

Tạp chí

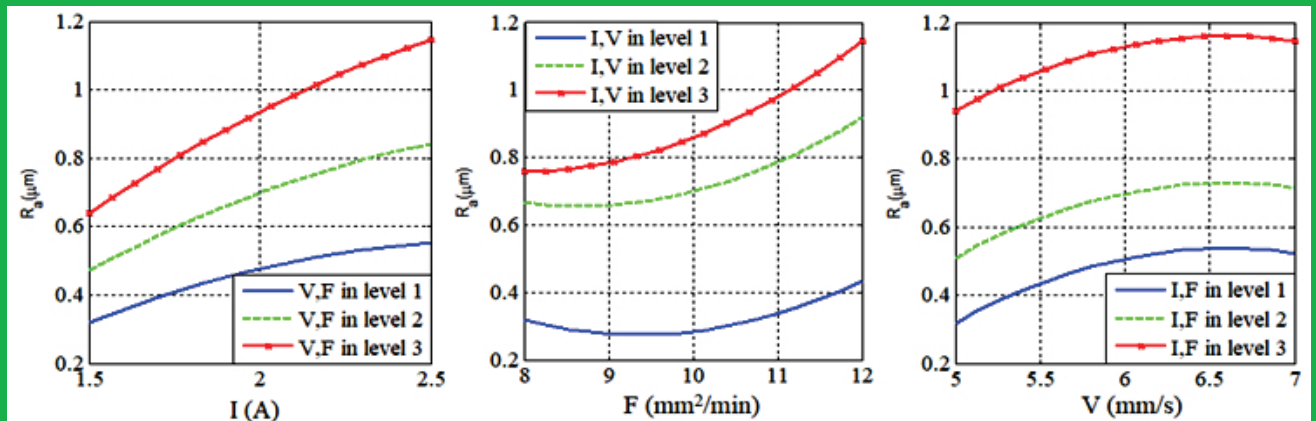
KHOA HỌC VÀ

CÔNG NGHỆ ỨNG DỤNG

JOURNAL OF APPLIED SCIENCE AND TECHNOLOGY

Số 48

Tháng 12/2025



MỤC LỤC

STT		Trang
1.	Nguyen Hong Phong, Van- The Tran, Thuan – Hoang Minh, and Vu Duc Phuc STATISTICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF SURFACE ROUGHNESS IN WIRE EDM OF NONCIRCULAR GEARS MADE OF SKD11 STEEL Mô hình hóa thống kê và tối ưu hóa độ nhám bề mặt trong gia công EDM các bánh răng không tròn làm từ thép SKD11	5
2.	Trong-Tung Dam, Thi-Quy Vu, Xuan-Truong Vu, Dinh-Quan Doan VELOCITY-DEPENDENT DEFORMATION MECHANISM OF FENICRCOTI HIGH-ENTROPY ALLOY UNDER VIBRATION-ASSISTED MACHINING Cơ chế biến dạng phụ thuộc vận tốc của hợp kim entropy cao FeNiCrCoTi trong quá trình gia công hỗ trợ rung động	12
3.	Van-Duong Vuong, Minh-Thuan Hoang CUTTER CORRECTION METHOD FOR IMPROVING THE ACCURACY OF MANUFACTURED SCREW ROTOR BY END MILLING CUTTER Phương pháp hiệu chỉnh dụng cụ cắt để nâng cao độ chính xác gia công rotor trục vít bằng dao phay ngón	19
4.	Trong-Linh Nguyen, Anh-Vu Pham, Van-Thoai Nguyen ATOMISTIC INSIGHTS INTO Al/Al EXPLOSIVE WELDING: A MOLECULAR DYNAMICS STUDY OF INTERFACIAL BONDING AND DIFFUSION MECHANISMS Nghiên cứu ở cấp nguyên tử quá trình hàn nổ Al/Al bằng mô phỏng động lực học phân tử về cơ chế liên kết và khuếch tán tại giao diện	25
5.	Anh-Vu Pham, Trong-Linh Nguyen INDENTATION SIZE EFFECT ON THE DEFORMATION BEHAVIOR OF Ta-Cu AMORPHOUS THIN FILMS Ảnh hưởng của kích thước dụng cụ đến hành vi biến dạng của màng mỏng vô định hình Ta-Cu	32
6.	Nguyễn Thị Vân Anh, Nguyễn Hữu Cường, Đào Văn Đã, Đỗ Thành Hiếu NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG HỆ THỐNG QUANG ĐIỆN BA PHA NỐI LƯỚI SỬ DỤNG KỸ THUẬT ĐIỀU CHẾ SVPWM CHO NGHỊCH LƯU Simulation Study of A Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic System using SVPWM Technique for The Inverter	38
7.	Giànn Thị Thu Hường, Cao Thị Hoài Thủy ĐÁNH GIÁ MỘT SỐ TÍNH CHẤT CƠ LÝ CỦA VẢI DỆT KIM ĐAN DỌC SỬ DỤNG SỢI POLYESTER TÁI CHẾ Evaluation of Some Mechanical Properties of Warp-Knitted Fabrics using Recycled Polyester Yarn	45
8.	Hà Ngọc Tuấn, Phạm Thị Ánh Hương, Trần Thị Thu Huyền, Ngô Thị Lan Anh SMOTE-ENSEMBLE: TỔNG QUAN KỸ THUẬT CÂN BẰNG DỮ LIỆU VÀ MÔ HÌNH HỌC MÁY KẾT HỢP TRONG DỰ ĐOÁN SỚM BIẾN CHỨNG VỔNG MẠC ĐÁI THÁO ĐƯỜNG Smote-Ensemble: A Review of Data-Balancing Techniques and Hybrid Machine Learning Models for Early Prediction of Diabetic Retinopathy Complications	51

