

Penerapan SMES untuk Load Frequency Control pada PLTMH Menggunakan Ant Colony Optimization

^{1*}Faisal, ²Muhammad Ruswandi Djalal, ³Machrus Ali

^{1,2}Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar

³Jurusan Teknik Elektro, Universitas Darul Ulum, Jombang

¹faisaltane@gmail.com, ²wandi@poliupg.ac.id, ³machrus7@gmail.com

Article Info

Article history:

Received January 12th, 2024

Revised February 24th, 2024

Accepted March 6th, 2024

Keyword:

Micro Hydro

Frequency

SMES

ACO

Overshoot

ABSTRACT

This research proposes an additional controller for load frequency control at a micro hydro power plant using PID-SMES. The PID-SMES parameters are optimized using smart methods called Ant Colony Optimization (ACO), which could find the optimal value of PID-SMES. In this paper four control approaches are compared which are P, PI, PID, SMES, and PID-SMES. From the simulation results, it can be obtained that overshoot of P controller is -0.0002193, with PI Controller is -0.0002183, with PD Controller is -0.0002139, with PID controller is -0.0002129, with SMES controller is -0.0001958, and with PID-SMES is -4.187e-05. ACO optimization results obtained fitness function value of 7.15e-09, with 50 iterations. The minimum value of the system performance function at each iteration is plotted on the convergence graph. In the simulation result, it can be concluded that the ACO algorithm could be quickly convergence on the 14th iteration or find the most optimal value at the 9th iteration. The PID-SMES controller proposed in this study has a significant influence in the damping of the oscillation of frequency deviation. Therefore, PID-SMES is appropriate to be applied to micro-hydro power plant.

Copyright © 2024 Jurnal JEETech.
All rights reserved.

Corresponding Author:

Faisal

Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang

Jl. Perintis Kemerdekaan KM.10

Email: faisaltane@gmail.com

Abstrak—Penelitian ini mengusulkan pengontrol tambahan untuk Load Frequency Control (LFC) pada pembangkit listrik tenaga mikro hidro menggunakan PID-SMES. Parameter PID-SMES dioptimalkan menggunakan metode pintar yang disebut Ant Colony Optimization (ACO), yang dapat menemukan nilai PID-SMES yang optimal. Dalam tulisan ini dibandingkan empat pendekatan pengendalian yaitu P, PI, PID, SMES, dan PID-SMES. Dari hasil simulasi diperoleh overshoot kontroler P sebesar -0.0002193, dengan kontroler PI sebesar -0.0002183, dengan kontroler PD sebesar -0.0002139, dengan kontroler PID sebesar -0.0002129, dengan kontroler SMES sebesar -0.0001958, dan dengan kontroler PID-SMES sebesar -4.187e-05. Hasil optimasi ACO diperoleh nilai fungsi fitness sebesar 7.15e-09, dengan 50 iterasi. Nilai minimum fungsi kinerja sistem pada setiap iterasi diplot pada grafik konvergensi. Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa algoritma ACO dapat cepat konvergen pada iterasi ke-14 atau menemukan nilai paling optimal pada iterasi ke-9. Kontroler PID-SMES yang diusulkan pada penelitian ini mempunyai pengaruh yang signifikan dalam meredam osilasi deviasi frekuensi. Oleh karena itu, PID-SMES layak diterapkan pada pembangkit listrik tenaga mikrohidro.

Kata Kunci: Micro Hydro, Frequency, SMES, ACO, Overshoot

1. PENDAHULUAN

Stabilitas menjadi perhatian utama dalam sistem operasi mikrohidro, karena pada kondisi tunak, kecepatan rata-rata seluruh pembangkit harus sama atau dalam keadaan sinkron. Frekuensi dan tegangan yang dihasilkan generator mikrohidro sangat dipengaruhi oleh kecepatan putar generator, kecepatan putar generator mikrohidro sangat dipengaruhi oleh perubahan beban. Beban listrik yang disalurkan mikrohidro pada malam hari akan berkurang terutama pada pukul 23.00. Hal ini menyebabkan poros generator berputar lebih cepat. Akibatnya frekuensi listrik akan meningkat dan membahayakan peralatan listrik konsumen. Mekanisme pengendalian mikrohidro dilakukan secara otomatis dengan mengatur posisi bukaan pintu, sehingga aliran air yang masuk dapat disesuaikan dengan beban listrik. Oleh karena itu, untuk memberikan adaptasi yang lebih baik terhadap perubahan beban, digunakan Load Frequency Control (LFC). Pada tulisan ini, mekanisme LFC dirancang menggunakan Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)[1-2]. SMES menyediakan sistem penyimpanan energi yang dapat beroperasi dengan cepat dan otomatis. Namun diperlukan optimalisasi parameter SMES agar kinerja SMES optimal. Oleh karena itu, dalam makalah ini metode Ant Colony Optimization (ACO) dipilih berdasarkan kelebihanannya untuk melakukan tuning parameter PID-SMES.

