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 5/2024

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

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

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

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

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. ***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 – Kĩ thuật và Công nghệ, 73(1):326-338*
4. ***Bùi Văn Hiền**, Nguyễn Tùng Linh, Nguyễn Vũ Lân, 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*
5. *Trương Việt Anh, **Bùi Văn Hiền**, Nguyễn Tùng Linh, Nguyễn Vũ Lân, 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.*
6. *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*
7. *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*
8. ***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 đối mặt 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].

1.1.1. Kỹ thuật MPPT. Để phân biệt GMPP trong nhiều LMPP trong PSC để tăng tốc độ hội tụ, nâng cao hiệu suất MPPT, giảm chi phí, duy trì ổn định [3], [4]. 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 [5 – 7].

1.1.2. Các cấu hình PV phổ biến. Tái cấu trúc PVS để kiểm soát số lượng MPP, giảm tác động của PSC, nâng cao hiệu suất khai thác điện [8]. Kiểu nối tiếp (SC) phải đối mặt với đa cực trị khi xảy ra PSC [9 - 11] trong khi song song (PC) có một cực trị trong mọi điều kiện nhưng dòng lớn gây tổn thất trên các mạch điều khiển [12, 13]. S-PC thường được ứng dụng và nghiên cứu rộng rãi nhưng có chung nhược điểm như SC [9]. Các dạng cải tiến như TCT, BL, HC tăng chi phí, tổn thất trên các liên kết thừa [14 – 16]

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. Do đó, nội dung 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 trong PSC để nâng cao hiệu suất khai thác năng lượng từ hệ PVS.

1.2. Mục tiêu và nhiệm vụ nghiên cứu.

1.2.1. Mục tiêu nghiên cứu: Mục tiêu tổng thể là phát triển giải thuật MPPT cho PVS trong PSC cụ thể bao gồm:

- Nghiên cứu, khảo sát ảnh hưởng của điều kiện làm việc đối với đặc tuyến I-V và P-V trong các PVS khác nhau.
- Nghiên cứu, đề xuất giải thuật GMPPT cho cấu hình PC và SC khi xảy ra PSC.

1.2.2. Nhiệm vụ nghiên cứu.

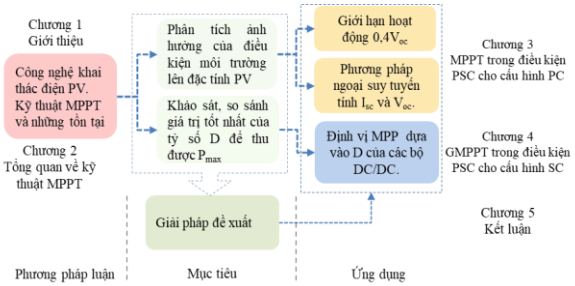
- Nghiên cứu các giải pháp GMPPT, ứng dụng, mô phỏng, phân tích hiệu quả trong các PVS.
- Nghiên cứu ảnh hưởng của PSC lên PVS thông dụng.

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 SC và 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 PVS khi xảy ra PSC.



Hình 1.1 Sơ đồ cấu trúc luận án.

1.5. Điểm mới của luận án.

Đề xuất giải pháp tính giá trị tối ưu của các bộ DC/DC. Xây dựng phương pháp tính I_{sc} và V_{oc} theo D để giảm gián đạon cập điện. Đề xuất giải pháp GMPPT dựa vào mô phỏng đường cong I-V của hệ thống PV trong PSC.

1.6. Giá trị thực tiễn của luận án.

- MPPT cho PC 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 cho SC có phương pháp đơn giản, hiệu quả, dễ thực hiện. Có thể áp dụng cho hệ thống PV liên kết 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.

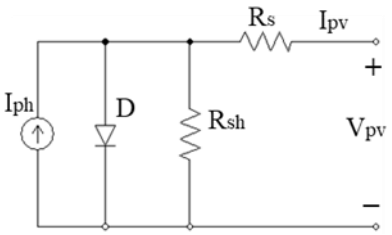
Nội dung của luận án gồm có 5 chương theo sơ đồ cấu trúc như hình 1.1.

CHƯƠNG 2. TỔNG QUAN VỀ KỸ THUẬT MPPT

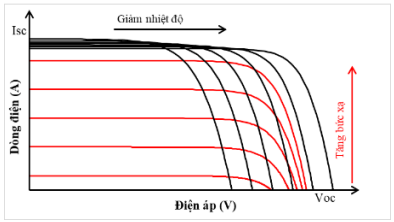
2.1 Ảnh hưởng của điều kiện vận hành lên đặc tính của PV.

2.1.1. Đặc tuyến của tế bào pin quang điện.

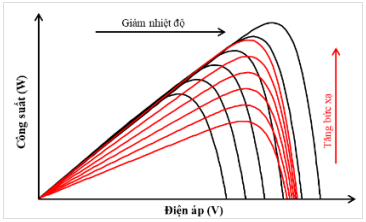
Điều kiện làm việc ảnh hưởng đến hiệu suất của PVS [8], [7]. Để phân biệt GMPP trong nhiều LMPP cần phát triển thuật toán và tái cấu trúc để giảm tác động của PSC. Với mô hình PV trong Hình 2.1 Các đặc tuyến của nó theo môi trường được khảo sát và trình bày trong Hình 2.2. Dòng I_{sc} thay đổi theo bức xạ nhiều hơn V_{oc}. Ngược lại, V_{oc} biến động theo nhiệt độ nhiều hơn [17]



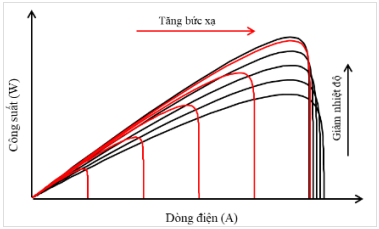
Hình 2.1 Mô hình toán tế bào PV.



a)



b)

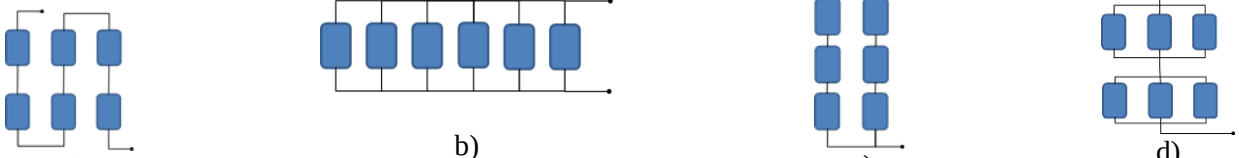


c)

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 [18] với các cấu hình cơ bản như hình 2.3.

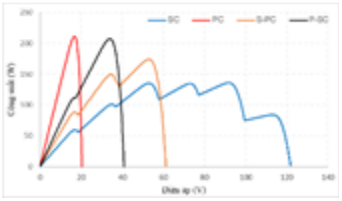


a) b) c) d)

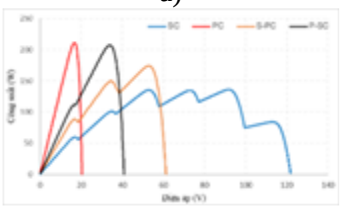
Hình 2.3 Cấu hình PV kiểu: a) SC; b) PC; c) S-PC; và d) P-SC.

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

- PC chỉ có một cực trị và có công suất lớn nhất trong mọi điều kiện vận hành.
- SC có nhiều LMPP nhất.
- P-SC ít cực trị hơn S-PC, nghĩa là tồn tại liên kết SC nhiều hơn sẽ bất lợi hơn trong khả năng giảm tác động của PSC.
- SC có dòng thấp nhất còn PC có điện áp thấp nhất.



a)



b)

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

Khi xảy ra PSC trên PVS 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} của PVS 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 [19 – 26]. 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	[23]/2021	[23]/2021	[25]/2017	[26]/2024

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.

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	[27]/2023	[28]/2021	[30]/2021	[31]/2023	[33]/2022	[39]/2024	[40]/2023

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.

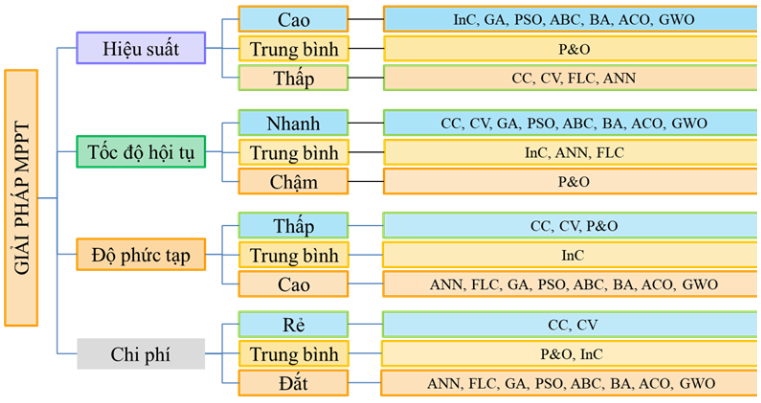
Bảng 2.3. So sánh tiêu chuẩn của một số giải thuật kết hợp.

