

# Định lượng và mô hình hóa tác động của lỗi kết nối trên Hiệu suất điện của mô-đun quang điện silicon tinh thể

Eleonora Annigoni<sup>1</sup> , Alessandro Virtuani<sup>1</sup> , Jacques Levrat<sup>2</sup>,Antonin Faes<sup>2</sup> ,  
Matthieu Despeisse<sup>2</sup> , Christophe Ballif<sup>1,2</sup>

1 Viện Công nghệ Liên bang Thụy Sĩ tại Lausanne (EPFL), Viện Kỹ thuật vi mô (IMT), Phòng thí nghiệm Điện tử màng mỏng và quang điện (PVLAB), 2000 Neuchâtel, Thụy Sĩ  
<sup>2</sup> CSEM, PV-center, 2000 Neuchâtel, Thụy Sĩ

Tóm tắt – Chúng tôi trình bày một mô hình điện được phát triển với LT-SPICE mô phỏng hiệu suất của một chuỗi các ô bị ngắt kết nối trong mạch điện. Trong một bài viết trước, chúng tôi đã định lượng bằng thực nghiệm cách hiệu suất của mô-đun bị ảnh hưởng khi một hoặc nhiều dải ruy băng bị cắt hoặc ngắt kết nối giữa các ô. Các phép đo được thực hiện trên các mô-đun nhỏ (chuỗi) gồm sáu ô, được kết nối nối tiếp bằng ba dải ruy băng kết nối. Ở đây, chúng tôi sử dụng các kết quả thực nghiệm này để xác thực

mô hình. Kết quả cho thấy mô hình của chúng tôi có khả năng mô tả tốt sự suy giảm công suất do ngắt/loại bỏ các dải liên kết tế bào và tái tạo hình dạng đặc biệt của các đường cong IV của một chuỗi bị ảnh hưởng bởi sự phân bố không đồng nhất của điện trở nối tiếp trong một số tế bào.

Thuật ngữ chỉ mục – Mô-đun PV, lỗi kết nối, thanh cái, mô hình điện, độ tin cậy, silicon tinh thể.

## I. GIỚI THIỆU

Sự gia tăng điện trở nối tiếp thường được quan sát thấy trong các nhà máy quang điện (PV) [1]. Nó có thể là biểu hiện của các cơ chế suy thoái khác nhau. Ví dụ, ứng suất gây ra trên vật liệu do môi nhiệt cơ học tích tụ (chu kỳ nhiệt, tải trọng gió hoặc tuyết.) thường ảnh hưởng đến các mối hàn giữa dải liên kết cell và thanh cái cell. Trong một số trường hợp, mối có thể gây đứt hoàn toàn các dải và ngắt kết nối hoàn toàn khỏi mạch. Hơn nữa, các liên kết hàn điện trở, cùng với các vết nứt cell, là một trong những nguyên nhân gây ra các điểm nóng ([2] và [3]). Trong khảo sát tài liệu mở rộng về độ tin cậy tại hiện trường của mô-đun PV được công bố vào năm 2016 bởi Jordan và cộng sự [4], các điểm nóng và sự đổi màu mạch bên trong (do ăn mòn) có liên quan đến tổn thất điện năng cao và được phân loại là mối quan tâm cao nhất đối với các hệ thống PV được lắp đặt trong 10 năm qua.

Độ tin cậy của các dải liên kết đã ngày càng được chú ý nhiều hơn trong vài năm trở lại đây. Nhiều tác giả đã nghiên cứu hành vi mối của các dải, bằng các phương tiện như thử nghiệm mối (xem [5] trong số những cái khác). Trong [6], Bosco et al. đề xuất một số chu kỳ nhiệt phụ thuộc vào khí hậu (theo IEC 61215) như một bài kiểm tra ứng suất cho các mô-đun để có được lượng hư hỏng mối hàn tương đương như ước tính bằng mô phỏng Phương pháp phần tử hữu hạn.

