

# NGHIÊN CỨU ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO DÒNG ĐIỆN KHÔNG TRỌNG SỐ CHO NGHỊCH LƯU NỐI LƯỚI SỬ DỤNG KỸ THUẬT TỐI ƯU HÓA THEO THỨ TỰ BẠC ƯU TIÊN

## WEIGHTING FACTOR-LESS MODEL PREDICTIVE CURRENT CONTROL FOR GRID-TIED INVERTERS USING RANKING-BASED OPTIMIZATION TECHNIQUE

NGUYỄN VĂN TIẾN\*, ĐỖ KHẮC TIỆP, CAO ĐỨC THANH

Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

\*Email liên hệ: nguyenvantien@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.980>

### Tóm tắt

Nghiên cứu này đề xuất một phương pháp điều khiển dự báo dòng điện tập hữu hạn FCS-MPC (Finite Control Set Model Predictive Control) cải tiến cho bộ nghịch lưu nối lưới ba pha, nhằm giải quyết hạn chế của các phương pháp truyền thống đó là sự phụ thuộc vào trọng số trong hàm mục tiêu và độ nhạy cảm cao với nhiễu đo lường điện áp. Nghiên cứu thực hiện hai cải tiến: Thứ nhất, ứng dụng thuật toán tối ưu hóa theo thứ tự bậc ưu tiên kết hợp với ràng buộc trễ động, cho phép giải quyết xung đột giữa mục tiêu bám dòng và giảm tần số đóng cắt mà không cần quá trình tinh chỉnh hệ số trọng số phức tạp; Thứ hai là tích hợp kỹ thuật tái tạo điện áp lưới dựa trên vòng khóa pha, giúp triệt tiêu hoàn toàn tác động của nhiễu hài bậc cao và sai số cảm biến lên mô hình dự báo. Kết quả mô phỏng trên MATLAB/Simulink chứng minh giải pháp đề xuất vượt trội hơn so với bộ điều khiển PI trên hệ tọa độ dq và MPC truyền thống về đặc tính đáp ứng và chất lượng điện năng. Đồng thời, hệ thống duy trì độ ổn định cao và tần số đóng cắt thấp ngay cả trong điều kiện lưới điện bị nhiễu loạn, khẳng định tiềm năng ứng dụng trong các hệ thống năng lượng tái tạo hiệu suất cao.

**Từ khóa:** Nghịch lưu nối lưới, Điều khiển dự báo, Tối ưu hóa xếp hạng, Tái tạo điện áp lưới, Chất lượng điện năng.

### Abstract

This study proposes an improved Finite Control Set Model Predictive Control (FCS-MPC) method for three-phase grid-tied inverters, aiming to address the limitations of conventional methods, specifically the dependence on weighting factors in the cost function and high sensitivity to voltage measurement noise. Two key improvements are

implemented: First, the application of a ranking-based optimization algorithm combined with dynamic delay constraints, which resolves the trade-off between current tracking and switching frequency reduction without the need for complex weighting factor tuning. Second, the integration of a PLL-based grid voltage reconstruction technique, which effectively eliminates the impact of high-order harmonics and sensor errors on the prediction model. Simulation results in MATLAB/Simulink demonstrate that the proposed solution outperforms both the conventional PI-dq controller and traditional MPC in terms of dynamic response characteristics and power quality. Furthermore, the system maintains high stability and low switching frequency even under distorted grid conditions, confirming its potential application in high-efficiency renewable energy systems.

**Keywords:** Grid-tied inverter, Predictive Control, Ranking optimization, Grid voltage reconstruction Power quality.

### 1. Mở đầu

Trong bối cảnh chuyển dịch năng lượng toàn cầu nhằm giảm thiểu khí thải carbon, các nguồn năng lượng tái tạo như điện mặt trời và điện gió đang chiếm tỷ trọng ngày càng lớn trong cơ cấu nguồn điện [1]. Để tích hợp hiệu quả các nguồn năng lượng này vào lưới điện quốc gia, bộ nghịch lưu nguồn áp đóng vai trò then chốt trong việc chuyển đổi năng lượng và điều tiết công suất [2]. Yêu cầu đặt ra cho các bộ nghịch lưu nối lưới hiện đại không chỉ dừng lại ở hiệu suất chuyển đổi cao mà còn đòi hỏi đáp ứng động học nhanh, chất lượng điện năng tốt và khả năng hoạt động ổn định trước các biến động của lưới điện [3].

Các phương pháp điều khiển truyền thống như

Điều khiển định hướng điện áp VOC (Voltage Oriented Control) sử dụng bộ điều khiển  $PI$  trên hệ tọa độ  $dq$  ( $PI-dq$ ) kết hợp với điều chế độ rộng xung PWM (Pulse Width Modulation) đã được áp dụng rộng rãi nhờ tần số đóng cắt cố định và thiết kế bộ lọc đơn giản [4]. Tuy nhiên, bản chất của bộ điều khiển  $PI$  tuyến tính thường bộc lộ hạn chế về tốc độ đáp ứng động học và khó khăn trong việc xử lý các ràng buộc phi tuyến của hệ thống [5].

Để khắc phục những nhược điểm trên, Điều khiển dự báo tập hợp hữu hạn FCS-MPC được nghiên cứu như một giải pháp thay thế đầy tiềm năng trong những năm gần đây [6]. FCS-MPC tận dụng mô hình rời rạc của bộ nghịch lưu để dự báo hành vi của các biến trạng thái (dòng điện, công suất) cho tất cả các trạng thái chuyển mạch khả thi, sau đó chọn ra trạng thái tối ưu nhất dựa trên một hàm mục tiêu có ràng buộc [7]. Ưu điểm của FCS-MPC là đáp ứng quá độ nhanh, dễ dàng tích hợp các ràng buộc phi tuyến và không cần đến bộ điều chế PWM [8].

