

Analisis Performa pada *Buck Converter* dengan Optimasi APO-PI

Kukuh Dermawan

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

e-mail: kukuh.22086@mhs.unesa.ac.id

Rifqi Firmansyah

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

e-mail: rifqifirmansyah@unesa.ac.id

Abstrak

Perkembangan teknologi elektronika daya menuntut sistem pengaturan tegangan yang memiliki performa tinggi dan stabilitas yang baik. Salah satu perangkat yang banyak digunakan dalam pengaturan tegangan adalah buck converter, yang berfungsi untuk menurunkan tegangan dari level yang lebih tinggi ke level yang lebih rendah secara efisien. Namun, karakteristik dinamis buck converter yang bersifat nonlinier dapat menyebabkan respon sistem yang kurang optimal apabila metode pengendalian yang digunakan tidak tepat, meskipun sistem beroperasi pada kondisi nominal. Penelitian ini mengusulkan penerapan metode Arctic Puffin Optimization–Proportional Integral (APO-PI) untuk meningkatkan performa pengaturan tegangan pada buck converter. Algoritma APO digunakan untuk mengoptimalkan parameter pengendali PI sehingga diperoleh respon tegangan yang lebih cepat, stabil, dan akurat. Hasil penerapan metode APO-PI menunjukkan peningkatan performa sistem dalam hal respon transien dan kestabilan tegangan, ditandai dengan berkurangnya overshoot serta waktu penetapan yang lebih singkat. Dengan demikian, metode APO-PI efektif digunakan untuk meningkatkan kinerja buck converter tanpa memerlukan perubahan kondisi operasi sistem.

Kata Kunci: APO-PI, *buck converter*, pengaturan tegangan.

Abstract

The development of power electronics technology demands a voltage regulation system that has high performance and good stability. One device that is widely used in voltage regulation is the buck converter, which functions to reduce the voltage from a higher level to a lower level efficiently. However, the nonlinear dynamic characteristics of the buck converter can cause a less than optimal system response if the control method used is not appropriate, even though the system is operating under nominal conditions. This study proposes the application of the Arctic Puffin Optimization–Proportional Integral (APO-PI) method to improve the performance of the voltage regulation in the buck converter. The APO algorithm is used to optimize the parameters of the PI controller to obtain a faster, more stable, and more accurate voltage response. The results of the application of the APO-PI method show an increase in system performance in terms of transient response and voltage stability, characterized by reduced overshoot and shorter settling time. Thus, the APO-PI method is effectively used to improve the performance of the buck converter without requiring changes in system operating conditions.

Keywords: APO-PI, *buck converter*, voltage regulation.

solusi yang kurang optimal.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi pada aplikasi seperti kendaraan listrik dan sistem tenaga surya menuntut sistem pengaturan tegangan yang stabil dan berperforma tinggi. Buck converter banyak digunakan sebagai penurun tegangan DC karena efisiensi dan kemampuannya menjaga suplai daya ke beban (DOĞAN & DAĞ, 2024). Namun, perubahan kondisi operasi dapat menyebabkan ketidakstabilan tegangan dan penurunan performa sistem. Kontrol konvensional berbasis Proportional–Integral (PI) telah terbukti mampu mengurangi error dan menjaga kestabilan tegangan output (Rajamallaiiah et al., 2024; Sucu et al., 2021). Penelitian sebelumnya dari (Alaoui et al., 2018) mengusulkan adaptive PI controller pada interleaved buck converter untuk emulator PV. Meskipun mampu mempertahankan performa sistem terhadap variasi beban, metode tersebut tidak menggunakan optimasi global dalam penentuan parameter PI sehingga berpotensi menghasilkan

