

THIẾT KẾ VÀ HOÀN THIỆN HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI ỨNG DỤNG THUẬT TOÁN ĐIỆN DẪN GIA TĂNG (INC) TRÊN NỀN TẢNG ARDUINO

Nguyễn Thị Ngọc Thảo¹, Võ Văn Ân^{2*}

¹Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Bình Dương

²Trường Đại học Thủ Dầu Một

*Email: anvv@tdmu.edu.vn

Ngày nhận bài: 19/5/2025; Ngày nhận bài sửa: 12/6/2025; Ngày chấp nhận đăng: 11/7/2025

TÓM TẮT

Bài báo trình bày quá trình thiết kế và triển khai một hệ thống điều khiển năng lượng mặt trời tích hợp thuật toán theo dõi điểm công suất cực đại MPPT (Maximum Power Point Tracking), sử dụng phương pháp điện dẫn gia tăng INC (Incremental Conductance). Hệ thống bao gồm phần cứng sử dụng vi điều khiển Arduino, cảm biến dòng ACS712, mạch điều khiển MOSFET và màn hình LCD, cùng phần mềm mô phỏng trên MATLAB/Simulink. Mô hình được đánh giá trong ba điều kiện bức xạ ánh sáng và tải điện khác nhau nhằm kiểm chứng khả năng thích nghi và ổn định của hệ thống. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy hệ thống đạt hiệu suất chuyển đổi cao (trên 88%) và phản ứng nhanh trước các biến động môi trường, minh chứng cho tính ổn định và khả năng ứng dụng thực tiễn của thuật toán INC. Ngoài ra, thuật toán INC thể hiện ưu thế vượt trội so với các phương pháp MPPT truyền thống như P&O (Perturb and Observe) trong việc giảm dao động công suất, thời gian hội tụ nhanh hơn và nâng cao độ chính xác khi xác định điểm MPP phù hợp cho các ứng dụng năng lượng tái tạo quy mô nhỏ.

Từ khóa: Maximum power point tracking (MPPT), incremental conductance (INC), ACS712, maximum power point (MPP), pin mặt trời.

1. MỞ ĐẦU

Trong bối cảnh nhu cầu năng lượng toàn cầu ngày càng gia tăng cùng với những thách thức về biến đổi khí hậu và ô nhiễm môi trường, các nguồn năng lượng tái tạo như năng lượng mặt trời đang ngày càng được quan tâm và đầu tư phát triển. Năng lượng mặt trời có ưu điểm nổi bật là sạch, không gây phát thải khí nhà kính và có khả năng khai thác lâu dài, đặc biệt phù hợp với điều kiện khí hậu tại nhiều quốc gia có cường độ bức xạ cao quanh năm. Tuy nhiên, hiệu suất chuyển đổi năng lượng từ bức xạ mặt trời thành điện năng vẫn còn nhiều hạn chế do sự biến thiên không ổn định của điều kiện môi trường như ánh sáng và nhiệt độ. Để khắc phục vấn đề này, các kỹ thuật theo dõi điểm công suất cực đại MPPT đã được phát triển nhằm tối ưu hóa công suất đầu ra của tấm pin mặt trời.

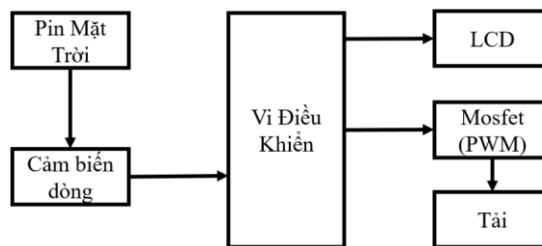
Một số nghiên cứu tiêu biểu từ giai đoạn gần đây [1-7] liên quan đến triển khai thuật toán MPPT và điều khiển hệ thống năng lượng mặt trời. Trong [1], Bài báo trình bày tổng quan các phương pháp điều khiển MPPT trong hệ PV, với thực nghiệm trên bốn thuật toán tích hợp bộ biến đổi boost. Mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) tạo tham chiếu công suất cực đại theo bức xạ và nhiệt độ, hỗ trợ điều khiển SMC (sliding mode controller), FLC (fuzzy logic controller) và MPC (model predictive control). Kết quả cho thấy mỗi phương pháp có ưu nhược điểm riêng tùy theo điều kiện phần cứng và phần mềm. Nghiên cứu [2], tác giả đề xuất một thuật toán MPPT cải tiến, trong đó bước điều khiển được điều chỉnh linh hoạt theo độ dốc của đặc tuyến công suất-điện áp (P-V) nhằm xác định chu kỳ xung tối ưu. Thuật toán kết hợp phương pháp Incremental Conductance với logic mờ, giúp cải thiện hiệu suất thu năng lượng và giảm dao động quanh điểm công suất cực đại. Kết quả mô phỏng xác nhận tính hiệu quả của phương pháp đề xuất. Trong [3], tác giả đề xuất thiết kế bộ điều khiển sạc năng lượng mặt trời chi phí thấp sử dụng Arduino Nano và cảm biến tiêu chuẩn. Hệ thống gồm tấm pin mặt trời, bộ chuyển đổi DC-DC, pin lưu trữ và mạch MPPT. Thuật toán MPPT điều chỉnh chu kỳ xung theo tải nhằm tối ưu công

suất. Kết quả cho thấy hệ thống điều khiển hiệu quả, duy trì hoạt động gần điểm công suất cực đại. Nghiên cứu [4], tác giả đề xuất phương pháp MPPT mới kết hợp mạng nơ-ron nhân tạo và thuật toán quét nhằm xác định điểm công suất cực đại toàn cục trong điều kiện chiếu sáng không đồng đều. Mô hình được mô phỏng trong Matlab/Simulink và so sánh với các thuật toán PO&GS (perturb and observe and global scanning) và FLE (fuzzy logic estimator), cho thấy phương pháp đề xuất đạt hiệu suất cao và thời gian đáp ứng nhanh trong việc theo dõi MPP. Trong nghiên cứu [5], tác giả đề xuất bộ điều khiển sạc năng lượng mặt trời sử dụng Arduino tích hợp thuật toán MPPT, hướng đến nâng cao hiệu suất cho hệ thống PV công suất lớn. Mạch sử dụng LM7815 và transistor 2SC5200 để điều khiển áp và dòng, hỗ trợ tải đến 60A. Hệ thống có chi phí thấp, phù hợp cho ứng dụng độc lập, và cho thấy hiệu suất cao cùng độ tin cậy qua thực nghiệm. Nghiên cứu [6], bài báo giới thiệu thuật toán MPPT P&O cải thiện hiệu suất hệ thống PV. Vi điều khiển ATMEGA328 điều khiển PWM qua bộ Buck-Boost để giữ điện áp đầu ra ổn định. Giải pháp chi phí thấp, tối ưu chuyển đổi DC-AC cho thiết bị gia dụng. Trong [7], tác giả đã tổng quan các kỹ thuật MPPT trong hệ thống quang điện đến năm 2012, phân loại dựa trên biến điều khiển, chiến lược và cấu trúc mạch. Nghiên cứu nhằm hỗ trợ lựa chọn phương pháp phù hợp, cung cấp tài liệu tham khảo toàn diện cho ứng dụng và phát triển MPPT trong tương lai. Các nghiên cứu này đều có chung một mục đích là hướng đến cải thiện khả năng theo dõi điểm công suất cực đại trong các điều kiện hoạt động biến đổi, bao gồm sự thay đổi tải và chiếu sáng không đồng đều, thông qua việc kết hợp các phương pháp điều khiển truyền thống với các kỹ thuật tiên tiến như logic mờ, mạng nơ-ron nhân tạo và biến đổi bước điều khiển. Ngoài ra, các nghiên cứu đều chú trọng phát triển các giải pháp điều khiển chi phí thấp, dễ triển khai thực nghiệm trên nền tảng vi điều khiển phổ biến như Arduino hoặc ATMEGA, đồng thời đảm bảo tính ổn định và hiệu quả trong thực tế.

