

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**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ  
NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỆN

Tp. Hồ Chí Minh, tháng 12/2024

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**  
NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỆN - 9520201

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS. TS. TRƯƠNG 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

Tp. Hồ Chí Minh, tháng 12/2024

# QUYẾT ĐỊNH GIAO ĐỀ TÀI

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

Số: 2402/QĐ-ĐHSPKT

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM  
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

Tp. Hồ Chí Minh, ngày 01 tháng 11 năm 2019

## QUYẾT ĐỊNH

V.v giao đề tài luận án và người hướng dẫn NCS khóa 2019 - 2022

HIỆU TRƯỞNG TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP. HỒ CHÍ MINH

Căn cứ Quyết định số 426/TTg ngày 27 tháng 10 năm 1976 của Thủ tướng Chính phủ về một số vấn đề cấp bách trong mạng lưới các trường đại học và Quyết định số 118/2000/QĐ-TTg ngày 10 tháng 10 năm 2000 của Thủ tướng Chính phủ về việc tổ chức lại Đại học Quốc gia Thành Phố Hồ Chí Minh, tách trường đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM trực thuộc Bộ Giáo dục và Đào tạo;

Căn cứ Quyết định số 937/QĐ-TTg ngày 30 tháng 6 năm 2017 về việc phê duyệt đề án thí điểm đổi mới cơ chế hoạt động của trường đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM;

Căn cứ Quyết định số 2727/QĐ-ĐHSPKT ngày 24 tháng 12 năm 2018 của Hiệu Trưởng Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP Hồ Chí Minh về việc ban hành Quy chế tổ chức và hoạt động của trường đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM;

Căn cứ Thông tư số 08/2017/TT-BGDĐT ngày 04 tháng 4 năm 2017 của Bộ Giáo dục và Đào tạo về việc Ban hành Quy chế tuyển sinh và đào tạo trình độ tiến sĩ;

Xét nhu cầu công tác và khả năng cán bộ;

Xét đề nghị của Trưởng khoa/Viện quản ngành và Trưởng phòng Đào tạo,

### QUYẾT ĐỊNH:

**Điều 1.** Giao đề tài luận án tiến sĩ và người hướng dẫn cho:

Nghiên cứu sinh : *Bùi Văn Hiền*

Ngành : *Kỹ thuật điện*

Khoá: 2019 - 2022

Tên luận án : *Nâng cao hiệu suất hệ thống pin quang điện*

Người HD thứ nhất (HD chính): *PGS.TS. Trương Việt Anh*

Người HD thứ hai : *TS. Nguyễn Vũ Lâm*

Thời gian thực hiện : *01/10/2019 đến 01/10/2022*

**Điều 2.** Giao cho Phòng Đào tạo quản lý, thực hiện theo đúng Quy chế đào tạo trình độ tiến sĩ của Bộ Giáo dục & Đào tạo đã ban hành.

**Điều 3.** Trưởng các đơn vị, phòng Đào tạo, các Khoa/Viện quản ngành tiến sĩ và các Ông (Bà) có tên tại Điều 1 chịu trách nhiệm thi hành quyết định này.

Quyết định có hiệu lực kể từ ngày ký./.

#### Nơi nhận :

- BGH (để biết);
- Như điều 2, 3;
- Lưu: VT, SDH (4b).



# LÝ LỊCH KHOA HỌC SƠ LƯỢC

## I. LÝ LỊCH SƠ LƯỢC

Họ & tên: Bùi Văn Hiền

Giới tính: Nam

Ngày, tháng, năm sinh: 10/04/1980

Nơi sinh: Thái Bình

Quê quán: Thái Bình

Dân tộc: Kinh

Địa chỉ liên lạc: 75/8/2 đường 48, phường Hiệp Bình Chánh, Tp Thủ Đức, Tp. HCM

Điện thoại: 0961086011

E-mail: hienbv.ncs@hcmute.edu.vn

## II. QUÁ TRÌNH ĐÀO TẠO

### 1. Đại học

Hệ đào tạo: Chính quy; Thời gian đào tạo từ: 2001-2005

Nơi học: Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM

Ngành học: Điện khí hóa & Cung cấp điện

Tên đề án: Biên Soạn Giáo Trình Hướng Dẫn Thực Tập Điện Năng Cao Phần Cung Cấp Điện

Ngày & nơi bảo vệ đề án: Năm 2005 - Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM

### 2. Cao học

Hệ đào tạo: Chính quy; Thời gian đào tạo từ: 2007-2009

Nơi học: Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM

Ngành học: Thiết bị mạng & Nhà máy điện

Tên đề án: Xác Định Vị Trí Tối Ưu Của TCSC Trên Lưới Điện Truyền Tải

Ngày & nơi bảo vệ luận văn: Năm 2009 - Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM

### III. QUÁ TRÌNH CÔNG TÁC CHUYÊN MÔN KỂ TỪ KHI TỐT NGHIỆP ĐẠI HỌC

<b>Thời gian</b>	<b>Nơi công tác</b>	<b>Công việc đảm nhiệm</b>
2005 - 2010	Trường Cao Đẳng Giao thông Vận tải Thành Phố Hồ Chí Minh	1. Kỹ sư điện – Trung tâm sát hạch lái xe 2. Giảng viên khoa Điện, điện tử
2010 - 2022	Trường Đại học Công nghiệp Thực phẩm Thành Phố Hồ Chí Minh	Giảng viên
06/2022 – nay	Trường Đại Học Văn Lang	Giảng viên

# LỜI CAM ĐOAN

Tôi cam đoan đây là công trình nghiên cứu của tôi.

Các số liệu, kết quả nêu trong luận án là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

*Tp. Hồ Chí Minh, ngày .. tháng ... năm 2024*

*(Ký tên và ghi rõ họ tên)*

Bùi Văn Hiền

# LỜI CẢM ƠN

Trước hết, em xin được bày tỏ lòng biết ơn chân thành và sâu sắc nhất gửi đến thầy PGS. TS. Trương Việt Anh, thầy TS. Nguyễn Vũ Lân đã tận tình hướng dẫn em trong suốt quá trình nghiên cứu để hoàn thành nội dung luận án này.

Xin cảm ơn quý Thầy, Cô khoa Điện – Điện tử của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM, những giảng viên đầy nhiệt huyết, thiện cảm đã truyền đạt những kiến thức chuyên môn, những kinh nghiệm quý báu, đã giảng dạy và hướng dẫn em trong suốt quá trình học tập và nghiên cứu.

Và cuối cùng, tôi xin cảm ơn đến tất cả các đồng nghiệp, bạn bè và đặc biệt là gia đình đã giúp đỡ tôi về tinh thần, vật chất và công sức trong quá trình học tập cũng như để hoàn thành luận án.

Xin trân trọng cảm ơn!

*Tp. Hồ Chí Minh, ngày ... tháng ... năm 2024*

*NCS thực hiện*

Bùi Văn Hiền

# TÓM TẮT

Luận án nghiên cứu giải pháp nâng cao hiệu suất khai thác năng lượng từ hệ thống pin quang điện (PVS). Liên quan đến mục tiêu tổng thể, nội dung luận án đề xuất các giải pháp bám điểm phát công suất cực đại toàn cục (GMPPT) cho hai cấu hình cơ bản là nối tiếp (SC) hoặc nối tiếp – song song (S-PC) và song song (PC) hoạt động trong điều kiện môi trường khác nhau đặc biệt là bóng che một phần (PSC).

Đối với giải pháp MPPT cho kiểu PC, luận án cải tiến giải thuật P&O hướng tới nâng cao hiệu suất và tốc độ hội tụ để gia tăng hiệu quả khai thác năng lượng từ PVS. Để có cơ sở hình thành và đề xuất giải pháp, tác giả đã khảo sát, phân tích ưu điểm, nhược điểm của ba nhóm giải thuật để tìm ra xu hướng và những rào cản công nghệ hiện tại. Bên cạnh đó, ba bộ DC/DC gồm Boost, Buck, và Buck-boost được khảo sát giới hạn hoạt động tốt nhất nhằm đề xuất vị trí tính dòng ngắn mạch ( $I_{sc}$ ) và điện áp hở mạch ( $V_{oc}$ ) của PVS mà không phải gián đoạn cấp điện. Ảnh hưởng của điều kiện làm việc lên đặc tuyến của PVS cũng được khảo sát trên ba nhóm pin quang điện (PV) là Monocrystalline, Polycrystalline, và Thin-film nhằm tìm ra vị trí tốt nhất ( $0,4V_{oc}$ ) để tính toán  $I_{sc}$  và  $V_{oc}$ . Từ những kết quả đạt được, phương pháp ngoại suy tuyến tính được đề xuất để cải tiến giá trị khởi động cho thuật toán P&O truyền thống. Nhờ khả năng ước lượng chính xác vị trí MPP từ hai tham số này, giải thuật đề xuất đã cải thiện giảm hơn 70% số lần lặp so với phiên bản chưa điều chỉnh để tăng tốc độ hội tụ lên gần 80%. Giải pháp đề xuất được ứng dụng cho cấu hình PC gồm bốn tấm PV loại MSX-60 hoạt động trong PSC kết hợp với ba bộ DC/DC đã chứng minh hiệu quả tin cậy trong mọi điều kiện vận hành khảo sát. Những cải tiến, đề xuất đã được nghiên cứu và công bố trong các công trình số {1}, {2} và {5}.

Đối với giải pháp GMPPT cho kiểu SC hoặc S-PC, luận án tiếp tục phát triển từ đề xuất trước đó đối với liên kết PC nhằm tránh bẫy LMPP khi xảy ra PSC. Giải thuật được chia thành hai giai đoạn gồm: định vị trí MPP tiềm năng dựa vào mô phỏng lại đặc tuyến của PVS và kiểm tra vị trí tối ưu khi đã giới hạn được vùng hoạt động



của GMPP. Hai giá trị  $I_{sc}$  và  $V_{oc}$  của PVS trong bài toán này được đo trực tiếp từ một vị trí thuận lợi nhất nhằm đảm bảo sai số thấp nhất khi ước lượng các giá trị tại MPP. Thông qua mô phỏng lại đường cong đặc tuyến và bước nhảy  $0,4V_{oc}$  để kiểm tra bóng che, giải pháp đã nhanh chóng loại bỏ các LMPP trong bước đầu tiên. Đóng góp quan trọng trong nội dung này là đề xuất giải pháp xác định khoảng hụt điện áp giữa hai cực trị liên tiếp để giảm sai số ước lượng các LMPP. Chính vì vậy, giá trị bước điều chỉnh  $\Delta D$  được chọn nhỏ lại trong bước tiếp theo sẽ gia tăng hiệu suất MPPT mà không kéo dài thời gian tìm kiếm. Nhờ đó mà tốc độ giảm hơn 70% so với PSO và GA nhưng hiệu suất có thể cải thiện tăng 3,32%. 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 – 9}.

Các giải thuật GMPPT đề xuất trong luận án đáp ứng đồng thời hai tiêu chí tốc độ hội tụ và hiệu suất MPPT cao để nhanh chóng khai thác tối đa năng lượng từ PVS. Ngoài ra, với khả năng đáp ứng linh hoạt trong điều kiện làm việc thay đổi liên tục và không gián đoạn cấp điện trong suốt thời gian vận hành là những ưu điểm nổi bật của các phương pháp đề xuất. Nó góp phần nâng cao hiệu suất sinh điện và ổn định hệ thống đối với kỹ thuật khai thác năng lượng từ PVS một cách rõ ràng.

# SUMMARY

The thesis researches solutions to improve the efficiency of energy exploitation from photovoltaic systems (PVS). For the overall goal, the thesis proposes solutions for global maximum power point tracking (GMPPT) for two basic configurations: serial (SC) or serial – parallel (S-PC) and parallel (PC) configurations operating in different environmental conditions, especially partial shade conditions (PSC).

Regarding the MPPT solution for PC, the thesis improves the P&O algorithm to improve performance and convergence speed to increase the efficiency of energy exploitation from PVS. To have a basis for forming and proposing solutions, the author surveyed and analyzed the advantages and disadvantages of three groups of algorithms to find technology trends and barriers. In addition, three DC/DC converters, including Boost, Buck, and Buck-boost, are investigated for their best operating limits to suggest the location for calculating the short-circuit current ( $I_{sc}$ ) and open-circuit voltage ( $V_{oc}$ ) of the PVS without interruption of power supply. The influence of working conditions on PVS's characteristics was also investigated in three groups, including Monocrystalline, Polycrystalline, and Thin-film, to find the best location ( $0,4V_{oc}$ ) to calculate  $I_{sc}$  and  $V_{oc}$ . From the obtained results, a linear extrapolation method is proposed to improve the starting value for the traditional P&O algorithm. Based on the ability to accurately estimate the MPP position from these parameters, the proposed algorithm has been enhanced by reducing the number of iterations by more than 70% compared to the unadjusted version to increase the convergence speed to nearly 80%. The proposed solution applied to a PC consisting of four MSX-60 PV panels operating in PSC combined with three DC/DC units has demonstrated reliable performance under all surveyed operating conditions. Improvements and proposals have been researched and published in research {1}, {2}, and {5}.

For the GMPPT solution for the SC or S-PC, the thesis continues to develop from the previous proposal for the PC to avoid the LMPP trap under PSC. The algorithm is divided into two stages, including locating potential MPP based on simulating the PVS's characteristics and checking the optimal position once the operating area of the GMPP has been determined. In this case, the  $I_{sc}$  and  $V_{oc}$  values of PVS are measured directly from the most favorable location to ensure the lowest error when estimating the values at MPP. Through resimulation of the characteristic curve and a jump step ( $0.4V_{oc}$ ) to check the shading, the solution quickly eliminated the LMPPs in the first step. The important contribution in this section is to propose a solution to determine the voltage gap between two consecutive extremes to reduce the estimation error of LMPPs. Therefore, choosing a smaller adjustment step value for the MPPT algorithm will increase performance without prolonging the search time. So, the speed is reduced by more than 70% compared to PSO and GA, but the performance can be improved by 3.32%. This proposed solution has been researched, applied, and published in research {3}, {4} and {6 – 9}.

The GMPPT algorithms proposed in the thesis meet two criteria of convergence speed and high MPPT efficiency to quickly exploit the maximum energy from PVS. In addition, the ability to flexibly respond to continuously changing working conditions without interrupted power supply throughout the operating period is an outstanding advantage of the proposed algorithms. It improves power generation efficiency and system stability for PVS energy exploiting techniques.

# MỤC LỤC

QUYẾT ĐỊNH GIAO ĐỀ TÀI .....	i
LÝ LỊCH KHOA HỌC SƠ LƯỢC .....	ii
LỜI CAM ĐOAN .....	iv
LỜI CẢM ƠN .....	v
TÓM TẮT .....	vi
MỤC LỤC .....	x
DANH MỤC VIẾT TẮT .....	xiii
DANH SÁCH HÌNH .....	xv
DANH SÁCH BẢNG .....	xvii
CHƯƠNG 1 .....	1
GIỚI THIỆU .....	1
1.1 Đặt vấn đề .....	1
1.2. Mục tiêu và nhiệm vụ nghiên cứu .....	2
1.3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu .....	2
1.4. Phương pháp nghiên cứu .....	3
1.5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn .....	3
1.6. Cấu trúc của luận án .....	3
CHƯƠNG 2 .....	5
TỔNG QUAN VỀ KỸ THUẬT MPPT .....	5
2.1 Ảnh hưởng của điều kiện vận hành lên đặc tính của PV .....	5
2.1.1. Đặc tuyến của tế bào pin quang điện .....	6
2.1.2. Ảnh hưởng của PSC lên các cấu trúc PV cơ bản .....	8
2.2 Các kỹ thuật MPPT cơ bản .....	13
2.2.1. Nhóm giải thuật truyền thống .....	15

2.2.1.1.	Thuật toán Perturbation and Observation .....	15
2.2.1.2.	Thuật toán Incremental Conductance .....	17
2.2.1.3.	Phương pháp Constant Voltage .....	19
2.2.1.4.	Phương pháp Constant Current.....	20
2.2.2.	Nhóm thuật toán tối ưu .....	22
2.2.2.1.	Giải thuật Particle Swarm Optimization.....	22
2.2.2.2.	Giải thuật Artificial Bee Colony.....	24
2.2.2.3.	Thuật toán Ant Colony Optimization .....	24
2.2.2.4.	Giải thuật Artificial Neural Net-work.....	25
2.2.2.5.	Bat Algorithm .....	26
2.2.2.6.	Thuật toán Grey Wolf Optimization.....	28
2.2.2.7.	Gen Algorithm .....	29
2.2.3.	Nhóm giải pháp lai.....	30
2.2.3.1.	Giải pháp kết hợp giữa InC (hoặc P&O) và ANN.....	30
2.2.3.2.	Giải pháp kết hợp PSO và P&O (hoặc InC) .....	31
2.2.3.3.	Giải pháp kết hợp giữa Modified Grey Wolf Optimization và Adaptive Neuro Fuzzy Inference System .....	32
2.2.3.4.	Giải pháp kết hợp giữa Ant Colony Optimization và Fuzzy Logic.....	33
2.3	Kết luận chương 2.....	34
CHƯƠNG 3 .....		39
GIẢI PHÁP MPPT CHO HỆ THỐNG PV CÓ CẤU HÌNH SONG SONG.....		39
3.1.	Hướng tiếp cận.....	39
3.1.1.	Hệ số FF của một số loại PV điển hình .....	40
3.1.2.	Phạm vi hoạt động tốt nhất của các bộ chuyển đổi DC/DC .....	43
3.2.	Đề xuất phương pháp xác định $I_{sc}$ dựa vào D.....	48
3.3.	Giải pháp xác định $V_{oc}$ dựa vào D .....	59

3.4.	Đề xuất giải pháp xác định MPP cho cấu hình song song.....	65
3.5.	Ứng dụng mô phỏng và những kết quả đạt được.....	67
3.6.	Kết luận chương 3.....	81
CHƯƠNG 4 .....		83
GIẢI PHÁP GMPPT CHO HỆ THỐNG PV CÓ CẤU HÌNH NỐI TIẾP .....		83
4.1.	Giới thiệu .....	83
4.2.	Phương pháp tiếp cận.....	86
4.2.1.	Điện áp hở mạch của PVS khi xảy ra PSC .....	86
4.2.2.	Dòng điện ngắn mạch của PVS khi xảy ra PSC .....	90
4.3.	Đề xuất giải pháp GMPPT dựa vào đặc tuyến I-V khi xảy ra PSC.....	90
4.3.1.	Xác định MPP trong khoảng đầu tiên trên đặc tuyến I-V.....	90
4.3.2.	Xác định vị trí các MPP còn lại trong hệ thống PV.....	91
4.3.3.	Lưu đồ giải thuật GMPPT đề xuất.....	94
4.3.4.	Ứng dụng và những kết quả đạt được.....	98
4.4.	Kết luận.....	113
CHƯƠNG 5 .....		115
KẾT LUẬN .....		115
5.1.	Những kết quả đạt được.....	115
5.2.	Hướng nghiên cứu phát triển .....	117

## DANH MỤC VIẾT TẮT

Ký tự viết tắt	Tên tiếng Anh	Tên tiếng Việt
ABC	Artificial Bee Colony	Thuộc địa ong nhân tạo
ACO	Ant Colony Optimization	Tối ưu thuộc địa kiến
AFO	Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic	Mạng thần kinh nhân tạo và logic mờ
ANFIS	Adaptive Neuro Fuzzy Inference System	Hệ thống suy luận mờ nơ-ron thích nghi
ANN	Artificial Neural Net-work	Mạng lưới trí tuệ nhân tạo
BA	Bat Algorithm	Giải thuật con dơi
BL	Brigde Linked	Liên kết kiểu cầu
CC	Constant Current	Dòng điện không đổi
CV	Constant Voltage	Điện áp không đổi
IABC	Improved Artificial Bee Colony	Thuộc địa ong nhân tạo cải tiến
InC	Incremental Conductance	Điện dẫn gia tăng
FA	Firefly Algorithm	Giải thuật lửa bay
FF	Fill Factor	Hệ số điền kín
FL	Fuzzy Logic	Logic mờ
FOCV	Fractional Open Circuit Voltage	Điện áp hở mạch phân đoạn
GA	Gen Algorithm	Thuật toán di truyền
GMPPT	Globe Maximum Power Point Tracking	Bám điểm phát công suất cực đại toàn cục
GWO	Grey Wolf Optimization	Tối ưu hóa sói xám
HC	Honey Comb	Tổ ong
InC	Incremental Conductance	Điện dẫn gia tăng
LMPP	Local Maximum Power Point	Điểm công suất cực đại địa phương
LPSO	Leader Particle Swarm Optimization	Tối ưu hóa bầy đàn lãnh đạo
MBA	Mine Blast Optimization	Tối ưu hóa nổ mìn
MPP	Maximum Power Point	Điểm công suất cực đại
MPPT	Maximum Power Point Tracking	Bám điểm phát công suất cực đại
MPSO	Modified Particle Swarm Optimization	Tối ưu hóa bầy đàn điều chỉnh
M-VSS-InC	Modified Variable Step Size Incremental Conductance	Điện dẫn gia tăng kích thước bước thay đổi điều chỉnh.

M-VSS-P&O	Modified Variable Step Size Perturbation and Observation	Nhiều loạn và quan sát kích thước bước thay đổi điều chỉnh.
P&O	Perturbation and Observation	Nhiều loạn và quan sát
PC	Parallel configuration	Cấu hình song song
PSC	Partial Sharding Condition	Điều kiện bóng che một phần
PSO	Particle Swarm Optimization	Tối ưu hóa bầy đàn
PV	Photovoltaic	Tấm pin mặt trời
PVS	Photovoltaic system	Hệ thống pin mặt trời
SC	Series configuration	Cấu hình nối tiếp
SHTS	Simultaneous Heat Transfer Search	Tìm kiếm truyền nhiệt đồng thời
S-PC	Series - Parallel configuration	Cấu hình nối tiếp – song song
TCT	Total Cross Tied	Tổng liên kết chéo
VSSP&O	Variable Step Size Perturbation and Observation	Nhiều loạn và quan sát kích thước bước thay đổi.



## DANH SÁCH HÌNH

<b>Hình 1.1.</b> Sơ đồ cấu trúc luận án. ....	4
<b>Hình 2.1.</b> Mô hình toán của tế bào pin quang điện. ....	6
<b>Hình 2.2.</b> Đặc tuyến: a) I-V; b) P-V; c) P-I dưới tác động của môi trường. ....	7
<b>Hình 2.3.</b> Cấu hình PV kiểu: a) SC; b) PC; c) S-PC. ....	9
<b>Hình 2.4.</b> So sánh đặc tuyến a) I-V và b) P-V khi xảy ra PSC. ....	10
<b>Hình 2.5.</b> Đặc tuyến a) I-V, b) P-V của cấu hình SC khi điều kiện thay đổi.....	13
<b>Hình 2.6.</b> Thuật toán P&O a) lưu đồ; b) sai số giữa hai lần lấy mẫu [4]. ....	16
<b>Hình 2.7.</b> Nguyên lý MPPT của giải thuật InC. ....	18
<b>Hình 2.8.</b> Lưu đồ giải thuật CV [23].....	20
<b>Hình 2.9.</b> Lưu đồ giải thuật PSO [38]. ....	22
<b>Hình 2.10.</b> Các lớp mô hình ANN [23].....	25
<b>Hình 2.11.</b> Lưu đồ giải thuật BA [48]. ....	27
<b>Hình 2.12.</b> Lưu đồ giải thuật ANN-P&O [4]. ....	31
<b>Hình 2.13.</b> Lưu đồ giải thuật AFO [39].....	33
<b>Hình 2.14.</b> Phân nhóm một số giải thuật thông dụng.....	35
<b>Hình 2.15.</b> Tiêu chí đánh giá một số giải pháp MPPT [36]. ....	36
<b>Hình 3.1.</b> Hệ thống PV liên kết kiểu song song. ....	41
<b>Hình 3.2.</b> Các bộ chuyển đổi: a) Boost; b) Buck; c) Buck-boost.....	44
<b>Hình 3.3.</b> Giới hạn điện trở trong vùng khảo sát.....	45
<b>Hình 3.4.</b> Giới hạn điện trở xác định giá trị $I_{sc}$ của PV. ....	48
<b>Hình 3.5.</b> Các vùng làm việc trên đường cong I-V. ....	51
<b>Hình 3.6.</b> Khảo sát vùng tuyến tính của PV loại a) GxB-340; b) Shell ST40; c) Shell S70; d) SSt 230-60P; e) Shell SQ150, f) Shell SP75, và g) MSX-60. ....	54

<b>Hình 3.7.</b> Khảo sát vùng tuyến tính đề xuất tính $I_{sc}$ .	56
<b>Hình 3.8.</b> Khảo sát vùng phi tuyến đề xuất tính $V_{oc}$ .	61
<b>Hình 3.9.</b> Lưu đồ giải thuật I_P&O đề xuất.	68
<b>Hình 3.10.</b> Các dạng sóng ngõ ra dùng mạch Boost trong PSC.	69
<b>Hình 3.11.</b> Kết quả MPPT khi PSC trong trường hợp 7.	69
<b>Hình 3.12.</b> MPPT của ba giải pháp với a) Boost, b) Buck và c) Buck-boost.	74
<b>Hình 3.13.</b> Bố trí sơ đồ thí nghiệm.	77
<b>Hình 3.14.</b> Thực nghiệm MPPT với a) Boost, b) Buck và c) Buck-boost.	78
<b>Hình 3.15.</b> Dạng sóng thực nghiệm của a) dòng điện, b) tỷ số đóng cắt.	79
<b>Hình 4.1.</b> Chia vùng điện áp trên đường cong I-V khi xảy ra PSC.	87
<b>Hình 4.2.</b> Lưu đồ thuật toán GMPPT đề xuất.	95
<b>Hình 4.3.</b> Cấu trúc hệ thống PV đề xuất.	98
<b>Hình 4.4.</b> Đặc tuyến a) P-V và b) I-V khi mô phỏng một chuỗi PV.	100
<b>Hình 4.5.</b> Dạng sóng MPPT trong điều kiện đồng nhất.	101
<b>Hình 4.6.</b> Dạng sóng ngõ ra khi mô phỏng cho trường hợp 4.	102
<b>Hình 4.7.</b> Đặc tuyến a) P-V và b) I-V khi mô phỏng nhiều chuỗi PV song song.	104
<b>Hình 4.8.</b> Dạng sóng ngõ ra khi mô phỏng cho 3 chuỗi song song ở PSC.	105
<b>Hình 4.9.</b> So sánh dạng sóng ra của các giải thuật khi xảy ra PSC.	107
<b>Hình 4.10.</b> Thay đổi điểm vận hành khi xảy ra PSC.	109
<b>Hình 4.11.</b> So sánh khả năng GMPP khi PSC thay đổi liên tục.	110
<b>Hình 4.12.</b> Bố trí thực nghiệm giải thuật đề xuất.	111
<b>Hình 4.13.</b> Kết quả thực nghiệm khi a) điều kiện đồng nhất, b) PSC.	111
<b>Hình 4.14.</b> Dạng sóng a) dòng điện và điện áp, b) công suất khi bức xạ thay đổi.	113

## DANH SÁCH BẢNG

<b>Bảng 2.1.</b> So sánh ảnh hưởng của PSC lên các cấu hình cơ bản.....	10
<b>Bảng 2.2.</b> So sánh tiêu chuẩn của một số giải thuật truyền thống.....	21
<b>Bảng 2.3.</b> So sánh tiêu chuẩn của một số giải thuật tối ưu.....	30
<b>Bảng 2.4.</b> So sánh tiêu chuẩn của một số giải thuật kết hợp.....	34
<b>Bảng 2.5.</b> Đặc điểm của các nhóm giải thuật MPPT [4]. .....	37
<b>Bảng 3.1.</b> Các thông số của một số loại PV được khảo sát.....	41
<b>Bảng 3.2.</b> Các trường hợp đề xuất khảo sát.....	42
<b>Bảng 3.3.</b> Hệ số FF của PV loại MSX-60 trong các trường hợp khảo sát. ....	43
<b>Bảng 3.4.</b> Hệ số FF của các loại PV .....	43
<b>Bảng 3.5.</b> Giới hạn hoạt động tốt nhất của D. ....	48
<b>Bảng 3.6.</b> Giá trị D của các PV tại $0,2V_{oc}$ và $0,4V_{oc}$ .....	50
<b>Bảng 3.7.</b> Giới hạn phân biệt vùng tuyến tính trên đường cong I-V.....	53
<b>Bảng 3.8.</b> $I_{sc}$ và $V_{oc}$ của các loại PV trong những trường hợp khảo sát. ....	57
<b>Bảng 3.9.</b> Sai số tính toán $I_{sc}$ của các loại PV trong các trường hợp khảo sát. ....	58
<b>Bảng 3.10.</b> Giá trị độ rộng xung D xác định tại vị trí $0,2I_{sc}$ . ....	61
<b>Bảng 3.11.</b> Sai số tính toán $V_{oc}$ bằng giải pháp đề xuất. ....	63
<b>Bảng 3.12.</b> Bảng giá trị khởi động của giải thuật.....	65
<b>Bảng 3.13.</b> Sai số tính toán $D_{mp}$ và $P_{mp}$ bằng giải pháp đề xuất.....	70
<b>Bảng 3.14.</b> Hiệu quả MPPT bằng giải pháp đề xuất. ....	72
<b>Bảng 3.15.</b> Các tham số thiết lập cho các thuật toán.....	73
<b>Bảng 3.16.</b> So sánh tốc độ hội tụ của ba giải thuật.....	76
<b>Bảng 3.17.</b> Thông số thiết kế mạch DC/DC cho thực nghiệm.....	78
<b>Bảng 3.18.</b> Tổng hợp các kết quả thực nghiệm trên Boost, Buck, và Buck-boost...80	
<b>Bảng 3.19.</b> Tổng hợp hiệu quả của một số nghiên cứu công bố gần đây.....	81

<b>Bảng 4.1.</b> Các trường hợp mô phỏng với giải thuật đề xuất. ....	99
<b>Bảng 4.2.</b> Tổng hợp hiệu suất và tốc độ MPPT cho các trường hợp mô phỏng. ...	106
<b>Bảng 4.3.</b> Thông số cơ bản của các giải thuật .....	107
<b>Bảng 4.4.</b> So sánh hiệu suất MPPT và tốc độ hội tụ với PSO và GA. ....	108
<b>Bảng 4.5.</b> Tổng hợp hiệu suất MPPT thực nghiệm cho các trường hợp đề xuất. ..	112

# CHƯƠNG 1

## GIỚI THIỆU

### 1.1 Đặt vấn đề

Những nỗ lực để giảm tiêu thụ năng lượng từ các nguồn truyền thống và con người ngày càng quan tâm nhiều hơn đến tác động của môi trường thì điện mặt trời nổi lên như một mảnh ghép hoàn thiện bức tranh năng lượng toàn cầu. Mặc dù luôn có những tranh cãi xung quanh vấn đề phát triển và ứng dụng dạng năng lượng này, nhưng không thể phủ nhận những ưu điểm vượt trội của nó như: tính bền vững và sẵn có ở mọi nơi. Giảm đáng kể lượng phát thải và tác động đến môi trường. Giảm tổn thất truyền tải và phân phối điện liên quan đến sản xuất điện tập trung truyền thống do tận dụng không gian có sẵn để phát điện tại chỗ. Ngoài ra, tùy thuộc vào thủ tục hành chính của từng địa phương mà năng lượng dư thừa có thể được đưa lên lưới điện hoặc lưu trữ dưới các dạng năng lượng khác [1]. Tuy nhiên, công nghệ khai thác năng lượng từ PVS đối mặt với thách thức là làm sao thu được công suất nhiều nhất trong thời gian nhanh nhất. Vấn đề này phát sinh do đặc điểm của nguồn năng lượng mặt trời thay đổi liên tục, thời gian bức xạ đủ để phát điện trong ngày ngắn. Trong khi đó, công suất của mỗi tấm PV nhỏ so với nhu cầu của một hệ thống điện. Vì vậy, cần liên kết chúng lại để đạt mức công suất ra mong muốn. Từ thực trạng trên, tác giả nhận thấy có hai xu hướng mà các nhà nghiên cứu đang theo đuổi để tối ưu hiệu suất sinh điện của PVS bao gồm [2]:

- i. Thứ nhất là phát triển kỹ thuật MPPT cho PVS trong những điều kiện vận hành khác nhau mà chủ yếu là bóng che một phần (PSC).
- ii. Hai là điều chỉnh cấu hình PV phù hợp với phạm vi ứng dụng, giảm tác động của PSC, để áp dụng các kỹ thuật MPPT để tăng hiệu suất sinh điện.

Từ thực tế nêu trên, tác giả nhận thấy cần đồng bộ giữa phát triển thuật toán MPPT với việc đề xuất cấu hình PV phù hợp cho những ứng dụng cụ thể. Nó là hai khía cạnh cốt lõi của một giải pháp nhằm gia tăng tốc độ hội tụ và tối ưu hiệu suất

sinh điện với chi phí hợp lý. 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, SC hoặc S-PC khi xảy ra PSC để nâng cao hiệu suất khai thác năng lượng từ PVS.

## **1.2. Mục tiêu và nhiệm vụ nghiên cứu**

Như đã trình bày trong những phần trước, để nâng cao hiệu suất của PVS thì cần: (1) Giảm tác động của hiện tượng bóng che một phần – là nguyên nhân chính dẫn đến suy giảm hiệu quả khai thác năng lượng, và (2) là tránh bẫy LMPP để nâng cao hiệu suất sinh điện, tăng tốc độ hội tụ với chi phí hợp lý.

Mặc dù đã có rất nhiều nghiên cứu được giới thiệu nhưng hiện nay vẫn thiếu những giải pháp đồng bộ đủ nhanh, mạnh, chính xác, đơn giản, hiệu quả và quan trọng là phù hợp giữa giải thuật và cấu hình. Mục tiêu tổng thể của luận án này là nghiên cứu phát triển các giải thuật MPPT để nâng cao hiệu suất sinh điện của PVS liên kết kiểu SC và PC. Để giải quyết mục tiêu tổng quan này, các mục tiêu và nhiệm vụ cụ thể được thực hiện theo từng giai đoạn bao gồm:

- Đề xuất giải thuật MPPT cải tiến ứng dụng cho cho cấu hình hệ thống pin quang điện song song trong điều kiện bóng che một phần để giảm số bước lặp, gia tăng tốc độ hội tụ, nhanh chóng ổn định và đáp ứng trong những điều kiện vận hành thay đổi.
- Đề xuất giải thuật GMPPT dựa trên sự cải tiến thuật toán P&O áp dụng cho cấu hình nối tiếp làm việc trong điều kiện bóng che một phần. Giải pháp đề xuất đạt độ chính xác cao trong việc tránh bẫy LMPP, giảm vòng lặp tìm kiếm, nâng cao khả năng ổn định và hiệu suất sinh điện của hệ thống pin quang điện.

## **1.3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu**

- Nghiên cứu bài toán nâng cao hiệu suất của PVS dựa vào các cấu hình cơ bản và kỹ thuật MPPT khi điều kiện làm việc thay đổi.
- Nghiên cứu tác động của bức xạ, nhiệt độ đến đường đặc tính và các tham số của PVS nhằm tìm giải pháp nâng cao hiệu suất MPPT cho các cấu hình PV.
- Nghiên cứu đặc điểm của các cấu hình PV trong khả năng giảm tác động của

PSC khi vận hành.

- Giải quyết bài toán GMPPT cho PVS kiểu PC và SC khi xảy ra PSC.

#### **1.4. Phương pháp nghiên cứu**

Nghiên cứu lý thuyết: tham khảo, phân tích, tổng hợp ưu, nhược điểm của các giải pháp MPPT liên quan để tìm giải pháp cải thiện hiệu suất sinh điện cho PVS.

Khảo sát đặc điểm dòng điện, điện áp và công suất của một số PV cơ bản dưới tác động của môi trường làm việc nhằm tìm ra phương pháp điều khiển phù hợp.

Mô phỏng, kiểm nghiệm giải thuật GMPPT đề xuất trong các môi trường giả lập cho các bài toán ứng dụng.

#### **1.5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn**

Trọng tâm của luận án là đề xuất các giải thuật GMPPT cho hai cấu hình pin quang điện cơ bản là nối tiếp và song song để nâng cao hiệu suất khai thác năng lượng. Vì vậy, những đóng góp của luận án về mặt học thuật và thực tiễn như sau:

- Đề xuất giới hạn điện áp  $0,4V_{oc}$  để xác định nhanh giá trị dòng điện tại MPP của hệ thống pin quang điện. Những ứng dụng từ phương pháp đề xuất này cho PVS kiểu song song đã được thực hiện và công bố trong công trình số {1}, {2} và {5}.
- Đề xuất giải pháp xác định khoảng hụt điện áp trên đặc tuyến I – V do điều kiện bóng che một phần gây ra. Đề xuất này đã được nghiên cứu, ứng dụng và công bố trong công trình số {3} và các công trình liên quan {4} và {6 – 9}.
- Về mặt thực tiễn, giải pháp đề xuất có thể được sử dụng như nguồn tài liệu tham khảo cho giảng dạy, nghiên cứu xa hơn trong lĩnh vực nâng cao hiệu suất của hệ thống pin quang điện. Những kết quả nghiên cứu trong luận án đã được công bố trên những tạp chí uy tín là minh chứng cho khả năng ứng dụng rộng rãi từ các giải pháp đề xuất.

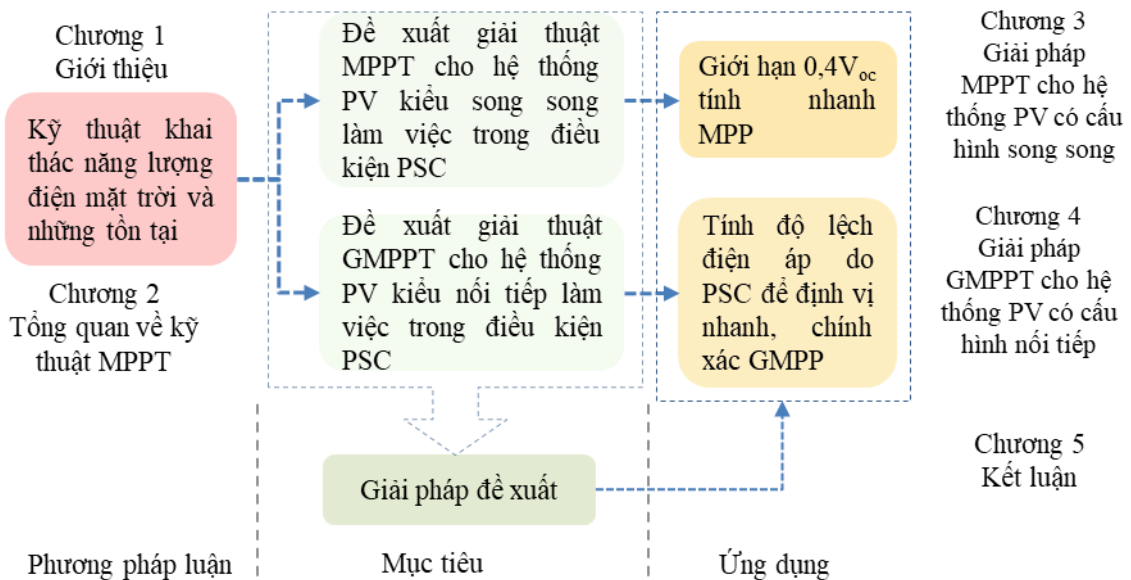
#### **1.6. Cấu trúc của luận án**

Cấu trúc của luận án gồm các phần như sơ đồ Hình 1.1 trong đó:

**Chương 1.** Giới thiệu sơ lược về lý do, mục đích, đối tượng, phương pháp

nghiên cứu và ý nghĩa thực tiễn của luận án.

**Chương 2.** Khái quát và phân tích những tồn tại của một số kỹ thuật MPPT phổ biến được công bố gần đây. Những ưu điểm, nhược điểm của các cấu hình PV hoạt động trong điều kiện đồng nhất hoặc PSC cũng được phân tích tổng hợp nhằm tìm ra những rào cản công nghệ hoặc những thiếu sót theo xu hướng phát triển để đưa ra giải pháp cải thiện. Bên cạnh đó, ảnh hưởng của điều kiện làm việc như nhiệt độ, bức xạ mặt trời lên đường đặc tuyến của PVS cũng được thảo luận. Những kết quả đạt được là cơ sở phương pháp luận cho việc đề xuất thuật toán MPPT trong những nghiên cứu ở phần tiếp theo.



**Hình 1.1.** Sơ đồ cấu trúc luận án.

**Chương 3.** Đề xuất giải thuật MPPT cho hệ thống PV kiểu song song vận hành trong PSC. Mục tiêu của giải thuật là nhanh chóng xác định vị trí MPP tiềm năng để giảm số bước lặp, tăng tốc độ hội tụ và ổn định, nâng cao hiệu suất cho hệ thống PV.

**Chương 4.** Đề xuất giải thuật GMPPT cho hệ thống PV kiểu nối tiếp vận hành trong PSC. Giải pháp đề xuất có độ chính xác cao hơn so với các công trình nghiên cứu trước đây nhờ mô phỏng lại đặc tuyến của hệ thống PV theo trạng thái làm việc để định vị MPP dựa vào khoảng hụt điện áp do PSC gây ra.

**Chương 5:** Trình bày những đóng góp của luận án qua các kết quả đạt được và hướng phát triển nhằm hạn chế những thiếu sót trong nội dung luận án.



## CHƯƠNG 2

# TỔNG QUAN VỀ KỸ THUẬT MPPT

Bên cạnh các PVS nối lưới rộng lớn, những ứng dụng của nó trong các hệ thống độc lập như điện mặt trời áp mái, đèn giao thông, đèn đường, các phương tiện dịch chuyển, bơm nước tưới tiêu tại các nông trại,...có sử dụng năng lượng mặt trời ngày một phát triển rộng khắp. Cấu trúc và hiệu suất của các tấm PV quyết định phạm vi ứng dụng của chúng trong những lĩnh vực khai thác năng lượng. Ngoài hiệu suất chuyển đổi nội tại là thông số đặc trưng của mỗi loại PV theo điều kiện tiêu chuẩn trong phòng thí nghiệm thì trong quá trình khai thác, sử dụng, có rất nhiều yếu tố bên ngoài ảnh hưởng đến hiệu suất sinh điện của chúng như: môi trường làm việc (bức xạ, nhiệt độ), cấu hình PVS, khả năng MPPT, tổng chi phí lắp đặt [3], [4]. Khi môi trường làm việc đồng nhất, dạng đường cong đặc tính I-V và P-V của các cấu hình là tương đồng. Đặc điểm này cho phép MPPT bằng bất kỳ thuật toán nào mà không cần quan tâm đến LMPP. Tuy nhiên, khi làm việc trong PSC, các diode hạn chế phát nóng cục bộ trong kiểu SC sinh ra nhiều cực trị. Nó khiến cho các giải thuật cơ bản không thể phân biệt giữa LMPP và GMPP. Để giải quyết vấn đề này, nhiều thuật toán tối ưu đã được giới thiệu. Bên cạnh đó, những cấu hình PV cải tiến tập trung hạn chế ảnh hưởng của PSC, giảm thất thoát năng lượng, nâng cao hiệu suất sinh điện cũng được quan tâm phát triển. Nhìn chung, mọi nỗ lực cải thiện từ các giải pháp đều xuất phát từ ảnh hưởng của điều kiện vận hành lên đặc tính ngõ ra của chúng.

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

Để khảo sát dạng đặc tuyến của PVS dưới tác động của điều kiện vận hành, luận án tập trung vào hai thông số là bức xạ mặt trời và nhiệt độ bề mặt của tấm pin khi làm việc. Bên cạnh đó, ba cấu trúc PVS cơ bản được sử dụng trong nghiên cứu là SC, PC, và S-PC. Các tham số ngõ ra đề nghị khảo sát, so sánh bao gồm: dòng điện, điện áp, công suất tại MPP, số đỉnh cực trị trong các điều kiện vận hành khác nhau, và hệ số điền kín. Trên cơ sở đó, phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chọn cấu

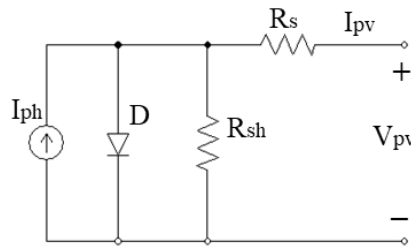
hình và giải thuật MPPT phù hợp với từng phạm vi ứng dụng.

### 2.1.1. Đặc tuyến của tế bào pin quang điện

Tùy vào công suất mà mỗi tấm PV có thể gồm một vài hoặc nhiều tế bào quang điện ghép với nhau, mỗi tế bào được mô hình hóa như giới thiệu trong Hình 2.1 [5]. Quan hệ giữa dòng điện và điện áp của nó được biểu diễn theo phương trình (2.1) [6]:

$$I_{PV} = I_{ph} - I_0 \left\{ e^{\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{nkT_c}} - 1 \right\} - \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

Trong đó:  $V_{pv}$  (V),  $I_{pv}$  (A) là điện áp và dòng điện ra của PV;  $I_{ph}$  và  $I_0$  dòng quang điện và dòng bão hòa ngược (A),  $k$  hằng số Boltzman ( $1,381 \times 10^{-23}$  J/K),  $q$  điện tích của electron ( $1,602 \times 10^{-19}$  C),  $T$  nhiệt độ lớp tiếp xúc (K),  $R_s$  và  $R_{sh}$  điện trở nối tiếp và song song ( $\Omega$ ),  $n$  là hệ số lý tưởng của diode.



**Hình 2.1.** Mô hình toán của tế bào pin quang điện.

Khi nhiệt độ làm việc và bức xạ thay đổi sẽ tác động đến giá trị dòng quang điện  $I_{ph}$  theo biểu thức (2.2).

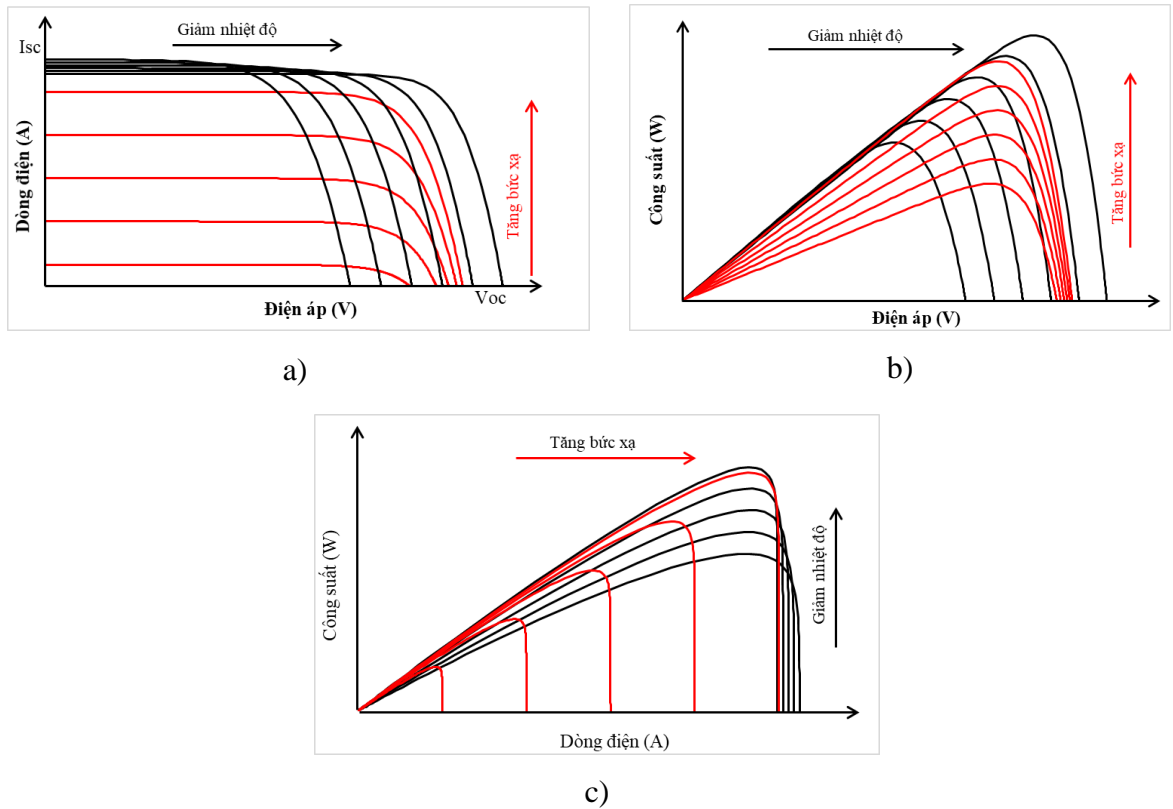
$$I_{ph} = [I_{sc} + \alpha_i (T - T_{ref})] \frac{W}{W_{ref}} \quad (2.2)$$

Với  $I_{sc}$  là dòng ngắn mạch của PV ở điều kiện tiêu chuẩn (A),  $\alpha_i$  là hệ số nhiệt độ của dòng ngắn mạch,  $T$  và  $T_{ref}$  là nhiệt độ làm việc ở điều kiện bất kỳ và điều kiện tham chiếu (K),  $W$  và  $W_{ref}$  là bức xạ mặt trời ở điều kiện bất kỳ và điều kiện tham chiếu ( $W/m^2$ ).