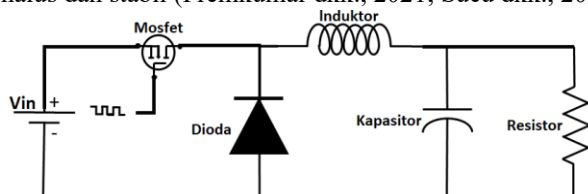
Sebaliknya, Arctic Puffin Optimization (APO) melakukan pencarian global berbasis populasi sehingga mampu memperoleh parameter PI yang lebih optimal berdasarkan fungsi objektif tertentu seperti ITAE. Penelitian lain dari (Das et al., 2017) menerapkan PI controller pada buck converter untuk emulator PEM fuel cell. Namun, parameter PI yang digunakan bersifat tetap dan tidak diperoleh melalui proses optimasi sehingga masih menghasilkan overshoot dan undershoot saat terjadi perubahan beban. Dibandingkan metode tersebut, Arctic Puffin Optimization (APO) mampu menentukan parameter PI secara optimal melalui mekanisme pencarian global sehingga berpotensi meningkatkan kualitas respon transien dan akurasi sistem. Sehingga meskipun kinerja kontrol PI sangat bergantung pada penentuan parameter yang tepat. Pengaturan PI yang

kurang optimal dapat menyebabkan respon lambat, overshoot tinggi, dan waktu pemulihan yang lebih lama. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penelitian ini mengusulkan penggunaan metode Arctic Puffin Optimization (APO) untuk mengoptimasi parameter kontrol PI pada buck converter. APO merupakan algoritma optimasi metaheuristik yang mampu mencari solusi optimal secara global dengan akurasi tinggi (Abaza et al., 2025; Wang et al., 2024). Integrasi APO dengan kontrol PI menghasilkan sistem APO-PI yang mampu meningkatkan kecepatan respon dan kestabilan tegangan output. Metode ini bekerja dengan mengoptimasi parameter PI agar error sistem dapat diminimalkan secara efektif (AboRas et al., 2025; Khan et al., 2025). Dengan APO-PI, buck converter diharapkan mampu mempertahankan tegangan output sesuai nilai referensi dalam berbagai kondisi operasi. Penerapan metode ini berpotensi meningkatkan performa sistem pengaturan tegangan pada aplikasi energi terbarukan seperti panel surya dan kendaraan listrik.

TINJAUAN PUSTAKA

Buck converter

Buck converter merupakan DC-DC converter yang berfungsi menurunkan tegangan input arus searah menjadi tegangan output yang lebih rendah dan stabil, sehingga banyak digunakan pada sistem catu daya dan pengisian baterai (Chincholkar et al., 2024). Rangkaian buck converter terdiri dari komponen utama seperti PWM, MOSFET, dioda freewheeling, induktor, kapasitor, serta beban. PWM umumnya dikombinasikan dengan pengontrol PI untuk menjaga kestabilan tegangan keluaran (Andriyanov, 2022). MOSFET berfungsi sebagai saklar utama yang mengatur aliran arus dari sumber menuju induktor. Saat MOSFET dalam kondisi aktif (on), arus mengalir ke induktor dan sebagian ke beban, sementara induktor menyimpan energi dalam bentuk medan magnet. Lama kondisi on ditentukan oleh duty cycle PWM yang sangat memengaruhi besar tegangan keluaran. Ketika MOSFET berada pada kondisi off, aliran arus dari sumber terputus namun arus tetap mengalir karena induktor melepaskan energi yang tersimpan. Energi tersebut disalurkan ke beban melalui dioda freewheeling sehingga suplai tegangan tetap terjaga. Proses penyimpanan dan pelepasan energi ini berlangsung berulang dengan frekuensi pensaklaran tinggi dan disaring oleh induktor serta kapasitor untuk menghasilkan tegangan yang lebih halus dan stabil (Premkumar dkk., 2021; Sucu dkk., 2021)



Gambar 1. Rangkaian DC-DC *boost converter*

Arctic Puffin Optimization (APO)

