

ĐỀ XUẤT PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN HỌC LẬP CHO BỘ BIẾN ĐỔI BUCK BOOST CONVERTER MÔ PHỎNG BẰNG PSCAD/EMTDC

Phạm Minh Tú¹, Trịnh Văn Cường^{2*}, Nguyễn Thế Phong¹

*Tác giả liên hệ, Email: tvcuong6@hou.edu.vn. ORCID: 0009-0003-9958-958X

Ngày tòa soạn nhận được bài báo: 15/01/2026

Ngày phản biện đánh giá: 18/03/2026

Ngày bài báo được duyệt đăng: 14/04/2026

DOI: 10.59266/houjs.2026.1158

Tóm tắt: Bài viết này trình bày thiết kế, phân tích và triển khai bộ điều khiển học lập (ILC) cho mạch chuyển đổi công suất Buck-Boost. Mạch Buck-Boost là một mạch chuyển đổi DC-DC linh hoạt được tích hợp có thể chạy ở chế độ hạ áp (Buck converter) và tăng áp (Boost converter). Một bộ điều khiển học lập cho mạch chuyển đổi buck-boost, nhằm cải thiện hiệu suất và độ ổn định của hệ thống. Bộ điều khiển ILC được đề xuất nhằm tối ưu hóa đáp ứng của mạch dưới các điều kiện tải biến thiên, đồng thời giảm thiểu sai lệch theo chu kỳ hoạt động. Thông qua việc học từ các chu kỳ trước, bộ điều khiển ILC có khả năng tự điều chỉnh các thông số điều khiển để đạt được hiệu suất tối ưu mà không cần mô hình chính xác của hệ thống. Các mô phỏng và thử nghiệm thực nghiệm đã được thực hiện trên phần mềm PSCAD để đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển ILC trong việc điều chỉnh điện áp đầu ra và cải thiện hiệu suất của mạch chuyển đổi buck-boost. Kết quả cho thấy bộ điều khiển ILC mang lại độ ổn định và khả năng thích ứng tốt với các điều kiện hoạt động khác nhau, mở ra tiềm năng ứng dụng trong các hệ thống biến đổi công suất yêu cầu độ chính xác cao.

Từ khóa: điều khiển điện áp, điều khiển dòng điện, bộ điều khiển học lập, Buck-boost converter, PSCAD.b

I. Đặt vấn đề

Mạch biến đổi điện áp DC-DC hiện nay được xem là giải pháp tối ưu trong kỹ thuật điện tử công suất nhờ sở hữu những ưu điểm vượt trội về hiệu suất chuyển đổi, khả năng điều tiết điện áp đầu ra linh hoạt

và mật độ công suất cao trong một thiết kế nhỏ gọn. Cấu trúc này không chỉ đảm bảo mục tiêu tiết kiệm năng lượng mà còn đáp ứng được yêu cầu khắt khe của nhiều lĩnh vực, từ thiết bị điện tử dân dụng đến các hệ thống công nghiệp và hạ tầng năng

¹ Trường Điện - Điện Tử, Đại học Bách khoa Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

² Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Mở Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

lượng tái tạo. Trong bối cảnh nguồn nhiên liệu hóa thạch đang dần cạn kiệt, việc ứng dụng các bộ biến đổi này trong hệ thống điện mặt trời (PV), pin nhiên liệu, xe điện lai (HEV) (Qadir & Ati, 2024) và hệ thống lưu trữ năng lượng dung lượng cao trở nên đặc biệt cấp thiết, nhằm cung cấp một điện áp ổn định từ các nguồn sơ cấp vốn có đặc tính ngẫu nhiên và khó điều tiết (Safari & Ardi, 2018).

Trong số các cấu trúc hình học phổ biến, bộ biến đổi Buck-Boost nhận được sự quan tâm lớn nhờ khả năng linh hoạt trong việc điều chỉnh điện áp đầu ra thấp hơn hoặc cao hơn điện áp đầu vào thông qua việc thay đổi chu kỳ làm việc của khóa bán dẫn. Tuy nhiên, việc thiết kế bộ điều khiển cho cấu trúc này đối mặt với nhiều thách thức kỹ thuật phức tạp do đây là một hệ thống có cấu trúc thay đổi, vận hành phi tuyến tính (Salazar và cộng sự, 2013) và mang đặc tính pha không cực tiểu (non-minimum phase) (Safari & Ardi, 2018) bởi sự xuất hiện của điểm không nằm bên phải mặt phẳng phức (RHPZ) trong hàm truyền.

