VOLTAGE CONTROL OF BUCK-BOOST CONVERTER USING SLIDING MODE CONTROL BASED ON PI SLIDING SURFACE

Pham Thanh Tung*, Le Thanh Quang Duc
Vinh Long University of Technology Education

ARTICLE INFO

Received: 12/12/2021
Revised: 20/01/2022
Published: 11/02/2022

KEYWORDS

Sliding mode control
Buck-Boost
PI sliding surface
Voltage control
MATLAB/Simulink

ABSTRACT

This paper presents a method to design a sliding mode control (SMC) based on proportional integral (PI) sliding surface for a Buck-Boost converter. The SMC methodologies emerged as an effective tool to tackle uncertainty and disturbances, which are inevitable in most of the practical systems and is a robust feedback control method. However, one of the drawbacks of the SMC is the high frequency oscillation (chattering) around the sliding surface. This paper uses the SMC combined with PI sliding surface to overcome chattering phenomenon. The proposed method is test to voltage tracking control for the Buck-Boost converter. Simulation results in MATLAB/Simulink show that the proposed algorithm is more effective than the SMC internal model and traditional PID with the rising time achieves 0.0022(s), the overshoot converges to zero, the steady-state error is 0.014(s), and the settling time is about 0.0041(s).

ĐIỀU KHIỂN ĐIỆN ÁP BỘ CHUYỂN ĐỔI BUCK-BOOST SỬ DỤNG ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT DỰA VÀO MẶT TRƯỢT PI

Phạm Thanh Tùng*, Lê Thanh Quang Đức
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 12/12/2021
Ngày hoàn thiện: 20/01/2022
Ngày đăng: 11/02/2022

TỪ KHÓA

Điều khiển trượt
Buck-Boost
Mặt trượt PI
Điều khiển điện áp
MATLAB/Simulink

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày phương pháp thiết kế bộ điều khiển trượt dựa vào mặt trượt tích phân tỷ lệ cho bộ chuyển đổi Buck-Boost. Phương pháp điều khiển trượt xuất hiện như một công cụ hiệu quả để giải quyết sự không chắc chắn và nhiễu ngoài trong hầu hết các hệ thống thực tế và là một trong các phương pháp điều khiển hồi tiếp bền vững. Tuy nhiên, một trong những nhược điểm của điều khiển trượt là hiện tượng dao động tần số cao (chattering) quanh mặt trượt. Bài báo này sử dụng điều khiển trượt kết hợp với mặt trượt tích phân tỷ lệ để khắc phục hiện tượng chattering. Phương pháp đề xuất được kiểm chứng để điều khiển bám điện áp bộ chuyển đổi Buck-Boost. Kết quả mô phỏng với MATLAB/Simulink cho thấy hiệu quả của phương pháp đề xuất được so sánh với điều khiển trượt mô hình nội và điều khiển PID với thời gian tăng đạt 0,0022(s), độ vọt lố hội tụ về 0, sai số xác lập là 0,014(s), thời gian xác lập là 0,0041(s).

