

Số đặc biệt: Các bài báo được chọn từ Hội nghị Năng lượng tái tạo IET lần thứ 5  
Hội nghị thể hệ 2016

# Tối ưu hóa cấp độ chuỗi trên các hệ thống điện mặt trời hòa lưới để giảm tổn thất bóng râm một phần

Ahsan Sarwar Rana<sup>1,2</sup>, Mashood Nasir<sup>1</sup>, Hassan Abbas Khan<sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup>Khoa Kỹ thuật Điện, Đại học Khoa học Quản lý Lahore, Lahore, Pakistan

<sup>2</sup>Khoa Kỹ thuật Điện, Công nghệ Thông tin, Đại học Punjab, Lahore, Pakistan

✉ Email: hassan.khan@lums.edu.pk

**Tóm tắt:** Bóng râm một phần, thường thấy trong các hệ thống điện mặt trời quang điện (PV) trên mái nhà dân dụng, có thể gây bất lợi lớn đến tỷ lệ hiệu suất (PR) của hệ thống PV. Thông thường, đối với các hệ thống lắp đặt trong nhà, cấu hình bộ biến tần chuỗi hoặc bộ biến tần vi mô-mô-đun được triển khai. Mặc dù bộ biến tần vi mô cấp mô-đun thường phản ứng tốt hơn với sự phân bố ánh sáng mặt trời không đồng đều, nhưng chúng vẫn ít phổ biến hơn và do đó, tồn kém ở nhiều thị trường mới nổi. Mặt khác, các triển khai cấp chuỗi được triển khai rộng rãi vì chúng ít phức tạp hơn và tiết kiệm chi phí hơn. Trong công trình này, các tác giả trình bày một khuôn khổ phân tích và mô phỏng để cải thiện PR trong điều kiện bóng râm một phần thông qua việc thay đổi các kết nối chuỗi trong hệ thống biến tần cấp chuỗi. Kết quả cho thấy PR cao hơn tới 4,6% vào những tháng mùa đông đối với hệ thống 42,24 kWp được lắp đặt tại Đại học Khoa học Quản lý Lahore, Lahore, Pakistan.

Số hiệu 1752-1416

Nhận ngày 3 tháng 4 năm 2017 Sửa  
đổi ngày 19 tháng 10 năm 2017 Chấp

nhận ngày 13 tháng 11 năm 2017 E-First ngày  
30 tháng 11 năm 2017 doi: 10.1049/iet-

rpg.2017.0229 www.ietdl.org

## 1 Giới thiệu

Có sự chuyển dịch ngày càng tăng từ nhiên liệu hóa thạch sang các nguồn tài nguyên tái tạo để sản xuất điện trên toàn thế giới. Các nguồn tài nguyên tái tạo, đặc biệt là năng lượng mặt trời có tiềm năng rất lớn ở nhiều quốc gia và có thể đóng góp đáng kể vào tổng hợp điện [1, 2]. Năng lượng mặt trời có thể được sản xuất thông qua (a) khai thác năng lượng nhiệt mặt trời hoặc (b) khai thác quang điện (PV) bằng cách sử dụng các mô-đun/tấm pin mặt trời PV. Quy trình nhiệt mặt trời khai thác năng lượng mặt trời bằng cách khai thác nhiệt từ ánh sáng mặt trời, sau đó có thể được sử dụng để tạo ra hơi nước để chạy tua-bin để sản xuất điện. Mặt khác, công nghệ PV khai thác năng lượng của các photon trong ánh sáng mặt trời thông qua các tế bào quang điện để tạo ra các cặp electron/lỗ trống chảy trong mạch ngoài để tạo ra điện. Các công nghệ PV mặt trời đã chứng kiến sự tăng trưởng cao hơn nhiều trong thập kỷ qua do chi phí của các tấm pin mặt trời và các thành phần cân bằng hệ thống giảm [3-5].

Các hệ thống PV gia dụng đô thị phổ biến nhất bao gồm các cấu trúc lưới điện hòa lưới, trong đó nhiều tấm pin được kết nối với một biến tần trung tâm cấp điện trực tiếp vào lưới điện. Nhiều yếu tố ảnh hưởng đến sản lượng của hệ thống PV; chủ yếu bao gồm nhiệt độ [6, 7], độ rọi thấp [8, 9], độ dốc và hướng của các tấm pin PV [10], hiệu suất của biến tần và pin (trong trường hợp hệ thống có nguồn dự phòng [11], thường được lắp đặt ở những khu vực có lưới điện không liên tục), tổn thất dây dẫn và bóng râm [9, 12, 13]. Tổn thất do bóng râm hoặc bóng râm có thể rất đáng kể đối với các thiết lập đô thị ảnh hưởng đến tỷ lệ hiệu suất (PR) đối với hướng biến tần trung tâm [14-16]. Ví dụ, Delinc et al. [16] đã chỉ ra rằng PR của hệ thống PV dựa trên tấm pin c-Si có thể dao động từ 20% đến 80% đối với bóng râm 30%.

Có nhiều phân loại bóng râm khác nhau, trong đó phân loại nhị phân, tức là bóng râm 'khách quan' và 'chủ quan', phổ biến hơn. Bóng râm khách quan là do thời tiết nhiều mây hoặc đơn giản là thời điểm trong ngày có ít ánh sáng. Không thể tránh được bóng râm khách quan vì ánh sáng mặt trời bị chặn trong đó và toàn bộ hệ thống PV có khả năng bị ảnh hưởng đồng đều. Bóng râm chủ quan có thể được phân loại thành bóng râm 'tĩnh' và 'động' [17]. Bóng râm tĩnh xảy ra do bất thường ở vùng lân cận của hệ thống PV (như bụi bẩn, phân chim, v.v.) và cũng được gọi là bóng râm cứng [9]. Bóng râm động (mềm) có thể có hình dạng là các tòa nhà, công trình hoặc cây cối ở xa gây ra bóng râm cho hệ thống PV. Bóng râm cứng có thể được cải thiện bằng cách vệ sinh tấm pin [18, 19], trong khi nhiều kỹ thuật được sử dụng để giảm tổn thất bóng râm mềm. Bóng râm cứng ảnh hưởng đến cả điện áp mạch hở hoạt động và dòng điện ngắn mạch của

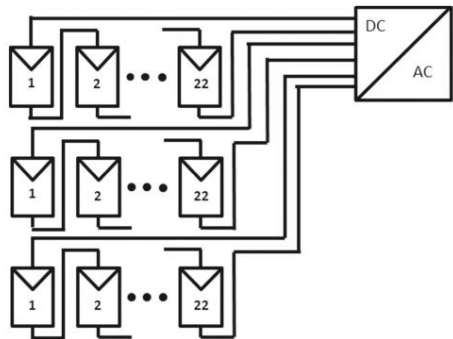
Chuỗi PV. Theo Zaihidee et al. [20], bụi tích tụ 20 g/m<sup>2</sup> trên tấm pin PV làm giảm dòng điện ngắn mạch, điện áp mạch hở và hiệu suất lần lượt là 15-21%, 2-6% và 15-35%.

