

PENINGKATAN KESTABILAN FREKUENSI-BEBAN PADA MICROGRID TERISOLASI BERBASIS PENGONTROL PID DENGAN DUKUNGAN TURBIN ANGIN DAN PV

Fathan Mubinan Sugiatna¹, Desmira², Malika Azizah Faradillah³, Jenice Fausta Ro Intan Sagala⁴, Naufal Abrar Wijaya⁵, Azhar Mahdi⁶

Email: fathanmubinan999@gmail.com¹, desmira@untirta.ac.id², malikaazizah98@gmail.com³, jenicefaustarointan08@gmail.com⁴, naufalabbrarwijaya@gmail.com⁵, azharmahdi86@gmail.com⁶

^{1,2,3,4,5,6}Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis cara untuk meningkatkan kestabilan frekuensi pada microgrid yang terisolasi dan memiliki tingkat penetrasi sumber energi terbarukan yang tinggi, seperti turbin angin dan panel surya. Metode yang diusulkan menggunakan pengontrol PID yang dibuat untuk mengatur kontribusi daya dari Sistem Penyimpanan Energi Battery (BESS) dan sumber terbarukan melalui pendekatan kontrol sekunder, dengan tujuan untuk mengurangi deviasi frekuensi saat ada gangguan beban dan fluktuasi output dari sumber energi terbarukan. Model dinamis microgrid dibuat dengan menggunakan persamaan swing yang sederhana dan diuji dalam skenario gangguan beban secara tiba-tiba serta fluktuasi dari sumber angin dan panel surya. Hasil dari simulasi menunjukkan bahwa penerapan strategi kontrol yang efektif dapat menurunkan overshoot frekuensi dan mempercepat proses pemulihan frekuensi menuju nilai yang diinginkan, meskipun hasil akhirnya sangat dipengaruhi oleh pengaturan PID dan batasan kapasitas BESS. Penelitian ini menyimpulkan bahwa penerapan pengendalian PID yang teroptimasi bersama dengan skema pengelolaan daya dari sumber energi terbarukan dapat meningkatkan ketahanan frekuensi pada microgrid yang terisolasi.

Kata Kunci: PID Controller; LFC; Microgrid.

ABSTRACT

This study analyzes ways to improve frequency stability in isolated microgrids with high penetration of renewable energy sources, such as wind turbines and solar panels. The proposed method uses a PID controller designed to regulate the power contribution from Battery Energy Storage Systems (BESS) and renewable sources through a secondary control approach, with the aim of reducing frequency deviation during load disturbances

and output fluctuations from renewable energy sources. A dynamic model of the microgrid is created using simple swing equations and tested under scenarios of sudden load disturbances and fluctuations from wind and solar panels. Simulation results show that the implementation of an effective control strategy can reduce frequency overshoot and accelerate the frequency recovery process towards the desired value, although the final result is strongly influenced by the PID settings and the capacity limitations of the BESS. This study concludes that the implementation of an optimized PID controller together with a power management scheme from renewable energy sources can improve frequency resilience in isolated microgrids.

Keywords: *PID Controller; LFC; Microgrid.*

1. PENDAHULUAN

Saat ini, seiring dengan menurunnya ketersediaan bahan bakar fosil dan meningkatnya polusi serta efek pemanasan global, pemanfaatan energi terbarukan untuk menghasilkan listrik menjadi salah satu solusi paling efektif yang ada. Meski terdapat banyak keuntungan dari energi terbarukan, stabilitas sistem tenaga—terutama pada mikrogrid—masih menghadapi berbagai tantangan yang memerlukan pengendalian yang baik. Salah satu jenis energi terbarukan yang paling umum dan ekonomis adalah energi angin, yang dimanfaatkan melalui penggunaan turbin angin. Namun, masalah keberlanjutan mikrogrid telah jadi salah satu tantangan teratas dalam sektor kelistrikan. Ketika keseimbangan antara pasokan dan permintaan terganggu, frekuensi mikrogrid akan berubah — jika beban turun dan output daya meningkat, generator biasanya akan meningkatkan kecepatan dan frekuensinya; sebaliknya, jika beban meningkat dan produksi turun, frekuensi serta kecepatan generator akan menurun. Dengan demikian, frekuensi mikrogrid dapat berfungsi sebagai indikator untuk menjaga keseimbangan daya secara real-time.