Mặc dù có nhiều ưu điểm, thách thức lớn nhất của FCS-MPC truyền thống nằm ở việc thiết kế hàm mục tiêu. Thông thường, hàm mục tiêu là tổng có trọng số của các thành phần sai số (dòng điện, công suất) và các ràng buộc phụ (tần số đóng cắt, cân bằng điểm trung tính) [9]. Việc lựa chọn hệ số trọng số ( $\lambda$ ) phù hợp thường dựa trên quy trình thử - sai tốn kém thời gian và mang tính chủ quan, không đảm bảo tính tối ưu toàn cục [10]. Một số nghiên cứu gần đây đã đề xuất sử dụng các thuật toán trí tuệ nhân tạo như giải thuật di truyền GA (Genetic Algorithm) hay tối ưu hóa bầy đàn PSO (Particle Swarm Optimization) để tìm  $\lambda$  tối ưu [11, 12]. Tuy nhiên, các phương pháp này lại làm tăng đáng kể khối lượng tính toán, gây khó khăn cho việc triển khai trên các vi xử lý trong thời gian thực.

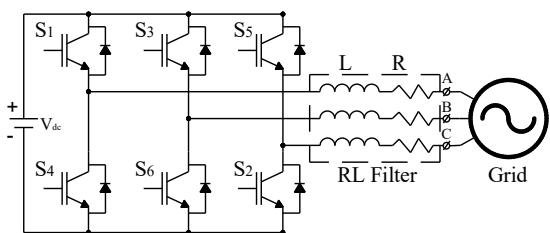
Để giải quyết triệt để vấn đề hệ số trọng số, hướng tiếp cận sử dụng kỹ thuật tối ưu hóa theo thứ tự bậc ưu tiên hay còn gọi là kỹ thuật xếp hạng (Ranking MPC) đang thu hút sự quan tâm lớn của giới nghiên cứu [13, 14]. Phương pháp này thay thế hàm mục tiêu tổng hợp duy nhất bằng một chuỗi các mục tiêu được xếp hạng theo mức độ quan trọng, ưu tiên đảm bảo sai số dòng điện trước, sau đó mới xét đến việc giảm tần số đóng cắt. Mặc dù vậy, các nghiên cứu về tối ưu hóa bậc ưu tiên hiện nay vẫn đối mặt với hai vấn đề tồn đọng: Thứ nhất là việc ưu tiên quá mức việc giảm chuyển mạch có thể gây ra sai số tĩnh hoặc gai dòng điện lớn tại các thời điểm dòng qua điểm không [15]; Thứ hai là độ nhạy cảm cao với nhiễu đo lường, đặc biệt là nhiễu điện áp lưới, làm suy giảm chất lượng dự báo.

Dựa trên những phân tích trên, bài báo này đề xuất một cấu trúc điều khiển dự báo dòng điện không trọng số sử dụng kỹ thuật tối ưu hóa theo thứ tự bậc ưu tiên cải tiến gọi tắt là IFCS-MPC (Improved FCS-MPC) cho bộ nghịch lưu nối lưới. So với các công bố trước đây, nghiên cứu này đóng góp 3 cải tiến.

Thứ nhất loại bỏ hoàn toàn hệ số trọng số bằng việc sử dụng thuật toán tối ưu hóa theo thứ tự bậc ưu tiên để giải quyết xung đột giữa mục tiêu bám dòng và giảm tần số đóng cắt mà không cần tinh chỉnh tham số  $\lambda$ . Thứ hai là bổ sung kỹ thuật tái tạo điện áp lưới. Cụ thể, thay vì sử dụng trực tiếp tín hiệu đo lường áp lưới chứa nhiễu để dự báo, nghiên cứu đề xuất phương pháp tái tạo điện áp lưới lý tưởng dựa trên thông tin pha từ vòng khóa pha PLL (Phase-Locked Loop). Kỹ thuật này giúp loại bỏ triệt để các nhiễu trong tính toán, giúp giảm méo hài tổng THD (Total Harmonic Distortion) đáng kể. Cuối cùng nghiên cứu đề xuất cơ chế lựa chọn vector thông minh, chỉ ưu tiên giảm chuyển mạch khi sai số dòng điện nằm trong phạm vi cho phép, đảm bảo cân bằng giữa chất lượng điện năng và hiệu suất thiết bị.

## 2. Mô hình toán học bộ nghịch lưu nguồn áp

Cấu trúc của hệ thống nghịch lưu nguồn áp ba pha hai bậc nối lưới được mô tả như trong Hình 1. Hệ thống bao gồm một nguồn điện áp một chiều ( $V_{DC}$ ), sáu khóa bán dẫn công suất IGBT được điều khiển kích mở theo cặp bổ sung và bộ lọc thụ động RL kết nối tại điểm đấu nối với lưới.



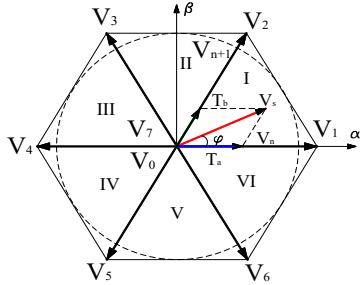
Hình 1. Cấu trúc mạch động lực của bộ nghịch lưu nguồn áp nối lưới

Trạng thái đóng cắt của bộ nghịch lưu được định nghĩa bởi vector  $S = [S_a, S_b, S_c]^T$ , trong đó  $S_x \in \{0, 1\}$  với  $x \in \{a, b, c\}$ . Giá trị  $S_x = 1$  tương ứng với khóa trên dẫn và khóa dưới ngắt, ngược lại  $S_x = 0$  tương ứng với khóa trên ngắt và khóa dưới dẫn. Do đó, tổng hợp các trạng thái đóng cắt tạo của các van sẽ tạo ra 8 vector điện áp như Hình 2.

Áp dụng định luật Kirchhoff về điện áp cho mạch vòng phía xoay chiều, phương trình động học của dòng điện trên hệ tọa độ ba pha  $abc$  được biểu diễn như sau:

$$v_{inv}^{abc} = R i_g^{abc} + L \frac{d i_g^{abc}}{dt} + v_g^{abc} \quad (1)$$

Trong đó:  $v_{inv}^{abc}, v_g^{abc}$  lần lượt là vector điện áp đầu ra của nghịch lưu và điện áp lưới trên hệ tọa độ  $abc$ ;  $i_g^{abc}$  là vector dòng điện hòa lưới trên hệ tọa độ  $abc$ ; R, L là điện trở và điện cảm của bộ lọc đầu ra.



