

Optimal PI untuk Kontrol *Bidirectional* DC – DC Converter charge-discharge Baterai

Habib Brilian Wicaksono

Program Studi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Ketintang 60231, Indonesia

e-mail : habib.21028@mhs.unesa.ac.id

Rifqi Firmansyah, Nanda Eka Saputra

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Ketintang 60231, Indonesia

e-mail : Rifqifirmansyah@unesa.ac.id, nanda.21035@mhs.unesa.ac.id

Abstrak

Sistem Penyimpanan energi berbasis baterai semakin banyak digunakan pada aplikasi modern seperti keadaan listrik dan sistem energi yang terbarukan. Untuk mendukung efisiensi pengisian dan pengosongan daya baterai, diperlukan kontrol yang akurat pada *bidirectional converter* DC – DC. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan strategi kontrol optimal berbasis Proporsional – Integral (PI) pada *bidirectional converter* DC – DC yang dirancang untuk proses *charge-discharge* baterai secara efisien. Parameter PI menggunakan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO), sebuah metode *metaheuristic* yang terkenal karena kecepatan dan kemampuannya dalam menemukan solusi yang optimal. Model dari *converter* dikembangkan dan diuji menggunakan simulasi berbasis MATLAB/Simulink. Proses optimasi dengan PSO bertujuan untuk meminimalkan error steady state, untuk meningkatkan respon dinamis, serta memastikan stabilitas sistem dalam berbagai kondisi. Hasil menunjukkan bahwa pengendali berbasis PI-PSO memberikan performa yang lebih baik dibandingkan metode konvensional maupun sistem tanpa pengendali, khususnya dalam parameter *rise time*, *overshoot*, dan kestabilan tegangan keluaran. Temuan ini menegaskan efektivitas PSO dalam meningkatkan performa *bidirectional converter* DC-DC pada sistem penyimpanan energi berbasis baterai.

Kata Kunci: Kontrol PI, *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Bidirectional Converter* DC-DC, *charge-discharge*, Baterai.

Abstract

Battery-based energy storage systems are increasingly used in modern applications such as power and renewable energy systems. To support the charging and discharging efficiency of the battery, accurate Control of the bidirectional DC-DC converter is required. This research aims to develop an optimal control strategy based on Proportional - Integral (PI) on a bidirectional DC - DC converter designed for efficient battery charge-discharge process. The PI parameters are parameterised using the Particle Swarm Optimisation (PSO) algorithm, a metaheuristic method renowned for its speed and ability to find optimal solutions. The model of the converter was developed and tested using MATLAB/Simulink-based simulation. The optimisation process with PSO aims to minimise the steady state error, to improve the dynamic response, and to ensure system stability under various conditions. The results show that the PI-PSO-based controller provides better performance than the conventional method and the system without controller, especially in the parameters of rise time, overshoot, and output voltage stability. This finding confirms the effectiveness of PSO in improving the performance of bidirectional DC-DC converter in battery-based energy storage systems.

Keywords: Control PI, *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Bidirectional Converter* DC-DC, *charge-discharge*, Battery.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi energi terbarukan seperti panel surya dan turbin mendorong kebutuhan sistem penyimpanan energi yang lebih efisien. Baterai berperan penting dalam berbagai aplikasi seperti *Electrical vehicle* (EV), fotovoltaik, serta jaringan listrik cerdas (*smart grid*) (Muktiadji et al., 2022). Untuk menjaga kinerja sistem secara keseluruhan, diperlukan pengaturan aliran daya yang efisien dalam proses pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*) baterai. Salah satu solusi teknis yang banyak digunakan adalah *Bidirectional* DC-DC yang memungkinkan aliran daya dua arah, antara sumber (Trapti Golhani & Sudeep Mohaney, 2024). Untuk mengendalikan

Bidirectional converter Pengendali *Proporsional-Integral* (PI) sering dipilih karena struktur yang sederhana dan memberikan respons sistem yang stabil (Ounnas et al., 2019), namun demikian, performa PI sendiri sangat bergantung pada pemilihan parameter yang tepat. Kekurangan seperti ketidakmampuan mengurangi *rise time*, mengurangi osilasi, serta sensitif terhadap variasi parameter sistem menjadi hambatan (Temel et al., 2012; Trinh et al., 2023)

