

ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT PID VÀ HÀM HYPERBOLIC TANGENT CHO BỘ CHUYỂN ĐỔI BUCK

PERFORMANCE EVALUATION OF A PID SLIDING MODE CONTROL AND HYPERBOLIC TANGENT FUNCTION FOR BUCK CONVERTER

DƯƠNG HOÀNG VŨ^{1,a},
HUỲNH ĐẮC SƠN TIỀN¹, PHẠM THANH TÙNG¹

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

^aTác giả liên hệ: codencm@gmail.com

Nhận bài (Received): 16/12/2023; Phản biện (Reviewed): 29/02/2024; Chấp nhận (Accepted): 14/03/2024

TÓM TẮT

Bài báo này thiết kế bộ điều khiển trượt dựa vào mặt trượt PID và hàm hyperbolic tangent để ổn định điện áp cho bộ chuyển đổi Buck. Đây là bộ chuyển đổi được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng khác nhau như bộ sạc năng lượng mặt trời, xe điện và thám hiểm không gian. Mặt trượt PID được sử dụng thay cho mặt trượt truyền thống. Bộ điều khiển đề xuất được thiết kế để cải thiện hiệu suất, khả năng hoạt động chính xác của bộ chuyển đổi Buck. Tính ổn định của bộ điều khiển đề xuất được kiểm tra bằng lý thuyết Lyapunov để đảm bảo tính ổn định vòng kín. Các kết quả mô phỏng với MATLAB/Simulink cho thấy hiệu quả của phương pháp đề xuất với sai số xác lập tiến về 0, thời gian tăng đạt 0.0055(s), thời gian xác lập là 0.0082(s), độ vọt lố là 0.021(%).

Từ khóa: bộ chuyển đổi Buck, điều khiển trượt, PID, hàm hyperbolic tangent, MATLAB/Simulink

ABSTRACT

This article designs a sliding mode control based on PID sliding surface and hyperbolic tangent function to voltage regulation for a Buck converter. This converter is widely utilized in various applications such as solar chargers, electrical vehicles and space exploration. The PID sliding surface is used to replace the conventional sliding surface. The proposed controller is designed to improve performances and correct operation of the Buck converter. The stability of the proposed controller is verified by using a Lyapunov theorem to guarantee closed-loop stability. Simulation results in MATLAB/Simulink show the effectiveness of the proposed method with the steady-state error converges to zero, the rising time achieves 0.0055(s), the settling time is about 0.0082(s), the overshoot is 0.021(%)

Keywords: Buck converter, sliding mode control, PID, hyperbolic tangent function, MATLAB/Simulink

1. GIỚI THIỆU

Bộ chuyển đổi DC-DC thường được sử dụng để chuyển đổi điện áp DC từ cấp độ này đến cấp độ thấp hơn hoặc cao hơn [1]. Với dòng điện gọn sóng nhỏ, cấu trúc đơn giản, kích thước nhỏ, chi phí thấp và các ưu điểm khác, bộ chuyển đổi Buck được sử dụng rộng rãi trong việc chuyển đổi nguồn điện, bộ điều chỉnh điện áp, mạch sạc lithium, hệ thống lưu trữ năng lượng siêu tụ điện [2], xe điện và thám hiểm không gian [1], [3].

Một trong những vấn đề chính của bộ chuyển đổi Buck là thiết kế kỹ thuật điều khiển để ổn định điện áp, cải thiện hiệu suất và hoạt động chính xác [4]. Về vấn đề này, nghiên cứu [1] đã phát triển bộ điều khiển trượt đầu cuối không kỳ dị thích nghi sử dụng giám sát mờ, bộ điều khiển PID dựa vào thuật toán tiến hóa vi phân cải tiến trong [2], trong [3] đã thực hiện điều khiển dự báo sử dụng mạng nơ-ron, điều khiển trượt được đề xuất trong [4], [5], phương pháp logic mờ được thực hiện trong [6], điều khiển trượt bậc 2 thích nghi trong [7].