Pada beberapa penelitian terdahulu, banyak peneliti yang membahas penerapan SMES pada sistem tenaga listrik, seperti pada [3-5] yang membahas tentang penerapan SMES pada turbin angin. Ref [6] membahas aplikasi UKM pada smart grid. Penerapan SMES sebagai pengontrol frekuensi pada sistem tenaga juga telah dibahas, seperti pada [7-9], dan [10] pada pembangkit listrik termal. Optimasi parameter SMES menggunakan metode cerdas telah dibahas pada ref [11], pada [12] menggunakan Fuzzy Logic, pada [13] menggunakan Cuckoo Search Algorithm, pada [14] menggunakan Imperialist Competitive Algorithm, dan [15-16] menggunakan Particle Swarm Optimization. Dari penelitian di atas dapat diketahui bahwa SMES dapat menjadi pilihan yang cocok untuk penyimpanan energi dan kompensator jika dikontrol dengan benar menggunakan metode cerdas. Dalam tulisan ini, optimalisasi parameter SMES menggunakan Ant Colony Optimization (ACO) diusulkan untuk mengontrol deviasi frekuensi beban pada sistem pembangkit listrik mikrohidro.

Metode cerdas berbasis Ant Colony Optimization (ACO) merupakan metode yang terinspirasi dari perilaku semut dalam mencari sumber makanan secara berkelompok [17-22]. Algoritma ACO akan bekerja berdasarkan Objective Function yang meminimalkan Integral Time Absolute Error (ITAE). Implementasi ACO juga telah banyak digunakan pada penelitian lain, karena hasilnya sangat optimal dalam melakukan proses komputasi, seperti pada[23] untuk Power System Stabilizer. Beberapa contoh pengendalian penyimpanan lainnya seperti Penyimpanan Energi Kapasitif, juga menghasilkan keluaran pengendalian yang baik.

2. PEMODELAN SYSTEM

A. Pemodelan Pembangkit Mikro Hidro

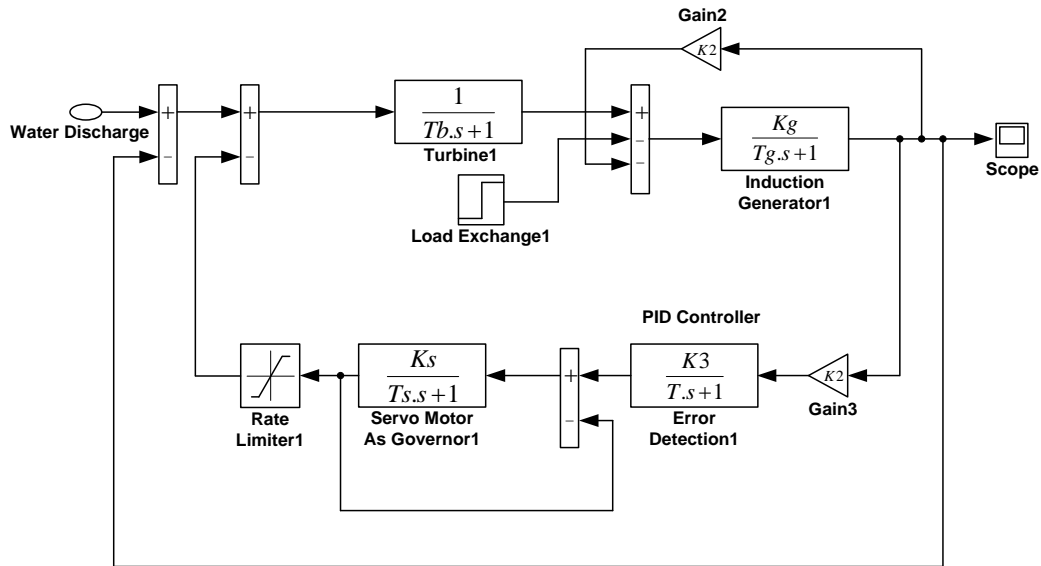
Pembangkit listrik tenaga mikrohidro merupakan salah satu pembangkit listrik terbarukan yang memanfaatkan perbedaan ketinggian dan jumlah debit air. Debit air dapat bersumber dari saluran irigasi, sungai atau air terjun. Aliran air ini akan memutar poros turbin sehingga menghasilkan energi mekanik. Energi ini kemudian menggerakkan generator dan menghasilkan listrik. Lokasi terbaik untuk pemasangan pembangkit listrik tenaga mikrohidro adalah lokasi yang mempunyai sumber air yang aliran airnya selalu mengalir sepanjang tahun. Secara teoritis, besarnya daya listrik yang dapat dihasilkan oleh suatu pembangkit listrik tenaga mikrohidro sangat bergantung pada nilai debit air Q yang melewati pipa dan juga tinggi air terjun H . Persamaannya adalah sebagai berikut:

$$P_{th}[W] = Q[m^3 / s].H[m].k[N / kg] \quad (1)$$

Karena efisiensi turbin dan efisiensi generator yang ditentukan oleh masing-masing pabrikan dengan nilai sekitar 0,85, maka nilai daya riil yang dihasilkan P_{th} menjadi lebih rendah dibandingkan P_{th} .

