

Analisis Sistem Kontrol *Bidirectional Converter* dengan Algoritma *Electric Charged Particles Optimization* (ECPO) terhadap Perubahan Tegangan Input Baterai

Aditya Rendra Pratama

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

e-mail : aditya.22095@mhs.unesa.ac.id

Rifqi Firmansyah

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

e-mail : rifqifirmansyah@unesa.ac.id

Abstrak

Sistem pengisian dan pengosongan baterai membutuhkan mekanisme kontrol yang ideal untuk meningkatkan kinerja dan memperpanjang umur baterai karena sangat penting untuk penggunaan energi terbarukan dan kendaraan listrik. Salah satu masalah utama dengan sistem ini adalah bagaimana mengoptimalkan pengendalian *bidirectional converter* untuk mengatur aliran daya pada baterai dan sumber sehingga memiliki sifat respons cepat, efisiensi tinggi, dan kestabilan yang baik dalam berbagai kondisi operasional. Penelitian ini mengusulkan menggunakan penerapan algoritma *Electric Charged Particles Optimization* (ECPO) sebagai teknik optimasi dalam sistem kontrol *bidirectional converter*. ECPO merupakan algoritma berbasis populasi yang terinspirasi dari interaksi partikel bermuatan listrik, yang mampu mencari solusi optimal secara lebih cepat dan efisien dibandingkan metode optimasi tradisional. Hasil pengujian dengan simulasi Simulink dengan berbagai skenario menunjukkan bahwa dengan menggunakan sistem ECPO menghasilkan *settling time* yang lebih singkat, respons yang lebih cepat dan *steady state error* yang mendekati nilai 0. Dari hasil pengujian itulah bahwa sistem ECPO dapat mengonfirmasi peningkatan stabilitas dan ketahanan sistem secara terukur.

Kata Kunci: *Electric Charged Particles Optimization* (ECPO), *Bidirectional Converter* DC - DC, Kontrol PI, Optimasi Sistem Kontrol, Baterai.

Abstract

Battery charging and discharge systems require an ideal control system for improved performance and extended battery life as it is crucial in the usage of renewable energy and electric cars. One of the main problems of this system is how to achieve the best control of the *bidirectional converter* for power flow regulation in the source and battery in order to make it of fast response nature, high efficiency, and good stability during various operating conditions. In this paper, it is proposed to make use of the utilization of the application of the *Electric Charged Particles Optimization* (ECPO) algorithm as the optimizing method in the control system of the *bidirectional converter*. ECPO is a population-based method based on the inspiration of the interaction between electrically charged particles that can find optimal solutions quicker and more economically than traditional optimization methods. The simulation test under various conditions with Simulink shows that the *settling time* is smaller, response and *steady state error* almost 0 in the ECPO system. According to the test results, the ECPO system can confirm a measurable enhancement in the stability and robustness of the system.

Keywords: *Electric Charged Particles Optimization* (ECPO), *Bidirectional Converter* DC - DC, PI Control, Control System Optimization, Battery.

PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, tren sumber energi terbarukan di mana baterai telah digunakan sebagai elemen utama untuk penyimpanan energi listrik telah menjadi sangat populer (Cabrane dkk., 2021; Kechida dkk., 2025). Mekanisme penyimpanan energi ini memiliki satu masalah, yaitu energi yang tersimpan dalam baterai tidak kembali ke sumber energi dalam keadaan habis. *Bidirectional Converter* merupakan solusi dalam mengatur aliran daya dari sumber daya dan

baterai. *Converter* ini dapat memungkinkan transfer atau pergerakan daya dalam dua arah (Golhani & Mohaney, 2024). Baik dalam penyimpanan energi berlebih maupun distribusi energi yang tersimpan ke beban topologi seperti *buck-boost* telah dimanfaatkan untuk memastikan efisiensi tertinggi dalam aliran daya (Khan dkk., 2025; Samosir dkk., 2023; Trisna Nugraha dkk., 2024).

Meskipun beberapa penelitian terdahulu telah memanfaatkan metode konvensional seperti metode tuning Ziegler - Nichols maupun algoritma metaheuristik populer seperti *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan

Genetic Algorithm (GA) untuk mengoptimalkan pengontrol PI pada konverter DC-DC, metode-metode tersebut masih kerap terjebak dalam kondisi optimum lokal (*local optima trapping*) dan menunjukkan kelambatan konvergensi ketika dihadapkan pada fluktuasi tegangan masukan yang ekstrem dinamis. Ketidakstabilan respon transien konverter pada sistem penyimpanan energi dapat mempercepat degradasi masa pakai baterai (*battery lifetime decay*). *Algoritma Electric Charged Particles Optimization* (ECPO) menawarkan keunggulan komparatif melalui replikasi interaksi fisika partikel bermuatan listrik yang adaptif, yang membagi fasenya secara seimbang antara eksplorasi global dan eksploitasi lokal. Kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini terletak pada aplikasi spesifik algoritma ECPO untuk melakukan sintesis parameter optimal secara offline pada pengontrol Proportional-Integral (PI) *bidirectional converter* yang mengalami gangguan (*disturbance*) fluktuasi tegangan input baterai secara dinamis. Evaluasi performa sistem diukur secara rigid menggunakan kriteria performansi integral berbasis indeks Integral of Time-weighted Absolute Error (ITAE) untuk menjamin minimalisasi galat keadaan tunak dan percepatan waktu pemulihan sistem secara simultan.

