

## Desain IMC - PID untuk kontrol tegangan pada DC - DC *Buck Converter*

**Naufal Maulana Fahmi**

Program Studi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Ketintang 60231, Indonesia  
e-mail: [naufal.22087@mhs.unesa.ac.id](mailto:naufal.22087@mhs.unesa.ac.id)

**Rifqi Firmansyah**

Program Studi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Ketintang 60231, Indonesia  
e-mail: [rifqifirmansyah@unesa.ac.id](mailto:rifqifirmansyah@unesa.ac.id)

### Abstrak

Pengendalian tegangan pada konverter DC-DC, khususnya tipe *buck*, merupakan elemen penting dalam sistem elektronika daya modern karena berpengaruh langsung terhadap efisiensi, stabilitas, dan kualitas suplai pada perangkat elektronik serta aplikasi industri berbasis daya rendah hingga menengah. Sejumlah penelitian terkini menekankan bahwa dinamika konverter yang bersifat nonlinier serta bergantung pada kondisi beban menuntut strategi kontrol yang mampu menjaga kestabilan meskipun terjadi variasi parameter dan gangguan eksternal. Metode pengendalian berbasis PID masih menjadi pendekatan paling banyak digunakan karena kemudahan implementasi dan kemampuannya dalam menangani respon transien, meskipun tuning parameter yang tidak tepat sering menyebabkan *overshoot* dan respon lambat pada sistem konverter daya. Tantangan ini semakin terlihat pada *buck converter* yang memiliki dinamika cepat dan sensitivitas tinggi terhadap perubahan beban sehingga tuning konvensional terkadang tidak memadai. *Internal Model Control* (IMC) menjadi salah satu metode tuning modern yang menawarkan solusi karena pendekatannya yang berbasis model serta kemampuannya menghasilkan parameter pengendali yang lebih *robust* terhadap ketidakpastian sistem. Penelitian ini secara khusus menganalisis penerapan metode IMC-PID pada *buck converter* dengan memanfaatkan model FOPDT untuk mendapatkan parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ . Pendekatan ini diharapkan memberikan hasil tuning yang lebih stabil, cepat, dan adaptif dibandingkan metode konvensional.

**Kata Kunci:** IMC, PID, *buck converter*, pengaturan tegangan.

### Abstract

Voltage control in DC-DC converters, especially buck converters, is a crucial element in modern power electronics systems because it directly impacts the efficiency, stability, and quality of supply in low- to medium-power electronic devices and industrial applications. Recent studies have emphasized that the nonlinear and load-dependent dynamics of converters require control strategies capable of maintaining stability despite parameter variations and external disturbances. PID-based control methods remain the most widely used approach due to their ease of implementation and ability to handle transient responses, although improper parameter tuning often leads to overshoot and slow response in power converter systems. This challenge is increasingly apparent in buck converters, which have fast dynamics and high sensitivity to load changes, making conventional tuning sometimes inadequate. Internal Model Control (IMC) is one of the modern tuning methods that offers a solution due to its model-based approach and its ability to produce control parameters that are more robust to system uncertainty. This study specifically analyzes the application of the IMC-PID method in buck converters by utilizing the FOPDT model to obtain the  $K_p$ ,  $K_i$ , and  $K_d$  parameters. This approach is expected to provide more stable, faster, and adaptive tuning results compared to conventional methods.

**Keywords:** IMC, PID, *buck converter*, voltage control.

### PENDAHULUAN

Penggunaan konverter DC-DC, khususnya *buck converter*, semakin meluas dalam berbagai aplikasi elektronika daya mulai dari sistem catu daya portabel, perangkat industri, hingga sistem energi terbarukan karena kemampuannya menurunkan tegangan dengan efisiensi tinggi serta dapat mempertahankan ukuran dan biaya yang relatif kecil. Namun, karakteristik

switching converter seperti *buck converter* menciptakan dinamika yang kompleks. Sistem dapat menunjukkan perilaku nonlinier, perubahan titik kerja, serta sensitivitas terhadap variasi beban dan gangguan eksternal. Kondisi-kondisi ini membuat pengendalian tegangan keluaran menjadi tantangan tersendiri. Beberapa penelitian menunjukkan pentingnya strategi kontrol yang tidak hanya menjaga kestabilan, tetapi

juga cukup *robust* terhadap ketidakpastian sistem (Saleem et al., 2024).