$$P_{real}[W] = Q[m^3 / s].H[m].k[N / kg].\eta_{turbin}.\eta_{gen} \quad (2)$$

Untuk pompa yang digunakan sebagai turbin, nilai efisiensinya berkisar antara 0,6 hingga 0,8. Untuk turbin aliran silang, nilainya berkisar antara 0,5 hingga 0,7. Sedangkan generator yang digunakan pada pembangkit listrik tenaga mikrohidro biasanya merupakan generator induksi, kemudian motor servo dioperasikan sebagai gubernur. Untuk mensimulasikan sistem yang diteliti digunakan program MATLAB-SIMULINK. Gambar 1 menunjukkan konfigurasi pembangkit listrik mikrohidro yang dirancang.



Gambar 1. Blok Diagram Mikro Hidro[17]

Dari blok pendeteksi kesalahan, sinyal $\Delta\omega$ akan diteruskan ke blok servomotor, yang digunakan sebagai Governor. Pada blok ini terdapat parameter yaitu K_s dan T_s . Sedangkan pada sisi keluaran gubernur terdapat sinyal yang diumpungkan kembali sebagai nilai masukan ke gubernur. Selain itu keluaran dari gubernur dilewatkan ke rate limiter yang berfungsi untuk membatasi sinyal pada nilai saturasi tertinggi dan terendah yang telah ditentukan sebelumnya. Keluaran dari pembatas laju ini diteruskan sebagai masukan pada blok turbin air. Tabel 1 menunjukkan parameter mikrohidro yang digunakan dalam penelitian ini.

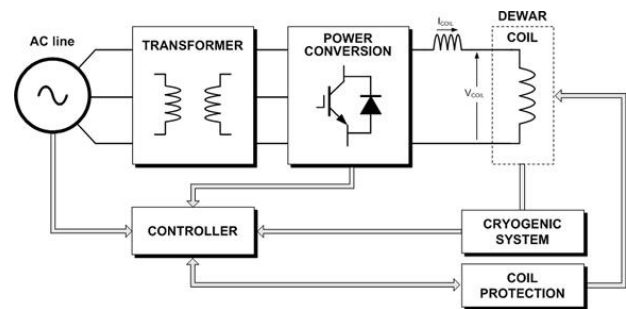
Tabel 1. Mikro Hidro Parameter[24]

Parameter	Nilai	Note
T_b	1	Water turbine time response (s)
K_g	1	Strengthening the generator regulator (s)
T_g	13,333	Response time induction generator (s)
K_1	5	Error Detection confirmation constant
K_2	8,52	Frequency deviation constant
K_3	0.004	Strengthening Error Detection
T	0,02	Time response Error Detection
T_s	0,1	The governor's time constant (s)
K_s	2,5	Strengthening governor
S_g	40	Micro hydro power generator rating (kVA)
pf	0,8	Power factor
V_g	400/231	Nominal voltage generator (V)
ω	1500	Nominal rotational speed (rpm)
f_g	50	The nominal frequency of micro hydro (Hz)

B. Pemodelan Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)

SMES merupakan suatu peralatan yang dapat menyimpan dan mengeluarkan daya dalam jumlah besar secara bersamaan. SMES menyimpan energi

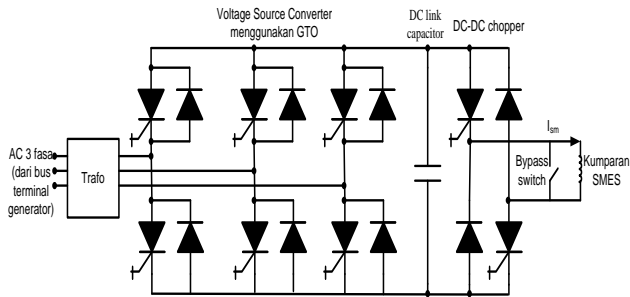
dalam medan magnet yang diciptakan oleh arus DC pada kumparan superkonduktor. SMES terdiri dari kumparan superkonduktor, sistem pendingin cyrogenic, dan sistem pengkondisian daya (PCS) dengan fungsi kontrol dan proteksi. PCS juga disebut sebagai hub elektronika daya dari koil SMES. Gambar 2 menunjukkan diagram skema SMES.