Bài báo tập trung thiết kế mô hình và triển khai thuật toán MPPT sử dụng phương pháp INC trong điều khiển năng lượng mặt trời bao gồm phần cứng thực nghiệm và phần mềm mô phỏng. Phần mềm được xây dựng trong môi trường MATLAB/Simulink với mục tiêu đánh giá khả năng theo dõi điểm công suất cực đại trong các điều kiện chiếu sáng và tải thay đổi. Phần cứng được triển khai trên nền tảng vi điều khiển Arduino, tích hợp với cảm biến dòng ACS712, mạch điều khiển MOSFET và màn hình LCD để hiển thị thực hóa việc đo lường, tính toán và điều khiển công suất theo thời gian thực. Cấu trúc bài báo gồm 4 phần: phần 1 - đặt vấn đề. Phần 2 - xây dựng và mô phỏng hệ thống điều khiển năng lượng mặt trời trên Matlab/Simulink. Phần 3 - trình bày mô hình phần cứng và đánh giá hoạt động của hệ thống điều khiển năng lượng mặt trời. Cuối cùng là phần kết luận và tài liệu tham khảo.

2. THIẾT KẾ VÀ MÔ PHỎNG HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN NĂNG LƯỢNG ĐIỆN MẶT TRỜI

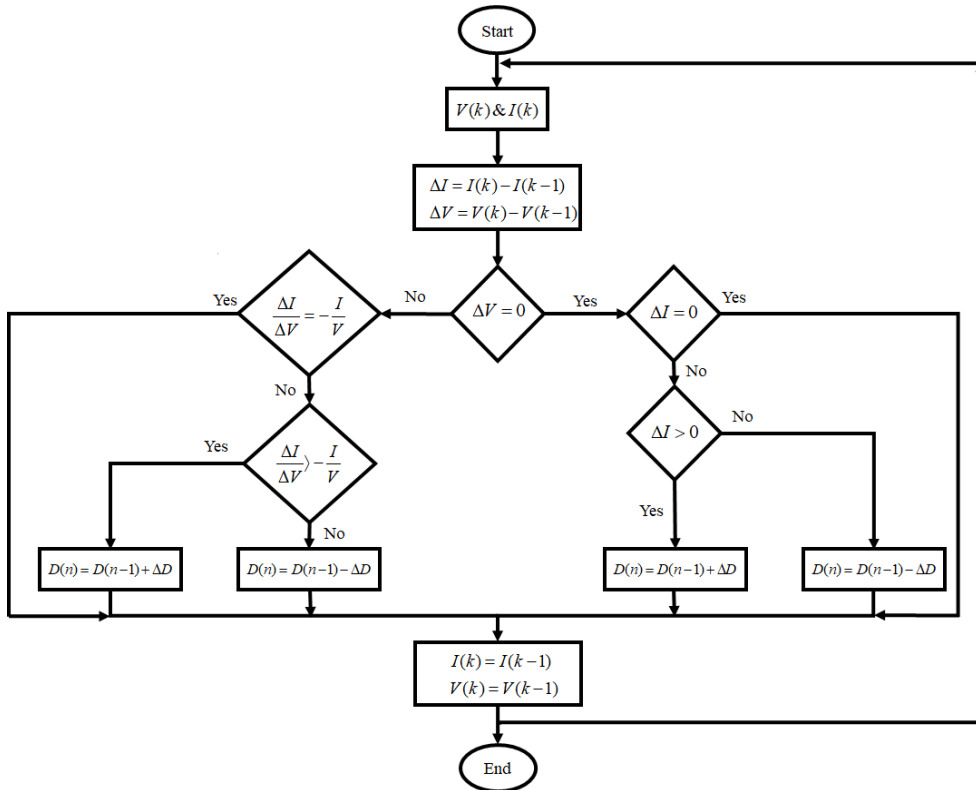
2.1. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển năng lượng điện mặt trời



Hình 1. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển năng lượng điện mặt trời

Hình 1 trình bày sơ đồ khối của một hệ thống điều khiển dòng điện sử dụng nguồn năng lượng từ pin mặt trời, tích hợp cảm biến dòng và vi điều khiển để giám sát và điều chỉnh công suất cung cấp cho tải. Nguồn điện một chiều được tạo ra từ tấm pin mặt trời sẽ đi qua cảm biến dòng và giá trị đo dòng điện sẽ được gửi về vi điều khiển. Vi điều khiển sẽ thu thập giá trị đo, xử lý và điều khiển một transistor công suất MOSFET thông qua kỹ thuật điều chế độ rộng xung PWM (Pulse Width Modulation), cho phép điều chỉnh công suất cung cấp đến tải theo thời gian thực. Bên cạnh đó, vi điều khiển cũng truyền dữ liệu hiển thị đến màn hình LCD nhằm cung cấp thông tin trạng thái hoạt động của hệ thống. Kiến trúc điều khiển vòng kín này không chỉ đảm bảo khả năng giám sát và phản hồi linh hoạt mà còn là nền tảng phù hợp cho việc tích hợp các thuật toán điều khiển tiên tiến như MPPT, góp phần nâng cao hiệu suất chuyển đổi và khai thác tối đa năng lượng từ bức xạ mặt trời.

2.2. Thuật toán dẫn điện gia tăng (INC)



Hình 2. Lưu đồ thuật toán điện dẫn gia tăng (INC)

Hình 2 mô tả sơ đồ thuật toán INC sau khi được hiệu chỉnh để cải thiện độ chính xác trong việc xác định vị trí MPP và ổn định hệ thống trong điều kiện thay đổi bức xạ mặt trời hoặc nhiệt độ môi trường [8].

Thuật toán bắt đầu bằng việc lấy mẫu điện áp và dòng điện tức thời của mô-đun PV tại thời điểm hiện tại, ký hiệu là $V(k)$ và $I(k)$. Sau đó tính toán sự thay đổi của dòng điện và điện áp được trình bày như sau:

$$\begin{aligned} \Delta I &= I(k) - I(k-1) \\ \Delta V &= V(k) - V(k-1) \end{aligned} \quad (1)$$

Trong đó: ΔI là biến thiên dòng điện, $I(k)$ là dòng điện tại thời điểm hiện tại (chu kỳ hiện tại) và $I(k-1)$ là dòng điện tại thời điểm trước đó (chu kỳ trước). ΔV là biến thiên điện áp, $V(k)$ là điện áp tại thời điểm hiện tại và $V(k-1)$ là điện áp tại chu kỳ trước.

