

Analisis Ketahanan Mikrogrid Energi Terbarukan Off-Grid Terhadap Gangguan Simetris Tiga Fasa: Studi Kasus di Wilayah 3T Kalimantan

Symmetrical Fault Resilience Analysis of Off-Grid Renewable Energy Microgrids: A Case Study in Remote Kalimantan

Dwi Sahidin¹, Purwiyanto², Hendi Purnata³, Feta Kukuh Pambudi⁴, Radhiansyah⁵, Syaiful Ismail⁶

^{1,2}Program Studi Teknik Listrik, Politeknik Negeri Cilacap

^{3,4}Program Studi Teknologi Rekayasa Mekatronika, Politeknik Negeri Cilacap

^{1,2,3,4}Jl. Dr. Soetomo No.1, Sidakaya, Kab. Cilacap, Jawa Tengah, Indonesia 53212

⁵Program Studi Teknik Sistem Energi, Institut Teknologi Bacharuddin Jusuf Habibie

⁵Jl. Balaikota No.1, Bumi Harapan, Kec. Bacukiki Bar., Kota Parepare, Sulawesi Selatan, Indonesia 91122

⁶Program Studi Teknik Elektro, Universitas Papua

⁶Jl. Gn. Salju, Amban, Kec. Manokwari Barat, Kabupaten Manokwari, Papua Barat, Indonesia 98314

email: ^{*1}dwisahidin@pnc.ac.id, ²purwi_power@pnc.ac.id, ³hendipurnata@pnc.ac.id, ⁴fetakp@pnc.ac.id,

⁵radhiansyah@ith.ac.id, ⁶s.ismail@unipa.ac.id

Informasi Artikel

Diajukan, 22 April 2026

Diterima, 3 Juni 2026

Diterbitkan, 19 Juni 2026

Kata Kunci :

Energi Terbarukan, Mikrohidro, Fotovoltaik, Angin, Gangguan Simetris

Keyword :

Renewable Energy, Micro-hydro, Photovoltaic, Wind, Symmetrical Fault

ABSTRAK

Peningkatan pemanfaatan energi terbarukan di wilayah terpencil memunculkan tantangan baru dalam menjaga stabilitas sistem tenaga listrik, khususnya saat terjadi gangguan simetris. Penelitian ini mengevaluasi dampak gangguan tiga-fasa-ke-tanah pada mikrogrid off-grid yang terdiri dari pembangkit surya, mikrohidro, angin, dan sistem baterai. Simulasi dilakukan di MATLAB/Simulink dengan berbagai kombinasi pembangkit dan beban. Hasil menunjukkan konfigurasi surya mandiri memiliki lonjakan tegangan dan arus tertinggi (3,57 p.u dan 4,50 p.u), menunjukkan sensitivitas tinggi terhadap gangguan. Sebaliknya, sistem mikrohidro mandiri menunjukkan ketahanan terbaik dengan tegangan lebih 1,13 p.u, masih dalam batas toleransi kurva ITIC/CBEMA. Integrasi baterai efektif dalam meredam fluktuasi, sedangkan filter pasif pada inverter justru memicu lonjakan transien. Kontribusi utama penelitian ini adalah pemetaan respons sistem terhadap gangguan berdasarkan konfigurasi pembangkit menggunakan kurva ITIC/CBEMA, mendukung perancangan mikrogrid tangguh untuk wilayah 3T. Disarankan penggunaan kontrol inverter adaptif dan sistem proteksi berrespons cepat.

ABSTRACT

The increasing deployment of renewable energy in remote areas presents new challenges in maintaining power system stability, particularly during symmetrical fault events. This study evaluates the impact of three-phase-to-ground symmetrical faults on an off-grid renewable energy microgrid comprising solar PV, micro-hydro, wind turbines, and battery storage. Using MATLAB/Simulink, various generation-load combinations are simulated. Results indicate that standalone PV configurations exhibit the highest transient overvoltage (3.57 p.u) and overcurrent (4.50 p.u), suggesting a high sensitivity to disturbances. In contrast, the standalone micro-hydro configuration shows superior fault resilience (overvoltage of 1.13 p.u), remaining within ITIC/CBEMA tolerances. Battery integration effectively dampens voltage fluctuations, while passive filters in inverters tend to exacerbate transient spikes. The study's key contribution is a fault response mapping of generator configurations using the ITIC/CBEMA curve, supporting robust microgrid design for 3T regions. Adaptive inverter control and rapid-response protection systems are recommended for enhancing reliability.

1. PENDAHULUAN

Tingginya ketergantungan terhadap pembangkit listrik berbasis bahan bakar fosil memberikan dampak negatif yang signifikan terhadap polusi udara, perubahan iklim, dan deplesi sumber daya alam. Bahan bakar fosil mengeluarkan polutan seperti sulfur dioksida, nitrogen oksida, dan partikel, yang berkontribusi terhadap masalah kualitas udara. Batubara sendiri menyumbang 37% dari produksi listrik global, melepaskan sejumlah besar CO² dan memperburuk masalah lingkungan [1]. Energi terbarukan merupakan alternatif yang menjanjikan untuk mencapai target energi bersih yang bebas emisi karbon dan mampu meminimalkan degradasi lingkungan [2]. Sumber energi bersih yang 100% bersumber dari energi terbarukan seperti surya, air, dan angin, memainkan peran dominan dalam transisi karena biaya rendah, efisiensi tinggi, penerapan luas, teknologi matang, dan akses yang luas ke sumber daya energi terbarukan [3].

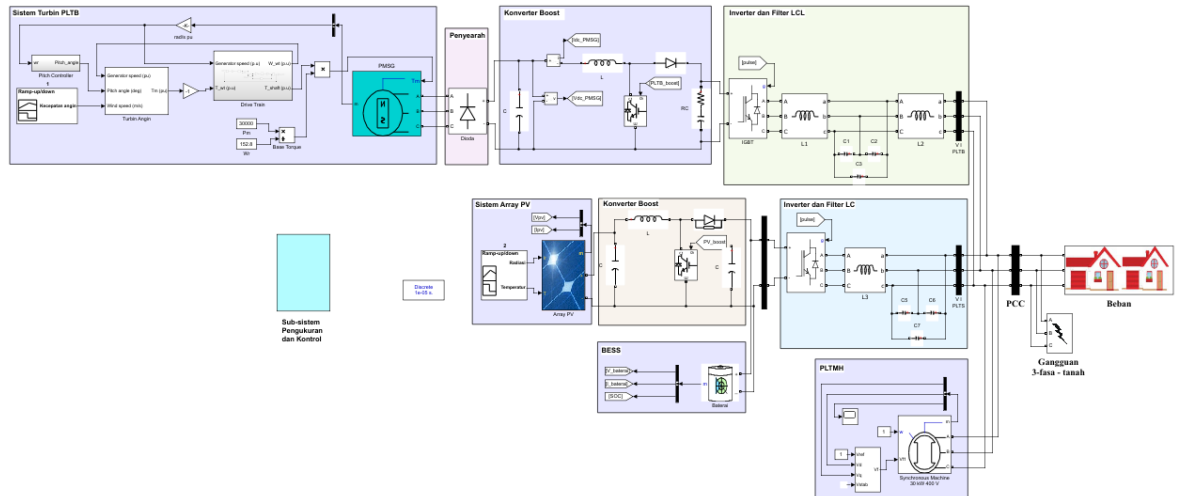
Indonesia merupakan negara kepulauan yang terdiri dari lebih dari 17.000 pulau, dimana di sebagian daerah seperti daerah tertinggal, terdepan, dan terluar (3T), belum mendapatkan akses energi listrik untuk kebutuhan sehari-hari [4]. Akses terhadap listrik meningkatkan potensi untuk meningkatkan standar hidup, meningkatkan kesempatan, meningkatkan kesehatan, produktivitas, dan mengurangi kemiskinan [5]. Pembangunan sistem mikrogrid energi terbarukan *off-grid*, seperti sistem hidro/surya/angin/baterai, merupakan cara penting untuk memecahkan masalah elektrifikasi di daerah terpencil, terisolasi dan kepulauan [6]. Pembangkit listrik ini merupakan energi ramah lingkungan yang dapat dipasang di dekat pusat beban, sehingga dapat meminimalkan biaya pemasangan jaringan distribusi skala besar [7]. Kemajuan teknologi dalam industri energi terbarukan meningkatkan kemungkinan menggabungkan sumber energi terbarukan ke dalam sistem tenaga listrik di komunitas terpencil. Hibridisasi energi terbarukan memiliki potensi yang tinggi untuk meningkatkan kapasitas pembangkitan dan keandalan pasokan listrik [8].