Tuy nhiên, theo hiểu biết của chúng tôi, không có nghiên cứu thực nghiệm nào đánh giá trực tiếp tác động của các kết nối bị hỏng đối với sự suy giảm các thông số điện. Công trình này là sự tiếp nối

của nghiên cứu được trình bày trong [7], trong đó chúng tôi định lượng bằng thực nghiệm tác động của một hoặc nhiều dải ruy băng bị ngắt kết nối về hiệu suất điện của một mô-đun. Ở đây, chúng tôi sử dụng những các phép đo để xác nhận mô hình điện, được triển khai trong LT-SPICE có khả năng mô phỏng hiệu suất của một mô-đun trình bày các dải kết nối bị hỏng.

## II. CÔNG TRÌNH THỰC NGHIỆM

Đối với công việc thử nghiệm, như cũng được mô tả trong [7], chúng tôi đã cán mỏng hai chuỗi bằng nhau, mỗi chuỗi có sáu tế bào năng lượng mặt trời (trường bề mặt sau bằng Al) được kết nối nối tiếp với các dải đồng 1,70 x 0,17 mm được phủ Sn62Pb36Ag2. Các tế bào là đơn sắc tinh thể, gốc p, có ba thanh cái. Chúng được đóng gói bằng cấu trúc kính/tấm nền với etylen-vinyl axetat

tấm ethylene tetrafluoroethylene (ETFE). Lớp mỏng như vậy có thể dễ dàng cắt và do đó cho phép cắt ruy băng đã chọn mà không có nguy cơ làm hỏng các ô liên kề. Sau đó, chúng tôi cắt một số ruy băng đã chọn ở các vị trí khác nhau trong chuỗi để đánh giá tác động đến hiệu suất.

Các dây được mô tả ban đầu và sau mỗi bước bằng phép đo đường cong IV với bộ mô phỏng mặt trời dựa trên đèn LED-halogen mô phỏng phổ AM1.5. Điện trở nối tiếp (Rs) của dây được trích xuất bằng phép khớp tuyến tính gần với điện áp mạch hở. Chúng tôi sử dụng giá trị thu được, Roc, thường cao hơn giá trị thực của Rs của mô-đun nhỏ, làm giá trị xấp xỉ cho Rs.

## III. MÔ HÌNH ĐIỆN

Mô hình của chúng tôi trong LT-SPICE mô tả mỗi ô 3 thanh cái là một mạng lưới gồm 3 ô con song song (xem Hình 1). Mỗi ô con được mô hình hóa bằng phương trình hai diode.

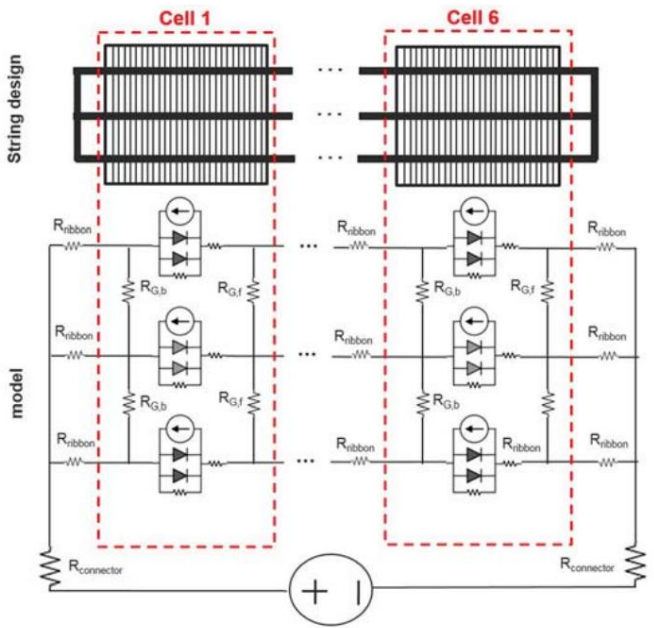
Để tính đến các đường dẫn điện mới sau khi cắt băng, điện trở nối tiếp của cell được xử lý bằng cách tách các đóng góp khác nhau thành hai. Các đóng góp do điện trở lưới bên trước và sau (RGf và RGb)

được tô sáng và thể hiện riêng biệt trong mạch. Thật vậy, vì chúng liên quan đến vận chuyển ngang, chúng có liên quan khác nhau khi một đường dẫn ruy băng bị thiếu. Các đóng góp khác (ví dụ như điện trở nối tiếp khối), thể hiện

điện trở bên trong tế bào, thay vào đó được giữ lại trong điện trở nối tiếp xuất hiện trong mô hình hai diode.

