

Pengoptimalan Parameter Kontrol PI pada Buck Converter DC-DC Menggunakan Metode PSO

Miftakhul Hidayatullah As-Sidqi

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

e-mail : miftakhulhidayatullahassiddqi@gmail.com

Rifqi Firmansyah, Bambang Suprianto, Muhamad Syariffuddin Zuhrie

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

e-mail : rifqifirmansyah@unesa.ac.id, bambangsuprianto@unesa.ac.id, zuhrie@unesa.ac.id.

Abstrak

Teknologi terus berkembang dalam menciptakan peralatan listrik yang menunjang kebutuhan manusia seperti fotovoltaiik (PV) dan motor listrik DC namun peralatan tersebut membutuhkan pengaturan tegangan yang sesuai agar kualitas pada alat tersebut tetap optimal dan mencegah terjadinya kerusakan. *Buck converter* merupakan salah satu komponen penting dalam mengatur tegangan. *Buck converter* memiliki tantangan berupa tegangan yang berubah sehingga kontrol PI merupakan salah satu solusi dalam mencegah terjadinya perubahan tegangan. Parameter pada kontrol PI dioptimalkan menggunakan algoritme PSO yang terkenal dalam memperoleh solusi optimal dengan kecepatan terbilang singkat pada optimasi parameter. Simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink untuk mengevaluasi kinerja sistem sebelum dan setelah optimasi. Parameter kinerja diukur dalam membandingkan nilai overshoot dan settling time pada tuning Ziegler Nichols dengan kontrol PI-PSO. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penggunaan PSO berhasil meningkatkan kinerja kontrol PI dengan mempercepat settling time dari 6,3 ms menjadi 4,9 ms. Penelitian ini menunjukkan bahwa kontrol PI yang dioptimalkan dengan PSO memberikan performa kecepatan respon yang lebih unggul daripada tuning PI Ziegler Nichols serta memberikan performa yang stabil dan andal saat mengalami gangguan pada sistem.

Kata Kunci: Kontrol PI, *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Buck Converter*, Optimalisasi tuning, MATLAB/Simulink.

Abstract

Technology continues to evolve in creating electrical equipment that supports human needs, such as photovoltaics (PV) and DC electric motors. However, such equipment requires appropriate voltage regulation to maintain optimal quality and prevent damage. The buck converter is an important component in regulating voltage. The buck converter faces the challenge of fluctuating voltage, and PI control is one solution to prevent voltage changes. The parameters in PI control are optimized using the particle swarm optimization (PSO) algorithm, which is known for obtaining optimal solutions with relatively short optimization times. Simulations were conducted using MATLAB/Simulink software to evaluate system performance before and after optimization. Performance parameters were measured by comparing overshoot values and settling times between Ziegler-Nichols tuning and PI-PSO control. The simulation results show that the use of PSO successfully improves the performance of PI control by accelerating the settling time from 6.3 ms to 4.9 ms. This study demonstrates that PI control optimized with PSO provides superior response speed performance compared to Ziegler Nichols PI tuning and offers stable and reliable performance when the system experiences disturbances.

Keywords: PI Control, *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Buck Converter*, Optimization tuning, MATLAB/Simulink.

PENDAHULUAN

Teknologi pengaturan tegangan listrik terus berkembang untuk memenuhi kebutuhan performa pada sistem yang diaplikasikan dalam sumber energi terbarukan dan perangkat elektronik. Tanpa perangkat pengatur tegangan yang tepat, sistem tidak dapat berfungsi secara optimal terhadap perubahan beban yang bervariasi. Salah satu contohnya adalah perangkat *converter DC-DC*.

Converter DC-DC berfungsi mengubah tingkat tegangan output yang diinginkan dengan mengatur tegangan input. *Buck converter* merupakan salah satu jenis *converter DC-DC* yang digunakan untuk menurunkan

tegangan input. *Buck converter* tersusun dari beberapa perangkat semikonduktor dan elemen pasif. Perangkat semikonduktor dalam rangkaian *buck converter* berperan sebagai saklar, seperti transistor, serta berfungsi untuk mencegah arus balik (*reverse biased*), seperti dioda. Elemen pasif, yaitu induktor, kapasitor, dan resistor, merupakan komponen yang dapat menyebabkan perubahan tegangan pada beban. Hal ini menimbulkan masalah karena nilai tegangan output dapat mengalami fluktuasi sehingga menghasilkan tegangan yang tidak diinginkan.

