e-ISSN: 3039 - 3145
Tạp chí Khoa học và Công nghệ Y khoa, 2026, 06, 061-066

ĐIỀU KHIỂN THỤ ĐỘNG THÍCH NGHI CHO BỘ BIẾN ĐỔI TĂNG ÁP VỚI ƯỚC LƯỢNG TRỰC TUYẾN TẢI

Phạm Hồng Phong*

Trường Đại học Lương Thế Vinh, Số 9 Đường Cầu Đông, Phường Nam Định, Tỉnh Ninh Bình, Việt Nam
** Tác giả liên hệ: phamhongphong@ltvu.edu.vn*

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận: 16/08/2026
Ngày hoàn thiện: 26/08/2026
Ngày chấp nhận: 06/09/2026
Ngày đăng: 15/09/2026

TỪ KHÓA

Bộ biến đổi tăng áp,
Điều khiển thụ động,
Điều khiển thụ động thích nghi,
Lyapunov,
Điều khiển phi tuyến.

TÓM TẮT

Bài báo trình bày phương pháp điều khiển thụ động và đề xuất cấu trúc điều khiển thụ động thích nghi cho bộ biến đổi tăng áp. Dựa trên mô hình trung bình tín hiệu lớn, luật điều khiển được xây dựng theo cấu trúc gián tiếp thông qua dòng điện cuộn cảm nhằm giảm ảnh hưởng của đặc tính pha không cực tiểu trong vòng điều khiển điện áp. Với phương pháp điều khiển thụ động cơ bản, bộ điều khiển PI vòng ngoài tạo dòng điện tham chiếu cho vòng điều khiển dòng. Trong cấu trúc đề xuất, tham số tải được ước lượng trực tuyến và dùng để cập nhật dòng điện tham chiếu, giúp giảm phụ thuộc vào giá trị tải biết trước và tăng khả năng thích nghi trước sự biến thiên của tải. Tính ổn định của hệ vòng kín được chứng minh theo tiêu chuẩn Lyapunov. Kết quả mô phỏng trên MATLAB/Simulink với các trường hợp thay đổi điện áp đặt, điện trở tải và điện áp nguồn cho thấy phương pháp đề xuất duy trì khả năng bám điện áp tốt, giảm độ quá điều chỉnh và dao động quá độ, đồng thời cho đáp ứng dòng điện cuộn cảm êm hơn so với phương pháp điều khiển thụ động cơ bản. Kết quả cho thấy cấu trúc thích nghi đề xuất cải thiện đáp ứng động và duy trì ổn định của bộ biến đổi khi tham số tải và điều kiện nguồn thay đổi.

ADAPTIVE PASSIVITY-BASED CONTROL OF BOOST CONVERTER WITH ONLINE LOAD ESTIMATION

Hong Phong Pham*

Luong The Vinh University, No. 9 Cau Dong Street, Nam Dinh Ward, Ninh Binh Province, Viet Nam
**Corresponding Author: phamhongphong@ltvu.edu.vn*

ARTICLE INFO

Received: Aug 16, 2026
Revised: Aug 26, 2026
Accepted: Sep 06, 2026
Published: Sep 15, 2026

KEYWORDS

Boost converter,
Passivity-based control,
Adaptive passivity-based control,
Lyapunov,
Nonlinear control.

ABSTRACT

This paper presents a passivity-based control method and proposes an adaptive passivity-based control structure for a boost converter. Based on the large-signal averaged model, the control law is developed using an indirect control structure through the inductor current to mitigate the influence of the non-minimum phase characteristic in the voltage control loop. In the conventional passivity-based control scheme, an outer-loop PI controller generates the reference current for the inner current control loop. In the proposed structure, the load parameter is estimated online and used to update the current reference, thereby reducing dependence on prior knowledge of the load and improving adaptability to load variations. The closed-loop stability is established using Lyapunov analysis. MATLAB/Simulink simulation results under variations in the voltage reference, load resistance, and input voltage show that the proposed method maintains accurate voltage tracking, reduces overshoot and transient oscillations, and provides a smoother inductor current response than the conventional passivity-based control method. The results demonstrate that the proposed adaptive structure improves dynamic performance while preserving converter stability under changes in load and source conditions.

1. GIỚI THIỆU/INTRODUCTION

Bộ biến đổi tăng áp được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống nguồn một chiều, năng lượng tái tạo và các ứng dụng điện tử công suất yêu cầu điện áp đầu ra lớn hơn điện áp đầu vào. Mô hình trung bình là một trong những phương pháp phổ biến để mô tả đặc tính động học của các bộ biến đổi đóng cắt và làm cơ sở cho quá trình thiết kế bộ điều khiển [1, 2]. Tuy nhiên, bộ biến đổi tăng áp là một hệ phi tuyến và cấu trúc điều khiển điện áp tồn tại điểm zero ở nửa mặt phẳng phải, dẫn đến đặc tính pha không cực tiểu và gây khó khăn cho việc điều khiển trực tiếp điện áp đầu ra. Vì vậy, việc phát triển các phương pháp điều khiển phi tuyến với khả năng bảo đảm ổn định và duy trì chất lượng điều khiển khi điều kiện vận hành thay đổi đang nhận được nhiều sự quan tâm.