Do cấu trúc đơn giản và hoạt động bền vững chống lại sự không chắc chắn về tham số và nhiễu ngoài, bộ điều khiển trượt (sliding mode control: SMC) đã trở thành một phương pháp phổ biến và đã được áp dụng thành công cho nhiều hệ thống khác nhau [1]. Tuy nhiên, một trong những hạn chế của điều khiển trượt là xuất hiện hiện tượng dao động với tần số cao (chattering) quanh mặt trượt. Hiện tượng này là do sự không hoàn hảo và chậm trễ thời gian trong chuyển mạch, do thiết bị truyền động hằng số thời gian nhỏ, các mạch công suất dễ bị quá nhiệt dẫn đến hư hỏng, phá hủy các chuyển động cơ khí [8], [9]. Để khắc phục hiện tượng này, bài báo đề xuất sử dụng mặt trượt PID và hàm hyperbolic tangent

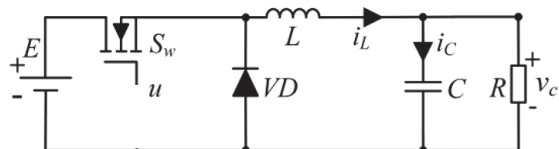
(còn gọi là hàm *tanh*) để ổn định điện áp cho bộ chuyển đổi Buck.

Bài báo này được tổ chức gồm 4 phần: giới thiệu được trình bày ở phần 1, phần 2 trình bày phương pháp thiết kế bộ điều khiển trượt PID và hàm hyperbolic tangent bộ chuyển đổi Buck, kết quả và bàn luận được trình bày trong phần 3 và phần 4 là kết luận.

2. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT PID VÀ HÀM HYPERBOLIC TANGENT BỘ CHUYỂN ĐỔI BUCK

2.1. Mô tả toán học bộ chuyển đổi Buck

Sơ đồ bộ chuyển đổi Buck như Hình 1 [10].



Hình 1. Sơ đồ bộ chuyển đổi Buck

Trong mạch chuyển đổi, E là nguồn điện áp DC ngõ vào với $0 < E < E_{\max}$, trong đó E_{\max} là giá trị lớn nhất của E ; v_c là giá trị của điện áp tải; VD là diode giới hạn dòng điện; S_w là công tắc nguồn thường bị chi phối bởi MOSFET và IGBT và công nghệ điều chế độ rộng xung (PWM) được áp dụng để S_w hiện thực điều khiển chu kỳ làm việc, tức là chu kỳ làm việc $u \in [0,1]$; L , C , và R là cuộn cảm, tụ điện và điện trở tải tương ứng; i_L và i_C là dòng điện chạy qua cuộn cảm và tụ điện tương ứng.

Giả sử rằng bộ chuyển đổi Buck hoạt động ở chế độ dẫn truyền liên tục (CCM), tức là dòng điện cảm ứng $i_L \neq 0$. Dựa trên định luật Kirchhoff và mô hình mô tả hoạt động BẬT/TẮT của bộ chuyển đổi có thể được thể hiện tương ứng như (1) dựa trên cách tiếp cận của mô hình hóa không gian trạng thái trung bình.

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(uE - v_c) \\ \frac{dv_c}{dt} = \frac{1}{C}\left(i_L - \frac{v_c}{R}\right) \end{cases} \quad (1)$$

Đặt biến trạng thái như (2):

$$\begin{cases} x_1 = v_c \\ x_2 = \dot{x}_1 = \dot{v}_c \end{cases} \quad (2)$$

Lúc này, ta được (3):

$$\dot{x}_2 = \ddot{x}_1 = \dot{v}_c = -\frac{1}{CL}x_1 - \frac{1}{RC}x_2 + \frac{1}{CL}Eu \quad (3)$$

Đặt

$$f = -\frac{1}{CL}x_1 - \frac{1}{RC}x_2 \quad (4)$$

$$g = \frac{1}{CL}E \quad (5)$$

Ta được không gian trạng thái bộ

chuyển đổi Buck với nhiễu như (6):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f + gu + dt \end{cases} \quad (6)$$

Trong đó, $|dt| \leq D$ là nhiễu chưa biết

Định nghĩa:

$$e = x_{1d} - x_1 \quad (7)$$

Với x_d là điện áp mong muốn.