Karakteristik intermiten dari energi terbarukan, ditambah dengan potensi gangguan simetris dan asimetris pada jaringan, menimbulkan tantangan operasional yang kompleks [9]. Kemampuan melewati gangguan (*fault ride-through/FRT*) jaringan listrik pada sebuah pembangkit listrik tenaga (PLT) energi terbarukan merupakan solusi untuk mengatasi tantangan tersebut [10]. Fluktuasi dalam pembangkitan energi dan integrasi perangkat elektronik daya, menjadi tantangan dalam stabilitas sistem dan kontrol jaringan. Ketidakstabilan jaringan dapat menyebabkan sistem runtuh dalam hitungan detik, sering kali disebabkan karena perubahan daya keluaran generator dan sudut daya pada pembangkit listrik tenaga mikrohidro. Seperti yang ditetapkan secara luas, penilaian stabilitas transien (*transient stability assessment/TSA*) yang cukup akurat sangat penting untuk menghindari hilangnya sinkronisasi dan akhirnya terjadi pemadaman listrik [11]. Setiap unit dari pembangkit listrik energi terbarukan diharuskan memiliki kemampuan mengatasi gangguan untuk mencegah diskoneksi tiap-tiap unit pembangkit listrik energi terbarukan akibat gangguan yang ada [12].

Pada penelitian [13] menyajikan deteksi gangguan dan identifikasi pengumpan yang terganggu pada sistem uji IEEE menggunakan software MATLAB. Software tersebut dapat membedakan sifat gangguan, yaitu apakah gangguan tersebut permanen atau sementara. Pada penelitian [14] menjelaskan mengenai gangguan pada konverter multilevel modular dan diagnosis gangguan, yang memberikan referensi terkini tentang keandalan konverter tersebut. Pada penelitian [15] menjelaskan metode diagnostik berdasarkan komponen simetris dan DC disajikan untuk gangguan sirkuit terbuka, yang dianalisis berdasarkan metode deret Fourier dan mekanisme pembangkitan torsi. Hasil simulasi dan eksperimen memvalidasi efektivitas metode yang dikembangkan dalam mendeteksi gangguan. Pada penelitian [16] menunjukkan aspek penting dari strategi kontrol konverter dalam penanganan skenario *fault-ride through* (FRT) dalam mengatasi gangguan simetris. Pada penelitian [17] menganalisis sistem fotovoltaik dan kinerja generator sinkron terhadap gangguan simetris. Simulasi menunjukkan bahwa sistem dapat mengatasi masalah gangguan sistem daya yang lebih kompleks. Pada penelitian ini [18] menyajikan desain dan pengembangan alat untuk analisis gangguan simetris pada sistem tenaga listrik. Sistem tenaga listrik digunakan untuk menguji alat tersebut dan hasil perhitungan dibandingkan dengan hasil simulasi. Pada penelitian [19] menganalisis menggunakan kurva *Computer Business Equipment Manufacturers Association* (CBEMA) untuk perhitungan langsung penurunan tegangan sistem setelah gangguan tiga fase. Pada [20] menganalisis penurunan tegangan dengan kurva CBEMA dan kurva *Information of Technology Industry Council* (ITIC) dan pengaruhnya terhadap beban dari sisi pengguna.

Kebaruan dari penelitian ini terletak pada pemodelan dan evaluasi ketahanan sistem mikrogrid *off-grid* multi-sumber secara komprehensif terhadap gangguan simetris tiga fasa ke tanah, dengan pendekatan berbasis kurva ITIC/CBEMA. Berbeda dari penelitian sebelumnya yang hanya menganalisis satu sumber atau sistem *grid-tied*, studi ini menyajikan pemetaan dampak gangguan berdasarkan konfigurasi pembangkit aktual di wilayah 3T di Indonesia. Dengan demikian, hasil penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah maupun praktis dalam desain sistem proteksi mikrogrid berbasis energi terbarukan.

energi. Sistem bekerja pada jaringan dengan tegangan AC 400 V pada frekuensi 50 Hz. Tabel 1 menunjukkan parameter komponen yang digunakan pada simulasi MATLAB/Simulink.

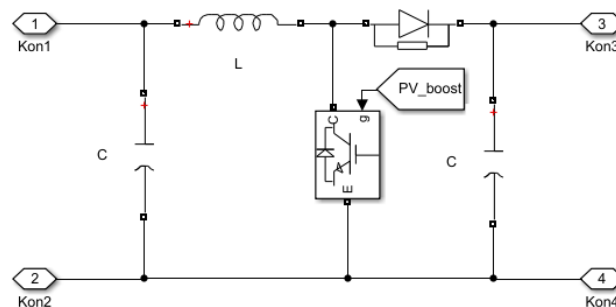


Gambar 2. Pemodelan Mikrogrid Surya, Mikrohidro, Angin, dan Sistem Baterai

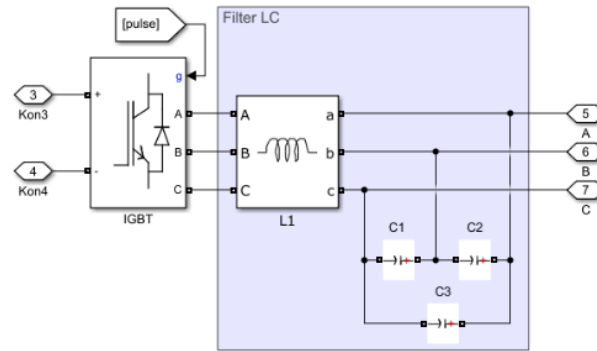
Tabel 1. Parameter Komponen yang Digunakan pada Simulasi MATLAB/Simulink

Sistem	Parameter Komponen	Nilai	Satuan
Surya	Kapasitor sisi input konverter boost	100	μF
	Induktor konverter boost	200	μH
	Kapasitor sisi output konverter boost	1	mF
	Induktor filter LC	1,1	mH
	Kapasitor filter LC	3,3	mF
Mikrohidro	Mesin Sinkron (tegangan keluaran)	400	V
	Eksiter IEEE tipe-1		
Angin	Kapasitor sisi input konverter boost	500	μF
	Induktor konverter boost	70	μH
	RC sisi output konverter boost	5 & 660,8	$\text{m}\Omega$ & μF
	Induktor sisi inverter filter LCL	5,2	mH
	Kapasitor filter LCL	375	μF
	Induktor sisi grid filter LCL	1,5	mH

Pemodelan konverter DC-DC yang digunakan pada sistem pembangkit surya adalah menggunakan tipe konverter boost, seperti terlihat pada Gambar 3. Sakelar yang digunakan pada konverter boost adalah sakelar model IGBT. Sinyal pulsa IGBT didapat dari P&O MPPT. Pada Gambar 4, model sakelar yang digunakan pada inverter DC ke AC tiga fasa pada sistem pembangkit surya adalah sakelar model IGBT. Untuk mengendalikan sakelar IGBT maka diperlukan sinyal pulsa yang dihasilkan oleh blok PWM generator melalui kontrol tegangan *close loop*.

