

Regulasi Tegangan Arus Searah Turbin Angin dan Baterai untuk *Microgrid*

Sidiq Budi Perkasa¹, Mochammad Facta¹, Iwan Setiawan¹

¹ Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, Jawa Tengah 50275, Indonesia

[Diserahkan: 9 Juli 2024, Direvisi: 23 September 2024, Diterima: 4 November 2024]
Penulis Korespondensi: Sidiq Budi Perkasa (email: sidiqbudi22@gmail.com)

INTISARI — Di masa depan, energi terbarukan akan menggantikan energi fosil. *Microgrid* arus searah (*direct current*, dc) memiliki kemampuan untuk beroperasi secara mandiri tanpa terhubung ke jaringan utilitas. Turbin angin, generator sinkron magnet permanen (*permanent magnet synchronous generator*, PMSG), penyearah, konverter dc-dc *boost*, konverter dc-dc *bidirectional*, baterai, dan *maximum power point tracking* (MPPT) dapat dimasukkan ke dalam konfigurasi sistem *microgrid* dc. Sistem dengan komponen kompleks tersebut memiliki tantangan untuk menjaga tegangan dc tetap stabil ketika terjadi perubahan beban maupun perubahan kecepatan angin. Makalah ini berfokus pada perbaikan kinerja *microgrid* dc dengan menambah kendali tegangan untuk memenuhi permintaan beban tersebut dan menjaga stabilitas tegangan dc yang konstan. Pengujian dilakukan dengan tiga kondisi. Pada kondisi pertama, turbin angin dapat menyuplai beban dan baterai; pada kondisi kedua, turbin angin dan baterai menyuplai beban; sedangkan pada kondisi ketiga, beban sepenuhnya disuplai oleh baterai. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa kinerja sistem yang dirancang dapat memenuhi permintaan beban dan untuk mengisi baterai. Ketika pembangkitan dari turbin angin tidak dapat memenuhi permintaan beban, baterai dan turbin angin dapat menyuplai beban. Dengan deviasi hanya 1%, sistem dapat mempertahankan tegangan pada bus dc sebesar 400 V. Menurut referensi IEC 61000-14-17, nilai ini masih dalam batas toleransi beban yang dapat diterima.

KATA KUNCI — Baterai, MPPT, Kendali PI, Konverter, Turbin Angin, *Microgrid* Arus Searah.

I. PENDAHULUAN

Ketika populasi Indonesia meningkat, kebutuhan listrik juga meningkat. Salah satu sumber daya energi terbarukan terbesar adalah energi angin. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) menyatakan bahwa Indonesia memiliki potensi 60,65 GW energi angin. Ini karena Indonesia adalah negara kepulauan dengan banyak wilayah pesisir yang memiliki potensi yang tepat untuk pembangkit energi listrik. *Microgrid* arus searah (*direct current*, dc) adalah cara yang bagus untuk memanfaatkan sumber energi terbarukan dan merupakan solusi yang baik untuk mengatasi peningkatan permintaan beban listrik [1]. Terdapat beberapa jenis *microgrid*, di antaranya *microgrid* arus bolak-balik (*alternating current*, ac), *microgrid* dc, dan gabungan *microgrid* (ac/dc). *Microgrid* dc lebih unggul daripada *microgrid* ac karena mempunyai banyak kelebihan, sehingga *microgrid* dc banyak mendapat perhatian untuk dikembangkan [2], [3].

Kelebihan *microgrid* dc adalah sistem yang lebih andal, struktur lebih sederhana, kinerja lebih baik, dan efisiensi konverter yang lebih tinggi [4], [5]. Di masa mendatang, energi terbarukan akan menjadi sumber listrik menggantikan energi fosil. *Microgrid* dapat beroperasi secara mandiri tanpa terhubung ke jaringan utilitas. Teknik ini umum digunakan di daerah yang tidak terjangkau oleh jaringan utilitas. Namun, untuk meningkatkan kinerja *microgrid* dc, strategi kendali yang ideal untuk konverter dc-dc diperlukan. Hal ini disebabkan oleh banyak konverter dalam *microgrid* dc terhubung secara paralel untuk menyuplai beban [6].

Salah satu sumber energi terbarukan yang paling menjanjikan adalah energi angin. Energi kinetik angin diubah menjadi energi listrik menggunakan turbin angin, melalui rotor berputar yang terhubung ke generator. Turbin angin ini dapat dipasang di berbagai lokasi, dari daratan hingga perairan lepas pantai, tergantung pada desain dan kapasitasnya. Dengan karakteristik angin yang berubah-ubah, daya yang dapat

diserap oleh pembangkit listrik tenaga angin bereaksi lebih lambat. Akibatnya, daya maksimum menjadi lebih sulit untuk dipertahankan [7]. Berbagai upaya dapat dilakukan untuk pengoptimalan turbin angin, mulai dari bilah, generator, hingga pengendali. Turbin angin membutuhkan teknologi yang dapat meningkatkan keandalan sistem dalam kondisi angin yang berubah-ubah. Salah satu teknologi yang dapat meningkatkan keandalan sistem adalah pengendali *maximum power point tracking* (MPPT). MPPT menjejak daya yang dihasilkan turbin angin agar berada pada titik maksimum dalam kondisi angin yang berubah-ubah [8]. Salah satu metode MPPT yang paling banyak digunakan adalah *perturb & observe* (P&O). Algoritma P&O memanipulasi nilai *duty cycle* konverter untuk meningkatkan atau menurunkan tegangan turbin angin secara terus-menerus berdasarkan nilai daya sebelumnya hingga mencapai titik daya maksimum (*maximum power point*).

Konverter dc-dc mengatur aliran energi dari sumber energi terbarukan ke beban dan menyimpan energi pada *microgrid* dc. Ketika *microgrid* dc menggunakan turbin angin tanpa penyimpanan energi, suplai energi ke beban akan terputus walaupun MPPT digunakan untuk menghasilkan daya keluaran maksimum. Akibatnya, sistem *microgrid* membutuhkan teknologi yang dapat meningkatkan keandalan sistem. Solusinya adalah dengan menyediakan teknologi penyimpanan energi listrik dari sumber energi cadangan [9], [10]. Untuk meningkatkan keandalan sistem *microgrid*, konverter dc-dc *bidirectional* yang memiliki baterai sebagai penyimpanan energi dapat digunakan untuk menyimpan energi yang dihasilkan oleh turbin angin. Konverter dc-dc *bidirectional* mempunyai dua mode kerja, yaitu mode pengisian baterai dan mode pengosongan baterai [11]. Baterai akan menyimpan kelebihan energi ketika kapasitasnya menghasilkan lebih banyak energi daripada permintaan beban. Sebaliknya, ketika kapasitasnya menghasilkan lebih sedikit energi daripada permintaan beban, energi yang disimpan dalam baterai akan digunakan. Dengan

demikian, makalah ini memiliki tantangan untuk menjaga suplai daya ke beban tetap stabil ketika terjadi perubahan beban maupun perubahan kecepatan angin.