Hình 2. Các vector áp ( $V_0 \div V_7$ ) tạo bởi trạng thái đóng cắt của các van

Để đơn giản hóa quá trình thiết kế bộ điều khiển và giảm bậc tự do của hệ thống, phương trình (1) được chuyển đổi sang hệ tọa độ tĩnh  $\alpha\beta$  thông qua phép biến đổi Clarke [10]. Mô hình toán học trong miền liên tục được viết lại như sau:

$$v_{inv}^{\alpha\beta} = R i_g^{\alpha\beta} + L \frac{d i_g^{\alpha\beta}}{dt} + v_g^{\alpha\beta} \quad (2)$$

Trong đó, vector điện áp đầu ra của nghịch lưu  $v_{inv}^{\alpha\beta}$  được xác định trực tiếp từ trạng thái đóng cắt S và điện áp DC-bus ( $V_{dc}$ ) theo công thức:

$$v_{inv}^{\alpha\beta} = \frac{2}{3} V_{dc} \left( e^{j0} S_a + e^{j\frac{2\pi}{3}} S_b + e^{j\frac{4\pi}{3}} S_c \right) \quad (3)$$

Để triển khai thuật toán FCS-MPC trên các vi xử lý kỹ thuật số, mô hình liên tục (2) cần được rời rạc hóa bằng cách sử dụng phương pháp xấp xỉ Euler thuận [10]. Mô hình dự báo dòng điện rời rạc tại thời điểm lấy mẫu  $(k+1)$  thu được như sau:

$$i_g^{\alpha\beta}(k+1) = \left( 1 - \frac{RT_s}{L} \right) i_g^{\alpha\beta}(k) + \frac{T_s}{L} [v_{inv}^{\alpha\beta}(k) - v_g^{\alpha\beta}(k)] \quad (4)$$

Với  $T_s$  là chu kỳ lấy mẫu. Phương trình (4) cho phép dự báo dòng điện tương lai cho mỗi trạng thái vector điện áp. Tuy nhiên, trong thực tế triển khai kỹ thuật số, độ trễ tính toán là yếu tố không thể bỏ qua. Tín hiệu điều khiển tối ưu được tính toán tại thời điểm  $k$  sẽ chỉ được áp dụng cho bộ biến đổi tại thời điểm  $(k+1)$ . Do đó, nếu sử dụng phương trình (4), dòng điện

thực tế sẽ bị trễ pha so với tham chiếu.

Để khắc phục hiện tượng này, nghiên cứu sử dụng chiến lược bù trễ bằng cách dự báo trước hai bước. Cụ thể, dòng điện tại thời điểm  $(k+1)$  được ước lượng dựa trên trạng thái đóng cắt tối ưu  $S_{opt}(k)$  đã chọn ở chu kỳ trước. Dòng điện tại thời điểm  $(k+2)$  được xác định trên cơ sở phương trình dự báo dòng điện (4) cho tất cả 8 vector  $V_i$  ( $i=0 \div 7$ ). Dòng điện tại thời điểm  $(k+2)$  khi đó được xác định bởi:

$$i_g^{\alpha\beta}(k+2) = A \cdot i_g^{\alpha\beta}(k+1) + B \cdot [V_i(k+1) - \hat{v}_g^{\alpha\beta}(k+1)] \quad (5)$$

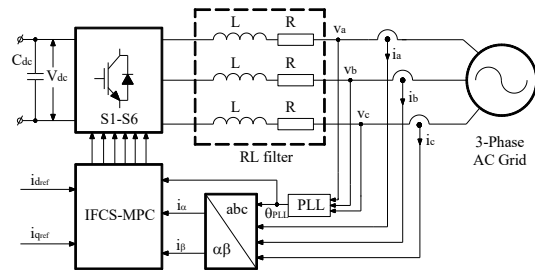
Trong đó các hệ số ma trận hệ thống được định nghĩa:

$A = \left( 1 - \frac{RT_s}{L} \right)$  và  $B = \frac{T_s}{L}$ . Biến  $\hat{v}_g^{\alpha\beta}(k+1)$  là giá trị điện áp lưới được tái tạo tại thời điểm  $(k+1)$ , sẽ được trình bày chi tiết trong phần phương pháp điều khiển đề xuất.

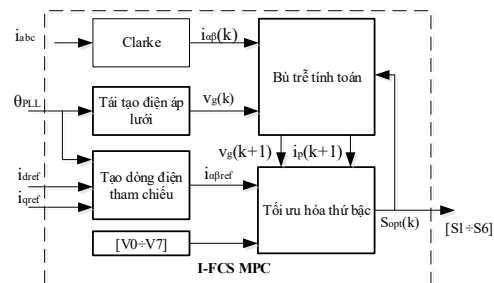
### 3. Phương pháp điều khiển đề xuất

Mục tiêu của phương pháp điều khiển đề xuất là giải quyết hai vấn đề của FCS-MPC truyền thống đó là sự suy giảm chất lượng dự báo do nhiều đo lường và sự phức tạp khi lựa chọn trọng số cho hàm mục tiêu.

Cấu trúc điều khiển cải tiến IFCS-MPC cho nghịch lưu nối lưới như Hình 3, bao gồm mạch nghịch lưu nguồn áp nối lưới qua bộ lọc RL và bộ điều khiển trung tâm IFCS-MPC kết hợp với khâu PLL.



Hình 3. Sơ đồ cấu trúc điều khiển nghịch lưu nối lưới với bộ điều khiển IFCS-MPC đề xuất



Hình 4. Cấu trúc bộ điều khiển dự báo dòng điện cải tiến IFCS-MPC

Cấu trúc khối bộ điều khiển IFCS-MPC bao gồm khối tái tạo điện áp lưới và khối tối ưu hóa theo thứ tự bậc ưu tiên cải tiến như Hình 4.

### 3.1. Kỹ thuật tái tạo điện áp lưới dựa trên PLL

Trong mô hình dự báo dòng điện (5), độ chính xác của điện áp lưới  $v_g$  đóng vai trò quyết định đến sai số bám dòng. Tuy nhiên, trong thực tế, tín hiệu điện áp đo trực tiếp thường chứa các thành phần nhiễu hài bậc cao và gai điện áp do quá trình đóng cắt của các van bán dẫn công suất. Việc đưa trực tiếp tín hiệu nhiễu này vào bộ điều khiển sẽ dẫn đến sai lệch trong tính toán vector dòng điện tham chiếu, gây ra dao động dòng điện và làm tăng độ méo dạng tổng.