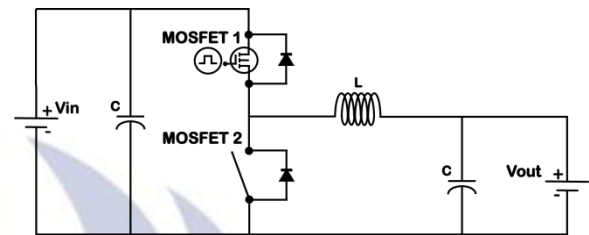
Tujuan penelitian ini adalah untuk meningkatkan dan menerapkan algoritma *Electric Charged Particles Optimization* (ECPO - PI) untuk optimasi parameter pengontrol PI dalam sistem kontrol *bidirectional converter* guna meningkatkan efisiensi dan stabilitas selama pengisian dan pengosongan baterai terhadap perubahan tegangan input baterai. Dengan memanfaatkan keunggulan ECPO dalam mengeksplorasi dan memanfaatkan ruang solusi secara adaptif, pengontrol yang diusulkan diharapkan dapat meminimalkan *steady state errors* dan *settling time* serta menjaga stabilitas tegangan dan arus selama proses konversi daya *bidirectional converter*. Penelitian ini berupaya meningkatkan kinerja sistem dalam kondisi operasi dinamis dan perubahan beban, yang diukur berdasarkan kriteria kinerja seperti *Integral of Time-weighted Absolute Error* (ITAE).

TINJUAN PUSTAKA

Bidirectional converter

Bidirectional converter merupakan rangkaian elektronika daya yang sangat penting dalam proses terjadinya transfer dan konversi energi listrik yang disimpan pada sistem penyimpanan energi (Liu dkk., 2023). Perangkat ini dibuat untuk menyediakan aliran daya, dalam dua arah, yang berarti dapat mengisi baterai (*mode charge*) atau mengeluarkan daya dari baterai (*mode discharge*) (Al-Obaidi dkk., 2022; Khan Baloch Assistant Professor dkk., 2025). Arus referensi digunakan untuk mengukur arus pengisian yang masuk

kedalam baterai. Sama halnya dalam mode *discharge*, arus yang mengalir dari baterai diukur dan dibandingkan dengan arus referensi untuk memastikan bahwa daya yang dikeluarkan sesuai dengan daya yang dibutuhkan oleh sistem (Adhikary & Biswas, 2024a; Sutikno dkk., 2023; Tong dkk., 2025). Proses pengaturan ini terus dilakukan hingga baterai mencapai batas tertentu dari proses pengisian (*State of Charge, SOC*) menunjukkan kapasitas baterai yang tersedia (Chatterjee dkk., 2024).



Gambar 1. Mode *Buck Converter*

Buck Converter adalah mode *bidirectional converter* yang bekerja sebagai penurun tegangan input supaya tegangan yang dihasilkan lebih kecil daripada tegangan output (Bakria dkk., 2023; Haque & Razzak, 2021). Mode *buck converter* sendiri bertugas dalam menyimpan daya listrik berlebih yang terjadi pada tegangan input yang kemudian akan disimpan ke penyimpanan energi pada tegangan output (Al-Dabbagh dkk., 2024; Doğan & Dağ, 2024). Rangkaian *buck converter* sendiri terdiri dari tegangan input (V_{in}), transistor MOSFET 1 sebagai transistor sakelar, transistor MOSFET 2 sebagai pengganti diode, induktor dan kapasitor yang berada pada sisi input dan outputnya (SUCU dkk., 2021; Tuluhong dkk., 2025).

Pada *buck converter* sendiri terdapat dua kondisi yaitu kondisi saat transistor MOSFET 1 mengalami proses konduksi dan tidak mengalami proses konduksi (Çelik, 2021; Ihsan Al-Fikri, 2022). Ketika transistor MOSFET 1 mengalami proses konduksi, terjadi perubahan pada arus dan waktu yang dapat dituliskan dalam persamaan berikut ini :

$$di = \Delta I = I_2 - I_1 \quad (1)$$

$$dt = t_{on} = t_1 - t_0 \quad (2)$$

Di mana ΔI mengindikasikan arus riak induktor (*inductor ripple current*) dalam satuan Ampere (A), dan t_{on} melambangkan durasi waktu kondisi sakelar aktif dalam satuan sekon (s). Sebaliknya, saat kondisi non-konduksi (*OFF*), relasi diferensial parameter tersebut mengikuti persamaan berikut ini :

$$di = -\Delta I = -I_1 - I_2 \quad (3)$$

$$dt = t_{off} = t_2 - t_1 \quad (4)$$

Dengan t_{off} didefinisikan sebagai interval durasi sakelar dalam kondisi tidak aktif (s). Rasio penyalaklaran siklus kerja (*duty cycle*) K ditentukan berdasarkan

hubungan persamaan berikut ini :

$$K = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} \quad (5)$$

$$t_{on} = k \cdot T \quad (6)$$

$$t_{off} = (1 - K) \cdot T \quad (7)$$

Di mana T merepresentasikan periode total penyakelaran ($T = 1/f$) dalam satuan sekon (s) dengan parameter frekuensi switching f bersatuan Hertz (Hz). Representasi tegangan induktor (V_L) dinilai berdasarkan karakteristik induktansi fisik komponen melalui ekspresi hukum induksi Faraday pada persamaan berikut ini :

$$V_s = V_L + V_R \quad (8)$$

Dari timbulnya tegangan yang terjadi pada induktor V_L yang mengakibatkan arus mengalir pada induktor L , dapat didefinisikan sebagai berikut (Chincholkar dkk., 2024):

$$V_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (9)$$

Dengan demikian, hasil dari persamaan pada induktor V_L dapat disubstitusikan kedalam persamaan hukum *kirchoff* ketika transistor MOSFET 1 mengalami proses konduksi. Hasil dari persamaan dapat dituliskan sebagai berikut ini :

$$V_s = L \cdot \frac{\Delta I}{t_{on}} + V_R \quad (10)$$

Kemudian, pada saat transistor MOSFET 1 tidak mengalami proses konduksi menyebabkan terjadinya sumber tegangan terpisah, induktor berubah menjadi sumber energi berupa sumber tegangan dan diode pada transistor MOSFET 2 mengalami proses kondisi. Dengan begitu sesuai dengan kaidah hukum *kirchoff*, persamaan dapat dituliskan sebagai berikut ini :

$$t_{on} = k \cdot T \quad (11)$$

$$V_s = L \cdot \frac{\Delta I}{t_{on}} + V_R \quad (12)$$

Dari keadaan transistor MOSFET 1 mengalami proses konduksi dan tidak mengalami proses konduksi, didapatkan sebuah persamaan sebagai berikut ini :

