

ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO DỰA TRÊN MÔ HÌNH CHO BỘ NGHỊCH LƯU BA PHA 3-BẬC DẠNG T KẾT NỐI LƯỚI SỬ DỤNG NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI

Đoàn Xuân Nam, Văn Tấn Lượng*

Trường Đại học Công Thương Thành phố Hồ Chí Minh

*Email: luongvt@huit.edu.vn

Ngày nhận bài: 24/5/2024; Ngày nhận bài sửa: 28/6/2024; Ngày chấp nhận đăng: 03/7/2024

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày kỹ thuật điều khiển dự báo dựa trên mô hình cho bộ biến tần 3-pha 3-bậc dạng T kết nối lưới cho hệ thống pin năng lượng mặt trời. Đầu tiên, giai đoạn chuyển đổi DC-DC sử dụng kỹ thuật dò tìm điểm công suất cực đại được trình bày. Tiếp đến, phương pháp điều khiển dự báo dựa trên mô hình với mục tiêu bám theo dòng điện đặt và cân bằng điện áp trên các tụ được giới thiệu. Trong chiến lược điều khiển này, dòng điện tham chiếu được lấy từ dòng điện tác dụng và dòng điện phản kháng qua phép biến đổi từ hệ trục dq sang $\alpha\beta$. Hiệu quả của phương pháp điều khiển được chứng minh thông qua các mô phỏng trên phần mềm Matlab/Simulink. Công suất phát lên lưới được duy trì ổn định ứng với điểm công suất cực đại của mảng PV, với hệ số công suất bằng 1 trong các điều kiện bức xạ nhiệt khác nhau. Đáp ứng dòng điện lưới nhanh chóng đạt xác lập tại giá trị tham chiếu. Điện áp trên các tụ điện được duy trì ở trạng thái cân bằng tốt.

Từ khóa: 3-bậc dạng T, cân bằng điện áp tụ, điều khiển dự báo, giải thuật P&O (Perturbation & Observation).

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Ngày nay, sử dụng năng lượng bền vững từ mặt trời đang là một trong những xu hướng được khuyến khích bởi nhiều quốc gia trên thế giới nhằm giải quyết vấn đề biến đổi khí hậu toàn cầu, giảm lượng khí thải carbon dioxide và đạt được mức độ trung hòa carbon [1-3]. Điều này dẫn đến sự phát triển nhanh chóng về năng lượng mặt trời và sự phổ biến ngày càng tăng của các hệ thống pin mặt trời (PV-Photovoltaic) kết nối lưới. Chiến lược điều khiển truy tìm điểm công suất tối đa (MPPT-Maximum Power Point Tracking) [4, 5] và điều khiển bộ nghịch lưu trong các hệ thống này nhằm đảm bảo hoạt động ổn định, cải thiện hiệu suất chuyển đổi năng lượng, cải thiện chất lượng điện và độ ổn định của hệ thống đang được rất nhiều nhà nghiên cứu quan tâm.

Bộ nghịch lưu 3-bậc ngày càng được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng công nghiệp có công suất lớn và điện áp cao, chúng có những ưu điểm nổi bật hơn so với các bộ nghịch lưu 2-bậc như: chất lượng điện năng tốt hơn, thiết kế bộ lọc nhỏ hơn (nếu cần), điện áp chịu đựng (dv/dt) trên linh kiện nhỏ hơn, hiệu suất cao, và có khả năng hoạt động vượt lỗi trong một số trường hợp [6-8]. Bộ nghịch lưu 3-bậc được sử dụng phổ biến nhất phải kể đến là cấu trúc 3-bậc diode kẹp trung tính được giới thiệu vào năm 1981 bởi A. Nabae, I. Takahashi và H. Akagi [9]. Trong những năm gần đây, một cấu trúc 3-bậc dạng T được giới thiệu với những ưu điểm như tiết kiệm hơn vì không sử dụng thêm các diode kẹp, vận hành tin cậy hơn và có hiệu suất tốt hơn cấu trúc diode kẹp trung tính ở dải tần số trung trình [10-12].

Phương pháp điều khiển cho bộ nghịch lưu cho hệ PV kết nối lưới đang là một trong những hướng nghiên cứu hấp dẫn. Các phương pháp điều khiển truyền thống bao gồm: các phương pháp tuyến tính, chẳng hạn như điều khiển PI tách rời [13]; và các phương pháp phi tuyến, chẳng hạn như điều khiển cộng hưởng tỉ lệ (PR-Proportional Resonant) [14]. Tuy nhiên, việc thiết kế và tính toán các thông số cho bộ điều khiển này tương đối phức tạp. Với những tiến bộ trong bộ xử lý kỹ thuật số, điều khiển dự báo đã được ứng dụng thành công trong lĩnh vực nghiên cứu điện tử công suất [15-17]. Phương pháp này đơn giản, dễ thực hiện, đáp ứng động nhanh, có khả năng bù thời gian trễ, không cần bộ điều chế PWM (Pulse-Width Modulation), loại bỏ được các bộ hiệu chỉnh tích phân tỉ lệ (PI-Proportional

Integral) phức tạp. Điều khiển đưa ra các dự báo dựa trên mô hình toán về các mục tiêu mong muốn với tất cả các trạng thái chuyển mạch của bộ nghịch lưu, từ đó chọn ra trạng thái chuyển mạch tốt nhất ứng với giá trị hàm chi phí nhỏ nhất. Đây được xem như chìa khóa vạn năng trong giải quyết các bài toán đa mục tiêu điều khiển, điều khiển đối tượng phi tuyến.

Để đạt được hiệu suất phát điện PV nối lưới tốt và tối đa hóa việc chuyển đổi năng lượng mặt trời, bài báo này trình bày chiến lược MPPT dựa trên phương pháp P&O; công suất được phát lên lưới bởi bộ nghịch lưu 3-bậc dạng T sử dụng giải thuật điều khiển dự báo với các mục tiêu bám theo dòng điện đặt và cân bằng điện áp trên các tụ. Hàm chi phí được thành lập ứng với mỗi mục tiêu dựa trên mô hình toán của bộ nghịch lưu 3-bậc kết nối lưới. Thông qua đánh giá hàm chi phí tổng, trạng thái chuyển mạch ứng với giá trị nhỏ nhất sẽ được áp dụng cho bộ nghịch lưu ở thời điểm tiếp theo. Cuối cùng, mô phỏng Matlab/Simulink đánh giá kết quả điều khiển dưới các điều kiện bức xạ mặt trời khác nhau, cho thấy điều khiển dự báo có đáp ứng dòng điện nhanh chóng đạt xác lập và bám theo dòng điện đặt ứng với điểm công suất tối đa của mảng PV, đồng thời điện áp trên các tụ cũng được duy trì cân bằng tốt. Qua đó, chứng minh được tính hiệu quả của giải thuật điều khiển đã trình bày bộ nghịch lưu kết nối sử dụng năng lượng mặt trời.