Điện trở nối tiếp do ribbon cung cấp được mô hình hóa thông qua thuật ngữ Ribbon . Cuối cùng, hai điện trở (Rconnector) được đưa vào để mô hình hóa các đầu nối được sử dụng để đo đường cong IV của các mô-đun.

Các thông số diode được trích xuất theo thực nghiệm bằng cách đo một trong các ô của chuỗi. Từ sự phù hợp phi tuyến tính của đường cong IV, chúng tôi đã thu được các thông số diode sau:  $J_{01} = 5.210-10A/cm^2$  ,  $J_{02} = 1,110-5A/cm^2$  ,  $R_{sh}$  cm2 . Điện trở nối tiếp bên trong (không có sự đóng góp của lưới) được lấy từ việc lắp đặt mô-đun đầy đủ có kích thước cm2 . Vì ô là đơn mặt,  $R_{G,f}$  tạo ra  $R_s$  tương ứng với điện trở giữa hai thanh cái phía trước và  $R_{G,b}$  tương ứng với giá trị điện trở chặn kim loại phía sau giữa hai dải băng phía sau. Phép đo bốn đầu cuối tạo ra  $R_{G,f} = 25\ \Omega$ , chúng được mô hình hóa bằng một giá trị  $G,b$  đóng góp Ribbon duy nhất Các tham số có thể điều chỉnh duy nhất là Rconnector được tạo ra bởi các đầu nối cá sấu được sử dụng trong phép đo IV và không thể đo được. Dữ liệu thực nghiệm được khớp chính xác với Rconnector



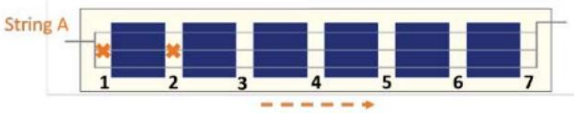
Hình 1. Sơ đồ mô hình điện được phát triển trong LT-SPICE để mô phỏng hiệu suất của một chuỗi có các dải kết nối bị lỗi. Các ô từ 2 đến 5 bị bỏ qua trong hình này.

IV. KẾT QUẢ

Trong các phần sau, chúng tôi trình bày kết quả mô phỏng và so sánh với kết quả thử nghiệm được trình bày trong [7] để xác nhận mô hình của chúng tôi.

A. Một Ribbon bị ngắt kết nối trên mỗi ô

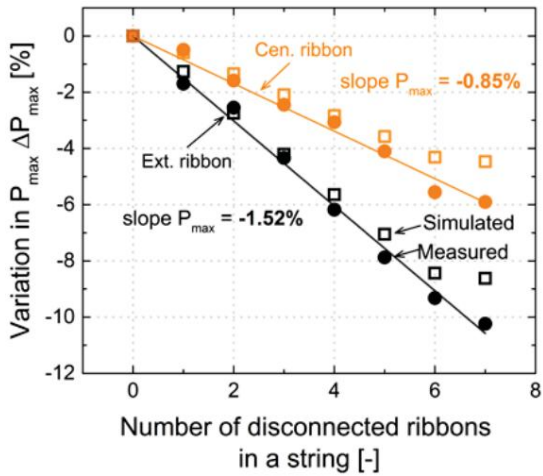
Chúng ta hãy xem xét trường hợp ngắt kết nối liên quan đến một dải ruy băng trên mỗi ô và so sánh tác động lên hiệu suất điện của mô-đun khi dải ruy băng bên ngoài (Ext.) bị hỏng so với dải ruy băng trung tâm (Cen.). Hình 2 hiển thị sơ đồ của một trong những chuỗi được sử dụng cho công việc thử nghiệm này. Các vị trí mà các dải ruy băng bị cắt được biểu thị bằng các số (1,..,7).