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	[41]/2024	[42]/2024	[45]/2024	[47]/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. Đề xuất này đã được ứng dụng trong công trình công bố số 1, 2.
2. Áp dụng phương pháp CV kết hợp giải thuật P&O 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 công bố số 1, 2, và 3
3. Mô phỏng đặc tuyến I-V của hệ thống PV kiểu SC khi xảy ra PSC để đề xuất giải thuật xác định GMPP nhằm nâng cao hiệu suất và tốc độ hội tụ. Giải thuật đề xuất cũng được ứng dụng vào bài toán MPPT trong các xuất bản số 4, 5, và 6.



Hình 2.5 Phân loại một số giải pháp MPPT theo các tiêu chí cơ bản [36].

CHƯƠNG 3

MPPT TRONG ĐIỀU KIỆN PSC CHO CẤU HÌNH PC

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 [48], [49], [50], [51]. 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.

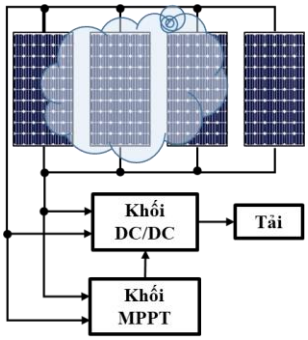
3.1.1. Hệ số FF của một số loại PV điển hình

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^{o}C đến 60^{o}C được khảo sát. Kết quả cho thấy hệ số dòng điện trung bình ki từ 0,91 đến 0,93 còn hệ số điện áp kv từ 0,75 đến 0,8.

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

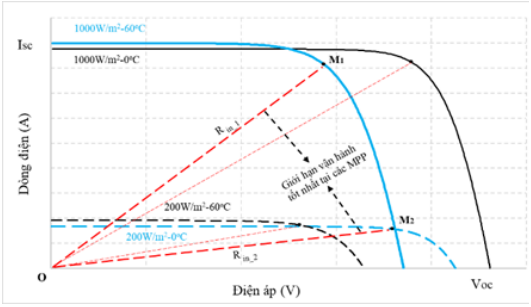
Nội dung nghiên cứu khảo sát ba mạch DC/DC với K là tỷ số giữa điện áp ra và vào, D là chu kỳ nhiệm vụ tốt nhất nên tiệm cận D = 0,5 [52], [53]:

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



Hình 3.1 Cấu hình PC hệ thống PV đề xuất

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 3.6. Trong phạm vi khảo sát đề xuất thì điện trở nội của PV sẽ thay đổi trong khoảng từ thấp nhất R_{in_1} (tại M_1) đến $R_{in\text{-}2}$ (tại M_2) như trong hình 3.3.



Hình 3.2 Giới hạn điện trở trong vùng khảo sát

$$R_L = K_{mp1}^2 R_{in_1} = K_{mp2}^2 R_{in_2} \quad (3.6)$$

Hay

$$\frac{K_{mp1}^2}{K_{mp2}^2} = \frac{k_v V_{oc2}}{k_i I_{sc2}} \frac{k_i I_{sc1}}{k_v V_{oc1}} = \frac{V_{oc2}}{I_{sc2}} \frac{I_{sc1}}{V_{oc1}} \quad (3.8)$$

Trong đó, các giá trị ở điều kiện bất kỳ được xác định theo điều kiện tiêu chuẩn như 3.9 [14]:

$$\begin{cases} V_{oc} = V_{oc_ref} - \alpha_v (T - T_{ref}) \\ I_{sc} = \left(I_{sc_ref} + \alpha_i (T - T_{ref}) \right) W / W_{ref} \end{cases} \quad (3.9)$$

Thay giá trị biểu thức 3.9 vào 3.8 ta được quan hệ giữa hai vị trí MPP như sau:

$$K_{mp1} = 2,46 K_{mp2} \quad (3.12)$$

Với chu kỳ nhiệm vụ tại hai điểm làm việc thỏa mãn 3.13 thì

$$D_{mp1} = 1 - D_{mp2} \quad (3.13)$$

Kết hợp biểu thức 3.13 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 các PV còn lại xác định 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} của hệ thống PV.

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 [54] tại $A(V_A, I_A)$ tại với $V_A = 0,2V_{oc}$. Thay tọa độ hai điểm vào biểu thức 3.8 xác định mối quan hệ gữa A và M_1 cho tất cả các mạch. 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

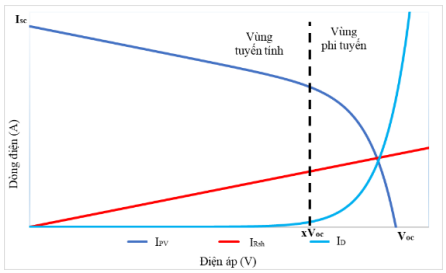
- Đối với Boost và Buck-boost, có thể đo được I_{sc} dựa vào D tại vị trí $0,2V_{oc}$.
- Đối với Buck, không thể thực hiện đo I_{sc} tại vị trí $0,2V_{oc}$. D càng gần 0 hoặc 1 thì càng bất lợi cho bộ DC/DC.

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 3.18 bằng đồ thị hình 3.3 nhận thấy

$$I_{pv} = I_{sc} - I_D - I_{R_{sh}} \quad (3.18)$$

- 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_{Rsh} 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 3.21 lớn nhất.



Hình 3.1 Các vùng làm việc trên đường cong I-V

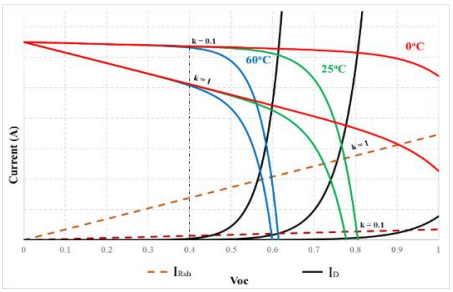
$$f(x) = I_{Rsh} - I_D = \frac{xV_{oc}}{R_{sh}} - I_0\left\{e^{\frac{qxV_{oc}}{nkT_c}} - 1\right\} \quad (3.21)$$

Nghĩa là hàm f(x) đạt cực đại khi

$$x = \frac{1}{c}\ln\left(\frac{a}{bc}\right) \quad (3.22)$$

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

$$x = 0,6\frac{1}{c}\ln\left(\frac{a}{bc}\right) \quad (3.23)$$



Hình 3.2 Khảo sát vùng tuyến tính của PV MSX-60

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

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 3.26 và kiểm tra sai số %:

$$I_{cal} = I_1 - \frac{I_2 - I_1}{V_2 - V_1}V_1 \quad (3.26)$$

Đối với mạch Boost: ΔI% lớn nhất là 2,63%, ΔI% 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 ΔI% 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 [54], 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, 2 và 3.

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 và lưu đồ thể hiện trong hình 3.9.

3.5. Kết quả mô phỏng và đánh giá

Cấu hình PVS bố trí như hình 3.1 và thử nghiệm trên cả ba bộ DC/DC để khảo sát 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 0,4775 so với giá trị hội tụ D_{con} = 0,4475 có sai số khoảng 0,07% (hình 3.10). 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 (hình 3.11) tính được D_{mp} = 0,38 và hội tụ tại D_{con} = 0,41 (lệch 0,07%). 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 cũng có sai số khoảng 0,11%.

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 ΔD_{tb} là 0,18%. Độ lệch công suất là 12,66% với độ chính xác đến lên đến 99,93%.

Mạch Buck, có sai số ΔD_{tb} chỉ 0,075%. Vì vậy mà công suất ước lượng được có độ chính xác lên đến 99,83%.

Bộ Buck-boost có sai số ước lượng D nhỏ hơn 0,12%, 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.

3.5.2. Đánh giá hiệu suất và tốc độ hội tụ

Dữ liệu thu được từ bảng 3.14 cho thấy:

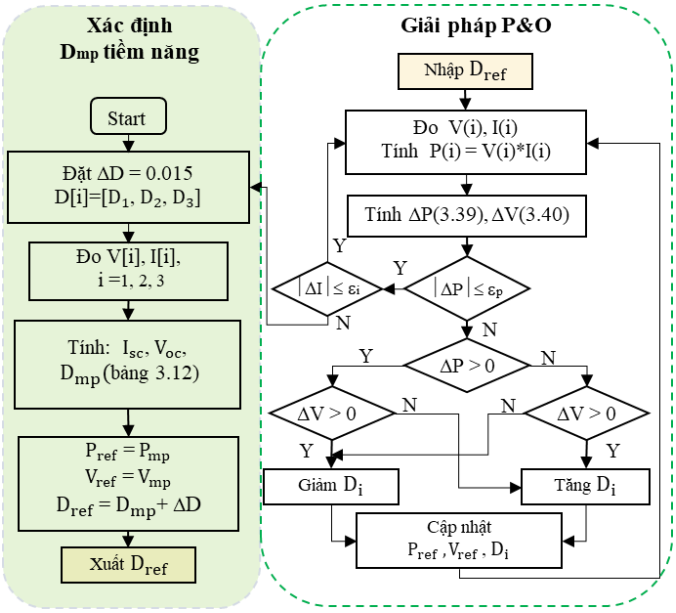
Đối với mạch Boost, tốc độ hội tụ nhanh nhất là 0,015 s. Hiệu suất MPPT trung bình khoảng 99,27%.

