

ĐÁNH GIÁ CHỦ ĐỀ • [TRUY CẬP MỞ](#)

Hình ảnh hồng ngoại của các mô-đun quang điện: một đánh giá của tình trạng nghệ thuật và những thách thức trong tương lai phải đối mặt nhà máy điện quang điện gigawatt

Đề trích dẫn bài viết này: Claudia Buerhop bạn cho 2022 Ấn xin. Năng lượng 4 042010

Xem bài viết [trực tuyến](#) để cập nhật và cải tiến.

Bạn cũng có thể thích

[Quang học tính thể lỏng có thể điều chỉnh bằng điện và các thiết bị hình ảnh hoạt động trong phạm vi bước sóng hồng ngoại của băng tần 10 μm](#)
Marenzori Kawamura, Shogo Sato và Susumu Sato

[Tự động đánh dấu không theo chiều dọc đăng ký hình ảnh vú hồng ngoại bằng GA- PSO](#)
Fan-Ya Lin, Chi-En Lee, Chung-Ming Chen và cộng sự

[Phân phối xác suất hai thành phần Chức năng mô tả sự phát xạ IR trung bình từ các đĩa của các thiên hà hình thành sao](#)
Debosmita Pathak, Adam K. Leroy, Todd A. Thompson và cộng sự

Tiến bộ trong năng lượng



CrossMark

TRUY CẬP MỞ

Đã sửa đổi
Ngày 10 tháng 3 năm 2022

Đã sửa đổi
24 tháng 6 năm 2022

Đã chấp nhận để xuất bản
Ngày 11 tháng 8 năm 2022

Đã xuất bản
Ngày 14 tháng 9 năm 2022

Nội dung gốc từ tác phẩm này có thể được sử dụng theo các điều khoản của giấy phép [Creative Commons Attribution 4.0](#).

Bất kỳ sự phản phối nào đối với tác phẩm này đều phải ghi rõ tác giả và tên tác phẩm, trích dẫn tạp chí và DOI.



ĐÁNH GIÁ CHỦ ĐỀ

Hình ảnh hồng ngoại của các mô-đun quang điện: đánh giá về tình trạng hiện tại và những thách thức trong tương lai mà các nhà máy điện quang điện gigawatt phải đối mặt

Claudia Buerhop¹, Lukas Bommes¹, Jan Schlipf², Tobias Pickell¹, Andreas Fladung² và Ian Marius Peters¹

- ¹ Phương pháp thông tin năng lượng cao trong quang điện, Forschungszentrum Jülich GmbH, Viện Helmholtz Erlangen-Nürnberg về năng lượng tái tạo (HI-ERN), Immerwahrstraße 2, 91058 Erlangen, Đức
- ² Aerial PV Inspection GmbH, Im Johannistal 31a, 52064 Aachen, Đức Tác giả mà bất kỳ thư từ nào cũng có thể được gửi đến.

Email: c.buerhop-lutz@fz-juelich.de

Từ khóa: Hình ảnh IR, thông tin năng lượng cao, sự liên quan, thu thập hình ảnh, xử lý và đánh giá

Tóm tắt

Nhiệt ảnh là một phương pháp thường được sử dụng và đánh giá cao để phát hiện các mô-đun quang điện kém hiệu suất trong các nhà máy điện mặt trời. Với bài đánh giá, chúng tôi đưa ra thông tin chi tiết về hai khía cạnh: (a) các chiến lược đo lường được phát triển có hiệu quả cao (khoảng 1 mô-đun s⁻¹) để đưa ra câu trả lời kịp thời từ hình ảnh cho các nhà điều hành của các nhà máy điện cực đại đa Mega Watt hay không và (b) các bên liên quan đến quang điện có nhận được câu trả lời về tính liên quan của các bất thường nhiệt đối với các quyết định tiếp theo hay không. Tiếp theo những câu hỏi này, ảnh hưởng của các điều kiện đo lường, thu thập hình ảnh và dữ liệu, đánh giá hình ảnh cũng như thẩm định hình ảnh được thảo luận. Từ tài liệu, rõ ràng là việc thu thập hình ảnh tự động bằng máy bay có người lái và không người lái cho phép chụp nhiều hơn 1 mô-đun s⁻¹. Điều này giúp đạt được các điều kiện đo lường gần như giống hệt nhau cho các mô-đun; tuy nhiên, có tài liệu ghi lại mức độ tăng tốc độ đạt được khi đánh đổi độ phân giải hình ảnh. Nhiều công cụ xử lý hình ảnh dựa trên máy học (ML) đã được phát triển và cho thấy tiềm năng phân tích hình ảnh hồng ngoại (IR) và phân loại khuyết tật.

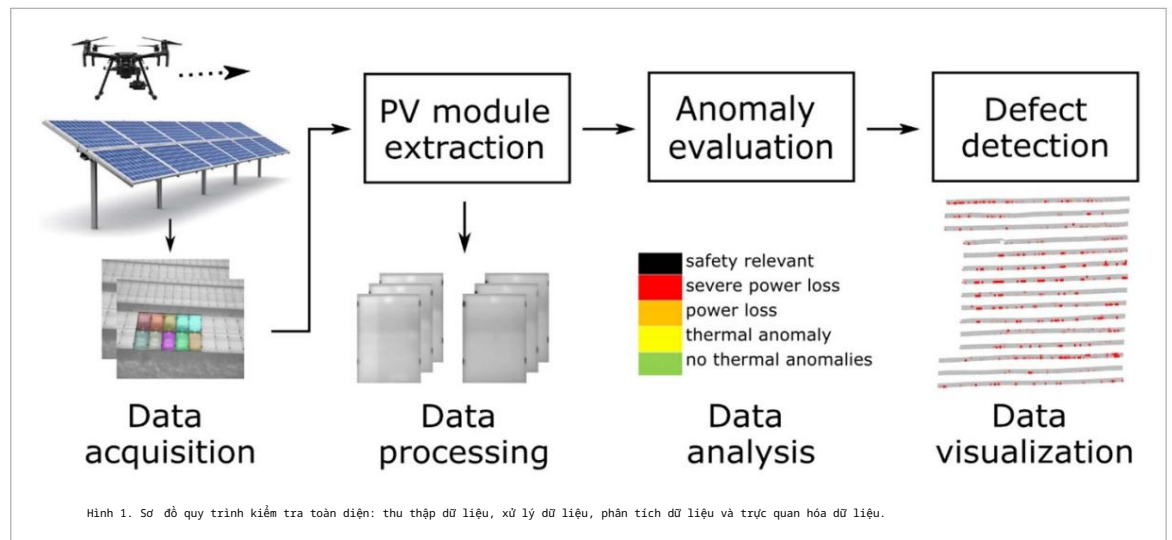
Có nhiều cách tiếp cận khác nhau để đánh giá các bất thường IR về mặt tác động đến hiệu suất, năng suất hoặc sự suy giảm của từng mô-đun hoặc mô-đun trong cấu hình chuỗi. Rõ ràng là vấn đề này rất phức tạp và nhiều lớp. Một mặt, thông tin về kết nối điện là cần thiết, mặt khác, thiếu các tập dữ liệu đủ và phù hợp để điều chỉnh các công cụ thị giác máy tính hiện có cho Quang điện. Đây là nơi chúng ta thấy nhu cầu lớn nhất về hành động và phát triển hơn nữa để tăng khả năng biểu đạt của hình ảnh IR cho các bên liên quan đến PV.

Chúng tôi kết luận bằng các khuyến nghị nhằm cải thiện kết quả của hình ảnh IR và khuyến khích tạo ra các bộ dữ liệu công khai phù hợp về cảnh quay IR để phát triển các công cụ ML.

1. Giới thiệu

Nhiệt ảnh, còn gọi là hình ảnh hồng ngoại (IR), là một công cụ thường được sử dụng trong nhiều năm để phát hiện các mô-đun và chuỗi bị lỗi hoặc hoạt động kém trong các nhà máy điện PV. IR rất hấp dẫn vì hình ảnh được chụp trong quá trình vận hành theo cách không tiếp xúc và không phá hủy mà không gây nhiễu hệ thống điện. Với bài đánh giá này, chúng tôi giải quyết câu hỏi về phương pháp kiểm tra nhiệt ảnh hiện nay đáp ứng được các yêu cầu hiện tại và tương lai của các nhà nghiên cứu và ngành công nghiệp đến mức nào. Có hai khía cạnh được tập trung:

- (a) Trên toàn thế giới, thị trường lắp đặt PV dự kiến sẽ tăng trưởng hàng năm 200 GWp và hơn thế nữa trong năm tới [1] Hệ thống PV sẽ được lắp đặt trên mặt nước (PV nổi), trên mặt tiền (Tòa nhà tích hợp Quang điện), trong môi trường nông nghiệp (nông nghiệp PV), và tất nhiên là trên những không gian mở rộng lớn tại Giga Watt



quy mô đỉnh (GWp). Quan trọng đối với sản xuất điện sẽ là các hệ thống PV đa Mega Watt đỉnh (MWp) quy mô tiện ích lớn và mở rộng. Chúng tôi tập trung vào các hệ thống này trong bài đánh giá. Chúng ta hãy thực hiện một ví dụ tính toán nhỏ. Để đơn giản, giả sử một nhà máy điện PV công suất 100 MWp với 200.000 mô-đun PV (mỗi mô-đun có 500 Wp) được phân bố trên 300 ha và ví dụ 200 bộ biến tần trung tâm cũng như các vi khí hậu thay đổi trên khắp địa điểm lắp đặt. Với bài đánh giá này, chúng tôi muốn vẽ nên một bức tranh toàn diện về quy trình kiểm tra: (1) thu thập dữ liệu, (2) xử lý dữ liệu, (3) phân tích dữ liệu và (4) trực quan hóa dữ liệu, như được trình bày trong hình 1. Tiếp tục ví dụ nhỏ, giả sử thêm rằng cứ mỗi giây một mô-đun được kiểm tra và dữ liệu đã ghi lại được phân tích và đánh giá, thì tổng thời gian xử lý là 7 ngày (mỗi lần 8 giờ) sẽ cần thiết để đánh giá toàn bộ nhà máy. Với 5 giây quy trình kiểm tra, tổng thời gian kiểm tra là 35 ngày. Mặc dù việc thu thập dữ liệu không phải là yếu tố hạn chế thông lượng kiểm tra, nhưng phần lớn thời gian được dành cho việc xử lý và phân tích dữ liệu. Tất cả các bước xử lý đòi hỏi lao động thủ công và không thể tự động hóa trong phân tích hình ảnh đều rất quan trọng về mặt thời gian, cũng như việc đào tạo các mô hình để xử lý dữ liệu.

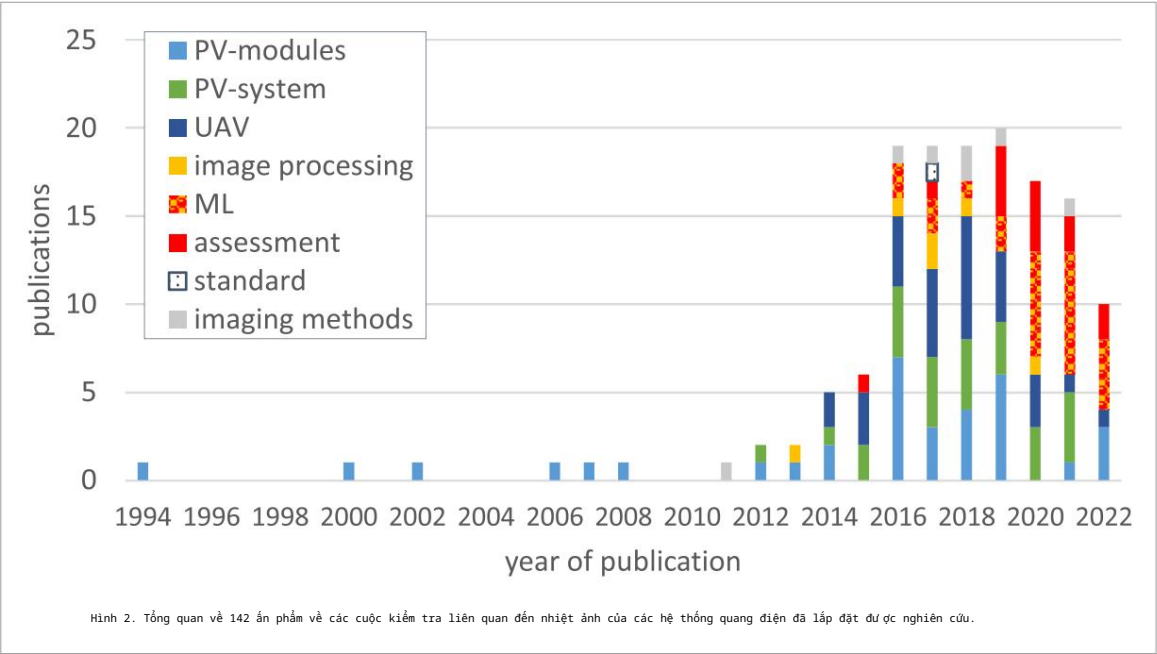
Các hệ thống xử lý tự động gần đây dựa trên thị giác máy tính và học máy (ML) đã cho thấy tiềm năng giảm đáng kể thời gian cần thiết để xử lý. Tuy nhiên, để phân tích dữ liệu tự động, cần tạo các tập dữ liệu và kiến thức phù hợp về các lỗi: liệu một sơ đồ thời gian 1 giây cho mỗi mô-đun để phân tích các nhà máy điện PV GWp có đủ để xác định các mô-đun và chuỗi hoạt động kém hiệu quả không? Chúng tôi nhấn mạnh những gì có thể đạt được bằng nhiệt ảnh theo tình trạng nghệ thuật hiện tại, nhưng cũng có khả năng phát triển tiềm năng.

- (b) Các cuộc thảo luận với chủ sở hữu tài sản, EPC và các công ty O&M cho thấy họ nhận thức và đánh giá cao những lợi thế của phương pháp chụp ảnh nhiệt. Phương pháp này cho phép xác định và định vị nhanh chóng, trực tiếp, không tiếp xúc, không phá hủy các mô-đun và chuỗi bị trục trặc hoặc hoạt động kém mà không làm gián đoạn hoạt động thương mại. 'Một bức tranh có giá trị bằng ngàn lời nói'. Việc làm cho các lỗi có thể nhìn thấy được bằng các bất thường về nhiệt chỉ có thể là bước đầu tiên, các tuyên bố về tính liên quan của các phát hiện vẫn còn thiếu, mặc dù ví dụ như hoạt động, tuổi thọ, năng suất hoặc O&M. Liệu phương pháp chụp ảnh nhiệt có thể cung cấp cho ngành thông tin này để quyết định các biện pháp bảo trì cần thiết nhằm đảm bảo hoạt động và năng suất không? Do đó, chúng tôi đang nghiên cứu tài liệu để tìm ra các tuyên bố định lượng đáng tin cậy về hành vi giảm hiệu suất (công suất hoặc năng suất) và/hoặc suy thoái của các hệ thống PV dựa trên hình ảnh IR.

Bài đánh giá cho thấy nhiệt ảnh hiện đại đóng góp như thế nào vào việc kiểm tra nhà máy điện PV ngày nay, nhưng cũng cho thấy những phát triển nào có thể có lợi để chuẩn bị cho các yêu cầu trong tương lai, (a) công cụ kiểm tra nhanh và (b) biểu cảm. Quét các ấn phẩm về tình trạng nghiên cứu và phát triển hiện tại trong ngành công nghiệp và học viện, nhiệt ảnh liên quan đến hệ thống PV đã bắt đầu từ năm 1994. Như được hình dung trong hình 2, chúng ta có thể phân biệt bốn kỷ nguyên trong quá trình phát triển nhiệt ảnh IR như một công cụ phù hợp để kiểm tra nhà máy điện PV:

- (a) IR-trong hai thập kỷ đầu tiên, hình ảnh IR bắt đầu chuyển từ phòng thí nghiệm sang ứng dụng ngoài trời cho PV kiểm tra mô-đun như một công cụ nhanh và rẻ tiền. Nhiếp ảnh gia IR đã đi qua các hệ thống PV và chụp ảnh IR của các mô-đun bị lỗi bằng tay. Các chữ ký lỗi của các mô-đun hoạt động thực tế, chẳng hạn như chuỗi con, suy thoái tiềm ẩn (PID), chuỗi mô-đun, đứt, ô nóng, lỗi hàn, đã được thu thập. (b) IR + UAV-khoảng năm 2014 các ấn phẩm đầu tiên nêu bật lợi ích của việc sử dụng máy bay không người lái hoặc máy bay không người lái

xe (UAV) làm phương tiện mang theo camera IR. Việc sử dụng máy bay không người lái đã đẩy nhanh và tạo điều kiện thuận lợi cho việc kiểm tra



quá trình và đặt nền tảng cho việc tự động hóa quá trình thu thập hình ảnh. Năm 2017, Andrews [2] báo cáo các cuộc kiểm tra IR của các nhà máy điện PV bằng máy bay. (c) IR + UAV + ML-do khối lượng hình ảnh quá lớn, việc đánh giá thủ công trở nên quá tẻ nhạt và ngày càng được thay thế bằng phân tích hình ảnh tự động kể từ năm 2016. Hiện nay, các hình ảnh được số hóa để sử dụng cho các phương pháp ML.

(d) IR + EVAL-kể từ khoảng năm 2018, chúng tôi đã chứng kiến những nỗ lực đầu tiên nhằm đánh giá (EVAL) và định lượng phát hiện ra sự bất thường về nhiệt.

Kể từ những nghiên cứu đầu tiên [3-5] về việc hình dung các khiếm khuyết trong các mô-đun PV trong điều kiện vận hành, sự quan tâm và việc chấp nhận nhiệt ảnh để kiểm soát chất lượng các mô-đun PV và nhà máy điện PV đã tăng lên đáng kể. Trọng tâm là nhận dạng, ghi chép và giải thích các kiểu lỗi điển hình của các mô-đun PV trong hình ảnh IR (được đánh dấu trong hình 2 là 'mô-đun PV') và các phương pháp hình ảnh đã được thiết lập khác như phát quang điện (EL). Vì sự xuất hiện và tính liên quan của các mô-đun PV bị lỗi chỉ có thể được hiểu trong bối cảnh của hệ thống PV, khía cạnh này được nắm bắt bằng từ khóa 'hệ thống PV' trong hình 2.

Câu chuyện thành công của thử nghiệm chất lượng nhiệt tiếp tục với sự sẵn có và khả năng sử dụng máy bay không người lái cho các ứng dụng dân sự, được đánh dấu trong hình 2 là 'UAV'. Chỉ trong một lần quét, camera IR trên máy bay không người lái giúp ghi lại số lượng lớn hình ảnh của nhiều mô-đun PV trong các nhà máy điện PV lớn để dàng đến mức không còn khả thi hoặc thực tế khi xử lý dữ liệu theo cách thủ công. Các công cụ thị giác máy tính có sẵn đã tăng cường nghiên cứu về các thuật toán để xử lý hình ảnh tự động và phát hiện bất thường. Phát hiện và phân loại lỗi hiện có thể được thực hiện bằng nhiều phương pháp ML khác nhau. Phát hiện lỗi/bất thường thành công là điều quan trọng, nhưng cũng đòi hỏi phải đánh giá định lượng về mức độ liên quan và tác động đến năng suất của hệ thống PV. Các ấn phẩm về đánh giá được tóm tắt trong danh mục 'đánh giá'. Hơn nữa, việc so sánh các phát hiện IR với các kỹ thuật hình ảnh khác rất đáng quan tâm và được liệt kê dưới tiêu đề 'phương pháp hình ảnh', ví dụ EL, hình ảnh màu đỏ-xanh lục-xanh lam (RGB) thực. Kể từ năm 2017, đã có một tiêu chuẩn quốc tế về kiểm tra nhiệt độ của các mô-đun năng lượng mặt trời [6], được gọi là 'tiêu chuẩn'.

Có nhiều bài đánh giá trong tài liệu liên quan đến IR PV chỉ ra kỳ vọng của cộng đồng đối với thử nghiệm IR của các nhà máy điện PV và tiềm năng được tiết lộ. Các bài đánh giá, được liệt kê trong bảng 1, bao gồm nhiều khía cạnh. Chúng cung cấp thông tin chi tiết về quang học và thông số kỹ thuật của máy ảnh [9], thông số kỹ thuật của rô-bốt và máy bay không người lái [9, 10, 13], kỹ thuật hình ảnh [11, 12, 14, 18, 19], lỗi mô-đun và các kiểu lỗi của chúng [7, 8, 15, 17, 19], xử lý hình ảnh [17] và các công cụ ML [16]. Bài đánh giá này là về thử nghiệm IR của hệ thống PV, không phải mô-đun PV. Nó mở rộng ra ngoài mô-đun PV riêng lẻ và coi mô-đun PV là một phần của hệ thống điện và kết nối với lưới điện. Khía cạnh thông lượng cao của việc kiểm tra các nhà máy điện PV GWP được nhấn mạnh ngang bằng với tuyên bố nêu rõ sự liên quan của các bất thường về nhiệt.