Transistor MOSFET 1 mengalami proses konduksi :

$$V_s = L \cdot \frac{\Delta I}{t_{on}} + V_R \quad (13)$$

Transistor MOSFET 1 tidak mengalami proses konduksi :

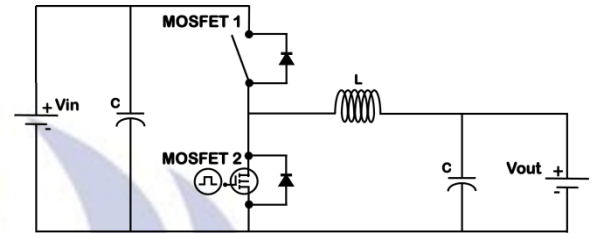
$$L \cdot \frac{\Delta I}{t_{off}} = V_R \quad (14)$$

Dari hasil persamaan diatas ketika transistor MOSFET 1 mengalami proses konduksi dan tidak mengalami proses konduksi, didapatkan hasil substitusi sebagai berikut ini :

$$V_s = V_R \cdot \frac{t_{off}}{t_{on}} + V_R \quad (15)$$

$$V_s = V_R \left(1 + \frac{t_{off}}{t_{on}}\right) \quad (16)$$

$$V_s = k \cdot V_R \quad (17)$$



Gambar 2. Mode Boost Converter

Boost Converter adalah mode *bidirectional converter* yang bekerja sebagai menaikkan tegangan input supaya tegangan yang dihasilkan lebih besar daripada tegangan output (Muktiadji & Rushdi, 2021; Yanarates & Zhou, 2022). Mode *boost converter* sendiri bertugas dalam menambah daya pada Bus DC ketika Bus DC membutuhkan asupan energi listrik yang sudah disimpan ketika terjadinya kelebihan daya (Daraz dkk., 2023; Firmansyah dkk., 2024). Rangkaian *boost converter* sendiri terdiri dari tegangan input (V_{in}), transistor MOSFET 1 sebagai pengganti diode, transistor MOSFET 2 sebagai transistor sakelar, induktor dan kapasitor yang berada pada sisi input dan outputnya (Demirtas & Ahmad, 2023; Muktiadji dkk., 2024).

Pada *boost converter* sendiri terdapat proses *switching* yang menyebabkan terjadinya dua kondisi yaitu transistor MOSFET 2 mengalami proses konduksi dan tidak mengalami proses konduksi. Ketika transistor MOSFET 2 mengalami proses konduksi, akan terjadi hubung singkat antara induktor dengan sumber tegangan (Inomoto dkk., 2022). Persamaan sumber tegangan dengan pengisian energi pada induktor dapat dituliskan dalam persamaan berikut ini :

$$V_s = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (18)$$

Karena transistor sakelar MOSFET 2 mengalami proses konduksi selama t_{on} dan mengalami proses pengisian daya linier, maka persamaan dari 18 dapat dituliskan sebagai berikut ini :

$$V_s = L \cdot \frac{\Delta I}{t_{on}} \quad (19)$$

Kemudian diubah menjadi bentuk persamaan sebagai berikut ini :

$$L \cdot \Delta I = V_s \cdot t_{on} \quad (20)$$

Kemudian, pada saat transistor MOSFET 2 tidak mengalami proses konduksi menyebabkan rangkaian beban akan terhubung dengan rangkaian sumber tegangan dan induktor. Induktor yang berfungsi sebagai pengisi energi dengan arus listrik akan berganti menjadi sumber energi dalam bentuk arus listrik. Dalam situasi ini, beban akan mendapatkan sumber tegangan yang berasal dari sumber tegangan V_s dan sumber tegangan yang berasal dari induktor L ketika melepaskan energi listrik. Kondisi ini diasumsikan seperti halnya beban mendapatkan catu daya dari sumber tegangan yang dirangkai secara seri. Sehingga, menyebabkan tegangan output dari mode *boost converter* dikatakan lebih besar daripada tegangan input. Ketika saklar transistor saklar MOSFET 2 tidak mengalami proses induksi yang menyebabkan t_{off} , menghasilkan persamaan sebagai berikut ini :

$$V_s + L \cdot \frac{\Delta I}{t_{off}} = V_R \quad (21)$$

Dari keadaan transistor MOSFET 2 yang mengalami proses konduksi dan tidak mengalami proses konduksi, didapatkan sebuah persamaan sebagai berikut ini :

Transistor MOSFET 2 mengalami proses konduksi :

$$V_R = V_L \cdot \frac{t_{on}}{t_{off}} + V_R \quad (22)$$

Transistor MOSFET 2 tidak mengalami proses konduksi :

$$V_R = V_s \left(1 - \frac{t_{on}}{t_{off}}\right) \quad (23)$$

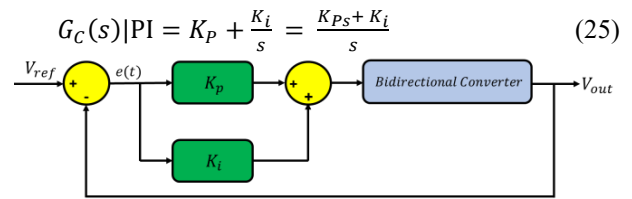
Dari hasil persamaan diatas ketika transistor MOSFET 2 mengalami proses konduksi dan tidak mengalami proses konduksi, didapatkan hasil substitusi sebagai berikut ini :

$$V_R = V_s \cdot \frac{1}{1-k} \quad (24)$$

Proportional Integral (PI)

Kontroler PI merupakan kombinasi dari kontroler *Proportional* (P) dan *Integral* (I) (Huba dkk., 2021). Dalam sistem ini, terdapat beberapa sinyal penting seperti sinyal error dengan lambang $E(s)$, sinyal kontrol dengan lambang $U(s)$, output sistem dengan lambang $C(s)$, referensi dengan lambang $R(s)$, gangguan dengan lambang $D(s)$, serta fungsi transfer dari sistem $G_p(s)$ dan

kontroler $G_c(s)$ (Kulikov dkk., 2021). Secara teoritis, cara kerja kontroler PI dapat dijelaskan melalui persamaan berikut.