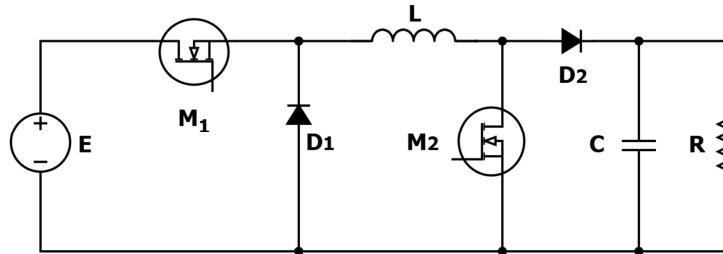
Những đặc điểm này đòi hỏi các chiến lược điều khiển tiên tiến để đảm bảo tính ổn định của hệ thống và khả năng đáp ứng động học nhanh chóng trước các nhiễu động. Các phương pháp điều khiển truyền thống, điển hình là bộ điều khiển PID (Proportional-Integral-Derivative), đã được ứng dụng rộng rãi nhờ cấu trúc đơn giản và tính khả thi trong thiết kế dựa trên việc điều chỉnh sai số giữa giá trị thực tế và giá trị đặt (Qadir & Ati, 2024). Để cải thiện hiệu suất, một số nghiên cứu đề xuất cấu trúc điều khiển hai vòng lặp: Vòng lặp trong điều khiển dòng điện và vòng lặp ngoài điều khiển điện áp đầu ra (Algamluoli & Hasan, 2020). Tuy nhiên, do bản chất là bộ điều khiển tuyến tính,

PID thường bộc lộ hạn chế khi hệ thống vận hành xa điểm làm việc định mức hoặc chịu tác động từ các nhiễu động lớn về tải và điện áp đầu vào, dẫn đến hiện tượng vọt lố cao và thời gian xác lập kéo dài. Để khắc phục những nhược điểm này, các phương pháp điều khiển phi tuyến như Fuzzy-Logic (FLC) đã được đề xuất, cho phép điều phối hệ thống dựa trên kinh nghiệm và quy tắc ngôn ngữ mà không phụ thuộc hoàn toàn vào mô hình toán học chính xác (Sahin & Okumus, 2011). Nhiều nghiên cứu thực nghiệm đã chứng minh FLC có khả năng cải thiện đáp ứng quá độ và duy trì tính bền vững tốt hơn so với PID trong các ứng dụng sạc pin và năng lượng mặt trời, dù hiệu quả của nó vẫn phụ thuộc chặt chẽ vào việc xây dựng cơ sở quy tắc và hàm thuộc.

Bên cạnh đó, điều khiển chế độ trượt (SMC) cũng được biết đến là một phương pháp mạnh mẽ dành cho các bộ biến đổi điện tử công suất, đặc biệt phù hợp cho các bộ biến đổi điện tử công suất vốn có bản chất chuyển mạch (Mohan & Sinha, 2008). Nhờ đặc tính bền vững tuyệt đối trước sự thay đổi tham số và nhiễu ngoài bằng cách cưỡng bức quỹ đạo trạng thái hệ thống di chuyển và duy trì trên một bề mặt trượt xác định (Torhchani, 2025). Dẫu vậy, lý thuyết SMC đòi hỏi tần số chuyển mạch vô hạn, điều này dẫn đến hiện tượng rung (chattering) trên bề mặt trượt trong các ứng dụng thực tế với tần số hữu hạn (Sahin và cộng sự, 2015). Trong một số cấu trúc mạch Buck-Boost gặp phải vấn đề về điểm không bên phải mặt phẳng phức, cụ thể hơn là khi chu kỳ làm việc D tăng, năng lượng tích trữ trong cuộn cảm L tăng, nhưng điện áp đầu ra V_o lại giảm tạm thời do cuộn cảm chỉ giải phóng năng lượng vào tải khi phân tử đóng cắt tắt. RHPZ phản ánh sự trễ pha này: thay vì điện áp

tăng ngay lập tức, nó lại giảm trước khi tăng. Để giải quyết vấn đề RHPZ, phương pháp điều khiển dòng điện thường được áp dụng trong thiết kế SMC thay vì chỉ

điều khiển điện áp (Safari & Ardi, 2018) và sử dụng cấu trúc mạch nối tầng. Cấu trúc cơ bản của mạch được thể hiện trong Hình 1 dưới đây.



Hình 1. Cấu trúc tổng quan của mạch Buck-Boost nối tầng

Để đạt được điện áp đầu ra ổn định, dòng điện cuộn cảm không đổi và cải thiện hệ số công suất, hai vòng điều khiển có thể được mô hình hóa. Bộ điều khiển này bao gồm vòng điều khiển điện áp đóng vai trò là vòng ngoài và điều khiển dòng điện là vòng trong. Vai trò của bộ điều khiển điện áp nhằm giữ điện áp đầu ra ổn định trong khi vòng điều khiển dòng điện tạo tín hiệu điều khiển cho các khóa chuyển mạch (Zulkifli, 2013).