Tính liên quan có nghĩa là khiếm khuyết nào phải được xem xét nghiêm túc, khiếm khuyết nào có thể bị bỏ qua. EL là một kỹ thuật hình ảnh thay thế có thể xác nhận khiếm khuyết. Đánh giá khả thi có thể dựa trên tiềm năng nguy hiểm, hiệu suất, năng suất hoặc sự suy thoái theo thời gian. Các phép đo IV và dữ liệu giám sát có thể giúp phân loại và đánh giá

Bảng 1. Tóm tắt các đánh giá liên quan đến IR và PV trong giai đoạn 2012-2021.

Mặt chính/chủ đề	Tác giả	Năm	Trích dẫn
Các lỗi, sự suy giảm mô-đun, danh sách các lỗi điển hình lỗi	Tiếng Tây Ban Nha và cộng sự	2012	[7]
Lỗi, mô-đun	Tsanakas và những người khác	2016	[8]
Nguyên tắc chung + máy ảnh và máy bay không người lái và thông số kỹ thuật	Gallardo và cộng sự	2018	[9]
Máy bay không người lái, UAS hướng tới kiểm tra tự động thủ tục, dị thường nhiệt, 3d ảnh trắc lượng	Rakh và Gorodetsky	2018	[10]
Kỹ thuật hình ảnh	Jahn et al, báo cáo của IEA	2018	[11]
Cơ bản	Herraziz và cộng sự	2020	[12]
Máy bay không người lái và hình ảnh IR của hệ thống PV, cơ bản	Rahman và cộng sự	2020	[13]
Giám sát tình trạng, nguyên tắc cơ bản của nhiệt ảnh	Kandeal và cộng sự	2021	[14]
Lỗi thị giác, lỗi, ảnh hưởng làm giảm năng lượng, lỗi và phương pháp, phân tích dữ liệu	Venkatesh và Sugumaran	2021	[15]
Học sâu cho hình ảnh hồng ngoại dựa trên tầm nhìn máy móc	Ông và cộng sự	2021	[16]
Xử lý hình ảnh: bề mặt khuyết điểm-bên trong-vấn đề bên ngoài, xác định thiệt hại của PV, hình ảnh của những thất bại	Atifah và những người khác	2021	[17]
Thiết bị kiểm tra di động phù hợp với hiện trường	Herrmann et al, báo cáo của IEA	2021	[18]
Nhà máy điện mặt trời	Navid và cộng sự	2021	[19]
Chẩn đoán lỗi cho hệ thống PV quy mô tiện ích, tính toán các thông số điện, nhiệt ảnh, lỗi + phân loại			

mất hiệu suất. Điều thú vị là các phương pháp hiện tại được trang bị như thế nào cho các nhiệm vụ trong tương lai, ví dụ như kiểm tra GWP Các nhà máy điện PV hoạt động liên tục trong khung thời gian cho phép và có báo cáo rõ ràng.

Bài đánh giá được cấu trúc như sau: (a) giới thiệu ngắn gọn về các bất thường về nhiệt, các lỗi đã xác định và Phát hiện IR và sự liên quan của chúng đối với hoạt động an toàn của nhà máy hoặc hiệu suất hệ thống, (b) điều kiện đo lường đối với ảnh chụp nhanh IR, rất quan trọng đối với việc phân tích hình ảnh như nguy hiểm khi được thảo luận và đưa vào (một mặt điều kiện đo lường có thể hỗ trợ phân tích nguyên nhân gốc rễ, mặt khác có thể là những hạn chế đối với việc so sánh phân tích hình ảnh), (c) phần cốt lõi làm nổi bật: thứ nhất; thu thập hình ảnh và trách nhiệm của nó đối với chất lượng hình ảnh và tốc độ kiểm tra, thứ hai, xử lý hình ảnh để phân đoạn mô-đun PV, trích xuất lỗi và phân loại, và thứ ba, đánh giá hình ảnh, giải thích và đánh giá để đưa ra hiểu biết sâu sắc về sự liên quan của các phát hiện và (d) thảo luận cung cấp cái nhìn tổng quan về các bài học kinh nghiệm, hậu quả và nhu cầu phát triển phát sinh, tức là những mảnh ghép nào của câu đố vẫn còn thiếu để thử nghiệm các nhà máy điện mặt trời quy mô lớn một cách nhanh chóng và đáng tin cậy, đồng thời đưa ra các tuyên bố về tính phù hợp của những phát hiện của họ.

2. Các chế độ lỗi trong hình ảnh IR

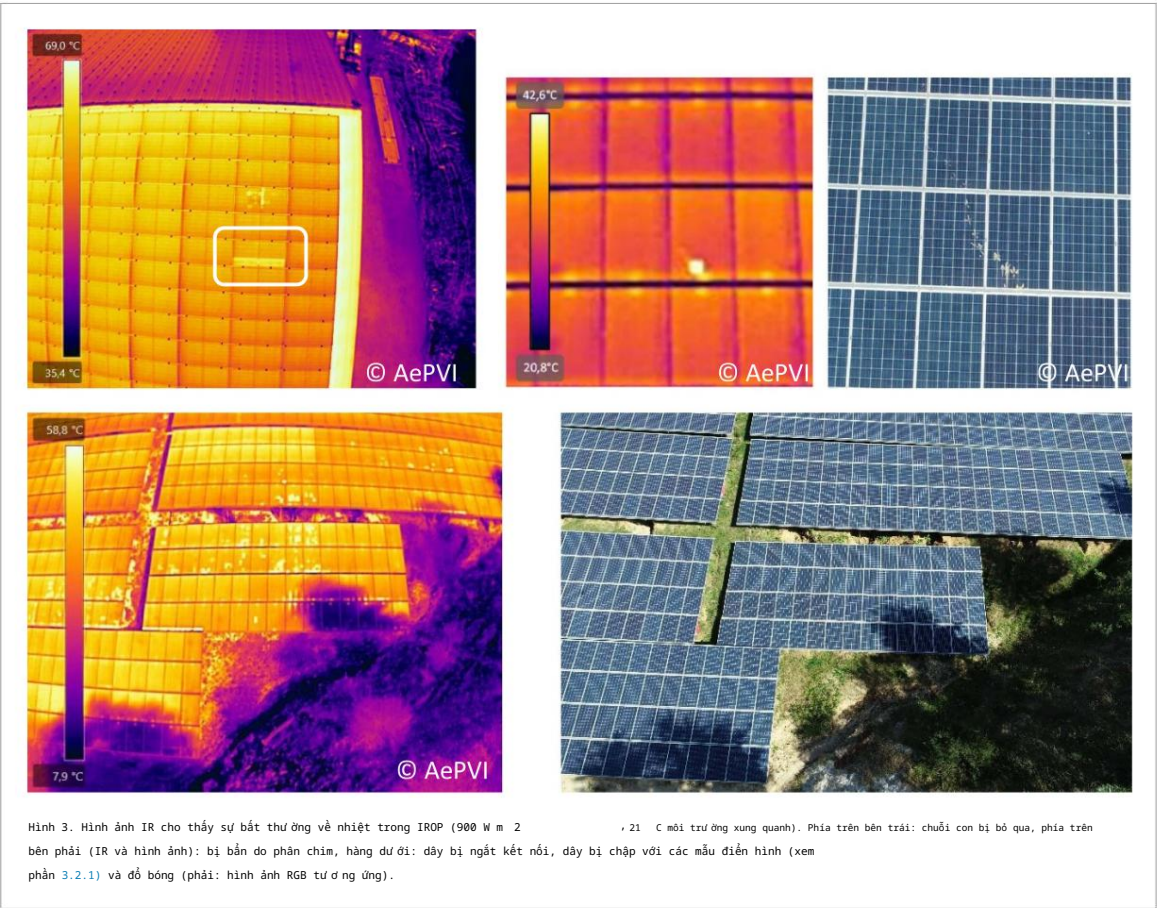
Trong những năm đầu, các dị thường nhiệt trong hình ảnh IR được phân loại theo các mẫu điển hình cho các chữ ký vật lý, ví dụ lỗi chuỗi con (mạch hở hoặc ngắn mạch), diode, gãy tế bào, PID. Nhiều hình ảnh mẫu về những lỗi như vậy, đặc biệt là đối với các mô-đun PV 60 và 72 cell, có thể được tìm thấy trong tài liệu [8, 11, 18, 20, 21]. Phân loại các dị thường được quan sát đã thay đổi theo những nỗ lực nhằm thực hiện đánh giá tự động hơn. Phân tích nguyên nhân gốc rễ vật lý đã trở thành một phân loại hiện tượng học của các quan sát. Thông thường, lỗi mô-đun PV được phân loại thành lỗi thị giác, lỗi điện và lỗi hỗn hợp [15, 22, 23]. Phân loại các dị thường IR được sử dụng rộng rãi được đề xuất trong Cơ quan Năng lượng Quốc tế (IEA) báo cáo [24] được hiển thị trong bảng 2. Các vết nứt ô thường không thể phát hiện được bằng IR do sự hòa tan bên bị giới hạn bởi sự mờ nhòe do sự khuếch tán nhiệt, như được Muehleisen et al [25] thể hiện một cách ấn tượng bằng cách sử dụng ví dụ về các mô-đun sau cơn mưa đá, ở đây sự tồn tại của các vết nứt ô đã được EL xác minh.

Nhiệt ảnh là phương pháp chụp ảnh có thể làm cho nhiều hơn các khiếm khuyết của mô-đun PV có thể nhìn thấy được. Nhiều những khiếm khuyết/sai lệch so với hoạt động bình thường có thể được phát hiện bằng cách sử dụng hình ảnh IR, cụ thể là:

- Lỗi mô-đun PV [27, 28], mọi loại bất thường về nhiệt và chênh lệch nhiệt độ.
- Các vấn đề vận hành, ví dụ như chuỗi/mảng/bộ biến tần bị ngắt kết nối, cắt giảm [29, 30].

Bảng 2. Phân loại các dấu hiệu nhiệt của lỗi mô-đun PV có thể được tìm thấy trong báo cáo của IEA [24] ban đầu từ nghiên cứu khả thi [26] nhưng đã được sửa đổi và mở rộng.

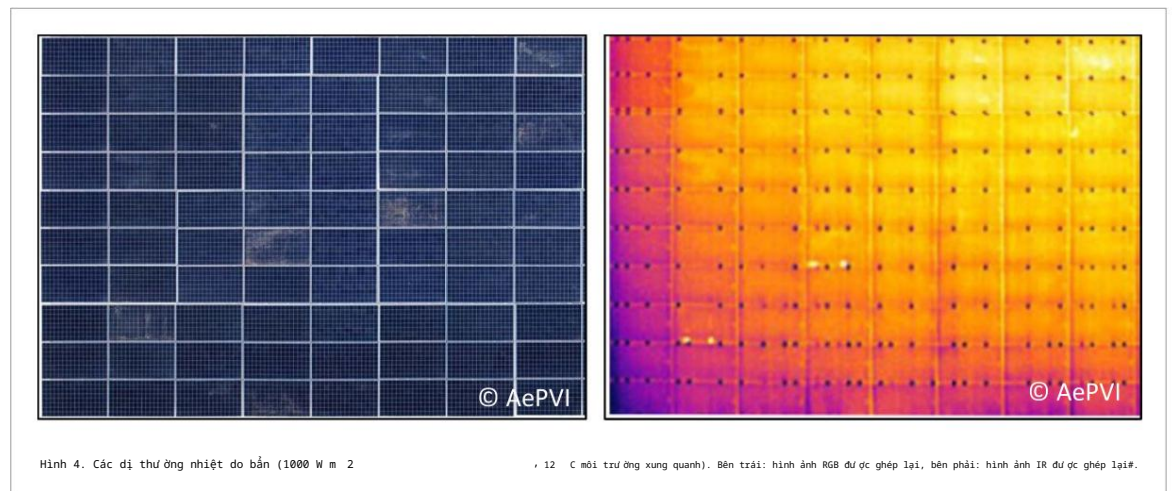
Thể loại chữ ký nhiệt	Sự miêu tả	Lý do
Một	Toàn bộ phần tế bào	Bị phân tách, tách lớp hoặc bị che bóng một phần tế bào
B	Một phần của tế bào nóng	Pin bị nứt, bộ kết nối bị ngắt kết nối, hoặc mối hàn bị lỗi
C	Điểm nóng đơn = điểm nóng	Tế bào bị nứt hoặc bị hư hỏng thanh cái/bộ kết nối, hoặc hiện vật
D và	Chuỗi con nóng đồng đều Mẫu chấp vá của nóng tế bào	Diode bypass hoạt động hoàn toàn Điốt bị đoản mạch/kính trụ ốc bị vỡ, diode phân luồng (với sự xuất hiện tăng lên gần khu vực: chỉ định cho PID)
F	Hộp nối nóng	Kết nối kém gây ra hiện tượng nóng chảy



- Các yếu tố bên ngoài, ví dụ như bụi bẩn và đất [31], bóng râm do các vật thể cố định hoặc thay đổi/di chuyển, ví dụ như thảm thực vật [30, 32], ống khói, đường dây cao thế [33], cột điện, bóng râm một phần [32].

Số liệu thống kê từ năm 2017 và 2019 cho thấy lỗi của mô-đun PV và mảng PV [29, 30] cũng như bóng mờ [30] thường được phát hiện là những bất thường trong hình ảnh IR. Đặc biệt là trong giai đoạn đưa vào sử dụng các vấn đề về bàn không hoạt động, vỡ kính, diode và hộp nối là những phát hiện thường gặp nhất [34]. Ví dụ của các lỗi mô-đun và các yếu tố bên ngoài trong hình ảnh IR được chụp ở chế độ hoạt động bình thường (IROP, giải thích bên dưới) được thể hiện trong hình 3.

Do những hạn chế của một phương pháp để hiểu rõ hơn những phát hiện quan sát được, thường bổ sung và các phép đo so sánh được thực hiện. Để biết thêm chi tiết, hình ảnh IR được làm giàu bằng hình ảnh EL [35–38] hoặc phát quang [39] hoặc dữ liệu công suất với phép đo IV [40]. Thường xuyên trực quan Hình ảnh RGB được ghi đồng thời vào cảnh quay IR để tránh việc giải thích sai do hiện vật, ví dụ như vỡ kính, phân chim, lá cây, bóng râm [41, 42]. Một ví dụ về các dị thường nhiệt do mức độ bắn được thể hiện ở hình 4.



Hình ảnh IR cũng thích hợp để phát hiện lỗi do bất thụ ớng nhiệt trong các mô-đun PV màng mỏng [27, 43, 44] nhưng sẽ không đ ợc thảo luận thêm trong bài đánh giá này. Mặc dù nhiệt ảnh có thể đ ợc áp dụng thành công để phát hiện lỗi trong tất cả các thiết bị điện (ví dụ như bộ biến tần, hộp kết hợp và cáp) [27, 45], chúng tôi sẽ tập trung vào ứng dụng của nó đối với các mô-đun PV trong phần còn lại của bài viết này. Các vấn đề dễ dàng phát hiện từ mặt tr ợc trong các hệ thống PV.

3. Điều kiện đo l ớng

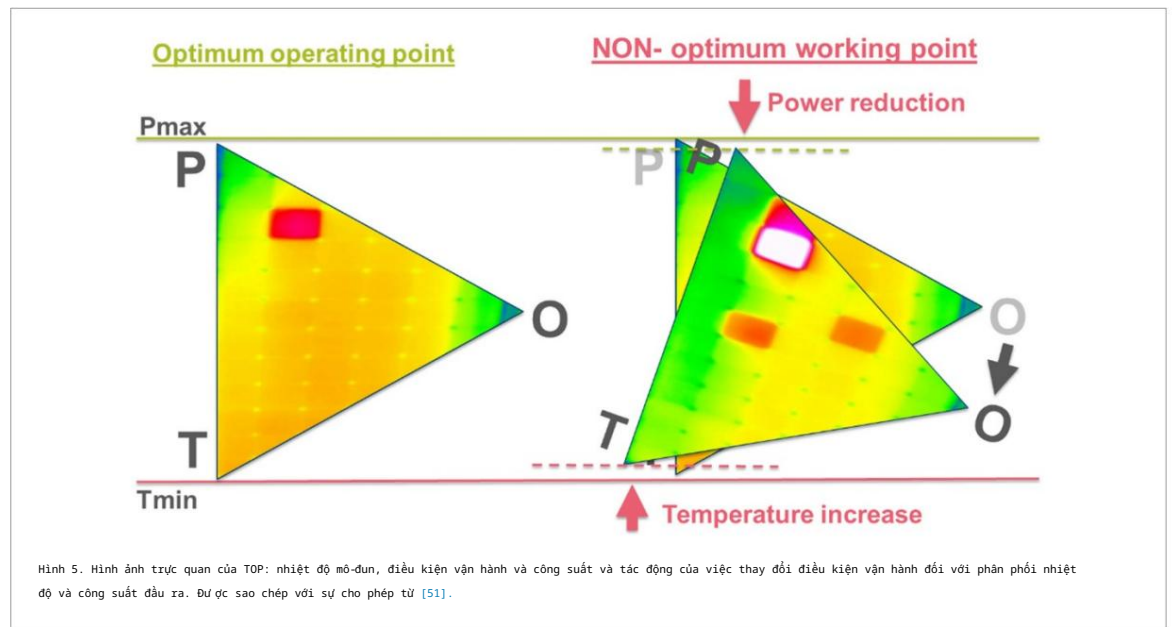
Các điều kiện đo l ớng cung cấp khuôn khổ cho thông l ớng cao và giá trị thông tin của các cuộc kiểm tra IR. Để đạt đ ợc cả hai, phải cân nhắc cẩn thận giữa các mục tiêu. Tr ợc tiên, sự phụ thuộc của hình ảnh IR vào thời điểm của các điều kiện đo l ớng bên ngoài, đã cho đ ợc phác thảo. Sau đó, lợi ích (bổ sung) của hình ảnh IR ở các điều kiện vận hành đ ợc kiểm soát của hệ thống PV để đánh giá lỗi và phân tích nguyên nhân gốc rễ đ ợc trình bày. Ở đây, cần phải cân bằng rõ ràng giữa các lợi ích bổ sung để đánh giá lỗi và hiệu suất đo l ớng nhanh và không tiếp xúc.

3.1. Các yếu tố ảnh hưởng

Các điều kiện đo l ớng rất quan trọng đối với sự phân bố nhiệt độ đ ợc ghi lại của ảnh chụp nhanh IR và việc phân tích và đánh giá thêm cũng như thời gian cần thiết để kiểm tra bao gồm cả khâu chuẩn bị.

Nhiệt ảnh sử dụng camera IR để ghi lại bức xạ nhiệt phát ra từ các vật thể, trong tr ớng hợp này là các mô-đun PV, theo cách không tiếp xúc và không phá hủy. Sự chênh lệch hoặc tăng nhiệt độ toàn cục và cục bộ chỉ ra lỗi và hiệu suất kém. Đối với các mô-đun PV, năng l ớng mặt trời không đ ợc chuyển đổi thành điện sẽ đ ợc chuyển đổi thành nhiệt. Hơn nữa, các bộ phận hiệu suất thấp của các mô-đun có thể trở thành ngư ời tiêu thụ thay vì nhà sản xuất điện và do đó nóng lên đáng kể. Do đó, nhiệt độ tăng là một dấu hiệu tốt cho thấy hiệu suất giảm và sự hiện diện của lỗi, nhưng cũng là một nhiệm vụ khó khăn khi sử dụng hình ảnh IR. Các khía cạnh như tính liên quan và an toàn phải đ ợc đánh giá bằng cách sử dụng nhiệt độ tuyệt đối hoặc chênh lệch nhiệt độ giữa bất thụ ớng và các tham chiếu không bị ảnh hưởng. Mặc dù chênh lệch nhiệt độ có thể đ ợc xác định đáng tin cậy hơn nhiệt độ tuyệt đối, nhưng nhiệt độ vẫn nhạy cảm với những thay đổi.