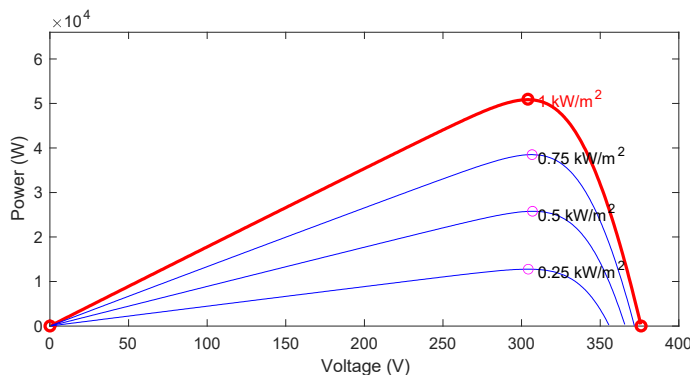
2. GIẢI THUẬT ĐIỀU KHIỂN CHO BỘ NGHỊCH LƯU 3-BẬC DẠNG T KẾT NỐI LƯỚI SỬ DỤNG NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI

Thông thường, hệ thống năng lượng mặt trời kết nối lưới bao gồm những thành phần chính như: mảng PV, bộ chuyển đổi DC-DC, bộ nghịch lưu DC-AC, bộ lọc sóng hài. Bộ chuyển đổi DC-DC có chức năng tăng điện áp đầu ra của mảng PV từ mức điện áp đầu vào thấp lên mức điện áp đầu ra cao hơn cấp cho bộ nghịch lưu. Bộ nghịch lưu DC-AC có chức năng chuyển đổi điện áp DC thành AC, đi qua bộ lọc, tạo ra điện áp AC đủ tiêu chuẩn cho kết nối lưới.

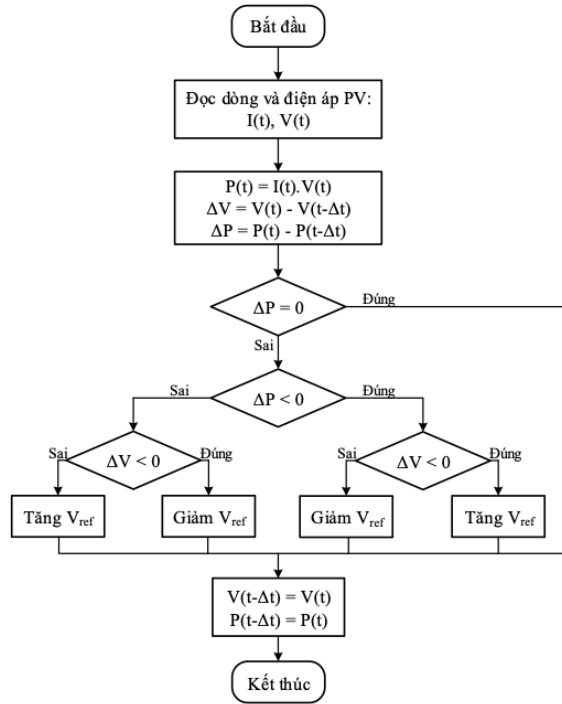
2.1. Giai đoạn chuyển đổi DC-DC

Trong bài báo này, công suất của các tấm pin mặt trời được thiết kế ở 50 kW gồm 20 chuỗi ghép song song, mỗi chuỗi là 10 module được ghép nối tiếp. Đặc tuyến của mảng PV được cho như trong Hình 1. Công suất mảng PV là một hàm phi tuyến tính của điện áp vận hành, và hàm này có điểm công suất cực đại (MPP-Maximum Power Point) ứng với một giá trị điện áp cụ thể. Ví dụ, mảng PV đạt công suất cực đại 50 kW tại điện áp 304 V ứng với điều kiện chiếu xạ 1 kW/m².

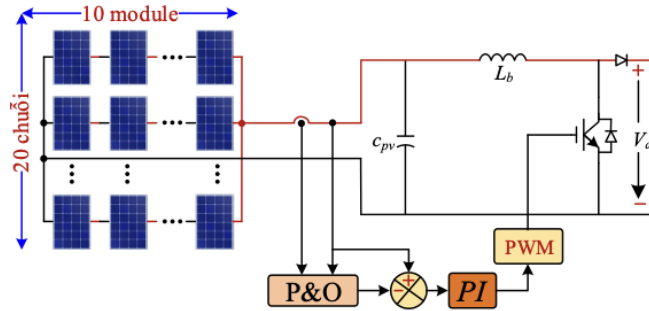
Phương pháp dò tìm điểm phát công suất cực đại sử dụng thuật toán nhiễu loạn và quan sát (P&O-Perturbation and Observation) là một trong những kỹ thuật được sử dụng rất phổ biến trong nghiên cứu hệ thống PV. Lưu đồ giải thuật được trình bày như trong Hình 2. Thuật toán này dựa trên sự so sánh công suất hiện tại và công suất trước đó, từ đó đưa ra quyết định điều chỉnh tăng hoặc giảm điện áp làm việc. Nếu điện áp được thay đổi theo chiều tăng mà dẫn đến tăng công suất thì giữ nguyên hướng thay đổi điện áp ở chu kỳ tiếp theo. Ngược lại, nếu công suất giảm thì hướng thay đổi điện áp ở chu kỳ tiếp theo sẽ diễn ra với kích bản ngược lại. Quá trình này được lặp lại cho đến khi đạt được MPP. Bộ điều khiển PI được sử dụng để điều chỉnh tín hiệu điều khiển PWM của bộ chuyển đổi DC-DC, như trong Hình 3.