Sự phát triển của công nghệ bán dẫn hiện đại, đặc biệt là các linh kiện dựa trên nền tảng Silicon Carbide (SiC), cùng với các bộ xử lý tín hiệu số tốc độ cao, hiện đã tạo điều kiện thuận lợi cho việc triển khai các thuật toán phức tạp như điều khiển dự đoán hay trí tuệ nhân tạo (mạng nơ-ron và logic mờ) trong thời gian thực với độ chính xác cao. Trong xu thế đó, bộ điều khiển học lặp (Iterative Learning Control - ILC), dựa trên ý tưởng “điều khiển thông qua phép thử” của Uchima từ năm 1978, đã nổi lên như một giải pháp hiệu quả cho các hệ thống hoạt động có tính chất chu kỳ nhờ cấu trúc đơn giản và khả năng tự tối ưu hóa qua từng vòng lặp. Trong nghiên cứu này, tác giả thực hiện ứng dụng bộ điều khiển học lặp để điều chế độ rộng xung cho bộ biến đổi Buck-Boost sử dụng bộ điều khiển

học lặp ILC, nhằm thay thế các phương pháp truyền thống vốn tồn tại những nhược điểm cố hữu. Quá trình thực nghiệm được triển khai trên phần mềm PSCAD - một công cụ mô phỏng mạnh mẽ trong phân tích hệ thống điện và điện tử công suất. Để mở rộng khả năng tính toán vượt ngoài các thư viện sẵn có của phần mềm, thuật toán ILC đã được thiết lập thông qua ngôn ngữ FORTRAN dưới dạng linh kiện người dùng tự định nghĩa trong môi trường PSCAD/EMTDC. Sau khi hoàn thiện mô hình mô phỏng, các kết quả thu được sẽ được đối chiếu với bộ điều khiển PI tiêu chuẩn để đánh giá hiệu năng.

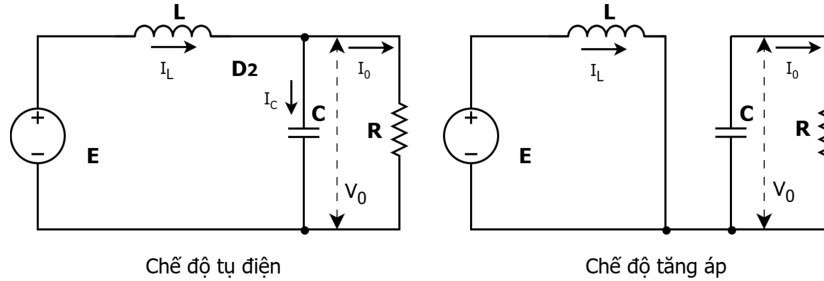
II. Cơ sở lý thuyết

2.1. Mô hình bộ biến đổi Buck-Boost nối tầng

Như đã giới thiệu ở phần trên, cấu trúc của bộ biến đổi Buck-Boost nối tầng (CBB) sử dụng 2 phần tử đóng cắt. Mục tiêu của CBB là có được điện áp đầu ra ổn định và cải thiện hệ số công suất cho dòng điện đầu vào (Yang và cộng sự, 2014). Một ưu điểm khác của CBB là khả năng hoạt động ở Chế độ dẫn liên tục (CCM) đối với dòng điện cuộn cảm, điều này phù hợp để làm nguồn dòng DC cấp cho tải. Các phương trình không

gian trạng thái trung bình đã được mô hình hóa sử dụng điều kiện ba trạng thái của mạch CBB, bao gồm: chế độ tụ điện D_c , chế độ tăng áp D_b và chế độ dòng

chạy tự do D_f . Phạm vi của nghiên cứu này sẽ đi sâu vào phân tích hai chế độ D_c và D_b của mạch CBB được thể hiện trong Hình 2.



Hình 2. Mô hình tương đương 2 chế độ trong CBB

Mô hình không gian trạng thái của 2 chế độ trên (Zulkifli, 2013) được thể hiện thông qua hai phương trình sau:

$$\begin{bmatrix} \frac{d i_L}{dt} \\ \frac{d V_0}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R_0 C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_i \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{d i_L}{dt} \\ \frac{d V_0}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R_0 C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_i \quad (2)$$

Xét chu kỳ $D_f = 0$ nên ta có: $D_b + D_c = 1$. Nhân các thành phần D_b và D_c với giá trị thành phần tương ứng trong phương trình (1) và (2) ta có:

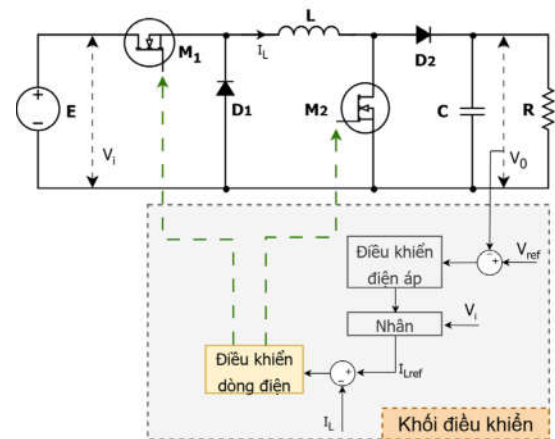
$$\begin{bmatrix} \frac{d i_L}{dt} \\ \frac{d V_0}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{D_c}{L} \\ \frac{D_c}{C} & -\frac{D_c}{R_0 C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{D_c}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_i \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{d i_L}{dt} \\ \frac{d V_0}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{D_b}{R_0 C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{D_b}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_i \quad (4)$$