Các điều kiện đo l ớng bao gồm tất cả các yếu tố ảnh hưởng đến trạng thái cân bằng giữa nhiệt độ mô-đun hoặc nhiệt độ lỗi T và công suất P hoặc tổn thất công suất. Các yếu tố tác động này bao gồm (a) cài đặt điện, ví dụ chiều dài chuỗi [46, 47], (b) cấu hình hoạt động, ví dụ theo dõi hoặc cắt giảm điểm công suất cực đại (MPP) xác định điểm hoạt động, (c) điều kiện thời tiết, ví dụ bức xạ mặt trời E, nhiệt độ, tốc độ gió và (d) đặc điểm của mô-đun PV bị lỗi [48]. Nếu một yếu tố tác động thay đổi, sự cân bằng nhiệt độ-công suất của mô-đun PV bị lỗi cũng thay đổi [49-51], như đ ợc hình dung trong hình 5. Tại điểm hoạt động MPP, nhiệt độ thấp nhất và công suất đầu ra cực đại. Sự dịch chuyển của điểm hoạt động dẫn đến tổn thất công suất tăng và nhiệt độ tăng. Việc đánh giá tổn thất công suất của các mô-đun PV để thấy về mặt nhiệt có thể không rõ ràng: Công suất mô-đun ở điều kiện STC hoặc công suất mô-đun ở điều kiện thực tế hoặc tác động của mô-đun PV bị lỗi đến công suất chuỗi trong thực tế. Các con số kết quả khác nhau, theo ví dụ trong [51], ví dụ công suất mô-đun t ớng đối so với công suất danh định: $P(STC) = 92\%$, $P(tr ớng) = 73\%$ và $P(tr ớng + nối tiếp với các mô-đun khác) = 58\%$. Khi đó, kiến thức về cấu hình điện, bố trí chuỗi và biến tần (bộ tối ưu hóa mô-đun, biến tần chuỗi hoặc biến tần trung tâm) là hoàn toàn cần thiết.



Tuy nhiên, thời gian phản ứng với những thay đổi, ví dụ trong điều kiện thời tiết, là khác nhau đối với dòng điện và điện áp so với nhiệt độ. Các thông số điện phản ứng tức thời trong khi nhiệt độ thích ứng chậm [52, 53]. Các mẫu có thể thay đổi trong vòng vài phút, ví dụ đoản bypass hoạt động hoặc trong suốt cả ngày (điểm bypass/chuỗi con của mô-đun năng lượng mặt trời bị ngắn mạch cho thấy hình dạng nhiệt giống bàn cờ vào sáng sớm ($E = 400 \text{ W m}^{-2}$ và $T = 36^\circ \text{C}$) và một ô rất nóng trong chuỗi con vào đầu buổi chiều ($E = 900 \text{ W m}^{-2}$ và $T = 69^\circ \text{C}$)). Do đó, ít nhất 15 phút điều kiện thời tiết không thay đổi được khuyến nghị rộng rãi.

Một khía cạnh khác cần được xem xét là độ ẩm trên bề mặt mô-đun. Cần tránh sự ngưng tụ IR bản ghi vì nếu không thì hình ảnh IR bị mờ là kết quả. Hơn nữa, chất lượng hình ảnh là rất quan trọng. Các thuộc tính của máy ảnh, như bước sóng, điểm ảnh, trường nhìn tức thời (IFOV) xác định giới hạn của độ phân giải bên, được đề cập trong [6, 54, 55]. Góc nhìn và độ cao/khoảng cách [55-57] cũng cần được tính đến. Đối với các cuộc kiểm tra ở cấp độ ô, độ cao/khoảng cách cũng như cảm biến IR, dữ liệu ống kính FOV/IFOV cần được điều chỉnh để đo kích thước điểm của công nghệ ô cần phân tích, ví dụ như nửa ô/mô-đun mới.

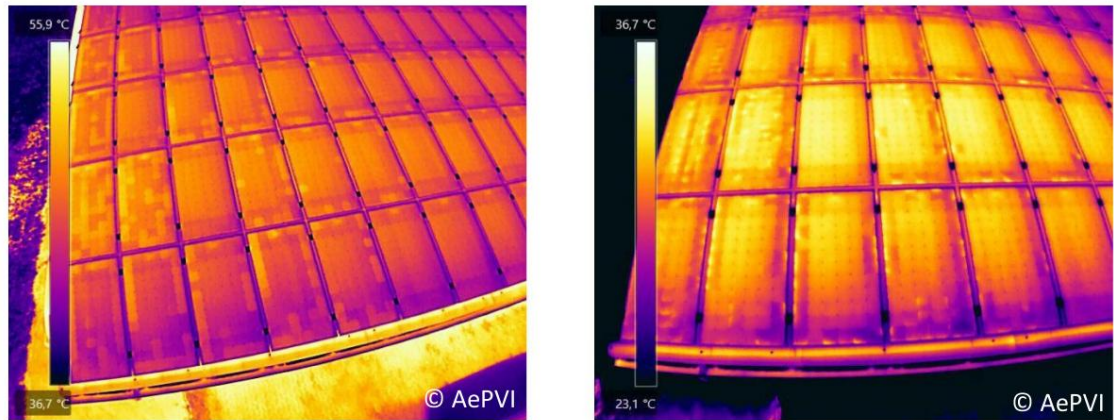
3.2. Phương pháp IR

Hình ảnh IR chụp và ghi lại các bất thường về nhiệt trực tiếp, tức thời [58] và theo thời gian thực mà không làm gián đoạn hoạt động. Để chuẩn bị và đánh giá tiếp theo về kiểm tra IR, cần phải xem xét các sơ đồ mặt bằng địa lý và cơ khí, sơ đồ chuỗi điện, khái niệm biến tần, ảnh hưởng của lưu ý điện (ví dụ: cắt giảm), dữ liệu mô-đun và dữ liệu thời tiết để có thể giải thích bất kỳ bất thường về nhiệt nào được quan sát thấy trong quá trình kiểm tra. Có thể phân biệt các phương pháp đo IR khác nhau tùy thuộc vào sự can thiệp vào mảng PV, ví dụ [59]. Chúng tôi mô tả: Hình ảnh IR đang hoạt động (IROP hoặc IRMP), Hình ảnh IR khi ngắn mạch (IRSC), Hình ảnh IR khi mạch hở (IROC), Hình ảnh IR trong dòng điện ngược (IRINV) và Hình ảnh IR phía sau (IRrs). Chúng tôi sẽ sử dụng thang màu xanh lam cho hình ảnh của IRINV để tránh nhầm lẫn với IRSC trong thang màu xanh lá cây và IROP, IROC trong thang màu cầu vồng thường được sử dụng. Sau đây, các quy trình, ưu điểm và hạn chế của các phương pháp được trình bày. Máy bay không người lái IR cổ điển có thể được sử dụng cho mọi loại kiểm tra IR. Không cần phải sửa đổi kỹ thuật đối với máy bay không người lái/camera IR.

3.2.1. Chụp ảnh hồng ngoại ở chế độ vận hành (OP)-IROP hoặc

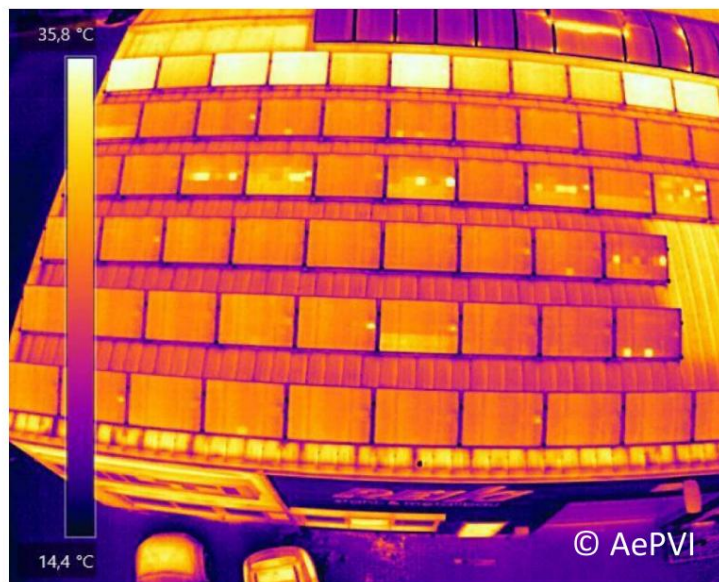
IRMP Các điều kiện vận hành thực tế được ghi lại trong OP hoặc tại MPP. Vì một mảng PV không nhất thiết phải hoạt động trong MPP của nó, nên tên gọi IROP được ưu tiên hơn IRMP. Mặc dù nhìn chung không cần can thiệp vào hệ thống điện đối với IROP, nhưng việc biết được các điều kiện vận hành là có lợi. Do đó, có thể sử dụng dữ liệu điện của hệ thống giám sát địa điểm hoặc hồ sơ riêng do ampe kế kẹp cung cấp.

Các phép đo IROP [60] của các nhà máy điện PV yêu cầu mức độ chiếu xạ tối thiểu để đánh giá và tạo ra các báo cáo có ý nghĩa. Ngoài các yêu cầu chuẩn mực là 600 W m^{-2} [6], các phép đo ở mức chiếu xạ thấp hơn cũng khả thi hoặc thậm chí có ý nghĩa rõ ràng hơn, chẳng hạn như đối với PID ở mức chiếu xạ thấp tới 250 W m^{-2} [61]. Lưu ý: nếu yêu cầu mức chiếu xạ tối thiểu chuẩn mực, thời gian đo có thể bị giới hạn nghiêm trọng bởi các biến động theo mùa và vị trí/quốc gia/lục địa.



Hình 6. PID trong IROP (trái) và IROC (phải) (700 W m^{-2})

10 °C nhiệt độ môi trường xung quanh).

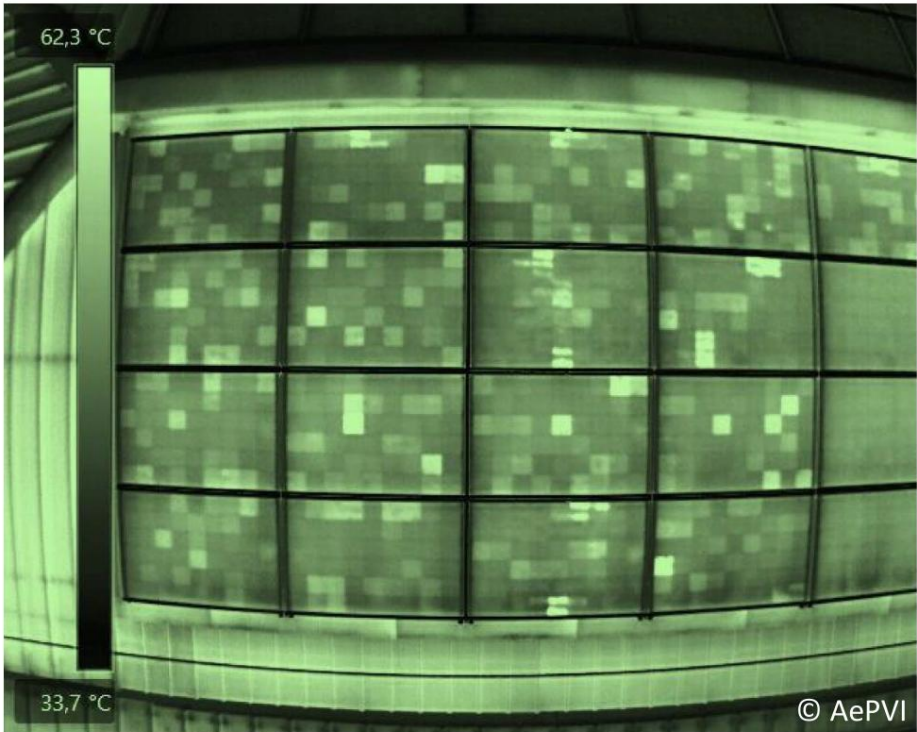


Hình 7. IROP (chế độ 700 W m^{-2} , 23 °C môi trường xung quanh). Trong chuỗi trên cùng, năm mô-đun đã được bắc cầu thủ công. Chúng đang ở chế độ nhân tử (nhiệt độ giống như các chuỗi con bị bỏ qua có thể nhìn thấy trong một số mô-đun khác trên mái nhà), nhưng các mô-đun còn lại của chuỗi nóng hơn nhiều. Năng lượng để tăng nhiệt độ bổ sung đó bắt nguồn từ hai chuỗi khác được kết nối song song (không hiển thị ở đây).

3.2.2. Chụp ảnh hồng ngoại ở mạch hở

IROC Đối với nhiều loại lỗi khác nhau, việc kiểm tra các mô-đun PV có thể rất hữu ích, không chỉ ở chế độ OP mà còn ở chế độ mạch hở (IROC). Điều này được minh họa trong hình 6 đối với trường hợp PID: trong IROP, chúng ta thấy mô hình điển hình của các ô nóng hơn, đặc biệt là ở các đường viền mô-đun. Ngoài ra, chúng ta thấy trong IROC rằng trong các ô bị ảnh hưởng này, các bộ phận ô gần nhất với khung mô-đun là nóng nhất. Điều này nhấn mạnh chẩn đoán PID trong đó dòng điện đi lạc khét tiếng chảy từ ô đến khung, do đó làm nóng khu vực. Nếu hai điều kiện vận hành được so sánh trực tiếp với nhau, một số nền tảng có thể được xác định rõ ràng, hãy so sánh sự xuất hiện của PID ở chế độ OP và OC trong hình 6. Vì mục đích này, biến tần phải được tắt ở phía AC/DC, sau đó về mặt lý thuyết, tất cả các mô-đun đều hoàn toàn ở chế độ mạch hở. Trong trường hợp các chuỗi mô-đun được kết nối song song với các điện áp chuỗi mô-đun khác nhau (do che bóng/bắn/lỗi mô-đun), dòng điện cân bằng sau đó có thể xảy ra giữa chúng, có thể được phát hiện trực tiếp bằng nhiệt. Một hoặc nhiều chuỗi sau đó cấp điện cho một hoặc nhiều chuỗi khác có điện áp thấp hơn; các mô-đun này trong chuỗi được cấp điện có vẻ ấm hơn đáng kể so với các mô-đun trong hoạt động không tải và chỉ ra các vấn đề về chuỗi/mô-đun. Điều này được minh họa trong hình 7. Để tránh hiện tượng này, tất cả các chuỗi phải được ngắt kết nối khỏi biến tần.

Tương tự như vậy, sự khác biệt giữa IROP và IROC có thể chứng minh rõ ràng liệu một diode bypass trong một chuỗi con dễ thấy có bị lỗi hay chỉ hoạt động. Ngoài ra, các mô-đun tình trạng tải nặng với PID cũng có thể được phát hiện trong điều kiện hoạt động mạch hở, xem hình 6.



Hình 8. Các mẫu tế bào trong các chuỗi ngắn mạch (IRSC, 1200 W m⁻², 38 °C môi trường xung quanh).

3.2.3. Chụp ảnh IR tại mạch ngắn-IRSC Đo IR

trong mạch ngắn (IRSC) đòi hỏi phải can thiệp vào hệ thống điện DC và do đó chỉ dành cho thợ điện có trình độ và được cấp phép. Vì mục đích này, các chuỗi mô-đun riêng lẻ được ngắn mạch bằng công tắc DC phù hợp khi bức xạ mặt trời >150 W m⁻². Các ô tinh thể mạnh hơn trong mô-đun/chuỗi bị ngắn mạch bắt đầu sản xuất điện ngay sau khi ngắn mạch; các ô bị che bóng, bẩn, hư hỏng với dòng điện yếu hơn trong mô-đun/chuỗi trở thành người tiêu dùng trong kết nối nối tiếp và chuyển đổi năng lượng do các ô mạnh hơn tạo ra thành nhiệt. Các mẫu nhiệt thường giống như bàn cờ vua hình thành có thể cung cấp thông tin về sự không khớp ô (sự cố của nhà máy) cũng như hư hỏng/che bóng hoặc bẩn của ô hiện có ngay trong giai đoạn đầu của mạch ngắn, xem hình 8. Lưu ý rằng trong điều kiện vận hành này, dòng điện ISC trong các chuỗi con cao hơn IMPP. Chúng tôi sử dụng thang màu xanh lá cây ở đây cho IRSC để tránh nhầm lẫn với IROP hoặc IROC.

Hiệu ứng này có thể hữu ích với mức chiếu xạ thấp hơn, mặt khác, các vấn đề về tế bào về cơ bản trở nên rõ ràng hơn và được phát hiện dễ dàng hơn. Việc ghi chép lại các kế hoạch về mái/dây vào ban ngày cũng có thể được thực hiện rất nhanh chóng.

3.2.4. Chụp ảnh hồng ngoại với nguồn điện-IRINV Một

giải pháp thay thế cho việc sử dụng ánh sáng mặt trời làm nguồn kích thích cho các mô-đun PV là ứng dụng nguồn điện bên ngoài, tương tự như EL nhưng ghi lại bức xạ nhiệt hồng ngoại. Phương pháp này được gọi là 'IR inverse' (IRINV) để nhấn mạnh hoạt động đảo ngược của mô-đun khi dòng điện được cung cấp để tạo ra nhiệt. Các phép đo này yêu cầu can thiệp vào hệ thống điện DC và do đó chỉ dành cho thợ điện có trình độ và được cấp phép. Vì mục đích này, các chuỗi mô-đun riêng lẻ được cấp điện với 0,1-1 × ISC (tùy thuộc vào mô-đun/loại lỗi) bằng nguồn điện DC phù hợp khi có ít hoặc không có bức xạ mặt trời, tức là vào lúc chạng vạng hoặc ban đêm.

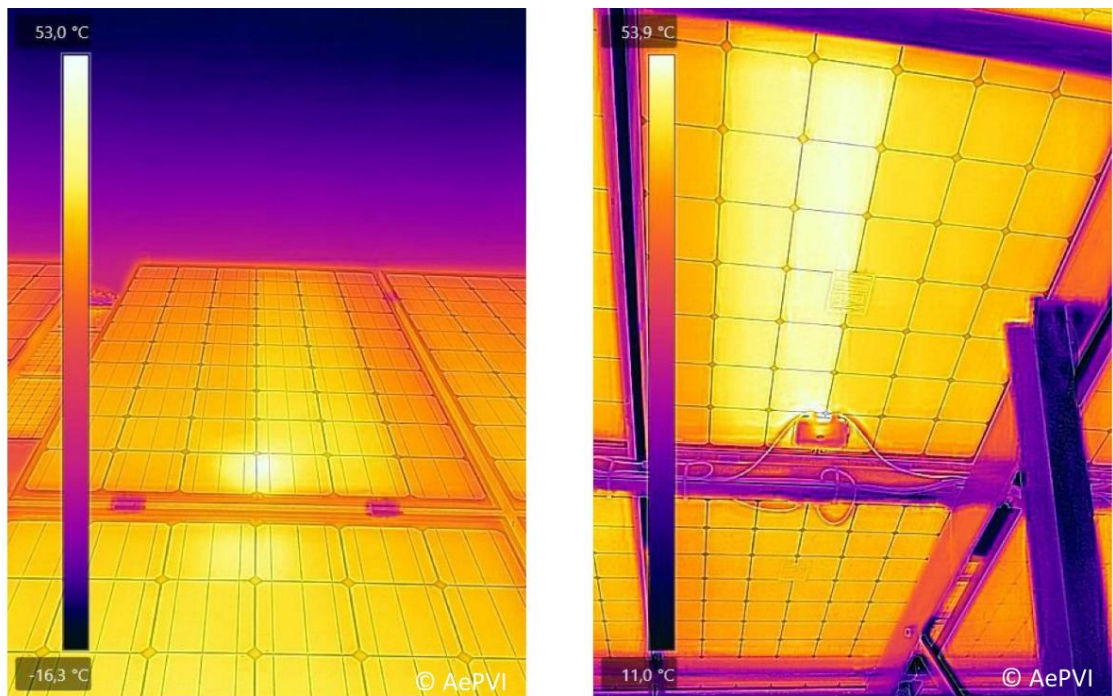
Do dòng điện được áp dụng cho các mô-đun/chuỗi, các khu vực khuyết tật trong các mô-đun thường nóng lên nhanh hơn trong vài giây đầu tiên so với phần còn lại của vật liệu ở nhiệt độ môi trường xung quanh. Ngược lại với các lần quét IROP ở nhiệt độ mô-đun/ô >70 °C, các lần quét này tạo ra các khuyết tật trong mô-đun ở 5 °C-15 °C. Do đó, chúng tạo ra tương tự đối cao hơn và các dấu hiệu nhiệt rõ ràng hơn, như đã biết đối với nhiệt ảnh xung hoặc khóa [43].

Tùy thuộc vào nhiệt độ của mô-đun/môi trường, các mô-đun/chuỗi chỉ được cấp điện trong vài giây để làm cho lỗi có thể nhìn thấy được. Hình 9 minh họa một mô hình IRINV điển hình.

Các cuộc kiểm tra IRINV có thể được thực hiện ở mức chiếu xạ thấp hoặc vào lúc rạng sáng/đêm. Điều này làm tăng đáng kể thời gian triển khai đo lường có thể có cho các cuộc kiểm tra máy bay không người lái IR trên toàn thế giới. Do kiểm tra IR với



Hình 9. Thiết bị được sử dụng để cấp điện cho chuỗi PV tại hộp kết hợp (bên trái và giữa), bản ghi hình ảnh IRINV về mô-đun PV cho thấy tình trạng vỡ cell (bên phải).



