

Optimasi Parameter PI pada *SEPIC Converter* Berbasis *Particle Swarm Optimization* (PSO)

Wahyu Cahya Putra

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

e-mail: wahyu.22049@mhs.unesa.ac.id

Rifqi Firmansyah

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

e-mail: rifqifirmansyah@unesa.ac.id

Abstrak

Perkembangan sistem pengaturan daya terus mengalami kemajuan seiring meningkatnya tuntutan terhadap efisiensi dan kestabilan daya, khususnya pada aplikasi energi terbarukan seperti panel surya dan kendaraan listrik. Salah satu konverter DC–DC yang banyak digunakan dalam aplikasi tersebut adalah *Single-Ended Primary Inductor Converter* (SEPIC), yang memiliki kemampuan untuk menaikkan maupun menurunkan tegangan dengan tetap mempertahankan polaritas keluaran. Untuk menjaga kestabilan tegangan keluaran, umumnya digunakan pengendali *Proportional-Integral* (PI). Namun, penentuan parameter PI menggunakan metode konvensional sering kali belum mampu menghasilkan respons sistem yang optimal. Oleh karena itu, penelitian ini menerapkan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) sebagai metode optimasi parameter pengendali PI pada *SEPIC converter*. Penerapan kontrol PI–PSO menunjukkan peningkatan kinerja sistem, yang ditandai dengan *rise time* yang lebih cepat serta nilai *overshoot* dan *steady-state error* yang lebih kecil. Hasil tersebut menunjukkan bahwa optimasi PSO mampu menghasilkan respons pengaturan tegangan yang stabil dan efektif.

Kata Kunci: Konverter SEPIC, Kontroler PI, *Particle Swarm Optimization*, Pengaturan tegangan.

Abstract

The development of power control systems continues to progress along with the increasing demands for power efficiency and stability, especially in renewable energy applications such as solar panels and electric vehicles. One of the DC–DC converters widely used in these applications is the Single-Ended Primary Inductor Converter (SEPIC), which has the ability to increase or decrease the voltage while maintaining the output polarity. To maintain the stability of the output voltage, a Proportional-Integral (PI) controller is generally used. However, determining PI parameters using conventional methods is often unable to produce an optimal system response. Therefore, this study applies the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm as a method for optimizing PI controller parameters in a SEPIC converter. The application of PI–PSO control shows an increase in system performance, which is characterized by a faster rise time and smaller overshoot and steady-state error values. These results indicate that PSO optimization is able to produce a stable and effective voltage regulation response.

Keywords: *SEPIC Converter, PI Controller, Particle Swarm Optimization, Voltage Regulation.*

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi elektronika daya mendorong meningkatnya kebutuhan akan sistem konversi energi yang efisien, stabil, dan adaptif, khususnya pada aplikasi energi terbarukan, panel surya, dan kendaraan Listrik (Mahmud et al., 2022). Dalam sistem tersebut, konverter DC–DC berperan penting dalam menyesuaikan level tegangan agar sesuai dengan kebutuhan beban, dengan parameter utama berupa efisiensi, kestabilan keluaran, dan kemampuan beradaptasi terhadap perubahan kondisi operasi (Hinov & Stanchev, 2025).

Konverter SEPIC (*Single-Ended Primary Inductor Converter*) merupakan salah satu topologi konverter DC–DC yang banyak digunakan karena mampu menghasilkan tegangan keluaran yang lebih tinggi atau lebih rendah dari tegangan masukan dengan polaritas yang tetap sama. Karakteristik ini menjadikan SEPIC lebih fleksibel dibandingkan *buck-boost* dan *CUK converter* yang memiliki polaritas

keluaran terbalik (Mahmud et al., 2022). Selain itu, SEPIC menghasilkan arus keluaran yang kontinu dengan *ripple* yang rendah, sehingga sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan kualitas daya yang baik, seperti sistem panel surya dan pengisian baterai (Dieu et al., 2022).