DOI: https://doi.org/10.34238/tnu-jst.5342

* Corresponding author. *Email: tungpt@vlute.edu.vn*

1. Giới thiệu

Bộ chuyển đổi DC-DC là một loại bộ điều chỉnh được sử dụng để chuyển đổi điện áp DC từ một mức này sang mức khác sao cho điện áp ngõ ra phải được điều chỉnh [1]. Bộ chuyển đổi Buck-Boost là một trong các bộ chuyển đổi DC-DC được sử dụng rộng rãi trong nhiều ứng dụng thực tế như trong hệ thống năng lượng tái tạo [2], hệ thống lưu trữ năng lượng DC, hệ thống điều chỉnh nguồn DC, ngành hàng không, công nghệ vũ trụ [3]. Điện áp ngõ ra của bộ chuyển đổi này có giá trị âm và giá trị này có thể nhỏ hơn hoặc lớn hơn điện áp ngõ vào [1]. Điện áp ngõ ra của Buck-Boost phụ thuộc vào thời gian hoạt động của chuyển mạch IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) điều khiển bằng điều chế độ rộng xung (pulse-width modulation - PWM) [4]. Nhiều nghiên cứu đã ứng dụng các phương pháp khác nhau để điều khiển bộ chuyển đổi này, tiêu biểu như trong [1], [2] đã điều khiển điện áp bộ chuyển đổi Buck-Boost với bộ điều khiển vi tích phân tỷ lệ (PID: Proportional Integral Derivative), điều khiển trượt dựa vào mô hình nội được thực hiện trong [3], trong [4], [5] đã điều khiển bộ chuyển đổi Buck-Boost với bộ điều khiển PI, bộ điều khiển LMI (linear matrix inequalities) được thực hiện trong [6] để ổn định dòng điện bộ chuyển đổi Buck-Boost và [7] đã nghiên cứu bộ điều khiển trượt tích phân cho bộ Buck-Boost với thời gian xác lập là 0,05(s) và độ vọt lố là 60(%) ở chattering ngõ ra. Trong các nghiên cứu đã công bố, bài toán chattering đã được quan tâm nhưng còn hạn chế. Vì thế, nghiên cứu này đề xuất sử dụng bộ điều khiển trượt dựa vào mặt trượt PI để áp dụng điều khiển ổn định điện áp ngõ ra bộ Buck-Boost.

Phương pháp điều khiển trượt xuất hiện như một công cụ hiệu quả để giải quyết sự không chắc chắn và nhiễu ngoài trong hầu hết các hệ thống thực tế và là một trong các phương pháp điều khiển hồi tiếp bền vững [8]. Cấu trúc thay đổi của SMC làm cho nó có khả năng chuyển đổi giữa các luật điều khiển khác nhau. Vì SMC không nhạy cảm với những thay đổi và nhiễu ngoài nên nó trở thành sự lựa chọn cạnh tranh giữa các phương pháp điều khiển khác [9]. Tuy nhiên, đối với biên độ của luật điều khiển trượt nếu không được lựa chọn phù hợp sẽ gây ra hiện tượng dao động tần số cao (còn gọi là chattering) quanh mặt trượt. Hiện tượng chattering 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 [10]. Nhiều nghiên cứu đã đưa ra các giải pháp để khắc phục hiện tượng chattering trong điều khiển trượt, tiêu biểu như trong [11] đã thay hàm signum bằng hàm bão hoà, sử dụng mạng nơ-ron Elman; mạng nơ-ron được sử dụng trong [12]; điều khiển trượt đầu cuối thích nghi được thảo luận trong [13]; trong [14] thực hiện với hàm Hyperbolic Tangent.

Bài báo này được tổ chức gồm 5 phần: phần 2 trình bày mô hình toán học của bộ chuyển đổi Buck-Boost, thiết kế bộ điều khiển trượt dựa vào mặt trượt PI được trình bày trong phần 3, kết quả mô phỏng và đánh giá được trình bày trong phần 4 và phần 5 là kết luận.

2. Mô hình toán học của bộ chuyển đổi Buck-Boost

Sơ đồ nguyên lý và mạch tương đương của bộ chuyển đổi Buck-Boost ở hai trạng thái on và off được biểu diễn ở Hình 1 [15].

** Trạng thái đóng (on)*

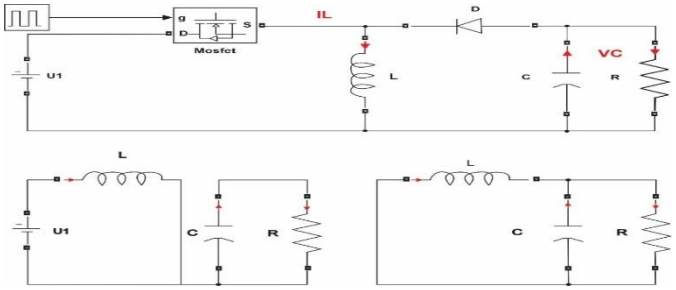
Trong suốt trạng thái đóng, cuộc dây được cấp điện bởi u_1 xác định như (1). Đồng thời không có dòng chạy đến tụ điện và điện trở, trong đó $i_L = 0$ và được xác định như (2).

$$u_1 = L\frac{di_L}{dt} \tag{1}$$

$$0 = C\frac{dV_C}{dt} + \frac{V_C}{R} \tag{2}$$

Đặt biến trạng thái như (3): $x_1 = i_L; x_2 = V_C$ (3)

