

Analisis Stabilitas Tegangan pada Sistem Microgrid DC Islanded Menggunakan Metode Droop Control Berbasis MATLAB/Simulink

Muhammad Al Rouvil Putra Mardian^{1*}, Danang Erwanto², & Bagus Mitra Sujatmiko³

Universitas Islam Kadiri, Kediri, Indonesia

Email: rouvil22@gmail.com

Abstract

The increasing penetration of intermittent renewable generation and constant power loads (CPLs) on distribution networks requires an islanded DC microgrid architecture capable of maintaining bus voltage stability without relying on inter-unit communication. This study analyzes the voltage stability of an islanded DC microgrid integrating photovoltaic (PV), wind turbine, and a battery energy storage system (BESS) using primary droop control, simulated in MATLAB/Simulink with the Simscape Electrical library. Three disturbance scenarios were tested: (1) irradiance and wind speed variation, (2) CPL load-step stress testing, and (3) BESS mode transition from charging to discharging following total PV outage. Simulation results show that the steady-state bus voltage remains within 433.74-435.77 V (a deviation of +8.44% to +8.94% relative to the 400 V nominal) across all scenarios, with a maximum undershoot of -2.75% and a maximum overshoot of +1.34% relative to the pre-disturbance steady state, and a transient recovery time of less than 30 ms. Eigenvalue analysis at the nominal operating point confirms that all system modes lie in the left-half-plane, with a dominant mode of $\lambda_6 = -85$ rad/s yielding a theoretical rise time of 25.87 ms and settling time of 35.29 ms, consistent in order of magnitude with the time-domain simulation results. All bus voltage values remain within the IEEE 1547 and IEC 61727 tolerance bands ($\pm 10\%$). The study concludes that primary droop control effectively maintains DC microgrid voltage stability under the tested source and load disturbances, while still exhibiting a voltage offset as an inherent trade-off of simple droop control.

Keywords: DC microgrid; droop control; voltage stability; constant power load; battery energy storage system

Abstrak

Meningkatnya penetrasi pembangkit energi terbarukan intermiten dan beban elektronik daya konstan (constant power load/CPL) pada jaringan distribusi menuntut arsitektur microgrid DC islanded yang mampu menjaga stabilitas tegangan bus tanpa bergantung pada komunikasi antar-unit. Penelitian ini menganalisis stabilitas tegangan sebuah microgrid DC islanded yang mengintegrasikan photovoltaic (PV), turbin angin, dan battery energy storage system (BESS) dengan metode primary droop control, disimulasikan pada MATLAB/Simulink dengan Library Simscape Electrical. Tiga skenario gangguan diuji: (1) variasi irradiansi dan kecepatan angin, (2) loncatan beban CPL (stress test), dan (3) transisi mode BESS dari charging ke discharging akibat pemadaman total PV. Hasil simulasi menunjukkan tegangan bus tunak berada pada rentang 433,74-435,77 V (deviasi +8,44% hingga +8,94% terhadap nominal 400 V) pada seluruh skenario, dengan undershoot maksimum -2,75% dan overshoot maksimum +1,34% terhadap kondisi tunak sebelum gangguan, serta waktu pemulihan transien kurang dari 30 ms. Analisis nilai eigen pada titik operasi nominal mengonfirmasi bahwa seluruh mode sistem berada pada left-half-plane dengan mode dominan $\lambda_6 = -85$ rad/s, menghasilkan estimasi rise time teoritis 25,87 ms dan settling time teoritis 35,29 ms yang konsisten secara orde besar dengan hasil simulasi domain waktu. Seluruh nilai tegangan bus tetap berada dalam batas toleransi standar IEEE 1547 dan IEC 61727 ($\pm 10\%$). Penelitian ini menyimpulkan bahwa primary droop control efektif mempertahankan stabilitas tegangan microgrid DC islanded pada kondisi gangguan sumber dan beban yang diuji, meskipun tetap menyisakan voltage offset sebagai trade-off karakteristik droop control sederhana.