Penggunaan energi terbarukan terus berkembang. Di antara berbagai jenis sumber energi terbarukan, pemanfaatan energi angin telah mengalami pertumbuhan yang signifikan di seluruh dunia. Kebanyakan turbin yang digunakan pada ladang angin adalah turbin dengan kecepatan konstan, tetapi belakangan turbin angin berkecepatan variabel semakin umum digunakan. Keuntungan dari turbin angin berkecepatan variabel meliputi kemampuan untuk mengikuti titik daya maksimum (MPPT), pengendalian daya reaktif secara terpisah, beban mekanis yang lebih rendah, serta ukuran konverter yang lebih

kecil. Generator induksi berbelitan ganda (DFIG) banyak digunakan dalam ladang angin berkecepatan variabel karena lebih rendahnya biaya instalasi, efisiensi yang lebih baik, dan kerugian yang lebih sedikit.

Kinerja dan pengendalian yang efisien adalah elemen penting dalam tantangan pengelolaan mikrogrid. Pengendalian mikrogrid biasanya dilakukan pada tiga tingkat, yaitu tingkat primer, sekunder, dan tersier. Dua tingkat pertama berfokus pada pengaturan tegangan dan frekuensi serta melakukan reset sistem bahkan dalam keadaan terisolasi ketika ada perubahan dalam beban atau output. Tingkat kendali ketiga bertujuan untuk mengatur komponen-komponen mikrogrid dan menentukan interaksinya dengan jaringan utama dengan mempertimbangkan faktor ekonomi serta keandalan sistem. Penjelasan rinci tentang arsitektur pengendali mikrogrid terdesentralisasi dapat ditemukan di sumber tertentu, sementara untuk pengendali terpusat dan mikrogrid hibrida dibahas di sumber lainnya. Selain itu, terdapat beragam metode untuk menyelesaikan penjadwalan dan manajemen mikrogrid yang berfokus pada pemodelan yang akurat terhadap komponen mikrogrid dan mengatasi ketidakpastian, seperti metode deterministik dan probabilistik yang dibahas dalam dua sumber berbeda.

Pada, para peneliti telah melakukan studi tentang pengelolaan mikrogrid yang terpisah untuk menekan variasi frekuensi dan daya, serta mengenai penerapan kontrol frekuensi cerdas untuk mikrogrid AC dengan kombinasi antara algoritma swarm dan logika fuzzy. Pada, para penulis memfokuskan perhatian pada stabilitas dan pengelolaan mikrogrid yang melibatkan kombinasi antara mikroturbin, sel bahan bakar, dan elektroliser yang dikendalikan secara otomatis menggunakan pengendali fuzzy. Pada, metode umpan balik keadaan digunakan untuk menganalisis stabilitas mikrogrid hibrida dengan cara mencari nilai eigen dari sistem dan menyesuaikan parameter dari pengendali. Pada, telah diajukan sebuah pendekatan baru untuk pengaturan frekuensi mikrogrid yang mencakup panel surya dan turbin angin. Pada, representasi pengendalian frekuensi mikrogrid menggunakan metode pengambilan sampel inersia dengan penambahan kontrol ditunjukkan. Pada, ada analisis terhadap kontrol frekuensi beban pada sistem tenaga yang terdiri dari beberapa zona dengan kehadiran DFIG, dan pada, ditampilkan penelitian mengenai mikrogrid dengan penggunaan konverter back-to-back. Pada, diajukan kontrol frekuensi untuk mikrogrid terpisah yang melibatkan sumber penyimpanan energi dengan menggunakan algoritma differential evolution, juga

memperhitungkan ketidakpastian dalam perancangan pengendali. Studi juga dilakukan tentang pengendalian emisi gas rumah kaca melalui investasi optimal pada teknologi DER serta manajemen energi untuk bangunan yang mencapai zero-net-energy.