Oleh karena itu, untuk mengoperasikan *buck converter* diperlukan suatu pengontrol yang memiliki

respon dinamis agar kestabilan tegangan pada *output* tetap terjaga, seperti metode kontrol PI (Livinti et al., 2024).

Metode kontrol proporsional-integral (PI) digunakan untuk memastikan stabilitas tegangan output. Metode kontrol ini memiliki beberapa kelebihan dan kekurangan. pengontrol PI dikenal karena respons sistemnya yang dinamis dan efektif serta lebih stabil, di sisi lain pengontrol PI mudah dirancang dan diimplementasikan dalam sistem fisik nyata (SUCU et al., 2021).

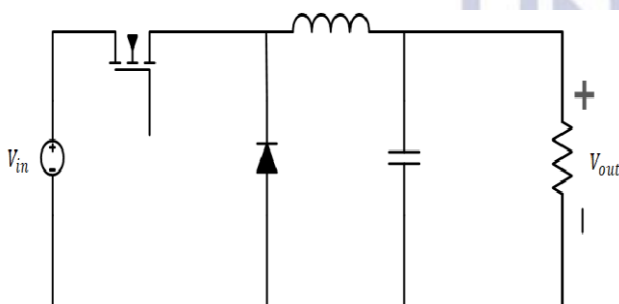
Penyetelan parameter terhadap kontrol PI dapat dilakukan dengan metode *Ziegler-Nichols*, yaitu metode konvensional untuk mendapatkan respon sistem secara transien pada buck converter. Tujuannya adalah untuk meminimalkan nilai *steady state error*, serta mempercepat waktu *rise time* dan *settling time* (Faradisa & Wanarti Rusimamto, 2020). Namun, metode *Ziegler-Nichols* memiliki kekurangan berupa akurasi yang rendah dan memerlukan waktu yang cukup lama dalam menentukan parameter kontrol PI (Hu, 2025).

Oleh karena itu, untuk mendapatkan parameter pengontrol yang optimal, pendekatan *particle swarm optimization* (PSO) digunakan untuk menangani model yang bersifat kompleks dan nonlinier, serta melengkapi kekurangan pada metode konvensional. PSO memiliki keunggulan, antara lain kinerja otomatis, kemampuan eksplorasi parameter yang baik, serta mudah untuk diimplementasikan (Premkumar et al., 2021).

TINJUAN PUSTAKA

Buck converter

Buck converter merupakan perangkat elektronik yang dapat mengubah tingkat tegangan tinggi menjadi rendah dan sering digunakan pada peralatan elektronik seperti *hand-phone*, televisi, dan lain sebagainya, rangkaian *buck converter* tersusun dari beberapa komponen aktif dan pasif.



Gambar 1. Buck Converter

Dalam Gambar 1, *buck converter* akan menghasilkan tegangan keluaran (V_{out}) yang besarnya berdasarkan dengan nilai tegangan input (V_{in}) dikali dengan *duty cycle* menghasilkan nilai tegangan *output* yang lebih rendah dari nilai tegangan *input* atau disebut dengan *stepdown* yang ditulus pada persamaan 1. (Sangeetha et al., 2023)

$$V_{out} = V_{in} \cdot D. \quad (1)$$

Buck converter dalam satu periode bekerja dua kondisi yaitu *switching on* dan *off* ketika saklar tertutup arus tegangan input akan mengalir pada induktor dan resistor, tetapi saat saklar terbuka polaritas pada tegangan induktor akan berubah sehingga induktor akan memberikan arus pada resistor (Rahman Ethan et al., 2022).

Proportional Integral (PI)

Kontrol PI merupakan salah satu jenis sistem kontrol yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri. Keunggulan utama dari kontrol PI terletak pada strukturnya yang lebih sederhana dibandingkan dengan kontrol PID, sehingga lebih mudah dalam hal implementasi dan tuning. kontrol PI membutuhkan biaya yang lebih terjangkau, menjadikannya pilihan yang efisien untuk sistem. Kontrol PI sering menjadi solusi praktis dalam pengendalian proses yang menuntut kestabilan dan keandalan dengan kompleksitas yang minimal. Kontrol PI merupakan salah jenis sistem kontrol dengan model fungsi transfer orde satu. Model matematika pada kontrol PI dapat dituliskan sebagai pada persamaan 2 (Yessef et al., 2024).