Terdapat beberapa penelitian terdahulu mengenai konfigurasi *microgrid* dc dan desain konverter. Dalam karya ilmiah, para peneliti telah menyelidiki berbagai sumber energi terbarukan, seperti hidro, matahari, angin, pasang surut, biomassa, biogas, dan panas bumi [12]-[14]. Karena sifat stokastik sumber energi terbarukan, penggunaan sumber energi tersebut memerlukan kombinasi perangkat penyimpanan. Secara umum, temuan penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa konverter dc-dc *bidirectional* yang dioptimalkan dengan algoritma dapat meningkatkan efisiensi [15], [16]. Berdasarkan penelitian sebelumnya, metode kendali pasif pada konverter dc-dc *bidirectional* yang terhubung ke baterai untuk regulasi tegangan dalam *microgrid* dc tidak dapat merespons secara dinamis perubahan beban [17].

Pada penelitian ini, dirancang sebuah sistem regulasi tegangan *microgrid* dc berbasis turbin angin-baterai dengan topologi *bidirectional* menggunakan kendali tegangan berbasis PI untuk menjamin kestabilan tegangan dan memenuhi kebutuhan beban.

II. KONFIGURASI SISTEM

Gambar 1 menunjukkan diagram blok perancangan sistem regulasi tegangan *microgrid* dc berbasis turbin angin-baterai. Sistem ini terdiri atas turbin angin, generator sinkron magnet permanen (*permanent magnet synchronous generator*, PMSG), penyearah, konverter *boost*, konverter dc-dc *bidirectional*, MPPT, kendali proporsional-integral (PI), baterai, dan beban dc.

A. TURBIN ANGIN

Pemanasan bumi oleh matahari yang tidak merata mengakibatkan energi angin menjadi alternatif yang dapat dimanfaatkan manusia untuk menghasilkan listrik [18]. Turbin angin, juga dikenal sebagai kincir, adalah alat yang dapat mengubah energi alternatif seperti angin menjadi energi listrik. Prinsip kerja turbin angin adalah bahwa kecepatan angin menghasilkan energi mekanik (rotasi), yang kemudian digunakan sebagai penggerak generator. Jumlah daya angin yang ditangkap oleh turbin bergantung pada ukuran bilah turbin dan kecepatan angin di suatu area [18]. Persamaan (1) dapat digunakan untuk menghitung daya angin (P_w).

$$P_w = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho v^3 \quad (1)$$

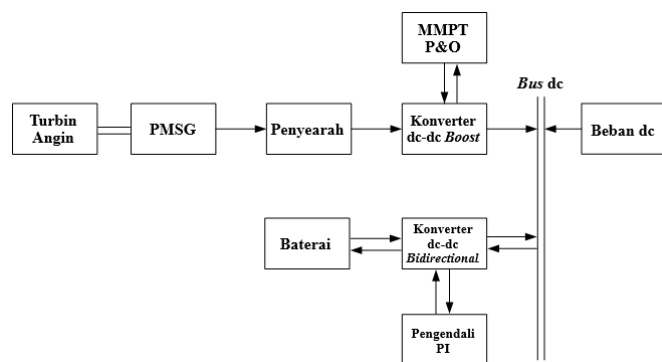
dengan R adalah jari-jari turbin angin, ρ adalah kerapatan udara, dan v adalah kecepatan angin. Persamaan (2) dapat digunakan untuk merumuskan daya mekanik (P_m) yang dihasilkan.

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \pi R^2 \rho v^3 \quad (2)$$

dengan C_p adalah koefisien daya (%) [18].

Efisiensi maksimal turbin angin adalah 0,57, menurut batas Betz. Koefisien daya (C_p) dan rasio kecepatan (*tip speed ratio*, TSR) (λ) menentukan daya mekanik. TSR adalah rasio kecepatan turbin dan angin, sedangkan koefisien daya adalah rasio daya mekanik dan daya angin [18]. Persamaan (3) digunakan untuk menghitung koefisien daya (C_p), sedangkan TSR (λ) dapat dihitung menggunakan (4).

$$C_p = \frac{P_m}{P_w} \quad (3)$$



Gambar 1. Diagram blok sistem.

$$\lambda = \frac{\omega_w R}{v} \quad (4)$$

Parameter yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel I. Daya keluaran mekanisnya adalah 3.000 W, kecepatan angin dasar 12 m/s, daya maksimum pada kecepatan angin dasar adalah 1 p.u., sedangkan kecepatan putar dasar generator adalah 1,3 p.u. Sudut *pitch* yang digunakan adalah 0°.

B. PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR (PMSG)

Generator adalah alat yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Jika tegangan (V) dan arus (I) sama, generator mengubah torsi (T) dan kecepatan putar rotor (ω). Saat digunakan pada turbin angin dengan kapasitas daya rendah hingga menengah, PMSG biasanya menghasilkan listrik ac 3 fase. Pada penelitian ini, digunakan *preset* model nomor 6 pada Simulink MATLAB. Parameter generator PMSG yang digunakan ditunjukkan pada Tabel II.

C. PENYEARAH

Penyearah gelombang terdiri atas diode dan berfungsi sebagai pengubah gelombang ac menjadi dc. Setengah gelombang dilewatkan oleh sebuah diode ketika arus bolak-balik melewatinya dan setengah gelombang lainnya diblok [19]. Dalam desain sistem ini, penyearah setengah gelombang digunakan dengan satu diode untuk menghentikan sisi sinyal negatif dari gelombang keluaran PMSG ac dan melewatkan sisi sinyal positif. Selanjutnya, parameter penyearah yang digunakan yaitu tahanan *snubber* sebesar 100.000 Ω , tegangan maju sebesar 0,8 V, perangkat elektronik daya menggunakan diode, dan lengan jembatan sebanyak tiga.

D. KONVERTER BOOST

Salah satu jenis konverter arus searah adalah konverter topologi dc-dc *boost* yang meningkatkan tegangan masukan menjadi tegangan keluaran yang lebih tinggi. 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 [20]. Gambar 2 menunjukkan model rangkaian konverter *boost*. Parameter konverter *boost* yang digunakan adalah frekuensi penyakelaran (f_s) sebesar 5.000 Hz, induktor (L) sebesar 0,0750 H, dan kapasitor (C) sebesar 0,46875 F.

Pada mode *buck*, hubungan antara tegangan keluaran (V_o) dan tegangan masukan (V_s) ditunjukkan pada (5).