Meskipun demikian, *SEPIC converter* memiliki tantangan dalam pengendalian akibat struktur rangkaian yang kompleks dan karakteristik nonlinier, yang dapat memicu ketidakstabilan respons dinamik apabila tidak dikendalikan dengan baik, terutama saat terjadi perubahan kondisi operasi (Panawan et al., 2024). Oleh karena itu, diperlukan metode pengendalian yang mampu menjaga kestabilan sistem secara efektif (Mahmud et al., 2022).

Pengendali *Proportional-Integral* (PI) banyak digunakan untuk mengatur tegangan keluaran SEPIC karena strukturnya yang sederhana dan kemampuannya dalam memperbaiki respons transien serta menghilangkan *steady-state error* (Chincholkar et al., 2024). Namun, penentuan parameter PI secara

konvensional sering kali belum menghasilkan performa yang optimal sehingga sensitif terhadap perubahan parameter sistem dan kondisi operasi (W. Zhang, 2025). Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penelitian ini menerapkan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) sebagai metode optimasi parameter PI. PSO merupakan algoritma metaheuristik yang terinspirasi dari perilaku sosial kawanan partikel dalam mencari solusi optimal, dengan keunggulan berupa struktur sederhana, konvergensi cepat, dan memiliki kemampuan eksplorasi serta eksploitasi yang seimbang (Sengupta et al., 2019).

Dibandingkan algoritma metaheuristik lainnya seperti *Genetic Algorithm* (GA), *Ant Colony Optimization* (ACO), dan *Grey Wolf Optimizer* (GWO), PSO memiliki struktur yang lebih sederhana, jumlah parameter yang lebih sedikit, serta kemampuan konvergensi yang cepat. Karakteristik tersebut memungkinkan proses optimasi berlangsung lebih efisien dengan kompleksitas komputasi yang relatif rendah, sehingga sesuai untuk optimasi parameter kontroler PI pada *SEPIC converter* (Shami et al., 2022; Wang et al., 2018). Dengan penerapan PSO, diharapkan kinerja pengendalian tegangan *SEPIC converter* dapat ditingkatkan secara signifikan.

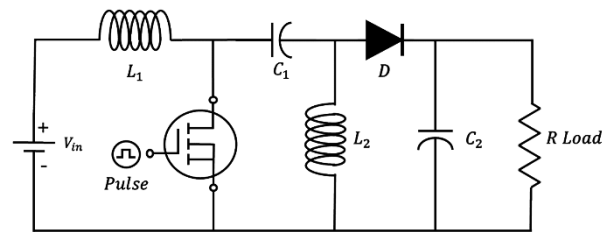
TINJAUAN PUSTAKA

SEPIC Converter

SEPIC (*Single-Ended Primary Inductance Converter*) merupakan topologi konverter DC-DC yang mampu beroperasi sebagai penaik maupun penurun tegangan dengan yang diatur berdasarkan nilai *duty cycle* yang diberikan (Sutikno et al., 2023). Konverter ini merupakan pengembangan dari konsep *buck-boost*, namun memiliki keunggulan berupa polaritas tegangan keluaran yang searah dengan tegangan masukan, sehingga lebih adaptif untuk berbagai kebutuhan sistem daya dibandingkan konverter *buck-boost* dan CUK yang menghasilkan polaritas terbalik (Mahmud et al., 2022). Selain itu, karakteristik arus masukan yang kontinu pada *SEPIC* berperan dalam menekan *ripple* arus sumber dan meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan (Chandrasekar et al., 2024).

Konverter *SEPIC* terdiri atas dua induktor, sebuah kapasitor kopling, dioda, saklar aktif berupa MOSFET, serta kapasitor keluaran yang terhubung ke beban. Kombinasi komponen tersebut memungkinkan proses penyimpanan dan transfer energi berlangsung secara efektif sehingga tegangan keluaran dapat dipertahankan tetap stabil. Dengan karakteristik tersebut, *SEPIC* banyak diterapkan pada sistem panel

surya dan kendaraan listrik yang menuntut kestabilan tegangan (Dieu et al., 2022; Falin, 2008). Konfigurasi rangkaian *SEPIC converter* yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian *SEPIC converter*