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int e(t) dt \right] \quad (2)$$

Sinyal $u(t)$ pada rumus di atas merepresentasikan keluaran sinyal dari kontroler sedangkan $e(t)$ merupakan sinyal error pada sebuah sistem. Pada kontroler ini *gain proportional* K_p merespon sinyal error. Sistem akan tidak stabil saat nilai sinyal error kecil dengan *gain proportional* yang besar sehingga terjadi *overshoot* saat sistem berjalan, sedangkan error pada kontrol integral menghilangkan sisa error pada kontrol proposional dengan menjumlahkan nilai error setiap satu periode lalu dikalikan dengan koefisien K_i (Ankur & Savani, 2014).

Optimalisasi Particle Swarm Optimization (PSO)

PSO merupakan metode yang terinspirasi dari perilaku sosial sekelompok ikan atau burung, Dr. Eberhart dan Dr. Kennedy mengembangkan teknik optimasi sarang burung (PSO) pada tahun 1995. *particle swarm optimization* menganggap kumpulan partikel memiliki ukuran tertentu dan setiap partikel memulai di lokasi acak dalam ruang multidimensi. Setiap partikel memiliki dua atribut utama: posisi dan kecepatan. Saat bergerak dalam ruang tertentu, partikel tersebut mengingat posisi terbaik yang ditemukan sesuai dengan nilai fungsi tujuan. Setiap partikel memberikan informasi tentang posisi terbaiknya kepada partikel lain dan mengubah posisi dan kecepatan mereka berdasarkan informasi tentang posisi terbaik (Freitas et al., 2020).

Dibandingkan dengan algoritme lain yang terinspirasi oleh alam, algoritme PSO membutuhkan lebih sedikit parameter. Algoritme ini menginisialisasi sekelompok partikel, atau burung buatan, dengan posisi (x) dan

kecepatan (v). Pada awal pencarian, setiap partikel dalam kumpulan (*swarm*) tersebar secara acak di seluruh ruang pencarian berdimensi- n . Pengalaman terbang masing-masing partikel dan fungsi tujuan memungkinkan setiap partikel dalam kumpulan secara dinamis menyesuaikan posisi dan kecepatan terbangnya. Selama proses pencarian optimasi, setiap partikel mengingat posisi terbaik yang pernah dicapainya disebut $pbest$ dan juga mendapatkan informasi tentang posisi terbaik secara global yang dicapai oleh partikel mana pun dalam populasi disebut $gbest$.

Pada iterasi ke- t , setiap partikel ke- i memiliki posisi yang didefinisikan sebagai $x_{i,t}$ dan kecepatan yang didefinisikan sebagai $v_{i,t}$ dalam ruang pencarian berdimensi- n . Kecepatan dan posisi setiap partikel pada iterasi berikutnya ($t+1$) dapat dihitung menggunakan rumus tertentu (Latha et al., 2013) yang ditunjukkan pada persamaan 3 dan 4.

$$V_{i,D}^{t+1} = W * V_{i,D}^t + C_1 * R_1 * (P_{i,D}^t - X_{i,D}^t) + C_2 * R_2 * (G_{i,D}^t - X_{i,D}^t) \quad (3)$$

$$X_{i,D}^{t+1} = X_{i,D}^t + V_{i,D}^t \quad (4)$$

Di mana $i = 1, 2, \dots, n$; dan konstanta percepatan c_1 yang disebut parameter kognitif menarik setiap partikel ke posisi terbaik lokalnya, dan konstanta c_2 yang disebut parameter sosial menarik partikel ke posisi terbaik global. R_1 dan R_2 dikenal sebagai angka acak dalam rentang 0 hingga 1.