Khi môi trường làm việc đồng nhất, dạng đường cong I-V và P-V của toàn bộ PVS có chung tính chất với từng tế bào. Mối quan hệ giữa dòng điện và điện áp của PVS gồm  $N_s$  tế bào mắc nối tiếp trong một chuỗi và ghép  $N_p$  chuỗi song song với

nhau được biểu diễn như phương trình (2.3) [7], [8].

$$I_{PV} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left\{ e^{\frac{q(V_{pv} + N_s I_{pv} R_s)}{N_s n k T_c}} - 1 \right\} - \frac{V_{pv} + N_s I_{pv} R_s}{N_s R_{sh}} \quad (2.3)$$



**Hình 2.2.** Đặc tuyến: a) I-V; b) P-V; c) P-I dưới tác động của môi trường.

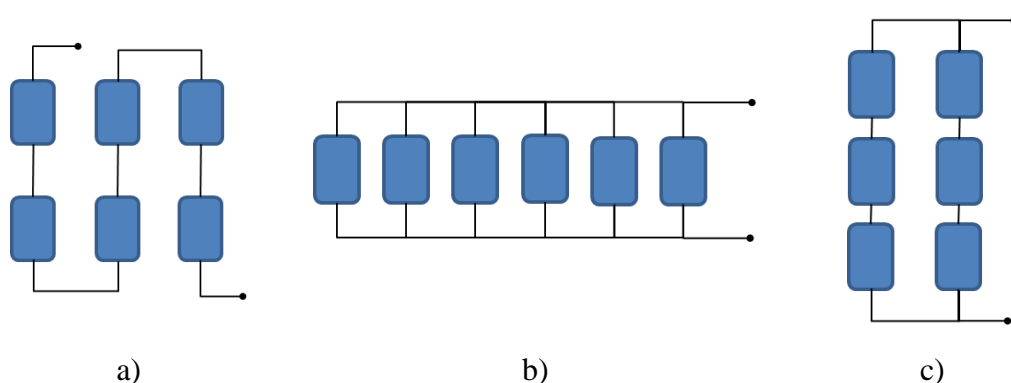
Từ các phương trình cho thấy, ngõ ra của PVS bị ảnh hưởng trực tiếp bởi bức xạ và nhiệt độ. Hình 2.2 biểu diễn các đường cong đặc tuyến I-V, P-V và P-I trong những điều kiện bức xạ và nhiệt độ khác nhau. Kết quả cho thấy, dòng điện và điện áp đồng biến với bức xạ mặt trời và  $I_{sc}$  bị ảnh hưởng nhiều hơn so với  $V_{oc}$ . Trong thực tế, bức xạ ở điều kiện vận hành luôn nhỏ hơn so với điều kiện phòng thí nghiệm ( $1kW/m^2$ ) nên hầu như hai thông số này đều có xu hướng giảm so với thông số thiết kế. Ngược lại, khi nhiệt độ làm việc thay đổi, dòng điện  $I_{sc}$  có xu hướng ổn định hơn so với điện áp  $V_{oc}$ . Không giống như bức xạ, nhiệt độ làm việc của PVS thường lớn hơn điều kiện chuẩn ( $25^\circ C$ ) nên sự suy giảm công suất trong trường hợp này chủ yếu do sụt áp gây ra. Họ đường cong đặc tuyến P-V cũng thể hiện rõ tính chất này; khi thay đổi bức xạ, giá trị  $V_{oc}$  thay đổi không đáng kể nên điện áp tại MPP ứng với các

điều kiện bức xạ khác nhau cũng gần như giống nhau. Trong khi đó giá trị dòng điện tại MPP ổn định hơn điện áp khi thay đổi nhiệt độ.

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

Khi hệ thống PV hoạt động trong điều kiện PSC, cấu trúc liên quyết định số lượng cực trị và ảnh hưởng đến tính hiệu quả của giải thuật MPPT. Các nghiên cứu nhằm nỗ lực cải thiện khả năng kiểm soát số lượng MPP, giảm tác động của PSC lên hiệu suất sinh điện. Nếu giảm được lượng cực trị địa phương thì có thể sử dụng các thuật toán đơn giản để giảm áp lực về các phép tính từ đó gia tăng hiệu suất đồng thời cải thiện được cả tốc độ tìm kiếm. Theo quan điểm này, các giải pháp điều chỉnh cấu hình PV tập trung khai thác các tính năng như: độ phân tán PSC, hiệu suất sinh điện, hệ số lấp đầy (FF), giảm tổn thất công suất, chi phí thực hiện và khả năng ứng dụng [3]. Theo tài liệu [9] từ hai cấu hình cơ bản là SC và PC, có rất nhiều cấu hình cải tiến khác nhau được nghiên cứu giới thiệu như: nối tiếp – song song (S-PC), liên kết cầu (BL), tổng liên kết chéo (TCT), dạng tổ ong (HC) [10]. Những cấu hình này đã hạn chế tối đa hoạt động của các diode bypass để duy trì khả năng phát điện của những PV nhận được ít năng lượng nhất trong PVS [11]. Nếu như trong SC, vị trí bị bóng che nhiều nhất sẽ bị cách ly khỏi chuỗi liên kết bằng diode bypass thì trong các cấu hình cải tiến này, công suất của chúng được đẩy qua các chuỗi khác thông qua các mối nối liên kết chéo giữa các hàng và các cột. Giải pháp này không những gia tăng hiệu suất phát điện khi xảy ra PSC mà còn có lợi trong quá trình bảo hành một hoặc một vài tấm PV mà không cần gián đoạn cấp điện toàn bộ hệ thống. Tuy nhiên, những nỗ lực cải thiện hiệu suất sinh điện và giảm tổn thất công suất lại làm gia tăng chi phí, gây tổn thất trên các mối nối dư thừa trong điều kiện đồng nhất. Hơn nữa, các cấu hình này có yêu cầu số lượng PV lớn mới đạt được hiệu quả mong đợi. Vì vậy nhược điểm của các cấu hình này vẫn đang được nghiên cứu cải thiện trong các xuất bản gần đây [12], [13]. Ngoài ra, còn rất nhiều các phiên bản cải tiến và điều chỉnh khác nhưng phạm vi ứng dụng và hiệu quả kém nên ít được đề cập [9]. Vì vậy, trong nội dung luận án này, tác giả chỉ tập trung vào hai loại cấu hình cơ bản là nối tiếp và song song.

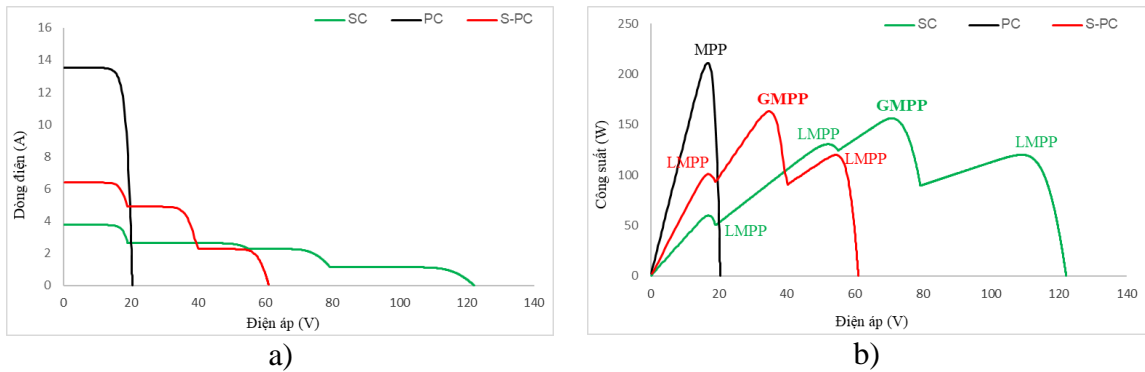
Để khảo sát tác động của PSC lên đặc tuyến I-V và P-V của các cấu hình liên kết khác nhau, một hệ thống 6 tấm PV loại MSX-60 [14], [15] được sử dụng. Ba kiểu liên kết cơ bản là SC và PC, và nối tiếp – song song (S-PC) được tiến hành khảo sát. Các dạng liên kết này được giới thiệu trong Hình 2.3 [16], [17]. Các kịch bản đề xuất thử nghiệm được liệt kê trong Bảng 2.1 nhằm so sánh các giá trị dòng điện, điện áp, và công suất tối đa mà chúng có thể cung cấp. Bên cạnh đó, số cực trị trong điều kiện PSC cũng là yếu tố cần khảo sát để đánh giá sự phù hợp và tính khả thi khi áp dụng với các thuật toán MPPT.



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

Kết quả khảo sát được tổng hợp, so sánh trong Bảng 2.1 cho thấy; trong điều kiện đồng nhất, tất cả các cấu hình đều cung cấp một lượng công suất ra tương đương. Sự khác biệt thể hiện ở hai tham số dòng điện ( $I_{mp}$ ) và điện áp ( $V_{mp}$ ) tại MPP. Đây cũng là trường hợp mà dạng đặc tuyến của tất cả các cấu hình đều có một cực trị. Nghĩa là khi không xảy ra PSC, các cấu hình PV giảm bớt bài toán tránh bẫy LMPP giúp cho việc ứng dụng các thuật toán linh hoạt và đơn giản hơn. Do đó, nếu bỏ qua hiện tượng PSC thì việc chọn cấu hình nào chỉ phụ thuộc vào yêu cầu về dòng điện, điện áp ra mong muốn và sự đáp ứng với các bộ chuyển đổi kèm theo. Dạng sóng ngõ ra khi điều kiện vận hành đồng nhất có thể được tìm thấy trong Hình 1.1. Bên cạnh đó, dạng sóng I-V và P-V trong trường hợp bóng che ngẫu nhiên được thể hiện trong Hình 2.4. Nhìn chung khi xảy ra PSC, các cấu hình khác nhau sẽ có những đặc điểm khác biệt về số lượng cực trị, giá trị dòng điện, điện áp tại MPP và khả năng sinh điện tối đa có thể cung cấp. Những khác biệt có thể được tổng hợp như sau:

- Kiểu PC chỉ có một cực trị trong tất cả các trường hợp khảo sát. Đây cũng là cấu hình có công suất ra lớn nhất.



**Hình 2.4.** So sánh đặc tuyến a) I-V và b) P-V khi xảy ra PSC.

**Bảng 2.1.** So sánh ảnh hưởng của PSC lên các cấu hình cơ bản.

Cấu hình	Kiểu bóng che	Bức xạ trên PV ( $\times 100 \text{ W/m}^2$ )						Số đỉnh	$I_{mp}$ (A)	$V_{mp}$ (V)	$P_{max}$ (W)
		PV <sub>1</sub>	PV <sub>2</sub>	PV <sub>3</sub>	PV <sub>4</sub>	PV <sub>5</sub>	PV <sub>6</sub>				
SC	Đồng nhất	10	10	10	10	10	10	1	3,499	102,65	359,27
PC								1	20,99	17,11	359,10
S-PC								1	7,01	51,23	359,19
SC	Ngẫu nhiên	10	8	7	5	4	2	6	1,48	91,85	135,94
PC								1	12,68	16,65	211,15
S-PC								3	3,28	53,04	174,11
SC	Hàng	3	3	3	9	9	9	2	3,15	51,19	161,17
PC								1	12,67	16,66	211,09
S-PC								3	4,2	34,8	146,27
SC	Cột	2	5	8	2	5	8	3	1,81	70,32	127,39
PC								1	10,47	16,67	174,51
S-PC								3	3,62	35,13	127,32
SC	Đường chéo	9	9	5	2	5	9	3	1,83	90,02	164,32
PC								1	13,55	16,94	229,58
S-PC								3	4,93	34,70	171,05
SC	Trung tâm	7	3	7	3	7	7	2	2,45	67,61	165,64
PC								1	11,93	16,68	199,06
S-PC								2	4,9	33,76	165,59
SC	Hai góc	9	6	5	7	5	2	5	1,82	87,88	160,05
PC								1	11,93	16,68	199,03
S-PC								3	3,97	35,08	139,32
SC	Ngẫu nhiên	10	7	6	3	3	7	4	2,21	70,89	156,37
PC								1	12,68	16,66	211,18
S-PC								3	4,71	34,62	163,05

- Kiểu SC tạo ra nhiều cực trị nhất, nếu bức xạ trên mỗi tấm PV là khác nhau thì số cực trị trong chuỗi tương đương với số tấm pin trong mỗi liên kết. Công suất của nó chỉ lớn hơn của S-PC khi bóng che theo hàng và hai góc.
- SC là kiểu liên kết đạt được mức điện áp tối đa so với các cấu hình khác. Mọi PV trong hệ thống đều có chung một giá trị dòng điện và nhỏ hơn dòng ngắn mạch ( $I_{sc}$ ) của một tấm PV. Ưu điểm này góp phần giảm áp lực lên các khóa điều khiển của các bộ chuyển đổi công suất. Tuy nhiên nhược điểm lớn nhất cũng phát sinh từ đặc điểm này. Khi xảy ra PSC, tại những vị trí nhận được bức xạ ít nhất, thậm chí không đủ năng lượng sinh điện vẫn phải duy cùng một mức dòng điện trong liên kết. Vấn đề này khiến chúng bị đảo trạng thái hoạt động dẫn đến phát nóng cục bộ (hot-spot) và có thể gián đoạn cung cấp điện nếu không có biện pháp bảo vệ [18]. Để khắc phục điều này, diode-bypass được sử dụng để cách ly các điểm yếu kể trên ra khỏi hệ thống. Nó đồng nghĩa với việc chấp nhận thất thoát năng lượng khi mà những vị trí nhận được ít bức xạ nhất không thể phát công suất [19]. Hơn nữa, nhiều MPP cũng làm giảm hiệu quả của cấu hình này vì phải chọn giải pháp đủ mạnh để tránh LMPP nên khó đạt được tốc độ hội tụ nhanh. Như vậy, giảm tổn thất công suất, phân biệt GMPP giữa nhiều LMPP để tăng tốc độ MPPT là những vấn đề cần khắc phục của SC.
- Ngược lại, PC tuy có dòng điện lớn nhưng điện áp ra khá ổn định ở mức thấp và không cần giải quyết sự cố “hot-spot”. Ngoài ra, điện áp tại MPP của cấu hình này ít bị ảnh hưởng bởi bức xạ, nghĩa là nó hầu như ổn định khi xảy ra PSC. Do đó, trong mọi điều kiện vận hành nó chỉ có một cực trị [19]. Ưu điểm này khiến cho việc ứng dụng các thuật toán tìm kiếm MPP đơn giản và hiệu quả hơn, từ đó gia tăng hiệu suất sinh điện và nhanh chóng ổn định tại vị trí cân bằng [20]. Cấu hình này khá phù hợp đối với những yêu cầu điện áp và công suất vừa phải. Trong các ứng dụng lớn hơn, yêu cầu độ chắc chắn và an toàn cao hơn đối với các khóa chuyển mạch có thể dẫn đến thất thoát năng lượng trên chúng. Theo tài liệu [21], đây cũng là cấu hình ít tổn thất, hiệu suất cao và có hệ số lấp đầy (Fill factor – FF) lớn nhất trong mọi điều kiện vận hành.

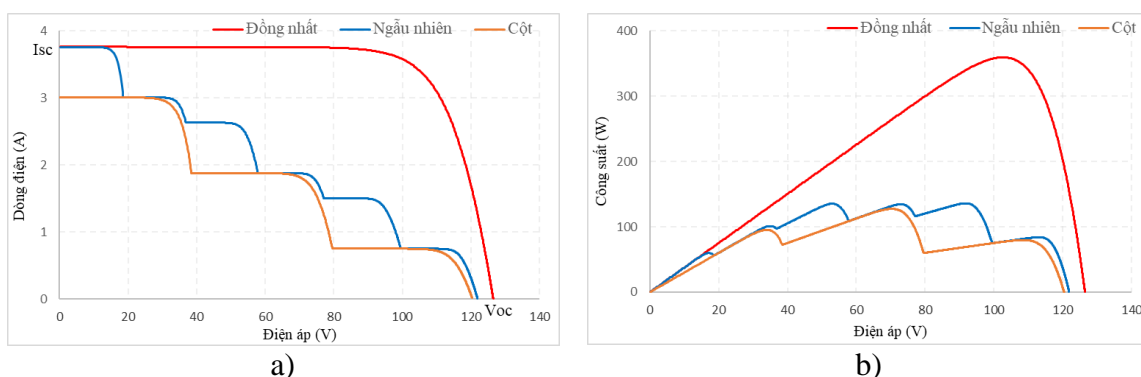
- Do khả năng điều chỉnh linh hoạt dòng điện và điện áp nên S-PC được ứng dụng và nghiên cứu rộng rãi [9]. Với cùng số lượng PV thì kiểu liên kết này có dòng điện và điện áp vừa phải, công suất phát tương đương so với hai kiểu cơ bản kể trên trong cùng điều kiện vận hành đồng nhất. Bằng cách thay đổi số PV trong một chuỗi và số chuỗi song song trong một hệ thống thì S-PC có thể đáp ứng trên phạm vi rộng về yêu cầu dòng điện và điện áp. Nó cũng là cấu hình có kết nối đơn giản, vận hành kinh tế và thông dụng nhất vì không có mối nối dư thừa trong các điều kiện vận hành khác nhau bởi vì chi phí và tổn thất công suất trên các mối nối dư thừa trong các cấu hình cải tiến khác là không nhỏ [21]. Tuy nhiên, do tồn tại kiểu SC trong liên kết nên nó cũng không tránh khỏi những nhược điểm như đã phân tích ở trên khi xảy ra PSC. Nghĩa là vẫn phải giải quyết bài toán đa cực trị để tăng hiệu suất và tốc độ MPPT.

Tóm lại, kết quả khảo sát có thể giúp nhận định một cách chủ quan rằng: Với những yêu cầu về công suất và điện áp thấp thì kiểu PC là một chọn lựa lý tưởng. Trong khi đó, ở những phạm vi công suất lớn, các cấu hình kết hợp sẽ được ưu tiên để đảm bảo dòng điện và điện áp không quá lớn, ảnh hưởng đến việc thiết kế các khóa chuyển mạch và giảm tổn thất công suất. Ngoài cấu hình PC ra, tất cả các cấu hình còn lại đều phải đối mặt với một thực tế là phân biệt GMPP trong nhiều LMPP để nâng cao hiệu suất sinh điện. Bài toán này xuất phát từ các liên kết nối tiếp trong mọi cấu hình. Do đó, dạng đường cong đặc tuyến ngõ ra trong chuỗi nối tiếp cũng cần được khảo sát dưới tác động của môi trường làm việc. Công việc này được thực hiện trên dữ liệu của kiểu SC được trình bày trong Hình 2.5 dưới đây. Từ dạng sóng I-V và P-V thu thập được có thể nhận thấy:

- Số cực trị tỷ lệ thuận với số PV nhận được bức xạ khác nhau trong liên kết. Cụ thể, trong trường hợp bóng che ngẫu nhiên, mỗi tấm PV nhận được mức năng lượng khác nhau sẽ tạo ra một giá trị LMPP. Nhưng khi tạo bóng theo cột với ba mức bức xạ trên toàn bộ hệ thống, số đỉnh cực trị giảm đi một nửa.
- Giá trị dòng điện ngắn mạch của PVS tỷ lệ thuận với bức xạ mà nó nhận được và bị suy giảm khi gia tăng mức che bóng.



- Khi xảy ra PSC, giá trị dòng điện ngắn mạch của PVS ( $I_{sc,sys}$ ) bằng với  $I_{sc}$  của PV nhận được nhiều năng lượng nhất trong liên kết.
- Khi xảy ra PSC, giá trị điện áp hở mạch cũng suy giảm nhưng không đáng kể.
- GMPP có thể nằm ở vị trí bất kỳ nào trên đặc tuyến.
- Điều kiện đồng nhất luôn sinh ra công suất cực đại lớn nhất và có một cực trị.



**Hình 2.5.** Đặc tuyến a) I-V, b) P-V của cấu hình SC khi điều kiện thay đổi

Những đặc điểm về các đường đặc tuyến khi xảy ra PSC sẽ là cơ sở xem xét, phân tích các trạng thái hoạt động của PVS một cách hiệu quả. Trên cơ sở các tham số dòng điện và điện áp thu được, có thể mô phỏng lại chúng dựa vào những tính chất đặc trưng để xác định vùng làm việc tối ưu nhất. Kết quả phân tích này đã được sử dụng trong các công trình nghiên cứu liên quan số {4}, {5}, {8}, và {9}.

## 2.2 Các kỹ thuật MPPT cơ bản

Mục đích của các thuật toán MPPT là khai thác tối đa năng lượng từ PVS trong mọi điều kiện làm việc. Đặc biệt, khi xảy ra PSC, PVS sinh ra nhiều cực trị, nó đóng một vai trò cực kỳ quan trọng trong việc xác định chính xác GMPP để nâng cao hiệu suất phát điện. Kỹ thuật này có thể được diễn giải như sau: khi điều kiện làm việc thay đổi, các thuật toán MPPT sẽ điều khiển để vị trí vận hành của PVS gần với điểm có công suất lớn nhất theo thiết kế. Tuy nhiên, hạn chế của các giải pháp kỹ thuật là sự gia tăng chi phí khi phải sử dụng các hệ thống đo lường, cảm biến, độ phức tạp của cấu trúc và các phép tính đòi hỏi phải có các phần cứng và bộ xử lý đủ mạnh. Điều này dẫn tới thời gian tìm kiếm GMPP gia tăng gây gián đoạn phát điện tạm thời trong lúc bức xạ biến động hoặc PSC. Để giải quyết tồn tại trên, một loạt các giải

thuật được nghiên cứu, phát triển, cải tiến, và điều chỉnh hàng năm. Bất kỳ giải thuật hay phiên bản cải tiến nào cũng luôn hướng tới mục tiêu tối ưu hóa khả năng ứng dụng, nâng cao hiệu suất MPPT, giảm độ phức tạp và chi phí thực hiện, duy trì sự ổn định dạng sóng ra tại vị trí cân bằng trong thời gian nhanh nhất.... [22], [23]. Rất khó để tìm được một giải pháp thỏa mãn mọi tiêu chí. Nghiên cứu trước đây cũng chỉ ra rằng, các phương pháp truyền thống có ưu điểm là đơn giản, dễ thực hiện nhưng kém hiệu quả khi PSC xảy ra do bị bẫy vào cực trị địa phương (LMPP). Ngược lại, nhóm giải thuật tối ưu hóa có hiệu suất cao nhưng cấu trúc phức tạp và không kinh tế. Các nhóm giải pháp kết hợp có khả năng GMPPT vượt trội nhưng cũng không tránh khỏi chi phí cao và đôi khi chịu áp lực về các phép tính khi phải tái khởi động lại trong những trường hợp PSC [24], [25]. Những phân tích trên đây cho thấy, có nhiều tiêu chuẩn để đánh giá tính hiệu quả của một giải pháp MPPT, mỗi loại giải thuật đều có những điểm mạnh, điểm yếu khác nhau. Dưới tác động của PSC, ngoại trừ cấu hình PC, mọi cấu hình đều sinh ra nhiều MPP gây sụt giảm công suất nếu không xác định được điểm làm việc tốt nhất. MPPT là kỹ thuật nhằm đạt được hiệu suất phát điện tối đa của PVS trong mọi điều kiện vận hành. Nói cách khác, chúng là những thuật toán có thể tránh bẫy LMPP khi PVS làm việc trong PSC. Có rất nhiều giải pháp đã được giới thiệu, mỗi tài liệu có những phương pháp tiếp cận, góc nhìn và cách giải quyết bài toán mục tiêu khác nhau. Tuy nhiên, mục tiêu chung vẫn là gia tăng tốc độ hội tụ, nâng cao hiệu suất để thu được năng lượng tối đa trong thời gian ngắn nhất. Dựa trên một số tiêu chuẩn nhất định, nội dung nghiên cứu này sẽ phân tích một số giải thuật thông dụng đã được xuất bản gần đây nhất cùng những tiêu chuẩn cơ bản như:

- Tốc độ MPPT: là thời gian để đạt được sự ổn định tại MPP. Nếu giải thuật mất nhiều thời gian hơn khi môi trường làm việc thay đổi thì có thể nó sẽ kém hiệu quả hơn khi bỏ sót các MPP trong quá trình hội tụ.
- Tham số điều khiển: là tín hiệu sử dụng để điều khiển công suất ngõ ra, nó liên quan đến lượng cảm biến sử dụng trong cấu hình nghiên cứu. Hầu hết các giải thuật sử dụng hai tham số chính là dòng điện và điện áp.
- Phụ thuộc vào kiểu PV: một số thuật toán được phát triển dựa trên đặc điểm của

PV. Vì vậy rất khó tìm kiếm MPP nếu không có thông số chi tiết của PVS.

- Sự phức tạp: độ chính xác tổng thể của giải pháp phụ thuộc vào thiết kế thuật toán MPPT. Các giải thuật cổ điển thường đơn giản nhưng kém hiệu quả trong điều kiện PSC. Ngoài ra, nó còn làm tăng dao động quanh MPP. Vì vậy để giải quyết vấn đề này, các thuật toán cải tiến trở nên phức tạp hơn.
- Khả năng ổn định: Các thuật toán cổ điển thường dao động quanh MPP gây tổn thất năng lượng. Khả năng ổn định trong mọi điều kiện vận hành cũng là chỉ tiêu cần được cải thiện trong những nghiên cứu ứng dụng trong lĩnh vực MPPT
- Chi phí: tính kinh tế cũng là yếu tố quan trọng để cân nhắc khi quyết định sử dụng thuật toán nào.
- Khả năng xử lý bóng che: hầu hết các thuật toán đều hiệu quả trong điều kiện đồng nhất. Nhưng khi có PSC, khả năng phân biệt GMPP trong số các LMPP là khác nhau. Các thuật toán lai xử lý điều này tốt hơn rất nhiều nhưng chúng lại khá phức tạp.
- Hiệu suất: đây là chỉ tiêu khá quan trọng đánh giá độ chính xác của giải thuật. Hầu hết các thuật toán đều có hiệu suất cao khi điều kiện vận hành đồng nhất hoặc cố định. Tuy nhiên khi điều kiện thay đổi hoặc PSC thì chúng trở nên kém chính xác hơn.
- Sử dụng bộ chuyển đổi DC/DC: đa số các ứng dụng đều dùng bộ chuyển đổi tăng áp để MPPT. Điều này dễ hiểu bởi nhu cầu sử dụng điện năng với công suất lớn trong khi đó khả năng sinh điện của mỗi tấm PV là có giới hạn.

Để có cái nhìn tổng quan về những thuật toán MPPT áp dụng cho PVS trong những năm gần đây, luận án tóm lược một số giải thuật thông dụng nhất sau đây.

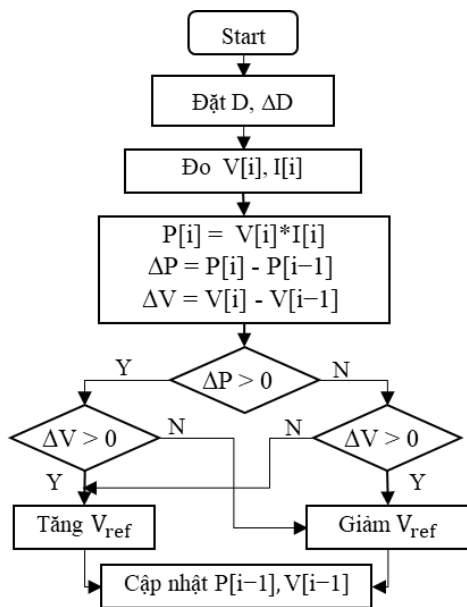
## **2.2.1. Nhóm giải thuật truyền thống**

### **2.2.1.1. Thuật toán Perturbation and Observation**

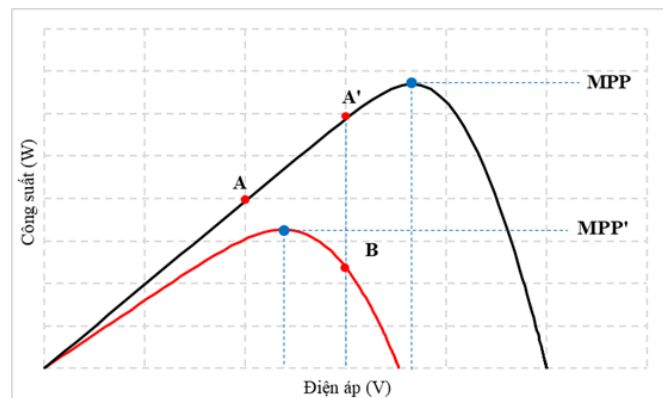
Đây là phương pháp cơ bản và thông dụng nhất để xác định GMPPT. Nguyên lý vận hành dựa trên sự nhiễu loạn một số giá  $\Delta V$  giữa hai lần đo thứ  $i$  ( $V_{[i]}$ ) và lần đo ngay trước đó ( $V_{[i-1]}$ ) để quan sát khả năng biến đổi công suất  $\Delta P$  giữa hai lần đo

tương ứng này ( $P_{[i]}$  và  $P_{[i-1]}$ ) ở ngõ ra dựa vào đặc tuyến P-V của PVS. Nếu thay đổi điện áp mà  $\Delta P > 0$  nghĩa là đang tiến về nhưng chưa đạt tới điểm MPPT. Ngược lại, có nghĩa là đang đi xa khỏi điểm cực trị. Thuật toán hội tụ khi  $|\Delta P| \leq \varepsilon$  – một giới hạn sai số chọn trước nào đó tùy thuộc yêu cầu của độ chính xác [26]. Như vậy, dựa vào giá trị công suất thu được ở lần lặp hiện tại và ngay trước đó để điều chỉnh tăng hoặc giảm điện áp tham chiếu ( $V_{ref}$ ) nhằm đạt được công suất tối đa của PVS. Hai thông số của hệ thống PV là điện áp ( $V_{pv}$ ) và dòng điện ( $I_{pv}$ ) được dùng như các biến đo lường trong giải thuật này [27], [28].

Giải thuật này có ưu điểm là đơn giản, dễ thực hiện, chi phí thấp, cần ít thông số đo lường, ít biến điều khiển nhưng có độ tin cậy và khả năng ứng dụng chưa cao vì những nguyên nhân như:



a)



b)

**Hình 2.6.** Thuật toán P&O a) lưu đồ; b) sai số giữa hai lần lấy mẫu [4].

Khó cân bằng giữa hiệu suất MPPT thời gian xử lý hội tụ. Có thể giải thích vấn đề này như sau: giải thuật dựa vào bước điều chỉnh để kiểm tra vị trí làm việc hiện tại so với giá trị cực đại. Để tăng tốc độ hội tụ, nó sử dụng bước nhảy rộng hơn để giảm số lần tìm kiếm. Kết quả là sai số lớn khi nó hội tụ tại điểm làm việc ổn định nên hiệu suất sụt giảm. Ngược lại, để nâng hiệu suất đồng thời ổn định tại điểm làm việc thì

cần sử dụng các bước điều chỉnh nhỏ nên thời gian xử lý sẽ kéo dài. Hình 2.6a giới thiệu lưu đồ của thuật toán P&O.

Tốc độ xử lý chậm và khả năng đáp ứng động kém, điều này được thể hiện trong Hình 2.6b. Ngay giữa hai lần lấy mẫu mà có sự thay đổi bức xạ sẽ khiến cho kết quả điều chỉnh không chính xác. Cụ thể; trong khi đang điều chỉnh từ A sang A' thì bức xạ thay đổi làm nó xác định được là B (không phải A'). Tại đây bước tiếp theo có giá trị  $\Delta P \cdot \Delta V > 0$  nên cần tăng điện áp. Do đó, sau một bước tính toán nữa nó mới nhận ra đã dịch chuyển ngược chiều tới điểm hội tụ. Kết quả là cần nhiều thời gian tìm kiếm hơn khi chế độ làm việc biến động. Bên cạnh đó, ngõ ra luôn dao động ở điểm vận hành và điện áp biến đổi lớn cũng là nguyên nhân gây tổn thất năng lượng.

Để khắc phục nhược điểm trên, các phiên bản cải tiến P&O liên tục được cập nhật giới thiệu như sử dụng bước điều chỉnh biến đổi thay cho giá trị cố định [29]. Giải pháp sử dụng các bước điều chỉnh lớn khi khởi tạo để tăng tốc, sau đó giảm kích thước bước khi tiến gần tới mục tiêu để tăng hiệu suất. Mặc dù đã đạt được một số thành tựu nhất định nhưng tốc độ hội tụ nhanh nhất là 27 ms và hiệu suất MPPT ở mức khiêm tốn 96,3%. Để cải thiện hơn nữa, các xuất bản gần đây tập trung giới hạn lại vùng tìm kiếm bằng cách kết hợp với PSO để giảm số lần lặp với một bước điều chỉnh nhỏ [30]. Những nỗ lực thay đổi đã mang lại kết quả khả quan hơn khi phương pháp này có thể nâng hiệu suất lên tới 98,73% tăng hơn 2,5% về hiệu suất so với phương pháp bước điều chỉnh. Tuy nhiên, thời gian tìm kiếm của giải pháp này hiện chỉ đạt 49,5 ms tăng hơn 83% so với phiên bản độc lập. Như vậy, thách thức về tốc độ hội tụ vẫn cần được cải thiện trong những nghiên cứu tiếp theo.

### **2.2.1.2. Thuật toán Incremental Conductance**

Thuật toán InC khắc phục nhược điểm của giải thuật P&O bằng cách sử dụng giá trị điện dẫn gia tăng của PV và đặc điểm về độ dốc của đường cong P-V [31].

Độ dốc bằng 0 ( $dP/dV = 0$ ) tại điểm MPP.

Độ dốc dương ( $dP/dV > 0$ ) tại bên trái điểm MPP.

Độ dốc âm ( $dP/dV < 0$ ) tại bên phải điểm MPP.

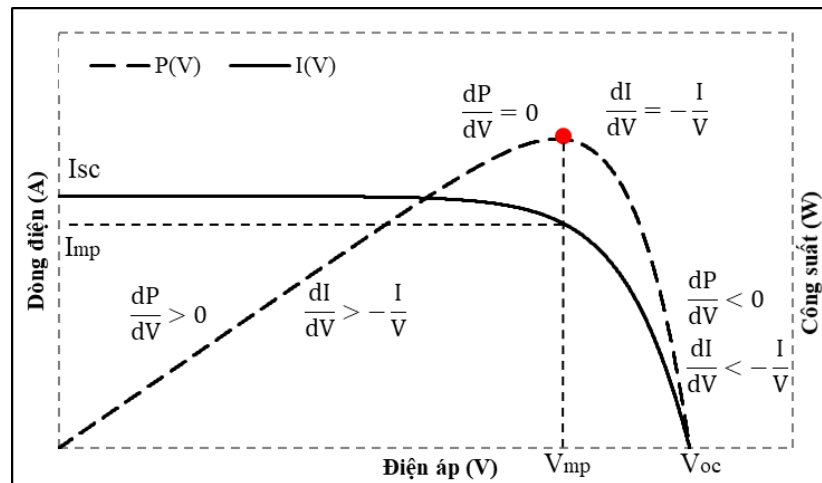
$$\text{Mà } \frac{dP}{dV} = \frac{d(I.V)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V}$$

Nên việc xác định vị trí điểm hoạt động tương đương với vấn đề:

$\Delta I/\Delta V = -I/V$ , tại điểm MPP.

$\Delta I/\Delta V > -I/V$ , tại bên trái điểm MPP.

$\Delta I/\Delta V < -I/V$ , tại bên phải điểm MPP.



**Hình 2.7.** Nguyên lý MPPT của giải thuật InC.

Giá trị gia tăng  $\Delta I$  và  $\Delta V$  được xác định liên tục giữa hai lần lấy mẫu liên tiếp. Khi  $\Delta I/\Delta V \neq -I/V$  thì điểm làm việc có thể ở bên trái hoặc bên phải MPP. Để đưa điểm hoạt động về đúng MPP đồng nghĩa với việc điều chỉnh tăng hoặc giảm điện áp tương ứng (Hình 2.7). Thuật toán này có một vài ưu điểm so với P&O như: *i* - xác định được khoảng cách tương đối giữa điểm làm việc với MPP do đó có thể xác định tương đối được giá trị thời gian hội tụ; *ii* - ít dao động hơn quanh MPP nên ít tổn thất hơn. Tuy nhiên, nó cũng tồn tại một vài nhược điểm như: *i* - không thể tìm được GMPP trong số các LMPP; *ii* - không thể đồng thời đạt được khả năng theo dõi chính xác với phản ứng động nhanh chóng và ổn định tốt. *iii* - kích thước và giới hạn sai số lớn sẽ tăng tốc độ hội tụ nhưng mất ổn định quanh vị trí MPP. Ngược lại, sai số giới hạn nhỏ sẽ ít dao động và điểm làm việc sát với MPP hơn nhưng gia tăng thời gian hội tụ dẫn đến giảm hiệu quả [32].

Để khắc phục nhược điểm của giải thuật này, tài liệu [33] đã sử dụng một kích

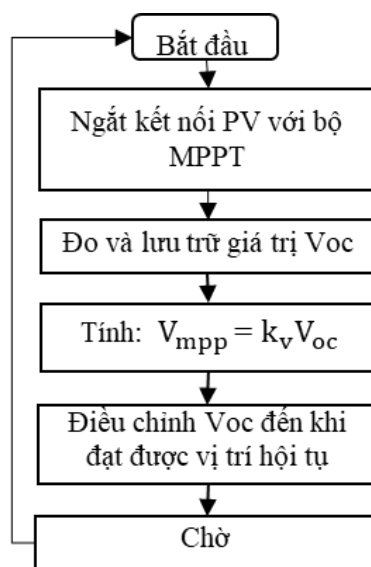
thước bước thích nghi để tăng hiệu suất MPPT và ổn định tại điểm làm việc cân bằng. Trong đó, giá trị nhiễu loạn của kích thước phụ thuộc vào sai số điện áp và công suất mỗi khi có sự thay đổi bức xạ và được điều chỉnh trong khoảng từ 1% đến 2,5%. Kết quả mô phỏng trên giải thuật này có hiệu suất khoảng 99,94% với thời gian tìm kiếm trung bình khoảng 0,4 s. Tuy nhiên, giải pháp này mới chỉ áp dụng cho PVS hoạt động trong điều kiện đồng nhất. Khả năng tránh bẫy LMPP khi PSC chưa được đề cập. Trong khi đó, sự kết hợp giữa InC với PSO trong tài liệu [30] đã tăng tốc độ hội tụ của giải pháp lên 0,043 s nghĩa là chỉ bằng khoảng 10% so với nghiên cứu trước đó. Tuy nhiên, hiệu suất mà nó mang lại sụt giảm xuống còn 99,07%. Một phiên bản điều chỉnh khác của nó trong tài liệu [34] đã khảo sát ảnh hưởng của cả hai tham số điện áp và dòng điện theo bức xạ mặt trời và đường đặc tính tải để đề xuất kích thước bước thay đổi trong ba mức 0,001; 0,005; và 0,01. Kết quả mô phỏng có thể đạt hiệu suất tối đa 100% và tốc độ nhanh nhất là 0,1 s, đây là kết quả tốt nhất so với các giải thuật khác trong cùng điều kiện làm việc. Nhưng cũng giống như những giải pháp cải tiến trước, khả năng tránh bẫy LMPP khi xảy ra PSC cũng không được đề cập trong phiên bản này. Tóm lại, so với P&O thì InC có khả năng ổn định quanh vị trí cân bằng hơn nhưng lại kém hiệu quả trong bài toán đa cực trị.

### **2.2.1.3. Phương pháp Constant Voltage**

Trong phương pháp CV, thường chọn giá trị điện áp cố định cho MPP, giống với giá trị được cung cấp ở điều kiện thử nghiệm tiêu chuẩn. Giá trị điện áp cố định này thường nằm trong khoảng từ 72% đến 80%  $V_{oc}$  và được sử dụng để điều chỉnh chu kỳ làm việc của bộ chuyển đổi MPPT thông qua vòng điều khiển phản hồi. Phương pháp CV được xây dựng đơn giản và chỉ yêu cầu phép đo điện áp PVS. Nó có thể được thực hiện bằng cách sử dụng cả mạch tương tự và kỹ thuật số [23].

Trong quá trình xử lý để lấy điện áp tham chiếu, PVS tạm thời được ngắt ra khỏi bộ MPPT để đo giá trị  $V_{oc}$ . Sau khi MPPT tính toán điểm vận hành chính xác với giá trị  $k_v$  cài đặt trước đó, hệ thống sẽ điều chỉnh điện áp của PV đến khi hội tụ. Rõ ràng phương pháp này có nhược điểm là luôn gây ra gián đoạn giữa PVS với phụ tải. Lưu đồ giải thuật của phương pháp CV được giới thiệu trong Hình 2.8.

Để không phải gián đoạn PVS trong khi MPPT, công trình nghiên cứu [35] đã sử dụng thêm hai bộ cảm biến nhiệt độ và bức xạ nhằm điều chỉnh giá trị điện áp tham chiếu trong một phạm vi nhất định đã được khảo sát trước đó. Nghĩa là, với một loại PV cho trước, việc khảo sát điện áp phụ thuộc vào hai điều kiện này được tiến hành. Dữ liệu sau đó được dùng làm tham chiếu cho phương pháp dò tìm MPP. Dựa trên sự điều chỉnh này, giải pháp đã đạt hiệu suất tối đa 100% trong một vài trường hợp với tốc độ nhanh nhất khoảng 3 s. Tuy nhiên, các kịch bản mô phỏng chưa đề cập đến vấn đề tránh bẫy LMPP khi xảy ra PSC là điểm hạn chế cần được khắc phục. Hơn nữa, nhược điểm chung của phương pháp CV có thể được thấy trên lưu đồ giải thuật Hình 2.8. Với nguyên lý điều chỉnh điện áp  $V_{oc}$  đạt đến vị trí hội tụ sau đó chờ để thực hiện lại vòng lặp, giải pháp dò tìm liên tục không có điểm dừng khiến cho tín hiệu ngõ ra kém ổn định. Trong thời gian chờ cập nhật lại điện áp tham chiếu thì điều kiện vận hành có thể đã thay đổi. Do đó, giá trị công suất đạt được chưa chắc đã chính xác tại MPP [36].



**Hình 2.8.** Lưu đồ giải thuật CV [23]

#### 2.2.1.4. Phương pháp Constant Current

Nguyên lý thực hiện của phương pháp CC cũng giống như CV, tuy nhiên ở đây sử dụng dòng điện thay cho điện áp. Tùy thuộc vào từng loại PV khác nhau sẽ có hệ số tỷ lệ  $k_i$  khác nhau. Nhưng nhìn chung chúng có giới hạn trong khoảng từ 0,78



đến 0,92 [4]. Tuy nhiên, giá trị  $I_{sc}$  của PVS khá nhạy cảm với những biến động của bức xạ mặt trời. Do đó, nếu sử dụng một giá trị tham chiếu cho mọi điều kiện vận hành thì hiệu suất MPPT chắc chắn sẽ sụt giảm. Để khắc phục điều này, trong tài liệu [37], nhóm tác giả đã kết hợp giữa CC với GWO để gia tăng hiệu suất và tốc độ MPPT trong PSC. Có lẽ đây là trường hợp hiếm hoi mà nghiên cứu dựa trên các giải pháp cơ bản xử lý ảnh hưởng của PSC lên PVS. Mặc dù tốc độ hội tụ khoảng 0,7 s nhưng hiệu suất cao nhất đạt được rất đáng khích lệ, khoảng 99,88%.

**Bảng 2.2.** 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	[33]/2021	[33]/2021	[35]/2017	[37]/2024

T: thấp; TB: trung bình; K: không; PT: phụ thuộc loại PV..

Tóm lại, với nhóm giải thuật cơ bản, ưu điểm dễ thấy nhất là tính đơn giản, chi phí thấp và dễ thực hiện. Chúng chủ yếu dựa vào hai tham số  $I_{sc}$  và  $V_{oc}$  của đường cong I-V để dò tìm điểm làm việc tối ưu. Tuy nhiên, hiệu suất và tốc độ hội tụ là hai tiêu chuẩn khó thỏa mãn đồng thời. Hơn nữa, do đơn giản trong các phép tính nên chúng không hiệu quả khi xử lý PSC. Các nghiên cứu trước đây cũng chủ yếu tập trung vào mô phỏng MPPT khi điều kiện làm việc thay đổi nhưng đồng bộ trên toàn hệ thống. Để nâng cao hiệu suất hơn nữa của nhóm này, cần phải có giải pháp cải tiến đồng bộ hoặc một phương pháp tiếp cận mang tính đột phá mới để gia tăng hiệu suất

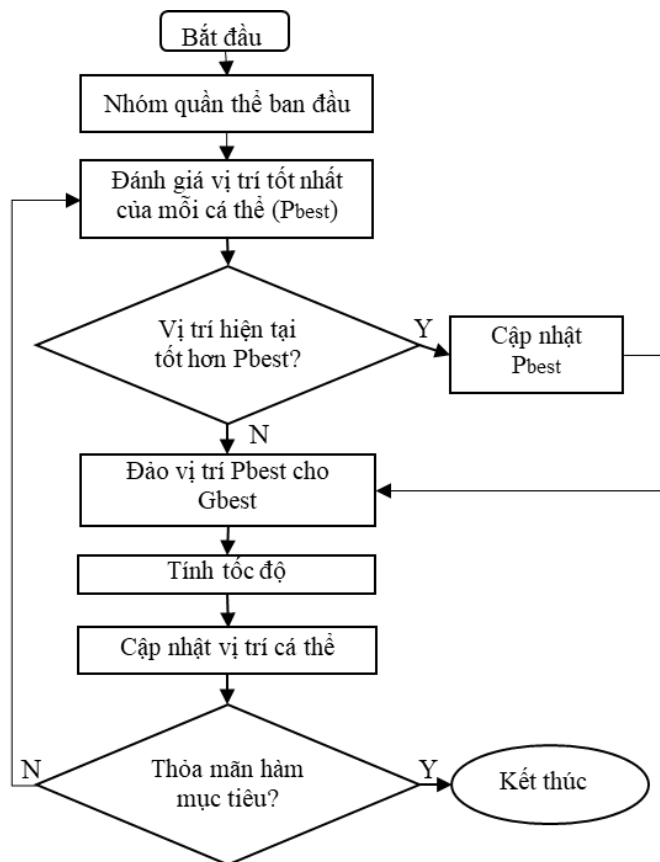
đồng thời tận dụng ưu điểm đơn giản để tăng tốc độ xử lý. Mặt khác, GMPPT trong điều kiện PSC cũng là nhược điểm cần được cải thiện của nhóm giải thuật này.

Một số đặc điểm cơ bản của nhóm giải thuật truyền thống được tổng hợp và so sánh trong Bảng 2.2.

## 2.2.2. Nhóm thuật toán tối ưu

### 2.2.2.1. Giải thuật Particle Swarm Optimization

PSO là thuật toán tối ưu bầy đàn thông minh thường dùng trong các bài toán tối ưu hóa số. PSO ngày càng phổ biến do tính hiệu quả và khả năng ứng dụng của nó trong việc giải quyết các bài toán liên quan đến khoa học và kỹ thuật. PSO dựa trên một tập hợp được khởi tạo ngẫu nhiên và mỗi cá thể tìm kiếm vị trí tối ưu của nó ( $P_{best}$ ) trong không gian giải pháp bằng cách cập nhật lặp đi lặp lại. Vị trí tốt nhất trong các giá trị  $P_{best}$  được giữ lại nhưng một giải pháp tối ưu toàn cục cho cả bầy đàn ( $G_{best}$ ). Lưu đồ giải thuật PSO giới thiệu trong Hình 2.9.