Để khắc phục nhược điểm này, nghiên cứu đề xuất kỹ thuật tái tạo điện áp lưới. Thay vì sử dụng giá trị tức thời đo được, điện áp lưới được tái tạo dựa trên thông tin góc pha  $\theta$  thu được từ bộ vòng khóa pha PLL và biên độ định mức của lưới điện.

Giả sử lưới điện hoạt động ở chế độ cân bằng, các thành phần điện áp lưới tái tạo  $\hat{v}_g^{\alpha\beta}$  được xác định như sau:

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_{g\alpha}(k) \\ \hat{v}_{g\beta}(k) \end{bmatrix} = \hat{V}_{peak} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{PLL}(k)) \\ \sin(\theta_{PLL}(k)) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Trong đó,  $\hat{V}_{peak}$  là biên độ pha định mức của lưới điện và  $\theta_{PLL}$  là góc pha ước lượng đồng bộ. Việc sử dụng  $\hat{v}_g^{\alpha\beta}$  thay cho tín hiệu đo lường  $v_{meas}^{\alpha\beta}$  giúp cách ly hoàn toàn mô hình dự báo khỏi các nhiễu loạn tần số cao, đảm bảo tín hiệu dòng điện đầu ổn định ngay cả khi hoạt động với tần số lấy mẫu cao.

### 3.2. Thuật toán tối ưu hóa theo thứ tự bậc ưu tiên cải tiến

FCS-MPC truyền thống giải quyết bài toán đa mục tiêu bằng cách tối thiểu hóa các hàm mục tiêu thành phần. Trong nghịch lưu nối lưới các mục tiêu điều khiển cần đạt được là bám dòng điện đồng thời đảm bảo tần số chuyển mạch của van là ít nhất (để giảm tổn thất), do vậy cần sử dụng 2 hàm mục tiêu là  $J_1$  và  $J_2$ .

Hàm mục tiêu sơ cấp  $J_1$  đánh giá sai lệch bình phương giữa dòng điện tham chiếu và dòng dự báo tại bước  $(k+2)$ :

$$J_1(i) = (i_{ref_\alpha}(k+2) - i_\alpha^p(k+2))^2 + (i_{ref_\beta}(k+2) - i_\beta^p(k+2))^2 \quad (7)$$

Hàm mục tiêu thứ cấp  $J_2$ , đánh giá số lượng van bán dẫn thay đổi trạng thái so với chu kỳ trước:

$$J_2(i) = \sum_{x \in \{a,b,c\}} |S_{x,i}(k+1) - S_{x,opt}(k)| \quad (8)$$

Mục tiêu điều khiển đạt được thông qua một hàm chi phí tổng hợp:

$$g = J_1 + \lambda J_2$$

Tuy nhiên, việc xác định hệ số trọng số  $\lambda$  để cân bằng giữa sai số dòng điện ( $J_1$ ) và tần số đóng cắt ( $J_2$ ) thường mang tính chủ quan và không đảm bảo tính tối ưu toàn cục. Để loại bỏ sự phụ thuộc vào  $\lambda$ , nghiên cứu này áp dụng phương pháp tối ưu hóa theo thứ tự bậc ưu tiên. Trong phương pháp này, các mục tiêu điều khiển được sắp xếp theo thứ tự ưu tiên bám dòng điện sau đó là giảm tần số đóng cắt.

Nguyên tắc tối ưu phân cấp được thực hiện như sau. Ở bước đầu tiên, thực hiện tính toán giá trị  $J_1$  cho tất cả 8 vector điện áp. Các vector được sắp xếp theo thứ tự tăng dần của  $J_1$  để tạo thành một tập hợp ứng viên tiềm năng  $G_{cand}$ . Ở bước tiếp theo, tiến hành tìm và chọn vector có  $J_2$  nhỏ nhất trong tập  $G_{cand}$ .

Tuy nhiên, cách tiếp cận này có thể dẫn đến việc chọn một vector có sai số dòng điện lớn chỉ để giảm một lần chuyển mạch, gây ra sai số tĩnh hoặc dòng điện đột biến. Để giải quyết vấn đề này, nghiên cứu đề xuất một ràng buộc trễ động. Một vector  $v_i \in G_{cand}$  chỉ được xem xét lựa chọn nếu sai số bám dòng của nó không vượt quá một ngưỡng cho phép so với vector tốt nhất ( $v_{best\_J1}$ ), điều đó có nghĩa là  $v_i \in G_{cand}$  chỉ được chọn khi thỏa mãn điều kiện sau:

$$J_1(v_i) \leq \xi \cdot J_1(v_{best\_J1}) + \delta \quad (9)$$

Trong đó,  $\xi$  là hệ số nới lỏng và  $\delta$  là hằng số biên nhỏ. Vector đóng cắt tối ưu cuối cùng  $S_{opt}(k+1)$  của các van tại thời điểm  $(k+1)$  là vector thỏa mãn điều kiện (9) và có giá trị  $J_2$  nhỏ nhất.

$$S_{opt}(k+1) = \arg \min_{v_i \in G_{cand}^*} \{J_2(v_i)\} \quad (10)$$

Phương pháp cải tiến này đảm bảo rằng tần số đóng cắt được giữ ở mức thấp nhất mà không làm suy giảm chất lượng bám dòng điện, giúp hệ thống đạt được sự cân bằng tối ưu giữa chất lượng điện năng và hiệu suất chuyển đổi.

Để cụ thể hóa quy trình của phương pháp điều khiển đề xuất, trình tự thực thi thuật toán IFCS-MPC trong mỗi chu kỳ lấy mẫu được trình bày chi tiết dưới đây. Giải thuật tích hợp tuần tự các bước xử lý tín hiệu tái tạo điện áp, tính toán mô hình dự báo bù trễ và áp dụng cơ chế tối ưu hóa xếp hạng phân cấp để lựa chọn trạng thái đóng cắt tối ưu mà không phụ thuộc vào trọng số.