Việc xác định MPP được thực hiện thông qua phân tích đạo hàm gần đúng của công suất theo điện áp, bằng cách so sánh dẫn suất gia tăng $\frac{\Delta I}{\Delta V}$ với đạo hàm tức thời $-\frac{I}{V}$ và được so sánh qua ba trường hợp sau [9]:

Trường hợp 1: $\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$ thì hệ thống đang hoạt động tại điểm công suất cực đại, do đó không cần thay đổi tín hiệu điều khiển.

Trường hợp 2: Nếu $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$ thì hệ thống đang hoạt động bên trái MPP trên đường đặc tuyến công suất, cần tăng chu kỳ xung D để giảm điện áp và tiến về MPP.

Trường hợp 3: Ngược lại, nếu $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$ thì hệ thống nằm bên phải MPP, cần giảm chu kỳ xung D để tăng điện áp và đạt MPP.

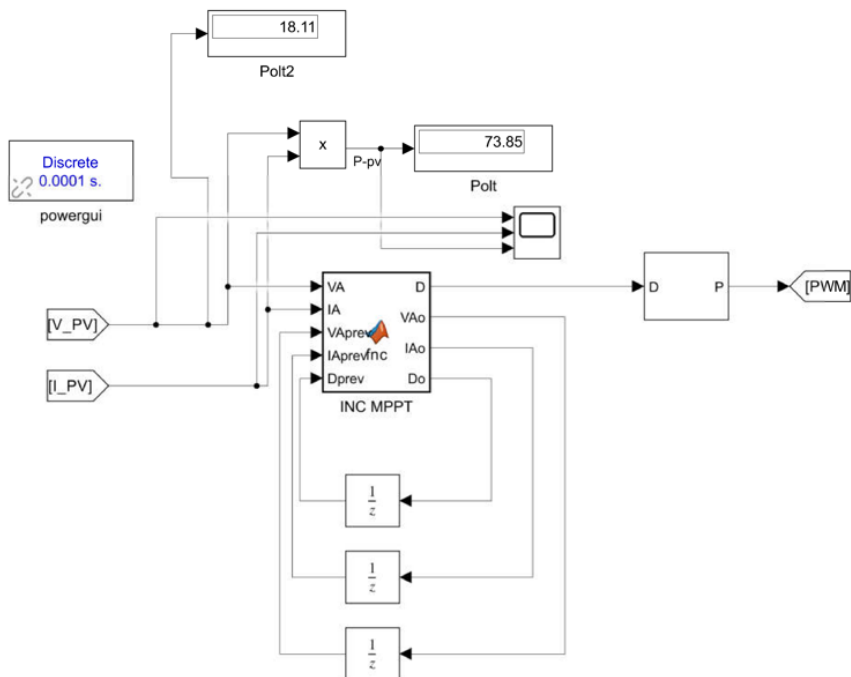
Trong trường hợp $\Delta V = 0$, tức điện áp không thay đổi, thuật toán xét tiếp đến biến thiên dòng điện ΔI để đưa ra quyết định. Nếu $\Delta I = 0$, không cần điều chỉnh vì hệ thống đang ở MPP. Nếu $\Delta I > 0$, thuật toán sẽ tăng chu kỳ xung; nếu $\Delta I < 0$, chu kỳ xung sẽ bị giảm. Nhờ vào các điều kiện phân nhánh chặt chẽ này, thuật toán IncCond có thể điều chỉnh điểm làm việc của hệ thống về MPP một cách ổn định và chính xác hơn so với các phương pháp truyền thống như P&O [10]. Sau khi quyết định thay đổi chu kỳ xung $D(n) = D(n-1) \pm \Delta D$, hệ thống cập nhật lại giá trị điện áp và dòng điện hiện tại để phục vụ cho chu kỳ điều khiển tiếp theo. Lưu đồ giải thuật điều khiển trong Hình 2 không chỉ đảm bảo theo dõi chính xác điểm MPP mà còn có khả năng phản ứng nhanh với sự thay đổi nhanh chóng của điều kiện môi trường, đồng thời giảm hiện tượng dao động quanh MPP khi hệ thống đã đạt trạng thái ổn định.

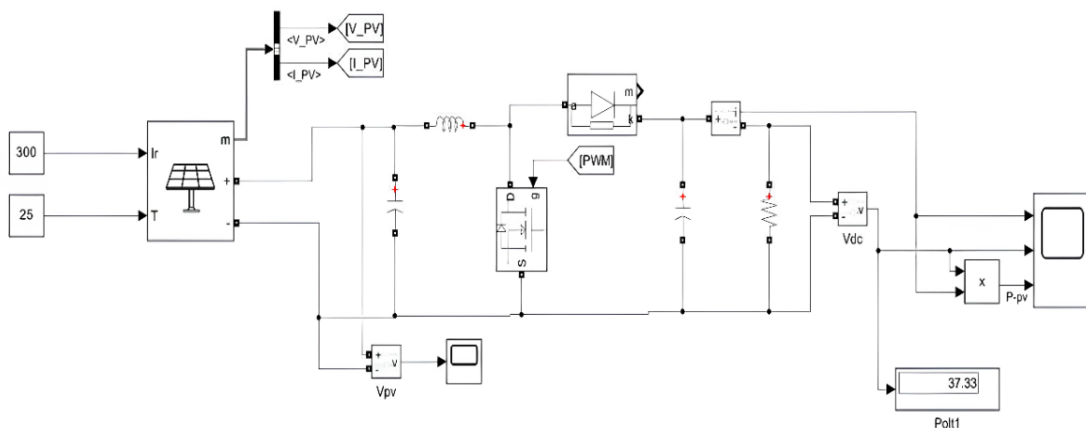
2.3. Mô phỏng hệ thống năng lượng điện mặt trời trên Simulink/Matlab

Để mô phỏng và đánh giá hiệu quả hoạt động của hệ thống điều khiển dòng từ pin mặt trời. Mô hình mô phỏng được xây dựng và triển khai trên nền tảng MATLAB/Simulink với các thông số pin mặt trời như trong Bảng 1 và nhiệt độ tiêu chuẩn là 25 °C.