9. **Nguyễn Đỗ Khải Hoàn, Trần Đỗ Thu Hà, Lưu Hoàng Minh, Nguyễn Xuân Mong, Nguyễn Văn Đạt, Trương Quốc Huy, Nguyễn Thanh Bình** 58
MỘT PHƯƠNG PHÁP TIẾP CẬN HIỆU QUẢ CHO BÀI TOÁN PHÁT HIỆN VẬT THỂ BAY TRÊN KHÔNG TẦM THẤP
An Effective Approach for Low-Altitude Aerial Object Detection
10. **Bui-Van HAI, Le-Duc HIEU, Nguyen-Phi TRUONG, Lam-Quang VINH, Khong-Van Nguyen** 62
THE IMPACT OF CERTAIN WORKING PARAMETERS ON THE DRILLING PROCESS OF PERCUSSIVE-ROTARY DRILLING
Ảnh hưởng của một số thông số làm việc đến quá trình khoan xoay đập
11. **Pham Thi Trang, Do Phuc Huong** 68
USING ROLE-PLAYING ACTIVITIES TO ENHANCE SPEAKING SKILLS OF SECOND-YEAR NON-ENGLISH MAJOR STUDENTS: AN ACTION RESEARCH AT A UNIVERSITY IN HUNG YEN
Sử dụng hoạt động nhập vai nhằm nâng cao kỹ năng nói cho sinh viên không chuyên ngữ năm thứ hai: nghiên cứu hành động tại một trường đại học ở Hưng Yên
12. **Nguyễn Anh Hải** 75
NGHIÊN CỨU VÀ CHẾ TẠO MẪU ROBOT TỰ HÀNH HỖ TRỢ CÔNG TÁC ĐÀO TẠO VỚI CHỨC NĂNG NHẬN DIỆN VÀ ĐỐI THOẠI THÔNG MINH
Research and Development of an Autonomous Mobile Robot for Educational Support with Intelligent Recognition and Dialogue Functions



NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG HỆ THỐNG QUANG ĐIỆN BA PHA NỔI LƯỚI SỬ DỤNG KỸ THUẬT ĐIỀU CHẾ SVPWM CHO NGHỊCH LƯU

Nguyễn Thị Vân Anh, Nguyễn Hữu Cường, Đào Văn Đã, Đỗ Thành Hiếu*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên

* Tác giả liên hệ: dothanhhieu@utehy.edu.vn

Ngày tòa soạn nhận được bài báo: 19/09/2025

Ngày phản biện đánh giá và sửa chữa: 10/11/2025

Ngày bài báo được duyệt đăng: 19/12/2025

Tóm tắt:

Bài báo nghiên cứu thiết kế và mô phỏng hệ thống quang điện (PV) ba pha nổi lưới cấu trúc hai tầng với phần mềm MATLAB/Simulink. Trọng tâm của nghiên cứu là đánh giá hiệu năng thuật toán MPPT P&O kết hợp cùng kỹ thuật điều chế vector không gian (SVPWM). Kết quả mô phỏng dưới tác động của biến đổi bức xạ cho thấy thuật toán P&O phản hồi nhanh, điện áp DC-link được duy trì ổn định ở 800 V. Đặc biệt, cấu trúc điều khiển này tối ưu hóa chất lượng dòng điện hòa lưới với tổng độ méo hài (THD) dao động từ 1,89% đến 4,17%, đáp ứng nghiêm ngặt tiêu chuẩn IEEE Std. 519-2022. Nghiên cứu này khẳng định tính hiệu quả giữa sự kết hợp giữa P&O và SVPWM trong việc nâng cao độ tin cậy và hiệu suất cho các hệ thống PV công suất lớn.

Từ khóa: Hệ quang điện ba pha, Thuật toán P&O, Bộ nghịch lưu VSI, Điều chế SVPWM.

1. Đặt vấn đề

Trước xu thế chuyển dịch năng lượng, hệ thống quang điện (PV) nổi lưới ba pha đã trở thành giải pháp chiến lược nhờ khả năng cung cấp công suất lớn và ổn định. Tuy nhiên, do phụ thuộc vào điều kiện thời tiết bất định, hệ thống đòi hỏi sự kết hợp tối ưu giữa thuật toán MPPT và chiến lược điều khiển nghịch lưu. Bài toán trọng tâm hiện nay là đảm bảo hiệu suất trích xuất năng lượng đồng thời giữ chỉ số méo hài (THD) trong ngưỡng cho phép của lưới điện. Trong các hệ thống hai giai đoạn, phối hợp giữa bộ biến đổi DC-DC và bộ nghịch lưu ba pha là yếu tố cốt lõi. Cấu trúc này vừa giúp duy trì điện áp DC trung gian ổn định, vừa nâng cao chất lượng điện năng xoay chiều trước khi cung cấp cho hệ thống điện [1-3], [12].

Trong số các giải pháp MPPT, những phương pháp như P&O (Perturb & Observe), INC (Incremental Conductance), điều khiển mờ (FLC) và các thuật toán metaheuristic (PSO, ABC) đã được nghiên cứu sâu rộng. Theo nhận định của Jain (2018) và Saber (2022) [4], [5], mặc dù P&O sở hữu ưu điểm về cấu trúc tinh gọn cùng tốc độ hội tụ nhanh, song kỹ thuật này vẫn tồn tại một số hạn chế cố hữu là hiện tượng dao động công suất tại trạng thái xác lập và nguy cơ bám sai điểm công suất cực đại (MPP) khi cường độ bức xạ biến động đột ngột. Dù nhiều biến thể cải tiến đã được đề xuất nhằm khắc phục các nhược điểm trên, chúng thường dẫn đến sự gia tăng đáng kể về độ phức tạp trong tính toán cũng như đòi hỏi năng lực xử lý cao của hệ thống điều khiển.

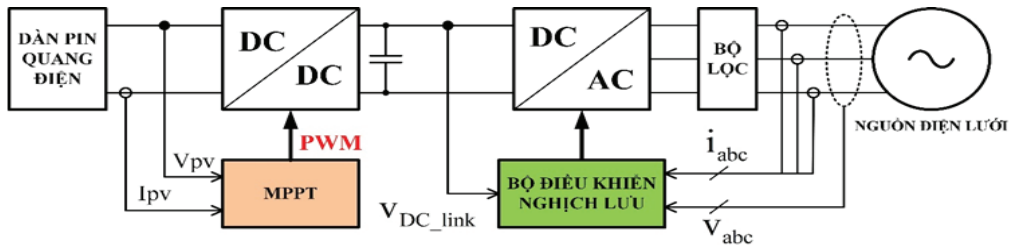
Tại tầng nghịch lưu, việc lựa chọn kỹ thuật điều chế là yếu tố then chốt quyết định hiệu suất chuyển đổi của toàn hệ thống. Nhiều nghiên cứu đã thực hiện phân tích so sánh giữa điều chế độ rộng xung hình sin (SPWM) và điều chế vector không gian (SVPWM). Các kết quả được công bố trong