Thông thường, trong trường hợp che bóng mềm, thuật toán theo dõi điểm công suất cực đại (MPPT) của biến tần có thể giảm dòng điện trong toàn bộ chuỗi để tận dụng sự đóng góp điện áp tổng thể của chuỗi nhằm tối đa hóa công suất đầu ra. Trong các bóng cứng, khi một tấm pin bị che bóng cứng (phân chim hoặc các lý do khác khiến bức xạ đầu vào bị chặn hoàn toàn), diode bypass sẽ hoạt động, bỏ qua hoàn toàn tấm pin/mô-đun. Điều này làm giảm điện áp hoạt động tổng thể của chuỗi. Trong công trình này, chúng tôi chỉ tập trung vào 'tổn thất che bóng mềm' (còn được gọi là 'tổn thất che bóng một phần') do các cấu trúc ở gần nơi triển khai PV.

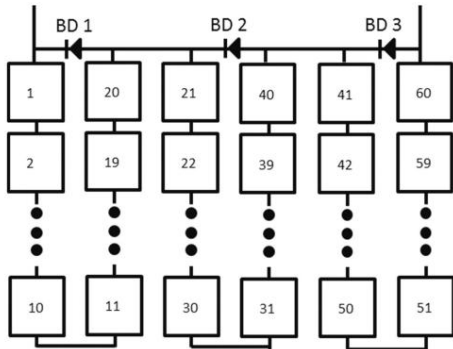
Hầu hết các khu dân cư, nơi lắp đặt các tấm pin PV, thường được bao quanh bởi các công trình hoặc tòa nhà khác và có kiểu bóng râm thay đổi theo vị trí của mặt trời. Khi bóng râm phủ đến một hệ thống PV, nó sẽ làm giảm sản lượng của các tấm pin bằng cách hạ thấp thể hiện tại của ô bị che bóng khi các ô được kết nối nối tiếp. Để khắc phục, các tấm pin mặt trời được trang bị các diode bypass (a) giúp giảm tổn thất bằng cách cung cấp một đường dẫn song song cho các ô/tấm pin bị che bóng và (b) ngăn ngừa các điểm nóng có thể làm hỏng vĩnh viễn một tấm pin. Tuy nhiên, tùy thuộc vào loại bóng râm, tổn thất do bóng râm vẫn có thể rất đáng kể.

PR có thể được cải thiện bằng cách giảm thiểu tác động của bóng râm thông qua nhiều lược đồ khác nhau như sửa đổi các kết nối giữa các mô-đun và chuỗi, các mảng có thể định cấu hình lại và tối ưu hóa cấp chuỗi [21-30]. Các lược đồ kết nối chuỗi và mô-đun khả thi bao gồm liên kết chéo toàn phần (TCT) và liên kết nhánh (BL) được thảo luận trong [24-26]. Các lược đồ này thường phân bổ đều tác động của bóng râm một phần và giảm thiểu sự suy giảm công suất do bóng râm. BL và TCT ít bị ảnh hưởng bởi các vấn đề bóng râm một phần hơn; tuy nhiên, dự phòng kết nối lớn đòi hỏi thêm dây dẫn, dẫn đến hệ thống cáp đất tiên và chi số lợi tức đầu tư giảm.

Một số kỹ thuật khác sử dụng các mảng PV có thể cấu hình lại động để giảm thiểu tác động của bóng râm một phần đã được trình bày trong tài liệu [27-32]. Các lược đồ này sử dụng các thuật toán điều khiển phức tạp để điều khiển các công tắc chịu trách nhiệm cấu hình lại mảng. Độ phức tạp về mặt tính toán cùng với các yêu cầu cảm biến thời gian thực cùng với giá mô-đun năng lượng mặt trời giảm khiến các lược đồ này tồn kém và phần lớn không khả thi đối với các triển khai quy mô nhỏ. Ngoài ra, vấn đề về độ tin cậy của các công tắc thường



Hình 1 Ba chuỗi gồm 22 tấm pin, mỗi chuỗi được kết nối với một bộ biến tần chuỗi trung tâm



Hình 2 Sơ đồ cơ bản của một tấm pin quang điện với 60 cell và ba diode bypass tạo thành ba khối gồm 20 cell

một mối quan tâm quan trọng đối với các hệ thống này. Do đó, đối với các hệ thống lắp đặt vừa và nhỏ, một chiến lược đơn giản, ít tốn kém về mặt tính toán và hiệu quả về mặt chi phí với yêu cầu phân phối tối thiểu (công tắc, cáp và dây dẫn) là rất mong muốn để giảm thiểu tác động suy giảm công suất do bóng râm.

Một kỹ thuật thú vị dựa trên cấu hình SU DO KU của các mô-đun để tăng cường công suất đầu ra của mảng PV được thảo luận trong [32]. Tuy nhiên, trong một sơ đồ như vậy, vị trí vật lý của các mô-đun bị thay đổi, trong khi kết nối điện vẫn không thay đổi. Một sơ đồ như vậy dựa trên việc di dời mô-đun là không tối ưu do (a) việc di dời các mô-đun đòi hỏi lao động và tài nguyên vật lý để thực hiện việc di dời vật lý và (b) vì kết nối điện không thay đổi, trong khi vị trí của mô-đun đã thay đổi, do đó, có thể cần một dây dẫn bổ sung để mô-đun được đặt ở một vị trí khác. Dây dẫn bổ sung này không chỉ làm tăng chi phí của hệ thống mà còn làm tăng tổn thất phân phối và hệ thống dây dẫn liên quan. Hơn nữa, phương pháp dựa trên SU DO KU không tính đến các mẫu bóng râm cụ thể tại địa điểm và bức xạ chiếu tới để tối đa hóa công suất đầu ra của mảng PV. Ngược lại, tối ưu hóa kết nối điện dựa trên thuật toán di truyền (GA) của các mô-đun khác nhau trong mảng PV được sử dụng sao cho vị trí vật lý của chúng không thay đổi như đã thảo luận trong [31]. Mặc dù nhu cầu lao động liên quan đến việc di dời các tấm pin và sự phức tạp của các kết nối phát sinh từ việc di dời vật lý có thể được giảm bớt bằng cách sử dụng tối ưu hóa kết nối dựa trên GA. Tuy nhiên, các lược đồ dựa trên GA như vậy có xu hướng hội tụ đến cực đại cục bộ thay vì cực đại toàn cục, điều này có thể dẫn đến giảm công suất đầu ra. Hơn nữa, sự hội tụ của thuật toán GA phụ thuộc rất nhiều vào việc lựa chọn tham số, điều này hạn chế việc sử dụng rộng rãi của thuật toán này.

Trong công trình này, chúng tôi thiết kế một phương pháp để tăng cường PR trong quá trình triển khai ở cấp độ chuỗi thông qua phân tích bóng râm tại thời điểm lắp đặt hoặc sắp xếp lại một lần các cấu trúc chuỗi trong các hệ thống PV hiện có để đạt được PR cao hơn. Cần lưu ý rằng việc sửa đổi không bao gồm việc di dời vật lý các tấm pin, mà chỉ liên quan đến việc xâu chuỗi lại với những thay đổi nhỏ theo đó một số tấm pin được che bóng ở các chuỗi lân cận được hoán đổi với các tấm pin không được che bóng để tăng sản lượng kết hợp của hai chuỗi. Về bản chất, hiệu quả đạt được thông qua việc cho phép các chuỗi

để không bị che bóng trong khoảng thời gian dài hơn. Chi phí duy nhất của sự thay đổi này là yêu cầu về dây dẫn bổ sung, ít hơn đáng kể so với các sơ đồ kết nối lại được sửa đổi theo TCT và BL được sử dụng trong tài liệu. Hơn nữa, việc cài tạo các hệ thống hiện có theo hướng TCT hoặc BL đòi hỏi các kết nối phức tạp (theo quan điểm triển khai) có thể rất khó khăn.