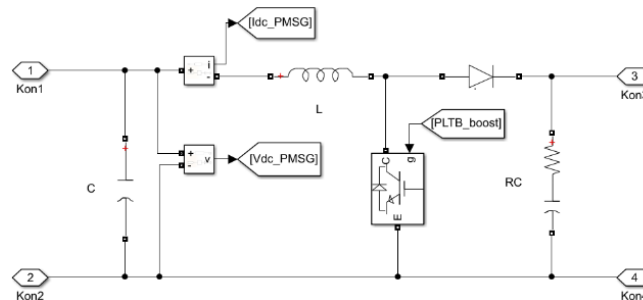


Gambar 3. Pemodelan Konverter Boost pada Pembangkit Surya

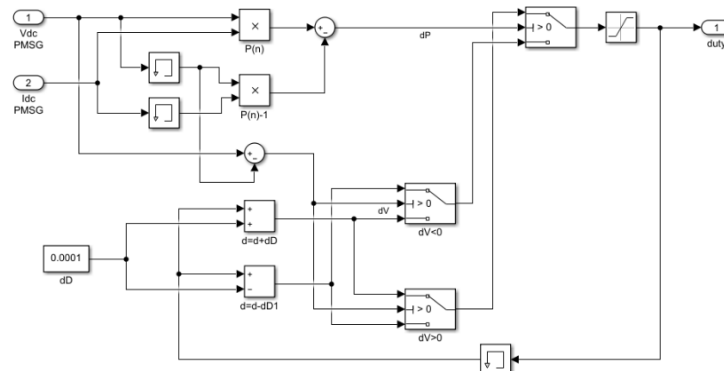


Gambar 4. Pemodelan Inverter dan Filter Pasif LC

Pemodelan Inverter pada sistem pembangkit tenaga angin menggunakan model sakelar dioda dengan tiga lengan. Penyearah dioda berfungsi untuk mengubah tegangan AC tiga fasa ke DC. Sakelar yang digunakan pada konverter boost pembangkit tenaga angin adalah sakelar model IGBT, seperti terlihat pada Gambar 5. Agar mencapai level tegangan DC yang diinginkan, maka konverter boost dilengkapi dengan P&O MPPT. Algoritma P&O bekerja dengan membaca tegangan dan arus pada keluaran penyearah dioda.

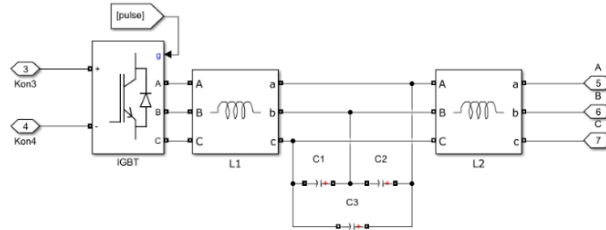


Gambar 5. Pemodelan Konverter Boost pada Sistem Pembangkit Tenaga Angin

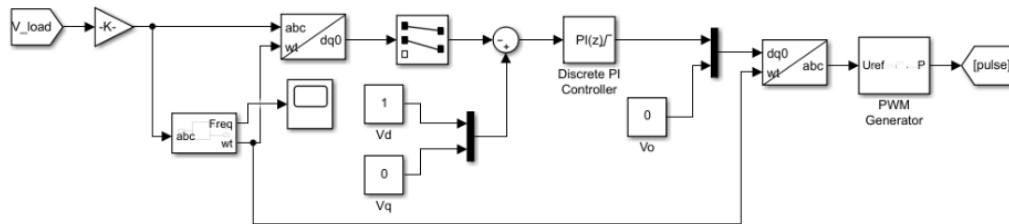


Gambar 6. Pemodelan Algoritma P&O MPPT pada Sistem Pembangkit Tenaga Angin

Pemodelan inverter pada sistem pembangkit tenaga angin pada perangkat lunak MATLAB/Simulink menggunakan sakelar model IGBT dengan tiga lengan, seperti terlihat pada Gambar 7. Pemodelan filter pada sistem pembangkit tenaga angin menggunakan filter pasif LCL. Agar menghasilkan keluaran gelombang tegangan yang konstan, maka diterapkan pengendali PI untuk menghasilkan pulsa melalui blok PWM generator dan diumpankan ke sakelar IGBT inverter [23].



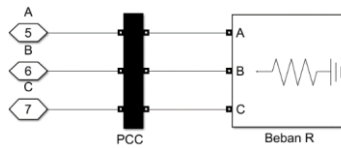
Gambar 7. Pemodelan Inverter dan Filter Pasif LCL



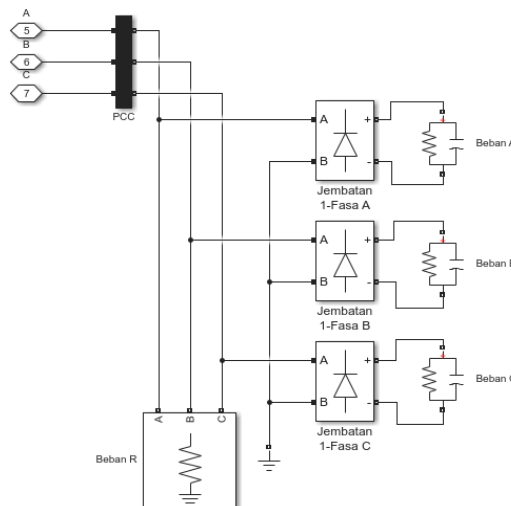
Gambar 8. Pemodelan Pengendali PI pada Inverter

2.3. Pemodelan Beban

Pemodelan beban komunal dibagi menjadi dua, yaitu beban resistif dan beban non-linier, seperti terlihat pada Gambar 9 dan Gambar 10. Beban resistif diterapkan pada seluruh skema sistem pada beban dasar, beban siang hari, dan beban puncak. Beban R meliputi rating daya sebesar 25 kW, 50 kW, dan 180 kW. Beban non-linier dimodelkan dengan beberapa sub-komponen, terdiri dari beban R sebesar 150 kW dan jembatan satu fasa pada setiap fasanya. Kemudian, jembatan satu fasa diparalel dengan beban model RC, dengan nilai R sebesar 10 Ω dan nilai C sebesar 2 mF.