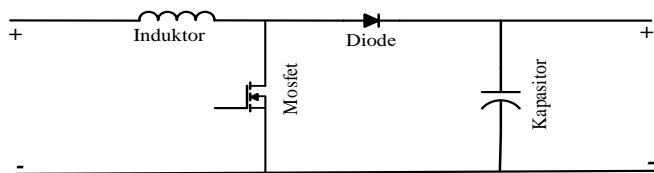
$$V_o = 1 - \frac{V_s}{D} \quad (5)$$

TABEL I
PARAMETER TURBIN ANGIN

Parameter	Nilai
Daya keluaran nominal	3.000 W
Daya dasar generator listrik	3.000/0,9 VA
Kecepatan angin dasar	12 m/s
Daya maksimum pada kecepatan angin dasar dari daya mekanik nominal	1 p.u.
Kecepatan putaran dasar generator	1,3 p.u.
Beta untuk menampilkan karakteristik daya turbin angin	0°

TABEL II
PARAMETER PMSG

Parameter	Nilai
Jumlah fase	3
Gelombang <i>electromotive force</i> (EMF)	Sinusoidal
Tipe rotor	Round
Masukan mekanis	Torsi (T_m)
Resistansi fase stator	0,4578 Ω
Induktansi armatur	0,00334 H
Tegangan dc	300 V
Kecepatan putar	2.300 rpm
Torsi	10 Nm-14,2 Nm



Gambar 2. Rangkaian konverter boost.

Nilai kapasitor keluaran (C) dan induktor minimal (L_{min}) konverter *buck* dinyatakan dengan (6) dan (7).

$$L_{min} = \frac{(1-D)^2 \cdot D \cdot R}{2 \cdot f} \quad (6)$$

$$C_{min} = \frac{D \cdot V_{out}}{V_r \cdot R \cdot f} \quad (7)$$

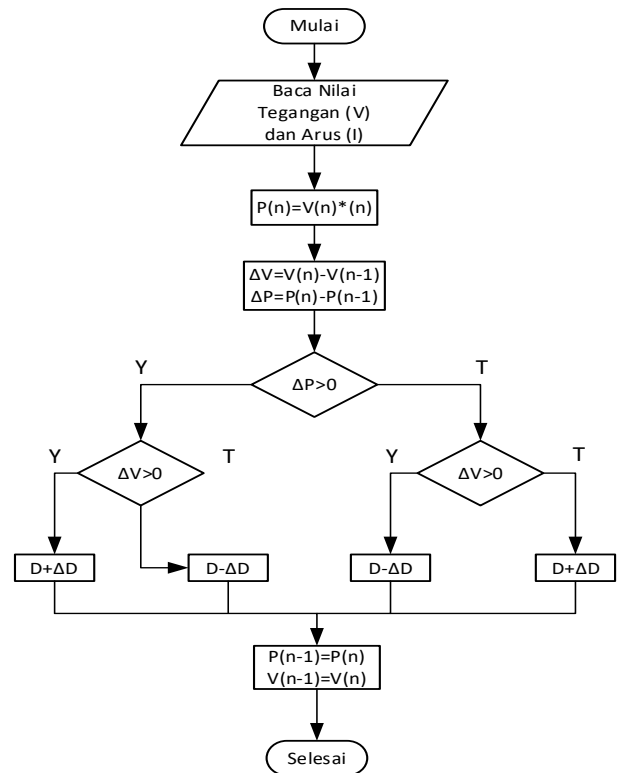
E. ALGORITMA PERTURB AND OBSERVE (P&O)

Untuk memaksimalkan pemanenan daya dari sumber energi terbarukan, metode pemantauan MPPT sering digunakan dalam pembangkit tenaga angin. MPPT digunakan untuk mengoptimalkan tegangan generator melalui penyearah di lokasi konverter *boost* [21]. Prinsip kerja MPPT P&O ditunjukkan pada Gambar 3.

Algoritma yang digunakan memiliki sifat iteratif, yaitu perhitungan dan penyesuaian nilai dilakukan secara berulang. Proses iterasi ini memungkinkan sistem untuk secara adaptif merespons perubahan kondisi operasi. Algoritma ini dimulai dengan membaca nilai tegangan (V) dan arus (I) sebagai masukan. Selanjutnya, daya (P) dihitung, diikuti oleh perhitungan perubahan tegangan (ΔV) dan perubahan daya (ΔP) untuk setiap iterasi. Berdasarkan nilai ΔV dan ΔP , algoritma akan menyesuaikan nilai *duty cycle* (D) yang optimal. Proses ini akan berulang terus-menerus hingga titik daya maksimum terpenuhi.

F. KONVERTER DC-DC BIDIRECTIONAL

Konverter dc-dc *bidirectional* dapat mengalirkan daya dari sisi sumber ke sisi beban atau sebaliknya [22]. Konverter dc-dc *bidirectional* memiliki perbedaan dengan konverter dc-dc seperti konverter *buck* dan konverter *boost*. Hal ini terjadi karena konverter *bidirectional* tidak memiliki diode yang mencegah aliran arus berbalik arah.



Gambar 3. Prinsip kerja metode P&O.

1) MODE BUCK

Konverter dc-dc *bidirectional* bekerja seperti konverter *buck* biasa pada mode ini. Tegangan keluaran memiliki nilai yang lebih kecil daripada tegangan masukan. Hubungan antara tegangan keluaran (V_o) dengan tegangan masukan (V_s) pada mode *buck* dinyatakan dengan (8).

$$V_o = V_s \times D \quad (8)$$

Nilai kapasitor keluaran (C) dan induktor minimal (L_{min}) pada konverter *buck* dinyatakan dengan (9) dan (10) [15].

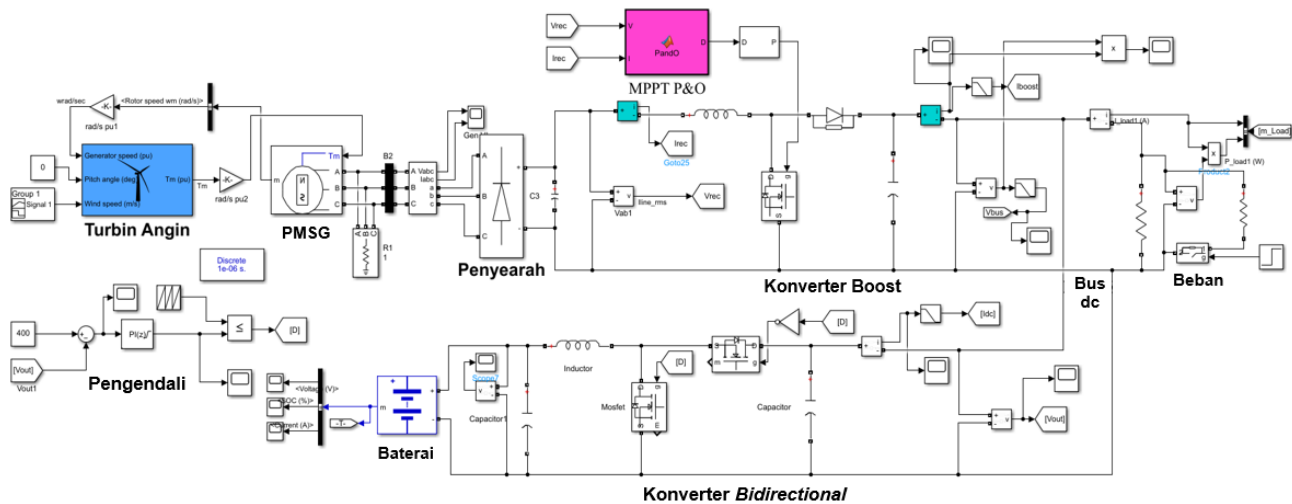
$$L_{min} = \frac{(1-D) \times R}{2 \times f_s} \quad (9)$$