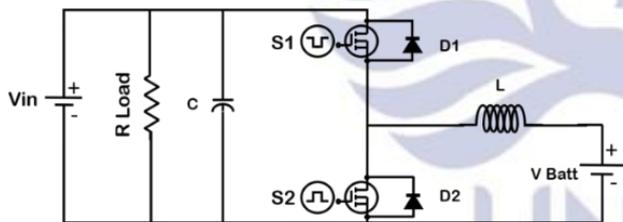
Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) berfungsi untuk mengoptimalkan pengendali PI. PSO efektif dalam menyelesaikan masalah optimasi parameter pengendali PI (Panda & Padhy, 2008), dengan optimasi ini diharapkan

sistem *converter* dapat menghasilkan kinerja yang lebih stabil dan responsive terhadap berbagai kondisi operasi. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem *bidirectional DC-DC converter* dengan pengendali PI yang dioptimalkan menggunakan algoritma PSO guna meningkatkan kinerja sistem penyimpanan energi berbasis baterai.

TINJUAN PUSTAKA

Bidirectional converter

Bidirectional converter DC – DC punya peranan penting dalam proses transfer dan konversi energi listrik yang tersimpan pada sistem penyimpanan energi. *Bidirectional converter* dirancang untuk mendukung kedua fase, yaitu mode *charge* dan mode *discharge* daya, sehingga sangat memungkinkan aliran energi lancar sesuai dengan kebutuhan spesifikasi dan operasional (Zhang et al., 2019). *Bidirectional converter* mempunyai kemampuan untuk menaikkan ataupun menurunkan tingkat tegangan dalam operasi *charge-discharge*. Perangkat ini dibuat untuk menyediakan aliran daya dalam dua arah, yang berarti dapat mengisi baterai (mode *charge*) atau mengeluarkan daya dari baterai (mode *discharge*). Tegangan referensi digunakan untuk mengukur tegangan pengisian yang masuk kedalam baterai. Sama halnya dalam mode *discharge*, tegangan yang mengalir dari baterai diukur dan dibandingkan dengan tegangan referensi untuk memastikan bahwa daya yang dikeluarkan sesuai dengan daya yang dibutuhkan oleh sistem. (Adhikary & Biswas, 2024)



Gambar 1. Bidirectional Converter

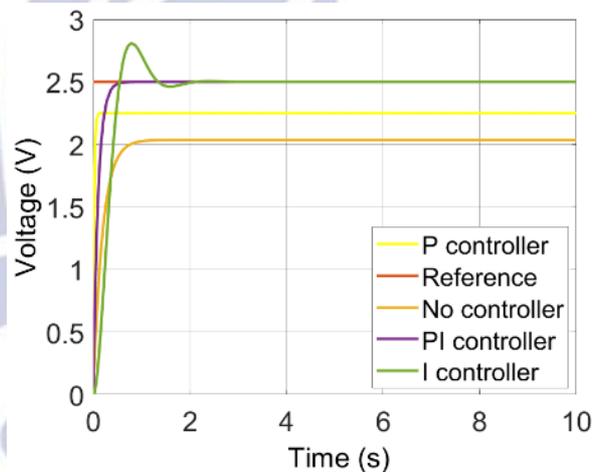
Dalam Gambar 1, V_{in} menyediakan tegangan untuk beban. Jika tegangan yang di *supply* V_{in} melebihi kebutuhan beban, sisa daya akan digunakan untuk mengisi baterai. Sebaliknya, jika tegangan yang di *supply* tidak mencukupi kebutuhan beban, maka beban akan beralih sumbernya dari baterai. Dengan demikian, kontinuitas tegangan pada beban akan terjaga sesuai V_{in} dan baterai. (Sarif et al., 2018)

Proportional Integral (PI)

Ada berbagai teknik kendali telah dikembangkan dan sudah diterapkan untuk mencapai stabilitas sistem sekaligus memastikan respon transien yang cepat. Diantara teknologi teknologi itu, solusi pengontrol proporsional (P), proporsional Integral (PI), proporsional derivative (PD), serta proporsional integral derivative (PID) yang banyak digunakan dalam sistem atau rekayasa kontrol (Katsuhiko

Ogata, 2017). Fungsi teoritis dari sistem pengendali PI adalah untuk menjaga variabel proses agar mencapai nilai target dengan mempertimbangkan selisih antara nilai yang menjadi referensi dan nilai aktual. Pengendali P bertugas untuk mengurangi kesalahan dengan memberikan respons cepat terhadap perubahan, sementara nilai pengendali I berperan untuk menghilangkan kesalahan dalam jangka panjang dengan mengintegrasikan nilai kesalahan seiring waktu. Kombinasi antara keduanya menghasilkan PI yang memungkinkan sistem mencapai performa yang optimal dengan respons yang cepat dan tingkat akurasi yang tinggi, meskipun terdapat gangguan ataupun perubahan dalam parameter sistem (Laoprom & Tunyasirut, 2020).