Điều khiển thụ động là một hướng tiếp cận phù hợp đối với các bộ biến đổi một chiều–một chiều do khai thác trực tiếp cấu trúc năng lượng và tính thụ động của hệ thống để xây dựng luật điều khiển. Các nghiên cứu gần đây cho thấy phương pháp điều khiển dựa trên tính thụ động có thể cải thiện đặc tính ổn định và đáp ứng động của bộ biến đổi tăng áp so với các cấu trúc điều khiển tuyến tính truyền thống [3]. Đối với bộ biến đổi tăng áp làm việc với công suất tải không đổi, điều khiển thụ động cũng được kết hợp với các cơ chế bù nhiễu và ước lượng nhiễu nhằm duy trì ổn định trước sự thay đổi trị số tải và các của tham số khác trong hệ thống [4]. Bên cạnh đó, các phương pháp điều khiển thụ động kết hợp cơ chế thích nghi hoặc ước lượng tham số đã được phát triển nhằm nâng cao khả năng làm việc trước sự biến thiên của tải, điện áp nguồn và các bất định tham số [5–7]. Những kết quả này cho thấy điều khiển thụ động có nhiều tiềm năng đối với bộ biến đổi tăng áp, đồng thời cho thấy việc cập nhật thông tin tải trong quá trình vận hành có vai trò quan trọng đối với chất lượng điều khiển khi điểm làm việc thay đổi.

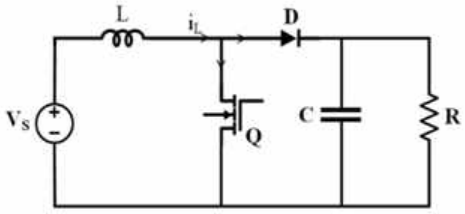
Trong nghiên cứu này, cấu trúc điều khiển thụ động cho bộ biến đổi tăng áp được xây dựng theo nguyên lý điều khiển gián tiếp thông qua dòng điện cuộn cảm. Trên cơ sở đó, cấu trúc điều khiển thụ động thích nghi được đề xuất, trong đó tham số tải được ước lượng trực tuyến và sử dụng để cập nhật dòng điện tham chiếu, qua đó giảm sự phụ thuộc vào giá trị tải biết trước. Tính ổn định của hệ thống được phân tích dựa trên tiêu chuẩn Lyapunov. Bài báo được tổ chức như sau: Mục 2 trình bày mô hình và cấu trúc điều khiển thụ động cho bộ biến đổi tăng áp; Mục 3 trình bày cấu trúc điều khiển thụ động thích nghi đề xuất; Mục 4 đánh giá và so sánh hai phương pháp thông qua mô phỏng trên MATLAB/Simulink; cuối cùng, các kết luận chính được trình bày trong mục 5.

2. ĐIỀU KHIỂN THỤ ĐỘNG CHO BỘ BIẾN ĐỔI TĂNG ÁP

Để xây dựng luật điều khiển cho bộ biến đổi tăng áp, trước hết cần thiết lập mô hình toán học phản ánh đặc tính động của hệ thống. Trong nghiên cứu này, mô hình trung bình tín hiệu lớn được sử dụng làm cơ sở tổng hợp bộ điều khiển do vẫn bảo toàn đặc tính phi tuyến của bộ biến đổi, trong khi mô hình tín hiệu nhỏ được xây dựng quanh điểm làm việc xác lập để khảo sát động học của cấu trúc điều khiển điện áp. Từ đó, vị trí các điểm zero của hệ thống được xác định nhằm đánh giá khả năng lựa chọn điện áp đầu ra làm biến điều khiển trực tiếp và lựa chọn cấu trúc điều khiển phù hợp.

2.1 MÔ HÌNH BỘ BIẾN ĐỔI TĂNG ÁP

Cấu trúc bộ biến đổi tăng áp được trình bày trên Hình 1, gồm nguồn một chiều V_s, cuộn cảm L, khóa công suất Q, diode D, tụ điện C và tải R. Bộ biến đổi được giả thiết làm việc ở chế độ dòng liên tục với các phần tử bán dẫn lý tưởng. Gọi i_L là dòng điện chảy qua cuộn cảm và v_C là điện áp trên tụ điện. Trạng thái đóng cắt của khóa được mô tả bởi biến $q \in \{0,1\}$, trong đó $q = 1$ tương ứng với khóa dẫn và $q = 0$ tương ứng với khóa ngắt.