Hình 2.9. Lưu đồ giải thuật PSO [38].

Phương pháp PSO khá hiệu quả khi xử lý đường cong P-V trong các trường hợp PSC. Với cấu trúc đơn giản và hiệu suất cao, đây là giải thuật được ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực MPPT. Tuy nhiên, tốc độ và khả năng tránh bẫy LMPP phụ thuộc nhiều và kích thước bầy đàn. Vấn đề này được giải thích như sau: giải thuật cần một lượng quần thể đủ lớn để phân biệt chính xác GMPP trong điều kiện PSC. Kết quả là số phép tính gia tăng nên tốc độ hội tụ không được cải thiện. Các phiên bản sửa đổi, cập nhật, cải tiến luôn nỗ lực khắc phục nhược điểm của nó trong những xuất bản gần đây. Một trong những nghiên cứu mới nhất tập trung giải quyết hai mục tiêu là tăng tốc độ hội tụ bằng cách sử dụng kích thước bầy đàn thích nghi đồng thời tránh bẫy LMPP được giới thiệu trong [39]. Giải pháp này ban đầu sử dụng kích thước quần thể trải rộng từ  $0,1D$  đến  $0,9D$ . Sau mỗi bước xác định  $G_{best}$  và điều chỉnh tham số cho các cá thể thì một số cá thể kém ưu thế sẽ bị loại bỏ. Bằng cách này, số lượng cá thể sẽ giảm dần sau các phép tính, qua đó không gây áp lực tính toán lên toàn giải pháp. Tuy nhiên, phương pháp này vẫn còn nhiều hạn chế như:

Chỉ mô phỏng trường hợp có hai cực trị trong điều kiện PSC và cũng là trường hợp bóng che duy nhất. Điện áp làm việc tại MPP trong hai trường hợp khảo sát đồng nhất và PSC gần như giống nhau nên khó có thể khẳng định nó có thực sự hiệu quả trong điều kiện PSC. Nghĩa là nếu ở điều kiện đồng nhất, giá trị  $V_{mp}$  rơi vào vùng điện áp cao (xấp xỉ  $V_{oc}$ ), thì trong điều kiện PSC nên chọn kích bản với  $V_{mp}$  thuộc miền điện áp thấp để đảm bảo tính đa dạng và khả năng vượt trội của giải thuật trong mọi điều kiện.

Phân biệt GMPP trong tổng số hai LMPP nhưng số lượng cá thể được chọn trong khoảng từ 6 đến 20 là chưa thực sự hiệu quả. Hơn nữa, nếu kích thước quần thể nhỏ hơn 5 thì tỷ lệ sai số của giải pháp là 100%. Kết quả này khiến cho giải pháp kém khả thi trong các ứng dụng thực tế. Vấn đề này có thể được giải thích như sau: Với 2 đỉnh cực trị trên đặc tuyến P-V, nếu sử dụng hai cá thể dò tìm từ hai phía ứng với  $D_1 = 0,1$  và  $D_2 = 0,9$  thì chắc chắn luôn tìm ra cực trị. Nhưng giải pháp đề xuất này phải cần tới sáu cá thể nên tốc độ hội tụ của nó chỉ dừng lại ở 0,0258 s.

Nhìn chung PSO và những cải tiến của nó đã thoát khỏi hạn chế về bẫy cực trị

của các giải pháp truyền thống vận hành trong PSC. Tuy nhiên, tốc độ hội tụ vẫn là một nhược điểm khi nó phụ thuộc vào số lượng cá thể trong quần thể.

#### **2.2.2.2. Giải thuật Artificial Bee Colony**

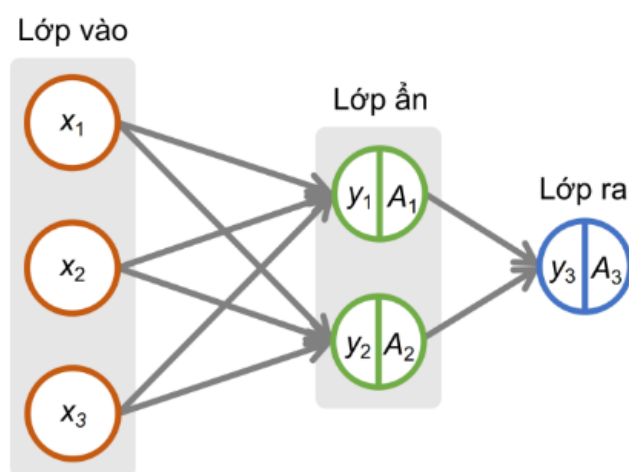
ABC là một thuật toán tối ưu hóa dựa trên hành vi của ong tự nhiên. Nó được phát triển để giải quyết đa chiều và đa phương thức bài toán tối ưu hóa trong lĩnh vực kỹ thuật điện như: điều khiển dòng điện tối ưu, kích thước tối ưu, kỹ thuật điều khiển và trong lĩnh vực cơ khí để tiếp cận thiết kế tối ưu.

Kỹ thuật MPPT dựa trên ABC đã được triển khai để kiểm soát tỷ số đóng điện của bộ chuyển đổi năng lượng để truy xuất và bám MPP của PVS. Khả năng của giải pháp đề xuất đã được kiểm chứng dưới nhiều điều kiện bóng che. Kết quả mô phỏng chứng minh rằng thuật toán ABC thực hiện tốt hơn trong mọi tình huống động để trích xuất MPP so với thuật toán PSO. Nó không phụ thuộc vào đặc điểm của PVS và chỉ yêu cầu về số lượng các hạt nhân được mắc nối tiếp. Thuật toán ABC có lợi thế như đơn giản, mạnh mẽ, chính xác và khả năng cho kết quả tốt hơn trong các trạng thái động. Trong công trình nghiên cứu [40], nhóm tác giả đã đề xuất giải pháp điều khiển hai vòng (dòng điện và điện áp) lồng nhau ứng dụng giải thuật ABC. Trong đó, mỗi vòng điều khiển sẽ giám sát một tham số đầu vào và điều chỉnh giá trị tham chiếu theo thay đổi của môi trường. Bằng cách phân tầng kiểm soát này, giải thuật đã mô phỏng trong các điều kiện thay đổi về bức xạ, nhiệt độ và cả hai tham số. Kết quả cho thấy hiệu suất lớn nhất của nó khoảng 99,8% khi bức xạ thay đổi, hai trường hợp còn lại, hiệu suất dưới 99%. Mặc dù giải pháp được khẳng định có tốc độ hội tụ cao hơn P&O nhưng số liệu cụ thể không được đề cập. Hơn nữa, những điều kiện mô phỏng đề xuất cũng chưa xem xét hiệu quả trong điều kiện PSC.

#### **2.2.2.3. Thuật toán Ant Colony Optimization**

ACO là giải pháp tối ưu hóa khác được sử dụng để MPPT lấy cảm hứng từ tối ưu hóa hành vi tìm kiếm của các đàn kiến. Nó là một kỹ thuật dùng cho giải pháp tìm đường đi tốt nhất thông qua các biểu đồ và sự trao đổi thông tin giữa các cá thể. Trong đàn, mỗi con kiến cố gắng tìm một tuyến đường giữa nó, tổ của nó, và một nguồn

thức ăn. Trên đường đi, chúng để lại dấu vết để thành viên bầy đàn có thể theo dấu vết tìm đến đích. Theo đánh giá thì đây là một trong những giải thuật có hiệu quả rất cao. Tốc độ hội tụ và sự chính xác ở mức trung bình khá. Độ phức tạp vừa phải nên chi phí cũng không quá cao. Năm 2019, tài liệu [41] trình bày giải pháp khai thác tối đa nguồn năng lượng kết hợp PV và gió dựa trên giải thuật ACO. Các kết quả mô phỏng so với PSO, FA và ABC cho thấy nó có tốc độ MPPT nhanh nhất và đạt mức 0.38 s. Một cải tiến mới đây cũng được giới thiệu trong [42] năm 2021 cho thấy tốc độ đã được cải thiện xuống còn 0,21 s. Tuy nhiên, dạng sóng ngõ ra kém ổn định và chưa khảo sát chi tiết hiệu suất GMPPT trong điều kiện PSC cũng là những nhược điểm cần khắc phục.



**Hình 2.10.** Các lớp mô hình ANN [23]

#### 2.2.2.4. Giải thuật Artificial Neural Net-work

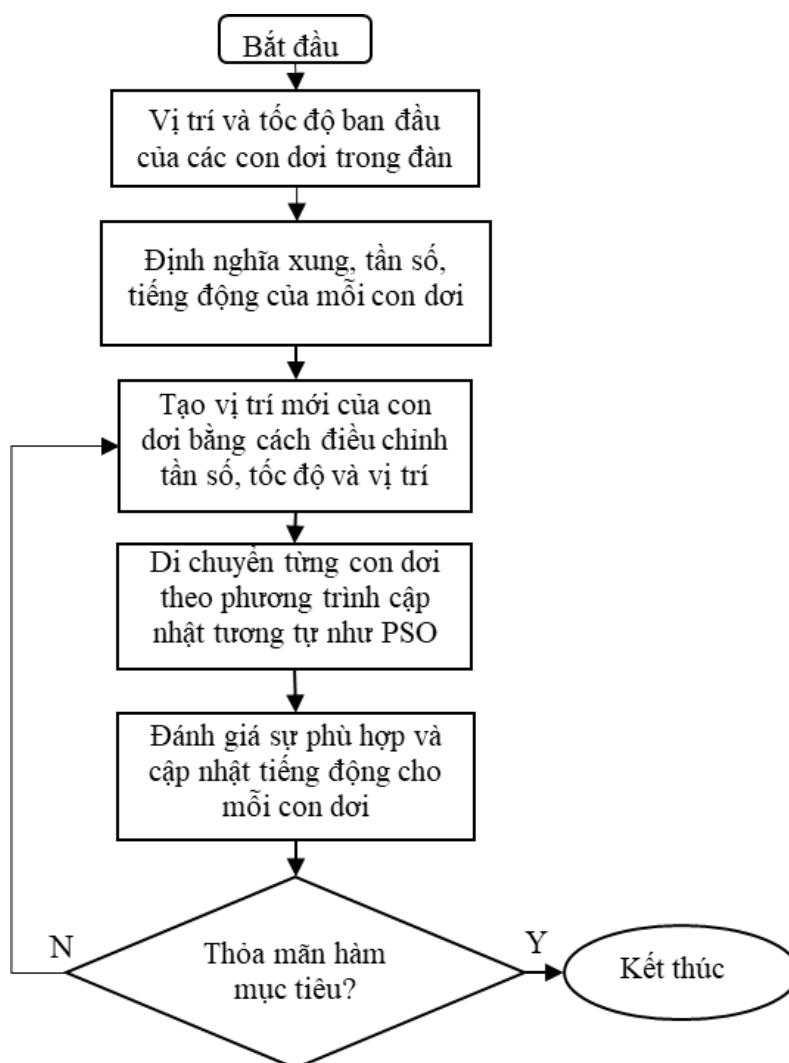
ANN là phương pháp tính toán mềm lấy cảm hứng từ hệ thống thần kinh trung ương. Để tạo ra một mạng tương tự như mạng nơ-ron sinh học, các mô hình máy tính có khả năng học máy này được biểu diễn dưới dạng các nơ-ron liên kết với nhau còn gọi là các nút nhân tạo. Trọng lượng kết nối được sửa đổi trong quá trình huấn luyện cho đến khi đạt được mức phù hợp nhất hoặc điện áp tham chiếu tương ứng với MPP. Mô hình có ba cấp độ: lớp đầu vào, lớp ẩn và lớp đầu ra, như trong Hình 2.10 [23], [43]. Dữ liệu môi trường làm việc như nhiệt độ và bức xạ, các tham số mô-đun PV như  $V_{oc}$  và  $I_{sc}$  hoặc kết hợp cả hai, có thể được sử dụng làm biến đầu vào. Đầu ra là

tín hiệu tỷ số đóng cắt điều khiển PVS tìm đến MPP. Trong kỹ thuật ANN, mỗi liên kết giữa nút  $i$  và  $j$  có trọng số  $W_{ij}$  và các liên kết này được tính trọng số dựa trên quy trình huấn luyện trong đó các tham số PV được đánh giá và ghi lại qua thời gian dài để đạt được trọng số phù hợp cho mỗi nút. Hạn chế của phương pháp này là mạng nơ-ron không thể được ứng dụng rộng rãi đồng thời trên nhiều loại vì nó phải được huấn luyện riêng cho mô-đun PV đang được sử dụng. Ngoài ra, do đặc điểm của tấm PV thay đổi theo thời gian nên mạng lưới thần kinh cần được huấn luyện lại thường xuyên để giảm sai số. Đây được xem là một giải thuật có độ chính xác cao, hoạt động rất ổn định, có khả năng giải quyết bài toán PSC hiệu quả. Các tham số đầu vào có thể là dòng điện, điện áp, bức xạ hoặc nhiệt độ. Tuy nhiên, với cấu trúc khá phức tạp nên chi phí cao là nhược điểm của giải pháp này. Nó cũng là nguyên nhân làm giảm tốc độ tìm kiếm của thuật toán. Do đó, một ứng dụng dựa trên ANN gần đây nhất được giới thiệu trong tài liệu [44] cho thấy hiệu suất MPPT trong điều kiện PSC không khả quan. Khi PVS đang vận hành ở điều kiện đồng nhất, tại thời điểm 5,5 s xảy ra bóng che một phần, giải pháp cần hơn 2 s sau mới có thể tìm được vị trí làm việc mới. Mặc dù hiệu suất trung bình khoảng 99,3% cao hơn so với P&O và InC nhưng dạng sóng ngõ ra rất kém ổn định. Bất chấp mọi rào cản và những nhược điểm thì tài liệu [45] tổng hợp một số ưu điểm của một nhóm giải thuật ANN đã được điều chỉnh với những kết luận cho thấy: những cải tiến trên nền tảng ANN có thể được kết hợp với trí tuệ nhân tạo để gia tăng hiệu quả và phạm vi ứng dụng của chúng.

#### **2.2.2.5. Bat Algorithm**

BA là một thuật toán tối ưu hóa siêu dữ liệu lấy cảm hứng từ hành vi định vị bằng siêu âm của con dơi tự nhiên trong việc định vị con mồi của nó. Nó được dùng để giải quyết các bài toán tối ưu hóa khác nhau. Mỗi con dơi ảo trong quần thể ban đầu sử dụng định vị bằng tiếng vang để cập nhật vị trí của nó. Con dơi định vị bằng tiếng vang là một hệ thống tri giác trong đó một loạt các sóng siêu âm lớn được kích hoạt để tạo ra tiếng vang. Những sóng này được trả lại với độ trễ và mức độ âm thanh khác nhau để dơi phát hiện ra con mồi. Trên nguyên lý đó, Hình 2.11 giới thiệu lưu đồ của giải thuật BA.

BA được dùng trong lĩnh vực tối ưu hóa, phân loại, xử lý hình ảnh, lựa chọn tính năng, lập lịch, khai thác dữ liệu. BA có nhiều ưu điểm như hội tụ rất nhanh, cấu trúc đơn giản, linh hoạt và đảm bảo hội tụ đến điểm tối ưu toàn cầu thực sự. Chính vì thế, nó được ứng dụng nhiều trong các nghiên cứu thuộc lĩnh vực MPPT [46]. Một xuất bản gần đây được giới thiệu trong tài liệu [47] đã so sánh hiệu quả của giải thuật BA cải tiến so với phiên bản gốc và PSO trong điều kiện PSC. Kết quả cho thấy, thời gian tìm kiếm tốt nhất của nó khoảng 0,16 s với hiệu suất lên đến 99,9%.



**Hình 2.11.** Lưu đồ giải thuật BA [48].

Mặc dù vậy, BA cũng giống như các thuật toán siêu dữ liệu khác, nó không thể bắt kịp GMPP mới khi điều kiện PSC thay đổi đột ngột. Vấn đề này cần khắc phục bằng cách khởi tạo lại đàn dơi, tuy nhiên sẽ làm xáo trộn hệ thống dẫn đến hội

tụ sớm tại LMPP. Có nhiều ràng buộc được đề xuất để tránh việc tái tạo lại bầy đàn không cần thiết nhằm gia tăng hiệu suất sinh điện. Một vấn đề khác cố hữu trong BA cũng như tất cả các kỹ thuật siêu hình là GMPP được lưu trong BA là công suất tối đa cao nhất từng thấy và nếu bức xạ giảm xuống có công suất thấp hơn thì nó sẽ không được cập nhật. Trên thực tế, vấn đề này chỉ được thảo luận và giải quyết bởi Eltamaly và cộng sự [49] bằng cách cập nhật GMPP nếu nó không bị thay đổi trong hai lần lặp liên tiếp. Với cải tiến không cần phải khởi tạo lại bầy đàn, một cá thể dơi quét được đề xuất sử dụng trong công trình [50]. Cá thể này không thuộc bầy đàn và nó hoạt động liên tục một cách độc lập. Nếu công suất thu được từ cá thể này lớn hơn giá trị GMPP của giải pháp thì bầy đàn sẽ sử dụng công suất này làm GMPP mới và thu hút mọi cá thể về vị trí mới này. Ngược lại thì hệ thống làm việc bình thường. Nhờ sự cải tiến này mà giải pháp đề xuất đã giảm thời gian khởi tạo lại từ 2 s xuống còn 0,3 s. Tuy nhiên hiệu suất của giải pháp không được đề cập. Bên cạnh đó, chi phí cao và áp lực xử lý các LMPP dẫn đến thời gian tìm kiếm gia tăng là những nhược điểm của giải thuật này [36].

#### **2.2.2.6. Thuật toán Grey Wolf Optimization**

GWO là một thuật toán siêu hình được lấy cảm hứng từ những con sói xám, chúng thích sống trong một bầy và được ứng dụng nhằm tối ưu hóa một hàm khó diễn đạt bằng phân tích. Trong quá trình phát triển GWO, một mô hình toán học mô phỏng cấu trúc xã hội bầy sói với bốn cá thể đặc trưng gồm:  $\alpha$  là giải pháp tối ưu nhất tượng trưng cho sói đầu đàn. Nó thường chứa nhiều thông tin nhất về mục tiêu. Các thành viên  $\beta$ ,  $\delta$ ,  $\omega$  là các giải pháp tiềm năng theo thứ tự giảm dần. Ba quy trình chính tạo nên giải thuật GWO là săn, rượt đuổi và theo dõi con mồi.

GWO là giải thuật có hiệu suất và độ chính xác khi bám điểm MPP rất cao trong cả điều kiện đồng nhất và PSC [4]. Tuy nhiên, nó cũng có chung nhược điểm với các thuật toán siêu hình khác là hội tụ sớm và rơi vào LMPP khi điều kiện vận hành thay đổi đột ngột. Kết quả là hiệu suất thấp và dao động quanh điểm làm việc ổn định. Vì vậy, các tác giả trong tài liệu [51] đã sửa đổi để chỉ cập nhật các giá trị



nhiệm vụ không bằng nhau trong bất kỳ lần lặp nào nhằm tránh các tìm kiếm không cần thiết và giảm thời gian theo dõi. Hay một giải pháp đề xuất sử dụng hàm lượng giác tiếp tuyến phi tuyến làm hệ số hội tụ trong xuất bản [52] đã cải thiện hiệu suất lên 98,54% và tốc độ hội tụ trong điều kiện PSC là 0,24 s. Bằng cách thay đổi hệ số hội tụ phụ thuộc vào khoảng cách giữa giải pháp  $\alpha$  với mục tiêu, tài liệu [53] đã nâng hiệu suất lên 98,88% trong một số tình huống. Tuy nhiên, với nhược điểm là chi phí cao, cấu trúc phức tạp, tốc độ hội tụ chậm thì giải thuật GWO vẫn cần phải được cải tiến hơn nữa.

### 2.2.2.7. Gen Algorithm

GA còn được gọi là thuật toán tiến hóa dựa trên lý thuyết tiến hóa của Darwin, trong đó những cá thể mạnh nhất sẽ sống sót và sinh sản trong khi những cá thể yếu nhất sẽ bị đào thải. Điều này có thể so sánh với việc tối ưu hóa hàm mục tiêu trong khuôn khổ MPPT. Hàm mục tiêu cần theo dõi được biểu thị bằng đường cong công suất là các vị trí ứng với mỗi tỷ số đóng cắt. Do đó, các gen mạnh nhất (vị trí gần cực trị) có nhiệm vụ tồn tại và sinh sản, trong khi các gen yếu nhất sẽ bị loại bỏ. Mỗi khi hai gen giao nhau, một loạt giải pháp tiềm năng mới sẽ xuất hiện, lý tưởng nhất là cải thiện những giải pháp trước đó thông qua đột biến. Điểm này được thuật toán sử dụng trong quá trình lặp cho đến khi các gen hội tụ thành một mã gen duy nhất không thể cải thiện hơn nữa hoặc đạt đến vùng giải pháp đủ gần với cực đại.

Một sự kết hợp giữa GA với bộ điều khiển bước lùi (Backstepping controller – BSC) được giới thiệu trong [54]. Trong đó GA được sử dụng với hai mục đích là tạo ra điện áp tham chiếu phù hợp với điều kiện vận hành và tối ưu hóa hệ số tích phân của bộ điều khiển BSC. Nhờ đó mà nó nhanh hơn ba lần so với phiên bản không được tối ưu hóa và nhanh hơn năm lần so với cấu hình kết hợp giữa P&O-BSC và INC-BSC. Tốc độ nhanh nhất ở điều kiện tiêu chuẩn là 0,052 s. Theo tài liệu [4], [36], GA là một thuật toán có tốc độ MPPT trung bình khá, hiệu suất cao. Tuy nhiên nó khá phức tạp và chi phí cao nên hiệu quả đạt được từ các nghiên cứu chưa thuyết phục. Cụ thể trong tài liệu tham khảo [55], sự kết hợp giữa GA với ACO mặc dù đã đạt được hiệu suất cao hơn so với các thuật toán khác. Tuy nhiên, tốc độ hội tụ nhanh

nhất khoảng 0,8 s vẫn là một nhược điểm cần cải thiện.

Nhìn chung, các giải thuật trong nhóm này đều có khả năng GMPPT trong PSC với ưu điểm là ổn định quanh vị trí cân bằng. Tuy nhiên nhược điểm mà tất cả các giải thuật cần phải khắc phục là cải thiện sự phức tạp trong sơ đồ để có thể giảm chi phí tổng thể. Các giải thuật hầu như đều dựa vào hai tham số của PV là dòng điện và điện áp. Chỉ có GWO dùng duy nhất tín hiệu điện áp cho giải pháp của nó, trong khi đó ANN có thể sử dụng cả đến tham số nhiệt độ và bức xạ môi trường làm việc. Tổng hợp các tiêu chuẩn so sánh nhóm giải pháp này được trình bày trong Bảng 2.3.

**Bảng 2.3.** 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 xuất bản	[39] 2023	[40] 2021	[42] 2021	[44] 2023	[47] 2022	[53] 2024	[55] 2023

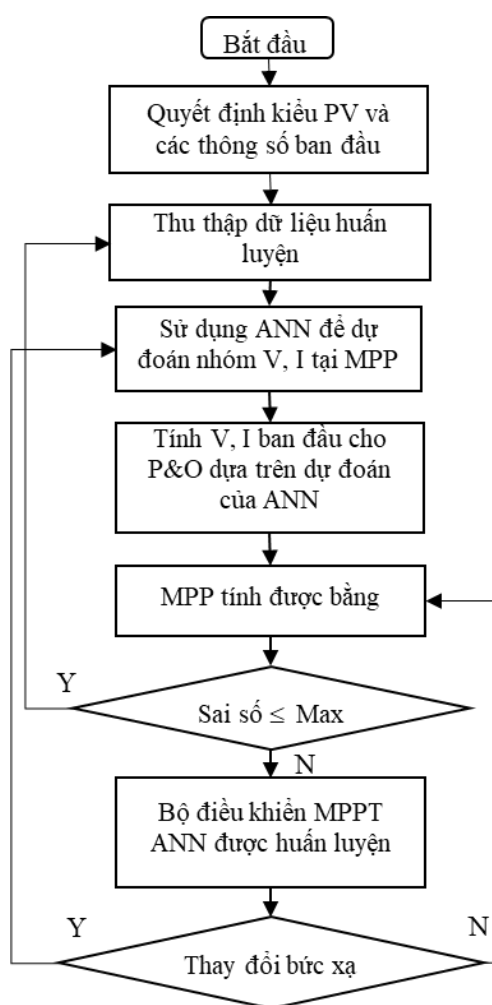
C: cao; TB: trung bình; K: không

### 2.2.3. Nhóm giải pháp lai

#### 2.2.3.1. Giải pháp kết hợp giữa InC (hoặc P&O) và ANN

Sự kết hợp giữa ANN với P&O truyền thống giúp cải thiện hiệu quả của giải pháp do phát huy được ưu điểm của từng thuật toán. Với độ chính xác theo dõi MPP cao, ANN sẽ đáp ứng theo những biến động của điều kiện vận hành. Sau đó, P&O sẽ điều chỉnh đến vị trí tối ưu để nâng cao hiệu suất sinh điện [4]. Dựa trên nguyên tắc

này, trong công trình nghiên cứu [56], hệ thống ANN được sử dụng như công cụ ước tính để cập nhật nhanh chóng giá trị tỷ số đóng cắt khi xảy ra những thay đổi đột ngột về bức xạ mặt trời. Hệ thống chỉ sử dụng một cảm biến dòng điện để điều chỉnh theo điều kiện vận hành. Mặc dù không đề cập tới hiệu suất MPPT của giải pháp nhưng tốc độ hội tụ mà nó đạt được là xấp xỉ 0,16 s. Kết quả này cho thấy, mặc dù giải pháp kết hợp có thể phát huy ưu điểm của các giải thuật đơn lẻ nhưng do cấu trúc phức tạp và xử lý nhiều công đoạn khiến thời gian tìm kiếm kéo dài gây thất thoát năng lượng và kém ổn định ở trạng thái làm việc.



**Hình 2.12.** Lưu đồ giải thuật ANN-P&O [4].

### 2.2.3.2. Giải pháp kết hợp PSO và P&O (hoặc InC)

Do có ưu điểm là đơn giản, chi phí thấp và MPPT hiệu quả trong điều kiện đồng nhất nên P&O và InC thường được kết hợp với các thuật toán khác để nâng cao

hiệu suất. Giải pháp kết hợp PSO-P&O/InC là một ví dụ, trong đó PSO được sử dụng để xác định vùng chứa GMPP, sau đó sử dụng thuật toán cổ điển để tiến tới vị trí ổn định. Bằng cách này giải pháp giảm dao động công suất ra trong quá trình MPPT. Áp dụng phương pháp này, tài liệu [30] có thể cải thiện hiệu suất lên đến 99,07%. Bên cạnh đó, một xuất bản mới đây nhất kết hợp giữa PSO với InC đạt hiệu suất khoảng trên 98% trong thời gian 0,5 s [57]. Tuy nhiên, cấu trúc điều khiển phức tạp, tốc độ hội tụ kém nếu GMPP nằm ngoài vùng tìm kiếm và chi phí phần cứng cao thì đây vẫn là nhược điểm cần được quan tâm cải thiện của giải pháp lai này.

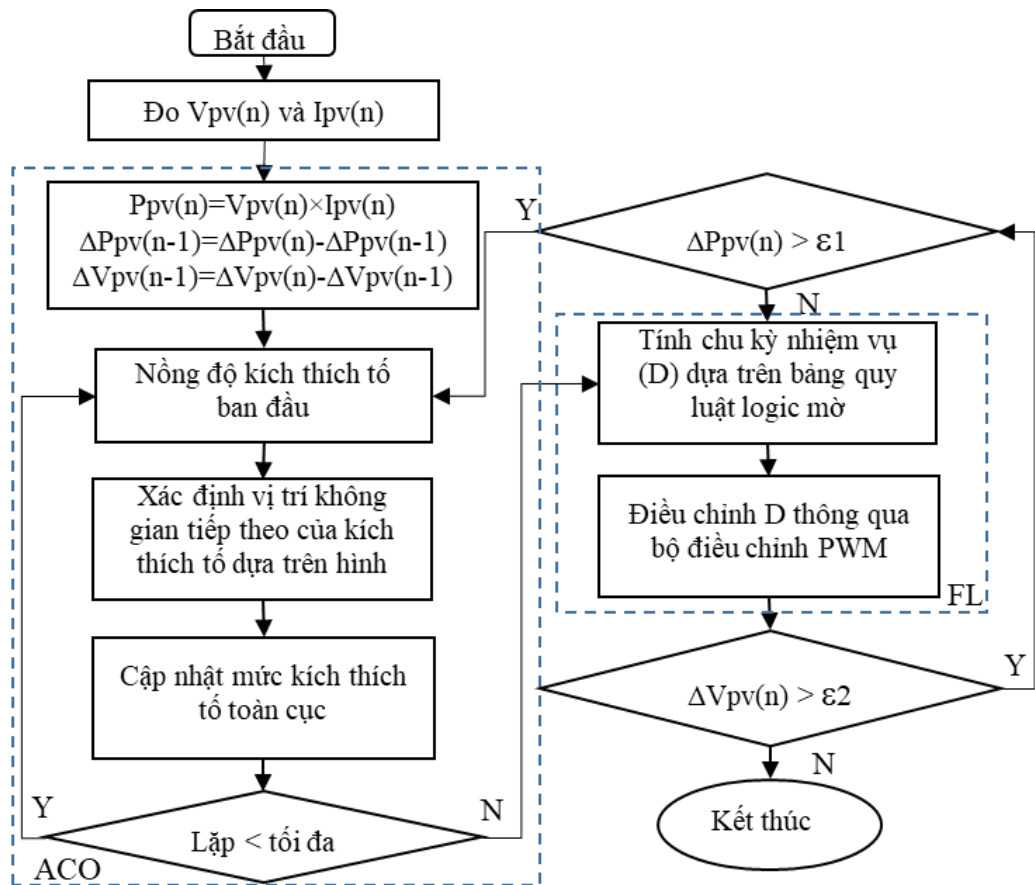
### **2.2.3.3. Giải pháp kết hợp giữa Modified Grey Wolf Optimization và Adaptive Neuro Fuzzy Inference System**

Khi so sánh với các thuật toán MPPT thông thường, thuật toán lai cho hiệu suất tốt về khả năng theo dõi hiệu quả, công suất đầu ra, tốc độ hội tụ, phản ứng nhanh với sự thay đổi của mức bức xạ mặt trời. Các thuật toán lai có những ưu điểm của cả hai thuật toán và nhược điểm của cả hai thuật toán gần như có thể được loại bỏ. Tuy nhiên, khi thiết kế một thuật toán lai, những khó khăn khi triển khai và mức độ phức tạp cần được giải quyết [25]. Trong số các thuật toán lai được đề xuất, các thuật toán dựa trên ANN, ANFIS, GWO cho kết quả tốt hơn về khả năng theo dõi hiệu quả, độ chính xác cao hơn, hội tụ nhanh và phản ứng linh hoạt với sự thay đổi đột ngột về mức độ bức xạ. Thuật toán MPPT lai GWO – ANFIS được phát triển và ứng dụng cho hệ thống trạm sạc EV giới thiệu trong tài liệu [58] là một ví dụ. Mục tiêu chính của nó là tạo ra chu kỳ hoạt động chính xác của mạch DC-DC để điều khiển PVS hoạt động tại GMPP. Vì vậy, bộ chuyển đổi sẽ hiển thị phản hồi nhanh. Tuy nhiên, hiệu suất tổng thể của giải pháp chưa được cải thiện. Khắc phục nhược điểm này, tài liệu [59] cũng giới thiệu một giải pháp lai có điều chỉnh dựa trên nền tảng GWO-ANFIS đã đạt được hiệu suất khoảng 99,94% với tốc độ 0,016 s trong điều kiện đồng nhất. Tuy nhiên khi xử lý PSC, hiệu suất của giải thuật chỉ đạt tối đa là 98,70% và không đề cập tới tốc độ. Cũng dựa trên phép lai này nhưng trong tài liệu [60] chỉ đạt hiệu suất GMPPT khoảng 98,22% với tốc độ 0,02 s. Tốc độ hội tụ của phương pháp lai này còn tiếp tục được cải thiện giảm xuống còn 0,014 s trong công trình

ngiên cứu [61]. Tuy nhiên hiệu suất cao nhất mà nó có thể đáp ứng là 98,11%.

#### 2.2.3.4. Giải pháp kết hợp giữa Ant Colony Optimization và Fuzzy Logic

Những ưu điểm của ACO như tốc độ hội tụ và bám điểm MPP khá tốt, hiệu suất cao được kết hợp với độ chính xác và ổn định của suy luận mờ (FL) có thể cải thiện được những nhược điểm như hiệu quả xử lý PSC kém, khả năng theo dõi MPPT kém chính xác trong điều kiện PSC. Sự kết hợp này sử dụng khả năng tối ưu hóa GMPPT của ACO để xác định vùng hoạt động tiềm năng sau đó phát huy hiệu quả của FL quanh điểm làm việc ổn định. Kết quả kiểm nghiệm trong tài liệu [62] cho thấy giải pháp lại này có thể đạt hiệu suất 98,7% trong điều kiện PSC cố định và tốc độ tìm kiếm khoảng 0,88 s. Tuy nhiên, trong điều kiện bóng che thay đổi đột ngột, tốc độ hội tụ vẫn cần được cải thiện hơn nữa so với kết quả 2,91 s. Lưu đồ thuật toán lai AFO được thể hiện trong Hình 2.13.



Hình 2.13. Lưu đồ giải thuật AFO [39].

Ngày càng nhiều các phương pháp kết hợp được nghiên cứu, giới thiệu. Thông thường là giữa một thuật toán tối ưu với một giải thuật truyền thống để phát huy độ chính xác và khả năng xử lý PSC của phương pháp hiện đại với sự đơn giản mà hiệu quả của giải pháp cổ điển. Nhưng đôi khi cũng lai các ưu điểm của nhiều thuật toán thông minh. Ở góc nhìn nào thì mục tiêu rất rõ ràng là cải thiện hiệu quả khi xảy ra PSC, tăng tốc độ và hiệu suất MPPT. Mặc dù có thể cải thiện hiệu suất và tốc độ hội tụ, nhưng sự phức tạp trong cấu trúc và chi phí gia tăng là những điểm yếu cần cải thiện của các giải pháp lai nói chung. Một số đặc điểm nổi bật của nhóm giải pháp này được tổng hợp và liệt kê trong Bảng 2.4.

**Bảng 2.4.** 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	[56]/2024	[57]/2024	[60]/2024	[62]/2024

C: cao; TB: trung bình; K: không

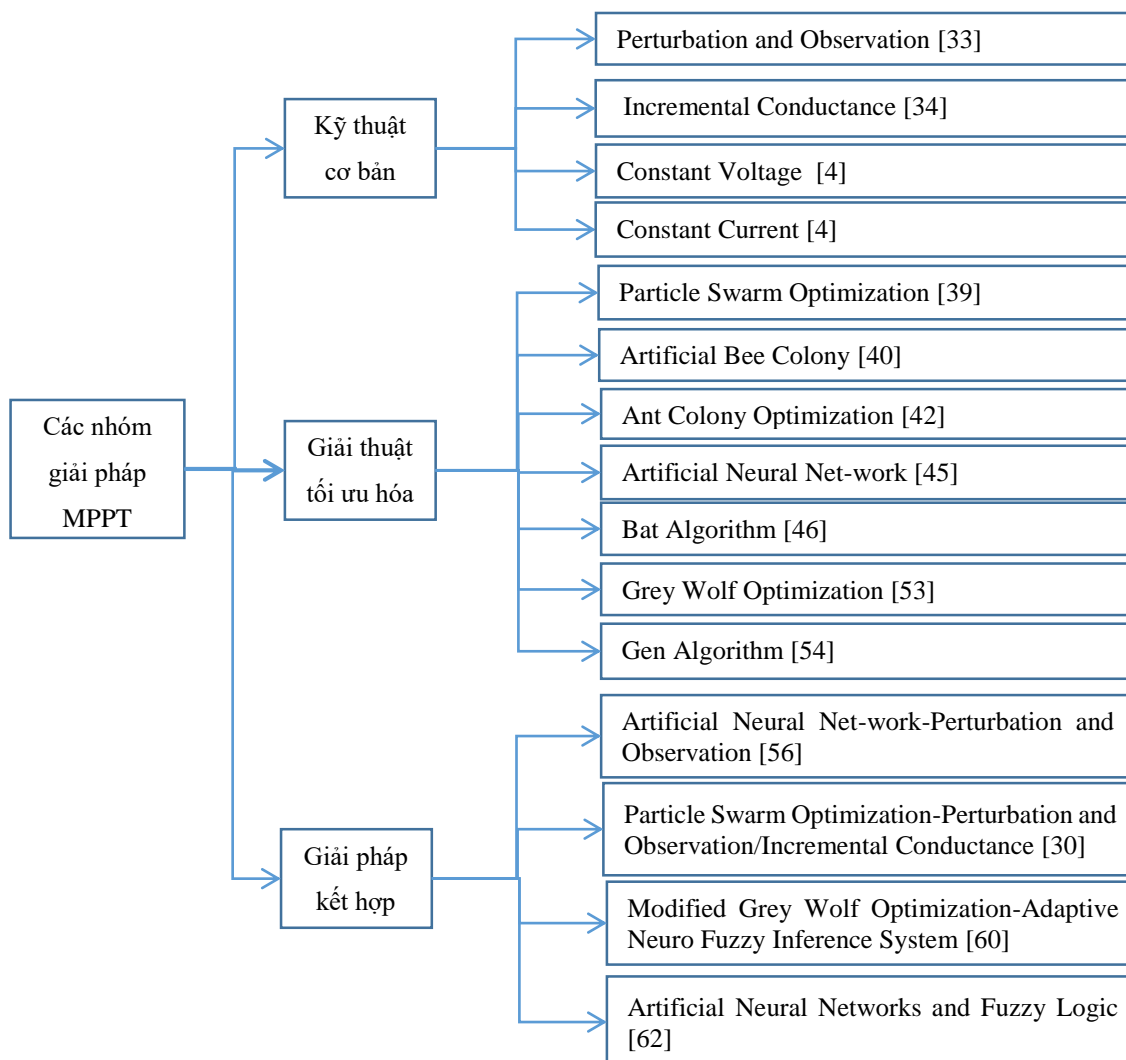
Tóm lại, các giải thuật MPPT được giới thiệu gần đây có thể được phân lớp gồm: nhóm kỹ thuật cơ bản, nhóm các thuật toán tối ưu hóa và nhóm giải pháp lai. Đại diện trong mỗi nhóm là một số giải thuật thông dụng đã được khảo sát trình bày trong Hình 2.14.

### 2.3 Kết luận chương 2

Nâng cao hiệu suất của PVS đang gặp phải một số trở ngại cho những cải tiến công nghệ khai thác năng lượng. Mặc dù những nghiên cứu trước đây đã đạt được

một số thành tựu nhất định nhưng vẫn tồn tại những vấn đề như:

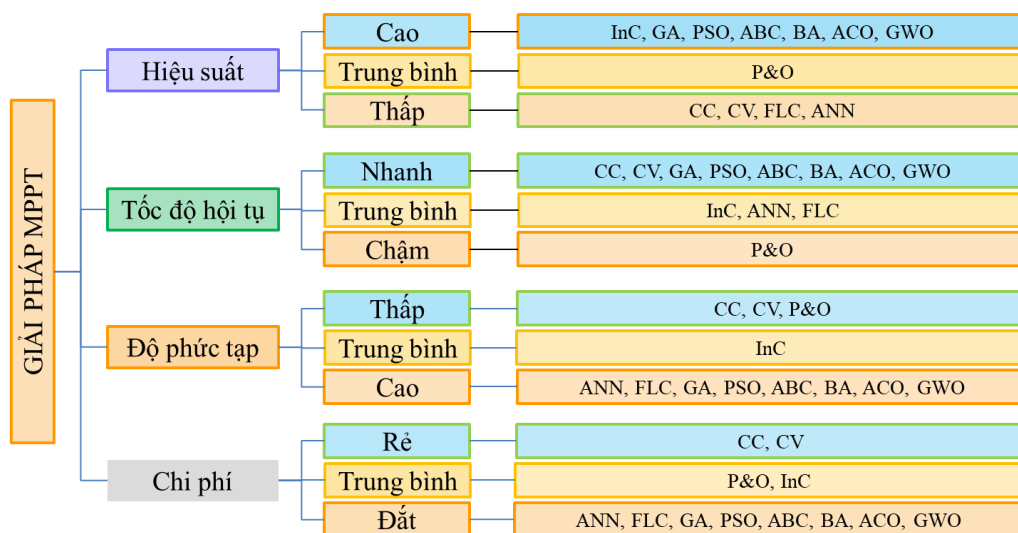
Đối với bài toán tái cấu trúc mảng PV cho thấy có rất nhiều cải tiến nhưng các bài toán đều phát sinh trên hai kiểu liên kết cơ bản là nối tiếp và song song. Các cấu trúc này nếu đơn giản hóa đặc tuyến ngõ ra của hệ thống để GMPPT dễ dàng hơn thì gây áp lực lên các khóa chuyển mạch của các bộ chuyển đổi. Trong khi đó những cải tiến để nâng cao hiệu suất của hệ thống thì sơ đồ trở nên quá phức tạp, có nhiều mối nối thừa gây tổn thất năng lượng và gia tăng chi phí lắp đặt trong một số trường hợp nhất định. Vấn đề đa cực trị của các cấu hình khiến cho giải pháp bị bẫy vào các LMPP cũng là nguyên nhân khiến sụt giảm hiệu suất do gia tăng tổn thất công suất.



**Hình 2.14.** Phân nhóm một số giải thuật thông dụng

Đối với giải thuật GMPPT là khía cạnh được khai thác nhiều nhất với rất nhiều

các thuật toán được giới thiệu. Tuy nhiên, mỗi giải thuật có tính phù hợp với từng loại cấu hình liên kết khác nhau trong những điều kiện làm việc nhất định. Chúng tập trung giải quyết vấn đề tăng tốc độ tìm kiếm, tăng hiệu suất và tránh bẫy LMPP. Để tăng tốc độ tính toán các nhóm giải thuật truyền thống thường có các bước tính đơn giản nên cũng khiến nó kém chính xác và kết quả là hiệu suất thấp. Ngược lại, muốn nâng cao hiệu suất cần các bài toán phức tạp, tính toán nhiều khiến nó không tránh khỏi việc gia tăng thời gian tính toán. Do đó, tốc độ, hiệu suất, chi phí điều khiển, sự phù hợp, tính ứng dụng... vẫn là những rào cản đối với những giải pháp đã được công bố trước đây. Tổng hợp từ những phân tích trên đây có thể tóm tắt một số đặc điểm chính của từng nhóm giải thuật trong Hình 2.15. Bên cạnh đó, Bảng 2.5 tổng hợp so sánh các ưu điểm, nhược điểm của của từng nhóm giải pháp.



**Hình 2.15.** Tiêu chí đánh giá một số giải pháp MPPT [36].

Tóm lại, các công trình nghiên cứu trước đây gặp phải những rào cản và thách thức như sau:

- Kiểu PC đơn giản, giảm tác động của PSC lên đặc tuyến thì đối mặt với dòng điện trên các khóa chuyển mạch lớn gây áp lực lên các bộ DC/DC.
- Cấu hình có chứa kiểu SC phải xử lý bài toán đa cực trị khi xảy ra PSC khiến các giải pháp không tránh khỏi bẫy LMPP.
- Sự phi tuyến của các đặc tuyến P-V và I-V.



- Tham số điều khiển ngõ vào chủ yếu dựa vào  $I_{pv}$  và  $V_{pv}$ .
- Cải thiện hiệu suất thì kéo dài thời gian xử lý dẫn đến đáp ứng động theo điều kiện môi trường kém, khả năng tính toán phức tạp.
- Quá chú trọng đến tốc độ thì hiệu suất hệ thống thấp, gây lãng phí.
- Chi phí phần cứng, phức tạp, khả năng ứng dụng giữa giải thuật với cấu hình PVS là những trở ngại đối với nhóm thuật toán tối ưu và giải pháp lai.
- Các giải thuật chủ yếu dựa trên nguyên tắc “thử và sai” nên xác suất tìm đúng GMPPT phụ thuộc vào kích thước quần thể.

**Bảng 2.5.** Đặc điểm của các nhóm giải thuật MPPT [4].

Phương pháp MPPT	Ưu điểm	Nhược điểm
Phương pháp truyền thống	Đơn giản, chi phí thấp Dễ triển khai Độ tin cậy cao	Hiệu suất thấp Tốc độ MPPT chậm Nhạy cảm với thay đổi môi trường
Giải thuật tối ưu, thông minh	Tốc độ đáp ứng nhanh Hiệu suất cao GMPPT hiệu quả	Hệ thống điều khiển phức tạp Chi phí cao Nhạy cảm với thay đổi môi trường
Giải pháp kết hợp	Thời gian đáp ứng nhanh Hiệu suất rất cao Độ phức tạp vừa phải	Chi phí cao Nhạy cảm với thay đổi của môi trường

Do đó, luận án này đề xuất các giải pháp MPPT cho hai cấu hình hệ thống PV cụ thể là PC và SC hoặc S-PC dựa trên đặc điểm của đường đặc tính I-V và P-V theo điều kiện vận hành. Giải thuật hướng tới cải thiện các mục tiêu là tốc độ và hiệu suất MPPT thông qua cải tiến các thuật toán đơn giản để giảm chi phí. Các giải pháp đề xuất xem xét đến các yếu tố thay đổi nhiệt độ, bức xạ, và tác động của chúng đến đặc tính ngõ ra của PVS. Nó được xem như giải pháp MPPT hai giai đoạn trong đó:

- Giai đoạn đầu để giới hạn phạm vi MPP tiềm năng thông qua việc xác định các tham số cơ bản của PV theo điều kiện làm việc. Giải pháp đề xuất khác với nguyên lý “thử và sai” vì nó dựa vào khả năng mô phỏng lại hình dạng

đặc tuyến PV theo điều kiện vận hành để xác định LMPP một cách chính xác.

- Giai đoạn sau đó là dùng thuật toán MPPT truyền thống để tận dụng ưu điểm đơn giản, tăng tốc độ mà không làm giảm hiệu suất tổng thể.

Trên cơ sở những phân tích trên, luận án sẽ xây dựng giải thuật GMPPT cho các cấu hình PV kiểu SC và PC với nội dung cụ thể như sau:

1. Đề xuất giới hạn điện áp tối thiểu để xác định  $I_{sc}$  và  $V_{oc}$  của PVS. 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 này 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. Cải tiến 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 pin quang điện trong liên kết PC. Giải pháp đề xuất được ứng dụng trong các công trình đã công bố số {1}, {2}, và {5}.
3. Đề xuất giải thuật GMPPT cho hệ thống pin quang điện kiểu SC khi xảy ra PSC để nâng cao hiệu suất và tốc độ hội tụ. Thuật toán P&O truyền thống được cải tiến ngay từ điểm khởi động dựa vào khả năng định vị chính xác các LMPP trên đặc tuyến I-V. Mục tiêu này được xây dựng trên cơ sở tính toán khoảng hụt điện áp do hiện tượng bóng che một phần gây ra. Giải thuật đề xuất được ứng dụng vào bài toán MPPT trong các công trình nghiên cứu số {3} và các công trình liên quan số {4}, {6 – 9}.

