

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

BÙI VĂN HIỀN

NÂNG CAO HIỆU SUẤT HỆ THỐNG PIN QUANG ĐIỆN

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỆN

Tp. Hồ Chí Minh, tháng 12/2024

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM**

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS TS TRƯỜNG VIỆT ANH

Người hướng dẫn khoa học 2: TS. NGUYỄN VŨ LÂN

Phản biện 1: TS. NGUYỄN TRUNG THẮNG

Phản biện 2: TS. TRẦN THANH NGỌC

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành Phố Hồ Chí Minh

ngày ... tháng ... năm 2024

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. **Bui Van Hien**, *Truong Viet Anh*, *Nguyen Tung Linh*, and *Pham Quoc Khanh*, “Rapidly Determine the Maximum Power Point in the Parallel Configuration of the Photovoltaic System,” *Sensors*, 2023, 23, 7503.
2. **Van Hien Bui**, *Viet Anh Truong*, *Vu Lan Nguyen*, *Thanh Long Duong*, “Estimating the potential maximum power point based on the calculation of short-circuit current and open-circuit voltage,” *IET Power Electronics*, 2024, pp: 1-20.
3. *Truong Viet Anh*, *Ton Ngoc Trieu*, *Pham Vo Hong Nghi*, **Bui Van Hien**. “Fast and Accurate GMPPT Based on Modified P&O Algorithm”. *IEEE Access*, Vol 12, 2024, pp: 29588-129600, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3457825.
4. **Bùi Văn Hiền**, *Trương Việt Anh*, *Quách Thanh Hải* (2020). “Tối ưu điểm phát công suất cực đại của pin quang điện làm việc trong điều kiện bóng che”. *Tạp chí Phát triển Khoa học và Công nghệ – Kỹ thuật và Công nghệ*, 73(1):326-338
5. **Bùi Văn Hiền**, *Nguyễn Tùng Linh*, *Nguyễn Vũ Lâm*, *Trương Việt Anh*, *Nguyễn Hồng Nguyên*, “Truy Xuất Điểm Phát Công Suất Cực Đại Của Hệ Thống Pin Quang Điện Trong Các Thiết Bị Di Chuyển”, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Thái Nguyên* 227(08)2022: pp 131 – 139
6. *Trương Việt Anh*, **Bùi Văn Hiền**, *Nguyễn Tùng Linh*, *Nguyễn Vũ Lâm*, *Quách Thanh Hải*, “Đề Xuất Giải Pháp Tìm Điểm Phát Công Suất Cực Đại Của Hệ Thống PV Dựa Vào Dự Đoán Giá Trị I_{sc} Và V_{oc} ”, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Thái Nguyên* 227(11):2022, pp 77-86.
7. *X. T. Luong*, **V. H. Bui**, *D. T. Do*, *T. H. Quach* and *V. A. Truong*, "An Improvement of Maximum Power Point Tracking Algorithm Based on Particle Swarm Optimization Method for Photovoltaic System". 2020 5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD), Ho Chi Minh City, Vietnam, 2020, pp. 53-58
8. *Trinh Trong Chuong*, *Nguyen Duc Minh*, **Bui Van Hien**, *Fan Yang*, *Truong Viet Anh* (2021). “Optimizing the Performance of the Photovoltaic System using the Micro DC-DC Converter”. 2021 3rd International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES) 978-1-6654-3879-7/21/\$31.00 ©2021 IEEE
9. **Bui Van Hien**, *Truong Viet Anh*, *Nguyen Duc Minh*, *Trinh Trong Chuong*, *Y Do Nhu*, *Trieu Viet Phuong*, “Module Integrated Converters and Independent MPPT Technique” *International Conference on Engineering Research and Applications*, 2022, 685-698

CHƯƠNG 1. GIỚI THIỆU

1.1 Lý do chọn đề tài

Năng lượng từ hệ thống pin quang điện (PVS) là bền vững và sẵn có ở mọi nơi, giảm tác động đến môi trường, giảm tổn thất truyền tải và phân phối, tận dụng không gian phát điện tại chỗ [1]. Tuy nhiên, công nghệ khai thác điện PV đổi mới với sự thay đổi liên tục, mất đồng bộ khi vận hành gây thất thoát năng lượng. Hai vấn đề chính để tối ưu hiệu suất của PVS là phát triển kỹ thuật MPPT và điều chỉnh cấu hình PV để giảm tác động của bóng che một phần (PSC) [2].

- Phát triển kỹ thuật GMPPT tránh bẫy LMPP để tăng tốc độ hội tụ, nâng cao hiệu suất, giảm chi phí, duy trì ổn định. Kỹ thuật truyền thống đơn giản, dễ thực hiện thì kém chính xác. Ngược lại, nhóm giải thuật tối ưu hóa và giải pháp lai có hiệu suất cao thì chi phí cao, tốc độ chậm [3].
- Tái cấu trúc PVS để kiểm soát số lượng MPP, giảm tác động của PSC, nâng cao hiệu suất khai thác điện. Kiểu nối tiếp (SC) phải đổi mặt với đa cực trị khi xảy ra PSC trong khi song song (PC) có một cực trị trong mọi điều kiện nhưng dòng lớn gây tổn thất trên các mạch điều khiển. S-PC thường được ứng dụng và nghiên cứu rộng rãi nhưng có chung nhược điểm như SC. Các dạng cải tiến TCT, BL, HC tăng chi phí, tổn thất trên các liên kết thừa [4], [5], [6].

Do đó, cần kết hợp phát triển thuật toán MPPT và đề xuất cấu hình PV để tối ưu hiệu suất sinh điện với chi phí hợp lý nhất. Đề tài “**Nâng cao hiệu suất hệ thống pin quang điện**” nghiên cứu, phát triển giải thuật GMPPT cho các cấu hình PC và SC hoặc S-PC trong điều kiện PS để nâng cao hiệu suất khai thác năng lượng từ hệ thống PV.

1.2. Mục tiêu và nhiệm vụ nghiên cứu

Mục tiêu tổng thể là phát triển giải thuật MPPT cho hệ thống PV trong PSC cụ thể bao gồm:

- Đề xuất giải thuật MPPT cho hệ thống PV kiểu PC trong điều kiện bóng che một phần.
- Nghiên cứu, đề xuất giải thuật GMPPT cho cấu hình SC hoặc S-PC khi xảy ra PSC.
- Nghiên cứu, ứng dụng, mô phỏng, phân tích hiệu quả của các hệ thống PV dưới ảnh hưởng của PSC.

1.3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Giải pháp nâng cao hiệu suất của PVS dựa vào kỹ thuật MPPT trong PSC cho cấu hình PC và SC hoặc S-PC.

1.4. Hướng tiếp cận và phương pháp nghiên cứu

Tham khảo tài liệu từ các nguồn liên quan. Xây dựng, đề xuất và ứng dụng giải thuật GMPPT cho hệ thống PV khi xảy ra PSC.

1.5. Điểm mới của luận án

Đề xuất giới hạn $0,4V_{oc}$ để xác định nhanh điểm khởi động cho thuật toán P&O cải tiến. Giải pháp xét tới giá trị tối ưu của bộ DC/DC để ước lượng nhanh MPP tiềm năng cho cấu hình PC.

Đề xuất giải pháp xác định khoảng hụt điện áp do bóng che một phần gây ra trên cấu hình SC hoặc S-PC. Xây dựng giải thuật tránh bẫy LMPP dựa vào mô phỏng đường cong I-V của hệ thống PV.

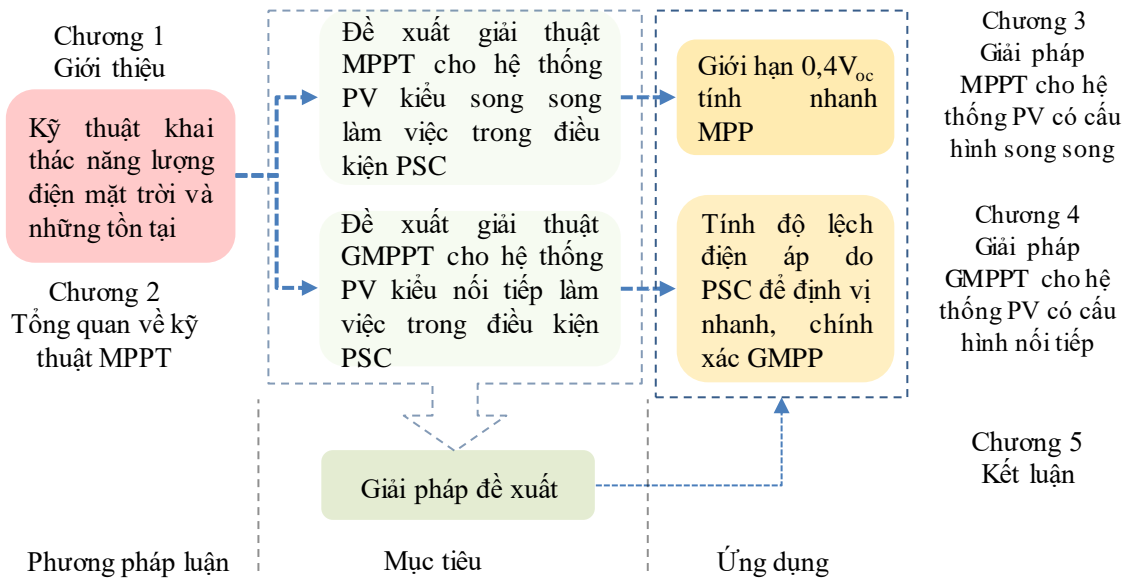
Các đề xuất được ứng dụng để tăng hiệu suất và tốc độ hội tụ, ổn định và đáp ứng động tốt do giảm bước lặp.

1.6. Giá trị thực tiễn của luận án

- MPPT cho hệ thống PV kết nối kiểu song song phù hợp với ứng dụng công suất và điện áp vừa và nhỏ như điện mặt trời áp mái, hệ thống bơm nước, đèn giao thông, các thiết bị di chuyển liên tục.
- Giải thuật GMPPT trong PSC có phương pháp đơn giản, hiệu quả, ít dao động do sử dụng ít vòng lặp. Có thể áp dụng cho hệ thống PV kiểu SC hoặc S-PC trong những điều kiện làm việc biến động về bức xạ và nhiệt độ.

1.7. Cấu trúc của luận án

Nội dung của luận án gồm có 5 chương theo sơ đồ cấu trúc như Hình 1.1.



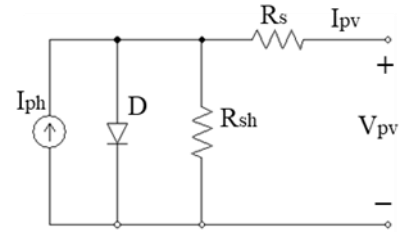
Hình 1.1 Sơ đồ cấu trúc luận án.

CHƯƠNG 2. TỔNG QUAN VỀ KỸ THUẬT MPPT

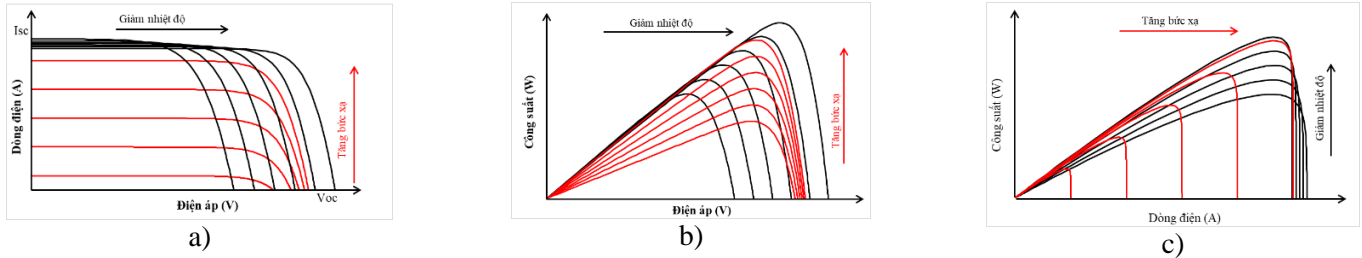
2.1 Ảnh hưởng của điều kiện vận hành lên đặc tính của PV

2.1.1. Đặc tuyến của tế bào pin quang điện

Điều kiện làm việc ảnh hưởng đến hiệu suất của PVS. Để phân biệt GMPP trong nhiều LMPP cần phát triển thuật toán và tái cấu trúc để giảm tác động của PSC. Với mô hình PV trong Hình 2.1, các đặc tuyến của nó theo môi trường được khảo sát và trình bày trong Hình 2.2. Dòng I_{sc} thay đổi theo bức xạ nhiều hơn V_{oc} . Ngược lại, V_{oc} biến động theo nhiệt độ nhiều hơn [7].