Sinyal kontrol PI digunakan untuk memberikan umpan balik terhadap nilai keluaran tegangan dari *Bidirectional converter* DC-DC dengan mengontrol *duty cycle*. Dalam hal ini, pengontrol PI menggunakan konstanta tertentu, yaitu konstanta proporsional (K_p) dan Konstanta Integral (K_i), dalam mengatur respons sistem. Tujuan utama dari penggunaan pengontrol PI adalah meminimalkan nilai *error* antara nilai yang diijinkan dan nilai aktual dari keluaran tegangan dan menyesuaikan *Duty cycle* secara akurat. (Zulkarnaen et al., 2020)



Gambar 2. Perbedaan pengendali P, I, PI

Dapat dilihat pada gambar 2 pada sumbu y menunjukkan nilai keluaran sistem atau respon sistem, sementara sumbu x merepresentasikan waktu. Keluaran respon sistem dari pengendali P, I, dan PI bisa dibandingkan dari gambar tersebut. Sinyal kontrol P memiliki keunggulan cepat dalam mencapai keadaan *steady state*, tetapi pengendali P masih memiliki nilai *error steady state* dalam penggunaannya. Sementara sinyal kontrol I memiliki respon sistem yang lebih lambat dari sinyal kontrol P, tetapi secara bertahap akan mencapai nilai referensi dengan stabil. Maka pengendali P dan I dikombinasikan dalam sistem agar mencapai keseimbangan antara respon sistem dan stabilitas agar mengurangi *error steady state* serta respon sistem yang cepat. Rumus dari kontroler PI dapat ditunjukkan dalam persamaan dibawah.

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int e(t) dt \right] \quad (1)$$

Dimana K_p adalah parameter proporsional, τ_i adalah konstanta waktu integrator, dan $e(t)$ adalah nilai *error* pada sistem. Keduanya adalah parameter yang dapat diubah sesuai dengan spesifikasi perancangan. Dalam pengembangannya, sangat banyak metode yang digunakan dalam mengatur parameter PI seperti Ziegler Nichols, Cohen-Coon, CHR, dan lain-lain (Firmansyah & Irmawanto, 2021).

Optimalisasi Particle Swarm Optimization (PSO)

PSO yang merupakan teknik optimasi berbasis populasi, terinspirasi oleh perilaku sosial kawanan. PSO adalah teknik optimasi berbasis populasi (Firmansyah et al., 2024). PSO mengkombinasikan Teknik pencarian lokal (*local search*) dan pencarian global (*global search*) untuk menemukan Solusi. PSO dirancang untuk menangani masalah yang kompleks dengan cara membentuk populasi partikel yang posisinya diatur secara acak pada awal proses. Setiap partikel adalah representasi dari Solusi potensial untuk masalah yang sedang diselesaikan. Selanjutnya algoritma ini mengevaluasi tingkat kecocokan dari setiap partikel, yang digunakan untuk menilai sejauh mana partikel tersebut mampu menyelesaikan masalah yang ada (Kusmarna et al., 2015).

Selama proses optimasi, setiap partikel akan memperbarui kecepatan dan posisinya berdasarkan pengalaman individu serta informasi kolektif dari seluruh kelompok (*swarm*) dengan penggabungan data personal dan pengetahuan sosial, partikel-partikel tersebut diarahkan ke area-area yang potensial dalam ruang pencarian. Kolaborasi ini memungkinkan kelompok untuk menjelajahi berbagai area dengan efektif. Sekaligus pemanfaatan wilayah yang dianggap menjanjikan atau menunjukkan potensi solusi yang lebih baik (Ahmad Putra et al., 2023).

PSO mengoptimalkan suatu masalah dengan menggunakan populasi solusi yang disebut partikel, bergerak dalam ruang pencarian berdasarkan rumus matematika sederhana terkait posisi dan kecepatan partikel. Maka prosedur dibawah ini dapat digunakan dalam implementasi algoritma PSO (Farokhnia et al., 2009).