Do đó, khuôn khổ được trình bày phù hợp cho việc lập kế hoạch lắp đặt mới cũng như cải tạo các lắp đặt hiện có với những thay đổi nhỏ trong cấu trúc chuỗi.

2 Phương pháp

Thông thường, trong các triển khai trên mái nhà, các biến tần cấp chuỗi thường được triển khai. Một cách sắp xếp đơn giản của sơ đồ này với ba chuỗi song song gồm 22 tấm pin, mỗi tấm được kết nối với một biến tần trung tâm được thể hiện trong Hình 1. Mỗi tấm pin thường chứa một số diốt bỏ qua đóng vai trò trung tâm trong việc giảm thiểu tổn thất do che bóng. Thông thường, ba diốt bỏ qua được sử dụng trong một tấm pin gồm 60 ô, phân phối một diốt cho mỗi khối gồm 20 ô như thể hiện trong Hình 2. Nếu một ô bị che bóng trong một khối (ví dụ ô 1-20), thì một đường dẫn thay thế cho dòng điện được cung cấp bởi diốt bỏ qua (BD1). Trong khi, trong điều kiện che bóng một phần, dòng điện có thể vẫn giữ nguyên trong một tấm pin, thì công suất đầu ra của hệ thống bị ảnh hưởng do loại trừ khối 'bị bỏ qua'. Việc che bóng thêm các ô trong cùng một khối sẽ không ảnh hưởng đến công suất đầu ra vì khối này đã bị bỏ qua. Tuy nhiên, nếu một ô từ khối khác (ví dụ ô 21-40) cũng bị che bóng thì hai khối từ tấm pin (thường) bị bỏ qua, dẫn đến một phần ba sản lượng.

Điều này đặc biệt quan trọng đối với hiệu suất của các hệ thống này và nhiều thuật toán MPPT hiệu quả giải quyết vấn đề này bằng cách giảm mức dòng điện một cách thích hợp để tối đa hóa công suất đầu ra [33-35].

Trong công trình này, nhiệm vụ chính là phân tích mẫu bóng râm của hệ thống và đánh giá các lợi ích có thể có thông qua việc tái cấu trúc các chuỗi. Các lợi ích thu được có thể được phân tích thông qua phần mềm (như PSIM) hoặc phân tích. Trong công trình này, chúng tôi đã sử dụng cả hai phương pháp để xác định cải thiện hiệu quả. Để đánh giá phân tích hệ thống bóng râm một phần, điều quan trọng là phải tóm tắt một số thông số cơ bản của tế bào PV [36]

Tôi = Isc    I01e<sup>q(V + IR) / nkT</sup>    V + IR / Rsh ,    (1)

Từ vùng = Isc / q    kT    ln(1 + 1 / (I01 / Isc))    (2)

trong đó I là dòng điện ra tại cực, Isc là dòng điện ngắn mạch của cell, I01 là dòng điện bão hòa ngược, q là điện tích của electron, V là điện áp tại cực, Rs là điện trở nối tiếp của cell, n là hệ số lý tưởng, k là hằng số Boltzmann, T là nhiệt độ trong điều kiện thử nghiệm tiêu chuẩn (STC), Rsh là điện trở phân lưu của cell và Voc là điện áp cell mạch hở.

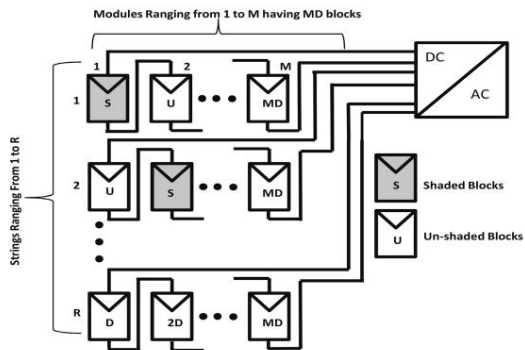
Các phương trình (1) và (2) đánh giá dòng điện và điện áp theo STC cho một tế bào quang điện. Tuy nhiên, để kết hợp hiệu ứng của việc thay đổi độ rọi và nhiệt độ, các phương trình dịch chuyển tiếp theo được thiết lập. Đối với một tấm pin mặt trời dựa trên Si thông thường, các phương trình được tóm tắt [37]

Isc = Isc,đ    { 1 + α (    Đến    ) } (    VA    /    ô    đó    ) ,    (3)

Bạn = Bạn, cái    { 1 + α ln (    VA    /    ô    đó    ) + β (    Đến    ) }    (4)

Imp = Imp, một    (    là    /    Isc, o    ) ,    (5)

Vmp = Vmp, o    + B (    Bạn, cái    ) + Rs (    Imp, o    Quý    đó    ) ,    (6)



Hình 3 Hệ thống điện mặt trời hòa lưới điển hình có chuỗi R với M mô-đun trong mỗi chuỗi

$$P_{cal} = V_{mp} I_{mp}, \tag{7}$$

trong đó  $I_{sc,0}$  là dòng điện ngắn mạch theo STC,  $\alpha$  là hệ số nhiệt độ dòng điện ngắn mạch,  $T$  là nhiệt độ hoạt động,  $T_0$  là nhiệt độ theo STC,  $E$  là cường độ bức xạ tức thời,  $E_0$  là cường độ bức xạ chuẩn ( $1000\text{ W/m}^2$ ),  $V_{oc,0}$  là điện áp mạch hở theo STC,  $a$  là hệ số hiệu chỉnh cường độ bức xạ của  $V_{oc}$ ,  $\beta$  là hệ số nhiệt độ điện áp mạch hở,  $I_{mp}$  là dòng điện tức thời ở công suất cực đại,  $I_{mp,0}$  là dòng điện ở công suất cực đại theo STC,  $V_{mp}$  là điện áp tức thời ở công suất cực đại,  $V_{mp,0}$  là điện áp ở công suất cực đại theo STC,  $R_s$  là điện trở nối tiếp và  $P_{cal}$  là công suất cực đại được tính toán.

Các phương trình (3)–(7) định lượng phản ứng của tấm pin mặt trời đối với các thông số thay đổi. Vì mỗi hệ thống PV đều khác nhau do vị trí, thiết kế, số lượng tấm pin được lắp đặt và sản xuất các tấm pin, nên các phương trình đã đề cập ở trên không thể được tuyến tính hóa cho hoạt động MPPT trong điều kiện bóng râm. Điều cần thiết là một tập hợp các phương trình chung có thể định lượng phản ứng của hệ thống PV ngay cả trong điều kiện bóng râm trong hoạt động MPPT bình thường. Ví dụ, nếu một số khối/tấm pin bị bỏ qua do bóng râm không đồng đều thì thuật toán MPPT phải có khả năng tính đến điều đó khi ước tính công suất. Do đó, chúng tôi suy ra điều kiện sau đây làm tham chiếu để xác định công suất tối đa có thể đạt được từ một chuỗi

$$V \left( \frac{P_{max}}{N} \right) \geq N_0 \text{ là } , \tag{8}$$

trong đó  $U$  là tổng số khối không được tô bóng trong một chuỗi,  $N$  là tổng số khối trong một chuỗi và  $E_s$  là độ rọi trong bóng râm.