Setiap mikrogrid dapat berfungsi baik dalam koneksi jaringan maupun dalam keadaan terpisah. Dalam situasi terhubung ke jaringan, dengan inersia sistem tenaga yang tinggi, stabilitas jaringan tidak terlalu terpengaruh oleh gangguan kecil. Di sisi lain, dalam kondisi terisolasi, rendahnya inersia menyebabkan mikrogrid mengalami variasi frekuensi meskipun hanya ada sedikit perubahan beban. Dalam penelitian ini, kestabilan frekuensi mikrogrid dalam mode terisolasi dengan turbin angin ber-DFIG dianalisis dengan menerapkan gangguan kecil seperti penyesuaian beban. Mikrogrid tersebut memiliki berbagai jenis sumber energi terdistribusi, termasuk panel surya, sel bahan bakar, dan generator diesel. Untuk meningkatkan kontrol frekuensi mikrogrid, pengendali frekuensi jenis PID diterapkan pada model turbin serta pada model governor dari generator diesel. Selain itu, guna meningkatkan efektivitas pengendali yang diusulkan, nilai gain disesuaikan secara optimal menggunakan pendekatan Craziness-Based Particle Swarm Optimization (CRPSO). Fungsi tujuan untuk optimasi ditentukan untuk meminimalkan fluktuasi frekuensi dalam periode singkat. krusial dalam operasi sistem tenaga listrik modern, yaitu stabilitas frekuensi pada microgrid yang terisolasi atau dalam mode pulau, khususnya dengan penetrasi tinggi dari sumber energi terbarukan intermiten seperti turbin angin dan fotovoltaik (PV). Adopsi sumber daya terdistribusi ini membawa tantangan inheren terhadap inersia dan peredaman sistem, yang memerlukan strategi kontrol yang canggih dan adaptif

2. METODE PENELITIAN

Modeling frekuensi dari mikrogrid pulau berdasarkan diagram blok dari setiap sumber pembangkit listrik terdistribusi dan turbin angin yang dilengkapi dengan DFIG disajikan untuk menyelidiki perilaku frekuensi sistem. Selanjutnya, dengan menggunakan penyesuaian optimal dari pengendali PID melalui algoritma CRPSO, metode pengendalian frekuensi terbaik dalam keberadaan DFIG dijelaskan secara bertahap. Dalam fungsi tujuan optimasi, untuk mengurangi parameter di domain waktu dengan bentuk fungsi tujuan ISTSE, kesalahan frekuensi dipilih agar fluktuasi frekuensi dapat diredam setelah beberapa waktu. Pemanfaatan sumber daya dalam mikrogrid akan dilakukan untuk meningkatkan stabilitas frekuensi mikrogrid. Selain itu, penerapan

pengendali yang diusulkan dalam mikrogrid dan penyesuaian optimal parameternya akan membuat fluktuasi frekuensi mikrogrid teredam dengan baik akibat gangguan seperti kelebihan beban serta tidak akan menghalangi operasi mikrogrid.

Alat, Bahan dan Metode :

Pemodelan frekuensi mikrogrid pulau berdasarkan diagram blok koneksi dari masing-masing sumber pembangkit terdistribusi dan turbin angin yang dilengkapi dengan DFIG disajikan untuk menyelidiki perilaku frekuensi sistem. Kemudian, dengan menggunakan penyesuaian optimal pengendali PID dengan algoritma CRPSO, metode pengendalian frekuensi optimal dengan adanya DFIG dijelaskan langkah demi langkah. Dalam fungsi tujuan optimasi, untuk mereduksi parameter domain waktu dalam bentuk fungsi tujuan ISTSE, kesalahan frekuensi dipilih sehingga fluktuasi frekuensi teredam setelah beberapa saat. Pemanfaatan sumber daya dalam mikrogrid akan direalisasikan untuk meningkatkan stabilitas frekuensi mikrogrid. Selain itu, penerapan pengendali yang diusulkan pada mikrogrid dan penyesuaian parameternya yang optimal akan menyebabkan fluktuasi frekuensi mikrogrid teredam dengan baik akibat gangguan seperti kelebihan beban dan tidak akan menghalangi mikrogrid untuk berfungsi.