<b>Xử lý tín hiệu và tái tạo điện áp</b>	
1	Ước lượng góc pha lưới: $\theta_g \leftarrow \text{PLL}(v_{abc}(k))$
2	Tái tạo điện áp (6): $\hat{v}_{\alpha\beta}(k) \leftarrow V_{peak} \theta_g$
3	Dự báo giá trị tham chiếu: $i_{\alpha\beta}(k) \leftarrow \text{Clarke}(i_{abc}(k))$ $i_{\alpha\beta}^*(k+2) \leftarrow \text{ParkInverse}(i_{dq}^* \theta_g + 2\omega T_s)$
<b>Khâu dự báo dòng điện</b>	
4	<b>For</b> i=0 to 7 <b>do</b>
5	Tính vector áp nghịch lưu theo (3): $v_{inv}(j) \leftarrow \text{CalculateV}(V_{dc}, S_j)$
6	Dự báo dòng điện bù trễ theo (5): $i^p(k+2) \leftarrow f(i(k), \hat{v}(k), v_{inv}(j))$
7	Tính hàm mục tiêu sơ cấp $J_1$ theo (7): $J_1(j) \leftarrow \ i^*(k+2) - i^p(k+2)\ ^2$
8	Tìm $J_{1min}$ : <b>If</b> $J_1(j) < J_{1min}$ <b>then</b> : $J_{1min} \leftarrow J_1(j)$
9	<b>End For</b>
<b>Tối ưu hóa xếp hạng và ràng buộc động</b>	
10	<b>For</b> i=0 to 16 <b>do</b>
	Kiểm tra điều kiện ràng buộc trễ động theo công thức (9):
11	<b>If</b> $J_1(j) \leq J_{1min} + \xi$ <b>then</b> $\Omega_{cand} \leftarrow V_j$ <b>End if</b>
12	<b>End For</b>
13	Tính số lần chuyển mạch theo (8): <b>For</b> $V_j \in \Omega_{cand}$ <b>do</b> $n_{sw} \leftarrow \sum  S_j - S_{old} $
	Lựa chọn vector tối ưu cuối cùng theo (10):
14	<b>If</b> $J_2(j) < J_{2min}$ <b>then</b> $J_{2min} \leftarrow J_2(j)$ $S_{opt} \leftarrow S_j$
	<b>End If</b>
<b>Cập nhật đầu ra</b>	
15	Áp dụng $S_{opt}$ cho các van IGBT: $S_{opt} \leftarrow S_j$
16	<b>End For</b>

## 4. Kết quả mô phỏng và thảo luận

### 4.1. Thiết lập thông số mô phỏng

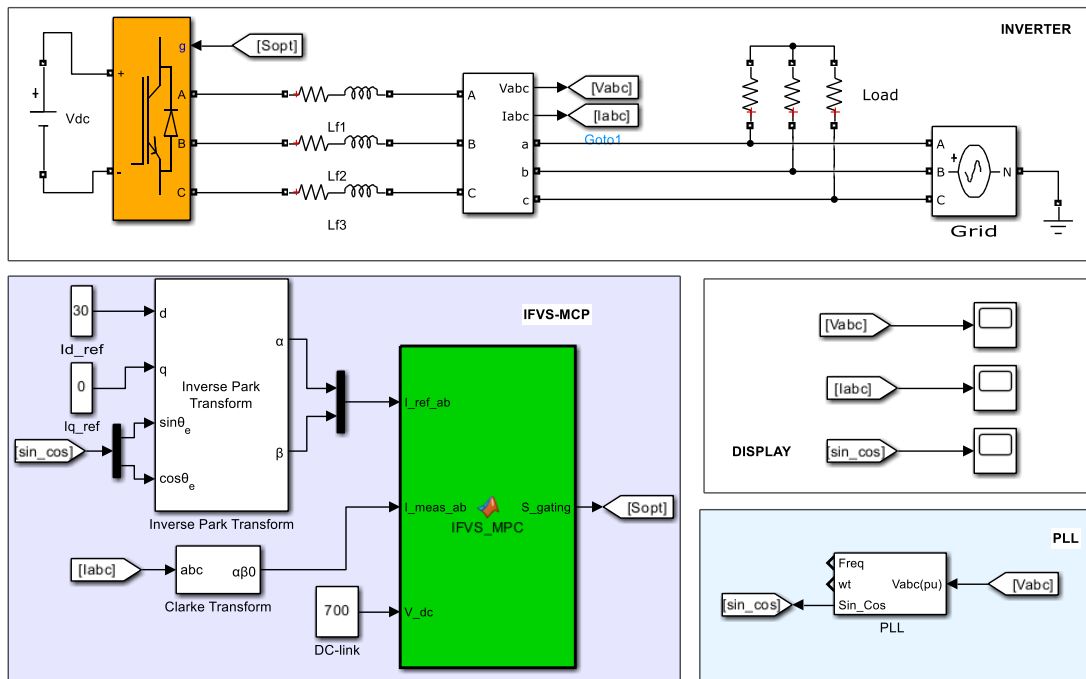
Để kiểm chứng tính đúng đắn và hiệu quả của giải thuật điều khiển dự báo dòng điện không trọng số cải tiến IFCS-MPC, mô hình nghịch lưu nối lưới ba pha được xây dựng và mô phỏng trên môi trường MATLAB/Simulink Simscape Electrical như Hình 5.

Cấu hình hệ thống bao gồm một nguồn điện áp một chiều cung cấp năng lượng cho bộ nghịch lưu

nguồn áp hai bậc sử dụng các khóa bán dẫn IGBT. Bộ nghịch lưu được kết nối với lưới điện ba pha cân bằng thông qua bộ lọc thụ động loại RL. Các tham số vật lý của mạch nghịch lưu và các tham số cài đặt cho bộ điều khiển IFCS-MPC cải tiến được liệt kê chi tiết trong Bảng 1.