‘Khối’ về cơ bản biểu diễn số lượng diode bypass trong một chuỗi. Nếu một bypass đang hoạt động, nó sẽ được tính là một khối được tô bóng và nếu không, nó sẽ được tính là một khối không được tô bóng. Độ rọi được đo thông qua cảm biến độ rọi (Hộp cảm biến Sunny SMA) với chức năng ghi dữ liệu và cung cấp các giá trị độ rọi theo khoảng thời gian 15 phút. Độ rọi của các tấm được tô bóng cũng được đo thông qua cảm biến độ rọi tham chiếu (KENTECHPV1). Đối với bất kỳ chuỗi nào, nếu (8) là đúng, thì dòng điện tức thời ở công suất cực đại  $I_a$  mp giống như (5) trong khi điện áp tức thời ở công suất cực đại  $V_a$  được đưa ra bởi (10) [38]. Trong trường hợp này, dòng điện ngắn mạch sẽ thay đổi theo tỷ lệ thuận với độ rọi tới  $E$  được chuẩn hóa theo độ rọi chuẩn  $E_0$ , trong khi điện áp mạch hở sẽ biểu thị sự phụ thuộc logarit với độ rọi tới  $E$  được chuẩn hóa theo độ rọi chuẩn  $E_0$  như thể hiện bởi (3) và (4)

$$I_{a,0} = I_{sc,0} \left( \frac{E}{E_0} \right)^{\alpha} \tag{9}$$

$$V_{mp} = V_{mp,0} + B \left( \ln \left( \frac{E}{E_0} \right) \right) + R_s \left( \frac{I_a}{I_{mp,0}} \right) \times \left( \frac{P_{max}}{N} \right) \times \text{Ảnh hưởng} (S) \text{RBD} \quad \text{với } , \tag{10}$$

trong đó  $S$  là tổng số khối được tô bóng trong một chuỗi,  $RBD$  là điện trở thuận của diode bypass,  $V_T$  là ngưỡng sụt áp của diode và  $M$  là tổng số mô-đun/tấm pin trong một chuỗi.

Nếu điều kiện trình bày trong (8) là sai, thì thuật toán MPPT sẽ không bỏ qua các khối, do đó, để đạt được công suất cực đại từ chuỗi, mỗi khối sẽ đóng góp vào công suất ròng từ chuỗi. Một chuỗi như vậy được phân loại là chuỗi bỏ qua không hoạt động và các thông số quan trọng của nó bao gồm dòng điện ngắn mạch  $I_a$  ở  $^\circ\text{sc}$ , dòng điện tức thời tại điểm công suất cực đại  $I_a$  ở  $^\circ\text{mp}$ , điện áp mạch hở  $V_a$  ở  $^\circ\text{oc}$  và điện áp tức thời tại điểm công suất cực đại  $V_a$  ở  $^\circ\text{mp}$ , phải được sửa đổi và được đưa ra bởi (11)–(14). Trong trường hợp này, dòng điện ngắn mạch sẽ thay đổi theo tỷ lệ thuận với độ rọi bóng râm  $E_s$  được chuẩn hóa theo độ rọi chuẩn  $E_0$ , trong khi điện áp mạch hở sẽ biểu thị sự phụ thuộc logarit với độ rọi bóng râm  $E_s$  được chuẩn hóa theo độ rọi chuẩn  $E_0$  như thể hiện trong (11) và (13), trong đó giả định độ rọi bóng râm đã được giải thích ở trên

$$I_{a,0} = I_{sc,0} \left\{ \left( 1 + \alpha \left( \frac{E_s}{E_0} - 1 \right) \right) \left( \frac{E_s}{E_0} \right) \right\} \tag{11}$$

$$I_{a,0} = I_{sc,0} \left( \frac{E_s}{E_0} \right)^{\alpha} \tag{12}$$

$$V_{mp,0} = B \ln \left( \frac{E_s}{E_0} \right) + \beta \left( \frac{E_s}{E_0} - 1 \right) \tag{13}$$

$$V_{mp} = V_{mp,0} + B \left( \ln \left( \frac{E_s}{E_0} \right) \right) + R_s \left( \frac{I_a}{I_{mp,0}} \right) \times \left( \frac{P_{max}}{N} \right) \times \text{Ảnh hưởng} (S) \text{RBD} \quad \text{với } . \tag{14}$$

Các phương trình này đã được sử dụng kết hợp với mô phỏng phần mềm để đánh giá hiệu suất hệ thống cho mô hình đổ bóng được quan sát.

3 Khung tối ưu hóa cho tối ưu hóa cấp độ chuỗi Đối với hệ thống PV mặt trời

tổng quát có  $R$  chuỗi với  $M$  mô-đun trong mỗi chuỗi như thể hiện trong Hình 3, tổng số khối  $N_t$  có thể được tính toán tùy thuộc vào số lượng diode bypass  $D$  trên mỗi mô-đun

$$N_t = R \times M \times D \tag{15}$$

Dựa trên độ rọi tới của mỗi khối, các khối này có thể được phân loại thêm thành các khối được tô bóng  $S_i$  và các khối không được tô bóng  $U_i$  trong mỗi chuỗi  $i$ . Do đó, đối với mỗi chuỗi  $i$ , tổng số khối trên mỗi chuỗi  $N$ , tổng số khối không được tô bóng  $N_1$  và tổng số khối được tô bóng  $N_2$  có thể được biểu diễn lần lượt bằng (16), (17) và (18)

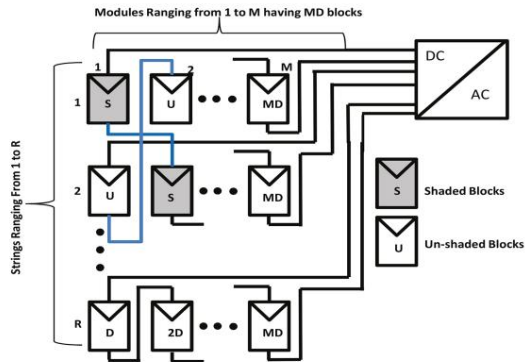
$$N = U_i + S_i \quad i = [1, R], \tag{16}$$

$$N_1 = \sum_{i=1}^R U_i \tag{17}$$

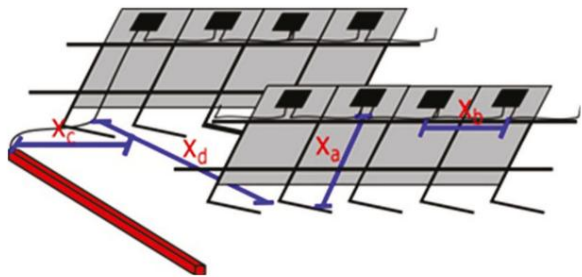
$$N_2 = \sum_{i=1}^R S_i \tag{18}$$

Trong khi tổng số khối  $N$  được đưa ra bởi (15) có thể được biểu diễn theo (17) và (18) bởi (19)

$$N_t = \sum_{i=1}^R (U_i + S_i) \tag{19}$$



Hình 4 Sơ đồ hệ thống được tối ưu hóa với cấu trúc được sửa đổi trong các chuỗi lân cận để tối đa hóa PR



