■Ngày nhận bài: 12/6/2026 ■Ngày sửa bài: 22/6/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 06/7/2026

Cải thiện hiệu suất của hệ thống điện mặt trời áp mái tại các nhà ga tàu điện dựa trên điều chỉnh cấu trúc kết nối của dãy PV

Improving the performance of rooftop photovoltaic systems at railway stations based on reconfiguration of PV array interconnections

> THS LÂM QUANG THÁI, PGS.TS AN THỊ HOÀI THU ANH*, TS TRẦN XUÂN TRƯỜNG, THS LÊ MẠNH TUẤN
Trường Đại học Giao thông vận tải
*Email: htanh.ktd@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Quá trình đô thị hóa nhanh đang tạo ra áp lực lớn lên việc khai thác và sử dụng hiệu quả năng lượng điện, đặc biệt trong lĩnh vực giao thông đô thị. Trong bối cảnh đó, năng lượng tái tạo, nhất là điện mặt trời được xem như một giải pháp bền vững và tiềm năng. Tuy nhiên, hiệu suất của các hệ thống quang điện lắp đặt trên mái nhà ga metro thường bị suy giảm do hiện tượng bóng che, gây ra bởi cấu trúc mái phức tạp và các công trình xung quanh dẫn đến tổn thất công suất đáng kể cho toàn hệ thống. Để giải quyết vấn đề này, bài báo đề xuất một phương pháp cải thiện hiệu suất của hệ thống điện mặt trời áp mái thông qua việc điều chỉnh cấu trúc kết nối giữa các tấm quang điện kết hợp với thuật toán điều khiển tối ưu. Kết quả nghiên cứu cho thấy việc sử dụng cấu trúc đề xuất giúp giảm đáng kể tổn thất do hiện tượng bóng che. Giải pháp được đề xuất không chỉ mang tính khả thi cao mà còn có khả năng cải thiện đáng kể hiệu suất của hệ thống điện mặt trời trong các ứng dụng giao thông đường sắt đô thị.

Từ khóa: Hiệu ứng bóng che; hệ thống điện mặt trời; đặc tính P-V; tấm quang điện.

ABSTRACT

Rapid urbanization is placing significant pressure on the efficient utilization of electrical energy, particularly in the urban transportation sector. In this context, renewable energy sources-especially solar energy-are considered a sustainable and promising solution. However, the performance of photovoltaic (PV) systems installed on metro station rooftops is often degraded due to shading effects, caused by complex roof structures and surrounding buildings, leading to significant power losses for the entire system. To address this issue, this paper proposes a method to enhance the performance of rooftop PV systems by reconfiguring the interconnection structure of PV modules in combination with an optimal control algorithm. The research results show that the proposed configuration significantly reduces power losses caused by shading. The proposed solution is not only highly feasible but also has strong potential to significantly improve the performance of PV systems in urban railway transportation applications.

Keywords: Partial shading; solar system; P-V characteristic; photovoltaic module (PV module).

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện nay, hệ thống đường sắt đô thị được xem là một giải pháp then chốt nhằm giảm ùn tắc giao thông và hạn chế ô nhiễm môi trường tại các đô thị lớn ở Việt Nam, nhờ ưu điểm về độ an toàn, tính đúng giờ và khả năng vận chuyển khối lượng hành khách lớn. Mặc dù vậy, loại hình vận tải này cũng đòi hỏi mức tiêu thụ năng lượng đáng kể. Trên thế giới, việc tích hợp các tấm pin năng lượng mặt trời

vào hệ thống đường sắt đô thị đã được triển khai trong nhiều dự án thực tế. Chẳng hạn, tại Singapore, hệ thống điện mặt trời công suất 1 MW được lắp đặt trên mái các ga tàu điện ngầm, góp phần giảm khoảng 500 tấn khí thải carbon mỗi năm. Tương tự, đường sắt Ấn Độ và Công ty Đường sắt JR của Nhật Bản đã xây dựng các công trình ứng dụng PV quy mô lớn, bao gồm đường hầm PV dài khoảng 3 km với tổng công suất 3 MW, cũng như lắp đặt các mô-đun PV trên nóc các toa tàu để cung cấp điện cho các hệ thống thông gió, chiếu sáng và điều hòa không khí [1-6].

Tuyến metro số 1 (Bến Thành - Suối Tiên) là tuyến đường sắt đô thị đầu tiên của TP.HCM, có tổng chiều dài 19,7 km, gồm 14 nhà ga và khu depot tại phường Long Bình với diện tích 20,9 ha (Hình 1). Tuyến kết nối trung tâm thành phố với khu vực cửa ngõ phía Đông, đi qua nhiều khu vực trọng điểm về giáo dục, công nghiệp và phát triển đô thị, góp phần thực hiện quy hoạch mạng lưới metro của Thành phố [7].