Bảng 1. Thông số mô phỏng hệ thống

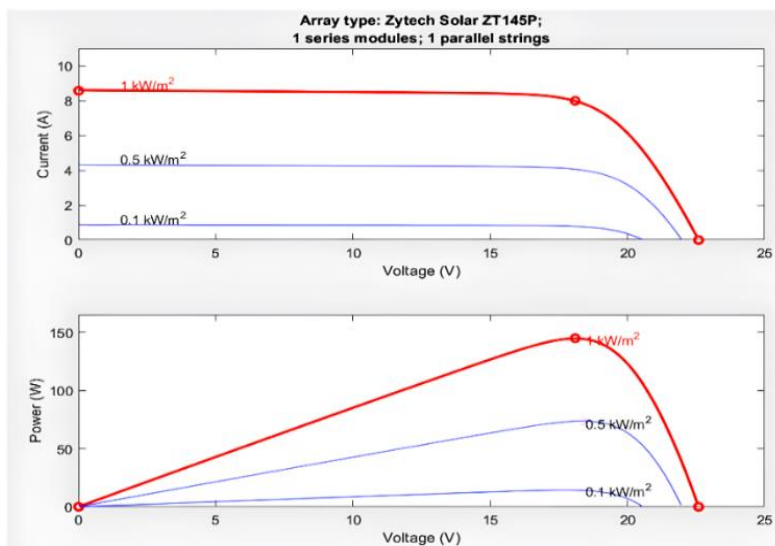
Tấm pin Zytech Solar ZT145P	
Số lượng ghép nối tiếp	1 module
Số lượng ghép song song	1 chuỗi
Công suất tại MPP	144,8 W
Điện áp tại MPP	18,1 V
Dòng tại MPP	8 A
Điện áp hở mạch V_{OC}	22,6 V
Dòng điện ngắn mạch I_{SC}	8,58





Hình 3. Mô hình pin năng lượng mặt trời sử dụng thuật toán INC

Hình 3 mô tả mô hình mô phỏng hệ thống điều khiển thu năng lượng từ pin mặt trời trên nền tảng MATLAB/Simulink, sử dụng thuật toán MPPT theo phương pháp Incremental Conductance (INC) để tối ưu hóa công suất. Hệ thống gồm các khối đo điện áp, dòng điện, thuật toán MPPT, bộ tạo xung PWM và bộ biến đổi DC-DC. Thuật toán INC điều chỉnh tín hiệu PWM nhằm điều khiển MOSFET, giúp hệ thống duy trì hoạt động tại điểm công suất cực đại. Mô hình cho phép đánh giá hiệu quả điều khiển trong các điều kiện môi trường thay đổi.

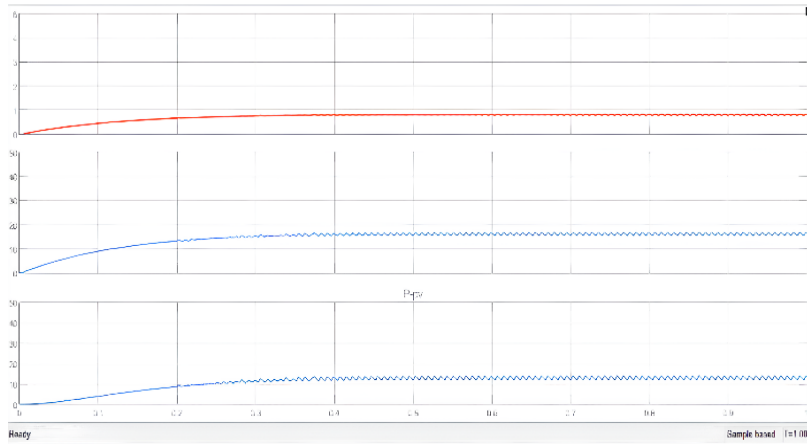


Hình 4. Đặc tuyến đáp ứng của pin mặt trời

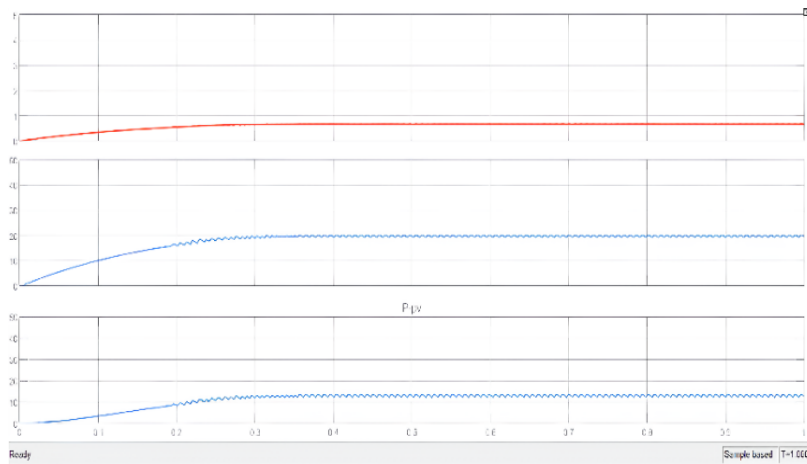
Hình 4 mô tả đặc tính công suất của tấm pin mặt trời Zytech Solar ZT145P dưới ba mức bức xạ khác nhau. Cụ thể, đường cong màu đỏ tương ứng với mức bức xạ cao nhất (1 kW/m^2), cho thấy công suất cực đại đạt xấp xỉ $144,8 \text{ W}$. Đường cong màu xanh phía trên biểu thị công suất giảm xuống khoảng 50% khi cường độ bức xạ giảm, trong khi đường cong màu xanh phía dưới cho thấy công suất rất thấp ứng với điều kiện bức xạ yếu. Dựa vào các đặc tính, có thể nhận thấy rằng khi bức xạ mặt trời giảm, dòng điện và công suất phát giảm đáng kể, trong khi điện áp hở mạch V_{OC} chỉ thay đổi không đáng kể. Do đó, công suất tối đa mà pin mặt trời có thể cung cấp phụ thuộc chủ yếu vào mức bức xạ, và đạt giá trị lớn nhất khi bức xạ ở mức cao nhất.

Hệ thống điều khiển thu năng lượng mặt trời, được tích hợp thuật toán MPPT sử dụng phương pháp INC, được mô phỏng trong ba kịch bản khác nhau với các điều kiện bức xạ (I_r) và giá trị tải thay đổi. Các kết quả được thể hiện qua các đồ thị dòng điện, điện áp và công suất tại đầu ra tải.

Trường hợp 1: Bức xạ $I_r = 100 \text{ W/m}^2$



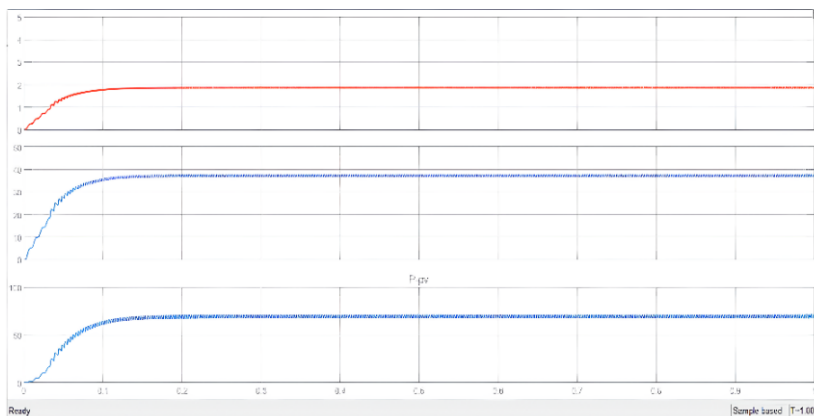
Hình 5. Đáp ứng của hệ thống với bức xạ $I_r = 100 \text{ W / m}^2$ với tải 20Ω