## CHƯƠNG 3

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

### 3.1. Hướng tiếp cận

Những phân tích trong Chương 2 trình bày tổng quan về thực trạng nghiên cứu, ứng dụng các kỹ thuật khai thác điện mặt trời hiện nay trên thế giới. Nó cho thấy một thực tế là rất khó để đạt được mọi tiêu chí trong một giải pháp có ứng dụng hệ thống PV. Trong đó, hai khía cạnh được quan tâm và nghiên cứu nhiều nhất là tốc độ hội tụ và hiệu suất của giải thuật MPPT. Hai yếu tố này phụ thuộc vào cấu hình và kỹ thuật khác nhau. Có rất nhiều cấu hình PV cải tiến được đề xuất nghiên cứu và công bố, tuy nhiên nó vẫn dựa trên hai loại liên kết cơ bản là nối tiếp và song song. Số lượng cực trị của chúng thay đổi tùy thuộc vào đặc điểm kết hợp của hai loại cấu hình cơ bản này. Do đó, vấn đề cốt lõi vẫn là giải quyết bài toán đơn cực trị hay đa cực trị sinh ra do đặc điểm của hai kiểu liên kết hệ thống PV này trong những điều kiện vận hành khác nhau. Đối với vấn đề MPPT, các thuật toán tối ưu thường phức tạp và có tốc độ chậm. Ngược lại, nếu giải quyết được vấn đề tránh bẫy LMPP cho các thuật toán truyền thống thì có thể tận dụng được sự đơn giản, hiệu quả của chúng để nâng cao hiệu suất đồng thời gia tăng tốc độ tìm kiếm để sớm ổn định công suất ngõ ra.

Hình dạng đặc tuyến của hệ thống PV quyết định tốc độ và hiệu suất MPPT của các thuật toán. Đối với mỗi tấm PV hoặc hệ thống PV làm việc trong điều kiện đồng nhất, vị trí MPP tỷ lệ với dòng điện ngắn mạch ( $I_{sc}$ ) và điện áp hở mạch ( $V_{oc}$ ) theo hệ số lấp đầy (FF). Giá trị FF của mỗi loại PV hoàn toàn khác nhau và phụ thuộc vào điều kiện làm việc nên đã có nhiều nghiên cứu khai thác đặc điểm này để MPPT cho hệ thống PV. Bằng cách sử dụng tham số FF để xác định tổn thất điện năng giữa MPP ở điều kiện tiêu chuẩn và PSC, tài liệu [63] đã so sánh liên tục để điều chỉnh vị trí làm việc. Qua đó hiệu suất được cải thiện tăng khoảng 6,98% so với phiên bản gốc. Trong khi đó, các tác giả trong tài liệu [64], [65] đề xuất giải pháp xấp xỉ dòng điện

ở vị trí MPP ( $I_{mp} = k_i I_{sc}$ ) để cải thiện hiệu suất, tốc độ hội tụ và ổn định dạng sóng ngõ ra. Giá trị  $I_{sc}$  của tấm PV được đo bằng cách làm gián đoạn hoạt động thường xuyên với tần số cụ thể và lưu trữ giá trị được tính toán. Tuy nhiên, tốc độ và hiệu suất vẫn chưa được cải thiện khi mà thời gian tìm kiếm tốt nhất là 1,35 s. Bên cạnh đó, một số giải pháp khai thác quan hệ giữa điện áp tại MPP với  $V_{oc}$  theo một hệ số tỷ lệ ( $V_{mp} = k_v V_{oc}$ ) để triển khai MPPT. Ứng dụng quan hệ này, tài liệu [66] chọn giá trị  $k_v = 0,8$  cho nghiên cứu của họ và đạt được hiệu suất khoảng 99,5%. Ưu điểm của chúng là đơn giản và giá thành thấp nhưng hoạt động của hệ thống PV bị gián đoạn thường xuyên gây ra tổn thất điện năng trong thời gian chờ cập nhật giá trị mới. Nếu chu kỳ lấy mẫu của hai tham số này nhỏ thì độ chính xác của MPPT sẽ tăng lên nhưng cũng làm tăng thời gian gián đoạn cung cấp điện. Ngược lại, nếu chúng không được cập nhật thường xuyên, các giá trị tính toán được sẽ có sai số và dao động lớn vì  $I_{sc}$  và  $V_{oc}$  bị thay đổi theo điều kiện vận hành và lão hóa của tấm pin. Tốc độ hội tụ của giải pháp này cũng khiến tốn ở mức 250 s.

Tóm lại, để khai thác hệ số FF cho giải pháp MPPT cần xác định được  $I_{sc}$  và  $V_{oc}$  của PVS. Các phương pháp ngắn mạch, hở mạch đều làm gián đoạn liên tục cấp điện dẫn đến tổn thất công suất nhất định. Để khắc phục điều này, luận án đề xuất giải pháp xác định trực tiếp hai thông số  $I_{sc}$  và  $V_{oc}$  theo chế độ vận hành để không làm gián đoạn cung cấp điện, giảm thất thoát năng lượng và nâng cao hiệu suất của hệ thống PV. Tuy nhiên, hai tham số này phụ thuộc vào đặc điểm của từng loại PV và thay đổi liên tục theo điều kiện vận hành. Do đó một giải pháp nghiên cứu, khảo sát tổng thể được đề xuất để cải tiến điểm khởi động cho thuật toán P&O truyền thống. Với những ứng dụng MPPT cho hệ thống PV liên kết kiểu song song và vận hành trong những môi trường khác nhau, đặc biệt là điều kiện bóng che một phần, nó góp phần định vị một cách nhanh chóng giá trị MPP tiềm năng để giảm thời gian tìm kiếm và nâng cao hiệu suất sinh điện cho hệ thống PV.

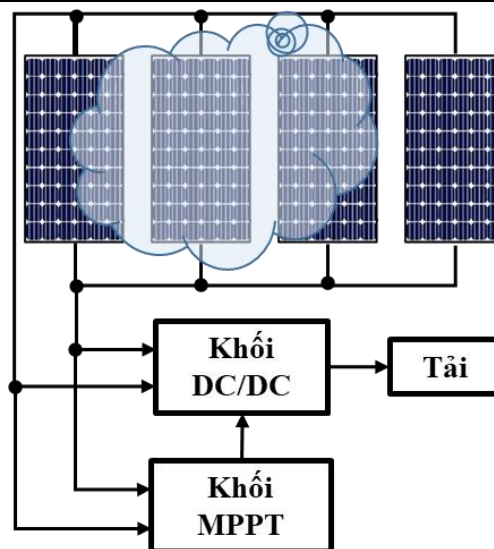
### **3.1.1. Hệ số FF của một số loại PV điển hình**

Hệ số FF của mỗi loại PV là khác nhau, hơn nữa chúng cũng thay đổi theo môi trường làm việc. Giá trị FF cung cấp kèm theo thông số kỹ thuật của các tấm PV là ở

điều kiện tiêu chuẩn. Để xác định phạm vi tương đối của tham số FF trong điều kiện thực tế, luận án đã khảo sát một số loại PV điển hình với các tham số như liệt kê trong Bảng 3.1. Hệ thống được khảo sát gồm 4 tấm PV liên kết theo kiểu PC vận hành trong phạm vi bức xạ từ 200 W/m<sup>2</sup> đến 1000 W/m<sup>2</sup> và nhiệt độ từ 0°C đến 60°C. Khối DC/DC sử dụng trong nghiên cứu này bao gồm ba loại là Boost, Buck, và Buck-boost. Trong khi đó khối MPPT có nhiệm vụ tạo ra một giá trị D tối ưu để điều khiển cho hệ thống PV luôn làm việc gần vị trí MPP nhất như trình bày trong Hình 3.1.

**Bảng 3.1.** Các thông số của một số loại PV được khảo sát.

Thông số	Monocrystalline		Polycrystalline			Thin-film	
	Shell SP75	Shell SQ150	SST 230-60P	Shell S70	MSX-60	GxB-340	Shell ST40
I <sub>sc</sub> (A)	4,8	4,8	8,52	4,5	3,8	9,3	2,68
V <sub>oc</sub> (V)	21,7	43,4	36,7	21,2	21,1	51,4	23,3
I <sub>mp</sub> (A)	4,4	4,4	7,83	4,12	3,5	8,5	2,41
V <sub>mp</sub> (V)	17	34	29,4	17	17,1	40	16,6
α <sub>i</sub> (mA/°C)	2	1,4	3,83	2	3	0,06	0,35
α <sub>v</sub> (mV/°C)	-76	-161	-128	-76	-80	-0,27	-100
Số cell	36	72	60	36	36	72	36
A	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,5	1,3
R <sub>s</sub>	0,33	0,67	0,2	0,25	0,2	0,37	1,52
R <sub>sh</sub>	236,7684	466,46	152,6382	311,8126	304,83	132,5701	284,1
I <sub>0</sub> (×10 <sup>-8</sup> A)	6,957	6,975	9,4629	9,8886	9,094	8,3667	1,0264



**Hình 3.1.** Hệ thống PV liên kết kiểu song song.

**Bảng 3.2.** Các trường hợp đề xuất khảo sát

STT	PV1		PV2		PV3		PV4	
	W/m <sup>2</sup>	°C	W/m <sup>2</sup>	°C	W/m <sup>2</sup>	°C	W/m <sup>2</sup>	°C
1	250	25	250	25	250	25	250	25
2	1000	60	1000	60	1000	60	1000	60
3	200	0	200	0	200	0	200	0
4	900	25	750	25	500	25	200	25
5	400	25	600	25	400	25	800	25
6	300	25	1000	25	300	25	1000	25
7	200	25	500	25	100	25	800	25
8	500	25	400	25	600	25	200	25

Các thông số của PV loại MSX-60 trong Bảng 3.1 được dùng để khảo sát mẫu cho việc tính các giá trị  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{mp}$ ,  $V_{mp}$  và  $P_{mp}$  trong những điều kiện đồng nhất và PSC. Bức xạ và nhiệt độ vận hành được thiết lập trong giới hạn như liệt kê tại Bảng 3.2. Trong đó, trường hợp thứ nhất giữ nhiệt độ ở điều kiện tiêu chuẩn và bức xạ giảm xuống còn 250 W/m<sup>2</sup>. Ngược lại, trường hợp thứ hai có bức xạ ở điều kiện chuẩn còn nhiệt độ ở mức 60°C. Trường hợp thứ ba là cả hai thông số bức xạ và nhiệt độ đều giảm so với điều kiện tiêu chuẩn. Ba trường hợp này xem như vận hành ở điều kiện đồng nhất vì mọi tấm pin trên hệ thống PV đều có cùng điều kiện như nhau. Các trường hợp còn lại được thiết lập ở điều kiện bóng che một phần với các mức bức xạ khác nhau ở cùng một nhiệt độ là 25°C. Những thông số này được sử dụng để khảo sát giá trị tọa độ MPP của hệ thống PV so với hai tham số  $I_{sc}$  và  $V_{oc}$  của chúng. Từ đó sử dụng biểu thức (3.1) để xác định hai hệ số  $k_i$  và  $k_v$  liên quan [67]. Kết quả khảo sát và tính toán được tổng hợp trong Bảng 3.3.

Kết quả cho thấy: đối với PV loại MSX60, hệ số  $k_i$  dao động trong khoảng từ 0,92 đến 0,95 còn  $k_v$  dao động từ 0,77 đến 0,83. Do đó, với loại PV này, các giá trị trung bình được chọn lần lượt là  $k_i = 0,93$  và  $k_v = 0,80$ . Thực hiện khảo sát tương tự đối với các loại PV còn lại để xác định giá trị tương đối của hệ số FF được tổng hợp trong Bảng 3.4. Mặc dù các giá trị  $k_i$  và  $k_v$  của các loại PV không hoàn toàn giống nhau nhưng có thể nhận thấy chúng thường có một tỷ lệ tương đối. Hệ số  $k_i$  thường

lớn hơn 0,9 và  $k_v$  trong khoảng 0,75 đến 0,8.

**Bảng 3.3.** Hệ số FF của PV loại MSX-60 trong các trường hợp khảo sát.

STT	$V_{oc}$ (V)	$I_{sc}$ (A)	$V_{mp}$ (V)	$I_{mp}$ (A)	$k_v$	$k_i$	$P_{mp}$ (W)
1	19,41	3,76	16,06	3,52	0,83	0,94	56,54
2	18,41	15,38	14,19	14,19	0,77	0,92	201,36
3	21,12	2,76	17,80	2,60	0,84	0,94	46,28
4	20,36	8,83	16,79	8,38	0,82	0,95	140,90
5	20,36	8,27	16,75	7,68	0,82	0,93	128,69
6	20,55	9,73	16,88	9,06	0,82	0,93	153,03
7	19,97	6,01	16,48	5,58	0,83	0,93	91,98
8	20,05	6,39	16,47	5,96	0,82	0,93	98,15

$$\left\{ \begin{array}{l} FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} = k_v k_i \\ k_v = \frac{V_{mp}}{V_{oc}} \\ k_i = \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \end{array} \right. \quad (3.1)$$

**Bảng 3.4.** Hệ số FF của các loại PV

Loại PV	MSX-60	Shell SP75	Shell SQ150	SSt 230-60P	Shell S70	GxB-340	Shell ST40
$k_i$	0,93	0,91	0,91	0,92	0,94	0,92	0,91
$k_v$	0,80	0,79	0,78	0,8	0,79	0,78	0,75
<b>FF</b>	0,74	0,72	0,71	0,74	0,74	0,72	0,68

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

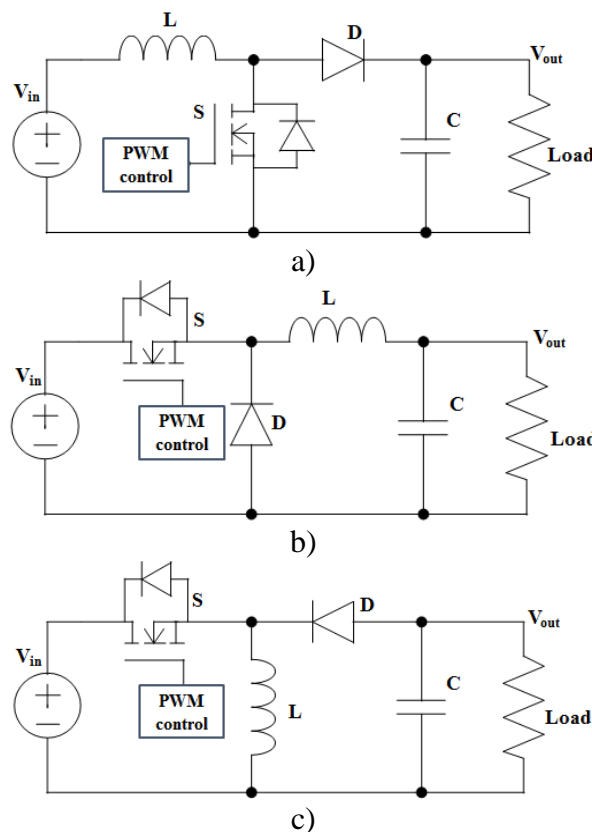
Trong các kỹ thuật MPPT, khả năng trích xuất công suất ngõ ra phụ thuộc vào một khối chuyển đổi được điều khiển bởi một bộ điều chế độ rộng xung D. Điện áp ngõ ra sẽ tỷ lệ với điện áp vào của từng bộ chuyển đổi DC/DC theo một tỷ số K nhất định. Do đó, vị trí MPP trên đặc tuyến của hệ thống PV liên quan mật thiết đến tỷ số đóng cắt D của khối điều khiển MPPT. Vì vậy, đặc tính của các bộ chuyển đổi DC/DC cần được khảo sát để xác định giới hạn hoạt động tốt nhất của chúng nhằm thu được tối đa công suất trong những điều kiện làm việc khác nhau. Tỷ số giữa điện áp ra

( $V_{out}$ ) và vào ( $V_{in}$ ) của các bộ DC/DC có dạng như biểu thức (3.2).

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = K \quad (3.2)$$

Trong đó giá trị của  $K$  liên quan đến tỷ số đóng cắt  $D$  tùy thuộc vào tính chất của từng loại DC/DC được biểu diễn theo phương trình (3.3) [68], [69], [70], [71],. Với  $D$  là tỷ số giữa thời gian đóng điện ( $T_{on}$ ) trên toàn bộ chu kỳ làm việc ( $T_{ck}$ ) của khóa điều khiển nằm trong giới hạn ( $0 < D < 1$ ) [72], [73]. Sơ đồ nguyên lý của ba mạch DC/DC cơ bản được trình bày trong Hình 3.2 [74].

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



**Hình 3.2.** Các bộ chuyển đổi: a) Boost; b) Buck; c) Buck-boost.

Để dòng điện qua mạch DC/DC không gây áp lực lên các khóa chuyển mạch hoặc diode thì giá trị  $D$  không nên tiệm cận các cực trị 0 và 1. Điều này có thể làm



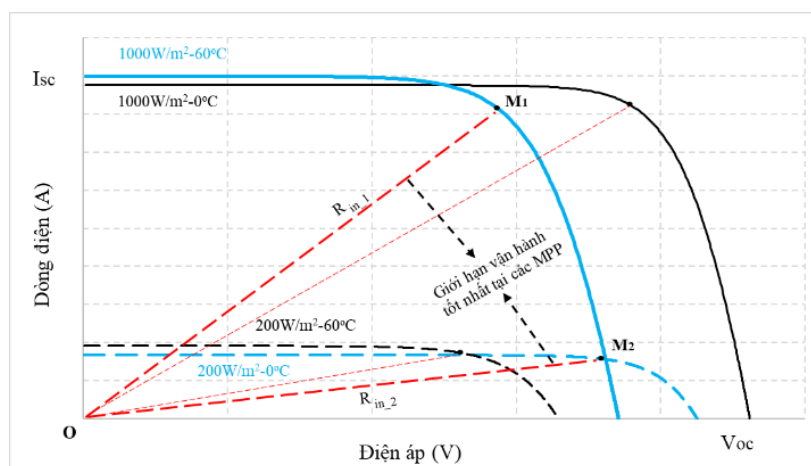
tăng độ gợn sóng dòng điện và giảm độ ổn định làm việc của PVS. Vì vậy, giới hạn tốt nhất của  $D$  nên tiệm cận ngưỡng 0,5 [75], [76]. Nghĩa là trong mọi điều kiện vận hành thì giá trị  $D$  tại MPP ở bức xạ cao nhất hay thấp nhất cũng nên tiệm cận quanh mức 0,5. Đó cũng là lý do vì sao nội dung nghiên cứu đề xuất giới hạn khảo sát trong một giải bức xạ và nhiệt độ thay đổi như trong Bảng 3.2.

Một cách gần đúng, nếu 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 hệ thống PV ( $R_{in}$ ) và điện trở tải ( $R_L$ ) theo phương trình (3.4) như sau.

$$P_{in} = P_{out} \Rightarrow \frac{V_{in}^2}{R_{in}} = \frac{V_{out}^2}{R_L} \quad (3.4)$$

$$R_L = K^2 R_{in} \quad (3.5)$$

$$R_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} \quad (3.6)$$



**Hình 3.3.** Giới hạn điện trở trong vùng khảo sát.

Từ các biểu thức (3.3) đến (3.6) nhận thấy, để truy xuất được công suất cực đại của hệ thống PV đồng nghĩa với việc điều chỉnh giá trị  $D$  dựa vào  $R_{in}$  và  $R_L$  cho mỗi bộ DC/DC là khác nhau. Khi điều kiện vận hành thay đổi, vị trí các MPP cũng thay đổi nên giá trị  $D$  cần phải điều chỉnh theo. Nghĩa là, trong giới hạn khảo sát, điện trở nội của PV sẽ thay đổi trong khoảng từ thấp nhất  $R_{in,1}$  (tại  $M_1$ ) ứng với bức xạ và nhiệt độ ở mức cao nhất cho đến  $R_{in,2}$  (tại  $M_2$ ) ứng với điều kiện bức xạ và nhiệt độ ở mức thấp nhất như trong Hình 3.3. Do đó phạm vi làm việc tốt nhất của  $D$  trong vùng

này cần phải được xác định sao cho nó thỏa mãn trong giới hạn lân cận 0,5.

Nếu xem  $R_L$  là hằng số thì từ phương trình (3.5), ứng với mỗi vị trí vận hành sẽ có một giá trị  $R_{in}$  được tính theo biểu thức (3.6). Khi đó tỷ số điện áp ở hai điểm  $M_1$  và  $M_2$  tương ứng là:

$$R_L = K_{mp1}^2 R_{in\_1} = K_{mp2}^2 R_{in\_2} \quad (3.7)$$

Hay

$$\frac{K_{mp1}^2}{K_{mp2}^2} = \frac{R_{in\_2}}{R_{in\_1}} = \frac{V_{mp2}}{I_{mp2}} \frac{I_{mp1}}{V_{mp1}} \quad (3.8)$$

Mặt khác, vị trí MPP tỷ lệ với  $I_{sc}$  và  $V_{oc}$  theo hệ số FF nên phương trình (3.8) có thể được biểu diễn lại như sau:

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

Như vậy, quan hệ giữa các tham số tại các MPP được quy đổi về mối quan hệ giữa các tham số  $I_{sc}$  và  $V_{oc}$  ở những điều kiện cụ thể. Trong khi đó, giá trị  $I_{sc}$  và  $V_{oc}$  bất kỳ được xác định dựa theo điều kiện tiêu chuẩn như phương trình (3.10) [11]:

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

Trong đó:  $V_{oc\_ref}$  (V) và  $I_{sc\_ref}$  (A) lần lượt là điện áp hở mạch và dòng điện ngắn mạch ở điều kiện tiêu chuẩn;  $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$  là nhiệt độ tiêu chuẩn;  $T$  là nhiệt độ làm việc ở mức bức xạ bất kỳ ( $^\circ\text{C}$ );  $W$  và  $W_{ref}$  lần lượt là bức xạ ở điều kiện bất kỳ và điều kiện tiêu chuẩn ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). Các hệ số  $\alpha_v$  và  $\alpha_i$  có thể được tìm thấy trong Bảng 3.1 về các tham số của các loại PV.

Thay giá trị biểu thức (3.10) vào (3.9) ta được:

$$\frac{K_{mp1}^2}{K_{mp2}^2} = \frac{(V_{oc\_ref} - \alpha_v (T_2 - 25))}{W_2 (I_{sc\_ref} + \alpha_i (T_2 - 25))} \frac{W_1 (I_{sc\_ref} + \alpha_i (T_1 - 25))}{(V_{oc\_ref} - \alpha_v (T_1 - 25))} \quad (3.11)$$

Sử dụng các thông số của PV loại MSX-60 đã cho trong Bảng 3.1 thay vào

phương trình (3.11) tương ứng với hai vị trí  $M_1\{1000 \text{ W/m}^2; 60^\circ\text{C}\}$  và  $M_2\{200 \text{ W/m}^2; 0^\circ\text{C}\}$  sẽ tính được quan hệ giữa hai tỷ số biến áp như sau.

$$\frac{K_{mp1}^2}{K_{mp2}^2} = \frac{(21,1 - (-0,379)(0 - 25))}{200(3,8 + 0,0789(0 - 25))} \frac{1000(3,8 + 0,0789(60 - 25))}{(21,1 - (-0,379)(60 - 25))} = 6,075 \quad (3.12)$$

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

Tỷ số K quan hệ với giá trị D tùy theo tính chất của các bộ DC/DC như trong biểu thức (3.3). Như đã phân tích ở trên, để an toàn cho bộ DC/DC thì các giá trị D tại hai vị trí  $M_1$  và  $M_2$  nên tiệm cận 0,5. Nghĩa là chúng phải thỏa mãn điều kiện sau.

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

Kết hợp (3.13) và (3.14) để xác định giới hạn của các bộ DC/DC như sau:

***Đối với bộ chuyển đổi Boost***

$$\begin{cases} D_{mp1} = 1 - D_{mp2} \\ \frac{1}{1 - D_{mp1}} = 2,46 \frac{1}{1 - D_{mp2}} \end{cases} \quad (3.15)$$

Giải hệ phương trình (3.15) tính được  $D_{mp1} = 0,71$  và  $D_{mp2} = 0,29$ .

***Đối với bộ chuyển đổi Buck***

$$\begin{cases} D_{mp1} = 1 - D_{mp2} \\ D_{mp1} = 2,46D_{mp2} \end{cases} \quad (3.16)$$

Từ đó tính được  $D_{mp1} = 0,71$  và  $D_{mp2} = 0,29$ .

***Đối với bộ chuyển đổi Buck-boost***

$$\begin{cases} D_{mp1} = 1 - D_{mp2} \\ \frac{D_{mp1}}{1 - D_{mp1}} = 2,46 \frac{D_{mp2}}{1 - D_{mp2}} \end{cases} \quad (3.17)$$

Do đó  $D_{mp1} = 0,61$  và  $D_{mp2} = 0,39$ .

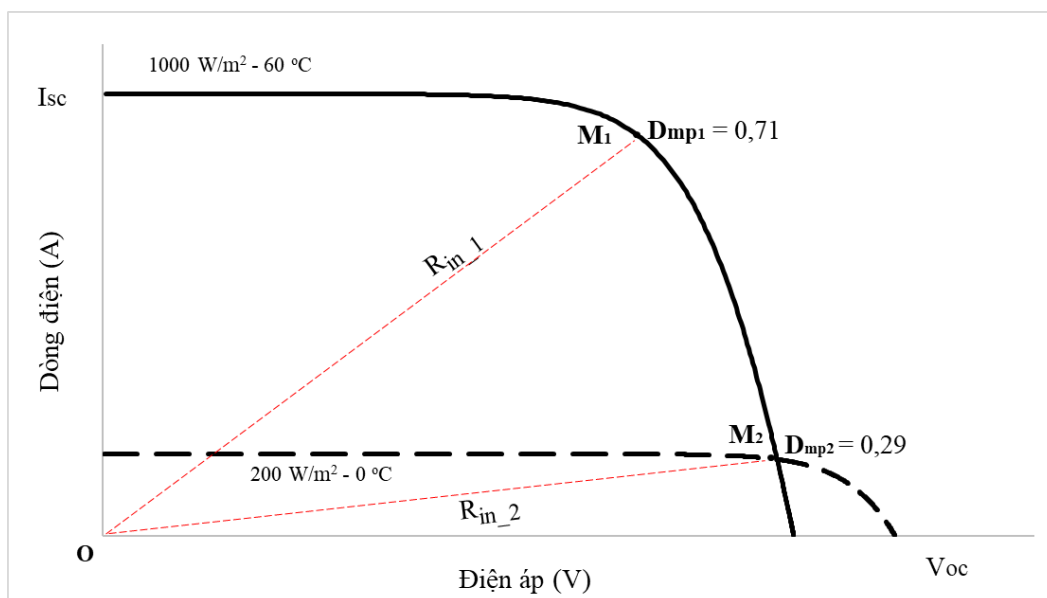
Thực hiện khảo sát tương tự cho các loại PV còn lại trong Bảng 3.1 thu được kết quả liệt kê trong Bảng 3.5 cho thấy: phạm vi hoạt động tốt nhất của các bộ DC/DC

trong khoảng từ 0,29 đến 0,71. Giới hạn này đảm bảo ở mọi điều kiện hoạt động thì nó cũng không quá gần giá trị cận biên 0 hay 1. Nghĩa là nếu  $D$  tại  $M_1$  mà tiến gần 0,5 thì ở điều kiện  $M_2$  chắc chắn nó sẽ tiệm cận giá trị 0 và ngược lại là tiệm cận 1. Như vậy thì cả hai trường hợp đều không tốt cho các chế độ làm việc của các mạch DC/DC như đã phân tích.

**Bảng 3.5.** Giới hạn hoạt động tốt nhất của  $D$ .

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

### 3.2. Đề xuất phương pháp xác định $I_{sc}$ dựa vào $D$ .



**Hình 3.4.** Giới hạn điện trở xác định giá trị  $I_{sc}$  của PV.

Theo những phân tích ở trên, phạm vi hoạt động tốt nhất của  $D$  từ  $D_{mp1}$  đến  $D_{mp2}$  tương ứng với hai giá trị điện trở  $R_{in-1}$  và  $R_{in-2}$  thể hiện trong Hình 3.4. Trên đường

đặc tính I-V hình thành hai vùng tuyến tính và phi tuyến rõ rệt và  $I_{sc}$  của PV thuộc vùng tuyến tính. Nghĩa là có thể tính gần đúng thông số này bằng một giá trị bất kỳ trong vùng tuyến tính. Do đó, việc khảo sát phạm vi tuyến tính dựa vào D là cơ sở để tính  $I_{sc}$  mà không cần phải gián đoạn cấp điện như những nghiên cứu trước đây.

Cũng trên Hình 3.4 cho thấy: nếu  $D > D_{mp1}$  thì điện trở  $R < R_{in-1}$  nên dòng đo được thuộc vùng tuyến tính. Ngược lại, nếu  $D < D_{mp2}$  thì  $R > R_{in-2}$  và nó luôn rơi vào vùng phi tuyến. Từ những phân tích này tác giả nhận thấy có thể tính gần đúng  $I_{sc}$  dựa vào một giá trị  $D > D_{mp1}$ . Tuy nhiên, miền giá trị chính xác của D để đo được  $I_{sc}$  tùy thuộc vào loại PV và phạm vi hoạt động tốt nhất của D như đã khảo sát. Trong khi đó với  $D < D_{mp2}$  sẽ phù hợp hơn cho việc xác định giá trị  $V_{oc}$ .

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

Để ước lượng giá trị  $I_{sc}$ , tài liệu [77] đã đề xuất một vị trí A( $V_A, I_A$ ) tại  $0,2V_{oc}$ . Nghĩa là nếu một vị trí có điện áp  $V_A = 0,2V_{oc}$  thì giá trị dòng điện tại đây là  $I_{sc} = I_A$ . Khi đó, mối quan hệ giữa các tỷ số biến áp tại A và một vị trí MPP bất kỳ sẽ được rút ra từ biểu thức (3.8) như sau.

$$\frac{K_A^2}{K_{mp}^2} = \frac{V_{mp}}{I_{mp}} \frac{I_A}{V_A} = \frac{0,8V_{oc}}{0,93I_{sc}} \frac{I_{sc}}{0,2V_{oc}} = 4,301 \quad (3.18)$$

$$K_A = 2,074K_{mp} \quad (3.19)$$

Sử dụng giá trị  $D_{mp1}$  của MSX-60 để khảo sát giá trị D tại vị trí A( $0,2V_{oc}; I_{sc}$ ) thu được kết quả như sau:

#### ***Đối với bộ chuyển đổi Boost***

$$\frac{1}{1-D_A} = 2,074 \frac{1}{1-D_{mp1}} \quad (3.20)$$

Với giá trị  $D_{mp1} = 0,71$  thế vào biểu thức (3.20) tính được  $D_A = 0,86$ .

#### ***Đối với bộ chuyển đổi Buck***

$$D_A = 2,074D_{mp1} \quad (3.21)$$

Thế  $D_{mp1} = 0,71$  vào biểu thức (3.21) tính được giá trị  $D_A = 1,48$ .

**Đối với bộ chuyển đổi Buck-boost**

$$\frac{D_A}{1-D_A} = 2,074 \frac{D_{mp1}}{1-D_{mp1}} \quad (3.22)$$

Sử dụng giá trị  $D_{mp1} = 0,71$  thay vào biểu thức (3.22) tính được  $D_A = 0,76$ .

Khảo sát giá trị  $D$  tại vị trí  $0,2V_{oc}$  theo cách tương tự cho các loại PV còn lại trong Bảng 3.1 áp dụng đối với ba bộ chuyển đổi DC/DC được tổng hợp trong Bảng 3.6 cho thấy:

**Bảng 3.6.** Giá trị  $D$  của các PV tại  $0,2V_{oc}$  và  $0,4V_{oc}$ .

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

- Đối với Boost và Buck-boost, có thể đo  $I_{sc}$  dựa vào  $D$  tại vị trí  $0,2V_{oc}$  do nó thuộc giới hạn cho phép hoạt động của các khóa chuyển mạch.
- Đối với bộ chuyển đổi Buck, các giá trị thu được lớn 1 không thỏa mãn. Do đó không thể kết luận có đo được  $I_{sc}$  theo  $D$  tại vị trí  $0,2V_{oc}$  cho mạch này hay không.
- Các giá trị của  $D$  càng tiệm cận tới 0 hoặc 1 thì càng bất lợi cho hoạt động của các bộ chuyển đổi.

Những bất lợi trên đòi hỏi cần có một giải pháp tính  $I_{sc}$  an toàn, chính xác hơn. Để giải quyết vấn đề này, luận án thực hiện khảo sát chi tiết vùng tuyến tính trên đặc tuyến I-V của các loại PV để tìm ra giá trị hợp lý cho việc tính toán  $I_{sc}$ .

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

Từ mô hình toán của tế bào PV trình bày trong Hình 2.1 cho thấy dòng điện ngõ ra của nó gồm ba thành phần cơ bản là dòng quang điện ( $I_{ph}$ ), dòng trên diode ( $I_D$ ) và dòng trên điện trở song song ( $I_{Rsh}$ ). Ở một điều kiện vận hành nhất định, mối quan hệ này được biểu diễn như sau [78], [79], [80].

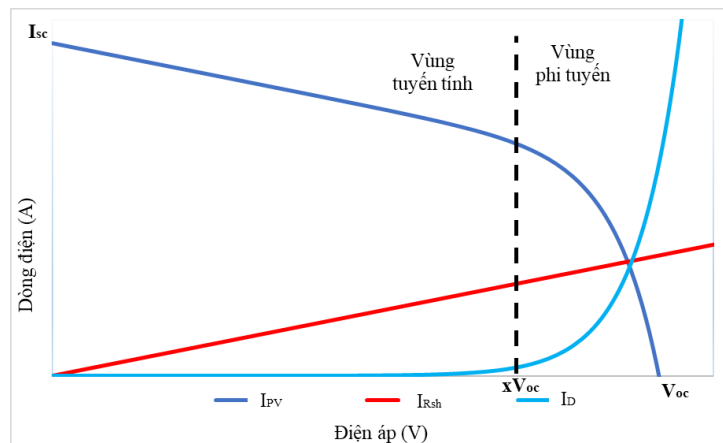
$$I_{pv} = I_{sc} - I_D - I_{Rsh} \quad (3.23)$$

Điện áp ra của PV thay đổi thì các dòng thành phần trong biểu thức (3.23) cũng biến đổi ảnh hưởng đến hình dạng của đường đặc tuyến I-V. Vì vậy, việc khảo sát  $V_{pv}$  trong giới hạn từ 0 đến  $V_{oc}$  được thực hiện theo giả thuyết  $V_{pv} = xV_{oc}$  trong đó giá trị  $0 \leq x \leq 1$ .

Xem thành phần  $I_{pv}R_s \ll V_{pv} = xV_{oc}$  thì dòng điện qua diode và điện trở  $R_{sh}$  có thể được biểu diễn dưới dạng các phương trình sau [81], [82].

$$I_D = I_0 \left\{ e^{\frac{qxV_{oc}}{nkT_c}} - 1 \right\} \quad (3.24)$$

$$I_{Rsh} = \frac{xV_{oc}}{R_{sh}} \quad (3.25)$$



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

Biểu diễn các phương trình (3.23) đến (3.25) bằng đồ thị Hình 3.5 cho thấy:

- Thành phần gây ra sự phi tuyến trên đường cong I-V là  $I_D$ .
- Trong phạm vi  $0 < V_{pv} < xV_{oc}$  các phương trình xem như tuyến tính. Độ dốc

của đặc tuyến I-V trong vùng này chủ yếu do thành phần  $I_{Rsh}$  gây nên.

- Khi  $V_{pv} > xV_{oc}$ , đặc tuyến I-V bắt đầu phi tuyến do thành phần  $I_D$  gây ra.
- Vị trí làm cho đường đặc tuyến I-V bắt đầu phi tuyến gần với vị trí mà hiệu số giữa  $I_{Rsh} - I_D$  đạt giá trị lớn nhất (trong giới hạn  $V_{oc}$ ).

Do đó, để xác định vùng tuyến tính đồng nghĩa với việc xác định giá trị  $x$  của hàm  $f(x)$  sao cho biểu thức (3.26) đạt giá trị cực đại.

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

Phương trình có dạng  $f(x) = ax - b(e^{cx} - 1)$

Trong đó  $a = \frac{V_{oc}}{R_{sh}}$ ;  $b = I_0$ ;  $c = \frac{qV_{oc}}{nkT_c}$

$$\frac{f(x)}{dx} = 0 \Rightarrow a - bce^{cx} = 0 \Rightarrow x = \frac{1}{c} \ln\left(\frac{a}{bc}\right)$$

$$\text{Do } \frac{f(x)}{(dx)^2} = -bc^2 e^{cx} < 0$$

Nên hàm  $f(x)$  đạt cực đại khi.

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

Một cách tương đối có thể xem như đường cong I-V là tuyến tính khi điện áp vận hành đo được nằm trong khoảng nhỏ hơn  $x$  trong biểu thức (3.27). Tuy nhiên, phương trình đường cong  $I_D$  phi tuyến ngay trước vị trí  $xV_{oc}$  (Hình 3.5). Do đó, một giới hạn  $\lambda = 60\%$  của  $x$  được đề xuất để đảm bảo chắc chắn lấy được một đoạn thẳng hoàn toàn tuyến tính. Vì vậy, vị trí để phân biệt giữa vùng tuyến tính và phi tuyến được xác định lại theo biểu thức (3.28) sau đây.

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

Sử dụng các tham số của các loại PV đề xuất trong Bảng 3.1 thay vào phương



trình (3.28) sẽ xác định được giới hạn phân biệt giữa vùng tuyến tính và phi tuyến trên đường cong đặc tính I-V của chúng. Kết quả khảo sát được tổng hợp và giới thiệu trong Bảng 3.7 sau đây.

**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

Đề đảo bảo tham số  $\lambda = 60\%$  đã chọn và giới hạn điện áp tính được trong Bảng 3.7 đáng tin cậy, phương pháp khảo sát bằng đồ thị cũng đã được tiến hành kiểm tra. Các phương trình từ (3.23) đến (3.25) được biểu diễn bằng đồ thị đối với tất cả các loại PV đề xuất ở bức xạ  $1000 \text{ W/m}^2$  và nhiệt độ từ  $0^\circ\text{C}$  đến  $60^\circ\text{C}$ . Trường hợp này được chọn khảo sát vì tỷ lệ  $k_v$  của nó nhỏ nhất nên độ dài đoạn tuyến tính có tỷ lệ ngắn nhất. Tổng hợp các kết quả khảo sát bằng đồ thị được trình bày trong Hình 3.6.

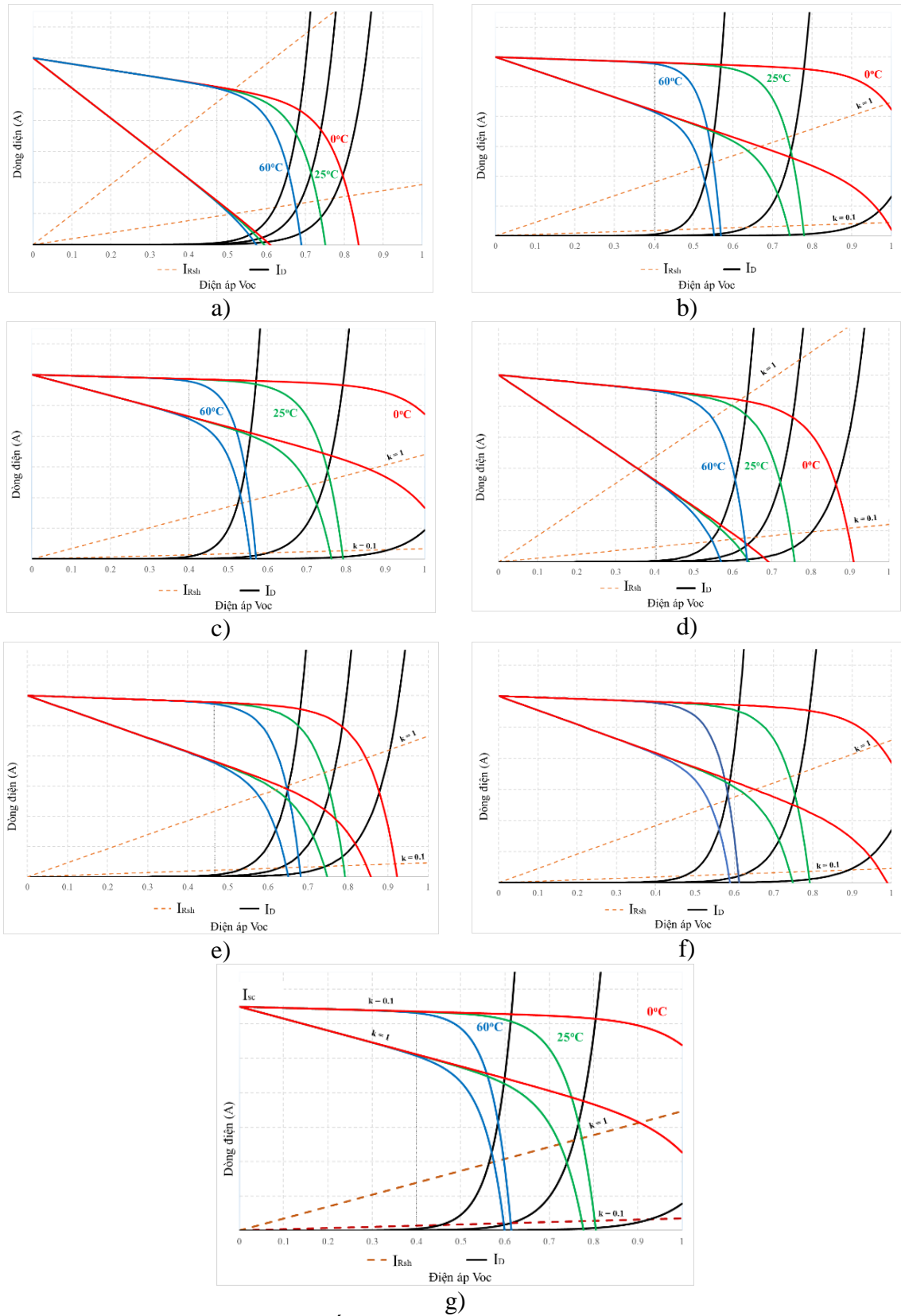
Từ kết quả tính toán và khảo sát bằng đồ thị cho thấy các loại PV đều tuyến tính trong khoảng điện áp nhỏ hơn  $0,4V_{oc}$ . Vì vậy, vị trí này được chọn như điểm giới hạn để phân biệt giữa vùng tuyến tính và phi tuyến trên đường cong I-V của tất cả các loại PV trong nghiên cứu này. Nó cũng là giới hạn được đề xuất để xây dựng phương án tính giá trị  $I_{sc}$ .

Xuất phát từ những kết quả nghiên cứu ở trên, vị trí điểm  $A'(0,4V_{oc}, I_{sc})$  được chọn thay cho giá trị  $A(0,2V_{oc}, I_{sc})$  để tính  $I_{sc}$  của PVS. Tỷ số đóng cắt tại  $A'$  được xác định dựa vào phương trình (3.8) và quan hệ giữa các tỷ số biến áp tại  $A'$  và MPP bất kỳ như sau.

$$\frac{K_{A'}^2}{K_{mp}^2} = \frac{V_{mp}}{I_{mp}} \frac{I_A}{V_A} = \frac{0,8V_{oc}}{0,93I_{sc}} \frac{I_{sc}}{0,4V_{oc}} = 2,13 \quad (3.29)$$

$$K_{A'} = 1,46K_{mp} \quad (3.30)$$

Quan hệ giữa  $D_{mp1}$  của MSX-60 với  $D_{A'}$  tại vị trí  $A'(0,4V_{oc}; I_{sc})$  tùy thuộc vào từng loại mạch DC/DC và được xác định như sau.



**Hình 3.6.** Khảo sát vùng tuyến tính của PV loại a) GxB-340; b) Shell ST40; c) Shell S70; d) SSt 230-60P; e) Shell SQ150, f) Shell SP75, và g) MSX-60.

***Đối với bộ chuyển đổi Boost***

$$\frac{1}{1-D_{A'}} = 1,46 \frac{1}{1-D_{mp1}} \quad (3.31)$$

Với  $D_{mp1} = 0,71$  thế vào phương trình (3.31) tính được  $D_{A'} = 0,80$ .

***Đối với bộ chuyển đổi Buck***

$$D_{A'} = 1,46 D_{mp1} \quad (3.32)$$

Thay  $D_{mp1} = 0,71$  vào phương trình (3.32) tính được  $D_{A'} = 1,04$ .

***Đối với bộ chuyển đổi Buck-boost***

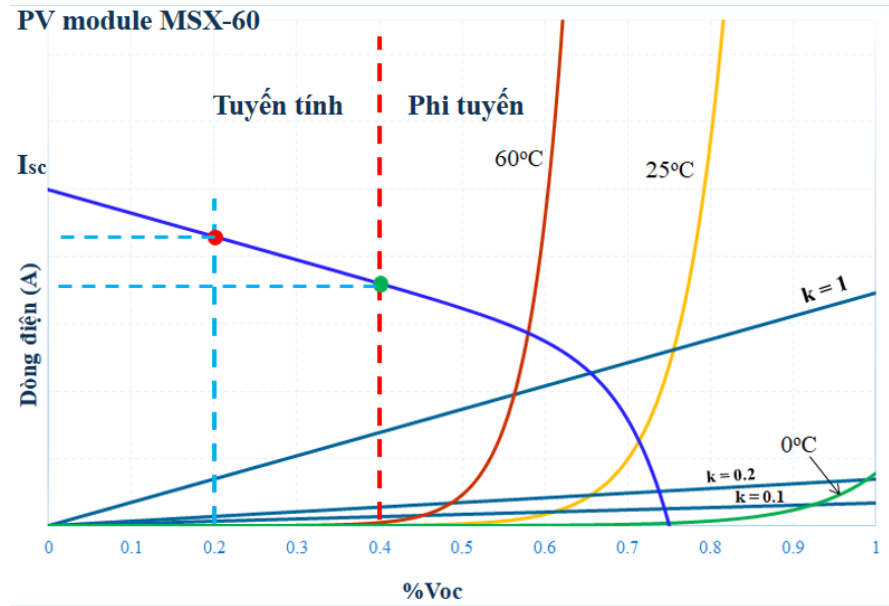
$$\frac{D_{A'}}{1-D_{A'}} = 1,46 \frac{D_{mp1}}{1-D_{mp1}} \quad (3.33)$$

Thay  $D_{mp1} = 0,71$  vào biểu thức (3.33) tính được  $D_{A'} = 0,69$ .

Thực hiện khảo sát giá trị  $D$  tại  $0,4V_{oc}$  cho các PV còn lại trong Bảng 3.1 theo cách tương tự với ba loại DC/C được tổng hợp và so sánh với vị trí  $0,2V_{oc}$  trong Bảng 3.6 cho thấy.

- Các giá trị  $D$  tại  $0,4V_{oc}$  nhỏ hơn so với tại  $0,2V_{oc}$  trong mọi trường hợp khảo sát. Nó vẫn đảm bảo tính được  $I_{sc}$  nhưng an toàn hơn cho các bộ DC/DC.
- Có thể đo được  $I_{sc}$  tại  $D > 0,8$  đối với Boost và  $D > 0,7$  đối với Buck-boost.
- Giá trị  $D$  đối với bộ Buck cũng hợp lý hơn khi nó dao động quanh ngưỡng 1 thay vì vô lý như khi khảo sát tại  $0,2V_{oc}$ .

Tuy nhiên, cũng từ kết quả khảo sát bằng đồ thị nhận thấy độ dốc của đường đặc tuyến I-V phụ thuộc vào giá trị dòng điện trên  $R_{sh}$ . Điện áp  $V_{pv}$  càng lớn thì  $I_{Rsh}$  tăng làm cho phần tuyến tính càng dốc hơn. Khi đó, việc đề xuất vị trí tính toán  $I_{sc}$  tại  $0,2V_{oc}$  hay  $0,4V_{oc}$  cũng đều gây ra những sai số nhất định (Hình 3.7). Nếu áp dụng vị trí  $0,2V_{oc}$  để xác định  $I_{sc}$  thì sai số tính toán nhỏ nhưng giá trị  $D$  lớn ảnh hưởng đến chất lượng của các bộ DC//DC. Ngược lại, nếu sử dụng vị trí  $0,4V_{oc}$  thì an toàn hơn nhưng sai số tính toán  $I_{sc}$  gia tăng. Do đó, phương pháp ngoại suy tuyến tính từ hai điểm bất kỳ trên đặc tuyến I-V được đề xuất để tính  $I_{sc}$  để đảm bảo chính xác hơn.