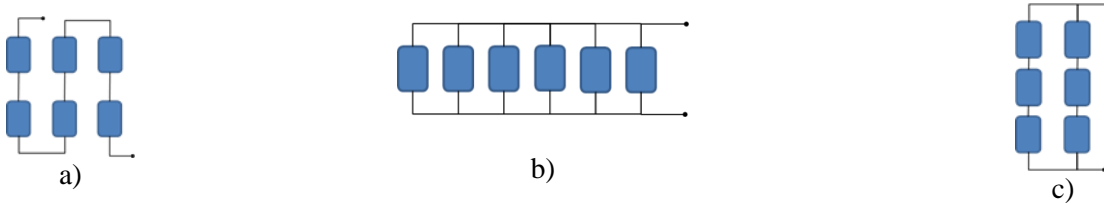
Hình 2.1 Mô hình toán tế bào PV.



Hình 2.2 Ảnh hưởng của nhiệt độ và bức xạ lên đặc tuyến: a) I-V; b) P-V; và c) P-I.

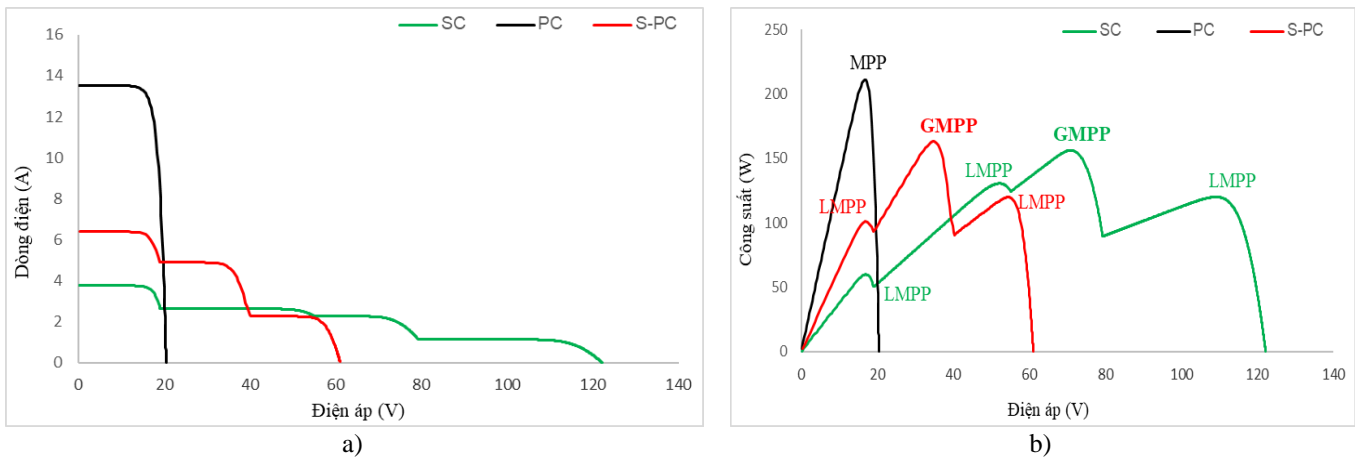
2.1.2. Ảnh hưởng của PSC lên các cấu trúc PV cơ bản

Khảo sát ảnh hưởng của PSC lên PV mẫu MSX-60 [8] với các cấu hình cơ bản như Hình 2.3.



Hình 2.3 Cấu hình PV kiểu: a) SC; b) PC; c) S-PC; và d) P-SC.

Kết quả khảo sát, so sánh trong các điều kiện đồng nhất, PSC một cách ngẫu nhiên trên các cấu hình cho thấy:



Hình 2.4 So sánh đặc tuyến a) I-V và b) P-V trong PSC.

- PC chỉ có một cực trị và có công suất lớn nhất trong mọi điều kiện vận hành.
- SC có nhiều LMPP nhất.
- SC có dòng thấp nhất còn PC có điện áp thấp nhất.

Khi xảy ra bóng che một phần trên hệ thống PV liên kết kiểu SC thì:

- Số cực trị bằng số PV nhận được bức xạ khác nhau trong liên kết.

- Giá trị I_{sc} tỷ lệ thuận với bức xạ và bị suy giảm khi tăng mức che bóng.
- $I_{sc,sys}$ của hệ thống PV bằng I_{sc} của PV nhận được bức xạ lớn nhất.
- V_{oc} cũng suy giảm theo bức xạ nhưng không đáng kể.
- Vị trí GMPP trong trường hợp PSC là ngẫu nhiên.
- Điều kiện vận hành đồng nhất luôn sinh ra công suất cực đại lớn nhất.

Những kết luận trên là cơ sở xem xét, mô phỏng, phân tích các trạng thái hoạt động của PVS một cách hiệu quả để xác định vùng hoạt động tốt nhất.

2.2 Các kỹ thuật MPPT cơ bản

Phần này khảo sát một số giải thuật MPPT thông dụng nhất theo các tiêu chí phân loại gồm: Tốc độ MPPT, tham số điều khiển, có phụ thuộc vào kiểu PV không, sự phức tạp trong sơ đồ thiết kế, khả năng ổn định, chi phí, khả năng xử lý bóng che, hiệu suất, sử dụng bộ chuyển đổi DC/DC nào. Theo những tiêu chí trên, ba nhóm giải thuật được khảo sát và tổng hợp trong các bảng 2.2 đến 2.4 [9]. Hình 2.15 giới thiệu phân loại một số thuật toán theo các tiêu chí cơ bản.

Bảng 2.1. So sánh tiêu chuẩn của một số giải thuật truyền thống.

Thông số	P&O	InC	CV	CC
Tốc độ MPPT	T	T	T	T
Độ chính xác	TB	TB	T	T
Tham số điều khiển	I, V	I, V	V	I
Có phụ thuộc loại PV	K	K	Có	Có
Sự phức tạp	T	TB	T	T
Khả năng ổn định	K	PT	K	K
Chi phí	TB	TB	T	T
Xử lý PSC	K	K	K	K
Hiệu suất	98,98	99,94	100,00	99,88
Dùng bộ chuyển đổi	Boost	Boost	Boost	Buck-boost
Tài liệu tham khảo/năm xuất bản	[10]/2021	[10]/2021	[11]/2017	[12]/2024

Ghi chú: T: Thấp; TB: Trung bình; K: Không; PT: Phụ thuộc loại PV; KPT: Không phụ thuộc vào PV.

2.3 Kết luận chương 2

PSC đang là một trở ngại cho những cải tiến công nghệ khai thác năng lượng từ PVS với những tồn tại sau đây:

- PC đơn giản nhưng dòng điện trên các khóa chuyển mạch lớn gây áp lực lên các bộ điều khiển.
- SC phải xử lý bài toán đa cực trị trong PSC khiến nó kém hiệu quả khi phải tránh bẫy LMPP, chi phí tăng.
- Sự phi tuyến của các đặc tuyến P-V và I-V trong mọi điều kiện vận hành.
- Hiệu suất và tốc độ MPPT khó đạt đồng thời trong cùng một giải pháp.
- Các giải thuật tối ưu phụ thuộc vào kích thước quần thể nên tốc độ chậm.

L luận án đề xuất các giải pháp MPPT dựa trên đặc điểm của đường đặc tính I-V và P-V theo điều kiện làm việc. Nó được xem như giải pháp MPPT hai giai đoạn trong đó:

- Giai đoạn đầu để giới hạn vùng MPP tiềm năng dựa vào mô phỏng lại hình dạng đặc tuyến PV trong những điều kiện vận hành cụ thể để xác định LMPP một cách chính xác.

- Giai đoạn sau đó là dùng thuật toán MPPT truyền thống để khai thác sự đơn giản, tốc độ cao mà không làm giảm hiệu suất.

Bảng 2.2. So sánh tiêu chuẩn của một số giải thuật tối ưu.

Thông số	PSO	ABC	ACO	ANN	BA	GWO	GA
Tốc độ MPPT	C	C	C	TB	C	TB	TB
Độ chính xác	TB	TB	TB	C	C	C	C
Tham số điều khiển	V, I	V, I	V, I	V, I/ G, T	V, I	V	V, I
Phụ thuộc loại PV	K	K	K	Có	K	K	K
Sự phức tạp	C	C	C	C	C	C	C
Khả năng ổn định	C	C	C	C	C	C	C
Chi phí	TB	C	TB	C	C	TB	C
Xử lý PSC	Có	Có	Có	Có	Có	Có	Có
Hiệu suất	-	99,8	-	99,81	99,9	99,57	-
Dùng bộ chuyển đổi	Boost	Boost	Boost	Boost	Boost	-	Boost
Tài liệu tham khảo/năm	[13]/2023	[14]/2021	[15]/2021	[16]/2023	[17]/2022	[18]/2024	[19]/2023

Ghi chú: C: Cao; TB: Trung bình; K: Không.

Bảng 2.3. So sánh tiêu chuẩn của một số giải thuật kết hợp.

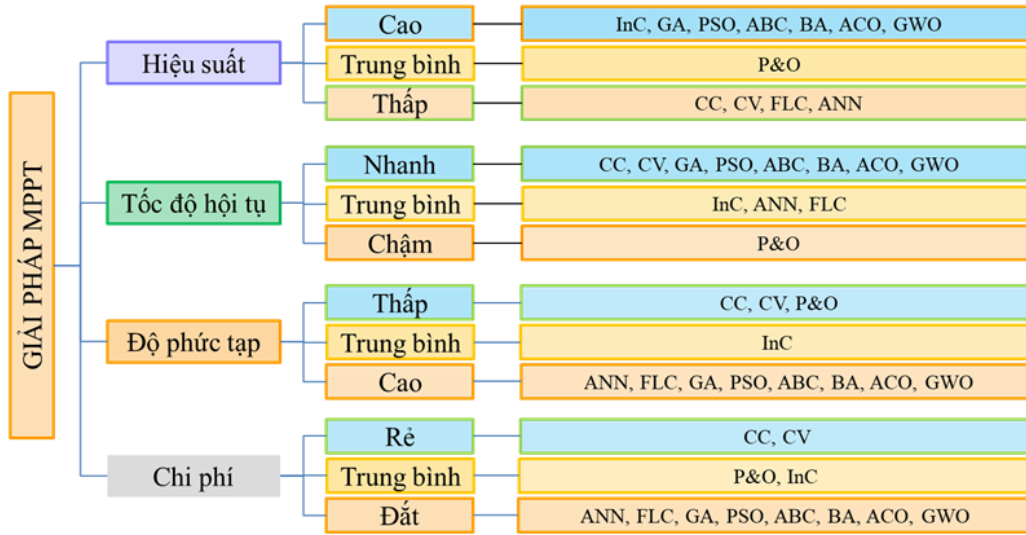
Thông số	ANN-P&O	PSO-P&O/InC	GWO-ANFIS	AFO
Tốc độ MPPT	TB	C	C	TB
Độ chính xác	C	C	TB	TB
Tham số điều khiển	V, I	V, I	V, I	V, I
Phụ thuộc loại PV	Có	K	K	K
Sự phức tạp	C	TB	TB	C
Khả năng ổn định	C	TB	C	TB
Chi phí	C	TB	C	C
Xử lý PSC	Có	Có	Có	Có
Hiệu suất	-	98,00	98,20	98,7
Dùng bộ chuyển đổi	Boost	Boost	Boost	Boost
Tài liệu tham khảo/năm xuất bản	[20]/2024	[21]/2024	[45]/2024	[22]/2024

C: cao; TB: trung bình; T: Thấp; K: không

Trên cơ sở những phân tích trên, luận án sẽ xây dựng giải thuật GMPPT có nội dung cụ thể như sau:

1. Đề xuất giới hạn điện áp tối thiểu để xác định I_{sc} và V_{oc} của hệ thống PV. Kết hợp với khảo sát, phân tích để đề xuất giá trị D tối ưu cho các bộ DC/DC nhằm đo được hai tham số I_{sc} và V_{oc} mà không làm gián đoạn cấp điện. Giải pháp này đã được trình bày và áp dụng trong công trình số {1}, {2} và {5}.
2. Áp dụng phương pháp CV kết hợp P&O cải tiến để xác định nhanh MPP tiềm năng thông qua định vị các điểm (0, I_{sc}) và (V_{oc} , 0) trên đồ thị I-V của hệ thống PV trong liên kết PC. Giải pháp đề xuất được ứng dụng trong các xuất bản số {1}, {2}, và {5}.
3. Mô phỏng đặc tuyến I-V của hệ thống PV kiểu SC hoặc S-PC khi xảy ra PSC để đề xuất giải thuật GMPPT nhằm nâng cao hiệu suất và tốc độ hội tụ. Giải thuật đề xuất cũng được ứng dụng trong các xuất bản số {3},

và các công trình liên quan số {4}, {6 - 9}.



Hình 2.15 Phân loại một số giải pháp MPPT theo các tiêu chí cơ bản [3].

CHƯƠNG 3

GIẢI PHÁP MPPT CHO HỆ THỐNG PV CÓ CẤU HÌNH SONG SONG

3.1. Hướng tiếp cận

Các giải pháp chủ yếu dựa trên I_{pv} , V_{pv} và hệ số điền kín (FF) cần phải có I_{sc} và V_{oc} của PVS [23]. Các phương pháp CV, CC đều làm gián đoạn cấp điện nên tổn thất công suất. Để khắc phục điều này, giải pháp xác định trực tiếp I_{sc} và V_{oc} theo D được đề xuất để không làm gián đoạn cung cấp điện nhằm nâng cao hiệu suất của PVS.

