

ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO MÔ HÌNH TẬP ĐIỆN ÁP HỮU HẠN DỰA TRÊN LOGIC MỜ VỚI BƯỚC NHẢY THÍCH NGHI CHO HỆ THỐNG QUANG ĐIỆN NỐI LƯỚI

FUZZY-BASED ADAPTIVE STEP-SIZE FINITE VOLTAGE SET MODEL PREDICTIVE CONTROL FOR GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

NGUYỄN VĂN TIẾN*, ĐỖ KHẮC TIỆP

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.1115>

Tóm tắt

Bài báo nghiên cứu tối ưu hóa hiệu suất bám điểm công suất cực đại MPPT (Maximum Power Point Tracking) cho hệ thống quang điện nối lưới thông qua việc phát triển giải pháp điều khiển dự báo mô hình MPC (Model Predictive Control) với tập điện áp hữu hạn FVS (Finite Voltage Set) dựa trên logic mờ FLC (Fuzzy Logic Controller). Một cấu trúc điều khiển lai ghép (Fuzzy-FVS-MPC) được thiết kế để khắc phục nhược điểm của các bộ điều khiển tuyến tính. Bộ điều khiển logic mờ được tích hợp nhằm tự động tính toán và điều chỉnh liên tục độ lớn bước nhảy điện áp của FVS-MPC, tuân theo các biến thiên tức thời của dòng năng lượng từ giàn pin.

Mô hình toán học và cấu trúc điều khiển được mô phỏng, đánh giá trên nền tảng MATLAB/Simulink. Kết quả cho thấy giải pháp đề xuất thể hiện tính ưu việt trong quá trình đáp ứng động học, đạt thời gian xác lập dưới 0,1 giây dưới các thay đổi bức xạ khắc nghiệt nhanh hơn 29% so với phương pháp truyền thống. Ở trạng thái tĩnh, giải pháp đảm bảo hiệu suất bám cực đại đạt trên 98,9% và loại bỏ hoàn toàn các dao động công suất có hại.

Từ khóa: Bám công suất cực đại, điều khiển dự báo mô hình, tập điện áp hữu hạn, điều khiển mờ, nghịch lưu nối lưới.

Abstract

This paper investigates the optimization of Maximum Power Point Tracking (MPPT) efficiency for grid-tied photovoltaic systems by developing a Finite Voltage Set Model Predictive Control (FVS-MPC) strategy based on a Fuzzy Logic Controller (FLC) with an adaptive step-size. A hybrid control structure (Fuzzy-FVS-MPC)

is designed to overcome the limitations of conventional linear controllers. The fuzzy logic controller is integrated to automatically calculate and continuously adjust the voltage prediction step size of the FVS-MPC, in response to instantaneous variations in the power flow from the PV array. The mathematical model and control structure are simulated and evaluated using the MATLAB/Simulink platform. The results demonstrate the superiority of the proposed solution in dynamic response, achieving a settling time of under 0.1 seconds under severe irradiance changes, which is 29% faster than traditional methods. Furthermore, in the steady state, the proposed strategy ensures a tracking efficiency of over 98.9% and completely eliminates harmful power oscillations.

Keywords: Maximum power point tracking, predictive control model, finite voltage set, fuzzy logic controller, grid-tied System.

1. Mở đầu

Bức tranh năng lượng toàn cầu đang trải qua sự chuyển dịch mạnh mẽ hướng tới các nguồn năng lượng tái tạo, trong đó hệ thống quang điện PV (Photovoltaic) khẳng định vai trò trụ cột nhờ tiềm năng khai thác lớn [1]. Mặc dù vậy, việc tích hợp quy mô lớn năng lượng mặt trời vào lưới điện vấp phải rào cản kỹ thuật chính là đặc tính phi tuyến của giàn PV chịu sự chi phối bởi các yếu tố từ môi trường, điển hình là cường độ bức xạ và nhiệt độ bề mặt [2, 3]. Do đó, việc nghiên cứu và ứng dụng các thuật toán bám điểm công suất cực đại MPPT nhằm tối ưu hóa hiệu suất chuyển đổi năng lượng đã trở thành một yêu cầu kỹ thuật bắt buộc, quyết định trực tiếp đến tính khả thi và hiệu quả kinh tế của các nhà máy điện mặt trời.

Kỹ thuật MPPT ghi nhận sự phổ biến của các

phương pháp kinh điển như quan sát và nhiễu loạn P&O (Perturb and Observe) hay điện dẫn gia tăng INC (Incremental Conductance), vốn được thương mại hóa rộng rãi nhờ cấu trúc điều khiển đơn giản [4]. Dầu vậy, các phân tích chuyên sâu gần đây [5, 6] đã vạch rõ nhược điểm cố hữu của nhóm giải pháp này đó là sự tồn tại của một mâu thuẫn giữa tốc độ đáp ứng động học và độ chính xác ở trạng thái xác lập. Về bản chất, việc ứng dụng một bước nhảy điện áp không đổi trong phương pháp P&O và INC buộc hệ thống phải chấp nhận sự đánh đổi về mặt hiệu năng. Một bước nhảy lớn ưu tiên tốc độ tiếp cận vùng công suất cực đại MPP (Maximum Power Point) nhưng lại gây dao động công suất lớn gây tổn hao năng lượng; ngược lại, việc thu hẹp bước nhảy giúp triệt tiêu dao động nhưng lại làm suy giảm độ nhạy của thuật toán trước các biến thiên nhanh của bức xạ [6].

Các kỹ thuật thông minh nhân tạo điển hình như mạng nơ-ron nhân tạo ANN (Artificial Neural Network) đã được ứng dụng cho bài toán MPPT phi tuyến nhờ khả năng ánh xạ tối ưu và tốc độ hội tụ nhanh [7, 8]. Mặc dù mang lại hiệu suất động học cao, giải pháp dựa trên ANN lại vấp phải rào cản lớn do phụ thuộc vào tập dữ liệu huấn luyện khổng lồ và đòi hỏi tài nguyên tính toán lớn.

Nhằm tháo gỡ những giới hạn của các bộ điều khiển tuyến tính cổ điển và bộ điều khiển ANN, điều khiển dự báo mô hình MPC đã trở thành hướng nghiên cứu chủ đạo trong lĩnh vực điện tử công suất [9]. MPC sử dụng mô hình toán học cho phép xử lý trực tiếp các ràng buộc phi tuyến và dự báo hành vi động học của hệ thống trong tương lai do vậy MPC mang lại bước tiến lớn về hiệu suất động học. Gần đây, biến thể MPC dựa trên tập điện áp hữu hạn (FVS-MPC) dành cho MPPT đã được Hassan và cộng sự [1] giới thiệu, cung cấp cơ chế tối ưu hóa trực tiếp hệ số đóng cắt của van bán dẫn thông qua việc tính toán công suất dự báo trên một tập hợp các mức điện áp rời rạc. Các minh chứng thực nghiệm trong [1, 10] khẳng định tính vượt trội của FVS-MPC so với P&O, đặc biệt ở khả năng giảm độ méo hài tổng THD (Total Harmonic Distortion) và ổn định điện áp DC-link.

