

Optimasi SMES untuk Load Frequency Control pada PLTMH Menggunakan ICA dan BA

^{1*} Machrus Ali, ² Hidayatul Nurohmah, ³ Muhammad Agil Haikal

^{1,2,3}Electrical Engineering, Universitas Darul Ulum, Jombang, Indonesia

¹ machrus7@gmail.com; ² hidayatul.nurohmah.mt@gmail.com; ³ agil.haikal86@gmail.com

Article Info

Article history:

Received 03 November, 2024

Revised 10 January, 2025

Accepted 14 March, 2025

Keyword:

Bat Algorithm

Imperialist Competitive Algorithm

Load Frequency Control

PLTMH

SMES

ABSTRACT

Micro hydro power plants (MHPPs) are increasingly important for decentralized renewable electrification, especially in isolated and rural grids where low inertia makes frequency sensitive to abrupt load variations. The main problem addressed in this study is that uncontrolled MHPPs and conventionally tuned PID controllers, including Ziegler-Nichols (PID-ZN) baselines, still show relatively high transient frequency deviation when compared with storage-assisted and metaheuristic-optimized control. This paper contributes a benchmark-based synthesis and normalized comparative analysis of Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)-assisted Load Frequency Control for a 40 kVA, 32 kW, 50 Hz MHPP using the Imperialist Competitive Algorithm (ICA) and the Bat Algorithm (BA), while explicitly positioning uncontrolled and PID-ZN/conventional PID operation as baseline scenarios. Literature benchmark data are reprocessed by converting per-unit overshoot into Hz and by calculating reduction relative to the uncontrolled condition. The uncontrolled case gives approximately -0.000318 pu (-0.0159 Hz), while the PID-ZN/conventional PID baseline gives -0.0002115 pu (-0.010575 Hz), corresponding to about 33.49% overshoot reduction. ICA-based PID-SMES gives -4.11×10^{-5} pu (-0.002055 Hz), whereas BA-based SMES-PID gives -4.038×10^{-5} pu (-0.002019 Hz). Compared with the uncontrolled system, overshoot reduction reaches 87.07% for ICA and 87.30% for BA. The main contribution is a clarified research-gap map, an expanded baseline comparison including PID-ZN and no-controller cases, and a replicable basis for future equal-condition MATLAB/Simulink validation.

Copyright © 2025 JEETech Journal.
All rights reserved.

Corresponding Author:

Machrus Ali

Electrical Engineering, Universitas Darul Ulum, Jombang, Indonesia,

Email: machrus7@gmail.com

1. Pendahuluan

Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) merupakan salah satu teknologi pembangkit energi terbarukan skala kecil yang sesuai untuk daerah terpencil, sistem isolated, dan jaringan distribusi lokal. Keunggulan PLTMH adalah struktur pembangkit yang relatif sederhana, biaya operasi rendah, dan

kesesuaian dengan lokasi yang memiliki potensi aliran air. Walaupun demikian, operasi PLTMH sangat dipengaruhi oleh perubahan beban konsumen. Ketika beban meningkat atau menurun secara mendadak, keseimbangan antara daya mekanik turbin dan daya elektrik beban terganggu sehingga kecepatan putar generator dan frekuensi sistem menyimpang dari nilai nominal.

Load Frequency Control (LFC) diperlukan untuk menjaga frekuensi sistem tetap berada di sekitar frekuensi nominal. Pada sistem mikrohidro, LFC menjadi penting karena kapasitas pembangkit yang kecil membuat inersia sistem terbatas. Dengan inersia yang rendah, gangguan beban kecil dapat menghasilkan perubahan frekuensi yang relatif signifikan. Kondisi ini berpotensi menurunkan kualitas daya, mempercepat keausan peralatan, serta mengganggu kenyamanan dan keamanan operasi beban listrik konsumen.

Pengendali konvensional seperti *proportional*, *proportional-integral*, *proportional-derivative*, dan *proportional-integral-derivative* (PID) telah banyak diterapkan pada LFC. Akan tetapi, pengendali konvensional sering kali tidak cukup optimal ketika parameter sistem berubah atau gangguan beban berlangsung cepat. Oleh karena itu, perangkat penyimpanan energi cepat dapat digunakan sebagai kompensator daya aktif. *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES) merupakan salah satu perangkat penyimpanan energi yang mampu merespons gangguan transien secara cepat karena energi disimpan dalam bentuk medan magnet pada kumparan superkonduktor.

SMES dapat menyerap kelebihan daya saat beban turun dan melepaskan energi saat beban naik. Dengan demikian, SMES membantu menyeimbangkan daya pembangkitan dan daya beban sebelum respons governor dan turbin mencapai keadaan tunak. Djalal dan Kadir menunjukkan bahwa penggunaan SMES dan *Capacitive Energy Storage* (CES) pada LFC mikrohidro dapat menyediakan kompensasi daya untuk mengurangi osilasi frekuensi akibat perubahan beban [1]. Djalal et al. juga menunjukkan bahwa PID-SMES yang dituning menggunakan ICA mampu menurunkan overshoot frekuensi secara signifikan pada model PLTMH [2].