Kontrol Frekuensi Beban Mikrogrid

Pengoperasian mikrogrid yang tepat membutuhkan keseimbangan antara daya produksi dengan konsumsi daya total dan rugi-rugi daya. Seiring waktu, titik operasi sistem terus berubah, sehingga frekuensi dan daya yang dialokasikan ke unit-unit dapat menjadi tidak seimbang. Penyimpangan ini dapat menyebabkan efek yang tidak diinginkan pada mikrogrid. Kontrol frekuensi beban (LFC), bersama dengan kontrol produksi otomatis, merupakan salah satu tantangan terpenting dalam perancangan dan pengoperasian mikrogrid, yang diperlukan untuk kinerja optimal mikrogrid dan harus dipertimbangkan secara serius dalam perancangan. Tujuan utama dalam mengendalikan LFC mikrogrid dapat diringkas sebagai berikut: memastikan deviasi frekuensi adalah nol dalam mode pulau, mengurangi fluktuasi frekuensi saat mengubah status dari mode koneksi jaringan ke mode pulau dan sebaliknya, pelacakan beban dan gangguan yang tepat, meminimalkan waktu penyelesaian, dan mengidentifikasi nilai overshoot dan undershoot maksimum saat terjadi deviasi frekuensi.

2.2. Pemodelan Respons Frekuensi Mikrojembatan Mikrogrid pada dasarnya bersifat nonlinier dan bervariasi terhadap waktu. Model linierisasi sistem ini dapat digunakan untuk menyelidiki dan menganalisis respons frekuensi mikrogrid terhadap gangguan beban kecil. Dinamika respons frekuensi mikrogrid jauh lebih lambat daripada dinamika tegangan dan sudut rotor dan berkisar dari beberapa detik hingga beberapa menit. Oleh karena itu, model yang lebih sederhana digunakan untuk memodelkan perilaku frekuensi sistem tenaga relatif terhadap gangguan, dan model tersebut jauh lebih sederhana daripada model yang ada untuk menganalisis dan mensimulasikan jenis dinamika lainnya. Dalam sebagian besar studi, untuk menyelidiki perilaku frekuensi mikrogrid, sumber pembangkit terdistribusi dimodelkan dengan fungsi transfer pra-fase orde pertama pertama. Berikut ini, model respons frekuensi mikrogrid dan beberapa sumber pembangkit terdistribusi dijelaskan.

Panel PV (solar array)

1. Qty: 1–3 modul (tergantung kapasitas).
2. Spesifikasi rekomendasi: total 300 W — 2000 W. (Edukasi: 100–300 W modul).
3. Fungsi: sumber DC variabel untuk simulasi PV.
4. Emulator PV (opsional)
5. Jika akses panel sulit atau ingin kontrol I–V, pakai PV emulator (MPPT-capable).
6. Spesifikasi: output DC adjustable sesuai modul.
7. Turbin angin / wind emulator
8. Opsi A: Wind turbine mini (kit) + turbine controller — jika ingin nyata.
9. Opsi B (direkomendasikan): Wind emulator berbasis motor DC/induksi + gearbox untuk mensimulasikan aerodinamika.
10. Spesifikasi: 500 W – 2 kW (atau sesuai microgrid target).
11. Fungsi: sumber AC/atau generator yang menghasilkan daya AC/DC tergantung konfigurasi.
12. Baterai / energy storage
13. Type: Lithium-ion (LiFePO₄) atau lead-acid (untuk biaya rendah).
14. Spesifikasi rekomendasi: 48 V, 50–200 Ah (tergantung kapasitas sistem). Untuk lab kecil, 12–48 V, 20–100 Ah.
15. Fungsi: menyimpan surplus Daya, support stabilitas frekuensi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Load Frequency Control, atau Kontrol Frekuensi Beban (LFC), adalah salah satu tantangan paling mendasar dan penting dalam pengoperasian sistem tenaga listrik, termasuk microgrid. LFC didefinisikan sebagai fungsi kontrol otomatis yang bertujuan untuk menjaga keseimbangan antara total daya yang dihasilkan dan total daya yang dikonsumsi, termasuk kerugian sistem, sehingga memastikan frekuensi sistem tetap berada dalam batas toleransi yang ketat.