Hình 2. Sơ đồ một trong sáu chuỗi tế bào được sử dụng cho công việc thực nghiệm. Trong trường hợp này, dải ruy băng trung tâm (Cen.) được cắt giữa các tế bào liên tiếp (từ điểm 1 theo trình tự đến điểm 7). Cùng một loại dây được sản xuất để phân tích trường hợp một trong hai dải ruy băng bên ngoài (Ext.) bị loại bỏ (Chuỗi B, được hiển thị trong Hình 4).

Do sự khác biệt giữa điện trở lưới bên trước và sau ( $R_{G,f}$  và  $R_{G,b}$ ), nếu dải ruy băng ở mặt trước được cắt trước thì hiệu suất giảm nhiều hơn so với khi dải ruy băng ở mặt sau được cắt trước. Do đó, điều quan trọng cần lưu ý là các dải ruy băng đã được ngắt kết nối bắt đầu từ mặt trước của ô.

Hình 3 cho thấy sự thay đổi công suất cực đại ( $P_{max}$ ) của toàn bộ chuỗi sau khi loại bỏ dần từng dải ruy băng một từ điểm 1 đến điểm 7, khi đo (ký hiệu hình tròn đầy đủ) và mô phỏng (ký hiệu hình vuông mở).



Hình 3. Sự thay đổi của  $P_{max}$  so với các giá trị ban đầu (không ngắt kết nối) theo hàm số của số lần cắt tích lũy. Ví dụ, hai dải ruy băng bị ngắt kết nối có nghĩa là dải ruy băng đã bị ngắt kết nối ở cả vị trí 1 và 2 (xem Hình 2). Sự thay đổi của các giá trị mô phỏng (ô vuông mở) theo sát các giá trị được đo (hình tròn đầy đủ). Các đường thẳng là đường thẳng phù hợp với các giá trị được đo.

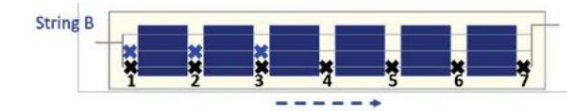
Từ công trình thực nghiệm, đầu tiên chúng tôi quan sát thấy rằng Pmax tổn thất hoàn toàn là do tổn thất trong FF. Dòng điện ngắn mạch và giá trị điện áp mạch hở vẫn không thay đổi sau khi ngắt kết nối các dải băng. Hơn nữa, sự suy thoái phụ thuộc vào vị trí của ruy băng trong chuỗi. Tác động lớn hơn đến tổn thất điện năng thực sự được đo lường khi ruy băng bên ngoài, thay vì ruy băng trung tâm, bị ngắt kết nối, với tổn thất điện năng trên mỗi lần cắt lần lượt là -1,51% và -0,85%.

Mô phỏng của chúng tôi tái tạo sự thay đổi của Pmax và FF (biến thể cuối cùng không được hiển thị trên sơ đồ vì lý do rõ ràng) phù hợp với kết quả thực nghiệm, với sai số tương đối luôn nhỏ hơn (theo giá trị tuyệt đối) 1% đối với Pmax và 0,50% đối với FF.

B. Hai Ruy-băng Không Kết Nối Trên Mỗi Ô

Mô-đun nhỏ được sử dụng cho cấu hình trong đó dải băng bên ngoài được cắt (Chuỗi B) sau đó được sử dụng để nghiên cứu trường hợp dải băng thứ hai (dải băng ở giữa) được tháo ra, xem Hình 4.