METODE PENELITIAN

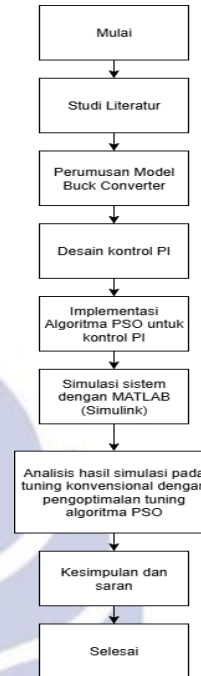
Pendekatan Penelitian

Metodologi pendekatan pada penelitian ini merupakan metode kuantitatif yaitu metode berfokus dalam pengumpulan dan analisis data numerik yang diukur secara objektif. Pendekatan kuantitatif menghasilkan pengukuran yang akurat dan sistematis dari hasil data yang diolah melalui simulasi. Metode optimalisasi PSO digunakan dalam mengoptimalkan respon sistem melalui kontroller PI dengan tuning parameter K_p dan K_i .

Rancangan Penelitian

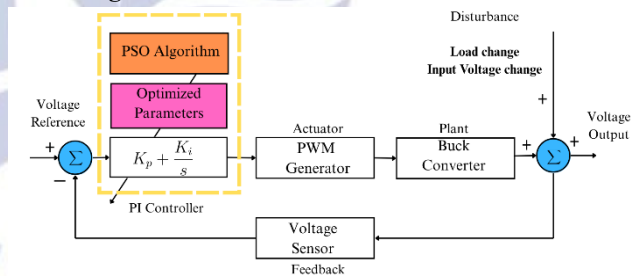
Penelitian ini mengembangkan sistem kendali pada buck converter dua arah dengan membandingkan pendekatan konvensional dan metode optimasi Particle Swarm Optimization (PSO). Tahapan dimulai dari studi literatur untuk menghimpun teori terkait buck converter, pengendali PI, dan algoritme PSO, kemudian dilanjutkan dengan perumusan model matematis sebagai dasar simulasi. Setelah itu, dilakukan perancangan kendali PI konvensional yang kemudian dioptimalkan menggunakan algoritme PSO guna memperoleh parameter kontrol yang lebih efektif. Proses berikutnya adalah simulasi sistem menggunakan MATLAB Simulink untuk mengevaluasi

kinerja kedua pendekatan, yang kemudian dianalisis berdasarkan respons sistem seperti *settling time*, *overshoot*, dan kestabilan. Rangkaian proses ini ditutup dengan penarikan kesimpulan dan saran untuk penelitian lanjutan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Rancangan penelitian

Blok Diagram



Gambar 3. diagram blok

Gambar 3 menunjukkan sistem pengaturan tegangan tertutup pada rangkaian buck converter. Tegangan keluaran diukur oleh sensor, kemudian dibandingkan dengan tegangan referensi untuk menghasilkan sinyal eror. Sinyal ini mencerminkan perbedaan antara tegangan aktual dan nilai yang diharapkan. Selanjutnya, sinyal eror diproses oleh kontrol PI untuk menghasilkan sinyal kendali yang akan mengatur saklar semikonduktor melalui teknik *Pulse Width Modulation* (PWM). Pengaturan *duty cycle* pada PWM memungkinkan sistem mengendalikan tegangan *output* agar tetap stabil dan sesuai dengan nilai referensi meskipun terjadi perubahan beban atau gangguan eksternal.

Parameter Komponen

Simulasi *buck converter* tanpa pengontrol dilakukan setelah mengetahui masing-masing ukuran komponen

penyusun. Buck converter akan menyuplai beban dengan tegangan output sebesar 12 volt dengan menurunkan tegangan input yang besarnya 24 volt.

Tabel 1. Komponen *Buck Converter*

NO	Komponen Konverter	Nilai
1.	Sumber Tegangan DC	24 V
2.	Resistor (Ω)	1 Ω
3.	Induktor (L)	97,5 μH
4.	Kapasitor (C)	481 μF
5.	Frekuensi Pensaklaran (f)	40kHz
6.	Siklus Kerja	50%

Tabel 1 menunjukkan parameter komponen perancangan buck converter. Pada tabel ditunjukkan nilai induktor, 97,5 μH nilai kapasitor 481 μF , dan frekuensi pensaklaran 40kHz untuk mengatur *buck converter* dengan sumber tegangan 24 V.