Thế (3) vào (1) và (2) ta được (4) và (5):



Hình 1. *Sơ đồ nguyên lý và mạch tương đương của bộ chuyển đổi Buck-Boost*

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{L}u_1 \tag{4}$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{RC}x_2 \tag{5}$$

Phương trình trạng thái của bộ Buck-Boost ở trạng thái đóng như (6):

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & -\frac{1}{RC}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\frac{1}{L}\\ 0\end{bmatrix}u_1 \tag{6}$$

** Trạng thái mở (off)*

Ở trạng thái mở, ta có $u_1 = 0$, nhưng trạng thái ngõ ra của V_C và i_L đảo ngược cực do hiện tượng phóng điện của cuộn cảm và được biểu diễn bởi (7) và (8):

$$-V_C = -L\frac{di_L}{dt} \tag{7}$$

$$-i_L = C\frac{dV_C}{dt} + \frac{V_C}{R} \tag{8}$$

Đặt biến trạng thái tương tự như (3), ta có (9) và (10):

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{L}x_2 \tag{9}$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{C}x_1 - \frac{1}{RC}x_2 \tag{10}$$

Phương trình trạng thái của bộ Buck-Boost ở trạng thái mở như (11):

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & \frac{1}{L}\\ -\frac{1}{C} & -\frac{1}{RC}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0\\ 0\end{bmatrix}u_1 \tag{11}$$

Ta sẽ xác định ma trận trung bình của $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$ ở trạng thái đóng và mở với chu kỳ chuyển mạch d như (12) và (13):

$$\begin{aligned}\overline{\boldsymbol{A}} &= \boldsymbol{A}_{(ON)}d + \boldsymbol{A}_{(OFF)}(1-d) = \begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & -\frac{1}{RC}\end{bmatrix}d + \begin{bmatrix}0 & \frac{1}{L}\\ -\frac{1}{C} & -\frac{1}{RC}\end{bmatrix}(1-d)\\ &= \begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & -\frac{d}{RC}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0 & \frac{1-d}{L}\\ -\frac{1-d}{C} & -\frac{1-d}{RC}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & \frac{1-d}{L}\\ -\frac{1-d}{C} & -\frac{1}{RC}\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{12}$$

$$\overline{\boldsymbol{B}} = \boldsymbol{B}_{(ON)}d + \boldsymbol{B}_{(OFF)}(1-d) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} d + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} (1-d) = \begin{bmatrix} \frac{d}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{13}$$

Ta có mô hình không gian trạng thái bộ Buck-Boost như (14) và (15):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1-d}{L} \\ -\frac{1-d}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d}{L} \\ 0 \end{bmatrix} u_1 \tag{14}$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_C \end{bmatrix} \tag{15}$$

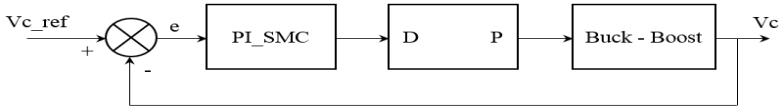
3. Thiết kế bộ điều khiển trượt dựa vào mặt trượt PI

Trong phần này, nghiên cứu tiến hành thiết kế bộ điều khiển trượt với mặt trượt PI (PI-SMC) bộ chuyển đổi Buck-Boost sao cho điện áp thực tế bám theo điện áp tham chiếu và chứng minh với luật điều khiển được thiết kế ổn định theo Lyapunov.

Luật điều khiển PI-SMC gồm 2 phần:

- Luật điều khiển chuyển mạch $u_{sw}(t)$ (switching control) để đưa trạng thái của hệ thống đến mặt trượt $s(t)$ (sliding surface);
- Luật điều khiển đẳng trị $u_{eq}(t)$ (equivalent control) để giữ trạng thái của hệ thống ổn định trên mặt trượt;

Sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển trượt với mặt trượt PI được trình bày như Hình 2:



Hình 2. *Sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển trượt với mặt trượt PI*

Mặt trượt được định nghĩa như (16) [16]:

$$s(t) = s_1(t) + s_2(t) = 2\dot{e}(t) + (\lambda + 2\alpha)e(t) + \alpha^2 \int_0^t e(\tau)d\tau, \lambda > 0, \alpha > 0 \tag{16}$$