Gangguan terhadap keseimbangan ini—misalnya, peningkatan beban atau penurunan daya keluaran—akan menyebabkan penyimpangan frekuensi, yang jika tidak dikendalikan, dapat mengganggu stabilitas dan keandalan sistem secara keseluruhan, terutama ketika beroperasi dalam kondisi mode pulau.

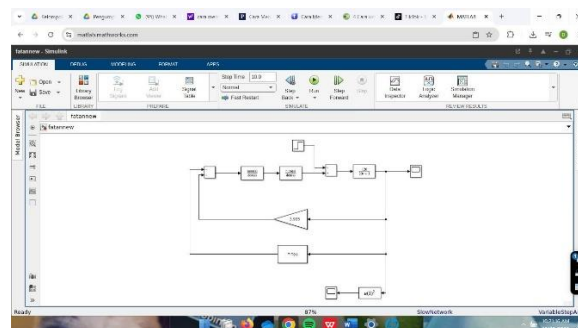
Latar belakang munculnya penelitian ini didorong oleh dua tren global yang saling terkait: peningkatan konsumsi energi dan urgensi untuk mengatasi perubahan iklim. Seiring dengan berkurangnya sumber bahan bakar fosil dan meningkatnya polusi, penggunaan energi terbarukan untuk menghasilkan listrik menjadi solusi yang tak terhindarkan dan paling diminati. Namun, adopsi energi terbarukan, khususnya energi angin dan PV yang memiliki sifat intermitten (terputus-putus) dan variabel, secara signifikan mengurangi inersia sistem dan memperburuk masalah stabilitas frekuensi, terutama pada microgrid yang beroperasi secara independen dari jaringan utama. Microgrid mode pulau, karena inersianya yang rendah, sangat rentan terhadap fluktuasi frekuensi yang parah akibat gangguan kecil atau perubahan beban. Dalam konteks microgrid modern, masalah ini semakin diperparah oleh dinamika sumber energi seperti Doubly Fed Induction Generator (DFIG) pada turbin angin. DFIG, meskipun memiliki keunggulan efisiensi dan biaya, tidak secara inheren menyumbang respons inersia jaringan seperti generator sinkron konvensional, sehingga memerlukan loop kontrol tambahan untuk meningkatkan daya keluaran aktual selama gangguan frekuensi.

Dengan demikian, penting untuk merancang pengontrol LFC sekunder yang tidak hanya dapat menghilangkan penyimpangan frekuensi tetapi juga cepat dan efektif dalam meredam osilasi dinamis yang disebabkan oleh sifat variabel sumber daya terbarukan ini, sekaligus mencapai waktu penetapan yang minimal.

Oleh karena itu, artikel ini mengusulkan solusi untuk mengatasi tantangan tersebut dengan memperkenalkan pengontrol PID yang dioptimasi secara cerdas, menggeser

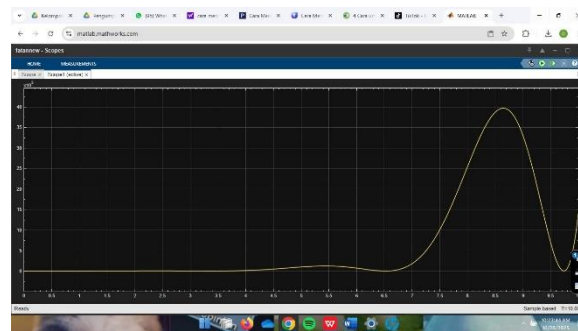
fokus dari penyetelan pengontrol PI klasik yang sering kali tidak optimal di luar titik operasi prasetel, menuju pendekatan yang lebih adaptif. Peningkatan pada algoritma optimasi, yaitu menggunakan Craziness-Based Particle Swarm Optimization (CRPSO), bertujuan untuk meningkatkan kecepatan dan akurasi penyetelan gain PID, secara simultan. Keseluruhan upaya penelitian ini diletakkan dalam kerangka kerja keberlanjutan, memastikan bahwa pasokan daya dapat dipertahankan secara andal meskipun terjadi perubahan mendadak pada sisi beban atau pembangkitan, yang merupakan kunci bagi operasional microgrid yang tangguh dan berkelanjutan.