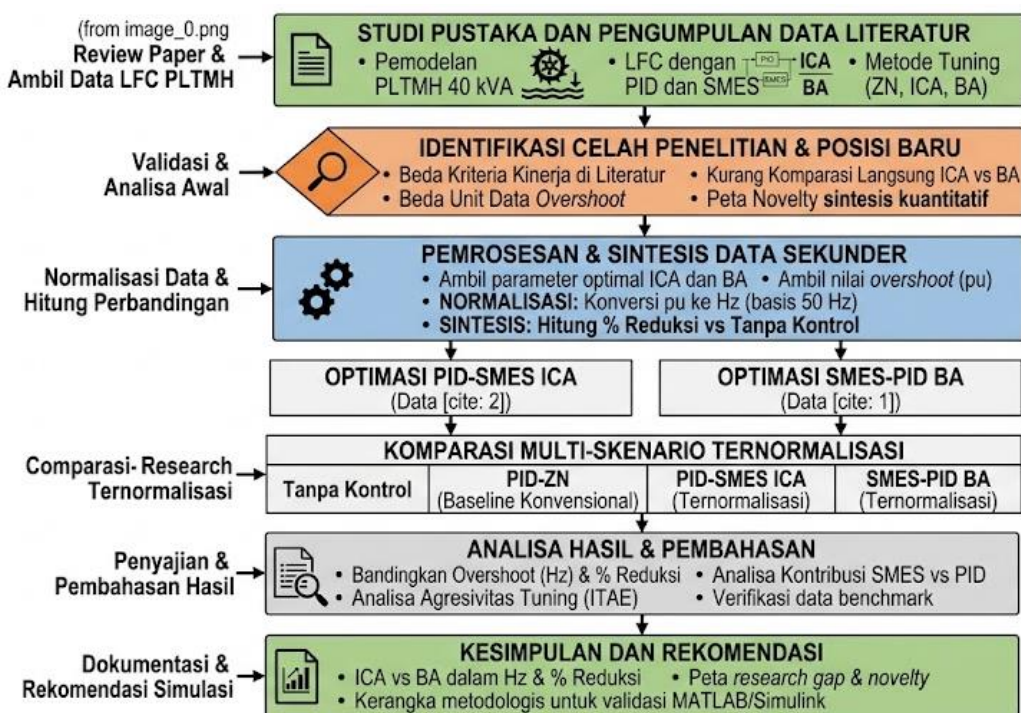
Di sisi lain, algoritma metaheuristik digunakan untuk memperoleh parameter kontrol yang lebih optimal dibandingkan metode *trial and error*. *Imperialist Competitive Algorithm* (ICA) memiliki mekanisme eksplorasi berbasis kompetisi antar-imperium, sedangkan *Bat Algorithm* (BA) menggunakan mekanisme ekolokasi kelelawar melalui pembaruan frekuensi, kecepatan, posisi, *loudness*, dan *pulse rate* [8], [9]. Keduanya telah dilaporkan berhasil meningkatkan performa LFC dalam berbagai skenario sistem tenaga.

Meskipun beberapa studi telah menerapkan ICA atau BA secara terpisah pada LFC PLTMH, studi komparatif yang menempatkan hasil keduanya dalam satu kerangka pembacaan yang sama masih terbatas. Literatur sebelumnya umumnya menonjolkan satu algoritma, satu skenario kontrol, atau kombinasi SMES-CES tertentu. Perbandingan langsung menjadi kurang objektif karena perbedaan basis satuan, kombinasi kontrol, parameter algoritma, dan metrik kinerja. Oleh sebab itu, artikel ini berfokus pada analisis komparatif berbasis data benchmark literatur dengan menormalisasi overshoot ke basis frekuensi 50 Hz dan menghitung persentase reduksi terhadap kondisi tanpa kontrol.

Celah penelitian terdahulu; (1) Studi ICA dan BA pada LFC PLTMH umumnya dipublikasikan secara terpisah sehingga pembaca sulit memperoleh perbandingan kuantitatif langsung antara kedua pendekatan. (2) Sebagian besar penelitian melaporkan overshoot dalam satuan per-unit tanpa mengonversinya ke Hz, padahal konversi tersebut penting untuk interpretasi praktis pada sistem 50 Hz. (3) Penelitian terdahulu lebih banyak menampilkan hasil akhir masing-masing algoritma daripada membahas perbedaan karakteristik eksplorasi, agresivitas parameter kontrol, dan implikasi praktisnya. (4) Belum banyak artikel yang secara eksplisit

memetakan posisi kebaruan antara ICA, BA, SMES, CES, dan varian metaheuristik lain pada benchmark PLTMH yang sejenis.