Trong đó, mặt trượt tỷ lệ $s_1(t)$ như (17) và mặt trượt tích phân $s_2(t)$ như (18):

$$s_1(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right) e(t) \tag{17}$$

$$s_2(t) = \left(\frac{d}{dt} + \alpha \right)^2 \xi_e(t); \; \xi_e(t) = \int_0^t e(\tau)d\tau \tag{18}$$

Với sai số và đạo hàm của nó như (19), (20) và (21):

$$e(t) = v_{cref}(t) - v_c(t) \tag{19}$$

$$\dot{e}(t) = \dot{v}_{cref}(t) - \dot{v}_c(t) \tag{20}$$

$$\ddot{e}(t) = \ddot{v}_{cref}(t) - \ddot{v}_c(t) \tag{21}$$

Trong đó: $v_{cref}(t)$: điện áp tham chiếu, $v_c(t)$: điện áp thực tế

Đạo hàm của $s(t)$ như (22):

$$\dot{s}(t) = 2\ddot{e}(t) + \alpha^2 e(t) + (\lambda + 2\alpha)\left[\dot{v}_{cref}(t) + \frac{1}{C}x_1 + \frac{1}{RC}x_2 \right] - (\lambda + 2\alpha)\frac{x_1}{C}d \tag{22}$$

Với luật tiếp cận tốc độ hằng như (23):

$$\dot{s}(t) = -\eta sign(s(t)), \eta > 0 \quad (23)$$

Luật điều khiển trượt với mặt trượt PI như (24):

$$u_{PISMC}(t) = \frac{C}{x_1(\lambda + 2\alpha)}\left[2\ddot{e}(t) + \alpha^2 e(t) + (\lambda + 2\alpha)\left[\dot{v}_{cref}(t) + \frac{1}{C}x_1 + \frac{1}{RC}x_2\right] + \eta sign(s(t))\right] \quad (24)$$

Để chứng minh tính ổn định, hàm Lyapunov được định nghĩa như (25) [3]:

$$u_{PISMC}(t) = \frac{C}{x_1(\lambda + 2\alpha)}\left[2\ddot{e}(t) + \alpha^2 e(t) + (\lambda + 2\alpha)\left[\dot{v}_{cref}(t) + \frac{1}{C}x_1 + \frac{1}{RC}x_2\right] + \eta sign(s(t))\right] \quad (25)$$

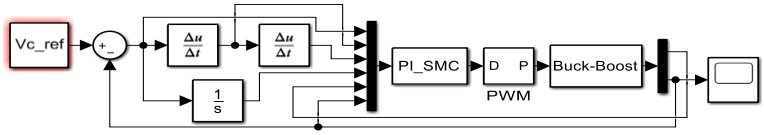
Đạo hàm của (25) như (26):

$$\dot{V}(t) = s(t)\dot{s}(t) = -s(t)\eta sign(s(t)) = -\eta|s(t)| < 0 \quad (26)$$

Trong đó, $\eta > 0$. Thêm vào đó, sai số $e(t)$ sẽ hội tụ về 0 dẫn theo $s(t) \to 0$ khi $t \to \infty$. Vì thế, $e(t), \dot{e}(t) \to 0$ khi $t \to \infty$.

4. Kết quả mô phỏng và đánh giá

Sơ đồ MATLAB/Simulink mô phỏng bộ điều khiển trượt với mặt trượt PI điều khiển bộ chuyển đổi Buck-Boost được trình bày như Hình 3 sau:



Hình 3. *Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển trượt với mặt trượt PI*

Thông số của bộ điều khiển PI-SMC được trình bày như Bảng 1 và Bảng 2 trình bày thông số của bộ chuyển đổi Buck-Boost.