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

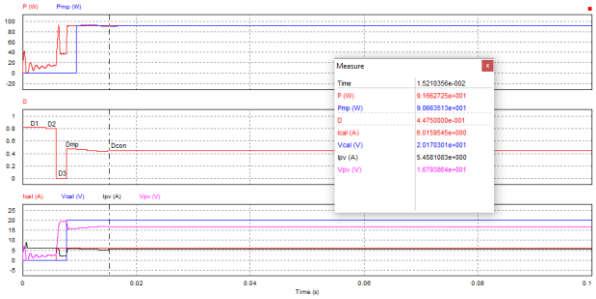
Với mạch Buck-boost tốc độ hội tụ ổn đinh khoảng 0,017 s và hiệu suất trung bình khoảng 99,27%.

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

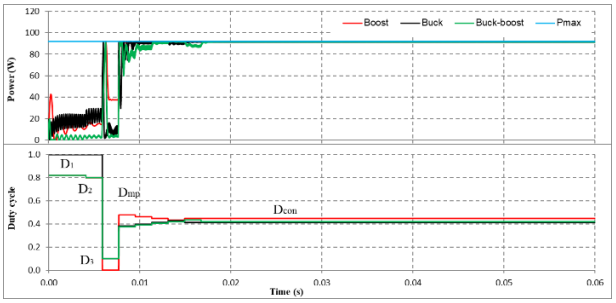
Thông số	Boost	Buck	Buck-boost
D_1	0,82	1	0,82
D_2	0,80	-	0,80
D_3	0	0,1	0,1
I_{sc}	(3.26)	$I_{sc} = I_{D1}$	(3.26)
V_{oc}	V_{D3}	V_{D3}	V_{D3}
D_{mp}	$D_{mp} = 1 - \sqrt{\frac{R_{mp}}{R_L}}$	$D_{mp} = \sqrt{\frac{R_L}{R_{mp}}}$	$D_{mp} = \frac{\sqrt{\frac{R_L}{R_{mp}}}}{1+\sqrt{\frac{R_L}{R_{mp}}}}$



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.

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

Giải thuật	Đề xuất	PSO+InC [40]	PSO+P&O [40]	LBNS [41]	CSA [42]	GWO [42]
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 [42]	PSO [42]	MC-P&O [43]	AFO [31]	COA-FLC [44]	MGWO-ANFIS [30]
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

3.5.3. So sánh hiệu quả với giải pháp truyền thống

Khi so sánh với hai thuật toán P&O và VSSP&, 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 và 73% so với VSSP&O.

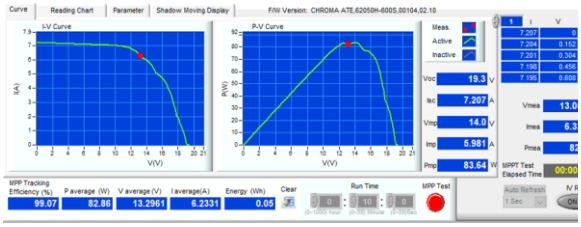
Bộ Buck-boost giảm 75% số bước lặp so với VSSP&O và 82% so với P&O. Thời gian MPPT trung bình của thuật toán đề xuất, P&O và VSSP&O lần lượt là 0,017 s, 0,054 s và 0,026 s.

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

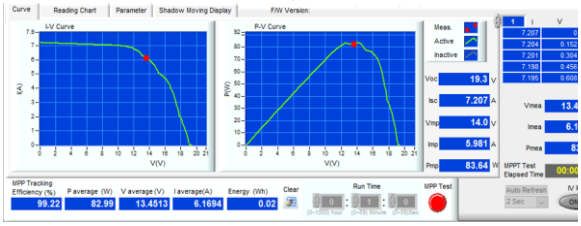
Kịch bản tương tự được thực nghiệm với trình mô phỏng Chroma 62050H-600S.

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%.

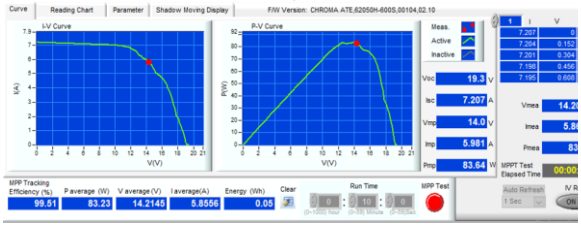
Giá trị D của các bộ DC/DC trong khoảng từ 0,41 đến 0,81. Nó đảm bảo không có chênh lệch quá xa giá trị D = 0,5 để đạt được hiệu suất tốt nhất cho bộ chuyển đổi DC/DC. Giải pháp có tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong các PVS vừa và nhỏ.



a)



b)



c)

Hình 3.3 Kết quả MPPT khi thực nghiệm với a) Boost, b) Buck và c) Buck-boost.

3.6. Kết luận chương 3

Nội dung chương này đã đề xuất và áp dụng giải pháp MPPT của PVS dựa trên thuật toán P&O sửa đổi cho cấu hình PC trong PSC. Giải pháp đề xuất có đáp ứng động cao nhất khoảng 100% với tốc độ 0,015s. MPP tiềm năng được tính chính xác nên hạn chế vùng tìm kiếm, giảm gánh nặng tính toán và từ đó cải thiện hiệu suất. 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%.

Bên cạnh đó, đường đặc tính I-V của một số loại PV điển hình được khảo sát cùng các mạch DC/DC. Trên cơ sở đó đề xuất giải pháp tính I_{sc} và V_{oc} của PVS 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 giải pháp đề xuất đã được ứng dụng và công bố trong các công trình số 1, 2 và 5.

CHƯƠNG 4

GIẢI PHÁP GMPPT TRONG ĐIỀU KIỆN PSC CHO CẤU HÌNH NỐI TIẾP

4.1. Giới thiệu.

Cấu hình PC phù hợp với ứng dụng có điện áp và công suất thấp [59]. 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 SC trong PSC [60], [61].

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 [27], [37], [62], [63] nhưng tính toán phức tạp, giá thành cao, khó thực hiện và tốc độ hội tụ chậm. Trong khi các giải thuật lai trong [21], [18], [64], [65] có thể 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 PSC.

4.2. Phương pháp tiếp cận.

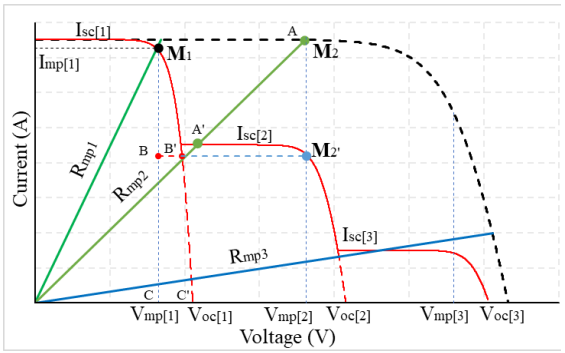
4.2.1. Điện áp hở mạch của hệ thống PV khi xảy ra PSC.

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 [66].

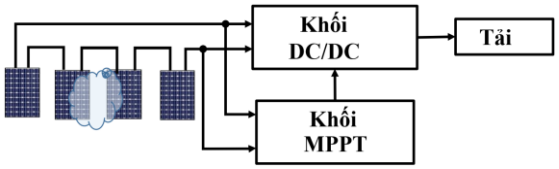
$$V_{oc[i]} = i\frac{V_{oc,sys}}{N};\ i = 1 \text{ đến } N \quad (4.1)$$

Điện áp tại MPP (M_1 trên hình 4.1) tỷ lệ với $V_{oc[i]}$ theo một hệ số k_v như biểu thức 4.2 [67], [68], [69], [70], [71]. Các giải pháp trước đây dựa trên khoảng cách tương đối này để quét toàn bộ đường đặc tuyến I-V. Nghiên cứu này để 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 sử dụng bước điều chỉnh nhỏ để cải thiện hiệu suất MPPT của hệ thống PV.

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



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



Hình 4.2 Cấu trúc PV đề xuất.

4.2.2. Dòng điện ngắn mạch của hệ thống PV trong điều kiện 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 [72]. Vì vậy, tham số cơ bản của PVS có thể được đo trực tiếp theo D mà không cần gián đoạn cập 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

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

Sơ đồ khối của PVS sử dụng mạch Buck-boost như 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.