Hình 1. Bản đồ tuyến metro số 1 (Bến Thành - Suối Tiên)

Trong quá trình lắp đặt và vận hành thử nghiệm các hệ thống quang điện áp mái tại các nhà ga, sự không đồng đều của bức xạ mặt trời tác động lên các tấm quang điện là một trong những yếu tố quan trọng làm suy giảm hiệu suất của hệ thống. Hiện tượng này có thể xuất phát từ bóng che của mây, lá cây, bóng của các tòa nhà xây dựng lân cận hoặc sự che khuất lẫn nhau giữa các tấm pin kề cận, từ đó gây ra sự sụt giảm đáng kể công suất phát của các tấm năng lượng mặt trời [8]. Bên cạnh đó, bóng che cục bộ còn có thể gây ra hiện tượng "hotspot" tại các tấm pin bị che phủ [9], dẫn đến ứng suất nhiệt cục bộ, làm hư hỏng trực tiếp các tế bào quang điện và suy giảm nghiêm trọng công suất của hệ thống. Ngoài ra, sự không đồng đều của bức xạ còn làm xuất hiện nhiều điểm cực đại cục bộ trên đặc tuyến công suất-điện áp (P-V), gây ra hiện tượng nhầm lẫn trong quá trình dò điểm công suất cực đại và làm giảm hiệu quả khai thác của hệ thống quang điện [8].

Các giải pháp giảm tổn thất do che phủ một phần của hệ thống quang điện chủ yếu gồm phân bổ MPPT, biến tần đa mức và tái cấu trúc mảng pin [10]. Trong đó, DMPPT cho phép dò điểm công suất cực đại ở cấp chuỗi hoặc mô-đun, giúp giảm tổn thất mismatch và nâng cao hiệu suất khai thác năng lượng trong điều kiện che bóng [11, 12]. Biến tần đa mức cải thiện chất lượng điện năng nhưng có cấu trúc điều khiển phức tạp và chưa khắc phục triệt để hiện tượng mismatch [13]. Phương pháp tái cấu trúc mảng pin giúp giảm ảnh hưởng của che bóng thông qua thay đổi cấu hình kết nối mà không cần bổ sung bộ biến đổi công suất, tuy nhiên hiệu quả vẫn phụ thuộc vào điều kiện che bóng và các giải pháp động đòi hỏi hệ thống điều khiển phức tạp [14, 15].

Để khắc phục các vấn đề nêu trên, bài báo này đề xuất phương pháp điều chỉnh cấu trúc kết nối các tấm quang điện kết hợp với phân bổ MPPT theo từng chuỗi PV được đề xuất như Hình 7 nhằm giải quyết trực tiếp và hiệu quả vấn đề bóng che. Nhờ khả năng khai thác công suất độc lập của từng chuỗi PV, các bộ MPPT không chỉ cải thiện hiệu suất năng lượng thu được mà còn có khả năng mở rộng. Vì vậy, phương pháp đề xuất rất phù hợp với hệ thống quang điện áp mái được lắp đặt trên nóc các nhà ga nổi của tuyến metro Bến Thành - Suối Tiên tại Việt Nam trong điều kiện che bóng một phần.

2. MÔ HÌNH HÓA VÀ ĐẶC TÍNH CỦA TẤM PIN QUANG ĐIỆN

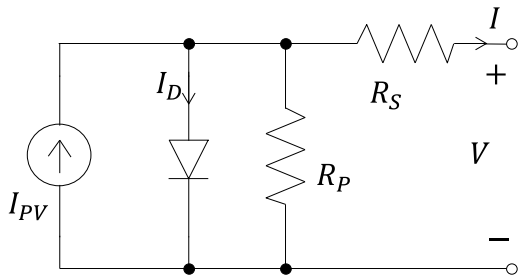
2.1. Tế bào quang điện

Phương trình cơ bản theo lý thuyết về chất bán dẫn mô tả toán học đặc tính I-V của tế bào quang điện lý tưởng [16]:

$$I = I_{PV} - I_0\left[\exp\left(\frac{qV}{akT}\right)-1\right] \quad (1)$$

Trong đó:
I_0 là dòng bão hòa qua diode (A);
q là điện tích q = -1,6.10^{-19} (C);
k là hằng số Boltzmann, k=1,38.10^{23} (J/K);
a là hệ số diode lý tưởng, có giá trị 1 a 1,5.

2.2. Mô hình hóa pin quang điện và ước lượng bức xạ



Hình 2. Mô hình diode đơn

Mạch tương đương của pin quang điện trong mô hình một diode được trình bày như Hình 2 bao gồm một nguồn dòng, diode, hai điện trở gồm nối tiếp R_S và song song R_P. Dòng qua Diode được tính:

$$I_d = I_0\left[\exp\left(\frac{qV}{akT}\right)-1\right] \quad (2)$$

Phương trình đặc tính điện áp - dòng điện của một tế bào quang điện pin mặt trời được tính bằng công thức [16]:

$$V_t = \frac{N_s kT}{q} \quad (3)$$

Với: $I = I_{PV} - I_0\left[\exp\left(\frac{V+R_s.I}{V_t.a}\right)-1\right]-\frac{V+R_s.I}{R_p}$

I_{PV} là dòng quang điện (A)

R_P, R_S là điện trở trong đặc trưng cho các tổn hao công suất trong quá trình làm việc của pin quang điện.