Bảng 1. *Thông số bộ điều khiển PI-SMC*

Thông số	α	λ	η
Giá trị	2,5	50	30

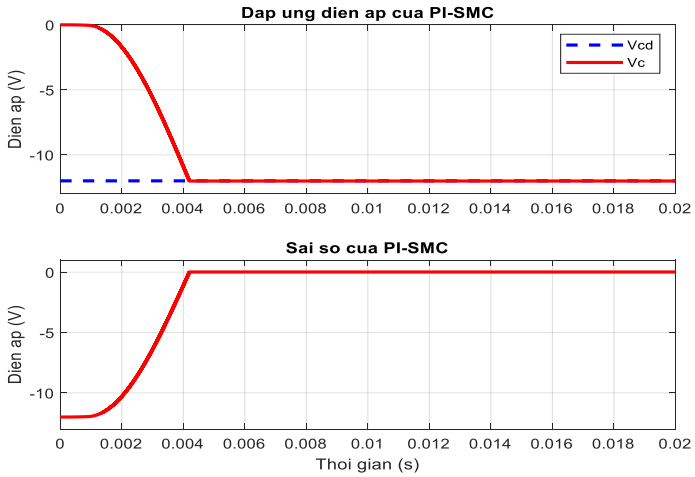
Bảng 2. *Thông số bộ chuyển đổi Buck-Boost* [16]

Thông số	**Ý nghĩa**	**Giá trị**	**Đơn vị**
C	Tụ điện	250	μF
L	Cuộn dây	1,5	mH
R	Điện trở tải	3	Ω
f	Tần số	10	kHz

Đáp ứng và sai số của bộ điều khiển đề xuất với tín hiệu vào $V_{cref} = -12(v)$ được trình bày như Hình 4. Quan sát đáp ứng ở Hình 4 ta thấy rằng, điện áp thực tế của bộ Buck-Boost bám theo điện áp tham chiếu với thời gian tăng đạt 0,0022 (s), thời gian xác lập là 0,0041 (s), độ vọt lố là 7,9195e-05 và sai số xác lập là 0,014 (v). Các chỉ tiêu chất lượng này được thể hiện như Bảng 3 và được so sánh với bộ điều khiển trượt mô hình nội và bộ PID truyền thống. Bộ điều khiển PI-SMC có thời gian tăng nhỏ hơn bộ PID (0,008(s)) và thời gian xác lập cũng nhỏ hơn bộ PID và điều khiển trượt mô hình nội (tương ứng là 0,16(s) và 0,78(s)).

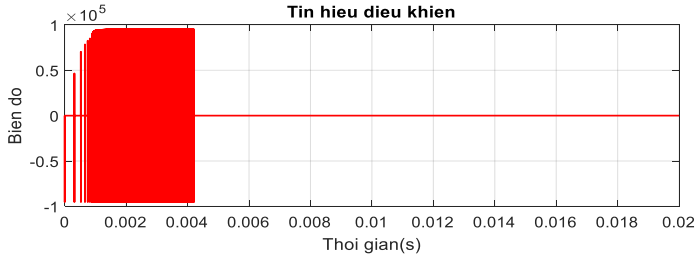
Bảng 3. *Các chỉ tiêu chất lượng của PI-SMC với* $V_{cref} = -12(v)$

Các chỉ tiêu chất lượng	**PI-SMC**	**SMC mô hình nội [3]**	**PID [1, 2]**
Thời gian tăng (s)	0,0022	-	0,008
Thời gian xác lập (s)	0,0041	0,78	0,16
Độ vọt lố (%)	7,9195e-05	-	-
Sai số xác lập	0,014	-	-



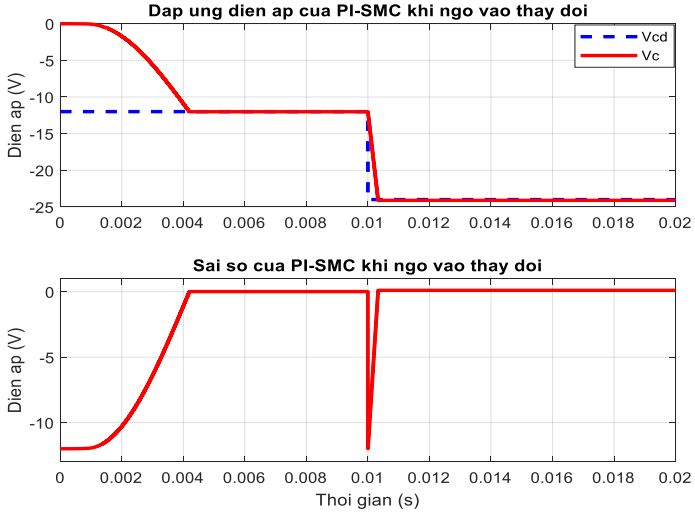
Hình 4. *Đáp ứng và sai số của PI-SMC bộ Buck-Boost*