Hình 1. *Cấu trúc mạch lực bộ biến đổi tăng áp*

Khi khóa công suất dẫn ($q = 1$), diode bị phân cực ngược, cuộn cảm tích lũy năng lượng từ nguồn và tụ điện cấp năng lượng cho tải. Khi đó, động học của bộ biến đổi được mô tả bởi

$$\begin{cases} L\dfrac{di_L}{dt} = V_s, \\ C\dfrac{dv_C}{dt} = -\dfrac{v_C}{R}. \end{cases} \tag{1}$$

Khi khóa công suất ngắt ($q = 0$), năng lượng tích lũy trong cuộn cảm cùng với năng lượng từ nguồn được truyền đến tụ điện và tải. Khi đó,

$$\begin{cases} L\dfrac{di_L}{dt} = V_s - v_C, \\ C\dfrac{dv_C}{dt} = i_L - \dfrac{v_C}{R}. \end{cases} \tag{2}$$

Từ hai trạng thái trên, mô hình đóng cắt tổng quát của bộ biến đổi tăng áp được biểu diễn bởi:

$$\begin{cases} L\dfrac{di_L}{dt} = V_s - (1-q)v_C, \\ C\dfrac{dv_C}{dt} = (1-q)i_L - \dfrac{v_C}{R}. \end{cases} \tag{3}$$

Mô hình (3) mô tả trực tiếp quá trình đóng cắt của bộ biến đổi. Tuy nhiên, biến q thay đổi gián đoạn giữa hai trạng thái 0 và 1 theo tần số chuyển mạch nên không thuận tiện cho quá trình tổng hợp luật điều khiển liên tục. Vì vậy, toán tử trung bình trượt được áp dụng trên một chu kỳ chuyển mạch T_s. Giá trị trung bình của biến đóng cắt q được xác định bởi hệ số đóng cắt d như sau:

$$d(t) = \frac{1}{T_s}\int_{t-T_s}^{t} q(\tau)d\tau, \qquad 0 \le d \le 1 \tag{4}$$

Với giả thiết các biến trạng thái thay đổi chậm trong một chu kỳ chuyển mạch, áp dụng toán tử trung bình trượt cho mô hình (3) thu được mô hình trung bình tín hiệu lớn của bộ biến đổi tăng áp:

$$\begin{cases} L\dfrac{di_L}{dt} = V_s - (1-d)v_C, \\ C\dfrac{dv_C}{dt} = (1-d)i_L - \dfrac{v_C}{R}. \end{cases} \tag{5}$$

Mô hình (5) được sử dụng để xây dựng luật điều khiển thụ động do vẫn bảo toàn đặc tính phi tuyến của bộ biến đổi. Đồng thời, mô hình tín hiệu nhỏ được thiết lập để khảo sát động học điện áp và xác định vị trí các điểm zero của hệ thống.

Xét điểm làm việc xác lập (I_L, V_C, d_e), các biến của mô hình (5) được biểu diễn dưới dạng tổng của giá trị xác lập và thành phần nhiễu động nhỏ. Sau khi tuyến tính hóa và bỏ qua

các thành phần nhiễu động bậc cao, mô hình tín hiệu nhỏ của bộ biến đổi được xác định bởi

$$\begin{cases} L\dfrac{d\hat{i}_L}{dt} = -(1-d_e)\hat{v}_C + V_C\hat{d} \\ C\dfrac{d\hat{v}_C}{dt} = (1-d_e)\hat{i}_L - \dfrac{\hat{v}_C}{R} - I_L\hat{d} \end{cases} \quad (6)$$

Từ mô hình trên, thực hiện biến đổi Laplace thu được hàm truyền từ hệ số đóng cắt đến điện áp đầu ra:

$$G_{vd}(s) = \frac{\hat{v}_C(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{(1-d_e)V_C - LI_L s}{LCs^2 + \dfrac{L}{R}s + (1-d_e)^2} \quad (7)$$

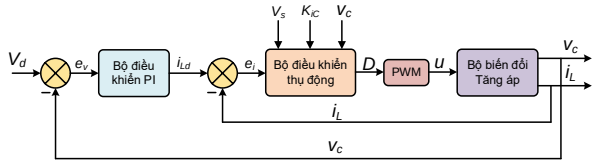
Điểm zero của hàm truyền được xác định bởi

$$s_z = \frac{(1-d_e)V_C}{LI_L} = \frac{R(1-d_e)^2}{L} > 0 \quad (8)$$

Do $R > 0$, $L > 0$ và $0 < d_e < 1$, điểm zero nằm ở nửa mặt phẳng phải. Vì vậy, cấu trúc điều khiển điện áp của bộ biến đổi tăng áp có đặc tính pha không cực tiểu, không phù hợp để lựa chọn điện áp đầu ra làm biến điều khiển trực tiếp. Do đó, phương pháp điều khiển thụ động được xây dựng theo cấu trúc điều khiển gián tiếp thông qua dòng điện chảy qua cuộn cảm.

2.2 ĐIỀU KHIỂN THỤ ĐỘNG CHO BỘ BIẾN ĐỔI TĂNG ÁP

Do đặc tính pha không cực tiểu của cấu trúc điều khiển điện áp, phương pháp điều khiển gián tiếp thông qua dòng điện cuộn cảm được sử dụng để đưa điện áp đầu ra về giá trị đặt. Cấu trúc điều khiển thụ động được trình bày trên Hình 2.