$$C_{min} = \frac{\Delta Q}{\Delta V_o} = \frac{\Delta I_L \times T}{8 \Delta V_o} = \frac{\Delta I_L}{8 \times f_s \times \Delta V_o} \quad (10)$$

2) MODE BOOST

Pada mode ini, konverter dc-dc *bidirectional* bekerja seperti konverter *boost* biasa. Nilai tegangan keluaran lebih besar daripada tegangan masukan. Hubungan antara tegangan keluaran (V_o) dan tegangan masukan (V_s) ditunjukkan dalam (5) dan nilai kapasitor sisi tegangan rendah ditunjukkan oleh (7).

Mode konverter dc-dc *bidirectional* bergantung pada tegangan bus dc. *Set point* dari bus dc adalah 400 V. Ketika jumlah energi yang dihasilkan oleh turbin angin melebihi permintaan beban, bus dc akan memiliki tegangan 400 V dan konverter dc-dc *bidirectional* bekerja pada mode *buck* untuk mengisi baterai. Namun, konverter dc-dc *bidirectional* bekerja pada mode *boost*, yang berarti bus dc akan mengalami penurunan tegangan karena daya turbin angin kurang dari permintaan beban. Akibatnya, bus dc akan mengalami penurunan tegangan. Konverter dc-dc *bidirectional* yang digunakan memiliki parameter frekuensi penyakelaran (f_s) 5.000 Hz, induktor (L) sebesar 0,004 H, kapasitor sisi tegangan rendah sebesar 0,000625 F, dan kapasitor sisi tegangan tinggi sebesar 0,000625 F.



Gambar 4. Model rangkaian simulasi perancangan sistem regulasi tegangan dc *microgrid* berbasis baterai-turbin angin pada Simulink MATLAB.

G. KENDALI PI

Konverter dc-dc *bidirectional*, yang beroperasi dalam mode konduksi kontinu (MKK), mengendalikan tegangan dc melalui pengaturan *duty cycle*. Baik pada sisi *boost* maupun sisi *buck*, kendali PI mempertahankan tegangan konstan. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4, kalang (*loop*) kendali PI membentuk kendali ini. Sinyal umpan balik ke kendali PI adalah tegangan keluaran (V_{KB}). Kalang tegangan luar memberikan referensi untuk kalang kendali PI. Di kalang tegangan luar, V_{KB} diperoleh dan dibandingkan dengan tegangan referensi (V_{ref}). Kendali PI menangani perbedaan antara keduanya. Untuk mendapatkan *duty cycle*, kendali PI memproses perbedaan guna menghasilkan tegangan stabil untuk suplai bus dc di sisi tegangan tinggi.

H. BATERAI

Baterai merupakan alat yang dapat mengubah energi kimia di dalam baterai menjadi energi listrik. Pada dasarnya, baterai adalah mesin yang mengubah energi kimia dalam bahan aktifnya menjadi energi listrik melalui reaksi redoks elektrokimia atau oksidasi-reduksi. Baterai terdiri atas elektrolit yang berfungsi sebagai penghantar serta terminal positif dan negatif. Arus keluaran dari baterai adalah arus dc. Unit sistem penyimpanan energi dalam sistem *microgrid* Amerika Serikat dirancang untuk memberikan tegangan yang stabil ke beban dalam kondisi beban yang berubah. Karena daya yang dihasilkan oleh turbin angin tidak selalu memenuhi beban yang dibutuhkan, baterai yang berfungsi sebagai penyimpan energi dapat membantu memenuhi permintaan beban. Dalam hal ini, sistem *state-of-charge* (SoC) baterai dianggap berada dalam rentang 50% dengan kapasitas baterai sebesar 200 Ah.

I. BEBAN

Pada perancangan sistem regulasi tegangan *microgrid* dc berbasis turbin angin-baterai, digunakan beban resistif untuk menguji keandalan sistem. Terdapat dua variasi beban resistif dengan masing-masing variasi sebesar 1.000 W. Variasi beban pertama langsung tersambung pada sistem yang dirancang, sedangkan variasi beban kedua tersambung ke sistem pada detik ke-3, sehingga total beban sebesar 2.000 W. Dengan demikian, keandalan sistem yang dirancang dapat dianalisis.

J. IEC 61000-4-17

IEC 61000-4-17 adalah standar internasional untuk pengujian kompatibilitas elektromagnetik (*electromagnetic*

compatibility, EMC) terhadap gangguan yang disebabkan oleh kondisi transien tegangan dc. Standar ini mengatur cara pengujian ketahanan peralatan listrik atau elektronik terhadap riak pada daya dc masukan. Standar ini berlaku untuk daya dc dengan tegangan rendah pada peralatan yang mendapatkan catu daya dari sistem penyearah eksternal atau baterai yang sedang diisi daya. Standar IEC 61000-4-17 memperbolehkan adanya riak tegangan pada peralatan elektronik dc sebesar 1% dari tegangan nominal. Standar ini mencakup bentuk gelombang tegangan, rentang nilai tegangan, pengaturan, serta prosedur pengujian.

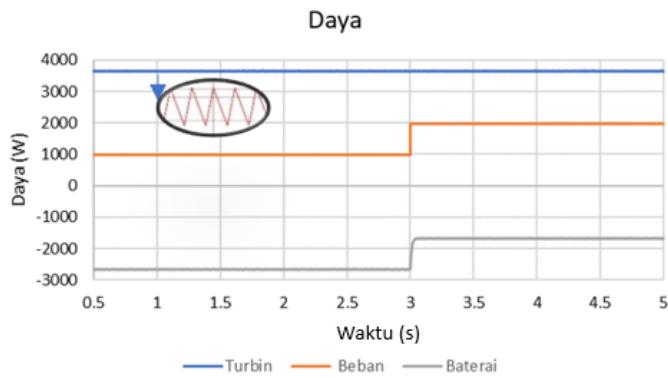
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini diuraikan hasil uji perancangan sistem regulasi tegangan *microgrid* dc berbasis turbin angin-baterai. Sistem yang dirancang disimulasikan menggunakan Simulink MATLAB, yang dilakukan selama 5 s. Model rangkaian simulasi ditunjukkan pada Gambar 4.