Hình 1. Đặc tuyến của mảng PV



Hình 2. Lưu đồ giải thuật tìm điểm phát công suất cực đại P&O



Hình 3. Sơ đồ thực hiện bộ chuyển đổi DC-DC

2.2. Điều khiển công suất tác dụng và phản kháng từ hệ thống PV vào lưới điện

Trong [18-20], dựa trên phương pháp điều khiển định hướng điện áp (VOC-Voltage Oriented Control), công suất tác dụng và phản kháng tức thời trong hệ tọa độ dq quay được mô tả như sau:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(e_d i_d + e_q i_q) \\ Q = \frac{3}{2}(e_q i_d - e_d i_q) \end{cases} \quad (1)$$

Để điều khiển công suất tác dụng và phản kháng tức thời được hệ thống PV đưa vào lưới điện, vòng khóa pha được điều chỉnh sao cho thành phần trục q của vector điện áp lưới bằng 0 ($e_q = 0$), do đó:

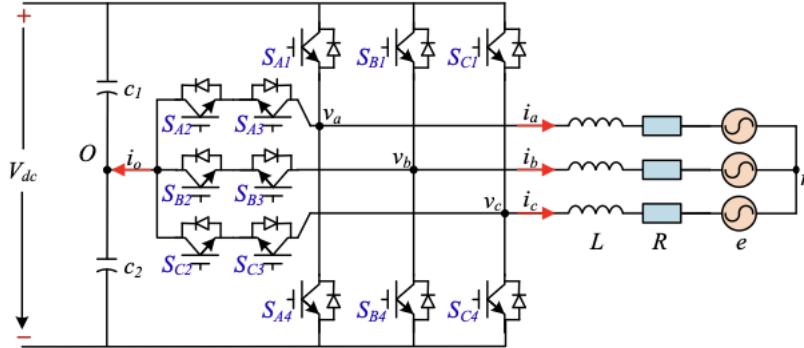
$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}e_d i_d \\ Q = -\frac{3}{2}e_d i_q \end{cases} \quad (2)$$

Từ (2), công suất tác dụng và công suất phản kháng có thể được điều khiển độc lập bằng cách điều khiển dòng điện tác dụng và phản kháng. Đối với hệ số công suất bằng 1, thành phần dòng điện tham chiếu trục q (i_q^*) được đặt bằng 0.

2.3. Điều khiển dự báo cho bộ nghịch lưu áp 3-bậc dạng T kết nối lưới

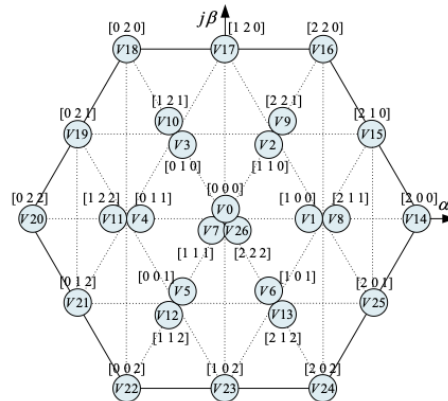
Cấu trúc bộ nghịch lưu áp 3-bậc dạng T kết nối lưới được mô tả như trong Hình 4, mỗi chân pha gồm 4 IGBT được liên kết ở dạng hình T. Điện áp DC đầu vào được cung cấp bởi bộ chuyển đổi DC-DC ở Mục 2.1. Trạng thái chuyển mạch các khoá IGBT trên mỗi chân pha theo nguyên tắc như sau:

$$\begin{cases} S_{X1} + S_{X3} = 1 \\ S_{X2} + S_{X4} = 1 \end{cases} \quad \text{với } X = \{A, B, C\} \quad (3)$$



Hình 4. Cấu trúc bộ nghịch lưu 3-bậc dạng T kết nối lưới

Bộ nghịch lưu áp 3-bậc dạng T có tổng cộng 27 trạng thái chuyển mạch được biểu diễn trong hệ tọa độ không gian $\alpha\beta$ như trong Hình 5 gồm 3 vector điện áp không, 12 vector điện áp nhỏ, 6 vector điện áp trung bình và 6 vector điện áp lớn.



Hình 5. Giản đồ không gian vector của nghịch lưu áp 3-bậc dạng T

2.3.1. Điều khiển bám theo dòng điện đặt

Phương trình toán của bộ nghịch lưu áp 3-bậc dạng T được biểu diễn trong hệ tọa độ abc như sau:

$$\begin{cases} v_{AN} = Ri_A + L \frac{di_A}{dt} + e_A \\ v_{BN} = Ri_B + L \frac{di_B}{dt} + e_B \\ v_{CN} = Ri_C + L \frac{di_C}{dt} + e_C \end{cases} \quad (4)$$

trong đó: e_X là điện áp lưới với $X = \{A, B, C\}$

Phương trình (4) được viết lại trong hệ tọa độ $\alpha\beta$:

$$v_{\alpha\beta} = Ri_{\alpha\beta} + L \frac{di_{\alpha\beta}}{dt} + e_{\alpha\beta} \quad (5)$$

Chuyển đổi các đại lượng trong miền liên tục sang rời rạc trong một chu kỳ lấy mẫu T_s bằng công thức Euler sau:

$$\frac{di}{dt} \approx \frac{i(k+1) - i(k)}{T_s} \quad (6)$$

Áp dụng (6) cho (5), dòng điện $i_{\alpha\beta}^p(k+1)$ được gọi là dòng điện dự báo tại thời điểm $(k+1)$ được biểu diễn như sau:

$$i_{\alpha\beta}^p(k+1) = \left(1 - \frac{R}{L}T_s\right) i_{\alpha\beta}(k) + \frac{T_s}{L} (v_{\alpha\beta}(k) - e_{\alpha\beta}(k)) \quad (7)$$

trong đó: $i_{\alpha\beta}(k)$, $e_{\alpha\beta}(k)$ là dòng điện hồi tiếp và điện áp lưới được đo tại thời điểm (k) ; $v_{\alpha\beta}(k)$ là vector điện áp ứng với các trạng thái chuyển mạch của bộ nghịch lưu.