Arctic Puffin Optimization (APO) merupakan algoritma optimasi metaheuristik yang terinspirasi dari perilaku berburu burung puffin Arktik dalam kondisi lingkungan yang ekstrem (Abaza et al., 2025). Algoritma ini bekerja melalui tiga fase utama, yaitu eksplorasi, eksploitasi, dan reorientasi, yang masing-masing merepresentasikan fase terbang, menyelam, dan peralihan. Fase eksplorasi digunakan untuk melakukan pencarian global secara acak dan luas guna menemukan wilayah solusi dengan potensi terbaik. Setelah wilayah tersebut ditemukan, fase eksploitasi berfokus pada penyempurnaan solusi dengan melakukan penyesuaian kecil pada parameter agar mendekati nilai optimal. Fase reorientasi berperan untuk mencegah stagnasi dengan mengubah arah pencarian apabila solusi tidak menunjukkan peningkatan yang signifikan (Wang et al., 2024). Dalam penelitian ini, penentuan kualitas solusi didasarkan pada indeks kinerja Integral Time Absolute Error (ITAE). Nilai ITAE dihitung dari selisih antara tegangan referensi dan tegangan keluaran secara real-time dalam simulasi dan digunakan sebagai fungsi objektif. Solusi dengan nilai ITAE terkecil ditetapkan sebagai solusi terbaik dan digunakan untuk menentukan parameter optimal kontrol PI pada buck converter.

PI Controller

Sistem kontrol PI bertujuan untuk mengatur variabel proses agar mencapai nilai yang diinginkan dengan memperhatikan selisih antara set point dan nilai aktual. Kontrol P merespons perubahan dengan cepat untuk mengurangi kesalahan, sedangkan kontrol I mengintegrasikan kesalahan seiring waktu untuk menghilangkannya pada kondisi stabil (Sucu et al., 2021). Kombinasi keduanya memungkinkan sistem mencapai kinerja optimal dengan respons cepat dan akurasi tinggi, meskipun ada gangguan atau variasi parameter sistem. (Laoprom & Tunyasrirut, 2020) Sistem kontrol PI dapat ditunjukkan melalui bentuk matematika di bawah

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

Dimana $u(t)$ merupakan nilai *output* dari sistem kontrol, K_p merupakan Konstanta pengontrol P, $e(t)$ adalah nilai *error*, dan K_I merupakan konstanta pengontrol I.

METODE PENELITIAN

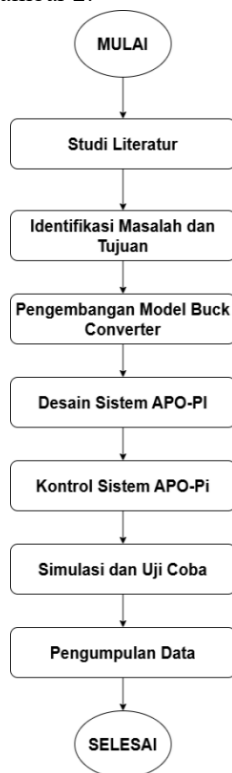
Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif untuk meningkatkan performa pengaturan

tegangan buck converter menggunakan kontrol APO-PI. Evaluasi dilakukan melalui simulasi dengan membandingkan parameter performa sistem, seperti error dan respon transien, sebelum dan sesudah optimasi. Algoritma Arctic Puffin Optimization (APO) digunakan untuk mengoptimalkan parameter PI sehingga diperoleh respon tegangan yang lebih stabil, cepat, dan akurat.