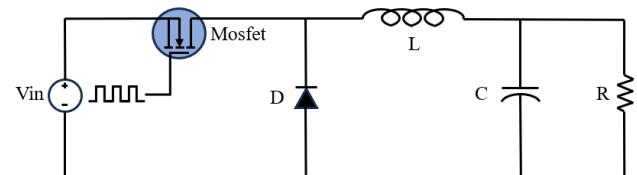
Pendekatan klasik dengan kontrol berbasis pengontrol PID tetap populer dalam literatur dan implementasi industri karena kesederhanaan struktur dan kemudahan implementasinya, termasuk dalam pengendalian tegangan keluaran pada *buck converter*. Misalnya, penelitian terbaru yang menggunakan PID diskrit pada *buck converter* berhasil menunjukkan bahwa dengan tuning parameter PID yang tepat dapat tercapai kestabilan tegangan meskipun terjadi perubahan beban (Azra Syahidah et al., 2025). Namun demikian, tuning PID konvensional menggunakan metode *Ziegler-Nichols* dapat menemui kesulitan dalam menghadapi dinamika cepat, variabilitas beban, dan ketidakpastian parameter *plant*. *Overshoot*, respon lambat, atau ketidakstabilan menjadi risiko ketika model *plant* tidak dipertimbangkan secara eksplisit dalam desain kontroler (Kunigar et al., 2023).

Sebagai alternatif yang lebih sistematis dan berbasis model, pendekatan *Internal Model Control* (IMC) dipandang menawarkan keunggulan signifikan terutama dalam hal *robustness* terhadap variasi *plant* dan gangguan. IMC memungkinkan perancangan kontroler dengan memanfaatkan model *plant* nominal, dan kemudian menerjemahkannya ke struktur PID (IMC PID), sehingga tetap kompatibel dengan implementasi industri. Pendekatan ini telah diaplikasikan dalam beberapa penelitian konverter daya dan sistem kontrol lain yang menunjukkan bahwa IMC PID dapat memperbaiki respons transien dan kestabilan dibanding PID konvensional (Choubey et al., 2024).

Meski demikian, literatur menunjukkan bahwa efektivitas IMC PID sangat bergantung pada model *plant* yang digunakan, baik dalam hal orde sistem maupun karakteristik dinamis seperti *delay*, *non-minimum phase*, atau variasi parameter. Pada banyak kasus, konverter DC-DC (termasuk *buck*) memiliki dinamika yang lebih dari orde satu atau menunjukkan efek parasitik dan non-idealitas, sehingga memerlukan pemilihan model dan metode tuning yang hati-hati (Apparasu et al., 2025). Oleh karena itu, analisis mendalam dan sistematis terhadap penerapan IMC PID pada *buck converter* mulai dari pemodelan, pemilihan parameter filter IMC, hingga konversi ke PID dan validasi performa sangat dibutuhkan untuk menilai manfaat riil metode ini dalam aplikasi nyata. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penerapan metode IMC PID pada rangkaian DC-DC *buck converter*. Dengan demikian, diharapkan penelitian ini dapat memberikan pemahaman mendalam dan pedoman praktis mengenai kelebihan, batasan, dan implementabilitas IMC PID pada sistem *buck converter* nyata.