Mục tiêu điều khiển là $e \rightarrow 0$ và $\dot{e} \rightarrow 0$.

2.2. Thiết kế bộ điều khiển

Sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển trượt dựa vào mặt trượt PID và hàm tanh áp dụng cho bộ chuyển đổi Buck như Hình 2.



Hình 2. Sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển dựa vào mặt trượt PID và hàm tanh

Mặt trượt PID như (8):

$$s = K_p e + K_I \int e dt + K_D \frac{de}{dt} \quad (8)$$

Lấy đạo hàm bậc 1 và 2 của (7), ta được (9) và (10):

$$\dot{e} = \dot{x}_{1d} - \dot{x}_1 \quad (9)$$

$$\ddot{e} = \ddot{x}_{1d} - \ddot{x}_1 \quad (10)$$

Đạo hàm của (8) như (11):

$$\dot{s} = K_p \dot{e} + K_I e + K_D \ddot{e} \quad (11)$$

Thế (6) và (10) vào (11), ta được (12):

$$\begin{aligned} \dot{s} &= K_p \dot{e} + K_I e + K_D [\ddot{x}_{1d} - \ddot{x}_1] \\ &= K_p \dot{e} + K_I e + K_D [\ddot{x}_{1d} - f - gu - dt] \end{aligned} \quad (12)$$

Với luật tiếp cận hàm mũ như (13) [11]:

$$\dot{s} = -\varepsilon \text{sign}(s) - ks, \quad \varepsilon > 0, k > 0 \quad (13)$$

Thiết kế bộ điều khiển trượt PID như (14):

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{K_D g} (K_p \dot{e} + K_I e + K_D [\ddot{x}_{1d} - f] - \\ &+ \varepsilon \text{sign}(s) + ks) \end{aligned} \quad (14)$$

Hàm Lyapunov được định nghĩa như (15):

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (15)$$

Đạo hàm của (15) như (16):

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} = s(K_p \dot{e} + K_I e + K_D [\ddot{x}_{1d} - f - gu - dt]) \\ &= s \left(K_p \dot{e} + K_I e + K_D \left[\ddot{x}_{1d} - f - g \left(\frac{1}{K_D g} (K_p \dot{e} + K_I e + K_D [\ddot{x}_{1d} - f] + \varepsilon \text{sign}(s) + ks) \right) - dt \right] \right) \\ &= s[-\varepsilon \text{sign}(s) - ks - K_D dt] \\ &= -ks^2 - \varepsilon |s| - sK_D dt \leq -ks^2 = -2kV \end{aligned} \quad (16)$$

Sử dụng Bổ đề 1.3 [11], ta có: (17)

$$V \leq e^{-2k(t-t_0)}V(t_0) \quad (17)$$

Với hàm \tanh , ta có luật điều khiển như (18):

$$u = \frac{1}{K_D g} \left(K_p \dot{e} + K_I e + K_D [\ddot{x}_{1d} - f] + \varepsilon \tanh\left(\frac{s}{\delta}\right) + ks \right) \quad (18)$$

Trong đó, $\delta > 0$

Theo Bổ đề 1.2 [11], ta có (19)

$$|s| - s \tanh\left(\frac{s}{\delta}\right) \leq \mu\delta \quad (19)$$

Thì

$$\varepsilon |s| - \varepsilon s \tanh\left(\frac{s}{\delta}\right) \leq \varepsilon\mu\delta \quad (20)$$

Suy ra

$$-\varepsilon s \tanh\left(\frac{s}{\delta}\right) \leq -\varepsilon |s| + \varepsilon\mu\delta \quad (21)$$