Để có thể mô hình hóa được tấm pin quang điện, cần xác định thêm các thông số I_{PV}, I_0, R_S, R_P. Điều này có thể được thực hiện dựa vào hệ thống các phương trình (4), (5) và (6).

$$I_0 = \frac{I_{PV-STC} + K_i\Delta T}{\exp\left[\left(V_{oc-STC} + K_v\Delta T / a.V_T\right)-1\right]} \quad (4)$$

$$I_{PV-STC} = \frac{R_p + R_s}{R_p} I_{scn} \quad (5)$$

$$P_{maxe} = V_{mp}.I_{mp} \quad (6)$$

Dòng quang điện là hàm của nhiệt độ và bức xạ:

$$I_{PV} = (\mathrm{I}_{pvn} + K_i.\Delta_T)\frac{G}{G_n} \quad (7)$$

$$I_{sc} = (\mathrm{I}_{scn} + K_i.\Delta_T)\frac{G}{G_n} \quad (8)$$

$$R_P = \frac{\mathrm{V}_{mp} + I_{mp}.R_s}{I_{pv} - I_o.\left[\exp\left(\frac{(\mathrm{V}_{mp} + I_{mp}.R_s)}{V_T}\right) + \exp\left(\frac{(\mathrm{V}_{mp} + I_{mp}.R_s)}{(P-1).V_T}\right) - 2\right] - \frac{P_{maxe}}{V_{mp}}} \quad (9)$$

$$R_{P\min} = \frac{V_{mp}}{I_{scn} - I_{mp}} - \frac{V_{oc-STC} - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (10)$$

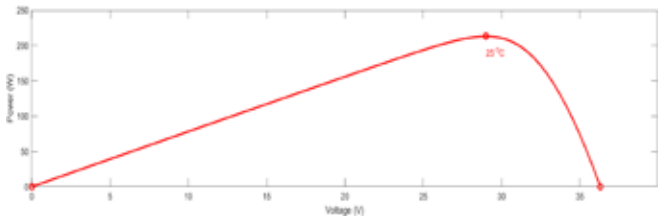
Bức xạ mặt trời được tính dựa trên kết quả đo dòng điện, điện áp và các thông số định mức của TPQĐ, khi ước tính bức xạ mặt trời đã xét đến sự ảnh hưởng của nhiệt độ TPQĐ T_c. Công thức tính bức xạ mặt trời [8] như sau:

$$Gs = \frac{G_{STC}}{I_{LSTC} + \mu_{1SC}(T_C - T_{CSTC})}\left[I + I_o(e^{\frac{V+IR_S}{n_S A_d k \frac{T_C}{q}}} - 1) + \frac{V + IR_S}{R_{Sh}}\right] \quad (11)$$

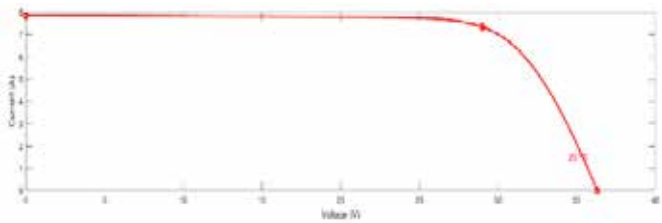
Trong đó: $I_{PV\text{-}STC}$, $V_{oc\text{-}STC}$ lần lượt là dòng điện và điện áp hở mạch được tạo ra trong điều kiện kiểm tra tiêu chuẩn - STC (T_{STC} = 25°C) $\Delta T = T - T_{STC}$; G là bức xạ trên pin mặt trời và G_n = 1.000 W/m² là lượng bức xạ trong điều kiện STC; K_i là hệ số nhiệt độ của dòng ngắn mạch; K_V là hệ số nhiệt độ của điện áp hở mạch; I_{scn} là dòng ngắn mạch của tấm pin trong điều kiện STC; V_{mp}, I_{mp} lần lượt là điện áp và dòng điện cực đại; P_{maxe} là công suất đỉnh đầu ra của tấm pin; μ_{1SC} là hệ số nhiệt độ dòng ngắn mạch; T_C là nhiệt độ của tế bào quang điện (TBQĐ); T_{CSTC} là nhiệt độ tại điều kiện tiêu chuẩn; A_d là hệ số chất lượng của diode; n_s là số TBQĐ kết nối nối tiếp trong TPQĐ.

2.3. Đặc tính của TPQĐ trong điều kiện tiêu chuẩn (STC) và bóng che một phần (PSC)

Trong điều kiện thử nghiệm STC được xác định (bức xạ 1.000 W/m² ở nhiệt độ là 25°C) đặc tính P-V, I-V của các TPQĐ được thể hiện trong Hình 3 và Hình 4.