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

Đặc điểm của SC là dòng $I_{sc,sys}$ cũng là dòng của PV nhận được nhiều năng lượng nhất. Do đó giá trị $I_{sc[1]} = I_{sc,sys}$ 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:

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

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

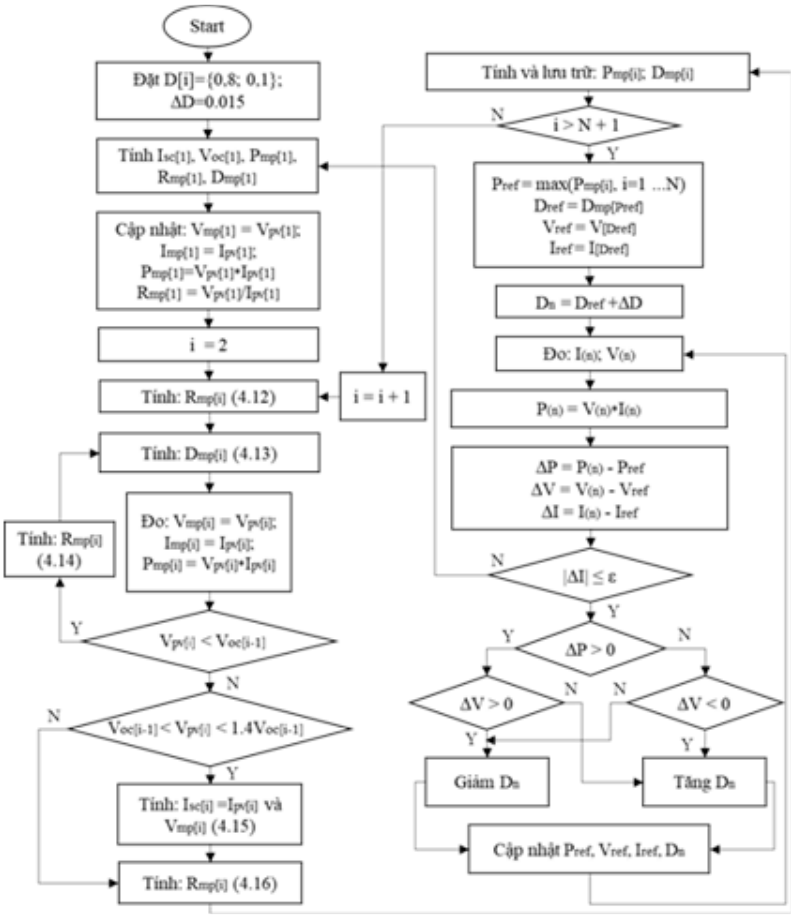
Điện trở nội PV tại vị trí M_1 là

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

Xác định $D_{mp[1]}$ tại M_1 theo phương trình 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.



Hình 4.3 Lưu đồ giải thuật đề xuất

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

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:

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

Vì vậy điện áp tại B' là

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

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:

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

Giá trị $V_{mp[2]}$ chính xác hơn việc cập nhật một khoảng điều $V_{mp[2]} = V_{mp[1]} + k_v V_{oc[1]}$ trong các nghiên cứu trước đó.

Một cách tổng quát, giá trị $V_{mp[i]}$ trong PVS có N tấm PV nối tiếp khi xảy ra PSC theo công thức 4.8 với i = 2 đến N.

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

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 4.8 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 sau:

$$R_{mp[2]} = \frac{V_{mp[2]}}{I_{sc[1]}} \quad (4.9)$$

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 $I_{sc[2]} << I_{sc[1]}$ 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 4.10 đến khi $V_{A'} > V_{oc[1]}$

$$R_{mp[2]} = R_{mp[2]} + \lambda \frac{V_{oc[1]}}{I_{sc[1]}} \quad (4.10)$$

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 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.

b.3. 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 giá trị $R_{mp[2]}$ và cập nhật lại $D_{mp[2]}$

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

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.

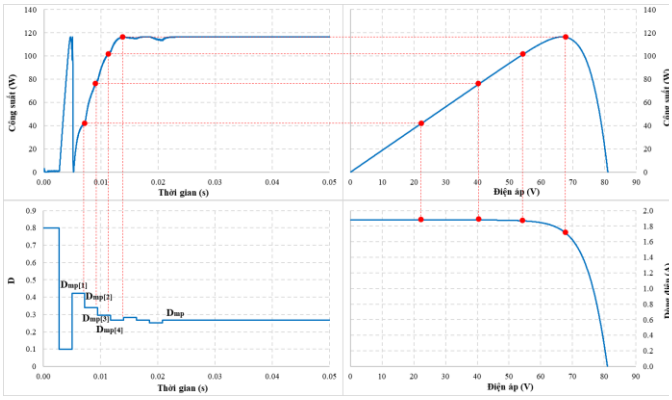
Lưu đồ giải thuật GMPP của hệ thống PVS khi xảy ra PSC trình bày trong hình 4.3

4.3.4. Kết quả và thảo luận

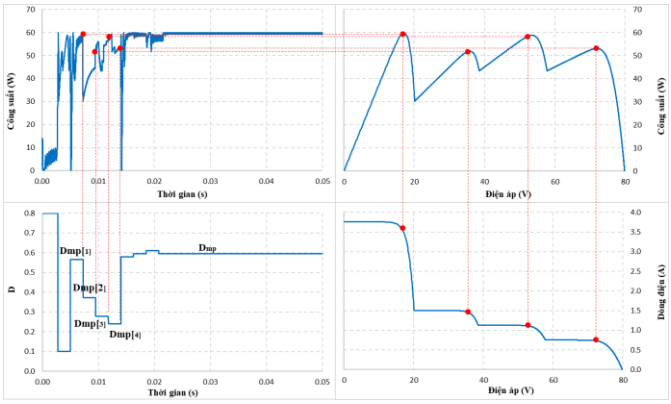
a. Kết quả mô phỏng

Trong PSC hoặc toàn phần, thuật toán đề xuất luôn tìm thấy vùng GMPP trong thời gian dưới 15 ms.

Sau khi tính các giá trị $I_{sc,sys}$ và $V_{oc,sys}$, và $D_{mp[i]}$ trong 11,4 ms (hình 4.5). Thuật toán cần 4 bước điều chỉnh trong khoảng 7 ms để hội tụ tại D_{mp}. Công suất ước tính $P_{mp[4]} = 116,40$ W tại $D_{mp[4]}$ đạt hiệu suất khoảng 99,98%.



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



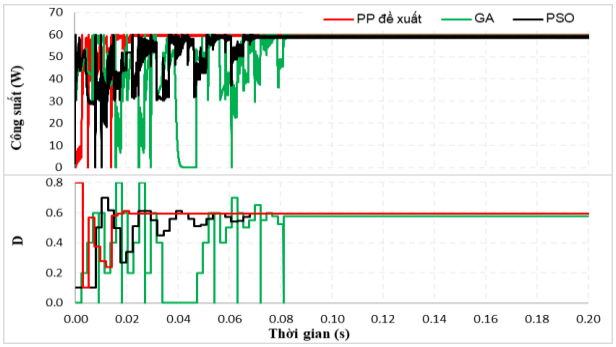
Hình 4.6 Dạng sóng ngõ ra khi mô phỏng trong điều kiện bóng che một phần

Trong điều kiện PSC, giá trị $P_{mp[1]}$ xấp xỉ $P_{mp[3]}$ (hình 4.6), giá trị $D_{mp[i]}$ và $P_{mp[i]}$ được tính trong khoảng 11,7 ms và qua 4 bước điều chỉnh để hội tụ tại $D_{mp} = 0,0595$ chỉ trong 7,1 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%.

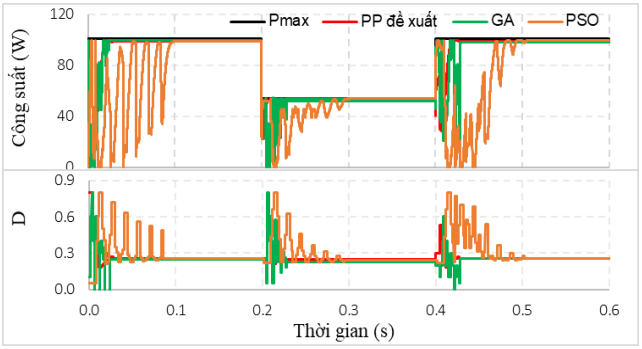
Khi so sánh với các giải thuật khác trong PSC (hình 4.7), giải pháp đề xuất chỉ mất 18,8 ms để ổn định công suất đầu ra và đạt hiệu suất 99,92% So với 99,97% của GA trong 82 ms và 98,58% của PSO trong 70 ms. Hiệu suất trung bình của giải pháp đề xuất là 99,70% so với 98,67% của PSO và GA là 98,09%. Tốc độ hội tụ nhanh, 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 4.9), 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 4.7 So sánh dạng sóng ra của các giải thuật khi xảy ra PSC.