Tín hiệu điều khiển của bộ PI-SMC cho bộ Buck-Boost được trình bày như Hình 5. Trong khoảng thời gian từ $0 \to 0,0041(s)$, biên độ của tín hiệu điều khiển khoảng 10^5 và khi hệ thống ở trạng thái xác lập thì biên độ của tín hiệu này hội tụ về 0 và không có dao động. Điều này phản ánh hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất với bộ chuyển đổi Buck-Boost.



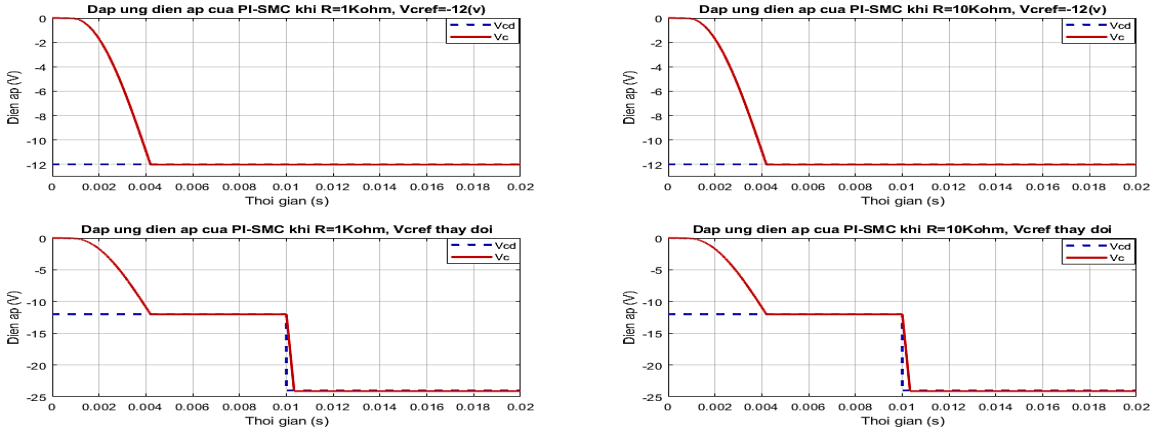
Hình 5. *Tín hiệu điều khiển bộ PI-SMC cho bộ Buck-Boost*

Với ngõ vào thay đổi từ $V_{cref} = -12 \to -24(v)$, đáp ứng điện áp của bộ chuyển đổi Buck-Boost với PI-SMC vẫn bám theo điện áp tham chiếu với sai số xác lập hội tụ về 0. Kết quả mô phỏng đáp ứng điện áp và sai số được trình bày như Hình 6.



Hình 6. *Đáp ứng và sai số của PI-SMC bộ Buck-Boost khi* $V_{cref} = -12 \to -24(v)$

Đáp ứng điện áp của bộ điều khiển đề xuất khi $R=3(\Omega)\rightarrow 1(k\Omega)$ và $R=3(\Omega)\rightarrow 10(k\Omega)$ với $V_{cref}=-12(v)$ và $V_{cref}=-12\rightarrow -24(v)$ được trình bày như Hình 7. Điện áp thực tế của bộ Buck-Boost vẫn bám theo điện áp tham chiếu trong thời gian hữu hạn với các chỉ tiêu chất lượng được trình bày như Bảng 4.