Hình 5 Các tấm kết nối nối tiếp tiêu biểu với nhiều chiều dài khác nhau được đề cử để tính toán yêu cầu dây dẫn tổng thể

Bảng 1 Đánh giá của tấm pin lắp đặt BYD240P6-30	
Công suất định mức tối đa (Pmax)	240 Công suất
sức chịu đựng	0-5W
điện áp tại Pmax (Vmp)	29,64 V
dòng tại Pmax (Imp)	8.10 Một
điện áp mạch hở (Voc)	37,3V
dòng điện ngắn mạch (Isc)	8,57 Một
hiệt độ hoạt động danh nghĩa của cell	45°C ± 2°C

Đối với một mẫu bóng râm nhất định, Si và Ui có thể thay đổi ở mỗi chuỗi i, do đó, công suất đầu ra P<sub>Si</sub> (t) của mỗi chuỗi tại bất kỳ thời điểm t nào cũng sẽ thay đổi tương ứng và được đưa ra dưới dạng

$$P_{Si} \left( t \right) = \left\{ \begin{array}{l} V_{mp,i} \left( t \right) I_{mp,i} \left( t \right) E_i \left( t \right) \left( 1 - \left( \frac{t}{T_s} \right)^R \right) \\ V_{mp,i} \left( t \right) I_{mp,i} \left( t \right) E_i \left( t \right) \left( 1 - \left( \frac{t}{T_s} \right)^R \right) \end{array} \right\}, \quad (20)$$

Dựa trên thông tin của Ui và Si, trong mỗi chuỗi, các kết nối của các khối và mô-đun liên quan có thể được sửa đổi sao cho hầu hết các khối không được tô bóng đều nằm trong cùng một chuỗi trong các khoảng thời gian dài hơn để tối đa hóa công suất đầu ra tổng thể.

Về mặt lý thuyết, công suất tối đa có thể đạt được P<sub>max</sub>(t) tại bất kỳ thời điểm nào t cho hệ thống được lắp đặt tại một cấu hình che nắng nhất định được đưa ra bằng tổng hoạt động điểm công suất cực đại riêng lẻ của tất cả các mô-đun và được đưa ra dưới dạng

$$P_{max} \left( t \right) = \sum_{i=1}^R P_{cal} \left( t \right), \quad (21)$$

Hàm tối ưu hóa được phát triển để giảm thiểu tổng tích lũy của sự khác biệt giữa công suất đạt được tối đa và công suất có thể đạt được thông qua việc kết nối lại các khối trong chuỗi trong khoảng thời gian xác định Ts là

$$\min_{U_i, S_i} \left\{ \sum_{t=1}^{P_{max} \left( t \right)} \left( \frac{t}{T_s} \right)^R \left( \frac{t}{T_s} \right)^R \right\}. \quad (22)$$

Tuân theo các ràng buộc được đưa ra bởi (15)-(19). Bài toán tối ưu hóa này được giải quyết bằng kỹ thuật tối ưu hóa tuyến tính chuẩn trong MATLAB để tìm giá trị Ui và Si cho mỗi chuỗi i. Dựa trên các giá trị tìm được, các kết nối của các mô-đun trong chuỗi được sửa đổi để có được đầu ra tối ưu từ công suất hệ thống đã cài đặt. Sơ đồ hệ thống và một kết nối lại tối ưu sau khi tối ưu hóa đã được thể hiện trong Hình 3 và 4.

4 Yêu cầu về dây dẫn để cấu hình lại các kết nối

Hình 5 cho thấy một trường hợp điển hình của lắp đặt PV với các chiều dài khác nhau (xa-xd) được hiển thị. Dây dẫn bổ sung cần thiết Condx để kết nối tối ưu các tấm pin theo xa, xb, xc và xd có thể được biểu thị dưới dạng hàm số của số lần kết nối lại λ được tính toán thông qua khuôn khổ tối ưu hóa được thảo luận trong Phần 3. Do đó, cần có một dây dẫn bổ sung để có được PR nâng cao thông qua việc kết nối lại giữa các chuỗi của các mô-đun PV được đưa ra như sau

$$Condx = \lambda \left( 2x_d + 4x_a + 2x_b + 2x_c \right), \quad (23)$$

Tổng số dây dẫn Condt cần thiết để đảm bảo hoạt động tối ưu được đưa ra như sau

$$Condt = M \left( 1x_b + \lambda 2x_d + 4x_a + 2x_c \right), \quad (24)$$

trong đó xa là chiều dài từ mặt đất đến tấm trên cùng của hộp nối, xb là chiều dài giữa hai hộp nối của hai tấm kết nối nối tiếp, xc là chiều dài cáp từ một tấm cụ thể đến vỏ bọc được cung cấp để đảm bảo tính toàn vẹn của cáp và xd là chiều dài từ một hàng tấm này đến hàng tấm tiếp theo trong một lắp đặt.

5 Triển khai hệ thống (nghiên cứu tình huống)

Phương pháp đề xuất được thử nghiệm thông qua hệ thống 42,24 kWp được lắp đặt tại Đại học Khoa học Quản lý Lahore (LUMS), Lahore, Pakistan. Trong hệ thống này, ba bộ biến tần trung tâm được kết nối với tám chuỗi (mỗi chuỗi 5,28 kWp) với 22 mô-đun (tấm pin) trên mỗi chuỗi. Trong số ba bộ biến tần, các chuỗi được kết nối với bộ biến tần thứ hai vẫn hoàn toàn không có bóng râm, đóng vai trò là tham chiếu cho các chuỗi khác (bị che bóng) do có tòa nhà lân cận.

Thông số kỹ thuật cho các tấm pin lắp đặt được đưa ra trong Bảng 1 và mô tả hệ thống chi tiết được trình bày trong công trình trước đây của chúng tôi [14].

Góc nhìn từ trên xuống và thiết kế lắp đặt ở cấp tòa nhà của hệ thống được mô tả trong Hình 6 với thiết kế kết nối chuỗi được thể hiện trong Hình 7. Các màu khác nhau trong Hình 7 biểu diễn các chuỗi riêng biệt gồm 22 tấm pin, ví dụ, IJK (màu cam) và FHI (màu xanh lá cây đậm) là hai trong tám chuỗi gồm 22 tấm pin nối tiếp. Các chuỗi DEG (màu xám) là các chuỗi không bị che bóng mọi lúc và đóng vai trò là tham chiếu để xác định đặc tính tổn thất. Cấu trúc chuỗi được cố định và thứ tự được tối ưu hóa để có hiệu suất tốt nhất vào những tháng mùa hè khi ánh sáng mặt trời đạt mức tối đa. Tuy nhiên, kiểu che bóng khác nhau vào mùa đông và do đó hiệu suất của hệ thống giảm xuống.