3.1.1. Hệ số FF của một số loại PV điển hình

Hệ số FF của mỗi loại PV là khác nhau và thay đổi theo điều kiện vận hành. Để xác định tương đối FF của một số loại PV điển hình, phạm vi bức xạ từ $200W/m^2$ đến $1000W/m^2$ và nhiệt độ từ $0^\circ C$ đến $60^\circ C$ được khảo sát. Kết quả cho thấy hệ số dòng điện trung bình k_i từ 0,91 đến 0,93 còn hệ số điện áp k_v từ 0,75 đến 0,8.

3.1.2. Phạm vi hoạt động tốt nhất của các bộ chuyển đổi DC/DC

Luận án khảo sát ba mạch DC/DC với K là tỷ số giữa điện áp ra và điện áp vào, D là chu kỳ nhiệm vụ, giá trị này tốt nhất nên tiệm cận $D = 0,5$ [24]:

$$\begin{cases} K_{Boost} = \frac{1}{1-D} \\ K_{Buck} = D \\ K_{Buck-boost} = \frac{D}{1-D} \end{cases} \quad (3.3)$$

Một cách gần đúng, bỏ qua tổn thất trên các linh kiện của bộ chuyển đổi DC/DC thì quan hệ giữa công suất vào và ra liên quan đến nội trở của PV (R_{in}) và điện trở tải (R_L) theo phương trình (3.7). Trong phạm vi nghiên cứu thì điện trở nội của PV sẽ thay đổi trong khoảng từ thấp nhất R_{in_1} (tại M_1) đến R_{in_2} (tại M_2) như trong Hình 3.3.

$$R_L = K_{mp1}^2 R_{in_1} = K_{mp2}^2 R_{in_2} \quad (3.7)$$

Hay

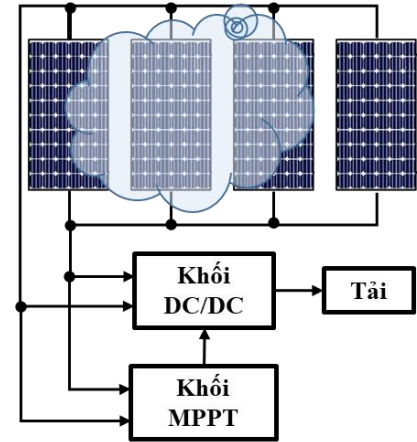
$$\frac{K_{mp1}^2}{K_{mp2}^2} = \frac{k_v V_{oc2}}{k_i I_{sc2}} \frac{k_i I_{sc1}}{k_v V_{oc1}} = \frac{V_{oc2}}{I_{sc2}} \frac{I_{sc1}}{V_{oc1}} \quad (3.9)$$

Trong đó, các giá trị ở điều kiện bất kỳ được xác định theo điều kiện tiêu chuẩn như phương trình (3.10) [25]:

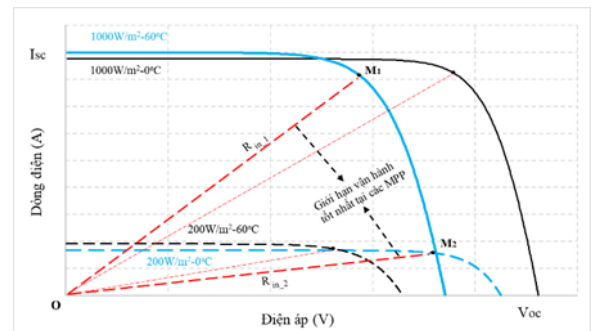
$$\begin{cases} V_{oc} = V_{oc_ref} - \alpha_v (T - T_{ref}) \\ I_{sc} = (I_{sc_ref} + \alpha_i (T - T_{ref})) W / W_{ref} \end{cases} \quad (3.10)$$

Thay giá trị biểu thức (3.9) vào (3.7) ta được quan hệ giữa hai vị trí MPP như sau:

$$K_{mp1} = 2,46K_{mp2} \quad (3.13)$$



Hình 3.1 Cấu hình PC hệ thống PV đề xuất.



Hình 3.3 Giới hạn điện trở trong vùng khảo sát.

Với chu kỳ nhiệm vụ tại hai điểm làm việc thỏa mãn phương trình (3.13) thì quan hệ giữa chúng là

$$D_{mp1} = 1 - D_{mp2} \quad (3.14)$$

Kết hợp biểu thức (3.14) với (3.3) tính được các giá trị D_{mp1} và D_{mp2} cho mạch Boost và Buck là 0,71 và 0,29; mạch Buck-boost là 0,61 và 0,39. Khảo sát tương tự cho các PV còn lại thu được giới hạn vận hành tốt nhất liệt kê trong Bảng 3.5.

Bảng 3.5 Giới hạn hoạt động tốt nhất của D

Loại PV	Boost		Buck		Buck-boost	
	D_{mp1}	D_{mp2}	D_{mp1}	D_{mp2}	D_{mp1}	D_{mp2}
MSX-60	0,71	0,29	0,71	0,29	0,61	0,39
Shell SP75	0,64	0,36	0,64	0,36	0,57	0,43
Shell SQ150	0,67	0,33	0,71	0,33	0,59	0,41
SSt 230-60P	0,66	0,34	0,67	0,34	0,58	0,42
Shell S70	0,64	0,36	0,64	0,36	0,57	0,43
GxB-340	0,69	0,31	0,69	0,31	0,66	0,40
Shell ST40	0,60	0,41	0,60	0,41	0,54	0,45

3.2. Đề xuất phương pháp xác định giá trị I_{sc} dựa vào D

Trong giới hạn từ R_{in-1} đến R_{in-2} . Nếu $D > D_{mp1}$ (tại M_1) thì $R < R_{in-1}$ nên dòng điện đo được thuộc vùng tuyến tính, có thể dùng để tính I_{sc} . Ngược lại, nếu $R > R_{in-2}$ nghĩa là $D < D_{mp2}$ (tại M_2) thì nó luôn rơi vào vùng phi tuyến dùng để tính V_{oc} .

3.2.1. Tính I_{sc} trong giới hạn $0,2V_{oc}$

Giá trị I_{sc} được tính theo tài liệu tham khảo [26] tại $A(V_A, I_A)$ với $V_A = 0,2V_{oc}$. Thay tọa độ điểm A và M_1 vào biểu thức (3.9) để xác định mối quan hệ giữa chúng cho tất cả các bộ DC/DC. Sau đó tính D tại A liệt kê trong Bảng 3.6 cho thấy

Bảng 3.6 Giá trị D của các PV tại $0,2V_{oc}$ và $0,4V_{oc}$ tương ứng với các bộ DC/DC

Loại PV	$0,2V_{oc}$			$0,4V_{oc}$		
	Boost	Buck	Buck-boost	Boost	Buck	Buck-boost
MSX60	0,86	1,48	0,76	0,80	1,04	0,69
Shell SP-75	0,82	1,33	0,73	0,75	0,94	0,66
Shell SQ-150	0,84	1,42	0,75	0,78	1,00	0,68
SST 230-60P	0,83	1,39	0,75	0,77	0,98	0,67
Shell S70	0,83	1,34	0,74	0,75	0,95	0,66
GxB-340	0,85	1,44	0,75	0,79	1,01	0,68
Shell ST40	0,81	1,25	0,71	0,72	0,88	0,64

- Đối với Boost và Buck-boost, có thể đo được I_{sc} dựa vào D tại vị trí $0,2V_{oc}$.
- Đối với Buck, không thể thực hiện đo I_{sc} tại vị trí $0,2V_{oc}$. D càng gần 0 hoặc 1 thì càng bất lợi cho bộ DC/DC.

3.2.2. Đề xuất giới hạn $0,4V_{oc}$ để tính toán I_{sc}

Từ mô hình toán của PV (Hình 2.1) thực hiện khảo sát phương trình 3.23 bằng đồ thị Hình 3.5 nhận thấy

$$I_{pv} = I_{sc} - I_D - I_{R_{sh}} \quad (3.23)$$

- Thành phần gây ra sự phi tuyến trên đường cong I-V là I_D
- Khi $0 < V_{pv} < xV_{oc}$ các phương trình xem như tuyến tính, độ dốc của đặc tuyến I-V do $I_{R_{sh}}$ gây nên.
- Khi $V_{pv} > xV_{oc}$, đường đặc tuyến I-V bắt đầu phi tuyến do thành phần I_D gây ra.
- Điểm phân biệt hai vùng là điểm thỏa mãn làm cho biểu thức (3.26) lớn nhất.

$$f(x) = I_{R_{sh}} - I_D = \frac{xV_{oc}}{R_{sh}} - I_0 \left\{ e^{\frac{qxV_{oc}}{nkT_c}} - 1 \right\} \quad (3.26)$$

Nghĩa là hàm $f(x)$ đạt cực đại khi

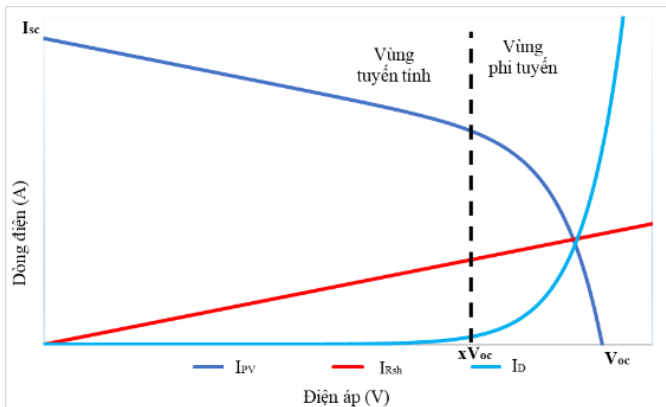
$$x = \frac{1}{c} \ln \left(\frac{a}{bc} \right) \quad (3.27)$$

Chọn $\lambda = 0,6x$ để chắc chắn xác định được một đoạn thẳng hoàn toàn tuyến tính nên giới hạn của x là.

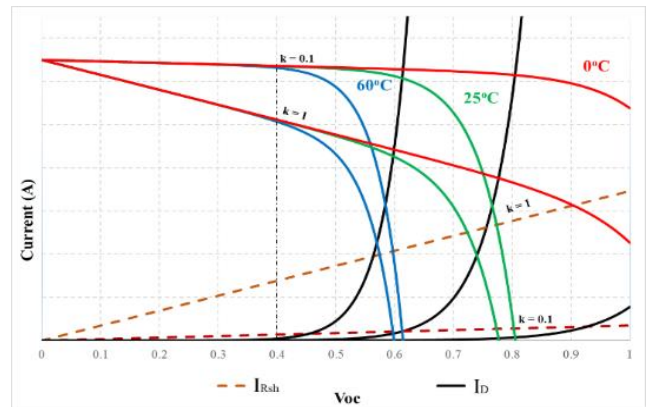
$$x = 0,6 \frac{1}{c} \ln \left(\frac{a}{bc} \right) \quad (3.28)$$

Vùng tuyến tính của các loại PV được khảo sát và tổng hợp trong Bảng 3.7.

Kết quả cho thấy các loại PV đều tuyến tính khi $V < 0,4V_{oc}$ nên nó được chọn là giới hạn để tính I_{sc} . Giá trị D tại $A'(0,4V_{oc}, I_{sc})$ tính tương tự như tại $A(0,2V_{oc}, I_{sc})$ thu được kết quả tổng hợp trong Bảng 3.6 cho thấy.



Hình 3.5 Các vùng làm việc trên đường cong I-V



Hình 3.6 Khảo sát vùng tuyến tính của PV MSX-60

Bảng 3.7 Giới hạn phân biệt vùng tuyến tính trên đường cong I-V.

Thông số	Monocrystalline		Polycrystalline			Thin-film	
	Shell SP75	Shell SQ150	SST 230-60P	Shell S70	MSX-60	GxB-340	Shell ST40
xV_{oc}	0,46	0,48	0,49	0,48	0,47	0,49	0,5

- Giá trị D tại $0,4V_{oc}$ nhỏ hơn so với tại $0,2V_{oc}$ trong mọi trường hợp khảo sát.
- Có thể đo I_{sc} tại $D > 0,8$ đối với bộ chuyển đổi Boost và $0,7$ đối với bộ chuyển đổi Buck-boost.
- Giá trị D của Buck cũng hợp lý hơn so với vị trí $0,2V_{oc}$.

3.2.3. Đề xuất phương pháp tính I_{sc}

Từ hai điểm $P_1(V_1, I_1)$ và $P_2(V_2, I_2)$ trong vùng nhỏ hơn $0,4V_{oc}$. Tính I_{sc} theo biểu thức (3.34) và kiểm tra sai số %:

$$I_{cal} = I_1 - \frac{I_2 - I_1}{V_2 - V_1} V_1 \quad (3.34)$$

Đối với mạch Boost: $\Delta I\%$ lớn nhất là 2,63%, $\Delta I\%$ trung bình lớn nhất là 0,34% và có thể đạt độ chính xác 100%.

Buck-boost cũng có sai số trung bình lớn nhất chỉ 0,18% và sai số lớn nhất cũng chỉ 1,12%.