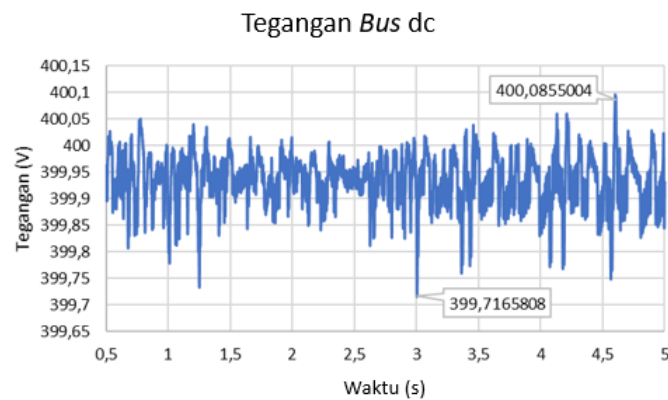
Kapasitas turbin angin yang digunakan sebesar 3 kW. Pada penelitian ini, terdapat tiga variasi kecepatan angin. Tiap variasi merepresentasikan kondisi tertentu. Variasi pertama yaitu dengan nilai kecepatan angin sebesar 12 m/s. Pada kondisi ini, beban sepenuhnya tersuplai oleh pembangkit listrik tenaga angin dan kelebihan daya dari pembangkit akan digunakan untuk mengisi daya pada baterai. Variasi kedua adalah dengan nilai kecepatan angin sebesar 8 m/s. Pada kondisi kecepatan angin ini, daya yang dihasilkan oleh pembangkit tidak maksimal, sehingga baterai yang ada akan berperan aktif membantu pembangkit listrik tenaga angin untuk mensuplai beban. Pada variasi yang ketiga, yaitu dengan nilai kecepatan angin sebesar 4 m/s, pembangkit listrik tenaga angin tidak mampu menghasilkan daya sama sekali, sehingga beban yang ada disuplai penuh oleh baterai. Pada penelitian ini, juga dilakukan pengujian dengan penambahan beban pada saat tiap kondisi berlangsung. Hal ini bertujuan untuk mengetahui kinerja regulasi tegangan pada bus dc yang dirancang.

A. TURBIN ANGIN MENSUPLAI BEBAN DAN BATERAI

Gambar 5 memperlihatkan grafik daya turbin angin, beban, dan konverter dc-dc *bidirectional*. Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, terlihat bahwa daya keluaran turbin angin dengan kecepatan angin sebesar 12 m/s bernilai 3.600 W. Pada Gambar 5 terlihat bahwa daya keluaran turbin angin memiliki nilai yang tidak konstan dan terjadi osilasi secara terus-menerus. Hal ini merupakan proses pelacakan daya yang dilakukan oleh



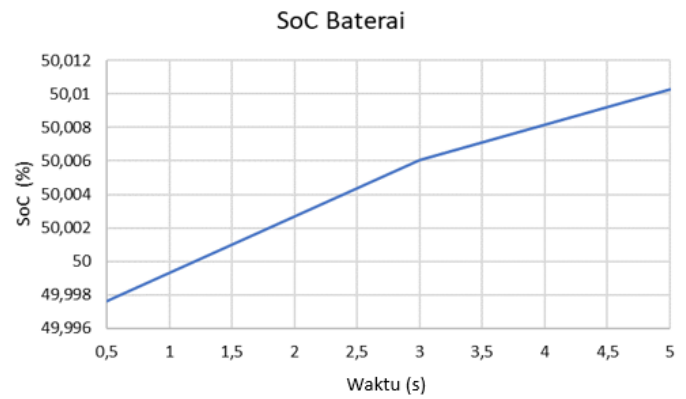
Gambar 5. Daya keluaran turbin angin, daya beban, dan daya baterai ketika kecepatan angin 12 m/s.



Gambar 6. Tegangan bus dc ketika kecepatan angin 12 m/s.

konverter *boost* dengan algoritma MPPT P&O, sehingga daya yang dihasilkan akan selalu beresilasi untuk mendapatkan daya keluaran turbin angin maksimum. Turbin angin dapat menyuplai beban dan mengisi baterai dengan kecepatan angin 12 m/s. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 5, yaitu bahwa daya pada konverter dc-dc *bidirectional* bekerja pada mode *buck* untuk pengisian baterai, dibuktikan dengan daya baterai yang memiliki nilai negatif. Nilai negatif menunjukkan proses pengisian daya ke baterai. Terjadi osilasi pada proses pengisian baterai karena masukan dari turbin angin juga mengalami osilasi. Pada detik ke-3 dalam simulasi, beban pada sistem bertambah dari 1.000 W menjadi 2.000 W. Saat terjadi penambahan beban, daya keluaran turbin angin tetap sama seperti sebelumnya. Perbedaan dapat dilihat pada daya baterai yang ada. Pada awalnya, daya yang masuk ke baterai sebesar -2.500 W, kemudian menjadi -1.500 W.

Gambar 6 memperlihatkan grafik tegangan pada bus dc dari sistem *microgrid* dengan kecepatan angin 12 m/s. Pada saat turbin angin menyuplai beban dan melakukan pengisian daya pada baterai, tegangan pada bus dc dari sistem *microgrid* dapat mempertahankan tegangan pada level 400 V. Pada detik ke-3 terdapat penambahan beban pada sistem, sehingga membuat nilai tegangan sedikit turun lalu kembali lagi ke level 400 V. Hasil pengukuran tegangan terendah dan tegangan tertinggi bus dc sesaat setelah penambahan beban pada detik ke-3 sebesar 399,7 V dan 400 V, sehingga fluktuasi tegangan bus dc sebesar 0,3 V. Bus dc dapat mempertahankan tegangan pada level 400 V, walaupun terjadi penambahan beban pada detik ke-3. Bus dc dapat mempertahankan level tegangan 400 V, dengan riak tegangan sebesar 0,3 V (0,075% dari tegangan nominal), yang menurut standar IEC 61000-4-17, riak tegangan tersebut masih dalam batas toleransi yang dapat diterima oleh peralatan elektronik dc, yaitu di bawah 1%.