Hình 2. *Cấu trúc điều khiển thụ động cho bộ biến đổi tăng áp*

Để xây dựng luật điều khiển dựa trên đặc tính năng lượng của hệ thống, mô hình trung bình tín hiệu lớn (5) được biểu diễn dưới dạng Euler–Lagrange. Vector trạng thái được xác định bởi

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} \quad (9)$$

Khi đó, mô hình bộ biến đổi được viết dưới dạng

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{z}} + \mathbf{J}(d)\mathbf{z} + \mathbf{P}\mathbf{z} = \mathbf{b} \quad (10)$$

trong đó

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{J}(d) = \begin{bmatrix} 0 & 1-d \\ -(1-d) & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \dfrac{1}{R} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} V_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Ma trận $\mathbf{M} = \mathbf{M}^T > 0$ biểu diễn thành phần lưu trữ năng lượng, $\mathbf{J}(d) = -\mathbf{J}^T(d)$ đặc trưng cho quá trình trao đổi năng lượng giữa cuộn cảm và tụ điện, trong khi $\mathbf{P} \geq 0$ biểu diễn thành phần tiêu tán năng lượng trên tải.

Hàm năng lượng của bộ biến đổi được xác định bởi

$$\mathrm{E}(\mathbf{z}) = \frac{1}{2}\mathbf{z}^T\mathbf{M}\mathbf{z} = \frac{1}{2}Li_L^2 + \frac{1}{2}Cv_C^2 \quad (15)$$

Với điện áp đầu ra mong muốn (V_d), tại trạng thái xác lập thỏa mãn

$$\dot{i}_L = 0, \qquad \dot{v}_C = 0, \qquad v_C = V_d \quad (16)$$

Từ mô hình trung bình tín hiệu lớn, hệ số đóng cắt tại điểm làm việc được xác định bởi

$$d_d = 1 - \frac{V_s}{V_d} \quad (17)$$

và dòng điện cuộn cảm tham chiếu được xác định là

$$I_{Ld} = \frac{V_d^2}{RV_s} \quad (18)$$

Do đó, điểm làm việc mong muốn của hệ thống được biểu diễn dưới dạng

$$\mathbf{z}_d = \begin{bmatrix} I_{Ld} \\ V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{V_d^2}{RV_s} \\ V_d \end{bmatrix} \quad (19)$$

Các giá trị trên được xác định từ điều kiện cân bằng của bộ biến đổi tại trạng thái xác lập.

Sai lệch dòng điện cuộn cảm được định nghĩa bởi

$$\mathrm{e_i} = \mathrm{i_L} - \mathrm{I_{Ld}} \quad (20)$$

Mục tiêu của bộ điều khiển là làm cho (e_i) hội tụ về không. Động học sai lệch mong muốn được lựa chọn dưới dạng

$$L\dot{e}_i = -\rho e_i, \qquad \rho > 0 \quad (21)$$

trong đó (ρ) là hệ số bơm suy giảm nhân tạo, có ảnh hưởng trực tiếp đến tốc độ hội tụ của dòng điện. Với giá trị tham chiếu (I_{Ld}) không đổi tại một điểm làm việc, có

$$\dot{e}_i = \dot{i}_L \quad (22)$$

Suy ra

$$L\dot{i}_L = -\rho\left(i_L - I_{Ld}\right) \quad (23)$$

Trong khi đó, phương trình động học dòng điện của bộ biến đổi được xác định bởi

$$L\dot{i}_L = V_s - (1-d)v_C \quad (24)$$

Đồng nhất động học thực tế với động học mong muốn cho

$$V_s - (1-d)v_C = -\rho\left(i_L - I_{Ld}\right) \quad (25)$$

Từ đó, luật điều khiển thụ động đối với hệ số đóng cắt được xác định:

$$d = 1 - \frac{V_s + K_{iC}\left(i_L - i_{Lref}\right)}{v_C} \quad (26)$$

Trong đó ($K_{iC} > 0$) là hệ số bơm suy giảm, có vai trò điều chỉnh tốc độ hội tụ của sai lệch dòng điện. Luật điều khiển trên làm cho động học sai lệch dòng điện thỏa mãn

$$L\dot{e}_i = -K_{iC}e_i \quad (27)$$

Với

$$e_i = i_L - i_{Lref}. \quad (28)$$

Do đó, e_i hội tụ về không khi $t \to \infty$, hay dòng điện cuộn cảm i_L bám theo giá trị tham chiếu i_{Lref}. Tiếp theo, để đánh giá sự hội tụ của điện áp đầu ra, xét hệ thống khi sai lệch dòng điện đã hội tụ về không:

$$e_i = 0 \quad (29)$$

khi đó

$$i_L = i_{Lref}. \tag{30}$$

Với dòng điện tham chiếu tại điểm làm việc được xác định bởi

$$i_{Lref} = \frac{V_d^2}{RV_s}, \tag{31}$$

Động học còn lại của điện áp đầu ra được biểu diễn dưới dạng

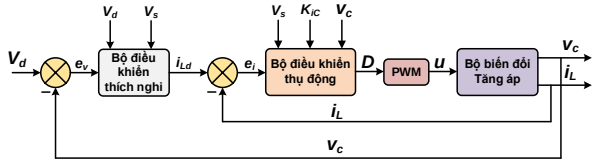
$$C\dot{v}_C = \frac{V_d^2 - v_C^2}{Rv_C}. \tag{32}$$

Với $v_C > 0$, nếu $v_C < V_d$ thì $\dot{v}_C > 0$, trong khi nếu $v_C > V_d$ thì $\dot{v}_C < 0$. Vì vậy, $v_C = V_d$ là điểm cân bằng ổn định tiệm cận của động học điện áp. Kết quả này cho thấy khi dòng điện cuộn cảm hội tụ về giá trị tham chiếu, điện áp đầu ra cũng hội tụ về giá trị đặt.