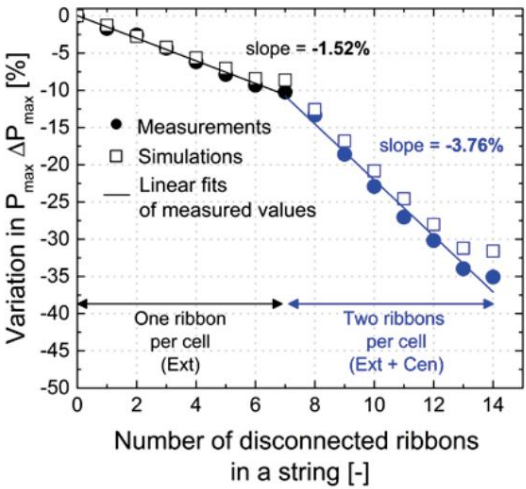
Biến thể đo được trong Pmax được hiển thị trong Hình 5 (hình tròn đầy đủ), cùng với các đường phù hợp. Ở đây, các vết cắt ở trung tâm ribbon được vẽ liên tiếp với các lần cắt trước đó trong ribbon ngoài (tức là một lần cắt ở vị trí n trong ribbon trung tâm tương ứng với tọa độ x 7+n). Các phép đo cho thấy rằng, sau khi ribbon ngoài được loại bỏ hoàn toàn (các chấm đen), mỗi lần cắt trong ribbon trung tâm (các chấm xanh) làm giảm Pmax 3,76% (Hình 5). Thay vào đó, với ribbon ngoài vẫn được kết nối, tổn thất công suất chỉ là 0,85%/lần cắt (Hình 3).



Hình 4. Sơ đồ của Chuỗi B, được sử dụng cho trường hợp hai dải ruy băng không kết nối trên mỗi ô. Đầu tiên, dải ruy băng bên ngoài được cắt tuần tự, sau đó dải ruy băng thứ hai trên mỗi ô (dải ruy băng ở giữa) được tháo tuần tự (8 đến 14), mỗi ô một lần.

Trong trường hợp này cũng vậy, sự thay đổi của các thông số điện theo hàm số của các vết cắt tích lũy thu được từ mô phỏng của chúng tôi (hình vuông mở) tuân theo một xu hướng tái tạo tốt các phép đo. Chúng tôi chỉ hiển thị trong Hình 5 sự thay đổi trong Pmax, xu hướng giữa thử nghiệm và mô phỏng đối với các thông số có liên quan khác như hệ số lấp đầy hoặc Rs là tương tự. Đặc biệt, mô hình mô phỏng sự thay đổi trong độ dốc Pmax xảy ra ngay khi dải trung tâm bắt đầu bị ngắt kết nối

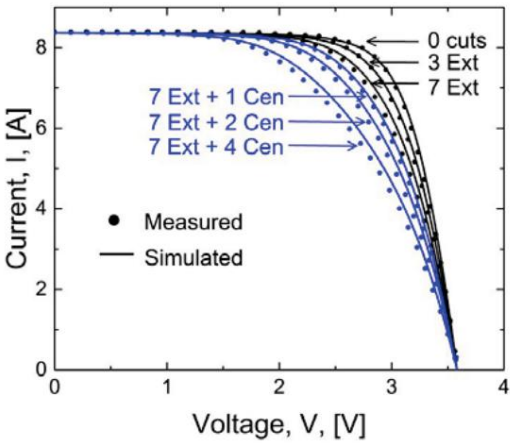
cũng vậy.



Hình 5. Sự thay đổi của Pmax so với các giá trị ban đầu (tất cả các dải ruy băng được kết nối) theo số lần cắt tích lũy, được đo lường và mô phỏng.

Sự chồng chéo giữa các đường cong IV mô phỏng và đo được cũng tốt (xem Hình 6). Điều đáng chú ý là mô hình không chỉ có thể tái tạo sự thay đổi trong độ dốc đường cong gần điểm mạch hở (tương quan với Rs) mà còn có thể tái tạo sự làm tròn tại điểm công suất cực đại điển hình của trường hợp chỉ một phần của ô bị ảnh hưởng bởi điện trở nối tiếp cao và một phần của ô thì không (sự gia tăng không đồng nhất của Rs trong mô-đun). Hiệu ứng này đã được giải thích trong [8]. A

độ lệch được quan sát thấy đối với số lượng vết cắt lớn, tức là khi có độ lệch lớn so với hành vi lý tưởng của dây. Vấn đề này được thảo luận trong Phần V.