Gambar 3. Kontrol PI

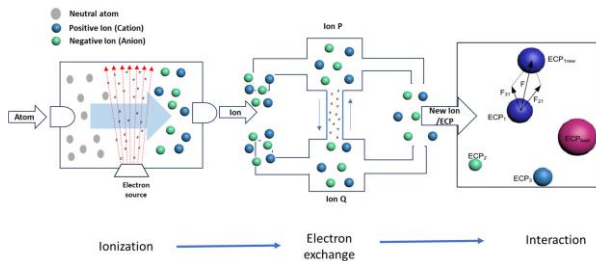
Pada kontroler *Proportional* (P), sinyal keluarannya bergantung langsung pada besar kecilnya error, yaitu selisih antara sinyal referensi dan output atau umpan balik sistem. Kontroler ini berfungsi memperkuat sinyal tersebut, sehingga semakin besar error, semakin kuat dorongan kontrol yang diberikan. Akibatnya, sistem bisa merespons lebih cepat, tapi biasanya disertai *overshoot* yang lebih tinggi. Meskipun kontroler *Proportional* (P) dapat mengurangi error saat kondisi stabil, kontrol ini tidak mampu menghilangkannya sepenuhnya. Nilai parameter kontrol K_p sangat berpengaruh terhadap respons sistem secara keseluruhan, karena mengubahnya akan memengaruhi karakteristik dinamis loop tertutup (Büchi, 2023).

Kontroler *Integral* (I) digunakan untuk mengatasi kesalahan offset yang tetap ada pada kondisi *steady-state*. Saat error berlangsung terus-menerus, bagian *integral* akan terus menumpuk, sehingga sinyal kontrol ikut meningkat dan error pun perlahan berkurang. Namun, karena sinyal kontrol terus bertambah, hal ini bisa menyebabkan *overshoot* yang lebih besar dan membuat sistem menjadi lebih lambat merespons perubahan. Selain itu, kontroler ini tidak mampu sepenuhnya menghilangkan osilasi. Cara kerjanya didasarkan pada akumulasi error dari waktu ke waktu. Artinya, sinyal kontrol saat ini merupakan hasil dari total area di bawah kurva error sejak awal hingga titik tersebut (Joseph dkk., 2022).

Electric Charged Particles Optimization (ECPO)

Algoritma Metahoristik merupakan sebuah teknik optimasi yang terinspirasi dari fenomena alam seperti biologi, fisika dan kimia. Algoritma ini sangatlah berpengaruh dalam mengatasi berbagai masalah, terutama sangat dianggap menantang bagi metode konvensional karena memiliki faktor kompleksitas yang sangat melekat (Kamel dkk., 2022; Ramli dkk., 2023). Salah satu contoh dari algoritma metahoristik sendiri yaitu Electric Charged Particles Optimization (ECPO). Algoritma ECPO terinspirasi berdasarkan fenomena yang berhubungan dengan fisika karena mensimulasikan proses optimasi dengan mereplikasikan interaksi diantara beberapa partikel bermuatan listrik (ECP) (Alanezi dkk.,

2021; Hidayat dkk., 2024).



Gambar 4. Proses ECPO

Agar ECPO dapat berjalan dengan baik, terdapat beberapa tahapan yang dilakukan secara berurutan yaitu sebagai berikut ini :

- Ekspresi fungsi objektif (ObjFunctions).
- Dimensi atau ukuran masalah (ProblemSize), yang juga merupakan jumlah variabel desain.
- Jumlah total ECP (nECP) yang setara dengan ukuran populasi.
- Jumlah maksimum iterasi (MaxITER) di mana algoritma memproses untuk menyelesaikan masalah yang ada.

Untuk memastikan simulasi yang valid, konfigurasi parameter intrinsik dari algoritma *Electric Charged Particles Optimization* (ECPO - PI) diatur secara terukur berdasarkan kompleksitas ruang pencarian dua dimensi (K_p dan K_i). Berikut ini merupakan detail parameter yang digunakan

Tabel 1. Parameter ECPO

NO	Parameter	Nilai
1.	Jumlah Populasi	50
2.	Iterasi	50
3.	Lower Bound	27,5 ; 205
4.	Upper Bound	32,5 ; 215

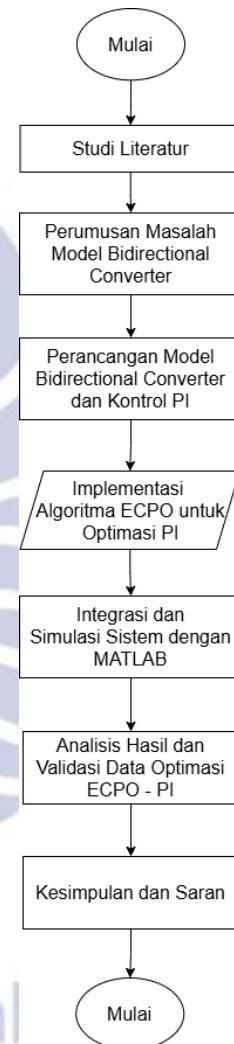
METODE PENELITIAN

Pendekatan Penelitian

Pendekatan penelitian yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif. Pemilihan kuantitatif yang digunakan dalam penelitian ini hanya terfokus dalam pengumpulan dan analisis data numerik yang diukur secara objektif. Pendekatan kuantitatif ini sangat mementingkan penekanan dalam pengambilan data yang didapatkan dari pengukuran yang akurat dan sistematis. Metode Optimisasi Algoritma ECPO digunakan untuk mendapatkan nilai PI, yang kemudian digunakan untuk menganalisis pengontrol PI dengan Algoritma ECPO.