Vì thế

$$\begin{aligned} s\dot{s} &= s(K_p \dot{e} + K_I e + K_D [\ddot{x}_{1d} - f - g u - dt]) \\ &= s \left(K_p \dot{e} + K_I e + K_D [\ddot{x}_{1d} - f - g \left(\frac{1}{K_D g} (K_p \dot{e} + K_I e + K_D [\ddot{x}_{1d} - f] + \varepsilon \tanh\left(\frac{s}{\delta}\right) + ks) \right) - dt \right] \right) \\ &= s \left(-\varepsilon \tanh\left(\frac{s}{\delta}\right) - ks - K_D dt \right) \\ &= -ks^2 - \varepsilon s \tanh\left(\frac{s}{\delta}\right) - s K_D dt \\ &\leq -ks^2 - \varepsilon |s| + \varepsilon\mu\delta - s K_D dt \\ &\leq -ks^2 + \varepsilon\mu\delta = -2kV + b \end{aligned} \quad (22)$$

Trong đó, $b = \varepsilon\mu\delta$

Lúc này, $\dot{V} = -2kV + b$, Sử dụng Bổ đề 1.3, ta có (23):

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq e^{-2k(t-t_0)}V(t_0) + be^{-2kt} \int e^{2k\tau} d\tau \\ &= e^{-2k(t-t_0)}V(t_0) + \frac{be^{-2kt}}{2k} (e^{-2kt} - e^{-2kt_0}) \\ &= e^{-2k(t-t_0)}V(t_0) + \frac{b}{2k} (1 - e^{-2k(t-t_0)}) \\ &= e^{-2k(t-t_0)}V(t_0) + \frac{\varepsilon\mu\delta}{2k} (1 - e^{-2k(t-t_0)}) \end{aligned} \quad (23)$$

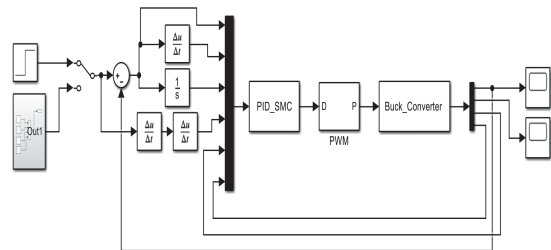
Vì thế

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V(t) \leq \frac{\varepsilon\mu\delta}{2k} \quad (24)$$

Theo bất đẳng thức (24), chúng ta có thể kết luận rằng sai số bám là hội tụ tiệm cận và độ chính xác hội tụ được xác định bởi ε, δ, k .

3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển đề xuất áp dụng cho bộ chuyển đổi Buck trong MATLAB/Simulink như Hình 3.



Hình 3. Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển đề xuất trong MATLAB/Simulink

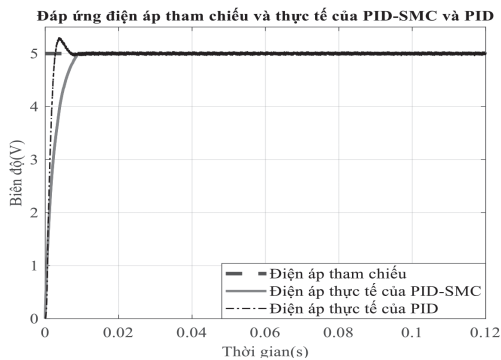
Các thông số của bộ chuyển đổi Buck như sau [12]: $E = 12(V)$, $L = 50(\mu H)$, $C = 220(\mu F)$, $R = 10(\Omega)$ và $f = 22(kHz)$. Với phương pháp thử và sai, các thông số của bộ điều khiển đề xuất được chọn như sau: $K_p = 11.5e3$, $K_I = 12e2$, $K_D = 15e-3$, $k = 4.5e2$, $\varepsilon = 5.5e2$ và $\delta = 0.1$.