## TINJAUAN PUSTAKA

### *Buck Converter*



Gambar 1. Rangkaian DC - DC *Buck Converter*

Rangkaian yang memiliki karakteristik menghasilkan tegangan keluaran ( $V_o$ ) yang lebih rendah daripada tegangan sumber ( $V_{in}$ ). Gambar 1 menunjukkan struktur rangkaian DC - DC *buck converter*. *Buck converter* terdiri dari dioda (D), sakelar terkendali (MOSFET), resistansi beban (R), induktansi (L), dan kapasitansi (C) sebagai filter (BELKAID et al., 2020)(Yin et al., 2020).

Untuk mengubah tegangan DC lebih tinggi menjadi tegangan DC berkekuatan lebih rendah, perangkat *switching* berdaya tinggi seperti MOSFET atau IGBT dinyalakan atau dimatikan pada frekuensi tinggi (Warrier & Shah, 2021). Semua orang tahu bahwa konverter dalam *mode switching* beroperasi secara kontinu, terputus-putus, dan atau dalam kondisi batas tergantung pada apakah arus induktansi turun menjadi nol (SUCU et al., 2021).

### **Kontroler PID (*Proportional Integral Derivative*)**

*Proportional Integral Derivative* adalah metode kontrol umpan balik paling umum dalam rekayasa kontrol. PID bekerja dengan membandingkan nilai referensi (*set-point*) dan nilai nyata dari variabel proses (*feedback*), kemudian menghitung signal kontrol berdasarkan tiga komponen yakni, proporsional (P), integral (I), dan derivatif (D), dengan tujuan meminimalkan *error* agar variabel proses mengikuti *setpoint* (Joseph et al., 2022). Persamaan matematis PID klasik pada domain waktu kontinu dapat dituliskan:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Dalam konteks pengendalian tegangan, PID dapat digunakan untuk menjaga tegangan keluaran tetap sesuai *setpoint*. Mekanismenya sensor atau pengukur (*feedback*) membaca tegangan keluaran aktual. *Error*  $e(t)$  dihitung sebagai selisih antara tegangan referensi (*setpoint*) dan tegangan keluaran aktual. Kontroler PID menghitung sinyal kontrol  $u(t)$  berdasarkan persamaan 1. Sinyal kontrol  $u(t)$  kemudian digunakan untuk mengatur elemen aktuator (misalnya *duty cycle* PWM pada konverter) sehingga output tegangan berubah untuk memperkecil *error*. Komponen *proportional* bereaksi terhadap *error* saat ini, mempercepat respon jika *error* besar, *integral* mengatasi *error steady-state (offset)*, dan *derivative* membantu meredam *overshoot* atau osilasi bila terjadi perubahan cepat pada beban

atau kondisi sistem.

Banyak penelitian dan aplikasi modern menunjukkan bahwa dengan tuning parameter PID yang tepat, kontroler mampu menjaga tegangan keluaran stabil, mampu merespon perubahan beban dengan cepat, dan meminimalkan *steady-state error* serta *overshoot* (Azra Syahidah et al., 2025).

### IMC (Internal Model Control)

*Internal Model Control* adalah kerangka desain pengendali berbasis model yang mendasarkan kompensator pada *invers model plant* (model internal) yang dikombinasikan dengan filter *low-pass* untuk menjamin kausalitas dan *robustness* terhadap ketidakpastian model. Dalam struktur IMC, model *plant* nominal  $G_m(s)$  digunakan secara eksplisit saat merancang kompensator  $Q(s)$ . Jika model sama dengan *plant* nyata dan tanpa *delay*, *input-output* ideal dapat dikompensasi oleh *invers model* sehingga *output* mengikuti *setpoint*. Namun karena model nyata tidak sempurna dan sering mengandung *delay* atau dinamika tak invertibel, penambahan filter (*parameterized by*  $\lambda$  atau  $\tau_c$ ) menjadi langkah kritis untuk mengontrol *trade-off* antara kecepatan respon dan toleransi terhadap *mismatch* model (Choubey et al., 2024).