Hình 10. Mặt trước (bên trái) và mặt sau của hộp IROP (800 W, 25 °C ambient) hiển thị lỗi chuỗi con. Lưu ý cách nối W m⁻² đang nóng lên do đốt bỏ qua chú động.

bức xạ mặt trời thấp/không có trong quy trình ngược lại, bóng râm và bụi bẩn của các mô-đun năng lượng mặt trời không còn đóng vai trò chính nữa. Do thiếu phản xạ mặt trời so với các phép đo IRMPP, việc phát hiện (tự động) các bất thường về nhiệt cũng dễ dàng hơn nhiều. Do đó, các nhà máy có các hư hỏng mô-đun khác nhau luôn có thể được kiểm tra và đánh giá trong cùng một điều kiện, ví dụ các mô-đun PV được định hướng khác nhau theo hướng đông-tây. Trái ngược với các phép đo IRMPP, phương pháp IRINV cho phép phát hiện rõ ràng các khuyết tật của ô. Các vết nứt/vỡ ô, đầu nối ô có điện trở cao, sự cố thanh cái/phân phối dòng điện, PID, v.v. có thể được phát hiện xuống đến cấp độ ô.

3.2.5. Mặt sau IR Hình

ảnh IR từ mặt sau polymer của các mô-đun PV có thể có lợi (hình ảnh IR mặt sau, xem hình 10 để biết ví dụ), vì độ phát xạ và đặc tính nhiệt khác nhau của mặt trước bằng kính và mặt sau bằng polymer. Độ phát xạ trong phạm vi phổ hồng ngoại đối với bề mặt kính là $\epsilon = 85\%$ [54, 62, 63] và đối với polymer là $\epsilon = 90\%-93\%$ [64, 65]. Hơn nữa, hiện tượng nhiễu ảnh được giảm bớt nhờ các lớp polyme mỏng phía sau tế bào quang điện (khoảng 0,5 mm) so với tấm kính dày phía trước tế bào (khoảng 4 mm) nhờ độ khuếch tán nhiệt thấp tương đương của cả hai vật liệu (kính $\alpha = 0,34 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ [66]). Để hoàn thiện, hình ảnh IR cũng có thể được ghi lại từ mặt sau của các mô-đun PV như đã thực hiện cho Khảo sát độ tin cậy PV toàn Ấn Độ mở rộng năm 2016 [67] nhằm ¹, polyme:polyetylen $\alpha = 0,17 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$) nghiên cứu sự suy giảm điện của các mô-đun PV. Ưu điểm là khả năng tiếp cận tốt với các mô-đun PV trong các lắp đặt giá đỡ mở nhờ độ phát xạ cao và do đó nhiệt độ đáng tin cậy hơn.

Do độ phát xạ của bề mặt kính là $\epsilon \approx 85\%$ trong phạm vi phổ hồng ngoại [54, 62, 63], nên hình ảnh IR từ mặt sau bằng polyme phát xạ cao của các mô-đun PV có thể có lợi (hình ảnh IR mặt sau, xem hình 10 để biết ví dụ).

4. Phân tích hình ảnh IR

Chúng tôi đã phân tích tài liệu về phân tích IR của các nhà máy điện PV để trả lời các câu hỏi: (a) liệu việc kiểm tra IR có đủ nhanh để phát hiện tất cả các lỗi liên quan trong các nhà máy điện PV GWP hay không và (b) liệu hình ảnh IR có cung cấp thông tin mà các bên liên quan đến nhà máy, ví dụ như người vận hành, đang tìm kiếm hay không.

4.1. Thu thập dữ liệu—Ghi hình ảnh IR Để khai thác tốt

hơn và hiệu quả hơn hình ảnh IR của các nhà máy điện PV, công nghệ ghi đã thay đổi theo thời gian. Các rô-bốt và phương tiện di động tự động, bên bỉ đã thay thế phần lớn các hệ thống cố định (ví dụ như bệ nâng, cần cẩu) và nhiếp ảnh gia IR (lao động con người). Trong khi các phép đo trên mặt đất vẫn được sử dụng cho một số tình huống nhất định và các nhiếp ảnh gia IR giàu kinh nghiệm có thể quản lý tới 30 MWp một ngày (ở đây chỉ ghi lại hình ảnh IR của các mô-đun PV đáng ngờ), thì các phép đo trên không nói chung phổ biến hơn. Khi thực hiện các phép đo trên mặt đất, chân máy và các phương tiện địa hình nhỏ có động cơ, thường được gọi là xe bốn bánh, có thể là những công cụ hữu ích để tăng phạm vi hoạt động của nhiếp ảnh gia.

Tuy nhiên, thường thì một phương tiện bay được sử dụng để mang camera IR qua các nhà máy điện PV ở đúng vị trí để có hình ảnh IR [57, 68, 69]. Đặc biệt, UAV [13] còn được gọi là máy bay không người lái, giống như máy bay trực thăng đa năng, có giá cả phải chăng, thường được sử dụng. Chúng dễ điều hướng và vận chuyển. So với các phép đo trên mặt đất, các phép đo trên không có ưu điểm là các hệ thống PV khó tiếp cận (ví dụ như PV nổi, mái dốc, mặt tiền của BIPV [5], các hệ thống lắp đặt trên mái nhà, hệ thống PV theo dõi [70]) có thể được kiểm tra mà không gặp vấn đề gì. Một số công trình [71–74] đề xuất các giải pháp lập kế hoạch và thực hiện chuyến bay tự động. Tài liệu tham khảo [71–73] trích xuất các thách thức về các hàng nhà máy PV từ hình ảnh vệ tinh có sẵn của địa điểm bằng cách sử dụng các thuật toán thị giác máy tính cổ điển, chẳng hạn như người ở. Sau đó, một drone bay tối ưu được tính toán và chuyển đến máy bay không người lái dự định để thực hiện nhiệm vụ điểm dừng [71]. Để đạt được khả năng theo dõi chính xác từng hàng trong quá trình quét [72–74], đề xuất sử dụng bộ điều khiển theo hàng, điều khiển máy bay không người lái dựa trên phản hồi trực quan.

Kiểm tra trên không bằng máy bay không người lái cũng như máy bay có người lái có thể dễ dàng được tự động hóa, cả trong lập kế hoạch tuyến đường và điều hướng. Điều này làm tăng thông lượng lần lượt làm giảm đáng kể thời gian thu thập so với các phương pháp thông thường, cầm tay, như thể hiện bằng lựa chọn dữ liệu có thể truy cập công khai trong bảng 3. Sử dụng máy bay không người lái, thời gian kiểm tra được giảm [75, 76], các yếu tố thay đổi, ví dụ 10–15 lần [13, 21] hoặc 50 lần [77]. Các số liệu của các phương pháp tiên tiến cho thấy rằng với máy bay không người lái và máy bay, có thể ghi lại hơn 1 mô-đun s 1. Mức độ kiểm tra vẫn thường không rõ ràng, tức là độ phân giải hình ảnh không được nêu/báo cáo, điều này quyết định đến việc phát hiện bất thường. Tiêu chuẩn IEC TS 62446-3 Phiên bản 1.0 2017-06 khuyến nghị khoảng cách mẫu mặt đất ít nhất là 3 cm px 1. Việc thu thập hình ảnh có hệ thống và tự động cho phép tự động hóa quá trình xử lý và đánh giá hình ảnh tiếp theo, như sẽ được trình bày bên dưới [78, 79].

Spagnolo và cộng sự [7] cho biết việc kiểm tra IR các nhà máy điện PV bằng máy bay không người lái nhanh chóng, đơn giản và không tốn kém. Weinreich nhấn mạnh rằng nhanh hơn 10–20 MWp cho mỗi nhiếp ảnh gia và mỗi ngày [30]. Chi phí dao động từ 1800 Euro đến 2740 Euro một ngày hoặc 225 Euro MWp 1, mang lại kết quả chính xác ở độ cao bay là 15 m [80]. Được xác nhận bởi Weinreich et al [30] đối với các nhà máy lớn hơn 100 kWp. Các công ty cung cấp dịch vụ kiểm tra IR bằng máy bay không người lái là, ví dụ Above Surveying, Rapotormaps, Sitemark, AePVI, Volateq, PV Service Pro.

Đối với các nhà máy điện PV quy mô tiện ích mở rộng có công suất 10 MWp hoặc 100 MWp, việc sử dụng máy bay có người lái với hệ thống camera có độ phân giải cao có ý nghĩa [2, 89]. Mặc dù khoảng cách lớn giữa mô-đun năng lượng mặt trời và hệ thống camera, các khiếm khuyết của ô như PID vẫn có thể được phát hiện. Ưu điểm lớn là các nhà máy điện PV mở rộng có thể được kiểm tra rất nhanh, tức là trong điều kiện môi trường gần giống nhau [2, 86, 90]. Tóm lại, việc thu thập hình ảnh drone như không phải là bước hạn chế thời gian kiểm tra, bỏ qua độ phân giải hình ảnh và phát hiện khiếm khuyết.

Tất cả các phương pháp đều có lợi từ việc phát hiện trực tiếp các bất thường về nhiệt trong quá trình vận hành, tức là IROP. Tuy nhiên, các phép đo nhiệt độ tiếp theo có thể rất hữu ích để xác định nguyên nhân gốc rễ của bất thường được quan sát.

Trong hình 11, các phép đo IROP, IROC, IRSC và IRINV được hiển thị. Bằng cách kết hợp các quan sát, có thể giải thích được lỗi chuỗi con được tổ chức. Nhìn chung, có ba kịch bản có thể dẫn đến hiện tượng này: (a) một diode bypass hoạt động, (b) một diode bypass bị lỗi, (c) lỗi điện trong chuỗi con mô-đun. Trong IRSC, chúng ta quan sát thấy các mẫu bàn cờ điển hình xảy ra do sự khác biệt về hiệu suất của các tế bào PV: trong chuỗi bị ngắn mạch, các tế bào tốt hơn tạo ra dòng điện được chuyển thành nhiệt bởi các tế bào kém hơn. Tuy nhiên, mẫu không có trong chuỗi con được thảo luận, cho thấy không có kết nối điện. Điều này cũng được IRINV nhấn mạnh, trong đó chuỗi con có vẻ mát hơn. Lưu ý rằng một số mô-đun

Bảng 3. Tổng quan về thông tin kiểm tra được báo cáo liên quan đến thời gian thu thập hình ảnh IR của một số nguồn không yêu cầu sự hoàn thiện.

Đo lường kiểu	Dung tích	Điều tra thời gian	Hình ảnh nghị quyết	Máy ảnh nghị quyết	Chuyển bay tốc độ	Bình luận	Dữ liệu nguồn
cầm tay	1 MWp	10 giờ –		–	–	–	[76]
	4000 mô-đun	8 ngày	–	–	–	1 mô-đun phút 1	[80]
Không người lái <small>Máy bay không người lái</small>	1 MWp	10 phút – 1 giờ		–	–	–	[81]
	1 MWp	–		–	–	–	[82]
	1,3 MWp	0,5 giờ – 1 giờ		–	–	–	[83]
	2–3 MWp	Phụ thuộc –		–	–	–	[11]
	3,2 MWp	32 phút – 18 phút 3–		–	–	2 hàng 3 hàng	[84]
	6–8 MWp	4 giờ – 1 giờ		640 × 480 –		–	[85]
	10 MWp	–		–	–	–	[76]
	10 MWp		3 cm px 1 – 1 ngày 1		–	–	[86]
	40 MWp	ngày Độ phân giải thấp.					
	74 MWp	24 giờ – 6 giờ		–	–	–	[75]
	30 MWp						
	21 MWp	7 giờ					
	13 MWp	4 giờ					
	40 MWp	1 ngày	–	640 × 512 –			[77]
	–	–	10–	–	48 km h 1	Tổng quan,	[87]
			15 cm px 1 5–6 cm px 1 3 cm px 1 3 cm px 1 –			cấp độ chuỗi Cấp độ mô-đun Nhiệt độ tuyệt đối	
	–	–			–	Điểm nóng phát hiện	[55]
	4000 mô-đun	5 phút					[80]
Có người lái	100 MWp	1 giờ	–	–	–	–	[86]
máy bay	300 MWp	1 ngày	–	–	–	200 MWp trong 1 chuyến bay	[88]

các loại không hiển thị các mẫu này trong IRSC , có thể là do sự kết hợp tuyệt vời của các tế bào có cùng hiệu suất. Trong hình 11, chúng ta không tìm thấy mẫu bàn cờ nào trong chuỗi con trong IROP. Chúng ta có thể kết luận rằng nó là trừu tượng hợp (c), một sự cố điện trong chuỗi con. Nếu nó liên quan đến các điốt bỏ qua, thì mẫu sẽ là cũng có trong IROP và IROC cuối cùng sẽ cho chúng ta biết liệu việc bỏ qua chỉ là hoạt động (không có mẫu) hay là lỗi (hình ảnh có thể nhìn thấy). Kinh nghiệm cho thấy hầu hết các lỗi chuỗi con được tìm thấy trong lĩnh vực này là do lỗi điện trong mô-đun (không phải trong diode bypass).

Thay vì can thiệp vào hệ thống, như cần thiết cho IROC, IRSC, IRINV hoặc IRbackside, thứ ờng là một Đo IROP ở mức độ chiếu sáng khác là một giải pháp thay thế hữu ích.

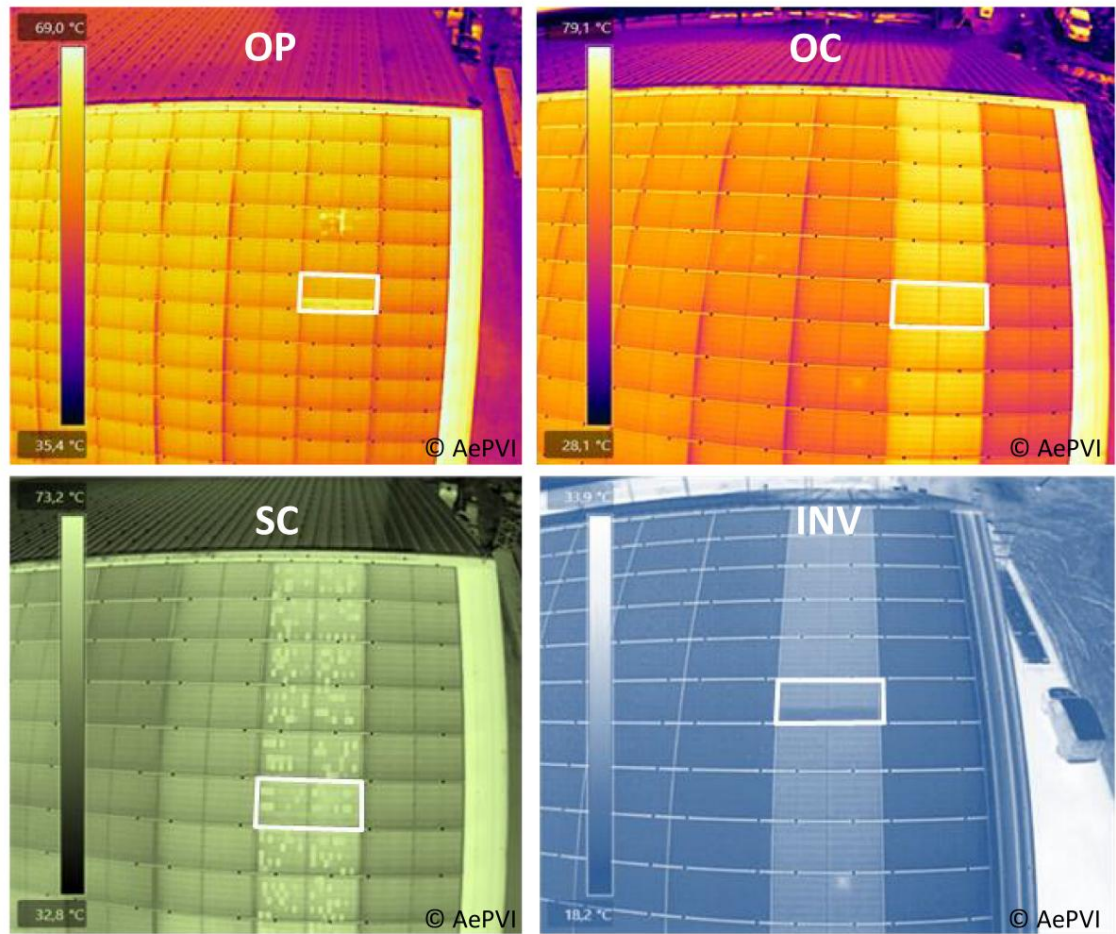
Cuối cùng, vùng cấm bay xác định thông số kỹ thuật của nền tảng cảm biến: máy bay cho nhà máy điện PV không gian mở rộng, máy bay không người lái cho mái nhà, mặt tiền, nổi, nhà máy điện PV không gian mở, hoặc là, quad cho nhà máy điện PV không gian mở, thang máy/chân máy cao cho mặt tiền và mái dốc, và camera cầm tay/ổn định cho hệ thống PV mái phẳng.

4.2. Xử lý dữ liệu–Phân đoạn hình ảnh IR, phân loại

4.2.1. Phát hiện các mô-đun PV trong video IR

Nhiều công trình hiện có sử dụng các kỹ thuật xử lý hình ảnh cổ điển để phát hiện mô-đun PV trong video IR. Một kỹ thuật phổ biến là ngưỡng nhị phân (thích ứng) của cư ờng độ hình ảnh–thứ ờng được áp dụng sau các phư ơng tiện xử lý trừu tượng hình ảnh–để có được mặt nạ phân đoạn của các mô-đun PV [91–97]. Các phư ơng pháp khác phát hiện các cạnh mô-đun PV với các hoạt động hình thái (mở, đóng) [98, 99], phát hiện cạnh Canny thuật toán [100, 101] hoặc biến đổi Hough [100, 102]. Một kỹ thuật khác để phát hiện mô-đun PV là mẫu khớp [103]. Ở đây, một hình ảnh mẫu của mô-đun PV được di chuyển qua hình ảnh đầu vào theo dạng trượt thời trang cửa sổ, một số liệu tư ơng quan được tính toán tại mỗi vị trí và các giá trị cực đại được chọn là tiềm năng vị trí của các mô-đun PV. Jeong et al tìm các vùng mô-đun PV ứng viên (các hộp hình chữ nhật) với thuật toán vùng cực trị ổn định tối đa (MSER) và lọc ra các hộp ứng viên có kích thước quá lớn/quá nhỏ [104].

Nhược điểm của các kỹ thuật xử lý hình ảnh cổ điển này là sự phụ thuộc của chúng vào các phép tính trừu tượng thủ công và phư ơng pháp tìm kiếm, nhu cầu điều chỉnh siêu tham số thủ công mở rộng của họ và quan trọng nhất là kém sự khái quát hóa thành hình ảnh vô hình.



Hình 11. Nhà máy điện trong các điều kiện vận hành khác nhau. Một chuỗi con bị mất với diode bypass chủ động có trong mô-đun được đánh dấu.

Để khắc phục những vấn đề này, học sâu đã được sử dụng gần đây để phát hiện mô-đun PV trong hình ảnh IR. Zhang et al thực hiện phân đoạn ngữ nghĩa bằng kiến trúc U-Net với xử lý sống ResNet-34 [105]. Tuy nhiên, cách tiếp cận này phân biệt các mô-đun PV với nền ảnh, không phân biệt giữa các mô-đun PV riêng lẻ. Tuy nhiên, trình phát hiện đối tượng YOLOv3 do Greco et al sử dụng phân biệt các mô-đun PV riêng lẻ, chỉ cung cấp hộp giới hạn của từng mô-đun thay vì mặt nạ chính xác đến từng pixel [106]. Bommers et al và Vega Díaz et al sử dụng khuôn khổ phân đoạn thể hiện mạng nơ-ron tích chập dựa trên vùng Mask (R-CNN) để khắc phục cả hai vấn đề và thu được mặt nạ phân đoạn chính xác đến từng pixel cho từng mô-đun PV riêng lẻ [107, 108]. Hơn nữa, Vega Díaz et al thấy Mask R-CNN hoạt động tốt hơn thuật toán cơ sở, thuật toán này thu được các vùng ứng viên mô-đun PV với ngưỡng thích ứng và phân loại các đặc điểm kết cấu được trích xuất bằng máy vectơ hỗ trợ. Bảng 4 tóm tắt các công trình liên quan theo phương pháp và quy mô tập dữ liệu được sử dụng. Phân tích kích thước tập dữ liệu cho thấy nhiều tác phẩm sử dụng tập dữ liệu rất nhỏ, điều này làm dấy lên nghi ngờ về khả năng áp dụng chung của các phương pháp đã phát triển. Đặc biệt trong bối cảnh học sâu, việc đào tạo trên các tập dữ liệu nhỏ và có phương sai thấp gây ra hiện tượng quá khớp mô hình, cản trở quá trình khái quát hóa.