Trung bình hóa không gian trạng thái từ phương trình (3) và (4) ta được phương trình ràng buộc các thông số dòng điện và điện áp trong mạch:

$$\begin{bmatrix} \frac{d i_L}{dt} \\ \frac{d V_0}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{D_c}{L} \\ \frac{D_c}{C} & -\frac{D_c - D_b}{R_0 C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{D_c + D_b}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_i \quad (5)$$

Cấu hình bộ điều khiển đề xuất được trình bày trong Hình 3.

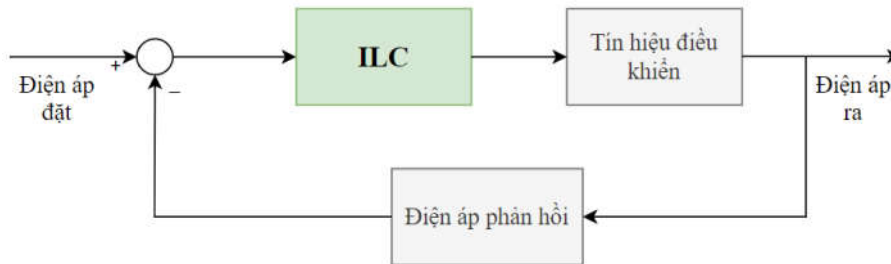


Hình 3. Sơ đồ tổng quan bộ điều khiển sử dụng

Sơ đồ cho thấy hai khối điều khiển, với vòng điều khiển điện áp, điện áp ngõ ra V_0 được so sánh với điện áp tham chiếu V_{ref} để tạo ra chu kỳ nhiệm vụ mong muốn D_c cho chế độ tụ điện. Khối nhân được sử dụng để tạo ra dòng điện cảm tham chiếu I_{Lref} . Dòng điện này sau đó được so sánh với tín hiệu phản hồi của dòng điện cảm I_L . Dòng I_L được sử dụng làm phản hồi nhằm đạt được chế độ dòng liên tục (CCM) ổn định.

2.2. Bộ điều khiển học lặp ILC

Điều khiển học lặp là một kỹ thuật điều khiển đơn giản, hiệu quả, có thể giảm dần các lỗi phản hồi và cải thiện độ ổn định của hệ thống thông qua việc điều chỉnh thông số điều khiển qua mỗi lần học. Mục tiêu của ILC là tạo ra một tín hiệu chuyển



Hình 4. Sơ đồ khối vòng điều khiển điện áp sử dụng ILC

Gọi u_k và y_k lần lượt biểu diễn tín hiệu đầu vào và đầu ra của bộ điều khiển ILC, với k là số lần lặp lại, y_t là điện áp đầu ra mong muốn của bộ biến đổi Buck-Boost, u_k tại lần lặp thứ k tương ứng với đầu ra y_k của bộ điều khiển. Sai số e_k giữa đầu vào và đầu ra được tính toán, một tín hiệu u_{k+1} được tính toán và cập nhật dựa trên các ràng buộc điều khiển. Nhiệm vụ thiết kế sao cho qua mỗi lần học, giá trị đầu ra y_k sẽ dần hội tụ về điểm làm việc mong muốn y_t . Nói cách khác, mong muốn thiết kế bộ điều khiển sao cho e_k tiến tới 0 khi k tiến tới vô cùng

Giả sử có quan hệ ánh xạ giữa tín hiệu đầu vào và tín hiệu đầu ra như sau:

$$y = f(u) \quad (6)$$

Độ rộng xung điều chế u_r thỏa mã phương trình $y_t = f(u_r)$, ta có:

$$\begin{cases} u_{k+1} = u_k + u(e_k) \\ e_k = y_t - y_k \end{cases} \quad (7)$$

Một luật điều khiển ILC đơn giản được thiết lập cho hệ thống như sau với q là số lần học lặp:

$$u_{k+1} = u_k + qe_k \quad (8)$$

tiếp để theo dõi một tham chiếu cụ thể hoặc để loại bỏ một tín hiệu nhiễu lặp lại. ILC mang tính chất dự đoán và có thể bù đắp cho các tín hiệu ngoại sinh, ví dụ như tín hiệu nhiễu có tính lặp lại bằng cách học từ những lần lặp trước đó. Nguyên lý của bộ điều khiển được mô tả

Xét ξ_t và ξ_d lần lượt là cận trên và cận dưới của hàm gradient:

$$f_u = \frac{\partial f}{\partial u}$$

$$\begin{aligned} e_{k+1} &= y_t - y_{k+1} \\ &= e_k - [f(u_{(k+1)}) - f(u_k)] \\ &= [1 - qf_u(u_k^*)]e_k \end{aligned} \quad (9)$$