Novelty dan Kontribusi artikel ini bukan berupa klaim eksperimen lapangan baru, melainkan novelty sintesis dan benchmark kuantitatif yang disusun secara transparan dari data literatur. Kontribusi utama artikel ini adalah sebagai berikut: (1) 1. Menyusun perbandingan ternormalisasi antara tanpa kontrol, PID-ZN/konvensional, ICA-PID-SMES, dan BA-SMES-PID pada sistem PLTMH 40 kVA dengan basis frekuensi 50 Hz. (2) 2. Mengonversi nilai overshoot per-unit dari literatur ke satuan Hz sehingga hasil lebih mudah ditafsirkan secara teknis. (3) 3. Menghitung efektivitas reduksi overshoot terhadap sistem tanpa kontrol untuk PID-ZN/konvensional, ICA, dan BA. (4) 4. Mempertajam research gap dan posisi novelty untuk pengembangan simulasi MATLAB/Simulink lanjutan yang membandingkan ICA dan BA pada skenario beban identik. (5) 5. Menyajikan kerangka metodologis yang dapat direplikasi untuk validasi ulang berbasis Simulink.



Gambar 1. Kerangka penelitian.

2. Tinjauan Pustaka

2.1. Load Frequency Control pada PLTMH

LFC pada PLTMH bertujuan mengembalikan frekuensi sistem ke nilai nominal setelah terjadi gangguan beban. Pada pembangkit mikrohidro, perubahan frekuensi terutama berkaitan dengan perubahan kecepatan putar generator. Karena ukuran sistem relatif kecil, karakteristik turbin, governor, generator induksi, dan perangkat deteksi error memiliki peran penting dalam menentukan respons transien.

Penelitian Djalal dan Kadir menggunakan model linier PLTMH pada MATLAB/Simulink dan menguji respons governor, turbin, serta frekuensi terhadap perubahan beban. Penelitian tersebut menekankan bahwa pengaturan parameter SMES dan CES diperlukan agar performa mikrohidro menjadi optimal [1]. Dengan kata lain, LFC mikrohidro tidak hanya berkaitan dengan pengendali konvensional, tetapi juga dengan bagaimana perangkat penyimpanan energi dimodelkan dan dituning.

2.2. SMES sebagai Kompensator Daya Cepat

SMES menyimpan energi listrik dalam bentuk medan magnet pada kumparan superkonduktor. Keunggulan utama SMES adalah respons daya yang cepat, efisiensi siklus tinggi, dan kemampuan menyerap atau melepaskan daya aktif dalam waktu singkat. Dalam konteks LFC, SMES bertindak sebagai kompensator transien yang mengurangi kesenjangan antara daya pembangkitan dan daya beban.

Pada model LFC mikrohidro, SMES biasanya direpresentasikan melalui blok dinamis yang melibatkan penguatan SMES, konstanta waktu konverter, dan blok washout. Parameter tersebut harus dituning dengan tepat agar SMES tidak hanya menurunkan overshoot, tetapi juga tidak menimbulkan osilasi baru atau respons yang terlalu agresif. Kajian mutakhir mengenai pemodelan SMES juga menekankan perlunya model operasi yang realistis agar SMES tidak terus bertukar energi pada kondisi stabil [7], [12].

2.3. Metaheuristik untuk Optimasi LFC

Metaheuristik banyak digunakan pada LFC karena fungsi objektif sistem dapat bersifat nonlinier, multi-parameter, dan sulit dioptimasi menggunakan pendekatan analitik. ICA bekerja dengan membentuk negara, imperialis, koloni, proses asimilasi, revolusi, dan kompetisi antar-imperium. Dalam LFC PLTMH, setiap kandidat solusi merepresentasikan kombinasi parameter pengendali PID dan SMES, sedangkan nilai fitness dihitung berdasarkan fungsi objektif seperti ITAE [2], [9].

BA diperkenalkan oleh Yang sebagai algoritma metaheuristik yang terinspirasi dari perilaku ekolokasi kelelawar [8]. Pada BA, setiap kelelawar merepresentasikan solusi kandidat. Posisi dan kecepatan diperbarui menggunakan frekuensi, loudness, dan pulse rate. Dalam studi LFC mikrohidro, BA digunakan untuk mengoptimasi parameter SMES dan CES agar nilai ITAE minimum dan respons frekuensi menjadi lebih baik [1].

2.4. Literatur Terkait dan Posisi Penelitian

Ringkasan literatur terkait disajikan pada Tabel 1. Tabel ini menegaskan bahwa penelitian sebelumnya telah mengembangkan banyak variasi metode optimasi untuk LFC PLTMH, tetapi komparasi ternormalisasi antara ICA dan BA pada SMES-PID masih jarang dibahas secara eksplisit.

Tabel 1. Ringkasan literatur dan gap penelitian.