Hình 4.9 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	18,4	75	36
2	77,20	77,07	76,22	70,49	99,83	98,73	91,31	20,5	75	46
3	78,62	78,21	75,58	70,05	99,48	96,13	89,10	21,0	74	58
4	59,88	59,83	59,03	59,86	99,92	98,58	99,97	18,8	70	82
5	94,74	94,11	94,59	92,37	99,34	99,84	97,50	22,9	62	51
6	56,80	56,53	56,54	53,69	99,52	99,54	94,52	21,4	69	66
7	115,03	115,01	114,83	114,64	99,98	99,83	99,66	20,7	57	41
8	64,47	64,20	63,77	63,65	99,58	99,19	99,00	16,1	58	38

b. Kết quả thực nghiệm

Ở điều kiện đồng nhất hiệu suất khoảng 99,95% (hình 4.11a) và giảm nhẹ khi xảy ra PSC (hình 4.11b), xấp xỉ 98,59%, giá trị trung bình khoảng 99,13%.

a) b)

Hình 4.11 Kết quả thực nghiệm khi a) điều kiện đồng nhất, b) PSC

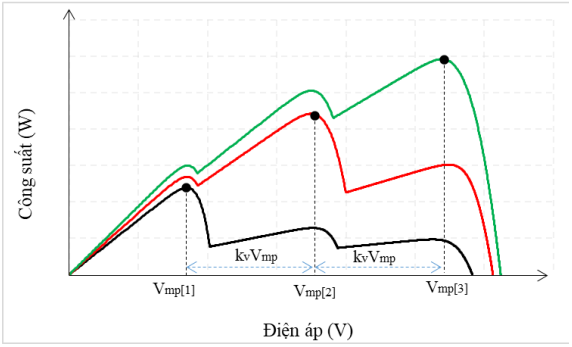
4.3.5. Kết luận

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 này đơn giản, dễ thực hiện và đáng tin cậy hơn trong điều kiện PSC. Nó có tiềm năng ứng dụng trong các PVS hoạt động trong những điều kiện khác nhau.

4.4. Đề xuất giải pháp GMPPT dựa vào vị trí tương đối của các V_{mp}.

4.4.1. Hướng tiếp cận.

Khi xảy ra PSC, đồ thị I-V và P-V xuất hiện nhiều bậc thang và tồn tại nhiều cực trị. Tuy nhiên có thể xem như khoảng cách điện áp giữa các điểm này là đồng đều (hình 4.13). Bài toán này khai thác khả năng tránh bẫy LMPP hiệu quả của thuật toán PSO để gia tăng hiệu suất và tốc hộ hội tụ dựa trên khoảng phân bố đều điện áp. Giải pháp đề xuất dựa vào PSO điều chỉnh để giới hạn phạm vi tìm kiếm nhằm cải thiện hiệu suất và tốc độ MPPT trong PSC.



Hình 4.13 Khoảng các tương đối giữa các MPP khi xảy ra PSC

4.4.2. Phương pháp đề xuất

PSO là thuật toán mô phỏng hành vi và kinh nghiệm của số đông. Do đó, vị trí "x_i" và tốc độ "v_i" sau mỗi lần tìm kiếm bị thay đổi và phụ thuộc vào tốc độ cũng như vị trí trước đó theo biểu thức sau.

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \tag{4.17}$$

Tốc độ của mỗi cá thể bị ảnh hưởng bởi vị trí tốt nhất của nó $P_{best;i}$ và một vị trí tốt nhất của đám đông G_{best} như sau

$$v_i^{k+1} = w_i v_i^k + c_1 r_1 \left(P_{best,i} - x_i^k\right) + c_2 r_2 \left(G_{best} - x_i^k\right) \tag{4.18}$$

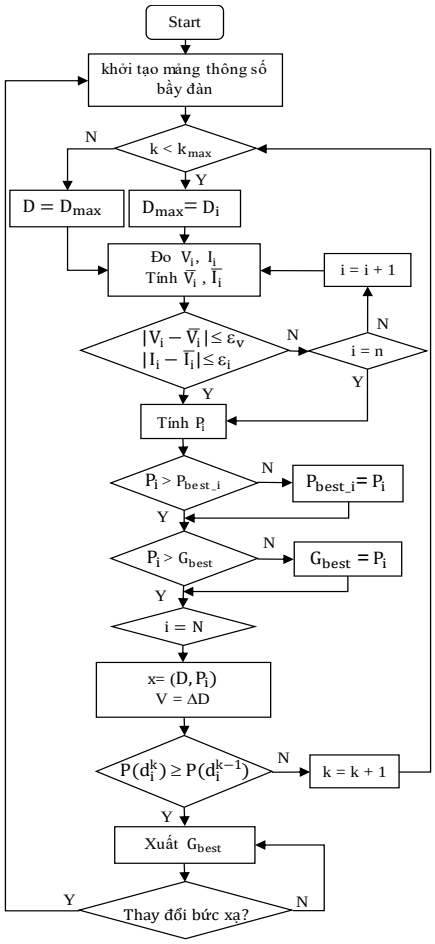
Trong đó: c_1, c_2 là các hằng số gia tốc cá thể và xã hội; r_1, r_2 là giá trị ngẫu nhiên trong khoảng [0,1]; k là số thứ tự của lần lặp thứ k; w_i là trọng số quán tính phụ thuộc vào số lần lặp N_{loop} và số lần lặp cực đại $N_{loop,max}$ theo biểu thức 4.19.

$$w_i = 0{,}9 - 0{,}8\frac{N_{loop} - 1}{N_{loop,max} - 1} \tag{4.19}$$

Để áp dụng PSO vào việc dò tìm GMPPT thì x = D và v = ΔD trong biểu thức 4.18 và D được phân bố đều từ [0,2 đến 0,8]. Lưu đồ giải thuật PSO được trình bày như hình 4.14. Tỷ số D tốt nhất cho cá thể (P_{best}) và toàn cục (G_{best}) dựa vào điều kiện hội tụ của hàm mục tiêu

$$P\left(D_i^k\right) > P\left(D_i^{k-1}\right) \tag{4.20}$$

Khi giảm w, c_1, c_2 có thể làm tăng thời gian xử lý nhưng cùng với việc giới hạn sai số $|\Delta D| \leq 0{,}15$ sẽ đảm bảo không bỏ qua bất cứ điểm cực trị nào. Bên cạnh đó, các cá thể D được phân bố trong khoảng từ [0,2 đến 0,8] để mọi điểm trên đặc tuyến P-V đều được xem xét sẽ tránh bỏ sót LMPP. Dừng lấy mẫu ngay khi dòng điện và điện áp đạt các sai số giới hạn là sự cải tiến bộ lọc giúp tăng tốc độ hội tụ, thể hiện ưu điểm nổi bật so với các giải pháp trước đây.



Hình 4.14 Lưu đồ giải thuật đề xuất

Gải pháp đề xuất được áp dụng cho mô hình SC gồm ba tấm PV loại PHM60W36 thông qua bộ tăng áp.

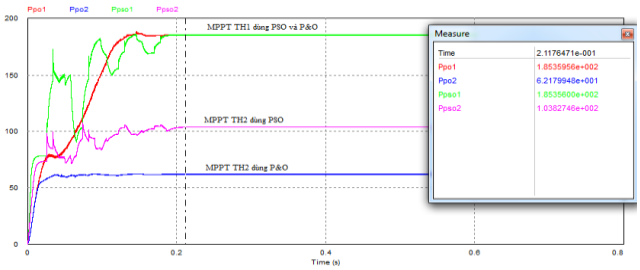
4.4.3. Kết quả và thảo luận

Các kết quả mô phỏng được so sánh với thuật toán P&O trong cùng điều kiện vận hành. Đây là giải thuật truyền thống có ưu điểm: chi phí thấp, đơn giản, ít bảo trì và giám sát, có tốc độ hội thụ khá nhanh.

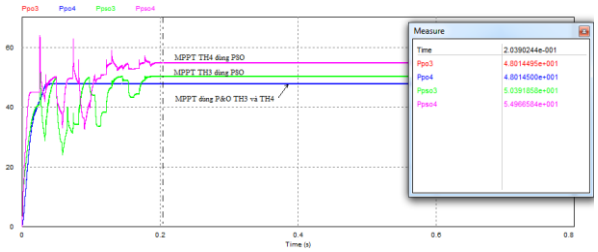
a. Mô phỏng trong môi trường PSIM

Từ kết quả mô phỏng bằng phần mềm về mối quan hệ giữa các đại lượng dòng điện, điện áp và công suất của hệ thống PV khi sử dụng hai giải thuật P&O và PSO để xác định MPPT cho thấy:

- Khi điều kiện vận hành đồng nhất, hiệu suất hai giải thuật tương đương nhau đạt 97,52% (Hình 4.15).
- Khi có PSC, PSO tăng hiệu suất đến 12,45% so với P&O do tránh được bẫy LMPP (hình 4.16).



Hình 4.15 So sánh hiệu suất MPPT trong trường hợp 1 và 2



Hình 4.16 So sánh hiệu suất MPPT trong trường hợp 3 và 4

b. Thực nghiệm với bộ Chroma.

Thực nghiệm trên bộ mô phỏng pin quang điện Chroma 62050H cho thấy

Ở điều kiện tiêu chuẩn cả hai giải thuật P&O và PSO đều tìm được GMPP với công suất ngõ ra là 97,69% và 98,19%. Khi xảy ra PSC, P&O bị bẫy vào LMPP nên hiệu suất giảm 12,39% so với PSO (hình 4.20). Các số liệu từ mô phỏng và thực nghiệm được thống kê và so sánh trong Bảng 4.8.