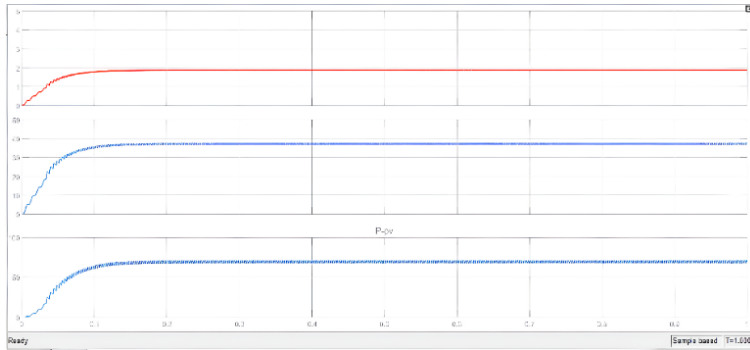
Hình 6. Đáp ứng của hệ thống với bức xạ $I_r = 100 \text{ W / m}^2$ với tải 30Ω

Đáp ứng ngõ ra ở Hình 5 và Hình 6 cho thấy ở mức bức xạ thấp ($I_r = 100 \text{ W / m}^2$) dòng điện đầu ra thấp và công suất thu được cũng hạn chế. Khi giá trị tải được thay đổi từ 20Ω lên 30Ω , hệ thống điều khiển tự động điều chỉnh điện áp đầu ra để đảm bảo công suất thu được vẫn tiệm cận điểm cực đại trong điều kiện giới hạn về bức xạ. Điều này thể hiện khả năng thích ứng của thuật toán MPPT trong điều kiện ánh sáng yếu.

Trường hợp 2: Bức xạ $I_r = 500 \text{ W / m}^2$



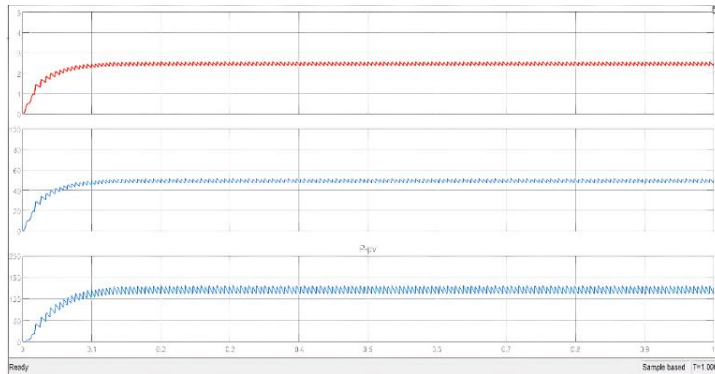
Hình 7. Đáp ứng của hệ thống với bức xạ $I_r = 500 \text{ W / m}^2$ với tải 20Ω



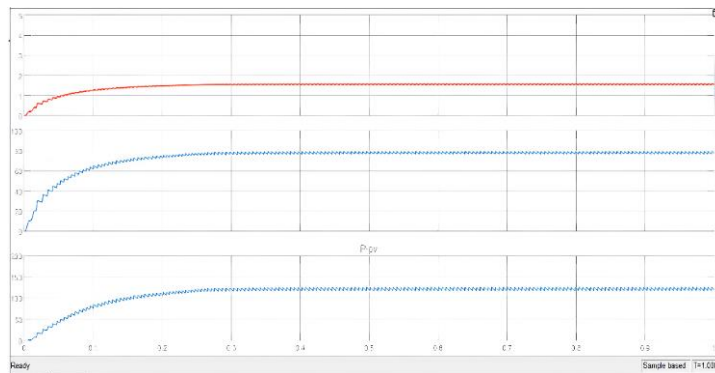
Hình 8. Đáp ứng của hệ thống với bức xạ $I_r = 500 \text{ W / m}^2$ với tải 50Ω

Tại mức bức xạ trung bình ($I_r = 500 \text{ W/m}^2$), các đáp ứng cho thấy công suất đầu ra tăng rõ rệt (Hình 7 và Hình 8). Khi giá trị tải được thay đổi từ 20Ω lên 50Ω , thuật toán MPPT vẫn đảm bảo rằng điện áp đầu ra được điều chỉnh phù hợp để duy trì hoạt động gần điểm công suất cực đại (MPP). Điều này cho thấy hiệu quả điều khiển ổn định của bộ điều chỉnh DC-DC dưới ảnh hưởng của thay đổi tải và điều kiện môi trường.

Trường hợp 3: Bức xạ $I_r = 1000 \text{ W / m}^2$



Hình 9. Đáp ứng của hệ thống với bức xạ $I_r = 1000 \text{ W / m}^2$ với tải 20Ω



Hình 10. Đáp ứng của hệ thống với bức xạ $I_r = 1000 \text{ W / m}^2$ với tải 50Ω

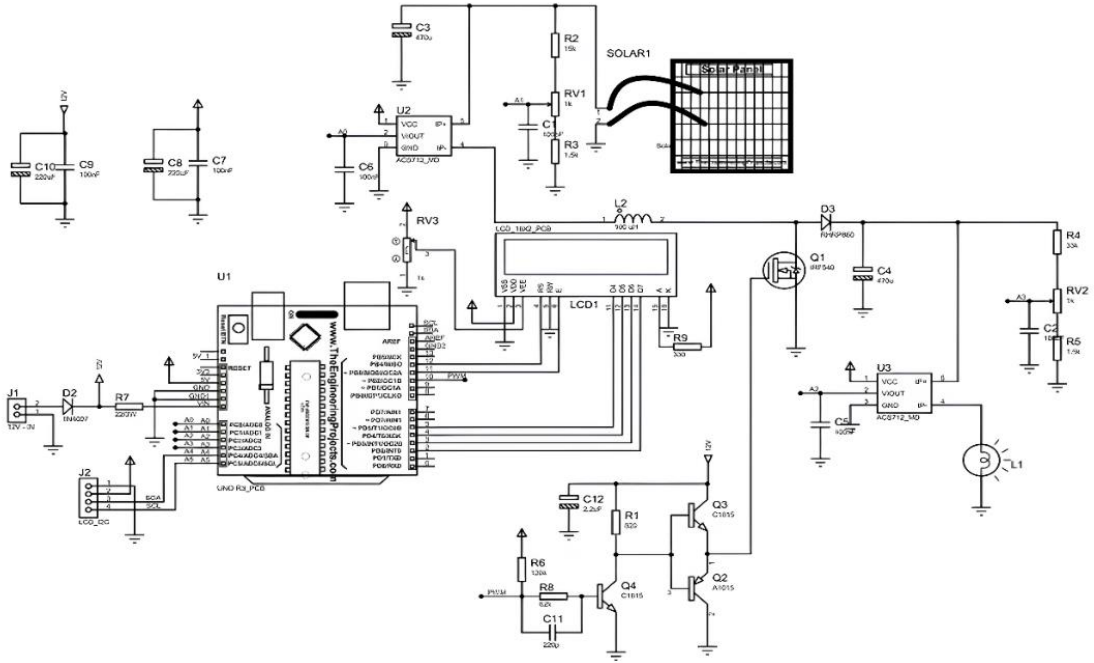
Ở mức bức xạ cao nhất ($I_r = 1000 \text{ W/m}^2$), đáp ứng ngõ ra cho thấy hệ thống đạt công suất cực đại gần với thông số định mức của tấm pin Zytech ZT145P ($\sim 145 \text{ W}$) (Hình 9 và Hình 10). Sự thay đổi tải không làm suy giảm đáng kể công suất đầu ra, cho thấy khả năng phản ứng nhanh và ổn định của thuật toán MPPT INC trong việc theo dõi và duy trì MPP.

Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống điều khiển pin năng lượng mặt trời sử dụng thuật toán MPPT theo phương pháp gia tăng nhiễu có khả năng thích nghi hiệu quả trước sự thay đổi của cường độ bức

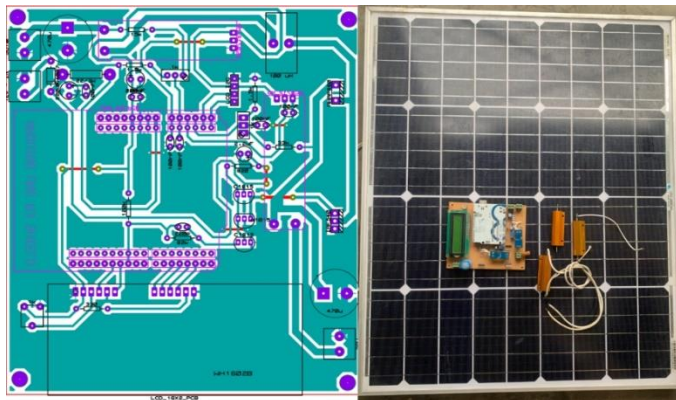
xạ mặt trời và tải điện. Trong các trường hợp khảo sát, điện áp đầu ra được điều chỉnh chủ động nhằm duy trì hoạt động gần điểm công suất cực đại, thể hiện độ chính xác và tính ổn định cao của thuật toán INC trong việc tối ưu hóa công suất thu từ tấm pin. Công suất mô phỏng thu được có độ tương đồng cao với đặc tính lý thuyết của tấm pin Zytech ZT145P, khẳng định độ tin cậy của mô hình và tính khả thi trong ứng dụng thực tế. Phân tích đáp ứng hệ thống cho thấy khả năng duy trì ổn định ở các mức bức xạ khác nhau mà không gây ra hiện tượng vượt mức đáng kể. Tuy nhiên, tại các thời điểm chuyển tiếp như khi tải thay đổi đột ngột, xuất hiện dao động nhỏ quanh MPP do hiện tượng "hunting", bắt nguồn từ giới hạn độ phân giải ADC và sai số đo, ảnh hưởng đến độ ổn định của điều khiển PWM

3. HOÀN THIỆN MÔ HÌNH VÀ ĐÁNH GIÁ HOẠT ĐỘNG HỆ THỐNG

3.1. Hoàn thiện mô hình



Hình 11. Sơ đồ nguyên lý của hệ thống điều khiển pin mặt trời



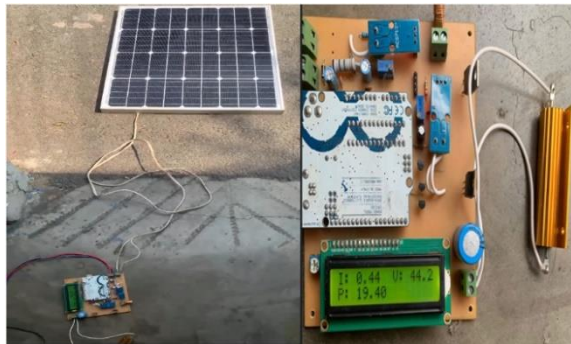
Hình 12. Mạch in và mô hình phần cứng của hệ thống điều khiển pin mặt trời

Hệ thống điều khiển pin năng lượng mặt trời được mô tả trong Hình 11 sử dụng Arduino làm bộ xử lý trung tâm, thu thập tín hiệu dòng và áp từ cảm biến ACS712 và bộ chia điện áp để tính công suất tiêu thụ. Arduino thực hiện điều khiển công suất theo thời gian thực thông qua tín hiệu PWM điều khiển MOSFET (Q1), điều chỉnh năng lượng cấp cho tải. Màn hình LCD hiển thị điện áp, dòng điện và công suất tức thời phục vụ giám sát. Hiệu suất điều khiển phụ thuộc đáng kể vào độ chính xác của cảm biến

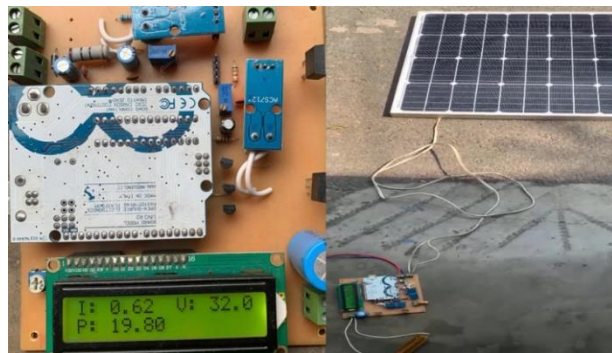
và độ phân giải ADC. Cảm biến ACS712 chịu ảnh hưởng của nhiễu điện từ và nhiệt độ, trong khi ADC 10-bit của Arduino (độ phân giải $\sim 4,9$ mV/bit) hạn chế khả năng đo tín hiệu nhỏ, làm giảm độ chính xác của thuật toán MPPT INC và có thể gây dao động quanh điểm công suất cực đại. Hình 12 trình bày thiết kế mạch in và mô hình phần cứng của hệ thống điều khiển pin mặt trời.

3.2. Kết quả hoạt động mô hình

Hình 13 và 14 trình bày kết quả thực nghiệm của hệ thống thu và điều khiển công suất năng lượng mặt trời trên nền tảng phần cứng thực tế. Quan sát thực nghiệm cho thấy hệ thống phản hồi tốt với sự thay đổi của cường độ bức xạ mặt trời, khi điện áp và dòng điện thay đổi, mạch điều khiển tự động điều chỉnh độ rộng xung PWM để duy trì công suất đầu ra gần điểm tối ưu. Kết quả thực nghiệm nhất quán với mô phỏng trong MATLAB/Simulink, khẳng định tính khả thi và hiệu quả của mô hình trong ứng dụng thực tế cho các hệ thống năng lượng tái tạo quy mô nhỏ. Bảng 2 trình bày so sánh kết quả thực nghiệm ở cùng 1 cường độ sáng (do điều kiện thực nghiệm không có máy đo cường độ sáng).