Phương trình rời rạc (7) được dịch về phía trước một bước để bù độ trễ do quá trình tính toán và chuyển đổi tín hiệu tương tự sang số như sau:

$$i_{\alpha\beta}^p(k+2) = \left(1 - \frac{R}{L}T_s\right) i_{\alpha\beta}(k+1) + \frac{T_s}{L} (v_{\alpha\beta}(k) - e_{\alpha\beta}(k+1)) \quad (8)$$

trong đó $i_{\alpha\beta}(k+1)$ và $e_{\alpha\beta}(k+1)$ là giá trị tương lai của dòng điện và điện áp lưới và được tính thông qua phép ngoại suy Lagrange bậc hai [12]:

$$\begin{cases} i_{\alpha\beta}(k+1) \approx 3i_{\alpha\beta}(k) - 3i_{\alpha\beta}(k-1) + i_{\alpha\beta}(k-2) \\ e_{\alpha\beta}(k+1) \approx 3e_{\alpha\beta}(k) - 3e_{\alpha\beta}(k-1) + e_{\alpha\beta}(k-2) \end{cases} \quad (9)$$

Hàm chi phí cho điều khiển bám theo dòng điện được xây dựng như sau:

$$g_i = [i_{\alpha}^p(k+2) - i_{\alpha}^*(k+2)]^2 + [i_{\beta}^p(k+2) - i_{\beta}^*(k+2)]^2 \quad (10)$$

trong đó: $i_{\alpha\beta}^*(k+2)$ dòng điện tham chiếu tại thời điểm $(k+2)$ có thể được ngoại suy bằng công thức Lagrange như sau:

$$i_{\alpha\beta}^*(k+2) \approx 6i_{\alpha\beta}^*(k) - 8i_{\alpha\beta}^*(k-1) + 3i_{\alpha\beta}^*(k-2) \quad (11)$$

Dòng điện tham chiếu $i_{\alpha\beta}^*$ được tính từ dòng điện i_d^* ở Mục 2.2 thông qua phép biến đổi Park ngược:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} \quad (12)$$

trong đó θ là góc giữa trục d và trục α , giá trị này thu được từ vòng khoá pha (PLL-Phase Lock Loop).

2.3.2. Điều khiển cân bằng điện áp tụ

Điện áp trên các tụ liên kết DC (c_1, c_2) phụ thuộc vào dòng điện tại điểm giữa (i_o), như trong Hình 4, được viết lại trong miền rời rạc như sau [21]:

$$\begin{cases} v_{c1}(k+1) = v_{c1}(k) + \frac{T_s}{2C} i_o(k) \\ v_{c2}(k+1) = v_{c2}(k) - \frac{T_s}{2C} i_o(k) \end{cases} \quad (13)$$

Dòng điện $i_o(k)$ được xác định thông qua trạng thái chuyển mạch của bộ nghịch lưu:

$$i_o(k) = (S_{A2} - S_{A1})i_A + (S_{B2} - S_{B1})i_B + (S_{C2} - S_{C1})i_C \quad (14)$$

Để bù thời gian trễ do quá trình chuyển đổi tín hiệu tương tự sang số bằng cách dịch (13) về phía trước một bước; điện áp dự báo trên các tụ c_1 và c_2 tại thời điểm $(k+2)$ như sau:

$$\begin{cases} v_{c1}^p(k+2) = v_{c1}(k+1) - \frac{T_s}{2C} i_o(k+1) \\ v_{c2}^p(k+2) = v_{c2}(k+1) + \frac{T_s}{2C} i_o(k+1) \end{cases} \quad (15)$$

trong đó i_o tại thời điểm $(k+1)$ được tính từ phép ngoại suy Lagrange (9).

Hàm chi phí cho mục tiêu cân bằng điện áp tụ:

$$g_c = [v_{c1}^p(k+2) - v_{c2}^p(k+2)]^2 \quad (16)$$

2.3.3. Hàm chi phí tổng

Hàm chi phí tổng cho các mục tiêu bám theo dòng và cân bằng điện áp tụ được xác định như sau:

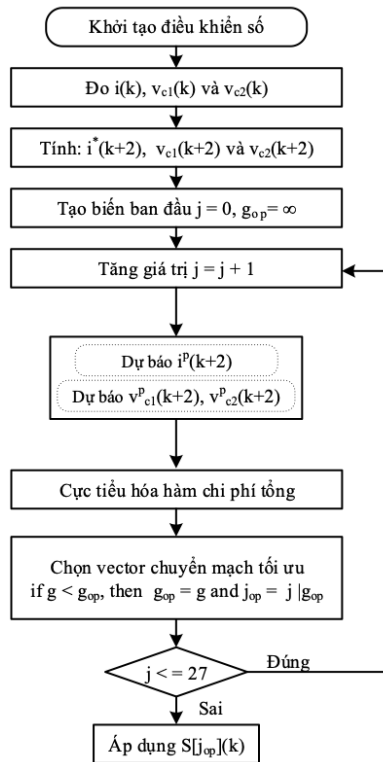
$$g = g_i + \lambda_c g_c \tag{17}$$

trong đó: λ_c là các trọng điều chỉnh mức độ cân bằng điện áp tụ

2.3.4. Lưu đồ giải thuật điều khiển dự báo

Lưu đồ thực hiện giải thuật điều khiển dự báo nhanh cho bộ biến tần 3-bậc dạng T được mô tả như trong Hình 6, gồm 9 bước:

- + Bước 1: Khởi tạo điều khiển số
- + Bước 2: Đo dòng điện, điện áp lưới, và điện áp trên các tụ
- + Bước 3: Tính dòng điện tham chiếu, điện áp trên các tụ tại thời điểm (k+2) thông qua phép ngoại suy
- + Bước 4: Gán giá trị ban đầu cho các biến
- + Bước 5: Vào vòng lặp, tăng giá trị biến j tại mỗi vòng lặp
- + Bước 6: Dự báo dòng điện lưới và điện áp trên các tụ tại thời điểm (k+2)
- + Bước 7: Cực tiểu hoá hàm chi phí tổng, lưu giá trị nhỏ nhất của hàm chi phí với biến g_{op} và vị trí tương ứng được lưu bởi biến n_{op} .
- + Bước 8: Kiểm tra điều kiện $j \leq 27$, nếu là đúng thì quay lại thực hiện các tác vụ từ Bước 5, nếu sai thì thoát khỏi vòng lặp và tiếp tục đến Bước 9.
- + Bước 9: Áp dụng các tín hiệu chuyển mạch cho bộ nghịch lưu ứng với giá trị n_{op} .