PI Controller

Kontroler *Proportional-Integral* (PI) merupakan metode pengendalian yang digunakan untuk menjaga variabel proses agar tetap berada pada nilai yang diinginkan dengan meminimalkan selisih antara *set point* dan nilai keluaran terukur. Aksi proporsional berfungsi mempercepat respons sistem menuju nilai acuan, sedangkan aksi integral berperan dalam menghilangkan kesalahan melalui akumulasi *error* terhadap waktu (Chincholkar et al., 2024). Sistem kontrol PI dapat ditunjukkan melalui model matematis berikut.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^1 e(t) dt \quad (1)$$

Pada persamaan tersebut, $u(t)$ adalah keluaran sistem kontrol, K_p dan K_i masing-masing merupakan konstanta proporsional dan integral, sedangkan $e(t)$ menyatakan nilai *error*.

Dalam penelitian ini, parameter pengendali PI konvensional ditentukan menggunakan pendekatan sistem orde satu, pada persamaan berikut (Seborg et al., 2002).

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (2)$$

$$K = \frac{Y_{ss}}{X_{ss}} \quad (3)$$

Nilai penguatan sistem K diperoleh dari perbandingan keluaran saat *steady-state* terhadap *set point*, sedangkan konstanta waktu τs ditentukan pada saat respons mencapai 63,2% dari kondisi tunak. Untuk mendapatkan parameter K_p dan K_i dapat dihitung

menggunakan persamaan:

$$K_p = \frac{\tau_i}{K\tau^*} \quad (4)$$

$$K_i = \frac{K_p}{\tau_i} \quad (5)$$

Dengan $\tau_i = \tau$ dan τ^* merupakan waktu naik yang diinginkan.

Algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO)

Particle Swarm Optimization (PSO) merupakan algoritma optimasi metaheuristik yang dikembangkan berdasarkan perilaku sosial kawanan burung dan kelompok ikan dalam menemukan sumber makanan secara bersama-sama (Shami et al., 2022). Algoritma ini pertama kali diperkenalkan oleh Kennedy dan Eberhart pada tahun 1995 dan termasuk dalam algoritma optimasi metaheuristik berbasis *swarm intelligence*. Pada algoritma PSO, setiap solusi kandidat dimodelkan sebagai partikel yang bergerak di dalam ruang pencarian, di mana arah pergerakannya dipengaruhi oleh solusi terbaik yang pernah dicapai secara individu (*personal best*) serta solusi terbaik yang diperoleh oleh seluruh populasi (*global best*) (Sengupta et al., 2019).

Dalam proses optimasi, setiap partikel pada algoritma PSO memperbarui posisi dan kecepatan secara iteratif dengan mempertimbangkan pengalaman terbaik individu serta informasi terbaik yang diperoleh dari keseluruhan populasi. Integrasi antara informasi personal dan global tersebut mengarahkan partikel menuju wilayah pencarian yang memiliki potensi solusi lebih baik. Mekanisme interaksi ini mendorong kelompok untuk melakukan eksplorasi ruang pencarian secara luas sekaligus mengeksplorasi area yang menunjukkan kinerja solusi yang lebih optimal. Dengan menggunakan formulasi matematis yang relatif sederhana dalam pembaruan posisi dan kecepatan, PSO memiliki kompleksitas komputasi yang rendah, mudah diimplementasikan, serta menunjukkan karakteristik konvergensi yang baik pada berbagai permasalahan optimasi (Wang et al., 2018).