Kata kunci: microgrid DC; droop control; stabilitas tegangan; constant power load; battery energy storage system

PENDAHULUAN

Rasio elektrifikasi Indonesia telah mendekati target penuh, namun pemerataan akses listrik ke wilayah kepulauan dan terpencil masih menjadi tantangan struktural (Zein et al., 2023). Microgrid berbasis energi baru terbarukan (EBT) menjadi salah satu solusi yang didorong pemerintah untuk mempercepat pemerataan akses listrik sekaligus mendukung transisi energi berkelanjutan (Maharani et al., 2024), sebagaimana ditunjukkan oleh implementasi smart microgrid Nusa Penida sebagai proyek microgrid EBT pertama di Indonesia (Putri, 2026). Meski demikian, penerapan microgrid DC di Indonesia masih menghadapi sejumlah tantangan teknis, termasuk keterbatasan standar interkoneksi dan pengalaman operasional (Halim et al., 2024).

Dibandingkan microgrid AC, arsitektur DC menawarkan efisiensi konversi yang lebih tinggi karena mengurangi tahap konversi daya, sekaligus lebih sesuai dengan karakteristik keluaran DC dari PV dan baterai (Justo et al., 2013). Namun demikian, kestabilan tegangan bus DC yang islanded (beroperasi tanpa terhubung ke jaringan utama) sangat rentan terhadap dua sumber gangguan utama: intermitensi pembangkit energi terbarukan dan karakteristik constant power load (CPL) pada beban elektronik daya modern, yang secara dinamis berperilaku sebagai impedansi negatif dan berpotensi mendestabilkan tegangan bus (Kwasinski & Onwuchekwa, 2011; Rahimi & Emadi, 2009).

Metode droop control banyak diadopsi sebagai strategi kendali primer pada microgrid DC karena kemampuannya membagi beban antar-sumber secara proporsional tanpa memerlukan jalur komunikasi cepat antar-unit (converter), sehingga lebih andal dan sederhana untuk diimplementasikan (Guerrero et al., 2011; Meng et al., 2017). Berbagai pengembangan telah diusulkan untuk mengatasi kelemahan droop control konvensional, di antaranya voltage offset akibat resistansi droop dan circulating current antar-konverter paralel (Ghanbari & Bhattacharya, 2020), maupun tinjauan komprehensif strategi kendali dan stabilisasi microgrid DC (Dragičević et al., 2016a, 2016b).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis kemampuan primary droop control dalam mempertahankan stabilitas tegangan bus pada sebuah microgrid DC islanded yang mengintegrasikan PV, turbin angin, dan BESS, ketika dihadapkan pada tiga jenis gangguan representatif: variasi kondisi lingkungan sumber terbarukan, loncatan beban CPL, dan kehilangan total salah satu sumber pembangkitan. Analisis dilakukan baik pada domain waktu (simulasi MATLAB/Simulink) maupun pada domain frekuensi (analisis nilai eigen sinyal-kecil), sehingga hasil simulasi dapat diverifikasi secara analitik.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi kuantitatif berbasis MATLAB R2020a dengan Library Simscape Electrical (Specialized Power Systems) dan Control System Toolbox. Model photovoltaic array mengadopsi model single-diode sebagaimana dikembangkan oleh Villalva et al. (2009), dengan algoritma maximum power point tracking mengacu pada kajian komparatif teknik MPPT oleh Esram dan Chapman (2007).

Sistem terdiri atas tiga sumber energi (PV, turbin angin, dan BESS) yang terhubung ke satu bus DC bersama melalui konverter daya dengan kendali primary droop control, mengikuti persamaan $V_{dc} = V_{ref} - r_d \times I_{dc}$, dengan $V_{ref} = 400$ V sebagai tegangan referensi bus. Parameter kendali utama sistem dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Utama Sistem Kendali Droop

Parameter	Nilai
Tegangan referensi bus (V_{ref})	400 V
Koefisien droop PV dan Wind (r_d)	0,05 Ω
Koefisien droop BESS (r_d)	0,02 Ω
Toleransi deviasi tegangan	$\pm 10\%$
Frekuensi switching	20 kHz
Induktor filter	2 mH
Kapasitor bus DC	2.200 μF

Koefisien droop BESS dibuat lebih kecil daripada PV dan Wind agar BESS berperan sebagai voltage-forming unit yang menanggung porsi koreksi arus lebih besar terhadap perubahan tegangan bus, sesuai perannya sebagai penyangga energi utama pada sistem islanded.