[6]–[8] khẳng định SVPWM sở hữu những ưu điểm vượt trội, đặc biệt là khả năng tối ưu hóa biên độ điện áp DC-link (cao hơn khoảng 15%), giảm thiểu chỉ số THD và cải thiện đáng kể chất lượng dòng điện hòa lưới. Tuy nhiên, các công bố hiện nay thường tập trung vào bộ nghịch lưu hoặc chiến lược điều khiển dòng độc lập, mà chưa đặt trong bối cảnh một hệ thống PV hai giai đoạn hoàn chỉnh có tích hợp MPPT. Bên cạnh đó, khả năng duy trì ổn định điện áp DC trung gian dưới tác động của các kịch bản môi trường biến thiên vẫn chưa được khảo sát một cách toàn diện.

Mặc dù ưu thế của kỹ thuật SVPWM trong việc cải thiện chất lượng điện năng đã được ghi nhận tại [6]–[8], song các công bố này thường chỉ tập trung cục bộ vào tầng nghịch lưu hoặc phân tích các phương pháp điều chế thuần túy. Việc đặt các kỹ thuật này trong một cấu trúc hệ thống PV hai giai đoạn hoàn chỉnh có tích hợp MPPT vẫn chưa được xem xét đầy đủ. Đặc biệt, sự tương tác động giữa thuật toán P&O và chiến lược SVPWM nhằm duy trì ổn định điện áp DC trung gian, đồng thời đảm bảo các chỉ số hòa lưới dưới tác động của bức xạ biến thiên vẫn là khía cạnh cần được đánh giá hệ thống và toàn diện hơn.

Để giải quyết những hạn chế trên, bài báo xây dựng mô hình mô phỏng toàn diện hệ thống PV ba pha nổi lưới hai giai đoạn. Cấu hình đề xuất bao gồm: (i) bộ Boost DC-DC tích hợp thuật toán MPPT P&O nhằm tối ưu việc trích xuất năng lượng; và (ii) bộ nghịch lưu cầu ba pha triển khai chiến lược điều khiển dòng điện trên hệ tọa độ quay (dq) kết hợp vòng khóa pha (PLL) và kỹ thuật SVPWM.

Trọng tâm của nghiên cứu là thiết lập một cấu trúc thống nhất, cho phép đánh giá định lượng hiệu năng tổng thể: từ khả năng bám MPP, tính ổn định của điện áp DC trung gian đến chất lượng điện năng hòa lưới dưới các kịch bản bức xạ biến thiên. Khác



Hình 1. Sơ đồ khối hệ thống PV nối lưới nghiên cứu

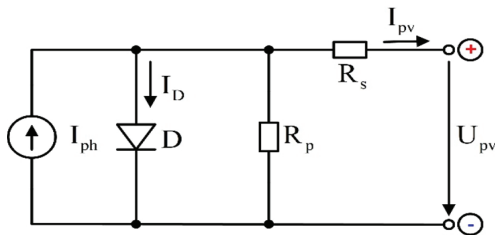
với những công bố trước đây [6]–[8], công trình này làm rõ cơ chế tương tác động giữa khâu MPPT và kỹ thuật SVPWM. Kết quả thu được cung cấp một mô hình tham chiếu chuẩn hóa, có giá trị thực tiễn cao cho việc tối ưu hóa và thiết kế các hệ thống PV nối lưới cấu trúc hai giai đoạn.