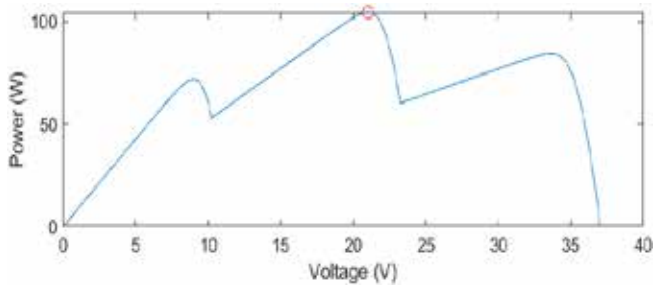


Hình 3. Đặc tính P-V của TPQĐ trong điều kiện STC

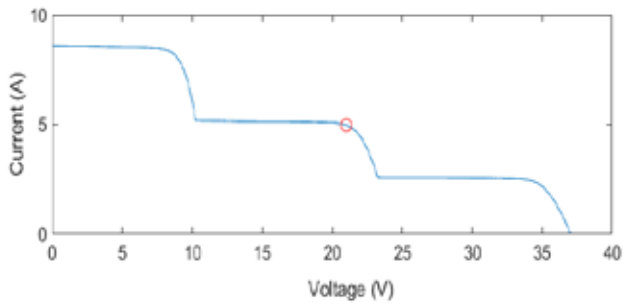


Hình 4. Đặc tính I-V của TPQĐ trong điều kiện STC

Bóng che là hiện tượng một cell pin trong TPQĐ bị che phủ (do đám mây, bóng cây, tòa nhà và các điều kiện vận hành phức tạp). Khi có hiện tượng PSC, đặc tính P-V, I-V của TPQĐ được thể hiện trong Hình 5, 6.



Hình 5. Đặc tính P-V của TPQĐ trong điều kiện PSC

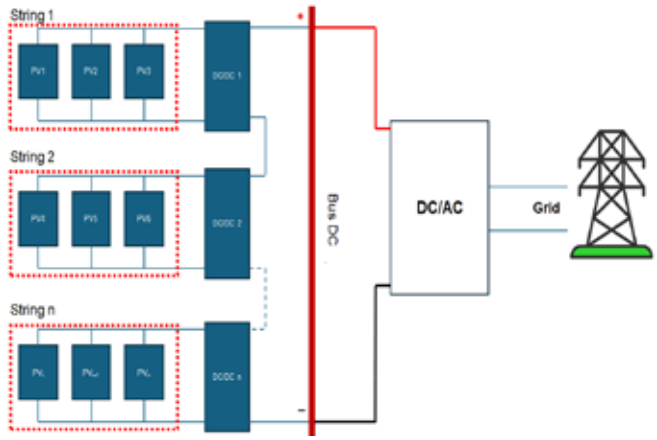


Hình 6. Đặc tính I-V của TPQĐ trong điều kiện PSC

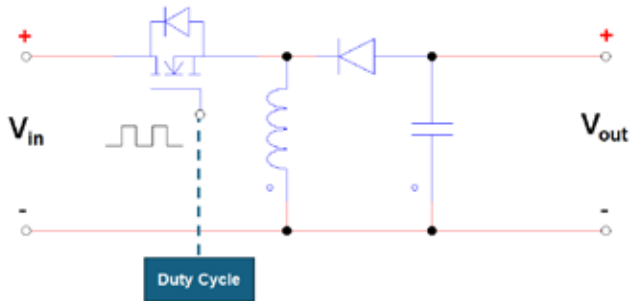
3. CẤU HÌNH HỆ THỐNG ĐỀ XUẤT

3.1. Sơ đồ tổng thể hệ thống

Cấu hình hệ thống quang điện được đề xuất trong nghiên cứu này bao gồm ba thành phần chính: Mảng quang điện, các bộ biến đổi DC-DC dạng Buck - Boost tích hợp cho từng chuỗi và bus DC kết nối với tải hoặc hệ thống điện phía sau được mô tả như Hình 7. Trong cấu trúc này, mỗi chuỗi PV nối song song được ghép nối với một bộ biến đổi DC-DC riêng biệt, tạo thành kiến trúc Distributed Maximum Power Point Tracking (DMPPT). Các bộ biến đổi này thực hiện chức năng điều chỉnh điểm làm việc của từng phần tử PV độc lập, sau đó năng lượng được tổng hợp tại DC bus chung để cấp cho tải hoặc hệ thống nghịch lưu nối lưới.



Hình 7. Mô hình đề xuất



Hình 8. Mô hình của bộ biến đổi Buck - Boost

3.2. Cấu trúc bộ biến đổi DC-DC

Bộ biến đổi DC-DC được sử dụng để chuyển đổi và điều chỉnh mức điện áp một chiều. Trong nghiên cứu này, bộ biến đổi buck-boost được áp dụng để điều chỉnh điện áp đầu ra của từng chuỗi PV và thực hiện MPPT phân tán. Nhờ khả năng tăng hoặc giảm điện áp linh hoạt thông qua điều chỉnh chu kỳ công tác, bộ biến đổi giúp mở rộng dải làm việc và tối ưu công suất của hệ thống. Cụ thể, khi khóa chuyển mạch mở, trạng thái mở của bộ băm w=0 và khi khóa đóng, w=1, được biểu diễn như sau:

$$w = \begin{cases} 1, & khóa \quad ON \\ 0, & khóa \quad OFF \end{cases} \tag{12}$$

Phương trình của bộ biến đổi buck-boost có thể được thiết lập bằng cách áp dụng các định luật điện áp và dòng điện Kirchhoff cho hai trạng thái đóng cắt như sau [17]:

Trạng thái ON (w = 1):

$$V_L = V_{in}, \quad \frac{dI_L}{dt} = \frac{V_{in}}{L} \tag{13}$$

Trạng thái OFF (w=0):

$$V_L = -V_{out}, \quad \frac{dI_L}{dt} = -\frac{V_{out}}{L} \tag{14}$$

Từ điều kiện cân bằng điện áp trên cuộn cảm trong một chu kỳ chuyển mạch, ta thu được quan hệ giữa điện áp đầu vào và đầu ra:

$$V_{out} = -\frac{D}{1-D} V_{in} \tag{15}$$

Trong đó: V_{out} là điện áp đầu ra của bộ biến đổi buck-boost; V_{in} là điện áp đầu vào (từ PV); I_L là dòng điện cuộn cảm; D là hệ số điều chế.

Như vậy, bằng cách điều chỉnh hệ số D, bộ biến đổi buck-boost có thể điều khiển điện áp và trở kháng nhìn từ phía nguồn PV, từ đó đảm bảo hệ thống luôn hoạt động tại điểm công suất cực đại.

4. PHƯƠNG PHÁP ĐỀ XUẤT

Nghiên cứu đề xuất cấu trúc MPPT phân tán nhằm nâng cao hiệu quả khai thác năng lượng của hệ thống quang điện trong điều kiện che bóng cục bộ. Mỗi chuỗi PV được điều khiển độc lập thông qua một bộ biến đổi DC-DC trước khi kết nối vào thanh cái DC chung và chuyển đổi sang điện áp AC bằng bộ nghịch lưu. Cấu trúc này khắc phục hạn chế của MPPT truyền thống khi đặc tuyến P-V xuất hiện nhiều điểm công suất cực đại cục bộ, cho phép từng chuỗi PV làm việc tại điểm công suất cực đại tương ứng với điều kiện bức xạ của mình, từ đó nâng cao hiệu suất khai thác năng lượng của toàn hệ thống.

4.1. Thuật toán điều khiển

Thuật toán điều khiển được xây dựng dựa trên việc ước lượng bức xạ của chuỗi PV, từ đó xác định điện áp MPP và tính toán hệ số điều chế cho từng bộ biến đổi DC-DC, thay vì sử dụng các thuật toán dò tìm truyền thống.

4.1.1. Ước lượng bức xạ dựa trên tín hiệu điện

Trong cấu trúc các chuỗi PV mắc song song, điện áp của chuỗi gần như không đổi, trong khi dòng điện đầu ra tỷ lệ thuận với bức xạ mặt trời. Do đó, bức xạ của từng chuỗi PV có thể được ước lượng từ dòng điện đo được [18]:

$$G_{ul} \approx G_{STC} \cdot \frac{I_{PV_i}}{I_{SCN}} \tag{16}$$

Trong đó: I_{PV_i} là dòng điện chuỗi PV; I_{SCN} là dòng ngắn mạch tại điều kiện tiêu chuẩn G_{STC} = 1.000 W/m².

4.1.2. Xác định điện áp tại điểm công suất cực đại

Sau khi ước lượng bức xạ, điện áp tại điểm công suất cực đại của từng chuỗi PV được xác định dựa trên mối quan hệ với điện áp hở mạch [18]:

$$V_{mp_i} \approx k.V_{OC_i} \tag{17}$$

Trong đó: k là hệ số phụ thuộc vào đặc tính tấm pin (thường từ 0,7 đến 0,8); V_{OC_i} là điện áp hở mạch.

4.1.3. Tính toán hệ số điều chế

Hệ số điều chế trong hệ thống quang điện được sử dụng để điều chỉnh chu kỳ công tác của bộ biến đổi DC-DC, qua đó kiểm soát công suất đầu ra của hệ PV. Giá trị này được xác định dựa trên sai lệch giữa công suất yêu cầu và công suất thực tế, giúp điều chỉnh điện áp và dòng điện đầu ra phù hợp với điểm làm việc mong muốn. Tỷ số truyền điện áp của bộ biến đổi tăng áp có thể được biểu diễn theo hệ số điều chế (D) như sau [17]:

$$\frac{V_{out_i}}{V_{mp_i}} = -\frac{D}{1-D} \tag{18}$$

Do đó, hệ số điều chế của mỗi bộ biến đổi tăng áp có thể được xác định trực tiếp như sau [17]:

$$D_i = \frac{|V_{out_i}|}{|V_{out_i}| + V_{mp_i}} \tag{19}$$

Trong đó: V_{out_i} là điện áp đầu ra.

Công thức này cho phép xác định trực tiếp tín hiệu điều khiển mà không cần thuật toán lặp, từ đó giảm dao động và tăng hiệu suất.