Kelebihan IMC dibandingkan kontrol PID klasik adalah IMC dapat mereduksi keseluruhan masalah tuning menjadi pemilihan parameter filter ( $\lambda$  atau  $\tau_c$ ) setelah model ditetapkan, sehingga *trade-off* kecepatan vs *robustness* menjadi terukur. Kemudian dengan memilih filter yang sesuai, IMC dapat dirancang untuk menahan variasi parameter *plant* dan gangguan eksternal lebih baik daripada PID yang di tuning heuristik. Selain itu, IMC memanfaatkan model internal sehingga mudah dihubungkan dengan strategi model *reduction*, identifikasi *online*, atau metode adaptif untuk menangani *non-linearity* dan perubahan titik kerja, serta untuk keperluan implementasi industri, solusi IMC sering dikonversi ke bentuk PID praktis (SIMC/IMC-PID) sehingga menggabungkan keunggulan model berbasis tuning dengan implementabilitas PID (Choubey et al., 2024).

Rumus  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  pada metode IMC untuk model FOPDT (*First-Order Plus Dead Time*) berdasarkan jurnal (Visioli & Sánchez-Moreno, 2024) adalah sebagai berikut.

$$K_p = \frac{\tau}{K(\tau * +\theta)} \quad (2)$$

IMC menyederhanakan desain controller dengan memilih filter *time-constant*  $\tau^*$  dan menghasilkan rumus proporsional yang bergantung pada *time constant* proses  $\tau$ , gain proses  $K$ , dan *dead-time*  $\theta$ . Ini adalah bentuk yang dipakai dalam banyak kajian IMC-PID modern sebagai aturan analitik dasar.

$$K_i = \frac{1}{\tau + \theta} \quad (3)$$

IMC menurunkan waktu integral sebagai jumlah  $\tau$  dan  $\theta$ , sehingga tindakan integral mempertimbangkan efek *delay* saat ada *dead-time*. Pernyataan dan penggunaan bentuk  $\tau_i = \tau + \theta$  dan konversinya ke  $K_i$  banyak muncul pada publikasi IMC-PID terbaru.

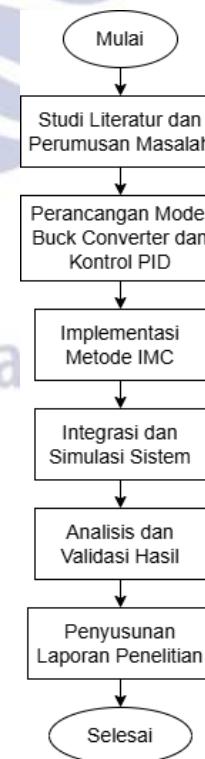
$$K_d = \frac{\tau\theta}{2\tau + \theta} \quad (4)$$

Bentuk ini muncul dari penyederhanaan hubungan IMC PID untuk FOPDT, derivatif berperan bila ada *dead-time* ( $\theta > 0$ ). Literatur modern yang membahas variasi IMC PID dan performa derivatif menegaskan bahwa  $K_d$  bergantung pada produk  $\tau\theta$  dibagi fungsi linear dari  $\tau$  dan  $\theta$ .

## METODE

### Pendekatan Penelitian

Pendekatan yang dilakukan penelitian ini termasuk kedalam kategori penelitian kuantitatif, yang berarti metode yang digunakan berfokus dalam pengumpulan dan analisis data numerik yang diukur secara objektif. Pendekatan kuantitatif menekankan pentingnya data yang dihasilkan dari pengukuran yang akurat dan sistematis. Metode IMC digunakan untuk mencari parameter PID, yang memungkinkan analisis yang lebih mendalam terkait pengontrol PID. Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahapan pada Gambar 2.