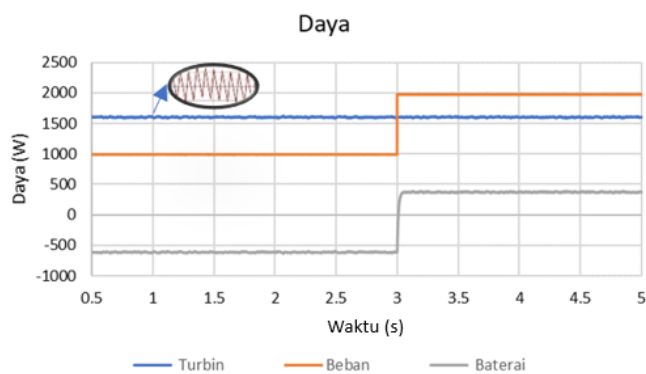
Gambar 7. SoC baterai ketika kecepatan angin 12 m/s.

Gambar 7 memperlihatkan grafik SoC baterai. Dengan kecepatan angin sebesar 12 m/s, turbin angin mampu menyuplai beban sekaligus mengisi daya baterai. Dapat dilihat bahwa nilai SoC baterai meningkat seiring berjalannya waktu. Pada detik ke-3 terdapat penambahan beban pada sistem, sehingga mengakibatkan daya yang digunakan untuk mengisi baterai makin kecil. Hal tersebut dibuktikan pada Gambar 7, yaitu setelah detik ke-3 kurva SoC baterai makin landai dibandingkan dengan detik sebelumnya.

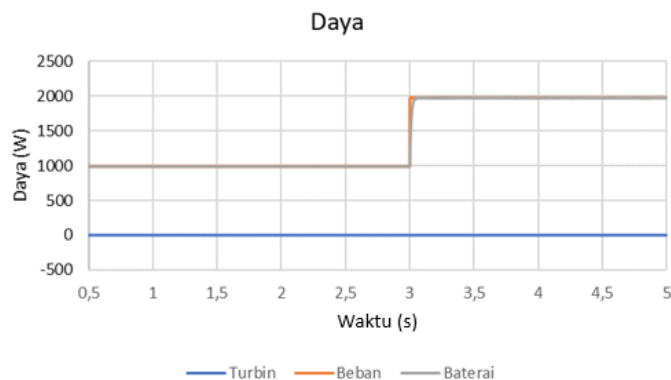
B. BEBAN DISUPLAI TURBIN ANGIN DAN BATERAI

Gambar 8 memperlihatkan grafik daya turbin angin, beban, dan konverter dc-dc *bidirectional*. Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, terlihat bahwa daya keluaran turbin angin dengan kecepatan angin sebesar 8 m/s bernilai sekitar 1.600 W. Pada Gambar 8 terlihat bahwa daya keluaran turbin angin memiliki nilai yang tidak konstan dan terjadi osilasi secara terus-menerus. Hal ini terjadi karena proses pelacakan daya yang dilakukan oleh konverter *boost* dengan algoritma MPPT P&O, sehingga daya yang dihasilkan akan selalu beresilasi untuk mendapatkan daya keluaran turbin angin maksimum. Dengan kecepatan angin sebesar 8 m/s, dapat dilihat bahwa turbin angin tidak cukup mampu untuk menyuplai, sehingga pada sistem ini baterai akan ikut andil untuk menyuplai beban. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 8. Konverter dc-dc *bidirectional* memberikan daya ke beban dalam mode *boost*, yang menunjukkan nilai daya baterai yang positif. Pada detik ke-3 dalam simulasi, beban pada sistem bertambah dari 1.000 W menjadi 2.000 W. Saat terjadi penambahan beban, daya keluaran dari turbin angin tetap sama seperti sebelumnya karena daya maksimal yang dapat dihasilkan oleh turbin angin saat kecepatan angin 8 m/s adalah sebesar 1.600 W. Perbedaan dapat dilihat dari daya pada konverter dc-dc *bidirectional*, yaitu daya keluaran dari baterai yang awalnya -600 W berubah menjadi 400 W.

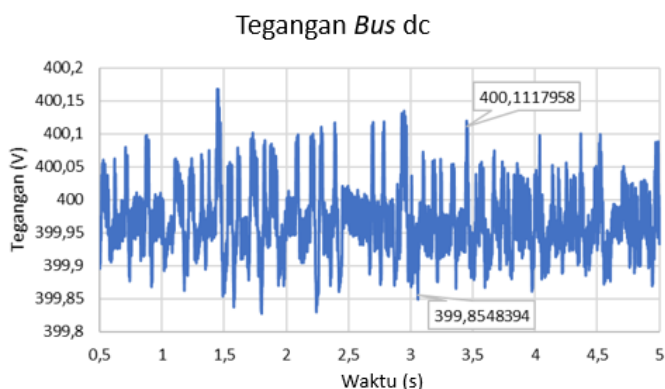
Gambar 9 memperlihatkan grafik tegangan pada bus dc dari sistem *microgrid* dengan kecepatan angin 8 m/s. Sistem *microgrid* dapat mempertahankan tegangan pada bus dc pada level 400 V saat turbin angin dan baterai menyuplai beban. Pada detik ke-3 terdapat penambahan beban pada sistem, sehingga membuat nilai tegangan sedikit turun lalu kembali lagi ke level 400 V. Hasil pengukuran tegangan terendah dan tertinggi sesaat setelah penambahan beban pada detik ke-3 adalah sebesar 399,8 V dan 400,1 V, sehingga fluktuasi tegangan bus dc adalah sebesar 0,3 V. Turbin angin dan baterai dapat mempertahankan tegangan bus dc pada level 400 V serta suplai ke beban tidak terputus. Bus dc dapat mempertahankan level tegangan 400 V, dengan riak tegangan sebesar 0,3 V



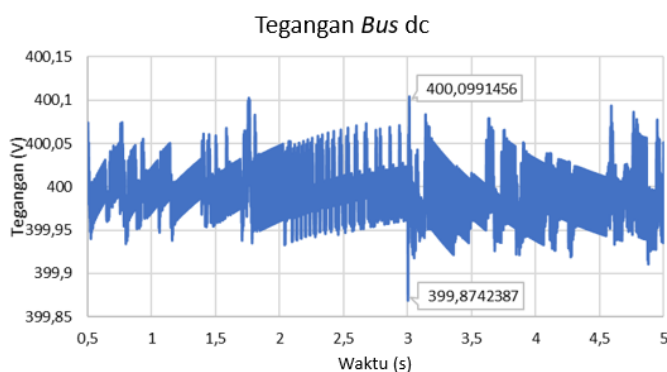
Gambar 8. Daya keluaran turbin angin, daya beban, dan daya baterai ketika kecepatan angin 8 m/s.