Tuy nhiên, hầu hết các kiến trúc FVS-MPC hiện nay, bao gồm cả các nghiên cứu [1, 10, 11], vẫn bị giới hạn bởi việc khai thác một tập điện áp dự báo có khoảng cách bước cố định. Dưới các điều kiện bức xạ mặt trời thay đổi đột ngột, việc duy trì bước dự báo cố định khiến bộ điều khiển mất nhiều chu kỳ lấy mẫu để xác lập lại điểm công suất cực đại mới, dẫn đến tổn thất năng lượng nghiêm trọng trong giai đoạn quá độ [12]. Mặc dù khái niệm bước nhảy biến thiên đã được

thử nghiệm đối với thuật toán P&O [5, 13], việc tích hợp cơ chế thích nghi này vào cấu trúc dự báo của MPC vẫn là một vấn đề chưa được khai thác triệt để.

Thách thức cốt lõi trong việc thiết kế cơ chế bước nhảy thích nghi nằm ở bản chất phi tuyến cao và tính bất định của hệ thống quang điện. Mối quan hệ giữa biến thiên công suất, biến thiên điện áp và độ lớn bước nhảy tối ưu không thể được biểu diễn bằng một hàm toán học giải tích tuyến tính đơn giản, đặc biệt khi đường cong đặc tính thay đổi liên tục dưới tác động ngẫu nhiên của thời tiết. Bên cạnh đó bộ điều khiển logic mờ đã chứng minh được tính ưu việt trong việc xử lý các ràng buộc phi tuyến phức hợp và tham số bất định [14, 15]. Hơn nữa, các phân tích tổng hợp mới nhất [15, 16] đồng thuận chỉ ra rằng, việc định vị logic mờ ở vai trò bộ điều khiển giám sát đang là một hướng đi đầy tiềm năng. Thông qua cơ chế suy luận mờ, hệ thống tự động tinh chỉnh tham số cho các bộ điều khiển kinh điển, qua đó bảo đảm độ ổn định và nâng cao chất lượng điều khiển trong các điều kiện làm việc biến thiên liên tục.

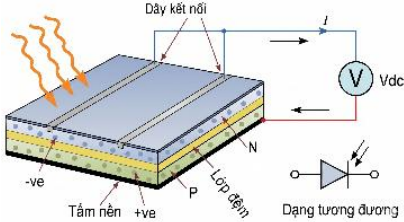
Xuất phát từ những phân tích trên, bài báo này đề xuất một kiến trúc điều khiển lai ghép mới: thuật toán FVS-MPC với bước nhảy thích nghi dựa trên logic mờ. Điểm mới so với các tiếp cận tính trước đây nằm ở việc nghiên cứu đã thiết kế thành công một bộ điều khiển mờ thực hiện nhiệm vụ giám sát sự thay đổi công suất tức thời, từ đó tự động tinh chỉnh độ rộng của tập điện áp dự báo bên trong thuật toán MPC. Mục tiêu của kiến trúc này là hiện thực hóa cơ chế thích nghi kép: Biên độ bước nhảy được mở rộng để gia tốc quá trình hội tụ trong giai đoạn quá độ; Đồng thời tự động thu hẹp nhằm triệt tiêu hoàn toàn dao động công suất khi hệ thống bước vào giai đoạn xác lập.

2. Mô hình toán học bộ nghịch lưu nguồn áp

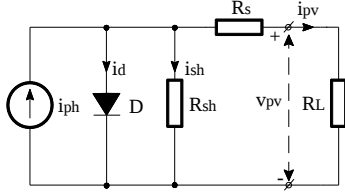
Trước khi đi sâu vào mô hình toán học chi tiết, cấu trúc tổng thể của hệ thống quang điện nối lưới được định hình với ba phân hệ cơ bản: (1) giàn pin quang điện (PV), (2) bộ biến đổi DC-DC Boost, và (3) bộ nghịch lưu ba pha. Về mặt luồng năng lượng, dòng điện một chiều từ giàn PV được đưa qua bộ DC-DC Boost nhằm nâng áp lên mức tiêu chuẩn cho tụ DC-link, trước khi được chuyển đổi thành dòng xoay chiều thông qua nghịch lưu để hòa lưới. Quá trình biến đổi năng lượng này được đặt dưới sự điều khiển của bộ điều khiển trung tâm; trong đó, thuật toán Fuzzy-FVS-MPC chịu trách nhiệm bám điểm công suất cực đại và xuất xung cho van bán dẫn của mạch Boost, hoạt động đồng bộ cùng vòng điều khiển phía nghịch lưu để giám sát và điều chỉnh công suất đầu lưới.

2.1. Mô hình pin quang điện

Pin quang điện là thiết bị bán dẫn có khả năng chuyển đổi trực tiếp năng lượng bức xạ ánh sáng thành điện năng dựa trên hiệu ứng quang điện. PV được cấu tạo từ hai lớp bán dẫn loại N và P như minh họa trong Hình 1a.



(a) Cấu tạo vật lý



(b) Sơ đồ tương đương

Hình 1. Cấu tạo và sơ đồ tương đương của pin quang điện

Để thuận tiện cho việc phân tích và mô phỏng toán học trong các hệ thống điều khiển, PV được mô hình hóa thành một mạch điện tương đương của một diode như Hình 1b. Dòng điện do PV tạo ra (i_{pv}) được mô tả như sau [1]:

$$i_{pv} = i_{ph} - i_0 \left[e^{\left(\frac{q(v_{pv} + i_{pv}R_s)}{A_n N_s k T_c} \right)} - 1 \right] - \frac{v_{pv} + i_{pv}R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

Trong đó: i_{ph} là dòng quang điện; i_0 là dòng bão hòa ngược của diode D; (v_{pv} , i_{pv}) lần lượt là điện áp và dòng điện đầu ra của PV; (R_s , R_{sh}) là các điện trở tương đương nối tiếp và song song của PV; A_n là hệ số lý tưởng của diode; N_s là số lượng PV; k là hằng số Boltzmann; q là điện tích electron; T_c là nhiệt độ làm việc của PV.

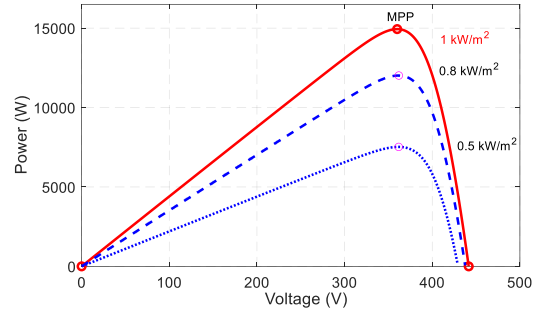
Dòng quang điện i_{ph} , điện áp hở mạch v_{oc} và dòng điện bão hòa i_0 phụ thuộc vào cường độ bức xạ E_a và sự chênh lệch nhiệt độ ΔT so với điều kiện theo các công thức sau [1]:

$$i_{ph}(E_a, \Delta T) = \frac{E_a}{E_{STC}} I_{SC_STC} (1 + \alpha_T \Delta T) \quad (2)$$

$$v_{oc}(E_a, \Delta T) = V_{OC_STC} (1 + \beta_T \Delta T) v_T(E_a) \quad (3)$$

$$i_0(E_a, \Delta T) = \frac{i_{ph}(E_a, \Delta T)}{e^{\left(\frac{q v_{oc}(E_a, \Delta T)}{A_n N_s k T_c} \right)} - 1} \quad (4)$$

Từ các phương trình đặc tính (1)-(4), có thể thấy quan hệ giữa công suất và điện áp của PV là một hàm phi tuyến đơn đỉnh như Hình 2.



