

STRATEGI MANAJEMEN ENERGI PADA DC MICROGRID BERBASIS PV-BATERAI UNTUK MENJAMIN KONTINUITAS SUPLAJ BEBAN PADA KONDISI IRADIASI DINAMIS

Sidiq Budi Perkasa^{1*}, Krismon Budiono², Byan Bagas Pradana³, Haidar Ali Fathin Naufal⁴, Aditya Putra Pradinawan⁵, Faris Cahya Priambada⁶

^{1,3,4,5} Politeknik Negeri Semarang; Jl. Prof. Soedarto, Tembalang, Kec. Tembalang, Kota Semarang, Jawa Tengah 50275; (024) 7472396

^{2,6} Universitas Diponegoro; Jl. Prof. Soedarto, Tembalang, Kec. Tembalang, Kota Semarang, Jawa Tengah 50275; (024) 7472396

Keywords:

Microgrid DC; Manajemen Energi; Baterai *Direct-Coupled*; *Interleaved Buck Converter*; Kendali PI.

Correspondent Email:

sidiq.budi@polines.ac.id

Abstrak. Pemanfaatan energi surya melalui sistem *microgrid* arus searah (DC) mode mandiri (*islanding*) menjadi solusi ideal untuk elektrifikasi di daerah terpencil. Namun, daya keluaran panel surya (*photovoltaic*/PV) memiliki kelemahan berupa fluktuasi ekstrem akibat variasi tingkat iradiasi matahari, yang dapat menyebabkan ketidakstabilan pasokan daya. Penelitian ini mengusulkan strategi manajemen energi dan regulasi tegangan pada *microgrid* DC menggunakan konfigurasi *direct-coupled battery*. Titik daya maksimum (MPPT) panel surya diekstraksi menggunakan *2-Phase Interleaved Buck Converter* berbasis algoritma *Perturb and Observe* (P&O). Baterai dihubungkan secara langsung membentuk *Intermediate DC Bus* untuk menyerap secara alami fluktuasi daya dari panel surya. Untuk menjamin kontinuitas suplai beban dengan tegangan yang stabil terlepas dari dinamika iradiasi dan *State of Charge* (SoC) baterai, sistem menggunakan *Boost Converter* yang diatur oleh kendali *Proportional-Integral* (PI). Pengujian sistem dilakukan melalui simulasi MATLAB/Simulink dengan memberikan variasi iradiasi matahari secara dinamis (600 W/m^2 , 800 W/m^2 , dan 1000 W/m^2) pada beban konstan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa strategi *direct-coupled* mampu mengatur transisi aliran daya pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*) baterai secara natural dan mulus. Selain itu, *Boost Converter* dengan kendali PI berhasil mempertahankan tegangan keluaran secara kokoh pada target 450 VDC di seluruh skenario pengujian, membuktikan keandalan sistem dalam menjamin kontinuitas suplai kelistrikan beban.

Abstract. The utilization of solar energy through a stand-alone (*islanding*) direct current (DC) microgrid system is an ideal solution for electrification in remote areas. However, photovoltaic (PV) output power has a major drawback in the form of extreme fluctuations due to variations in solar irradiation levels, which can cause power supply instability. This study proposes an energy management and voltage regulation strategy in a DC microgrid using a direct-coupled battery configuration. The maximum power point (MPPT) of the PV is extracted using a 2-Phase Interleaved Buck Converter based on the Perturb and Observe (P&O) algorithm. The battery is connected directly to form an Intermediate DC Bus to naturally absorb power fluctuations from the solar panels. To ensure the continuity of the load supply with a stable voltage regardless of irradiation dynamics and battery State of



Copyright © [JITET](http://www.jitet.org) (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

Charge (SoC), the system utilizes a Boost Converter regulated by Proportional-Integral (PI) control. System testing was carried out through MATLAB/Simulink simulations by providing dynamic variations in solar irradiation (1000 W/m², 800 W/m², and 600 W/m²) at a constant load. The simulation results show that the direct-coupled strategy is capable of managing the transition of battery charging and discharging power flows naturally and seamlessly. Furthermore, the Boost Converter with PI control successfully maintained the output voltage robustly at the target of 450 VDC across all test scenarios, proving the system's reliability in ensuring load electricity supply continuity.

1. PENDAHULUAN

Seiring dengan peningkatan populasi dan pertumbuhan ekonomi di Indonesia, kebutuhan terhadap energi listrik juga terus meningkat tajam. Di sisi lain, menipisnya cadangan bahan bakar fosil mendorong transisi menuju pemanfaatan sumber energi terbarukan. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) menyatakan bahwa Indonesia memiliki potensi energi surya yang sangat masif, mencapai lebih dari 3.200 GW, mengingat posisinya yang berada di garis khatulistiwa dengan paparan sinar matahari sepanjang tahun [1]. *Microgrid* arus searah (*direct current*, DC) merupakan salah satu pendekatan terbaik untuk mengintegrasikan sumber energi terbarukan seperti panel surya guna mengatasi peningkatan permintaan beban listrik [2]. Dibandingkan dengan *microgrid* arus bolak-balik (AC) maupun *hybrid* (AC/DC), *microgrid* DC dinilai lebih unggul karena tidak memerlukan sinkronisasi frekuensi maupun daya reaktif, sehingga memiliki keandalan, struktur yang lebih sederhana, dan efisiensi konversi yang lebih tinggi [3], [4].

Di masa mendatang, sistem *microgrid* DC yang ditenagai oleh energi terbarukan diharapkan mampu beroperasi secara mandiri (*stand-alone* atau *islanded mode*) tanpa bergantung pada jaringan utilitas utama [5]. Skema ini sangat ideal untuk diimplementasikan di daerah terpencil atau kepulauan yang tidak terjangkau oleh jaringan listrik nasional. Namun, karena banyak konverter elektronika daya yang terhubung ke bus DC untuk menyuplai beban, diperlukan strategi kendali yang sangat presisi untuk menjaga stabilitas tegangan *microgrid* [6].

Panel surya (*photovoltaic*, PV) bekerja dengan mengonversi energi foton dari matahari secara langsung menjadi energi listrik DC.