4.2.2. Phát hiện các bất thường của mô-

đun PV Tương tự như phát hiện mô-đun PV, nhiều công trình hiện có xác định các mô-đun PV bất thường trong hình ảnh IR bằng các kỹ thuật xử lý hình ảnh cổ điển. Kỹ thuật phổ biến nhất là ngưỡng nhị phân cơ sở độ hình ảnh, phân đoạn các vùng nóng của mô-đun PV tương ứng với các bất thường về nhiệt [91, 92, 97, 102, 104, 109]. Các kỹ thuật khác là cụm k-means của cơ sở độ điểm ảnh [110], phân loại dựa trên quy tắc mờ [111], mô tả hình ảnh màu [112] và sự phát triển lặp lại của mặt nạ phân đoạn bắt đầu từ các cực đại cơ sở độ cục bộ [100, 113]. Addabbo và cộng sự đề xuất phương pháp khớp mẫu để định vị các vùng nóng [103].

Do dựa vào xử lý hình ảnh cổ điển nên tất cả các kỹ thuật này đều yêu cầu điều chỉnh siêu tham số thủ công rộng rãi và không khái quát tốt đối với hình ảnh không nhìn thấy được. Hơn nữa, các tác phẩm này chỉ phát hiện

Bảng 4. Tổng quan tài liệu về các phương pháp phát hiện mô-đun PV và phát hiện bất thường. Các phương pháp ML và học sâu truyền thống được tổ chức theo kiểu in nghiêng và in đậm. Tất cả các phương pháp khác đều sử dụng xử lý hình ảnh cổ điển. Bộ dữ liệu có kích thước đủ lớn (theo ý kiến của chúng tôi) được in đậm.

Nguồn	Kích thước tập dữ liệu		
	(hình ảnh/mô-đun/cây)	Phát hiện mô-đun PV	Phát hiện bất thường
[91, 92, 94]	34/—/1	Ngưng nhị phân	Ngưng nhị phân
[93]	37/1 554/1	Ngưng nhị phân	Trích xuất tính năng thủ công + Grubb kiểm tra/kiểm tra Q của Dixon
[95, 96]	3/204/1	Ngưng nhị phân	—
[97]	120/—/1	Ngưng nhị phân Các	Ngưng nhị phân
[98, 99]	không	hoạt động hình thái —	
[100]	14 215/14 215/>1	Các cạnh Canny + Hough dịch	Sự tăng trưởng lặp lại của mặt nạ phân đoạn
[101]	4/4/1	Phát hiện cạnh không	—
[102]	1171/84/>1	ngoan Biến đổi	Ngưng nhị phân
[104]	40/240/1	Hough Cực trị ổn định tối đa vùng (MSER)	Ngưng nhị phân
[103]	270/—/1	Mẫu phù hợp với ngữ nghĩa U-Net	Mẫu phù hợp
[105]	235/—/1	phân đoạn	—
[106]	50 499/—/>1	Phát hiện đối tượng YOLOv3 —	
[107]	100/—/3	Phân đoạn phiên bản R-CNN của mặt nạ —	
[108]	453 511/11 644/7	Phân đoạn phiên bản R-CNN của mặt nạ.	Phân loại có giám sát với CNN
[109]	<10/3/1	—	Ngưng nhị phân
[110]	4/4/1	—	Phân cụm k-means của cường độ điểm ảnh
[111]	120/120/1	—	Phân loại dựa trên quy tắc mờ
[112]	315/315/1	—	Mô tả hình ảnh màu
[113]	<10/2/1	—	Sự tăng trưởng lặp lại của mặt nạ phân đoạn
[114]	375/375/1	—	Tính năng HoG + phân loại Bayes ngây thơ
[79]	<10/—/1	—	Phân đoạn ngữ nghĩa VGG-16
[115]	9000/9000/6	—	Phát hiện đối tượng R-CNN nhanh hơn
[116]	783/783/1	—	Phân loại có giám sát với CNN
[117]	1000/1000/>1	—	Phân loại có giám sát với CNN
[118]	93	—	Phân loại có giám sát với CNN
[60]	220/93 220/28	—	Phân loại có giám sát với CNN
[119]	1428/480/1	—	Phát hiện đối tượng R-CNN
[120]	4160 000/105 546/6	—	CNN không phụ thuộc vào miền + k-gần nhất phân loại hàng xóm

sự hiện diện của các điểm nóng tương đối lớn và kết nối với các gradient nhiệt độ cục bộ lớn. Điều đó làm cho chúng dễ bỏ sót những loại bất thường quan trọng, chẳng hạn như PID.

Một lần nữa, máy học và học sâu đã được sử dụng gần đây để khắc phục những vấn đề này. Đối với Ví dụ, Oliveira et al [79] sử dụng mô hình phân đoạn dựa trên CNN VGG-16 để phân đoạn ba các dị thường mô-đun trực tiếp trong khung video IR. Vlaminck et al [115] cũng hoạt động trực tiếp trên video khung và sử dụng bộ dò đối tượng Faster R-CNN để có được các hộp giới hạn của các mô-đun PV có chứa dị thường nhiệt. Ngược lại, các phương pháp khác hoạt động trên hình ảnh của từng mô-đun PV thay vì toàn bộ khung hình video. Ví dụ, Dotenco và cộng sự trích xuất các tính năng thủ công, chẳng hạn như trung bình và chuẩn độ lệch, cho mỗi mô-đun PV và xác định các mô-đun ngoại lệ bằng cách sử dụng thử nghiệm Grubb được nối tiếp và Kiểm tra Q của Dixon [93]. Tương tự như vậy, Niazi et al trích xuất biểu đồ histogram của các đặc điểm gradien định hướng (HOG) và phân loại chúng bằng cách sử dụng bộ phân loại Bayes ngây thơ [114]. Dunderdale et al trích xuất biến đổi tính năng bất biến theo tỷ lệ (SIFT) các tính năng và áp dụng bộ phân loại rừng ngẫu nhiên có giám sát để phân biệt giữa bốn loại mô-đun khác nhau các bất thường [116]. Cùng một công trình tìm thấy MobileNet và VGG-16 CNN vượt trội hơn rừng ngẫu nhiên bộ phân loại để phân loại các mô-đun bất thường. Các tác phẩm của Manno et al [117], Zefri et al [60] và Ramirez et al [118] theo cùng một hướng nghiên cứu. Tương tự như vậy, Bommes et al đào tạo một CNN ResNet-50 cho phân loại mười mô-đun khác nhau bất thường [108]. Bộ dữ liệu của họ bao gồm 450 000 hình ảnh và là lớn hơn đáng kể so với các tập dữ liệu được sử dụng trong các tác phẩm khác (xem bảng 4). Bommes et al cũng chứng minh rằng thu thập nhiều hình ảnh cho mỗi mô-đun PV có lợi cho độ chính xác phân loại. Bằng cách sử dụng đối tượng R-CNN máy dò Su et al [119] không chỉ dự đoán loại dị thường của mô-đun mà còn thu được các hộp giới hạn, xác định vị trí bất thường trong hình ảnh mô-đun.

Trong khi những phương pháp học sâu được áp dụng sớm này đạt được độ chính xác cao trong các bài kiểm tra tương ứng các tập dữ liệu, họ không xem xét sự thay đổi miền không thể tránh khỏi giữa phân phối dữ liệu đào tạo và thử nghiệm. Điều này

vấn đề đã được xem xét trong một công trình gần đây hơn của Bommes et al [120]. Là một giải pháp ban đầu cho vấn đề dịch chuyển miền, một bộ phân loại k-nearest neighbor hoạt động trên các biểu diễn tư ơng phản có giám sát ít cụ thể hơn về miền đã được đề xuất. Tuy nhiên, bộ phân loại này chỉ đưa ra quyết định nhị phân và không thể phân biệt các loại bất thường khác nhau. Do đó, việc phân loại chính xác các loại bất thường khác nhau của mô-đun PV trong hình ảnh IR khi có sự dịch chuyển miền giữa dữ liệu đào tạo và dữ liệu thử nghiệm vẫn là một vấn đề chưa có lời giải.

4.2.3. Định vị không gian của các mô-đun PV trong một nhà máy PV

Định vị chính xác các mô-đun PV trong một nhà máy quy mô lớn dựa trên video IR trên không là một nhiệm vụ quan trọng vì nó tạo điều kiện cho việc sửa chữa có mục tiêu các mô-đun bị lỗi. Tuy nhiên, đây cũng là một vấn đề khó khăn vì video có tính lặp lại cao và chỉ hiển thị một khung nhìn cục bộ nhỏ với chỉ một vài mô-đun PV tại một thời điểm.

Như một giải pháp một phần cho vấn đề này, Henry và cộng sự đánh dấu vị trí hệ thống định vị toàn cầu (GPS) của máy bay không người lái trên bản đồ bất cứ khi nào một khung video chứa một mô-đun PV bất thường [71]. Mặc dù đơn giản như ng cách tiếp cận này chỉ thu được vị trí gần đúng của mô-đun bất thường.

Một số tác phẩm giải quyết vấn đề định vị bằng cách ghép các khung hình video tiếp theo thành một hình ảnh toàn cảnh của toàn bộ một dãy nhà máy PV [91, 92, 98]. Điều này đã được chứng minh là hoạt động tốt đối với các chuỗi video ngắn như ng chỉ định vị các mô-đun tư ơng đối với các mô-đun khác. Để cung cấp vị trí trong khung tham chiếu tuyệt đối, Niccolai và cộng sự mở rộng phư ơng pháp bằng cách khớp từng toàn cảnh hàng với một kế hoạch thiết kế hỗ trợ máy tính (CAD) của nhà máy thông qua tọa độ GPS của các điểm trung tâm toàn cảnh [94]. Vấn đề là cần có một kế hoạch CAD chuẩn hóa, không phải lúc nào cũng có sẵn.

Một cách tiếp cận khác là tạo ảnh trực giao của toàn bộ nhà máy PV từ độ cao lớn [41, 121, 122]. Điều này đòi hỏi các hình ảnh nadiral có sự chồng chéo phù hợp mà không phải lúc nào cũng khả thi trong trư ờng hợp có đư ờng dây điện, đư ờng phổ hoặc đư ờng ray xe lửa gần đó. Quan trọng nhất là độ phân giải không gian của hình ảnh ở độ cao lớn thấp khiến việc phân loại dị thường chỉ tiết của các mô-đun PV trở nên khó khăn.

Một số tác phẩm đề xuất tham chiếu địa lý trực tiếp để có được tọa độ địa lý của từng pixel trong mỗi khung hình video [103, 123]. Mặc dù đây là một cách tiếp cận tao nhã như ng nó đòi hỏi hình ảnh nadiral và ớc tính vị trí GPS cực kỳ chính xác mà chỉ có thể đạt được bằng GPS động học thời gian thực. Cách tiếp cận này không xem xét các tín hiệu thị giác mà chỉ dựa vào các phép đo GPS, khiến nó dễ bị lỗi do GPS.

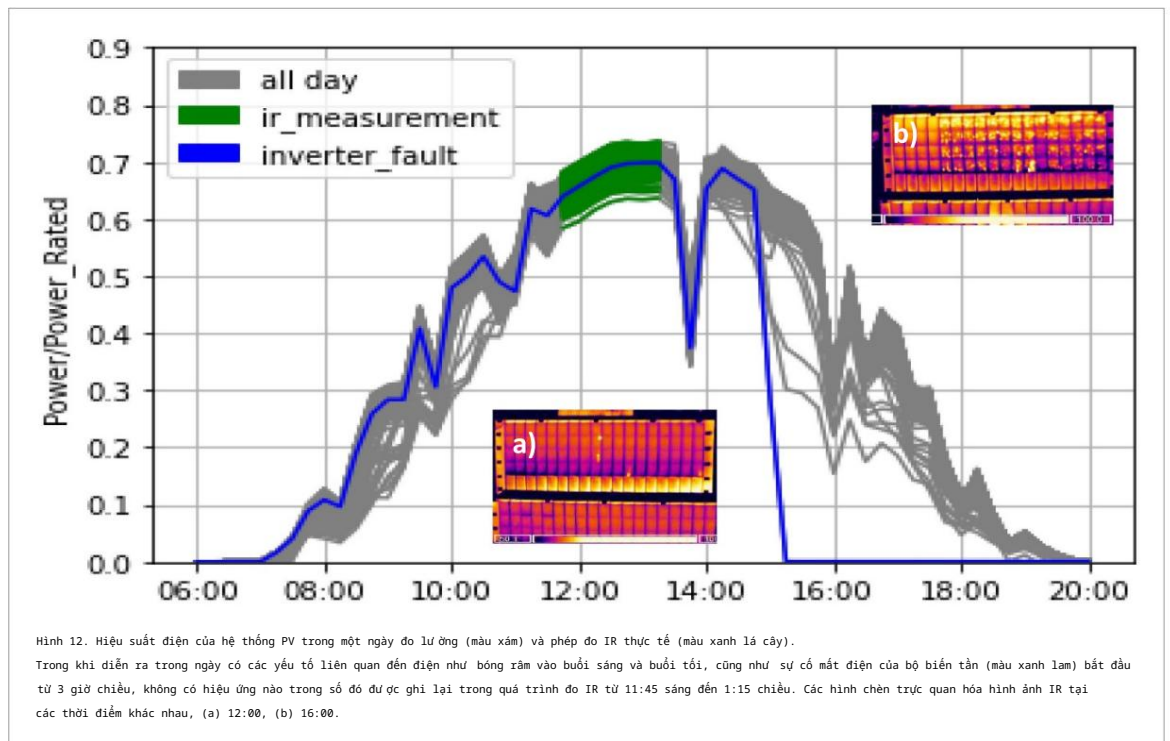
Bommes et al [84] và Zefri et al [60] đề xuất một phư ơng pháp mạnh mẽ hơn để tham chiếu địa lý trực tiếp sử dụng cả phép đo GPS và tín hiệu trực quan [84]. Phư ơng pháp này sử dụng cấu trúc từ chuyển động để tái tạo quỹ đạo của máy ảnh và để có được tọa độ địa lý chính xác cho các góc của mỗi mô-đun PV.

4.3. Đánh giá dữ liệu-Đánh giá hình ảnh IR, sự liên quan đến hiệu suất hệ thống Bên cạnh việc phát

hiện dị thường và vị trí lỗi, việc đánh giá và thẩm định các phát hiện IR cũng rất quan trọng và thú vị. Mục đích là liên kết hiệu suất/sản lượng/mất điện với những thay đổi được phát hiện trong phân phối nhiệt độ hoặc các mẫu IR cụ thể của lỗi và các hành động được khuyến nghị cho O&M. Nhiệt độ tăng có nghĩa là giảm công suất và ngược lại. Như ng có nhiều yếu tố ảnh hưởng khiến việc định lượng tổn thất điện năng trong điều kiện vận hành thực tế trở nên khó khăn. Các yếu tố quan trọng nhất là, ví dụ như điều kiện thời tiết thay đổi (theo thời gian và cục bộ), điểm vận hành chưa biết (lý tư ờng là MPP), các ảnh hưởng bên ngoài không thể tránh khỏi (và chủ yếu là chưa biết) từ lưới điện (ví dụ như cắt giảm), vận hành các mô-đun PV trong kết nối điện nối tiếp và/hoặc song song, đặc tính IV của mỗi tế bào quang điện [124]. Một cách tiếp cận cơ bản thú vị hơn đư ợc Catalano [125] trình bày, một mô hình cân bằng công suất đư ợc sử dụng để ớc tính công suất đư ợc tạo ra (tiêu tán) cho từng ô, có sai số nhỏ hơn 1% đối với các ô phân luồng.

Đặc biệt khi liên kết các phát hiện IR với tổn thất năng suất, điều cực kỳ quan trọng là các yếu tố đã đề cập và các lỗi liên quan đến nguồn điện khác có thể ảnh hưởng đến nhà máy điện PV, như ng không nhất thiết phải xảy ra trong quá trình kiểm tra IR. Hình 12 cho thấy một ví dụ về hiệu suất điện của một nhà máy điện PV vào một ngày diễn ra phép đo IR. Trong khi trong quá trình đo thực tế, hiệu suất chung đáp ứng đư ợc kỳ vọng của các phát hiện IR, trư ớc và sau khi đo, các bộ phận của nhà máy bị ảnh hưởng bởi bóng râm và lỗi biến tần, gây ra sự cố mất điện của một số chuỗi PV.

Có một số cách tiếp cận để liên hệ nhiệt độ mô-đun với công suất mô-đun [126] và sự suy giảm [67, 127]. Vergura và Marino [128] phân loại hiệu suất theo một khuôn khổ phân tích các ô và cụm ô: $T = 10\text{ K}$ gây ra sự giảm hiệu suất 4%, $T = 18\text{ K}$ gây ra sự giảm hiệu suất 7%-10%. Teubner [129, 130] tính toán sự giảm công suất tư ơng đối của mô-đun PV dựa trên nhiệt độ mô-đun trung bình của nó so với nhiệt độ của mô-đun tham chiếu mạch hở. Công suất còn lại của các mô-đun bị ảnh hưởng bởi PID tư ơng quan tốt với số lượng ô đư ợc làm nóng [131-133]. Có thể xác minh công suất đư ợc suy ra/đo đư ợc của mô-đun PV bị lỗi từ chữ ký IR của nó bằng phép đo IV hoặc giám sát ở cấp độ mô-đun. Trong các dự án quy mô tiện ích không có chuỗi giám sát, quét nhiệt độ đang trở nên quan trọng hơn để xác định vị trí các mô-đun yếu nhất trong chuỗi và ưu tiên bảo trì khắc phục [134]. Dữ liệu giám sát cấp mô-đun xác minh sự sụt giảm điện áp [51, 135] đối với các mô-đun bị lỗi với nhiệt độ tăng do sự dịch chuyển của điểm làm việc. Moreton et al [136]



đã nghiên cứu rõ ràng mối tương quan giữa chênh lệch nhiệt độ và sụt áp và cho thấy tác động của việc theo dõi MPP lên điểm vận hành và chênh lệch nhiệt độ, dao động mạnh đối với cường độ chiếu xạ thấp. Các ô được làm nóng, cụ thể là các điểm nóng, được nghiên cứu và mô hình hóa để ngăn ngừa hỏng hóc [136-140].

Islam et al [141] mô tả sự mất hiệu suất tuyến tính đối với các mô-đun PV bị lỗi với chênh lệch nhiệt độ tăng dần giữa lỗi được gia nhiệt và nhiệt độ môi trường. Muttillio et al [142] đã trích xuất các giá trị điện đặc trưng hỏng hóc (MPP, ISC và VOC) từ các mô-đun PV bị lỗi có mối tương quan với hình ảnh IR của chuỗi thử nghiệm. Pinceti et al [143] đã trình bày một mô hình toán học để tương quan giữa sự gia tăng nhiệt độ với tổn thất điện năng và giảm thu nhập kinh tế. Sử dụng dữ liệu từ trình tối ưu hóa mô-đun [144] hoặc phép đo IV [136] cũng có thể hỗ trợ dự đoán công suất nhưng trước tiên, không phản ánh các điều kiện vận hành thực tế của phần lớn các mô-đun PV trong quá trình lắp đặt không gian mở và thứ hai, cung cấp dữ liệu cho mô-đun PV đơn lẻ ở một số điều kiện môi trường nhất định. Một nghiên cứu suy thoái mở rộng về các dự trữ nhiệt là 53,5 GWp do máy bay cho thấy sự suy thoái lỗi diễn ra nhanh hơn ở các vùng có nhiệt độ cao hơn và theo tuổi của địa điểm, được thể hiện đối với các điểm nóng không xác định được và các lỗi có thể bảo hành [127].

Quan trọng hơn việc đánh giá chính xác sự suy giảm công suất của từng mô-đun PV bị lỗi là tác động đến hiệu suất hệ thống mà mô-đun đó thuộc về. Do khó khăn trong việc chuyển dữ liệu từ các mô-đun đơn lẻ sang các mô-đun trong cấu hình chuỗi và xác định tác động đến hiệu suất chuỗi/mảng (ví dụ chuỗi đôi tức là hai chuỗi song song), Dalsass et al [93, 145-147] và Skomedal et al [148-151] đã nghiên cứu dữ liệu mảng được giám sát. Cả hai đều kết hợp hình ảnh IR với dữ liệu sản xuất ở cấp độ chuỗi. Họ đã phân tích/tổng hợp dữ liệu năng suất hàng ngày của tháng trước và sau khi kiểm tra IR.

Họ đã tìm thấy/xác định các chuỗi con, được bảo vệ bởi diode, là đơn vị nhỏ nhất có thể phát hiện được. Theo Dalsass và Skomedal, điều quan trọng nhất ở cấp độ chuỗi là số lượng chuỗi con mô-đun chứa các bất thường về nhiệt. Hiệu suất của một chuỗi có 60 chuỗi con (20 mô-đun, mỗi mô-đun có ba chuỗi con) trung bình giảm 1,16 + 0,12% cho mỗi chuỗi con mô-đun chứa các bất thường về nhiệt, thấp hơn dự kiến (1/60 = 1,6%). Ngoài ra, một sự dịch chuyển của điểm hoạt động diễn ra theo Dalsass et al [152].