Như vậy, điều khiển thụ động bảo đảm dòng điện cuộn cảm bám giá trị tham chiếu và điện áp đầu ra hội tụ về giá trị đặt. Tuy nhiên, dòng điện tham chiếu phụ thuộc trực tiếp vào điện trở tải R; khi tải biến thiên, giá trị tham chiếu không còn phù hợp với điểm làm việc thực tế. Đây là cơ sở để phát triển cấu trúc điều khiển thụ động thích nghi.

3. ĐỀ XUẤT CẤU TRÚC ĐIỀU KHIỂN THỤ ĐỘNG THÍCH NGHI CHO BỘ BIẾN ĐỔI TĂNG ÁP

Để giảm sự phụ thuộc của dòng điện tham chiếu vào điện trở tải, cấu trúc điều khiển thụ động thích nghi được đề xuất với tham số tải được ước lượng trực tuyến để cập nhật dòng điện tham chiếu. Như trình bày trên Hình 3, bộ ước lượng được tích hợp vào khâu tạo dòng điện tham chiếu, trong khi luật điều khiển thụ động vòng dòng được giữ nguyên để xác định hệ số đóng cắt.



Hình 3. *Cấu trúc điều khiển thụ động thích nghi đề xuất cho bộ biến đổi tăng áp*

Từ cấu trúc điều khiển đề xuất ở Hình 3, ảnh hưởng của tải đến dòng điện tham chiếu được thể hiện trực tiếp qua biểu thức $i_{Lref} = V_d^2/(RV_s)$. Để giảm sự phụ thuộc vào giá trị điện trở tải đã biết trước, tham số tải được lựa chọn dưới dạng

$$\theta = \frac{1}{R}, \tag{33}$$

Khi đó dòng điện tham chiếu có thể được viết lại thành

$$i_{Lref} = \theta \frac{V_d^2}{V_s}. \tag{34}$$

Do θ không được giả thiết biết chính xác trong quá trình vận hành, một giá trị ước lượng $\hat{\theta}$ được sử dụng để xác định dòng điện tham chiếu thích nghi

$$\hat{i}_{Lref} = \hat{\theta} \frac{V_d^2}{V_s}. \tag{35}$$

Sai lệch ước lượng tham số được định nghĩa bởi

$$\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta, \tag{36}$$

Trong khi sai lệch dòng điện của bộ điều khiển được xác định theo dòng điện tham chiếu ước lượng. Khi đó, luật điều khiển thụ động vòng dòng vẫn được giữ nguyên về cấu trúc và được viết dưới dạng

$$d = 1 - \frac{V_s + K_{iC}\left(i_L - \hat{i}_{Lref}\right)}{v_C}. \tag{37}$$

Như vậy, điểm khác biệt của cấu trúc đề xuất không nằm ở luật điều khiển vòng dòng mà ở cơ chế cập nhật trực tuyến giá trị $\hat{i}_{Lref}$ thông qua tham số $\hat{\theta}$.

Để xây dựng luật cập nhật cho $\hat{\theta}$, một hàm Lyapunov mở rộng được lựa chọn nhằm xét đồng thời năng lượng sai lệch trạng thái và sai số ước lượng tham số. Hàm Lyapunov có dạng

$$V = \frac{1}{2}L\tilde{i}_L^2 + \frac{1}{2}C\tilde{v}_C^2 + \frac{1}{2\gamma}\tilde{\theta}^2, \tag{38}$$

Trong đó $\gamma > 0$ là hệ số thích nghi. Đạo hàm của hàm Lyapunov theo thời gian được khai triển cùng với mô hình động học của bộ biến đổi và luật điều khiển thụ động; luật cập nhật tham số được lựa chọn sao cho thành phần chứa sai số ước lượng bị triệt tiêu. Từ đó, luật thích nghi được xác định bởi

$$\dot{\hat{\theta}} = -\gamma v_C\left(v_C - V_d\right). \tag{39}$$

Luật cập nhật trên sử dụng trực tiếp sai lệch điện áp để điều chỉnh $\hat{\theta}$, qua đó cập nhật liên tục dòng điện tham chiếu $\hat{i}_{Lref}$ khi tải thay đổi. Với cách lựa chọn này, cấu trúc điều khiển thích nghi duy trì luật điều khiển thụ động ở vòng dòng trong khi bổ sung khả năng tự hiệu chỉnh tham số tải theo điều kiện vận hành thực tế.