2. Mô tả hệ thống PV nối lưới nghiên cứu

Hệ thống PV nghiên cứu được thiết kế theo cấu hình hai tầng nhằm tối ưu hóa hiệu suất trích xuất năng lượng và chất lượng điện năng. Tại tầng tiên biên đổi, bộ Boost DC–DC tích hợp thuật toán MPPT giúp duy trì MPP. Tiếp đó, bộ nghịch lưu nguồn áp ba pha thực hiện nhiệm vụ chuyển đổi năng lượng và đồng bộ hóa với lưới điện. Tầng này vận hành dựa trên chiến lược điều khiển dòng trong hệ tọa độ quay dq tựa theo điện áp lưới, kết hợp vòng PLL và kỹ thuật SVPWM nhằm tối ưu đặc tính chuyển mạch cũng như giảm thiểu sóng hài. Sơ đồ tổng quát của hệ thống với công suất định mức 20 kW được minh họa chi tiết tại Hình 1.

2.1. Mô hình toán học và khảo sát đặc tuyến của tấm pin PV

Về mặt cấu tạo, pin PV gồm các tế bào quang điện từ vật liệu bán dẫn, được ghép nối tiếp và song song với nhau. Để phân tích đặc tính vận hành, hành vi điện động học của thiết bị này thường được mô hình hóa bởi sơ đồ mạch tương đương. Hình 2 thể hiện sơ đồ mạch điện tương đương của một tế bào PV [9].



Hình 2. Sơ đồ mạch điện tương đương của một tế bào PV

Dòng điện đầu ra của tế bào PV được xác định dựa trên biểu thức toán học sau:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \cdot \left\{ e^{\left[\frac{q(U_{pv} + I_{pv} \cdot R_s)}{A \cdot K \cdot T_c} \right]} - 1 \right\} - \frac{U_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_p} \quad (1)$$

Trong đó: I_{pv} và U_{pv} là dòng điện và điện áp đầu ra, I_{ph} là dòng quang điện; I_s là dòng điện bão hòa; K là hằng số Boltzmann bằng $1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$; q là

điện tích electron bằng $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; T_c là nhiệt độ ở lớp tiếp giáp với đơn vị tính là Kelvin.

Dòng điện I_{ph} phụ thuộc vào nhiệt độ T xung quanh tấm PV và cường độ chiếu sáng của mặt trời S . Nó được tính bởi công thức sau:

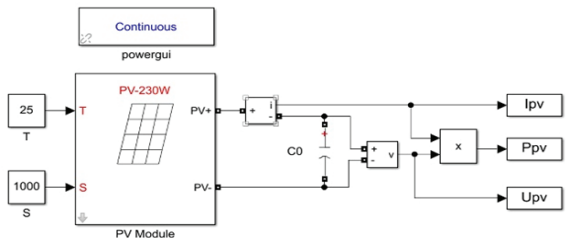
$$I_{ph} = [I_{sc} + K_1 \cdot (T - T_{ref})] \cdot \frac{S}{S_{ref}} \quad (2)$$

Với T_{ref} là nhiệt độ môi trường tiêu chuẩn bằng 25°C ; S_{ref} là cường độ chiếu sáng tiêu chuẩn bằng 1000 W/m^2 ; K_1 là hệ số nhiệt độ và I_{sc} là dòng điện ngắn mạch.

Vì giá trị điện trở R_s rất nhỏ và ngược lại điện trở R_p giá trị tương đối lớn, do đó I_{pv} có thể được xấp xỉ như sau:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \cdot \left\{ e^{\left[\frac{q(U_{pv} + I_{pv} \cdot R_s)}{A \cdot K \cdot T_c} \right]} - 1 \right\} \quad (3)$$

Dựa trên các hệ thức toán học từ (1) đến (3), mô hình mô phỏng tấm PV công suất 230 W đã được thiết lập trong môi trường Matlab/Simulink, như minh họa tại Hình 3.



Hình 3. Mô hình khảo sát đặc tuyến của tấm PV

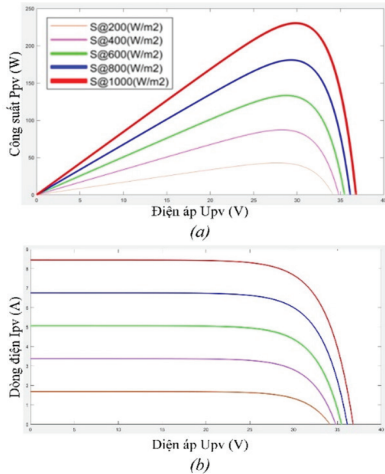
Bảng 1 cung cấp các thông số kỹ thuật của tấm PV mã hiệu RS-P630-230.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của tấm pin mã hiệu RS-P630-230