Sumber	Metode	Objek	Temuan utama	Keterbatasan terkait gap
Djalal et al. [2]	PID-SMES + ICA	PLTMH	ICA menurunkan overshoot PID-SMES hingga -4.11×10^{-5} pu.	Tidak membandingkan langsung dengan BA pada artikel yang sama.
Djalal dan Kadir [1]	SMES/CES + BA	PLTMH	BA mengoptimasi SMES dan CES dengan fungsi objektif ITAE.	Fokus pada BA dan kombinasi SMES-CES, bukan komparasi ICA.
Djalal et al. [3]	Hybrid SMES-CES + CSA	PLTMH	CSA mengurangi overshoot respons frekuensi.	Algoritma berbeda; belum membahas ICA vs BA.
Faisal et al. [4]	PID-SMES + ACO	PLTMH	ACO-SMES mengurangi deviasi frekuensi.	Fokus pada ACO, bukan benchmarking lintas algoritma.
Novendra et al. [5]	PID + GWO	MHPP	GWO digunakan untuk optimasi PID pada mode isolated dan grid-connected.	Tidak menempatkan SMES sebagai fokus utama.
Gulzar et al. [6]	Review LFC modern	Sistem tenaga modern	Mengidentifikasi kebutuhan robustness, AI, dan storage device.	Tidak spesifik pada benchmark PLTMH SMES.

Gaber et al. [7]	Model SMES untuk frequency support	Sistem energi terbarukan	Menekankan model SMES yang lebih realistis untuk transien.	Perlu diadaptasi ke PLTMH kecil.
Pradhan et al. [13]	PID-ZN + SMES	AGC hidro-thermal	ZN-PID digunakan sebagai baseline dan SMES meningkatkan respons frekuensi.	Bukan PLTMH 40 kVA; digunakan sebagai dasar metodologis baseline PID-ZN.

Metode Ziegler-Nichols (ZN) merupakan pendekatan tuning PID klasik yang sering digunakan sebagai pembanding awal pada automatic generation control dan load frequency control. Literatur AGC berbasis SMES menunjukkan bahwa parameter P, PI, dan PID dapat dituning menggunakan metode ZN dan dibandingkan dengan konfigurasi yang melibatkan SMES [13]. Dalam artikel ini, PID-ZN tidak diposisikan sebagai kontribusi utama, melainkan sebagai baseline konvensional untuk menunjukkan seberapa besar peningkatan yang diperoleh ketika SMES dioptimasi menggunakan ICA dan BA. Karena benchmark PLTMH yang tersedia melaporkan nilai PID konvensional tanpa menyajikan ulang perhitungan ultimate gain dan ultimate period ZN, nilai PID tersebut digunakan sebagai proxy baseline PID-ZN/konvensional dan dinyatakan secara eksplisit sebagai keterbatasan.

3. Metodologi Penelitian

3.1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain studi komparatif berbasis data benchmark literatur. Skenario pembanding diperluas menjadi empat kelompok utama, yaitu sistem tanpa kontrol, PID-ZN/konvensional, PID-SMES berbasis ICA, dan SMES-PID berbasis BA. Data parameter PLTMH, parameter algoritma, parameter optimal SMES-PID, dan nilai overshoot diambil dari studi MATLAB/Simulink terdahulu yang relevan.

Sifat penelitian ini adalah benchmark sekunder. Oleh karena itu, angka performa yang disajikan tidak diklaim sebagai hasil running ulang model Simulink baru. Data ICA berasal dari studi PID-SMES menggunakan ICA, sedangkan data BA berasal dari studi SMES/CES menggunakan BA. Nilai PID-ZN dalam artikel ini diposisikan sebagai baseline PID konvensional berbasis literatur PLTMH; validasi ZN primer dengan parameter ultimate gain dan ultimate period yang sama perlu dilakukan pada simulasi lanjutan.

3.2. Parameter Sistem PLTMH

Parameter sistem PLTMH yang digunakan merupakan benchmark dinamik mikrohidro 40 kVA. Daya aktif nominal dihitung dari daya semu dan faktor daya:

$$P_g = S_g \times pf = 40 \text{ kVA} \times 0.8 = 32 \text{ kW} \quad (1)$$

Dengan demikian, sistem yang dianalisis merepresentasikan PLTMH 40 kVA dengan daya aktif sekitar 32 kW pada frekuensi nominal 50 Hz. Parameter sistem ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter sistem PLTMH benchmark.