### 4.2. Các kịch bản mô phỏng và thảo luận

Để đánh giá giải pháp IFCS-MPC đề xuất, chúng tôi so sánh đối chứng với cấu trúc điều khiển dòng điện tuyến tính kinh điển sử dụng bộ điều khiển PI



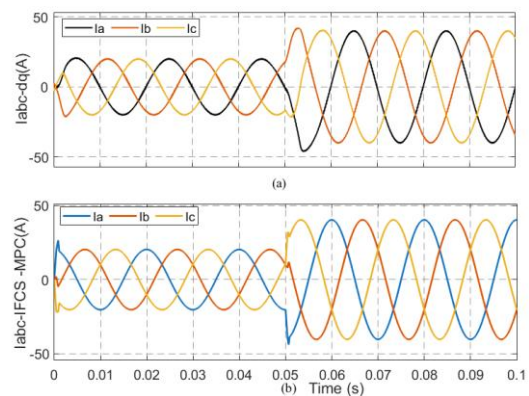
Hình 5. Sơ đồ mô phỏng nghịch lưu nối lưới với bộ điều khiển IFCS-MPC trên MATLAB/Simulink

Bảng 1. Thông số hệ thống và bộ điều khiển mô phỏng

Tham số	Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị
Nghịch lưu	Điện áp DC	$V_{dc}$	700 V
	Điện áp lưới	$V_{g(rms)}$	380 V
	Tần số lưới	$f_g$	50 Hz
	Điện áp pha	$V_{peak}$	311 V
	Điện cảm bộ lọc	$L$	10 mH
	Điện trở bộ lọc	$R$	0,1Ω
IFCS-MPC	Chu kỳ lấy mẫu	$T_s$	5 μs
	Tầm dự báo	$N$	2
	Số vector ứng viên	$N_{cand}$	3
	Hệ số trễ nói lỏng	$\xi$	2,0

trên hệ tọa độ quay  $dq$  ( $PI-dq$ ). Trong cấu hình tham chiếu này, bộ điều khiển PI được kết hợp với kỹ thuật điều chế vector không gian SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) với tần số sóng mang được thiết lập ở mức 20kHz. Việc lựa chọn tần số điều chế cao này nhằm mục đích tạo ra một chuẩn so sánh chất lượng cao, đảm bảo rằng bất kỳ ưu thế nào của IFCS-

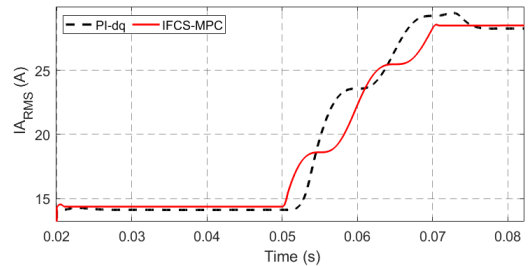
MPC đều xuất phát từ bản chất thuật toán thay vì giới hạn phần cứng. Để đảm bảo tính nhất quán khoa học, toàn bộ các tham số vật lý của hệ thống bao gồm trở kháng lưới, thông số bộ lọc đều được thiết lập đồng nhất tuyệt đối trong cả kịch bản mô phỏng. Trong kịch bản này dòng điện tham chiếu  $I_{d\_ref}$  có dạng bước nhảy được đưa vào bộ điều khiển, từ biên độ đỉnh 20A lên 40A tại thời điểm 0,05s để đánh giá quá trình quá độ. Đáp ứng dòng điện 3 pha của 2 bộ điều khiển như trên Hình 6.



Hình 6. So sánh đáp ứng dòng điện 3 pha; (a): Bộ điều khiển PI-dq; (b): Bộ điều khiển IFCS-MPC

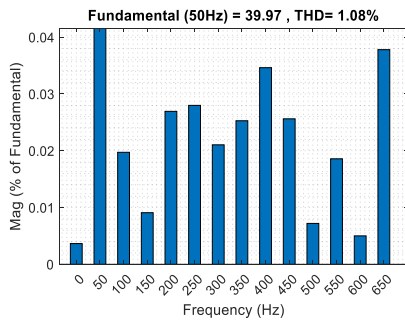
Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng, tại chế độ xác lập, cả hai bộ điều khiển đều đảm bảo độ chính xác bám dòng cao với biên độ đỉnh duy trì ổn định ở mức 20A

(giai đoạn  $0 \div 0,05s$  và  $40A$  (giai đoạn  $0,05 \div 0,1s$ ). Tuy nhiên, sự khác biệt được thể hiện rõ nét trong đặc tính đáp ứng quá độ. Cụ thể, bộ điều khiển IFCS-MPC đề xuất cho thấy thời gian xác lập nhanh hơn đáng kể so với  $PI-dq$ . Ưu thế này được minh chứng thông qua đồ thị dòng điện hiệu dụng RMS (True Root Mean Square) pha A trình bày tại Hình 7.

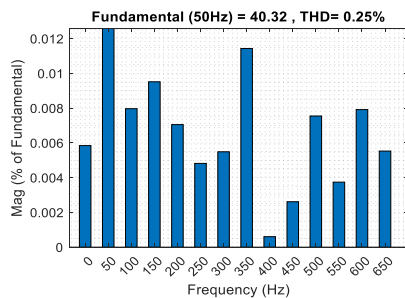


**Hình 7. So sánh giá trị dòng hiệu dụng pha A của bộ điều khiển  $PI-dq$  và IFCS-MPC**

Quan sát trên đồ thị có thể thấy, tại thời điểm dòng điện tham chiếu thay đổi bước nhảy, IFCS-MPC (đường màu đỏ) có giá trị RMS tăng nhanh từ  $14,14A$  lên  $28,28A$  (tương ứng với biên độ đỉnh  $40A$ ) và xác lập mà hoàn toàn với độ quá điều chỉnh rất nhỏ ( $0,7\%$ ). Ngược lại, bộ điều khiển  $PI-dq$  (đường nét đứt) xuất hiện quá điều chỉnh lớn ( $4,2\%$ ) trước khi dao động tắt dần. Trong khi bộ điều khiển  $PI-dq$  cần khoảng  $25ms$  để quá trình quá độ tắt dần, thì IFCS-MPC chỉ cần  $20ms$ .



(a) THD của  $PI-dq$



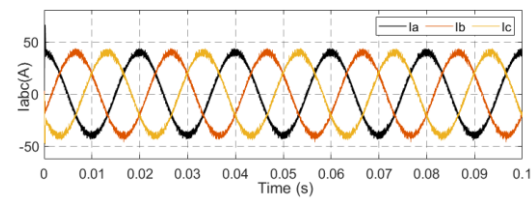
(b) THD của IFCS-MPC

**Hình 8. Phân tích chỉ số THD điện năng**

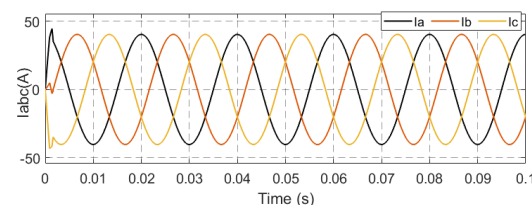
Phân tích chất lượng điện năng bằng công cụ FFT Analyzer của Simulink như Hình 8 cho thấy dòng điện của IFCS-MPC có chất lượng tốt hơn với tổng độ méo sóng hài THD chỉ  $0,25\%$ , thấp hơn đáng kể so với mức  $1,08\%$  của phương pháp  $PI-dq$ . Kết quả này đáp ứng hoàn toàn các yêu cầu kỹ thuật về đầu nối nguồn phân tán được quy định trong Thông tư 39/2015/TT-BCT (yêu cầu  $THD < 5\%$ ) [16].