- PSO Initialization

Dimulai dengan menetapkan posisi awal partikel secara acak berdasarkan distribusi dalam ruang pencarian (*search space*). Setiap partikel ditempatkan dalam ruang berdasarkan parameter relevan dengan masalah yang dioptimalkan.

- Fitness Evaluation

Fitness evaluation adalah proses untuk menilai tingkat kecocokan setiap partikel secara individual. Pada tahap ini nilai *fitness* dihitung berdasar kriteria yang

ditentukan dan ditetapkan sesuai dengan masalah yang sedang dipecahkan.

- Update individual data

Pada tahapan ini, nilai *fitness* terbaru dibandingkan dengan nilai yang sebelumnya. Selanjutnya dilakukan pembaruan nilai *Pbest* (*personal best*) jika nilai *fitness* saat ini lebih baik, maka nilai tersebut diperbaharui sebagai *Pbest*.

- Identifikasi global best

Dari seluruh partikel dalam *swarm*, partikel dengan nilai *fitness* tertinggi diidentifikasi sebagai solusi terbaik global (*Gbest*).

- Update Velocity dan position

Kecepatan dan posisi setiap partikel diperbaharui menggunakan persamaan yang mempertimbangkan kecepatan serta posisi dari *Pbest* dan *Gbest*. Perubahan ini memungkinkan partikel untuk bergerak ke arah yang lebih optimal berdasarkan informasi dari individu dan kolektif. Iterasi dilakukan hingga kriteria konvergensi terpenuhi. PSO digunakan untuk mengoptimalkan parameter K_p dan K_i pada algoritma pengontrol PI sehingga sistem kontrol loop tertutup dapat beroperasi dengan efisiensi maksimal. Algoritma optimasi fungsi ITAE menghasilkan waktu penyelesaian yang lebih cepat. Kesalahan keadaan tunak yang lebih kecil, dan *overshoot* yang minimal melalui optimasi parameter berbasis PSO. (Mühürçü et al., 2017).

$$ITAE(e) = \sum_{k=0}^{t_{sim}/T_s} t |e_t| \quad (2)$$

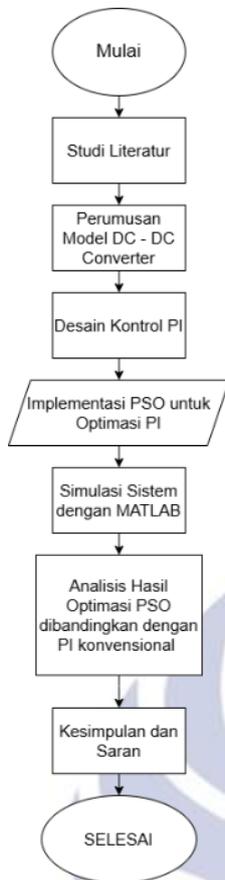
Yang dimana ITAE adalah digunakan sebagai fungsi objektif dalam algoritma PSO untuk mencari K_p dan K_i terbaik pada pengendali PI. Nilai ITAE yang lebih kecil menandakan bahwa sistem memiliki performa kontrol yang lebih baik, yaitu mampu mencapai referensi yang lebih cepat dengan *error minimum*

METODE PENELITIAN

Pendekatan Penelitian

Pendekatan yang dilakukan penelitian ini termasuk kedalam kategori penelitian kuantitatif, yang berarti metode yang digunakan berfokus dalam pengumpulan dan analisis data numerik yang diukur secara objektif. Pendekatan kuantitatif menekankan pentingnya data yang dihasilkan dari pengukuran yang akurat dan sistematis. Metode optimalisasi PSO digunakan untuk mencari nilai PI, yang memungkinkan analisis yang lebih mendalam terkait pengontrol PI.

Rancangan Penelitian



Gambar 3. Rancangan penelitian

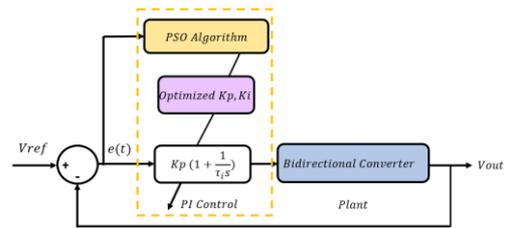
Pada gambar 3 menunjukkan *flowchart* penelitian untuk *bidirectional converter* DC-DC menggunakan PI-PSO. Penelitian ini, bertujuan merancang dan membandingkan kontrol PI konvensional dan dioptimasi dengan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) pada sistem *bidirectional converter* melalui pemodelan, simulasi MATLAB, dan analisis performa sistem.