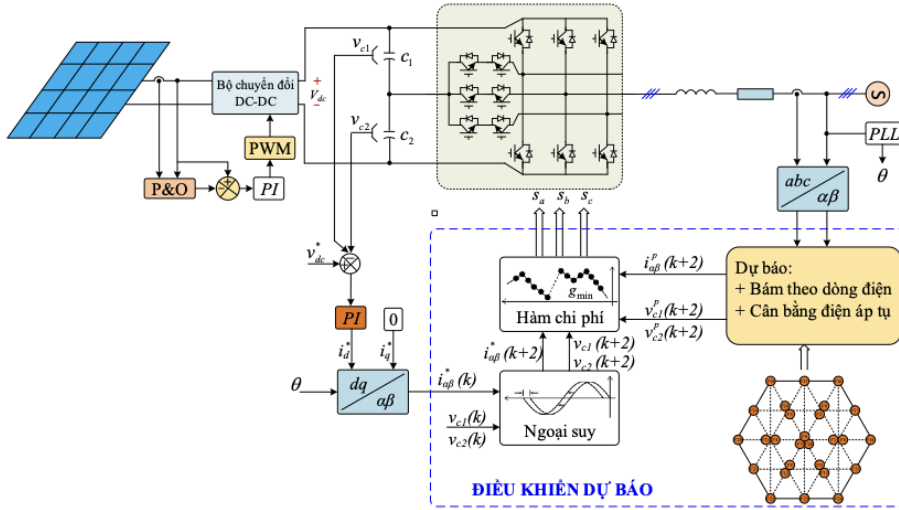


Hình 6. Lưu đồ giải thuật điều khiển dự báo cho nghịch lưu 3-bậc dạng T kết nối lưới

2.4. Sơ đồ thực hiện giải thuật điều khiển dự báo cho bộ nghịch lưu áp 3-bậc dạng T kết nối lưới sử dụng năng lượng mặt trời

Sơ đồ thực hiện giải thuật điều khiển dự báo cho bộ nghịch lưu áp 3-bậc dạng T kết nối lưới cho hệ thống PV được trình bày như trong Hình 7. Điện áp từ pin mặt trời được điều khiển thông qua bộ chuyển đổi DC-DC sử dụng giải thuật P&O nhằm đảm bảo phát công suất cực đại, điện áp DC ngõ ra được cấp cho đầu vào của bộ nghịch lưu 3-bậc dạng T qua tụ liên kết DC. Bộ điều khiển PI (màu đỏ) điều chỉnh điện áp liên kết DC đến giá trị tham chiếu không đổi. Kỹ thuật điều khiển dự báo bám theo

dòng điện được sử dụng để điều khiển bộ nghịch lưu 3-bậc dạng T. Mục đích chính của chiến lược điều khiển là điều chỉnh dòng điện tác dụng và phản kháng đầu ra từ bộ nghịch lưu để bám theo tín hiệu dòng điện tham chiếu. Dòng điện tác dụng tham chiếu được lấy từ ngõ ra của bộ điều khiển PI qua phép biến đổi trục dq sang $\alpha\beta$, dòng điện phản kháng tham chiếu được đặt bằng 0 để đạt hệ số công suất bằng 1. Việc xác định góc vector điện áp lưới được thực hiện bằng thuật toán vòng khóa pha.



Hình 7. Sơ đồ thực hiện giải điều khiển dự báo cho bộ nghịch lưu áp 3-bậc dạng T kết nối lưới sử dụng năng lượng từ hệ thống PV

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

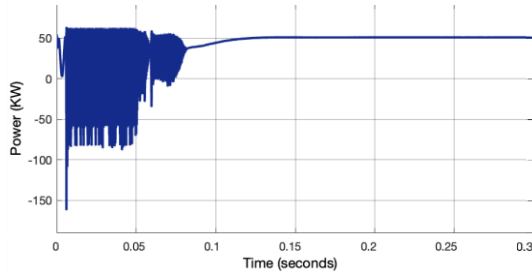
Mô hình mô phỏng được thực hiện bởi phần mềm Matlab/Simulink phiên bản 2023b để kiểm chứng các giải thuật điều khiển đã trình bày cho bộ nghịch lưu áp 3-bậc dạng T kết nối lưới sử dụng năng lượng mặt trời, với các thông số được liệt kê như trong Bảng 1. Đối với tất cả các mô phỏng, nhiệt độ được giả định là không đổi ở 25 °C.

Bảng 1. Thông số mô phỏng hệ thống

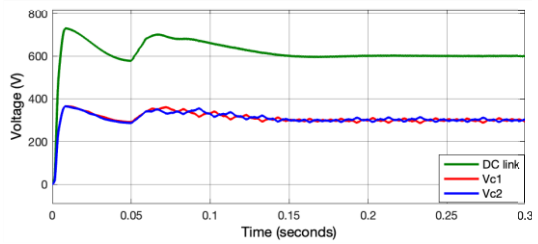
TẮM PIN ALEO SOLAR P18Y255	
Số lượng ghép nối tiếp	10 module
Số lượng ghép song song	20 chuỗi
Công suất tại MPP	50 kW
Điện áp tại MPP	304 V
BỘ CHUYỂN ĐỔI DC-DC	
Tần số chuyển mạch	5 kHz
Điện áp ra tại MPP	600 V
BỘ NGHỊCH LƯU DC-AC	
Tần số lấy mẫu	20 kHz
Tụ liên kết DC	4800 μ F
Điện áp lưới	380 V/50Hz
Bộ lọc R – L	0,1 Ω – 3 mH

Trong điều kiện bức xạ mặt trời ở 1000 W/m², đồ thị công suất phát của mảng PV thể hiện như trong Hình 8a, công suất phát thu được 50 kW sau khoảng thời gian 0,1s và duy trì ổn định tại điểm làm việc này. Điểm làm việc này cũng ứng với giá trị MPP như trong đặc tính P-V ở Hình 1. Đồ thị dạng sóng điện áp liên kết DC và điện áp trên các tụ (c₁, c₂) được thể hiện trong Hình 8b. Điện áp liên kết DC được duy trì ổn định tại giá trị đặt, điện áp trên các tụ cũng được duy trì cân bằng tốt với độ dao