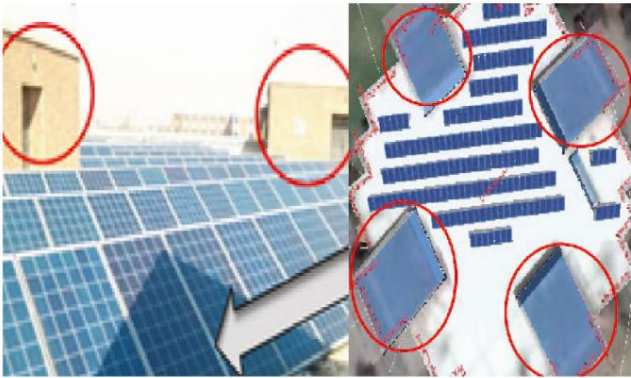
Do đó, một giải pháp tối ưu với kết nối chuỗi tối ưu là chìa khóa để tối đa hóa PR trong suốt cả năm.

6 Kết quả và thảo luận

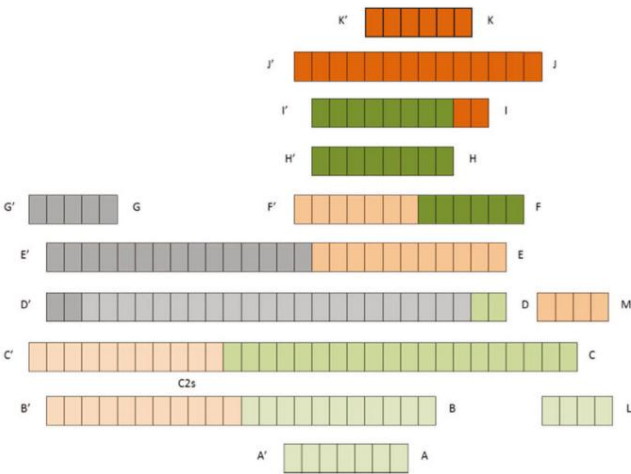
Để định lượng tổng lợi nhuận, điều quan trọng là phải phân tích PR của hệ thống được định nghĩa là

$$\text{Đo công suất AC đầu ra KWh} \\ \text{Sản xuất DC lý thuyết không có tổn thất}, \quad (25)$$

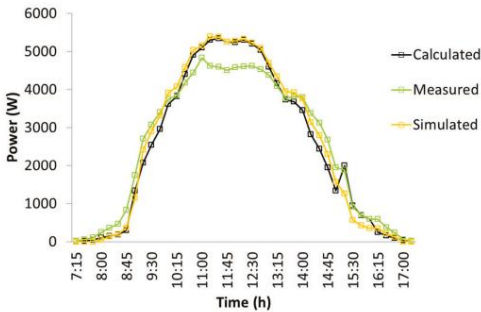
trong đó sản lượng dòng điện một chiều (DC) lý thuyết được tính bằng cách tìm số giờ nắng cao điểm tương đương trong ngày thông qua phép đo cục bộ hoặc thông qua dữ liệu của Phòng thí nghiệm năng lượng tái tạo quốc gia (NREL) [39] khi nhân với công suất bảng tấm pin và số lượng tấm pin sẽ cho sản lượng chuỗi DC lý thuyết mà không bị mất mát. Điều này liên quan đến thực tế



Hình 6. Góc nhìn từ trên xuống (bên trái) và góc nhìn từ trên xuống (bên phải) của công trình lắp đặt tại tòa nhà thư viện LUMS với bốn kết cấu cản trở tạo ra bóng râm nhẹ vào nhiều thời điểm khác nhau trong ngày.



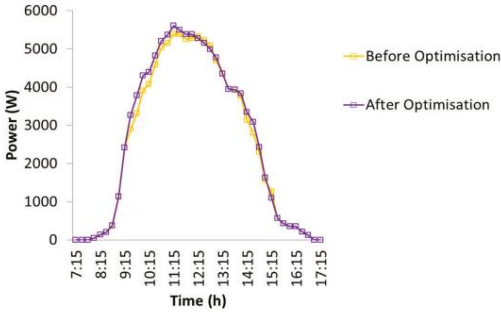
Hình 7. Thiết kế lắp đặt mức Sting cho hệ thống trên mái nhà



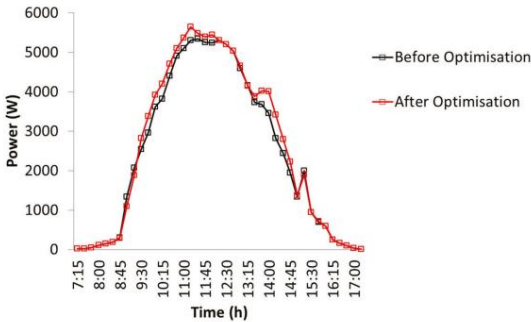
Hình 8. Dữ liệu đo lường ngày mùa đông điển hình cùng với kết quả mô phỏng và tính toán

đơn vị năng lượng được tính toán thêm vào lưu trữ điện (dòng điện xoay chiều) cung cấp PR. Đối với việc triển khai hiện tại, đối với một ngày mùa đông điển hình, công suất do bộ biến tần (kết hợp hai chuỗi toàn bộ) tạo ra được hiển thị trong Hình 8 cùng với dữ liệu mô phỏng (PSIM) và tính toán (mô hình phân tích được thảo luận trong Phần 2). Dữ liệu đầu ra và độ rớt được đo từ ứng dụng với các quan sát được lấy theo khoảng thời gian 15 phút thông qua hệ thống ghi dữ liệu. Việc tính trung bình này, cùng với các biến thể trong các giá trị độ rớt bóng râm do phản xạ từ các mặt lân cận, giải thích cho sự khác biệt nhỏ giữa các kết quả đo được và mô phỏng/tính toán trong Hình 8.

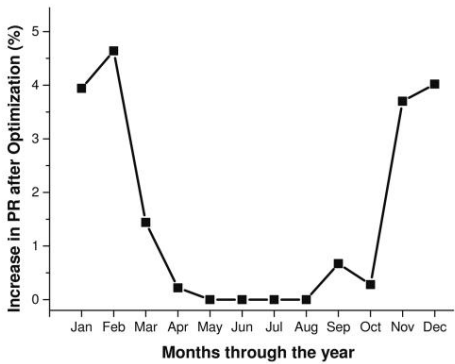
Hệ số bóng râm trung bình trên các tấm pin khác nhau có thể thay đổi do phản xạ của môi trường xung quanh và do đó có thể quan sát thấy một số biến thể. Các mô phỏng được thực hiện bằng phần mềm PSIM để đánh giá hiệu suất hệ thống đối với kiểu đồ bóng được quan sát. Bóng đổ thay đổi được thêm vào mô phỏng thông qua C-Block tạo ra độ rớt khác nhau cho mô-đun vật lý mặt trời trong phần mềm. Dữ liệu về nhiệt độ cũng được thêm vào C-block. Kết quả phân tích đã đạt được bằng cách sử dụng mô hình được xây dựng trong Phần 2. Sau khi thực hiện tối ưu hóa bằng cách sử dụng khuôn khổ



Hình 9. Công suất đầu ra của biến tần PV (mô phỏng) cho đường cơ sở so với cấu trúc chuỗi đã sửa đổi cho một ngày mùa đông điển hình



Hình 10. Công suất đầu ra của biến tần PV (được tính toán phân tích) cho đường cơ sở so với cấu trúc chuỗi đã sửa đổi trong một ngày mùa đông thông thường



Hình 11. Cải thiện PR sau khi đề xuất thay đổi chuỗi trong thời gian 12 tháng

được thảo luận trong Phần 3 đối với hai chuỗi được tô bóng, sự sắp xếp lại mạng lại công suất đầu ra cao hơn cho một ngày thông thường như thể hiện trong Hình 9 và 10.