Tiga skenario pengujian dirancang untuk mengevaluasi ketahanan sistem terhadap gangguan sumber maupun beban:

1. Skenario 1 - Variasi Irradiansi dan Kecepatan Angin: kondisi lingkungan diubah bertahap pada tiga interval (1000 W/m^2 & $12 \text{ m/s} \rightarrow 500 \text{ W/m}^2$ & 6 m/s pada $t = 1 \text{ s} \rightarrow 800 \text{ W/m}^2$ & 9 m/s pada $t = 2 \text{ s}$).
2. Skenario 2 - CPL Stress Test: beban CPL dinaikkan mendadak (step-up) dari kondisi hampir tanpa beban menjadi $\approx 3.532,4 \text{ W}$ pada $t = 1 \text{ s}$, kemudian diturunkan (step-down) menjadi $\approx 556,5 \text{ W}$ pada $t = 2 \text{ s}$.
3. Skenario 3 - Transisi Mode BESS: pasokan PV dipadamkan total pada $t = 1,5 \text{ s}$, memaksa BESS berpindah dari mode charging ke discharging untuk menopang beban.

Parameter performa yang dianalisis meliputi deviasi tegangan steady-state terhadap nilai nominal ($\text{Deviasi}_{ss} = ((V_{ss} - V_{ref})/V_{ref}) \times 100\%$), magnitude overshoot/undershoot terhadap kondisi steady-state sesaat sebelum gangguan ($\text{Deviasi}_{transien} = ((V_{ekstrem} - V_{sebelum})/V_{sebelum}) \times 100\%$), settling time dengan pita penetapan $\pm 5\%$ (kriteria $t_s < 50 \text{ ms}$), serta rise time 10-90%. Sebagai pendukung analitik, dilakukan pula linierisasi sinyal-kecil pada titik operasi nominal untuk memperoleh nilai eigen matriks sistem, guna memverifikasi kestabilan asimtotik lokal dan memperkirakan konstanta waktu dominan ($\tau = 1/|\text{Re}(\lambda)|$) secara independen dari hasil simulasi domain waktu.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Respons Tegangan Bus pada Ketiga Skenario

Tabel 2 merangkum hasil simulasi domain waktu untuk ketiga skenario. Pada Skenario 1, perubahan irradiansi dan kecepatan angin menghasilkan undershoot hingga -2,07% saat penurunan kondisi cuaca ($t = 1$ s) dan overshoot +1,15% saat pemulihan ($t = 2$ s), dengan tegangan bus kembali tunak dalam waktu kurang dari 30 ms. Pada Skenario 2, loncatan beban CPL menghasilkan undershoot -1,48% (step-up) dan overshoot +1,34% (step-down), dengan settling time kurang dari 25 ms untuk kedua transisi. Pada Skenario 3, pemadaman total PV memaksa pembalikan arah arus BESS dari -6,41 A (charging) menjadi +10,17 A pada saat transisi, menghasilkan undershoot terbesar di antara ketiga skenario (-2,75%), namun tegangan bus pulih mendekati kondisi sebelumnya hanya dalam 5 ms - jauh lebih cepat dibanding dua skenario lain karena BESS bertindak langsung sebagai voltage-forming unit.

Tabel 2. Ringkasan Respons Tegangan Bus pada Ketiga Skenario Pengujian

Indikator	Skenario 1 (Variasi Cuaca)	Skenario 2 (CPL Stress Test)	Skenario 3 (Transisi BESS)
Rentang tegangan tunak	433,74-435,53 V	434,04-435,77 V	432,45-434,92 V
Deviasi steady-state maks.	+8,88%	+8,94%	+8,50%
<i>Undershoot</i>	-2,07%	-1,48%	-2,75%
<i>Overshoot</i>	+1,15%	+1,34%	tidak tercatat
Waktu pemulihan transien	< 30 ms	< 25 ms	5 ms (pemulihan awal)

Catatan: Undershoot/overshoot dihitung relatif terhadap kondisi steady-state sesaat sebelum gangguan, bukan terhadap tegangan nominal 400 V. Seluruh nilai tegangan absolut berada dalam rentang 422,07-439,64 V (deviasi +5,52% hingga +9,91% terhadap 400 V), masih di dalam batas toleransi $\pm 10\%$ standar IEEE 1547 dan IEC 61727 meskipun puncak transien tertinggi hanya menyisakan margin $\approx 0,36$ V terhadap batas atas 440 V.