Buck có $\Delta I\%$ lớn nhất là 5,85%, sai số trung bình lớn nhất 0,77% và sai số trung bình nhỏ nhất là 0,13%.

3.3. Giải pháp xác định V_{oc} của hệ thống PV

Theo [26], V_{oc} có thể được tính từ vị trí B(V_{oc} ; $0,2I_{sc}$). Tương tự như khảo sát tại A, giá trị D tại B(V_{oc} ; $0,2I_{sc}$) được tham chiếu tới M_2 để tính toán cho các mạch DC/DC có số liệu liệt kê trong Bảng 3.10 cho thấy:

Có thể đo V_{oc} tại $D < 0,1$ đối với Buck và $D < 0,2$ đối với Buck-boost.. Ngược lại, mạch Boost có $D < 0$ nên chọn $D = 0$ để đo V_{oc} . Sai số điện áp tính toán khi sử dụng các thông số đề xuất được tổng hợp như sau.

Mạch Buck-boost có sai số tính toán thấp nhất khoảng 0,32%.

Buck có số lớn nhất là 2,31% sai số trung bình lớn nhất khoảng 1,62% và sai số trung bình nhỏ nhất chỉ 0,48%.

Mạch Boost có sai số trung bình lớn nhất khoảng 7,64%, sai số trung bình thấp nhất là 1,72%.

Sai số trung bình cho tất cả các trường hợp khảo sát khoảng 1,52%.

Tóm lại, tính trực tiếp I_{sc} và V_{oc} sẽ giảm thời gian gián đoạn cấp điện đồng thời ước lượng chính xác vị trí MPP tiềm năng để gia tăng hiệu suất sinh điện cho PVS. Phương pháp đề xuất này được sử dụng trong các công bố số {1-3} và {5}.

Bảng 3.10. Giá trị độ rộng xung D xác định tại vị trí $0,2I_{sc}$.

Thông số	MSX-60	Shell SP75	Shell SQ150	SSt 230-60P	Shell S70	GxB-340	Shell ST40
Boost	-0,71	-0,54	-0,61	-0,59	-0,54	-0,66	-0,42
Buck	0,12	0,15	0,13	0,14	0,15	0,12	0,17
Buck-boost	0,21	0,23	0,22	0,23	0,24	0,21	0,25

3.4. Xác định vị trí MPP tiềm năng

Giải pháp đề xuất sử dụng các giá trị khởi động trong Bảng 3.12 để ước lượng MPP tiềm năng cho giải thuật P&O cải tiến ($I_{P\&O}$). Lưu đồ giải thuật $I_{P\&O}$ được thể hiện trong Hình 3.9.

3.5. Kết quả mô phỏng và đánh giá

Hình 3.1 giới thiệu hệ thống PV được khảo sát trên các bộ DC/DC và đạt được những kết quả như sau:

3.5.1. Đánh giá các giá trị D_{mp} và P_{mp} của giải thuật đề xuất

Đối với mạch Boost, giá trị D_{mp} tính được là 0,4775 so với giá trị hội tụ $D_{con} = 0,4475$ có sai số khoảng 0,03 (Hình 3.10) và giá trị $I_{cal} = 6,0159$ A trùng với $I_{sc} = 6,01$. Trong khi đó, $V_{cal} = 20,17$ V có sai số khoảng 1,0% so với $V_{oc} = 19,97$ V. Kết quả là dạng sóng công suất ước lượng với $P_{mp} = 90,66$ W có sai số khoảng 1,1% so với giá trị hội tụ $P = 91,66$ W. Mạch Buck tính được $D_{mp} = 0,38$ và sau đó giải pháp hội tụ tại $D_{con} = 0,41$ (lệch 0,03). Cuối cùng là bộ Buck-boost với khả năng xác định $D_{mp} = 0,38$ so với vị trí hội tụ là $D_{con} = 0,42$ có sai số khoảng 0,04 (Hình 3.11).

Tổng hợp kết quả khảo sát cho mọi loại PV đề xuất được liệt kê trong Bảng 3.13 cho thấy rằng

Mạch Boost có sai số trung bình là 0,07, độ lệch công suất là 12,66% với độ chính xác đến lên đến 99,93%.

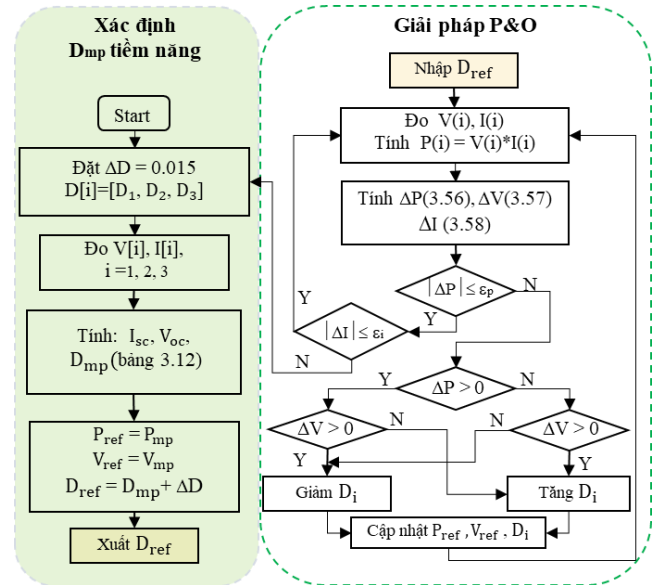
Mạch Buck, có sai số trung bình chỉ 0,04 nên công suất ước lượng được có độ chính xác lên đến 99,83%.

Bộ Buck-boost có sai số ước lượng D nhỏ hơn 0,04, khả năng tính toán chính xác tới 99,96%.

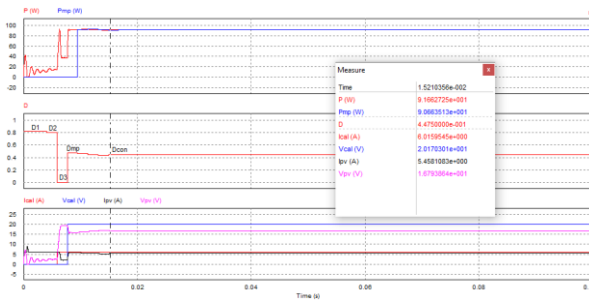
Tóm lại, từ các MPP tiềm năng giải thuật P&O được triển khai tìm kiếm giúp cho giải pháp tổng thể tăng tốc độ hội tụ, đạt hiệu quả cao do khả năng giới hạn vùng tìm kiếm.

Bảng 3.12. Bảng giá trị khởi động của giải thuật.

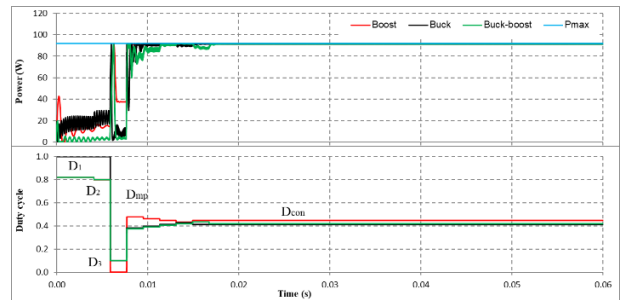
Thông số	Boost	Buck	Buck-boost
D_1	0,82	1	0,82
D_2	0,80	-	0,80
D_3	0	0,1	0,1
I_{sc}	(3.35)	$I_{sc} = I_{D1}$	(3.35)
V_{oc}	V_{D3}	V_{D3}	V_{D3}
D_{mp}	$D_{mp} = 1 - \sqrt{\frac{R_{mp}}{R_L}}$	$D_{mp} = \sqrt{\frac{R_L}{R_{mp}}}$	$D_{mp} = \frac{\sqrt{\frac{R_L}{R_{mp}}}}{1 + \sqrt{\frac{R_L}{R_{mp}}}}$



Hình 3.9 Lưu đồ giải thuật đề xuất



Hình 3.10 Các dạng sóng ngõ ra dùng mạch Boost trong PSC



Hình 3.11 Kết quả MPPT khi PSC trong trường hợp 7.

3.5.2. Đánh giá hiệu suất và tốc độ hội tụ

Dữ liệu thu được từ Bảng 3.14 cho thấy:

Đối với mạch Boost, tốc độ hội tụ nhanh nhất là 0,015 s. Hiệu suất MPPT trung bình khoảng 99,27%.

Đối với mạch Buck, tốc độ trung bình khoảng 0,0165 s. Hiệu suất trung bình đạt khoảng 99,31%.

Với mạch Buck-boost tốc độ hội tụ ổn định khoảng 0,017 s và hiệu suất trung bình khoảng 99,27%.

3.5.3. So sánh hiệu quả với giải pháp truyền thống

Khi so sánh với hai thuật toán P&O và VSSP&O, kết quả thu được cho thấy.

Đối với mạch Boost, giải pháp đề xuất đã giảm 85% số lần lặp so với P&O và 80% so với VSSP&O. Vì vậy tốc độ hội tụ của nó nhanh nhất 0,015 s, trong khi thời gian tìm kiếm của P&O và VSSP&O lần lượt là 0,070 s và 0,025 s.

Mạch Buck có tốc độ nhanh nhất là 0,016 s so với P&O khoảng 0,067 s và VSSP&O khoảng 0,021 s. Nó cũng giảm 83% so với P&O và 73% so với VSSP&O.

Bộ Buck-boost giảm 75% số bước lặp so với VSSP&O và 82% so với P&O. Thời gian MPPT trung bình của thuật toán đề xuất, P&O và VSSP&O lần lượt là 0,017 s, 0,054 s và 0,026 s.

Bảng 3.17. So sánh hiệu quả của một số giải pháp gần đây.

Giải thuật	I_P&O	PSO+InC [27]	PSO+P&O [27]	LBNS [28]	CSA [29]	GWO [29]
Tốc độ hội tụ (s)	0,015	0,0434	0,0495	0,038	0,48	0,19
Hiệu suất MPPT (%)	100	99,4	99	99,98	99,9	99,99
Giải thuật	MIC [29]	PSO [29]	MC-P&O [30]	AFO [22]	COA-FLC [31]	MGWO-ANFIS [32]
Tốc độ hội tụ (s)	0,014	0,92	0,0375	0,88	0,016	0,02
Hiệu suất MPPT (%)	99,9	99,96	99,54	98,60	99,83	98,20

3.5.4. Kết quả thực nghiệm dựa trên giải thuật đề xuất

Các kịch bản trong tự mô phỏng được thực nghiệm với trình mô phỏng Chroma 62050H-600S.

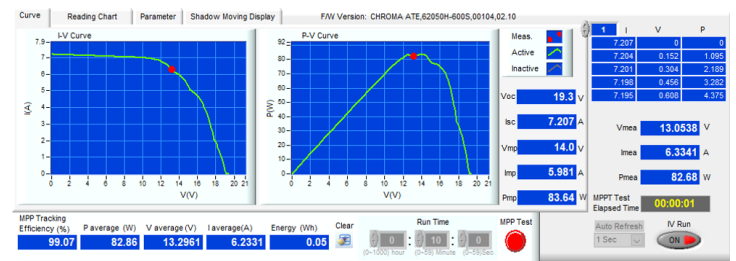
Hiệu suất của giải pháp đề xuất với các bộ chuyển đổi Boost, Buck và Buck-Boost lần lượt là 99,07%, 99,22% và 99,51%. Hiệu suất tối đa có thể đạt 99,95% trong khi hiệu suất thấp nhất khoảng 98,33 và hiệu suất trung bình trên 99%.

Giá trị D của các bộ DC/DC trong khoảng từ 0,41 đến 0,81. Nó đảm bảo không có chênh lệch quá xa so với $D = 0,5$ để đạt được hiệu suất tốt nhất cho các bộ chuyển đổi DC/DC. Giải pháp đề xuất có tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống PV vừa và nhỏ.

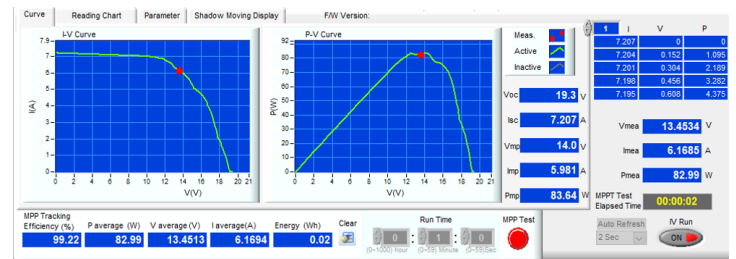
3.6. Kết luận chương 3

Nội dung chương này đã đề xuất giới hạn điện áp $0,4V_{oc}$ để cải tiến vị trí khởi động cho thuật toán P&O. Giải pháp được ứng dụng để MPPT cho cấu hình PC trong điều kiện bóng che một phần. Kết quả cho thấy, nó có đáp ứng động cao nhất khoảng 100% với tốc độ 0,015s. MPP tìm kiếm được tính chính xác nên hạn chế vùng tìm kiếm, giảm gánh nặng tính toán và từ đó cải thiện hiệu suất sinh điện. Cụ thể số bước lặp giảm 76,60% so với P&O và 69,01% so với VSSP&O. Qua đó thời gian tìm kiếm giảm xuống 71,39% và 21,94%. Kết quả là hiệu suất MPPT trung bình tăng 4,46% so với phiên bản chưa cải tiến và tăng 1,65% so với VSSP&O.