Trong đó u_k^* được xác định bằng:

$$f(u_{k+1}) - f(u_k) = f_u(u_k^*)(u_{k+1} - u_k)$$

Theo đó ta có:

$$|1 - qf_u(u_k^*)| < 1$$

$$\text{Vì vậy } \frac{e_{k+1}}{e_k} < 1 \text{ hay } \lim_{k \rightarrow \infty} e_k = 0$$

Hệ quả là tín hiệu sai lệch của hệ thống được loại bỏ, sự hội tụ của bộ điều khiển ILC được đảm bảo. Hệ số học lặp q được tính như sau:

$$q = sat \frac{u_k - u_{k-1}}{y_k - y_{k-1}} \quad (10)$$

III. Phương pháp, vật liệu nghiên cứu

3.1. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu này tiếp cận bài toán điều khiển bộ biến đổi Buck-Boost nối tầng thông qua việc xây dựng mô hình toán học dựa trên phương pháp trung bình hóa không gian trạng thái (State-Space Averaging), tập trung phân tích hoạt động của mạch ở các chế độ tụ điện và tăng áp để thiết lập phương trình ràng buộc giữa dòng điện và điện áp. Trên cơ sở lý thuyết này, tác giả đề xuất chiến lược điều khiển học lặp (ILC) với cấu trúc hai vòng lặp - vòng ngoài điều khiển điện áp và vòng trong điều khiển dòng điện, sử dụng luật cập nhật kiểu PID nhằm tối ưu hóa tín hiệu điều khiển và triệt tiêu sai số qua từng chu kỳ hoạt động mà không phụ thuộc hoàn

toàn vào mô hình chính xác của đối tượng. Để triển khai thuật toán, nghiên cứu sử dụng phần mềm PSCAD/EMTDC làm môi trường mô phỏng chính. Hiệu quả của phương pháp được kiểm chứng và đánh giá định lượng thông qua việc so sánh các chỉ tiêu chất lượng quá độ (độ quá điều chỉnh, thời gian xác lập) với bộ điều khiển PID truyền thống trong cả hai kịch bản tăng áp và giảm áp.

3.2. Xây dựng mô hình bộ điều khiển ILC

Xác định luật cập nhật sau để xác định đầu vào của hệ thống:

$$u_{j+1}(i) = u_j(i) + \Delta u_{j+1}(i) \quad (11)$$

Trong đó $\Delta u_{j+1}(i)$ là một số hạng hiệu chỉnh. Theo chiến lược PID, $\Delta u_{j+1}(i)$ được chọn như sau:

$$\Delta u_{j+1}(i) = k_p e_j(i+1) + k_I \sum_{m=1}^{i+1} e_j(m) + k_D (e_j(i+1) - e_j(i)) \quad (12)$$

Với: $e_j(i) = y_d(i) - y_j(i)$ là sai số điều khiển qua các lần lặp.

K_p , K_I , K_D là các hệ số hằng số thực (hệ số), lần lượt là các hệ số học tỷ lệ, tích phân và đạo hàm. Việc lựa

chọn tham số này sao cho điều kiện hội tụ được thỏa mãn. Coi khoảng giảm mỗi vòng lặp là $V(j)$. Nhiệm vụ của bộ điều khiển học lặp chính là thiết kế một quy luật để tính $V(j)$ sao cho sai lệch giảm dần qua mỗi lần lặp.

$$V(j) = (k_p + k_D) e_j(i+1) + k_I \sum_{m=1}^{i+1} e_j(m) - k_D e_j(i) \quad (13)$$

- Thành phần tỷ lệ và đạo hàm, tích phân và đạo hàm lần lượt được biểu diễn:

$$\begin{bmatrix} (k_p + k_D) e_j(1) \\ (k_p + k_D) e_j(2) \\ \boxtimes \end{bmatrix} = (k_p + k_D) \begin{bmatrix} 1 & 0 & \boxtimes \\ 0 & 1 & \boxtimes \\ \boxtimes & \boxtimes & \boxtimes \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_j(1) \\ e_j(2) \\ \boxtimes \end{bmatrix} = (k_p + k_D) I E(j) \quad (14)$$