Perubahan

Penelitian ini melibatkan beberapa tahapan yang terdapat pada gambar 2:



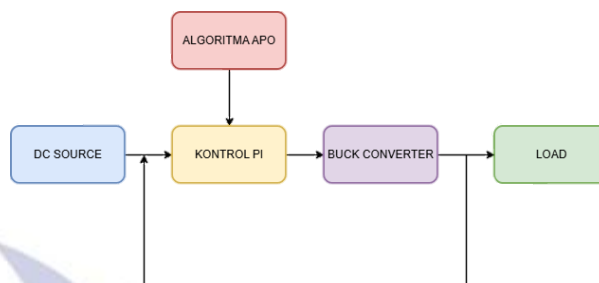
Gambar 2. *Flowchart* rancangan penelitian penelitian

Penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk memahami karakteristik buck converter, kontrol PI, serta metode optimasi yang relevan sebagai dasar teoritis. Berdasarkan kajian tersebut, dilakukan identifikasi masalah dan penetapan tujuan penelitian, yaitu meningkatkan performa pengaturan tegangan buck converter menggunakan kontrol APO-PI. Selanjutnya, dikembangkan model buck converter dalam bentuk simulasi untuk merepresentasikan perilaku sistem. Sistem kontrol APO-PI kemudian dirancang dengan mengintegrasikan algoritma Arctic Puffin Optimization (APO) dalam proses optimasi parameter PI. Parameter hasil optimasi diterapkan pada sistem kontrol untuk mengatur tegangan keluaran buck converter. Pengujian dilakukan melalui simulasi dan uji coba menggunakan perangkat lunak MATLAB, diikuti dengan pengumpulan dan analisis data respon tegangan serta parameter performa sistem guna

mengevaluasi peningkatan kinerja pengaturan tegangan yang dihasilkan.

Blok Diagram

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



Gambar 3. *Block diagram* sistem

Gambar 3 Diagram blok sistem menunjukkan alur kerja dan hubungan antar komponen utama dalam pengaturan tegangan buck converter berbasis kontrol APO-PI. Sistem diawali dari sumber tegangan DC yang menjadi masukan bagi buck converter. Tegangan keluaran buck converter dibandingkan dengan nilai referensi (set point) untuk menghasilkan sinyal error, yang selanjutnya diproses oleh kontrol PI. Parameter kontrol PI, yaitu K_p dan K_i dioptimalkan secara adaptif menggunakan algoritma Arctic Puffin Optimization (APO) guna meningkatkan performa pengaturan tegangan. Sinyal kendali yang dihasilkan oleh kontrol PI kemudian digunakan untuk mengatur proses switching pada buck converter sehingga diperoleh tegangan keluaran yang sesuai dengan nilai referensi. Tegangan keluaran ini disalurkan ke beban (load) dan sekaligus diumpanbalikkan ke sistem kontrol sebagai sinyal umpan balik, sehingga kestabilan dan akurasi pengaturan tegangan dapat terus dipertahankan.

Parameter Komponen

Parameter komponen *buck converter* yang digunakan pada penelitian ini terdapat pada tabel 1 sebagai berikut:

Tabel 1. Parameter komponen *buck converter*

No.	Parameter	Nilai
1.	Tegangan <i>Input</i> (V_{in})	12 Volt
2.	Tegangan <i>reference</i> (V_{ref})	5 Volt
3.	Frekuensi (f)	5 kHz

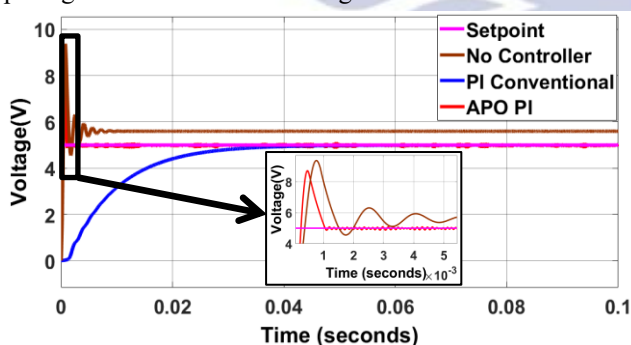
4.	Resistor (R)	100 Ω
5.	Induktor (L)	6 mH
6.	Kapasitor (C)	10 μ F