Sau khi lựa chọn hàm Lyapunov mở rộng như công thức (38), tính ổn định của hệ vòng kín được đánh giá thông qua đạo hàm của hàm này theo thời gian. Đạo hàm của V dọc theo quỹ đạo hệ được xác định bởi

$$\dot{V} = Le_i\dot{e}_i + Ce_v\dot{e}_v + \frac{1}{\gamma}\tilde{\theta}\dot{\hat{\theta}}. \tag{40}$$

Thay mô hình động học vòng kín và luật điều khiển thụ động vào biểu thức trên xuất hiện các thành phần phụ thuộc vào sai số ước lượng $\tilde{\theta}$. Luật cập nhật

$$\dot{\hat{\theta}} = -\gamma v_C(v_C - V_d) \tag{41}$$

Được lựa chọn nhằm triệt tiêu các thành phần này, làm cho đạo hàm của hàm Lyapunov chỉ còn các thành phần tiêu tán và thỏa mãn

$$\dot{V} \le 0. \tag{42}$$

Để xác định tính hội tụ của hệ thống, nguyên lý bất biến LaSalle được áp dụng trên tập các trạng thái thỏa mãn $\dot{V} = 0$. Trên tập bất biến này, sai lệch dòng điện tiến về không; kết hợp với động học zero ổn định của bộ biến đổi, sai lệch điện áp cũng hội tụ về không, tức là

$$e_i \to 0, \qquad e_v \to 0. \tag{43}$$

Do đó, điện áp đầu ra hội tụ về giá trị đặt trong khi dòng điện cuộn cảm bám theo giá trị tham chiếu được cập nhật bởi luật thích nghi. Kết quả trên chứng minh cấu trúc điều khiển đề xuất duy trì tính ổn định của hệ vòng kín khi tham số tải biến thiên.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Để đánh giá hiệu quả của cấu trúc đề xuất, mô hình bộ biến đổi tăng áp được xây dựng trên MATLAB/Simulink với giả thiết phần tử lý tưởng và chế độ dòng liên tục. Hai phương pháp được so sánh gồm điều khiển thụ động cơ bản với bộ PI vòng ngoài tạo dòng điện tham chiếu và điều khiển

thụ động thích nghi, trong đó dòng điện tham chiếu được cập nhật trực tuyến từ tham số tải ước lượng.

Bảng 1. *Thông số thiết kế của bộ biến đổi tăng áp*

Thông số	Ký hiệu	Giá trị
Công suất định mức	P	36 W
Điện áp đầu vào	V_s	12 V
Điện áp đầu ra	V_o	18 V
Dòng điện đầu ra	I_o	2 A
Điện trở tải	R	9 Ω
Tần số chuyển mạch	f_s	50 kHz
Hệ số đóng cắt danh định	D_0	0.333
Độ đập mạch dòng điện cho phép	Δi_L	0.4 A
Độ đập mạch điện áp cho phép	Δv_C	0.2 V

Đối với cấu trúc điều khiển thụ động cơ bản, bộ PI vòng ngoài được sử dụng để tạo dòng điện tham chiếu cho vòng điều khiển dòng. Giả thiết vòng dòng nhanh hơn đáng kể so với vòng điện áp, hàm truyền tương đương của vòng ngoài được xác định bởi

$$G_v(s) = \frac{R(1-d_0)}{RCs+1}. \quad (44)$$

Lựa chọn đáp ứng vòng kín mong muốn dạng bậc nhất

$$T_d(s) = \frac{1}{\beta s+1}, \quad (45)$$

Các tham số của bộ điều khiển PI được xác định như sau:

$$K_P = \frac{C}{(1-d_0)\beta} \quad (46)$$

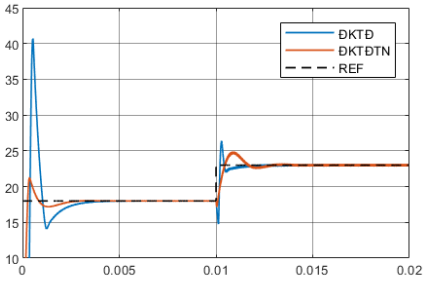
$$K_I = \frac{1}{R(1-d_0)\beta} \quad (47)$$

Trong đó, β được lựa chọn để vòng điện áp có đáp ứng chậm hơn vòng dòng.

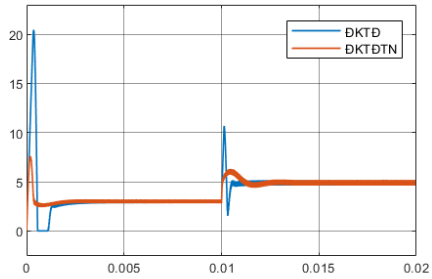
Từ các thông số trong Bảng 1 và lựa chọn hằng số thời gian vòng điện áp $\beta = 120\,\mu s$, bộ điều khiển PI có $K_P = 0{,}833$ và $K_I = 1388{,}9$. Hệ số bơm suy giảm và hệ số thích nghi được chọn lần lượt là $K_{iC} = 10$ và $\gamma = 1$, quyết định tốc độ hội tụ dòng điện và tốc độ cập nhật tham số ước lượng. Ba trường hợp mô phỏng gồm thay đổi điện áp đặt, tải và điện áp nguồn; đường màu xanh biểu diễn điều khiển thụ động cơ bản, còn đường màu cam biểu diễn điều khiển thụ động thích nghi đề xuất.