**Hình 3.7.** Khảo sát vùng tuyến tính để xuất tính  $I_{sc}$ .

### 3.2.3. Đề xuất phương pháp tính $I_{sc}$

Giá trị dòng điện đo được tại  $0,2V_{oc}$  và  $0,4V_{oc}$  trong Hình 3.7 đều có những sai số nhất định so với  $I_{sc}$  của hệ thống PV. Tuy nhiên, chúng có một điểm chung là cùng nằm trong vùng tuyến tính của đường cong I-V. Nếu sử dụng tọa độ hai điểm này để vẽ một đường thẳng thì xác suất nó đi qua  $I_{sc}$  là rất lớn. Từ đó có thể tính được giá trị  $I_{sc}$  với sai số nhỏ nhất mà không cần gián đoạn cung cấp điện. Bên cạnh đó, thông số tỷ số đóng cắt D tại hai vị trí này đã được khảo sát và liệt kê trong Bảng 3.6. Nghĩa là chỉ cần sử dụng hai điểm  $P_1(V_1, I_1)$  và  $P_2(V_2, I_2)$  trong vùng điện áp nhỏ hơn  $0,4V_{oc}$  để thành lập phương trình đường thẳng đi qua  $I_{sc}$  như biểu thức (3.34).

$$I = \frac{I_2 - I_1}{V_2 - V_1} V + \left[ I_1 - \frac{I_2 - I_1}{V_2 - V_1} V_1 \right] \quad (3.34)$$

Giá trị dòng ngắn mạch tính toán  $I_{cal}$  được rút ra từ biểu thức (3.34) khi cho điện áp  $V = 0$  là.

$$I_{cal} = I_1 - \frac{I_2 - I_1}{V_2 - V_1} V_1 \quad (3.35)$$

Sai số tính toán dòng ngắn mạch  $\Delta I\%$  được kiểm tra theo biểu thức (3.36).

$$\Delta I\% = \left| \frac{I_{\text{cal}} - I_{\text{sc}}}{I_{\text{sc}}} \right| 100\% \quad (3.36)$$

**Bảng 3.8.**  $I_{\text{sc}}$  và  $V_{\text{oc}}$  của các loại PV trong những trường hợp khảo sát.

Loại PV		Trường hợp khảo sát							
		1	2	3	4	5	6	7	8
<b>MSX-60</b>	$I_{\text{sc}}$ (A)	3,76	15,4	2,76	8,83	8,27	9,73	6,01	6,39
	$V_{\text{oc}}$ (V)	19,41	18,4	21,1	20,36	20,36	20,55	19,97	20,05
<b>Shell SP-75</b>	$I_{\text{sc}}$ (A)	20,15	19,2	21,8	21,16	21,1	21,26	20,68	20,78
	$V_{\text{oc}}$ (V)	4,75	19,4	3,5	11,16	10,44	12,35	7,6	8,07
<b>Shell SQ-150</b>	$I_{\text{sc}}$ (A)	40,08	38,2	43,5	42,09	41,96	42,31	41,14	41,34
	$V_{\text{oc}}$ (V)	4,74	19,2	3,65	11,13	10,43	12,32	7,58	8,06
<b>SST 230-60P</b>	$I_{\text{sc}}$ (A)	33,94	32,4	36,7	35,63	35,52	35,82	34,85	35
	$V_{\text{oc}}$ (V)	8,41	34,2	6,34	19,76	18,49	21,86	13,45	14,29
<b>Shell S70</b>	$I_{\text{sc}}$ (A)	19,54	18,5	21,3	20,55	20,48	20,67	20,08	20,17
	$V_{\text{oc}}$ (V)	4,43	17,8	3,34	10,41	9,74	11,51	7,08	7,53
<b>GxB-340</b>	$I_{\text{sc}}$ (A)	47,5	47	50,2	49,81	49,67	50,05	48,71	48,95
	$V_{\text{oc}}$ (V)	9,16	37,5	6,72	21,52	20,15	23,81	14,65	15,57
<b>Shell ST40</b>	$I_{\text{sc}}$ (A)	21,61	20,8	23,2	22,58	22,53	22,67	22,08	22,22
	$V_{\text{oc}}$ (V)	2,64	10,6	2,07	6,2	5,8	6,86	4,22	4,48

Tóm lại, đối với mạch Boost và Buck-boost, hai giá trị  $D_1 = 0,8$  và  $D_2 = 0,82$  được chọn để đo  $I_{\text{cal}}$  theo phương trình (3.35). Trong khi đó mạch Buck đề xuất đo  $I_{\text{sc}}$  tại  $D = 1$ . Để kiểm tra sai số tính toán cho tất cả các loại PV theo phương pháp đề xuất, các giá trị  $I_{\text{sc}}$  và  $V_{\text{oc}}$  của chúng được khảo sát và liệt kê trong Bảng 3.8. Dữ liệu này dùng để so sánh với kết quả tính toán  $I_{\text{cal}}$  trong những điều kiện vận hành khác nhau. Bên cạnh đó, sai số dòng điện phần trăm trung bình đối với từng loại DC/DC cũng được thống kê. Số liệu tính toán trong Bảng 3.9 cho thấy:

Đối với bộ chuyển đổi Boost: sai số dòng điện lớn nhất là 2,63%, sai số trung bình lớn nhất là 0,34% và có thể đạt độ chính xác 100% trong một vài trường hợp.

Tương tự như Boost thì Buck-boost cũng có độ chính xác đáng kể với sai số trung bình lớn nhất chỉ 0,18%. Tất cả các loại PV trong mọi điều kiện đề xuất khảo

sát đều có sai số trung bình nhỏ hơn một đơn vị với sai số lớn nhất là 1,12%.

**Bảng 3.9.** Sai số tính toán  $I_{sc}$  của các loại PV trong các trường hợp khảo sát.

Loại PV	Trường hợp khảo sát								$\Delta I_{tb}\%$	
	1	2	3	4	5	6	7	8		
<b>Boost</b>										
<b>MSX-60</b>	$I_{cal}$ (A)	3,76	15,44	2,76	8,83	8,27	9,77	6,02	6,39	
	$\Delta I\%$	0	0,39	0	0	0	0,41	0,17	0	0,12
<b>Shell SP-75</b>	$I_{cal}$ (A)	4,75	19,92	3,5	11,2	10,45	12,4	7,6	8,07	
	$\Delta I\%$	0	2,63	0	0	0,1	0	0	0	0,34
<b>Shell SQ-150</b>	$I_{cal}$ (A)	4,74	19,2	3,65	11,1	10,43	12,32	7,58	8,06	
	$\Delta I\%$	0	0,05	0	0,09	0	0	0	0	0,017
<b>SST 230-60P</b>	$I_{cal}$ (A)	8,41	35,01	6,34	19,76	18,5	21,9	13,45	14,3	
	$\Delta I\%$	0	2,46	0	0	0,05	0	0	0	0,31
<b>Shell S70</b>	$I_{cal}$ (A)	4,43	18,3	3,34	10,41	9,75	11,52	7,08	7,53	
	$\Delta I\%$	0	2,53	0	0	0,1	0,09	0	0	0,34
<b>GxB-340</b>	$I_{cal}$ (A)	9,16	37,59	6,72	21,52	20,15	23,81	14,65	15,57	
	$\Delta I\%$	0	0,29	0	0	0	0	0	0	0,036
<b>Shell ST40</b>	$I_{cal}$ (A)	2,64	10,61	2,07	6,2	5,8	6,86	4,22	4,48	
	$\Delta I\%$	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
<b>Buck</b>										
<b>MSX-60</b>	$I_{cal}$ (A)	3,76	15,73	2,76	8,84	8,27	9,78	6,02	6,39	
	$\Delta I\%$	0	2,28	0	0,11	0	0,51	0,17	0	0,38
<b>Shell SP-75</b>	$I_{cal}$ (A)	4,75	20,1	3,5	11,16	10,45	12,35	7,6	8,07	
	$\Delta I\%$	0	3,55	0	0	0,1	0	0	0	0,46
<b>Shell SQ-150</b>	$I_{cal}$ (A)	4,74	19,16	3,65	11,14	10,43	12,32	7,58	8,06	
	$\Delta I\%$	0	0,05	0	0,09	0	0	0	0	0,02
<b>SST 230-60P</b>	$I_{cal}$ (A)	8,41	36,17	6,34	19,77	18,51	21,88	13,46	14,29	
	$\Delta I\%$	0	5,85	0	0,05	0,11	0,09	0,07	0	0,77
<b>Shell S70</b>	$I_{cal}$ (A)	4,43	18,57	3,34	10,41	9,75	11,52	7,08	7,53	
	$\Delta I\%$	0	4,33	0	0	0,1	0,09	0	0	0,56
<b>GxB-340</b>	$I_{cal}$ (A)	9,16	37,84	6,72	21,51	20,15	23,81	14,65	15,57	
	$\Delta I\%$	0	0,96	0	0,05	0	0	0	0	0,13
<b>Shell ST40</b>	$I_{cal}$ (A)	2,64	10,64	2,07	6,2	5,81	6,86	4,22	4,49	
	$\Delta I\%$	0	0,28	0	0	0,17	0	0	0,22	0,08
<b>Buck-boost</b>										
<b>MSX-60</b>	$I_{cal}$ (A)	3,76	15,39	2,76	8,84	8,27	9,77	6,02	6,39	

	$\Delta I\%$	0	0,07	0	0,11	0	0,41	0,17	0	0,1
<b>Shell SP-75</b>	$I_{cal}$ (A)	4,75	19,42	3,5	11,2	10,5	12,35	7,6	8,07	
	$\Delta I\%$	0	0,05	0	0	0,1	0	0	0	0,02
<b>Shell SQ-150</b>	$I_{cal}$ (A)	4,74	19,15	3,65	11,1	10,4	12,32	7,58	8,06	
	$\Delta I\%$	0	0	0	0,09	0	0	0	0	0,01
<b>SST 230-60P</b>	$I_{cal}$ (A)	8,41	34,19	6,35	19,8	18,5	21,86	13,5	14,3	
	$\Delta I\%$	0	0,06	0,16	0	0,05	0	0,07	0,07	0,05
<b>Shell S70</b>	$I_{cal}$ (A)	4,43	18	3,34	10,4	9,75	11,52	7,09	7,53	
	$\Delta I\%$	0	1,12	0	0	0,1	0,09	0,14	0	0,18
<b>GxB-340</b>	$I_{cal}$ (A)	9,16	37	6,72	21,52	20,15	23,8	14,66	15,57	
	$\Delta I\%$	0	0	0	0	0	0,04	0,07	0	0,02
<b>Shell ST40</b>	$I_{cal}$ (A)	2,64	10,61	2,07	6,2	5,81	6,86	4,22	4,49	
	$\Delta I\%$	0	0	0	0	0,17	0	0	0,22	0,05

Do mạch Buck được đề xuất đo  $I_{sc}$  tại  $D = 1$  nên có sai số nhiều hơn. Sai số lớn nhất là 5,85%. Tuy nhiên sai số trung bình lớn nhất và sai số trung bình nhỏ nhất cũng chỉ lần lượt là 0,77% và 0,13%. Kết quả tính toán có độ chính xác trên 99% nên phương pháp đề xuất có thể chấp nhận được trong giới hạn của nghiên cứu này.

Tóm lại, mặc dù có sai số khác nhau khi tính giá trị  $I_{sc}$  cho các loại PV khác nhau khi ứng dụng với từng bộ DC/DC nhưng sai số bình quân của chúng chỉ khoảng 0,2%. Kết quả khẳng định rằng giải pháp đề xuất khá phù hợp để tính toán trực tiếp  $I_{sc}$  của hệ thống PV trong quá trình vận hành mà không phải gián đoạn cung cấp điện. Giải pháp góp phần gia tăng độ chính xác và tốc độ của kỹ thuật MPPT có sử dụng tham số điều khiển liên quan đến dòng  $I_{sc}$ .

### 3.3. Giải pháp xác định $V_{oc}$ dựa vào D

Phương pháp xác định  $V_{oc}$  dựa trên giá trị D kém chính xác hơn do nó thuộc vùng phi tuyến. Tuy nhiên bằng cách này có thể giảm đáng kể thời gian gián đoạn cung cấp điện, gia tăng độ ổn định và cải thiện hiệu suất sinh điện của hệ thống PV. Theo [77], giá trị  $V_{oc}$  có thể được tính dựa vào tọa độ điểm B( $V_{oc}; 0,2I_{sc}$ ). Có thể giải thích chi tiết rằng, nếu một điểm trên đường cong I-V thỏa mãn điều kiện dòng điện bằng  $0,2I_{sc}$  thì điện áp tại đó được xem như  $V_{oc}$ . Với giả thuyết này, tỷ số đóng cắt D tại điểm B( $V_{oc}; 0,2I_{sc}$ ) cần được xác định để đo được giá trị điện áp  $V_{oc}$ .

Trở lại Hình 3.4, nếu vị trí  $M_1$  được chọn để khảo sát tính  $I_{sc}$  thì vị trí  $M_2$  sẽ phù hợp hơn để xác định tham số  $V_{oc}$ . Nó đảm bảo rằng, với  $R_{in\_2}$  thì hầu như tất cả các đường cong đều làm việc trong vùng phi tuyến và gần với  $V_{oc}$  nhất. Một cách tương tự, mối quan hệ giữa tỷ số biến đổi điện áp tại điểm  $M_2$  so với điểm  $B(V_{oc}; 0.2I_{sc})$  được rút ra từ biểu thức (3.7) theo quan hệ sau:

$$\frac{K_B^2}{K_{mp}^2} = \frac{V_{mp}}{I_{mp}} \frac{I_B}{V_B} = \frac{0,8V_{oc}}{0,93I_{sc}} \frac{0,2I_{sc}}{V_{oc}} = 0,172 \quad (3.37)$$

$$K_B = 0,414K_{mp} \quad (3.38)$$

Sử dụng  $D_{mp2} = 0,29$  của PV loại MSX-60 để khảo sát vị trí  $B(V_{oc}; 0,2I_{sc})$  có kết quả như sau:

**Đối với bộ chuyển đổi Boost**

$$\frac{1}{1-D_B} = 0,414 \frac{1}{1-D_{mp2}} \quad (3.39)$$

Thay giá trị  $D_{mp2} = 0,29$  vào biểu thức (3.39) tính được  $D_B = -0,71$ .

**Đối với bộ chuyển đổi Buck**

$$D_B = 0,414D_{mp2} \quad (3.40)$$

Với  $D_{mp2} = 0,29$  thế vào biểu thức (3.40) có thể tính được  $D_B = 0,12$ .

**Đối với bộ chuyển đổi Buck-boost**

$$\frac{D_B}{1-D_B} = 0,414 \frac{D_{mp2}}{1-D_{mp2}} \quad (3.41)$$

Thay thế  $D_{mp2} = 0,29$  vào biểu thức (3.41) sẽ tính được giá trị  $D_B = 0,21$ .

Một cách tương tự, sử dụng thông số của các loại PV đã cho trong Bảng 3.1 để khảo sát giá trị  $D$  tại vị trí  $0,2I_{sc}$ . Kết quả khảo sát đối với ba bộ Boost, Buck, và Buck-boost được tổng hợp trong Bảng 3.10 cho thấy như sau:

Có thể đo được  $V_{oc}$  tại  $D < 0,1$  đối với mạch Buck và  $D < 0,2$  đối với mạch Buck-boost. Do đó  $D = 0,1$  được chọn như một giới hạn chung cho hai mạch này để xác định



giá trị  $V_{oc}$ .

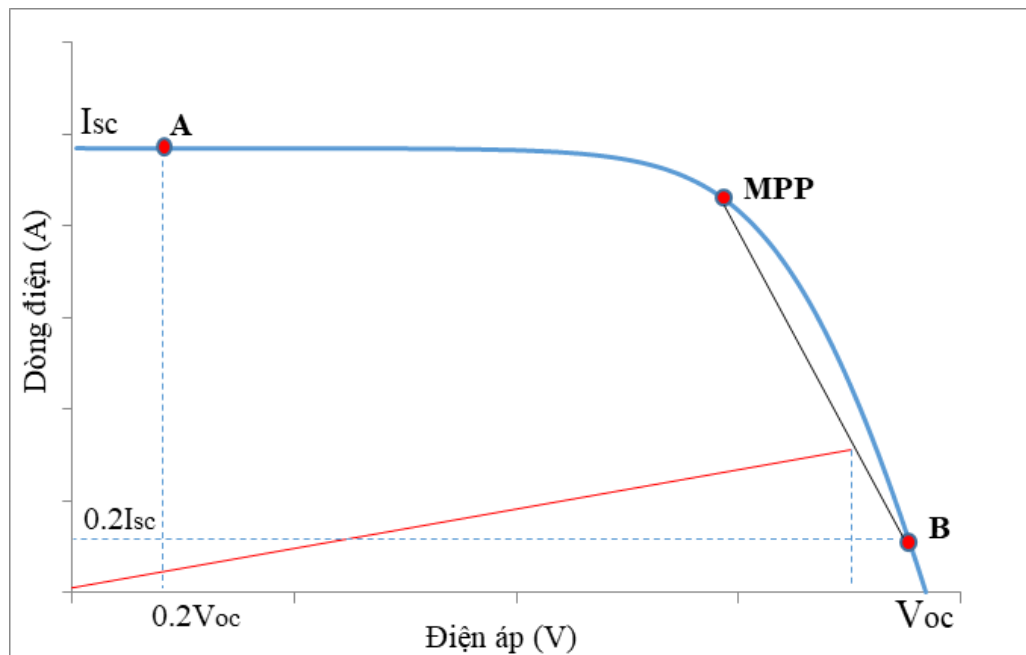
Mạch Boost có  $D < 0$  nên giới hạn nhỏ nhất được dùng để đo  $V_{oc}$  là  $D = 0$ .

Với tọa độ điểm B trong Hình 3.8, khi nhiệt độ và bức xạ giảm sâu thì điện trở nội tăng đáng kể. Tuy nhiên điện áp tại B luôn nhỏ hơn  $V_{oc}$  và tỷ số biến áp tại đây khá nhỏ nên giá trị D tại đây cần phải thỏa mãn phương trình (3.42) như sau:

$$\frac{V_{out}}{I_{out}} = K_B^2 \frac{V_B}{I_B} = K_B^2 \frac{V_{oc}}{0.2I_{sc}} = K_B^2 \frac{5V_{oc}}{I_{sc}} \quad (3.42)$$

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

Loại PV	MSX-60	Shell SP75	Shell SQ150	SSSt 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



**Hình 3.8.** Khảo sát vùng phi tuyến đề xuất tính  $V_{oc}$ .

Trong khi đó, điện áp tại vị trí MPP có giá trị trong khoảng từ  $0,8V_{oc}$  đến  $V_B$ . Do đó, xác định được tỷ số D trong vùng điện áp này có thể ước lượng gần đúng giá trị điện áp  $V_{oc}$ . Phương trình đường thẳng đi qua hai điểm MPP và  $B(V_{oc}; 0,2I_{sc})$  được thành lập như biểu thức (3.43) như sau.

$$I = \frac{I_{mp} - I_B}{V_{mp} - V_B} V + I_{mp} - \frac{(I_{mp} - I_B)}{V_{mp} - V_B} V_{mp} \quad (3.43)$$

Trong khi đó, phương trình đường thẳng đi qua gốc tọa độ và điểm MPP là.

$$I = \frac{I_{mp}}{K_{mp}^2 V_{mp}} V \quad (3.44)$$

Điện áp trong vùng từ vị trí MPP tới B có thể được xác định tại giao điểm của hai phương trình (3.43) và (3.44) như sau.

$$\frac{I_{mp}}{K_{mp}^2 V_{mp}} V = \frac{I_{mp} - I_B}{V_{mp} - V_B} V + I_{mp} - \frac{(I_{mp} - I_B)}{V_{mp} - V_B} V_{mp} \quad (3.45)$$

$$\text{Hay } V = \frac{3,85K_{mp}^2}{3,65K_{mp}^2 + 1,16} V_{oc} \quad (3.46)$$

Với PV loại MSX-60 có tỷ số đóng cắt tại điểm  $M_2$  là  $D_{mp2} = 0,29$  thì tỷ số biến áp tương ứng là.

$$K_{mp2} = \frac{1}{1 - D_{mp2}} = \frac{1}{1 - 0,29} = 1,41 \quad (3.47)$$

Thế giá trị  $K_{mp2}$  vào biểu thức (3.46) tính được.

$$V = \frac{3,85(1,41)^2}{3,65(1,41)^2 + 1,16} V_{oc} = 0,91V_{oc} \quad (3.48)$$

Nếu dựng phương trình (3.45) đi qua điểm B( $V_{oc}, 0,2I_{sc}$ ) thì có quan hệ như sau.

$$\frac{I_B}{K_B^2 V_B} V = \frac{I_{mp} - I_B}{V_{mp} - V_B} V + I_{mp} - \frac{(I_{mp} - I_B)}{V_{mp} - V_B} V_{mp} \quad (3.49)$$

$$\text{Hay } V = \frac{3,85K_B^2}{3,65K_B^2 + 0,2} V_{oc} \quad (3.50)$$

Phương trình (3.50) cho thấy; điện áp V tiến tới  $V_{oc}$  khi  $K_B$  tiến tới 1 hay D tiến tới 0. Nghĩa là trong giới hạn  $D > D_{mp2}$  có thể đo được điện áp trung bình lớn hơn

95%  $V_{oc}$ .

Tóm lại giá trị  $D = 0,1$  được chọn để tính  $V_{cal}$  cho hai bộ Buck và Buck-boost, trong khi đó mạch Boost sẽ áp dụng giá trị  $D = 0$ . Các kết quả khảo sát cũng được kiểm tra sai số theo biểu thức (3.51) và tổng hợp trong Bảng 3.11 cho thấy như sau:

$$\Delta V\% = \left| \frac{V_{cal} - V_{oc}}{V_{oc}} \right| 100\% \quad (3.51)$$

**Bảng 3.11.** Sai số tính toán  $V_{oc}$  bằng giải pháp đề xuất.

Loại PV	Các trường hợp khảo sát								Sai số $\Delta V_{tb}\%$	
	1	2	3	4	5	6	7	8		
<b>Boost</b>										
<b>MSX-60</b>	$V_{cal}$ (V)	19,24	18,9	20,4	20,81	20,7	20,97	20,17	20,28	
	$\Delta V\%$	0,88	2,5	3,36	2,21	1,77	2,04	1	1,15	1,86
<b>Shell SP-75</b>	$V_{cal}$ (V)	19,34	18,9	20,6	20,71	20,6	20,83	20,11	20,25	
	$\Delta V\%$	4	1,67	5,42	2,13	2,21	2	2,75	2,57	2,84
<b>Shell SQ-150</b>	$V_{cal}$ (V)	43,21	36,6	41,4	42,41	40,1	40,6	38,71	39,05	
	$\Delta V\%$	7,81	4,29	4,92	0,76	4,48	4,04	5,91	5,54	4,72
<b>SST 230-60P</b>	$V_{cal}$ (V)	34,06	33,3	36,4	36,42	36,3	36,65	35,4	35,6	
	$\Delta V\%$	0,35	2,65	0,79	2,22	2,11	2,32	1,58	1,71	1,72
<b>Shell S70</b>	$V_{cal}$ (V)	18,76	18,3	20,1	20,17	20,1	20,31	19,57	19,69	
	$\Delta V\%$	3,99	1,4	5,36	1,85	1,95	1,74	2,54	2,38	2,65
<b>GxB-340</b>	$V_{cal}$ (V)	45,08	46	46,58	48,51	48,32	48,81	47,05	47,37	
	$\Delta V\%$	5,09	2,04	7,14	2,61	2,72	2,48	3,41	3,23	3,59
<b>Shell ST40</b>	$V_{cal}$ (V)	22,14	22,76	20,43	24,4	24,33	24,54	23,47	23,75	
	$\Delta V\%$	2,45	9,27	11,9	8,06	7,99	8,25	6,3	6,89	7,64
<b>Buck</b>										
<b>MSX-60</b>	$V_{cal}$ (V)	19,2	18,35	20,8	20,36	20,28	20,48	19,85	19,94	
	$\Delta V\%$	0,93	0,33	1,37	0	0,39	0,34	0,6	0,55	0,56
<b>Shell SP-75</b>	$V_{cal}$ (V)	20	19,16	21,5	21,08	21,01	21,19	20,57	20,68	
	$\Delta V\%$	0,84	0,42	1,19	0,38	0,43	0,33	0,53	0,48	0,58
<b>Shell SQ-150</b>	$V_{cal}$ (V)	39,3	37,97	42,7	41,7	41,55	41,94	40,6	40,83	
	$\Delta V\%$	1,9	0,58	1,91	0,93	0,98	0,87	1,31	1,23	1,21

<b>SST 230-60P</b>	V <sub>cal</sub> (V)	33,7	32,33	36,3	35,52	35,4	35,71	34,7	34,86	
	ΔV%	0,74	0,34	0,95	0,31	0,34	0,31	0,43	0,4	0,48
<b>Shell S70</b>	V <sub>cal</sub> (V)	19,4	18,48	21	20,49	20,42	20,6	19,98	20,08	
	ΔV%	0,82	0,32	1,13	0,29	0,29	0,34	0,5	0,45	0,52
<b>GxB- 340</b>	V <sub>cal</sub> (V)	46,96	46,75	49,43	49,57	49,41	49,8	48,36	48,6	
	ΔV%	1,14	0,45	1,46	0,48	0,52	0,44	0,72	0,67	0,74
<b>Shell ST40</b>	V <sub>cal</sub> (V)	21,11	20,63	22,68	22,27	22,22	22,4	21,69	21,9	
	ΔV%	2,31	0,96	2,2	1,37	1,38	1,28	1,77	1,67	1,62
<b>Buck-boost</b>										
<b>MSX-60</b>	V <sub>cal</sub> (V)	19,38	18,4	21,07	20,4	20,3	20,53	20	20,03	
	ΔV%	0,15	0,05	0,24	0,29	0,1	0,1	0,1	0,1	0,14
<b>Shell SP-75</b>	V <sub>cal</sub> (V)	20,12	19,22	21,76	21,1	21,1	21,25	20,7	20,76	
	ΔV%	0,15	0,1	0,18	0,09	0,14	0,05	0,1	0,1	0,11
<b>Shell SQ-150</b>	V <sub>cal</sub> (V)	39,95	38,13	43,32	42	41,9	42,23	41,1	41,25	
	ΔV%	0,32	0,16	0,39	0,17	0,19	0,19	0,22	0,22	0,23
<b>SST 230-60P</b>	V <sub>cal</sub> (V)	33,89	32,42	36,63	35,6	35,5	35,79	34,8	34,96	
	ΔV%	0,15	0,06	0,16	0,08	0,08	0,08	0,11	0,11	0,10
<b>Shell S70</b>	V <sub>cal</sub> (V)	19,51	18,53	21,22	20,5	20,5	20,65	20,1	20,15	
	ΔV%	0,15	0,05	0,19	0,05	0,05	0,1	0,05	0,1	0,09
<b>GxB- 340</b>	V <sub>cal</sub> (V)	47,4	47	50,03	49,75	49,61	50	48,64	48,88	
	ΔV%	0,21	0,1	0,26	0,12	0,12	0,1	0,14	0,14	0,15
<b>Shell ST40</b>	V <sub>cal</sub> (V)	21,52	21	23,09	22,51	22,47	22,6	22,01	22,15	
	ΔV%	0,42	0,2	0,43	0,31	0,27	0,26	0,32	0,32	0,32

Mạch Buck-boost có sai số thấp nhất với giá trị trung bình tối đa là 0,32%. Tất cả các loại PV đều có sai số dưới 1% trong giới hạn khảo sát. Kết quả này phản ánh đúng giá trị điện áp đo được tại  $D = 0,1$ . Bởi vì theo kết quả khảo sát trong Bảng 3.10, điện áp  $V_{oc}$  có thể đo được trong phạm vi  $D < 0,2$ . Do đó, khi chọn  $D$  càng nhỏ sẽ có kết quả tính toán càng chính xác.

Tiếp đến là bộ chuyển đổi Buck với độ chính xác lên tới 99%. Sai số lớn nhất cho ứng dụng này là 2,31%. Sai số trung bình lớn nhất khoảng 1,62% trong khi đó sai số

trung bình nhỏ nhất chỉ 0,48%. Như vậy, kết quả khảo sát trong Bảng 3.10 cho mạch Buck đề xuất vùng khảo sát D quanh vị trí 0,1 là hoàn toàn phù hợp.

Cuối cùng là mạch Boost, với sai số trung bình cho tất cả các trường hợp là 3,57% và sai số trung bình lớn nhất khoảng 7,64%. Kết quả cho thấy có thể chấp nhận giá trị  $V_{oc}$  tại  $D = 0$  mà không cần gián đoạn cấp điện.

Mặc dù việc tính giá trị  $V_{oc}$  từ một điểm kém chính xác hơn so với tính  $I_{sc}$  vì nó thuộc vùng phi tuyến của đặc tính I-V và ảnh hưởng của điều kiện vận hành lên đặc tuyến đó. Tuy nhiên, sai số trung bình cho tất cả các trường hợp khảo sát khoảng 1,52% cũng là một kết quả đáng tin cậy đối với giải pháp đề xuất. Bằng cách đo trực tiếp  $I_{sc}$  và  $V_{oc}$ , giải pháp đề xuất sẽ giảm bớt thời gian gián đoạn cấp điện đồng thời ước lượng nhanh được vị trí MPP tiềm năng để đẩy nhanh tốc độ tính toán và cải thiện hiệu suất sinh điện cho PVS. Phương pháp đề xuất này đã được ứng dụng trong các công bố số {1}, {2} và {5}.

**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)
$V_{oc}$	$V_{D3}$	$V_{D3}$	$V_{D3}$
$D_{mp}$	$D_{mp} = 1 - \sqrt{\frac{R_{mp}}{R_L}}$	$D_{mp} = \sqrt{\frac{R_L}{R_{mp}}}$	$D_{mp} = 1 - \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{R_L}{R_{mp}}}}$

### 3.4. Đề xuất giải pháp xác định MPP cho cấu hình song song

Dựa trên những nghiên cứu, phân tích trong mục 3.3, nội dung phần này đề xuất một giải pháp MPPT cho hệ thống PV liên kết kiểu song song làm việc trong điều kiện bóng che một phần. Giải pháp là sự kết hợp giữa khả năng tính toán nhanh hai tham số  $I_{sc}$  và  $V_{oc}$  của hệ thống PV với giải thuật P&O truyền thống. Bằng cách định vị nhanh điểm khởi động gần với vị trí MPP tối ưu mà giải thuật P&O cải tiến ( $I_{P\&O}$ ) giới

thiệu trong luận án này có khả năng giảm số bước tìm kiếm để nhanh chóng ổn định tại điểm vận hành. Hơn nữa, hai tham số  $I_{sc}$  và  $V_{oc}$  được tính toán theo điều kiện làm việc thực tế nên không phải gián đoạn cung cấp điện. Điều này sẽ làm gia tăng hiệu suất sinh điện của toàn bộ hệ thống PV trong thời gian vận hành. Quy trình thực hiện của giải thuật I\_P&O trải qua các bước như sau:

**b1. Tính  $I_{sc}$ .** Thiết lập các giá trị  $D_1$  và  $D_2$  theo Bảng 3.12 để đo dòng điện, điện áp tương ứng. Tính giá trị dòng điện  $I_{sc} = I_{cal}$  theo biểu thức (3.35) đối với Boost và Buck-boost. Trong khi đó chọn  $I_{sc} = I_{D1}$  đối với mạch Buck.

**b2. Tính  $V_{oc}$ .** Thiết lập giá trị  $D_3$  theo Bảng 3.12 để đo điện áp  $V_{oc}$  tương ứng.

**b3. Ước lượng  $P_{mp}$ .** Điểm phát công suất cực đại tiềm năng của PVS được tính toán theo  $I_{sc}$  và  $V_{oc}$  với trình tự như sau.

$$P_{mp} = V_{mp} I_{mp} = k_v V_{oc} k_i I_{sc} \quad (3.52)$$

**b4. Tính  $D_{mp}$ .** Giá trị  $D_{mp}$  tại MPP tiềm năng được rút ra từ biểu thức (3.5) tương ứng với các bộ chuyển đổi theo nhóm biểu thức sau [83].

**Đối với mạch Boost**

$$\frac{1}{1-D_{mp}} = \sqrt{\frac{R_L}{R_{mp}}} \Rightarrow D_{mp} = 1 - \sqrt{\frac{R_{mp}}{R_L}} \quad (3.53)$$

**Đối với mạch Buck**

$$D_{mp} = \sqrt{\frac{R_L}{R_{mp}}} \quad (3.54)$$

**Đối với mạch Buck-boost**

$$\frac{D_{mp}}{1-D_{mp}} = \sqrt{\frac{R_L}{R_{mp}}} \Rightarrow D_{mp} = 1 - \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{R_L}{R_{mp}}}} \quad (3.55)$$

$$\text{Trong đó: } R_{mp} = \frac{V_{mp}}{I_{mp}}$$

Các giá trị đo được tại  $D_{mp}$  sẽ dùng làm tham chiếu để kiểm tra MPP của hệ thống PV bằng cách triển khai tìm kiếm dựa vào P&O.

**b5. Kiểm tra vị trí MPP tối ưu.** Việc kiểm tra vị trí MPP đã chính xác chưa được thực hiện bằng cách thay đổi một lượng số gia  $\Delta D$  để quan sát những thay đổi về công suất và điện áp so với giá trị tham chiếu để xác định sai số. Giải pháp được xem là hội tụ khi thỏa mãn sai số công suất giữa hai lần kiểm tra liên tiếp nhỏ hơn một giới hạn định trước theo biểu thức (3.56).

$$|\Delta P| = \frac{P_{i+1} - P_i}{P_i} \times 100\% \leq \varepsilon_p \quad (3.56)$$

Kiểm tra sai số điện áp theo biểu thức (3.57) để điều chỉnh vị trí làm việc nếu chưa thỏa mãn mục tiêu trong biểu thức (3.56).

$$|\Delta V| = \frac{V_{i+1} - V_i}{V_i} \times 100\% \quad (3.57)$$

Nếu  $\Delta V \times \Delta P > 0$  thì tăng V bằng cách giảm D.

Nếu  $\Delta V \times \Delta P < 0$  thì giảm V thông qua việc tăng D.

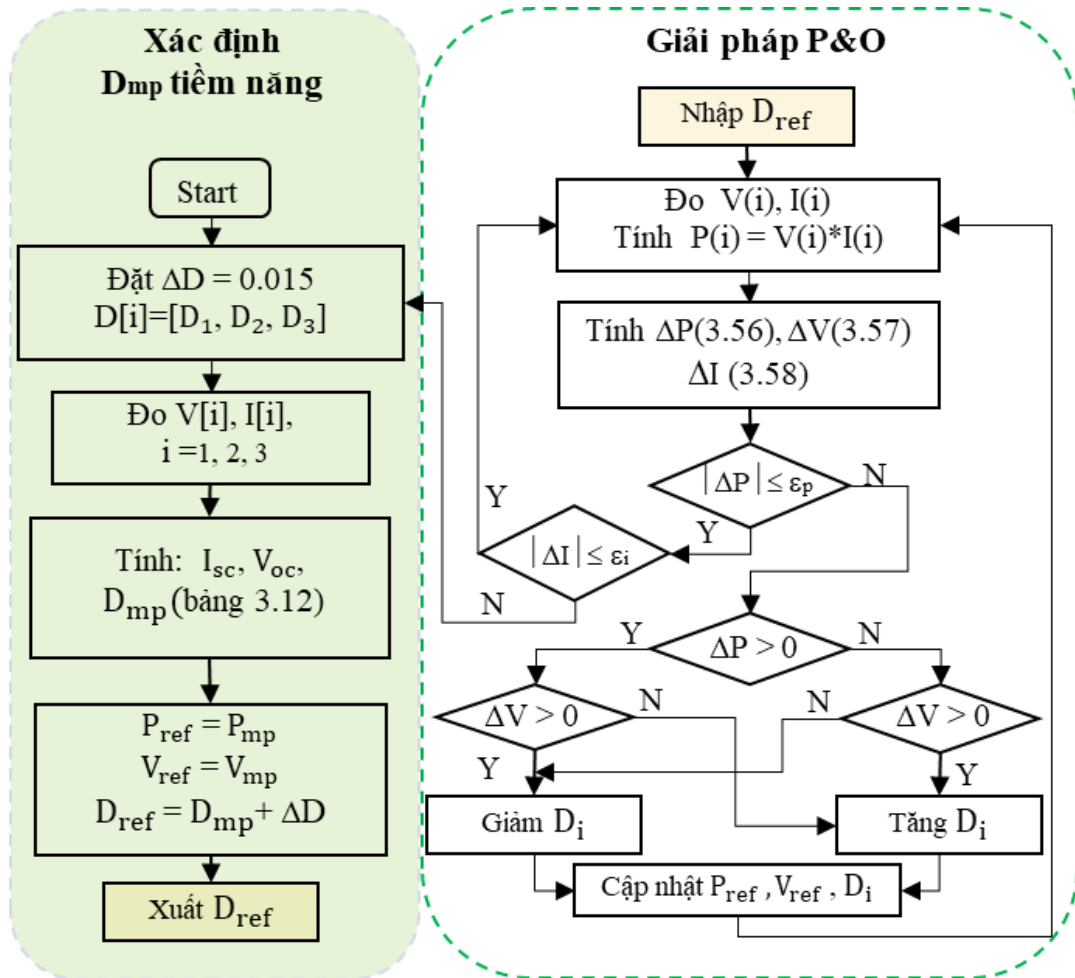
Ngược lại, nghĩa là điều kiện làm việc đang ổn định, hệ thống kiểm tra thay đổi bức xạ bằng sai số dòng điện theo biểu thức (3.58).

$$|\Delta I| = \frac{I_{i+1} - I_i}{I_i} \times 100\% \quad (3.58)$$

Trình tự xử lý của giải thuật đề xuất có lưu đồ như Hình 3.9.

### 3.5. Ứng dụng mô phỏng và những kết quả đạt được

Giải pháp đề xuất được ứng dụng cho cấu hình gồm 4 tấm PV loại MSX-60 liên kết theo kiểu song song có sơ đồ kết nối như Hình 3.1. Các trạng thái vận hành bao gồm điều kiện đồng nhất (cùng bức xạ và nhiệt độ) và bóng che một phần (khác bức xạ nhưng cùng nhiệt độ tiêu chuẩn) được đề xuất mô phỏng như liệt kê trong Bảng 3.2. Tất cả các kịch bản đều được thực hiện trên cả ba bộ Boost, Buck và Buck-boost để kiểm chứng khả năng cải thiện hiệu suất sinh điện và tốc độ tìm kiếm MPP khi vận hành trong PSC.



Hình 3.9. Lưu đồ giải thuật I\_P&O đề xuất.

### 3.5.1. Đánh giá các tham số $D_{mp}$ và $P_{mp}$ của giải thuật đề xuất

Để đánh giá khả năng ước lượng và giới hạn vị trí MPP tiềm năng của giải pháp đề xuất, các giá trị  $D_{mp}$  và  $P_{mp}$  được kiểm tra sai lệch so với vị trí hội tụ  $D_{con}$  và  $P_{con}$  theo những tiêu chuẩn trong các biểu thức sau.

Độ lệch giá trị  $\delta D$  ước lượng.

$$\delta D = |D_{mp} - D_{con}| \quad (3.59)$$

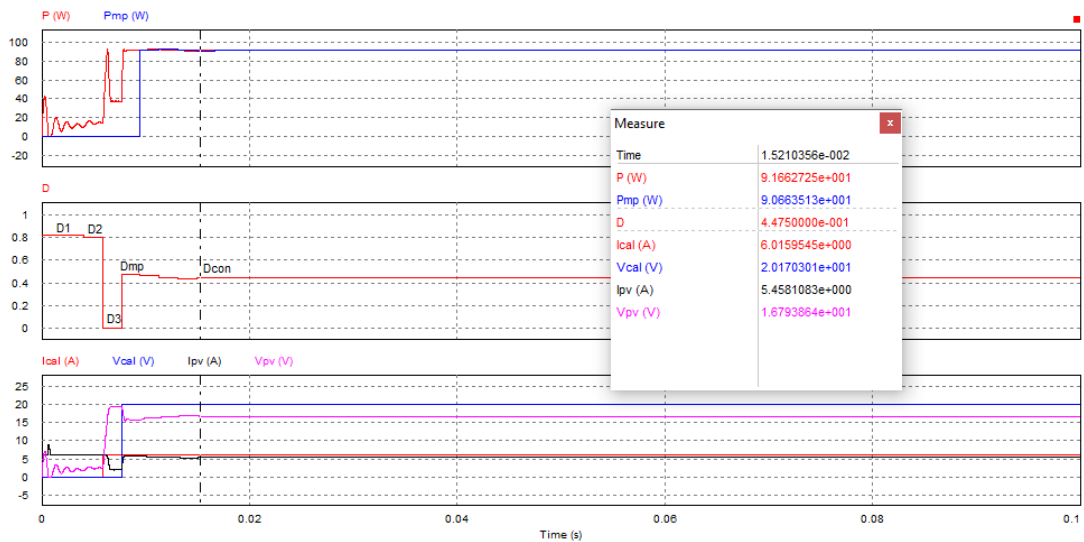
Sai số ước lượng công suất phần trăm so với vị trí hội tụ.

$$\Delta P\% = \frac{|P_{mp} - P_{con}|}{P_{con}} \times 100\% \quad (3.60)$$

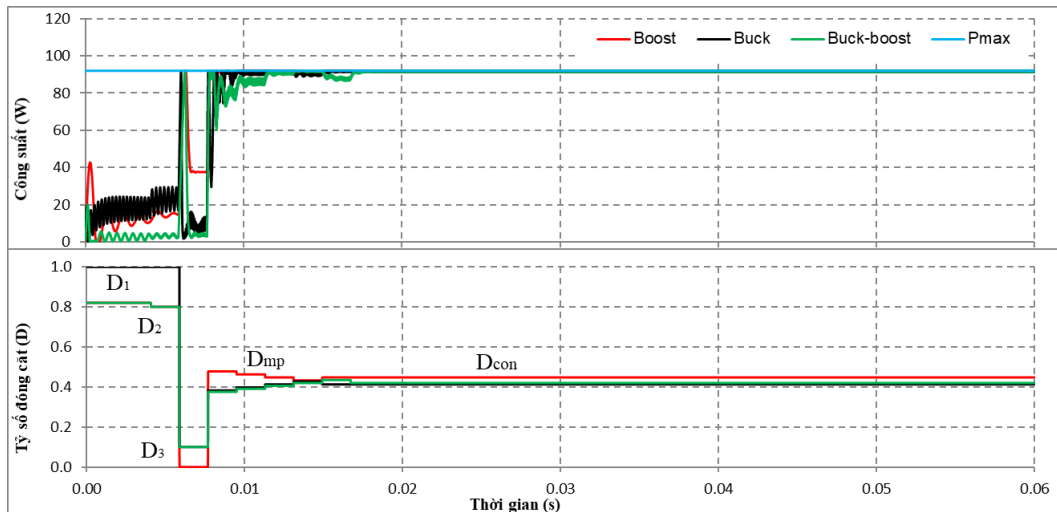
Kết quả mô phỏng dạng sóng ngõ ra khi áp dụng mạch Boost hoạt động trong điều kiện bóng che một phần thể hiện trong Hình 3.10 cho thấy: Đối với mạch Boost,



giá trị  $D_{mp}$  ước lượng được là 0,4775 so với tại vị trí hội tụ là  $D_{con} = 0,4475$  có sai số khoảng  $\delta D = 0,03$ . Dạng sóng dòng điện và điện áp cũng cho thấy giá trị  $I_{cal} = 6,0159$  A hoàn toàn chính xác với giá trị  $I_{sc} = 6,01$  A. Trong khi đó, điện áp  $V_{cal} = 20,17$  V có sai số khoảng 1,0% so với  $V_{oc} = 19,97$  V. Công suất ước lượng tại  $P_{mp} = 90,66$  W đạt khoảng 98,92% so với giá trị hội tụ  $P = 91,66$  W.



**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.

Thực hiện mô phỏng tương tự cho hai mạch còn lại có dạng sóng ra như Hình 3.11. Mạch Buck ước lượng giá trị  $D_{mp} = 0,38$  và sau đó nó hội tụ tại  $D_{con} = 0,41$  với sai số khoảng  $\delta D = 0,03$ . Cuối cùng là bộ Buck-boost với khả năng xác định giá trị  $D_{mp} = 0,38$  so với vị trí hội tụ là  $D_{con} = 0,42$  có sai số khoảng  $\delta D = 0,04$ .

Tổng hợp tất cả các trường hợp khảo sát cho mọi loại PV đề xuất được liệt kê trong Bảng 3.13 cho thấy rằng:

**Bảng 3.13.** Sai số tính toán  $D_{mp}$  và  $P_{mp}$  bằng giải pháp đề xuất.

STT	$D_{mp}$	$D_{con}$	$\delta D$	$P_{mp}$ (W)	$P_{con}$ (W)	$\Delta P(\%)$
<b>Boost converter</b>						
1	0,25	0,34	0,09	48,58	55,22	87,98
2	0,74	0,68	0,06	172,30	201,08	85,69
3	0,21	0,15	0,06	46,04	46,07	99,93
4	0,62	0,55	0,07	112,64	137,79	81,75
5	0,62	0,53	0,09	111,95	128,69	86,99
6	0,64	0,56	0,08	129,72	152,61	85,00
7	0,47	0,44	0,03	90,66	91,65	98,92
8	0,57	0,47	0,10	78,90	98,10	80,43
<b>Buck converter</b>						
1	0,31	0,34	0,03	51,12	55,87	91,50
2	0,63	0,69	0,06	194,30	201,20	96,53
3	0,25	0,27	0,02	45,31	46,29	97,88
4	0,46	0,5	0,04	128,30	136,70	93,85
5	0,45	0,47	0,02	117,30	128,20	91,50
6	0,48	0,53	0,05	142,20	151,90	93,65
7	0,38	0,41	0,03	91,79	91,95	99,83
8	0,40	0,43	0,03	92,69	98,07	94,51
<b>Buck-boost converter</b>						
1	0,33	0,37	0,04	49,76	55,27	90,03
2	0,50	0,55	0,05	180,20	201,20	89,59
3	0,29	0,32	0,03	42,81	46,20	92,66
4	0,42	0,47	0,05	130,70	137,50	95,04
5	0,41	0,46	0,05	122,50	128,10	95,68
6	0,43	0,48	0,05	143,00	153,00	93,51
7	0,38	0,42	0,04	89,79	91,80	97,81
8	0,38	0,43	0,05	90,42	97,93	92,33

Mạch Boost có sai số ước lượng  $\delta D$  trung bình khoảng 0,07 nên công suất thu được chính xác trên 99,93%. Độ lệch công suất ước lượng trung bình khoảng 12,66%.

Đối với mạch Buck, khả năng ước lượng chính xác còn được cải thiện rõ rệt hơn khi sai số  $\delta D$  trung bình chỉ 0,04. Vì vậy mà công suất ước lượng được cũng luôn có độ chính xác trên 94%. Độ chính xác cao nhất khoảng 99,83% và trong trường hợp xấu nhất kết quả đạt được cũng trên 91%. Nó được xem là khá ổn định trong việc giới hạn vùng tìm kiếm MPP tiềm năng cho hệ thống PV.

Cuối cùng là bộ Buck-boost, sai số ước lượng  $\delta D$  trong khoảng từ 0,003 đến 0,05. Nó cho thấy khả năng tính toán vị trí MPP tiềm năng chính xác lên tới 99,96%. Giá trị trung bình của bộ chuyển đổi này có thể đạt được là 93,33%.

Tóm lại, phương pháp đề xuất đã ước lượng vị trí các MPP tiềm năng một cách nhanh chóng và chính xác trên 92%. Kết quả góp phần chứng minh tiềm năng ứng dụng của nó đối với nhiều loại PV khác nhau sử dụng các bộ DC/DC. Với khả năng giới hạn tối đa vùng tìm kiếm, nó giúp cho giải pháp tổng thể gia tăng tốc độ hội tụ để đạt hiệu quả cao nhất. Những vị trí ước lượng này sẽ là điểm khởi tạo, tham chiếu để triển khai thuật toán P&O nhằm phát huy tính hiệu quả và đơn giản của nó.