Sistem pengaturan tegangan pada *buck converter* ini menggunakan tegangan *input* 12 V dengan tegangan *reference* 5 V. Perhitungan Untuk frekuensi pensaklaran yang digunakan adalah 5 kHz karena komponen pensaklaran yang digunakan adalah MOSFET. Nilai resistor sebesar 100 Ω . Nilai Induktor yang digunakan adalah 6 mH. Sementara itu untuk kapasitor, didapatkan nilai 10 μ F. Nilai *duty cycle* yang digunakan sebesar 0.5.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian performa pada *Buck Converter*

Pengujian performa *Buck converter* dilakukan untuk mengevaluasi performa sistem dalam mempertahankan tegangan *output* sesuai dengan set point yang diinginkan. Dalam uji coba ini, tegangan *input* dan set point diberikan secara konstan. Beberapa parameter utama yang diuji meliputi *rise time* serta *maximum overshoot*. *Rise time* mengacu pada waktu yang diperlukan oleh tegangan *output* untuk mencapai nilai *set point* dari kondisi awalnya dan *maximum overshoot* menunjukkan sejauh mana sistem menyimpang dari *set point*. *Maximum overshoot* menunjukkan lonjakan tertinggi yang terjadi sebelum sistem kembali ke keadaan stabil. Hasil dari pengujian *buck converter* dalam kondisi *set point* tetap dapat dilihat pada gambar 4 dan tabel 2 sebagai berikut:



Gambar 4. Grafik pengujian performa sistem

pada gambar 4 terlihat bahwa tanpa pengontrol memiliki overshoot yang tinggi melebihi APO, sedangkan PI konvensional walaupun tidak memiliki overshoot namun untuk mencapai setpoint memerlukan waktu yang lama. APO memiliki overshoot yang tidak tinggi dan cepat mencapai setpoint sehingga memiliki keunggulan dibandingkan PI konvensional dan tanpa pengontrol. Untuk melihat lebih jelas lihat tabel dibawah ini.

Tabel 2. Hasil pengujian pada kondisi set point tetap

Parameter	Setting time(s)	Rise time(s)	Overshoot (%)	Error steady state
No controller	0.01	0,0002	0,9	4,373
PI Conventional	0,07	0,07	0	0
APO PI	0,05	0,00109	0,74	0,00006

Berdasarkan hasil perbandingan performa pada tabel 2, sistem tanpa pengontrol menunjukkan kinerja terburuk dengan overshoot sebesar 0,9% dan kesalahan keadaan tunak yang tinggi sebesar 4,373 meskipun memiliki waktu naik 0,0002 s dan waktu penyelesaian 0,01 s. Penggunaan pengontrol PI konvensional meningkatkan kestabilan sistem dengan waktu naik dan waktu penyelesaian masing-masing sebesar 0,07 s, namun respons transien menjadi lebih lambat. Penerapan pengontrol ABC-PI menghasilkan perbaikan performa yang lebih signifikan dengan waktu penyelesaian 0,00108 s, waktu naik 0,072 s, overshoot 0,75%, serta kesalahan keadaan tunak yang sangat kecil sebesar 0,00036. Secara keseluruhan, pengontrol APO-PI menunjukkan performa terbaik dibandingkan metode lainnya dengan waktu naik tercepat sebesar 0,000109 s, waktu penyelesaian 0,05 s, overshoot rendah sebesar 0,74%, dan kesalahan keadaan tunak paling kecil yaitu 0,00006%, yang menandakan respons transien dan keadaan tunak yang paling optimal.

PENUTUP

Simpulan

Sistem kontrol APO-PI berhasil dirancang dengan menggabungkan optimasi APO dan kontrol PI konvensional. Implementasi sistem ini dalam simulasi menunjukkan bahwa desain dapat bekerja secara efektif untuk mengatur *duty cycle*. Analisis performa mengungkapkan bahwa sistem APO-PI memiliki kinerja terbaik dibandingkan dengan kontrol PI dan tanpa pengontrol, karena mampu mempercepat *rise time* serta meminimalkan *error steady state*. Hal ini membuktikan bahwa sistem kontrol APO-PI efektif dalam meningkatkan stabilitas dan keandalan *buck converter*.