Meskipun menjanjikan, daya keluaran yang dihasilkan oleh panel surya sangat fluktuatif dan sangat bergantung pada kondisi lingkungan, terutama tingkat iradiasi matahari dan suhu [7]. Perubahan cuaca, seperti awan mendung yang lewat, dapat menyebabkan daya keluaran turun secara drastis dalam hitungan detik. Untuk mengatasi hal ini, diperlukan teknologi yang dapat memaksimalkan penyerapan daya, yaitu algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Salah satu metode yang paling andal adalah algoritma *Perturb and Observe* (P&O) yang memanipulasi nilai *duty cycle* pada konverter di sisi PV secara terus-menerus guna menjaga titik operasi panel surya selalu berada pada daya maksimumnya [8], [9].

Meskipun sistem telah dilengkapi dengan MPPT, penggunaan panel surya tanpa sistem penyimpanan energi tetap akan menyebabkan terputusnya suplai daya ke beban pada saat malam hari atau ketika iradiasi matahari sangat rendah [10]. Oleh karena itu, *microgrid* DC membutuhkan sistem penyimpanan energi cadangan berupa baterai. Untuk menyederhanakan arsitektur kendali, integrasi baterai dapat dilakukan menggunakan konfigurasi *direct-coupled*, di mana terminal baterai terhubung secara langsung membentuk *Intermediate DC Bus* [11], [12]. Pada konfigurasi ini, tegangan dibiarkan berfluktuasi mengikuti *State of Charge* (SoC) baterai, sementara manajemen aliran daya (pengisian atau pengosongan baterai) terjadi secara natural berdasarkan Hukum Arus Kirchhoff (KCL) [13].

Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang mengkaji sistem *microgrid* DC otonom [14]. Namun, penerapan arsitektur *direct-coupled* sering kali menghadapi tantangan terkait kualitas daya yang disuplai ke beban akibat

fluktuasi tegangan baterai [15]. Oleh karena itu, makalah ini berfokus pada perancangan strategi manajemen energi yang tangguh. Sistem menggunakan *2-Phase Interleaved Buck Converter* untuk mengekstraksi daya PV ke bus baterai, yang kemudian tegangan akhirnya dinaikkan dan distabilkan secara ketat menggunakan *Boost Converter* dengan kendali *Proportional-Integral* (PI). Tujuan utama dari penelitian ini adalah memastikan kontinuitas suplai daya dan stabilitas tegangan akhir pada target 450 VDC, terlepas dari adanya variasi ekstrem pada iradiasi matahari.

Oleh karena itu, makalah ini berfokus pada penyelesaian masalah tersebut dengan merancang sistem regulasi tegangan *microgrid* DC berbasis panel surya dan baterai menggunakan arsitektur *direct-coupled*. Untuk menjamin tegangan pasokan yang stabil, sebuah *Boost Converter* diimplementasikan di sisi beban dan dikendalikan menggunakan sistem kendali *Proportional-Integral* (PI) yang ditala secara optimal. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk memastikan kontinuitas suplai daya dan mengunci stabilitas tegangan keluaran secara absolut pada target 450 VDC, terlepas dari adanya variasi transisi ekstrem pada tingkat iradiasi matahari.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Panel Surya Fotovoltaik

Panel surya atau *photovoltaic* (PV) merupakan perangkat semikonduktor yang mengonversi energi foton dari cahaya matahari menjadi energi listrik arus searah (DC). Karakteristik keluaran daya dari panel surya bersifat non-linear dan sangat bergantung pada dua parameter lingkungan utama, yaitu tingkat iradiasi matahari (W/m^2) dan suhu lingkungan (C^o) [1], [7]. Hubungan antara arus dan tegangan pada sel surya membentuk kurva karakteristik I-V dan P-V, di mana terdapat satu titik puncak operasi yang menghasilkan daya maksimum, yang dikenal sebagai *Maximum Power Point* (MPP) [9]. Perubahan iradiasi secara drastis akan berbanding lurus dengan perubahan arus hubung singkat (I_{sc}), sedangkan perubahan suhu berdampak pada penurunan tegangan tegangan sirkuit terbuka (V_{sc}).

2.2 2-Phase Interleaved Buck Converter

Interleaved Buck Converter (IBC) merupakan pengembangan dari buck konverter

konvensional. Topologi ini terdiri dari dua rangkaian *buck converter* yang dirangkai secara paralel, di mana sakelar semikonduktornya dioperasikan dengan beda fasa sebesar 180^o [7]. Persamaan tegangan output V_o terhadap tegangan input V_{in} dengan *duty cycle* (D) tetap mengikuti karakteristik buck:

$$V_o = D \cdot V_{in} \quad (1)$$

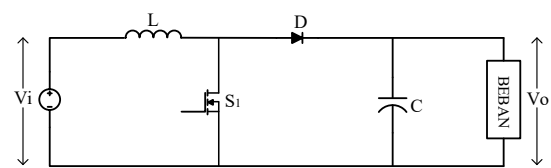
Sedangkan untuk arus induktor pada masing-masing fase L_1 dan L_2 , ripple arus ΔI_L dapat dihitung dengan:

$$\Delta I_L = \frac{V_o(1-D)}{L \cdot f_{sw}} \quad (2)$$

2.3 Konverter Boost

Konverter *Boost* merupakan topologi konverter DC-DC yang berfungsi untuk menaikkan tegangan keluaran (V_o) menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan tegangan masukan (V_i) [8]. Secara umum, konverter ini bekerja dengan memanfaatkan sifat penyimpanan energi pada komponen induktor (L) saat komponen pensaklaran dalam kondisi tertutup (*on-state*) dan melepaskannya ke beban saat komponen pensaklaran terbuka (*off-state*).

Konverter *boost* terdiri atas induktor (L), komponen sakelar aktif seperti MOSFET atau *insulated-gate bipolar transistor* (IGBT) (Q), diode sebagai sakelar pasif (D), dan kapasitor (C). Induktor pada rangkaian konverter *boost* digunakan untuk menyimpan energi dalam bentuk arus, sedangkan kapasitor digunakan sebagai filter guna mengurangi riak tegangan keluaran.