Kết quả này khẳng định IFCS-MPC không chỉ khắc phục triệt để nhược điểm về trễ pha của các vòng lặp điều khiển tuyến tính mà còn tối ưu hóa chất lượng dòng điện hòa lưới.

Để kiểm chứng tính bền vững của thuật toán IFCS-MPC trước các nhiễu công nghiệp, kịch bản thứ hai mô phỏng nhiễu đo lường bằng cách cộng tín hiệu nhiễu trắng vào tín hiệu điện áp lưới đầu vào sau đó đưa vào 2 bộ IFCS-MPC có thông số như nhau nhưng một bộ không có khâu tái tạo điện áp, một bộ có sử dụng giải pháp tái tạo điện áp. Kết quả mô phỏng so sánh giữa hai cấu trúc điều khiển được thể hiện qua dạng sóng dòng điện pha như Hình 9.



(a) Bộ điều khiển IFCS-MPC không có khâu tái tạo điện áp



(b) Bộ điều khiển IFCS-MPC có khâu tái tạo điện áp

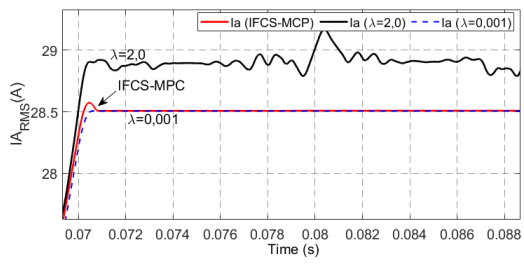
**Hình 9. Đáp ứng dòng điện khi có nhiễu**

Quan sát trên đồ thị Hình 9 có thể thấy, đối với bộ điều khiển IFCS-MPC sử dụng phương pháp đo trực tiếp, sự hiện diện của nhiễu tần số cao trong tín hiệu điện áp đã tác động tiêu cực đến độ chính xác của hàm mục tiêu. Do đặc tính của mô hình dự báo sử dụng đạo hàm dòng điện, các thành phần nhiễu này bị khuếch đại, dẫn đến dòng điện đầu ra bị méo dạng nghiêm trọng ( $THD=5,1\%$ ), xuất hiện nhiều gai điện áp và dao động tần số cao bao quanh đường biên dạng sin. Ngược lại, bộ điều khiển IFCS-MPC có sử dụng khâu tái tạo điện áp đã loại bỏ hoàn toàn ảnh hưởng của nhiễu đo lường lên mô hình dự báo. Kết quả là dòng điện hòa lưới vẫn duy

trì được độ dạng sóng hình sin chuẩn xác ( $THD=0,25\%$ ). Điều này khẳng định giải pháp tái tạo điện áp lưới có thể nâng cao đáng kể độ tin cậy của hệ thống nghịch lưu trước các nhiễu loạn từ thiết bị đo lường.

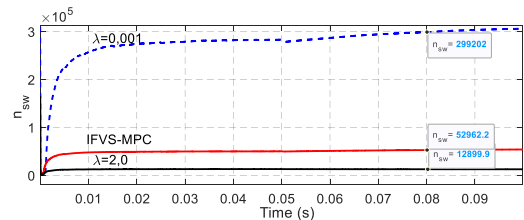
Trong kịch bản thứ 3, tính ưu việt của giải pháp tối ưu hóa thứ tự bậc ưu tiên trong nghiên cứu được kiểm chứng thực nghiệm thông qua kết quả so sánh đối chứng với phương pháp MPC truyền thống phụ thuộc trọng số  $\lambda$ , như được trình bày chi tiết tại Hình 10. Các dữ liệu này minh họa rõ nét khả năng tự cân bằng giữa các chỉ tiêu vận hành mà không cần quá trình tinh chỉnh tham số phức tạp.

Phân tích đồ thị dòng điện hiệu dụng pha A cho thấy, khi thiết lập trọng số nhỏ ( $\lambda=0,001$ , đường nét đứt xanh), hệ thống đạt độ chính xác bám dòng, cao tương đương với thuật toán IFCS-MPC (đường màu đỏ), tuy nhiên, khi tăng trọng số để hạn chế chuyển mạch ( $\lambda=2,0$  đường màu đen), dòng điện bị suy giảm chất lượng nghiêm trọng, xuất hiện sai lệch tĩnh lớn và dao động không ổn định.



**Hình 10. So sánh đáp ứng dòng điện hiệu dụng pha A giữa IFCS-MPC và MPC truyền thống với các hệ số trọng số  $\lambda$  khác nhau**

Sự khác biệt về hiệu suất được lượng hóa cụ thể qua đồ thị số lần chuyển mạch tích lũy ( $n_{sw}$ ) Hình 11. Trong khi trường hợp  $\lambda=0,001$ , tần số đóng cắt tăng mạnh ( $\approx 2,9 \times 10^5$ ). Thuật toán IFCS-MPC (đường đỏ) duy trì số lần chuyển mạch thấp hơn ( $0,5 \times 10^5$ ) đáng kể so với trường hợp  $\lambda=0,001$ .



**Hình 11. So sánh tổng số lần chuyển mạch tích lũy của bộ nghịch lưu giữa thuật toán IFCS-MPC và MPC truyền thống trong cùng khoảng thời gian mô phỏng**

Kết quả này chứng minh IFCS-MPC có khả năng tự động tìm điểm cân bằng tối ưu đảm bảo chất lượng điện năng tốt nhất với tổn hao chuyển mạch thấp nhất mà không cần quá trình tinh chỉnh tham số phức tạp.

## 5. Kết luận

Bài báo đã trình bày một phương pháp tiếp cận mới trong điều khiển nghịch lưu nối lưới thông qua giải thuật dự báo dòng điện không trọng số cải tiến IFCS-MPC. Nghiên cứu đã giải quyết thành công bài toán tối ưu đa mục tiêu và nâng cao tính bền vững của hệ thống điều khiển trước các nhiễu loạn thực tế.