Verifikasi Analitik melalui Nilai Eigen Dominan

Linierisasi sinyal-kecil pada titik operasi nominal menghasilkan enam mode sistem sebagaimana disajikan pada Tabel 3. Seluruh nilai eigen memiliki bagian real negatif, mengonfirmasi bahwa sistem stabil asimtotik secara lokal (left-half-plane). Mode $\lambda_6 = -85$ rad/s memiliki bagian real paling dekat dengan sumbu imajiner sehingga menjadi mode paling lambat meluruh dan paling menentukan karakteristik transien keseluruhan, berkaitan dengan dinamika tegangan bus DC dan CPL.

Tabel 3. Nilai Eigen Dominan pada Titik Operasi Nominal

Mode	Nilai Eigen (rad/s)	$\tau = 1/ \text{Re}(\lambda) $	Rasio Redaman	Interpretasi
$\lambda_{1,2}$	$-1250 \pm j4500$	0,80 ms	0,268	Transien pensakelaran
$\lambda_{3,4}$	$-450 \pm j850$	2,22 ms	0,468	Resonansi filter LC
λ_5	-180	5,56 ms	- (pole real)	Respons dinamik BESS
λ_6	-85	11,76 ms	- (pole real)	Dominan Vbus & CPL

Dengan pendekatan sistem dominan orde pertama, estimasi rise time ($t_r \approx 2,2\tau$) dan settling time pita 5% ($t_s \approx 3\tau$) dari mode λ_6 masing-masing menghasilkan 25,87 ms dan 35,29 ms - keduanya konsisten secara orde besar dengan hasil simulasi domain waktu (settling time < 30 ms pada Skenario 1, < 25 ms pada Skenario 2, dan pemulihan awal 5 ms pada Skenario 3). Perlu dicatat bahwa data time-series tegangan bus yang tersimpan dari hasil simulasi memiliki interval pencuplikan 5 ms, sedangkan transien pada seluruh skenario terbukti selesai dalam rentang waktu yang lebih pendek dari satu interval tersebut, sehingga rise time eksperimental ($t_{10\%}$ - $t_{90\%}$) tidak dapat diinterpolasi secara valid dari data tersebut. Estimasi analitik berbasis nilai eigen dominan karenanya digunakan sebagai rujukan rise time pada penelitian ini, sedangkan angka settling time hasil simulasi tetap dijadikan hasil utama.

Pembahasan Umum

Secara keseluruhan, primary droop control terbukti mampu menjaga stabilitas tegangan bus DC islanded pada seluruh skenario gangguan sumber maupun beban yang diuji, dengan waktu pemulihan transien konsisten di bawah 30 ms. Namun demikian, nilai tegangan tunak yang secara konsisten berada di atas 400 V (deviasi +8,4% hingga +8,9%) menunjukkan voltage offset yang melekat pada karakteristik primary droop control sederhana - sebuah trade-off yang telah banyak dibahas dalam literatur (Guerrero et al., 2011; Meng et al., 2017) dan umumnya diatasi melalui penambahan kendali sekunder pada arsitektur hierarkis. Temuan ini menegaskan bahwa meskipun droop control tunggal sudah memadai untuk menjaga kestabilan dinamis jangka pendek, koreksi voltage offset jangka panjang memerlukan lapisan kendali tambahan yang menjadi arah pengembangan lanjutan penelitian ini.