Gambar 9. Pemodelan Beban R



Gambar 10. Pemodelan Beban Non-Linier

2.4. Skema Simulasi Sistem

Simulasi mikrogrid energi terbarukan dilakukan dengan beberapa skema sistem. Simulasi pada penelitian ini terdiri dari tiga bagian, yaitu: (1) skema simulasi sistem *existing* surya, mikrohidro, baterai, (2) skema simulasi integrasi sistem pembangkit tenaga angin terhadap sistem *existing*, (3) skema simulasi kombinasi dari dua pembangkit, dan (4) skema simulasi dengan pembangkit mandiri. Seluruh skema simulasi dapat dilihat pada Tabel 2 di bawah ini:

Tabel 2. Skema Simulasi Mikrogrid Energi Terbarukan

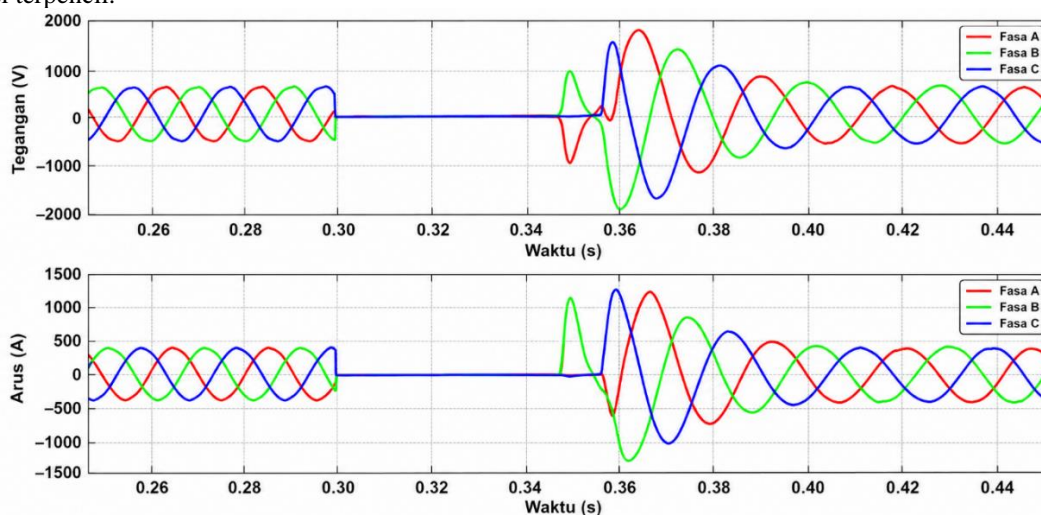
Skema	Simulasi Sistem
1	Surya/Mikrohidro/Baterai
2	Surya/Mikrohidro/Angin/Baterai
3	Surya/Mikrohidro/Angin
4	Surya/Mikrohidro
5	Surya/Angin
6	Mikrohidro/Angin
7	Surya mandiri
8	Angin mandiri
9	Mikrohidro mandiri

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

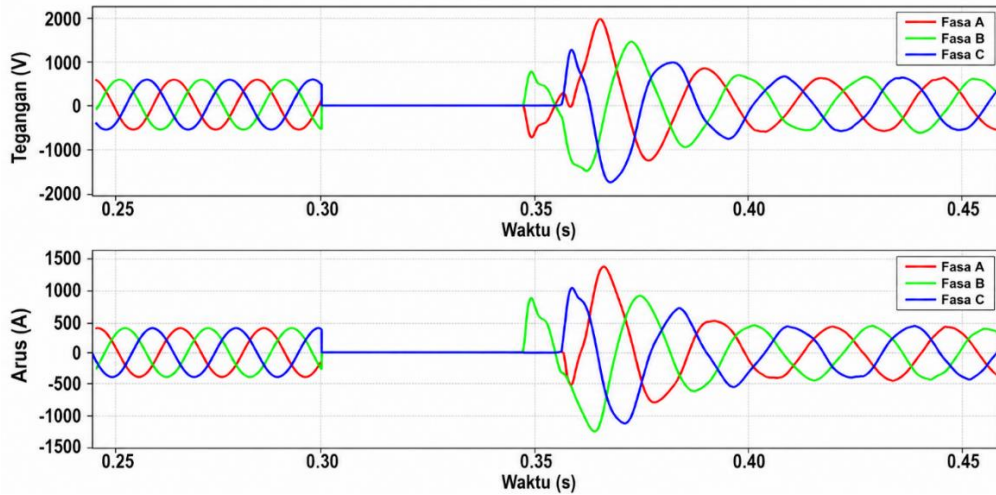
Simulasi pada setiap skema sistem mikrogrid energi terbarukan diatur pada rentang waktu 1 s. Dalam kurun waktu tersebut, masukan berupa radiasi pada pembangkit surya dan kecepatan angin pada pembangkit tenaga angin bersifat *intermittent* dan diatur tidak konstan. Melalui modul Powergui tipe *discrete*, simulasi *step* diatur pada waktu sampel $1e-5$ s. Algoritma ode23tb dipilih untuk menyelesaikan sirkuit sistem.

3.1. Hasil Simulasi Sistem Mikrogrid Energi Terbarukan

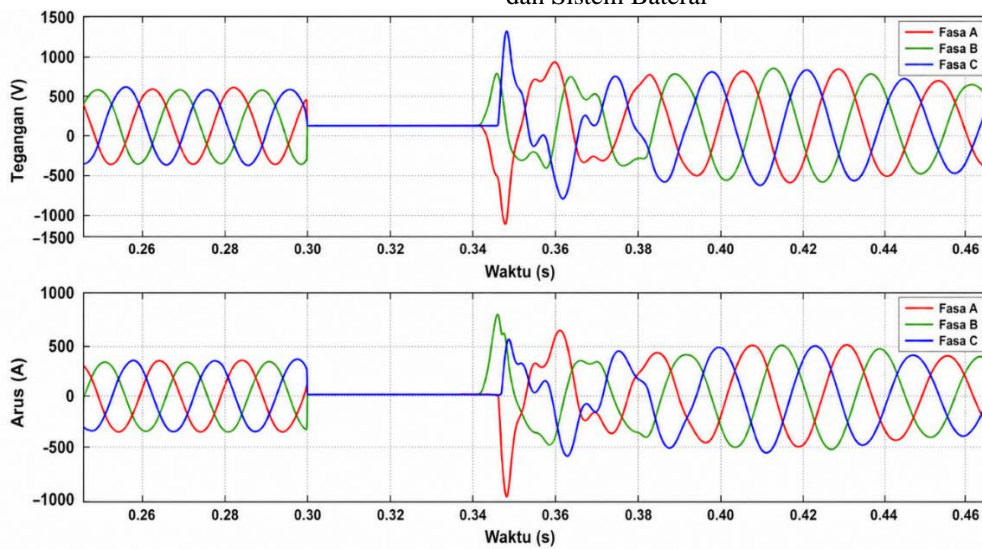
Simulasi hubung singkat tiga fasa ke tanah dilakukan pada sembilan konfigurasi sistem mikrogrid berbasis energi terbarukan terlihat pada Gambar 11 - Gambar 19. Hasil menunjukkan bahwa konfigurasi pembangkit tenaga surya mandiri menghasilkan tegangan dan arus lebih transien tertinggi, masing-masing sebesar 3,57 p.u dan 4,5 p.u. Hal ini menunjukkan sensitivitas tinggi sistem berbasis inverter terhadap gangguan, terutama tanpa dukungan penyimpanan energi. Konfigurasi mikrogrid surya, mikrohidro, angin, dan baterai, yang merepresentasikan sistem terintegrasi penuh, juga menunjukkan lonjakan transien signifikan (3,53 p.u dan 3,44 p.u), disebabkan oleh akumulasi efek inverter dan filter pasif. Sebaliknya, sistem pembangkit energi mikrohidro mandiri menunjukkan performa terbaik dengan tegangan lebih hanya 1,13 p.u dan arus lebih 1,36 p.u, yang tetap berada dalam batas toleransi kurva ITIC/CBEMA. Sistem dengan integrasi baterai cenderung memiliki respons yang lebih terkendali terhadap gangguan, menunjukkan perannya dalam meredam fluktuasi. Namun, filter pasif yang umum digunakan pada inverter justru menjadi sumber lonjakan tegangan sementara pasca gangguan. Perbedaan karakteristik output antar konfigurasi menegaskan pentingnya pemilihan kombinasi pembangkit dan desain kontrol inverter yang tepat untuk menjamin kestabilan sistem di lokasi terpencil.