Đối với phân tích và đánh giá có ý nghĩa và định lượng, dữ liệu chiếu xạ và nhiệt độ mô-đun nên được ghi lại do độ trễ nhiệt. Đối với các nhà máy điện PV mở rộng, một số đơn vị đo lường nên được phân phối khắp nhà máy điện PV, vì vi khí hậu có thể khác nhau đáng kể (do bóng râm, sự ngưng tụ, bụi, tầng bình lưu, hình thành mây, v.v.).

Hơn nữa, việc đánh giá và định lượng mô-đun bị lỗi tại hiện trường vẫn còn khó khăn và không rõ ràng. Không có tiêu chuẩn đủ điều kiện rõ ràng. Hầu hết các tác giả đánh giá công suất mô-đun xác định theo các điều kiện thử nghiệm tiêu chuẩn (STC). Moreton đưa ra các đề xuất về tiêu chuẩn từ chối và chấp nhận. Dalsass và Skomedal đưa ra các đề xuất để điều tra hiệu suất của các mô-đun PV bị lỗi trong bối cảnh hệ thống PV.

5. Thảo luận

Bài học kinh nghiệm từ các tài liệu cho thấy nhiều thành tựu đã đạt được trong những năm gần đây, cả về kiểm tra IR thông lượng cao tại các nhà máy điện PV GWP và về tính phù hợp của các phát hiện.

Tuy nhiên, chúng tôi đã xác định ba trụ cột phát triển cần cung cấp giá trị cho các bên liên quan/người dùng các phép đo IR như vậy trong tương lai. Chúng tôi thấy tiềm năng chưa được sử dụng trong lĩnh vực thu thập dữ liệu, xử lý hình ảnh và đánh giá hình ảnh.

Đầu tiên, thu thập hình ảnh là việc thực hiện kiểm tra. Sử dụng máy bay và máy bay không người lái ít tốn kém hơn kết hợp với hệ thống camera phù hợp đã được phát triển và mở rộng hơn nữa trong những năm gần đây.

Trong khi máy bay có thể kiểm tra nhiều MWp từ độ cao trong thời gian ngắn, máy bay không người lái có độ cao bay thấp hơn và do đó có độ phân giải tốt hơn cần thời gian dài hơn gấp mười lần. Công nghệ tiên tiến nhất là máy bay không người lái có thể kiểm tra 1 mô-đun s 1 của các nhà máy điện PV nhiều MWp. Tuy nhiên, các báo cáo không cung cấp thông tin chi tiết về chất lượng hình ảnh, nếu độ phân giải hình ảnh đủ để đánh giá hình ảnh biểu cảm, hữu ích cho các bên liên quan đến PV. Hơn nữa, có tài liệu ghi lại rằng các nhiệm vụ kéo dài dựa trên máy bay không người lái được thực hiện trong vòng 1 ngày.

Câu hỏi về ảnh hưởng của các điều kiện đo lường thay đổi trong suốt ngày đo lường đối với việc đánh giá và thẩm định vẫn chưa có lời giải đáp. Điều đáng hứa hẹn là máy bay không người lái phù hợp với các hoạt động ban ngày. Đối với ví dụ giới thiệu về nhà máy điện PV GWP, cần phải kiểm tra IR liên tục bằng máy bay không người lái trong ít nhất 70 hoạt động ban ngày. Điều này đòi hỏi các hệ thống mạnh mẽ để vận hành vĩnh viễn và lý tưởng là tự chủ trong điều kiện môi trường khắc nghiệt, nơi đặt các nhà máy điện PV.

Các giải pháp là cần thiết, điều chỉnh các ví dụ như trực thăng 'khôn ngoan' được điều khiển, có động cơ như một phần của sứ mệnh Sao Hỏa 2020 của NASA [153], hoặc máy bay không người lái tự động bay cho mục đích y tế đến các đảo xa xôi [154], cho PV. Việc song song hóa và phối hợp hoạt động và giao tiếp của máy bay không người lái tự động theo bầy đàn cũng là một giải pháp thay thế, nhưng cần có những phát triển hơn nữa và các quy định được điều chỉnh. Các chiến lược vận hành máy bay không người lái thông minh sau đó có thể kiểm soát việc lập kế hoạch tuyến đường và điều hướng.

Thứ hai, xử lý hình ảnh đã là trọng tâm của nghiên cứu trong những năm gần đây và nhiều việc đã được thực hiện về phát hiện dị thường và phân loại lỗi. ML đã trở thành một phần quan trọng của các kỹ thuật xử lý. Các số liệu được công bố nhấn mạnh chất lượng của các công cụ đã phát triển, sự liên quan và lợi ích cho cộng đồng PV thường không rõ ràng vì loại lỗi và số lượng lỗi không được đưa vào. Nhìn chung, thiếu các tập dữ liệu phù hợp với số lượng ví dụ đủ về một số kiểu lỗi nhất định, thiếu sự liên quan của các quan sát được đánh giá, ví dụ như phân chim. Do đó, nhiều phương pháp ML bị hạn chế về độ chắc chắn của dự đoán.

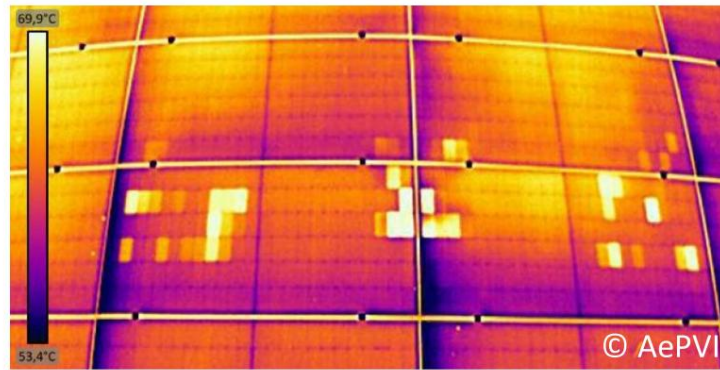
Trong tài liệu, các công nghệ kế thừa chiếm ưu thế của các mô-đun 60 và 72 cell, ví dụ như mô-đun half-cut/butterfly, vẫn chưa có vai trò gì. Do kết nối điện đặc biệt của các mô-đun này, các công cụ phân tích tiêu chuẩn có thể hiểu sai các bất thường về nhiệt đối xứng, do lỗi chỉ ở một nửa, xem hình 13.

Ở đây, việc thành lập một tập dữ liệu hình ảnh IR với sự tham gia của quốc tế có thể giúp lấp đầy những khoảng trống và thúc đẩy phát triển thuật toán cho tất cả mọi người.

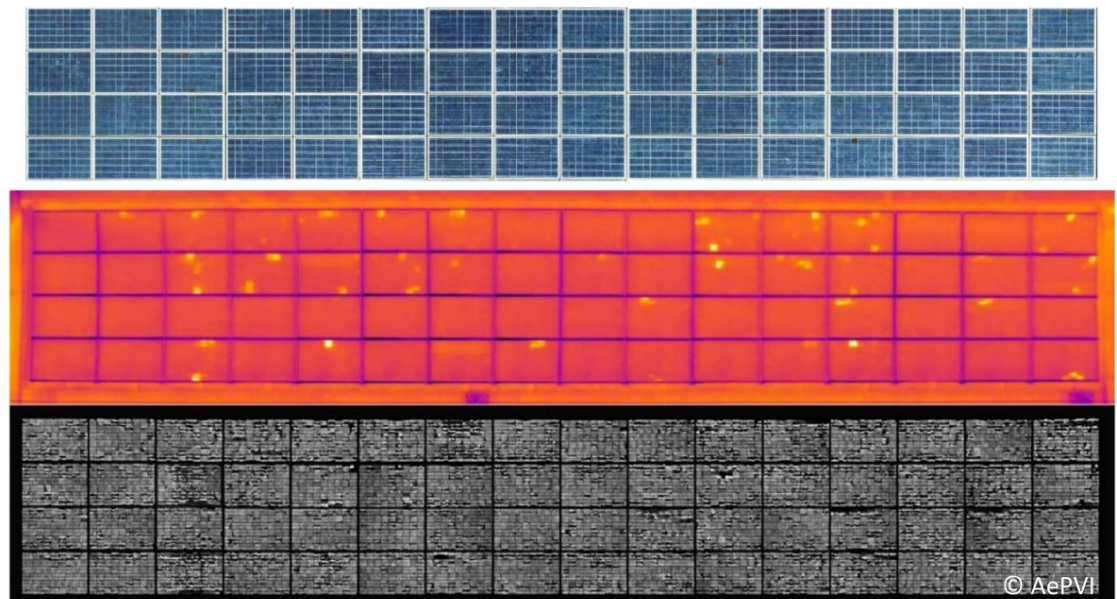
Thứ ba, đánh giá hình ảnh nhằm mục đích chỉ ra sự liên quan của sự bất thường được quan sát đối với hiệu suất, năng suất và tính an toàn của nhiệt ảnh năng lượng PV. Các mô-đun yếu nhất trong chuỗi có thể được xác định bằng cách tăng nhiệt độ của chúng. Rằng đây không nhất thiết là tất cả các mô-đun bị lỗi như thể hiện khi so sánh với các bản ghi EL, hãy xem hình 14. Để làm rõ mức độ lỗi và tác động của lỗi, đặc biệt là các vết nứt tế bào, các bên liên quan đến PV nên xem xét các phép đo bổ sung, chẳng hạn như IRINV, đường cong IV, EL, PL, hãy xem hình 15, tùy thuộc vào mục tiêu của họ.

Số lượng ấn phẩm hạn chế về đánh giá hiệu suất cho thấy điều này rất khó. Nhiều yếu tố ảnh hưởng phải được biết đến và cần được tính đến. Cần phải xây dựng kiến thức cơ bản, ví dụ như kiến thức về cấu hình điện và bố trí chuỗi/biến tần (bộ tối ưu hóa mô-đun, biến tần chuỗi hoặc biến tần trung tâm). Tổn thất điện năng của các mô-đun PV không được xác định. Đó có phải là tổn thất điện năng của mô-đun trong điều kiện STC hoặc điều kiện thực tế, hay trong kết nối nối tiếp với các mô-đun khác, như trong hoạt động thực tế, hay năng suất tốt hơn? Ở đây, nhận thức về sự khác biệt và ý nghĩa của chúng còn thiếu. Cho đến nay, trọng tâm là các mô-đun, nhưng quan điểm nên vượt ra ngoài các mô-đun để bao gồm các yếu tố bên ngoài, biến tần và lưới điện. Các phương pháp tiếp cận đầu tiên kết hợp dữ liệu sản xuất với hình ảnh IR để xem xét khoảng thời gian dài hơn chứ không chỉ thời điểm ghi hình ảnh. Mối tương quan giữa dữ liệu giám sát và các bất thường IR không phải lúc nào cũng rõ ràng, nhưng điều này không có nghĩa là không có lỗi hoặc tác động. Trong dữ liệu giám sát, ảnh hưởng của các thành phần hệ thống khác nhau có thể chồng chéo và ẩn các lỗi mô-đun.

Để ngăn ngừa việc hiểu sai các bất thường về nhiệt rõ ràng, siêu dữ liệu (thông tin về địa lý và cơ học của địa điểm) và các khái niệm về hệ thống dây điện và các điều kiện đo lường phải được biết đến và tham gia vào quá trình đánh giá. Hai phép đo ở các điều kiện đo lường khác nhau sẽ củng cố kết quả và thất bại



Hình 13. Các mô-đun kiến trúc hình cánh bướm thể hiện các bất thường về nhiệt ở cả khu vực bên phải và bên trái trong IROP (900 W m⁻² song song. Kết quả, 22 °C môi trường xung quanh). Các mô-đun Butterfly có ba chuỗi con, nhưng thực tế tạo thành hai chuỗi con được kết nối nối điện này có thể dẫn đến các bất thường về nhiệt ở cả hai khu vực chuỗi con trong phần cực thuận của diốt (bị ngắn mạch chủ động hoặc bị ngắn mạch bị lỗi), mặc dù lỗi chỉ xuất hiện ở một chuỗi con.

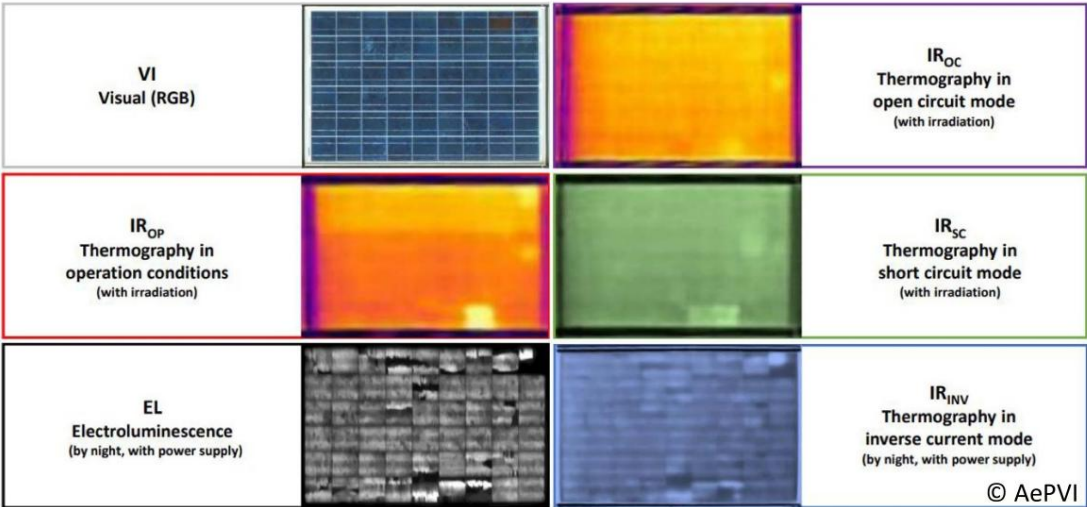


Hình 14. So sánh trực quan (phía trên), IROP (lắp đặt trên mái nhà, 30 °C môi trường xung quanh) (ở giữa) và các phép đo EL (dưới cùng) của 1200 W m⁻² [155]. Trong khi các phép đo EL cho thấy hư hỏng nghiêm trọng của ô ở hầu hết các mô-đun, chỉ một nửa số mô-đun cho thấy bất thường trong IROP. Vì bộ biến tần phản ứng với công suất đầu ra giảm của các mô-đun bị hư hỏng nên điểm vận hành chuyển sang công suất thấp hơn. Sau đó, chỉ những ô bị hư hỏng nghiêm trọng nhất mới hiển thị dưới dạng bất thường về nhiệt.

phân tích hình ảnh mờ hồ. Các công cụ thị giác máy tính đầy hứa hẹn hiện có, ví dụ [156], điều còn thiếu là việc triển khai cho PV. Các kết quả mẫu được đưa ra bởi Bommes et al [120], nếu các tập dữ liệu cần thiết tồn tại.

Hơn nữa, không tồn tại các tiêu chuẩn chắc chắn và được chấp nhận rộng rãi về mức độ nghiêm trọng của các dị thường nhiệt. Có những cách tiếp cận mờ hồ, ví dụ như đề xuất $T > 20$ K là nghiêm trọng [136, 157] hoặc dự báo tổn thất điện năng theo các điều kiện STC. Theo kinh nghiệm của chúng tôi, mức độ kém hiệu suất liên quan đến các dị thường nhiệt cần được đánh giá trong bối cảnh các điều kiện đo lường và ngoài ra là nền tảng tài chính và khái niệm đầu tư của nhà máy điện PV quan tâm. Các số liệu liên quan đến lĩnh vực phù hợp nên được đánh giá và chuyển thành một tiêu chuẩn.

Cuối cùng, chúng tôi đặc biệt khuyến nghị một tuyên bố nhất quán và có thông tin về cảnh quay IR được trình bày bao gồm: độ rọi, nhiệt độ môi trường, điểm vận hành và thang nhiệt độ (bảng tra cứu và thanh màu phù hợp). Ngoài ra, cấu hình nhà máy (loại mô-đun, bố trí chuỗi, loại biến tần), ngày, giờ, hình ảnh trực quan tương ứng và tốc độ gió là mong muốn đối với tiêu chuẩn Vàng. Chúng tôi khuyến nghị sử dụng các lược đồ màu khác nhau cho IROP, IRSC và IRINV. Các số liệu ML nên được làm phong phú thêm bằng các mô tả về tập dữ liệu.



Hình 15. So sánh các phương pháp đo lường khác nhau cho một mô-đun [155].

6. Kết luận

Số lượng lớn các ấn phẩm trong những năm gần đây cho thấy những lợi thế của nhiệt ảnh, đặc biệt là các cuộc khảo sát IR nhanh bằng máy bay không người lái để khắc phục sự cố các nhà máy điện PV đã được công nhận và đang được sử dụng. Để thúc đẩy việc mở rộng năng lượng tái tạo, các nhà máy điện GWP phải được xây dựng, vận hành và hoạt động. Những khoản đầu tư này phải và nên cung cấp điện trong thời gian dài và bền vững. Chủ sở hữu tài sản, EPC và các công ty O&M quan tâm đến việc đạt được đánh giá nhanh chóng và đáng tin cậy về tình trạng của hệ thống PV, có thể thực hiện được. Vận hành và bảo trì là điều quan trọng để đảm bảo điều đó. Cơ sở vững chắc và đáng tin cậy để ra quyết định là điều kiện tiên quyết. Hồng ngoại có tiềm năng trở thành một thành phần thiết yếu trong hộp công cụ để kiểm tra và đánh giá các nhà máy điện PV GWP. Đối với việc kiểm tra các nhà máy điện PV mở rộng này, tiềm năng của hình ảnh IR vẫn chưa thể được khai thác đầy đủ bằng các phương pháp tiếp cận hiện tại trong lĩnh vực thu thập dữ liệu, xử lý hình ảnh và đánh giá.

Theo tài liệu, chúng ta cần nhấn mạnh hơn nữa, hiểu sâu hơn về cách định lượng tác động của những bất thường này đối với hiệu suất cũng như sự suy giảm của chúng. Các tiêu chuẩn và nghiên cứu khoa học chi tiết có thể cung cấp cho các bên liên quan đến PV thông tin cần thiết để O&M có thể hành động. Đối với điều đó, cần tạo ra các tập dữ liệu phù hợp về lỗi cộng với dữ liệu điện. Vì tỷ lệ lỗi của các hệ thống PV thường thấp, dưới 8%, nên việc hợp tác quốc tế là có lợi. Hầu hết đều thiếu các tập dữ liệu phù hợp có sẵn để điều chỉnh, đào tạo và thử nghiệm các thiết bị tính toán hiện có cho PV. Việc tạo ra các tập dữ liệu này và công khai chúng là nhiệm vụ đầy thách thức nhất. Các hợp tác quốc tế về việc thu thập các tập dữ liệu được gần gũi như vậy, theo ví dụ của NREL [158], cung cấp quyền truy cập vào nhiều tập dữ liệu khác nhau.

Sau đó, các quy trình công cụ ML trong tương lai có thể nắm bắt toàn bộ các bước của quy trình kiểm tra IR.

Với điều đó, chúng tôi tin rằng công nghệ hình ảnh IR được trang bị tốt cho các cuộc kiểm tra chất lượng sắp tới của các nhà máy điện PV GWP.

Tuyên bố về tính khả dụng của dữ liệu

Mọi dữ liệu hỗ trợ cho những phát hiện của nghiên cứu này đều có trong bài viết (và mọi tệp bổ sung).

Lời cảm ơn

Công trình này được hỗ trợ bởi Bộ Kinh tế và Hành động Khí hậu Liên bang Đức (Dự án 'COSIMA', FKZ: 0324291A và 'dig4morE', FKZ: 03EE1090B) cũng như Chính quyền bang Bavaria (Dự án 'PVtera-Sản xuất điện quang điện đáng tin cậy và tiết kiệm chi phí ở quy mô Terawatt', số 44-6521a/20/5).