KESIMPULAN

Primary droop control terbukti efektif dan tangguh dalam mempertahankan stabilitas tegangan bus microgrid DC islanded pada seluruh skenario dinamis yang diuji - variasi cuaca sumber terbarukan, CPL stress test, dan transisi mode BESS akibat pemadaman PV - dengan tegangan bus tetap berada pada rentang aman 422,07-439,64 V (deviasi +5,52% hingga +9,91%

terhadap nominal, sesuai standar IEEE 1547 $\pm 10\%$), undershoot maksimum $-2,75\%$ dan overshoot maksimum $+1,34\%$ terhadap kondisi tunak sebelum gangguan, serta waktu pemulihan transien di bawah 30 ms. Analisis nilai eigen pada titik operasi nominal mengonfirmasi kestabilan asimtotik lokal sistem dan memberikan estimasi rise time ($\approx 25,87$ ms) serta settling time ($\approx 35,29$ ms) yang konsisten secara orde besar dengan hasil simulasi domain waktu. Voltage offset sekitar $+8,4\%$ hingga $+8,9\%$ pada kondisi tunak tetap menjadi keterbatasan primary droop control sederhana, sehingga penelitian lanjutan disarankan mengarah pada penambahan kendali sekunder untuk mengoreksi offset tersebut tanpa mengorbankan keandalan operasi desentralisasi yang menjadi keunggulan utama droop control.

REFERENSI

- Dragičević, T., Lu, X., Vasquez, J. C., & Guerrero, J. M. (2016a). DC microgrids—Part I: A review of control strategies and stabilization techniques. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(7), 4876-4891. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2478859>
- Dragičević, T., Lu, X., Vasquez, J. C., & Guerrero, J. M. (2016b). DC microgrids—Part II: A review of power architectures, applications, and standardization issues. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(5), 3528-3549. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2464277>
- Esrām, T., & Chapman, P. L. (2007). Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(2), 439-449.
- Ghanbari, N., & Bhattacharya, S. (2020). Adaptive droop control method for suppressing circulating currents in DC microgrids. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, 7, 100-110. <https://doi.org/10.1109/OAJPE.2020.2974940>
- Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., De Vicuña, L. G., & Castilla, M. (2011). Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—A general approach toward standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1), 158-172. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2066534>
- Halim, L., Anugrah, P., Kurniawan, A., & Karim, K. (2024). A critical evaluation of DC microgrid implementation in Indonesia: Opportunities and challenges. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 34(2), 687-696. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v34.i2.pp687-696>
- Justo, J. J., Mwasilu, F., Lee, J., & Jung, J.-W. (2013). AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 387-405. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.067>
- Kwasinski, A., & Onwuchekwa, C. N. (2011). Dynamic behavior and stabilization of DC microgrids with instantaneous constant-power loads. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(3), 822-834. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2091285>
- Maharani, C. B. Z., Supriyadi, I., Tumanggor, M., Nugroho, F. B., & Iksan, D. (2024). Microgrid EBT mewujudkan energi berkelanjutan dalam akses listrik merata di Indonesia. *Machinery: Jurnal Teknologi Terapan*, 5(2), 125-131. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12738758>

-
- Meng, L., Shafiee, Q., Ferrari Trecate, G., Karimi, H., Fulwani, D., Lu, X., & Guerrero, J. M. (2017). Review on control of DC microgrids and multiple microgrid clusters. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 5(3), 928-948. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2017.2690219>
- Putri, N. M. L. K. (2026, 24 Februari). Pertama di Indonesia, smart microgrid Nusa Penida beroperasi. *detikBali*. <https://www.detik.com/bali/bisnis/d-8181657/pertama-di-indonesia-smart-microgrid-nusa-penida-beroperasi>
- Rahimi, A. M., & Emadi, A. (2009). Active damping in DC/DC power electronic converters: A novel method to overcome the problems of constant power loads. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(5), 1428-1439.
- Villalva, M. G., Gazoli, J. R., & Filho, E. R. (2009). Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5), 1198-1208.
- Zein, M., Ghalih, M., Pebriana, R., & Ghalih, M. (2023). Assessment of grey forecasting model: Study case for electrification rate in Indonesia from 2012 to 2021. *International Journal of Research in Vocational Studies*, 2(4), 13-19.