Parameter	Nilai	Keterangan
Tb	1 s	Konstanta waktu turbin air
Kg	1	Penguatan regulator generator
Tg	13.333 s	Konstanta waktu generator induksi
K1	5	Konstanta deteksi error
K2	8.52	Konstanta deviasi frekuensi
K3	0.004	Penguatan deteksi error

T	0.02 s	Konstanta waktu deteksi error
Ts	0.1 s	Konstanta waktu governor
Ks	2.5	Penguatan governor
Sg	40 kVA	Rating generator
pf	0.8	Faktor daya
Vg	400/231 V	Tegangan nominal generator
omega	1500 rpm	Kecepatan nominal
fg	50 Hz	Frekuensi nominal

3.3. Model Dinamik LFC

Model dinamik PLTMH dapat dituliskan menggunakan beberapa blok fungsi alih orde pertama. Model governor, turbin air, generator induksi, dan deteksi error ditunjukkan pada Persamaan (2) hingga (5).

$$G_{gov}(s) = K_s / (1 + sT_s) = 2.5 / (1 + 0.1s) \quad (2)$$

$$G_t(s) = 1 / (1 + sT_b) = 1 / (1 + s) \quad (3)$$

$$G_g(s) = K_g / (1 + sT_g) = 1 / (1 + 13.333s) \quad (4)$$

$$G_e(s) = K_3 / (1 + sT) = 0.004 / (1 + 0.02s) \quad (5)$$

Secara konseptual, deviasi frekuensi dipengaruhi oleh selisih daya mekanik turbin, daya kompensasi SMES, dan perubahan beban. Hubungan tersebut dapat ditulis sebagai:

$$\Delta f(s) = G_g(s)[\Delta P_m + \Delta P_{SMES} - \Delta P_L] \quad (6)$$

3.4. Model SMES-PID

Dalam konfigurasi yang dianalisis, SMES dikombinasikan dengan pengendali PID. Secara sederhana, blok SMES dapat direpresentasikan sebagai fungsi alih orde pertama dengan penguatan KSMES dan konstanta waktu Tdc:

$$G_{SMES}(s) = K_{SMES} / (1 + sT_{dc}) \quad (7)$$

Pada konfigurasi PID-SMES, variabel keputusan yang umum digunakan meliputi Kp, Ki, Kd, Tdc, Tw, dan KSMES. Blok washout Tw berfungsi menyaring komponen transien sehingga SMES terutama bekerja pada gangguan frekuensi, bukan pada kondisi tunak.

3.5. Fungsi Objektif

Fungsi objektif yang digunakan dalam benchmark literatur adalah Integral Time Absolute Error (ITAE). ITAE memberikan penalti lebih besar terhadap error yang bertahan lama, sehingga sesuai untuk sistem LFC yang menuntut pemulihan cepat menuju keadaan tunak.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |\Delta \omega(t)| dt \quad (8)$$

Nilai ITAE yang lebih kecil menunjukkan performa kontrol yang lebih baik karena deviasi frekuensi lebih kecil dan berlangsung dalam waktu lebih singkat.

3.6. Parameter Algoritma dan Data Benchmark

Parameter algoritma ICA dan BA yang menjadi dasar pembacaan artikel ini disajikan pada Tabel 3. Untuk hasil BA, artikel benchmark menggunakan population size 35 dan iterasi 50, dengan loudness 0.25, pulse rate 0.5, alpha 0.7, dan gamma 0.7 [1]. Karena penelitian ini menggunakan data literatur, parameter BA hasil benchmark tersebut dipertahankan agar hasil tetap tertelusur.

Tabel 3. Parameter algoritma pada data benchmark literatur.

Algoritma	Parameter	Nilai
ICA	Number of countries	50
ICA	Imperialists	6
ICA	Colonies	44
ICA	Revolution rate	0.3
ICA	Assimilation coefficient beta	2
ICA	Assimilation coefficient gamma	0.5
ICA	Zeta zeta	0.01
ICA	Iteration	40 pada benchmark; 100 pada rancangan awal
BA	Population size	35
BA	Loudness	0.25 pada benchmark
BA	Pulse rate	0.5 pada benchmark
BA	Alpha	0.7 pada benchmark
BA	Gamma	0.7 pada benchmark
BA	Iteration	50
BA	Dimension	11

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Parameter Optimal SMES-PID

Tabel 4 membandingkan parameter optimal SMES-PID hasil ICA dan BA. Pada data ICA, parameter optimal PID-SMES adalah $K_p = 10.9266$, $K_i = 0.4515$, $K_d = 0.6588$, $T_{dc} = 0.0196$, $T_w = 19.6067$, dan $K_{SMES} = 80.2835$ [2]. Pada data BA, parameter optimal SMES-PID adalah $T_{dc} = 0.6013$, $T_w = 20.5028$, $K_{SMES} = 81.3793$, $K_p = 40.5466$, $K_i = 1.5526$, dan $K_d = 0.5974$ [1].

Tabel 4. Parameter optimal SMES-PID berdasarkan data benchmark.

Parameter	ICA PID-SMES [2]	BA SMES-PID [1]
K_p	10.9266	40.5466
K_i	0.4515	1.5526
K_d	0.6588	0.5974
T_{dc}	0.0196	0.6013
T_w	19.6067	20.5028
K_{SMES}	80.2835	81.3793

Perbedaan nilai K_p dan K_i menunjukkan bahwa BA menghasilkan parameter PID yang lebih agresif dibandingkan ICA. Namun, nilai K_{SMES} pada kedua metode relatif berdekatan, yaitu sekitar 80-81. Hal ini mengindikasikan bahwa kontribusi SMES sebagai kompensator daya cepat dominan pada kedua skenario, sedangkan PID mengatur bentuk respons transiennya.