4.1 TRƯỜNG HỢP 1: THAY ĐỔI TRỊ SỐ ĐIỆN ÁP ĐẶT

Trường hợp này đánh giá khả năng bám điện áp khi giá trị đặt thay đổi, trong khi các thông số còn lại được giữ không đổi. Hình 4 và Hình 5 lần lượt trình bày đáp ứng điện áp đầu ra và dòng điện cuộn cảm của hai phương pháp điều khiển.



Hình 4. *Đáp ứng điện áp khi thay đổi giá trị đặt điện áp đầu ra*

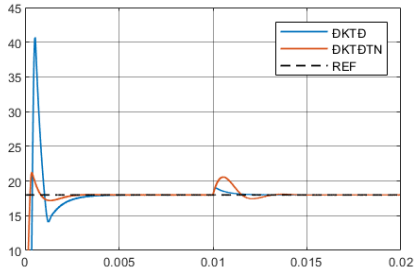


Hình 5. *Đáp ứng dòng điện khi thay đổi giá trị đặt điện áp đầu ra*

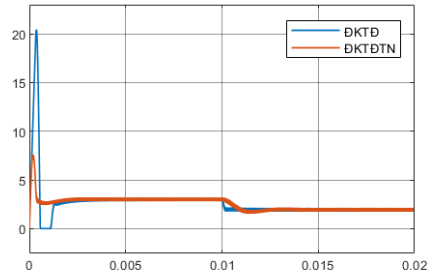
Hình 4 cho thấy cả hai phương pháp đều đưa điện áp đầu ra hội tụ về giá trị đặt, tuy nhiên phương pháp điều khiển thụ động thích nghi có chất lượng quá độ tốt hơn. Tại thời điểm khởi động và khi điện áp đặt thay đổi tại $t = 0{,}01$, phương pháp điều khiển thụ động cơ bản xuất hiện độ vọt lố và dao động lớn hơn, trong khi phương pháp thích nghi giới hạn được biên độ quá độ và đưa điện áp về giá trị mới êm hơn. Kết quả trên Hình 5 cũng cho thấy dòng điện cuộn cảm của phương pháp thích nghi có đỉnh nhỏ hơn và quá trình chuyển tiếp trơn hơn. Điều này cho thấy cơ chế thích nghi giúp cải thiện đồng thời khả năng bám điện áp và chất lượng động của dòng điện khi điểm làm việc thay đổi.

4.2 TRƯỜNG HỢP 2: THAY ĐỔI TẢI

Trường hợp này đánh giá khả năng duy trì điện áp đầu ra khi điện trở tải thay đổi đột ngột, trong khi điện áp đặt và điện áp nguồn được giữ không đổi. Hình 6 và Hình 7 lần lượt trình bày đáp ứng điện áp đầu ra và dòng điện cuộn cảm của hai phương pháp điều khiển.



Hình *6. Đáp ứng điện áp khi thay đổi giá trị tải*



Hình *7. Đáp ứng dòng điện khi thay đổi giá trị tải*

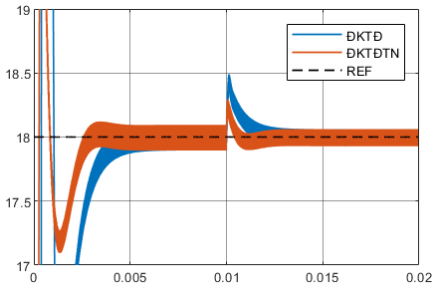
Hình 6 cho thấy khi điện trở tải tăng thêm 5 Ω tại $t = 0{,}01$, cả hai phương pháp đều đưa điện áp đầu ra trở lại giá trị đặt sau giai đoạn quá độ. Tuy nhiên, phương pháp điều khiển thụ động thích nghi xuất hiện sự tăng đột biến ngắn do tham số tải cần được cập nhật, trong khi phương pháp điều khiển thụ động cơ bản có biên độ dao động nhỏ hơn tại thời điểm thay đổi tải. Dù vậy, phương pháp thích nghi vẫn nhanh chóng xác lập lại điện áp mà không xuất hiện sai lệch tĩnh.

Đáp ứng dòng điện trên Hình 7 cho thấy khi tải tăng, dòng điện cuộn cảm giảm về mức xác lập mới phù hợp với điểm làm việc mới. Phương pháp điều khiển thụ động thích nghi

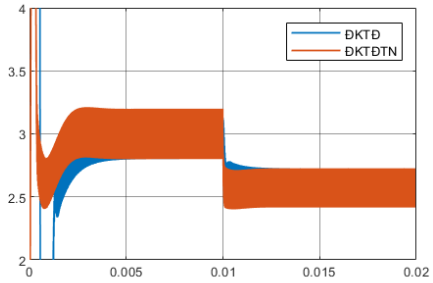
tạo quá trình chuyển tiếp tương đối trơn và nhanh chóng đưa dòng điện về giá trị mới, qua đó thể hiện khả năng tự điều chỉnh dòng tham chiếu khi tham số tải thay đổi.