Đáp ứng và sai số giữa điện áp tham chiếu 5(V) và điện áp thực tế của bộ chuyển đổi Buck với bộ điều khiển PID-SMC so với bộ điều khiển PID truyền thống được trình bày như Hình 4 và Hình 5 tương ứng. Kết quả từ Hình 4 và Hình 5 cho thấy rằng điện áp thực tế của bộ chuyển đổi Buck hội tụ về điện áp tham chiếu với sai số xác lập tiến về 0, thời gian tăng đạt 0.0055(s), thời gian xác lập là 0.0082(s), độ vọt lố là 0.021(%). Các chỉ tiêu chất lượng đạt được của bộ điều khiển đề xuất hiệu quả hơn so với bộ điều khiển PID truyền thống [12] và được trình bày như Bảng 1. Tín hiệu điều khiển của bộ điều khiển PID-SMC đề xuất

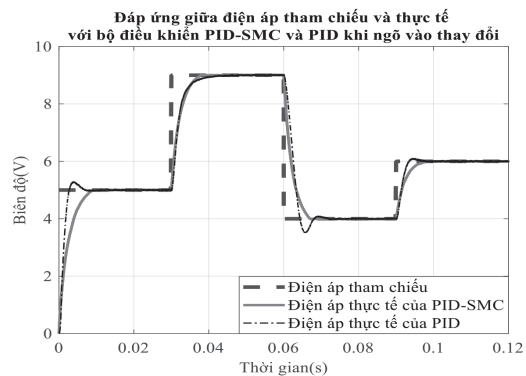
có biên độ đỉnh – đỉnh giảm 62.89% và tần số dao động giảm 32.86% so với tín hiệu điều khiển của bộ điều khiển SMC truyền thống như Hình 6.

Bảng 1. Chỉ tiêu chất lượng đạt được của bộ điều khiển PID-SMC

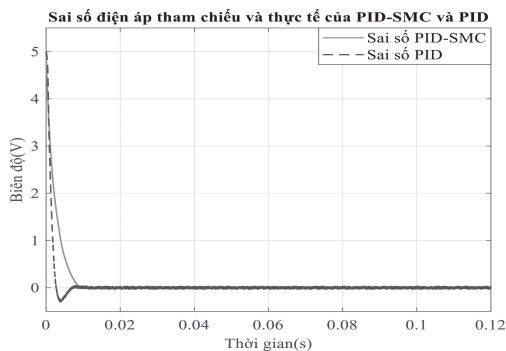
Chỉ tiêu	Thời gian tăng (s)	Thời gian xác lập (s)	Độ vọt lố (%)	Sai số xác lập (V)
PID-SMC	0.0055	0.0082	0.021	1.5458e-4
PID [12]	-	0.01	6.8	0.029



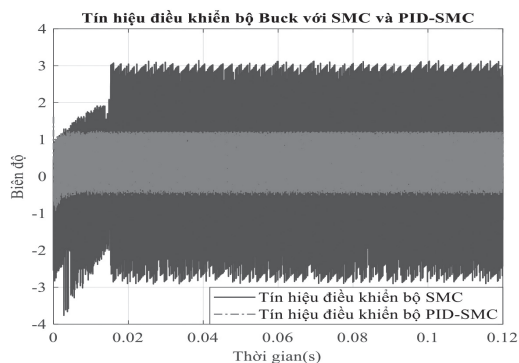
Hình 4. Đáp ứng giữa điện áp tham chiếu 5(V) và thực tế với bộ điều khiển PID-SMC và PID



Hình 7. Đáp ứng giữa điện áp tham chiếu và thực tế với bộ điều khiển PID-SMC và PID khi ngõ vào thay đổi



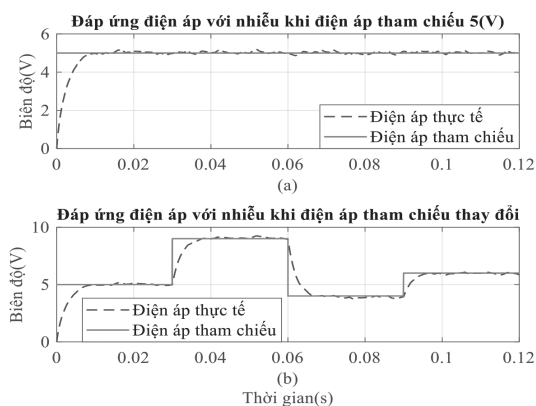
Hình 5. Sai số giữa điện áp tham chiếu 5(V) và thực tế với bộ điều khiển PID-SMC và PID