Penelitian diawali dengan penentuan topik yaitu merancang kontrol optimal untuk proses *charge-discharge* baterai. Selanjutnya dilakukan kajian terhadap referensi ilmiah terkait kontrol PI, algoritma optimasi PSO, serta struktur dan prinsip *bidirectional converter*. Setelah melakukan kajian terhadap referensi, Dibuat model matematis dan simulasi dari *bidirectional converter* meliputi komponen utama seperti baterai, induktor, kapasitor, dan MOSFET. Setelah membuat model dari *bidirectional converter*, pengendali PI dirancang berdasarkan struktur umum kendali *loop* tertutup. Parameter K_p dan K_i awal diperoleh dari metode konvensional sebagai pembanding.

Algoritma PSO diterapkan untuk mengoptimalkan K_p dan K_i dengan kriteria fitness berupa minimisasi *error*. Proses ini melibatkan pembangkitan populasi awal evaluasi *fitness*, dll. Model sistem yang telah dirancang disimulasikan di lingkungan MATLAB/Simulink. Simulasi dilakukan untuk dua mode operasi *converter charging* dan *discharging*.

Evaluasi dilakukan dengan membandingkan performa sistem dalam hal *rise time*, *overshoot*, dan osilasi tegangan pada ketiga kondisi kontrol. Perbandingan ditampilkan dalam bentuk grafik dan tabel.

Blok Diagram



Gambar 4. diagram blok

Pada gambar 4 menggambarkan diagram blok sistem pengendalian tegangan berbasis PI controller yang dioptimasi dengan menggunakan PSO. Diagram ini memperlihatkan alur sinyal dari referensi tegangan ke kontroler PI, ke *converter* hingga output yang dikontrol. PSO digunakan untuk menyesuaikan parameter kontrol PI agar sistem menghasilkan respon optimal dalam mode *charge* maupun *discharge*.

Tegangan referensi (V_{ref}) dibandingkan dengan tegangan keluaran actual (V_{out}) menghasilkan sinyal error $e(t)$, yang menjadi input pengendali. Pengendali PI menggunakan rumus $K_p(1 + \frac{1}{s})$, untuk menghasilkan sinyal kontrol. Nilai parameter K_p dan K_i ($K_p =$ gain proporsional, $\frac{K_p}{\tau_i} =$ gain integral) Aksi proporsional mempercepat respons sistem, sedangkan aksi integral mengurangi error steady state. Nilai parameter K_p dan K_i dioptimalkan menggunakan algoritma PSO dengan meminimalkan fungsi objektif seperti ITAE.

Blok PSO bertugas melakukan tuning parameter sebelum simulasi dilakukan. Hasil optimasi diterapkan pada pengendali untuk mengatur duty cycle pada *converter*.

Bidirectional converter berfungsi sebagai plant yang mengatur aliran daya dua arah (mode *charge* dan *discharge*). Tegangan keluaran sistem digunakan sebagai umpan balik untuk menjaga kesesuaian dengan nilai referensi, serta dinilai berdasarkan *rise time*, *overshoot*, dan kestabilan sistem.

Parameter Komponen

Tabel 1. Komponen *Bidirectional Converter*

NO	Komponen Konverter	Nilai
1.	Baterai	24 V, 50 Ah
2.	DC Source Voltage	48 V
3.	Induktor (L)	5.76e – 4H
4.	Kapasitor (C)	1.083e – 3F
5.	Switching Frekuensi (f)	10kHz
6.	Duty cycle	50%
7.	Ripple tegangan	2%

Tabel 1 menunjukkan parameter komponen perancangan *bidirectional converter* DC-DC. Pada tabel

ditunjukkan nilai induktor $5.76e - 4H$, nilai kapasitor $1.083e - 3F$, dan switching frekuensi 10kHz untuk mengatur *bidirectional converter* dengan tegangan masukan 48 V dan baterai 24V.