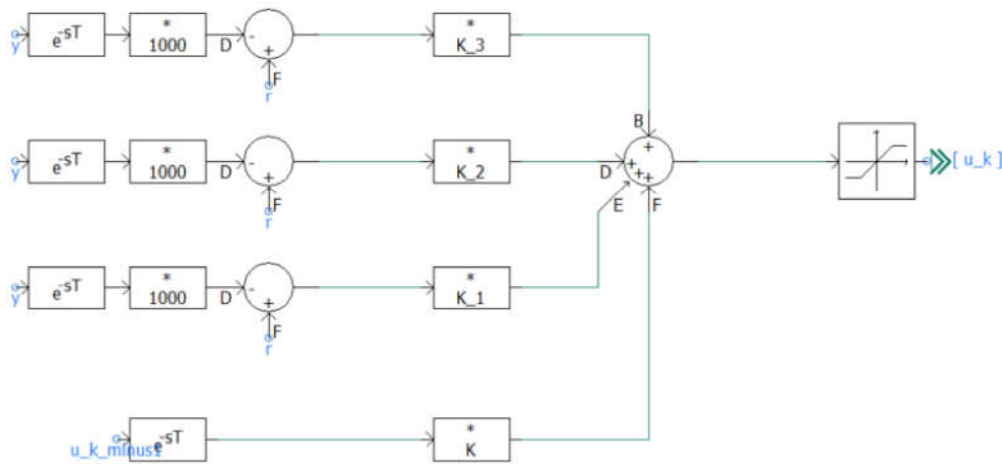
$$k_I \begin{bmatrix} e_j(1) \\ e_j(1) + e_j(2) \\ \boxtimes \end{bmatrix} = k_I \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \boxtimes \\ 1 & 1 & 0 & \boxtimes \\ 1 & 1 & 1 & \boxtimes \\ \boxtimes & \boxtimes & \boxtimes & \boxtimes \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_j(1) \\ e_j(2) \\ e_j(3) \\ \boxtimes \end{bmatrix} = k_I F_1 E(j) \quad (15)$$

$$k_D \begin{bmatrix} 0 \\ e_j(1) \\ e_j(2) \\ \vdots \end{bmatrix} = k_D \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \vdots \\ 0 & 1 & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_j(1) \\ e_j(2) \\ e_j(3) \\ \vdots \end{bmatrix} = k_D F_2 E(j) \quad (16)$$

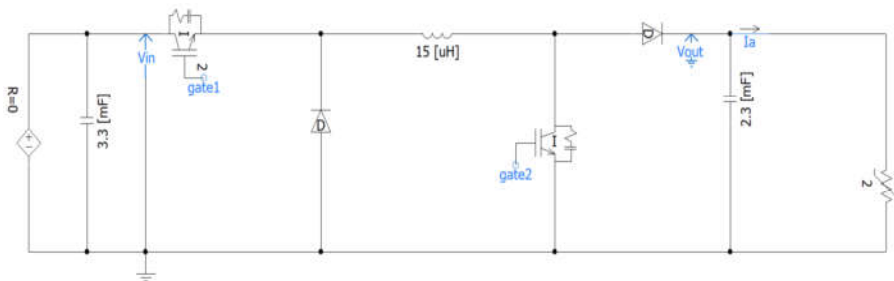
Điều kiện cho quá trình học hội tụ:

$$I - G[(k_p + k_D)I + k_I F_1 - k_D F_2] < 1 \quad (17)$$

Từ các phương trình toán học trên, ta thiết lập được mô hình bộ điều khiển ILC trong phần mềm PSCAD được trình bày trong Hình 5.



Hình 5. Bộ điều khiển ILC



Hình 6. Mô hình mạch Buck-Boost xây dựng trong PSCAD

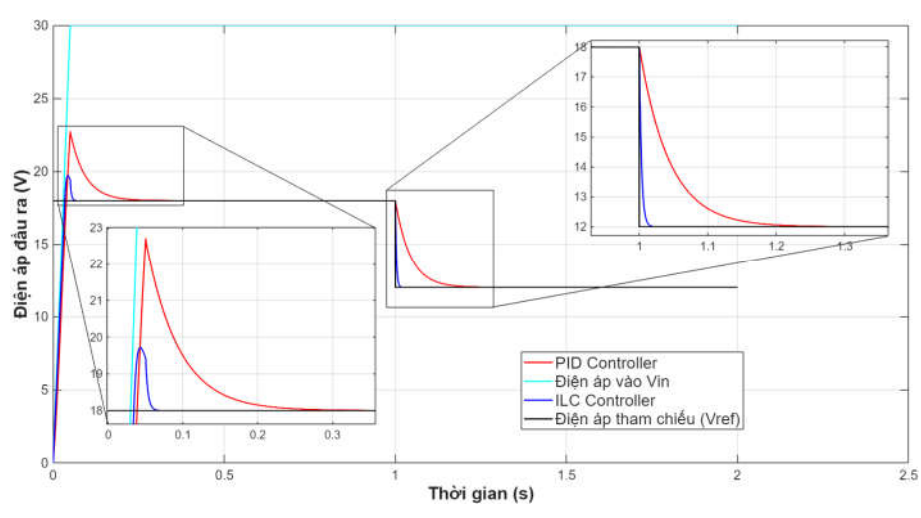
Mạch buck-boost được mô phỏng với thông số: V_i biến thiên trong dải 25 - 60 V, $V_o = 24-48V$, $R=2\Omega$, $L= 15\mu H$, $C= 2.3mF$, tần số đóng cắt 250kHz

IV. Kết quả và thảo luận

4.1. Trường hợp bộ biến đổi chạy ở chế độ giảm áp

Trong trường hợp này, xét đầu vào bộ biến đổi điện có điện áp không đổi ở

mức 30V, điện áp đầu ra được thay đổi ở các mức 18V và 12V, đặc tính được mô phỏng trong phần mềm PSCAD, dữ liệu mô phỏng được vẽ lại đặc tính thông qua Matlab được thể hiện trong Hình 7.