Hình 6. Tín hiệu điều khiển bộ chuyển đổi Buck với SMC và PID-SMC

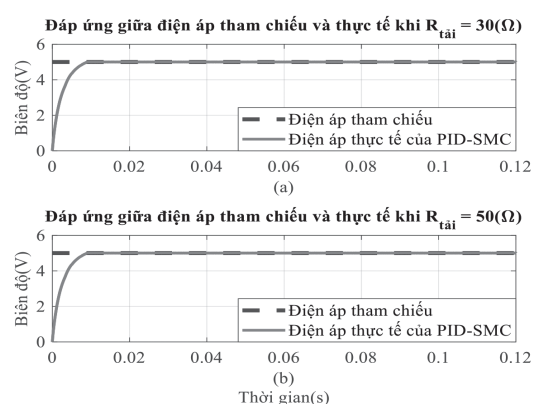
Hình 7 trình bày đáp ứng giữa điện áp tham chiếu và thực tế với bộ điều khiển PID-SMC so với bộ điều khiển PID truyền thống khi ngõ vào thay đổi. Điện áp thực tế của bộ chuyển đổi Buck vẫn hội tụ về điện áp tham chiếu với sai số xác lập tiến về 0 và không xảy ra hiện tượng vọt lố.

Hình 8 và Hình 9 trình bày kết quả đáp ứng điện áp của bộ điều khiển đề xuất trong trường hợp có nhiễu tác động ở điện áp ngõ ra (giả sử nhiễu cảm biến với công suất 0.0001(W), thời gian lấy mẫu $1e-6$) và điện trở tải thay đổi ($R = 30(\Omega)$ và $R = 50(\Omega)$). Điện áp thực tế của bộ chuyển đổi Buck vẫn hội tụ về điện áp tham chiếu với sai số xác lập tiến về 0. Điều này cho thấy sự phù hợp, tính bền vững của bộ điều khiển PID-SMC trong ứng dụng điều khiển ổn định điện áp cho bộ chuyển đổi Buck.



Hình 8. Đáp ứng điện áp của bộ điều khiển PID-SMC với nhiều trạng khi $V_{ref} = 5(V)$ và V_{ref} thay đổi

(a) Đáp ứng điện áp với nhiều trạng khi $V_{ref} = 5(V)$;
(b) Đáp ứng điện áp với nhiều trạng khi V_{ref} thay đổi



Hình 9. Đáp ứng điện áp của bộ điều khiển PID-SMC khi $V_{ref} = 5(V)$ với điện trở tải thay đổi

(a) Đáp ứng điện áp khi $R_{tải} = 30(\Omega)$;
(b) Đáp ứng điện áp khi $R_{tải} = 50(\Omega)$;