Hình 13. Hệ thống chạy thực nghiệm với mô hình phần cứng



Hình 14. Một số hoạt động thực nghiệm mô hình

Bảng 2. So sánh kết quả thực nghiệm cùng 1 cường độ sáng

STT	Điện trở tải (Ω)	Điện áp (V)	Dòng điện (A)	Công suất thực nghiệm (W)	Công suất MPP lý thuyết (W)	Hiệu suất (%)	PWM Duty Cycle (%)
1	25 Ω	25,5	0,81	20,6	22,0	93,6	75
2	50 Ω	32,0	0,62	19,8	22,0	90,0	68
3	100 Ω	44,2	0,44	19,4	22,0	88,2	62

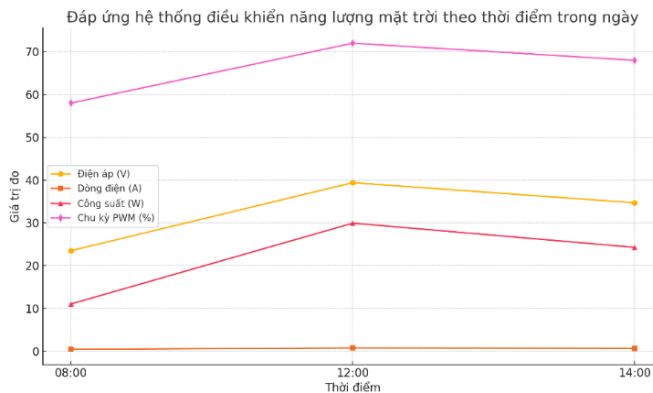
Bảng 2 trình bày kết quả thực nghiệm hệ thống điều khiển công suất từ nguồn năng lượng mặt trời trong điều kiện chiếu sáng không đổi với ba giá trị điện trở tải khác nhau (25 Ω , 50 Ω và 100 Ω). Các thông số điện áp, dòng điện và công suất đầu ra được đo lường và so sánh với công suất lý thuyết tại điểm công suất cực đại (MPP). Kết quả cho thấy công suất thực nghiệm dao động trong khoảng 19,4 W đến 20,6 W, đạt hiệu suất cao từ 88,2% đến 93,6% so với công suất MPP lý thuyết (22 W), phản ánh khả năng điều chỉnh hiệu quả của thuật toán điều khiển tích hợp. Bên cạnh đó, tín hiệu điều khiển PWM từ vi điều khiển Arduino thay đổi tương ứng với từng giá trị tải, với độ rộng xung giảm dần từ 75%

xuống 62% khi điện trở tải tăng. Sự thay đổi này thể hiện phản ứng thích nghi của hệ thống nhằm duy trì mức công suất tối ưu tại đầu ra. Nhìn chung, các kết quả thực nghiệm cho thấy tính ổn định và hiệu quả của hệ thống trong việc theo dõi và khai thác công suất cực đại từ pin mặt trời, đồng thời khẳng định khả năng triển khai thực tế cho các ứng dụng năng lượng tái tạo quy mô nhỏ.

Để đánh giá khả năng phản ứng động của hệ thống điều khiển trong điều kiện chiếu sáng thay đổi nhanh, một thí nghiệm thực tế được tiến hành trong 12 giờ, tại ba thời điểm có mức bức xạ đặc trưng trong ngày: 08 giờ sáng (ánh sáng yếu), 12 giờ trưa (bức xạ cực đại), và 14 giờ chiều (ánh sáng giảm dần). Tại mỗi thời điểm, điện trở tải được giữ cố định ở mức 50 Ω nhằm loại trừ ảnh hưởng của biến thiên tải, và các thông số điện áp, dòng điện, công suất đầu ra và chu kỳ PWM được ghi nhận. Kết quả cho thấy hệ thống đạt công suất thấp nhất vào lúc 08 giờ sáng với 11,05 W, phản ánh đúng điều kiện bức xạ yếu; trong khi tại thời điểm 12 giờ trưa, công suất đạt 29,94 W, tiệm cận hoặc vượt mức công suất cực đại lý thuyết (22 W) do ánh sáng ngoài trời đạt đỉnh và nhiệt độ tấm pin có thể đã tăng, làm giảm nội trở. Tại 14 giờ chiều, công suất giảm nhẹ xuống còn 24,29 W, phản ánh sự suy giảm cường độ chiếu sáng cuối buổi trưa. Chu kỳ PWM được điều chỉnh linh hoạt trong dải từ 58% đến 72%, phù hợp với công suất và dòng điện đầu ra tại từng thời điểm. Hệ thống phản hồi nhanh, đặc biệt tại thời điểm 12 giờ trưa, với thời gian điều chỉnh ổn định <1 giây, trong khi thời gian phản ứng vào buổi sáng là 1–2 giây do mức tín hiệu đầu vào thấp hơn. Không xuất hiện dao động lớn quanh điểm công suất cực đại, cho thấy thuật toán Incremental Conductance (INC) đã phát huy hiệu quả trong việc điều chỉnh điểm làm việc theo thời gian thực. Các kết quả thí nghiệm cho thấy tính ổn định, độ chính xác và khả năng phản ứng nhanh của hệ thống khi hoạt động trong điều kiện môi trường biến đổi nhanh, qua đó nâng cao tính thực tiễn và độ tin cậy của mô hình điều khiển năng lượng mặt trời sử dụng thuật toán INC. Bảng 3 và Hình 15 trình bày kết quả đo thực nghiệm hệ thống điều khiển năng lượng mặt trời tại ba thời điểm điển hình trong ngày với tải cố định.

Bảng 3. So sánh kết quả đo thực nghiệm hệ thống điều khiển năng lượng mặt trời tại ba thời điểm điển hình trong ngày với tải cố định

Thời điểm	Cường độ bức xạ	Điện trở tải (Ω)	Điện áp (V)	Dòng điện (A)	Công suất (W)	PWM duty cycle (%)	Ghi chú phản ứng hệ thống
8:00	Thấp	50	23,5	0,47	11,05	58	Hệ thống phản ứng chậm nhẹ, ổn định sau ~1–2 s
12:00	Cao	50	39,4	0,76	29,94	72	Phản ứng rất nhanh, công suất đạt gần cực đại
14:00	Trung bình	50	34,7	0,70	24,29	68	Phản ứng ổn định, giảm công suất nhẹ theo bức xạ



Hình 15. Đáp ứng hệ thống điều khiển năng lượng mặt trời tại ba thời điểm trong ngày (08:00, 12:00, 14:00) với tải cố định

Để đánh giá hiệu quả thuật toán MPPT sử dụng phương pháp điện dẫn gia tăng (INC) so với phương pháp truyền thống P&O, bảng so sánh được xây dựng dựa trên kết quả thực nghiệm trong nghiên cứu này và các nghiên cứu nổi bật từ năm 2007 đến năm 2016 [6], [7], [8], theo ba tiêu chí: thời gian hội tụ, dao động công suất quanh MPP và hiệu suất toàn hệ thống. Bảng 4 trình bày So sánh định lượng giữa thuật toán INC và P&O.