HASIL DAN PEMBAHASAN

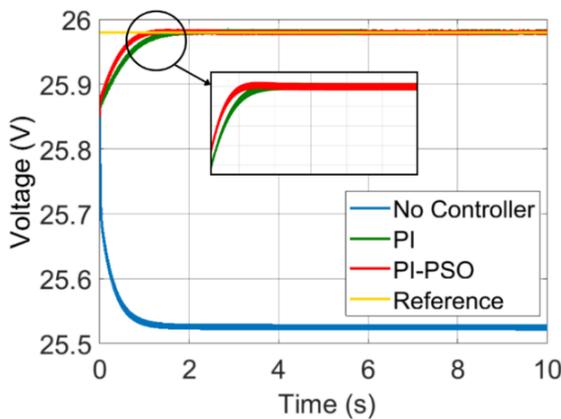
Hasil Penelitian

Mode Charge

Pada tabel 2 adalah hasil optimasi nilai *best cost* yang dihasilkan dari ITAE, K_p , serta K_i . Dapat dilihat PSO Nilai *best cost* sebesar 0.000204 menunjukkan bahwa kesalahan sistem terhadap referensi. PSO mencari K_p dengan nilai 44.82 dan K_i dengan nilai 317.32.

Tabel 2 hasil *best cost*, K_p , dan K_i PSO

<i>Best cost</i>	K_p	K_i
0.000204	44.82	317.32



Gambar 5. Perbandingan mode *charge* tanpa pengontrol, PI, PI-PSO

Gambar 5 menunjukkan perbandingan mode *charge bidirectional converter* dalam tiga kondisi yang berbeda, yaitu tanpa pengendali, menggunakan PI konvensional, dan menggunakan pengendali PI yang dioptimalkan dengan algoritma PSO (PI-PSO). Dapat dilihat ketiga kondisi tersebut menunjukkan perbedaan yang signifikan dalam hal kecepatan respons serta kemampuan mencapai tegangan referensi.

Tabel 3. Perbandingan performa *bidirectional converter* mode *charge*

Sistem	Maximum Overshoot (V)	Rise time (s)	Osilasi (V)	
			Min	Max
Tanpa pengendali	0.0000	0.000	25.521	25.531
PI konvensional	25.9841	0.819	25.9765	25.9841
PI-PSO	25.9849	0.562	25.9767	25.9839

Pada tabel 3 performa terbaik ditunjukkan oleh sistem yang menggunakan pengendali PI-PSO. Tegangan mencapai *reference* dalam waktu yang lebih singkat, dengan *rise time* sebesar 0.562 detik. Walaupun memiliki

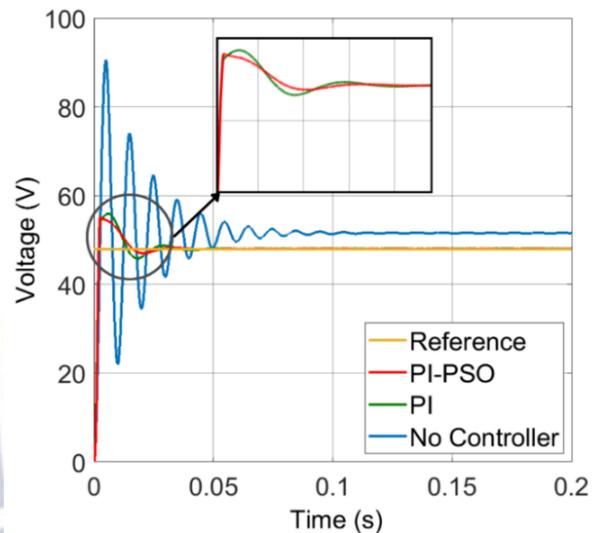
overshoot yang sedikit lebih tinggi yaitu 25.9849 V, Nilai osilasi PI-PSO menjadi yang paling kecil dibandingkan dengan yang lainnya. Dengan tegangan stabil pada rentang 25.9767 V hingga 25.9839 V.