Hình 7. Đặc tính đáp ứng điện áp đầu ra bộ biến đổi Buck-Boost chế độ giảm áp
 Bảng 1. Bảng so sánh thông số đáp ứng đầu ra giữa 2 bộ điều khiển tại chế độ giảm áp

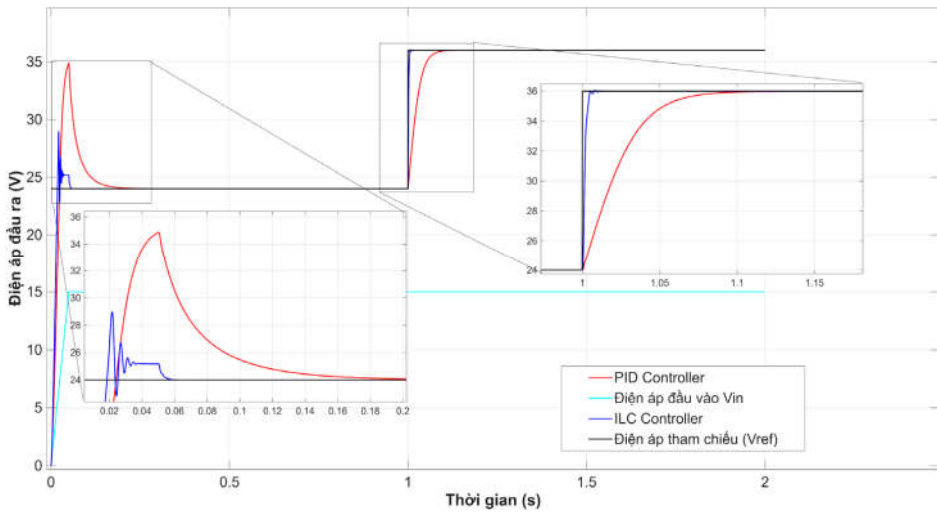
Bộ điều khiển		Độ quá điều chỉnh (%)	Thời gian đáp ứng (s)
Giai đoạn quá độ	ILC	9	0.05
	PID	25	0.3
Giai đoạn giảm áp	ILC	0	0.02
	PID	0	0.2

Ta thấy độ quá điều chỉnh của bộ điều khiển PID cao hơn rất nhiều so với ILC, đồng thời thời gian xác lập của PID cũng lớn hơn của ILC tương đối lớn. Tuy

nhien cả hai bộ điều khiển đều cho thấy khả năng triệt tiêu sai số xác lập tốt sau khi hết giai đoạn quá độ. Kết quả so sánh chi tiết được thể hiện trong Bảng 1.

4.2. Trường hợp bộ biến đổi chạy ở chế độ tăng áp

Trong trường hợp này, xét đầu vào bộ biến đổi điện có điện áp không đổi ở mức 15V, điện áp đầu ra được thay đổi ở các mức 24V và 36V, đặc tính được mô phỏng trong phần mềm PSCAD, dữ liệu mô phỏng được vẽ lại đặc tính thông qua Matlab được thể hiện trong Hình 8.



Hình 8. Đặc tính đáp ứng điện áp đầu ra bộ biến đổi Buck-Boost chế độ tăng áp

Đáp ứng đầu ra của bộ biến đổi trong chế độ tăng áp được tính toán chi tiết trong Bảng 2.

Bảng 2. Bảng so sánh thông số đáp ứng đầu ra giữa 2 bộ điều khiển tại chế độ tăng áp

Bộ điều khiển		Độ quá điều chỉnh (%)	Thời gian đáp ứng (s)
Giai đoạn quá độ	<i>ILC</i>	21	0.05
	<i>PID</i>	46	0.2
Giai đoạn giảm áp	<i>ILC</i>	0	<0.01
	<i>PID</i>	0	0.12

Trong chế độ tăng áp này, sự chênh lệch hiệu năng càng rõ rệt hơn chế độ hạ áp trước đó. PID bộc lộ điểm yếu là độ quá điều chỉnh quá lớn khi khởi động, trong khi ILC kiểm soát năng lượng tốt hơn nhiều và duy trì khả năng bám sát tín hiệu đặt tuyệt vời.