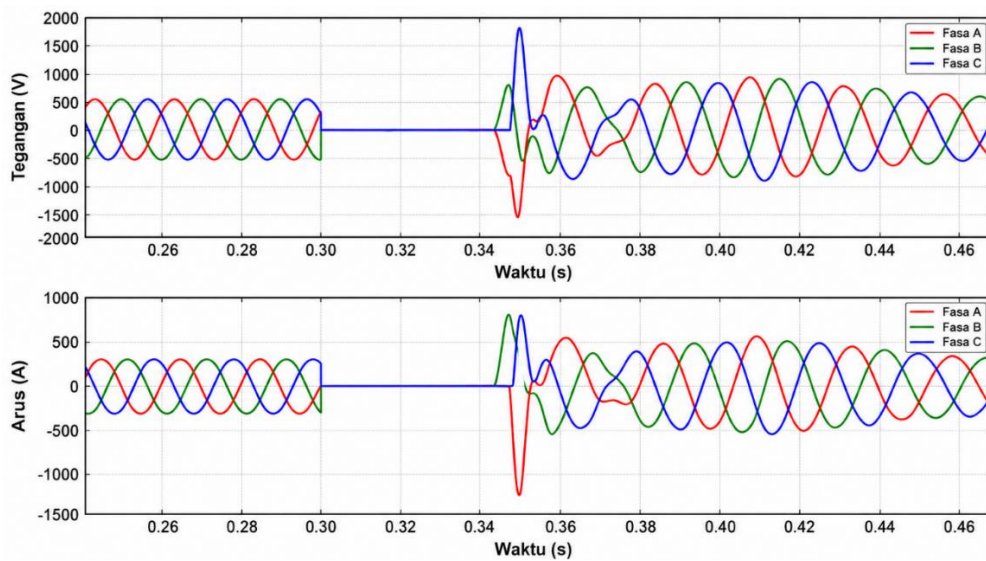
Gambar 11. Profil Tegangan dan Arus Hubung Singkat pada Sistem *Existing* Surya, Mikrohidro dan Baterai



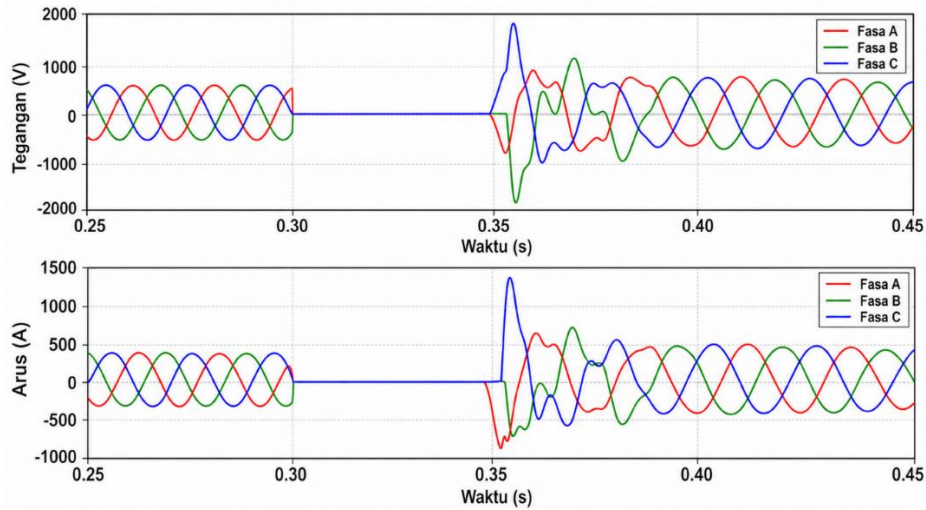
Gambar 12. Profil Tegangan dan Arus Hubung Singkat pada Sistem Pembangkit Surya, Mikrohidro, Angin dan Sistem Baterai



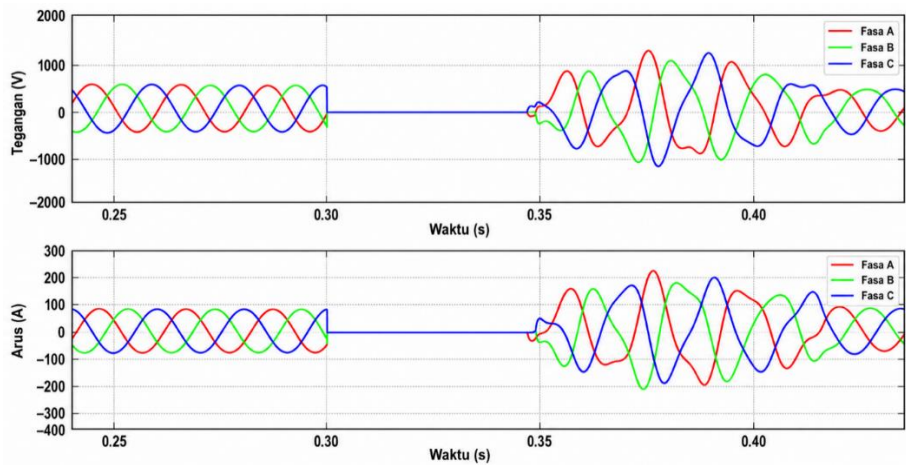
Gambar 13. Tegangan dan Arus Hubung Singkat pada Sistem Pembangkit Surya, Mikrohidro, dan Angin



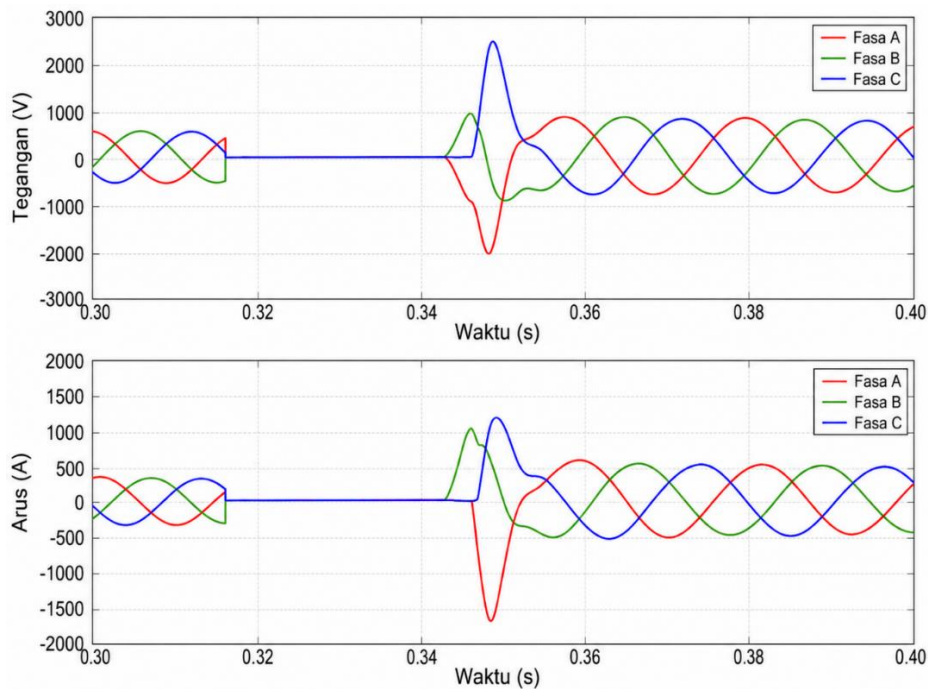
Gambar 14. Profil Tegangan dan Arus Hubung Singkat pada Sistem Pembangkit Surya dan Mikrohidro