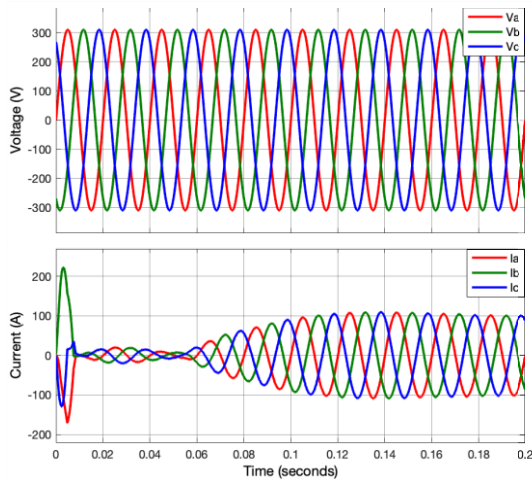
động điện áp giữa 2 tụ khoảng 6 V. Hình 8c thể hiện điện áp pha trên lưới và dòng điện lưới, tại thời điểm mảng PV phát công suất ổn định cho thấy dòng điện lưới cũng được duy trì ổn định khoảng 107 A với tổng độ méo dạng sóng hài với THD khoảng 1,2 %. So sánh giữa dòng điện tham chiếu và dòng điện lưới trong hệ tọa độ $\alpha\beta$ được trình bày ở Hình 8d, qua đó cho thấy giải thuật điều khiển dự báo đã cho chất lượng điều khiển tốt và nhanh. Kết quả mô phỏng công suất tác dụng, công suất phản kháng được trình bày ở Hình 8e, chúng được duy trì ổn định với công suất tác dụng khoảng 50 kW và gần bằng 0 đối với công suất phản kháng, đường đặc tính của hệ số công suất luôn duy trì bằng 1.



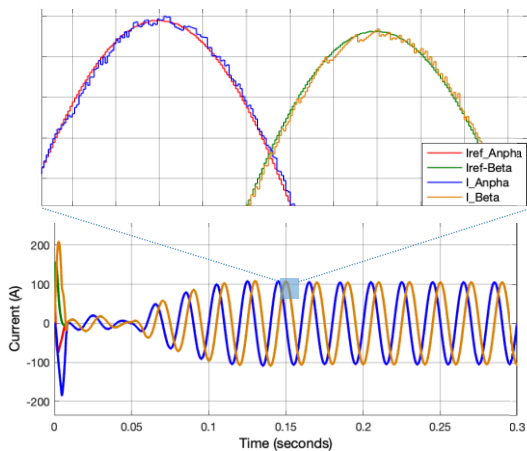
a) Công suất mảng PV



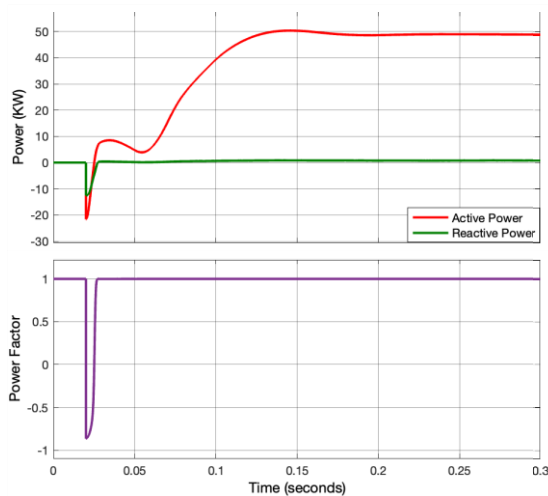
b) Điện áp liên kết DC và điện áp trên các tụ



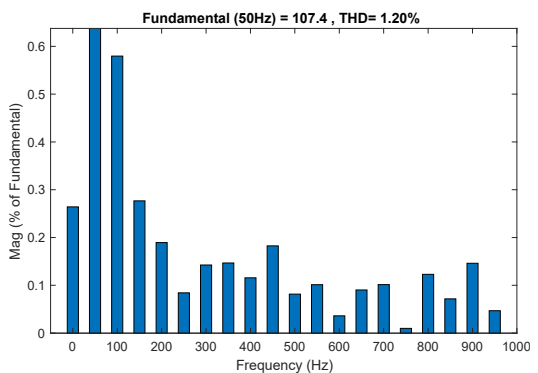
c) Điện áp lưới, dòng điện lưới



d) Dòng điện lưới đo được và dòng điện tham chiếu trong hệ tọa độ $\alpha\beta$

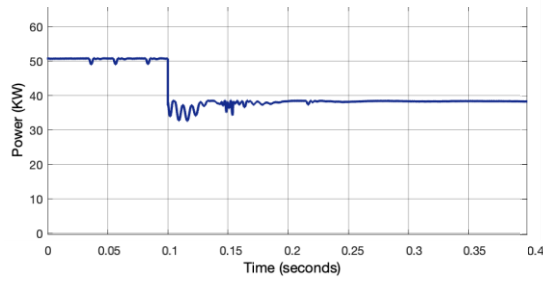


e) Công suất tác dụng, công suất phản kháng và hệ số công suất

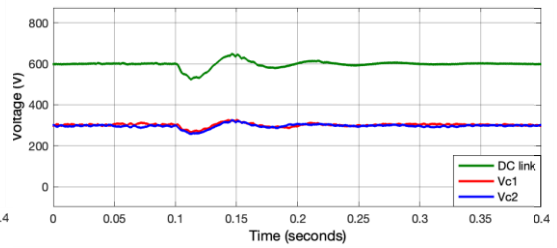


f) Phổ THD dòng điện lưới

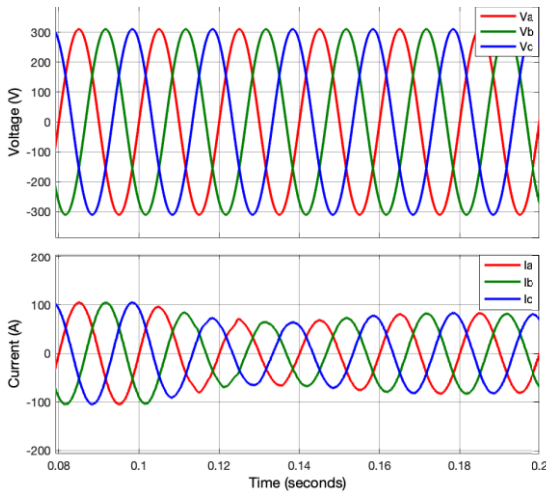
Hình 8. Kết quả mô phỏng dưới điều kiện bức xạ mặt trời 1000 W/m²