Để định lượng mức tăng hàng năm, chúng tôi đánh giá PR (trên cơ sở hàng tháng) được hiển thị trong Hình 11. Điều này được thực hiện thông qua mô hình hóa cấu trúc tòa nhà cùng với các vật cản trong dữ liệu PVSOL premium và dữ liệu bức xạ được lấy từ NREL [39]. Khi đã biết các mẫu bóng râm, có thể thực hiện xử lý theo đó. Không giống như các lược đồ chủ động (chẳng hạn như mảng có thể định cấu hình lại yêu cầu thông tin thời gian thực để xử lý), công việc của chúng tôi dựa trên xử lý ngoại tuyến (với các tài nguyên điện toán tiêu chuẩn) của thông tin để thay đổi chuỗi một lần. Kết quả cho thấy mức tăng cao hơn trong PR (lên đến 4,6%) vào những tháng mùa đông vì hệ thống gặp phải bóng râm lớn trong những tháng này. Tuy nhiên, việc xâu lại chuỗi không có tác động tiêu cực đến những tháng mùa hè chủ yếu là do thực tế là bóng râm là tối thiểu trong những tháng này.

Điều quan trọng cần lưu ý là đây dẫn bổ sung cần thiết để đạt được PR năng cao này được tính toán thông qua (23). Nhìn chung, tính khả thi của phương án tối ưu hóa được đề xuất có thể được đánh giá thông qua việc so sánh chi phí liên quan đến dây dẫn bổ sung và khoản tiết kiệm liên quan đến việc sử dụng tăng cường hệ thống hòa lưới sau khi tối ưu hóa. Khoản tiết kiệm có thể được tính bằng cách nhân chi phí trên một đơn vị (\$/kWh) điện với hiệu số của một số đơn vị được tạo ra sau và trước khi tối ưu hóa. Do đó, thời gian hoàn vốn cho chi phí của dây dẫn cũng có thể được tính toán.



Đối với lắp đặt hiện tại, cần thêm một dây dẫn dài 63,4 m để tạo ra các kết nối tối ưu, trong khi khoảng 114 đơn vị bổ sung (kWh/năm) sẽ được tạo ra sau khi tối ưu hóa. Do đó, khi tính đến giá điện rẻ (\$0,15/kWh), thời gian hoàn vốn cho chi phí thêm của dây dẫn (khoảng 1\$/m) sẽ là <4 năm đối với lắp đặt này. Tương tự như vậy, đối với bất kỳ lắp đặt nào khác, phải thực hiện phân tích này cho bất kỳ khả năng sắp xếp lại nào dựa trên kết quả của quá trình tối ưu hóa được thảo luận trong Phần 3 để có được hiệu quả tối đa từ hệ thống.

7 Kết luận

Tổn thất do che bóng một phần không tỷ lệ thuận với diện tích che bóng mà phụ thuộc vào kiểu che bóng, cấu hình mảng và vị trí vật lý của các mô-đun che bóng trong mảng. Vì kiểu che bóng thay đổi trong suốt cả năm, do vị trí tương đối của mặt trời, nên bóng râm trên các tấm pin thay đổi ảnh hưởng đến PR của hệ thống. Chúng tôi phân tích tổn thất do che bóng cho hệ thống PV biến tần trung tâm và đánh giá mức tăng PR do việc lắp lại chuỗi nhỏ các tấm pin lân cận. Trong quá trình lắp đặt của chúng tôi, sơ đồ này tạo ra PR cao hơn tới 4,6% vào mùa đông trong khi PR tăng nhẹ vào những tháng mùa hè.

Công trình này đặc biệt có liên quan đến việc triển khai trên mái nhà dân dụng, nơi mà sự suy giảm PR thường được quan sát thấy do mất bóng râm một phần.

8 Lời cảm ơn

Hassan Khan muốn ghi nhận sự hỗ trợ của (a) khoản tài trợ LUMS FIF (216) cho việc tài trợ RA và (b) HEC, Pakistan cho việc tài trợ hội nghị ban đầu (252.102).

9 Tài liệu tham khảo

[1] Harijan, K., Uqaili, MA, Mirza, Vũ ơng quốc Anh: 'Đánh giá tiềm năng phát điện mặt trời PV ở Pakistan', J. Clean Energy Technol., 2015, 3, tr. 54-56

[2] Li, D., Liu, G., Liao, S.: 'Tiềm năng năng lượng mặt trời trong các tòa nhà dân cư đô thị', Sol. Năng lượng, 2015, 111, trang 225-

[3] 235 Sahu, BK: 'Một nghiên cứu về sự phát triển và chính sách năng lượng mặt trời PV toàn cầu, đặc biệt tập trung vào môi trường quốc gia sản xuất điện mặt trời PV hàng đầu', Renew. Sustain. Energy Rev., 2015, 43, tr. 621-634

[4] Khan, J., Arsalan, MH: 'Công nghệ năng lượng mặt trời để tạo ra điện bền vững - một bài đánh giá', Renew. Sustain. Energy Rev., 2016, 55, tr. 414-425

[5] Hirth, L.: 'Giá trị thị trường của năng lượng mặt trời: quang điện có cạnh tranh về chi phí không?', IET Renew. Power Gener., 2015, 9, tr. 37-45 Nordmann, T., Clavadetscher, L.: 'Hiệu được tác động của nhiệt độ lên hiệu suất của hệ thống PV'. Proc. Hội nghị thế giới lần thứ 3 về Chuyển đổi Năng lượng Quang điện, 2003, 2003, trang 2243-2246 Khan, HA, Pervaiz, S.: 'Đánh giá công nghệ về PV mặt trời ở Pakistan: phạm vi, thực hành và khuyến nghị để thiết kế hệ thống tối ưu', Renew. Sustain. Energy Rev., 2013, 23, tr. 147-154

[8] Pervaiz, S., Khan, HA: 'Định lượng tổn thất bức xạ thấp trong các tấm pin c-Si cho hệ thống quang điện', J. Renew. Sustain. Energy, 2015, 7, tr.