4.2. Respons Frekuensi Berbasis ICA

Data ICA menunjukkan bahwa kondisi tanpa kontrol menghasilkan overshoot frekuensi -0.0003179 pu. Penggunaan PID-SMES menurunkan overshoot menjadi -4.11×10^{-5} pu. Jika dikonversi ke basis 50 Hz, overshoot tanpa kontrol setara dengan -0.015895 Hz, sedangkan PID-SMES setara dengan -0.002055 Hz.

Tabel 5. Respons frekuensi berbasis ICA [2].

Metode kontrol	Overshoot (pu)	Ekuivalen 50 Hz (Hz)
Tanpa kontrol	-0.00031790	-0.01589500
P	-0.00021760	-0.01088000
PI	-0.00021670	-0.01083500
PD	-0.00021280	-0.01064000
PID	-0.00021180	-0.01059000
SMES	-0.00019510	-0.00975500
PID-SMES ICA	-0.00004110	-0.00205500

Reduksi overshoot ICA dihitung sebagai:

$$\eta_{ICA} = (0.0002768 / 0.0003179) \times 100\% = 87.07\% \quad (9)$$

Hasil ini menunjukkan bahwa PID-SMES berbasis ICA mampu menurunkan magnitudo overshoot sekitar 87.07% dibandingkan sistem tanpa kontrol.

4.3. Respons Frekuensi Berbasis BA

Data BA menunjukkan bahwa kondisi tanpa kontrol menghasilkan overshoot -0.000318 pu. Baseline PID-ZN/konvensional menurunkan overshoot menjadi -0.0002115 pu, sedangkan SMES-PID berbasis BA menurunkannya lebih jauh menjadi -4.038×10^{-5} pu. Jika dikonversi ke basis 50 Hz, nilai tersebut masing-masing setara dengan -0.015900 Hz, -0.010575 Hz, dan -0.002019 Hz.

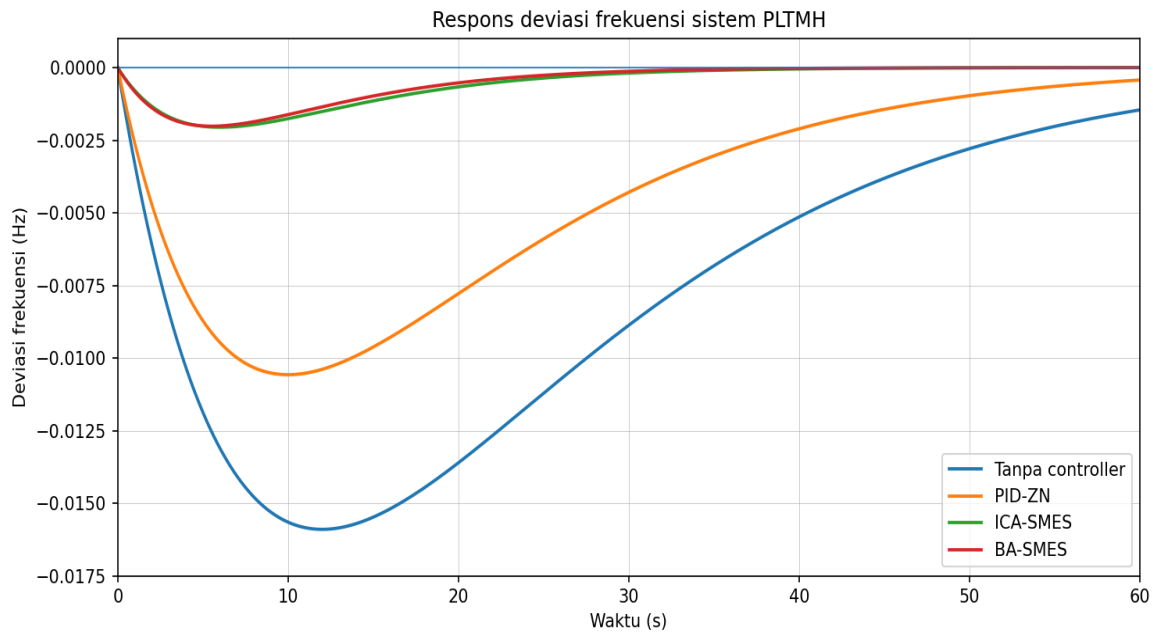
Tabel 6. Respons frekuensi berbasis BA dan baseline PID-ZN/konvensional [1].