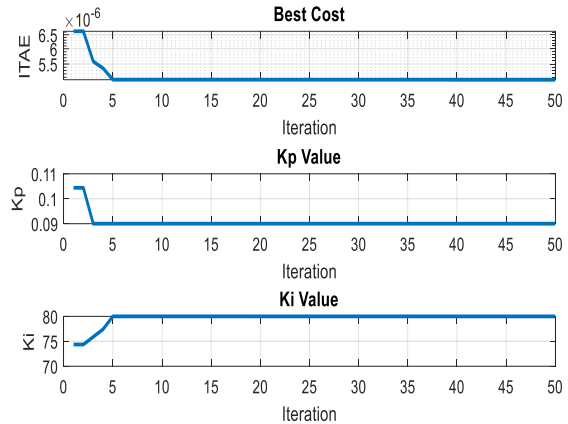
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemilihan parameter optimasi PSO, seperti jumlah partikel, bobot inersia, penurunan inersia, serta konstanta pembelajaran pribadi dan global, didasarkan pada studi-studi terbaru dalam literatur teknik. Misalnya, penelitian oleh (Zhou et al., 2024) memanfaatkan PSO untuk penyetelan pengendali PI pada konverter AC-DC dua tahap dengan parameter yang serupa. Selain itu, (Mohammed et al., 2021) juga melaporkan penggunaan jumlah partikel dalam kisaran puluhan hingga ratusan pada tuning PI untuk buck converter. Sementara itu, studi oleh (Muresan & De Keyser, 2022) menunjukkan bahwa penggunaan bobot inersia dan konstanta pembelajaran dalam rentang yang setara memberikan performa sistem yang stabil dan respons yang cepat pada aplikasi konverter sejenis.

Tabel 2 Parameter Optimisasi PSO

Parameter	Nilai
Jumlah Partikel	80
Iterasi	50
Bobot inersia (w)	2
Penurunan inersia (w_{damp})	0,99
Faktor pembelajaran pribadi ($c1$)	4,5
Faktor pembelajaran global ($c2$)	3,5

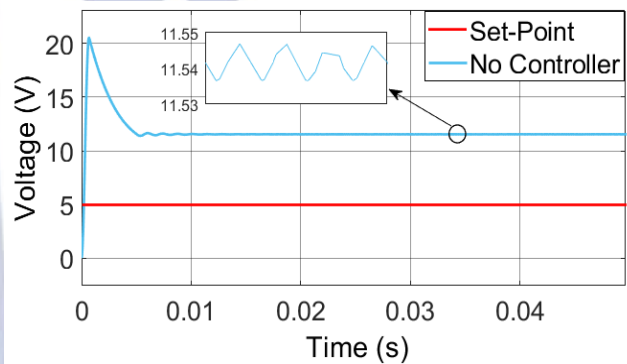
Optimasi parameter K_p dan K_i pada kontrol *buck converter* menghasilkan nilai perubahan nilai ITAE yang konvergen pada iterasi ke 50 sehingga menghasilkan grafik optimasi PSO yang ditunjukkan pada gambar 4



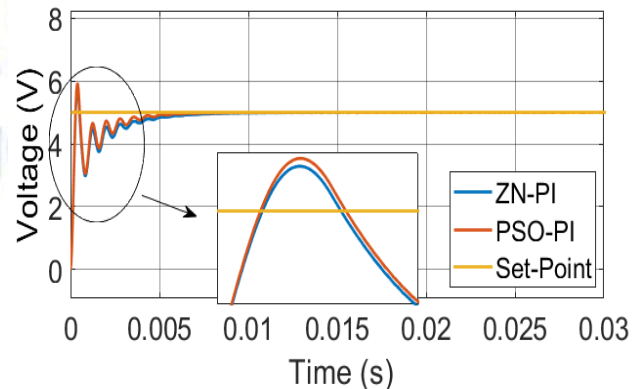
Gambar 4 Hasil optimasi tuning pada kontrol PI dengan menggunakan algoritme PSO

Tabel 3 hasil best cost, K_p , dan K_i PSO

Best Cost	K_p	K_i
5.0288.10	0.090004	79.9951

Gambar 5 *buck converter* tanpa pengontrol

Gambar 5 menunjukkan respon pada *buck converter* saat tidak ada pengontrol yang menghasilkan tegangan keluaran mencapai 11.5 V dengan nilai osilasi sebesar 0.01 V kemudian akan dikontrol oleh kontrol PSO-PI dengan tegangan referensi sebesar 5 V.