Về mặt thuật toán điều khiển, phương pháp tối ưu hóa theo thứ tự bậc ưu tiên với cơ chế ưu tiên phân cấp đã loại bỏ hoàn toàn việc sử dụng hệ số trọng số  $\lambda$  trong hàm mục tiêu. Kết quả so sánh cho thấy thuật toán có khả năng tự động tìm điểm cân bằng tối ưu, duy trì sai số bám dòng ở mức thấp nhất trong khi kiểm soát hiệu quả số lần chuyển mạch, khắc phục nhược điểm của phương pháp MPC truyền thống.

Đồng thời nghiên cứu cũng đã chỉ ra, kỹ thuật tái tạo điện áp lưới đề xuất đã chứng minh vai trò then chốt trong việc đảm bảo độ chính xác của mô hình dự báo. Hệ thống có khả năng kháng nhiễu trắng tần số cao và sóng hài điện áp, giữ cho dòng điện đầu ra gần với hình sin hơn ( $THD \approx 0,25\%$ ) so với mức méo dạng ( $THD \approx 5,1\%$ ) khi sử dụng phương pháp đo trực tiếp.

Ngoài ra, khi so với bộ điều khiển tuyến tính PI-dq, giải pháp IFCS-MPC cải thiện đáng kể tốc độ đáp ứng động học với thời gian quá độ ngắn hơn (20ms so với 25ms của PI-dq) và triệt tiêu hoàn toàn hiện tượng quá điều chỉnh khi thay đổi tải đột ngột.

Những điều trên chứng tỏ rằng, giải pháp IFCS-MPC đề xuất là một phương pháp điều khiển tiên tiến, đảm bảo sự cân bằng giữa độ phức tạp tính toán, chất lượng điện năng và độ tin cậy vận hành.

Mặc dù giải pháp đề xuất đã kiểm soát hiệu quả tần số đóng cắt trung bình thông qua cơ chế xếp hạng, nhưng bản chất của phương pháp FCS-MPC vẫn tạo ra phổ tần số biến thiên. Đặc tính này có thể gây khó khăn nhất định cho quá trình thiết kế bộ lọc thụ động đầu ra để triệt tiêu các thành phần sóng hài bậc cao cụ thể. Các nghiên cứu tương lai sẽ hướng tới việc tích hợp các ràng buộc về phổ tần số vào thuật toán tối ưu hoặc phát triển các bộ lọc tích cực để khắc phục triệt để vấn đề này.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] H. Abu-Rub, M. Malinowski, and K. Al-Haddad (2020), *Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications*, John Wiley & Sons.

- [2] F. Blaabjerg, Y. Yang, D. Yang, and X. Wang (2020), *Power electronics-the key technology for renewable energy system integration*, CPSS Trans. Power Electron. Appl., Vol.5, No.2, pp.200-211.
- [3] S. Vazquez, J. Rodriguez, M. Rivera, L. G. Franquelo, and M. Norambuena (2021), *Model predictive control for power converters and drives: Advances and trends*, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.64, No.2, pp.935-947.
- [4] X. Li, H. Zhang, M. B. Shadmand, and R. S. Balog (2021), *Model predictive control of a grid-connected inverter with LC filter and active power decoupling*, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.68, No.8, pp.7175-7186.
- [5] C. Liu, F. Hong, Z. Liu, L. Zhou, X. Jin, Z. Lin (2024), *Robust predictive control strategy for grid-connected inverters with ultra-local model based on linear matrix inequality*, IET Power Electronics, Vol.17, pp.2000-2012.
- [6] J. Rodriguez et al. (2020), *State of the art of finite control set model predictive control in power electronics*, IEEE Trans. Ind. Informat., Vol.9, No.2, pp.1003-1016.
- [7] H. -C. Vu, Q. -H. Tran, D. -A. Dong, K. D. Hoang and T. L. Van (2023), *A Simple Model Predictive Current Control to Improve Current Performance with Fixed Switching Frequency for Four-leg VSI fed Two-phase Loads*, 2023 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), Ho Chi Minh, Vietnam, pp.358-362.
- [8] P. Cortes et al. (2020), *Guidelines for weighting factors design in model predictive control of power converters and drives*, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.67, No.1, pp.20-30.
- [9] M. H. Nguyen, S. Kwak, S. Choi (2021), *Scope for the control of power converters via model predictive control: An overview*, IEEE Open J. Ind. Electron. Soc., Vol.2, pp.248-275.
- [10] Nguyen, M.H.; Kwak, S.; Choi, S. (2023), *Performance Evaluation of Per-Phase Model Predictive Control Schemes for Extending Lifespan of Voltage Source Converters*, Machines 2023, Vol.11, pp.1053.
- [11] L. Hu, W. Lei, J. Zhao and X. Sun (2024), *Optimal Weighting Factor Design of Finite Control Set Model Predictive Control Based on Multiobjective Ant Colony Optimization*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.71, No.7, pp.6918-6928.
- [12] T. Yang, Y. Wang, Y. Miao, Q. Xu, Q. Guo (2024), *A novel weighting factor determined method of model predictive torque control for permanent magnet synchronous motor*, IET Electric Power Applications, Vol.18, Issue 11, pp.1616-1625.
- [13] F. Wang, Z. Zhang, X. Mei, J. Rodriguez, and R. Kennel (2020), *Advanced control strategies of induction machine field-oriented control for industrial applications*, IEEE Ind. Electron. Mag., Vol.14, No.4, pp.16-29.
- [14] C. Zheng, Z. Gong, R. Zhu. (2022), *Weighting Factor-Less Sequential Predictive Control of LC-Filtered Voltage Source Inverters*, International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol.2022, Issue 1.
- [15] L. Tarisciotti, P. Zanchetta, A. Watson, S. Bifaretti, and J. C. Clare (2021), *Modulated model predictive control for a seven-level cascaded H-bridge back-to-back converter*, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.68, No.2, pp.1012-1022.
- [16] Bộ Công Thương (2015), *Quy định hệ thống điện phân phối*, Thông tư số 39/2015/TT-BCT, Hà Nội, Việt Nam.

Ngày nhận bài:	21/01/2026
Ngày nhận bản sửa:	25/02/2026
Ngày duyệt đăng:	02/03/2026