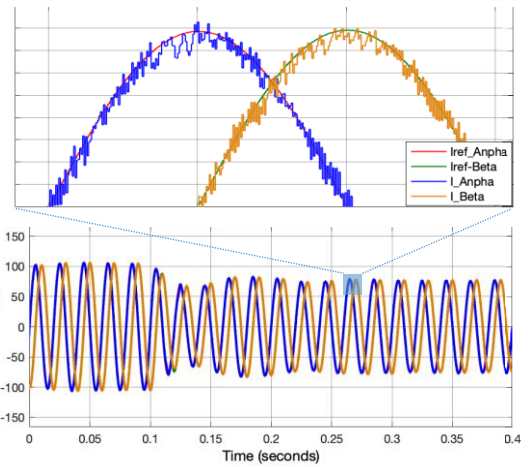
a) Công suất mảng PV



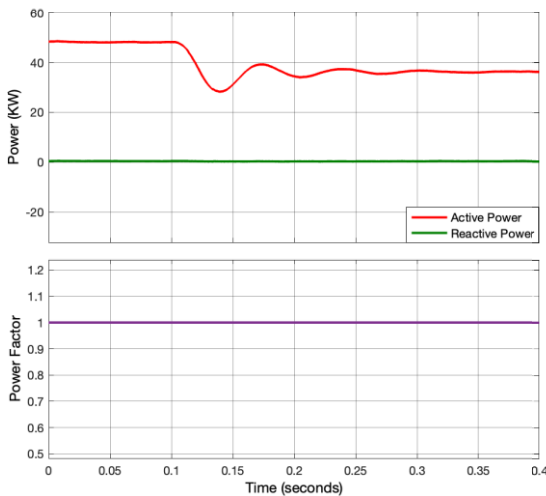
b) Điện áp liên kết DC và điện áp trên các tụ



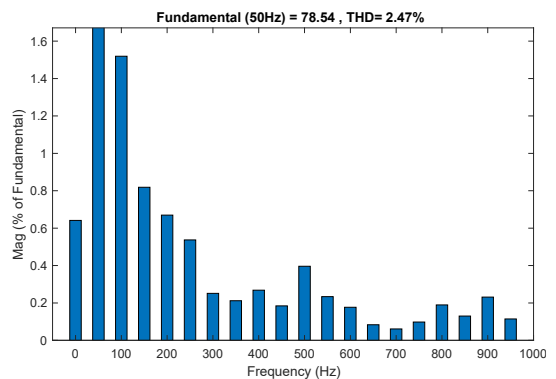
c) Điện áp lưới, dòng điện lưới



d) Dòng điện lưới đo được và dòng điện tham chiếu trong hệ tọa độ $\alpha\beta$



e) Công suất tác dụng, công suất phản kháng và hệ số công suất



f) Phổ THD dòng điện lưới

Hình 9. Kết quả mô phỏng dưới điều kiện thay đổi bức xạ mặt trời từ 1000 W/m^2 sang 750 W/m^2 tại thời điểm $t = 0,1 \text{ s}$

Mô phỏng tiếp theo được thực hiện trong điều kiện thay đổi hệ số bức xạ mặt trời từ 1000 W/m^2 xuống 750 W/m^2 . Kết quả từ Hình 9a có thể thấy, khi bức xạ mặt trời thay đổi đột ngột xuống 750 W/m^2 tại thời điểm $t = 0,1 \text{ s}$; giải thuật P&O điều chỉnh nhanh chóng để truy tìm điểm công suất tối đa tại 38 kW, ứng với điểm MPP như ở Hình 1. Tương tự, bộ điều khiển dự báo cũng cho đáp ứng hệ thống tốt,

cụ thể: điện áp DC được duy trì ổn định ở giá trị đặt và điện áp trên các tụ cũng được duy trì ở trạng thái cân bằng ổn định, như trong Hình 9b; dòng điện lưới nhanh chóng đạt xác lập tại giá trị tham chiếu với chất lượng THD tốt khoảng 2,47 %, Hình 9c và 9d; công suất tác dụng và công suất phản kháng được duy trì ổn định với hệ số công suất bằng 1, như Hình 9e; phổ THD dòng điện lưới được trình bày như trong Hình 9f.