Bảng 4. So sánh định lượng giữa thuật toán INC và P&O

Tiêu chí đánh giá	Nghiên cứu này (INC)	Nghiên cứu [6-8] (P&O)	Ưu thế INC
Thời gian hội tụ	0,1-0,2 giây	0,3-0,5 giây	Nhanh hơn khoảng 40-60%
Dao động công suất	1-2% quanh MPP	5-10% quanh MPP	Giảm dao động 3-5 lần
Hiệu suất toàn hệ thống	88,2%-93,6%	75%-85%	Cao hơn 5-15%

Kết quả so sánh trong Bảng 4 cho thấy thuật toán INC vượt trội hơn rõ rệt so với phương pháp P&O ở ba tiêu chí đánh giá cốt lõi. Thời gian hội tụ của INC được rút ngắn đáng kể (0,1–0,2 giây so với 0,3–0,5 giây), mức dao động công suất quanh điểm MPP giảm xuống còn 1–2% (so với 5–10% của P&O), và hiệu suất toàn hệ đạt 88,2–93,6%, cao hơn 5–15% so với P&O. Các kết quả này phản ánh khả năng theo dõi MPP chính xác, ổn định và nhanh chóng của INC nhờ vào cơ chế đánh giá đạo hàm tức thời thay vì điều khiển nhiễu loạn. Do đó, INC là lựa chọn tối ưu cho các hệ thống năng lượng mặt trời quy mô nhỏ, đặc biệt trong điều kiện chiếu sáng và tải biến đổi, với ưu điểm nổi bật về hiệu quả năng lượng và tính khả thi triển khai thực tế.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày thành công một hệ thống điều khiển năng lượng mặt trời ứng dụng thuật toán MPPT theo phương pháp điện dẫn gia tăng (INC), tích hợp cả mô hình phần cứng và phần mềm mô phỏng. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy hệ thống có khả năng phản hồi hiệu quả với các biến thiên của bức xạ mặt trời và tải điện, duy trì hoạt động gần điểm công suất cực đại với hiệu suất từ 88,2% đến 93,6%. So với các thuật toán truyền thống như P&O, phương pháp INC khắc phục được hiện tượng dao động công suất và rút ngắn thời gian hội tụ, đồng thời có khả năng phản ứng tốt với sự thay đổi đột ngột của bức xạ và tải. Việc ứng dụng nền tảng Arduino giúp hệ thống có chi phí thấp và dễ dàng triển khai trong thực tế. Kết quả nghiên cứu là cơ sở khả thi để phát triển các hệ thống năng lượng tái tạo thông minh, thích ứng với điều kiện môi trường thực tế, đặc biệt phù hợp với các mô hình nhà kính hoặc vùng nông nghiệp sử dụng năng lượng mặt trời.

Trong tương lai, việc tích hợp các thuật toán điều khiển thông minh sử dụng trí tuệ nhân tạo (AI) hoặc học máy (Machine Learning - ML) nhằm nâng cao khả năng dự đoán, tự tối ưu tham số và thích nghi với môi trường thay đổi nhanh. Đồng thời, việc kết hợp hệ thống lưu trữ năng lượng (pin Lithium, siêu tụ) giúp ổn định nguồn đầu ra và tăng tính linh hoạt cho hệ thống trong điều kiện bức xạ không liên tục. Ngoài ra, ứng dụng công nghệ IoT vào giám sát từ xa và điều khiển thời gian thực sẽ tạo tiền đề phát triển các mô hình nhà thông minh và lưới điện phân tán bền vững.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Derbeli M., Napole C., Barambones O., Sanchez J., Calvo I., & Fernández-Bustamante P. - Maximum power point tracking techniques for photovoltaic panel: A review and experimental applications. *Energies* **14** (22) (2021) 7806. <https://doi.org/10.3390/en14227806>
2. Abbes H., Abid H., Loukil K. - An improved MPPT incremental conductance algorithm using T-S Fuzzy system for photovoltaic panel. *International Journal of Renewable Energy Research* **5** (2016) 160-167.
3. Abdelilah B., Mouna A., KouiderM'Sirdi N., El Hossain A. - Implementation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Solar Charge Controller using Arduino. 2018 IOP Conference Series Materials Science and Engineering **353** (2018) 1-6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/353/1/012024>
4. Loubna B., Hajji M., Hajji B., Bouali H. - A New MPPT-based ANN for photovoltaic system under partial shading conditions. 2017 Energy Procedia **111** (2017) 924-933. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.255>
5. Matthew B., Stephen A., Kehinde O., David S., Charity S. - Design and Implementation of an Arduino-Based MPPT Solar Charge Controller. *NIU Journal of Humanities* **9** (2024) 51-60. <https://doi.org/10.58709/niuju.v9i4.2049>

6. Ubaid U., Musa R., Suleman A., Zeashan K. - Design and Implementation of a low-cost MPPT Controller for Solar PV System. 10th IEEE-International Conference on Open Source Systems and Technologies (ICOSST) At: Al-Khawarizmi Institute of computer Science, UET, Lahore, Pakistan, (2016). <https://doi.org/10.1109/ICOSST.2016.7838594>
7. Subudhi B., & Pradhan R. - A comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems. IEEE Transactions on Sustainable Energy **4** (2013) 89–98. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2012.2202294>
8. ESRAM T., & Chapman L. - Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. IEEE Transactions on Energy Conversion **22** (2007) 439–449. <https://doi.org/10.1109/TEC.2006.874230>
9. Salas V., Olías E., Barrado A., & Lázaro A. - Review of the Maximum Power Point Tracking Algorithms for Stand-Alone Photovoltaic Systems. Solar Energy Materials and Solar Cells **90** (2006) 1555–1578. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.10.023>
10. Patel H., & Agarwal V. - MATLAB-Based Modeling to Study the Effects of Partial Shading on PV Array Characteristics. IEEE Transactions on Energy Conversion **23** (2008) 302–310. <https://doi.org/10.1109/TEC.2007.914308>

ABSTRACT

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A SOLAR POWER CONTROL SYSTEM USING INCREMENTAL CONDUCTANCE MPPT ALGORITHM ON ARDUINO PLATFORM

Nguyễn Thị Ngọc Thảo¹, Võ Văn Ân^{2*}

¹*Binh Duong Economics and Technology University*

²*Thu Dau Mot University*

*Email: anvv@tdmu.edu.vn

The paper presents the design and implementation process of a solar power control system integrated with the Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm, using the Incremental Conductance (INC) method. The system includes hardware utilising an Arduino microcontroller, an ACS712 current sensor, a MOSFET control circuit, an LCD, and simulation software on MATLAB/Simulink. The model was evaluated under three different light radiation conditions and electrical loads to verify the adaptability and stability of the system. Simulation and experimental results show that the system achieves a high conversion efficiency (over 88%) and responds quickly to environmental fluctuations, demonstrating the stability and practical applicability of the INC algorithm. Additionally, the INC algorithm shows significant advantages over traditional MPPT methods such as Perturb and Observe (P&O) in reducing power fluctuations, converging faster, and improving accuracy in identifying the MPP suitable for small-scale renewable energy applications.

Keywords: Maximum power point tracking (MPPT), incremental conductance (INC), ACS712, maximum power point (MPP), solar panel.