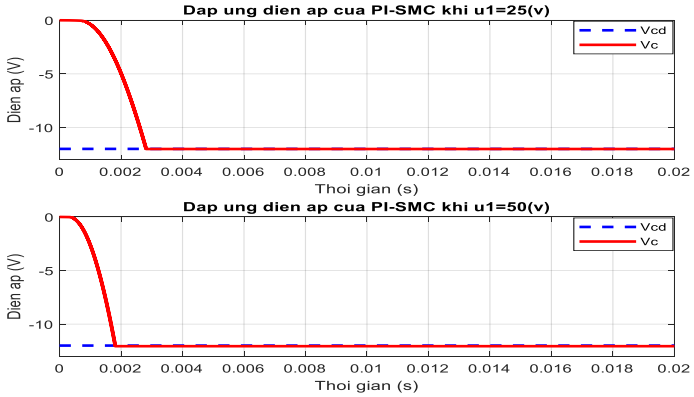
Hình 7. *Đáp ứng điện áp bộ PI-SMC khi R thay đổi*

Bảng 4. *Các chỉ tiêu chất lượng của PI-SMC khi* $R=3(\Omega)\rightarrow 1(k\Omega)$ *và* $R=3(\Omega)\rightarrow 10(k\Omega)$ *với* $V_{cref}=-12(v)$ *và* $V_{cref}=-12\rightarrow -24(v)$

Các chỉ tiêu chất lượng		Thời gian tăng (s)	Thời gian xác lập (s)	Độ vọt lố (%)	Sai số xác lập
$V_{cref}=-12(v)$	$R=3(\Omega)\rightarrow 1(k\Omega)$	0,0022	0,0041	3,9602e-07	0,014
	$R=3(\Omega)\rightarrow 10(k\Omega)$	0,0022	0,0041	3,9578e-08	0,014

Quan sát các chỉ tiêu chất lượng được trình bày trong Bảng 4 ta thấy rằng, thời gian tăng của đáp ứng điện áp khi $R=3(\Omega)\rightarrow 1(k\Omega)$ là 0,0022(s), thời gian xác lập là 0,0041(s), sai số xác lập là 0,014(v), độ vọt lố là 3,9602e-07 và khi $R=3(\Omega)\rightarrow 10(k\Omega)$ là 0,0022(s), 0,0041 (s), 0,014 (v), 3,9578e-08.

Đáp ứng điện áp của PI-SMC bộ chuyển đổi Buck-Boost khi $u_1=25(v)$ và $u_1=50(v)$ được trình bày như Hình 8. Quan sát kết quả mô phỏng ở Hình 8, điện áp thực tế của bộ chuyển đổi vẫn bám theo điện áp tham chiếu với các chỉ tiêu chất lượng được trình bày ở Bảng 5.



Hình 8. *Đáp ứng điện áp bộ PI-SMC khi* $u_1 = 25(v)$ và $u_1 = 50(v)$

Bảng 5. *Các chỉ tiêu chất lượng của PI-SMC khi* $u_1 = 25(v)$ *và* $u_1 = 50(v)$

Các chỉ tiêu chất lượng	Thời gian tăng (s)	Thời gian xác lập (s)	Độ vọt lố (%)	Sai số xác lập
$u_1 = 25(v)$	0,0014	0,0028	1,4343e-04	0,0103
$u_1 = 50(v)$	9,5760e-04	0,0018	1,5166e-04	0,0578

Quan sát các chỉ tiêu chất lượng được trình bày trong Bảng 5 ta thấy rằng, thời gian tăng của đáp ứng điện áp khi $u_1 = 25(v)$ là 0,0014(s), thời gian xác lập là 0,0028(s), sai số xác lập là 0,0103(v), độ vọt lố là 1,4343e-04(%) và khi $u_1 = 50(v)$ là 9,5760e-04(s), 0,0018(s), 0,0578(v), 1,5166e-04(%).

5. Kết luận

Bài báo đã thiết kế bộ điều khiển trượt dựa vào mặt trượt PI để điều khiển điện áp bộ chuyển đổi Buck-Boost. Mặt trượt PI với các thông số λ và α được lựa chọn phù hợp đã khắc phục được hiện tượng chattering của điều khiển trượt ở trạng thái xác lập. Bộ điều khiển đề xuất đảm bảo điện áp thực tế của bộ Buck-Boost bám theo điện áp tham chiếu trong thời gian hữu hạn. Các kết quả mô phỏng trong MATLAB/Simulink với các chỉ tiêu đạt được cho thấy, bộ điều khiển PI-SMC hiệu quả hơn bộ điều khiển trượt mô hình nội và điều khiển PID truyền thống. Tính bền vững của bộ điều khiển đề xuất được khảo sát với sự thay đổi của điện trở tải và điện áp u_1. Trong thời gian tới, nghiên cứu sẽ ứng dụng các giải thuật thông minh để xác định các giá trị của λ và α để nâng cao chất lượng và hiệu suất bộ điều khiển PI-SMC và thực nghiệm trên mô hình thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

[1] M. D. Almawlawe and M. Kovandzic, "A Modified Method for Tuning PID Controller for Buck-Boost Converter," *International Journal of Advanced Engineering Research and Science* (IJAERS), vol. 3, no. 12, pp. 20-26, 2016.