Gambar 6. Perbandingan respon pada buck converter dengan ZN-PI dan PSO-PI

Gambar 6 membandingkan hasil respons pada buck converter yang diatur melalui tegangan referensi sebesar 5 V. Pengaturan tersebut akan dievaluasi berdasarkan nilai *settling time*, *overshoot*, dan *rise time* dengan dua

penyetelan parameter yang berbeda, yaitu menggunakan metode *Ziegler-Nichols* serta menggunakan algoritme PSO. Gambar tersebut menunjukkan bahwa lonjakan pada tegangan PSO-PI cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan metode *Ziegler-Nichols*. Hasil perbandingan nilai tersebut dilampirkan pada tabel.

Tabel 4. Perbandingan performa buck converter dengan tuning *Ziegler-Nichols* dan kontrol PSO-PI

Metode Tuning	Rise Time (ms)	Settling time (ms)	Overshoot (%)
Ziegler-Nichols	0.1944	6.3	15.68
PSO	0.1908	4.9	18.46

Pada tabel 5. *Settling time* dan *rise time* pada kontrol PSO-PI mengalami peningkatan performa, dengan penekanan *settling time* menjadi lebih rendah yaitu 4.9 ms dan *rise time* sedikit membaik yaitu 0.1908 ms.

PENUTUP

Simpulan .

Perancangan kendali PI yang dioptimalkan menggunakan algoritme PSO telah berhasil dilakukan. Proses optimasi mencakup inisialisasi populasi partikel, penggunaan fungsi objektif berbasis Integral Time Absolute Error (ITAE), serta penentuan parameter berupa koefisien pembelajaran partikel dan bobot inersia untuk memperoleh nilai K_p dan K_i yang optimal.

Berdasarkan hasil simulasi, pengendali PSO-PI menunjukkan peningkatan performa dibandingkan metode penyetelan *Ziegler-Nichols*. Hal ini ditunjukkan oleh penurunan nilai *settling time* dari 6,3 ms menjadi 4,9 ms, serta *rise time* dari 0,1944 ms menjadi 0,1908 ms. Namun demikian, peningkatan performa tersebut disertai dengan kenaikan *overshoot* dari 15,68% menjadi 18,46%.

Maka dapat disimpulkan bahwa pendekatan PSO dalam penyetelan parameter pengendali PI mampu mempercepat respons sistem pada buck converter, khususnya dalam hal waktu mencapai *steady state*, meskipun menghasilkan *overshoot* yang sedikit lebih tinggi dibandingkan metode konvensional.

Saran

Penggunaan metode optimisasi yang lain: selain PSO, algoritme lain seperti *Genetic Algorithm* (GA), *Grey Wolf Optimization* (GWO), atau *Artificial Bee Colony* (ABC) dapat digunakan untuk membandingkan performa dan efektivitas pada pengendali proporsional-integral (PI).

DAFTAR PUSTAKA

Ankur, P., & Savani, V. (2014). Performance Analysis of PID Controller and Its significance for Closed Loop System. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 3(3), 1843–1847. <https://www.ijert.org/download/8854/performance->

[analysis-of-pid-controller-and-its-significance-for-closed-loop-system](#)