Rancangan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa tahapan, diantaranya adalah melakukan sebuah kajian studi literatur dari beberapa penelitian yang sudah dilakukan, perumusan masalah dari kajian studi literatur yang sudah dibaca, perancangan model *converter* dengan sistem optimasi PI dengan algoritma ECPO, pengumpulan data secara relevan yang berfungsi untuk analisis data yang dihasilkan dari percobaan yang sudah dilakukan serta pembuatan laporan akhir.



Gambar 5. Flowchart rancangan penelitian

Lingkungan dan Spesifikasi Parameter Simulasi

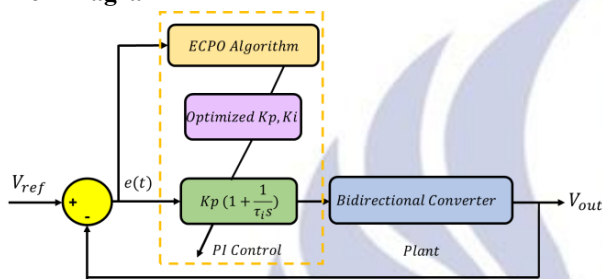
Sistem kendali yang diujikan menggunakan platform MATLAB 20217b / Simulink dengan memanfaatkan pustaka elektronika daya khusus (*Simscape Electrical*). Spesifikasi konfigurasi *solver* numerik serta kondisi batas awal (*initial conditions*) sistem ditentukan sebagai berikut :

- **Waktu Pengambilan Sampel (*Sampling Time, T_s*)** sebesar 1×10^{-6} s ($1 \mu s$) dipilih secara rigid untuk mengomodasi resolusi penyakelaran frekuensi tinggi

PWM sebesar 10 kHz.

- **Durasi Total Simulasi** diatur 10.0 sekon.
- Kondisi Awal Sistem (*Initial Conditions*) yaitu Tegangan *Bus DC* nominal disetel pada 48 V. Dengan menggunakan Baterai dengan kapasitas nominal awal 50 Ah dengan tegangan operasional dasar 24 V, serta kondisi kapasitas awal (*State of Charge, SOC*) ditetapkan pada nilai tengahan 50%. Dan skenario gangguan berupa sinyal undak (*step input change*) senilai +10 V diinjeksikan pada $t = 3.5$ s, dan gangguan penurunan nominal -10 V diinjeksikan pada durasi transien $t = 6.0$ s.

Blok Diagram



Gambar 6. Block diagram sistem

Gambar 6. menunjukkan diagram blok sistem yang menjelaskan alur kerja sistem pengendali tegangan berbasis *PI controller* yang dioptimasi menggunakan algoritma ECPO. Diagram blok sistem ini dimulai dari *set point*, yaitu nilai tegangan yang diinginkan sebagai output dari *bidirectional converter*. Selanjutnya, algoritma ECPO dijalankan dalam rangkaian *bidirectional converter* yang akan menghasilkan nilai *error* parameter K_p dan K_i . Kemudian, nilai parameter K_p dan K_i yang terbaik, akan dijadikan sebagai parameter *PI controller* yang dijalankan kedalam sistem *bidirectional converter* untuk menghasilkan tegangan keluaran. Tegangan yang dikeluarkan dari sistem *bidirectional converter* baik dari mode *charge* maupun *discharge* disebut sebagai V_{out} .

Parameter Komponen

Tabel 2. Komponen Bidirectional Converter

NO	Komponen Konverter	Nilai
1.	Baterai	24 V, 50 Ah
2.	DC Source Voltage	48 V
3.	Induktor (L)	0,000576 H
4.	Kapasitor (C)	0,001083 F
5.	Switching Frekuensi (f)	10kHz
6.	Duty cycle	50%
7.	Ripple tegangan	2%

Tabel 2 merupakan tabel parameter komponen perancangan *bidirectional converter*. Dari table diatas menunjukkan nilai induktor sebesar 0,000576 H dan

nilai kapasitor sebesar 0,001083 F dengan *switching* frekuensi sebesar 10kHz yang berfungsi sebagai pengatur *bidirectional converter* dengan tegangan masukan 48 V dan baterai 24V.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Input berubah

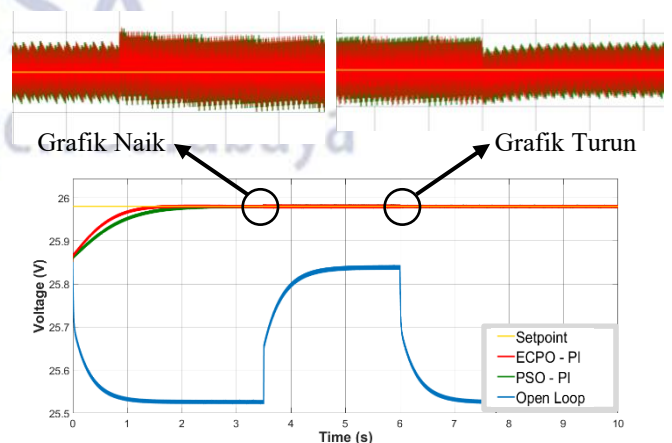
Pada Tabel 3 adalah hasil optimasi nilai best cost yang dihasilkan dari ITAE, K_p , dan K_i . Dapat dilihat nilai best cost ITAE ECPO sebesar 0.0159454 dari kesalahan sistem terhadap referensi. ECPO juga menghasilkan nilai K_p sebesar 27.52876 dan nilai K_i sebesar 213.1319.