Từ các kết quả mô phỏng cho thấy, giải thuật P&O đã truy tìm nhanh chóng điểm làm việc tối ưu để đảm bảo hệ thống PV luôn làm việc ở điểm công suất cực đại. Bên cạnh đó, giải thuật điều khiển dự báo thiết kế cho bộ nghịch lưu áp 3-bậc dạng T cho kết quả điều khiển dòng điện chính xác và nhanh kể cả khi có thay đổi về điều kiện bức xạ mặt trời. Dòng điện lưới có chất lượng THD <5 % đảm bảo theo tiêu chuẩn IEEE 929 and IEEE 1547. Thêm vào đó, điện áp trên các tụ được duy trì ở trạng thái cân bằng tốt.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày phương pháp điều khiển dự báo dựa trên mô hình cho bộ nghịch lưu áp 3-bậc dạng T với các mục tiêu bám theo dòng điện tham chiếu và cân bằng điện áp trên các tụ. Hàm chi phí cho mỗi mục tiêu được thiết kế có tính tới việc bù thời gian trễ do quá trình chuyển đổi tín hiệu tương tự sang số. Trạng thái chuyển mạch tối ưu được chọn sau khi cực tiểu hóa hàm chi phí tổng. Để đạt được hiệu suất phát công suất cực đại từ mảng pin mặt trời, kỹ thuật truy tìm điểm phát công suất cực đại dựa trên phương pháp nhiễu loạn và quan sát đã được trình bày. Kết quả mô phỏng đã chứng minh được hiệu quả điều khiển của giải thuật đã giới thiệu dưới các điều kiện chiếu bức xạ khác nhau.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này do Trường Đại học Công Thương Thành phố Hồ Chí Minh bảo trợ và cấp kinh phí theo Hợp đồng số 80/HĐ-DCT ngày 15 tháng 08 năm 2023.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] K. Ostad-Ali-Askari, R. Su, and L. Liu, "Water resources and climate change," *Journal of Water and Climate Change*, vol. 9, no. 2, pp. 239–251, 2018, doi: <https://doi.org/10.2166/wcc.2018.999>
- [2] K. Ostad-Ali-Askari, H. G. Kharazi, M. Shayannejad, and M. J. Zareian, "Effect of management strategies on reducing negative impacts of climate change on water resources of the Isfahan-Borkhar aquifer using MODFLOW," *River Research and Applications*, vol. 35, no. 6, pp. 611–631, 2019, doi: <https://doi.org/10.1002/rra.3463>
- [3] K. Ostad-Ali-Askari, H. G. Kharazi, M. Shayannejad, and M. J. Zareian, "Effect of climate change on precipitation patterns in an arid region using GCM models: Case study of Isfahan-Borkhar Plain," *Natural Hazards Review*, vol. 21, no. 2, Art. no. 04020006, 2020, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000367](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000367)
- [4] T. Efram and P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, 2007, doi: <https://doi.org/10.1109/TEC.2006.874230>
- [5] A. S. A. Nafeh, F. H. Fahmy, O. A. Mahgoub, and E. M. A. El-Zahab, "Developed algorithm of maximum power tracking for stand-alone photovoltaic system," *Energy Sources*, vol. 20, no. 1, pp. 45–53, 1998, doi: <https://doi.org/10.1080/00908319808970042>
- [6] J. Rodriguez, S. Bernet, B. Wu, J. O. Pontt, and S. Kouro, "Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 6, pp. 2930–2945, 2007, doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.907044>
- [7] L. G. Franquelo, J. Rodriguez, J. I. Leon, S. Kouro, R. Portillo, and M. A. M. Prats, "The age of multilevel converters arrives," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 28–39, 2008, doi: <https://doi.org/10.1109/MIE.2008.923519>
- [8] J. S. Lee and K. B. Lee, "Open-switch fault tolerance control for a three-level NPC/T-type rectifier in wind turbine systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 2, pp. 1012–1021, 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2347912>

- [9] A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, "A new neutral-point-clamped PWM inverter," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-17, no. 5, pp. 518–523, 1981, doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.1981.4503992>
- [10] M. Schweizer, I. Lizama, T. Friedli, and J. W. Kolar, "Comparison of the chip area usage of 2-level and 3-level voltage source converter topologies," in *Proc. IECON 2010—36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Glendale, AZ, USA, 2010, pp. 391–396, doi: <https://doi.org/10.1109/IECON.2010.5674994>
- [11] M. Schweizer and J. W. Kolar, "Design and implementation of a highly efficient three-level T-type converter for low-voltage applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 2, pp. 899–907, 2013, doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2203151>.
- [12] M. Schweizer and J. W. Kolar, "High efficiency drive system with 3-level T-type inverter," in *Proc. 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications*, Birmingham, U.K., 2011, pp. 1–10.
- [13] F. Y. Gao, Q. Du, Y. Qiao, and G. D. Qiang, "Decoupling control strategy with inverter-side current feedback for LCL-type three-phase PV grid-connected inverter," *Power System Protection and Control*, vol. 46, no. 9, pp. 122–128, 2018, doi: <https://doi.org/10.7667/PSPC170656>
- [14] M. Elkayam and A. Kuperman, "Optimized design of multiresonant AC current regulators for single-phase grid-connected photovoltaic inverters," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 9, no. 6, pp. 1815–1818, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2937386>
- [15] C. E. García, D. M. Prett, and M. Morari, "Model predictive control: Theory and practice—A survey," *Automatica*, vol. 25, no. 3, pp. 335–348, 1989, doi: [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(89\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0005-1098(89)90002-2)
- [16] J. Holtz and S. Stadtfeld, "A predictive controller for the stator current vector of AC machines fed from a switched voltage source," in *Proc. International Power Electronics Conference*, Tokyo, Japan, vol. 2, 1983, pp. 1665–1675.
- [17] A. K. Eedara, C. S. Koritala, and S. R. Rayapudi, "Modified model predictive control of back-to-back T-type NPC converter interfacing wind turbine-driven PMSG and electric grid," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 44, no. 8, pp. 7047–7065, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s13369-019-03775-0>
- [18] M. Malinowski, M. P. Kazmierkowski, and A. M. Trzynadlowski, "Review and comparative study of control techniques for three-phase PWM rectifiers," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 63, no. 3–5, pp. 349–361, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(03\)00081-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(03)00081-8)
- [19] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. V. Timbus, "Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1398–1409, 2006, doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2006.881997>.
- [20] R. Kadri, J.-P. Gaubert, and G. Champenois, "An improved maximum power point tracking for photovoltaic grid-connected inverter based on voltage-oriented control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 66–75, 2011, doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2044733>
- [21] P. T. X. Hoa, T. V. Hai, and X. N. Doan, "Giải thuật điều khiển dự báo nhanh cho bộ nghịch lưu 3-bậc dạng T nhằm giảm điện áp common-mode và cân bằng điện áp tụ," *HUIT Journal of Science*, vol. 24, no. 3, pp. 122–137, 2024, doi: [10.62985/j.huit_ojs.vol24.no3.94](https://doi.org/10.62985/j.huit_ojs.vol24.no3.94)

ABSTRACT

MODEL PREDICTIVE CONTROL FOR 3-LEVEL T-TYPE INVERTER GRID CONNECTED FOR SOLAR SYSTEM

Doan Xuan Nam, Van Tan Luong*

Ho Chi Minh City University of Industry and Trade

*Email: luongvt@huit.edu.vn

This article presents model predictive control technique for a grid-connected 3-phase 3-level T-type inverter for solar system. First, the DC-DC conversion stage using the maximum power point tracing technique is presented. Next, model predictive control method with the goal of current tracking and balancing the capacitor voltages is introduced. In this control strategy, the reference current is taken from the active current and reactive current through the transformation from dq to $\alpha\beta$ coordinate. The effectiveness of the control method is demonstrated through simulations on Matlab/ Simulink software. The power transmitted to the grid is maintained stable corresponding to the maximum power point of the PV array, with power factor at 1 under different heat radiation conditions. The grid current response quickly reaches the reference value. The voltage of the capacitors is maintained in a well-balanced.

Keywords: 3-level T-NPC, capacitor voltage balancing, model predictive control, P&O algorithm.