Gambar 1 Topologi konverter boost

Pada mode *boost*, hubungan antara tegangan keluaran (V_o) dan tegangan masukan (V_i) ditunjukkan pada persamaan (3) [16].

$$V_o = \frac{V_i}{1-D} \quad (3)$$

Dimana D adalah *duty cycle* dari saklar utama (S_1), V_i adalah tegangan masukan konverter, dan V_o adalah tegangan keluaran konverter. Nilai kapasitor keluaran (C) dan induktor minimal (L_{min}) konverter *boost* dinyatakan dengan (4) dan (5).

$$L_{min} = \frac{(1-D)^2 \cdot D \cdot R}{2 \cdot f} \quad (4)$$

$$C_{min} = \frac{(D \cdot V_{out})}{V_r \cdot R \cdot f} \quad (5)$$

2.4 Algoritma Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) adalah suatu teknik kendali yang dirancang untuk mengekstraksi daya maksimum dari suatu sumber energi yang memiliki karakteristik non-linear [4]. Salah satu metode yang paling umum dan sederhana dalam MPPT adalah algoritma *Perturb and Observe* (P&O). Algoritma ini bekerja berdasarkan prinsip pemberian perturbasi (gangguan) berupa perubahan nilai yang kecil pada tegangan referensi atau siklus kerja (*duty cycle*) secara periodik. Sistem kemudian mengamati perubahan daya keluaran (ΔP) akibat gangguan tersebut. Jika nilai daya mengalami peningkatan ($\Delta P > 0$), maka arah perturbasi selanjutnya akan dipertahankan pada arah yang sama. Sebaliknya, jika daya mengalami penurunan ($\Delta P < 0$), maka arah perturbasi akan dibalik untuk kembali mencari dan mengarah ke titik puncak daya maksimum [9].

2.5 Sistem Kendal Proportional-Integral (PI)

Sistem kendali *Proportional-Integral* (PI) adalah salah satu jenis pengontrol umpan balik (*feedback controller*) yang paling banyak digunakan dalam aplikasi industri dan elektronika daya untuk menjaga suatu variabel keluaran agar tetap stabil pada nilai referensinya (*setpoint*). Kendali PI bekerja dengan cara meminimalkan sinyal galat (*error*), yaitu selisih antara nilai yang terukur dengan nilai referensi. Persamaan matematis dari kendali PI dinyatakan pada Persamaan (6) [5], [6]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (6)$$

dengan $u(t)$ sebagai sinyal keluaran kendali, $e(t)$ adalah galat, K_p adalah konstanta proporsional untuk merespons galat saat ini secara langsung, dan K_i adalah konstanta integral untuk mengeliminasi galat *steady-state* hingga bernilai nol. Pada aplikasi konverter daya, sinyal keluaran $u(t)$ ini umumnya digunakan sebagai sinyal modulasi yang dikomparasikan dengan sinyal pembawa (*carrier wave*) untuk menghasilkan *Pulse Width Modulation* (PWM). Sinyal PWM inilah yang

bertugas mengatur siklus kerja (*duty cycle*) dari sakelar semikonduktor.

2.6 Baterai

Baterai adalah perangkat elektrokimia yang berfungsi menyimpan energi listrik melalui proses reaksi kimia yang bersifat reversibel. Secara elektroteknik, karakteristik dinamis baterai direpresentasikan melalui pemodelan resistansi internal dan sumber tegangan ideal [17]. Parameter fundamental dalam operasional baterai adalah *State of Charge* (SoC), yang menyatakan persentase kapasitas energi aktual yang tersisa relatif terhadap kapasitas maksimum teoretisnya. Secara matematis, perubahan SoC dihitung berdasarkan integral fungsi arus pengisian maupun pengosongan terhadap waktu. Batasan operasional dasar pada sel baterai meliputi tegangan *cut-off* bawah untuk mencegah *deep discharge* dan batas tegangan atas untuk menghindari *overcharge*, di mana pelanggaran terhadap batas-batas ini secara teoretis akan mendegradasi umur pakai sel.

3. METODE PENELITIAN

Bagian ini menguraikan tahapan pelaksanaan penelitian secara komprehensif serta konfigurasi arsitektur sistem *microgrid* arus searah (DC) mode mandiri (*islanded*). Penelitian ini difokuskan pada perancangan, pemodelan, dan pengujian sistem untuk memvalidasi strategi manajemen energi secara alami (*natural power flow*) pada topologi baterai terhubung langsung (*direct-coupled battery*) dengan regulasi tegangan di sisi beban.

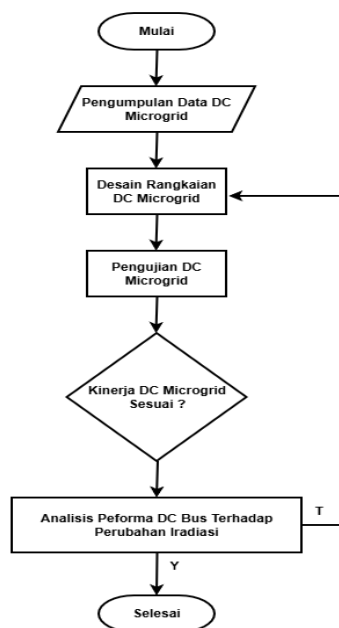
3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan sistematis yang divisualisasikan pada diagram alir di Gambar 3.1.

Tahap pertama dimulai dengan perumusan masalah dan studi literatur mengenai karakteristik panel surya fotovoltaik, *interleaved buck converter*, arsitektur baterai *direct-coupled*, serta sistem kendali lingkaran tertutup (*closed-loop*) pada *boost converter*. Tahap kedua adalah perancangan sistem, yang mencakup perumusan parameter matematis dan desain pemodelan rangkaian *microgrid*. Tahap ketiga adalah pembuatan model pada perangkat lunak MATLAB/Simulink, di mana algoritma *Perturb and Observe* (P&O) untuk MPPT dan

penalaan (*tuning*) konstanta kendali PI diintegrasikan ke dalam sistem.