Tabel 3. Hasil ITAE, K_p , dan K_i ECPO

Best ITAE	K_p	K_i
0.0159454	27.52876	213.1319

Gambar 7. menunjukan perbandingan mode *input* berubah *bidirectional converter* dalam tiga kondisi yang berbeda, yaitu tanpa pengendali, menggunakan pengendali PI yang dioptimalkan dengan algoritma PSO (PSO - PI), dan menggunakan pengendali PI yang dioptimalkan dengan algoritma ECPO (ECPO - PI). Dapat dilihat ketiga kondisi tersebut menunjukan perbedaan yang signifikan dalam hal kecepatan respons serta kemampuan mencapai tegangan referensi.

Gambar 7. menunjukan perbandingan mode *input* berubah *bidirectional converter* dalam tiga kondisi yang berbeda, yaitu tanpa pengendali, menggunakan pengendali PI yang dioptimalkan dengan algoritma PSO (PSO - PI), dan menggunakan pengendali PI yang dioptimalkan dengan algoritma ECPO (ECPO - PI). Dapat dilihat ketiga kondisi tersebut menunjukan perbedaan yang signifikan dalam hal kecepatan respons serta kemampuan mencapai tegangan referensi.



Gambar 7. Perbandingan mode *input* berubah tanpa pengontrol, ECPO - PI, PSO - PI

Gambar 7. menunjukan perbandingan mode *input* berubah *bidirectional converter* dalam tiga kondisi yang

berbeda, yaitu tanpa pengendali, menggunakan pengendali PI yang dioptimalkan dengan algoritma PSO (PSO - PI), dan menggunakan pengendali PI yang dioptimalkan dengan algoritma ECPO (ECPO - PI). Dapat dilihat ketiga kondisi tersebut menunjukkan perbedaan yang signifikan dalam hal kecepatan respons serta kemampuan mencapai tegangan referensi.

Tabel 4. Perbandingan performa bidirectional converter mode *input* berubah

Parameters		Values		
		ECPO PI	PSO PI	Open Loop
10 V input changed	Settling Time (s)	3.5075	3.5125	5.985
	Steady State Error	0	0	0.14
-10 V input changed	Settling Time (s)	6.0025	6.0075	8.5
	Steady State Error	0	0	0.455

Berdasarkan Gambar 7. grafik naik dan Tabel 4. pada kondisi gangguan +10V, sistem dengan pengendali ECPO - PI menunjukkan *settling time* sebesar 3,5075 *second*, yang lebih singkat dibandingkan pengendali PSO - PI dengan *settling time* 3,5125 *second*. Hal ini mengindikasikan bahwa parameter pengendali hasil optimasi ECPO mampu mempercepat proses pemulihan sistem menuju kondisi tunak setelah terjadinya gangguan. Sebaliknya, sistem *open-loop* memerlukan waktu yang jauh lebih lama untuk kembali mendekati kondisi tunak, dengan *settling time* mencapai 5,985 *second*, yang mencerminkan keterbatasan sistem tanpa umpan balik dalam meredam pengaruh gangguan.

Ditinjau dari parameter *steady state error* pada gangguan +10 V, baik pengendali PI berbasis ECPO - PI maupun pengendali PSO - PI menghasilkan nilai *steady state error* sebesar 0 *volt*, yang menunjukkan bahwa kedua sistem mampu mengembalikan tegangan keluaran secara tepat ke nilai setpoint setelah gangguan terjadi. Kondisi ini menegaskan efektivitas aksi integral pada pengendali PI dalam menghilangkan kesalahan keadaan tunak. Sebaliknya, sistem *open-loop* menunjukkan *steady state error* sebesar 0,14 *volt*, yang menandakan adanya selisih permanen antara tegangan keluaran dan nilai referensi akibat tidak adanya mekanisme koreksi umpan balik.

Pada kondisi gangguan -10 V dalam Gambar 7. grafik naik dan Tabel 4., kecenderungan yang serupa juga dapat diamati. Pengendali ECPO - PI memiliki *settling time* sebesar 6,0025 *second*, sedikit lebih cepat dibandingkan pengendali PSO - PI dengan *settling time* 6,0075 *second*. Sementara itu, sistem *open-loop* kembali

menunjukkan performa terburuk dengan *settling time* mencapai 8,5 *second*, yang menegaskan rendahnya kemampuan sistem tanpa pengendali dalam mengatasi gangguan negatif. Dari sisi *steady state error*, baik pengendali ECPO - PI maupun PSO - PI tetap menghasilkan nilai 0 *volt*, sedangkan sistem *open-loop* menunjukkan *steady state error* yang lebih besar yaitu 0,455 *volt*, akibat ketidakmampuan sistem dalam mengoreksi deviasi keluaran secara berkelanjutan.

PENUTUP

- Kontribusi Penelitian (Conclusions & Contributions)

Pada kondisi gangguan -10 V dalam Gambar 7. grafik naik dan Tabel 3., kecenderungan yang serupa juga dapat diamati. Pengendali ECPO - PI memiliki *settling time* sebesar 6,0025 *second*, sedikit lebih cepat dibandingkan pengendali PSO - PI dengan *settling time* 6,0075 *second*. Sementara itu, sistem *open-loop* kembali menunjukkan performa terburuk dengan *settling time* mencapai 8,5 *second*, yang menegaskan rendahnya kemampuan sistem tanpa pengendali dalam mengatasi gangguan negatif. Dari sisi *steady state error*, baik pengendali ECPO - PI maupun PSO - PI tetap menghasilkan nilai 0 *volt*, sedangkan sistem *open-loop* menunjukkan *steady state error* yang lebih besar yaitu 0,455 *volt*, akibat ketidakmampuan sistem dalam mengoreksi deviasi keluaran secara berkelanjutan.