Những thông số trong Bảng 4.9 cho thấy rằng: hiệu suất và tốc độ của các giải thuật tối ưu phụ thuộc vào kích thước bầy đàn. Tuy nhiên bằng khả năng điều chỉnh w, c_1 và c_2 hợp lý thì giải pháp đề xuất có hiệu suất và tốc độ cao với số lượng quần thể bằng 4 và khả năng đáp ứng động nhanh. Tại những thời điểm 0s, 0,2s và 0,4s các cá thể khởi động với sự điều chỉnh thông số bầy đàn tích cực để chuyển điểm làm việc từ 556W; 1312,306W; và 338W (hình 4.21). Chỉ 0,08 s PVS đã hội tụ tại điểm làm việc mới đạt hiệu suất 99,78%. Cho đến hiện tại đây là giải pháp linh hoạt, hiệu quả, có khả năng đáp ứng động khi điều kiện vận hành thay đổi liên tục và chắc chắn luôn tìm được GMPP.

Bảng 4.8 So sánh hiệu suất MPPT

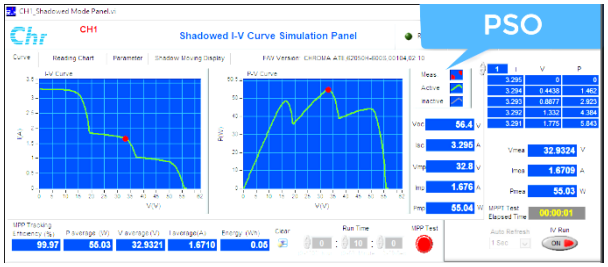
STT	P_{max} (W)	Mô phỏng				P_{max} (W)	Thực nghiệm			
		P&O (W)	Hiệu suất (%)	PSO (W)	Hiệu suất (%)		P&O (W)	Hiệu suất (%)	PSO (W)	Hiệu suất (%)
1	190,07	185,36	97,52	185,35	97,52	182,6	178,4	97,7	179,3	98,19
2	106,51	62,18	58,38	103,83	97,49	108,2	94,49	87,33	107,9	99,72
3	51,05	48,01	94,05	50,39	98,71	48,53	48,43	99,79	48,23	99,38
4	55,79	48,01	86,06	54,96	98,51	55,04	48,23	87,63	55,03	99,98

4.4.4. Kết luận

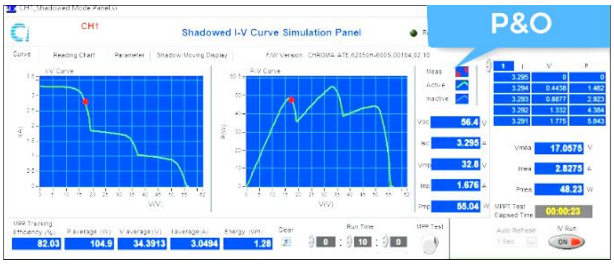
Mô hình thí nghiệm được xây dựng trên nền PSIM và kiểm chứng thực nghiệm bằng Chroma 62050H nhằm nghiên cứu ảnh hưởng của bóng che một phần đến đặc tính làm việc của hệ thống PV và hiệu quả của giải thuật PSO trong việc xác định GMPP khi xảy ra PSC. Với kết quả đạt được nghiên cứu cho thấy.

- Trong điều kiện đồng nhất, có thể xác định MPPT bằng bất cứ giải thuật nào do đặc tuyến PV chỉ có một điểm MPP duy nhất.
- Khi có bóng che, số đỉnh MPP tăng lên khiến cho việc xác định GMPP phức tạp, giải thuật PSO đề xuất thể hiện tính hiệu quả vượt trội khi luôn bám sát GMPPT. Khả năng hoạt động khá ổn định và linh hoạt trong quá trình

mô phỏng cũng như thực nghiệm. Trong khi đó, giải thuật P&O kém ổn định hơn và bị bẫy vào LMPP. Điều này cho thấy PSO có thể đáp ứng tốt trong việc bám sát MPP trong những điều kiện vận hành phức tạp. Kết quả nghiên cứu mở ra những hướng nghiên cứu mới như: cải tiến, ứng dụng PSO vào những cấu hình PV phức tạp hơn để nâng cao hiệu quả của hệ thống; nâng cao tốc độ dò tìm MPP của giải thuật để tránh lãng phí điện năng.

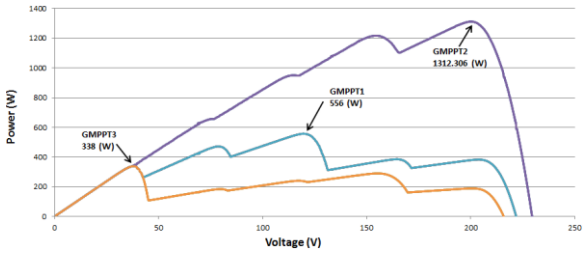


a)

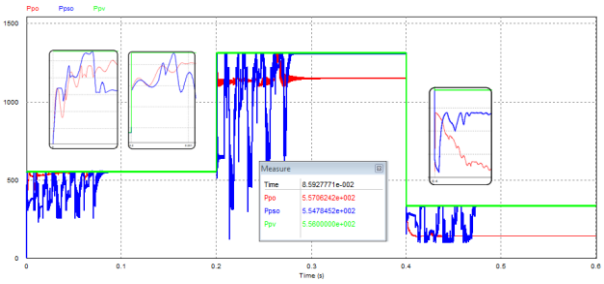


b)

Hình 4.20 kết quả MPPT trong trường hợp số 4



Hình 4.21 Vị trí các MPP khi thay đổi bức xạ



Hình 4.22 So sánh đáp ứng động của PSO với P&O

4.5. Kết Luận Chương 4.

Giải thuật GMPPT cho cấu hình SC bằng cách ước lượng nhanh $I_{sc,sys}$ và $V_{oc,sys}$ từ một vị trí thuận lợi nhất để không gián đoạn cung cấp điện. Thông qua mô phỏng lại đường cong đặc tuyến của hệ thống PV, giải pháp đề xuất đã chứng minh xác suất tìm được GMPP tốt hơn so với các phương pháp khác. Tốc độ hội tụ giảm 70,4% so với PSO và 61,77% so với GA trong khi khả năng GMPP tốt hơn với hiệu suất trung bình tăng 0,98% và 3,32%.

Bảng 4.9. So sánh hiệu suất MPPT với một số công trình [73]

Giải thuật GMPPT	Độ phức tạp	Hiệu suất (%)	Tốc độ hội tụ (s)
Phương pháp đề xuất	-	99,78	0,08
L_PSO	Thấp	99,99	0,35
M_PSO	Trung bình	98,92	1,3
ACO	Thấp	100	1,1
BA	Thấp	99,98	1,3
FFA	Trung bình	99,8	1,3
GWO	Cao	99,92	-
InC-FFA	Trung bình	99,99	0,38

Luận án đề xuất điều chỉnh ba tham số của giải thuật PSO để tăng tốc độ và hiệu suất MPPT cho cấu hình SC bao gồm: thứ nhất là phân bố các cá thể dựa vào vị trí tương đối giữa các V_{mp}. Thứ hai là số gia w_i được tự động điều chỉnh theo khoảng cách tới G_{best}. Cuối cùng là chủ động ngưng lấy mẫu khi đạt giới hạn sai số dòng điện và điện áp. Những kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy giải thuật có thể cải thiện tăng hiệu suất MPPT từ 3,66% đến 12,45% so với thuật toán P&O. Với khả năng tránh bẫy LMPP tốt, tốc độ hội tụ nhanh, hiệu suất trung bình trên 99% thì giải thuật đề xuất có tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống PV hoạt động trong PSC. Giải pháp đề xuất này đã được nghiên cứu, ứng dụng và công bố trong công trình số 3 và công trình liên quan số 4 và 6

CHƯƠNG 5. KẾT LUẬN

5.1. Những kết quả đạt được

Nội dung 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, chi phí thấp, dễ thực thi, có hiệu suất và tốc độ MPPT cao. Trọng tâm của luận án đã giải quyết hai bài toán chính xuất phát từ những giải pháp đề xuất bao gồm:

5.1.1. MPPT cho PVS kiểu PC.

Đề xuất phương pháp xác định I_{sc} và V_{oc} bằng phép ngoại suy để không phải gián đoạn cấp điện. Kết hợp với khảo sát phạm vi làm việc tốt nhất của các bộ DC/DC để định vị MPP nhanh chóng, chính xác. Các kết quả mô phỏng, thực nghiệm được so với hai giải thuật P&O và VSSP&O cho thấy: nó có thể giảm tới 71,39% thời gian tìm kiếm so với P&O và 21,94% so với VSSP&O. Nhờ đó mà hiệu suất cải thiện được lần lượt là 4,46% và 1,65%. Đề xuất đã được ứng dụng trong công trình số [1], [2], và [5].