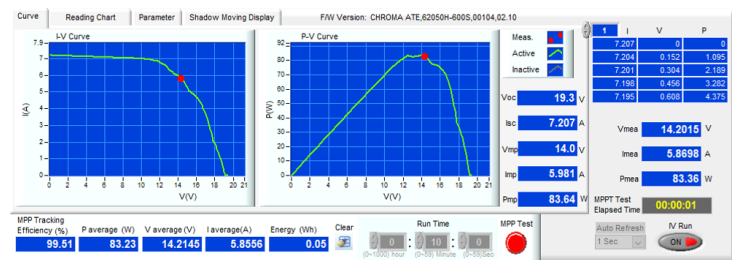
Bên cạnh đó, đường đặc tính I-V của một số loại PV điển hình được khảo sát cùng các bộ chuyển đổi DC/DC. Từ đó đề xuất giải pháp tính I_{sc} và V_{oc} của hệ thống PV mà không làm gián đoạn cấp điện. Nó có tiềm năng ứng dụng rộng rãi và đáng tin cậy trong các giải pháp kỹ thuật MPPT. Các kỹ thuật này đã được nghiên cứu, ứng dụng và công bố trong các xuất bản số {1}, {2} và {5}.



a)



b)



c)

Hình 3.14 Kết quả MPPT khi thực nghiệm với a)

Boost, b) Buck và c) Buck-boost.

CHƯƠNG 4

GIẢI PHÁP GMPPT CHO HỆ THỐNG PV CÓ CẤU HÌNH NỐI TIẾP

4.1. Giới thiệu

Cấu hình PC phù hợp với ứng dụng có điện áp và công suất thấp [33]. Trong hệ thống lớn hơn, S-PC được ưu tiên vì tính linh hoạt trong điều chỉnh điện áp và dòng điện ngõ ra nhưng cần phân biệt GMPP trong số các LMPP sinh ra bởi liên kết nối tiếp trong điều kiện bóng che một phần [34].

Để giải quyết tồn tại trên, các kỹ thuật MPPT dựa trên thuật toán tối ưu hoặc các giải pháp kết hợp có khả năng tránh bẫy LMPP khá ấn tượng [35] nhưng tính toán phức tạp, giá thành cao, khó thực hiện và tốc độ hội tụ chậm. Trong khi các giải thuật lai trong [36] có thể tận dụng ưu điểm của giải thuật truyền thống và sự chính xác của giải thuật hiện đại. Tuy nhiên cần phải gián đoạn cấp điện để đo I_{sc} và V_{oc} dẫn đến tổn thất lớn. Để khắc phục những tồn tại trên, mục 4.3 đề xuất một giải pháp GMPPT dựa trên khả năng mô phỏng đặc tuyến I-V khi xảy ra bóng che một phần.

4.2. Phương pháp tiếp cận

4.2.1. Điện áp hở mạch của hệ thống PV khi xảy ra PSC

Điện áp hở mạch của một PV ($V_{oc[i]}$) trong một chuỗi gồm N tấm nối tiếp có thể được tính bằng điện áp hở mạch của chuỗi ($V_{oc,sys}$) chia cho số PV như phương trình (4.1) [37].

$$V_{oc[i]} = i \frac{V_{oc,sys}}{N}; i = 1 \text{ đến } N \quad (4.1)$$

Điện áp tại MPP (M_1 trên Hình 4.1) tỷ lệ với $V_{oc[i]}$ theo hệ số k_v như biểu thức 4.2 [38]. Các giải pháp trước đây dựa trên khoảng cách tương đối này để quét toàn bộ đường đặc tuyến I-V nên mất nhiều thời gian và kém ổn định. Nghiên cứu này đề xuất giải pháp xác định khoảng hụt điện áp giữa hai điểm B và B' (trên Hình 4.1) để tính $V_{mp[2]}$. Giá trị ước lượng chính xác có thể cho phép sử dụng bước điều chỉnh nhỏ để cải thiện hiệu suất MPPT của hệ thống PV.

$$V_{mp[1]} = k_v \frac{V_{oc,sys}}{N} \quad (4.2)$$

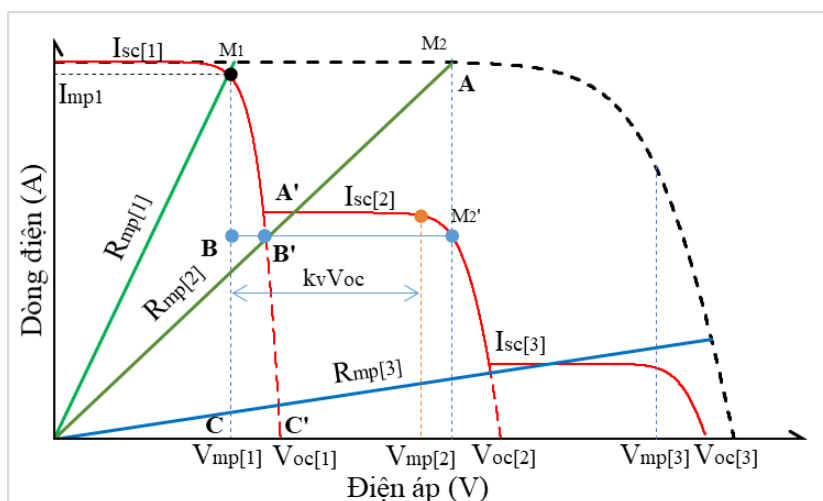
4.2.2. Dòng điện ngắn mạch của hệ thống PV khi xảy ra PSC

Nhược điểm của các giải pháp dựa trên kỹ thuật CV và CC là phải gián đoạn cung cấp điện để đo I_{sc} và V_{oc} làm giảm hiệu suất sinh điện. Mục 3.2 đã đề xuất giải pháp đo I_{sc} dựa vào D cho các bộ DC/DC. Phương pháp này cũng có thể được tìm thấy trong tài liệu tham khảo [39]. Vì vậy, các tham số I_{sc} và V_{oc} của hệ thống PV có thể được đo trực tiếp theo D mà không cần gián đoạn cấp điện.

4.3. Đề xuất giải pháp GMPPT dựa trên đặc tuyến I-V khi xảy ra PSC

4.3.1. Xác định MPP trong khoảng đầu tiên trên đặc tuyến I-V

a. Điện áp hở mạch của PV đầu tiên trên đặc tuyến I-V



Hình 4.1 Chia vùng điện áp trên đường cong I-V khi xảy ra PSC.

Sơ đồ khối của hệ thống PV kết hợp với bộ chuyển đổi Buck-boost được giới thiệu trong Hình 4.2. Giá trị $V_{oc,sys}$ được đo trực tiếp tại $D = 0,1$ sau đó áp dụng các phương trình (4.1) và (4.2) để tính điện áp tại đỉnh cực trị đầu tiên với $k_v = 0,8$. Phương pháp này đã được chứng minh trong mục 3.3 và công bố trong các xuất bản số {1} và {2}.

b. Dòng điện ngắn mạch của PV đầu tiên trên đặc tuyến I-V

Đặc điểm của liên kết kiểu SC là dòng $I_{sc,sys}$ cũng là dòng của PV nhận được nhiều năng lượng nhất. Do đó giá trị dòng điện ngắn mạch $I_{sc[1]} = I_{sc,sys}$ khi thiết lập thông số ban đầu $D = 0,8$.

Tóm lại, thiết lập $D_1 = 0,8$ và $D_2 = 0,1$ để đo $I_{sc,sys}$ và $V_{oc,sys}$, sau đó tính MPP đầu tiên tại M_1 như sau:

$$V_{mp[1]} = k_v V_{oc[1]} = k_v \frac{V_{oc,sys}}{N} \quad (4.3a)$$

$$I_{mp[1]} = k_i I_{sc[1]} = k_i I_{sc,sys} \quad (4.3b)$$

Điện trở nội của PV đầu tiên tại vị trí M_1 là

$$R_{mp[1]} = \frac{V_{mp[1]}}{I_{mp[1]}} \quad (4.4)$$

Xác định $D_{mp[1]}$ tại M_1 theo phương trình (4.5) như sau.

$$D_{mp[1]} = \frac{\sqrt{\frac{R_L}{R_{mp[1]}}}}{1 + \sqrt{\frac{R_L}{R_{mp[1]}}}} \quad (4.5)$$

Với giá trị $D_{mp[1]}$ vừa tính được, cập nhật tọa độ M_1 vào bảng giá trị MPP tiềm năng.

4.3.2. Xác định vị trí các MPP còn lại trong hệ thống PV

a. Xác định giá trị điện áp V_{mp} tại các đỉnh LMPP

Điện áp tại B' được tính gần đúng khi xét hai tam giác đồng dạng M_1BB' và M_1CC' như sau:

$$V_{B'} - V_{mp[1]} = (1 - k_v) V_{oc[1]} \frac{k_i (I_{sc[1]} - I_{sc[2]})}{k_i I_{sc[1]}} = (1 - k_v) V_{oc[1]} \frac{I_{sc[1]} - I_{sc[2]}}{I_{sc[1]}} \quad (4.6)$$

Vì vậy điện áp tại B' là.

$$V_{B'} = (1 - k_v) V_{oc[1]} \frac{I_{sc[1]} - I_{sc[2]}}{I_{sc[1]}} + V_{mp[1]} \quad (4.7)$$

Điện áp $V_{mp[2]}$ trùng với M_2' và chênh lệch so với B' một khoảng là $k_v V_{oc[1]}$, nên $V_{mp[2]}$ được tính theo biểu thức sau:

$$V_{mp[2]} = V_{B'} + k_v V_{oc[1]} = V_{mp[1]} + V_{oc[1]} \left[(1 - k_v) \frac{I_{sc[1]} - I_{sc[2]}}{I_{sc[1]}} + k_v \right] \quad (4.8)$$

Giá trị $V_{mp[2]}$ tính theo biểu thức (4.8) chính xác hơn so với việc cập nhật một khoảng điều $V_{mp[2]} = V_{mp[1]} + k_v V_{oc[1]}$ như trong các nghiên cứu trước đó đã sử dụng. Một cách tổng quát, giá trị $V_{mp[i]}$ trong hệ thống PV có N tấm PV nối tiếp khi xảy ra bóng che một phần theo công thức (4.10) với $i = 2$ đến N.

$$V_{mp[i]} = V_{mp[i-1]} + V_{oc[1]} \left[(1 - k_v) \frac{I_{sc[i-1]} - I_{sc[i]}}{I_{sc[i-1]}} + k_v \right] \quad (4.10)$$

b. Xác định giá trị dòng điện I_{mp} tại các đỉnh LMPP

Trên đường cong I-V Hình 4.1, giá trị điện áp $V_{mp[2]}$ tính được bằng công thức (4.10) cũng chính là điện áp tại hai

điểm M_2 và M_2' . Khi đó, giá trị điện trở R_{mp2} được xác định theo biểu thức (4.11) như sau:

$$R_{mp[2]} = \frac{V_{mp[2]}}{I_{sc[1]}} \quad (4.11)$$

Tính $D_{mp[2]}$ theo phương trình (4.5), đo và kiểm tra điện áp tại $D_{mp[2]}$ để xác nhận bóng che theo nguyên tắc sau:

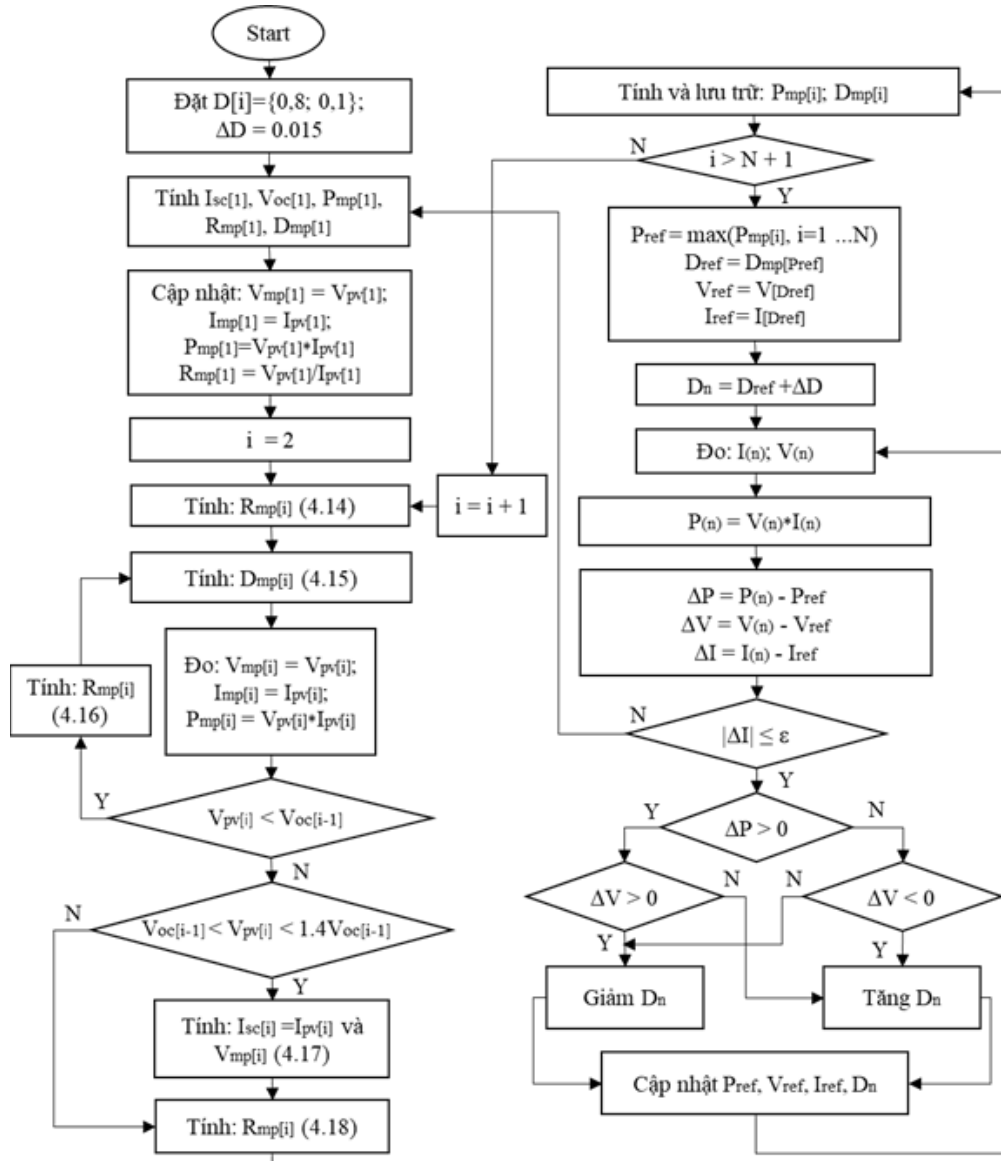
b1. Nếu $V_{mp[1]} < V_{A'} < V_{oc[1]}$ là có bóng che và $I_{sc[2]} \ll I_{sc[1]}$ nên dòng điện đo được $I_{sc[2]} < I_{A'} < I_{sc[1]}$. Vì vậy phải tăng $V_{A'}$ bằng cách điều chỉnh $D_{mp[2]}$ thông qua điều chỉnh $R_{mp[2]}$ theo biểu thức (4.12) đến khi $V_{A'} > V_{oc[1]}$.

$$R_{mp[2]} = R_{mp[2]} + \lambda \frac{V_{oc[1]}}{I_{sc[1]}} \quad (4.12)$$

b2. Nếu $V_{oc[1]} < V_{A'} < 1.4V_{oc[1]}$, nghĩa là có bóng che và $I_{sc[2]} = I_{A'}$, điểm MPP cần xác định là M_2' như trong Hình 4.1. Với $I_{sc[2]} = I_{A'}$, tính lại các giá trị $R_{mp[2]}$ và $D_{mp[2]}$ để cập nhật vị trí hiện tại. Kiểm tra các PV còn lại theo các bước tương tự.

b3. Nếu $V_{A'} > 1.4V_{oc[1]}$ thì không có bóng che $I_{sc[1]} = I_{sc[2]}$. Chọn $I_{sc[2]} = I_{A'}$ sau đó tính giá trị $R_{mp[2]}$ và cập nhật lại $D_{mp[2]}$

$$R_{mp[2]} = \frac{V_{mp[2]}}{k_i I_{sc[2]}} \quad (4.13)$$



Hình 4.2 Lưu đồ giải thuật đề xuất

Kiểm tra tới PV cuối cùng, GMPP được xác định là vùng có P_{mp} lớn nhất trong số các $P_{mp[i]}$ đã lưu trữ. Chúng được dùng làm điểm tham chiếu để áp dụng phương pháp P&O kiểm tra chính xác điểm hội tụ.

4.3.3. Lưu đồ giải thuật GMPPT đề xuất

Lưu đồ giải thuật GMPP của hệ thống PV khi xảy ra bóng che một phần được trình bày trong Hình 4.3.

4.3.4. Ứng dụng và những kết quả đạt được

Các thí nghiệm đề xuất mô phỏng liệt kê trong Bảng

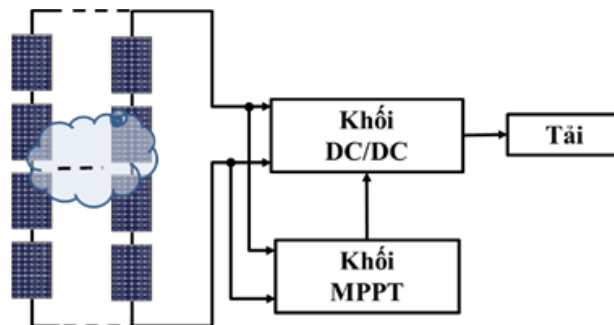
4.1 tập trung vào những mục tiêu sau đây:

- Mô phỏng đáp ứng của giải thuật với một chuỗi gồm 4 tấm PV trong những điều kiện vận hành bóng che một phần.

- Mô phỏng và kiểm tra đáp ứng của giải thuật trong điều kiện bóng che một phần khi có nhiều chuỗi song song.

- So sánh đáp ứng động của giải thuật đề xuất với hai thuật toán tối ưu khác là PSO và GA trong cùng điều kiện vận hành ổn định và thay đổi liên tục.

- Thực nghiệm các điều kiện bóng che một phần trên một chuỗi PV thông qua trình mô phỏng Chroma. Cấu trúc của hệ thống PV ứng dụng cho giải pháp đề xuất này được thể hiện trong Hình 4.3.



Hình 4.3 Cấu trúc PV đề xuất.

Bảng 4.1. Các trường hợp mô phỏng với giải thuật đề xuất.

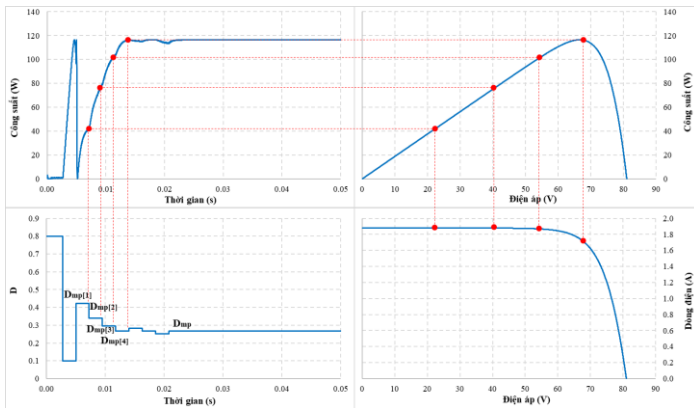
Trường hợp	Bức xạ trên PV (W/m^2)				Số lượng cực trị	Vị trí GMPP	P_{max} (W)
	PV1	PV2	PV3	PV4			
1	500	500	500	500	1	1	116,51
2	700	500	400	200	4	3	77,20
3	600	500	400	300	4	4	78,62
4	1000	200	300	400	4	1	59,88
5	950	750	300	250	4	2	94,74
6	950	200	250	350	4	1	56,80
7	800	700	600	300	4	3	115,03
8	900	500	250	100	4	2	64,29
9	Chuỗi 1	1000	1000	1000	1	1	479,72
	Chuỗi 2	1000	1000	1000			
10	Chuỗi 1	1000	900	400	4	2	247,98
	Chuỗi 2	800	450	1000			
11	Chuỗi 1	500	1000	700	3	1	280,11
	Chuỗi 2	1000	700	1000			
12	Chuỗi 1	1000	1000	400	2	2	242,12

	Chuỗi 2	400	400	1000	1000			
13	Chuỗi 1	1000	900	450	200	4	3	311,71
	Chuỗi 2	200	700	450	900			
	Chuỗi 3	900	200	400	100			

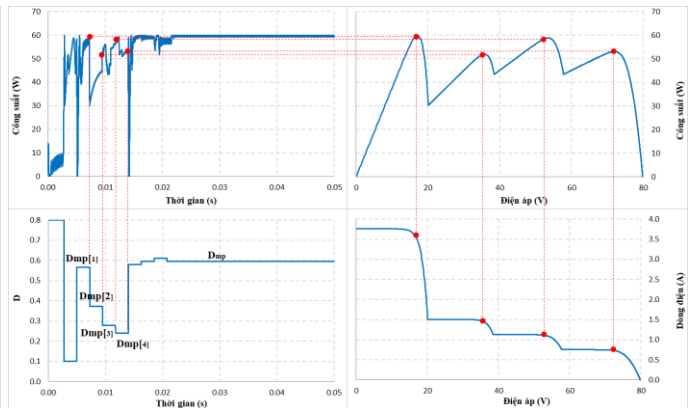
a. Mô phỏng với một chuỗi PV

Trong điều kiện đồng nhất hoặc bóng che toàn phần, thuật toán đề xuất luôn tìm thấy GMPP dưới 22 ms từ khi khởi động. Sau khi tính các giá trị $I_{sc,sys}$ và $V_{oc,sys}$, và $D_{mp[i]}$ trong 15 ms (Hình 4.5). Thuật toán cần 4 bước điều chỉnh để hội tụ tại D_{mp} . Công suất ước tính là $P_{mp[4]} = 116,40$ W tại $D_{mp[4]}$ đạt hiệu suất khoảng 99,98%.

Trong điều kiện bóng che một phần, giá trị $P_{mp[1]}$ xấp xỉ $P_{mp[3]}$ nên những thuật toán có độ chính xác kém thường bị bẫy vào LMPP trong những trường hợp tương tự (Hình 4.6). Trong trường hợp này, giá trị $D_{mp[i]}$ và $P_{mp[i]}$ được tính trong khoảng 15,7 ms và qua 4 bước điều chỉnh để hội tụ tại $D_{mp} = 0,0595$ với tổng thời gian khoảng 28 ms. Công suất ổn định khoảng 59,83 W đạt 99,92%. Tất cả các trường hợp mô phỏng đều có hiệu suất trên 99% với mức trung bình là 99,70%.



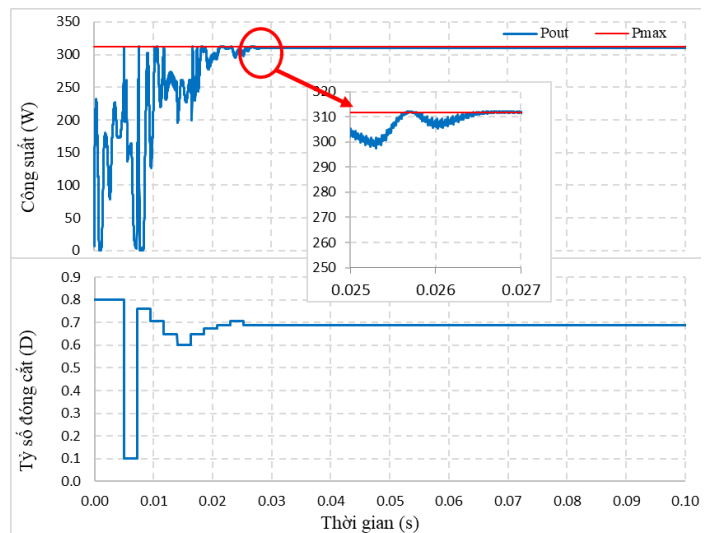
Hình 4.5 Dạng sóng ngõ ra khi mô phỏng trong điều kiện đồng nhất.



Hình 4.6 Dạng sóng ngõ ra khi mô phỏng trong điều kiện bóng che một phần.

b. Mô phỏng với nhiều chuỗi PV ghép song song

Các trường hợp khảo sát gồm hai hoặc ba chuỗi song song làm việc trong điều kiện đồng nhất hoặc PSC. Hình 4.8 trình bày dạng sóng công suất và tỷ số đóng cắt D khi vận hành ba chuỗi ở điều kiện PSC. Kết quả cho thấy: ngay khi xác định được $I_{sc,sys}$ và $V_{oc,sys}$, từ hai giá trị D ban đầu, bốn giá trị D được triển khai tìm kiếm trong các khoảng khác nhau. Tổng thời gian từ khi khởi động đến lúc hội tụ tại vị trí làm việc cân bằng khoảng 0,027 s với lượng công suất phát đạt 99,94% so với công suất cực đại của hệ thống PV. Kết quả này cũng cho thấy: mặc dù gia tăng về số lượng chuỗi song song đồng nghĩa với gia tăng về dòng $I_{sc,sys}$ nhưng giải pháp vẫn có khả năng tránh bẫy LMPP hiệu quả và trích xuất chính xác giá trị GMPP của hệ thống PV. Điều này có thể được giải thích chi tiết rằng: hai vị trí đặc biệt trên đường cong I-V đã được giới hạn ngay từ lúc khởi động nên giải pháp chỉ tìm kiếm các LMPP trong phạm vi định



Hình 4.8. Dạng sóng ngõ ra khi mô phỏng cho 3 chuỗi song song ở PSC.