- Keterbatasan Penelitian (Research Limitations)

Meskipun menunjukkan performansi transien yang superior pada lingkungan simulasi Simulink, penelitian ini masih terbatas pada pengujian model matematika linier konverter secara ideal tanpa memperhitungkan elemen parasitis komponen non-linier seperti hambatan dalam sakelar (*RDS-on*) dan hambatan seri esensial (*Equivalent Series Resistance* / ESR) pada induktor dan kapasitor. Selain itu, validasi pengujian sejauh ini masih terbatas pada domain simulasi numerik komputasional komputer tunggal, belum dievaluasi pada tahap implementasi purwarupa fisik real-time ataupun pengujian *Hardware-in-the-Loop* (HIL).

- Potensi Pengembangan Masa Depan (Future Recommendations)

Menanggapi keterbatasan riset di atas, agenda pengembangan riset selanjutnya direkomendasikan untuk mengimplementasikan algoritma optimasi ECPO ini secara aktual ke dalam arsitektur mikrokontroler berbasis prosesor digital (seperti DSP atau tipe mikrokontroler berkecepatan tinggi) untuk mengonfirmasi ketahanan kendali fisik. Eksplorasi performansi konverter juga dapat ditingkatkan melalui

integrasi topologi pengontrol hibrida cerdas lanjutan, seperti penggabungan metode *Fractional-Order* PID (FOPID) atau sistem inferensi kontrol adaptif *Fuzzy-PI* berbasis komparasi performa kecerdasan buatan, guna mengejar efisiensi konversi daya konverter yang jauh lebih optimal pada aplikasi kendaraan listrik.

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*. <https://doi.org/10.1109/ISTEMS60181.2024.10560127>
- Alanezi, M. A., Boucekara, H. R. E. H., Shahriar, M. S., Sha'aban, Y. A., Javaid, M. S., & Khodja, M. (2021). Motion-encoded electric charged particles optimization for moving target search using unmanned aerial vehicles. *Sensors*, *21*(19). <https://doi.org/10.3390/s21196568>
- Al-Dabbagh, Z. A., Shneen, S. W., & Hanfesh, A. O. (2024). Fuzzy Logic-based PI Controller with PWM for Buck-Boost Converter. *Journal of Fuzzy Systems and Control*, *2*(3), 147–159. <https://doi.org/10.59247/jfsc.v2i3.239>
- Al-Obaidi, N. A., Abbas, R. A., & Khazaaal, H. F. (2022). A Review of Non-Isolated Bidirectional DC-DC Converters for Hybrid Energy Storage System. *IICETA 2022 - 5th International Conference on Engineering Technology and Its Applications*, 248–253. <https://doi.org/10.1109/IICETA54559.2022.9888704>
- Bakria, D., Gozim, D., & Korich, B. (2023). Chaos Elimination for a Buck Converter Using the Multi-Objective Grey Wolf Optimiser. *Power Electronics and Drives*, *8*(1), 165–173. <https://doi.org/10.2478/pead-2023-0012>
- Büchi, R. (2023). *PID parameter tables after ITAE to control overshooting systems found with AI algorithm*.
- Cabrane, Z., Kim, J., Yoo, K., & Ouassaid, M. (2021). HESS-based photovoltaic/batteries/supercapacitors: Energy management strategy and DC bus voltage stabilization. *Solar Energy*, *216*, 551–563. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.048>
- Çelik, E. (2021). Design of new fractional order PI–fractional order PD cascade controller through dragonfly search algorithm for advanced load frequency control of power systems. *Soft Computing*, *25*(2), 1193–1217. <https://doi.org/10.1007/s00500-020-05215-w>
- Chatterjee, A., Patra, S., Samal, P., Jyoti, D., & Utsav, K. A. (2024). Investigation Analysis of a Bi-directional DC-DC Converter for EV Charging. *2024 IEEE 1st International Conference on Advances in Signal Processing, Power, Communication, and Computing, ASPCC 2024*, 118–123. <https://doi.org/10.1109/ASPCC62191.2024.10881172>
- Chincholkar, S., Tariq, M., Poshtan, M., & Sharaf, M. (2024). Normalized Error-Based PI Controller and Its Application to the DC–DC Buck Converter. *Mathematics*, *12*(2). <https://doi.org/10.3390/math12020240>
- Daraz, A., Basit, A., & Zhang, G. (2023). Performance analysis of PID controller and fuzzy logic controller for DC-DC boostconverter. *PLoS ONE*, *18*(10) (October). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281122>
- Demirtas, M., & Ahmad, F. (2023). Fractional fuzzy PI controller using particle swarm optimization to improve power factor by boost converter. *International Journal of Optimization and Control: Theories and Applications*, *13*(2), 205–213. <https://doi.org/10.11121/ijocta.2023.1260>
- Doğan, K., & Dağ, B. (2024). Design and Optimization of Voltage Mode PWM Control of DC-DC Buck Converter with a PI-Lead Compensator Using the Simulated Annealing Algorithm. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, *7*(1), 72–88. <https://doi.org/10.34248/bsengineering.1382392>
- Firmansyah, R., Saputra, P. P. S., & Althobiti, A. (2024). DC Motor Speed Control using Particle Swarm Optimization based on Labview. *JEEE-U (Journal of Electrical and Electronic Engineering-UMSIDA)*, *8*(2), 111–121. <https://doi.org/10.21070/jeeeu.v8i2.1701>
- Golhani, T., & Mohaney, S. (2024). Control and Designing of Bidirectional DC-DC Converter. In *International Journal of Research Publication and Reviews* (Vol. 5, Number 1). www.ijrpr.com
- Haque, M. R., & Razzak, M. A. (2021, April 21). A buck converter-based battery charging controller for electric vehicles using modified PI control system. *2021 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference, IEMTRONICS 2021 - Proceedings*.