Mã số ORCID

Claudia Buerhop <https://orcid.org/0000-0001-5233-6700>

Tài liệu tham khảo

[1] Bloomberg NEF 2022 Solar-10 dự đoán cho năm 2022 BloombergNEF (có tại: [bnef.com](https://www.bnef.com))

[2] Andrews R 2017 Giới thiệu về Kiểm tra trên không Solarpro 10 12-15 [3] Illicito A, Previ A, Fleres S và Scuto M 1994 Kinh nghiệm thử nghiệm các mô-đun quang điện cho nhà máy điện đa megawatt Proc. 1994 IEEE 1st World Conf. về Chuyển đổi Năng lượng Quang điện-WCEC (Hội nghị chung của PVSC, PVSEC và PSEC) tập 2 trang 2271-4

[4] King DL, Kratochvil JA, Quintana MA và McMahon TJ 2000 Ứng dụng cho thiết bị hình ảnh hồng ngoại trong thử nghiệm hệ thống, mô-đun và pin quang điện Biên bản Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 28-2000 trang 1487-90

[5] Bazillian MD, Kamalanathan H và Prasad DK 2002 Phân tích nhiệt của hệ thống quang điện tích hợp tòa nhà Renew. Năng lượng 26 449-61

[6] IEC/TS 62446-3:2017-06 2017 Hệ thống quang điện (PV)-yêu cầu về thử nghiệm, lập tài liệu và bảo trì, phần 3: mô-đun quang điện và nhà máy- tiêu chuẩn nhiệt hồng ngoại ngoài trời

[7] Spagnolo GS, Vecchio PD, Makary G, Papalillo D và Martocchia A 2012 Đánh giá về nhiệt ảnh IR được áp dụng cho hệ thống PV Hội nghị quốc tế lần thứ 11 về Môi trường và Kỹ thuật điện năm 2012 trang 879-84

[8] Tsanakas JA, Ha L và Buerhop C 2016 Lỗi và chẩn đoán nhiệt hồng ngoại trong các mô-đun quang điện c-Si đang hoạt động: tổng quan về nghiên cứu và những thách thức trong tư ng lai Renew. Sustain. Energy Rev. 62 695-709 [9] Gallardo-Saavedra S, Hernández-Callejo L và Duque-Perez O 2018 Đánh giá công nghệ của thiết bị đo được sử dụng trên không kiểm tra nhiệt của các nhà máy quang điện Renew. Sustain. Energy Rev. 93 566-79

[10] Rakha T và Gorodetsky A 2018 Đánh giá năm 2018 về các ứng dụng hệ thống máy bay không người lái (UAS) trong môi trường xây dựng: hướng tới quy trình kiểm tra tòa nhà tự động sử dụng máy bay không người lái Autom. Constr. 93 252-64 [11] Jahn U, Herz M, Koentges M, Parlevliet D, Paggi M và Tsanakas I 2018 Đánh giá về hình ảnh hồng ngoại và phát quang điện cho Ứng dụng PV Field IPT 13, Nhiệm vụ phụ 3.3: Báo cáo IEA-PVPS T13-10

[12] Herraiz AH, Marugán AP và Márquez FPG 2020 Đánh giá về hệ thống giám sát tình trạng cho các nhà máy điện mặt trời dựa trên kỹ thuật chụp ảnh nhiệt và kiểm tra không phá hủy đối với tài sản công nghiệp năng lượng tái tạo biên tập M Papaelias, FPG Marquez và A Karyotakis (Boston, MA: Butterworth-Heinemann) chương 7, trang 103-18

[13] Rahaman SA, Urmee T và Parlevliet DA 2020 Xác định lỗi hệ thống PV bằng cách sử dụng hình ảnh hồng ngoại (IR) dựa trên máy bay điều khiển từ xa (RPA): một đánh giá Sol. Năng lượng 206 579-95 [14] Kandeal AW, Elkadeem MR, Kumar Thakur A, Abdelaziz GB, Sathyamurthy R, Kabeel AE, Yang N và Sharshir SW 2021 Giám sát tình trạng hệ thống quang điện mặt trời dựa trên nhiệt kế hồng ngoại: một bản tóm tắt ngắn gọn về những tiến bộ gần đây Sol. Energy 223 33-43

[15] Venkatesh SN và Sugumaran V 2021 Chẩn đoán lỗi của lỗi thị giác trong các mô-đun quang điện: một bản đánh giá Int. J. Green Energy 18 37-50

[16] He Y, Deng B, Wang H, Cheng L, Zhou K, Cai S và Ciampa F 2021 Tầm nhìn máy hồng ngoại và nhiệt ảnh hồng ngoại với học sâu: một bài đánh giá Công nghệ vật lý hồng ngoại 116 103754 [17] Najiah Nurul Afifah A, Indrabayu I, Suyuti A và Syafaruddin SA 2021 Đánh giá về các kỹ thuật xử lý hình ảnh để phát hiện hư hỏng trên các tấm pin quang điện ICIC International [18] Herrmann W và cộng sự 2021 Đánh giá chất lượng các nhà máy điện quang điện (PV) bằng thiết bị kiểm tra di động Nhiệm vụ 13: Hiệu suất, hoạt động và độ tin cậy của các hệ thống quang điện do W Herrmann và U Jahn biên tập (IEA PVPS)

[19] Navid Q, Hassan A, Fardoun AA, Ramzan R và Alraeesi A 2021 Phương pháp chẩn đoán lỗi cho các nhà máy điện quang điện quy mô tiện ích: đánh giá về tình trạng hiện tại Tính bền vững 13 1629 [20] Buerhop C, Schlegel D, Niess M, Vodermayr C, Weißmann R và Brabec CJ 2012 Độ tin cậy của hình ảnh IR của các nhà máy PV trong điều kiện vận hành Sol. Energy Mater. Sol. Cells 107 154-64 [21] Fernández A, Usamentiaga R, de Arquer P, Fernández MA, Fernández D, Car us JL và Fernández M 2020 Phát hiện, phân loại và định vị chính xác các khuyết tật trong các nhà máy quang điện lớn dựa trên máy bay không người lái và nhiệt ảnh hồng ngoại Appl. Sci. 10 5948

[22] Denz J, Hepp J, Buerhop C, Doll B, Hauch J, Brabec CJ và Peters IM 2022 Các khuyết và hiệu suất của các mô-đun PV Si trong lĩnh vực-một phân tích Năng lượng Môi trường. Khoa học 15 2180-99 [23] Haque A, Bharath KVS, Khan MA, Khan I và Jaffery ZA 2019 Chẩn đoán lỗi của mô-đun quang điện Khoa học năng lượng. Kỹ thuật. 7 622-44

[24] Köntges M 2014 Hiệu suất và độ tin cậy của hệ thống quang điện, Nhiệm vụ phụ 3.2: Xem xét các lỗi của mô-đun quang điện (IEA, Chương trình Hệ thống Điện quang điện)

[25] Muehleisen W, Eder GC, Voronko Y, Spielberger M, Sonnleitner H, Knoebl K, Ebner R, Ujvari G và Hirschl C 2018 Ngoài trời phát hiện và hình dung thiệt hại do mưa đá gây ra cho các nhà máy quang điện Renew. Năng lượng 118 138-45

[26] Buerhop C, Jahn U, Hoyer U, Lerche B và Wittmann S 2007 Báo cáo cuối cùng về nghiên cứu khả thi về việc kiểm tra chất lượng của các mô-đun quang điện sử dụng hình ảnh hồng ngoại (có tại: www.sev-bayern.de/wp-content/uploads/2018/12/IR-Handbuch.pdf)

[27] Gulkowski S, Zytowska N, Dragan P, Licholai L, Debska B, Miasik P, Szyzaska J, Krason J và Szalacha A 2018 Phân tích phân bố nhiệt độ của các công nghệ khác nhau của mô-đun PV sử dụng nhiệt hồng ngoại E3S Web Conf. 49 00044 [28] Gallardo-Saavedra S, Hernández-Callejo L và Duque-Pérez O 2019 Phân tích và mô tả đặc điểm của các khuyết mô-đun PV bằng kiểm tra nhiệt Rev. Fac. Ing.-Univ. Ant. 93 92-104 [29] Buerhop-Lutz C, Pickel T, Scheuerpflug H, Camus C, Hauch J và Brabec CJ 2017 Phân tích thống kê các cuộc kiểm tra hồng ngoại của Nhà máy điện mặt trời PVSEC lần thứ 33 của EU (Amsterdam, Hà Lan) trang 2320-4

[30] Weinreich B, Schauer B, Güzüing S và Haas R 2019 Nghiên cứu thực địa 2.0 về chất lượng mô-đun và hệ thống dựa trên nhiệt độ Các phép đo của 1 GW PV-Symp. (Staffelstein xấu xa)

[31] García Márquez FP và Segovia Ramírez I 2019 Hệ thống giám sát tình trạng cho các nhà máy điện mặt trời với bức xạ và cảm biến nhiệt được nhúng trong máy bay không người lái Đo lường 139 152-62

[32] Numan AH, Hussein HA và Dawood ZS 2021 Phân tích điểm nóng của mô-đun quang điện trong điều kiện che bóng một phần bằng cách sử dụng công nghệ hình ảnh IR Kỹ thuật. Công nghệ. J. 39 1338-44

- [33] Dolara A, Lazaroiu GC và Ogliari E 2016 Phân tích hiệu quả của các nhà máy điện PV dự ợc che phủ bởi dư ỡng dây trên không MV Int. J. Năng lượng Khoáng. Tiếng Anh **7** 115-23
- [34] Cubukcu M và Akanalci A 2020 Phư ơng pháp kiểm tra và xác định lỗi thời gian thực trên hệ thống điện quang điện bằng hình ảnh nhiệt tại Thổ Nhĩ Kỳ Renew. Năng lượng **147** 1231-8 [35] Ebner R, Kubicek B và Ujvári G 2013 Các kỹ thuật không phá hủy để kiểm soát chất lượng của các mô-đun PV: nhiệt ảnh hồng ngoại, hình ảnh phát quang điện và quang điện IECON 2013-39 Hội nghị thứ ợng niên Hiệp hội điện tử công nghiệp IEEE trang 8104-9
- [36] Sinha A, Roy S, Kumar S và Gupta R 2017 Nghiên cứu về sự suy thoái trong các mô-đun quang điện bằng hình ảnh hồng ngoại và phát quang điện Tiến bộ trong Khoa học và Kỹ thuật Quang học (Berlin: Springer) trang 3-9
- [37] Gallardo-Saavedra S, Hernández-Callejo L, Alonso-García M, Santos J, Morales-Aragónes J và Alonso-Gómez V 2019 Chẩn đoán lỗi trên các mô-đun quang điện sử dụng kỹ thuật nhiệt ảnh, phát quang điện, RGB và IV Proc. Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 36 (Marseille, Pháp) trang 1171-5
- [38] Koch M, Weber T, Sobottka C, Fladung A, Clemens P và Berghold J 2016 Chụp ảnh phát quang điện ngoài trời của các mô-đun quang điện tinh thể: nghiên cứu so sánh giữa kiểm tra thủ công ở mặt đất và khảo sát trên không bằng máy bay không người lái Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 32 trang 1736-40 [39] Doll B, Hepp J, Hoffmann M, Schüler R, Buerhop-Lutz C, Peters IM, Hauch JA, Maier A và Brabec CJ 2021 Phát quang để phát hiện khuyết tật trên các mô-đun quang điện kích thước đầy đủ IEEE J. Photovolt. **11** 1419-29
- [40] Mühleisen W et al 2019 So sánh khoa học và kinh tế các phư ơng pháp đặc trưng ngoài trời cho các nhà máy điện quang điện Tái tạo. Năng lượng **134** 321-9
- [41] Zefri Y, ElKettani A, SEbari I và AlAmallam SA 2018 Kiểm tra bằng hồng ngoại nhiệt và trực quan các hệ thống quang điện của Ảnh trực lượng UAV-trư ờng hợp ứng dụng: Máy bay không người lái Morocco **2** 41
- [42] Roumpakias E, Bouroutzikas F và Stamatelos A 2016 Kiểm tra tại chỗ các tấm pin quang điện, dự ợc hỗ trợ bởi nhiệt kế hồng ngoại Adv. Khoa học ứng dụng **1** 53-62
- [43] Kumar S, Jena P, Sinha A và Gupta R 2017 Ứng dụng nhiệt ảnh hồng ngoại để kiểm tra không phá hủy mô-đun quang điện mặt trời J. Kiểm tra không phá hủy. **15** 25-32
- [44] Buerhop C, Pickel T, Scheuerpflug H, Dürschner C và Camus C 2016 aIR-PV-check của các nhà máy PV màng mỏng-phát hiện PID và các khuyết tật khác trong các mô-đun CIGS EU-PVSEC lần thứ 32 (Munich, Đức) trang 2021-6
- [45] Lorenzo GD, Araneo R, Mitolo M, Niccolai A và Grimaccia F 2020 Đánh giá các hoạt động O&M trong các nhà máy PV: thất bại, giải pháp, . điều khiển từ xa và công cụ giám sát IEEE J. Photovolt. **10** 914-26
- [46] Buerhop C, Scheuerpflug H và Pickel T 2015 Phân tích lỗi của các mô-đun PV đã lắp đặt-nhiệt ảnh IR và đo công suất trong chuỗi Hội nghị PVSEC EU lần thứ 31 (Hamburg, Đức) trang 1692-7
- [47] Buerhop C và Scheuerpflug H 2014 So sánh hiệu suất hình ảnh IR và mô-đun trong điều kiện tiêu chuẩn và điều kiện thực tế PVSEC EU lần thứ 29 (Amsterdam, Hà Lan) trang 3260-4
- [48] Buerhop C và Scheuerpflug H 2015 Đặc điểm của các khuyết tật trong các mô-đun PV theo sự phát triển nhiệt độ của chúng bằng cách sử dụng IR-nhiệt ảnh lần thứ 31 EU PVSEC (Hamburg, Đức) trang 1789-92
- [49] Nedelchev I và Zhivomirov H 2020 Một cách tiếp cận kết hợp để đánh giá chức năng của các mô-đun quang điện trong hoạt động trong thế giới thực E3S Web of Conf. (EDP Sciences) trang 02006
- [50] Schuss C, Remes K, Leppänen K, Eichberger B và Fabritius T 2021 Nhiệt ảnh của các tấm pin quang điện và phát hiện khuyết tật trong điều kiện môi trường ngoài trời 2021 IEEE Int. Công nghệ đo lường và thiết bị Conf. (I2MTC) trang 1-6
- [51] Buerhop-Lutz C, Pickel T, Teubner J, Hauch J và Brabec CJ 2019 Phân tích dữ liệu hệ thống/mô-đun PV dự ợc số hóa để chẩn đoán lỗi EU-PVSEC lần thứ 36 (Marseille, Pháp) trang 1336-41
- [52] Fecher F, Pickel T, Buerhop C, Camus C và Brabec JC 2016 Phân loại lỗi của các mô-đun PV bị lỗi dựa trên mức tối đa phân tích power point lần thứ 32 EU PVSEC (Munich, Đức) trang 2252-4
- [53] Buerhop C, Fecher F, Dettelbacher J, Pickel T, Camus C, Hauch J và Brabec JC 2016 Hình ảnh IR của các mô-đun PV bị lỗi chịu ảnh hưởng bởi những thay đổi trong thời gian ngắn của hệ thống điện EU PVSEC lần thứ 32 (Munich, Đức) trang 2027
- [54] Glavaš H, Žnidarec M, Šljivac D và Vei' c N 2022 Ứng dụng nhiệt ảnh hồng ngoại trong phân tích khả năng tái sử dụng đầy đủ của các mô-đun quang điện bị ảnh hưởng bởi mưa đá Appl. Sci. **12** 745 [55] Cardinale-Villalobos L, Rimolo-Donadio R và Meza C 2020 Phát hiện lỗi tấm pin năng lượng mặt trời bằng kỹ thuật số UAS hồng ngoại quang trắc: một nghiên cứu điển hình Int. J. Renew. Energy Res. **10** [56] Buerhop C và Scheuerpflug H 2014 Kiểm tra thực địa các mô-đun PV bằng phư ơng pháp chụp ảnh nhiệt trên không, gần trên máy bay không người lái EU-PVSEC lần thứ 29 (Amsterdam, Hà Lan) trang 2975-9 [57] Gallardo-Saavedra S, Hernández-Callejo L và Duque-Perez O 2018 Ảnh hưởng của độ phân giải hình ảnh trong đo nhiệt độ trên không kiểm tra các nhà máy quang điện IEEE Trans. Ind. Inform. **14** 5678-86
- [58] Sethi R và Kumar P 2017 Ưu điểm và hạn chế của nhiệt ảnh trong các nhà máy điện mặt trời quy mô tiện ích Conf.: ISES Solar World Conf. 2017 và IEA SHC Solar Heating and Cooling Conf. for Buildings and Industry 2017 (<https://doi.org/10.18086/ SWC.2017.20.09>)
- [59] Hu Y, Cao W, Ma J, Finney SJ và Li D 2014 Xác định lỗi không khớp mô-đun PV bằng nhiệt độ dựa trên nhiệt độ Phân tích phần phối IEEE Trans. Device Mater. Reliab. **14** 951-60
- [60] Zefri Y, Sebari I, Hajji H và Aniba G 2022 Phát triển giải pháp lớp 3 dựa trên học sâu để kiểm tra mô-đun quang điện hồng ngoại nhiệt quy mô lớn từ dữ liệu hình ảnh UAV lớn dự ợc chỉnh lưu Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. **106** 102652
- [61] Buerhop-Lutz C, Pickel T, Wenz F, Zetzmann C, Hauch J, Camus C và Brabec CJ 2018 Ảnh hưởng của độ rọi đến khả năng phát hiện và hiệu suất của các mô-đun PV bị ảnh hưởng bởi PID EU-PVSEC lần thứ 35 (Brussels, Bỉ) trang 2001-4
- [62] Buerhop C, Scheuerpflug H và Weißmann R 2011 Vai trò của độ phát xạ hồng ngoại của kính đối với hình ảnh hồng ngoại của các nhà máy PV 26 EU-PVSEC (Hamburg, Đức) trang 3413-6
- [63] Glavaš H, Vukobratović M, Primorac M và Muštrán D 2017 Nhiệt ảnh hồng ngoại trong quá trình kiểm tra tấm pin quang điện 2017 Hội nghị quốc tế về Hệ thống và Công nghệ thông minh (SST) trang 63-68
- [64] Breitenstein O và Langenkamp M 2003 Khóa nhiệt độ (Vi điện tử tiên tiến) tập 10 (Berlin: Springer)
- [65] Bảng độ phát xạ giá trị đo dự ợc (có tại: www.messwert.at/tools/emissionsgradtabelle/)
- [66] Blumm J và Lindemann A 2003/2007 Đặc tính của các tính chất nhiệt vật lý của polyme nóng chảy và chất lỏng sử dụng kỹ thuật flash Nhiệt độ cao.-Máy ép cao. **35/36** 627 [67] Chattopadhyay S et al 2018 Trư ờng quan nhiệt ảnh hồng ngoại với sự suy giảm điện của các mô-đun PV dự ợc kiểm tra trên toàn Ấn Độ khảo sát độ tin cậy của mô-đun quang điện 2016 IEEE J. Photovolt. **8** 1800-8

[68] Quater PB, Grimaccia F, Leva S, Mussetta M và Aghaei M 2014 Máy bay không người lái hạng nhẹ (UAV) để kiểm tra hợp tác các nhà máy PV IEEE J. Photovolt. 4 1107-13 [69] Alvarez-Tey G, Jiménez-Castañeda R và Carpio J 2017 Phân tích cấu hình và vị trí của nhiệt độ thiết bị kiểm tra trong hệ thống quang điện Công nghệ Vật lý Hồng ngoại 87 40-46

[70] Buerhop C, Scheuerpflug H, Pickel T và Camus C 2016 Chụp ảnh hồng ngoại một nhà máy PV theo dõi bằng máy bay không người lái 32 EU PVSEC (Munich, Đức) trang 2016

[71] Henry C, Poudel S, Lee SW và Jeong H 2020 Hệ thống phát hiện tự động các mô-đun PV bị hỏng bằng máy bay không người lái có nhiệt máy ảnh ứng dụng khoa học 10 3802

[72] Xi Z, Lou Z, Sun Y, Li X, Yang Q và Yan W 2018 Chiến lược kiểm tra dựa trên tầm nhìn cho các trang trại quang điện quy mô lớn sử dụng UAV tự động 2018 Hội nghị quốc tế lần thứ 17 về máy tính phân tán và ứng dụng cho khoa học và kỹ thuật kinh doanh (DCABES) trang 200-3

[73] Moradi Sizkouhi AM, Esmailifar SM, Aghaei M và Karimkhani M 2022 RoboPV: một gói phần mềm tích hợp cho giám sát trên không tự động các nhà máy điện mặt trời quy mô lớn Energy Convers. Manage. 254 115217

[74] Roggi G, Niccolai A, Grimaccia F và Lovera M 2020 Một thuật toán theo dõi dự ứng tầm nhìn máy tính cho quang điện UAV tự động ứng dụng giám sát thực vật Năng lượng 13 838 [75] Đo lường máy bay không người lái trong năng lượng mặt trời (có tại: www.measure.com/drones-in-solar-operations) (Truy cập năm 2022)

[76] McColl D Kiểm tra PV mặt trời trên không 2020 (có tại: <http://large.stanford.edu/courses/2020/ph240/mccoll12/>)

[77] Heliguy 2021 Máy bay không người lái để kiểm tra tấm pin mặt trời [78] Oliveira A, Bracht MK, Melo AP, Lamberts R và Ruther R 2021 Đánh giá lỗi trong nhà máy điện quang điện bằng cách sử dụng ảnh ghép chính hình dựa trên nhiệt ảnh hồng ngoại trên không 2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conf. (PVSC) trang 2604-10 [79] Vidal de Oliveira AK, Aghaei M và Ruther R 2019 Phát hiện lỗi tự động của mảng quang điện bằng mạng nơ-ron tích chập trong quá trình chụp ảnh nhiệt hồng ngoại trên không EU-PVSEC lần thứ 36 (Marseille, Pháp) trang 1302-7