Hình 2. Mối quan hệ giữa điện áp và công suất của PV dưới các điều kiện bức xạ khác nhau

Tại mỗi điều kiện bức xạ và nhiệt độ cụ thể, tồn tại duy nhất một điểm vận hành tối ưu MPP mà tại đó công suất phát ra đạt giá trị cực đại.

Tuy nhiên, vị trí của MPP thay đổi liên tục theo điều kiện môi trường. Nếu kết nối trực tiếp PV vào nghịch lưu hoặc tải tĩnh, điểm làm việc thực tế sẽ bị khóa bởi điện áp tải và ít khi trùng khớp với điểm MPP, dẫn đến hiệu suất khai thác năng lượng thấp. Do đó, để tối ưu hóa hiệu suất, cần thiết phải có một cơ chế bám điểm công suất cực đại để liên tục điều chỉnh điểm làm việc về điểm MPP. Yêu cầu này dẫn đến việc phải sử dụng một bộ biến DC-DC dạng tăng áp (bộ Boost). Bộ DC-DC Boost đóng vai trò như một khâu phối hợp trở kháng động giữa PV và tải đồng thời là cơ cấu chấp hành cho thuật toán điều khiển.

2.2. Mô hình bộ biến đổi DC-DC Boost

Bộ biến đổi DC-DC Boost được sử dụng như một khâu trung gian để nâng điện áp và thực hiện chức năng bám điểm công suất cực đại. Cấu trúc mạch động lực của bộ biến đổi Boost bao gồm cuộn cảm đầu vào L_b , tụ điện đầu vào C_{pv} , khóa bán dẫn S, diode chặn D và tụ điện liên kết một chiều C_{dc} ở đầu ra như Hình 3.

Trạng thái S đóng (ON), cuộn cảm tích lũy năng lượng từ nguồn, dòng điện cuộn cảm i_L tăng dần theo phương trình:

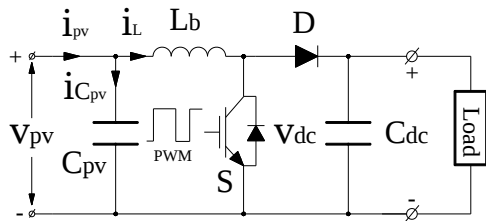
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_{pv}}{L_b} \quad (5)$$

Khi S ngắt (OFF), năng lượng từ nguồn PV cộng

với năng lượng tích lũy trong cuộn cảm được giải phóng sang tụ C_{dc} và tải, phương trình dòng điện lúc này là:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_{pv} - v_{dc}}{L_b} \quad (6)$$

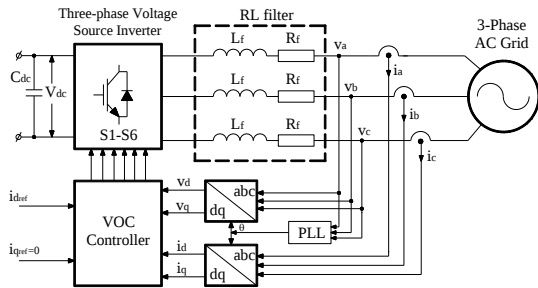
Phương trình (5) và (6) được sử dụng trong việc thiết kế bộ điều khiển dự báo. Dựa trên các phương trình này, thuật toán MPC có thể tính toán trước giá trị dòng điện tại thời điểm thứ $(k+1)$, từ đó lựa chọn tỉ số điều chế tối ưu để đưa điện áp PV về giá trị tham chiếu mong muốn.



Hình 3. Cấu trúc của mạch DC-DC Boost

2.3. Mô hình bộ nghịch lưu nối lưới

Để thực hiện quá trình chuyển đổi năng lượng từ dòng một chiều sang dòng xoay chiều và hòa vào lưới điện, hệ thống nghịch lưu nối lưới sử dụng một bộ nghịch lưu nguồn dòng ba pha. Sơ đồ nguyên lý cấu trúc mạch động lực, phương thức ghép nối lưới được mô tả chi tiết trong Hình 4.



Hình 4. Sơ đồ cấu trúc bộ nghịch lưu nối lưới

Về mặt cấu trúc, bộ nghịch lưu bao gồm: Mạch cầu ba pha gồm sáu khóa bán dẫn (S1÷S6); Bộ lọc đầu ra (L_f , R_f) nhằm loại bỏ các thành phần hài bậc cao.

Trong nghiên cứu này, trọng tâm tập trung vào thuật toán MPPT phía DC-DC, do đó bộ nghịch lưu được thiết kế theo cấu trúc định hướng điện áp VOC (Voltage-Oriented Control) kinh điển [17]. Công suất tác dụng (P) và công suất phản kháng (Q) trao đổi với lưới được tính toán dựa trên các giá trị dòng áp trên trục dq theo công thức sau [17]:

$$P = \frac{3}{2} (E_d i_d + E_q i_q) \quad (7)$$

$$Q = \frac{3}{2} (E_q i_d - E_d i_q) \quad (8)$$

Bằng cách sử dụng vòng khóa pha PLL (Phase-Locked Loop) để đồng bộ hóa theo điện áp lưới, chúng ta có thể giả thiết ($E_q=0$) và E_d bằng biên độ điện áp lưới. Khi đó, việc điều khiển công suất tác dụng P và phản kháng Q có thể được thực hiện độc lập thông qua việc điều khiển dòng điện i_d và i_q .

3. Phương pháp điều khiển đề xuất

3.1. Bám điểm công suất cực đại theo nguyên lý FVS-MPC

Khác với các bộ điều khiển tuyến tính truyền thống (như P&O) sử dụng độ rộng xung làm biến điều khiển liên tục. FVS-MPC dùng mô hình toán học rời rạc của hệ thống để dự báo công suất tại một số điểm điện áp giả định trong tập điện áp, từ đó lựa chọn ra điểm làm việc tối ưu nhất.

Để hạn chế việc gia tăng khối lượng tính toán, thay vì quét toàn bộ dải điện áp hoạt động, thuật toán chỉ xét một tập hợp hữu hạn các giá trị điện áp (V_{set}) trước và sau điểm làm việc hiện tại. Tập hợp này thường bao gồm 3 phần tử cơ bản:

$$V_{set} = \{v_{pv}(k) - \Delta v, v_{pv}(k), v_{pv}(k) + \Delta v\} \quad (9)$$

Trong đó Δv là bước nhảy điện áp. Trong phương pháp FVS-MPC truyền thống [1, 8] thì Δv là một hằng số cố định.