[9] 013129 Thevenard, D., Pelland, S.: 'Ước tính sự không chắc chắn trong dự đoán sản lượng quang điện dài hạn', Sol. Energy, 2013, 91, tr. 432-445

[10] de Wild-Scholten, M., Alsema, E., Ter Horst, E., et al.: 'So sánh chi phí và tác động môi trường của các hệ thống PV trên mái nhà và trên mặt đất được kết nối với lưới điện'. Hội nghị Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 21, 2006, tr. 3167-3173

[11] Mundada, AS, Shah, KK, Pearce, J.: 'Chi phí điện bình quân cho các hệ thống lai quang điện mặt trời, pin và đồng phát', Renew. Sustain. Energy Rev., 2016, 57, trang 692-703

[12] Pervaiz, S., Khan, HA, Qureshi, MA: 'Góc nhìn thực tế về các hệ thống PV hòa lưới trong các lưới điện có độ tin cậy thấp'. Hội nghị chuyên gia quang điện lần thứ 40 của IEEE (PVSC) năm 2014, 2014, trang 1969-1972 [13] Wang, YJ, Hsu, PC: 'Mô hình phân tích về bóng râm một phần và hướng khác nhau của các mô-đun quang điện', IET Renew. Power Gener., 2010, 4, trang[39] 272-282

[14] Ahmed, J., Salam, Z.: 'Đánh giá quan trọng về các phương pháp theo dõi điểm công suất cực đại cho bóng râm một phần trong hệ thống PV', Renew. Sustain. Energy Rev., 2015, 47, trang 933-953 Batzelis, EI, Georgilakis, PS, Papathanassiou, SA: 'Các mô hình năng lượng cho hệ thống quang điện trong điều kiện bóng râm một phần: đánh giá toàn diện', IET Renew. Power Gener., 2015, 9, trang 340-349 Deline, C.: 'Hoạt động bóng râm một phần của hệ thống PV hòa lưới'. 2009 Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 34 (PVSC), 2009, trang 001268-001273 Bulanyi, P., Zhang, R.: 'Phân tích và cải thiện bóng râm cho hệ thống quang điện hòa lưới phân tán tại khu dân cư'. Solar 2014, 2014 [18] Lamont, LA, El Chaar, L.: 'Nâng cao hiệu suất của hệ thống quang điện độc lập: giảm bóng râm mềm và cứng', Renew. Energy, 2011, 36, trang 1306-1310

[19] Ramli, MA, Prasetyono, E., Wicaksana, RW, et al.: 'Về việc điều tra tình trạng giảm công suất đầu ra của quang điện do bụi tích tụ và điều kiện thời tiết', Renew. Energy, 2016, 99, trang 836-844

[20] Zaihidee, FM, Mekhilef, S., Seyedmahmoudian, M., et al.: 'Bụi là yếu tố gây suy thoái không thể thay đổi ảnh hưởng đến hiệu suất của tấm pin PV: tại sao và như thế nào', Renew. Sustain. Energy Rev., 2016, 65, tr. 1267-1278 Chaaban, MA, El Chaar, L., Alahmad, M.: 'Một cấu trúc quang điện thích ứng để khắc phục hiệu ứng che bóng trong các hệ thống PV', Int. J. Photoenergy, 2015, 2015, tr. 1-9 Hasan, M., Parida, S.: 'Tổng quan về mô hình hóa tấm pin quang điện mặt trời trên quan điểm phân tích và thực nghiệm', Renew. Sustain. Energy Rev., 2016, 60, tr. 75-83 [23] La Manna, D., Vigni, VL, Sanseverino, ER, et al.: 'Các chiến lược kết nối điện có thể định cấu hình lại cho các mảng quang điện: một bài kiểm tra', Renew. Sustain. Energy Rev., 2014, 33, trang 412-

[24] 426 Kaushika, ND, Gautam, NK: 'Mô phỏng năng suất năng lượng của các mảng PV mặt trời được kết nối', IEEE Trans. Energy Convers., 2003, 18, trang 127-134 El-Dein, MS, Kazerani, M., Salama, M.: 'Một kết nối chéo tổng thể tối ưu để giảm tổn thất không khớp trong các mảng quang điện', IEEE Trans. Sustain. Energy, 2013, 4, trang 99-107

[26] Wang, Y.-J., Lin, S.-S.: 'Phân tích một mảng PV được che bóng một phần khi xem xét các sơ đồ kết nối mô-đun khác nhau và tác động của diốt bỏ qua'. 2011 Int. Hội nghị và Triển lãm Tiên ích về Hệ thống Điện và Năng lượng: Các vấn đề và Triển vọng cho Châu Á (ICUE), 2011, trang 1-7 El-Dein, MS, Kazerani, M., Salama, M.: 'Cấu hình lại mảng quang điện tối ưu để giảm tổn thất do che bóng một phần', IEEE Trans. Sustain. Năng lượng, 2013, 4, trang 145-

153 [28] Nguyen, D., Lehman, B.: 'Một mảng quang điện mặt trời thích ứng sử dụng thuật toán cấu hình lại dựa trên mô hình', IEEE Trans. Ind. Electron., 2008, 55, trang 145-153. 2644-2654

[29] Spagnuolo, G., Petrone, G., Lehman, B., et al.: 'Kiểm soát các mảng quang điện: cấu hình lại động để chống lại các điều kiện không phù hợp và đáp ứng các yêu cầu về tải', IEEE Ind. Electron. Mag., 2015, 9, trang 62-76

[30] Storey, JP, Wilson, PR, Bagnall, D.: 'Chiến lược tối ưu hóa được cải thiện để cân bằng công suất bức xạ trong các mảng quang điện động', IEEE Trans. Power Electron., 2013, 28, trang 2946-2956 Niranjan, DS, Dhale, S., Mukherjee, J., et al.: 'Cấu hình lại mảng quang điện mặt trời trong điều kiện che bóng một phần để khai thác công suất tối đa bằng thuật toán di truyền', Renew. Sustain. Energy Rev., 2015, 43, tr. 102-110

[32] Rani, BI, Ilango, GS, Nagamani, C.: 'Tăng cường sản xuất điện từ mảng PV trong điều kiện che bóng một phần bằng cách phân tán bóng râm sử dụng cấu hình Su Do Ku', IEEE Trans. Sustain. Energy, 2013, 4, tr. 594-601

[33] Chin, CS, Neelakantan, P., Yang, SS, et al.: 'Ảnh hưởng của điều kiện che bóng một phần đến khả năng theo dõi điểm công suất cực đại của mảng quang điện', IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58, tr. 52-59 [34] Wang, Y., Li, Y., Ruan, X.: 'Các phương pháp MPPT tốc độ nhanh và độ chính xác cao cho chuỗi PV trong điều kiện che bóng một phần', IEEE Trans. Ind. Electron., 2016, 63, tr. 235-245 Nasir, M., Zia, MF: 'Thuật toán theo dõi điểm công suất cực đại toàn cầu cho các hệ thống quang điện trong điều kiện che bóng một phần'. Hội nghị và Triển lãm Điện tử công suất và Điều khiển chuyển động quốc tế lần thứ 16 (PEMC), 2012, tr. 667-672

[36] Solanki, CS: 'Điện mặt trời quang điện: cơ bản, công nghệ và ứng dụng' (PHI Learning Pvt. Ltd, Ấn Độ, 2015)

[37] Ding, K., Zhang, J., Bian, X., et al.: 'Một mô hình đơn giản hóa cho các mô-đun quang điện dựa trên các phương trình chuyển dịch được cải thiện', Sol. Energy, 2014, 101, trang 40-52 Rana, AS, Khan, HA: 'Tối ưu hóa cấp độ chuỗi trên các hệ thống PV mặt trời hòa lưới để giảm thiểu tổn thất điện năng do che bóng mềm'. Hội nghị quốc tế IET lần thứ 5 về Sản xuất điện tái tạo, Cơ sở dữ liệu bức xạ mặt trời quốc gia (NSRDB) năm 2016. <https://nsrdb.nrel.gov/>