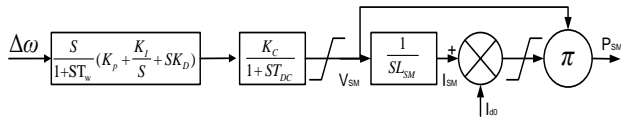
Gambar 2. Diagram Skematik SMES[17]

Pada prinsipnya, superkonduktor mempunyai kerugian mendekati nol pada suhu yang sangat dingin. Pendingin yang digunakan adalah cairan Helium yang mampu mendinginkan hingga 4 K. PCS digunakan untuk mentransfer energi dari kumparan SMES ke sistem. PCS menggunakan kapasitor tautan dc untuk menghubungkan sumber tegangan dari koil SMES ke sistem. Prinsip kerja SMES terbagi menjadi tiga, yaitu mode pengisian daya, mode siaga, dan mode pengosongan. Pengaturan kinerja SMES dilakukan dengan mengatur duty cycle (D) konverter yang dalam hal ini menggunakan thyristor Gate Turn Off (GTO) seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3. Untuk mengontrol keseimbangan daya generator secara

efektif, SMES ditempatkan pada terminal bus generator. Dari beberapa persamaan acuan SMES, diagram blok pengontrol PID-SMES yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 4. Pada penelitian ini PID-SMES dipasang pada sistem tenaga listrik mikrohidro. Pemasangan PID-SMES berada pada terminal bus generator induksi pada saat terjadi beban pergantian beban.



Gambar 3. Konfigurasi SMES



Gambar 4. Blok diagram PID-SMES

C. Ant Colony Optimization

1. Penentuan Jarak

Kota yang dimaksud di sini adalah besarnya nilai pembangkitan masing-masing pembangkit. Sebelum melakukan perjalanan, jarak antara nilai pembangkitan pembangkit satu dengan pembangkit lainnya dihitung terlebih dahulu (diinisialisasi). Setelah inisialisasi, semut ditempatkan di kota pertama secara acak. Kemudian semut akan melanjutkan perjalanannya dari satu kota ke kota lain secara acak hingga tujuan akhir yaitu kota terakhir. Setelah perjalanan selesai, lokasi kota yang dilalui semut akan digunakan untuk menghitung solusi yang dihasilkan dari perjalanan tersebut[25].

2. Ant Tour

Semut memilih jalur yang akan dilalui dari titik r ke titik s dalam suatu perjalanan dengan probabilitas:

$$p(r,s) = \frac{\gamma(r,s)}{\sum_t \gamma(r,t)} s, l \in N_r^k \quad (3)$$

dimana matriks $\gamma(r, s)$ mewakili besarnya intensitas feromon antara titik r dan s. Kemudian feromon akan diperbarui melalui persamaan berikut:

$$\gamma(r,s) = \alpha \cdot \gamma(r,s) + \Delta y^k(r,s) \quad (4)$$

dimana α dengan interval $0 < \alpha < 1$ adalah ketahanan feromon, maka $(1 - \alpha)$ menyatakan penguapan yang terjadi pada feromon dan $\Delta y^k(r, s)$ adalah jumlah feromon yang dijatuhkan semut pada garis (r, s) .

3. Update Local Pheromones

Jejak feromon (r, s) untuk perjalanan terbaik yang dilakukan semut (semut yang menghasilkan biaya pembangkitan terkecil) akan diperbarui menggunakan persamaan berikut.

$$\gamma(r,s) = \alpha \cdot \gamma(r,s) + \frac{Q}{f_{best}} r, s \in J_{best}^k \quad (5)$$

dengan Q adalah konstanta positif yang sangat besar.

4. Update Global Pheromones

Untuk menghindari stagnasi (situasi di mana semut akan mengikuti jalur yang sama, yang akan menghasilkan solusi yang sama), kekuatan jejak feromon dibatasi pada interval berikut:

$$\gamma(r,s) = \begin{cases} \tau_{min} & \text{if } \gamma(r,s) \leq \tau_{min} \\ \tau_{max} & \text{if } \gamma(r,s) \geq \tau_{max} \end{cases} \quad (6)$$

Batas atas dan batas bawahnya adalah sebagai berikut:

$$\tau_{max} = \frac{1}{\alpha \cdot f_{best}} \quad (7)$$

$$\tau_{min} = \frac{\tau_{max}}{M^2} \quad (8)$$

dengan M adalah banyaknya semut yang melakukan perjalanan.

5. Ants Plot Travel

Solusi perjalanan koloni semut dalam meminimalkan biaya pembangkitan diplot ke dalam grafik hingga batas iterasi maksimum.

6. Best Tour Plot

Perjalanan dengan solusi terbaik dari koloni semut (biaya pembangkitan minimum) untuk setiap iterasi diplot ke ambang batas iterasi maksimum.

7. Initialization of Pheromones (Tau Matrix)

Matriks tau berukuran $n \times m$, dengan jumlah bus pada sistem, sedangkan jumlah unit pembangkit yang dihasilkan pada skala 0 sampai 1 mempunyai interval 0,01. Nilai matriks ini akan diperbarui setiap kali koloni semut melakukan perjalanan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Fungsi tujuan yang digunakan dalam penelitian ini adalah meminimalkan Integral Time Absolute Error (ITAE).

$$ITAE = \int_0^t t |\Delta\omega(t)| dt \quad (9)$$

Parameter SMES-PID yang disetel oleh ACO adalah Kp, Ki, Kd, Tdci, twi, dan Ksmes. Data parameter ACO dan grafik konvergensi ACO ditunjukkan pada Tabel 2-3 dan Gambar 5 di bawah.