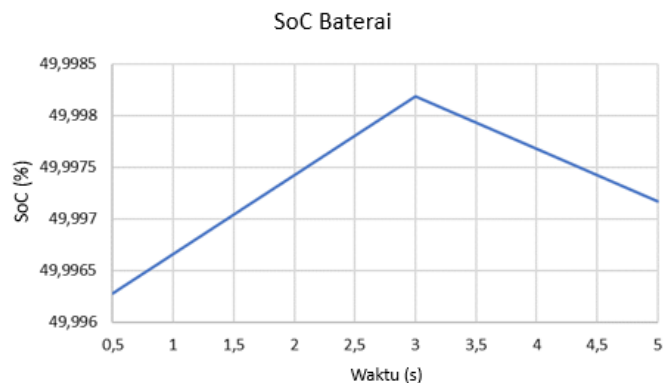
Gambar 11. Daya keluaran turbin angin, daya beban, dan daya baterai ketika kecepatan angin 4 m/s.



Gambar 9. Tegangan bus dc ketika kecepatan angin 8 m/s.



Gambar 12. Tegangan bus dc ketika kecepatan angin 4 m/s.



Gambar 10. SoC baterai ketika kecepatan angin 8 m/s.

(0,075% dari tegangan nominal) yang menurut standar IEC 61000-4-17, riak tegangan tersebut masih dalam batas toleransi yang dapat diterima oleh peralatan elektronik dc, yaitu di bawah 1%.

Gambar 10 memperlihatkan grafik SoC baterai. Dengan kecepatan angin sebesar 8 m/s, baterai perlu ikut andil dalam menyuplai beban karena daya keluaran maksimum turbin angin kurang untuk menyuplai beban secara penuh. Dapat dilihat bahwa nilai SoC baterai menurun seiring berjalannya waktu. Pada detik ke-3, sistem mengalami peningkatan beban, yang menghasilkan peningkatan daya keluaran baterai untuk menyuplai beban. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 10, yaitu setelah detik ke-3, kurva SoC pada baterai makin curam dibandingkan dengan detik sebelumnya.

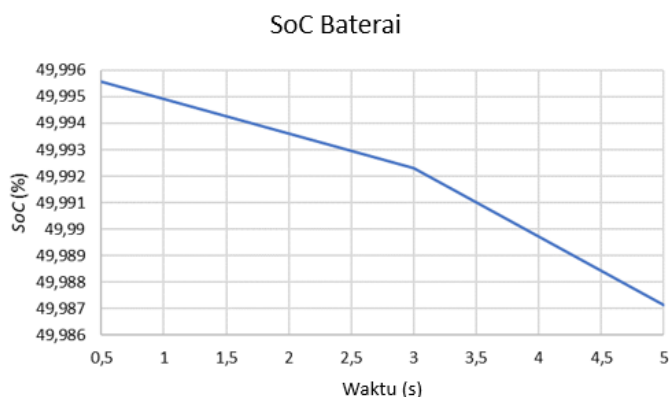
C. BEBAN DISUPLAI BATERAI

Gambar 11 memperlihatkan grafik daya turbin angin, beban, dan konverter dc-dc *bidirectional*. Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, terlihat bahwa turbin angin tidak dapat menghasilkan daya keluaran saat kecepatan angin 4 m/s. Dapat

dilihat bahwa pada kecepatan angin tersebut, beban yang ada pada sistem sepenuhnya disuplai oleh baterai. Hal tersebut tampak pada Gambar 11, yaitu konverter dc-dc *bidirectional* bekerja pada mode *boost* untuk suplai pada beban, dibuktikan dengan daya baterai bernilai positif. Pada detik ke-3 dalam simulasi, beban pada sistem bertambah dari 1.000 W menjadi 2.000 W. Saat terjadi penambahan beban, daya keluaran dari baterai juga berubah, sama dengan daya pada beban. Hal ini menunjukkan bahwa beban sepenuhnya disuplai oleh baterai.

Gambar 12 memperlihatkan grafik tegangan pada bus dc dari sistem *microgrid* dengan kecepatan angin 4 m/s. Pada saat beban sepenuhnya disuplai oleh baterai, tegangan pada bus dc dari sistem *microgrid* dapat mempertahankan tegangan pada level 400 V. Pada detik ke-3 terdapat penambahan beban pada sistem, sehingga membuat nilai tegangan sedikit turun lalu kembali lagi ke level 400 V. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa tegangan terendah dan tertinggi bus dc sesaat setelah penambahan beban pada detik ke-3 sebesar 399,8 V dan 400 V, sehingga fluktuasi tegangan bus dc adalah 0,2 V. Baterai dapat mempertahankan tegangan bus dc pada level 400 V serta suplai ke beban tidak terputus. Bus dc dapat mempertahankan level tegangan 400 V, dengan riak tegangan sebesar 0,2 V (0,05% dari tegangan nominal), yang menurut standar IEC 61000-4-17, riak tegangan tersebut masih dalam batas toleransi yang dapat diterima oleh peralatan elektronik dc, yaitu di bawah 1%.

Gambar 13 memperlihatkan grafik SoC baterai. Dengan kecepatan angin sebesar 4 m/s, beban sepenuhnya disuplai oleh baterai karena turbin angin tidak mampu menghasilkan daya. Dapat dilihat bahwa nilai SoC baterai menurun seiring berjalannya waktu. Kondisi kurva SoC dengan kecepatan angin ini lebih curam dibandingkan dengan kurva SoC pada kecepatan angin 8 m/s. Pada detik ke-3 terdapat penambahan beban pada sistem, yang mengakibatkan daya keluaran baterai untuk menyuplai beban makin besar. Hal tersebut dapat dilihat



Gambar 13. SoC baterai ketika kecepatan angin 4 m/s.

pada Gambar 13, yaitu setelah detik ke-3 kurva SoC pada baterai makin curam dibandingkan dengan detik sebelumnya.

IV. KESIMPULAN

Kinerja sistem *microgrid* dc yang dirancang dapat bekerja dengan baik. Daya keluaran turbin angin dapat memenuhi permintaan beban dan untuk mengisi baterai. Ketika turbin tidak dapat membangkitkan daya keluaran, baterai dapat memenuhi permintaan beban. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada kecepatan angin 12 m/s, turbin angin dapat menghasilkan listrik untuk memenuhi permintaan beban dan mengisi baterai. Pada saat kecepatan angin 8 m/s, baterai dapat menyuplai kekurangan daya keluaran turbin dalam memenuhi permintaan beban. Pada saat kecepatan angin 4 m/s, turbin angin tidak dapat menghasilkan daya keluaran dan beban sepenuhnya disuplai oleh baterai. Sistem yang diusulkan berhasil mempertahankan tegangan pada bus dc sebesar 400 V dengan deviasi hanya 1%. Nilai-nilai ini masih berada di bawah batas toleransi beban, menurut referensi IEC 61000-4-17.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dalam penelitian ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Sidiq Budi Perkasa; metodologi, Sidiq Budi Perkasa; perangkat lunak, Sidiq Budi Perkasa; validasi, Sidiq Budi Perkasa, Mochammad Facta, dan Iwan Setiawan; analisis formal, Sidiq Budi Perkasa, Mochammad Facta, dan Iwan Setiawan; investigasi, Sidiq Budi Perkasa, Mochammad Facta, dan Iwan Setiawan; sumber daya, Sidiq Budi Perkasa; penulisan—penyusunan draf asli, Sidiq Budi Perkasa; penulisan—peninjauan dan penyuntingan, Sidiq Budi Perkasa, Mochammad Facta, dan Iwan Setiawan; visualisasi, Sidiq Budi Perkasa; supervisi, Mochammad Facta, dan Iwan Setiawan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kami tujukan kepada semua pihak yang telah membantu dan mendukung selama proses penulisan karya tulis ilmiah ini.