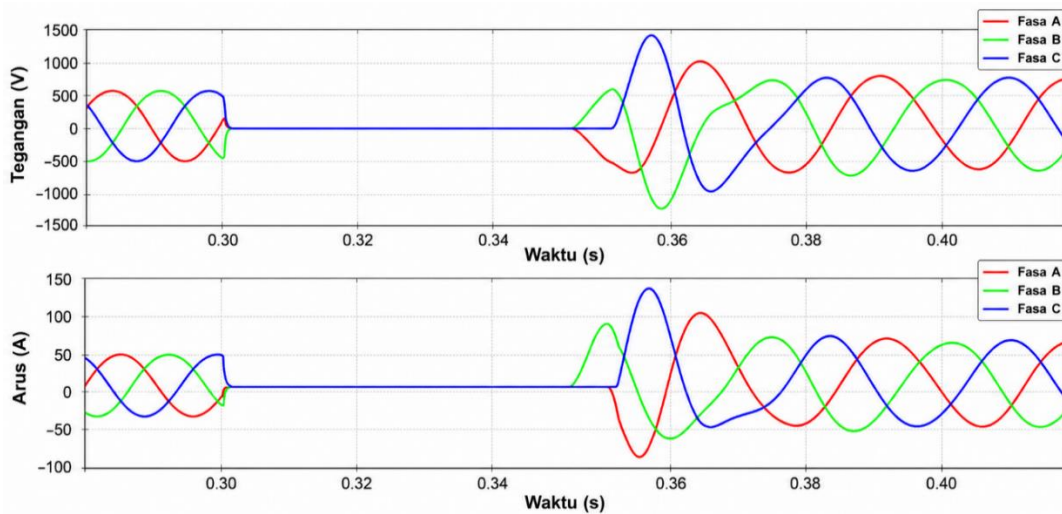
Gambar 15. Profil Tegangan dan Arus Hubung Singkat pada Sistem Pembangkit Surya dan Angin



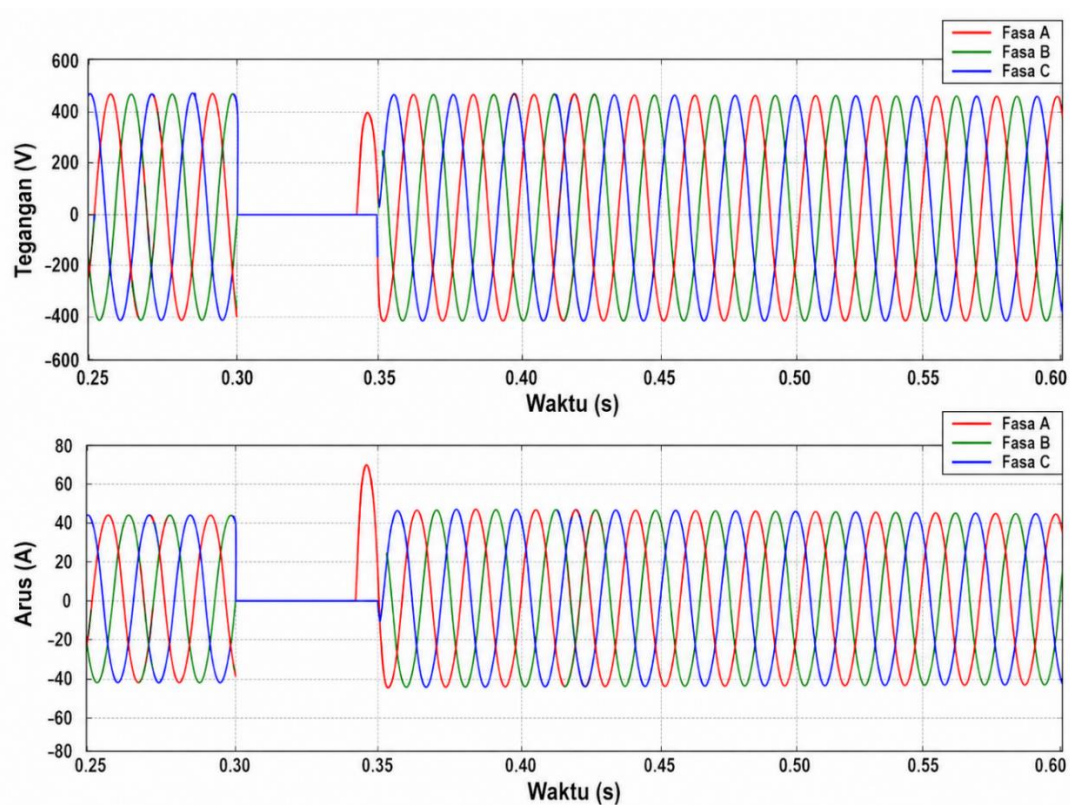
Gambar 16. Profil Tegangan dan Arus Hubung Singkat pada Sistem Pembangkit Mikrohidro dan Angin



Gambar 17. Profil Tegangan dan Arus Hubung Singkat pada Sistem Pembangkit Surya Mandiri



Gambar 18. Profil Tegangan dan Arus Hubung Singkat pada Sistem Pembangkit Angin Mandiri



Gambar 19. Profil Tegangan dan Arus Hubung Singkat pada Sistem Pembangkit Mikrohidro Mandiri

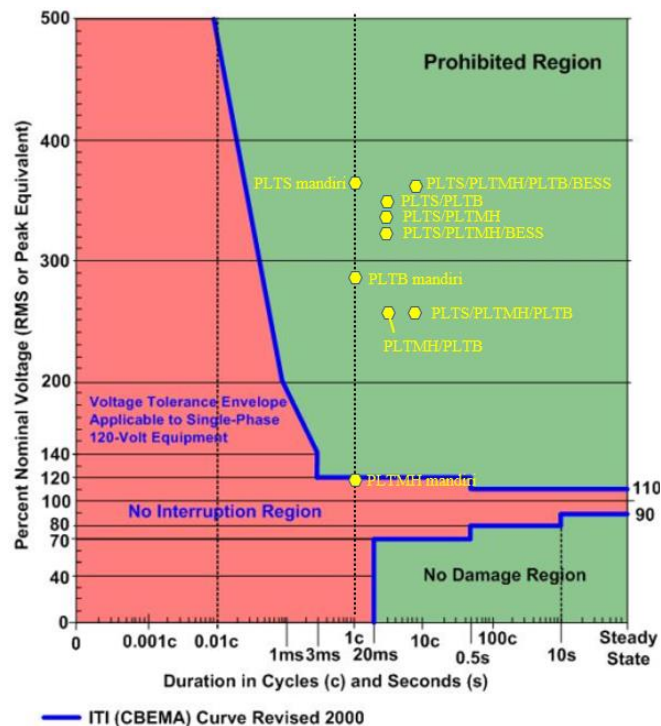
3.2. Analisa dan Pembahasan

Hal yang menjadi penting adalah dengan penggunaan pengendali PI pada inverter yang diterapkan pada sistem pembangkit tenaga surya dan angin. Pada sistem pembangkit tenaga angin mandiri mampu menghasilkan keluaran tegangan yang lebih stabil dari pada sistem pembangkit surya. Hal ini juga dipengaruhi dari penggunaan turbin angin yang dilengkapi dengan *drive train* dan kontrol *pitch angle* [22]. Pemilihan kontrol inverter yang digunakan pada pembangkit listrik energi terbarukan dengan elektronika daya sangat mempengaruhi indeks fluktuasi tegangan yang dihasilkan. Kemudian, dengan adanya integrasi sistem baterai dapat memperbaiki indeks fluktuasi tegangan hingga stabil pada tegangan kerja nominal 1 p.u.