Penulis menggunakan Proportional–Integral–Derivative (PID) controller sebagai pengendali sekunder untuk menjaga kestabilan frekuensi pada islated microgrid (jaringan mandiri yang tidak terhubung ke jaringan utama). Untuk meningkatkan kinerja PID, digunakan metode optimasi Craziness-Based Particle Swarm Optimization (CRPSO), yaitu versi yang ditingkatkan dari algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) untuk mempercepat konvergensi dan mengatasi nonlinieritas pada sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode ini menghasilkan respon frekuensi yang lebih cepat, stabil, dan minim osilasi dibandingkan sistem konvensional.



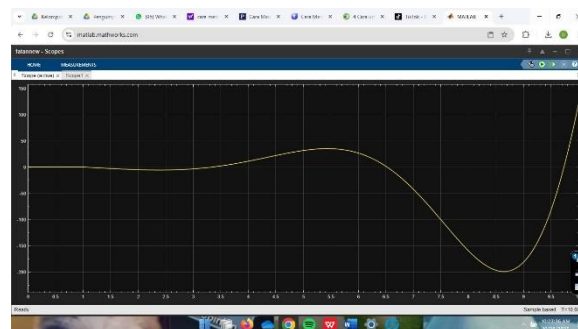
Gambar 2. 1 Diagram Blok yang di Uji

Blok Fungsi Transfer, Keterangan $80e^{-3s}+11$ (Transfer Fcn2), Governor/Pengatur Kecepatan $0.3s+11$ (Transfer Fcn1), Turbin (Diesel Generator/WTG) $20s+1120$ (Transfer Fcn), Sistem Microgrid Ekuivalen (G_{sys}) PID(s), Pengontrol Sekunder PID Gain (3.935), Konstanta LFC Ekuivalen ($1/R$) Step, Input Gangguan Beban Langkah (ΔPL) Scope, Output Penyimpangan Frekuensi (ΔF) Model ini adalah kerangka kerja di mana pengujian kontrol dilakukan. Dua fotolainnya(90D80BD9... dan A1B3C616...) menunjukkan Scope (grafik output) dari simulasi model ini, merepresentasikan penyimpangan frekuensi yang tidak terkontrol atau belum optimal. Cara Merangkai Model Simulink (Struktur Rangkaian)



Gambar 2. 2 Gelombang yang di Hasilkan

Hasil simulasi MATLAB menunjukkan perbaikan signifikan pada respons sistem. Frekuensi mencapai keadaan tunak dengan cepat, settling time hanya sekitar 4 detik. Osilasi berkurang menjadi hanya satu siklus sebelum stabil. Amplitudo deviasi frekuensi jauh lebih kecil dibandingkan dua skenario sebelumnya. Hal ini membuktikan bahwa PID yang dioptimasi dengan CRPSO mampu mengurangi overshoot dan mempercepat stabilisasi frekuensi mikrogrid secara efektif



Gambar 2. 3 Gelombang yang di Hasilkan 2

Scope 2 (A1B3C616...), Kurva memiliki ayunan negatif yang besar (mencapai -200 pada waktu 8-9 detik) dan kemudian mulai naik positif (mencapai $+150$)., "Kurva ini juga menunjukkan ketidakstabilan parah. Meskipun bentuknya terlihat seperti ayunan, skala magnitude (ratusan) jauh di luar batas penyimpangan frekuensi yang wajar dalam sistem tenaga listrik (skala mil Hertz atau $10-3$ Hz)." Skenario Artikel (Gambar 8), "Optimal. Redaman cepat (1 osilasi), Settling Time 4 detik. Penyimpangan maksimum hanya $\approx 4 \times 10^{-3}$ Hz.", "Kinerja optimal ini hanya dicapai setelah memasukkan gain PID hasil optimasi CRPSO ($K_p = 1.16$, $K_i = 14.32$, $K_d = 18.22$)."