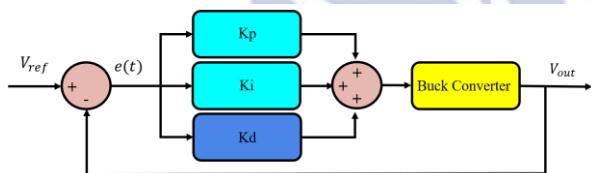
Gambar 2. *Flowchart* Penelitian

Berdasarkan *flowchart* penelitian pada Gambar 2,

tahapan penelitian ini dimulai dengan studi literatur untuk memahami karakteristik buck converter, prinsip kerja kontrol PID, teknik tuning konvensional, serta konsep optimasi menggunakan metode IMC – PID sebagai dasar penyusunan landasan teori dan spesifikasi sistem awal. Selanjutnya dilakukan perancangan model buck converter dan kontrol PID di MATLAB/Simulink, mencakup pemodelan rangkaian, pengukuran tegangan output, serta implementasi blok PID dengan parameter yang dapat diubah untuk memastikan sistem bekerja sesuai kondisi ideal. Metode IMC - PID kemudian diimplementasikan di MATLAB melalui perhitungan sehingga diperoleh nilai  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  yang optimal. Setelah parameter optimal diperoleh, dilakukan integrasi ke model Simulink dan simulasi untuk mengevaluasi performa respons sistem. Hasil simulasi kemudian dianalisis dan divalidasi melalui grafik respons dan tabel parameter performa. Tahapan terakhir adalah penyusunan laporan penelitian yang memuat seluruh proses, perhitungan, simulasi, analisis, serta kesimpulan secara sistematis sesuai pedoman akademik.

### Diagram Blok

Gambar 3 di bawah ini menunjukkan alur kerja sistem pada penelitian ini.



Gambar 3. Diagram Blok

Dalam diagram blok tersebut sebuah sistem membentuk rangkaian tertutup dengan tegangan *output* sebagai *feedback* dalam sistem kontrol agar tegangan *output* yang dihasilkan dapat dikontrol sehingga sesuai dengan kebutuhan beban dan kontrol PID yang telah dioptimalkan menggunakan metode IMC sehingga didapat nilai  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  yang optimal.

### Parameter Komponen

Parameter komponen *buck converter* yang digunakan pada penelitian ini berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh (Al-Fikri et al., 2022) adalah sebagai berikut.

Tabel 1. Parameter Komponen *Buck Converter*

Parameter	Nilai
$V_{in}$	12 V
$V_{out}$	5 V
Frekuensi switching	50 kHz
Induktor	6 mH
Kapasitor	10 $\mu$ F
Resistor (beban)	100 $\Omega$

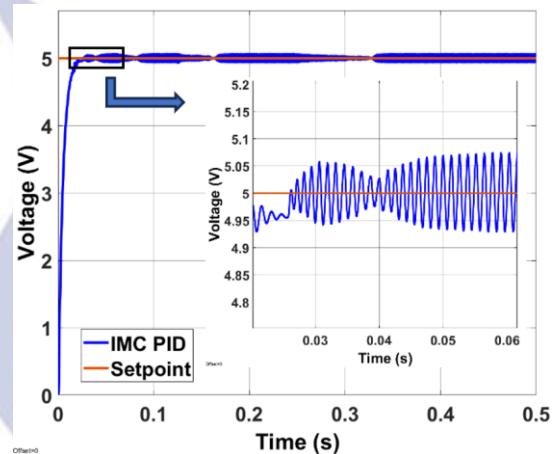
Berdasarkan parameter tersebut, didapat parameter PID menggunakan metode IMC sebagai berikut.

Tabel 2. Parameter PID

Parameter	Nilai
$K_p$	0,005464
$K_i$	17,8562
$K_d$	0

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Respons sistem IMC PID dilihat melalui simulasi MATLAB. Nilai  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  dari langkah sebelumnya, beserta parameter *buck converter*, digunakan untuk melakukan simulasi. *Overshoot*, *rise time*, *settling time*, *error steady state*, dan nilai ITAE merupakan parameter yang dianalisis. Hasil data simulasi dari MATLAB disajikan sebagai dasar analisis.