Integral Time Absolute Error (ITAE)

Pada sistem pengendalian tegangan *SEPIC converter* dengan metode PI-PSO, algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) digunakan untuk mengoptimasi parameter K_p dan K_i pada pengendali *Proportional-Integral* (PI). Proses optimasi ini bertujuan untuk meminimalkan nilai *Integral Time Absolute Error* (ITAE) yang dijadikan sebagai fungsi

objektif dalam evaluasi kinerja sistem. Nilai ITAE yang lebih kecil menunjukkan kualitas respons sistem yang lebih baik, karena perbedaan antara tegangan keluaran dan tegangan referensi dapat ditekan secara cepat dan stabil. Secara matematis, ITAE didefinisikan sebagai integral waktu dari nilai absolut selisih antara tegangan referensi dan tegangan keluaran, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan berikut (Y. Zhang et al., 2019).

$$ITAE = \int_0^t t |V_{ref} - V_{out}| dt \quad (6)$$

Di mana V_{ref} merupakan tegangan referensi (*set point*) dan V_{out} adalah tegangan keluaran. Nilai ITAE digunakan sebagai fungsi objektif dalam optimasi pengendali PI, sehingga parameter K_p dan K_i tidak ditetapkan secara tetap, melainkan dioptimasi oleh algoritma PSO berdasarkan integral waktu dari nilai absolut selisih antara tegangan referensi dan tegangan keluaran.

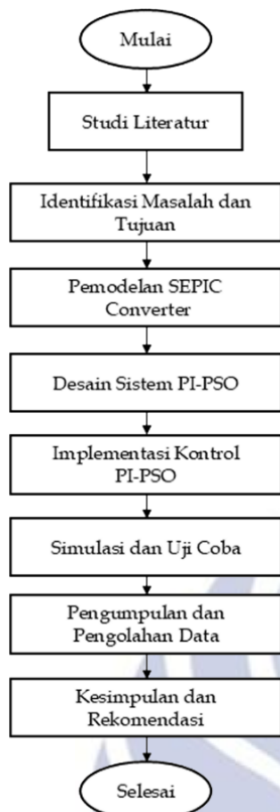
METODE PENELITIAN

Pendekatan Penelitian

Pendekatan penelitian yang dipilih adalah pendekatan kuantitatif, dengan fokus pada pengumpulan dan analisis data numerik secara objektif. Metode ini menekankan pengukuran yang akurat dan sistematis untuk mengevaluasi kinerja sistem. Dalam penelitian ini, digunakan metode eksperimen untuk mengembangkan dan menguji optimasi parameter pada kontroler PI menggunakan algoritma PSO pada *SEPIC converter* guna memperoleh respon tegangan keluaran yang stabil dan optimal.

Rancangan Penelitian

Penelitian ini melibatkan beberapa tahapan yang disajikan pada gambar 2:



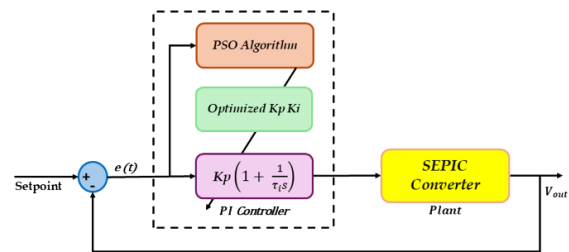
Gambar 2. Flowchart rancangan penelitian

Penelitian ini diawali dengan tahap perencanaan awal dan pengumpulan referensi yang relevan melalui studi literatur untuk memperkuat dasar teoritis, khususnya terkait *SEPIC converter*, kontroler PI, dan algoritma optimasi berbasis metaheuristik *Particle Swarm Optimization* (PSO). Berdasarkan kajian literatur tersebut, dilakukan identifikasi permasalahan serta perumusan tujuan penelitian yang berfokus pada optimasi parameter kontroler PI guna meningkatkan kestabilan tegangan keluaran *SEPIC converter*. Selanjutnya, dilakukan pemodelan simulasi *SEPIC converter* untuk menganalisis karakteristik kinerja sistem pada berbagai kondisi operasi.

Setelah model sistem terbentuk, dilakukan perancangan kontroler PI dengan parameter K_p serta K_i yang dioptimasi menggunakan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO). Parameter hasil optimasi kemudian diimplementasikan pada model *SEPIC converter* dan diuji melalui simulasi menggunakan software MATLAB/Simulink. Data hasil simulasi dianalisis untuk mengevaluasi kinerja sistem kontrol yang diusulkan. Berdasarkan hasil analisis tersebut, dirumuskan kesimpulan mengenai efektivitas metode PI-PSO serta disampaikan rekomendasi untuk pengembangan penelitian selanjutnya. Seluruh tahapan penelitian kemudian disusun secara sistematis dalam bentuk laporan.