Hình 6. Đường cong IV cho một cấu hình trong đó hai dải ruy băng được loại bỏ trên mỗi ô. Đường cong màu đen: cắt dải ruy băng bên ngoài. Đường cong màu xanh: dải ruy băng bên ngoài được loại bỏ hoàn toàn (điểm 1 đến 7) và dải ruy băng ở giữa cũng được cắt.

Cuối cùng, chúng tôi sử dụng mô hình để chứng minh rằng các kết quả thử nghiệm thu được trên chuỗi sáu cell có thể mở rộng bất kể số lượng cell được kết nối tuần tự trong một chuỗi. Ví dụ (các mô phỏng này không được hiển thị ở đây), nếu một dải băng bên ngoài bị ngắt kết nối khỏi tất cả các cell trong chuỗi 12 hoặc 18 cell, thì tổng mức mất điện sẽ xấp xỉ -10%, cùng mức thu được trong Hình 3 đối với chuỗi sáu cell.

V. THẢO LUẬN

Mô hình của chúng tôi cho thấy giới hạn của nó khi điện trở nối tiếp cảm ứng trở nên rất cao, đặc biệt là khi hai dải ruy băng bị ngắt kết nối trên mỗi ô. Biểu diễn đơn giản này của ô như 3 ô con song song và được kết nối bằng điện trở lưới bên không đủ để tái tạo đầy đủ phân phối điện áp giữa các đầu cuối. Tuy nhiên, sự phù hợp tốt giữa cách tiếp cận của chúng tôi và các phép đo, ngay cả khi thiếu hai dải ruy băng, là điều đáng khích lệ và chỉ ra rằng các cơ chế vật lý chính đã được nắm bắt.

Mô hình này, đã được xác thực bằng thực nghiệm, có thể được mở rộng để mô phỏng những tình huống ít cực đoan hơn so với các dải băng bị đứt, chẳng hạn như điện trở nối tiếp tăng do các mối hàn điện trở. Hơn nữa, nó có thể được điều chỉnh cho các sơ đồ kim loại hóa mới như các ô có nhiều thanh cái hơn hoặc các công nghệ kết nối tiên tiến (ví dụ: Công nghệ kết nối SmartWire SWCT® của Meyer Burger, [9]). Sau đó, nó sẽ là một công cụ mạnh mẽ để mô phỏng các mô-đun có kết nối bị lỗi và dự đoán tác động của các lỗi như vậy trong các công nghệ kết nối mới.

VI. KẾT LUẬN

Chúng tôi bắt đầu từ một công trình trước đó, trong đó tác động của các dải liên kết bị hỏng lên hiệu suất công suất của mô-đun PV được định lượng theo thực nghiệm [7]. Một số phát hiện bao gồm sự phụ thuộc mạnh mẽ của tổn thất công suất vào vị trí của dải trong chuỗi (trung tâm hoặc bên ngoài). Khi chúng tôi cắt một dải tuần tự giữa các ô liên kề, công suất của chuỗi giảm tuyến tính ở mỗi lần cắt. Chúng tôi định lượng độ dốc của Pmax là -1,52%/lần cắt nếu dải bên ngoài bị loại bỏ, trong khi chỉ là -0,85%/lần cắt nếu các lần cắt ở trung tâm

ruy-băng.

Ở đây, chúng tôi trình bày một mô hình mô phỏng hiệu suất điện của một chuỗi với các dải ruy băng bị ngắt kết nối. Mô hình như vậy, được phát triển trong LT-SPICE, coi cell là ba subcell được kết nối song song (ba là số busbar cell), mỗi subcell được mô tả bằng mô hình hai diode. Các đóng góp cho Rs do các sóng mang bên truyền tải trên lưới (điện trở lưới trước và sau) được xử lý riêng biệt với Rs của mô hình hai diode, để tính đến các đường dẫn điện mới khi một hoặc nhiều dải bị thiếu.