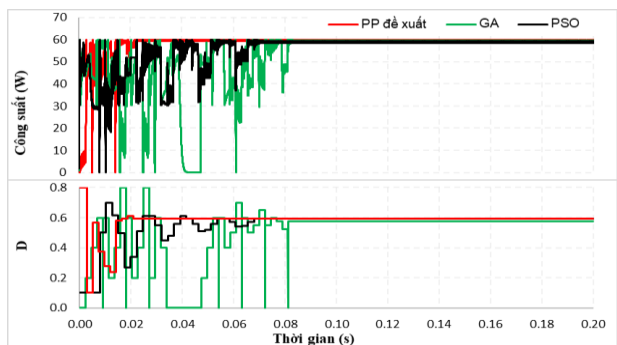
sẵn mà không bị trôi khỏi vùng tiềm năng. Hơn nữa giải pháp chỉ tăng số lượng phép tính mà không tăng số lần lặp nên hệ thống PV sớm ổn định hơn so với các kỹ thuật trước đây.

Tổng hợp tất cả các trường hợp mô phỏng cho thấy tốc độ hội tụ trong khoảng từ 21 ms đến 32 ms. Tất cả các trường hợp mô phỏng đều có hiệu suất trên 99% với giá trị trung bình khoảng 99,68%. Nó cho thấy phương pháp đề xuất này có thể đáp ứng được với nhiều dạng cấu hình PV và vận hành trong những điều kiện khác nhau.

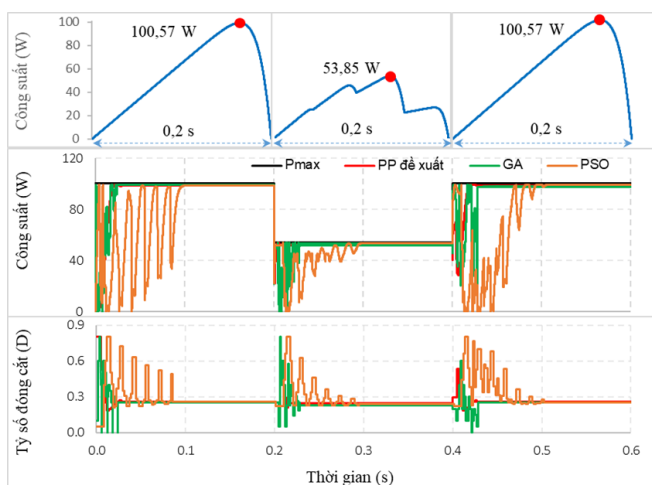
c. So sánh đáp ứng động với các thuật toán tối ưu

Khi so sánh với các giải thuật khác trong điều kiện bóng che một phần (Hình 4.9), giải pháp đề xuất chỉ mất 18,8 ms để ổn định công suất đầu ra và đạt hiệu suất 99,92% so với 99,97% của GA trong 82 ms và 98,58% của PSO trong 70 ms. Hiệu suất trung bình của giải pháp đề xuất là 99,70% so với 98,67% của PSO và GA là 98,09%. Tốc độ hội tụ của giải pháp đề xuất nhanh nhất với giá trị trung bình khoảng 19,97 ms so với 67,5 ms của PSO và 52,25 ms của GA (Bảng 4.2).

Trong điều kiện thay đổi liên tục (Hình 4.10), giải pháp đề xuất và GA gần như ổn định cùng lúc ở 0,430s, trong khi thuật toán PSO mất 0,510s. Nhìn chung hiệu suất trung bình tăng 0,99% so với PSO và 3,45% so với GA. Trong khi đó thời gian tìm kiếm trung bình giảm 70,4% và 61,77%.



Hình 4.9 So sánh dạng sóng ra của các giải thuật khi xảy ra PSC.



Hình 4.11 So sánh khả năng GMPP khi PSC thay đổi liên tục

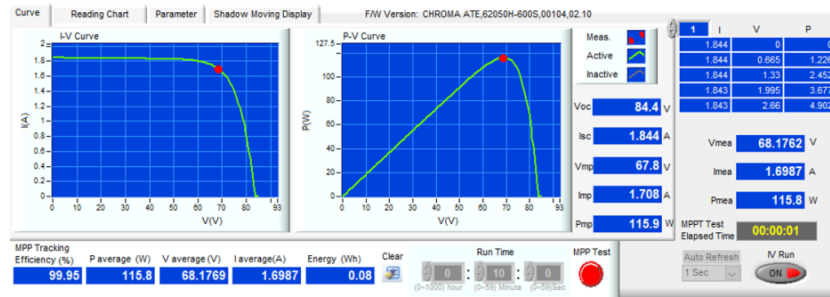
Bảng 4.2. Tổng hợp hiệu suất MPPT và tốc độ hội tụ khi mô phỏng

Trường hợp	P _{max} (W)	P _{out} (W)			Hiệu suất (%)			Tốc độ hội tụ (ms)		
		PP đề xuất	PSO	GA	PP đề xuất	PSO	GA	PP đề xuất	PSO	GA
1	116,51	116,40	113,98	116,41	99,91	97,83	99,91	21	75	36
2	77,20	77,07	76,22	75,49	99,83	98,73	97,78	27	75	46
3	78,62	78,21	75,58	75,05	99,48	96,13	95,46	27	74	58
4	59,88	59,83	59,03	59,86	99,92	98,58	99,97	28	70	82
5	94,74	94,11	94,59	92,37	99,34	99,84	97,50	31	62	51
6	56,80	56,53	56,54	53,69	99,52	99,54	94,52	23	69	66
7	115,03	115,01	114,83	114,64	99,98	99,83	99,66	28	57	41
8	64,47	64,20	63,77	63,65	99,58	98,91	98,73	31	58	38
Giá trị trung bình					99,70	98,67	97,94	27	67,5	52,25

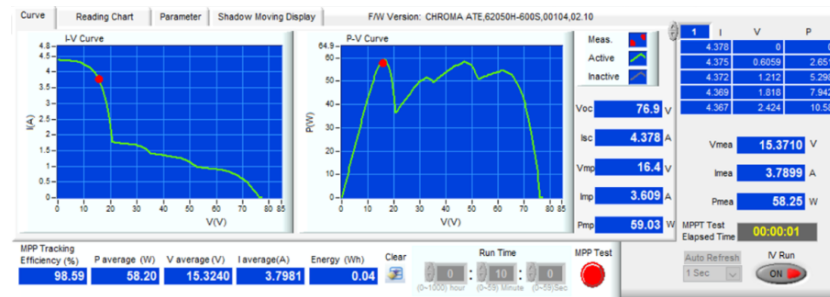
d. Kết quả thực nghiệm

Ở điều kiện đồng nhất hiệu suất GMPPT khoảng 99,95% (Hình 4.13a) và giảm nhẹ khi xảy ra PSC (Hình 4.13b), xấp xỉ 98,59%, giá trị trung bình khoảng 99,13%.

Tóm lại, bằng khả năng tính toán $I_{sc,sys}$ và $V_{oc,sys}$ dựa vào D để định vị các LMPP trên đường cong đặc tuyến I-V. Giải pháp đề xuất tính chính xác độ lệch điện áp giữa hai vị trí MPP liên tiếp. Qua đó tăng tốc độ và hiệu suất MPPT so với các thuật toán tối ưu khác trong cùng điều kiện thử nghiệm. Kết quả đã khẳng định rằng phương pháp đề xuất có khả năng tránh bẫy LMPP hiệu quả dựa trên nguyên lý hoạt động trong mục 4.3.2. Nó là giải pháp đơn giản, dễ thực hiện và đáng tin cậy hơn trong điều kiện PSC nhờ tự động điều chỉnh bước nhảy ΔV và ΔR theo điều kiện vận hành trong khi ΔD được chọn với giá trị nhỏ và cố định để gia tăng hiệu suất và độ ổn định quanh điểm GMPP. Nó có tiềm năng ứng dụng trong các hệ thống PV liên kết kiểu nối tiếp hoặc S-PC hoạt động trong những điều kiện khác nhau có xét tới ảnh hưởng của diode bypass.



a)



b)

Hình 4.13 Kết quả thực nghiệm khi a) điều kiện đồng nhất, b) PSC

4.4. Kết Luận Chương 4

Nội dung chương 4 đã đề xuất giải pháp GMPP cho hệ thống PV liên kết kiểu SC hoặc S-PC khi xảy ra bóng che một phần với các nghiên cứu ứng dụng như sau.

Kế thừa và phát huy đề xuất vùng điện áp nhỏ hơn $0,4V_{oc}$ từ Chương 3 để định vị các LMPP trong vùng bậc thang trên đường cong đặc tuyến I-V do bóng che một phần gây ra. Phát triển giải pháp xác định trực tiếp $I_{sc,sys}$ và $V_{oc,sys}$ của hệ thống PV gồm một hoặc một vài chuỗi song song dựa trên mô phỏng đường cong làm việc của chúng. Bên cạnh đó, giải pháp đề xuất tính toán chính xác sai số điện áp giữa hai đỉnh cực trị liên tiếp trên đường đặc tuyến I-V khi xảy ra PSC và sự điều chỉnh vùng làm việc theo ΔR đã giảm bớt số vòng lặp cho giải thuật P&O để giảm số bước lặp tìm kiếm. Các kết quả đạt được khẳng định tính giá trị về khả năng GMPPT của giải thuật đề xuất tốt hơn so với các thuật toán tối ưu trong cùng điều kiện vận hành. Cụ thể, giải thuật đề xuất đã giảm 70,4% thời gian tính toán so với PSO và 61,77% so với GA. Vì vậy mà hiệu suất đã tăng lên lần lượt là 0,98% và 3,32% so với hai phương pháp này. Nó góp phần làm sáng tỏ hơn kỹ thuật GMPPT dựa trên khả năng mô phỏng trạng thái hoạt động của PVS trong điều kiện vận hành thực tế. Vì vậy giải thuật đề xuất có nhiều tiềm năng ứng dụng trong các hệ thống PV hoạt động trong các điều kiện khác nhau đặc biệt là bóng che một phần. Giải pháp đề xuất này đã được nghiên cứu và ứng dụng trong công trình đã được công bố số {3} và công trình liên quan số {6-9}.

CHƯƠNG 5. KẾT LUẬN

5.1. Những kết quả đạt được

Luận án “**Nâng cao hiệu suất hệ thống pin quang điện**” đã nghiên cứu, phân tích, đề xuất các kỹ thuật MPPT nhằm cải thiện hiệu quả khai thác năng lượng từ PVS. Ưu điểm nổi bật của phương pháp đề xuất là cấu trúc đơn giản, dễ thực thi, hiệu suất MPPT cao và có số bước lặp giảm so với các phiên bản truyền thống và cải tiến trước đó. Trọng tâm của luận án đã giải quyết hai bài toán MPPT xuất phát từ những giải pháp đề xuất bao gồm:

5.1.1. Giải pháp MPPT cho hệ thống PV có cấu hình song song

Luận án đã đề xuất giải thuật MPPT cho hệ thống PV liên kết kiểu song song làm việc trong những điều kiện bóng che một phần. Đóng góp chính trong giải pháp này là đề xuất giới hạn điện áp trong vùng $0,4V_{oc}$ để ước lượng nhanh vị trí khởi động cho thuật toán P&O cải tiến. Để có cơ sở đề xuất giải pháp, một loạt các PV thuộc ba nhóm Monocrystalline, Polycrystalline, và Thin-film được khảo sát đặc trưng ngõ ra của chúng dưới tác động của môi trường làm việc. Công việc này nhằm khảo sát các vùng tuyến tính và phi tuyến trên đường cong I-V để tính trực tiếp hai giá trị I_{sc} và V_{oc} của PVS bằng phép ngoại suy mà không cần gián đoạn cung cấp điện. Bên cạnh đó, ba bộ chuyển đổi Boost, Buck, và Buck-boost cũng được khảo sát giới hạn vận hành tối ưu nhằm tìm ra giá trị D tốt nhất trong từng điều kiện làm việc. Sự kết hợp giữa hai công đoạn này đã giúp định vị nhanh chóng và chính xác vùng MPP của PVS. Do đó, giải pháp đề xuất chỉ cần kiểm tra lại độ chính xác bằng thuật toán P&O đơn giản để tăng hiệu suất MPPT. Những kết quả mô phỏng và thực nghiệm trên PVS kiểu PC cho thấy nó có khả năng đáp ứng động cao nhất lên tới 100% trong thời gian 0,015 s. Bên cạnh đó, khả năng MPPT của giải thuật này còn được so sánh trực tiếp với phiên bản P&O truyền thống và VSSP&O. Giải pháp đề xuất có số bước lặp trung bình giảm 76,60% so với P&O và 69,01% so với VSSP&O. Vì vậy mà thời gian tính toán đã giảm xuống lần lượt là 71,39% và 21,94% so với hai giải pháp trên. Không những thế, hiệu suất MPPT trung bình cũng đã được cải thiện tăng 4,46% so với phiên bản chưa cải tiến và 1,65% so với VSSP&O. Nó có nhiều tiềm năng ứng dụng trong các hệ thống PV có công suất vừa và nhỏ. Phương pháp đề xuất này đã được thực hiện và công bố trong công trình số {1}, {2} và {5}.