4.1.4. Lưu đồ thuật toán

Lưu đồ điều khiển đề xuất trong Hình 9 được xây dựng theo nguyên lý MPPT phân tán ở cấp chuỗi nhằm tối đa hóa công suất thu được của hệ thống quang điện khi xảy ra che bóng cục bộ. Thuật toán trước hết thu thập điện áp và dòng điện của từng chuỗi PV để ước lượng bức xạ mặt trời thông qua mô hình toán học. Từ giá trị bức xạ ước lượng, điện áp tại điểm công suất cực đại (V_{mp_i}) được xác định trực tiếp, không cần áp dụng các thuật toán tìm kiếm lặp. Dựa trên V_{mp_i}, chu kỳ công tác của bộ biến đổi DC-DC được tính toán để đưa từng chuỗi PV vận hành tại điểm công suất cực đại tương ứng. Quy trình được lặp lại liên tục theo chu kỳ lấy mẫu, giúp hệ thống đáp ứng nhanh trước sự thay đổi của điều kiện môi trường, giảm dao động quanh MPP và nâng cao hiệu suất thu năng lượng.

5. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ

5.1. Mô hình mô phỏng

Hệ thống quang điện được mô phỏng trong môi trường PSIM như Hình 10. Mỗi chuỗi PV bao gồm nhiều tấm quang điện mắc song song và được kết nối với một bộ điều khiển riêng. Các bộ điều kiển này được mắc nối tiếp nhau và ghép vào một thanh cái DC. Thuật toán điều khiển được thực hiện riêng biệt cho từng chuỗi PV và phối hợp với các bộ điều khiển khác, bao gồm các bước: Đo điện áp - dòng điện, ước lượng bức xạ, xác định công suất cực đại.

5.2. Các kịch bản thử nghiệm

Để đánh giá hiệu quả của phương pháp đề xuất, hai kịch bản chính được xây dựng:

5.2.1. Không che bóng

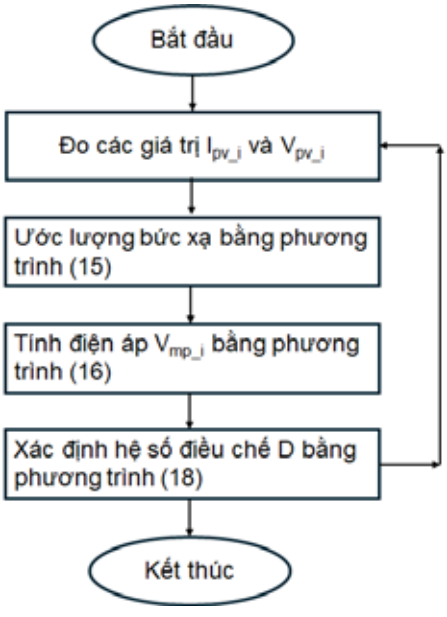
Trong điều kiện bức xạ đồng đều, tất cả các chuỗi PV nhận cùng mức bức xạ 1.000 W/m^2. Đây là trường hợp lý tưởng nhằm đánh giá khả năng hội tụ và độ ổn định của thuật toán điều khiển. Kết quả cho thấy hệ thống nhanh chóng đạt điểm công suất cực đại, dao động công suất nhỏ, hiệu suất đạt gần giá trị tối đa được mô tả như Hình 11.

5.2.2. Che bóng một phần

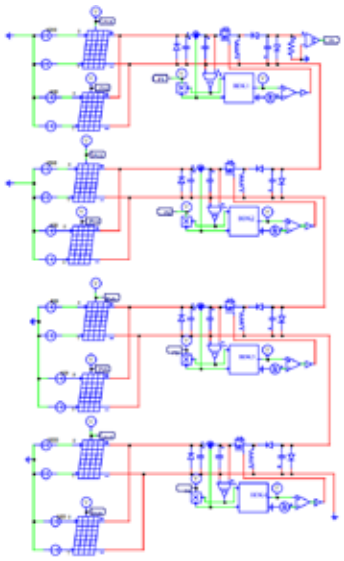
Trong kịch bản này, các chuỗi PV chịu các mức bức xạ khác nhau: Chuỗi 1: Bức xạ lần lượt của 2 tấm quang điện là 1.000 và 500 W/m^2; Chuỗi 2: Bức xạ lần lượt của 2 tấm quang điện là 1.000 và 200 W/m^2; Chuỗi 3: Bức xạ lần lượt của 2 tấm quang điện là 800 và 500 W/m^2; Chuỗi 4: Bức xạ lần lượt của 2 tấm quang điện là 1.000 và 500 W/m^2. Kết quả mô phỏng cho thấy mỗi chuỗi PV được điều khiển độc lập tại MPP riêng, tổng công suất hệ thống được tối ưu hóa, tránh được hiện tượng mắc kẹt tại điểm cực đại cục bộ được mô tả như Hình 12.

5.3. So sánh với bộ MPPT tập trung

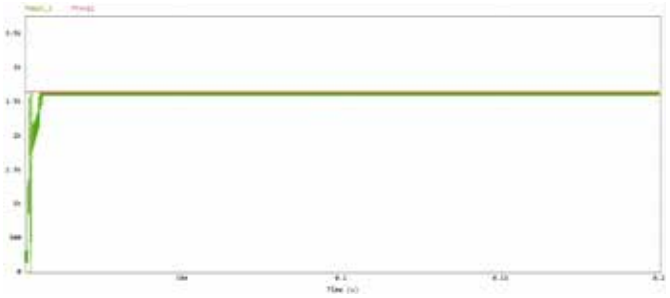
Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp MPPT phân tán đạt hiệu quả cao hơn MPPT tập trung được thể hiện như Hình 13 trong điều kiện che bóng. Nhờ điều khiển độc lập từng chuỗi PV bằng các bộ biến đổi DC-DC riêng, hệ thống giảm ảnh hưởng của hiện tượng mismatch, bám gần điểm công suất cực đại toàn cục và nâng cao hiệu suất khai thác năng lượng. Phương pháp đặc biệt phù hợp với các hệ thống PV thường xuyên chịu ảnh hưởng của che bóng như điện mặt trời áp mái và nhà ga metro.