### 3.5.2. Đánh giá hiệu suất và tốc độ ổn định

Từ những kết quả đạt được, một bảng tổng hợp hiệu suất, số bước điều chỉnh và tốc độ tìm kiếm khi ứng dụng giải pháp đề xuất cho ba bộ DC/DC vận hành trong các điều kiện khác nhau được trình bày trong Bảng 3.14. Giá trị hiệu suất MPPT % được xác định theo biểu thức (3.61) như sau.

$$\eta\% = \frac{P_{\text{con}}}{P_{\text{max}}} \times 100\% \quad (3.61)$$

Đối với mạch Boost, bốn bước điều chỉnh là kết quả tốt nhất để giải thuật hội tụ trong khoảng thời gian tìm kiếm 0,015 s. Trường hợp có tốc độ chậm nhất là 0,026 s trong khi tốc độ trung bình khoảng 0,021 s. Hiệu suất lớn nhất mà giải pháp có thể đạt được là 100%. Nhìn chung hiệu suất MPPT trung bình khi áp dụng bộ chuyển đổi

Boost cho PV loại MSX-60 là 99,27%.

Đối với mạch Buck, 0,0165 s là tốc độ trung bình cho mọi điều kiện vận hành. Với thời gian tìm kiếm dao động từ 0,015 s đến 0,018 s là một tốc độ khá nhanh do khả năng ước lượng vị trí MPP tiềm năng chính xác ở bước khởi đầu. Hiệu suất MPPT khi ứng dụng loại DC/DC này cũng cao hơn so với bộ Boost, trung bình đạt khoảng 99,31%.

**Bảng 3.14.** Hiệu quả MPPT bằng giải pháp đề xuất.

Thông số	Trường hợp khảo sát							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$P_{\max}$ (W)	56,54	201,36	46,28	140,90	128,69	153,03	91,98	98,15
<b>Boost</b>								
Bước điều chỉnh	10	6	4	7	8	7	4	9
Tốc độ hội tụ (s)	0,026	0,019	0,016	0,021	0,023	0,021	0,015	0,024
$P_{\text{con}}$ (W)	55,22	201,08	46,07	137,79	128,69	152,61	91,65	98,10
Hiệu suất ( $\eta\%$ )	97,67	99,86	99,55	97,79	100	99,73	99,64	99,95
<b>Buck</b>								
Bước điều chỉnh	4	6	5	5	4	5	4	4
Tốc độ hội tụ (s)	0,017	0,018	0,017	0,017	0,015	0,017	0,016	0,015
$P_{\text{con}}$ (W)	55,87	201,20	46,28	136,70	128,20	151,90	91,95	98,07
Hiệu suất ( $\eta\%$ )	98,81	99,92	100	97,02	99,62	99,26	99,97	99,92
<b>Buck-boost</b>								
Bước điều chỉnh	5	5	5	5	5	5	5	5
Tốc độ hội tụ (s)	0,018	0,017	0,016	0,017	0,017	0,017	0,018	0,017
$P_{\text{con}}$ (W)	55,27	201,20	46,20	137,50	128,10	153,00	91,80	97,93
Hiệu suất ( $\eta\%$ )	97,75	99,92	99,83	97,59	99,54	99,98	99,8	99,78

Cuối cùng là bộ chuyển đổi Buck-boost có khả năng hoạt động ổn định trong mọi tình huống bóng che. Nó chỉ cần năm bước điều chỉnh để đạt tới vị trí ổn định nên tốc độ không thay đổi nhiều. Thời gian tìm kiếm trung bình khoảng 0,017 s và

hiệu suất MPPT trung bình là 99,27%. Hiệu suất cao nhất khoảng 99,96%.

Nhìn chung, công suất ra tại vị trí làm việc tối ưu tương đối ổn định trong các kịch bản đề xuất mô phỏng. Hiệu suất trung bình của mọi trường hợp khảo sát luôn trên 99%. Tuy có sự khác biệt nhỏ về sai số tính toán trung bình đối với từng bộ DC/DC nhưng không đáng kể. Nhờ khả năng ước lượng vị trí MPP tiềm năng khá chính xác mà giải pháp đề xuất đã giảm được số lần lặp qua đó nâng cao tốc độ tìm kiếm và cải thiện hiệu suất khai thác điện năng của PVS.

### 3.5.3. So sánh hiệu quả với giải pháp truyền thống

Để khẳng định khả năng cải thiện hiệu quả trong các tình huống MPPT, giải pháp đề xuất được mô phỏng song song với hai thuật toán là P&O và VSSP&O theo những kịch bản PSC khác nhau. Các tham số D khởi tạo cho giải thuật đề xuất và các giải thuật còn lại được liệt kê trong Bảng 3.15. Các kết quả đạt được nhằm chứng minh khả năng cải thiện về phần trăm hiệu suất MPPT ( $\Delta\eta\%$ ) của phương pháp I\_P&O ( $\eta_{I\_P\&O}$ ) so với các phương pháp trước đây ( $\eta_{old}$ ) theo biểu thức (3.62) như sau.

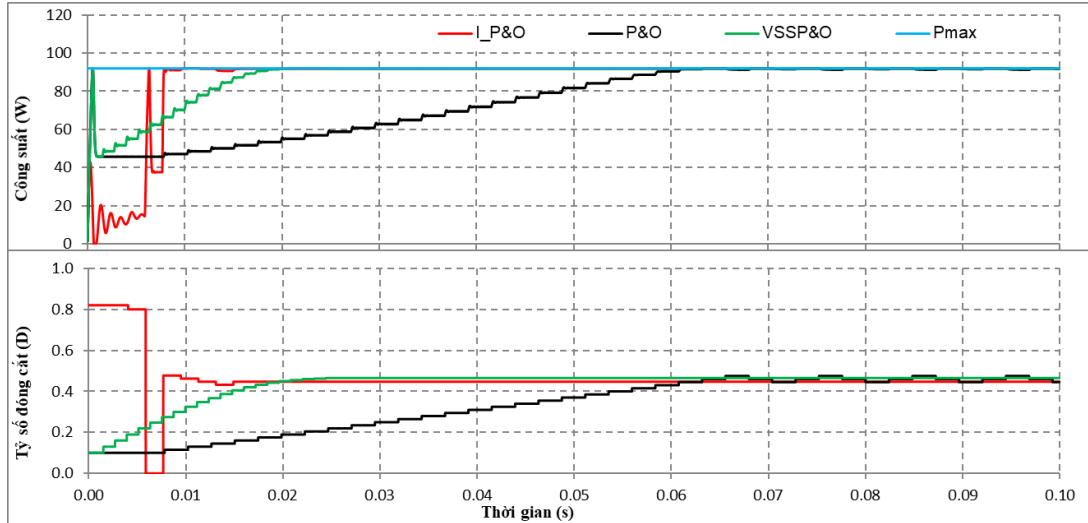
$$\Delta\eta\% = \frac{\eta_{I\_P\&O} - \eta_{old}}{\eta_{old}} \times 100\% \quad (3.62)$$

**Bảng 3.15.** Các tham số thiết lập cho các thuật toán.

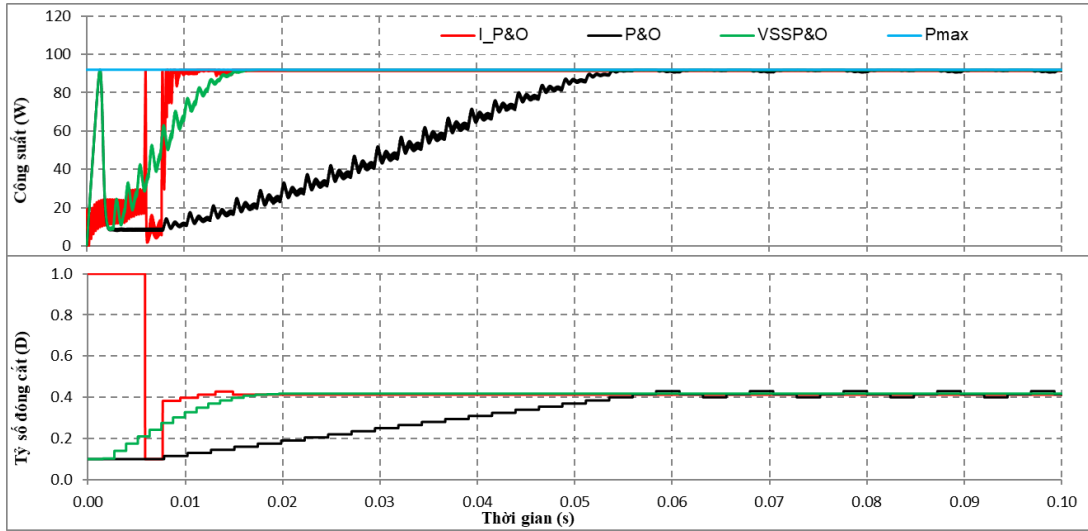
Thông số	I_P&O	P&O	VSSP&O
Giá trị khởi tạo D	Theo bảng 3.12	0,1	0,1
Số gia $\Delta D$	0,015	0,015	0,4dP/dV

Đối với thuật toán VSSP&O chọn bước điều chỉnh 0,4dP/dV nhằm tự động thay đổi kích thước bước so với khoảng cách tới vị trí tối ưu mà không cần giới hạn bước tối đa hay tối thiểu. Các thông số được chọn đảm bảo các bước điều chỉnh cuối cùng tại vị trí hội tụ là tương đồng để không ảnh hưởng đến hiệu suất của giải pháp. Do đó, tốc độ hội tụ chỉ còn phụ thuộc vào vị trí khởi động mà giải pháp dò tìm. Các kết quả mô phỏng được tổng hợp trong Hình 3.12 cho thấy:

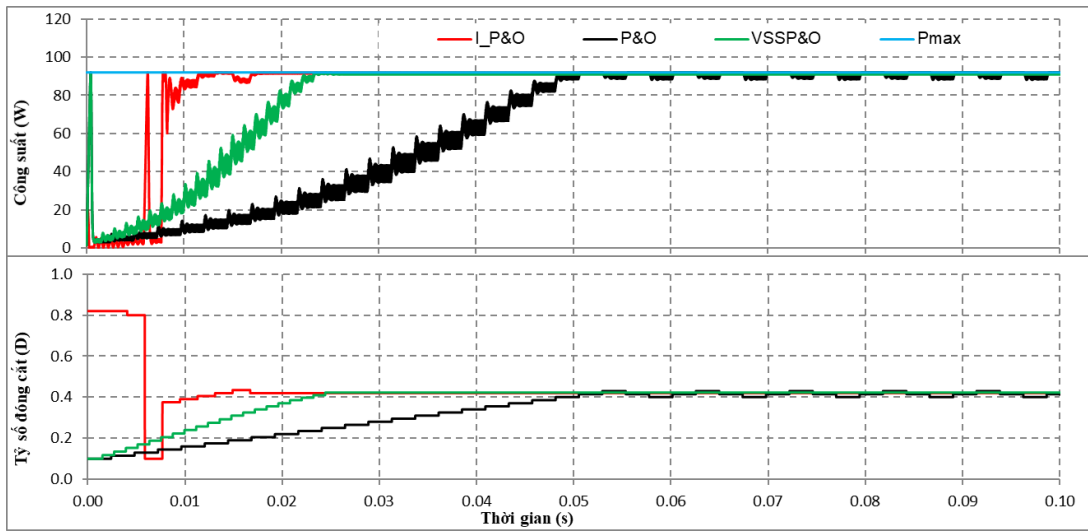
Đối với mạch Boost, giải pháp đề xuất có hiệu quả vượt trội trong PSC với khả năng đáp ứng trong bốn bước điều chỉnh từ  $D_{mp}$ , (Hình 3.12a).



a)



b)



c)

Hình 3.12. MPPT của ba giải pháp với a) Boost, b) Buck và c) Buck-boost.

Ngược lại, P&O truyền thống cần 26 bước lặp do phải quét gần như toàn bộ đường cong P-V. Mặc dù kích thước bước đã được điều chỉnh tối ưu nhưng VSSP&O cần tới 20 bước để hội tụ. Trong bối cảnh này, phương pháp đề xuất đã giảm 85% số bước lặp cần thiết so với P&O và 80% so với VSSP&O. Vì thế nó có thể đạt tốc độ hội tụ nhanh nhất trong 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.

Thuật toán đề xuất có tốc độ tìm kiếm nhanh nhất trong ba giải thuật, trung bình khoảng 0,021 s. Tốc độ hội tụ trung bình của phương pháp P&O và VSSP&O lần lượt là 0,069 s và 0,023 s. Mặc dù số bước điều chỉnh của VSSP&O khá nhiều nhưng do kích thước bước thay đổi linh hoạt nên thời gian hội tụ cũng cải thiện đáng kể, hai giải pháp còn lại sử dụng  $\Delta D$  cố định. Điều này thấy rõ nhất trong trường hợp 3 (Hình 3.12). Giải thuật VSSP&O cần 13 bước điều chỉnh trong khoảng 0,018 s trong khi P&O cần 5 bước điều chỉnh nhưng mất 0,020 s. Phương pháp đề xuất có số lần lặp ít nhất nên tốc độ hội tụ nhanh nhất là 0,016 s.

Đối với mạch Buck, dữ liệu trong Bảng 3.16 cho thấy nó hội tụ chỉ sau 4 bước điều chỉnh với thời gian 0,016 s. P&O cần 23 bước điều chỉnh và mất 0,064 s trong khi VSSP&O cần 0,019 s sau 15 bước điều chỉnh. Mặc dù hiệu suất tương tự nhau nhưng tín hiệu công suất đầu ra của P&O kém ổn định hơn các phương pháp còn lại. Kết quả cho thấy số lần lặp giảm 83% so với P&O và 73% so với VSSP&O. Tốc độ hội tụ trung bình cũng nhanh hơn, khoảng 0,016 s so với các thuật toán còn lại là P&O khoảng 0,067 s và VSSP&O khoảng 0,021 s.

Giống như các bộ chuyển đổi khác, Buck-boost chỉ mất năm bước lặp để điều chỉnh từ  $D_{mp}$  sang  $D_{con}$  trong khoảng 0,018 s. Trong khi đó, VSSP&O cần 20 bước điều chỉnh để ổn định tại 0,0251 s. Cuối cùng, P&O có thời gian xử lý chậm nhất với 0,058 s sau 23 lần lặp. Trong trường hợp này, P&O có một nhược điểm khác là công suất ra của nó kém ổn định do sự dao động của  $D_{con}$  (Hình 3.12c). Mặc dù tất cả các thuật toán có chênh lệch hiệu suất MPPT không đáng kể nhưng tốc độ tìm kiếm của phương pháp đề xuất nhanh nhất do số lần lặp giảm lần lượt 75% 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 3.16.** So sánh tốc độ hội tụ của ba giải thuật.

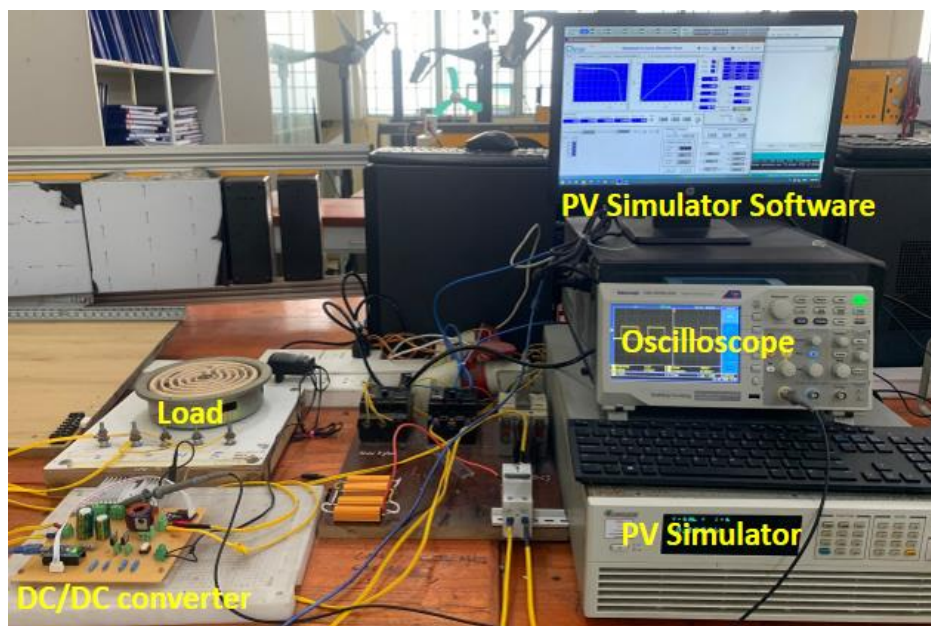
STT	Bước điều chỉnh			Tốc độ hội tụ (s)		
	I_P&O	P&O	VSSP&O	I_P&O	P&O	VSSP&O
<b>Boost</b>						
1	10	17	20	0,026	0,048	0,025
2	6	36	19	0,019	0,091	0,024
3	4	5	13	0,016	0,020	0,018
4	7	32	19	0,021	0,080	0,023
5	8	32	19	0,023	0,081	0,023
6	7	34	19	0,021	0,087	0,023
7	4	26	20	0,015	0,071	0,025
8	9	28	20	0,024	0,073	0,025
<b>Buck</b>						
1	4	17	13	0,017	0,048	0,018
2	6	35	20	0,018	0,091	0,026
3	5	14	12	0,017	0,040	0,018
4	5	28	17	0,017	0,075	0,021
5	4	27	16	0,015	0,073	0,020
6	5	31	19	0,017	0,080	0,023
7	4	23	15	0,016	0,064	0,019
8	4	24	16	0,015	0,066	0,020
<b>Buck-boost</b>						
1	5	33	18	0,018	0,087	0,027
2	5	29	20	0,017	0,077	0,028
3	5	11	14	0,016	0,035	0,022
4	5	15	19	0,017	0,044	0,027
5	5	14	19	0,017	0,042	0,027
6	5	16	20	0,017	0,047	0,025
7	5	23	20	0,018	0,058	0,025
8	5	14	19	0,017	0,039	0,024



Tóm lại, tốc độ hội tụ vượt trội và dạng sóng đầu ra ổn định là những ưu điểm của phương pháp đề xuất. Trong môi trường hoạt động thay đổi, tốc độ MPPT ít bị ảnh hưởng hơn nhờ khả năng ước tính  $D_{mp}$  chính xác. Thời gian tìm kiếm trung bình của thuật toán này là khoảng 0,017 s so với 0,021 s của VSSP&O và 0,07 s của P&O. Khi mô phỏng trong cùng PSC, hiệu suất MPPT và tốc độ hội tụ của giải pháp đề xuất đều vượt trội so với các thuật toán còn lại.

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

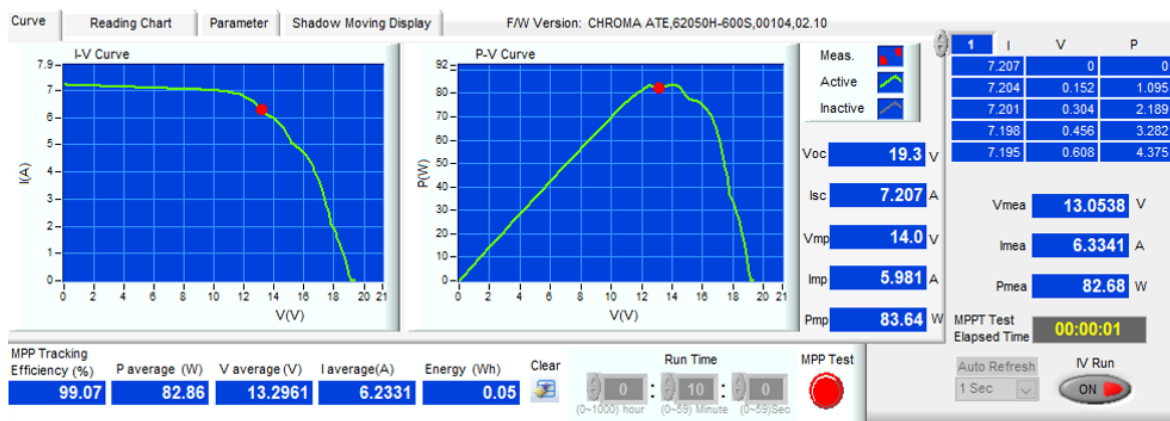
Các kịch bản bóng che một phần tương tự như khi mô phỏng được thực nghiệm với bộ Chroma 62050H-600S có sơ đồ bố trí như Hình 3.13. Trong đó, bộ mô phỏng PV simulator cung cấp dữ liệu hệ thống PV giả lập được kết nối và hiển thị thông qua phần mềm mô phỏng điều khiển bằng máy tính. Số lượng, kiểu liên kết các hệ thống PV cũng như tham số của chúng có thể tùy chỉnh cho phù hợp với tham số PV nghiên cứu trong luận án. Một máy hiện sóng để trích xuất ngõ ra của xung điều khiển để lấy được công suất lớn nhất cung cấp cho một biến trở. Các tham số của mạch DC/DC được liệt kê trong Bảng 3.17. Kết quả thực nghiệm cũng được kiểm tra trên toàn bộ dữ liệu như đối với mô phỏng. Dạng sóng I-V và P-V cùng kết quả MPPT khi xảy ra PSC trong trường hợp số 7 được thể hiện trong Hình 3.14 cho thấy.



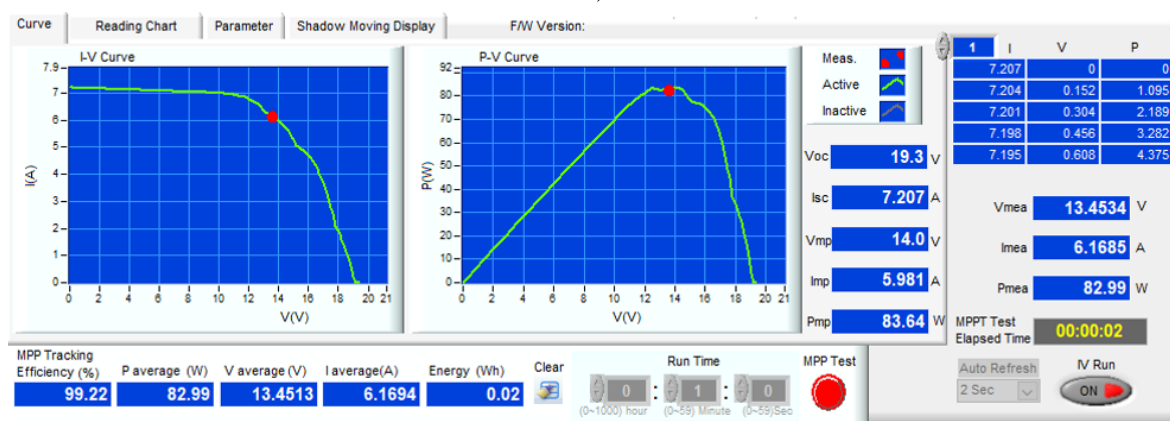
Hình 3.13. Bố trí sơ đồ thí nghiệm.

**Bảng 3.17.** Thông số thiết kế mạch DC/DC cho thực nghiệm.

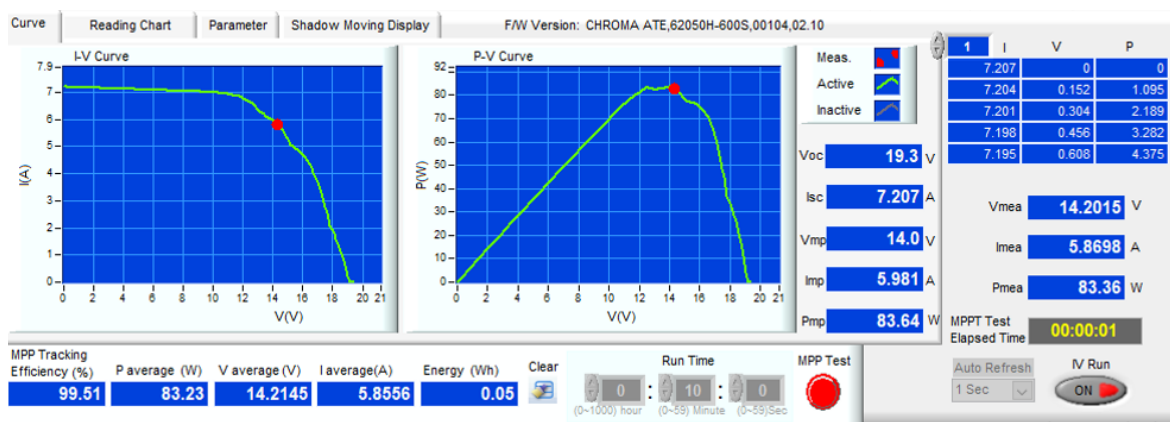
Thông số	Giá trị	Thông số	Giá trị
Tụ điện $C_{in}$	47 $\mu$ F	Diode D	MUR3060PT
Tụ điện $C_{out}$	47 $\mu$ F	MOSFET	FGA_25N120
Cuộn cảm L	0.4mH	Tần số đóng cắt	45kHz



a)



b)

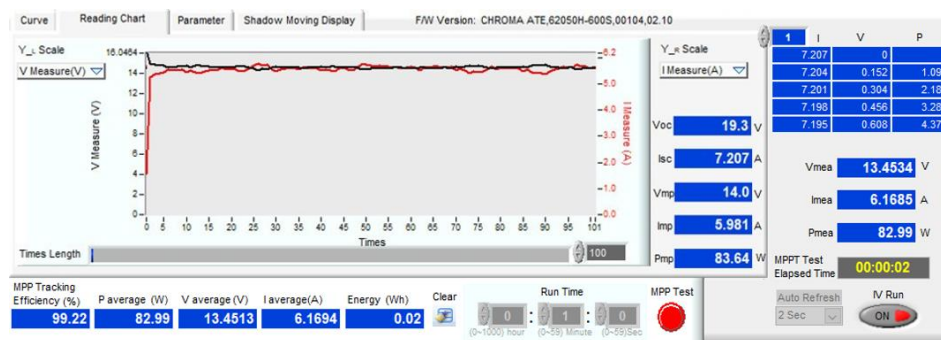


c)

**Hình 3.14.** Thực nghiệm MPPT với a) Boost, b) Buck và c) Buck-boost.

Hiệu suất của giải pháp đề xuất khi áp dụng với các bộ chuyển đổi Boost, Buck và Buck-Boost trong PSC lần lượt là 99,07%, 99,22% và 99,51%. Các số liệu thu thập từ thực nghiệm cho từng trường hợp được liệt kê trong Bảng 3.18 cho thấy: Hiệu suất MPPT trung bình của ba bộ DC/DC này trong tất cả các trường hợp khảo sát là 99,08%, 99,04%, và 99,31% và hiệu suất cao nhất có thể đạt 99,95%.

Giá trị D của các mạch Buck, Boost và Buck-boost lần lượt là 0,51; 0,68; và 0,64 trong trường hợp 7 (Hình 3.15b). Tổng hợp tất cả số liệu về giá trị D trong Bảng 3.18 cho thấy chúng trong khoảng từ 0,41 đến 0,81 trong mọi trường hợp. Giá trị này đảm bảo không chênh lệch quá xa so với ngưỡng  $D = 0,5$  để đạt được hiệu suất tốt nhất cho các bộ DC/DC. Với khả năng ổn định và hiệu suất MPPT cao, kết quả nghiên cứu này có tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống điện vừa và nhỏ.



a)



b)

**Hình 3.15.** Dạng sóng thực nghiệm của a) dòng điện, b) tỷ số đóng cắt.

**Bảng 3.18.** Tổng hợp các kết quả thực nghiệm trên Boost, Buck, và Buck-boost.

STT	$P_{\max}$ (W)	Công suất (W)	Hiệu suất (%)	D
<b>Boost</b>				
1	56,53	56,50	99,95	0,56
2	198,05	196,72	99,33	0,81
3	45,42	44,66	98,33	0,46
4	132,2	130,89	99,01	0,75
5	129,2	127,60	98,76	0,73
6	146,7	144,52	98,51	0,76
7	83,64	82,86	99,07	0,68
8	96,41	96,13	99,71	0,72
<b>Buck</b>				
1	56,53	55,78	98,67	0,47
2	198,05	195,50	98,71	0,73
3	45,42	45,35	99,85	0,41
4	132,2	131,18	99,23	0,63
5	129,2	128,10	99,15	0,57
6	146,7	145,07	98,89	0,65
7	83,64	82,99	99,22	0,51
8	96,41	95,08	98,62	0,53
<b>Buck-boost</b>				
1	56,53	56,46	99,88	0,54
2	198,05	196,85	99,39	0,73
3	45,42	44,76	98,55	0,46
4	132,2	130,94	99,05	0,68
5	129,2	127,52	98,70	0,65
6	146,7	146,05	99,56	0,70
7	83,64	83,36	99,67	0,64
8	96,41	96,06	99,64	0,67

Tóm lại, với giải pháp ước lượng nhanh vị trí MPP tiềm năng của hệ thống PV liên kết kiểu song song, thuật toán I\_P&O đề xuất đã chứng tỏ khả năng MPPT hiệu quả trong những tình huống thử nghiệm bóng che một phần. Nhờ khả năng cải tiến vị trí khởi động mà nó có thể đạt tốc độ hội tụ nhanh nhất khoảng 0,015 ms với hiệu suất MPPT cao nhất lên tới 100%. Những thông số này được sử dụng để đối chiếu với kết quả nghiên cứu của một số giải thuật đã công bố trong các xuất bản gần đây được liệt kê trong Bảng 3.19 cho thấy: các giải pháp khác chỉ có thể cải thiện tốc độ hoặc hiệu suất. Trong khi đó, giải pháp đề xuất có hiệu quả đáng tin cậy đối với cả hai mục tiêu này. Nó có nhiều tiềm năng khai thác trong những ứng dụng hệ thống PV có công suất vừa và nhỏ.

**Bảng 3.19.** Tổng hợp hiệu quả của một số nghiên cứu công bố gần đây.

<b>Giải thuật</b>	I_P&O	PSO+InC [30]	PSO+P&O [30]	LBNS [84]	CSA [85]	GWO [85]
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
<b>Giải thuật</b>	MIC [85]	PSO [85]	MC-P&O [86]	AFO [62]	COA-FLC [87]	MGWO-ANFIS [60]
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

### 3.6. Kết luận chương 3

Nội dung chương này đã đề xuất và áp dụng giới hạn điện áp trong khoảng  $0,4V_{oc}$  để xác định chính xác giá trị  $I_{sc}$  theo điều kiện vận hành mà không làm gián đoạn cung cấp điện. Nó là cơ sở cho việc cải tiến giải thuật MPPT cho cấu hình PC dưới ảnh hưởng của PSC dựa trên thuật toán P&O sửa đổi. Kết quả đạt được cho thấy giải pháp có đáp ứng động cao nhất khoảng 100% với tốc độ nhanh nhất là 0,015 s. Nó cũng có dạng sóng ra ổn định hơn so với các phiên bản truyền thống và cải tiến khác. Thành quả này đạt được là dựa vào khả năng xác định chính xác MPP tiềm năng nên hạn chế đáng kể không gian tìm kiếm, giảm gánh nặng tính toán và từ đó cải thiện hiệu suất MPPT. Việc áp dụng phương pháp đề xuất này để GMPPT cho cấu hình PC khi xảy ra PSC đã mang lại hiệu quả vượt trội so với những giải pháp đề

xuất hoặc cải tiến trước đây. Cụ thể số bước lặp đã giảm 76,60% so với P&O và 69,01% so với VSSP&O. Qua đó thời gian tìm kiếm giảm xuống lần lượt là 71,39% và 21,94% so với P&O và VSSP&O. Hơn nữa, hiệu suất MPPT trung bình cũng tăng lên 4,46% so với phiên bản trước khi cải tiến và tăng 1,65% so với phiên bản VSSP&O.

Bên cạnh đó, đường đặc tính I-V của một số loại PV điển hình được khảo sát, thu thập, kết hợp với những phân tích về giới hạn vận hành tốt nhất của các mạch DC/DC để đề xuất phương pháp xác định tham số  $V_{oc}$  của hệ thống PV. Giải pháp đề xuất có tiềm năng ứng dụng rộng rãi và đáng tin cậy trong các hệ thống PV có công suất vừa và nhỏ để nâng cao hiệu suất sinh điện và khả năng ổn định dạng sóng ngõ ra của nó. Nó cũng mở ra một hướng tiếp cận mới cho việc xác định các vùng bậc thang trên đường cong đặc tuyến I-V do điều kiện bóng che một phần gây ra. Các kỹ thuật này đã được ứng dụng và công bố trong các công trình số {1}, {2} và {5}.

## CHƯƠNG 4

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

### 4.1. Giới thiệu

Hệ thống PV kiểu song song chỉ phù hợp với các ứng dụng có điện áp và công suất thấp [88]. Trong những hệ thống lớn hơn, S-PC được ưu tiên vì tính linh hoạt trong điều chỉnh điện áp và dòng điện ngõ ra. Tuy nhiên, sự tồn tại kiểu SC trong cấu hình này khiến nó bị sụt giảm công suất hoặc gián đoạn cấp điện với hiệu ứng “điểm nóng” khi xảy ra PSC. Các nghiên cứu trước đây đã cho thấy rằng diode bypass giải quyết triệt để hiện tượng điểm nóng do điều kiện bóng che một phần gây ra trên hệ thống PV [19]. Mặc dù có thể bảo vệ được liên kết duy trì vận hành trong điều kiện này, nhưng phải chấp nhận thất thoát năng lượng khi mà những vị trí nhận được năng lượng thấp nhất không thể phát công suất vào chuỗi liên kết. Nó cũng đồng nghĩa với việc tạo ra nhiều cực trị trên đường cong đặc tuyến I-V và P-V gây khó khăn cho các giải thuật trong việc xác định chính xác GMPP trong số các LMPP. Nghĩa là số lượng cực trị địa phương gia tăng do sự hiện diện của diode bypass trong các liên kết nối tiếp dưới điều kiện bóng che một phần. Do đó, rào cản lớn nhất trong khai thác, ứng dụng cấu trúc này là giải quyết bài toán đa cực trị để phân biệt GMPP trong số các LMPP sinh ra bởi các liên kết nối tiếp khi xảy ra PSC [89], [90]. Nội dung luận án đề xuất các giải pháp GMPPT trong các điều kiện bóng che một phần cũng chính là đang nghiên cứu tính hiệu quả của giải thuật đề xuất dưới tác động của diode bypass. Đây cũng là mục tiêu chính trong phần này của luận án. Những kết quả đạt được cho thấy khả năng hoạt động vượt trội của giải thuật P&O cải tiến đối với bài toán nâng cao hiệu suất hệ thống PV trong các điều kiện vận hành khác nhau có ảnh hưởng của diode bypass.

Để giải quyết tồn tại trên, các kỹ thuật MPPT dựa trên thuật toán tối ưu hoặc

các phương pháp lai có khả năng tránh bẫy LMPP khá ấn tượng. Một trong những ấn phẩm gần đây được giới thiệu trong tài liệu [91] sử dụng kỹ thuật siêu dữ liệu mới dựa trên PSO cải tiến. Nó được giới thiệu là phiên bản cải tiến tốt nhất của PSO và có thể ổn định xung quanh điểm làm việc với sai số khoảng 2,03%. Tuy nhiên, hiệu suất và tốc độ xử lý của giải pháp này lần lượt là 98,6% và 2,6 s thì vẫn chưa phải là giải pháp hiệu quả vượt trội. Một phiên bản sửa đổi khác đã được đề xuất trong tài liệu [39], có thể tăng hiệu suất và giảm 75% thời gian tìm kiếm so với phiên bản truyền thống bằng cách giảm kích thước bầy đàn. Mặc dù tốc độ hội tụ giảm xuống còn 0,258 s nhưng hiệu suất MPPT không được thể hiện rõ ràng và hạn chế trong các tình huống thử nghiệm khiến nó trở nên kém giá trị. Trong tài liệu [53], các tác giả đã giới thiệu thuật toán GWO cải tiến cho phép tốc độ được điều chỉnh tự động theo hàm mục tiêu sau mỗi lần lặp. So với GWO thông thường, phiên bản cải tiến này có thể cải thiện hiệu suất lên tới 1,4% và giảm thời gian tìm kiếm tới 82%. Tuy nhiên, với hiệu suất cao nhất khoảng 99,57% trong 72 s, kết quả này thấp hơn rất nhiều so với các thuật toán tối ưu khác. Thuật toán ABC cải tiến (IABC) đề xuất trong tài liệu [92] được kết hợp với tìm kiếm truyền nhiệt đồng thời (SHTS) để MPPT trong PSC. Trong đó IABC giới hạn vùng GMPP và sau đó tăng tốc độ hội tụ bằng SHTS. Bằng cách này, giải pháp có thể đạt hiệu suất cao nhất là 99,55% trong 0,13 s. Tóm lại, nhược điểm chung của các nghiên cứu thuộc nhóm giải pháp tối ưu là hàm mục tiêu và phương pháp tính phức tạp, giá thành cao, khó thực hiện vì vậy mà tốc độ hội tụ chậm hơn so với các giải pháp truyền thống.

Gần đây, các giải pháp kết hợp trong đó sử dụng ít nhất một giải thuật truyền thống đang là xu hướng. Chúng có khả năng tận dụng sự đơn giản, hiệu quả để tăng tốc độ MPPT trong những điều kiện PSC. Trong tài liệu [14], thuật toán P&O và InC dựa trên các kích thước bước biến đổi điều chỉnh (M-VSS-P&O và M-VSS-InC) được đề xuất. Giải pháp dựa vào sự chênh lệch công suất giữa hai phép đo để điều chỉnh kích thước bước. Tuy có thể đạt được hiệu suất 99,37% trong 16,34 s đối với M-VSS-P&O, và 100% trong 18,22 s đối với M-VSSInC, nhưng nó chưa được thử nghiệm với PSC. Một phiên bản cải tiến của phương pháp CV cũng được giới thiệu trong tài



liệu [93] khi dùng một tham số điều chỉnh động duy nhất để tăng khả năng MPPT. Mặc dù tốc độ hội tụ đã gia tăng 38,75% so với phiên bản gốc nhưng thời gian tìm kiếm nhanh nhất khoảng 0,15 s và hiệu suất 99,8% cũng chỉ được xếp vào nhóm có mức khá. Sự kết hợp giữa P&O hoặc InC với PSO trong tài liệu [30] tạo ra giải pháp hai giai đoạn. Trong đó, giai đoạn đầu tiên sử dụng phương pháp PSO để tối ưu hóa kích thước bước cho các thuật toán truyền thống ở các giai đoạn còn lại. Bằng cách này, nó có thể đạt được tốc độ 43,4 ms với hiệu suất khoảng 99,07%. Trong khi đó, bài báo [94] giới thiệu một phương pháp lai mới kết hợp GA với OCV phân đoạn, cho phép sử dụng một biến quyết định duy nhất để đơn giản hóa việc tính toán và tăng khả năng xử lý GMPPT. Giải pháp này đã đạt được hiệu suất trung bình khoảng 99,96%, tăng 3% so với FOCV thông thường và thời gian tìm kiếm khoảng 0,07 s. Nó cũng làm tăng hiệu quả sử dụng năng lượng vì không cần phải cách ly để đo giá trị điện áp  $V_{oc}$  tham chiếu. Mặc dù giải pháp này không phức tạp về mặt tính toán nhưng việc sử dụng cảm biến điện áp riêng để đo  $V_{oc}$  của tấm PV tham chiếu sẽ làm tăng chi phí và có thể có sai số lớn do điện áp được tham chiếu từ một hệ thống độc lập. Nhìn chung, nhóm giải pháp này có thể cải thiện hiệu suất và tốc độ khá tốt do kết hợp được những ưu điểm từ nhiều giải thuật khác nhau, đặc biệt là tốc độ tìm kiếm của giải thuật truyền thống.

Những phân tích cho thấy, các giải thuật truyền thống vẫn giữ một vị trí quan trọng trong bản đồ công nghệ khai thác năng lượng PV. Trong khi các thuật toán tối ưu thiên về tìm kiếm theo nguyên lý thử và sai thì các phương pháp cổ điển dựa trên mô phỏng đặc tính sẵn có của đường cong đặc tuyến để dự đoán điểm làm việc tối ưu. Hai tham số chính của PVS được sử dụng nhiều nhất là  $I_{sc}$  và  $V_{oc}$  cùng những hệ số tương quan với vị trí MPP. Vấn đề tồn tại lớn nhất là khả năng phân biệt được vùng chứa GMPP trong số nhiều bậc thang do hiện tượng bóng che một phần gây ra. Khi đó giải thuật truyền thống mới có thể phát huy được ưu điểm trong vùng đơn cực trị đã được giới hạn trước đó. Để khắc phục những tồn tại trên, trong phần này của luận án đề xuất một giải pháp GMPPT dựa trên khả năng mô phỏng đặc tuyến I-V khi xảy ra PSC. Nó được ứng dụng cho PVS kiểu SC khi xảy ra PSC nhằm mục tiêu

tăng tốc độ hội tụ và cải thiện hiệu suất MPPT, từ đó giảm tổn thất công suất, gia tăng hiệu suất khai thác năng lượng của hệ thống PV. Giải pháp là sự kế thừa và ứng dụng đề xuất vị trí  $0,4V_{oc}$  trước đó để định vị các vùng bậc thang trên đặc tuyến I-V. Từ đó chỉ ra vùng chứa GMPP tiềm năng sau đó triển khai thuật toán P&O nhằm đạt được mục tiêu và hiệu suất và tốc độ hội tụ đề ra.

## 4.2. Phương pháp tiếp cận

### 4.2.1. Điện áp hở mạch của PVS khi xảy ra PSC

Khi xảy ra PSC, đường cong đặc tuyến I-V của một chuỗi nối tiếp gồm N tấm PV sẽ có N bậc, tương đương với đường đặc tuyến P-V sẽ bị chia thành N khoảng, mỗi khoảng có một đỉnh cực trị. Khi đó, điện áp  $V_{oc}$  của mỗi tấm PV đơn có thể được tính bằng tỷ số giữa điện áp hở mạch của hệ thống PV ( $V_{oc,sys}$ ) với số lượng tấm PV mắc nối tiếp (N) theo biểu thức (4.1) [95].

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

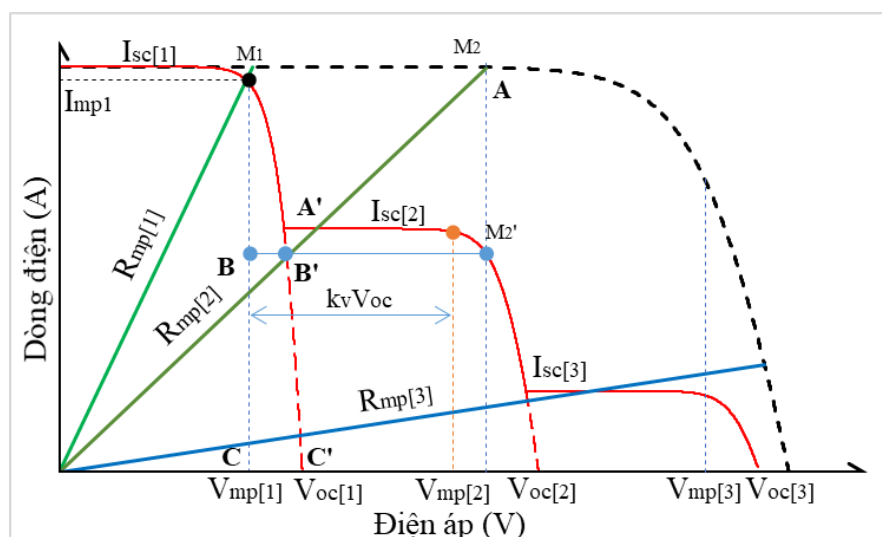
Trong khi đó, điện áp tại các MPP tỷ lệ với  $V_{oc}$  trong mỗi khoảng theo một hệ số  $k_v$ . Do đó, có thể ước lượng gần đúng giá trị điện áp tại đỉnh cực trị đầu tiên ( $M_1$ ) trên đặc tuyến I-V trong Hình 4.1 theo biểu thức (4.2) sau:

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

Áp dụng quan hệ này, tài liệu [96] dùng giải thuật InC dò vị trí MPP đầu tiên với  $D = 0$ . Sau đó điều chỉnh bước nhảy  $\Delta D$  sang vị trí MPP kế tiếp bằng một khoảng  $0,8V_{oc}$ . Nếu xảy ra bóng che, điểm làm việc sẽ thuộc đoạn phi tuyến của vùng 1. Ở vùng này, một giới hạn sai số dòng điện  $dI$  được đề xuất kiểm tra. Nếu  $dI < dI_{min}$  thì nó đang ở đoạn tuyến tính, ngược lại thì phải tăng  $\Delta D$  để thoát khỏi vùng phi tuyến. Tóm lại, giải pháp này đề xuất bước nhảy điện áp  $0,8V_{oc}$  để ước lượng tương đối các giá trị D tại điểm khởi động sau đó kiểm tra sai số  $dI$  để đảm bảo đã chuyển sang vùng chứa MPP mới. Tuy nhiên, nhược điểm của nó là dùng InC để ước lượng một đỉnh cực trị ban đầu. Nếu có PSC, nó phải quét hết một vùng tương đương với một

PV trong chuỗi liên kết mới có thể triển khai giải thuật. Thứ hai là khi chuyển sang vùng tìm kiếm mới (thỏa mãn sai số  $dI < dI_{\min}$ ) thì lặp lại InC. Điều này có nghĩa là InC cần phải quét hết đoạn tuyến tính từ  $V_{oc[1]}$  đến  $V_{mp[2]}$  mới tìm được MPP. Cả hai vấn đề trên dẫn tới tốc độ của giải thuật thấp vì phải quét toàn bộ đặc tuyến I-V với cùng một số gia  $\Delta D$ . Một bất lợi nữa là nếu đỉnh GMPP nằm bên trái vị trí khởi động thì nó phải đi một vòng mới tìm được vị trí hội tụ. Hơn nữa, khi bức xạ chênh lệch nhiều làm đoạn  $I_{sc[2]}$  giảm sâu khiến cho đoạn BB' trong Hình 4.1 tăng lên thì giải pháp tính giá trị  $V_{mp[2]} = k_v V_{mp[1]}$  sẽ có sai số lớn. Đặc biệt với chuỗi nối tiếp càng nhiều PV thì sai số cộng dồn gia tăng nên cần nhiều thời gian tính toán hơn.

Trong khi đó, tài liệu [97] sử dụng giá trị điện áp  $V_{oc}$  cố định ở điều kiện tiêu chuẩn của một tấm PV để xác định tương đối vị trí các MPP theo hệ số  $k_v$ . Giải pháp này khá đơn giản nhưng kém chính xác vì những sai số như đã phân tích trước đó trong tài liệu [96]. Hơn nữa, sai số điện áp  $V_{oc,sys}$  sẽ gia tăng với sự sụt giảm bức xạ trên các PV khi số lượng nhiều hơn. Giới hạn vùng điện áp tìm kiếm từ 60% đến 90%  $V_{oc}$  để đảm bảo không bỏ sót cực trị là biện pháp khắc phục để giảm sai số tính toán. Vì vậy, với một chuỗi gồm N tấm PV nối tiếp giải pháp sẽ phải lặp lại việc dò tìm trong vùng giới hạn này N lần. Do đó tốc độ nhanh nhất của nó là 0,06 s với hiệu suất khoảng 99,5%.



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

Tài liệu [98] đề xuất giải pháp kiểm tra tình trạng bóng che một phần bằng cách so sánh dòng điện tại MPP đầu tiên (tại  $0,8V_{oc}$ ) và MPP cuối cùng trong chuỗi (tại  $0,8V_{oc,sys}$ ). Nếu chúng có sự khác biệt nghĩa là xuất hiện bóng che. Khi đó giải pháp sẽ kiểm tra vị trí  $0,5V_{oc,sys}$ . Đặc điểm của giải pháp này là xem như đã biết trước  $V_{mp}$  để suy ra  $V_{oc,sys}$  theo quan hệ  $V_{mp} = 0,8V_{oc,sys}$ . Điều này có nghĩa là tại thời điểm khởi tạo nó xem như đang ở điều kiện đồng nhất. Trong trường hợp ban đầu đang bị bóng che và điện áp tại GMPP nằm ở đỉnh đầu tiên (vùng điện áp thấp) kết quả tính toán các giá trị  $V_{oc}$  không chính xác. Thứ hai, giả sử rằng thời điểm khởi tạo thuận lợi và đo chính xác được tham số khởi động. Nhưng khi xảy ra PSC, giải pháp cần phải quét toàn bộ đường cong I-V từ  $0,8V_{oc}$  đầu tiên đến  $0,8V_{oc,sys}$  bằng giải thuật PSO cũng mất khá nhiều thời gian. Do đó, tốc độ MPPT của nó trong điều kiện PSC khoảng 0,32 s và không đề cập tới hiệu suất MPPT cũng là nhược điểm của phương pháp này.