Với mỗi giá trị điện áp $v_j(k+1) \in V_{set}$, từ công thức (1) dòng điện và công suất ở chu kỳ kế tiếp $(k+1)$ của PV được xác định bởi biểu thức:

$$i_{pv,j}(k+1) = I_{ph}(k) - I_o(k) \left[e^{\frac{q(v_j(k+1) + i_{pv}(k)R_s)}{A_n N_s k T_c}} - 1 \right] - \frac{v_j(k+1) + i_{pv}(k)R_s}{R_{sh}} \quad (10)$$

$$p_{pv,j}(k+1) = v_j(k+1) \cdot i_{pv,j}(k+1) \quad (11)$$

Khi được thực thi, thuật toán FVS-MPC sẽ so sánh các công suất dự báo với nhau và chọn ra điện áp v_{pv} mà tại đó mang lại công suất lớn nhất để làm điện áp tham chiếu tối ưu V_{opt} cho DC-DC Boost, nói cách khác:

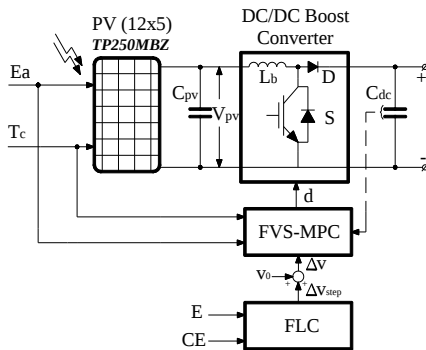
$$V_{opt}(k+1) = \arg \max_{v_j \in V_{set}} \{p_{pv,j}(k+1)\} \quad (12)$$

Ưu điểm của FVS-MPC là khả năng dự báo chính

xác và loại bỏ sai số tĩnh tốt hơn so với P&O truyền thống. Tuy nhiên, hiệu suất của thuật toán phụ thuộc trực tiếp vào việc lựa chọn bước nhảy Δv . Đây là động lực để bài báo phát triển giải pháp bước nhảy thích nghi được trình bày trong phần tiếp theo.

3.2. Tích hợp logic mờ vào chu trình FVS-MPC

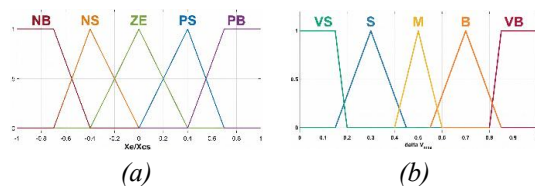
Để khắc phục nhược điểm về bước nhảy cố định của thuật toán FVS-MPC truyền thống, nghiên cứu này đề xuất một cơ chế phối hợp giữa bộ điều khiển mờ và khối điều khiển dự báo để hình thành cấu trúc Fuzzy-FVS-MPC như trên Hình 5.



Hình 5. Cấu trúc điều khiển Fuzzy-FVS-MPC cho thuật giải MPPT

Trong cấu trúc này, bộ điều khiển logic mờ đóng vai trò là khối tính toán tham số thích nghi, cung cấp giá trị bước nhảy Δv tối ưu cho từng chu kỳ lấy mẫu, trong khi khối FVS-MPC thực hiện chức năng dự báo và tối ưu hóa điểm làm việc. Bộ điều khiển mờ được thiết kế với hai đầu vào là độ dốc công suất E ($E = \Delta P_{pv} / \Delta V_{pv}$) và biến thiên sai lệch CE ($CE = dE / dt$), cùng một đầu ra Δv_{step} là độ lớn bước nhảy điện áp.

Cả 2 biến vào (E , CE) đều được chia thành 5 tập mờ với các hàm thuộc giống nhau, được gán nhãn ngôn ngữ: NB (Âm lớn), NS (Âm nhỏ), ZE (Không), PS (Dương nhỏ), và PB (Dương lớn). Biến đầu ra được chia thành 5 tập mờ với các nhãn: VS (Rất nhỏ), S (Nhỏ), M (Trung bình), B (Lớn), và VB (Rất lớn). Để cân bằng giữa độ chính xác và khối lượng tính toán, nghiên cứu sử dụng kết hợp hàm thuộc dạng hình thang và hình tam giác như trong Hình 6.



Hình 6. Mờ hóa đầu vào/ra của bộ điều khiển mờ:
 (a) Đầu vào; (b) Đầu ra

Hàm hình thang được sử dụng cho các tập biên nhằm bảo hòa các giá trị vượt ngưỡng, đảm bảo hệ thống phản ứng mạnh nhất khi điểm làm việc ở xa MPP. Hàm tam giác được sử dụng cho các tập trung gian (NS, ZE, PS; S, M, B) để đảm bảo độ nhạy cao và chuyển tiếp mềm giữa các vùng điều khiển lân cận.

Bảng 1. Bảng quy tắc điều khiển mờ cho FLC

E / CE	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	VB	VB	VB	B	M
NS	VB	B	M	S	VS
ZE	VB	M	VS	M	VB
PS	VS	S	M	B	VB
PB	M	B	VB	VB	VB

Luật mờ được hình thành dựa trên các nguyên tắc khi độ dốc $\Delta P_{pv} / \Delta V_{pv}$ (đầu vào E) có giá trị tuyệt đối rất lớn (đang ở xa điểm MPP) thì bước nhảy Δv_{step} phải rất lớn để nhanh chóng tiếp cận MPP. Khi điểm làm việc tiến gần MPP, độ dốc giảm dần về 0 thì bước nhảy Δv_{step} cần giảm để tránh gây quá điều chỉnh. Dựa trên các nguyên tắc trên, luật mờ gồm 25 quy tắc được thiết lập như Bảng 1.

Để hệ thống hóa quy trình điều khiển thích nghi đã phân tích, toàn bộ trình tự thực thi của giải pháp đề xuất được tóm tắt chi tiết dưới dạng mã giả (pseudocode). Thuật giải này minh họa cụ thể sự phối hợp giữa cơ chế suy luận bước nhảy của bộ điều khiển mờ và quá trình dự báo tối ưu của FVS-MPC.

Thuật giải Fuzzy-FVS-MPC đề xuất với bước nhảy thích nghi

1 Khởi tạo các trị ban đầu:

$$v_{pv}(k-1), p_{pv}(k-1), E(k-1)$$

2 Đo v_{pv} và i_{pv} để tính p_{pv} và ΔP :

$$p_{pv}(k) \leftarrow v_{pv}(k) \times i_{pv}(k); \Delta P \leftarrow p_{pv}(k) - p_{pv}(k-1);$$

$$\Delta V \leftarrow v_{pv}(k) - v_{pv}(k-1)$$

3 If $|\Delta V| > \epsilon$ Then $E(k) \leftarrow \Delta P / \Delta V$

$$\text{Else } E(k) \leftarrow E(k-1)$$

$$\text{Tính biến thiên độ dốc: } CE(k) \leftarrow E(k) - E(k-1)$$

Chuẩn hóa ngõ vào:

$$x_E \leftarrow E(k) \times K_e; x_{CE} \leftarrow CE(k) \times K_{ce}$$

Suy luận và giải mờ:

$$\Delta v_{step} \leftarrow \text{FuzzyBlock}(x_E, x_{CE}) \times K_{out}$$

4 Xác định tập điện áp theo (9):

$$V_{set} \leftarrow \{v_{pv}(k) - \Delta v_{step}, v_{pv}(k), v_{pv}(k) + \Delta v_{step}\}$$