Saran

Penelitian ini masih terbatas pada simulasi menggunakan MATLAB, sehingga disarankan untuk dikembangkan lebih lanjut dalam bentuk implementasi fisik menggunakan perangkat keras seperti mikrokontroler agar efektivitas sistem kontrol Fuzzy-PI dapat diuji secara langsung dalam

kondisi nyata. Selain itu, untuk meningkatkan performa sistem, metode optimasi seperti *Particle Swarm Optimization* (PSO) atau *Genetic Algorithm* (GA) dapat diterapkan guna menyempurnakan pemilihan parameter K_p dan K_i dalam rule base, sehingga respon sistem menjadi lebih presisi dan adaptif terhadap berbagai perubahan kondisi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya saya sampaikan kepada bapak Rifqi Firmansyah, S.T., M.T., Ph.D. selaku pembimbing saya, yang telah dengan sabar, cermat, dan tulus memberikan bimbingan, arahan, dan masukan yang berharga selama proses penelitian. Berkat dukungan beliau, saya dapat menyelesaikan penelitian ini dengan lebih terarah dan mendalam. Semangat, ilmu, dan pengalaman yang dibagikan beliau menjadi motivasi dan inspirasi yang sangat berarti bagi saya dalam menyelesaikan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abaza, A., El-Schiemy, R. A., Hamida, M. A., Chenouard, R., & Bayomyi, A. (2025). Optimal parameter extraction of equivalent circuits for single- and three-phase Power transformers based on arctic puffin algorithm accomplished with experimental verification. *Results in Engineering*, 26(February), 104888. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104888>
- AboRas, K. M., El-Banna, M. H., & Megahed, A. I. (2025). A unique novel-based FLC approach for enhancing MPPT operation of solar systems considering sudden/gradual variation in weather conditions. *Science Progress*, 108(1), 1–40. <https://doi.org/10.1177/00368504251323732>
- Alaoui, M., Maker, H., Mouhsen, A., Alaoui, M., Maker, H., Mouhsen, A., Emulator, P. V., & Buck, I. (2018). *PV Emulator based on Interleaved Buck Converter using Adaptive PI Controller To cite this version : HAL Id : hal-01936617*.
- Andriyanov, A. I. (2022). Investigating the dynamics of a buck converter with time-delay feedback control. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1227(1), 012011. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1227/1/012011>
- 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>
- Das, H. S., Tan, C. W., Yatim, A. H. M., & bin Muhamad, N. D. (2017). Proton exchange membrane fuel cell emulator using PI controlled buck converter. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 8(1), 462–469. <https://doi.org/10.11591/ijped.v8i1.pp462-469>
- 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>
- Khan, N. A., Altaf, S., Khan, N. A., & Ayaz, M. (2025). Haar wavelet Arctic Puffin optimization method (HWAPOM): Application to logistic models with fractal-fractional Caputo-Fabrizio operator. *Partial Differential Equations in Applied Mathematics*, 13(January), 101114. <https://doi.org/10.1016/j.padiff.2025.101114>
- 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>
- Rajamallaiyah, A., Karri, S. P. K., & Shankar, Y. R. (2024). Deep Reinforcement Learning Based Control Strategy for Voltage Regulation of DC-DC Buck Converter Feeding CPLs in DC Microgrid. *IEEE Access*, 12, 17419–17430. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3358412>
- Sucu, H., Goktas, T., & Arkan, M. (2021). *Design , Simulation and Application of Buck Converter with Digital PI Controller*. 9(2), 106–113. <https://doi.org/10.17694/bajece.884290>
- Wang, W. chuan, Tian, W. can, Xu, D. mei, & Zang, H. fei. (2024). Arctic puffin optimization: A bio-inspired metaheuristic algorithm for solving engineering design optimization. *Advances in Engineering Software*, 195(June), 103694. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2024.103694>