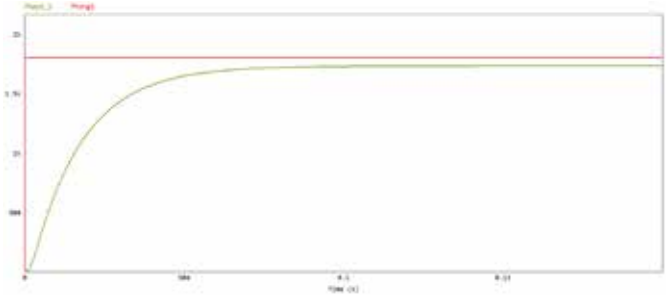
Hình 9. Lưu đồ thuật toán đề xuất



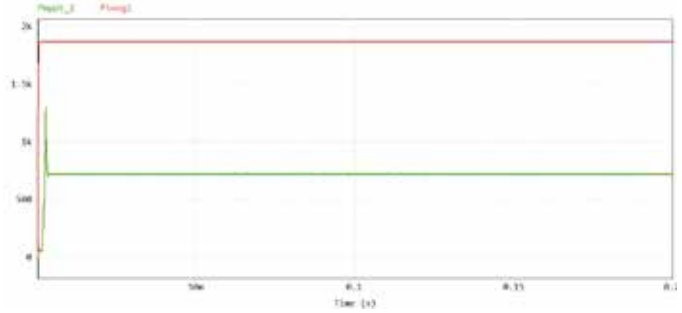
Hình 10. Sơ đồ mô hình mô phỏng hệ thống



Hình 11. Đồ thị so sánh công suất của mảng PV và công suất thu được từ bộ MPPT trong điều kiện không có bóng che



Hình 12. Đồ thị so sánh công suất của mảng PV và công suất thu được từ bộ MPPT phân tán trong điều kiện khi có bóng che



Hình 13. Đồ thị so sánh công suất của mảng PV và công suất thu được từ bộ MPPT tập trung trong điều kiện khi có bóng che

5.4. Các chỉ tiêu đánh giá

Các chỉ tiêu được sử dụng để đánh giá hiệu năng hệ thống bao gồm: Công suất đầu ra là công suất thu được tại DC bus, Hiệu suất là tỷ lệ giữa công suất đầu ra, công suất lý tưởng và thời gian bám MPP là thời gian hệ thống hội tụ về điểm công suất cực đại.

Bảng 1. So sánh phương pháp đề xuất với phương pháp truyền thống

Phương pháp	Công suất (W)	Hiệu suất (%)	Thời gian bám MPP (ms)
Mô hình MPPT truyền thống	941,97	52,23	20 - 30
Mô hình MPPT đề xuất	1.708,85	94,75	15 - 25

5.5. Thảo luận

Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp MPPT phân tán cải thiện đáng kể khả năng khai thác năng lượng so với MPPT tập trung trong điều kiện che bóng một phần. Việc điều khiển độc lập từng chuỗi PV bằng các bộ biến đổi DC-DC giúp mỗi chuỗi làm việc tại điểm công suất cực đại tương ứng, nhờ đó công suất đầu ra đạt 1.708,85 W với hiệu suất 94,75%, vượt trội so với MPPT tập trung (941,97 W và 52,23%). Với khả năng duy trì hiệu suất cao dưới điều kiện bức xạ không đồng đều, phương pháp này phù hợp cho các hệ thống điện mặt trời trong môi trường đô thị, đặc biệt là điện mặt trời áp mái tại các nhà ga metro và các khu vực thường xuyên xảy ra che bóng.

6. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất một phương pháp nâng cao hiệu suất hệ thống quang điện trong điều kiện che bóng một phần thông qua điều chỉnh cấu trúc kết nối và điều khiển MPPT. Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp đạt công suất đầu ra 1.708,85 W với hiệu suất 94,75%, vượt trội so với phương pháp truyền thống (941,97 W và 52,23%), đồng thời rút ngắn thời gian bám điểm công suất cực đại xuống khoảng 15 - 25 ms. Những kết quả này khẳng định tính hiệu quả của phương pháp trong việc nâng cao khả năng khai thác năng lượng và hạn chế hiện tượng mắc kẹt tại các điểm công suất cực đại cục bộ. Trong thời gian tới, nghiên cứu sẽ tập trung vào xây dựng mô hình thực nghiệm, đánh giá trên hệ thống PV nối lưới và tích hợp lưu trữ năng lượng để kiểm chứng và mở rộng khả năng ứng dụng trong thực tế.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải (ĐH GTVT) trong Đề tài mã số T2026-PHII_DDT-001.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Md Ashraful Islam, Abdulla Al Mamun, M.M. Naushad Ali. Integrating PV-based energy production utilizing the existing infrastructure of MRT-6 at Dhaka, Bangladesh. Heliyon, vol. 10, Issue 2, 30 January 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e24078.