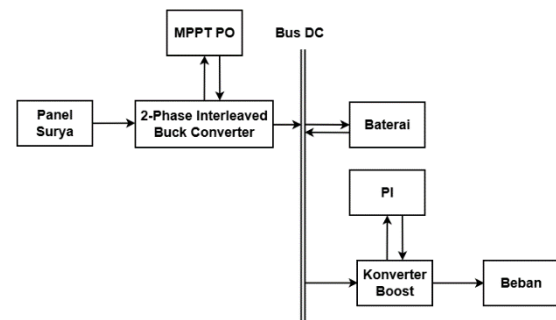
Selanjutnya, dilakukan pengujian sistem. Pada tahap ini, terdapat blok keputusan untuk mengevaluasi apakah sistem berfungsi dengan baik dalam mengatur manajemen aliran daya antara PV dan baterai, sekaligus menjaga stabilitas tegangan keluaran ke beban pada target 450 VDC. Jika terjadi kegagalan atau instabilitas, proses akan dikembalikan ke tahap pembuatan dan perbaikan model. Jika sistem telah terverifikasi stabil, proses dilanjutkan ke tahap pengambilan data berdasarkan skenario pengujian dinamis (fluktuasi tingkat iradiasi matahari). Tahap terakhir adalah analisa data respons manajemen energi dan kualitas tegangan keluaran, yang kemudian diakhiri dengan penarikan kesimpulan.



Gambar 2 Diagram alir penelitian

3.2 Konfigurasi Sistem

Gambar 2 menunjukkan diagram blok perancangan Strategi Manajemen Energi pada DC Microgrid Berbasis PV-Baterai. Sistem ini terdiri atas panel surya fotovoltaik, *2-phase interleaved buck* konverter, konverter *boost*, MPPT, kendali proporsional-integral (PI), baterai, dan beban dc.



Gambar 3 Blok diagram sistem yang diusulkan

Berdasarkan rancangan pada Gambar 2, panel surya bertindak sebagai sumber energi primer. Dayanya diekstraksi maksimal menggunakan *2-phase interleaved buck converter* berbasis algoritma P&O (MPPT), kemudian disalurkan ke *Intermediate DC Bus* tempat baterai terhubung secara langsung (*direct-coupled*).

Untuk menjaga tegangan suplai ke beban agar selalu stabil di angka 450 VDC, sebuah *boost converter* dihubungkan antara bus DC menengah dan beban utama. Konverter ini secara aktif dikendalikan oleh sistem kendali *Proportional-Integral* (PI). Dalam arsitektur ini, ketika daya dari panel surya melebihi permintaan beban, kelebihan daya akan mengalir secara natural untuk mengisi kapasitas baterai (*charging*). Sebaliknya, ketika iradiasi turun dan daya panel surya lebih rendah dari kebutuhan beban, baterai secara otomatis akan melepaskan energinya (*discharging*) untuk menutupi kekurangan daya, sementara kendali PI terus beroperasi menyesuaikan *duty cycle* agar tegangan yang diterima beban tetap stabil.

Secara lebih rinci, penjabaran fungsi, konfigurasi, beserta penentuan parameter untuk masing-masing blok komponen dalam rancangan sistem ini akan dijelaskan sebagai berikut:

A. Panel Surya Fotovoltaik

Susunan panel surya (PV array) berfungsi sebagai sumber energi primer untuk menyuplai beban yang dikondisikan konstan serta mengisi kapasitas baterai. Kapasitas total sistem dirancang berlebih (*oversize*) dengan nilai daya puncak mencapai 6104,5 Wp. Margin kapasitas ini secara khusus disediakan agar pada kondisi iradiasi maksimal (1000 W/m^2), sistem memiliki surplus daya sekitar 4104 W yang dapat dialirkan secara natural untuk pengisian baterai (*charging*), sekaligus sebagai

kompensasi terhadap penurunan efisiensi saat suhu panel meningkat.

Berdasarkan parameter pemodelan, sistem ini menggunakan 20 modul tipe SunPower SPR-305E-WHT-D yang dikonfigurasi ke dalam 10 untai paralel, dengan masing-masing 2 modul terhubung secara seri. Pada kondisi uji standar (STC), konfigurasi persambungan ini mampu menghasilkan tegangan kerja maksimum (V_{mp}) sebesar 109,4 V dan arus kerja maksimum (I_{mp}) sebesar 55,8 A. Nilai tegangan (V_{mp}) sebesar 109,4 V ini dirancang secara spesifik untuk mengakomodasi karakteristik *interleaved buck converter* yang digunakan sebagai antarmuka penurun tegangan, memastikan tegangan PV selalu berada di atas level tegangan operasional baterai guna meminimalisasi rugi-rugi penyaklaran dan riak arus pada induktor.

B. 2-Phase Interleaved Buck Converter dan MPPT

Subsistem ini bertindak sebagai antarmuka penurun tegangan dari panel surya menuju *Intermediate DC Bus*. Berbeda dengan konverter tipe *buck* konvensional, sistem ini mengimplementasikan topologi *Synchronous 2-Phase Interleaved*. Pada topologi ini, digunakan total 4 buah sakelar semikonduktor (MOSFET). Penggunaan 4 MOSFET ini dikarenakan masing-masing fasa beroperasi secara sinkron, di mana setiap fasa memiliki satu MOSFET sisi atas (*high-side switch*) sebagai penyaklar utama dan satu MOSFET sisi bawah (*low-side switch*) sebagai penyearah sinkron yang berfungsi menggantikan peran dioda *freewheeling*. Mengingat arus keluaran susunan panel surya sangat besar (mencapai 55,8 A), penggantian komponen dioda dengan MOSFET bertujuan untuk meminimalkan rugi-rugi konduksi, sehingga efisiensi termal dan daya konverter menjadi jauh lebih tinggi.

Secara prinsip kerja, kedua fasa tersebut dipicu oleh sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) yang digeser sudut fasanya sebesar 180° satu sama lain. Penggeseran fasa ini adalah karakteristik utama dari metode *interleaving*. Interaksi saling melengkapi saat siklus pengisian dan pengosongan energi pada induktor ini menghasilkan fenomena pembatalan riak, sehingga riak arus keluaran kumulatif menjadi sangat halus. Untuk