Mode Discharge

Pada tabel 4 adalah hasil optimasi nilai *best cost* yang dihasilkan dari ITAE, K_p , serta K_i . Dapat dilihat PSO Nilai *best cost* sebesar 0.002074 menunjukkan bahwa kesalahan sistem terhadap referensi. PSO mencari K_p dengan nilai 0.412 dan K_i dengan nilai 154.208

Tabel 4 hasil *best cost*, K_p , dan K_i PSO *discharge*

<i>Best cost</i>	K_p	K_i
0.002074	0.4012	154.208



Gambar 6. Perbandingan mode *discharge* tanpa pengontrol, PI, PI-PSO

Gambar 6 menyajikan hasil simulasi *bidirectional converter* pada saat baterai dalam kondisi *discharge*. Analisis dilakukan terhadap ketiga skenario, yaitu tanpa pengendali, dengan pengendali PI konvensional, dan dengan pengendali PI-PSO evaluasi difokuskan pada tiga parameter utama yaitu maximum *overshoot*, *rise time* dan osilasi tegangan keluaran.

Tabel 5. Perbandingan performa *bidirectional converter* mode *discharge*

Sistem	Maximum Overshoot (V)	Rise time (s)	Osilasi (V)	
			Min	Max
Tanpa pengendali	90.56	0.00167	51.55	51.586
PI konvensional	55.83	0.00117	47.965	48.030
PI-PSO	55.16	0.00111	47.974	48.030

Pada tabel 4 peningkatan paling signifikan ditunjukkan oleh sistem pengendali PI-PSO. Dengan penekanan *overshoot* menjadi lebih rendah yaitu 55.16V dan *rise time* sedikit membaik menjadi 0.00111 detik. Serta osilasi juga lebih stabil yaitu antara 47.974 V hingga 48.030 V.

Pembahasan

Pengendali PI-PSO menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan dengan PI konvensional karena proses tuning parameter dilakukan secara otomatis dan berdasarkan kriteria performa sistem. Berbeda dengan metode tuning manual, algoritma PSO melakukan pencarian nilai Kp dan Ki optimal melalui proses iteratif dengan mempertimbangkan indeks kesalahan total seperti ITAE. Hal ini memungkinkan PSO menemukan parameter yang benar benar cocok terhadap karakteristik sistem.

Dari sisi dinamika sistem, PI-PSO mampu menyesuaikan penguatan proporsional dan integral terhadap kondisi aktual sistem, menjadikannya lebih *robust* dalam menghadapi perubahan beban atau gangguan. Dapat dilihat dari *overshoot* yang lebih rendah, rentang isolasi yang lebih kecil, dan waktu mencapai steady state yang lebih singkat dibandingkan PI konvensional.

PENUTUP

Simpulan

Pada mode *charge*, pengendali PI-PSO mampu mempercepat waktu naik (*rise time*) dan memperkecil osilasi dibanding PI konvensional. Sistem mencapai tegangan referensi dengan presisi lebih baik serta menunjukkan peningkatan kestabilan sistem dalam mode pengisian baterai.

Pada mode *discharge*, penerapan PI-PSO juga memberikan hasil optimal dengan menekan *overshoot* secara signifikan dan memperpendek waktu respon. Keluaran sistem menjadi lebih halus dan sesuai dengan referensi untuk pengosongan daya baterai secara efisien.

Saran

Penggunaan metode optimasi yang lain selain PSO, algoritma lain seperti *Generic algorithm* (GA), *grey Wolf Optimization* (GWO), atau *artificial bee colony* (ABC) dapat dipertimbangkan untuk membandingkan performa dan efektivitas pada kontrol PI. Serta disarankan evaluasi lebih lanjut terhadap pengaruh variasi beban dan suhu kerja baterai dalam eksperimen nyata.