5 Dự báo công suất theo (10)(11):

$$p_{pred,j} \leftarrow v_j \times i_{pred,j}$$

Đánh giá hàm mục tiêu (12):

$$\text{If } p_{pred,j} > P_{max} \text{ Then } P_{max} \leftarrow p_{pred,j}; V_{opt} \leftarrow v_j$$

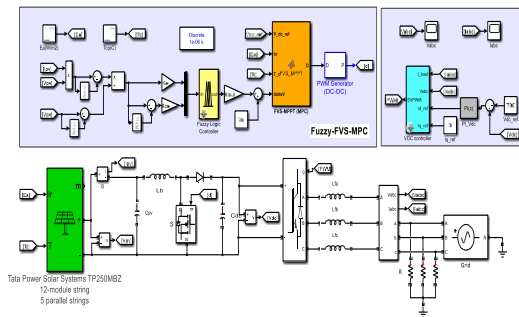
6 Tính d cho mạch DC Boost theo V_{opt} và lưu kết quả

7 Trả về kết quả $d(k+1)$

4. Kết quả mô phỏng

4.1. Thiết lập thông số mô phỏng

Để kiểm chứng thuật toán Fuzzy-FVS-MPC, mô hình hệ thống PV nối lưới đã được xây dựng và mô phỏng trên MATLAB/Simulink. Sơ đồ cấu trúc của hệ thống được mô tả như trong Hình 7.



Hình 7. Sơ đồ mô phỏng bộ nghịch lưu nối lưới với bộ điều khiển Fuzzy-FVS-MPC cho phần DC

Khối pin quang điện trong mô phỏng là Tata Power TP250MBZ [18] với cấu trúc gồm 5 chuỗi song song, mỗi chuỗi ghép nối tiếp 12 tấm để đạt công suất định mức xấp xỉ 14,9 kW. Năng lượng từ PV được đưa qua bộ biến đổi DC-DC Boost, đóng vai trò là khâu chấp hành cho thuật toán Fuzzy-FVS-MPC. Cuối cùng, năng lượng được chuyển đổi sang dạng xoay chiều và hòa vào lưới.

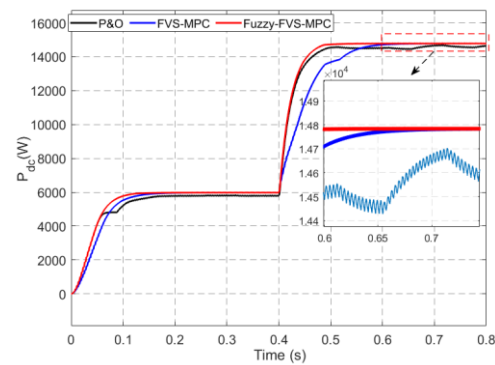
Bảng 2. Thông số kỹ thuật của hệ thống mô phỏng

Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Cuộn cảm đầu vào	L_b	5,0	mH
Tụ điện đầu vào PV	C_{pv}	470	μF
Tụ điện DC-Link	C_{dc}	1200	μF
Tần số PWM	f_{sw}	20	kHz
Điện áp tham chiếu	V_{dc}	700	V
Điện áp lưới (dây)	V_{grid}	400	V
Tần số lưới	f_{grid}	50	Hz
Cuộn cảm lọc	L_f	10	mH
Chu kỳ lấy mẫu MPC	T_s	50	μs
Bước điện áp khởi tạo	V_0	0,15	V
Bước mô phỏng	T	1	μs

4.2. Các kịch bản mô phỏng và thảo luận

4.2.1. Kịch bản 1: Đánh giá khả năng thu năng lượng ở trạng thái tĩnh

Để so sánh khả năng thu năng lượng cực đại của Fuzzy-FVS-MPC so với FVS-MPC và P&O, cả 3 bộ điều khiển được thiết lập với tải trở thuần có giá trị bằng nhau trong điều kiện cường độ bức xạ mặt trời thay đổi đột ngột từ $500W/m^2$ lên $1000W/m^2$ ở 0,4 giây. Kết quả mô phỏng công suất một chiều thu được (phía DC) như trên Hình 8.

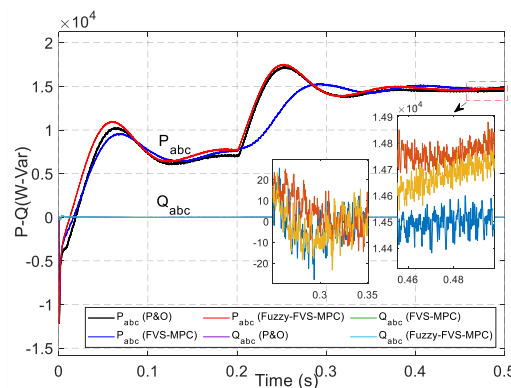


Hình 8. So sánh công suất PV với Fuzzy-FVS-MPC, FVS-MPC và P&O khi bức xạ thay đổi

Kết quả mô phỏng cho thấy nhóm giải pháp dựa trên MPC thu được 14782,5W (hiệu suất 98,9%) lớn hơn so với P&O (14588,1W).

Quan sát phản phóng to cho thấy P&O bị dao động mạnh quanh điểm làm việc. Cấu trúc điều khiển Fuzzy-FVS-MPC có tốc độ hội tụ nhanh nhất (0,1 giây), nhanh hơn P&O (0,14 giây), tương đương nhanh hơn 29%. FVS-MPC đạt được cùng mức công suất như Fuzzy-FVS-MPC nhưng tốc độ chậm hơn (0,22 giây) do sử dụng bước dò tìm cố định.

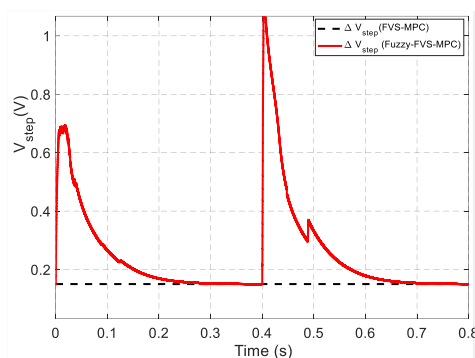
Công suất P_{abc} và Q_{abc} (phía AC) được bộ nghịch lưu đẩy vào lưới điện như Hình 9.



Hình 9. Đồ thị công suất P_{abc} và Q_{abc} đẩy lưới

Tại giai đoạn khởi động ($0 \div 0,05$ giây), công suất bị âm, đây là quá trình nạp khởi động của tụ DC-link C_{DC} (lưới cấp cho tụ). Kết thúc quá trình quá độ, công suất đầu lưới của Fuzzy-FVS-MPC ổn định tại mức công suất 14495,4W sau 0,35 giây. P&O chậm hơn (0,4 giây), đường P&O vẫn còn dao động nhẹ ở cuối giai đoạn mô phỏng. Công suất phản kháng Q_{abc} được duy trì ở mức xấp xỉ 0, việc này đảm bảo hệ số công suất đạt xấp xỉ 1 tại điểm hòa lưới.

Mức năng lượng cao hơn của Fuzzy-FVS-MPC được lý giải thông qua đồ thị bước nhảy điện áp ΔV_{step} như trên Hình 10.