5.1.2. MPPT cho PVS kiểu SC. Luận án cải tiến giải thuật P&O và PSO cho PVS kiểu SC

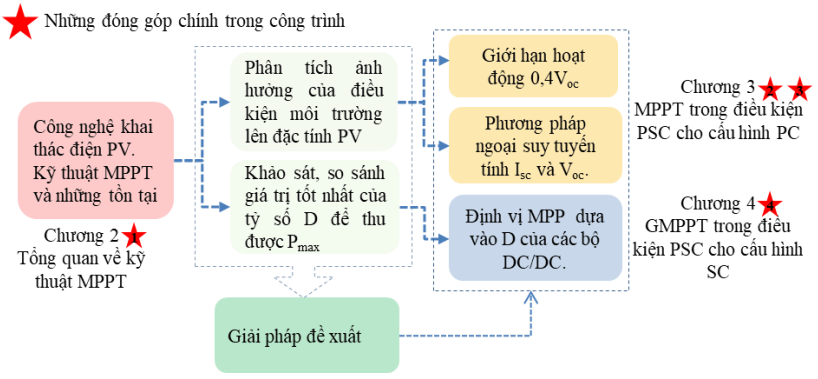
Đối với giải thuật P&O, giải pháp cải tiến 2 vấn đề gồm: Tính $I_{sc,sys}$ và $V_{oc,sys}$ từ những vị trí thuận lợi nhất để tăng độ chính xác so với phương pháp CC hoặc CV. Hai là đề xuất phương pháp tính độ lệch điện áp giữa hai điểm MPP liên tiếp theo điều kiện làm việc. Tốc độ và sự chính xác đã làm giảm 70,4% thời gian tìm kiếm so với PSO và 61,77% so với GA. Qua đó tăng hiệu suất MPPT lên lần lượt là 0,98 và 3,32%.

Cải tiến ba tham số của PSO gồm: Phân bố các cá thể theo vị trí tương đối giữa các V_{mp}, thiết lập hệ số gia tốc tự động điều chỉnh theo vị trí hiện tại, và chủ động ngừng lấy mẫu nếu tín hiệu đạt giới hạn chính xác. Với những điều chỉnh này, giải pháp đề xuất đã tăng hiệu suất tối đa 12,39% so với thuật toán P&O trong những điều kiện làm việc giống nhau. Ưu điểm nổi bật của giải thuật là khả năng tránh bẫy LMPP tốt, tốc độ tìm kiếm nhanh, hiệu suất ổn định trên 99%.

Các đề xuất trong nội dung nghiên cứu này đã được ứng dụng và công bố trong công trình số [3], [4] , và [6].

5.2. Những đóng góp chính của luận án.

Những đóng góp chính của luận án này dựa trên hai vấn đề trọng tâm là MPPT cho hai liên kết PV kiểu PC và SC khi xảy ra PSC được tổng hợp trong sơ đồ Hình 5.1. Trên cơ sở đó, những đóng góp cụ thể từ phương pháp luận đến giải pháp, ứng dụng được thực hiện như sau:



Hình 5.1. Những đóng góp chính của luận án

5.2.1. Phân tích, so sánh, phân nhóm một số kỹ thuật MPPT và cấu hình PV thông dụng (chương 2 – phương pháp luận)

Phân tích ưu điểm, nhược điểm của các kỹ thuật MPPT về thay đổi cấu trúc PV và phát triển giải thuật MPPT dựa trên những công trình xuất bản mới nhất để tìm ra xu thế phát triển, những rào cản về công nghệ để từ đó đề xuất những giải pháp

khắc phục. Kết quả có thể dùng làm tham khảo cho những nghiên cứu sâu hơn về kỹ thuật khai thác điện từ PVS.

5.2.2. Phân tích, so sánh và đề xuất giới hạn hoạt động tốt nhất của các bộ chuyển đổi Boost, Buck, và Buck-boost (chương 3 – phương pháp luận)

Thông qua khảo sát, phân tích, và so sánh, phạm vi hoạt động tốt nhất của D cho các bộ DC/DC đã được đề xuất để thu được năng lượng tốt nhất. Những kết quả đạt được là cơ sở đề xuất tính I_{sc} và V_{oc} theo D mà không gián đoạn cấp điện. Giá trị tốt nhất của D trong vùng tiệm cận giới hạn 0,5 được xây dựng và ứng dụng trong các nghiên cứu liên quan tới công bố số 1 và 2

5.2.3. Đề xuất giải thuật MPPT cho cấu hình PC trong điều kiện PSC (chương 3 – giải pháp đề xuất, ứng dụng)

Cơ sở đề xuất giải pháp xác định tham số PV bằng ngoại suy tuyến tính được hình thành trên kết quả khảo sát, tính toán đối với ba nhóm PV là Monocrystalline, Polycrystalline, và Thin-film. Giới hạn điện áp nhỏ hơn $0,4V_{oc}$ được đề xuất để xác định vùng tuyến tính, nơi có thể tính chính xác giá trị I_{sc} với sai số dưới 1%. Bên cạnh đó, việc tính toán V_{oc} gặp khó khăn hơn do nó thuộc vùng phi tuyến. Nhưng giải pháp cũng có thể ước lượng chính xác đến hơn 90%.

Kết hợp với phạm vi hoạt động tốt nhất của D đã phân tích trong phương pháp luận, giải pháp đề xất MPPT cho cấu hình PC đã đạt được những kết quả vượt trội so với những công trình nghiên cứu gần đây. Cụ thể số bước lặp đã giảm 76,6% so với P&O và 69,01% so với VSSP&O. Vì vậy mà thời gian tìm kiếm cũng lần lượt giảm 71,39% và 21,94% so với hai thuật toán kể trên. Giải thuật đề xuất được nghiên cứu, ứng dụng và công bố trong các công trình số 1, 2 và công trình liên quan số 5

5.2.4. Đề xuất giải pháp định vị GMPP cho cấu hình SC trong điều kiện PSC (chương 4 – giải pháp đề xuất, ứng dụng)

Cuối cùng, dựa trên phương pháp luận và những đề xuất tính toán tham số PV theo D, giải thuật xác định GMPP cho một chuỗi các PV trong điều kiện PSC được triển khai ứng dụng. Giải thuật hoạt động qua hai giai đoạn cơ bản là: giới hạn vùng chứa các LMPP (giai đoạn 1) và xác định chính xác vị trí, giá trị của GMPP trong số các LMPP (giai đoạn 2). Dựa trên khả năng mô phỏng đặc tuyến của hệ thống PV khi xảy ra PSC, giải pháp nhanh chóng xác định các LMPP để chọn ra vùng GMPP tiềm năng. Các kết quả mô phỏng hoạt động của giải thuật cho thấy giải pháp có tốc độ hội tụ và hiệu suất MPPT cao hơn so với những giải thuật được đề xuất gần đây. Tốc độ hội tụ giảm 70,4% so với PSO và 61,77% so với GA trong khi hiệu suất sinh điện của hệ thống PV được cải thiện tăng 3,45%. Ngoài ra, với khả năng đáp ứng động linh hoạt khi điều kiện vận hành thay đổi liên tục, giải pháp để xuất hứa hẹn sẽ có tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực sử dụng nguồn điện mặt trời. Giải pháp đề xuất được nghiên cứu, ứng dụng và công bố trong công trình số 3 và các công trình liên quan số 4 và 6:

5.3. 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 hệ thống PV. 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 của nhiệt độ làm việc bề mặt.
- Đề xuất các cấu hình high-step-up, nâng cao chất lượng ổn định động quanh điểm MPP của hệ thống PV 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] S. Hanzaei, S. Gorji und M. Ektesabi, „A Scheme-Based Review of MPPT Techniques With Respect to Input Variables Including Solar Irradiance and PV Arrays' Temperature," *IEEE Access,* Bd. 8, p. 182229, 2020.

[4] M. Katche, 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.

[5] R. Bollipo, S. Mikkili und P. Bonthagorla, „Critical Review on PV MPPT Techniques: Classical, Intelligent and Optimisation," *IET Renewable Power Generation,* Bd. 14, Nr. 9, pp. 1433-1452, 2020.

[6] R. B. Bollipo, S. Mikkili und P. K. Bonthagorla, „Hybrid, Optimal, Intelligent and Classical PV MPPT Techniques: A Review," *CSEE Journal of Power and Energy Systems,* Bd. 7, Nr. 1, pp. 9-33, 2021.

[7] M. Kumar, K. Panda, J. Rosas-Caro, A. Valderrabano-Gonzalez und G. Panda, „Comprehensive review of conventional and emerging maximum power point tracking algorithms for uniformly and partially shaded solar photovoltaic systems," *IEEE Access,* Bd. 11, pp. 31778-31812, 2023.

[8] C. Chandrakant und S. Mikkili, „A Typical Review on Static Reconfiguration Strategies in Photovoltaic Array Under Non-uniform Shading Conditions," *CSEE Journal of Power and Energy Systems,* Bd. 9, Nr. 6, pp. 2018-2039, 2023.

[9] 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.

[10] 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.

[11] K. S. Parlak, „PV array reconfiguration method under partial shading conditions," *Electrical Power and Energy Systems,* Bd. 63, p. 713–721, 2014.

[12] T. M. G. Sai Krishna, „Reconfiguration strategies for reducing partial shading effects in photovoltaic arrays: State of the art," *Solar Energy,* Bd. 182, pp. 429-452, 2019.

[13] 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.

[14] 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.