5.1.2. Giải pháp GMPPT cho hệ thống PV có cấu hình nối tiếp

Kế thừa những kết quả đạt được từ bài toán trước, luận án tiếp tục đề xuất cải tiến giải thuật P&O truyền thống để GMPPT cho hệ thống gồm các PV mắc nối tiếp hoặc gồm nhiều chuỗi PV mắc song song. Trong đó, phương pháp mô phỏng đường cong đặc tuyến I-V khi xảy ra PSC được sử dụng để xác định MPP. Giải pháp đã đề xuất cải tiến hai vấn đề then chốt để tăng khả năng ước lượng nhanh chóng, chính xác vùng chứa GMPP trong số các LMPP. Thứ nhất, các tham số $I_{sc,sys}$ và $V_{oc,sys}$ của PVS được xác định trực tiếp từ những vị trí thuận lợi nhất để không gián đoạn cấp điện mà lại chính xác hơn phương pháp CC hoặc CV. Thứ hai là đề xuất phương pháp xác định độ lệch điện áp giữa các đỉnh MPP liên tiếp khi xảy ra PSC. Công việc này được kế thừa từ đề xuất vùng điện áp $0,4V_{oc}$ trong bài toán trước đó để xác định nhanh trạng thái bóng che. Bằng cách này giải pháp đề xuất sẽ giảm sai số ước lượng do vị trí tính toán có kể đến điều kiện vận hành. Hai cải tiến trên giúp khả năng ước lượng MPP nhanh hơn với sai số nhỏ hơn. Nhờ đó đẩy nhanh tốc độ tìm kiếm và gia tăng hiệu suất sinh điện của PVS. Kết quả chứng minh bằng việc so sánh với hai giải thuật tối ưu trong những điều kiện làm việc giống nhau. Giải thuật đề xuất đã giảm 70,4% thời gian tính toán so với PSO và 61,77% so với GA. Vì vậy mà hiệu suất đã tăng lên lần lượt là 0,98% và 3,32% so với hai phương pháp này. Phải pháp đề xuất có nhiều tiềm năng ứng dụng trong các hệ thống PV có cấu hình nối tiếp hoặc S-PC với hiệu suất và tốc độ vượt trội.

Các đề xuất trong nội dung nghiên cứu này đã được ứng dụng và công bố trong công trình số {3} và các công trình liên quan số {4}, và {6 - 9}.

5.2. Hướng nghiên cứu phát triển

Mặc dù đã đạt được một số kết quả nhất định trong ứng dụng công nghệ MPPT để nâng cao hiệu suất sinh điện của PVS. Tuy nhiên, luận án vẫn còn một số hạn chế nhất định. Trong những nghiên cứu tiếp theo, tác giả tiếp tục ứng dụng những kết quả đạt được để cải thiện các hạn chế trong nghiên cứu này bao gồm:

- Xây dựng giải thuật GMPPT trong điều kiện bóng che có xét tới yếu tố ảnh hưởng khác ngoài bức xạ và nhiệt độ bề mặt.
- Đề xuất các cấu hình high-step-up, nâng cao chất lượng ổn định động quanh điểm MPP của PVS trong điều kiện bóng che.
- Xác định vùng xảy ra sự cố trong chuỗi các tấm PV ở điều kiện làm việc thực tế dựa vào đặc tính ngõ ra của hệ thống

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] I. Iam, Z. Ding, Z. Huang, C. Lam, R. Martins und P. Mak, "A Flexible Rooftop Photovoltaic-Inductive Wireless Power," *IEEE Access*, Bd. 11, p. 51117–51132, 2023.
- [2] H. Farh, A. Fathy, A. Al-Shamma'a, S. Mekhilef und A. Al-Shaalan, "Global research trends on photovoltaic maximum power extraction:," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Bd. 61, p. 103585, 2024.
- [3] A. Baba, G. Liu und X. Chen, "Classification and Evaluation Review of Maximum Power Point Tracking Methods," *Sustainable Futures*, Bd. 2, p. 100020, 2020.
- [4] R. K. Pachauri, O. P. Mahela, A. Sharma, J. Bai, Y. K. Chauhan, B. Khan und H. H. Alhelou, "Impact of partial shading on various PV array configurations and different modeling approaches: A comprehensive review," *IEEE Access*, Bd. 8, pp. 181375-181403, 2020.
- [5] L. Gao, R. A. Dougal, S. Liu und A. P. Iotova, "Parallel-Connected Solar PV System to Address Partial and Rapidly Fluctuating Shadow Conditions," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Bd. 56, Nr. 5, pp. 1548 - 1556, 2009.
- [6] C. L. F. Belhachat, "Modeling, analysis and comparison of solar photovoltaic array configurations under partial shading conditions," *Solar Energy*, Bd. 120, p. 399–418, 2015.
- [7] S. A. S. R. W. M. K Abdulmawjood, "Characteristic study of solar photovoltaic array under different partial shading conditions," *IEEE Access*, Bd. 10, pp. 6856 - 6866, 2022.
- [8] D. Khodair, S. Motahhir, H. Mostafa, A. Shaker, H. Munim, M. Abouelatta und A. Saeed, "Modeling and Simulation of modified MPPT techniques under varying operating climatic conditions," *Energies*, Bd. 16, Nr. 1, p. 549, 2023.
- [9] M. Kathe, A. Makokha, S. Zachary und M. Adaramola, "A Comprehensive Review of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Techniques Used in Solar PV Systems," *Energies*, Bd. 16, p. 2206, 2023.
- [10] S. Bhattacharyya, S. Samanta und S. Mishra, "Steady Output and Fast Tracking MPPT (SOFT-MPPT) for P&O and InC Algorithms," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Bd. 12, Nr. 1, pp. 293 - 302, 2021.
- [11] A. A. R. M. A. S. O. M Lasheen, "Adaptive reference voltage-based MPPT technique for PV applications," *IET Renewable Power Generation*, Bd. 11, Nr. 5, pp. 715-722, 2017.
- [12] B. A. Y. D. I Dagal, "A modified multi-stepped constant current based on gray wolf algorithm for photovoltaics applications," *Electrical Engineering*, pp. 10.1007/s00202-023-02180-z, 2024.
- [13] A. Baatiah, A. Eltamaly und M. Alotaibi, "Improving Photovoltaic MPPT Performance through PSO Dynamic Swarm Size Reduction," *Energies*, Bd. 16, p. 6433, 2023.
- [14] C. González-Castaño, C. Restrepo, S. Kouro und J. Rodriguez, "MPPT Algorithm Based on Artificial Bee Colony for PV System," *IEEE Access*, Bd. 9, pp. 43121 - 43133, 2021.

- [15] V. R. S. P. F. A. N Priyadarshi, „An ant colony optimized MPPT for standalone hybrid PV-wind power system with single Cuk converter,“ *Energies*, Bd. 12, Nr. 1, p. 167, 2019.
- [16] S. B. S. M. M. I. S. M. NI Nahin, „A modified PWM strategy with an improved ANN based MPPT algorithm for solar PV fed NPC inverter driven induction motor drives,“ *IEEE Access*, Bd. 11, pp. 70960 - 70976, 2023.
- [17] M. Shehab, M. Abu-Hashem, M. Shambour, A. Alsalibi, O. Alomari, J. Gupta, A. R. Alsoud, B. Abuhaija und L. Abualigah, „A Comprehensive Review of Bat Inspired Algorithm: Variants, Applications, and Hybridization,“ *Archives of Computational Methods in Engineering*, Bd. 30, pp. 765-797, 2023.
- [18] E. Y. İ Yazıcı, „Modified grey wolf optimizer based MPPT design and experimentally performance evaluations for wind energy systems,“ *Engineering Science and Technology*, Bd. 46, p. 101520, 2023.
- [19] K. C. T. L. KH Huang, „An improved photovoltaic module array global maximum power tracker combining a genetic algorithm and ant colony optimization,“ *Technologies*, Bd. 11, Nr. 2, p. 61, 2023.
- [20] A. Dawahdeh, H. Sharadga und S. Kumar, „Novel MPPT Controller Augmented with Neural Network for Use with Photovoltaic Systems Experiencing Rapid Solar Radiation Changes,“ *Sustainability*, Bd. 16, p. 1021, 2024.
- [21] A. L. A. B. R. H. H. C. A. M. I. S. M. M. S Abboud, „Optimizing Solar Energy Production in Partially Shaded PV Systems with PSO-INC Hybrid Control,“ *Journal of Robotics and Control*, Bd. 5, Nr. 2, pp. 312-320, 2024.
- [22] Y. L. B. Z. K Xia, „Improved Photovoltaic MPPT Algorithm Based on Ant Colony Optimization and Fuzzy Logic Under Conditions of Partial Shading,“ *IEEE Access*, Bd. 12, pp. 44817-44825, 2024.
- [23] Z. S. J Ahmed, „An enhanced adaptive P&O MPPT for fast and efficient tracking under varying environmental conditions,“ *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Bd. 9, Nr. 3, pp. 1487 - 1496, 2018.
- [24] F. W. F Yi, „Review of voltage-bucking/boosting techniques, topologies, and applications,“ *Energies*, Bd. 16, Nr. 2, p. 842, 2023.
- [25] T. R. Kandipati Rajani, „Reconfiguration of PV Arrays (T-C-T, B-L, H-C) Considering Wiring Resistance,“ *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, Bd. 8, Nr. 5, pp. 1408 - 1416, 2022.
- [26] A. D. G. A Orioli, „A procedure to calculate the five-parameter model of crystalline silicon photovoltaic modules based on the tabular performance data,“ *Applied energy*, Bd. 102, p. 1160–1177, 2013.
- [27] M. Ibrahim, S. Ang, M. Dani, M. Rahman, R. Petra und S. Sulthan, „Optimizing Step-Size of Perturb & Observe and Incremental Conductance MPPT Techniques Using PSO for Grid-Tied PV System,“ *IEEE Access*, Bd. 11, p. 13079, 2023.
- [28] C. A. Y. M. I Pervez, „A Reduced Search Space Exploration Metaheuristic Algorithm for MPPT,“ *IEEE Access*, Bd. 10, pp. 26090 - 26100, 2022.
- [29] N. Pamuk, „Performance Analysis of Different Optimization Algorithms for MPPT Control Techniques under Complex Partial Shading Conditions in PV Systems,“ *Energies*, Bd. 16, Nr. 8, p. 3358, 2023.

- [30] R. Morales, J. Rohten, M. Garbarino, J. Muñoz, J. Silva, E. Pulido, J. Espinoza und M. Andreu, „A Novel Global MPPT Method Based on Measurement Cells,“ *IEEE Access*, Bd. 10, pp. 97481-97494, 2022.
- [31] S. Zand, S. Mobayen, H. Gul, H. Molashahi, M. Nasiri und A. Fekih, „Optimized Fuzzy Controller Based on Cuckoo Optimization Algorithm for Maximum Power-Point Tracking of Photovoltaic Systems,“ *IEEE Access*, Bd. 10, pp. 71699-71716, 2022.
- [32] C. H. Basha, M. Palati, C. Dhanamjayulu, S. Muyeen und P. Venkatareddy, „A novel on design and implementation of hybrid MPPT controllers for solar PV systems under various partial shading conditions,“ *Scientific Reports*, Bd. 14, p. 1609, 2024.
- [33] M. M. R. W. P. M. M. Z. O. I. A Calcabrini, „A fully reconfigurable series-parallel photovoltaic module,“ *Renewable Energy*, Bd. 179, pp. 1-11, 2021.
- [34] R. R. S Malathy, „Comprehensive analysis on the role of array size and configuration on energy yield of photovoltaic systems under shaded conditions,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 49, p. 672–679, 2015.
- [35] G. H. C. H. L Gong, „A two-stage MPPT controller for PV system based on the improved artificial bee colony and simultaneous heat transfer search algorithm,“ *ISA transactions*, Bd. 132, pp. 428-443, 2023.
- [36] O. B. M. M. A Hassan, „An improved genetic algorithm based fractional open circuit voltage MPPT for solar PV systems,“ *Energy Reports*, Bd. 9, pp. 1535-1548, 2023.
- [37] Z. S. J Ahmed, „An accurate method for MPPT to detect the partial shading occurrence in a PV system,“ *IEEE transactions on industrial informatics*, Bd. 13, Nr. 5, pp. 2151 - 2161, 2017.
- [38] Y. C. H. L. W. T. M. L. J. W. Z. L. L Li, „A Multi-Producer Group-Search-Optimization Method-Based Maximum-Power-Point-Tracking for Uniform and Partial Shading Condition,“ *IEEE Access*, Bd. 8, pp. 184688 - 184696, 2020.
- [39] K. M. S. M. M. M. RI Jabbar, „A modified perturb and observe MPPT for a fast and accurate tracking of MPP under varying weather conditions,“ *IEEE Access*, Bd. 11, pp. 76166 - 76176, 2023.
- [40] Y. M, C. R und G. A, „Enhanced photovoltaic systems performance: Anti-Windup PI controller in ANN-Based ARV MPPT method,“ *IEEE Access*, Bd. 11, pp. 90498 - 90509, 2023.