Diagram Blok

Diagram blok pada Gambar 3 menunjukkan alur kerja sistem pada penelitian ini.



Gambar 3. Diagram blok sistem

Gambar 3 menampilkan diagram blok sistem yang menggambarkan integrasi algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) dengan pengendali PI pada *SEPIC converter*. Proses diawali dengan penentuan pasangan parameter K_p dan K_i sebagai kandidat solusi yang dihasilkan oleh algoritma PSO. Parameter tersebut kemudian diterapkan pada pengendali PI untuk mengatur sinyal kendali yang diberikan kepada *SEPIC converter*. Selanjutnya, respons tegangan keluaran yang dihasilkan oleh sistem dikembalikan ke algoritma PSO sebagai umpan balik untuk mengevaluasi kinerja berdasarkan fungsi objektif ITAE. Proses evaluasi dan pembaruan parameter dilakukan secara berulang hingga diperoleh kombinasi K_p dan K_i yang optimal, sehingga mampu meminimalkan nilai *error* dan meningkatkan kestabilan tegangan keluaran *SEPIC converter*.

Parameter Komponen

Parameter komponen *SEPIC converter* yang digunakan pada penelitian ini ditampilkan pada Tabel 1 dan diperoleh dari penelitian terdahulu oleh (Yilmaz et al., 2022), sehingga penelitian ini berfokus pada optimasi parameter pengendali PI.

Tabel 1. Parameter komponen *SEPIC converter*

Parameter	Nilai
Tegangan Input (V_{in})	20 Volt
Tegangan Output (V_{out})	12 Volt
Duty cycle	37,5 %
Frekuensi (f)	100 kHz
Resistor (R)	5 Ω
Induktor (L_1, L_2)	134 μ H, 134 μ H
Kapasitor (C_1, C_2)	2 μ F, 800 μ F

Sistem *SEPIC converter* dirancang dengan tegangan masukan 20 V dan tegangan keluaran 12 V. Pengaturan tegangan dilakukan melalui *duty cycle* 37,5% pada

frekuensi 100 kHz dengan beban 5 Ω. Sistem menggunakan dua induktor L_1 dan L_2 masing-masing 134 μH, kapasitor kopling C_1 sebesar 2 μF, serta kapasitor keluaran C_2 sebesar 800 μF untuk menjaga kestabilan dan mereduksi *ripple* tegangan.

Berdasarkan hasil optimasi menggunakan MATLAB/Simulink, diperoleh nilai parameter K_p dan K_i untuk pengendali PI-PSO serta pengendali PI konvensional yang digunakan sebagai pembanding dalam evaluasi peningkatan kinerja metode optimasi PSO, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter PI

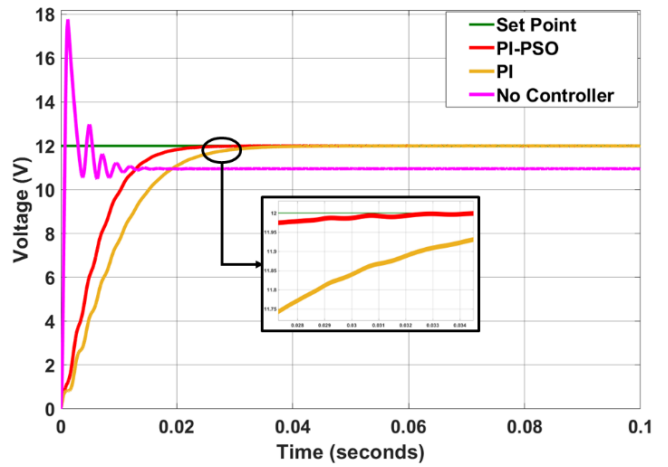
Parameter	PI-PSO	PI Konvensional
K_p	0,0020	0,0018
K_i	5,4098	3,6630

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Kinerja *SEPIC Converter*

Pengujian kinerja ini bertujuan untuk menilai kemampuan sistem dalam menjaga kestabilan tegangan keluaran. Pada pengujian ini, diberikan tegangan input sebesar 20V, sedangkan *set point* tegangan keluaran ditetapkan sebesar 12V dengan beban konstan sebesar 5Ω. Selama proses pengujian, tegangan input dan *set point* tidak mengalami perubahan, sehingga evaluasi difokuskan pada respons dinamis sistem tanpa pengaruh variasi kondisi operasi.