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thiết kế bộ điều khiển PID-SMC để ổn định điện áp cho bộ chuyển đổi Buck. Tính ổn định của hệ thống được chứng minh bằng lý thuyết Lyapunov. Các chỉ tiêu đạt được cho thấy hiệu quả, sự phù hợp của bộ điều khiển đề xuất so với bộ điều khiển PID truyền thống trong điều khiển ổn định điện áp của bộ chuyển đổi Buck với sai số xác lập tiến về 0, thời gian tăng đạt 0.0055(s), thời gian xác lập là 0.0082(s), độ vọt lố là 0.021(%). Tín hiệu điều khiển của bộ điều khiển đề xuất có biên độ đỉnh – đỉnh giảm 62.89% và tần số dao động giảm 32.86% so với tín hiệu điều khiển của bộ điều khiển SMC truyền thống. Ngoài ra, bộ điều khiển đề xuất cũng đã chứng tỏ sự bền vững khi được khảo sát với trường hợp có nhiễu tác động ở điện áp ngõ ra và điện trở tải thay đổi. Những kết quả đạt được từ mô phỏng đã chứng minh rằng bộ điều khiển PID-SMC được đề xuất có khả năng điều khiển hiệu quả bộ chuyển đổi Buck với độ chính xác cao. Trong thời gian tới, nghiên cứu sẽ áp dụng các bộ điều khiển thông minh và tối ưu kết hợp với bộ điều khiển PID-SMC đề xuất cho bộ chuyển đổi Buck này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] E. Badfar and R. Abdollahi, “Design of an adaptive nonsingular terminal sliding mode using supervisory fuzzy for the output voltage control of a buck converter,” *JART*, vol. 18, no. 2, pp. 77–88, 2020, doi: 10.22201/icat.24486736e.2020.18.2.1000.
- [2] Y. Zhao, Q. Qiu, and X. Zhao, “PID Parameter Tuning for Buck Controllers Based on an Improved Differential Evolution Algorithm,” *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2029, no. 1, pp. 1–9, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2029/1/012059.
- [3] S. Saadatmand, P. Shamsi, and M. Ferdowsi, “The Voltage Regulation of a Buck Converter Using a Neural Network Predictive Controller,” in *2020 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, College Station, TX, USA: IEEE, 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/TPEC48276.2020.9042588.
- [4] S. Huerta-Moro, O. Martínez-Fuentes, V. R. Gonzalez-Diaz, and E. Tlelo-Cuautle,

- “On the Sliding Mode Control Applied to a DC-DC Buck Converter,” *Technologies*, vol. 11, no. 2, pp. 1–14, Feb. 2023, doi: 10.3390/technologies11020033.
- [5] S. B. Hamed, M. B. Hamed, and L. Sbita, “Robust Voltage Control of a Buck DC-DC Converter: A Sliding Mode Approach,” *Energies*, vol. 15, no. 17, pp. 1–21, 2022, doi: 10.3390/en15176128.
- [6] U. SaiSangeeth and N. K. Arun, “Fuzzy Logic Control of DC-DC Buck Converter in DC Distribution System with Constant Power Load,” in *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence Techniques for Electrical Engineering Systems (AITEES 2022)*, vol. 3, V. E. Balas, R. C. Bansal, S. K. Mangipudi, and S. Dawn, Eds., in Atlantis Highlights in Intelligent Systems, vol. 3. , Dordrecht: Atlantis Press International BV, 2023, pp. 180–191. doi: 10.2991/978-94-6463-074-9_16.
- [7] Y. Wang, W. Zhang, Y. Yang, C. Xue, S. Yuan, and H. Zhang, “Adaptive Second-Order Sliding Mode Control of Buck Converters with Multi-Disturbances,” *Energies*, vol. 15, no. 14, pp. 1–19, 2022, doi: 10.3390/en15145139.
- [8] H. U. Suleiman, M. B. Murazu, T. A. Zarma, A. T. Salawudeen, S. Thomas, and A. A. Galadima, “Methods of Chattering Reduction in Sliding Mode Control: A Case Study of Ball and Plate System,” in *2018 IEEE 7th International Conference on Adaptive Science & Technology (ICAST)*, Accra: IEEE, Aug. 2018, pp. 1–8. doi: 10.1109/ICASTECH.2018.8506783.
- [9] L. Guo, H. Zhao, and Y. Song, “A Nearly Optimal Chattering Reduction Method of Sliding Mode Control With an Application to a Two-wheeled Mobile Robot.” arXiv, 2021. Accessed: Jan. 19, 2024. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2110.12706>
- [10] Y. Wang, W. Zhang, and C. Xue, “Adaptive Continuous Sliding Mode Control of Buck Converters With Multidisturbances Based on Zero-Crossing Detection,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 72643–72657, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3188760.
- [11] Jinkun Liu, *Sliding Mode Control Using MATLAB*. Academic Press, 2017.
- [12] A. S. Samosir, T. Sutikno, and L. Mardiyah, “Simple formula for designing the PID controller of a DC-DC buck converter,” *IJPEDS*, vol. 14, no. 1, pp. 327–336, 2023, doi: 10.11591/ijpeds.v14.i1.pp327-336.