[2] Valeriy Kuznetsov, Petro Hubskyi, Artur Rojek, Magdalena Udzik and Krzysztof Lowczowski. Progress and Challenges Connected with the Integration of Renewable Energy Sources with Railway Distribution Networks. Energies, 19 January 2024, doi: 10.3390/en17020489.

[3] Ahmad Fayad, Hussein Ibrahim, Adrian Ilinca, Sasan Sattarpanah Karganroudi and Mohamad Issa. Energy Efficiency Improvement of Diesel-Electric Trains Using Solar Energy: A Feasibility Study. MDPI Journal - Appl. Sci. 2022, 12, 5869, doi: 10.3390/app12125869.

[4] Brijesh. Use of solar panels in civil engineering structures and railways: An Indian perspective. International Journal of Research in Civil Engineering and Technology vol. 5, Iss 2, pp. 72-74, 2024, doi: 10.22271/27078264.2024.v5.i2a.93.

[5] Flavio Ciccarelli, Luigi Pio Di Noia and Renato Rizzo. Integration of Photovoltaic Plants and Supercapacitors in Tramway Power Systems. Energies, 9 February 2018, 11(2), 410, doi: 10.3390/en11020410.

[6] Ding Feng, Hengkai Zhu, Feng Wang, Xiaojun Sun, Sheng Lin, Zhengyou He. Evaluation of voltage quality and energy saving benefits of urban rail transit power supply system considering the access of photovoltaics. CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 9, Issue: 6, November 2023, doi: 10.17775/CSEEJPES.2020.02320.

[7] Giới thiệu tổng quan về tuyến metro số 1 Bến Thành - Suối Tiên. Internet: http://www.maur.hochiminhcity.gov.vn/web/bqlds/tuyen-so-1.

[8] Ngô Ngọc Thành, Nguyễn Ngọc Trung. Phương pháp tối ưu ma trận chuyển mạch trong chiến lược tái cấu trúc kết nối các TPQĐ. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Năng lượng, Trường Đại học Điện lực, ISSN:1859- 4557, pp. 58- 66, 2019.

[9] D. Yousri, T. S. Babu, D. Allam, V. Ramachandaramurthy, E. Beshr, M. Eteiba et al. Fractional chaos maps with flower pollination algorithm for partial shading mitigation of photovoltaic systems. Energies, 16 September 2019, doi: 10.3390/en12183548.

[10] Moturi Gana Sai Krishna, Tukaram Moger. Reconfiguration strategies for reducing partial shading effects in photovoltaic arrays: State of the art. Solar Energy, vol. 182, April 2019, pp. 429-452, doi: 10.1016/j.solener.2019.02.057.

[11] Narjis Nahedh Nadhim, Muhammed Sabri Salim. Maximum Power Point Tracking Techniques: A Review. International Journal of Recent Research in Electrical and Electronics Engineering (IJRREEE), vol. 1, Issue 1, pp, 25-33, Month: April - June 2014, doi: 10.29194/NJES.28040653.

[12] Abdessamad Benlafkih, Yassine El Moujahid. Optimizing photovoltaic systems performance under partial shading using an advanced cuckoo search algorithm. International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS), vol. 15, no. 2, June 2024, pp. 845-857, ISSN: 2088-8694, doi: 10.11591/ijpeds.v15.i2.pp845-857.

[13] Shaik Nyamathulla and Dhanamjayulu Chittathuru. A Review of Multilevel Inverter Topologies for Grid-Connected Sustainable Solar Photovoltaic Systems. Sustainability 2023, 15, 13376, doi:10.3390/su151813376.

[14] Emily Grace Gummadi, Suresh Mikkili, Santhosh Yedla. SuDoKU based Reconfiguration Techniques to T-C-T PV Array for Enhancing the Maximum Power under Partial Shading Patterns. 2023 International Conference on Power Electronics and Energy (ICPEE), doi: 10.1109/ICPEE54198.2023.10060192.

[15] Koran A. Namuq, Abdulrahman I. Siddiq. Dynamic Reconfiguration of PV Array under Partial Shading Condition by Using Automatic Switching. International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications, 2023, doi:10.18178/ijeetc.12.4.

[16] S. Busquets-Monge, J. Rocabert, P. Rodriguez. Multilevel diode-clamped converter for photovoltaic generators with independent voltage control of each solar array. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, vol. 55, no. 7, pp. 2713-2723, doi: 10.1109/TIE.2008.924011.

[17] Maria I. S. Guerra, Fábio M. Ugulino de Araújo, Mahmoud Dhimish. Assessing Maximum Power Point Tracking Intelligent Techniques on a PV System with a Buck-Boost Converter. Energies 2021, 14, 7453, doi: 10.3390/en14227453.

[18] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, Issue: 5, June 2009, doi: 0.1109/TPEL.2009.2013862.