[2] A. Ammar, "Voltage Controller of DC-DC Buck Boost Converter with Proposed PID Controller," *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology* (IJARCET), vol. 9, no. 1, pp. 2278-1323, 2020.

[3] B. Loarte, O. Camacho, G. Chavez, P. Leica, and M. Pozo, "Sliding Mode Control Based on Internal Model for a Non-minimum phase Buck and Boost Converter," *Enfoque UTE*., vol. 10, no. 1, pp. 41-53, 2019.

[4] Q. Duong, V. T. Nguyen, N. Sava, M. Scripcariu, and M. Mussetta, "Design and simulation of PI-type control for the Buck Boost converter," *International Conference on Energy and Environment* (CIEM), 2017, pp. 79-82.

[5] Suhariningsih, M. Mukti, and R. Rakhmawati, "Implementation Buck-Boost Converter using PI Control for Voltage Stability and Increase Efficiency," *International Seminar on Application for Technology of Information and Communication* (iSemantic), 2019, pp. 492-496.

[6] H. Amirez, G. Garzón, C. P. Torres, J. Navarrete, and C. Restrepo, "LMI Control Design of a Non-Inverting Buck-Boost Converter: A Current Regulation Approach," *TECCIENCIA*. vol. 12, pp. 79-85, 2017.

[7] E. R. Lisy, M. Nandakumar, R. Anasraj, and P. R. Kumar, "Design of Robust Chattering Free Integral Sliding Mode Controller for Dual Input Buck Boost Converter," *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 13, no. 1, pp. 358-365, 2018.

[8] S. Balamurugan, P. Venkatesh, and M. Varatharajan, "Fuzzy sliding-mode control with low pass filter to reduce chattering effect: an experimental validation on Quanser SRIP," *Indian Academy of Sciences*, vol. 42, no. 10, pp. 1693-1703, 2017.

[9] K. A. Baghaei, H. Ghaffarzadeh, S. A. Hadigheh, and D. Dias-da-Costa, "Chattering-free sliding mode control with a fuzzy model for structural applications," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 69, no. 3, pp. 307-315, 2019.

[10] C. B. Kadu and A. A. Khandekar, "Design of sliding mode controller with PI sliding surface for robust regulation and tracking of process control systems," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 140, pp. 1-11, 2018.

[11] H. U. Suleiman, M. B. Mu'azu, 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," *International Conference on Adaptive Science & Technology* (ICAST), 2018, pp. 1-9.

[12] N. Cibiraj and M. Varatharajan, "Chattering reduction in sliding mode control of quadcopters using neural networks," *International Conference on Power Engineering, Computing and Control*, 2017, pp. 885-892.

[13] L. Wan, G. Chen, M. Sheng, Y. Zhang, and Z. Zhang, "Adaptive chattering-free terminal sliding-mode control for full-order nonlinear system with unknown disturbances and model uncertainties," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 17, pp. 1-11, 2020.

[14] J. - S. Fang, J. Tsai, Y. -J. Yan, and S. -M. Guo, "Adaptive Chattering-Free Sliding Mode Control of Chaotic Systems with Unknown Input Nonlinearity via Smooth Hyperbolic Tangent Function," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2019, pp. 1-9, 2019.

[15] R. H. G. Tan and L. Y. H. Hoo, "DC-DC converter modeling and simulation using state space approach," *IEEE Conference on Energy Conversion* (CENCON), 2015, pp. 42-47.

[16] C. -H. Lin and F. -Y. Hsiao, "Proportional-Integral Sliding Mode Control with an Application in the Balance Control of a Two-Wheel Vehicle System," *Applied Sciences*, vol. 10, pp. 1-27, 2020.