Tài liệu [99] cũng sử dụng giả thiết điện áp  $V_{oc}$  của các tấm PV trong chuỗi nối tiếp là như nhau. Theo đó, điện áp  $V_{oc}$  lớn nhất và nhỏ nhất của một PV theo điều kiện vận hành được khảo sát làm cơ sở giới hạn vùng tìm kiếm. Sau đó điện áp tại MPP bất kỳ sẽ được tìm kiếm trong vùng  $k_v V_{oc,min} < V_{mp} < k_v V_{oc,max}$ . Giải thuật gồm nhiều giai đoạn. Khởi đầu, các giá trị  $\Delta D$  lớn được áp dụng để nhanh chóng dịch chuyển tới gần vị trí MPP. Trong vùng này, các bước điều chỉnh có thể thay đổi được sử dụng để cải thiện hiệu suất. Sau khi xác định được điểm GMPP, triển khai kiểm tra tình trạng bóng che (nếu có biến động) trong giai đoạn tiếp theo. Tại đây, giải pháp kiểm tra và lưu trữ tất cả các điểm gãy trên đặc tuyến I-V để giới hạn phạm vi GMPP nếu có sự thay đổi. Nghĩa là nó sẽ so sánh điện áp tại điểm MPP hiện tại với điện áp tại một vị trí bất kỳ có cùng công suất. Nếu xuất hiện một điểm khác có cùng công suất với  $P_{mp}$  hiện tại mà khác điện áp nghĩa là đã xuất hiện một đỉnh mới. Khi đó giải pháp triển khai tìm về phía tăng hoặc giảm điện áp so với vị trí hiện tại. Mặc dù đã đạt được hiệu quả hơn nhiều so với giải thuật P&O truyền thống nhưng nếu vị trí hiện tại thấp hơn các đỉnh mới và nằm ở khoảng giữa thì sẽ có nhiều điểm có cùng công suất dẫn tới thời gian xử lý gia tăng. Kết quả là tốc độ hội tụ nhanh nhất khoảng 1,35 s và không đề cập tới hiệu suất MPPT trong công trình này cũng là một nhược

điểm cần cải thiện.

Gần đây, tài liệu [100] cũng dựa vào quan hệ này kết hợp với chiến thuật kiểm tra công suất tại những vị trí tương ứng với điện áp tại các LMPP. Trong nghiên cứu của họ, với 4 PV nối tiếp thì giải pháp đề xuất kiểm tra 4 vị trí tương ứng tại  $k_v = \{0,25; 0,5; 0,75, 1,0\} V_{oc,sys}$ . Giải pháp này khá đơn giản và hiệu quả khi số lượng PV trong chuỗi ít. Nếu số lượng PV nối tiếp gia tăng thì vị trí khởi động ban đầu cũng tăng theo làm mất nhiều thời gian kiểm tra toàn bộ đường đặc tuyến. Chính vì vậy, trong nghiên cứu của họ thời gian tìm kiếm GMPP khi có 4 cực trị khoảng 0,17 s với hiệu suất khoảng 99,7%. Trong điều kiện đồng nhất, hiệu suất có thể đạt 99,99% nhưng tốc độ 0,121 s cũng cần phải cải thiện hơn nữa.

Tóm lại, một số nghiên cứu dựa trên quan hệ điện áp  $V_{oc}$  của một tấm PV so với điện áp  $V_{oc,sys}$  của hệ thống nhưng chỉ định vị một cách tương đối. Khoảng cách giữa các  $V_{oc}$  hoặc  $V_{mp}$  trong các khoảng được xem như không đổi. Điều này dẫn tới sai số tính toán gia tăng do sự sụt giảm điện áp trên các đoạn bậc thang khi có PSC không giống nhau. Sai số này càng tăng khi số lượng PV trong chuỗi nối tiếp càng nhiều nếu sử dụng giá trị  $V_{oc}$  cố định. Thứ hai là các giải pháp trước đây đều phải quét toàn bộ đường đặc tuyến I-V để xác định vị trí MPP. Thứ ba là sử dụng cùng một giá trị  $\Delta D$  cho hai mục tiêu định vị vùng bóng che và hội tụ sẽ khó đạt được đồng thời mục tiêu về tốc độ và hiệu suất MPPT. Bởi vì với bước nhảy lớn có thể bỏ qua cực trị dẫn đến bị bẫy vào LMPP. Ngược lại thì cần phải quét gần như toàn bộ đường cong I-V. Kết quả là tốn nhiều thời gian tìm kiếm hơn, gây thất thoát năng lượng.

Để hạn chế điều này nhằm thu hẹp vùng tìm kiếm, giảm thời gian xử lý, nội dung này của luận án đề xuất giải pháp xác định khoảng hụt điện áp giữa hai điểm B và B' trên đặc tuyến I-V do bóng che một phần gây ra. Giải pháp đề xuất được ứng dụng vào khả năng giới hạn vùng GMPP cho hệ thống PV liên kết kiểu nối tiếp hoặc nối tiếp – song song vận hành trong điều kiện bóng che một phần. Công việc này sẽ giúp tăng độ chính xác tính toán giá trị điện áp tại các vị trí  $V_{mp[i]}$ . Nhờ đó giảm thời gian tìm kiếm đồng thời có thể sử dụng bước điều chỉnh nhỏ để cải thiện hiệu suất GMPPT của hệ thống PV.

#### 4.2.2. Dòng điện ngắn mạch của PVS 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 các tham số  $I_{sc}$  và  $V_{oc}$  tương ứng. Phương pháp này sẽ làm giảm hiệu suất sinh điện trong thời gian gián đoạn hoạt động của PVS. Vấn đề này sẽ được khắc phục khi đo trực tiếp  $I_{sc}$  theo điều kiện làm việc dựa vào giá trị D. Phương pháp đo  $I_{sc}$  tại  $D = 0,8$  cũng có thể được tìm thấy trong tài liệu [101]. Quan điểm này được công bố cùng thời điểm với đề xuất trong nghiên cứu của luận án. Kết quả một lần nữa khẳng định rằng có thể đo trực tiếp  $I_{sc}$  của hệ thống PV theo D mà không cần gián đoạn cung cấp điện.

#### 4.3. Đề xuất giải pháp GMPPT dựa vào 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

Các nghiên cứu trước đây thường áp dụng giải pháp cách ly tạm thời hệ thống PV trong thời gian xác định lại  $V_{oc}$  và cập nhật lại theo chu kỳ. Phương pháp này không những gián đoạn cung cấp điện gây thất thoát năng lượng mà còn gia tăng sai số tính toán do điều kiện vận hành thay đổi liên tục. Điện áp ở mạch của hệ thống PV,  $V_{oc,sys}$ , trong nghiên cứu này được đo trực tiếp tại  $D = 0,1$  theo điều kiện vận hành để giảm tối thiểu sai số tính toán. 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 cấu hình SC khi xảy ra PSC là dòng ngắn mạch của hệ thống PV ( $I_{sc,sys}$ ) cũng là dòng của tấm pin nhận được nhiều năng lượng nhất, nằm ở vùng điện áp thấp nhất của đặc tuyến I-V. Do đó giá trị  $I_{sc[1]} = I_{sc,sys}$  được xác định khi thiết lập thông số ban đầu  $D = 0,8$ .

Tóm lại, dùng hai giá trị  $D_1 = 0,8$  và  $D_2 = 0,1$  để đo  $I_{sc,sys}$  và  $V_{oc,sys}$ . Sau đó tính các tham số tại MPP đầu tiên ( $M_1$ ) dựa vào FF 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 ước lượng  $M_1$  là

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

Giá trị  $D_{mp[1]}$  tại  $M_1$  được xác định theo tính chất của mạch DC/DC như biểu diễn trong phương trình (4.5) như đã trình bày trong mục 3.4.

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

Với  $D_{mp[1]}$  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

Độ lệch điện áp giữa hai điểm  $M_1$  và  $B'$  là đoạn  $BB'$  tùy thuộc vào mức độ che bóng trên hệ thống PV. Bóng che càng nhiều thì đoạn  $BB'$  càng lớn và phép ước lượng khoảng cách đều nhau như các công trình nghiên cứu trước đây trở nên kém chính xác. Trong nội dung này, điện áp tại  $B'$  được đề xuất 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 hoành độ điểm  $M_2'$  và có độ chênh lệch so với điểm  $B'$  một khoảng là  $k_v V_{oc[1]}$ , nên giá trị của  $V_{mp[2]}$  được tính theo biểu thức (4.9) như sau:

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

$$V_{mp[2]} = V_{mp[1]} + V_{oc[1]} \left[ (1 - k_v) \frac{I_{sc[1]} - I_{sc[2]}}{I_{sc[1]}} + k_v \right] \quad (4.9)$$

Giá trị  $V_{mp[2]}$  tính được từ phương trình (4.9) có độ chính xác hơn so với việc cập nhật một lượng đồng đều  $V_{mp[2]} = V_{mp[1]} + k_v V_{oc[1]}$  áp dụng trong các nghiên cứu trước đó. Một cách tổng quát, có thể xác định giá trị điện áp tại một vị trí MPP bất kỳ ( $V_{mp[i]}$ ) trong một chuỗi có N tấm PV mắc nối tiếp khi xảy ra PSC theo công thức (4.10) với  $i = 2$  đến N như sau.

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

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

Trên đường cong I-V Hình 4.1, điện áp  $V_{mp[2]}$  tính được từ công thức (4.10) cũng chính là điện áp tại hai điểm  $M_2$  và  $M_2'$ . Khi đó, giá trị điện trở  $R_{mp[2]}$  được xác định theo biểu thức (4.11) như sau:

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

Sử dụng  $R_{mp[2]}$  để tính giá trị  $D_{mp[2]}$  theo phương trình (4.5). Tiến hành đo và kiểm tra điện áp tương ứng với  $D_{mp[2]}$ . Trong trường hợp hệ thống không bị bóng che thì  $R_{mp[2]}$  cắt đường I-V tại A có điện áp vận hành là  $V_A = V_{mp[2]}$ . Nhưng khi xảy ra PSC, nó cắt đặc tuyến tại A' có  $V_{A'} < V_{mp[2]}$ . Tùy thuộc vào mức độ che bóng mà giá trị  $V_{A'}$  dao động từ  $V_{mp[1]}$  đến  $V_{pm[2]}$ . Quá trình kiểm tra tình trạng bóng che và xử lý theo nguyên tắc sau.

**b.1. Nếu  $V_{mp[1]} < V_{A'} < V_{oc[1]}$ ,** nghĩa là hệ thống bị bóng che và  $I_{sc[2]}$  giảm sâu so với  $I_{sc[1]}$ . Khi đó điểm A' có thể thuộc vùng từ  $M_1$  đến B'. Trường hợp này dòng điện đo được trong khoảng  $I_{sc[2]} < I_{A'} < I_{sc[1]}$ . Do đó, để vượt qua đoạn phi tuyến này thì phải tăng điện áp  $V_{A'}$ . Tài liệu [96] sử dụng bước điều chỉnh  $\Delta D$  cố định và quét hết đường cong I-V trong đoạn từ  $M_1$  đến A' dẫn đến mất nhiều thời gian. Hơn nữa, khi xác định được vị trí A' trên đoạn tuyến tính  $I_{sc[2]}$ , việc triển khai InC để dò MPP trong vùng này cũng phải quét hết đoạn từ A' đến  $M_2'$ . Nghĩa là trong công trình của họ,



giải thuật phải quét toàn bộ đường cong I-V. Để đẩy nhanh tốc độ hội tụ, luận án này đề xuất bước nhảy  $\Delta R$  tham chiếu đến vị trí  $V_{oc[1]}$  và  $1,4V_{oc[1]}$ . Nghĩa là nếu điện áp  $V_{A'} < V_{oc[1]}$  thì điều chỉnh tham số  $R_{mp[2]}$  theo biểu thức (4.12) sau:

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

Cập nhật giá trị điện trở từ (4.12) để tính lại  $D_{mp[2]}$ , thực hiện lặp lại đến khi đạt được điều kiện  $V_{A'} > V_{oc[1]}$ . Bằng cách này, có thể điều chỉnh điểm làm việc sang vùng cực trị mới một cách nhanh chóng mà không phụ thuộc vào bước  $\Delta D$  cố định. Vì  $\Delta D$  cần được chọn nhỏ lại để nâng cao hiệu suất. Hơn nữa số gia  $\Delta R$  phụ thuộc vào dòng điện và điện áp nên tự động điều chỉnh với các khoảng bóng che khác nhau một cách linh hoạt.

**b.2.  $V_{oc[1]} < V_{A'} < 1,4V_{oc[1]}$** , nghĩa là hệ thống đang làm việc trong vùng bóng che với  $I_{sc[2]} = I_{A'}$  và điểm MPP cần xác định là  $M_2$ , như Hình 4.1. Nghĩa là trong khoảng  $0,4V_{oc}$ , đường cong I-V xem như tuyến tính và  $I_{sc}$  thay đổi không đáng kể (đã chứng minh trong mục 3.2.2). Vì thế, vị trí tham chiếu để kiểm tra bóng che cho tấm PV thứ hai là  $V_{oc[1]} + 0,4V_{oc[1]}$ . Với  $I_{sc[2]} = I_{A'}$ , áp dụng công thức (4.3b) để tìm  $I_{mp[2]}$ . Sau đó tính  $R_{mp[2]}$  và  $D_{mp[2]}$  theo các biểu thức (4.4) và (4.5). Đo các giá trị tại  $D_{mp[2]}$  và lưu trữ  $P_{mp[2]}$  vào bảng dữ liệu.

Thực hiện kiểm tra các PV còn lại trong liên kết theo các bước tương tự.

**b.3.  $V_{A'} > 1,4V_{oc[1]}$** , nghĩa là hệ thống không bị bóng che hoặc sự khác biệt giữa  $I_{sc[1]}$  và  $I_{sc[2]}$  là không đáng kể (điểm A trên Hình 4.1). Tuy nhiên để giảm bớt sai số tính  $I_{sc[2]}$  do độ dốc của đường cong I-V thì chọn  $I_{sc[2]} = I_{A'}$ . Sau đó giá trị  $R_{mp[2]}$  được tính lại theo biểu thức (4.13) để cập nhật lại  $D_{mp[2]}$  và các giá trị tại điểm làm việc này.

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

Kiểm tra các PV còn lại theo các bước tương tự cho đến hết. Vùng chứa GMPP là vùng có  $P_{mp}$  lớn nhất trong số các  $P_{mp[i]}$  đã lưu trữ. Các thông số tại đây được dùng làm giá trị 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

Tóm lại, để xác định GMPP của hệ thống PV khi xảy ra PSC, quá trình thực hiện của giải pháp đề xuất như sau:

1. Thiết lập giá trị D ban đầu để đo  $I_{sc,sys}$  và  $V_{oc,sys}$  của chuỗi gồm N tấm PV. Chọn giá trị  $I_{sc[1]} = I_{sc,sys}$  là dòng ngắn mạch của PV trong khoảng đầu tiên trên đường cong I-V.
2. Ước lượng giá trị công suất cực đại đầu tiên  $P_{mp[1]}$  theo biểu thức (4.3). Từ vị trí này xác định được giá trị điện trở  $R_{mp[1]}$  theo biểu thức (4.4). Thông qua tỷ số biến áp và tính chất của mạch Buck-boost để xác định tỷ số đóng cắt tại MPP đầu tiên  $D_{mp[1]}$  theo biểu thức (4.5). Cập nhật lại các giá trị đo được tại  $D_{mp[1]}$ .
3. Xác định điện áp tại các điểm MPP thứ i ( $i = 2$  đến N) theo biểu thức (4.10).
4. Tính các giá trị điện trở tại các điểm MPP theo phương trình (4.14).

$$R_{mp[i]} = \frac{V_{mp[i]}}{I_{sc[i-1]}} \quad (4.14)$$

5. Tính các  $D_{mp[i]}$  theo biểu thức (4.15).

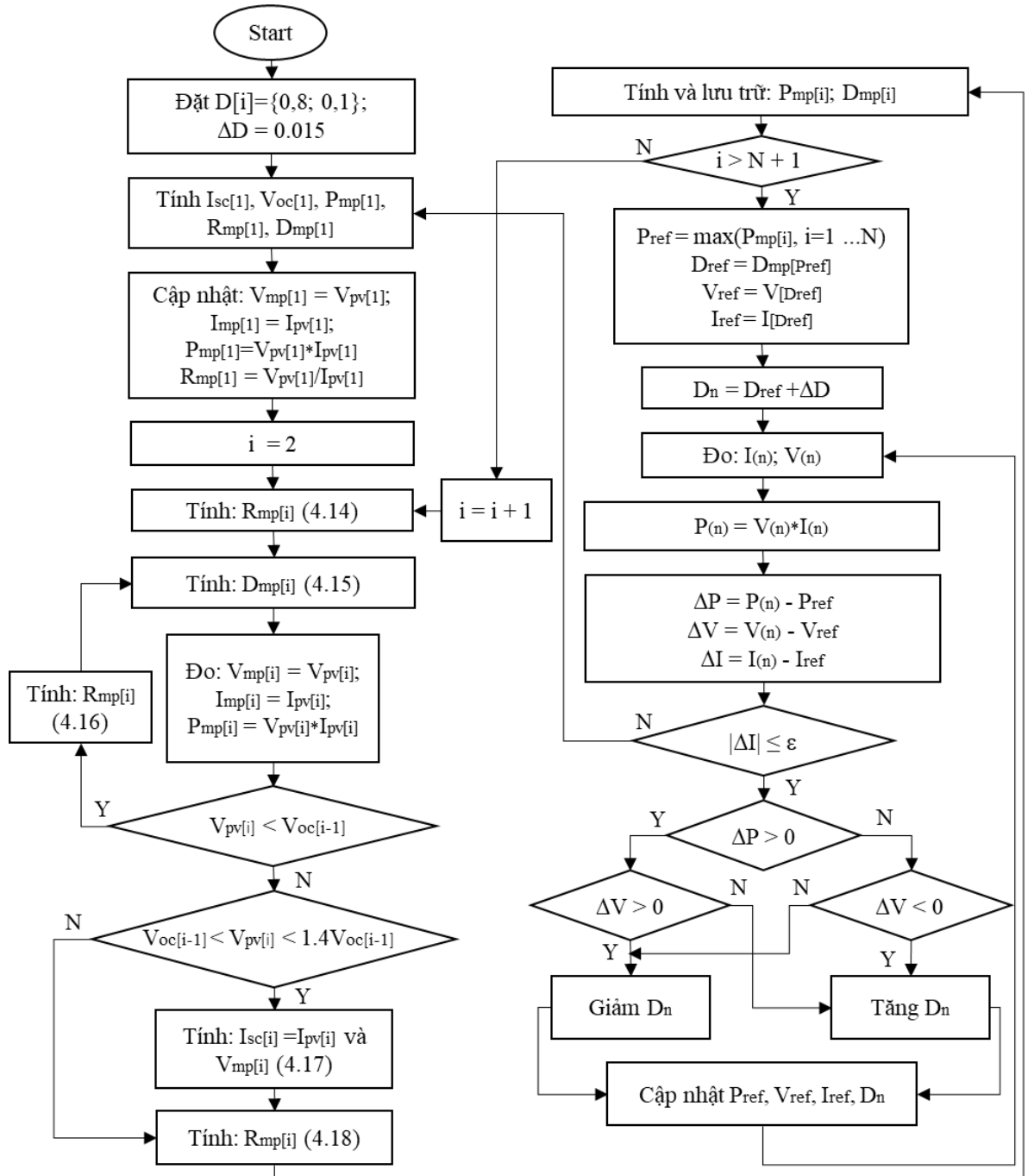
$$D_{mp[i]} = \frac{\sqrt{\frac{R_L}{R_{mp[i]}}}}{1 + \sqrt{\frac{R_L}{R_{mp[i]}}}} \quad (4.15)$$

6. Đo các giá trị  $I_{pv[i]}$ ,  $V_{pv[i]}$  tại  $D_{mp[i]}$  và kiểm tra điện áp ngõ ra để xác nhận tình trạng bóng che.
7. Nếu  $V_{pv[i]} < V_{oc[i-1]}$  thì phải tăng điện trở  $R_{mp[i]}$  theo biểu thức (4.16) và quay lại bước 5, ngược lại thì sang bước kế tiếp.

$$R_{mp[i]} = R_{mp[i]} + \lambda \frac{V_{oc[1]}}{I_{sc[i]}} \quad (4.16)$$

8. Xác định LMPP khi bóng che.

Nếu  $V_{oc[i-1]} < V_{pv[i]} < 1.4V_{oc[i-1]}$ , thì  $I_{sc[i]} = I_{pv[i]}$ . Điện áp tại MPP thứ i được xác định theo biểu thức sau.



**Hình 4.2.** Lưu đồ thuật toán GMPPT đề xuất.

$$V_{mp[i]} = V_{mp[i-1]} + V_{oc[1]} \left[ (1 - k_v) \frac{I_{sc[i-1]} - I_{sc[i]}}{I_{sc[i-1]}} + k_v \right] \quad (4.17)$$

9. Tính lại  $R_{mp[i]}$  theo biểu thức (4.14) và thực hiện lại từ bước 5.

10. Ngược lại,  $V_{vp[i]} > V_{oc[i-1]} + 0.4V_{oc[1]}$ , trong trường hợp này hệ thống được xem

như đồng nhất và  $I_{sc[i]} = I_{pv[i]}$ . Với giá trị  $V_{mp[i]}$  mới tính được từ biểu thức (4.17) và dòng điện  $I_{pv[i]}$  đo được tại  $D_{mp[i]}$ , xác định lại điện trở tại vị trí MPP thứ  $i$  theo biểu thức (4.18) như sau.

$$R_{mp[i]} = \frac{V_{mp[i]}}{k_i I_{sc[i]}} \quad (4.18)$$

11. Quay lại bước 5, tính và lưu trữ các giá trị  $P_{pv[i]}$  theo vị trí  $D_{mp[i]}$  để tìm ra vị trí có công suất lớn nhất.
12. Chọn đỉnh công suất cực đại tương ứng với  $P_{pv[i]}$  lớn nhất trong số các giá trị đã tính toán và lưu trữ làm điểm tham chiếu  $P_{ref}$ . Đồng thời chọn các giá trị  $D_{ref}$ ,  $V_{ref}$ ,  $I_{ref}$  là các giá trị tỷ số đóng cắt, điện áp và dòng điện tham chiếu tương ứng với vị trí có công suất cực đại  $P_{ref}$ .
13. Kiểm tra hội tụ sử dụng giải thuật P&O bằng cách kiểm tra thỏa mãn phương trình sai số công suất (3.56).
14. Nếu công suất phát chưa phải cực đại thì thuật toán sẽ kiểm tra lại sai số điện áp  $\Delta V$  theo phương trình (3.57). Sau đó kiểm tra nếu  $\Delta V \times \Delta P > 0$  thì tăng  $V$  bằng cách giảm  $D$  và ngược lại.
15. Ngược lại, nghĩa là điều kiện làm việc đang ổn định, hệ thống kiểm tra thay đổi bức xạ bằng sai số dòng điện theo biểu thức (3.58).

Lưu đồ giải thuật GMPPT đề xuất được thể hiện trong Hình 4.2. Nguyên lý hoạt động của giải thuật để thoát bẫy LMPP cho các hệ thống PV kiểu SC hoặc PSC được giải thích như sau.

Từ điểm khởi tạo, giải pháp đề xuất tính nhanh vị trí MPP đầu tiên dựa vào hai tham số  $I_{sc,sys}$  và  $V_{oc,sys}$  của hệ thống gồm  $N$  PV mắc nối tiếp. Có thể hình dung tọa độ điểm  $M_1$  có giá trị công suất tương đương với  $P_1(k_v V_{oc,sys}/N, k_i I_{sc,sys})$ .

Điện áp tại vị trí  $M_2$  được ước lượng cách  $M_1$  một khoảng  $\Delta V$  để không cần phải quét toàn bộ đường cong đặc tuyến. Giá trị của  $\Delta V$  không cố định mà phụ thuộc vào mức độ bóng che theo biểu thức (4.17). Nếu không có bóng che xảy ra thì các khoảng cách tương đương nhau nên bước điều chỉnh điện áp  $\Delta V = k_v V_{oc[1]}$  là không đổi giữa các vị trí MPP liên tiếp. Bằng cách này các vị trí MPP được ước lượng nhanh

chúng nên giá trị GMPP được chọn ứng với vị trí có công suất lớn nhất. Sau đó một vài bước điều chỉnh bằng thuật toán P&O được triển khai để đảm bảo thu được công suất lớn nhất.

Tuy nhiên, khi xảy ra hiện tượng bóng che một phần, giá trị  $\Delta V$  trong biểu thức (4.17) gồm hai thành phần: Thứ nhất là  $k_v V_{oc[1]}$ ; mặc dù chỉ cần cập nhật một bước nhảy cố định này cũng đủ để tiến tới MPP trong vùng thứ hai nhanh hơn so với P&O truyền thống. Nhưng điểm ước lượng được ở vị trí chấm màu cam (Hình 4.1), nó bị hụt một khoảng so với vị trí thực thể (chấm xanh) do độ sụt giảm giá trị dòng điện  $I_{sc[2]}$  gây ra bởi bóng che một phần. Sai số này có thể kéo theo việc xác định giá trị cực đại trong tập hợp các MPPs bị nhầm lẫn nếu có nhiều đỉnh cực trị có công suất xấp xỉ nhau. Để gia tăng độ chính xác nhằm thoát bẫy LMPP. Luận án đề xuất tính toán khoảng hụt điện áp  $BB'$  để ước lượng chính xác vị trí các  $M_2'$ . Do đó trong công thức (4.17) có thêm một thành phần để tính  $\Delta V$  phụ thuộc vào mức độ che bóng trên các PV trong chuỗi liên kết thể hiện ở hai tham số  $I_{sc[i-1]}$  và  $I_{sc[i]}$ . Nhờ kết hợp cùng lúc hai giá trị sai số theo điều kiện vận hành mà giải pháp đề xuất ước lượng chính xác các MPP trong điều kiện bóng che nhằm tránh bẫy LMPP một cách hiệu quả.

Ngoài ra, để hiệu chỉnh bước nhảy giữa các vùng bậc thang trên đặc tuyến làm việc của hệ thống PV dưới tác động của bóng che một phần một cách hiệu quả, nội dung luận án nghiên cứu hai tham số điều chỉnh bổ sung cụ thể như sau:

Bước nhảy điện trở  $\Delta R$  trong công thức (4.16) nhằm kiểm tra tình trạng bóng che trên đặc tuyến I-V. Nó đảm bảo chắc chắn rằng bước nhảy điện áp trước đó đã hoàn toàn vượt qua vùng bậc thang hiện tại để tìm kiếm ở vùng kế tiếp. Có thể giải thích một cách chi tiết rằng. Khi bức xạ giảm sâu, giá trị  $I_{sc[2]}$  rất nhỏ so với  $I_{sc[1]}$  (Hình 4.1) sẽ khiến cho đường thẳng  $R_{mp[2]}$  cắt đặc tuyến I-V trong khoảng từ  $M_1$  đến  $A'$ . Nếu dùng giá trị dòng điện đo được tại đây như tham số  $I_{sc[2]}$  thì có sai số lớn. Vì vậy cần đảm bảo bước nhảy  $\Delta R$  để vùng tìm kiếm tiếp theo hoàn toàn nằm trong khoảng từ  $A'$  đến  $M_2'$  theo công thức.

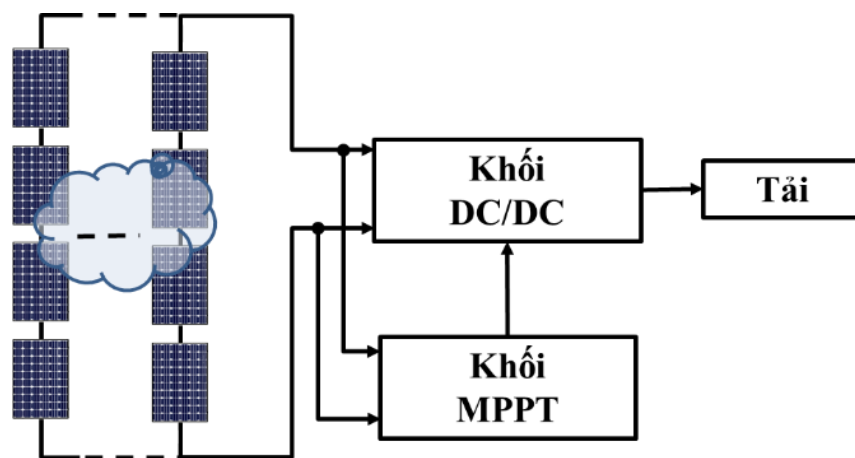
Bước điều chỉnh  $\Delta D$  quanh vị trí GMPP. Hoàn toàn khác với các nghiên cứu trước đây sử dụng cùng một giá trị  $\Delta D$  cho hai mục đích là chuyển vùng tìm kiếm và

kiểm tra vị trí hội tụ. Trong nội dung luận án này, giá trị  $\Delta D$  được sử dụng cố định và với mục đích duy nhất là kiểm tra vị trí hội tụ. Vì các vị trí MPPs đã được ước lượng khá chính xác nên bước nhảy  $\Delta D$  được chọn nhỏ lại nhằm gia tăng hiệu suất và sự ổn định quanh điểm làm việc GMPP.

Tóm lại, với hai tham số bước nhảy  $\Delta V$  và  $\Delta R$  được điều chỉnh tự động để nhanh chóng đạt tới giới hạn các MPPs, sau đó giải pháp đề xuất sử dụng các bước điều chỉnh  $\Delta D$  nhỏ vẫn có thể giảm số lần lặp tìm kiếm nhằm tránh bẫy LMPP, giảm sự dao động, gia tăng hiệu suất và sự ổn định quanh điểm làm việc.

#### 4.3.4. Ứng dụng và những kết quả đạt được

Để xác thực tính hiệu quả của giải thuật đề xuất, một hệ thống PV gồm nhiều chuỗi, mỗi chuỗi gồm 4 tấm pin loại MSX60 mắc nối tiếp để cung cấp năng lượng cho tải tiêu thụ thông qua khối DC/DC và bộ điều khiển MPPT như trình bày trong Hình 4.3 được đề xuất ứng dụng. Các thí nghiệm tập trung vào những mục tiêu sau đây:



**Hình 4.3.** Cấu trúc hệ thống PV đề xuất.

- 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 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.

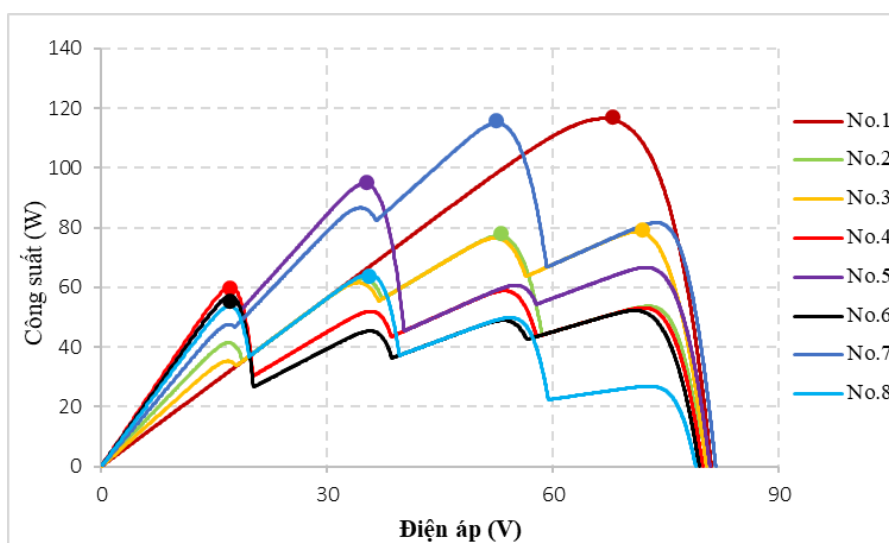
Để đảm bảo kết quả đạt được một cách khách quan, các kịch bản thử nghiệm được chọn ngẫu nhiên trong số nhiều trường hợp sao cho vị trí GMPP của hệ thống PV có thể ở bất kỳ vùng điện áp nào trên đường cong đặc tuyến I-V. Trong đó trường hợp 1 vận hành trong điều kiện bóng che toàn phần, trường hợp 9 ở điều kiện tiêu chuẩn, cả hai trường hợp này đều có điều kiện làm việc đồng nhất nên chỉ có một cực trị. Các trường hợp còn lại tập trung vào bài toán điều kiện bóng che một phần bởi vì ở điều kiện này tổn thất năng lượng là lớn nhất và các thuật toán dễ bị bẫy vào LMPP. Chi tiết về số lượng và vị trí các MPP cho các trường hợp đề xuất thử nghiệm được trình bày trong Bảng 4.1.

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

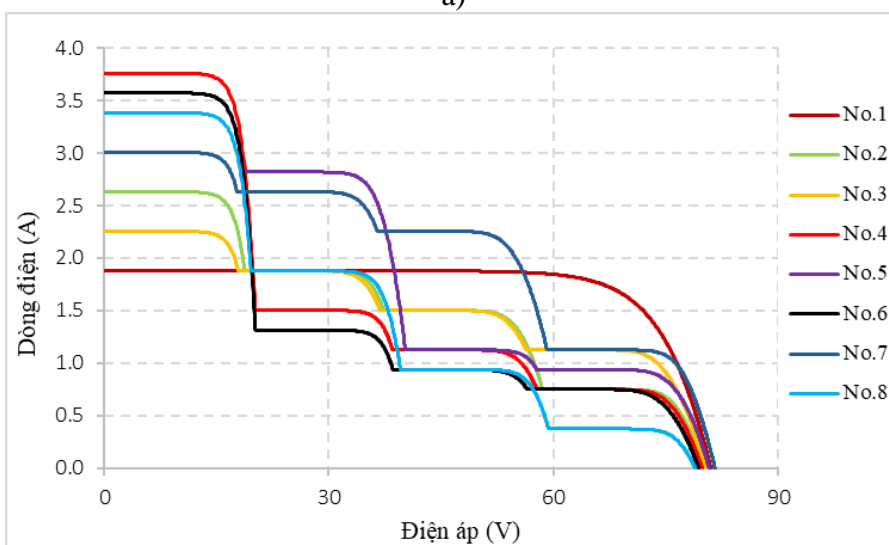
Trường hợp	Bức xạ trên PV (W/m <sup>2</sup> )				Số lượng cực trị	Vị trí GMPP	P <sub>max</sub> (W)
	PV1	PV2	PV3	PV4			
1	500	500	500	500	1	1	116,51
2	700	500	400	200	4	3	77,20
3	600	500	400	300	4	4	78,62
4	1000	200	300	400	4	1	59,88
5	950	750	300	250	4	2	94,74
6	950	200	250	350	4	1	56,80
7	800	700	600	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			
<b>13</b>	Chuỗi 1	1000	900	450	200	4	3	311,71
	Chuỗi 2	200	700	450	900			
	Chuỗi 3	900	200	400	100			

Bên cạnh đó, Hình 4.4 trình bày trực quan về các đặc tuyến P-V và I-V trong các trường hợp vận hành với một chuỗi PV. Những kết quả mô phỏng và kiểm nghiệm tập trung làm nổi bật giá trị của giải pháp đề xuất về các khía cạnh như:



a)



b)

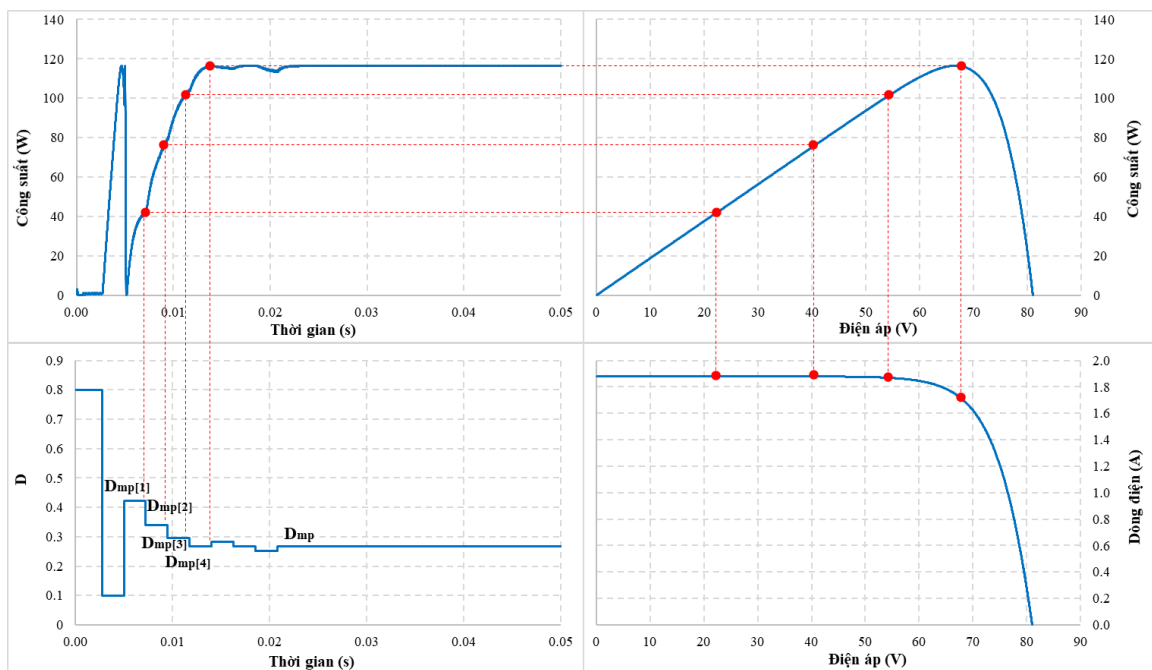
**Hình 4.4.** Đặc tuyến a) P-V và b) I-V khi mô phỏng một chuỗi PV.



- Khả năng định vị các LMPP trên đường đặc tính I-V của PVS khi xảy ra PSC.
- Chứng minh khả năng xác định khoảng hụt điện áp của phương pháp nghiên cứu có thể tăng tốc độ tìm kiếm, cải thiện hiệu suất và tốc độ MPPT khi xảy ra PSC.
- So sánh với các thuật toán khác trong cùng điều kiện vận hành để khẳng định sự vượt trội và khả năng ứng dụng do sự đơn giản và hiệu quả.

### a. Mô phỏng với một chuỗi PV

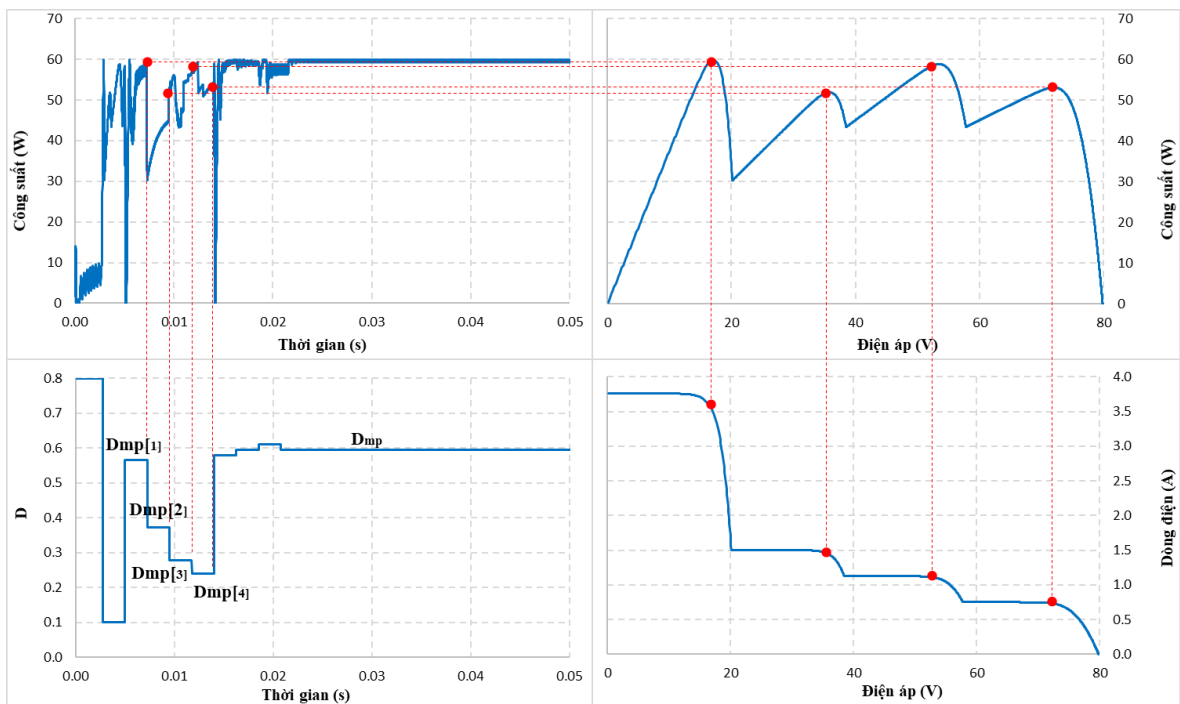
Khi thử nghiệm với một chuỗi gồm 4 tấm PV mắc nối tiếp, thuật toán đề xuất có thể tìm thấy vùng GMPP trong thời gian dưới 22 ms trong điều kiện đồng nhất. Vì vậy, tốc độ hội tụ tại điểm làm việc ổn định của hệ thống PV rất nhanh. Dựa trên đồ thị dạng sóng đầu ra trên Hình 4.5 có thể giải thích một cách chi tiết cách thức hoạt động của thuật toán như sau:



**Hình 4.5.** Dạng sóng MPPT trong điều kiện đồng nhất.

Trường hợp này chỉ có một cực trị duy nhất, nhưng với các bước tính của giải pháp đề xuất thì giá trị GMPP rơi vào đỉnh cực trị ở vùng cuối cùng (có 3 cực trị ảo trước đó do tương đương về dòng điện  $I_{sc}$ ). Hai giá trị  $D_1 = 0,8$  và  $D_2 = 0,1$  dùng để xác định  $I_{sc,sys}$  và  $V_{oc,sys}$ . Sau đó các giá trị  $D_{mp[i]}$  được tính toán với trong khoảng 15

ms. Do đó, thuật toán P&O chỉ cần 4 bước điều chỉnh để hội tụ tại  $D_{mp}$ . Công suất ước tính tối đa là  $P_{mp[4]} = 116,40 \text{ W}$  tại  $D_{mp[4]}$  đạt hiệu suất khoảng 99,90% đây cũng là giá trị vận hành của PVS tại điểm hội tụ trong trường hợp này. Do vị trí MPP tiềm năng được ước tính khá chính xác nên giải pháp này sử dụng kích thước bước nhỏ để tăng hiệu suất MPPT nhưng không tăng thời gian tìm kiếm. Tuy nhiên nó cũng có một nhược điểm là sau khi ước lượng được các giá trị LMPP, vị trí cuối cùng vẫn cần được kiểm tra bằng giải thuật P&O để đảm bảo chắc chắn đã đạt tới điểm tối ưu. Công việc này sẽ cần thêm thời gian bởi vì: khi chọn giá trị  $P_{max}$  lớn nhất trong số các LMPP làm điểm tham chiếu, giải pháp phải kiểm tra về hai phía của vị trí hiện tại để đảm bảo vị trí của GMPP đã được xác định chính xác.



**Hình 4.6.** Dạng sóng ngõ ra khi mô phỏng cho trường hợp 4.

Khi xảy ra PSC, dạng sóng P-V trong Hình 4.6 cho thấy giá trị GMPP tại  $P_{mp[1]}$  xấp xỉ  $P_{mp[3]}$ . Những thuật toán có độ chính xác kém thường bị mắc kẹt tại LMPP trong các trường hợp tương tự. Tuy nhiên, với khả năng ước tính chính xác và điều chỉnh các thông số phù hợp, giải pháp đề xuất đã xuất sắc trong việc xác định đúng GMPP. Điều này được giải thích dựa trên dạng sóng D như sau. Sau khi đo được các tham số của hệ thống PV từ hai vị trí  $D_1 = 0,8$  và  $D_2 = 0,1$ . Các giá trị  $D_{mp[i]}$  và  $P_{mp[i]}$

được tính trong khoảng 15,7 ms. Giải pháp chọn  $D_{mp[1]} = 0,565$  làm điểm tham chiếu để kiểm tra vị trí làm việc tối ưu từ dữ liệu này. Qua 4 bước điều chỉnh, thuật toán P&O hội tụ tại  $D_{mp} = 0,595$  với tổng thời gian từ lúc khởi động là 28 ms. Công suất đầu ra ổn định ở vị trí tối ưu ngay sau đó, với khoảng 59,83 W đạt 99,92%. Do khoảng cách giữa hai giá trị dòng điện  $I_{sc[1]}$  và  $I_{sc[2]}$  khá xa nên tham số  $D_{mp[2]}$  cần được định vị lại tương đối xa so với  $D_{mp[1]}$  để đảm bảo lấy được đúng giá trị dòng điện trong vùng tuyến tính.

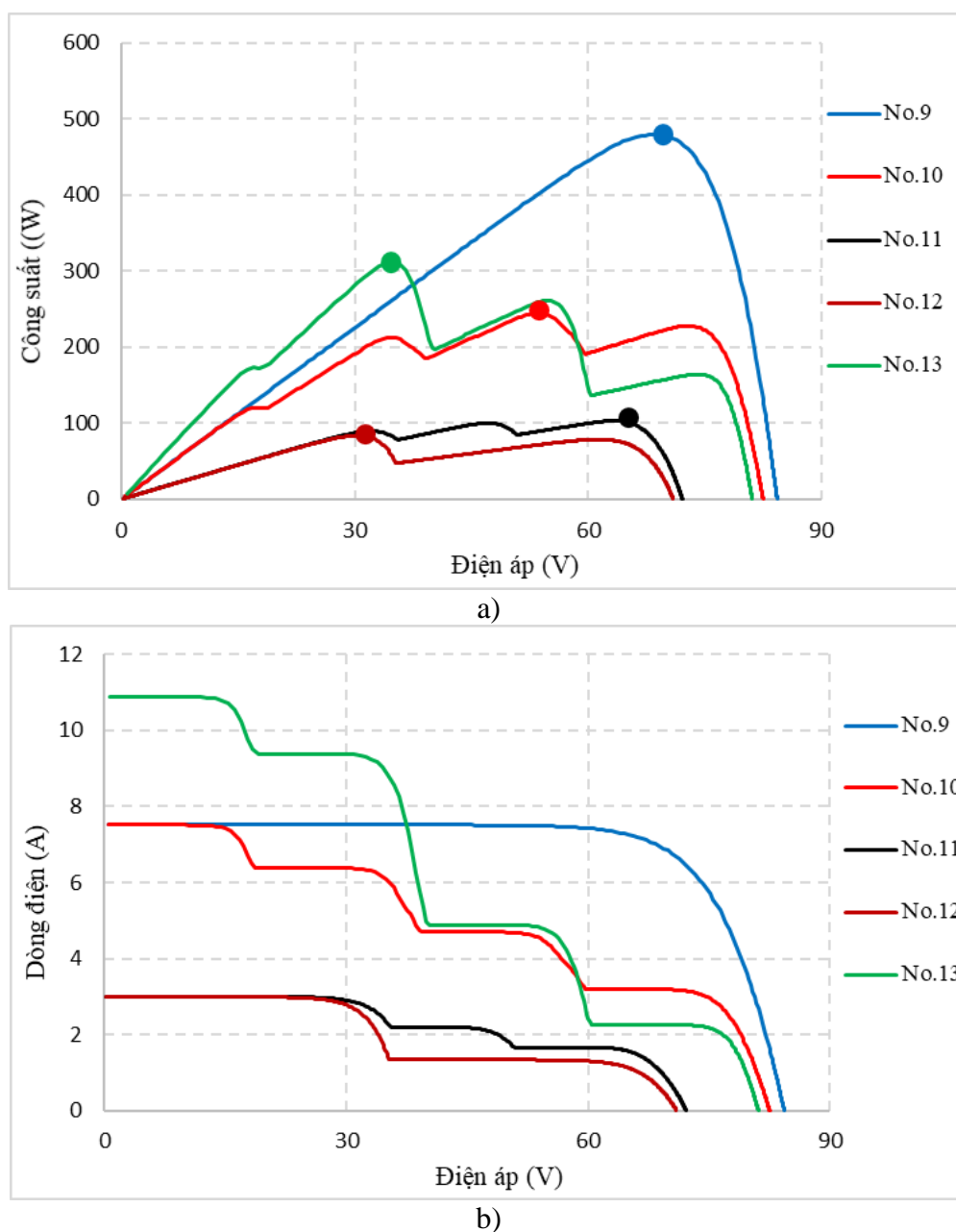
Mặc dù các trường hợp khảo sát trên có hình dạng đường cong đặc thù riêng, số lượng LMPP và vị trí GMPP khác nhau nhưng tốc độ hội tụ gần như ổn định. Nghĩa là thời gian tính toán các vị trí  $D_{mp[i]}$  cho các trường hợp vận hành khác nhau gần như không đổi. Do đó, thời gian tìm kiếm chỉ phụ thuộc vào sai số vị trí tham chiếu so với GMPP. Nếu vị trí này được ước lượng chính xác thì chỉ cần một vài lần lặp sẽ hội tụ; ngược lại sẽ cần nhiều thời gian hơn. Dựa trên khả năng xác định khá chính xác các vị trí LMPP nên giải pháp đề xuất có thể hội tụ tại GMPP tối ưu với tốc độ ổn định.