Beberapa parameter performa utama yang dianalisis dalam pengujian ini meliputi *rise time*, *settling time*, *overshoot*, dan *steady-state error*. *Rise time* merupakan waktu yang dibutuhkan tegangan keluaran untuk mencapai *set point*, sedangkan *settling time* menunjukkan waktu sistem mencapai kondisi stabil dalam batas toleransi tertentu. *Overshoot* menggambarkan lonjakan maksimum tegangan yang melebihi *set point*, Sementara itu, *steady-state error* menunjukkan selisih antara tegangan keluaran dan *set point* pada kondisi tunak. Hasil pengujian kinerja *SEPIC converter* pada kondisi *set point* tetap disajikan pada Gambar 4 dan dirangkum dalam Tabel 2.



Gambar 4. Grafik pengujian respon sistem

Tabel 3. Hasil pengujian pada kondisi set point tetap

Parameter	PI-PSO	PI-Konv.	Tanpa Pengontrol
<i>Rise time</i> (s)	0,0310	0,0485	0,0007
<i>Settling Time</i> (s)	0,0399	0,0596	0,017
<i>Overshoot</i> (%)	0	0	48,01
<i>Steady-State Error</i> (V)	0,01	0,01	1,04
ITAE	0,000366	0,000789	-

Berdasarkan Gambar 4 dan Tabel 3, dapat dilakukan perbandingan performa antara beberapa jenis pengendali, yaitu PI-PSO, PI konvensional, dan sistem tanpa pengontrol. Pengendali PI-PSO menunjukkan performa paling stabil dengan *rise time* sebesar 0,0310s dan *settling time* 0,0399s, serta tidak menghasilkan *overshoot* dan memiliki *steady-state error* yang sangat kecil. Selain itu, nilai ITAE sebesar 0,000366 menunjukkan bahwa kesalahan sistem dapat diminimalkan secara cepat dan efisien. Pengendali PI konvensional juga tidak menimbulkan *overshoot* dan memiliki *steady-state error* yang sama, namun menunjukkan respon yang lebih lambat dengan *rise time* 0,0485s dan *settling time* 0,0596s, serta memiliki nilai ITAE sebesar 0,000789 yang lebih besar dibandingkan PI-PSO. Sementara itu, sistem tanpa pengontrol menunjukkan *overshoot* yang sangat tinggi sebesar 48,01% serta *steady-state error* sebesar 1,04 V, meskipun memiliki *rise time* yang cepat. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan pengendali PI-PSO memberikan kinerja terbaik dalam mempertahankan tegangan keluaran pada kondisi *set point* tetap.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada bapak Rifqi Firmansyah, S.T., M.T.,

Ph.D. selaku dosen pembimbing penulis, atas bimbingan, arahan, serta masukan yang diberikan selama proses penelitian berlangsung. Dukungan tersebut membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian ini secara lebih terarah dan mendalam. Selain itu, ilmu, pengalaman, serta motivasi yang beliau berikan menjadi inspirasi yang sangat berarti dalam penyusunan artikel ini.

PENUTUP

Simpulan

Sistem kontrol PI-PSO berhasil dirancang dengan mengombinasikan pengendali PI dan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) sebagai metode optimasi parameter K_p dan K_i . Hasil implementasi dalam simulasi menunjukkan bahwa sistem mampu bekerja secara efektif dalam mengatur *duty cycle* pada *SEPIC converter*. Berdasarkan analisis hasil simulasi, pengendali PI-PSO memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan PI konvensional dan sistem tanpa pengontrol, ditunjukkan oleh respon yang lebih cepat ditandai dengan *rise time* dan *settling time* yang kecil, tanpa *overshoot*, dan memiliki *steady-state error* yang sangat kecil. Hal ini membuktikan bahwa penerapan PI-PSO mampu meningkatkan kinerja *SEPIC converter* dalam menjaga kestabilan tegangan keluaran.