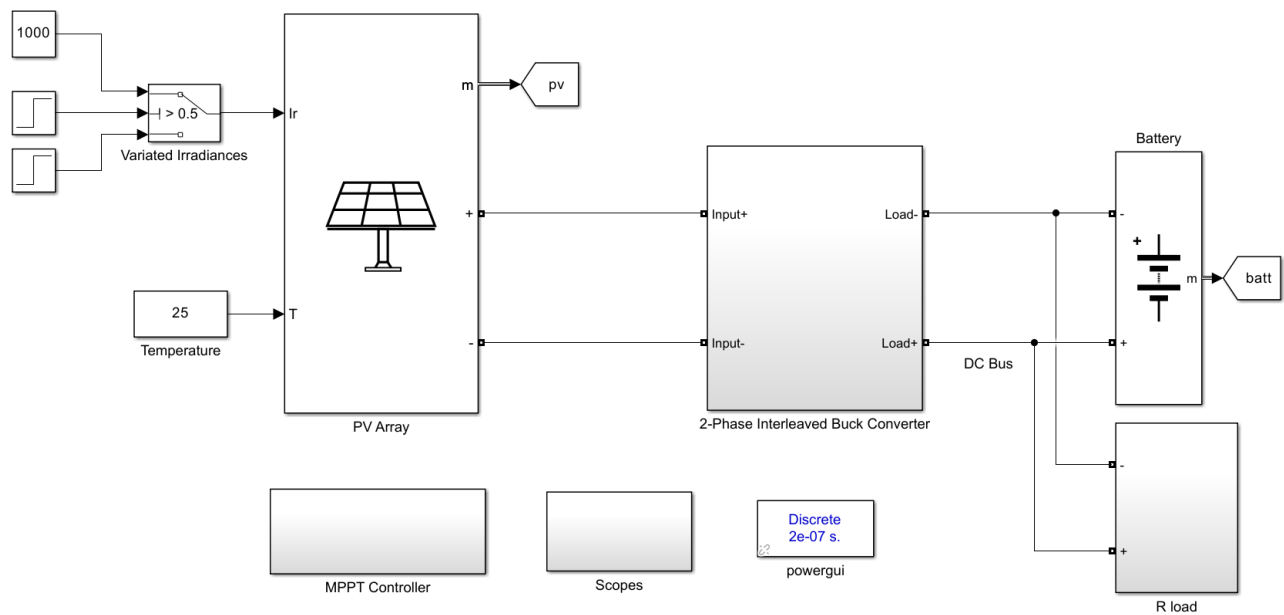
menjamin pembagian arus yang simetris, komponen induktor pada Fasa 1 (L_1) dan Fasa 2 (L_2) dirancang memiliki nilai induktansi yang persis sama, yaitu sebesar 0,00228 H.

Untuk memaksimalkan penyerapan energi, konverter ini diatur sepenuhnya oleh modul pengontrol MPPT berbasis algoritma *Perturb and Observe* (P&O). Algoritma ini bekerja dengan cara membaca data tegangan dan arus panel surya secara kontinu untuk menghitung daya aktual. Selanjutnya, algoritma memberikan perturbasi (gangguan kecil) pada nilai siklus kerja (*duty cycle*). Apabila perturbasi tersebut menghasilkan peningkatan daya, algoritma akan terus menggeser nilai *duty cycle* ke arah yang sama. Sebaliknya, jika daya terdeteksi menurun, arah perturbasi akan dibalik. Nilai *duty cycle* optimal hasil komputasi P&O ini kemudian diproses oleh generator PWM dan dipecah menjadi dua sinyal pemicu yang berbeda fasa 180° untuk mengendalikan keempat sakelar MOSFET secara sinkron.

C. Sistem Baterai (*Intermediate DC Bus*)

Dalam pemodelan ini, sistem penyimpanan energi menggunakan jenis baterai *Lithium-Ion* (Li-Ion). Pemilihan tipe ini didasarkan pada karakteristik rasio kepadatan energi yang tinggi dan laju pengosongan mandiri (*self-discharge*) yang sangat rendah. Berdasarkan parameter simulasi, blok baterai diatur memiliki tegangan nominal sebesar 350 VDC dengan kapasitas terukur (*rated capacity*) sebesar 2 Ah. Kapasitas ini setara dengan daya simpan total sebesar 700 Wh. Baterai ini juga dikonfigurasi dengan waktu respons (*response time*) sebesar 30 detik guna menyimulasikan inersia dinamis elektrokimia baterai secara lebih realistis saat merespons transisi pengisian maupun pengosongan arus secara fluktuatif.

Nilai tegangan nominal 350 VDC ini sekaligus mendefinisikan level tegangan operasional alami pada *Intermediate DC Bus*. Terminal baterai terhubung secara langsung (*hardwired*) tanpa konverter antarmuka tambahan menuju bus tersebut. Manajemen aliran energi beroperasi sepenuhnya



Gambar 4 Model rangkaian simulasi Strategi Manajemen Energi pada DC Microgrid Berbasis PV-Baterai pada Simulink MATLAB.

berdasarkan Hukum Arus Kirchhoff (KCL) secara natural, di mana baterai menyerap sisa arus saat suplai PV berlebih, dan secara otomatis melepaskan arus (*discharging*) saat suplai PV mengalami defisit akibat penurunan iradiasi. Untuk keperluan pengamatan dinamika transisi pada simulasi, persentase kapasitas awal atau *State of Charge* (SoC) baterai dikondisikan secara eksak pada level 50%.

D. Konverter *boost* dan kendali PI

Subsistem ini berfungsi sebagai antarmuka penaik tegangan di sisi konsumen untuk menyesuaikan level tegangan *Intermediate DC Bus* (baterai) yang berfluktuasi menuju target tegangan stabil yang dibutuhkan oleh beban. Pada pemodelan rancangan ini, perangkat keras *boost converter* dikonfigurasi secara spesifik menggunakan komponen pasif berupa induktor penyimpan energi bernilai 5,28 μH dan kapasitor filter keluaran bernilai 100 μF . Nilai induktor sebesar 5,28 μH dirancang untuk menjamin konverter beroperasi pada mode arus kontinu (*Continuous Conduction Mode / CCM*) serta menekan batas riak arus. Sementara itu, kapasitor 100 μF berfungsi untuk menyerap fluktuasi transien serta menghaluskan riak tegangan (*voltage ripple*) keluaran. Untuk memastikan keandalan sistem, konverter ini secara aktif dipandu oleh sistem kendali *Proportional-Integral* (PI) yang terus-menerus membaca galat (*error*) antara tegangan

keluaran aktual dengan referensi tegangan 450 VDC guna menyesuaikan parameter siklus kerja (*duty cycle*).