Có sự thống nhất tốt giữa các mô phỏng và phép đo. Sự thay đổi tương đối trong Pmax (cũng như FF và Rs, không được hiển thị ở đây) sau mỗi lần cắt được tái tạo tốt. Hơn nữa, các đường cong IV mô phỏng bám sát các đường cong đã đo, đồng thời cũng mô phỏng quá trình làm tròn tại điểm công suất cực đại.

diễn hình của sự phân bố không đồng nhất của Rs trong các tế bào. Độ lệch lớn hơn được quan sát thấy trong các giá trị mô phỏng khi tăng số lần cắt (tức là độ lệch so với hành vi lý tưởng) và những hạn chế của phương pháp này để nghiên cứu các trường hợp cực đoan như vậy sẽ được thảo luận ngắn gọn.

Sau đó, chúng tôi sử dụng các mô phỏng để chứng minh rằng các kết quả thử nghiệm có thể mở rộng bất kể số lượng ô được kết nối nối tiếp. Trường hợp ngắt kết nối được phân phối ngẫu nhiên trong mô-đun cũng đang được điều tra và sẽ là chủ đề đóng góp trong tương lai.

Chúng tôi cũng thảo luận rằng điện trở suất của lưới điện ảnh hưởng đến mất điện khi một hoặc hai ribbon bị ngắt kết nối. Ví dụ, khi ribbon ở mặt sau được cắt trước hoặc khi ribbon ở mặt trước được cắt trước. Do đó, có một lưới mạnh có thể cải thiện độ tin cậy của mô-đun chống lại lỗi ribbon.

LỜI CẢM ƠN

Chúng tôi chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của EOS Holding và dự án SCCER-Furies (do CTI hỗ trợ). Chúng tôi biết ơn Jonathan Champlaud vì những cuộc thảo luận hiệu quả và biết ơn Joël Sunier vì sự hỗ trợ trong công việc thử nghiệm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] IEA, "Đánh giá các lỗi của mô-đun quang điện - Báo cáo IEA-PVPS T13-01:2014," 2014.

[2] J. Munoz, E. Lorenzo, F. Martinez-Moreno, L. Marroyo và M. Garcia, "Một cuộc điều tra về các điểm nóng trong hai nhà máy điện mặt trời lớn được kết nối với lưới điện", Tiến bộ trong quang điện: Nghiên cứu và ứng dụng, tập 16, số 8, trang 693-701, 2008.

[3] DC Jordan, TJ Silverman, B. Sekulic và SR Kurtz, "Đường cong suy thoái PV: phi tuyến tính và chế độ hỏng hóc", Tiến bộ trong quang điện: Nghiên cứu và ứng dụng, tập 25, số 7, trang 583-591, 2017.

[4] DC Jordan, T. Silverman, J., JH Wohlgemuth, SR Kurtz và KT VanSant, "Chế độ suy thoái và hỏng hóc quang điện", Tiến bộ trong quang điện: Nghiên cứu và ứng dụng, tập 25, số 4, trang 318-326, 2017.

[5] R. Meier, S. Kraemer, S. Wiese, K.-J. Wolter và J. Bagdahn, "Độ tin cậy của dải đồng trong các mô-đun PV dưới tải nhiệt cơ học", trong Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 35 (PVSC), trang 1283-1288, 2010.

[6] N. Bosco, TJ Silverman và S. Kurtz, "Mối cơ nhiệt đặc trưng của khí hậu đối với mối hàn mô-đun quang điện tấm phẳng", Độ tin cậy của vi điện tử, số 62, trang 124-129, 2016.

[7] E. Annigoni, A. Virtuani, F. Sculati-Meillaud, A. Faes, M. Despeisse và C. Ballif, "Đánh giá tác động của các dải kết nối bị hỏng và lỗi đối với hiệu suất điện của các mô-đun quang điện silic tinh thể", trong Hội nghị và triển lãm năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 33, trang 1754-1757, Amsterdam, 2017.

[8] S. Bowden và A. Rohatgi, "Xác định nhanh chóng và chính xác điện trở nối tiếp và tổn thất hệ số lấp đầy trong pin mặt trời silicon công nghiệp", trong Viện Công nghệ Georgia, 2001.

[9] T. Söderström, P. Papet và J. Ufheil, "Công nghệ kết nối dây thông minh", trong Hội nghị năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 28, trang 495-499, 2013.