Tabel 3. Ringkasan Indeks Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah dari Hasil Simulasi

Skema Sistem	Tegangan lebih transien maksimal (p.u.)	Arus lebih transien maksimal (p.u.)	Transien tegangan pasca gangguan (siklus)	Transien arus pasca gangguan (siklus)
Surya/Mirkohidro/Baterai	3,21	3,11	2	2
Surya/Mirkohidro/Angin/Baterai	3,53	3,44	3	2
Surya/Mirkohidro/Angin	2,60	2,59	2	2
Surya/Mirkohidro	3,32	3,24	2	2
Surya/Angin	3,41	3,96	2	2
Mirkohidro/Angin	2,60	2,54	3	3
Surya mandiri	3,57	4,50	1	1
Angin mandiri	2,85	4,09	1	1
Mirkohidro mandiri	1,13	1,36	1	1

Kurva akseptabilitas daya merupakan kurva empiris yang merepresentasikan intensitas dan durasi gangguan tegangan pada bus yang berkaitan dengan energi yang dikirim ke beban, serta sebagai alternatif untuk penilaian dan pengukuran penurunan tegangan atau terjadi tegangan lebih pada bus [24]. Lokus ini mengukur akseptabilitas daya suplai sebagai fungsi dari durasi terhadap besarnya gangguan tegangan bus. Dari data Tabel 3, jika diplot pada kurva aksesibilitas ITIC [25] maka hanya sistem pembangkit mikrohidro mandiri yang memiliki tegangan lebih transien yang masih dapat ditoleransi, seperti ditunjukkan oleh Gambar 20. Skema sistem yang melibatkan inverter daya dalam sistem pembangkit energi terbarukan berada pada zona yang terlarang. Skema sistem mikrogrid surya, mikrohidro, angin, dan sistem baterai memiliki nilai dengan tegangan lebih transien maksimal tertinggi dari pada skema sistem lainnya. Penggunaan komponen kapasitor yang terdapat pada filter pasif inverter mempengaruhi besaran magnitudo tegangan lebih sementara pasca gangguan hubung singkat pada mikrogrid energi terbarukan dengan elektronika daya [26]. Stabilitas tinggi pada pembangkit mikrohidro mandiri disebabkan oleh sifat mekanikalnya yang berbasis mesin sinkron dan eksitasi kontinyu, yang secara alami mampu menahan gangguan sesaat tanpa ketergantungan inverter. Sebaliknya, pembangkit tenaga surya mandiri menggunakan inverter yang sangat sensitif terhadap perubahan beban dan arus gangguan, terutama ketika sistem tidak dilengkapi penyimpanan energi atau kontrol adaptif.



Gambar 20. Kurva Aksesibilitas Daya ITIC/CBEMA

Informasi dari kurva aksesibilitas daya dapat digunakan untuk mengidentifikasi apakah desain sistem pembangkit energi terbarukan memadai dan apakah kerentanan beban perlu dikurangi. Peralatan seperti komputer dan alat komunikasi sangat peka terhadap tegangan naik, tegangan turun dan transien akan mempengaruhi operasinya. Faktor yang mempengaruhi dari tegangan lebih sementara dalam sistem tenaga listrik adalah dengan penggunaan sistem pembumian yang tepat pada komponen utama sistem tenaga listrik.

Dari sisi kepraktisan implementasi, konfigurasi pembangkit mikrohidro menunjukkan keunggulan dalam kestabilan sistem dan ketahanan terhadap gangguan, namun terbatas secara geografis. Sebaliknya, pembangkit tenaga surya mudah dipasang dan cepat dikembangkan di banyak wilayah, namun memerlukan sistem kontrol yang lebih canggih dan penyimpanan energi untuk meningkatkan ketahanan. Oleh karena itu, konfigurasi hybrid pembangkit surya, mikrohidro, baterai menawarkan keseimbangan antara keandalan teknis dan fleksibilitas pemasangan di daerah terpencil.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa gangguan simetris tiga fasa ke tanah pada sistem mikrogrid berbasis energi terbarukan berdampak signifikan terhadap kestabilan tegangan dan arus sistem. Melalui pemodelan dan simulasi menggunakan MATLAB/Simulink pada berbagai konfigurasi pembangkit, ditemukan bahwa sistem pembangkit surya mandiri menghasilkan lonjakan tegangan dan arus tertinggi, yaitu 3,57 p.u dan 4,50 p.u, yang melampaui batas toleransi berdasarkan kurva ITIC/CBEMA. Sebaliknya, sistem mikrohidro mandiri menunjukkan ketahanan terbaik dengan tegangan lebih hanya sebesar 1,13 p.u, dan tetap berada dalam zona aman. Integrasi sistem baterai terbukti mampu meredam fluktuasi tegangan, sementara penggunaan inverter dan filter pasif justru berkontribusi terhadap lonjakan transien pasca gangguan. Kekurangan utama sistem berbasis elektronika daya terletak pada sensitivitas tinggi terhadap gangguan serta ketergantungan pada desain kontrol inverter yang tepat. Kontribusi utama dari penelitian ini adalah pemetaan korelasi antara konfigurasi pembangkit dan respons sistem terhadap gangguan simetris dalam konteks mikrogrid *off-grid*, yang dapat digunakan sebagai acuan dalam perancangan sistem perlindungan dan kendali inverter.

Penelitian ini menyimpulkan bahwa sistem mikrohidro mandiri merupakan konfigurasi paling tahan terhadap gangguan simetris, sedangkan sistem surya mandiri paling rentan. Inverter dan filter pasif berkontribusi signifikan terhadap lonjakan transien, sementara baterai berperan sebagai penstabil sistem. Studi ini memetakan korelasi antara jenis pembangkit dan dampak gangguan berdasarkan standar ITIC/CBEMA. Untuk pengembangan sistem yang lebih tangguh, disarankan integrasi kontrol inverter berbasis kecerdasan buatan dan proteksi selektif berbasis deteksi gangguan cepat. Hasil ini dapat dijadikan acuan dalam kebijakan elektrifikasi 3T yang adaptif terhadap gangguan sistem tenaga.