Parameter	Nilai
Jumlah Ant	6
Max Iterasi	50
Feromone (Alpha)	0.9
Beta	2

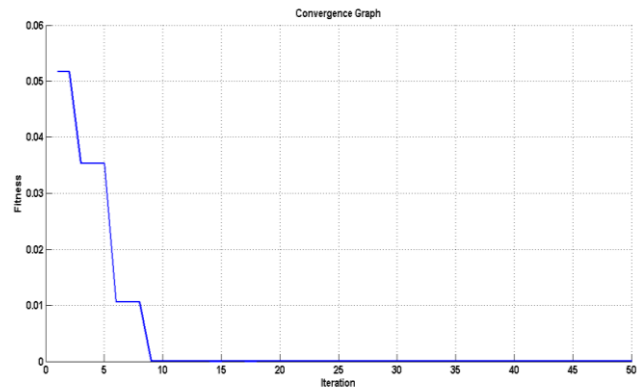
Table 3. Hasil Optimasi SMES-PID menggunakan ACO

Best Solution =			
Columns 1 through 4			
10.6582	0.4493	0.7216	0.0199
Columns 5 through 6			
19.5611	79.4553		

Hasil optimasi ACO diperoleh nilai fungsi fitness sebesar 7.15e-09, dengan 50 iterasi. Nilai minimum fungsi kinerja sistem pada setiap iterasi diplot pada grafik konvergensi yang ditunjukkan pada Gambar 5. Pada Gambar tersebut terlihat bahwa algoritma ACO dapat dengan cepat konvergen pada iterasi ke-9 atau menemukan nilai paling optimal pada iterasi ke-9. Tabel 4 menunjukkan nilai hasil optimasi parameter SMES-PID setelah tuning oleh ACO.

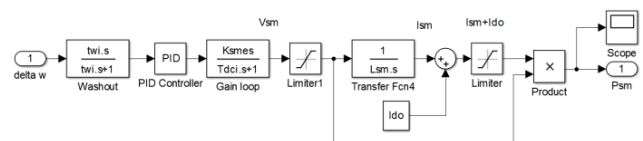
Table 4 Results of Tuning of SMES-PID Parameters

Parameter	Limits		Results
	Lower limit	Upper limit	
Kp	0	100	10.6582
Ki	0	1	0.4493
Kd	0	1	0.7216
Tdci	0	1	0.0199
twi	0	100	19.5611
Ksmes	0	100	79.4553

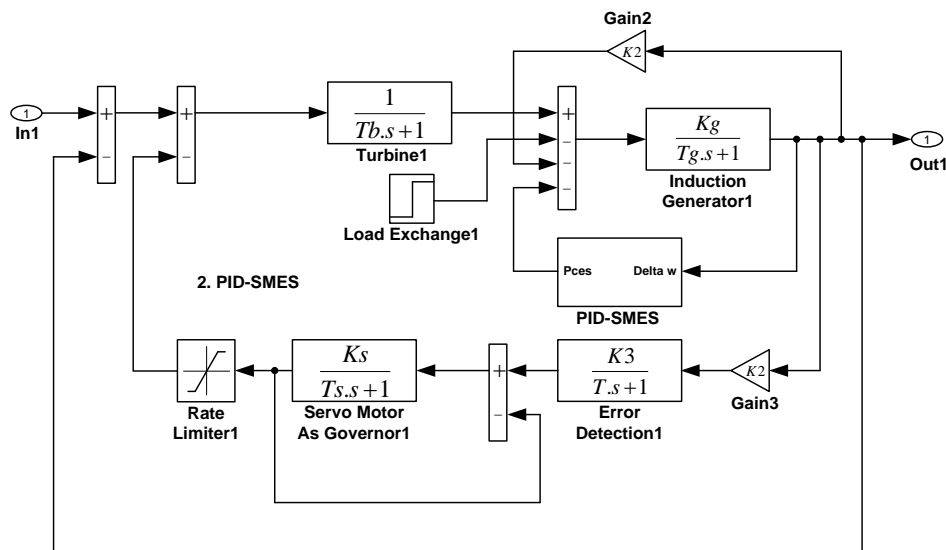


Gambar 5. Proses Konvergensi Ant Colony Optimization

Gambar 6 sampai 7 menunjukkan desain pembangkit listrik tenaga mikrohidro yang digunakan dalam penelitian ini. Gambar 6 menunjukkan desain model mikrohidro dengan pengontrol PID-SMES, Gambar 7 menunjukkan desain model SMES.



Gambar 6. Blok Diagram SMES



Gambar 7. Desain Kontrol PID-SMES

Simulasi pertama dijalankan untuk mengetahui respon frekuensi mikrohidro tanpa menggunakan pengontrol. Dari hasil simulasi terlihat bahwa respon osilasi frekuensi cukup besar yaitu sebesar -0,0003179. Perhatikan bahwa untuk semua desain sistem pembangkit listrik tenaga mikro hidro, diharapkan deviasi frekuensinya nol. Tanpa pengontrol, deviasi frekuensi mempunyai overshoot yang besar, serta settling time yang lama sehingga sistem dapat kembali ke kondisi tunak. Hasil simulasi pembangkit listrik tenaga mikrohidro tanpa kendali akan dijadikan acuan dalam perancangan kendali frekuensi mikrohidro.