Hình 10. Đồ thị bước nhảy điện áp thích nghi của cấu trúc Fuzzy-FVS-MPC so với FVS-MPC

Đường nét đứt mô tả bước nhảy điện áp cố định của FVS-MPC ($\Delta V_{step}=0,15V$) còn nét liền là bước nhảy thích nghi của Fuzzy-FVS-MPC. Tại thời điểm xảy ra quá độ ($t=0$ và $t=0,4$ giây), sai lệch công suất tăng mạnh, bộ điều khiển mờ thực hiện tăng bước nhảy điện áp theo cơ chế thích nghi đã trình bày trong mục 3.2. Điều này cho phép điểm làm việc nhảy bậc để tiếp cận MPP nhanh hơn. Khi hệ thống đi vào trạng thái ổn định, ΔV_{step} tự động suy giảm theo hàm mũ và duy trì ở mức thấp (0,15V). Cơ chế này giúp triệt tiêu dao động, đảm bảo tốc độ nhanh trong giai đoạn quá độ và tính chính xác cao trong giai đoạn ổn định như đã quan sát thấy trong đồ thị công suất.

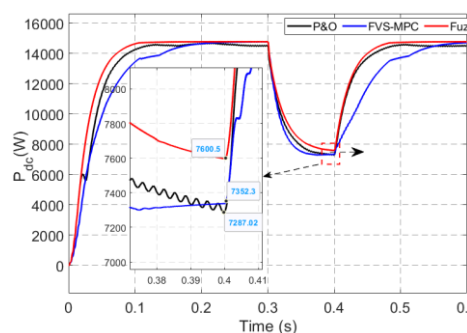
4.2.2. Kịch bản 2: Đánh giá khả năng đáp ứng động trước nhiễu loạn môi trường

Để đánh giá khả năng đáp ứng động của hệ thống trước các nhiễu loạn môi trường, chúng tôi thiết lập kịch bản cường độ bức xạ giảm đột ngột tại thời điểm 0,3 giây và phục hồi lại định mức tại 0,4 giây. Kịch bản này mô phỏng việc xuất hiện một đám mây bay ngang qua PV trong điều kiện vận hành thực tế. Kết quả mô phỏng công suất đầu ra của ba thuật toán được thể hiện trong Hình 11.

Quan sát phản phóng to tại thời điểm ngay trước khi cường độ bức xạ phục hồi (0,4 giây), Fuzzy-FVS-

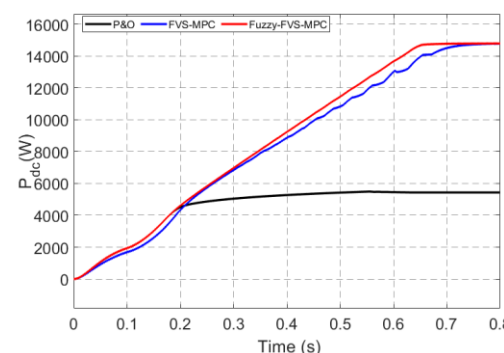
MPC duy trì công suất ổn định tại mức 7600,5W, đây là mức thu năng lượng cao nhất trong ba phương pháp. P&O mất nhiều thời gian hơn để hội tụ về điểm làm việc mới, đồng thời xuất hiện dao động lớn quanh điểm cực đại. Giá trị trung bình của P&O khoảng 7352,3W, thấp hơn Fuzzy-FVS-MPC khoảng 248W. Đối với FVS-MPC, mặc dù không bị dao động như P&O, nhưng do hạn chế của tập điện áp dự báo cố định, thuật toán này không thể tìm chính xác đỉnh MPP mới, dẫn đến sai số tĩnh, công suất chỉ đạt 7287W. Như vậy cơ chế bước nhảy thích nghi của Fuzzy-FVS-MPC đã cho phép thuật toán tự động tinh chỉnh độ phân giải tìm kiếm khi bức xạ thấp, giúp thu được thêm xấp xỉ 313W so với FVS-MPC trong điều kiện thử nghiệm.

4.2.3. Kịch bản 3: Đánh giá khả năng tìm điểm MPP



Hình 11. Công suất thu được của các bộ điều khiển dưới điều kiện cường độ bức xạ thay đổi nhanh khi cường độ bức xạ thay đổi chậm

Để kiểm chứng khả năng bám đuổi điểm MPP của các thuật toán trong điều kiện thời tiết thay đổi liên tục nhưng không đột ngột (như buổi sáng sớm mặt trời mọc hoặc khi mây tan từ từ), một kịch bản tăng dần cường độ bức xạ từ 0 lên 1000W/m² trong khoảng thời gian $0 \div 0,7$ giây được thiết lập, kết quả mô phỏng thu được như trên Hình 12.



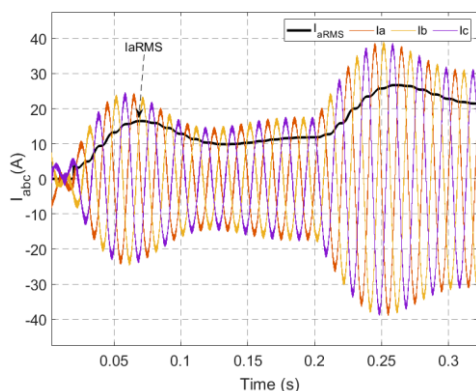
Hình 12. Phân tích đáp ứng công suất PV dưới điều kiện cường độ bức xạ tăng dần

Đối với thuật toán P&O, khi tốc độ tăng của bức xạ lớn hơn tốc độ hội tụ của thuật toán thì P&O bị lỗi tìm MPP. Công suất đầu ra bị bão hòa ở mức khoảng 5,5kW, trong khi công suất thực tế có thể lên tới 15kW. Dưới điều kiện bức xạ tăng liên tục, biến thiên công suất luôn dương ($\Delta P > 0$), khiến P&O không thể phân lập sự gia tăng công suất do nhiễu loạn môi trường hay do kết quả của tác động điều khiển. Điều này gây ra sai số tín hiệu và dẫn đến hiện tượng trôi điểm làm việc ra xa khỏi cực đại thực tế.

Cả hai thuật toán Fuzzy-FVS-MPC (đường màu đỏ) và FVS-MPC (đường màu xanh lục) đều có công suất tăng tuyến tính và bám sát giới hạn công suất cực đại lý thuyết của giàn PV. Tuy nhiên, thuật toán FVS-MPC xuất hiện sai số tính khiến đường đặc tính luôn duy trì mức công suất thấp hơn so với Fuzzy-FVS-MPC. Ưu điểm chung của nhóm giải pháp điều khiển dựa trên mô hình này là khả năng cập nhật tức thời điện áp tối ưu thông qua các phương trình trạng thái ngay khi có sự thay đổi của biến số môi trường (bức xạ, nhiệt độ). Nhờ đó, hệ thống đạt được tốc độ đáp ứng động học nhanh và duy trì khả năng bám điểm cực đại chính xác hơn P&O, bất chấp điều kiện bức xạ biến thiên liên tục.

4.2.4. Kịch bản 4: Đánh giá chất lượng điện năng đầu lưới khi sử dụng Fuzzy-FVS-MPC

Đồ thị Hình 13 là dòng điện đầu lưới của nghịch lưu, khi đang sử dụng bộ điều khiển Fuzzy-FVS-MPC ở phía DC. Cường độ bức xạ mặt trời được thiết lập từ 500W/m² tăng lên 1000W/m² tại thời điểm 0,2 giây trong thử nghiệm này.