- <https://doi.org/10.1109/IEMTRONICS52119.2021.9422646>
- Hidayat, T., Ramli, M. A. M., & Alqahtani, M. M. (2024). Optimization of Non-Uniform Onshore Wind Farm Layout Using Modified Electric Charged Particles Optimization Algorithm Considering Different Terrain Characteristics. *Sustainability (Switzerland)*, 16(7). <https://doi.org/10.3390/su16072611>
- Huba, M., Chamraz, S., Bistak, P., & Vrancic, D. (2021). Making the pi and pid controller tuning inspired by ziegler and nichols precise and reliable. *Sensors*, 21(18). <https://doi.org/10.3390/s21186157>
- Ihsan Al-Fikri. (2022). *Fuzzy-PI Control for Buck Converter Output Voltage Stabilizer* (Vol. 14, Number 1).
- Inomoto, R. S., Monteiro, J. R. B. D. A., & Filho, A. J. S. (2022). Boost Converter Control of PV System Using Sliding Mode Control With Integrative Sliding Surface. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 10(5), 5522–5530. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2022.3158247>
- Joseph, S. B., Dada, E. G., Abidemi, A., Oyewola, D. O., & Khammas, B. M. (2022). Metaheuristic algorithms for PID controller parameters tuning: review, approaches and open problems. In *Heliyon* (Vol. 8, Number 5). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09399>
- Kamel, S., Houssein, E. H., Hassan, M. H., Shouran, M., & Hashim, F. A. (2022). An Efficient Electric Charged Particles Optimization Algorithm for Numerical Optimization and Optimal Estimation of Photovoltaic Models. *Mathematics*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/math10060913>
- Kechida, A., Gozim, D., Toual, B., & Derradji, B. (2025). Optimal Control of Bi-directional Converter to Enhance the Performance of an off-Grid Hybrid System. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 15(3), 23988–23994. <https://doi.org/10.48084/etasr.10787>
- Khan Baloch Assistant Professor, S., Waqar, M., Abdullah Bin Arif, M., & Aqeel Anwar, M. (2025). Modeling and Control of Bidirectional DC-DC Converters for Electric Vehicle Battery Management and Energy Recovery Systems. *Global Research Journal of Natural Science and Technology (Grjnst)*, 3–5. www.grjnst.com
- Khan, M. J., Akhtar, M. N., & Afthanorhan, A. (2025). An innovative control of the charging and discharging for the battery management operation using a bidirectional converter. *Future Technology*, 4(1), 23–28. <https://doi.org/10.55670/fpll.futech.4.1.3>
- Kulikov, V. V., Kutsyi, A. P., & Kutsyi, N. N. (2021). Formation of algorithm of automatic parametric optimization of PI controller with variable parameters while using Internal Model Control. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1151(1), 012031. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1151/1/012031>
- Liu, H., Cui, S., Zhang, H., Hu, Y., Xue, Y., & Liu, C. (2023). The Hybrid Bidirectional DC/DC Converter: Mutual Control and Stability Analysis. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 9(2), 769–778. <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2021.00260>
- Muktiadji, R. F., Ramli, M. A. M., & Milyani, A. H. (2024). Twin-Delayed Deep Deterministic Policy Gradient Algorithm to Control a Boost Converter in a DC Microgrid. *Electronics (Switzerland)*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/electronics13020433>
- Muktiadji, R. F., & Rushdi, A. M. (2021). Reliability Analysis of Boost Converters Connected to a Solar Panel Using a Markov Approach. *Journal of Energy Research and Reviews*, 29–42. <https://doi.org/10.9734/jenrr/2021/v7i130182>
- Ramli, M. A. M., Boucekara, H. R. E. H., & Milyani, A. H. (2023). Wind farm layout optimization using a multi-objective electric charged particles optimization and a variable reduction approach. *Energy Strategy Reviews*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.101016>
- Samosir, A. S., Sutikno, T., & Mardiyah, L. (2023). Simple formula for designing the PID controller of a DC-DC buck converter. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 14(1), 327–336. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v14.i1.pp327-336>
- SUCU, H., GÖKTAŞ, T., & ARKAN, M. (2021). Design, Simulation and Application of Buck Converter with Digital PI Controller. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 9(2), 106–113. <https://doi.org/10.17694/bajece.884290>
- Sutikno, T., Aprilianto, R. A., & Purnama, H. S. (2023). Application of non-isolated bidirectional DC-DC converters for renewable and sustainable energy systems: A review. In *Clean Energy* (Vol. 7, Number 2, pp. 293–311). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/ce/zkac070>

Tong, Y., Salhi, I., Wang, Q., Lu, G., & Wu, S. (2025). Bidirectional DC-DC Converter Topologies for Hybrid Energy Storage Systems in Electric Vehicles: A Comprehensive Review. In *Energies* (Vol. 18, Number 9). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/en18092312>

Trisna Nugraha, A., Asri, P., Sunarno, E., & Prilian Eviningsih, R. (2024). Design Build an Off Grid Based Solar Power Plant System Using The Bidirectional Buck And Boost Topology In The Conservation Of Sea Pearl Turtles. *E3S Web of Conferences*, 473. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447301006>

Tuluhong, A., Xu, Z., Chang, Q., & Song, T. (2025). Recent Developments in Bidirectional DC-DC Converter Topologies, Control Strategies, and Applications in Photovoltaic Power Generation Systems: A Comparative Review and Analysis. In *Electronics (Switzerland)* (Vol. 14, Number 2). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/electronics14020389>

Yanarates, C., & Zhou, Z. (2022). Design and Cascade PI Controller-Based Robust Model Reference Adaptive Control of DC-DC Boost Converter. *IEEE Access*, 10, 44909–44922. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3169591>

