkat	I_{SC}	3,8 A
Koefisien suhu I_{SC}	k_i	0,24 %/°C
Faktor ideal PN junction	A	1,2
Tegangan gap pita semikonduktor	V_g	1,12 eV

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi berbasis MATLAB untuk perubahan bertahap dalam beban dan transisi antara mode kontrol ditunjukkan pada Gambar 8. Awalnya, beban dengan resistansi 10 dihubungkan melintasi keluaran simulator. Perubahan bertahap dalam beban dari 10 ke 3,33 diterapkan pada 0,5 detik. Ketika resistansi beban adalah 10 , beban tersebut beroperasi dalam CVR karakteristik I–V. Sedangkan, ketika resistansi beban adalah 3,33 , beban tersebut beroperasi dalam CCR karakteristik IV.



Gambar 8 Perubahan langkah dalam beban dan transisi antara mode kontrol (a)-(c) Bentuk gelombang VCM (d)-(f) Bentuk gelombang CCM (g)-(j) Bentuk gelombang DCM.

3.1 Mode Kontrol Tegangan

Dalam mode kontrol tegangan atau *Voltage Control Mode (VCM)*, arus keluaran simulator dimasukkan sebagai masukan ke model analitis modul PV, yang menghitung tegangan referensi yang sesuai dengan arus masukan. Tegangan referensi ini dibandingkan dengan tegangan aktual, dan perbedaan kesalahan ini dimasukkan ke pengontrol tegangan. Gambar 8(a) menunjukkan sinyal arus simulator dari mana sinyal tegangan referensi dihasilkan. Gambar 8(b) menunjukkan sinyal tegangan referensi, yang memiliki lebih sedikit distorsi dalam CVR, tetapi memiliki distorsi yang cukup besar dalam CCR. Simulator bekerja dengan baik di VCM saat beroperasi di CVR. Tetapi ketika simulator beroperasi di CCR, untuk perubahan kecil pada arus, ada perubahan besar dalam tegangan referensi keluaran. Jadi ada riak yang cukup besar pada tegangan keluaran di CCR seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8(c).

3.2 Mode Kontrol Arus

Dalam mode kontrol arus atau *Current Control Mode* (CCM), tegangan keluaran simulator dimasukkan sebagai masukan ke model analitis modul PV, yang menghitung referensi arus yang sesuai dengan tegangan masukan. Arus referensi ini dibandingkan dengan arus aktual, dan perbedaan kesalahan ini dimasukkan ke pengontrol arus. Gambar 8(d) menunjukkan sinyal tegangan simulator dari mana sinyal arus referensi dihasilkan. Gambar 8(e) menunjukkan sinyal arus referensi, yang memiliki lebih sedikit distorsi dalam CCR, tetapi memiliki distorsi yang cukup besar dalam CVR. Simulator bekerja dengan baik di CCM saat beroperasi di CCR. Tetapi ketika simulator beroperasi di CVR, untuk perubahan kecil dalam tegangan, ada perubahan besar dalam arus referensi keluaran. Jadi ada riak yang cukup besar pada arus keluaran di CVR seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8(f).

3.3 Mode Dual Control

Dalam mode kontrol ganda (DCM), pengontrol histeresis digunakan di antara CCM dan VCM sebagai transisi antara dua mode. Jika tegangan keluaran simulator kurang dari V_{mp} , maka beroperasi dalam CCM, dan jika tegangan keluaran simulator lebih dari V_{mp} , maka beroperasi dalam VCM. Gambar 8(g) dan (h) menunjukkan sinyal arus referensi dan tegangan referensi yang dihasilkan oleh model analitis modul PV. Sinyal referensi arus memiliki lebih sedikit distorsi dalam CCR, sedangkan sinyal referensi tegangan memiliki lebih sedikit distorsi dalam CVR. Jadi dalam CCR, CCM bekerja dengan baik, dan dalam CVR, VCM bekerja dengan baik. Gambar 8(i) dan (j) menunjukkan bentuk gelombang arus dan tegangan simulator, yang lebih unggul daripada bentuk gelombang arus dan tegangan DCM.

4. KESIMPULAN

Dalam makalah ini, pendekatan desain praktis untuk pemodelan dan implementasi perangkat keras simulator surya berbiaya rendah telah diselidiki. Kondisi praktis seperti insolasi dan suhu direproduksi dalam variasi karakteristik PV. Pemilihan mode kontrol untuk pengoperasian simulator yang stabil dalam arus konstan dan CVR karakteristik I–V panel PV diimplementasikan melalui pendekatan kontrol baru, yang bekerja dengan memuaskan untuk prosesor dsPIC berbiaya rendah. Transisi mode kontrol menghasilkan tegangan dan arus keluaran riak rendah dari simulator. Pengontrol histeresis membantu dalam transisi mode kontrol yang mulus di dekat MPP. Emulator yang diusulkan dapat berguna untuk pengujian berbagai konverter yang digunakan untuk pembangkitan terdistribusi dan aplikasi jaringan pintar.