Saran

Penelitian ini masih terbatas pada tahap simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan sistem ke dalam bentuk implementasi perangkat keras, misalnya dengan memanfaatkan mikrokontroler, sehingga kinerja pengendali PI-PSO dapat dievaluasi secara langsung pada kondisi operasi nyata. Selain itu, penelitian lanjutan dapat menerapkan algoritma metaheuristik yang lebih baru atau metode hybrid untuk memperoleh parameter K_p dan K_i yang lebih optimal, sehingga respon sistem menjadi lebih cepat.

DAFTAR PUSTAKA

- Chandrasekar, A., Subramanian, V., & Rajamanickam, N. (2024). *Design and Control of Four-Port Non-Isolated SEPIC Converter for Hybrid Renewable Energy Systems*.
- Chincholkar, S., Tariq, M., Poshtan, M., & Sharaf, M. (2024). *Normalized Error-Based PI Controller and Its Application to the DC – DC Buck Converter*.
- Dieu, J. De, Kenné, N. G., Tchouani, A. F., Eustace, N., & Nfah, M. (2022). Adaptive neuro-synergetic control technique for SEPIC converter in PV systems. *International Journal of Dynamics and Control*, 10(1), 203–216. <https://doi.org/10.1007/s40435-021-00808-1>
- Falin, B. J. (2008). *Designing DC / DC converters based on SEPIC topology*.
- Hinov, N., & Stanchev, P. (2025). *Analysis and Optimization of DC-DC Converters Through Sensitivity to Parametric Variations*.
- Mahmud, A. J., Mithun, M. H., Khan, A., Faisal, F., & Nishat, M. M. (2022). *Optimal Control and Performance Enhancement of DC-DC Bidirectional SEPIC Converter*. December. <https://doi.org/10.1109/UEMCON54665.2022.9965670>
- Panawan, A. N. A. A., Samman, F. A., Sahali, I. R., & Smedley, K. M. (2024). Performance Analysis of Single Ended Primary Inductor Converter with Adaptive and Static Proportional Integral Control Variants. *International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*, 3(2), 69–74. <https://doi.org/10.1109/EECSI63442.2024.10776373>
- Seborg, D. E., Edgar, T. F., & Mellichamp, D. A. (2002). *Process Dynamics and Control*.
- Sengupta, S., Basak, S., Alan, R., & Ii, P. (2019). *Particle Swarm Optimization: A Survey of Historical and Recent Developments with Hybridization Perspectives*. 157–191. <https://doi.org/10.3390/make1010010>
- Shami, T. M., El-saleh, A. A., & Member, S. (2022). *Particle Swarm Optimization: A Comprehensive Survey*. 10031–10061.
- Sutikno, T., Aprilianto, R. A., Rumzi, N., Idris, N., & Samosir, A. S. (2023). *Performance numerical evaluation of modified single-ended primary-inductor converter for photovoltaic systems*. 13(4), 3720–3732. <https://doi.org/10.11591/ijece.v13i4.pp3720-3732>
- Wang, D., Tan, D., & Liu, L. (2018). Particle swarm optimization algorithm: an overview. *Soft Computing*, 22(2), 387–408. <https://doi.org/10.1007/s00500-016-2474-6>
- Yilmaz, M., Emin Kalçık, M., & Muhammet, F. Ç. (2022). *Sliding-Mode Control Techniques of SEPIC Converter in Continuous Current Mode*. 9(1), 195–207.
- Zhang, W. (2025). *The Impact of PID Control Parameters on DC Motor Performance*. 0, 141–146. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/136/2025.20995>
- Zhang, Y., Zhang, L., & Dong, Z. (2019). *An MEA-Tuning Method for Design of the PID Controller*. 2019.