Perancangan kendali yang pertama adalah dengan menggunakan kendali proporsional (P) untuk kendali frekuensi pada pembangkit listrik tenaga mikrohidro. Parameter pengontrol proporsional dioptimasi menggunakan metode ACO. Hasil simulasi menunjukkan respon yang lebih baik dibandingkan dengan sistem tanpa kendali, dimana overshoot pada sistem ini adalah -4.64e-05. Settling time pun semakin bertambah dan menunjukkan hasil yang baik, karena sistem kembali ke kondisi tunak lebih cepat dibandingkan sistem tanpa adanya pengontrol.

Perancangan pengontrol selanjutnya menggunakan pengontrol proporsional-integral (PI) untuk pengontrolan frekuensi pada pembangkit listrik tenaga mikrohidro. Parameter pengontrol PI juga dioptimasi menggunakan metode ACO. Dari hasil simulasi terlihat respon yang lebih baik dibandingkan dengan sistem tanpa kendali dan proporsional, dimana overshoot pada sistem ini sebesar -0.0002183. Settling time pun semakin bertambah dan menunjukkan hasil yang baik, karena sistem kembali ke kondisi tunak lebih cepat dibandingkan sebelumnya.

Berdasarkan respon kinerja pengontrol frekuensi sebelumnya, kinerja pengontrol masih dapat ditingkatkan lebih baik dibandingkan algoritma kontrol sebelumnya. Untuk mencapai hal tersebut diterapkan pengontrol proporsional-derivatif (PD) untuk pengaturan frekuensi pada mikrohidro. Parameter pengontrol PD juga dioptimasi menggunakan metode ACO. Dari hasil simulasi terlihat respon yang lebih baik dibandingkan dengan kontroler PI, dimana overshoot pada sistem ini sebesar -0.0002139. Settling time juga meningkat lebih baik dibandingkan kedua algoritma kontrol sebelumnya.

Pengendali PID adalah kandidat berikutnya yang akan digunakan dalam penelitian ini. Seperti

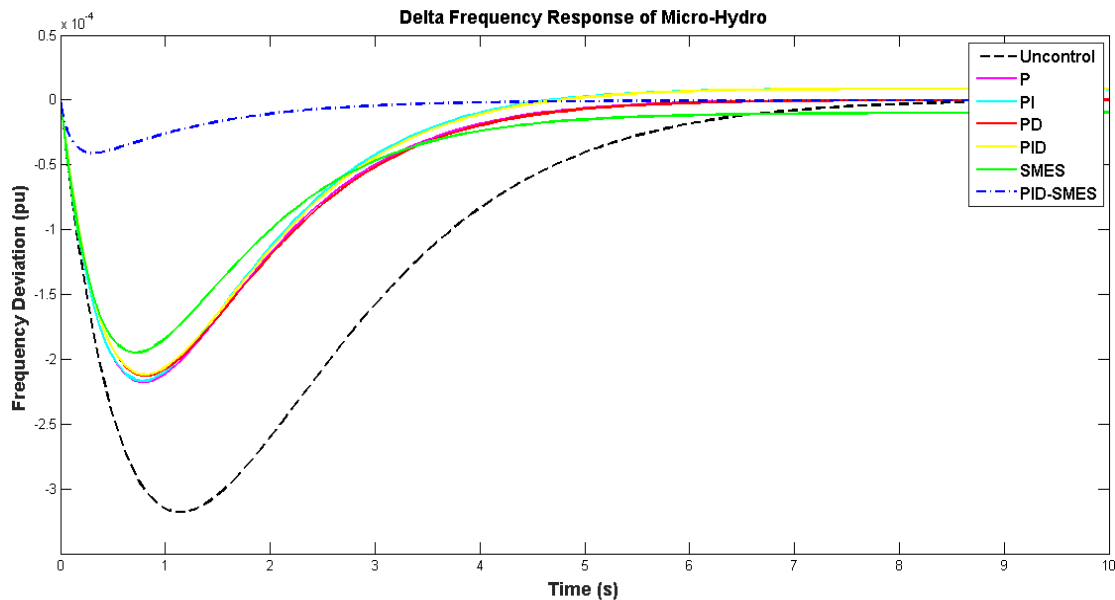
pengontrol sebelumnya, juga dioptimalkan menggunakan metode ACO. Hasil simulasi menunjukkan respon yang lebih baik dibandingkan dengan ketiga kontroler sebelumnya, dimana overshoot pada sistem ini sebesar -0.0002129 dan settling time memberikan respon yang lebih baik dibandingkan dengan ketiga skema kontrol sebelumnya. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa kombinasi PID menunjukkan kinerja yang lebih memuaskan.