#### **b. Mô phỏng với nhiều chuỗi PV ghép song song**

Khi mô phỏng với nhiều chuỗi PV song song, các điều kiện đồng nhất và PSC cũng lần lượt được đề xuất như liệt kê trong bảng 4.1. Trong số đó, các trường hợp từ 9 đến 12 sử dụng hai chuỗi song song, mỗi chuỗi gồm 4 tấm PV mắc nối tiếp, vận hành ở điều kiện tiêu chuẩn (trường hợp 9) và bóng che một phần (các trường hợp còn lại). Trường hợp số 13 sử dụng ba chuỗi song song ở điều kiện bóng che một phần. Tất cả các trường hợp mô phỏng đều ở nhiệt độ tiêu chuẩn 25°C. Dạng đường cong đặc tuyến P-V và I-V cũng như vị trí các GMPP cho các trường hợp mô phỏng này được trình bày trong Hình 4.7.

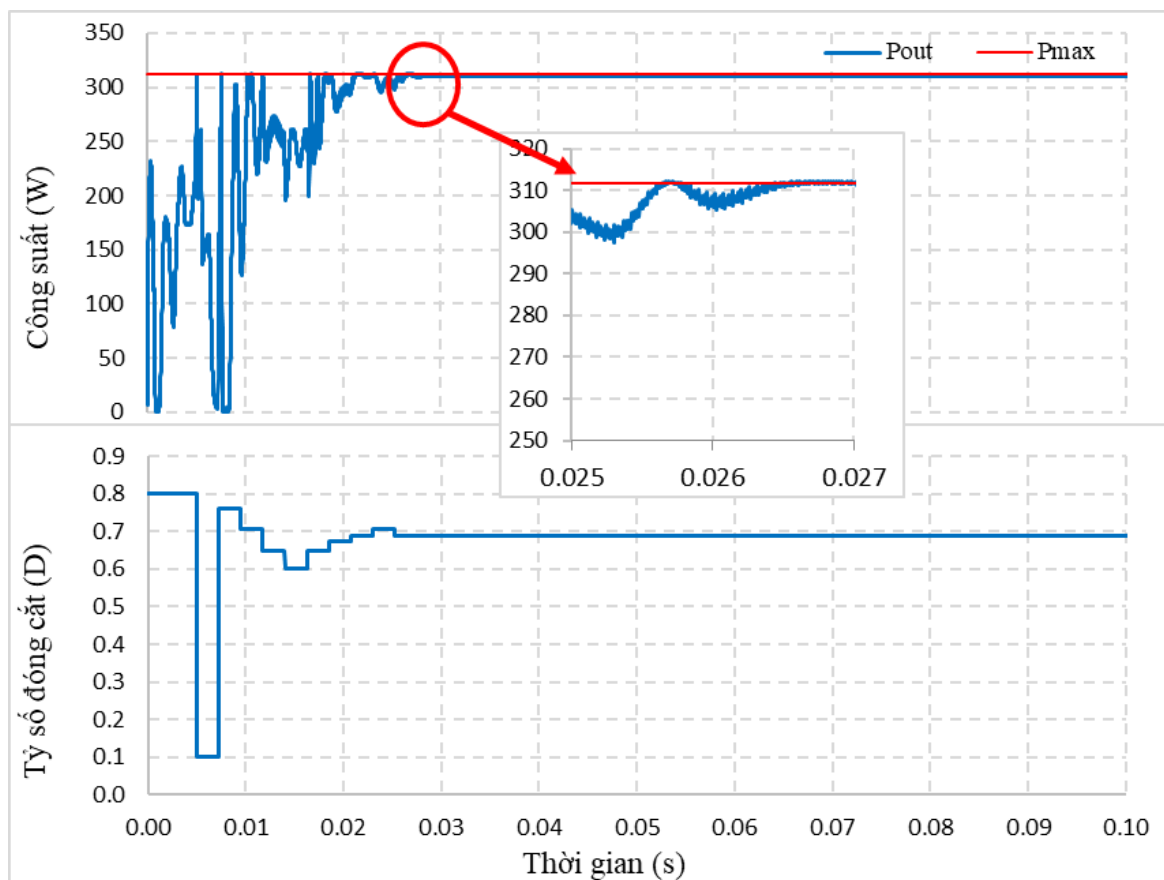
Kết quả mô phỏng cho thấy: khi toàn bộ hệ thống vận hành ở điều kiện tiêu chuẩn, mức công suất cực đại mà nó có thể cung cấp tương đương 479,72 W. Do đường cong đặc tính I-V và P-V trong trường hợp này chỉ có một cực trị nên giải pháp dễ dàng xác định được GMPP trong thời gian 0,026 s với công suất ra là 479,67 W đạt khoảng 99,98%. Khi số chuỗi song song tăng lên và xảy ra hiện tượng bóng che một phần, giải thuật đề xuất cũng thể hiện khả năng xác định chính xác GMPPT chỉ với một vài

bước điều chỉnh. Hình 4.8 trình bày dạng sóng D và công suất ngõ ra trong trường hợp bóng che một phần xảy ra trên ba chuỗi song song (trường hợp 13). Ngay sau 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 ở bốn khoảng tương ứng do bóng che tạo ra. Sau khi xác định được vùng chứa GMPP, giải pháp đề xuất chỉ cần điều chỉnh thêm bốn lần để hội tụ tại 0,027 s với khả năng trích xuất năng lượng 311,52 W đạt khoảng 99,94% so với công suất cực đại là 311,71 W của hệ thống PV.



**Hình 4.7.** Đặc tuyến a) P-V và b) I-V khi mô phỏng nhiều chuỗi PV song song.

Những kết quả đạt được cho thấy: mặc dù gia tăng về số lượng chuỗi PV làm thay đổi giá trị  $I_{sc,sys}$  và  $V_{oc,sys}$  của hệ thống PV nhưng hai tham số này được xác định trực tiếp theo điều kiện vận hành thông qua tỷ số đóng cắt D nên nó giống như một khung định vị để giải pháp tìm kiếm các LMPP trong phạm vi này mà không bị trôi ra khỏi vùng tiềm năng. Bên cạnh đó, giải thuật chỉ gia tăng số lượng phép tính chứ không tăng số lần lặp nên hầu như tốc độ tìm kiếm của các trường hợp gần như không đổi. Điều này giúp cho hệ thống PV làm việc ổn định hơn nhiều so với việc dùng nhiều bước lặp để tìm kiếm trong các công trình công bố trước đó.



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

Tổng hợp tất cả các kết quả mô phỏng trong bảng 4.2 cho thấy tốc độ hội tụ nhanh nhất có thể đạt 21 ms và chậm nhất là 32 ms. Trung bình cần khoảng 27,6 ms để phân biệt được GMPP giữa các LMPP. Bên cạnh sự gia tăng đáng kể về tốc độ hội tụ, hiệu suất GMPPT trong PSC cũng được cải thiện rõ rệt. Tất cả các trường hợp mô phỏng đều có hiệu suất trên 99% với mức trung bình là 99,68%. Kết quả cũng cho

thấy giải pháp đề xuất có thể ứng dụng cho những hệ thống PV gồm một hoặc một số chuỗi song song mà không làm gia tăng thời gian tìm kiếm GMPP. Điều này có thể được giải thích một cách chi tiết rằng; với khả năng xác định chính xác tọa độ điểm đầu ( $0; I_{sc,sys}$ ) và điểm cuối ( $V_{oc,sys}; 0$ ), giải pháp chỉ triển khai trong vùng định sẵn với các bước tìm kiếm như nhau. Do đó, tốc độ tìm kiếm gần như không thay đổi đáng kể mà chỉ phụ thuộc vào sai số ước lượng giữa điểm MPP tiềm năng với giá trị cực đại của nó. Với đặc điểm này, giải pháp đề xuất có tiềm năng được ứng dụng ở những hệ thống PV có cấu trúc lớn hơn gồm nhiều chuỗi PV ghép nối song song.

**Bảng 4.2.** Tổng hợp hiệu suất và tốc độ MPPT cho các trường hợp mô phỏng.

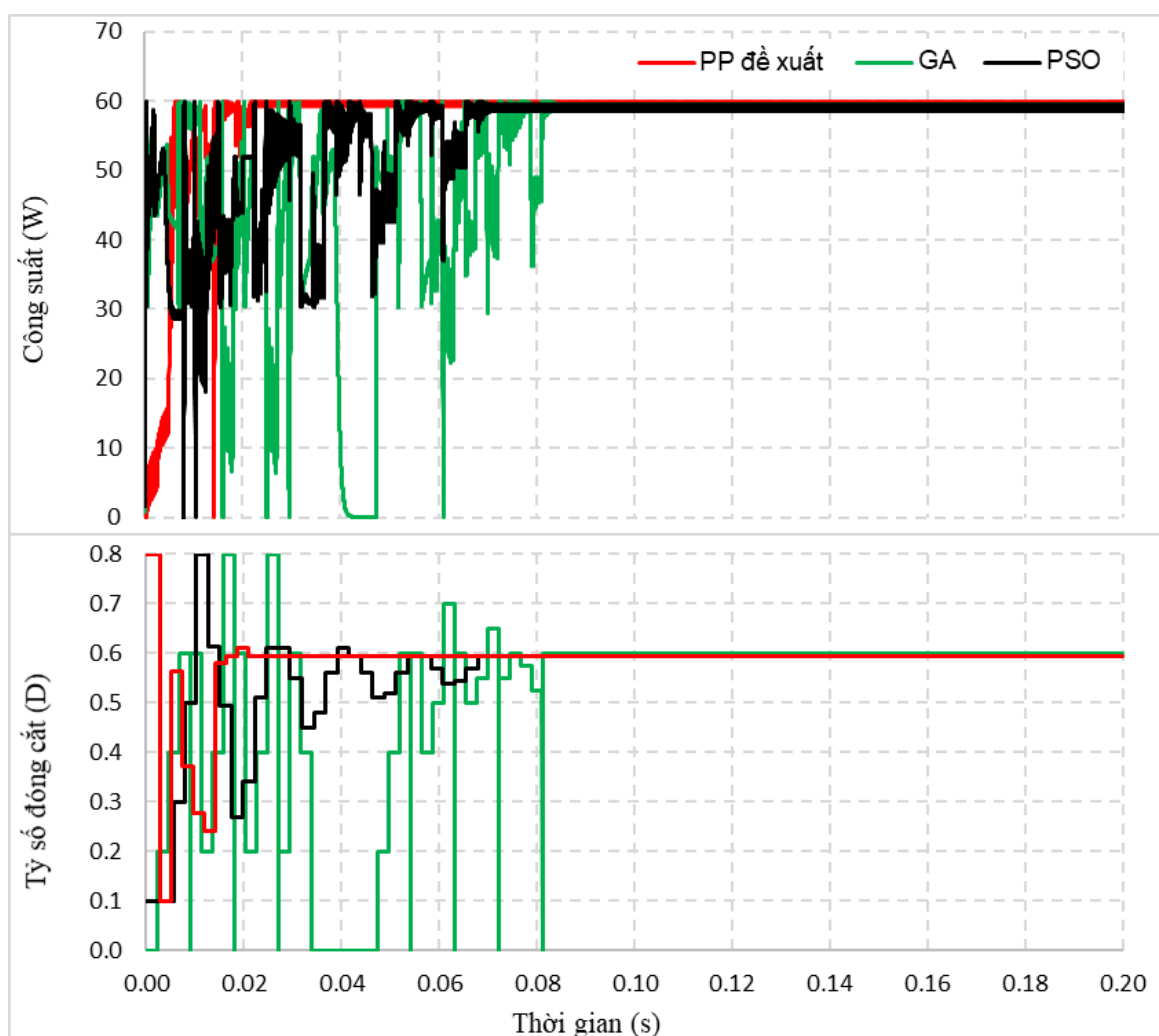
Trường hợp	$P_{max}$ (W)	$P_{out}$ (W)	Hiệu suất (%)	Tốc độ hội tụ (s)
1	116,51	116,40	99,91	0,021
2	77,20	77,07	99,83	0,027
3	78,62	78,21	99,48	0,027
4	59,88	59,83	99,92	0,028
5	94,74	94,11	99,34	0,031
6	56,80	56,53	99,52	0,023
7	115,03	115,01	99,98	0,028
8	64,47	64,20	99,58	0,031
9	479,72	479,67	99,98	0,026
10	247,98	246,94	99,58	0,030
11	280,11	279,63	99,82	0,028
12	242,12	240,08	99,15	0,032
13	311,71	311,52	99,94	0,027

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

Hiệu quả của thuật toán đề xuất còn được so sánh với hai phương pháp tối ưu là PSO và GA trong cùng điều kiện vận hành. Các tham số của hai thuật toán được liệt kê trong Bảng 4.3, trong khi giải pháp đề xuất sử dụng kích thước bước cố định  $\Delta D = 0,015$  để tìm kiếm trong giới hạn hoạt động từ hai vị trí khởi động ban đầu là 0,1 và 0,8 để tính các giá trị cơ bản của hệ thống PV. Kích thước quần thể, số lượng mẫu và số lần lặp tối đa là như nhau đối với tất cả các thuật toán để đảm bảo kết quả được so sánh một cách khách quan.

**Bảng 4.3.** Thông số cơ bản của các giải thuật

PSO		GA	
Thông số	Giá trị	Thông số	Giá trị
Kích thước quần thể	4	Kích thước quần thể	4
Hệ số gia tốc $c_1, c_2$	0,02 và 0,5	Kích thước quần thể tối đa	8
Hệ số ngẫu nhiên $r_1, r_2$	Từ 0 đến 1	Hệ số sinh sản	0,8
Trọng số quán tính	0,1	Tốc độ đột biến	0,1
Số lượng mẫu	300	Số lượng mẫu	300
Số bước lặp tối đa	500	Số bước lặp tối đa	500



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

Kết quả so sánh dạng sóng đầu ra của ba giải thuật khi xảy ra PSC trong trường

hợp 4 trình bày trong Hình 4.9 cho thấy: Với hai giá trị ban đầu  $D_1 = 0,8$  và  $D_2 = 0,1$ , giải pháp đề xuất triển khai bốn giá trị  $D$  trong các khoảng bóng che để xác định các LMPP. Chính vì vậy mà nó giảm bớt số lần lặp và sớm ổn định tại điểm làm việc tại thời điểm 0,028 s với công suất ngõ ra khoảng 59,80 W đạt 99,92%. Bên cạnh đó, PSO cũng được rải đều các cá thể trong phạm vi từ 0,1 đến 0,8 nhưng mỗi cá thể cũng cần phải cập nhật 8 lần mới hội tụ tại vị trí ổn định. Do đó thời gian tìm kiếm của PSO là 0,07 s và hiệu suất MPPT đạt 98,58% khi trích xuất giá trị công suất khoảng 59,03 W. Trong trường hợp này, GA có hiệu suất nhanh hơn so với hai thuật toán còn lại (đạt 99,97%) nhưng nó lại cần nhiều thời gian nhất, khoảng 82 s.

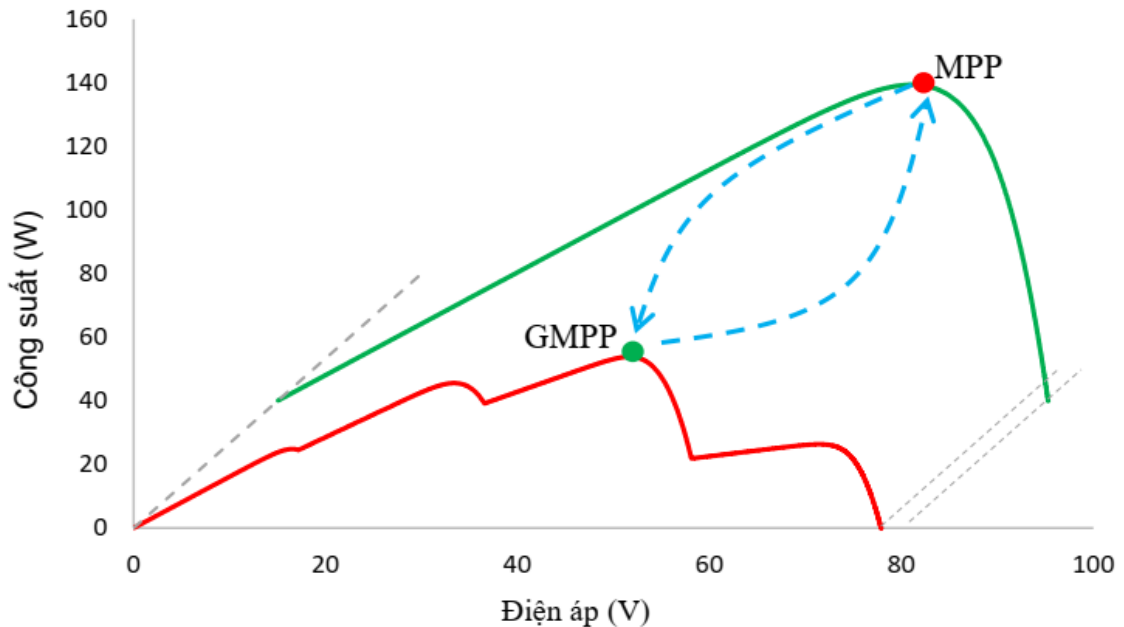
**Bảng 4.4.** So sánh hiệu suất MPPT và tốc độ hội tụ với PSO và GA.

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

Tổng hợp kết quả so sánh khả năng GMPP giữa ba giải thuật cho hệ thống gồm 4 tấm PV mắc nối tiếp được liệt kê trong Bảng 4.4 cho thấy: hiệu suất cao nhất của giải pháp đề xuất là 99,98%, GA với 99,97% là giới hạn tối đa, trong khi đó PSO có hiệu suất cao nhất khoảng 99,84%. Thời gian tìm kiếm của giải thuật đề xuất từ 21 ms đến 31 ms và khá ổn định với tốc độ trung bình khoảng 27 ms. Trong khi đó PSO cần nhiều thời gian nhất với tốc độ bình quân là 67,5 ms. Đối với GA, trung bình nó cần 52,25 ms để ổn định tại điểm làm việc. Không những gia tăng về tốc độ hội tụ, hiệu



suất trung bình của giải pháp đề xuất cũng vượt trội khi đạt 99,70% so với 98,67% của PSO và 97,94% của GA. Nó minh chứng cho khả năng áp dụng thuật toán đơn giản nhưng rất hiệu quả nhờ vào sự điều chỉnh điểm khởi động để tìm kiếm các giá trị LMPP - cụ thể là xác định khoảng hụt điện áp do bóng che một phần gây ra.

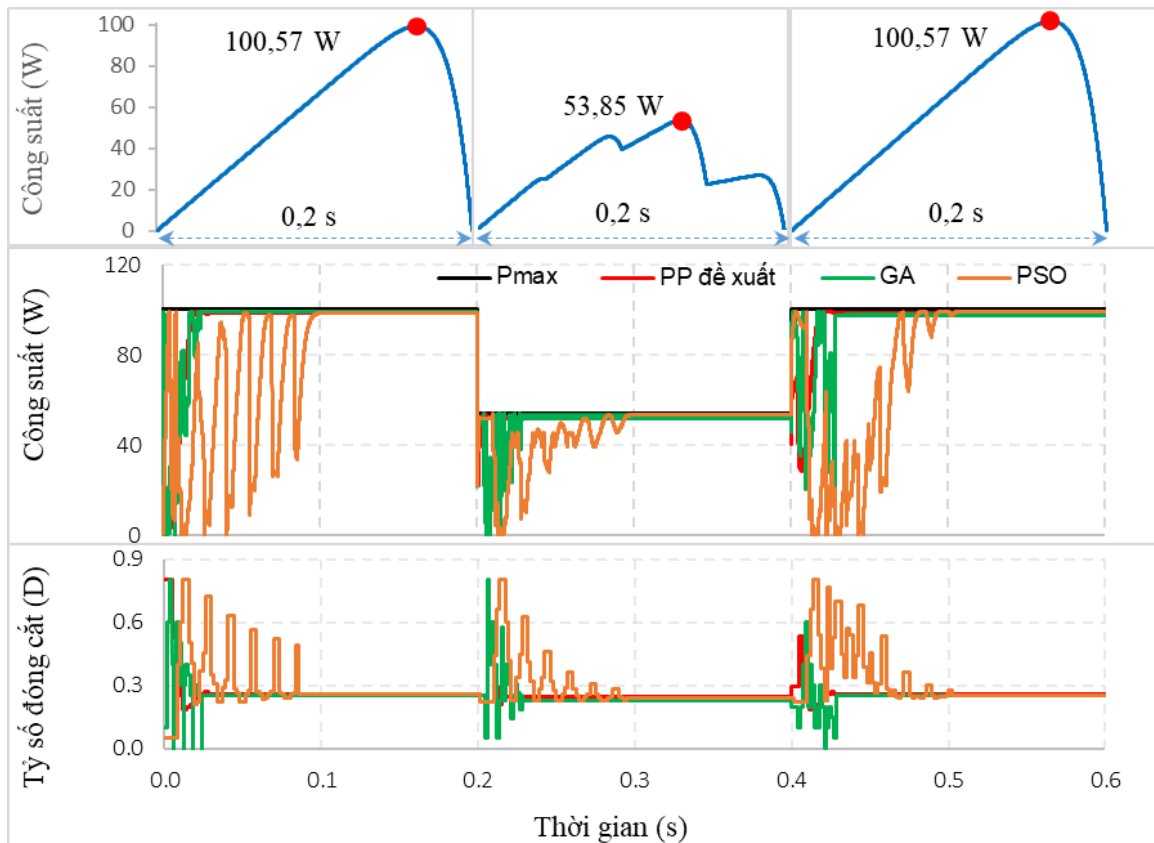


**Hình 4.10.** Thay đổi điểm vận hành khi xảy ra PSC.

Một kịch bản khác được đề xuất mô phỏng trong điều kiện bức xạ thay đổi liên tục (Hình 4.10) để kiểm tra đáp ứng động của giải thuật đề xuất. Giả sử toàn bộ hệ thống PV đang ổn định ở  $430 \text{ W/m}^2$  với tổng công suất phát khoảng  $100,57 \text{ W}$  thì PSC xảy ra tại thời điểm  $0,2 \text{ s}$ . Bức xạ trên các tấm PV thay đổi lần lượt là  $430 \text{ W/m}^2$ ,  $380 \text{ W/m}^2$ ,  $280 \text{ W/m}^2$  và  $100 \text{ W/m}^2$ . Đường cong đặc tính P-V thay xuất hiện bốn cực trị và GMPP thuộc vị trí thứ ba. Công suất phát của hệ thống PV đột ngột giảm xuống còn  $53,85 \text{ W}$ . Sau đó tại thời điểm  $0,4 \text{ s}$  tức là  $0,2 \text{ s}$  tiếp theo, sự có bóng che không còn, hệ thống phục hồi hoàn toàn trạng thái làm việc. Giải pháp đề xuất đã chứng minh được khả năng theo dõi GMPP mới nhanh chóng và ổn định tại  $0,221 \text{ s}$ . Nghĩa là nó chỉ cần  $21 \text{ ms}$  để di chuyển đến điểm làm việc mới, tốc độ hội tụ này giảm 26% so với PSO và 7% so với GA. Mặc dù hiệu suất của các thuật toán chênh lệch không đáng kể nhưng dạng sóng đầu ra của thuật toán GA kém ổn định hơn các giải thuật khác. Sau đó, điều kiện vận hành phục hồi tại thời điểm  $0,4 \text{ s}$ . Giải pháp đề xuất và

GA gần như ổn định cùng lúc ở 0,430 s, trong khi thuật toán PSO mất 0,510 s để quay trở lại điểm làm việc (Hình 4.11).

Tóm lại, các kết quả so sánh trong điều kiện vận hành đồng nhất, PSC và bức xạ thay đổi liên tục cho thấy hiệu suất GMPP và tốc độ hội tụ của giải thuật đề xuất đạt hiệu quả vượt trội so với các phương pháp còn lại. 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% so với PSO và 61,77% so với GA. Đối với điều kiện làm việc khi bức xạ thay đổi liên tục, giải pháp đề xuất cũng chứng minh khả năng đáp ứng động vượt trội khi nhanh chóng tìm ra điểm làm việc mới mỗi khi vị trí GMPP thay đổi. Việc giảm bớt số lần lặp khi tìm kiếm giúp cho dạng sóng công suất ngõ ra ổn định hơn, nâng cao chất lượng cải thiện khả năng sinh điện của hệ thống PV.

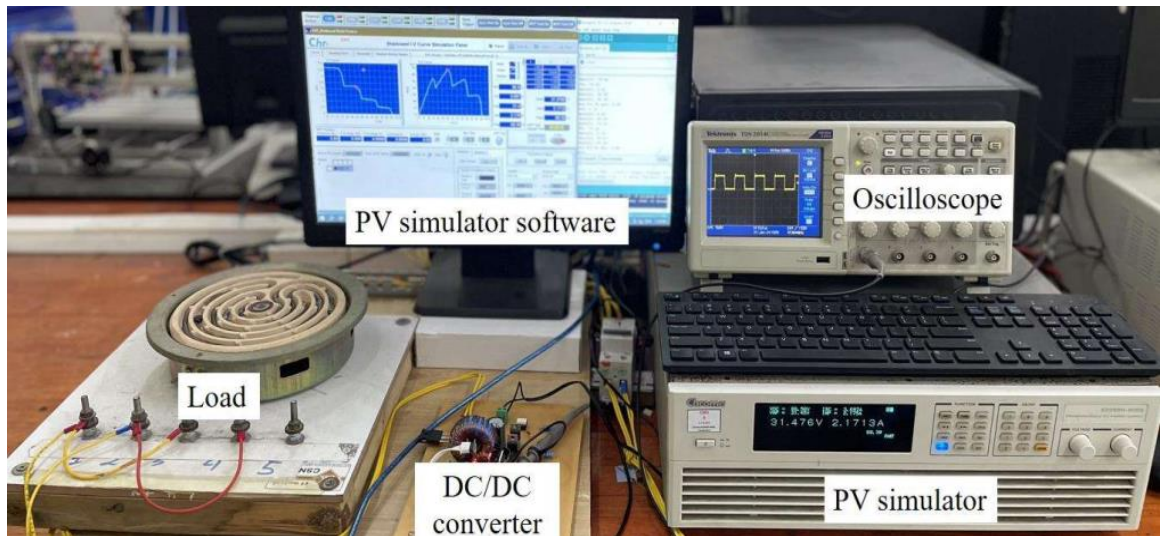


**Hình 4.11.** So sánh khả năng GMPP khi PSC thay đổi liên tục.

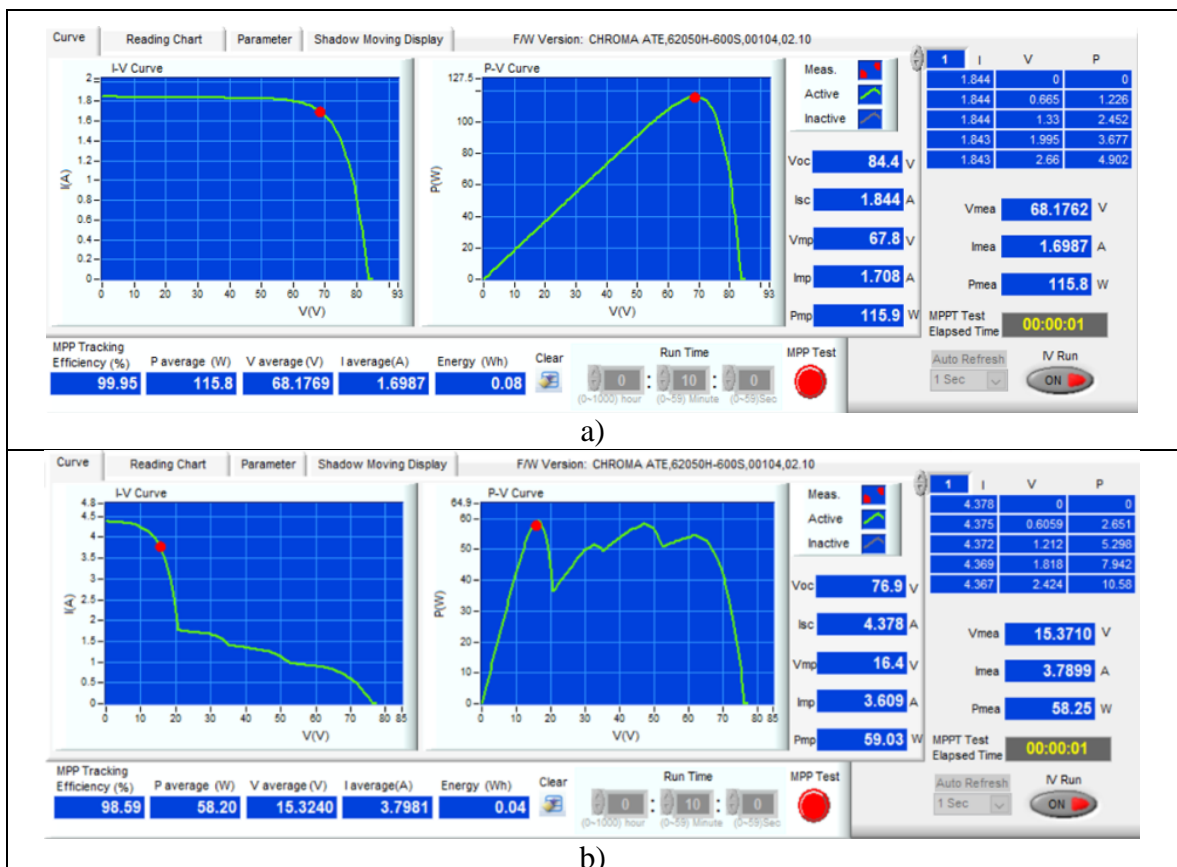
#### **d. Kết quả thực nghiệm**

Các kịch bản và điều kiện vận hành tương tự như mô phỏng được thực nghiệm trên một chuỗi gồm bốn tấm PV mắc nối tiếp sử dụng trình mô phỏng Chroma có sơ

đồ bố trí như Hình 4.12. Các thông số của mạch DC/DC có thể được tìm thấy trong Bảng 3.18 mục 3.5.4.



Hình 4.12. Bố trí thực nghiệm giải thuật đề xuất



Hình 4.13. Kết quả thực nghiệm khi a) điều kiện đồng nhất, b) PSC  
Khi vận hành trong điều kiện đồng nhất, Hình 4.13a, công suất ngõ ra trung

bình là 115,8 W, đạt hiệu suất MPPT khoảng 99,95%. Hiệu suất giảm nhẹ khi xảy ra PSC như trong Hình 4.13b, ở mức xấp xỉ 98,59%. Trường hợp này, GMPP thuộc đỉnh cực trị đầu tiên trên đường cong P-V và hơn nữa hai cực trị số một và số ba có công suất xấp xỉ nhau. Những giải thuật có độ chính xác kém thường bị bẫy vào cực trị địa phương vì những lý do như: Điểm cực trị đầu tiên ứng với vùng giá trị D sát cận biên 1, nếu giải thuật sử dụng phương pháp chặn trên để giới hạn vùng tìm kiếm thường dễ lọt cực trị này. Thứ hai, công suất của hai đỉnh có giá trị tương đương dẫn đến dễ nhầm lẫn GMPP tại vị trí số 3 do phương pháp ước lượng các vị trí LMPP thiếu chính xác. Bằng cách xác định khoảng hụt điện áp một cách chính xác mà giải thuật đề xuất dễ dàng tránh được bẫy LMPP một cách hiệu quả. Hơn nữa, vị trí cực trị đầu tiên mặc dù cũng được giới hạn nhưng nó được không chế bởi giá trị  $I_{sc,sys}$  nên chắc chắn giải pháp sẽ không dễ lọt cực trị này như trong các công trình nghiên cứu trước đây.

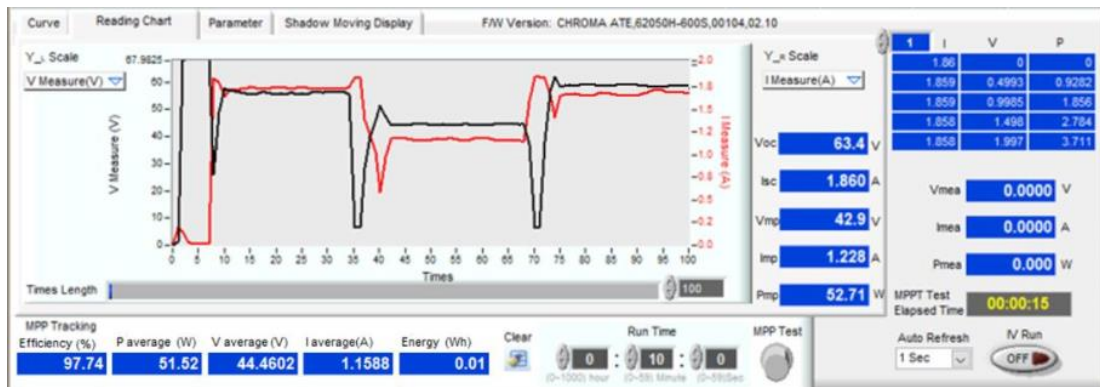
Tổng hợp công suất phát và hiệu suất thử nghiệm được trình bày trong Bảng 4.5 cho thấy: hiệu suất MPPT trung bình khi thử nghiệm ở các điều kiện hoạt động khác nhau khoảng 99,13%. Bên cạnh đó, khả năng GMPPT của giải thuật đề xuất cũng được thử nghiệm trong điều kiện bức xạ thay đổi đột ngột như đối với trường hợp mô phỏng. Kết quả dạng sóng dòng điện, điện áp và công suất trong Hình 4.14 chứng tỏ tiềm năng khai thác giải thuật này trong mọi điều kiện làm việc khác nhau.

**Bảng 4.5.** Tổng hợp hiệu suất MPPT thực nghiệm cho các trường hợp đề xuất.

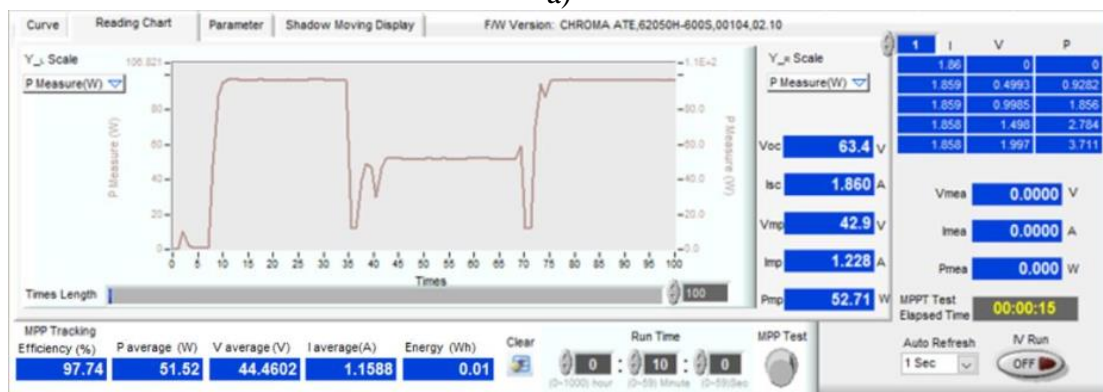
Trường hợp	1	2	3	4	5	6	7	8
Công suất (W)	115,8	76,89	77,47	59,03	94,57	55,71	113,75	64,18
Hiệu suất MPPT %	99,95	99,60	98,54	98,59	99,82	98,08	98,89	99,55

Tóm lại, số liệu thống kê qua mô phỏng và thử nghiệm chỉ ra rằng thuật toán đề xuất đạt được hiệu quả GMPP vượt trội trong mọi tình huống xử lý bóng che một phần và toàn phần. Trong điều kiện xuất hiện cùng lúc hai trạng thái bóng che (một phần và toàn phần) trên hệ thống PV, số lượng LMPP sinh ra phụ thuộc vào số tấm PV nhận được bức xạ khác nhau nên nó được xếp vào dạng bóng che một phần. Do đó, luận án tập trung nhiều vào bài toán tránh bẫy LMPP trong điều kiện bóng che

một phần hơn là bóng che toàn phần. Giải pháp đề xuất đơn giản, dễ triển khai, hoạt động tốt và cải thiện đáng kể tốc độ tìm kiếm GMPP khi xảy ra PSC. Kết quả này đạt được dựa trên sự kết hợp giữa phương pháp ước lượng khoảng hụt điện áp do bóng che một phần gây nên với vị trí tham chiếu  $0,4V_{oc}$  trên đặc tuyến I-V để phân biệt các vùng LMPP. Nhờ đó mà giải thuật P&O truyền thống mới phát huy hiệu quả tìm kiếm trong giới hạn đơn cực trị để gia tăng cả hệ hiệu suất và tốc độ hội tụ.



a)



b)

**Hình 4.14.** Dạng sóng a) dòng điện và điện áp, b) công suất khi bức xạ thay đổi

#### 4.4. Kết luận

Nội dung chương 4 đã đề xuất giải pháp GMPPT cho hệ thống PV liên kết kiểu SC và S-PC khi xảy ra PSC với các nghiên cứu ứng dụng như sau:

Kế thừa và phát huy đề xuất phạm vi hoạt động nhỏ hơn  $0,4V_{oc}$  từ Chương 3 để định vị các LMPP trong vùng bậc thang trên đường 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 đặc tuyến

theo điều kiện 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  $\Delta R$  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}.

# 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, 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 cấu hình song song PVS làm việc trong những điều kiện thay đổi về bức xạ và nhiệt độ để trích xuất năng lượng lớn nhất có thể. 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  $I_{sc}$  và  $V_{oc}$  của PVS bằng phép ngoại suy mà không cần gián đoạn cung cấp điện. Kết quả đạt được với khả năng tính toán hai tham số này chính xác tới 99%. 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 truyền thống và một phiên bản cải tiến khác

là VSSP&O. Giải pháp đề xuất luôn thể hiện khả năng MPPT vượt trội trong mọi tình huống thử nghiệm. Cụ thể 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. Những thông số thống kê cho thấy, giải thuật đề xuất rất hiệu quả trong MPPT nhằm nâng cao hiệu suất khai thác năng lượng từ hệ thống PV. Ứng dụng phương pháp đề xuất này cho cấu hình PV kiểu song song 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 và hệ thống gồm nhiều chuỗi PV mắc song song. Trong đó, phương pháp mô phỏng đường cong đặc tuyến I-V khi xảy ra PSC để xác định MPP được sử dụng. 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.

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

## DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. **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.
2. **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.
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. Truong 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.
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. **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
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. **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
9. 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*

## 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] 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.
- [4] 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.
- [5] Y. Q. Z. B. Z. X. W. Jinpeng, "Study on MPPT algorithm based on an efficient hybrid conjugate gradient method in a photovoltaic system," *IEEE Access*, Bd. 11, pp. 4219 - 4227, 2023.
- [6] 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.
- [7] G. K. B. K. Karmakar, "A current supported PV array reconfiguration technique to mitigate partial shading," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Bd. 12, Nr. 2, pp. 1449 - 1460, 2021.

- [8] S. S. S. Singh, "Solar-PV inverter for the overall stability of power systems with intelligent MPPT control of DC-link capacitor voltage," *Protection and Control of Modern Power Systems*, Bd. 8, Nr. 1, pp. 1 -20, 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] F. L. C. D. P. Y. Xu, "District multi-energy systems: A comprehensive review of configurations, technologies, and performances," *Building and Environment*, Bd. 253, p. 111318, 2024.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] S. U. K. J. M. Jazayeri, "A comparative study on different photovoltaic array topologies under partial shading conditions," in *IEEE PES T&D Conference and Exposition*, Famagusta, North Cyprus, via Mersin 10 Turkey, 2014.

- [16] B. L. M. R. Ramaprabha, "A Comprehensive Review and Analysis of Solar Photovoltaic Array Configurations under Partial Shaded Conditions," *International Journal of Photoenergy*, p. 120214, 2012.
- [17] M. K. M. M. A. S. M. Z. S. El-Dein, "Optimal Photovoltaic Array Reconfiguration to Reduce Partial Shading Losses," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Bd. 4, Nr. 1, pp. 145 - 153, 2012.
- [18] 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.
- [19] K. S. Parlak, "PV array reconfiguration method under partial shading conditions," *Electrical Power and Energy Systems*, Bd. 63, p. 713–721, 2014.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.

- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] T. A. R. K. R. K. R. A. D. K. Narne, "Evaluation of series-parallel-cross-tied PV array configuration performance with maximum power point tracking techniques under partial shading conditions," *Clean Energy*, Bd. 7, Nr. 3, pp. 620 - 634, 2023.
- [27] 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.
- [28] S. Z. A. A. M. S. W. A. S. B. J. Z. Ali, "A Study of a Generalized Photovoltaic System with MPPT Using Perturb and Observer Algorithms under Varying Conditions," *Energies*, Bd. 16, Nr. 9, p. 3638, 2023.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] A. D. R. S. B. A. Bidram, "Control and circuit techniques to mitigate partial shading effects in photovoltaic arrays," *IEEE Journal of Photovoltaics*, Bd. 2, Nr. 4, pp. 532 - 546, 2012.

- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] A. Baba, G. Liu und X. Chen, "Classification and Evaluation Review of Maximum Power Point Tracking Methods," *Sustainable Futures*, Bd. 2, p. 100020, 2020.
- [37] 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.
- [38] H. B. L. B. T. P. V. M. L. T. A. P. D. H. N. X. T. T. T. T. L. L. M. Le, "Hybrid artificial intelligence approaches for predicting buckling damage of steel columns under axial compression," *Materials*, Bd. 12, p. 1670, 2019.
- [39] A. Baatiah, A. Eltamaly und M. Alotaibi, „Improving Photovoltaic MPPT Performance through PSO Dynamic Swarm Size Reduction," *Energies*, Bd. 16, p. 6433, 2023.



- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] A. D. O. Z. A. W. M. T. A. Y. A. Z. M. S. E. M. M. H. Chojaa, "Robust control of DFIG-based WECS integrating an energy storage system with intelligent MPPT under a real wind profile," *IEEE Access*, Bd. 11, pp. 90065 - 90083, 2023.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] L. K. T. M. O. Okwu, *Metaheuristic Optimization: Nature-Inspired Algorithms Swarm and Computational Intelligence, Theory and Applications*, Springer, 2020.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] 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.

- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] 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.

- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] 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.
- [65] 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.
- [66] 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.
- [67] Q. A. M. M. F. S. S. A. S. R. A. R. S. ... S. A. Q. L. G. Hua, "Comparative Analysis of Power Output, Fill Factor, and Efficiency at Fixed and Variable Tilt Angles for Polycrystalline and Monocrystalline Photovoltaic Panels—The Case of Sukkur IBA University," *Energies*, Bd. 15, Nr. 11, p. 3917, 2022.
- [68] H. H. H. M. H. R. A. M. S. K. A. S. H. Z. M. A. E. E. M. M. A. R. Y. A. A. I. M. Ali, "An Enhanced P&O MPPT Algorithm With Concise Search Area for Grid-Tied PV Systems," *Abdallah*, Bd. 11, pp. 79408 - 79421, 2023.
- [69] W.-T. H. Hwa-Dong Liu, "An improved solar step-up power converter for next-generation electric vehicle charging," *Energy Reports*, Bd. 12, pp. 1848-1858, 2024.

- [70] A. B. Jurica Kandrata, "Clock Frequency Optimization of a Compensated Spread-Spectrum Controller in Buck Converters," *IEEE Access*, Bd. 12, pp. 4881 - 4891, 2024.
- [71] V. F. P. D. F. A. C. J. F. S. S. P. J. Monteiro, "A Buck-Boost Converter with Extended Duty-Cycle Range in the Buck Voltage Region for Renewable Energy Sources," *Electronics*, Bd. 12, Nr. 3, p. 584, 2023.
- [72] 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.
- [73] F. W. F Yi, "Review of voltage-bucking/boosting techniques, topologies, and applications," *Energies*, Bd. 16, Nr. 2, p. 842, 2023.
- [74] E. D. P. K. Joseph, "Design of hybrid forward boost converter for renewable energy powered electric vehicle charging applications," *IET Power Electronics*, Bd. 12, Nr. 8, pp. 2015-2021, 2019.
- [75] X. H. W Li, "Review of nonisolated high-step-up DC/DC converters in photovoltaic grid-connected applications," *IEEE Transactions on industrial electronics*, Bd. 58, Nr. 4, pp. 1239 - 1250, 2011.
- [76] P. K. S. C. S. Lee, "High Step-Up Soft-Switched Converters Using Voltage Multiplier Cells," *IEEE Trans. Power Electron*, Bd. 28, pp. 3379 - 3387, 2013.
- [77] 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.
- [78] D. P. B. R. S. B. A. L. L. F. L. Villa, "Maximizing the power output of partially shaded photovoltaic plants through optimization of the

- interconnections among its modules," *IEEE Journal of Photovoltaics*, Bd. 2, Nr. 2, pp. 154 - 163, 2012.
- [79] P. W. D. P. K. B. I. C. S. Ganesan, "Power enhancement in PV arrays under partial shaded conditions with different array configuration," *Heliyon*, Bd. 10, p. 23992, 2024.
- [80] A. Y. A. Z. M. S. E. M. A. M. S. Khadar, "MPPT-SAZE Algorithm for Solar PV Array Powered Series-Connected 5-Phase Induction Motors Supplied Off a Z-Source and Dual-Inverter," *IEEE Access*, Bd. 12, pp. 99002 - 99011, 2024.
- [81] E. A. A.-A. H. M. H. W. K. S. M. L. R. A. T. M. T. V. F. J. G. A. Ghazi, "Circle Search Algorithm-Based Super Twisting Sliding Mode Control for MPPT of Different Commercial PV Modules," *IEEE Access*, Bd. 12, pp. 33109 - 33128, 2024.
- [82] M. B. A. I. S. M. T. M. A. Taher, "Wavelet and Signal Analyzer Based High-Frequency Ripple Extraction in the Context of MPPT Algorithm in Solar PV Systems," *IEEE Access*, Bd. 12, pp. 113726 - 113740, 2024.
- [83] H. A. S. A. H. A. M. N. A. F. M. H. Khan, "Improved RCC-Based MPPT Strategy for Enhanced Solar Energy Harvesting in Shaded Environments," *IEEE Access*, Bd. 12, pp. 111035 - 111044, 2024.
- [84] C. A. Y. M. I Pervez, "A Reduced Search Space Exploration Metaheuristic Algorithm for MPPT," *IEEE Access*, Bd. 10, pp. 26090 - 26100, 2022.
- [85] 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.
- [86] 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.

- [87] 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.
- [88] 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.
- [89] 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.
- [90] 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.
- [91] 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.
- [92] 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.
- [93] 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.

- [94] 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.
- [95] 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.
- [96] 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.
- [97] 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.
- [98] 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.
- [99] 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.
- [100] 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.
- [101] 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.