DAFTAR PUSAKA

- [1] H. El Hafdaoui, A. Khallaayoun, and S. Aimajeed, "Controlled Non-Dominated Sorting Genetic Algorithms for Multi-Objective Optimal Design of Standalone and Grid-Connected Renewable Energy Systems in Integrated Energy Sectors," *IEEE Access*, vol. 13, no. November 2024, pp. 14658–14685, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3530084.
- [2] D. Sahidin, B. Ihsan, T. D. Rachmildha, and D. Hamdani, "Perancangan dan Pemodelan PLTS Off-Grid dengan Penyimpanan Energi Hibrida Berbasis Supercapacitor-Baterai: Studi Kasus di Desa Karamina, Papua," *J. Ris. Rekayasa Elektro*, vol. 7, no. 1, pp. 23–34, 2025, doi: <https://doi.org/10.30595/jrre.v7i1.26325>.
- [3] C. Breyer *et al.*, "On the History and Future of 100% Renewable Energy Systems Research," *IEEE Access*, vol. 10, no. July, pp. 78176–78218, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3193402.
- [4] Radhiansyah, N. A. Syam, Muzakkir, and D. Sahidin, "Analisis Levelized Cost of Electricity (LCoE) pada PLTS Terapung dengan PLTS di Daratan: Study Kasus Pulau Kodingareng, Makassar Sulawesi Selatan," *Globe Publ. Ilmu Tek. Teknol. Kebumihan, Ilmu Perkapalan*, vol. 3, no. 1, pp. 58–67, 2025, doi: <https://doi.org/10.61132/globe.v3i1.741>.
- [5] G. M. Shafiullah *et al.*, "Prospects of Hybrid Renewable Energy-Based Power System: A Case Study, Post Analysis of Chipendeke Micro-Hydro, Zimbabwe," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 73433–73452, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3078713.
- [6] J. Chen, Y. Che, and J. Zhang, "Optimal Configuration and Analysis of Isolated Renewable Power Systems," in *2011 4th International Conference on Power Electronics Systems and Applications, PESA 2011*, Hong Kong, China: IEEE, 2011, pp. 2–5. doi: 10.1109/PESA.2011.5982923.
- [7] D. Sahidin, T. Desmana Rachmildha, and D. Hamdani, "Power Quality Analysis of Solar PV/Micro-Hydro/Wind Renewable Energy Systems for Isolated Area," in *2021 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2021*, Bandung, Indonesia: IEEE, 2021, pp. 624–629. doi: 10.1109/ICHVEPS53178.2021.9601054.
- [8] S. Tucker and M. Negnevitsky, "Renewable Energy Micro-Grid Power System for Isolated Communities," in *2011 21st Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2011*, Brisbane, QLD, Australia: IEEE, 2011, pp. 1–7.
- [9] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Std 141-1993: IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*. 1993, pp. 1–750.
- [10] M. I. Hossain, W. M. Hamanah, M. S. Alam, M. Shafiullah, and M. A. Abido, "Fault Ride Through and Intermittency

- Improvement of Renewable Energy Integrated MMC-HVDC System Employing Flywheel Energy Storage,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 50528–50546, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3277968.
- [11] M. Massaoudi, H. Abu-Rub, and A. Ghayeb, “FLACON: A Deep Federated Transfer Learning-Enabled Transient Stability Assessment During Symmetrical and Asymmetrical Grid Faults,” *IEEE Open J. Ind. Appl.*, vol. 5, pp. 253–266, 2024, doi: 10.1109/OJIA.2024.3426281.
- [12] Y. Gu, Y. Huang, Q. Wu, C. Li, H. Zhao, and Y. Zhan, “Isolation and Protection of the Motor-Generator Pair System for Fault Ride-Through of Renewable Energy Generation Systems,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 13251–13258, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2965773.
- [13] M. A. Barik, A. Gargoom, M. A. Mahmud, M. E. Haque, H. Al-Khalidi, and A. M. Than Oo, “A Decentralized Fault Detection Technique for Detecting Single Phase to Ground Faults in Power Distribution Systems with Resonant Grounding,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 33, no. 5, pp. 2462–2473, 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2018.2799181.
- [14] J. He, Q. Yang, and Z. Wang, “On-Line Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Operation of Modular Multilevel Converters – A Comprehensive Review,” *CES Trans. Electr. Mach. Syst.*, vol. 4, no. 4, pp. 360–372, 2020, doi: 10.30941/CESTEMS.2020.00043.
- [15] W. Huang, J. Du, W. Hua, and Q. Fan, “An Open-Circuit Fault Diagnosis Method for PMSM Drives Using Symmetrical and DC Components,” *Chinese J. Electr. Eng.*, vol. 7, no. 3, pp. 124–135, 2021, doi: 10.23919/CJEE.2021.000031.
- [16] R. Rosso, S. Engelken, and M. Liserre, “On the Implementation of an FRT Strategy for Grid-Forming Converters under Symmetrical and Asymmetrical Grid Faults,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 57, no. 5, pp. 4385–4397, 2021, doi: 10.1109/TIA.2021.3095025.
- [17] B. S. Tekpeti, X. Kang, and M. Kheshti, “Particular PV Grid-Connected System Under Symmetrical and Asymmetrical Faults Analysis,” in *2017 IEEE Electrical Power and Energy Conference, EPEC 2017*, Saskatoon, SK, Canada: IEEE, 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/EPEC.2017.8286146.
- [18] D. V. Tien and R. Gono, “Developing a Tool for Symmetrical and Unsymmetrical Faults Analysis in Power System,” in *Proceedings of 2021 International Conference on System Science and Engineering, ICSSE 2021*, Ho Chi Minh City, Vietnam: IEEE, 2021, pp. 189–194. doi: 10.1109/ICSSE52999.2021.9538422.
- [19] Y. H. Chan, C. J. Wu, W. N. Chang, and Y. P. Chang, “Voltage Sag Planning of Industry power system using hybrid differential evolution considering CBEMA curve,” *Int. J. Circuits, Syst. Signal Process.*, vol. 5, no. 2, pp. 141–150, 2011.
- [20] J. F. Moon, S. H. Lim, J. C. Kim, and S. Y. Yun, “Assessment of the Impact of SFCL on Voltage Sags in Power Distribution System,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, no. 3 PART 2, pp. 2161–2164, 2011, doi: 10.1109/TASC.2010.2093592.
- [21] D. Sahidin, T. D. Rachmildha, and D. Hamdani, “Study of Power Quality Improvement in Microgrid Based on Solar PV/Micro-Hydro/Wind Renewable Energy Generation with Battery System,” in *2022 5th International Conference on Energy Conservation and Efficiency, ICECE 2022 - Proceedings*, Lahore, Pakistan: IEEE, 2022, pp. 1–7. doi: 10.1109/ICECE54634.2022.9758977.
- [22] D. Sahidin, “Kajian Kualitas Daya pada Mikrogrid Berbasis PLTS/PLTMH/PLTB untuk Daerah Terisolasi,” Master’s Thesis, Institut Teknologi Bandung, 2022.
- [23] T. H. M. S. Rashid, A. K. Routh, R. Rana, A. H. M. I. Ferdous, and R. Sayed, “A Novel Approach to Maximize Performance and Reliability of PMSG Based Wind Turbine: Bangladesh Perspective,” *Am. J. Eng. Res.*, vol. 7, no. 6, pp. 17–26, 2018.
- [24] R. S. Thallam and G. T. Heydt, “Power Acceptability and Voltage Sag Indices in the Three Phase Sense,” in *2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No.00CH37134)*, Seattle, WA, USA: IEEE, 2000, pp. 905–910. doi: 10.1109/PESS.2000.867482.
- [25] M. P. Stephens, “Power Quality Standards: CBEMA, ITIC, SEMI F47, IEC 61000-4-11/34,” 2009.
- [26] H. Ghoddami and A. Yazdani, “A Mitigation Strategy for Temporary Overvoltages Caused By Grid-Connected Photovoltaic Systems,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 2, pp. 413–420, 2015, doi: 10.1109/TEC.2014.2364033.