Perancangan pengontrol selanjutnya menggunakan pengontrol Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES). Parameter pengontrol SMES juga dioptimasi menggunakan metode ACO. Hasil simulasi menunjukkan respon yang lebih memuaskan dibandingkan seluruh kontroler sebelumnya, dimana overshoot pada sistem ini sebesar -0.0001958. Settling time juga menunjukkan hasil yang sangat baik, karena sistem kembali ke kondisi tunak lebih cepat dibandingkan dengan tren yang ditunjukkan oleh pengontrol sebelumnya.

Dengan hasil yang signifikan baik untuk PID maupun SMES, diusulkan skema kontrol frekuensi baru untuk frekuensi mikrohidro menggunakan kombinasi PID-SMES. Parameter pengontrol PID-SMES juga dioptimasi menggunakan pendekatan ACO. Dari hasil simulasi terlihat respon yang lebih memuaskan dibandingkan seluruh kontroler sebelumnya, dimana overshoot pada skema ini adalah -4.187e-05. Settling time juga menunjukkan hasil yang sangat baik, karena sistem kembali ke kondisi tunak lebih cepat dibandingkan semua skema pengendalian yang diusulkan sebelumnya. Oleh karena itu, dapat diketahui bahwa kombinasi PID-UKM menunjukkan kinerja yang lebih memuaskan dibandingkan seluruh skema pengendalian yang diusulkan sebelumnya. Perbandingan respon frekuensi mikrohidro seluruh metode pengendalian dapat dilihat pada Gambar 8.

Tabel 5. Profil Overshoot and settling time

Skema	Overshoot (pu)
Uncontrol	-0.0003179
Proportional	-0.0002193
Proportional-Integral (PI)	-0.0002183
Proportional-Derivative (PD)	-0.0002139
Proportional-Integral-Derivative (PID)	-0.0002129
Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)	-0.0001958
PID-SMES	-4.187e-05



Gambar 8. Perbandingan Respon Frekuensi Mikro Hidro

Berdasarkan perbandingan seluruh respon frekuensi yang ditunjukkan pada Gambar 9, dapat disimpulkan bahwa pembangkit listrik tenaga mikrohidro memerlukan suatu pengontrol untuk meredam osilasi frekuensi akibat perubahan beban. Kontroler PID-SMES yang diusulkan pada penelitian ini mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap redaman osilasi pada pembangkit listrik tenaga mikrohidro. Metode Ant Colony Optimization merupakan algoritma yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan optimasi parameter pengontrol. Dengan parameter PID dan SMES yang optimal, kinerja mikrohidro dapat lebih optimal dalam mengendalikan dinamika perubahan beban.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini mengusulkan pengontrol tambahan untuk pengendalian frekuensi beban pada pembangkit listrik tenaga mikro hidro menggunakan PID-SMES. Parameter PID-SMES dioptimalkan menggunakan metode cerdas yang disebut algoritma Ant Colony Optimization, yang dapat menemukan parameter PID-SMES yang optimal. Dari hasil simulasi diperoleh overshoot pada PID-SMES sebesar $-4.187e-05$, menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan hasil yang diperoleh pada pengontrol P, PI, PD, PID dan SMES. Kontroler PID-SMES yang diusulkan pada penelitian ini mempunyai pengaruh yang signifikan dalam meredam osilasi deviasi frekuensi. Oleh karena itu, lebih disukai untuk diterapkan pada pembangkit listrik tenaga mikrohidro terutama untuk sistem dengan pengalaman perubahan beban yang besar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kadaryono, Rukslin, M. Ali, Askan, A. Parwanti, and I. Cahyono, "Comparison of LFC Optimization on Micro-hydro using PID, CES, and SMES based Firefly Algorithm," in 2018 5th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI), IEEE, Oct. 2018, pp. 204–209. doi: 10.1109/EECSI.2018.8752733.
- [2] B. Kadaryono, Kadaryono; Rukslin, Rukslin; Ali, Machrus; Budiman, "Optimasi PID dan SMES pada Mikrohidro Berbasis Firefly Algorithm," J. Tecnoscienza, vol. 3, no. 1, pp. 65–80, 2018.
- [3] A. S. Yunus, A. Abu-Siada, and M. Masoum, "Effects of SMES on dynamic behaviors of type D-Wind Turbine Generator-Grid connected during short circuit," in Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE, 2011: IEEE, pp. 1-6.
- [4] A. S. Yunus, A. Abu-Siada, and M. Masoum, "Effect of SMES unit on the performance of type 4 wind turbine generator during voltage sag," 2011.
- [5] A. S. Yunus, A. Abu-Siada, and M. Masoum, "Improving dynamic performance of wind energy conversion systems using fuzzy-based hysteresis current-controlled superconducting