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini membahas pengendalian frekuensi beban (Load Frequency Control, LFC) pada sistem mikrogrid berisland mode yang terdiri atas sumber energi terdistribusi seperti turbin angin (DFIG), sistem fotovoltaik (PV), dan generator diesel. Tujuannya adalah menjaga kestabilan frekuensi ketika terjadi perubahan beban atau gangguan kecil dalam sistem.

Untuk mencapai kestabilan optimal, penulis menggunakan kontroler PID yang dioptimasi menggunakan algoritma Crazyiness-Based Particle Swarm Optimization (CRPSO) yaitu versi pengembangan dari algoritma PSO konvensional yang memiliki kemampuan konvergensi lebih cepat dan presisi lebih tinggi dalam mencari parameter optimal.

Kondisi tanpa kontroler menunjukkan bahwa sistem mikrogrid mengalami fluktuasi frekuensi besar dan tidak stabil, sehingga terjadi deviasi frekuensi yang cukup tinggi akibat ketidakseimbangan daya antara pembangkitan dan beban. Sistem tidak mampu mencapai kondisi steady-state dalam waktu yang wajar.

Kondisi dengan kontroler PI konvensional memperlihatkan peningkatan stabilitas, namun masih terdapat osilasi dan waktu pemantapan (settling time) yang relatif lama, yaitu sekitar 14 detik. Hal ini menandakan bahwa kontroler PI belum cukup adaptif terhadap perubahan beban yang cepat dan nonlinieritas sistem mikrogrid.

Pendekatan CRPSO-PID terbukti lebih unggul dibandingkan metode konvensional karena dapat menyesuaikan perubahan beban dan gangguan dengan cepat.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk mengganti jenis kontroler (misalnya fuzzy atau adaptif) dan menggunakan algoritma optimasi metaheuristik lain agar diperoleh kinerja sistem yang lebih stabil dan efisien terhadap ketidakpastian energi terbarukan.

Kontroler PID yang dioptimasi dengan algoritma CRPSO terbukti efektif dalam menjaga kestabilan frekuensi mikrogrid berisland mode dengan respon yang cepat, stabil, dan memiliki tingkat osilasi minimal dibandingkan sistem tanpa kontroler maupun dengan PI konvensional.

DAFTAR PUSTAKA

Alayi, R., Seydnouri, S., Jahangeri, M., & Maarif, A. (2021). Optimization,

- sensitivity analysis, and techno-economic evaluation of a multi-source system for an urban community: A case study. *Renewable Energy Research and Applications*. <https://doi.org/10.22044/rera.2021.10752.1054>. Alayi, R., Ahmadi, M. H., Visei, A. R., Sharma, S., & Najafi, A. (2021). Technical and environmental analysis of photovoltaic and solar water heater cogeneration system: A case study of Saveh City. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 16(2), 447–453. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctaa077>. Alayi, R., Khan, M. R. B., & Mohammadi, M. S. G. (2020). Feasibility study of grid-connected PV system for peak demand reduction of a residential building in Tehran, Iran. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 7(4), 563–567. <https://doi.org/10.18280/mmep.070408> Karami, A., Roshani, G. H., Khazaei, A., Nazemi, E., & Fallahi, M. (2018). Investigation of different sources in order to optimize the nuclear metering system of gas–oil–water annular flows. *Neural Computing and Applications*, 32(12), 3619–3631. <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3673-0>. Katiraei, F., Iravani, M. R., & Lehn, P. W. (2005). Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(1), 248–257. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.835051>. Roshani, M., Sattari, M. A., Ali, P. J. M., Roshani, G. H., Nazemi, B., Corniani, E., & Nazemi, E. (2020). Application of GMDH neural network technique to improve measuring precision of a simplified photon attenuation-based two-phase flowmeter. *Flow Measurement and Instrumentation*, 75, 101804. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101804>. crystal production. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(3), 388–395.