REFERENSI

- [1] Kannan N, Vakeesan D. Solar energy for future world: - A review. Vol. 62, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016.
- [2] Ram JP, Manghani H, Pillai DS, Babu TS, Miyatake M, Rajasekar N. Analysis on solar PV emulators: A review. Vol. 81, Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier Ltd; 2018. p. 149–60.
- [3] Ayop R, Tan CW. A comprehensive review on photovoltaic emulator. Vol. 80, Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier Ltd; 2017. p. 430–52.
- [4] Boucharef A, Tahri A, Tahri F, Silvestre S, Bourahla M. Solar module emulator based on a low-cost microcontroller. Measurement. 2022 Jan 1;187:110275.
- [5] Sudhakar Babu T, Mohammed Azharuddin S, Nishant B, Rajasekar N. A dynamic photo voltaic emulator using dSPACE controller with high accuracy solar photo voltaic characteristics. Journal of Renewable and Sustainable Energy. 2016 Jan 1;8(1).

- [6] Ayub Windarko N, Nizar Habibi M, Ari Bagus Nugroho M, Prasetyono E. Simulator Panel Surya Ekonomis untuk Pengujian MPPT pada Kondisi Berbayang Sebagian. *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*. 2020;9(1):110–5.
- [7] Balakishan CH, Sandeep N. Development of a Microcontroller Based PV Emulator with Current Controlled DC-DC Buck Converter. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2014;4(4).
- [8] Purnama Adi F, Hakim L, Soemantri Brojonegoro No J, Lampung B. Photovoltaic Emulator Berbasis Embedded System pada Jaringan Listirk Cerdas. *ELECTRICIAN – Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*. 2019;13(2).
- [9] Ramyar A, Avestruz AT. Reconfigurable photovoltaic emulator for differential diffusion charge redistribution solar modules. *IEEE Open Journal of Industry Applications*. 2021;2:36–46.
- [10] Ullah N, Nisar F, Alahmadi AA. Closed Loop Control of Photo Voltaic Emulator Using Fractional Calculus. *IEEE Access*. 2020;8:28880–7.
- [11] J. Gonzalez-Llorente, A. Rambal-Vecino, L. A. Garcia-Rodriguez, J. C. Balda, E. I. Ortiz-Rivera. Simple and efficient low power photovoltaic emulator for evaluation of power conditioning systems. In: *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. IEEE; 2016.
- [12] Jayawardana IDG, Ho CNM, Pokharel M, Valderrama GE. A Fast-Dynamic Control Scheme for a Power-Electronics-Based PV Emulator. *IEEE J Photovolt*. 2021 Mar 1;11(2):485–95.
- [13] Ayop R, Tan CW. Rapid prototyping of photovoltaic emulator using buck converter based on fast convergence resistance feedback method. *IEEE Trans Power Electron*. 2019 Sep 1;34(9):8715–23.
- [14] Khawaldeh HA, Al-Soeidat M, Farhangi M, Lu DDC, Li L. Efficiency Improvement Scheme for PV Emulator Based on a Physical Equivalent PV-Cell Model. *IEEE Access*. 2021;9:83929–39.
- [15] Khawaldeh HA, Al-Soeidat M, Lu DDC, Li L. Accurate, Fast and Power Efficient PV Emulator Based on Hybrid Passive and Active Circuits. *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*. 2022 Dec 1;7(4):432–41.
- [16] Gayathri G, Deeba B, Dhanalakshmi V, Karthika V, Jabamani T. Design and Implementation of Solar Emulator for Photovoltaic Module. *International Journal of Engineering Science and Computing IJESC [Internet]*. 2020; Available from: <http://ijesc.org/>
- [17] Korasiak P, Jaglarz J. A New Photovoltaic Emulator Designed for Testing Low-Power Inverters Connected to the LV Grid. *Energies (Basel)*. 2022 Apr 1;15(7).
- [18] Hidayat K, Hasanah RN, Suyono H. Hybrid Improved Differential Evolution and Spline-based Jaya for Photovoltaic MPPT Technique. In: *International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI) [Internet]*. 2019 [cited 2024 Jul 25]. p. 344–51. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8976977>
- [19] Effendy M, Syahputra RN, Hidayat K. Perancangan Maximum Power Point Tracking pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Menggunakan Four Switch Buck Boost Converter dengan Metode P&O-ORB. *Transmisi*. 2019 Oct 29;21(4):103–8.
- [20] Hidayat K, Hasani MC, Mardiyah A, Effendy DM. Strategi Pengisian Baterai pada Sistem Panel Surya Standalone Berbasis Kontrol PI Multi-Loop. *Jurnal Teknik Elektro [Internet]*. 2021 [cited 2024 Jul 25];13(1):25–33. Available from: <https://journal.unnes.ac.id/nju/jte/article/view/29765>
- [21] Prasojo F, Mardiyah NA, Hidayat K. Stand-Alone Hybrid PV System by Using The Bypass Converter Topology to Optimize the Reliable of Device. *Kinetik: Game Technology, Information System, Computer Network, Computing, Electronics, and Control*. 2023 May 30;
- [22] Syafaah L, Faruq A, Cahyadi BN, Hidayat K, Setyawan N, Lestandy M, et al. Design of MPPT for Buck-boost Converter based on GA to Optimize Solar Power Generation. *Kinetik: Game Technology, Information System, Computer Network, Computing, Electronics, and Control*. 2023 Jul 17;
- [23] Izadian A, Pourtaherian A, Motahari S. Basic model and governing equation of solar cells used in power and control applications. In: *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2012*. 2012. p. 1483–8.