Gambar 4. Grafik Performa Sistem

Tabel 3. Analisis Performa Sistem

Parameter	Nilai IMC PID
<i>Overshoot (%)</i>	0
<i>Rise Time (s)</i>	0,0262
<i>Settling Time (s)</i>	0,031
<i>Error Steady State</i>	0
ITAE	0,005096

Hasil pengujian pada Tabel 3 menunjukkan bahwa parameter kontroler PID yang diperoleh melalui metode IMC mampu memberikan performa dinamika yang sangat baik pada sistem *buck converter*. Nilai *overshoot* sebesar 0% menandakan bahwa respons sistem tidak mengalami lonjakan tegangan melewati *setpoint*, sehingga kontroler bekerja secara stabil dan terukur. Waktu naik (*rise time*) sebesar 0,0262 s dan *settling time* 0,031 s menunjukkan bahwa sistem mampu mencapai kondisi stabil dengan sangat cepat, menandakan kecepatan respons yang optimal tanpa mengorbankan stabilitas. Selain itu, *error steady-state* sebesar 0 menunjukkan bahwa kontroler memiliki kemampuan sangat baik dalam menghilangkan kesalahan jangka panjang, sesuai dengan karakteristik *integral action* pada PID. Nilai ITAE yang sangat kecil, yaitu 0,005096, mengonfirmasi bahwa total akumulasi *error* teredam dengan baik sepanjang waktu respon, sehingga kontroler IMC memberikan transien yang

halus dan minimal *error*.

Secara keseluruhan, performa ini menunjukkan bahwa pendekatan tuning berbasis IMC efektif dalam memberikan respons yang cepat dan stabil pada *buck converter*. Metode IMC secara alami menghasilkan parameter yang konservatif namun responsif, mampu menjaga sistem dari *overshoot* sekaligus memaksimalkan kecepatan transien. Dengan hasil ini, dapat dikatakan bahwa PID berbasis IMC dapat menjadi acuan kuat untuk tuning awal atau bahkan tuning final pada sistem buck converter dengan karakteristik serupa.

Meskipun hasil simulasi menunjukkan kinerja IMC-PID yang sangat baik dengan *overshoot* dan *error steady-state* sebesar nol serta nilai ITAE yang kecil, perlu dicatat bahwa model sistem yang digunakan masih bersifat ideal. Pada simulasi ini, umpan balik tegangan diasumsikan bebas dari *noise* sensor, serta model *buck converter* direpresentasikan menggunakan pendekatan model rata-rata tanpa mempertimbangkan *ripple switching* akibat proses pensaklaran. Selain itu, implementasi kontrol dilakukan dalam domain kontinu tanpa memperhitungkan *delay* digital akibat proses PWM, *sampling* ADC, dan komputasi mikrokontroler. Oleh karena itu, hasil yang diperoleh mencerminkan kinerja ideal dari metode IMC-PID pada kondisi nominal. Evaluasi lebih lanjut dengan mempertimbangkan efek nonideal seperti *noise*, *ripple switching*, dan *delay* digital diperlukan untuk mendekati kondisi sistem nyata. Sebagai pengembangan selanjutnya, model dapat diperluas dengan memasukkan efek *noise* sensor, *switching ripple*, dan *delay* digital untuk mengevaluasi *robustness* pengendali IMC-PID pada kondisi non ideal.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Rifqi Firmansyah, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang dengan penuh kesabaran, ketelitian, dan ketulusan memberikan bimbingan, arahan, serta masukan berharga sepanjang proses penelitian. Berkat dukungan beliau, penelitian ini dapat penulis selesaikan dengan lebih terarah dan mendalam. Semangat, wawasan, dan pengalaman yang beliau bagikan menjadi motivasi serta inspirasi yang sangat berarti bagi penulis dalam menyelesaikan artikel ini.