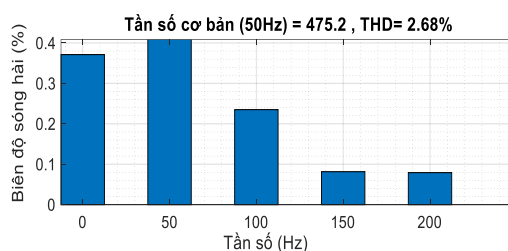


Hình 13. Dòng điện tức thời 3 pha và dòng điện hiệu dụng được bộ nghịch lưu đưa lên lưới

Quan sát trong giai đoạn xác lập, dòng điện ba pha đưa vào lưới có dạng hình sin gần lý tưởng. Kết quả phân tích phổ bằng FFT Analyzer (Hình 14) cho thấy dòng điện hòa lưới có chất lượng cao với chỉ số méo hài tổng rất thấp ($THD=2,68\%$) dưới ngưỡng giới hạn

6,5% của Bộ Công thương cho cấp điện áp trung áp và hạ áp [16].

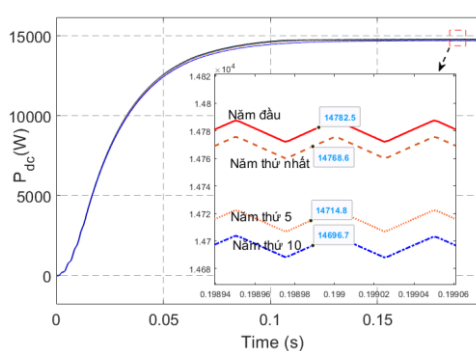
Kết quả này là sự kết hợp giữa thuật toán Fuzzy-FVS-MPC và vòng điều khiển dòng điện phía lưới trong việc triệt tiêu các thành phần sóng hài bậc cao. Nhờ khả năng giảm thiểu tối đa dao động điện áp trên tụ DC, dạng sóng dòng điện đầu ra được cải thiện đáng kể và tiệm cận đường hình sin lý tưởng. Sự cải thiện chất lượng điện năng này khắc phục được nhược điểm của thuật toán P&O, nơi mà dao động công suất quanh điểm MPP thường lan truyền sang phía DC, gây mất ổn định điện áp đầu vào nghịch lưu và làm gia tăng độ méo dạng dòng điện phát lưới.



Hình 14. Phân tích phổ dòng điện pha A cho thấy lượng sóng méo hài tổng thấp chỉ 2,68%

4.2.5. Kịch bản 5: Đánh giá tính bền vững của giải pháp đề xuất

Để kiểm chứng tính bền vững của thuật toán Fuzzy-FVS-MPC trước sự biến đổi tham số vật lý theo thời gian, nghiên cứu đã thiết lập các kịch bản mô phỏng lão hóa tương ứng với thời gian vận hành 1 năm, 5 năm và 10 năm. Hình 15 là đáp ứng công suất đầu ra của hệ thống tại các mốc thời gian này.



Hình 15. Công suất PV khi sử dụng Fuzzy-FVS-MPC dưới điều kiện sai lệch tham số mô hình do lão hóa

Trong các kịch bản này, điện trở nối tiếp R_s của PV được gia tăng theo mô hình suy hao thực tế ($\approx 0,28\%$ hiệu suất/năm)[19]. Trong khi tham số mô hình nội tại của bộ điều khiển được giữ nguyên để tạo ra sự sai lệch mô hình.

Phản phóng to trên đồ thị ở giai đoạn xác lập cho thấy rõ sự sụt giảm nhẹ về mức công suất do sự gia tăng tổn hao nội tại và sự dịch chuyển điểm làm việc tối ưu, tuy nhiên hệ thống vẫn duy trì trạng thái ổn định mà không xảy ra hiện tượng mất bám.

Bảng 3 tóm tắt dữ liệu mô phỏng quá trình lão hóa của giàn pin quang điện sau 1 năm, 5 năm và 10 năm cho thấy mối tương quan rõ rệt giữa sự thay đổi thông số vật lý và hiệu suất chuyển đổi năng lượng của bộ điều khiển MPC.

Theo bảng số liệu có thể thấy, hiệu suất bám công suất cực đại của bộ điều khiển Fuzzy-FVS-MPC giảm dần sau các năm theo độ lão hóa của PV. Sau 10 năm, điện trở nội thực tế của tấm pin tăng từ 0,2914Ω lên 0,4121Ω. Điều này dẫn đến việc điểm công suất cực đại dự báo bị lệch một khoảng nhỏ (0,6%) so với điểm cực đại thực tế của giàn pin đã lão hóa.

Bảng 3. Tổng hợp công suất vận hành của hệ thống PV tại các mốc thời gian lão hóa (1, 5 và 10 năm) khi dùng tấm pin Tata Power TP250MBZ

Mốc thời gian	Điện trở R_s (Ω)	Công suất của PV (W)	Công suất thu được (W)	Hiệu suất (%)
Năm 0	0,2914	14940,2	14782,5	98,9
Năm 1	0,3017	14897,7	14768,6	98,8
Năm 5	0,3465	14938,9	14714,8	98,5
Năm 10	0,4121	14950,9	14696,7	98,3

Đây là hạn chế của các phương pháp MPC, chất lượng điều khiển phụ thuộc vào độ chính xác của mô hình. Khi đối tượng điều khiển thay đổi mà mô hình không được cập nhật thì sai số tính sẽ xuất hiện. Sự sụt giảm nhỏ này mặc dù không ảnh hưởng quá nhiều đến hiệu quả của hệ thống nhưng hoàn toàn có thể được khắc phục trong thực tế bằng các phương pháp như: cập nhật lại tham số R_s trong phần mềm điều khiển sau mỗi 2-3 năm bảo trì hoặc tích hợp thêm các thuật toán như RLS (Recursive Least Squares) hoặc MRAS (Model Reference Adaptive System) để tự động ước lượng R_s theo thời gian thực.

5. Kết luận

Bài báo đã đề xuất và kiểm chứng giải pháp điều khiển dự báo mô hình tập điện áp hữu hạn tích hợp cơ chế bước nhảy thích nghi Fuzzy-FVS-MPC cho hệ thống pin mặt trời nổi lưới. Giải pháp này khắc phục được nhược điểm cố hữu về mâu thuẫn giữa tốc độ đáp ứng và độ chính xác của các thuật toán MPPT

truyền thống thông qua việc sử dụng bộ điều khiển logic mờ để giám sát và tinh chỉnh độ lớn bước dự báo theo thời gian thực.

Kết quả mô phỏng trên phần mềm MATLAB/Simulink đã cho thấy ưu điểm của giải pháp đề xuất trên ba khía cạnh chính: Giảm thời gian xác lập xuống dưới 0,1 giây; Cải thiện tốc độ đáp ứng khoảng 29% so với phương pháp P&O và nhanh hơn đáng kể so với FVS-MPC bước cố định; Loại bỏ hiện tượng trôi điểm làm việc trong điều kiện bức xạ tăng nhanh.