E. Beban DC (Resistif)

Di terminal paling ujung dari sistem *microgrid*, dipasang sebuah beban kelistrikan arus searah yang direpresentasikan menggunakan komponen resistansi murni bernilai 60 Ω . Dengan adanya regulasi tegangan yang dijaga sangat ketat oleh kendali PI pada angka konstan 450 VDC, secara matematis beban resistif ini akan menarik aliran daya secara konstan sebesar 3375 Watt. Kondisi beban yang dibiarkan statis atau konstan sepanjang simulasi ini dirancang secara spesifik. Pendekatan ini memungkinkan pengujian difokuskan secara penuh untuk mengobservasi dan memvalidasi keandalan bermanuver dari sistem manajemen energi (transisi penyaluran arus antara panel surya dan baterai) ketika menghadapi gangguan fluktuasi cuaca ekstrem di sisi sumber.

3.3 Skenario Pengujian

Fokus utama dari pengujian ini adalah untuk memvalidasi keandalan strategi manajemen aliran daya (*power flow management*) pada topologi *direct-coupled* dalam menghadapi dinamika cuaca siang hari. Pengujian dilakukan dengan mempertahankan beban pada nilai konstan, sementara sistem diberikan gangguan

berupa fluktuasi tingkat iradiasi matahari secara *step*. Skenario pengujian dibagi menjadi tiga tingkat iradiasi:

1. Skenario 1 (Daya PV Surplus / Mode *Charging*)

Merepresentasikan kondisi cuaca cerah terik. Daya keluaran panel surya mencapai nilai puncaknya, menghasilkan surplus daya yang cukup besar untuk menyuplai beban sekaligus mengisi baterai secara maksimal (mode *charging*).

2. Skenario 2 (Daya PV Defisit / Mode Berbagi Daya)

Merepresentasikan kondisi cuaca cerah berawan. Terjadi penurunan produksi daya panel surya. Pengujian ini bertujuan melihat respons transisi baterai ketika laju surplus daya mulai menurun dan mendekati titik keseimbangan pasokan.

3. Skenario 3 (Daya PV Minimum / Mode Baterai Mandiri)

Merepresentasikan kondisi cuaca mendung. Daya keluaran panel surya diproyeksikan jatuh hingga berada di bawah kebutuhan daya beban. Baterai dipaksa beralih mode secara instan menjadi penyuplai (*discharging*) untuk menutupi defisit daya.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini diuraikan hasil uji perancangan sistem regulasi tegangan *microgrid* DC berbasis panel surya-baterai dengan arsitektur *direct-coupled*. Sistem yang dirancang disimulasikan menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink dengan durasi total simulasi selama 6 detik. Model keseluruhan rangkaian simulasi merujuk pada Gambar 4.

Kapasitas susunan panel surya yang digunakan adalah sebesar 6104,5 Wp. Pada penelitian ini, terdapat tiga variasi tingkat iradiasi matahari secara dinamis. Tiap variasi merepresentasikan kondisi cuaca tertentu. Variasi pertama, yang disimulasikan pada interval detik ke-0 hingga ke-2, yaitu dengan nilai iradiasi rendah sebesar 600 W/m². Pada kondisi ini, daya yang dihasilkan oleh panel surya belum mampu menanggung total beban beserta rugi-rugi konverter, sehingga baterai beralih mode secara instan untuk melepaskan daya (*discharging*) guna menutupi defisit pasokan daya tersebut. Variasi kedua berlangsung pada interval detik ke-2 hingga ke-4 dengan nilai iradiasi menengah sebesar 800 W/m². Pada kondisi tingkat iradiasi ini, produksi daya dari panel surya mengalami peningkatan melebihi beban namun surplusnya belum maksimal, sehingga baterai mulai menerima arus pengisian namun dengan laju yang lebih lambat. Pada variasi yang ketiga, yaitu pada interval detik ke-4 hingga ke-6, nilai iradiasi maksimal sebesar 1000 W/m² diberikan. Pada kondisi ini, daya yang dibangkitkan panel surya jauh melebihi tarikan beban, sehingga beban sepenuhnya tersuplai dan kelebihan daya akan secara otomatis digunakan untuk mengisi daya pada baterai (*charging*) secara maksimal.

Pada penelitian ini, pengujian difokuskan dengan mempertahankan nilai beban secara konstan (3375 W). Hal ini bertujuan murni untuk mengobservasi keandalan manuver manajemen aliran energi dan ketangguhan kinerja regulasi tegangan pada *boost converter* saat menghadapi transisi perubahan cuaca di sisi sumber.

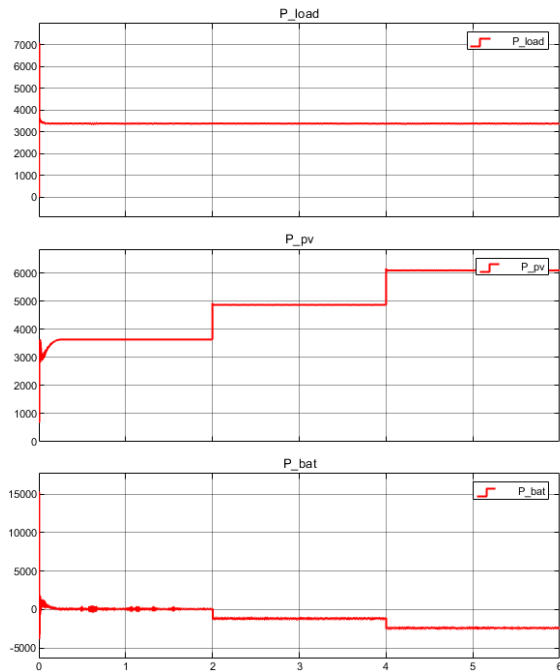
4.1 Analisis Manajemen Aliran Daya

Manajemen aliran energi pada arsitektur ini terjadi secara alami pada terminal *Intermediate*

Tabel 1. Spesifikasi dan Parameter Sistem

Parameter Sistem	Nilai / Keterangan
Panel Surya	
Tipe Modul PV	SunPower SPR-305NE-WHT-D
Konfigurasi Susunan	10 Seri, 2 Paralel (20 Modul)
Kapasitas Daya Total	6104,5 Wp
Tegangan / Arus Maks. (V_{mp} / I_{mp})	328,2 V / 11,16 A
2-Phase Interleaved Buck	
Induktor (L)	0.00228 H
Sistem Baterai	
Tegangan / Kapasitas	350V / 2 Ah
Konverter Boost	
Induktor (L)	5,28 μ H
Kapasitor	100 μ F
Kendali PI	
Target Tegangan Bus DC	450 V
($K_{pv} ; K_{iv}$)	0,035 ; 60/50
Beban Resistif DC	
Beban Nominal	60 Ω