- Budiman, F. N., Ramli, M. A. M., Milyani, A. H., Boucekara, H. R. E. H., Rawa, M., Muktiadji, R. F., & Seedahmed, M. M. A. (2022). Stochastic optimization for the scheduling of a grid-connected microgrid with a hybrid energy storage system considering multiple uncertainties. *ElsevierFN Budiman, MAM Ramli, AH Milyani, HREH Boucekara, MRawa, RF MuktiadjiEnergy Reports*, 2022•Elsevier, 8, 7444–7456. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2022.05.249>
- Faradisa, S., & Wanarti Rusimanto, P. (2020). Perancangan Kontroler Pi Dengan Metode Tuning Cohen-Coon Untuk Kendali Suhu Pada Inkubator Bayi Berbasis Labview 2014. *Jurnal Teknik Elektro*, 9(2), 293–301.
- Freitas, D., Lopes, L. G., & Morgado-Dias, F. (2020). Particle swarm optimisation: a historical review up to the current developments. *Mdpi.ComD Freitas, LG Lopes, F Morgado-DiasEntropy*, 2020•mdpi.Com, 22(3). <https://doi.org/10.3390/E22030362>
- Hu, N. (2025). The Limitations of Traditional PID Controllers and Modern Optimization Methods. *Applied and Computational Engineering*, 147(1), 238–244. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/2025.22912>
- Latha, K., Rajinikanth, V., & Surekha, P. M. (2013). PSO-Based PID Controller Design for a Class of Stable and Unstable Systems. *ISRN Artificial Intelligence*, 2013, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2013/543607>
- Livinti, P., Culea, G., Banu, I. V., & Vernica, S. G. (2024). Comparative Study of a Buck DC-DC Converter Controlled by the MPPT (P&O) Algorithm without or with Fuzzy Logic Controller. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(17). <https://doi.org/10.3390/app14177628>
- Mohammed, I., (JRC), L. K.-J. of R. and C., & 2024, undefined. (n.d.). Design and Simulation of an Analog Robust Control for a Realistic Buck Converter Model. *Journal.Umy.Ac.Id*, 5(5), 2024. <https://doi.org/10.18196/jrc.v5i5.22408>
- Muktiadji, R. F., Ramli, M. A. M., Boucekara, H. R. E. H., Milyani, A. H., Rawa, M., Seedahmed, M. M. A., & Budiman, F. N. (2022). Control of Boost Converter Using Observer-Based Backstepping Sliding Mode Control for DC Microgrid. *Frontiers in Energy Research*, 10. <https://doi.org/10.3389/FENRG.2022.828978/PDF>
- 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. *Ieeexplore.Ieee.OrgRF Muktiadji, MAM Ramli, MMA Seedahmed, R Uswarman2022 Fifth International Conference on Vocational Education and*, 2022•ieeexplore.Ieee.Org, 130–135. <https://doi.org/10.1109/ICVEE57061.2022.9930441>
- Muresan, C. I., & De Keyser, R. (2022). Revisiting Ziegler–Nichols. A fractional order approach. *ISA*

- Transactions*, 129, 287–296.
<https://doi.org/10.1016/J.ISATRA.2022.01.017>
- Premkumar, K., Vishnupriya, M., Thamizhselvan, T., Sanjeevikumar, P., & Manikandan, B. V. (2021). PSO optimized PI controlled DC-DC buck converter-based proton-exchange membrane fuel cell emulator for testing of MPPT algorithm and battery charger controller. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(2), e12754. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12754>
- Rahman Ethan, Sarah Afiq, Maryam Fikri, & Amsyar Isfahann. (2022). *Acknowledging the Role of Buck Converter in DC-DC Conversion*. 3.
- Sangeetha, S., Revathi, B. S., Balamurugan, K., & Suresh, G. (2023). Performance analysis of buck converter with fractional PID controller using hybrid technique. *Robotics and Autonomous Systems*, 169, 104515.
<https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.104515>
- Saputra, P. P. S., Murdianto, F. D., Firmansyah, R., & Widarsono, K. (2020). Economic dispatch in ieee 26 bus system using quantum behaved particle swarm optimization. *Ieeexplore.Iee.OrgPPS Saputra, FD Murdianto, R Firmansyah, K Widarsono2020 International Conference on Applied Science and Technology*, 2020•*ieeexplore.Iee.Org*, 54–58.
<https://doi.org/10.1109/ICAST51016.2020.9557625>
- 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>
- Yessef, M., Benbouhenni, H., Taoussi, M., Lagrioui, A., Colak, I., Bossoufi, B., & Alghamdi, T. A. H. (2024). Experimental Validation of Feedback PI Controllers for Multi-Rotor Wind Energy Conversion Systems. *IEEE Access*, 12(January), 7071–7088.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3351355>
- Zhou, K., Li, Z., & Wu, X. (2024). Research on Two-stage Isolated AC–DC Converter with PSO Optimized PI Control. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 19(3), 1619–1631.
<https://doi.org/10.1007/S42835-023-01671-0/FIGURES/22>