## PENUTUP

### Simpulan

Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan metode IMC untuk tuning parameter PID pada *buck converter* menghasilkan kinerja kontrol yang sangat baik, ditunjukkan oleh tidak adanya *overshoot*, waktu naik dan waktu tunak yang sangat cepat, *error steady-state* nol, serta nilai ITAE yang sangat kecil.

Parameter IMC terbukti memberikan keseimbangan antara kecepatan respons dan stabilitas sistem. Secara keseluruhan, metode IMC dapat diandalkan sebagai teknik tuning kontrol PID untuk aplikasi *buck converter*.

### Saran

Untuk penelitian berikutnya, disarankan melakukan perbandingan langsung antara metode IMC dengan metode optimasi berbasis algoritma metaheuristik, guna melihat potensi peningkatan performa lebih lanjut. Selain itu, pengujian pada kondisi beban yang lebih variatif atau implementasi *hardware* berbasis mikrokontroler dapat dilakukan untuk menguji *robustness* kontroler terhadap kondisi nyata.

## DAFTAR PUSTAKA

- Al-Fikri, I., Aripriharta, Handayani, A. N., Rosmin, N., & Oma, S. (2022). *Fuzzy-PI Control for Buck Converter Output Voltage Stabilizer* (Vol. 14, Issue 1).
- Apparasu, A., Ambati, S. R., Kumar, V., & Gara, U. B. B. (2025). Robust Smith predictor-based fractional IMC-PID controller design for improved stable SOPTD process performance. *Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture*. <https://doi.org/10.1007/s43995-025-00241-x>
- Azra Syahidah, H., Jembar Pangestu, A., Salman Al Farisi, M., Ferdiansyah, R., Nazhr Warnata, R., Zulfikar, M., & Adli Rizqulloh, M. (2025). Journal of Mechatronics and Artificial Intelligence Design and Implementation of a Digital PID Controller for DC-DC Buck Converter with MATLAB. *Journal of Mechatronics and Artificial Intelligence*, 71(2), 71–90. <http://ejournal.upi.edu/index.php/jmai/>
- Belkaid, A., Colak, I., Bayindir, R., & Kayisli, K. (2020). *Indirect Sliding Mode Voltage Control of Buck Converter*. IEEE 2020 8th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid).
- Choubey, A., Jain, S. K., & Padhy, P. K. (2024). A GWO-Based Indirect IMC-PID Controller for DC-DC Boost Converter. *Energies*, 17(23). <https://doi.org/10.3390/en17235954>
- 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, Issue 5). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09399>
- Kunigar, R., Al Tahtawi, A., & Muhammad Ilman, S. (2023). Desain dan Implementasi Modul Konverter DC-DC Buck Boost Dengan Pengendali PID. *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, 4, 404–415. <https://doi.org/10.24036/jtein.v4i1.414>
- Saleem, O., Ahmad, K. R., & Iqbal, J. (2024). Fuzzy-Augmented Model Reference Adaptive PID

- Control Law Design for Robust Voltage Regulation in DC-DC Buck Converters. *Mathematics*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/math12121893>
- Sucu, H., Göktas, 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>
- Visioli, A., & Sánchez-Moreno, J. (2024). IMC-based tuning of PIDA controllers: a comparison with PID control\*\*This work was supported in part by the Spanish State Research Agency (AEI) under the Project PID2020-112658RBI00/AEI/10.13039/501100011033. *IFAC-PapersOnLine*, 58(7), 1–6. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.08.001>
- Warrier, P., & Shah, P. (2021). Optimal fractional pid controller for buck converter using cohort intelligent algorithm. *Applied System Innovation*, 4(3). <https://doi.org/10.3390/asi4030050>
- Yin, Y., Liu, J., Marquez, A., Lin, X., Leon, J. I., Vazquez, S., Franquelo, L. G., & Wu, L. (2020). Advanced Control Strategies for DC-DC Buck Converters with Parametric Uncertainties via Experimental Evaluation. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 67(12), 5257–5267. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2020.3009168>