DC Bus yang terhubung langsung dengan baterai. Prinsip keseimbangan daya sistem mematuhi persamaan $P_{PV} - P_{Load_Total} = P_{Battery}$, di mana beban total mencakup daya yang ditarik oleh beban resistif beserta rugi-rugi daya pada konverter. Respons dinamika aliran daya dari ketiga komponen (PV, Beban, dan Baterai) disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5 Kurva aliran daya sistem pada skenario kenaikan iradiasi

1. Interval Skenario 1 ($t = 0 - 2$ detik; Iradiasi 600 W/m^2)

Pada awal simulasi, terdapat kondisi *startup transient* di mana komponen penyimpan energi (induktor dan kapasitor) menarik arus *inrush* yang masif, yang sebagian besar ditanggung oleh baterai. Setelah kondisi mencapai status tunak (*steady state*), algoritma MPPT mengekstraksi daya PV di kisaran 3660 W. Secara teoretis, nilai ini sedikit di atas tarikan beban (3375 W). Namun, dikarenakan adanya kompensasi tambahan untuk rugi-rugi penyaklaran (*switching losses*) dan konduksi, total daya yang ditarik dari *Intermediate DC Bus* melampaui produksi PV. Berdasarkan Hukum Arus Kirchoff (KCL), baterai secara alami turun tangan menutupi defisit tersebut dengan melepaskan daya (*discharging*), yang ditandai dengan kurva baterai bernilai positif.

2. Interval Skenario 2 ($t = 2 - 4$ detik; Iradiasi 800 W/m^2)

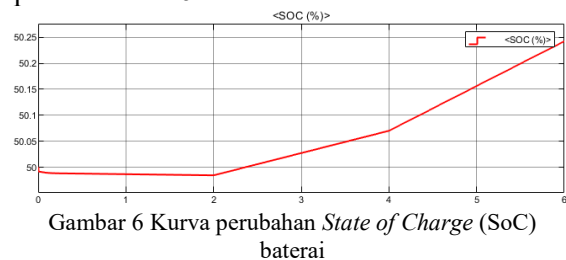
Memasuki detik ke-2, iradiasi dinaikkan menjadi 800 W/m^2 yang merepresentasikan cuaca cerah berawan. Daya keluaran PV melonjak secara signifikan menjadi $\approx 4800 \text{ W}$. Pada titik ini, PV mampu menanggung total beban secara penuh dan memiliki sisa surplus daya. Sistem secara mulus bermanuver membalikkan arah aliran arus baterai. Kurva baterai bergeser melewati garis nol menuju area negatif, mengindikasikan bahwa sistem telah beralih mode menuju pengisian daya (*charging*) dengan laju penyerapan yang lambat.

3. Interval Skenario 3 ($t = 4 - 6$ detik; Iradiasi 1000 W/m^2)

Pada sepertiga akhir simulasi, iradiasi mencapai nilai puncaknya yakni 1000 W/m^2 (cuaca sangat cerah). Daya panel surya meroket hingga mencapai nilai puncaknya di kisaran 6100 W. Lebarnya selisih antara ketersediaan pasokan PV dan tarikan beban menghasilkan surplus daya yang sangat masif di dalam bus DC. Kelebihan daya ini seluruhnya diserap oleh baterai untuk melakukan proses pengisian daya secara maksimal (*fast charging*), terlihat dari kurva baterai yang menekuk tajam ke area negatif.

4.2 Respons Kapasitas Baterai (*State of Charge*)

Dinamika manuver arah aliran arus (dari membuang menjadi menyerap daya) yang sangat fluktuatif pada analisis sebelumnya divalidasi lebih lanjut melalui grafik kapasitas sisa energi baterai atau *State of Charge* (SoC) pada Gambar 6.



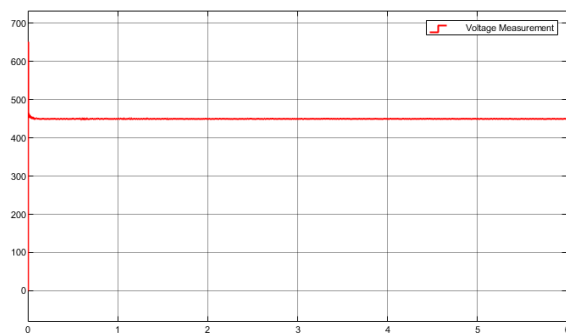
Gambar 6 Kurva perubahan *State of Charge* (SoC) baterai

Simulasi pergerakan baterai diawali dengan level kapasitas 50%. Merujuk pada Gambar 6, pada interval awal ($t = 0 - 2$ detik), kurva SoC menekuk turun sebagai dampak langsung dari

mode *discharging* untuk menyuplai *inrush current* awal serta kompensasi saat defisit daya 600 W/m^2 . Saat iradiasi dinaikkan menjadi 800 W/m^2 pada interval 2 - 4 detik, kemiringan kurva mulai berbelok arah dari yang semula turun menjadi perlahan menanjak, mengonfirmasi keberhasilan sistem melakukan transisi masuk ke mode *charging*. Pada interval 4 - 6 detik, kurva SoC terkonfirmasi meroket naik dengan sudut kemiringan yang curam, sejalan dengan injeksi daya surplus yang masif pada iradiasi maksimal 1000 W/m^2 .

4.3 Analisis Regulasi Tegangan Keluaran Beban

Tujuan akhir dari *microgrid* DC otonom adalah memastikan konsumen menerima pasokan listrik dengan kualitas tegangan yang tangguh dan konstan, tanpa merasakan transisi manuver di sisi baterai maupun fluktuasi cuaca di sisi sumber surya.



Gambar 7 Respons regulasi tegangan keluaran pada bus beban DC

Berdasarkan grafik pada Gambar 7, integrasi *Boost Converter* dan sistem kendali *Proportional-Integral* (PI) menampilkan performa regulasi yang sangat kokoh. Pada masa mula (*startup*), tegangan di sisi beban memang sempat mengalami *overshoot* transien sesaat (menyentuh $\approx 500 \text{ V}$) akibat pengisian arus *inrush* awal pada kapasitor, sebelum akhirnya diredam dengan sigap oleh aksi kontrol PI dalam waktu kurang dari 0,5 detik. Setelah mencapai kondisi *steady state*, tegangan keluaran dikunci rapat hingga membentuk garis lurus absolut pada *setpoint* 450 VDC.