- magnetic energy storage," *IET Power Electronics*, vol. 5, no. 8, pp. 1305-1314, 2012.
- [6] J. X. Jin and X. Y. Chen, "Study on the SMES application solutions for smart grid," *Physics Procedia*, vol. 36, pp. 902-907, 2012.
- [7] S. Kumar and G. D. Yadav, "Load Frequency Control in Wind-Diesel Based Isolated Power System by Pitch-Angle Controller," 2016.
- [8] A. A. El-Fergany and M. A. El-Hameed, "Efficient frequency controllers for autonomous two-area hybrid microgrid system using social-spider optimiser," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 3, pp. 637-648, 2017.
- [9] S. Dhundhara and Y. P. Verma, "Evaluation of CES and DFIG unit in AGC of realistic multisource deregulated power system," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 27, no. 5, p. e2304, 2017.
- [10] U. P. Garimella and K. Rajan, "Design of Hybrid Controller Based Load Frequency Controller for Multi Area Hydro Thermal System," *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 68, no. 2, 2014.
- [11] B. Vidhya and R. Jayashree, "On The Design of Artificial Intelligence Based Load Frequency Controller for A Two Area Power System With Super Conducting Magnetic Energy Storage Device."
- [12] V. NUKALA and D. K. R. SUDHA, "Design of Fuzzy Load Frequency Controller for Interconnected Power System with Super Conducting Magnetic Energy Storage Units," 2014.
- [13] S. Chaine and M. Tripathy, "Performance of static synchronous series compensator and superconducting magnetic energy storage controllers for frequency regulation in two area hybrid wind-thermal power system using Cuckoo Search Algorithm," *Engineering Reports*, vol. 3, no. 4, p. e12313, 2021.
- [14] C.-a. Liu and H. Jia, "Multiobjective imperialist competitive algorithm for solving nonlinear constrained optimization problems," *Journal of Systems Science and Information*, vol. 7, no. 6, pp. 532-549, 2019.
- [15] M. R. Djalal, M. Saini, and A. Yunus, "Optimal design of power system stabilizer and energy storage using particle swarm optimization under load shedding condition," in *AIP Conference Proceedings*, 2023, vol. 2536, no. 1: AIP Publishing.
- [16] M. Mansur and M. R. Djalal, "Using Particle Swarm Optimization for Power System Stabilizer and energy storage in the SMIB system under load shedding conditions," *SINERGI*, vol. 27, no. 8, pp. 423-432.
- [17] M. Ali, A. Afandi, H. Nurohmah, R. Rukslin, M. A. Haikal, and M. R. Djalal, "Optimization of wind-turbine control using the hybrid ANFIS-PID method based on ant colony optimization," in *AIP Conference Proceedings*, 2023, vol. 2536, no. 1: AIP Publishing.
- [18] M. Ali, A. N. Afandi, H. Nurohmah, R. Rukslin, M. A. Haikal, and M. R. Djalal, "Optimization of wind-turbine control using the hybrid ANFIS-PID method based on ant colony optimization," in *INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED TECHNOLOGY AND MULTIDISCIPLINE (ICATAM) 2021*, 2023, p. 30002. doi: 10.1063/5.0118865.
- [19] M. Ali and H. Sucipto, "Ant Colony Optimization Algorithm Implementation for Distribution of Natural Disaster Relief Logistics in Jombang Regency Web Base," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 704, no. 1, p. 12008, Mar. 2021, doi: 10.1088/1755-1315/704/1/012008.
- [20] V. Kusuma Apsari, M. Ali, H. Nurohmah, and R. Rukslin, "Desain Optimasi PID Controller Pada Temperatur Heating Furnace Berbasis Ant Colony Algorithm (ACO)," *J. FORTECH*, vol. 2, no. 2, pp. 57-62, 2023, doi: 10.56795/fortech.v2i2.204.

-
- [21] M. Arrohman, R. Fajardika, M. Muhlasin, and M. Ali, "Optimasi Frekuensi Kontrol pada Sistem Hybrid Wind-Diesel Menggunakan PID Kontroler Berbasis ACO dan MFA," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 9, no. 1, pp. 65–68, May 2018, doi: 10.21776/ub.jrm.2018.009.01.10.
- [22] W. Cahyono, M. Ali, and H. Nurohmah, "Ant Colony Optimazation sebagai Tuning PID pada Single Axis Tracking Photovoltaic," *Sinarfe7-2*, vol. 2, no. 1, pp. 455–458, 2019.
- [23] M. M. Linda and N. K. Nair, "Optimal design of multi-machine power system stabilizer using robust ant colony optimization technique," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 34, no. 7, pp. 829-840, 2012.
- [24] M. R. Djalal, H. Setiadi, and A. Imran, "Frequency stability improvement of micro hydro power system using hybrid SMES and CES based on Cuckoo search algorithm," *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 76-84.
- [25] M. R. Djalal, M. Saini, and A. S. Yunus, "Optimization Power System Stabilizer and Energy Storage Using Ant Colony Optimization," in *2021 International Seminar on Machine Learning, Optimization, and Data Science (ISMODE)*, 2022: IEEE, pp. 120-124.