[80] Máy bay không người lái Uasvision 2016 cắt giảm chi phí kiểm tra tấm pin quang điện nhiệt (có tại: www.uasvision.com/2016/09/15/drones-cut-cost-of-thermographic-pv-panel-inspections/)

[81] Kiểm tra năng lượng mặt trời bằng máy bay không người lái hồng ngoại Life td (có tại: <https://thedronelifej.com/infrared-drone-solar-inspections/>)

[82] Aghaei M, Madukanya UE, Vidal de Oliveira AK và Ruther R 2018 Kiểm tra lỗi bằng nhiệt ảnh hồng ngoại trên không trong PV nhà máy sau cơn sóng thần khí tự động VII Đại hội Năng lượng Mặt trời Brazil (Granado)

[83] Muntwyler U, Schüpbach E và Lanz M Máy bay không người lái hồng ngoại để kiểm tra PV nhanh chóng và rẻ tiền EU-PVSEC lần thứ 31 trang 1804-6

[84] Bommers L, Buerhop C, Pickel T, Hauch J, Brabec CJ và Peters IM 2022 Tham chiếu địa lý các mô-đun quang điện từ trên không video hồng ngoại sử dụng cấu trúc từ chuyển động Prog. Photovolt. 30 1122-35

[85] Kitawa P 2014 Nhiệt ảnh trên hệ thống quang điện (có tại: <https://kitawa.de/thermografie-pv-anlagen>)

[86] Sách trắng về Kiểm tra trên không (Solarplaza) của Andrews R 2018 [87] Các mức kiểm tra khả dụng của Raptormaps (có tại: <https://raptormaps.com/turnkey-services/>) (Truy cập năm 2022)

[88] Kiểm tra máy bay Solarif (có tại: www.solarif.com/drone-inspection-2/) (Truy cập năm 2022)

[89] Raptormaps 2021 Hướng dẫn kiểm tra PV mặt trời bằng máy bay có người lái (có tại: <https://f.hubspotusercontent40.net/hubfs/3446343/2021%20Hướng%20dẫn%20kiểm%20tra%20máy%20bay%20có%20người%20lái%20thuộc%20PV%20.pdf>)

[90] Andrews R 2018 Xác định và giải quyết các tài sản năng lượng mặt trời kém hiệu quả Solarpro 11 12-18 [91] Grimaccia F, Leva S và Niccolai A 2017 Bản đồ kỹ thuật số nhà máy PV để phát hiện lỗi mô-đun bằng máy bay không người lái IET Renew. Power Gener. 11 1221-8

[92] Francesco G, Sonia L và Alessandro N 2018 Phương pháp bán tự động để xác định lỗi trong các nhà máy điện quang điện lớn bằng cách sử dụng máy bay không người lái Cuộc họp chung của Hiệp hội Điện lực và Năng lượng IEEE (PESGM) (IEEE) năm 2018 trang 1-5

[93] Dotenco S, Dalsass M, Winkler L, Würzner T, Brabec C, Maier A và Gallwitz F 2016 Phát hiện và phân tích tự động mô-đun quang điện trong hình ảnh hồng ngoại trên không Hội nghị mùa đông IEEE 2016 về Ứng dụng của Thị giác máy tính (WACV) (Lake Placid, NY: IEEE) trang 1-9

[94] Niccolai A, Grimaccia F và Leva S 2019 Các công cụ quản lý tài sản tiên tiến trong giám sát nhà máy quang điện: Kỹ thuật số dựa trên UAV Bản đồ năng lượng 12 4736 [95] Kim D, Youn J và Kim C 2016 Tự động trích xuất diện tích tấm pin quang điện từ hình ảnh hồng ngoại nhiệt của UAV J. Korean Soc. Khảo sát Địa lý Ảnh chụp Bản đồ 34 559-68

[96] Kim D, Youn J và Kim C 2017 Nhận dạng lỗi tự động của các mô-đun quang điện dựa trên phân tích thống kê của UAV Nhiệt ảnh Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. 42 179

[97] Wang Q, Paynabar K và Pacella M 2021 Phát hiện dị thường tự động trực tuyến cho hệ thống quang điện bằng cách sử dụng nhiệt ảnh hình ảnh và phân tích ma trận bậc thấp J. Qual. Technol. 1-14

[98] Aghaei M, Leva S và Grimaccia F 2016 Kiểm tra nhà máy điện PV bằng kỹ thuật ghép ảnh cho hình ảnh thời gian thực IR 2016 Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 43 (PVSC) (IEEE) trang 3100-5

[99] Wu F, Zhang D, Li X, Luo X, Wang J, Yan W, Chen Z và Yang Q 2017 Nhận dạng và khớp hình ảnh trên không để kiểm tra các trang trại quang điện quy mô lớn 2017 Hội nghị quốc tế về thành phố thông minh (ISC2) (IEEE) trang 1-6 [100] Carletti V, Greco A, Saggese A và Vento M 2020 Hệ thống bay thông minh để tự động phát hiện lỗi trong các nhà máy quang điện J. Ambient Intell. Humaniz. Comput. 11 2027-40

[101] Tsanakas JA, Chrysostomou D, Botsaris PN và Gasteratos EA

2013 Chẩn đoán lỗi của các mô-đun quang điện thông qua xử lý hình ảnh và phát hiện cạnh Canny trên các phép đo nhiệt độ thực địa Int. J. Sustain. Năng lượng 34 351-72 [102] Arenella A, Greco A, Saggese A và Vento M 2017 Phát hiện lỗi thời gian thực trong các tế bào quang điện bằng camera trên máy bay không người lái Int. Conf. Phân tích và Nhận dạng Hình ảnh (Springer) trang 617-25 [103] Addabbo P, Angrisano A, Bernardi ML, Gagliardi G, Mennella A, Nisi M và Ullo SL 2018 Hệ thống UAV để kiểm tra nhà máy quang điện IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag. 33 58-67 [104] Jeong H, Kwon GR và Lee SW 2020 Chẩn đoán sự suy giảm của mô-đun năng lượng mặt trời bằng cách sử dụng xử lý hình ảnh nhiệt và hình ảnh khả kiến Năng lượng 13 2856

[105] Zhang H, Hong X, Zhou S và Wang Q 2019 Phân đoạn hình ảnh hồng ngoại cho các tấm pin quang điện dựa trên Hội nghị Trung Quốc về Nhận dạng mẫu và Tầm nhìn máy tính (PRCV) Res-UNet (Springer) trang 611-22 [106] Greco A, Pironti C, Saggese A, Vento M và Vigilante V 2020 Một phương pháp tiếp cận dựa trên học sâu để phát hiện các tấm pin trong pin quang điện cây trồng Proc. Hội nghị quốc tế lần thứ 3 về Ứng dụng của Hệ thống thông minh trang 1-7

[107] Vega Diaz JJ, Vlaminck M, Lefkaditis D, Orjuela Vargas SA và Luong H. 2020 Phát hiện tấm pin mặt trời trong phức hợp nền sử dụng hình ảnh nhiệt thu được từ UAV Cảm biến 20 6219

[108] Bommes L, Pickel T, Buerhop C, Brabec CJ và Peters IM 2021 Công cụ thị giác máy tính để phát hiện, lập bản đồ và phân loại lỗi của các mô-đun PV trong video IR trên không Prog. Photovolta. [29 1236-51](#)

[109] Aghaei M, Grimaccia F, Gonano CA và Leva S 2015 Hệ thống điều khiển tự động sáng tạo để kiểm tra các trường PV và từ xa kiểm soát IEEE Trans. Ind. Electron. [62 7287-96](#)

[110] Et-talebey A, Boussetta M, Benslimane M và Khadka DB 2020 Phát hiện lỗi cho trường quang điện dựa trên các kỹ thuật K-means, elbow và hình bóng trung bình thông qua phân đoạn ảnh nhiệt Int. J. Photoenergy [2020 6617597](#) [111] Jaffery ZA, Dubey AK, Haque I và Haque A 2017 Sơ đồ chẩn đoán lỗi dự đoán trong các mô-đun quang điện sử dụng nhiệt hình ảnh Công nghệ vật lý hồng ngoại [83 182-7](#)

[112] Ali MU, Saleem S, Masood H, Kallu KD, Masud M, Alvi MJ và Zafar A 2022 Phát hiện điểm nóng sớm trong các mô-đun quang điện sử dụng các mô tả hình ảnh màu: một nghiên cứu nhiệt ảnh hồng ngoại Int. J. Energy Res. [46 774-85](#)

[113] Alsafasfeh M, Abdel-Qader I, Bazuin B, Alsafasfeh Q và Su W 2018 Phát hiện và phân tích lỗi không giám sát cho các hệ thống quang điện sử dụng máy bay không người lái và tầm nhìn máy móc Năng lượng [11 2252](#)

[114] Niazi KAK, Akhtar W, Khan HA, Yang Y và Athar S 2019 Chẩn đoán điểm nóng cho các mô-đun quang điện mặt trời bằng cách sử dụng Naive Bayes phân loại Sol. Năng lượng [190 34-43](#)

[115] Vlamincck M, Heidbuchel R, Philips W và Luong H 2022 CNN theo vùng để phát hiện dị thường trong các nhà máy điện PV bằng cách sử dụng Hình ảnh trên không Cẩm biển [22 1244](#)

[116] Dunderdale C, Bretteny W, Clohessy C và van Dyk EE 2020 Phân loại khuyết tật quang điện thông qua hồng ngoại nhiệt chụp ảnh bằng cách sử dụng phương pháp tiếp cận học máy Prog. Photovolta., Res. Appl. [28 177-88](#)

[117] Manno D, Cipriani G, Ciulla G, di Dio V, Guarino S và Lo Brano V 2021 Chiến lược học sâu để chẩn đoán lỗi tự động trong hệ thống quang điện bằng hình ảnh nhiệt Energy Convers. Manage. [241 114315](#)

[118] Segovia Ramirez I, Das B và García Márquez FP 2022 Phát hiện và chẩn đoán lỗi trong các tấm pin quang điện bằng phương pháp đo bức xạ cảm biến nhúng trong máy bay không người lái Prog. Photovolta., Res. Appl. [30 240-56](#)

[119] Su Y, Tao F, Jin J và Zhang C 2021 Phát hiện đối tượng vùng quá nhiệt tự động của mô-đun quang điện bằng hình ảnh nhiệt IEEE J. Photovolta. [11 535-44](#) [120] Bommes L, Hoffmann M, Buerhop C, Hauch J, Brabec CJ và Peters IM 2022 Phát hiện dị thường trong hình ảnh IR của mô-đun PV sử dụng chương trình học tự động phân có giám sát Photovolta. [30 597-614](#)

[121] Lee DH và Park JH 2019 Phát triển phương pháp kiểm tra nhà máy điện mặt trời bằng cảm biến hồng ngoại nhiệt trên tàu máy bay không người lái Năng lượng [12 2928](#)

[122] Tsanakas JA, Ha LD và Al Shakarchi F 2017 Kiểm tra nâng cao các cơ sở quang điện bằng phương pháp tam giác hóa trên không và tham chiếu địa lý mặt đất của hình ảnh nhiệt/hình ảnh Renew. Năng lượng [102 224-33](#)

[123] Nisi M, Menichetti F, Muhammad B, Prasad R, Cianca E, Mennella A, Gagliarde G và Marenchino D 2016 Hệ thống EGNSS có độ chính xác cao cải thiện việc bảo trì nhà máy quang điện bằng cách sử dụng RPAS tích hợp với bộ thu RTK giá rẻ Proc. Hội nghị trường đỉnh không dây toàn cầu

[124] Alonso-Garcia MC, Ruiz JM và Chenlo F 2006 Nghiên cứu thực nghiệm về sự không khớp và hiệu ứng che bóng trong đặc tính I-V của mô-đun quang điện Sol. Energy Mater. Sol. Cells [90 329-40](#) [125] Catalano AP, Scognamiglio C, Guerriero P, Daliento S và d'Alessandro V 2021 Sử dụng EMPHASIS để phát hiện lỗi dựa trên nhiệt độ trong các nhà máy quang điện Năng lượng [14 1559](#) [126] Kauppinen T, Panoullot PE, Siikanen S, Athanasakou E, Baltas P và Nikopoulos B 2015 Về quét hồng ngoại của nhà máy quang điện mặt trời Proc. SPIE [9485 948517](#)

[127] Andrews R 2022 Tác động của khí hậu đến các chế độ suy thoái mô-đun có thể phát hiện nhiệt Hội thảo về độ tin cậy quang điện của NREL (Denver, CO)

[128] Vergura S và Marino F 2017 Chẩn đoán dựa trên nhiệt độ định lượng và hỗ trợ máy tính cho các thiết bị PV: phần I-khung IEEE J. Photovolta. [7 822-7](#)

[129] Teubner J, Buerhop-Lutz C, Pickel T, Hauch J, Camus CJ và Brabec CJ 2019 Đánh giá định lượng về tổn thất điện năng của silicon Mô-đun PV bằng nhiệt ảnh IR và sự phụ thuộc của nó vào tiêu chí lọc dữ liệu Prog. Photovolta. [27 479](#)

[130] Denz J, Buerhop-Lutz C, Pickel T, Hauch J, Camus C và Brabec CJ 2020 Đánh giá định lượng về tổn thất điện năng của các mô-đun PV silicon bằng phương pháp chụp ảnh nhiệt IR và ứng dụng thực tế của nó trong lĩnh vực này EU-PVSEC lần thứ 37 (Lisboa, Bồ Đào Nha) trang [1542-7](#) [131] Martinez-Moreno F, Figueiredo G và Lorenzo E 2018 Các trải nghiệm liên quan đến PID thực tế Sol. Năng lượng Mater. Sol. Cells [174 485-93](#)

[132] Buerhop-Lutz C, Fecher FW, Pickel T, Patel T, Zetzmann C, Camus C, Hauch J và Brabec CJ 2017 Tác động của PID đến các công trình lắp đặt PV trên mái nhà công nghiệp Proc. SPIE [10370 1037008](#) [133] Buerhop C, Pickel T, Blumberg T, Adams J, Wrana S, Dalsass M, Camus C, Zetzmann C, Hauch J và Brabec CJ 2016 Tư vấn quan của sự suy thoái tiềm ẩn (PID) trong các mô-đun PV với công suất đầu ra của chuỗi được giám sát Proc. SPIE [9938 99380J](#) [134] van der Vaeren S 2018 Sự kết hợp hoàn hảo giữa dữ liệu giám sát và dữ liệu trên không cho PV mặt trời (có tại: [www.PESSOLAR.com](#))

[135] Teubner J, Kruse I, Scheuerpflug H, Buerhop-Lutz C, Hauch J, Camus C và Brabec CJ 2017 So sánh hình ảnh IR dựa trên máy bay không người lái với dữ liệu công suất giám sát phân giải mô-đun Hội nghị quốc tế lần thứ 7 về quang điện silicon, Silicon PV 2017 (Freiburg, Đức)

[136] Moretón R, Lorenzo E và Narvarte L 2015 Quan sát thực nghiệm về điểm nóng và tiêu chí chấp nhận/từ chối được suy ra Sol. Năng lượng [118 28-40](#)

[137] Winston DP 2019 Kỹ thuật bảo vệ và tăng cường công suất đầu ra hiệu quả cho các mô-đun quang điện mặt trời phát nóng IEEE Trans. Device Mater. Reliab. [19 664-70](#)

[138] Ma M, Liu H, Zhang Z, Yun P và Liu F 2019 Chẩn đoán nhanh lỗi điểm nóng của mô-đun PV silicon tinh thể dựa trên I-V Dự ứng công Microelectron. Độ tin cậy. [100-1 113402](#)

[139] Cabo FG, Marini 'C-Kragi' c I, Garma T và Nižeti' c S 2021 Phát triển mô hình nhiệt điện của tấm pin quang điện trong điều kiện điểm nóng với xác nhận thực nghiệm Năng lượng [230 120785](#)

[140] Muñoz J, Lorenzo E, Martínez-Moreno F, Marroyo L và García M 2008 Một cuộc điều tra về các điểm nóng ở hai nhà máy điện mặt trời nổi lư ời Prog. Photovolta., Res. Appl. [16 693-701](#)

[141] Islam M, Hasan G, Ahmed I, Amin M, Dewan S và Rahman MM 2019 Phân tích hiệu suất dựa trên nhiệt hồng ngoại của mô-đun quang điện 2019 Hội nghị quốc tế về Kỹ thuật năng lượng và điện (ICEPE) trang [1-5](#)

[142] Muttillio M, Nardi I, Stornelli V, de Rubéis T, Pasqualoni G và Ambrosini D 2020 Cẩm biển nhiệt hồng ngoại tại hiện trường cho PV đánh giá hiệu quả hệ thống: kết quả và so sánh với các mô hình điện Cẩm biển [20 1055](#)

IOP Publishing

Tiến trình Năng lượng 4 (2022) 042010

C Buerhop và cộng sự

[143] Pinceti P, Profumo P, Travaini E và Vanti M 2019 Sử dụng hình ảnh nhiệt được hỗ trợ bởi máy bay không người lái để tính toán hiệu suất của nhà máy PV 2019 IEEE Int. Conf. về Môi trường và Kỹ thuật Điện và 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC/ICPS Europe) trang 1-6 [144] Buerhop-Lutz C, Fecher F, Pickel T, Häring A, Adamski T, Camus C, Hauch J và Brabec CJ 2018 Xác minh mô-đun PV bị lỗi nhận dạng bằng hình ảnh IR và bộ tối ưu hóa mô-đun Prog. Photovolt. 26 622-30

[145] Dalsass M, Scheuerpflug H, Fecher F, Buerhop C, Camus C và Brabec CJ 2016 Tư vấn quan giữa công suất chuỗi được tạo ra của nhà máy điện quang điện và các khiếm khuyết của mô-đun được phát hiện bằng nhiệt ảnh trên không IEEE PVSC 43rd (Portland, Hoa Kỳ) trang 3113-8

[146] Dalsass M, Scheuerpflug H, Maier M và Brabec CJ 2015 Tư vấn quan giữa dữ liệu giám sát của nhà máy điện quang điện và các lỗi mô-đun được phát hiện bằng nhiệt ảnh gần trên máy bay không người lái EU-PVSEC lần thứ 31 (Hamburg, Đức) trang 1793-8

[147] Stegner C, Dalsass M, Luchscheider P và Brabec CJ 2018 Giám sát và đánh giá sản xuất điện mặt trời dựa trên sự kết hợp của đo lường thông minh và đo nhiệt Sol. Năng lượng 163 16-24

[148] Skomedal Å F, Aarseth BL, Haug H, Selj J và Marstein ES 2020 Có bao nhiêu điện năng bị mất trong một điểm nóng? Một nghiên cứu điển hình định lượng tác động của các dị thường nhiệt trong hai nhà máy điện PV quy mô tiện ích Sol. Năng lượng 211 1255-62

[149] Aarseth BL, Skomedal A, Ogaard MB và Marstein ES 2020 Ảnh hưởng của các dấu hiệu nhiệt được quan sát bằng hồng ngoại nhiệt ảnh về sản xuất điện trong nhà máy điện quy mô tiện ích Proc. Hội nghị năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 37 trang 1360-3

[150] Skomedal Å F, Ogaard MB, Haug H và Marstein ES 2021 Phát hiện nhanh chóng và mạnh mẽ các tổn thất điện năng nhỏ trong hệ thống PV quy mô lớn IEEE J. Photovolt. 11 819-26 [151] Aarseth BL và Marstein ES 2019 Nhận dạng khuyết tật và ước tính tổn thất điện năng bằng cách sử dụng nhiệt ảnh hồng ngoại Proc. Châu Âu Hội nghị năng lượng mặt trời quang điện trang 1563-8

[152] Dalsass M, Schmitt P, Buerhop C, Luchscheider P, Hauch JA, Brabec J và Camus CJ 2018 Sử dụng điểm vận hành biến tần chuyển đổi như một công cụ đánh giá chất lượng cho các hệ thống quang điện IEEE J. Photovolt. 8 315-21 [153] NASA 2021 Bay trên một thế giới khác [154] BMWi 2020 trong các hoạt động nhân đạo-vận chuyển thuốc men . bằng máy bay không người láiBay không người lái phục vụ con người, Thiên nhiên và Xã hội

[155] Fladung A và Schlipf J 2021 Kiểm tra PV trên không

[156] Lowin M, Kellner D, Kohl T và Mihale-Wilson C 2021 Từ vật lý đến ảo: tận dụng hình ảnh máy bay không người lái để tự động hóa việc bảo trì hệ thống quang điện INFORMATIK 2021

[157] Libra M, Danecek M, Leseticky J, Poulek V, Sedláček J và Beranek V 2019 Giám sát các khiếm khuyết của nhà máy điện quang điện sử dụng máy bay không người lái Năng lượng 12 795

[158] Mạng lưới nhà phát triển NREL 2022 (có tại: <https://developer.nrel.gov/docs/solar/pvdaq-v3/>)