Hệ thống duy trì hiệu suất bám tĩnh đạt 98,9% với công suất ra tải ổn định, không dao động. Kết quả phân tích độ nhạy tham số cho thấy giải pháp đề xuất có khả năng chịu đựng tốt sự sai lệch mô hình do quá trình lão hóa thiết bị. Sau 10 năm vận hành giả định hệ thống vẫn duy trì hiệu suất chuyển đổi năng lượng trên 98,3%, chứng tỏ tính ổn định và độ tin cậy cao của bộ điều khiển.

Bên cạnh những ưu điểm, nghiên cứu cũng nhìn nhận một số hạn chế còn tồn tại của giải pháp. Mặc dù cơ chế thích nghi mờ đã cải thiện đáng kể tính bền vững, nhưng thuật toán MPC về bản chất vẫn phụ thuộc vào độ chính xác của các thông số vật lý đầu vào. Trong các điều kiện vận hành khắc nghiệt làm thay đổi tham số quá lớn (lớn hơn ngưỡng bù của FLC), sai số tính có thể gia tăng. Ngoài ra việc kết hợp hai khối thuật toán (Fuzzy Logic và MPC) làm gia tăng khối lượng tính toán trong mỗi chu kỳ lấy mẫu, đặt ra yêu cầu cao hơn về tốc độ xử lý của vi điều khiển so với phương pháp P&O đơn giản.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. A. Hassan, M. M. Adel, A. A. Saleh, M. B. Eteiba, and A. Farhan (2024), *Maximum Power Point Tracking Based on Finite Voltage-Set MPC for Grid-Connected Photovoltaic Systems Under Environmental Variations*, Sustainability, Vol.16, No.23, p. 10317.
DOI: 10.3390/su162310317.
- [2] B. Sangeetha, K. Manjunatha, P. T. Kumaran, A. Sheela, K. S. Yamuna, and S. Sivakumar (2024), *Performance Optimization in Photovoltaic Systems: A Review*, Archives of Computational Methods in Engineering, Vol.31, No.3, pp.1507-1518.
DOI: 10.1007/s11831-023-10023-0.
- [3] A. K. Podder, N. K. Roy, and H. R. Pota (2019), *MPPT methods for solar PV systems: A critical review based on tracking nature*, IET Renewable

- Power Generation, Vol.13, No.10, pp.1615-1632.
DOI: 10.1049/iet-rpg.2018.5946.
- [4] D. Sera, L. Mathe, T. Kerekes, S. V. Spataru, and R. Teodorescu (2013), *On the Perturb-and-Observe and Incremental Conductance MPPT Methods for PV Systems*, IEEE Journal of Photovoltaics, Vol.3, No.3, pp.1070-1078.
DOI: 10.1109/JPHOTOV.2013.2261118.
- [5] Soni, A. K., Jana, K. C., & Gupta, D. K. (2023), *Variable Step-size Adaptive Maximum Power Point Tracking Algorithm for Solar Cell Under Partial Shading Conditions*, IETE Journal of Research, 69(3), 1562-1577.
DOI: 10.1080/03772063.2020.1871425.
- [6] H. Abouadane et al. (2020), *Multiple-Power-Sample Based P&O MPPT for Fast-Changing Irradiance Conditions*, IEEE Journal of Photovoltaics, Vol.10, No.5, pp.1481-1488.
DOI: 10.1109/JPHOTOV.2020.3009781.
- [7] A. Dawahdeh, H. Sharadga, and S. Kumar (2024), *Novel MPPT Controller Augmented with Neural Network for Use with Photovoltaic Systems Experiencing Rapid Solar Radiation Changes, Sustainability*, Vol.16, No.3, p. 1021.
DOI: 10.3390/su16031021.
- [8] M. E. Haque and N. Mohammad (2024), *Design and Performance Analysis of Neural Network-Based MPPT in PV System with Energy Storage Management*, 2024 6th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT), pp.1378-1383.
DOI: 10.1109/iceeict62016.2024.10534419.
- [9] S. Vazquez et al. (2014), *Model Predictive Control: A Review of Its Applications in Power Electronics*, IEEE Industrial Electronics Magazine, Vol.8, No.1, pp.16-31.
DOI: 10.1109/MIE.2013.2290138.
- [10] A. O. Salau and G. K. Alitasb (2024), *MPPT efficiency enhancement of a grid connected solar PV system using finite control set model predictive controller*, Heliyon, Vol.10, No.1, p. e27663.
DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e27663.
- [11] M. Ahmed, I. Harbi, M. Abdelrahem, R. Kennel, and J. Rodriguez (2023), *Highly Efficient MPPT Technique Using Model Predictive Control*, 2023 IEEE International Conference on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE), Wuhan, China, pp.1-5.
DOI: 10.1109/PRECEDE57319.2023.10174406.
- [12] C.-H. Lin et al. (2023), *Finite Control Set Model Predictive Control (FCS-MPC) for Enhancing the Performance of a Single-Phase Inverter in a Renewable Energy System (RES)*, Mathematics, Vol.11, No.21, p. 4553.
DOI: 10.3390/math11214553.
- [13] Y. Liu, S. Li, Y. He and Q. Zhang (2024), *Improved Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Algorithm Integrating Intelligent Fuzzy Control with the Variable-Step-Size Method*, 2024 4th International Signal Processing, Communications and Engineering Management Conference (ISPCEM), Montreal, QC, Canada, pp.17-22.
DOI: 10.1109/ISPCEM64498.2024.00009.
- [14] K. Ullah, M. Ishaq, F. Tchie, H. Ahmad, Z. Ahmad (2023), *Fuzzy-based maximum power point tracking (MPPT) control system for photovoltaic power generation system*, Engineering, Vol.20.
- [15] S. Motahhir et al. (2020), *The Most Used MPPT Algorithms: Review and the Suitable Low-Cost Embedded Board for Each Algorithm*, Journal of Cleaner Production, Vol.246, p. 118983.
DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118983.
- [16] M. M. Adel, A. A. Saleh, M. A. Hassan, R. Kennel, and A. Farhan (2024), *Efficient Sensorless Speed Predictive Control Without Weighting Factors for PMSM Drive Based On MRAS Estimator*, Journal of Applied Science and Engineering, Vol.27, No.12, pp.3697-3710.
DOI: 10.6180/jase.202412_27(12).0010.
- [17] F. Wang, A. TuluHong, B. Luo, A. Abudureyimu (2025), *Control Methods and AI Application for Grid-Connected PV Inverter: A Review*, Technologies, Vol.13, Issue 11.
DOI: 10.3390/technologies13110535.
- [18] Bộ Công Thương (2015), *Quy định hệ thống điện phân phối*, Thông tư số 39/2015/TT-BCT, Hà Nội, Việt Nam.
- [19] Tata Power Solar Systems Ltd. (2015), *Technical Datasheet: TP250 Series - 60 Cell Multicrystalline Solar Photovoltaic Modules*, Bangalore, India, 2015. [Online]. Available: <https://sunpowersystems.in/productfiles/Tata%20Power%20Solar.pdf>

Ngày nhận bài:	17/04/2026
Ngày nhận bản sửa:	28/05/2026
Ngày duyệt đăng:	29/05/2026