Metode kontrol	Overshoot (pu)	Ekuivalen 50 Hz (Hz)
Tanpa kontrol	-0.00031800	-0.01590000
PID-ZN/konvensional	-0.00021150	-0.01057500
CES	-0.00012410	-0.00620500
CES-PID	-0.00001445	-0.00072250
SMES	-0.00019390	-0.00969500
SMES-PID BA	-0.00004038	-0.00201900
SMES-CES	-0.00010260	-0.00513000
SMES-CES-PID	-0.00001432	-0.00071600
SMES-PID-CES	-0.00003430	-0.00171500
SMES-PID-CES-PID	-0.000009028	-0.00045140

Reduksi overshoot BA dihitung sebagai:

$$\eta_{BA} = (0.00027762 / 0.000318) \times 100\% = 87.30\% \quad (10)$$

Dengan demikian, SMES-PID berbasis BA mampu menurunkan magnitudo overshoot sekitar 87.30% dibandingkan sistem tanpa kontrol, sedangkan PID-ZN/konvensional hanya menurunkan overshoot sekitar 33.49%. Perbedaan ini menegaskan bahwa penambahan SMES dan optimasi parameter memberikan peningkatan yang lebih besar dibandingkan tuning PID konvensional saja.



Gambar 2. Grafik respons deviasi frekuensi bergaya MATLAB/Simulink berdasarkan data benchmark literatur.

4.4. Perbandingan Kuantitatif Tanpa Kontrol, PID-ZN, ICA, dan BA

Perbandingan ringkas antara kondisi tanpa kontrol, PID-ZN/konvensional, ICA, dan BA disajikan pada Tabel 7. Tabel tersebut menunjukkan bahwa PID-ZN mampu memperbaiki respons dibandingkan sistem tanpa kontrol, tetapi reduksinya masih jauh lebih kecil dibandingkan konfigurasi SMES-PID yang dioptimasi menggunakan ICA atau BA.

Tabel 7. Perbandingan tanpa kontrol, PID-ZN, ICA, dan BA.

Metode	Konfigurasi	Overshoot (pu)	Overshoot (Hz)	Reduksi
Tanpa kontrol	Uncontrolled	-0.00031800	-0.015900	0.00%
PID-ZN	PID konvensional	-0.00021150	-0.010575	33.49%
ICA	PID-SMES	-0.00004110	-0.002055	87.07%
BA	SMES-PID	-0.00004038	-0.002019	87.30%

Jika dinyatakan sebagai penurunan absolut dari kondisi tanpa kontrol, PID-ZN/konvensional menurunkan deviasi frekuensi dari sekitar 0.015900 Hz menjadi 0.010575 Hz. ICA menurunkan deviasi menjadi 0.002055 Hz, sedangkan BA menurunkannya menjadi 0.002019 Hz. Dengan demikian, PID-ZN memberikan perbaikan awal, tetapi kontribusi terbesar berasal dari integrasi SMES dengan parameter yang dioptimasi secara metaheuristik.

4.5. Analisis Celah dan Implikasi Penelitian Lanjutan

Hasil komparatif memperlihatkan bahwa peningkatan performa tidak hanya ditentukan oleh jenis algoritma, tetapi juga oleh konfigurasi pengendali, batas parameter, keberadaan penyimpanan energi cepat, dan karakteristik objective function. Dibandingkan PID-ZN/konvensional, konfigurasi SMES-PID berbasis ICA dan BA menunjukkan penurunan overshoot yang jauh lebih besar karena SMES mampu memberikan kompensasi daya aktif secara cepat ketika terjadi ketidakseimbangan daya.

Dari sudut pandang novelty, penelitian lanjutan yang paling kuat adalah melakukan re-simulasi ICA dan BA pada satu model Simulink yang sama, menggunakan batas parameter yang sama, skenario step load yang sama, horizon simulasi yang sama, serta kriteria objective function yang sama. Dengan demikian, perbedaan kinerja yang diperoleh benar-benar mencerminkan karakteristik algoritma, bukan perbedaan rancangan eksperimen.

Selain itu, studi masa depan perlu memasukkan metrik selain overshoot, seperti settling time, rise time, integral absolute error, integral squared error, energi SMES yang digunakan, batas arus kumparan, serta sensitivitas terhadap variasi beban. Pemodelan SMES yang lebih realistis juga perlu diperhatikan agar kompensasi daya tidak diasumsikan ideal sepanjang waktu.

5. Kesimpulan

Artikel ini menyajikan studi komparatif optimasi SMES untuk LFC pada PLTMH menggunakan ICA dan BA berbasis data benchmark literatur, serta menambahkan baseline tanpa kontrol dan PID-ZN/konvensional. Sistem yang dianalisis adalah PLTMH 40 kVA dengan faktor daya 0,8, daya aktif 32 kW, dan frekuensi nominal 50 Hz.