V. Kết luận

Nghiên cứu đã đề xuất và triển khai thành công chiến lược điều khiển học lặp (ILC) cho bộ biến đổi Buck-Boost, được kiểm chứng thông qua môi trường mô phỏng PSCAD/EMTDC. Kết quả định lượng khẳng định thuật toán ILC mang lại hiệu suất vượt trội so với bộ điều khiển PID truyền thống trên cả hai phương diện: độ ổn định và tốc độ đáp ứng. Cụ thể, tại các kịch bản vận hành thay đổi, bộ điều khiển đề xuất đã giảm thiểu đáng kể độ vọt lố điện áp đầu ra (giảm từ 46% xuống 21% ở chế độ tăng áp và từ 25% xuống 9% ở chế độ giảm áp), đồng thời rút ngắn thời gian xác lập xuống còn khoảng 0.05s, nhanh gấp 4 đến 6 lần so với đối chứng PID. Bên cạnh đó, khả năng bám tín hiệu tham chiếu của ILC đạt độ chính xác cao với thời gian

đáp ứng tức thời (dưới 0.02s), khắc phục triệt để nhược điểm về độ trễ và dao động quá độ lớn thường gặp ở các phương pháp tuyến tính. Kết quả này minh chứng tiềm năng ứng dụng của ILC trong các hệ thống chuyển đổi năng lượng yêu cầu cao về chất lượng điện áp, tạo tiền đề quan trọng cho các nghiên cứu thực nghiệm phần cứng và tối ưu hóa luật học thích nghi trong tương lai.

Tài liệu tham khảo

- Algamluoli, A. F., & Hasan, H. A. (2020). *Voltage Controller of DC-DC Buck Boost Converter with Proposed PID Controller*. 9(1).
- Mohan, B. M., & Sinha, A. (2008). Mathematical models of the simplest fuzzy PI/PD controllers with skewed input and output fuzzy sets. *ISA Transactions*, 47(3), 300-310. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2007.03.008>
- Qadir, B. A., & Ati, M. (2024). Optimizing DC-DC Buck-Boost Converters with a PID Controller: Harnessing the Power of Silicon Carbide Technology. *2024 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICEET65156.2024.10913738>
- Safari, A., & Ardi, H. (2018). Sliding Mode Control of a Bidirectional Buck/Boost DC-DC Converter with Constant Switching Frequency. *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, 14(1). <https://doi.org/10.22068/IJEEE.14.1.69>
- Sahin, M. E., & Okumus, H. I. (2011). Fuzzy logic-controlled buck-boost DC-DC converter for solar energy-battery system. *2011 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications*, 394-397. <https://doi.org/10.1109/INISTA.2011.5946099>

- Sahin, M. E., Okumus, H. I., & Kahveci, H. (2015). Sliding mode control of PV powered DC/DC Buck-Boost converter with digital signal processor. *2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*, 1-8. <https://doi.org/10.1109/EPE.2015.7309361>
- Salazar, P., Ayala, P., Jimenez, S. G., & Correa, A. F. (2013). Design of a sliding mode control for a DC-to-DC buck-boost converter. *2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 4661-4666. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2013.6561777>
- Torchani, B. (2025). *Adaptive Sliding Mode Control of a Photovoltaic System with a Combined Boost/Buck Converter*. 91.
- Yang, C., Xie, S., Mao, L., & Zhang, Z. (2014). Efficiency improvement on two-switch buck-boost converter with coupled inductor for high-voltage applications. *IET Power Electronics*, 7(11), 2846-2856. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2013.0739>
- Zulkifli, S. A. (2013). Cascaded buck-boost converters: Output voltage regulation & constant inductor current. *2013 IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications*, 111-116. <https://doi.org/10.1109/ISIEA.2013.6738978>

ITERATIVE LEARNING CONTROL SCHEME FOR BUCK-BOOST CONVERTERS: A SIMULATION STUDY IN PSCAD/EMTDC

Pham Minh Tu¹, Trinh Van Cuong², Nguyen The Phong¹

Abstract: *This paper presents the design, analysis, and implementation of an Iterative Learning Control (ILC) scheme for a Buck-Boost power converter. The Buck-Boost converter is a versatile DC-DC power electronic circuit capable of operating in both step-down (Buck) and step-up (Boost) modes. To enhance system performance and stability, an ILC-based controller is proposed to optimize the circuit response under varying load conditions while minimizing periodic errors. By learning from previous operation cycles, the ILC controller autonomously adjusts control parameters to achieve optimal performance without requiring an exact mathematical model of the system. Simulations and experimental evaluations were conducted using PSCAD software to assess the effectiveness of the ILC in regulating output voltage and improving conversion efficiency. The results demonstrate that the proposed ILC scheme provides robust stability and excellent adaptability across diverse operating conditions, highlighting its potential for high-precision power conversion applications.*

Keywords: *voltage control, current control, iterative learning control (ILC), Buck-Boost converter, PSCAD*

¹ School of Electrical and Electronic Engineering, Hanoi University of Science Technology, Hanoi, Vietnam

² Faculty of Electric and Electronic Engineering, Hanoi Open University, Hanoi, Vietnam