4.3 TRƯỜNG HỢP 3: THAY ĐỔI TRỊ SỐ ĐIỆN ÁP NGUỒN

Nội dung này đánh giá khả năng duy trì điện áp đầu ra khi điện áp nguồn thay đổi đột ngột, trong khi điện áp đặt và tải được giữ không đổi. Hình 8 và Hình 9 lần lượt trình bày đáp ứng điện áp đầu ra và dòng điện cuộn cảm của hai phương pháp điều khiển.



***Hình** 8. Đáp ứng điện áp khi thay đổi giá trị điện áp nguồn*



***Hình** 9. Đáp ứng dòng điện khi thay đổi giá trị điện áp nguồn*

Hình 8 cho thấy khi điện áp nguồn thay đổi tại $t = 0{,}01\,s$, cả hai phương pháp đều duy trì điện áp đầu ra gần giá trị đặt và nhanh chóng xác lập trở lại sau quá trình quá độ. Phương pháp điều khiển thụ động thích nghi cho biên độ dao động điện áp nhỏ hơn và quá trình phục hồi êm hơn.

Hình 9 cho thấy dòng điện cuộn cảm được điều chỉnh về mức xác lập mới tương ứng với sự thay đổi công suất phía nguồn. Phương pháp điều khiển thụ động thích nghi tạo quá trình chuyển tiếp trơn hơn, trong khi vẫn bảo đảm dòng điện hội tụ về giá trị làm việc mới.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày phương pháp điều khiển thụ động và đề xuất cấu trúc điều khiển thụ động thích nghi cho bộ biến đổi tăng áp. Trên cơ sở mô hình phi tuyến của bộ biến đổi, luật điều khiển được xây dựng theo cấu trúc điều khiển gián tiếp thông qua dòng điện cuộn cảm nhằm khắc phục ảnh hưởng của đặc tính pha không cực tiểu của cấu trúc điều khiển điện áp. Phương pháp đề xuất bổ sung cơ chế ước lượng trực tuyến tham số tải để cập nhật dòng điện tham chiếu, qua đó giảm sự phụ thuộc vào giá trị tải biết trước và duy trì khả năng điều chỉnh khi điều kiện vận hành thay đổi. Tính ổn định của hệ vòng kín được phân tích dựa trên tiêu chuẩn Lyapunov nhằm bảo đảm các sai lệch điều khiển hội tụ trong quá trình vận hành.

Kết quả mô phỏng trên MATLAB/Simulink với ba trường hợp thay đổi: điện áp đặt, tải và điện áp nguồn cho thấy phương pháp đề xuất duy trì khả năng bám điện áp, cải thiện chất lượng quá độ và điều chỉnh dòng điện phù hợp với điểm làm việc mới. Các kết quả thu được phù hợp với phân tích lý thuyết và cho thấy tiềm năng của cấu trúc điều khiển thụ động thích nghi đối với các bộ biến đổi DC–DC có tham số vận hành biến thiên.

6. TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] González-Castro J-A, Rubio-Astorga G-J, Alarcón-Carbajal M-A, et al. Low-Cost Platform Implementation of Discrete Controllers for DC-DC Boost Converter. *Energies* **2024**, 17 (16), 4097.

[2] Oucheriah S, Azad A. Current-Sensorless Robust Sliding Mode Control for the DC-DC Boost Converter. *AIMS Electronics and Electrical Engineering* **2025**, 9 (1), pp. 46–59.

[3] Fang L, Ortega R, Griñó R. Voltage Control of the Boost Converter: PI vs. Nonlinear Passivity-Based Control. *International Journal of Robust and Nonlinear Control* **2026**, 36 (5), pp. 2557–2570.

[4] Abdolahi M, Adabi J, Mousazadeh Mousavi S-Y. A Passivity Control and Developed Nonlinear Disturbance Observer for Boost Converter With Constant Power Load in DC Microgrid. *International Journal of Circuit Theory and Applications* **2024**, 52 (11), pp. 5859–5876.

[5] Hassan M-A, Su C-L, Chen F-Z, Lo K-Y. Adaptive Passivity-Based Control of a DC–DC Boost Power Converter Supplying Constant Power and Constant Voltage Loads. IEEE Trans. Ind. Electron. **2022**, 69 (6), pp. 6204-6214.

[6] Langarica-Cordoba D, Martinez-Rodriguez P-R, Diaz-Saldierna L-H, Leyva-Ramos J, Reyes-Cruz D, Iturriaga-Medina S. Passivity-Based Control for a DC/DC High-Gain Transformerless Boost Converter. Asian J. Control **2023**, 25 (1), pp. 26-39.

[7] Baazouzi K, Bensalah A-D, Drid S, Chrifi-Alaoui L. Passivity Voltage Based Control of the Boost Power Converter Used in Photovoltaic System. Electr. Eng. Electromech. **2022**, (2), pp. 11-17.