Dibandingkan sistem tanpa kontrol, PID-ZN/konvensional menurunkan overshoot sekitar 33,49%, ICA menurunkan overshoot sekitar 87,07%, sedangkan BA menurunkan overshoot sekitar 87,30%. BA menunjukkan nilai overshoot sedikit lebih rendah dibandingkan ICA, tetapi selisihnya sangat kecil. Hasil ini memperlihatkan bahwa PID-ZN bermanfaat sebagai baseline awal, sedangkan SMES-PID teroptimasi memberikan perbaikan transien yang jauh lebih signifikan.

Celah penelitian yang paling penting adalah belum adanya simulasi primer yang membandingkan tanpa kontrol, PID-ZN, ICA, dan BA pada model, batas parameter, objective function, seed, dan skenario beban yang sepenuhnya sama. Kontribusi artikel ini adalah menyajikan peta gap dan pembacaan benchmark kuantitatif yang dapat menjadi dasar penyusunan simulasi MATLAB/Simulink lanjutan.

6. Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini menggunakan data benchmark literatur sehingga tidak mengklaim hasil simulasi primer baru. Selain itu, data ICA dan BA berasal dari studi yang berbeda, sedangkan baseline PID-ZN menggunakan nilai PID konvensional yang tersedia pada benchmark PLTMH. Oleh karena itu, hasil perbandingan perlu dipandang sebagai sintesis awal yang harus divalidasi ulang melalui simulasi primer dengan prosedur Ziegler-Nichols, batas parameter, dan skenario gangguan beban yang seragam.

Conflict of Interest

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan dalam penyusunan naskah ini.

Ucapan Terima Kasih

Bagian ini dapat diisi dengan sumber pendanaan, nama laboratorium, atau pihak yang membantu penelitian. Jika tidak ada, bagian ini dapat dihapus sesuai template jurnal tujuan.

References

- [1] M. R. Djalal and N. Kadir, "Optimal design of energy storage for load frequency control in micro hydro power plant using Bat Algorithm," *SINERGI*, vol. 26, no. 1, pp. 7-14, 2022, doi: 10.22441/sinergi.2022.1.002.
- [2] M. R. Djalal, Sonong, and Marhatang, "Superconducting Magnetic Energy Storage Optimization for Load Frequency Control in Micro Hydro Power Plant using Imperialist Competitive Algorithm," *International Journal of Engineering and Manufacturing*, vol. 8, no. 5, pp. 1-9, 2018, doi: 10.5815/ijem.2018.05.01.
- [3] 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, 2017, doi: 10.14203/j.mev.2017.v8.76-84.
- [4] F. Faisal, M. R. Djalal, and M. Ali, "Penerapan SMES untuk Load Frequency Control pada PLTMH Menggunakan Ant Colony Optimization," *Jurnal FORTECH*, vol. 5, no. 1, pp. 1-9, 2024, doi: 10.56795/fortech.v5i1.5101.

-
- [5] I. I. Novendra, I. M. Wirawan, A. Kusumawardana, and A. K. Latt, "Optimization of load frequency control using grey wolf optimizer in micro hydro power plants," *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, vol. 14, no. 2, pp. 166-176, 2023, doi: 10.14203/j.mev.2023.v14.166-176.
- [6] M. M. Gulzar, D. Sibtain, M. Alqahtani, F. Alismail, and M. Khalid, "Load frequency control progress: A comprehensive review on recent development and challenges of modern power systems," *Energy Strategy Reviews*, vol. 57, Article 101604, 2025, doi: 10.1016/j.esr.2024.101604.
- [7] M. Gaber et al., "An accurate model of SMES for load frequency control in renewable power systems," *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2025, doi: 10.1016/j.pcmp.2025.100657.
- [8] X. S. Yang, "A new metaheuristic bat-inspired algorithm," in *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2010, pp. 65-74, doi: 10.1007/978-3-642-12538-6_6.
- [9] E. Atashpaz-Gargari and C. Lucas, "Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition," in *2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Singapore, 2007, pp. 4661-4667, doi: 10.1109/CEC.2007.4425083.
- [10] S. Doolla, T. S. Bhatti, and R. C. Bansal, "Load frequency control of an isolated small hydro power plant using multi-pipe scheme," *Electric Power Components and Systems*, vol. 39, no. 1, pp. 46-63, 2011.
- [11] I. T. Yuniahastuti, I. Anshori, and I. Robandi, "Load frequency control of micro-hydro power plant with Capacitive Energy Storage using Bat Algorithm," in *International Seminar on Application for Technology of Information and Communication*, 2016, pp. 147-151.
- [12] B. B. Adetokun, O. Oghorada, and S. J. Abubakar, "Superconducting magnetic energy storage systems: Prospects and challenges for renewable energy applications," *Journal of Energy Storage*, vol. 55, Article 105663, 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105663.
- [13] P. C. Pradhan, N. Satapathy, P. K. Pany, and J. Moharana, "Automatic Generation Control with Z-N Tuned PID Controller in the Two Area Hydro Thermal Power System with SMES," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 6, no. 5, pp. 3640-3647, 2017, doi: 10.15662/IJAREEIE.2017.0605078.