Lebih lanjut, manuver ekstrem yang diakibatkan oleh perubahan berundak pada iradiasi di detik ke-2 dan ke-4—termasuk momen pembalikan arus baterai secara tiba-tiba dari *discharging* menuju *charging*—terbukti

mampu diregulasi seutuhnya. Tidak terdeteksi adanya fenomena kedip tegangan (*voltage sag*) maupun lonjakan ulang (*voltage swell*) yang ditransmisikan ke titik beban akhir. Hal ini secara konklusif memvalidasi tingkat kekokohan (*robustness*) perancangan parameter PI dalam menolak segala bentuk gangguan asimetris yang terjadi di sisi hulu.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, pemodelan, dan simulasi pengujian sistem *microgrid* DC otonom yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi arsitektur *direct-coupled* pada *Intermediate DC Bus* terbukti sangat efektif dan andal dalam menjalankan fungsi manajemen aliran energi secara natural berdasarkan Hukum Arus Kirchhoff. Sistem baterai mampu bertindak sebagai penyangga (*buffer*) yang responsif tanpa memerlukan konverter *bidirectional* maupun logika penyaklaran yang rumit. Hal ini dibuktikan dengan keberhasilan baterai dalam melakukan manuver transisi aliran arus yang sangat mulus (*seamless*) dari mode pengosongan (*discharging*) saat kondisi iradiasi defisit (600 W/m^2) menuju mode pengisian daya (*charging*) saat kondisi iradiasi berlebih (800 W/m^2 dan 1000 W/m^2).

Selain keandalan pada sisi manajemen energi, integrasi *Boost Converter* dengan sistem kendali *Proportional-Integral* (PI) di sisi beban juga menunjukkan tingkat kekokohan (*robustness*) yang sangat memuaskan. Kendali PI terbukti sigap meredam *overshoot* transien pada awal penyalaan dalam waktu kurang dari 0,5 detik. Lebih lanjut, manuver aliran arus yang berbalik arah secara instan akibat fluktuasi cuaca ekstrem sama sekali tidak mendegradasi kualitas daya. Tegangan suplai berhasil dikunci secara absolut pada target referensi 450 VDC tanpa memicu terjadinya fenomena kedip tegangan (*voltage sag*) sekecil apa pun, sehingga kontinuitas dan keandalan pasokan listrik ke titik beban konsumen terjamin secara penuh.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. S. Ahmad, "Potensi dan Pemanfaatan Energi Surya di Indonesia untuk Mendukung Transisi Energi Nasional," *Jurnal Energi Terbarukan*, vol. 5, no. 2, pp. 45-52, 2021.

- [2] A. Hamza, H. Bin Tahir, K. Siraj, and M. Nasir, "Hybrid ac/dc microgrid for residential applications," in *2019 IEEE 3rd Int. Conf. DC Microgrids (ICDCM)*, 2019, pp. 1-5.
- [3] S. Pannala, N. Patari, A. K. Srivastava, and N. P. Padhy, "Effective control and management scheme for isolated and grid connected dc microgrid," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 56, no. 6, pp. 6767-6780, 2020.
- [4] V. F. Pires, A. Pires, and A. Cordeiro, "DC microgrids: Benefits, architectures, perspectives and challenges," *Energies*, vol. 16, no. 3, p. 1217, 2023.
- [5] N. Qachchachi, H. Mahmoudi, and A. E. Hassnaoui, "Control strategy of hybrid ac/dc microgrid in standalone mode," *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 9, no. 2, pp. 295-301, 2020.
- [6] S. Abdullahi, T. Jin, and P. M. Lingom, "Robust control strategy for inductive parametric uncertainties of dc/dc converters in islanded dc microgrid," *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 11, no. 1, pp. 335-344, 2023.
- [7] H. -H. Shin, S. -J. Choi, dan J. -W. Kim, "A New Control Strategy of the Solar Buck Battery Charger using the Interleaved Ampere-Sec Balance Control," in *2024 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2024, pp. 1-6.
- [8] M. S. Simoiu *et al.*, "BOOST converter modelling as a subsystem of a photovoltaic panel control system," in *2020 IEEE Int. Conf. Autom. Qual. Test. Robot. (AQTR)*, 2020, pp. 1-6.
- [9] Z. Efendi, *et al.*, "A Maximum Power Point Tracking Technique Using Modified Hill Climbing (MHC) Method In DC Microgrid Application," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2228, no. 1, 030007, 2020.
- [10] H. Chen, "Lithium-ion battery-supercapacitor energy management for dc microgrids," *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 17, pp. 1452-1458, 2022.
- [11] M. Effendy, M. Ashari, dan H. Suryoatmojo, "PV Generation-Energy Storage Coordination with Adaptive Droop Control in Isolated DC Microgrid," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 19, no. 3, pp. 655-669, 2023.
- [12] M. Ilman, U. S. Septiani, and N. M. Mulyono, "Desain Dan Implementasi Konverter DC-DC Buck Dengan Daya Keluaran 50W," *JITET (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan)*, vol. 13, no. 3S1, 2025.
- [13] F. Farhan and B. Sujanarko, "Pengaruh frekuensi dan duty cycle pada ripple tegangan buck converter," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 9, no. 1, pp. 51-61, 2022.
- [14] V. Patel and V. Patel, "A comprehensive review: Ac & dc microgrid protection," in *21st Natl. Power Syst. Conf. (NPSC)*, 2020, pp. 1-6.
- [15] A. Anggawan and M. Yuhendri, "Implementasi kendali tegangan output buck converter berbasis Simulink Matlab," *Jurnal Teknik Elektro dan Informatika (JTEIN)*, vol. 2, no. 1, pp. 34-39, 2020.
- [16] R. Ardhenta, D. O. Anggriawan, M. F. N. Tajuddin, and A. A. Riza, "Application of direct MRAC in PI controller for DC-DC boost converter," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, vol. 11, no. 3, pp. 1205-1212, 2020.
- [17] M. A. Hannan, M. S. H. Lipu, A. Hussain, and A. Mohamed, "A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 834-854, 2017.