[15] N. Kadhim, A. Obed, A. Abid, H. Kotb und A. Emara, „Optimal PV Reconfiguration Under Partial Shading Based on White Shark Optimization," *IEEE Access,* Bd. 12, pp. 27385 - 27398, 2024.

[16] V. Madhusudhan und D. Kumar, „Maximum Power Extraction from an Optimal PV Array Configuration under various Partial Shading Conditions using MPPT," *Journal of University of Shanghai for Science and Technology,* Bd. 26, Nr. 2, pp. 18-25, 2024.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 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.

[21] A. Baatiah, A. Eltamaly und M. Alotaibi, „Improving Photovoltaic MPPT Performance through PSO Dynamic Swarm Size Reduction," *Energies,* Bd. 16, p. 6433, 2023.

[22] 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.

[23] L. S. J. C. H. D. RK Phanden, „A novel modified ant colony optimization based maximum power point tracking controller for photovoltaic systems," *Materials Today: Proceedings,* Bd. 38, Nr. 1, pp. 89-93, 2021.

[24] 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.

[25] M. Alshareef, „A New Particle Swarm Optimization with Bat Algorithm Parameter-Based MPPT for Photovoltaic Systems under Partial Shading Conditions," *Studies in Informatics and Control,* Bd. 31, Nr. 4, pp. 53-66, 2022.

[26] H. Gundogdu, A. Demirci, S. Tercan und U. Cali, „A Novel Improved Grey Wolf Algorithm Based Global Maximum Power Point Tracker Method Considering Partial Shading," *IEEE Access,* Bd. 12, pp. 6148 - 6159, 2024.

[27] 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.

[28] 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.

[29] 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.

[30] 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.

[31] 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.

[32] A. Baba, G. Liu und X. Chen, „Classification and Evaluation Review of Maximum Power Point Tracking Methods," *Sustainable Futures,* Bd. 2, p. 100020, 2020.

[33] H. A. J. B. M. G. RK Pachauri, „Adaptive switch matrix for PV module connections to avoid permanent cross-tied link in PV array system under non-uniform irradiations," *IEEE Access,* Bd. 9, pp. 45978-45992, 2021.

[34] C. L. F Belhachat, „A review of global maximum power point tracking techniques of photovoltaic system under partial shading conditions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* Bd. 92, pp. 513-553, 2018.

[35] A. J. A. T. A. I. MA Husain, „Fast and precise global maximum power point tracking techniques for photovoltaic system," *IET Renewable Power Generation,* Bd. 13, Nr. 14, pp. 2569-2579, 2019.

[36] 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.

[37] S. K. Mishra, K. K. Nayak, M. S. Rana und V. Dharmarajan, „Switched-Boost Action Based Multiport Converter," *IEEE Transactions on Industry Applications,* Bd. 55, Nr. 1, pp. 964 - 975, 2019.

[38] F. W. F Yi, „Review of voltage-bucking/boosting techniques, topologies, and applications," *Energies,* Bd. 16, Nr. 2, p. 842, 2023.

[39] 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.

[40] 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.

[41] C. A. Y. M. I Pervez, „A Reduced Search Space Exploration Metaheuristic Algorithm for MPPT," *IEEE Access,* Bd. 10, pp. 26090 - 26100, 2022.

[42] 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.

[43] R. Morales, J. Rohten, M. Garbarino, J. Muñoz, J. Silva, E. Pulido, J. Espinoza und M. Andreu, „A Novel Glob-al MPPT Method Based on Measurement Cells," *IEEE Access ,* Bd. 10, pp. 97481-97494, 2022.

[44] S. Zand, S. Mobayen, H. Gul, H. Molashahi, M. Nasiri und A. Fekih, „Optimized Fuzzy Controller Based on Cuckoo Opti-mization Algorithm for Maximum Power-Point Tracking of Photovoltaic Systems.," *IEEE Access,* Bd. 10, pp. 71699-71716, 2022.

[45] 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.

[46] R. K. P. Y. K. C. S. C. R. S. A. S. Yadav, „Performance enhancement of partially shaded pv array using novel shade," *Solar Energy,* Bd. 144, p. 780–797, 2017.

[47] 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.

[48] A. K. M. E. Y. E. A. K. M. E. A Refaat, „A novel metaheuristic MPPT technique based on enhanced autonomous group Particle Swarm Optimization Algorithm to track the GMPP under partial shading conditions - Experimental validation," *Energy Conversion and Management,* Bd. 287, p. 117124, 2023.

[49] 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.

[50] S. M. K. T. I Shams, „Improved social ski driver-based MPPT for partial shading conditions hybridized with constant voltage method for fast response to load variations," *IEEE Transactions on Sustainable Energy,* Bd. 12, Nr. 4, pp. 2255 - 2267, 2021.

[51] 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.

[52] 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.

[53] S. M. KS Tey, „Modified incremental conductance algorithm for photovoltaic system under partial shading conditions and load variation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* Bd. 61, Nr. 10, pp. 5384 - 5392, 2014.

[54] Y. L. X. R. Y Wang, „High-accuracy and fast-speed MPPT methods for PV string under partially shaded conditions," *IEEE Transactions on Industrial Electronics,,* Bd. 63, Nr. 1, pp. 235 - 245, 2015.

[55] 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.

[56] A. J. A. T. A. I. MA Husain, „Fast and precise global maximum power point tracking techniques for photovoltaic system," *IET Renewable Power Generation,* Bd. 13, Nr. 14, pp. 2569-2579, 2019.

[57] 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.

[58] 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.

[59] C. L. Faiza Belhachat, „A review of global maximum power point tracking techniques of photovoltaic system under partial shading conditions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* Bd. 92, pp. 513-553, 2018.

[60] I. Al-Wesabi, Z. Fang, H. Farh, A. Al-Shamma'a und A. Al-Shaalan, „Comprehensive comparisons of improved incremental conductance with the state-of-the-art MPPT Techniques for extracting global peak and regulating dc-link voltage," *Energy Reports,* Bd. 11, p. 1590–1610, 2024.

[61] M. Hussain, A. Sarwar, M. Tariq, S. Urooj, A. BaQais und M. Hossain, „An Evaluation of ANN Algorithm Performance for MPPT Energy Harvesting in Solar PV Systems," *Sustainability,* Bd. 15, p. 11144, 2023.

[62] 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.

[63] S. Naoussi, K. Saatong, R. Molu, W. Mbasso, M. Bajaj, M. Louzazni, M. Berhanu und S. Kamel, „Enhancing MPPT performance for partially shaded photovoltaic arrays through backstepping control with Genetic Algorithm-optimized gains," *Scientific Reports,* Bd. 14, p. 3334, 2024.

[64] V. Prashanth, S. Rafikiran, C. H. Basha, J. Kumar, C. Dhanamjayulu, H. Kotb und A. ELrashidi, „Implementation of high step-up power converter for fuel cell application with hybrid MPPT controller," *Scientific Reports,* Bd. 14, p. 3342, 2024.

[65] 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.

[66] J. Dadkhah und M. Niroomand, „Optimization Methods of MPPT Parameters for PV Systems: Review, Classification, and Comparison," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,* Bd. 9, Nr. 2, pp. 225 - 236, 2021.

[67] 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.

[68] S. Babaa, M. Armstrong und V. Pickert, „Overview of maximum power point tracking control methods for PV systems," *Journal of Power and Energy Engineering,* Bd. 2, Nr. 8, p. 49283, 2014.

[69] Z. F. H. F. A. A.-S. A. A.-S. I Al-Wesabi, „Comprehensive comparisons of improved incremental conductance with the state-of-the-art MPPT Techniques for extracting global peak and regulating dc-link voltage," *Energy Reports,* Bd. 11, pp. 1590-1610, 2024.

[70] 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.

[71] M. A.-S. A. A. H. F. AM Eltamaly, „Photovoltaic maximum power point tracking under dynamic partial shading changes by novel adaptive particle swarm optimization strategy," *Transactions of the Institute of Measurement and Control,* Bd. 42, Nr. 1, pp. 104-115, 2020.

[72] M. A.-S. A. A. AM Eltamaly, A novel scanning bat algorithm strategy for maximum power point tracker of partially shaded photovoltaic energy systems," *Ain Shams Engineering Journal,* Bd. 11, Nr. 4, pp. 1093-1103, 2020.

[73] 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.

[74] L. C. M. M. L. Z. Q. Z. K Guo, „An improved gray wolf optimizer MPPT algorithm for PV system with BFBIC converter under partial shading," *IEEE Access,* Bd. 8, pp. 103476 - 103490, 2020.

[75] N. S. M. P. S. S. S. M. I. R Ragul, „PV Based Standalone DC-Micro Grid System for EV Charging Station with New GWO-ANFIS MPPTs under Partial Shading Conditions," *International Transactions on Electrical Energy Systems,* p. 2073742, 2023.

[76] K. K. S. R. R Sreedhar, Design, implementation and empirical analysis of a cascaded hybrid MPPT controller for grid tied solar photovoltaic systems under partial shaded conditions," *Measurement: Sensors,* Bd. 31, p. 100961, 2024.