DAFTAR PUSTAKA

- Adhikary, S., & Biswas, P. K. (2024). *Optimization of PID Tuning of DC-DC Bidirectional Converter Control Strategy for EV Charger using GA and IoT based SOC Estimation. Proceedings - 2024 1st International Conference on Innovative Sustainable Technologies for Energy, Mechatronics and Smart Systems, ISTEMS 2024*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISTEMS60181.2024.10560127>
- Ahmad Putra, Z. M., Asri, P., Romadloni, F., & Arnestanta, R. R. (2023). Penerapan Algoritma *Particle Swarm Optimization* Untuk Meningkatkan Efisiensi Daya Keluaran Panel Surya. *Jurnal Teknik Elektro Dan Komputer TRIAC*, 10(2), 56–64. <https://doi.org/10.21107/triac.v10i2.20717>
- Farokhnia, N., Fathi, S. H., Khoraminia, R., & Hosseinian, S. H. (2009). *Optimization of PI coefficients in DSTATCOM nonlinear controller for regulating DC voltage using genetic algorithm. 2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2009*, 2291–2296. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2009.5138607>
- Firmansyah, R., & Irmawanto, R. (2021). *Comparison study of PI controller tuning method to regulate the DC motor speed. 2021 3rd International Conference on Research and Academic Community Services (ICRACOS)*, 93–97.
- Firmansyah, R., M, M. B. A., K, M. M., Prayuda, A. G., Rafli, F., Saputra, P. P. S., & Althobiti, A. (2024). *DC Motor Speed Control using Particle Swarm Optimization based on Labview. 8(2)*, 111–121.
- Katsuhiko Ogata. (2017). *Modern control engineering. In Modern Control Engineering*. <https://doi.org/10.1201/9781315214573>
- Kusmarna, I., Wardhani, L. K., & Safrizal, M. (2015). Aplikasi Penjadwalan Mata Kuliah Menggunakan Algoritma Particle Swarm Optimization (Pso). *Jurnal Teknik Informatika*, 8(2), 1–8. <https://doi.org/10.15408/jti.v8i2.2441>
- Laoprom, I., & Tunyasrirut, S. (2020). *Design of PI Controller for Voltage Controller of Four-Phase Interleaved Boost Converter Using Particle Swarm Optimization. Journal of Control Science and Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/9515160>
- Muktiadji, R. F., Ramli, M. A. M., Seedahmed, M. M. A., Uswarman, R., & Endryansyah. (2022). *Power Sharing Control and Voltage Restoration in DC Microgrid Using PI Fuzzy. 2022 5th International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering: The Future of Electrical Engineering, Informatics, and Educational Technology Through the Freedom of Study in the Post-Pandemic Era, ICVEE 2022 - Proceeding*. <https://doi.org/10.1109/ICVEE57061.2022.9930441>
- Ounnas, D., Guiza, D., Soufi, Y., Dhaouadi, R., & Bouden, A. (2019). *Design and Implementation of a Digital PID Controller for DC-DC Buck Converter. Proceedings - 2019 1st International Conference on Sustainable Renewable Energy Systems and Applications, ICSRESA 2019, December*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICSRESA49121.2019.9182430>
- Panda, S., & Padhy, N. P. (2008). *Comparison of particle swarm optimization and genetic algorithm for FACTS-based Controller design. Applied Soft Computing Journal*, 8(4), 1418–1427. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2007.10.009>
- Sarif, M. S. M., Pei, T. X., & Annuar, A. Z. (2018). *Modeling, design and Control of bidirectional DC-DC converter using state-space average model. ISCAIE 2018 - 2018 IEEE Symposium on Computer Applications and Industrial Electronics*, 416–421.

<https://doi.org/10.1109/ISCAIE.2018.8405509>

Temel, S., Yagli, S., & Gören, S. (2012). P, Pd, Pi, Pid Controllers.

<https://www.google.com/pr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CB0QFjAAahUKEwig6ZPnyInJAhUG5CYKHX6oBDI&url=http%3A%2F%2Fwww.Researchgate.Net%2Ffile.PostFileLoader.Html%3Fid%3D54685991d11b8bc9668b461a%26assetKey%3DAS%253A27363520017,63>

Trapti Golhani, & Sudeep Mohaney. (2024). *Control and Designing of Bidirectional DC-DC Converter*. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 05(01), 852–855. <https://doi.org/10.55248/gengpi.2023.4149>

Trinh, H. A., Nguyen, D. G., Phan, V. Du, Duong, T. Q., Truong, H. V. A., Choi, S. J., & Ahn, K. K. (2023).

Robust Adaptive Control Strategy for a Bidirectional DC-DC Converter Based on Extremum Seeking and Sliding Mode Control. *Sensors*, 23(1). <https://doi.org/10.3390/s23010457>

Zhang, H., Chen, Y., Park, S. J., & Kim, D. H. (2019). *A family of bidirectional DC-DC converters for battery storage system with high voltage gain*. *Energies*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/en12071289>

Zulkarnaen, A. S., Winardi, B., & Setiyono, B. (2020). *Desain Dan Simulasi Sistem Plts Dengan Penyimpanan Baterai Menggunakan Bidirectional Dc-Dc Converter Dengan Metode Proportional-Integral Di Sma Negeri 4 Semarang Menggunakan Matlab Simulink*. *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 9(4), 503–510. <https://doi.org/10.14710/transient.v9i4.503-510>