REFERENSI

[1] A. Hamza, H. Bin Tahir, K. Siraj, dan M. Nasir, "Hybrid ac/dc microgrid for residential applications," dalam *2019 IEEE 3rd Int. Conf. DC Microgrids (ICDCM)*, 2019, hal. 1–5, doi: 10.1109/icdcm45535.2019.9232773.

[2] S. Pannala, N. Patari, A.K. Srivastava, dan N.P. Padhy, "Effective control and management scheme for isolated and grid connected dc microgrid," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 56, no. 6, hal. 6767–6780, Nov./Des. 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.3015819.

[3] J. Dhillon dan A.K. Kouam, "Design and modelling of a dc microgrid for wind and solar system," dalam *2022 1st Int. Conf. Sustain. Technol. Power Energy Syst.*, 2022, hal. 1–6, doi: 10.1109/stpes54845.2022.10006534.

[4] N. Qachchachi, H. Mahmoudi, dan A.E. Hassnaoui, "Control strategy of hybrid ac/dc microgrid in standalone mode," *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 9, no. 2, hal. 295–301, Jul. 2020, doi: 10.14710/ijred.9.2.295-301.

[5] W. Bai, "DC microgrid optimized energy management and real-time control of power systems for grid-connected and off-grid operating modes," Disertasi Ph.D., Université de Technologie de Compiègne, Compiègne, Perancis, 2021.

[6] S. Abdullahi, T. Jin, dan 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, hal. 335–344, Jan. 2023, doi: 10.35833/MPCE.2021.000241.

[7] J. Aourir, F. Locment, dan M. Sechilariu, "Power and energy management of a dc microgrid for a renewable curtailment case due to the integration of a small-scale wind turbine," *Energies*, vol. 15, no. 9, hal. 1–24, Mei 2022, doi: 10.3390/en15093421.

[8] M.F.N. Akbar, Z. Zulfatman, dan I. Pakaya. (22 Des. 2020). Maximum power point tracking pada pembangkit tenaga angin menggunakan backtracking search algorithm. Dipresentasikan pada Semin. Nas. Teknol. Rekayasa (SENTRA), [Online], <https://www.youtube.com/watch?v=jPPqToVHeoU>

[9] K.R. Bharath, M.M. Krishnan, dan P. Kanakasabapathy, "A review on dc microgrid control techniques, applications and trends," *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 9, no. 3, hal. 1328–1338, Sep. 2019, doi: 10.20508/ijrer.v9i3.9671.g7710.

[10] H. Chen, "Lithium-ion battery-supercapacitor energy management for dc microgrids," *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 17, hal. 1452–1458, Nov. 2022, doi: 10.1093/ijlct/ctac128.

[11] R. Rajasekaran dan P.U. Rani, "Bidirectional dc-dc converter for microgrid in energy management system," *Int. J. Electron.*, vol. 108, no. 2, hal. 322–343, Feb. 2021, doi: 10.1080/00207217.2020.1793418.

[12] V.F. Pires, A. Pires, dan A. Cordeiro, "DC microgrids: Benefits, architectures, perspectives and challenges," *Energies*, vol. 16, no. 3, hal. 1–20, Feb. 2023, doi: 10.3390/en16031217.

[13] A. Kusmantoro, A. Priyadi, V.L.B. Putri, dan M.H. Purnomo, "Kinerja micro grid menggunakan photovoltaic-baterai dengan sistem off-grid," *J. Nas. Tek. Elekt. Teknol. Inf.*, vol. 9, no. 2, hal. 211–217, Mei 2020, doi: 10.22146/jnteti.v9i2.155.

[14] A. Kusmantoro dan A. Priyadi, "Strategi peningkatan kinerja dc microgrid dengan konfigurasi dc/ac coupling," *J. Nas. Tek. Elekt. Teknol. Inf.*, vol. 12, no. 3, hal. 175–180, Agu. 2023, doi: 10.22146/jnteti.v12i3.7151.

[15] A.M. Yasin, "Energy management of a stand-alone dc microgrid based on PV/wind/battery/diesel gen. combined with super-capacitor," *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 9, no. 4, hal. 1811–1826, Des. 2019, doi: 10.20508/ijrer.v9i4.10094.g7784.

[16] G.S. Mahesh, A. Puskar, P. M. Krishna, dan S. Rajashekhar, "Energy management with bi-directional converters in dc microgrids," dalam *Int. Conf. Thermo-fluids Energy Syst. (ICTES2019)*, 2020, hal. 1–8, doi: 10.1088/1742-6596/1473/1/012016.

[17] V. Patel dan V. Patel, "A comprehensive review: Ac & dc microgrid protection," dalam *21st Natl. Power Syst. Conf. (NPSC)*, 2020, hal. 1–6, doi: 10.1109/NPSC49263.2020.9331932.

[18] H. Piggott, *Windpower Workshop*. Machynlleth, Inggris: Centre for Alternative Technol, 1997.

[19] D.W. Hart, *Power Electronics*. New York, NY, AS: McGraw-Hill, 2010.

[20] M.S. Simoiu dkk., "BOOST converter modelling as a subsystem of a photovoltaic panel control system," dalam *2020 IEEE Int. Conf. Autom. Qual. Test. Robot. (AQTR)*, 2020, hal. 1–6, doi: 10.1109/AQTR49680.2020.9129963.

[21] R. Syahputra dan I. Soesanti, "Performance improvement for small-scale wind turbine system based on maximum power point tracking control," *Energies*, vol. 12, no. 20, hal. 1–18, Okt. 2019, doi: 10.3390/en12203938.

[22] A.S. Pratiwi, S.D. Nugraha, dan E. Sunarno, "Desain dan simulasi bidirectional dc-dc converter untuk penyimpanan energi pada sistem fotovoltaik," *J. Nas. Tek. Elekt. Teknol. Inf.*, vol. 9, no. 3, hal. 305–310, Agu. 2020, doi: 10.22146/v9i3.377.