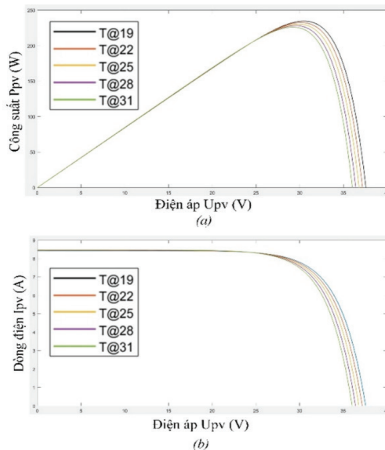
Thông số	Giá trị
Điện áp cực đại	29,6 V
Điện áp hở mạch	37,02 V
Dòng điện ngắn mạch	8,34 A
Dòng điện cực đại	7,79 A
Công suất cực đại	230 W
Hiệu suất của mô đun	14,17
Hệ số α	0,0004 $\text{A}/^\circ\text{C}$
Hệ số β	0,09
Hệ số γ	-0,0035
Màng cell	6 x 10

Hình 4 và Hình 5 lần lượt thể hiện các đặc tuyến của tấm pin PV mã hiệu RS-P630-230 trong hai trường hợp: khi $T = 25^\circ\text{C}$ và S thay đổi, và khi $S = 1000 \text{ W/m}^2$ và T thay đổi. Từ các các đặc tuyến này, có thể rút ra rằng:

- Khi S thay đổi thì công suất của tấm PV cũng thay đổi theo.
- Dòng điện ngõ ra của tấm PV thay đổi gần như tỷ lệ thuận với S .



Hình 4. Họ đặc tuyến tấm PV khi S thay đổi và nhiệt độ T bằng 25°C
(a) Đặc tuyến P-V; (b) Đặc tuyến I-V

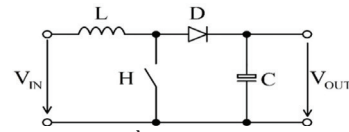


Hình 5. Họ đặc tuyến tấm PV khi T thay đổi và S bằng 1000 W/m^2
a. Đặc tuyến P-V b. Đặc tuyến I-V

2.2. Mạch biến đổi Boost DC-DC

Bộ Boost DC-DC đóng vai trò tăng trung gian, đảm nhận nhiệm vụ bám điểm MPP và nâng điện áp DC lên ngưỡng phù hợp cho tầng phía sau. Cấu trúc mạch gồm các thành phần cơ bản: cuộn cảm L , khóa chuyển mạch H , diode D và tụ lọc đầu ra C_{out} . Tại đây, thuật toán MPPT được tiến hành thông qua điều chỉnh tỉ số chu kỳ D để điều khiển khóa bán dẫn. Quá trình này giúp tối ưu hóa công suất trích xuất từ giàn pin PV trước khi truyền tải đến tầng biến đổi thứ hai. Hình 6 trình bày sơ đồ

nguyên lý chi tiết của mạch Boost.



Hình 6. Sơ đồ mạch Boost DC-DC.

Theo [10], ở chế độ dẫn liên tục (CCM), giữa điện áp ngõ ra V_{OUT} và ngõ V_{IN} của bộ Boost DC-DC có quan hệ được xác định bởi biểu thức:

$$V_{OUT} = (1 - D) \cdot V_{IN} \quad (4)$$

Trong đó: $D = T_{on}/T$ là tỉ số chu kỳ.

Cuộn cảm L đảm nhận vai trò lưu trữ năng lượng và hạn chế độ gợn dòng điện ngõ vào. Để đảm bảo bộ Boost vận hành ở chế độ CCM, giá trị điện cảm được xác định theo biểu thức [14]:

$$L = \frac{V_{IN} \cdot (V_{OUT} - V_{IN})}{\Delta I_L \cdot f_{sw} \cdot V_{OUT}} \quad (5)$$

Trong đó: ΔI_L là độ gợn dòng điện của cuộn cảm theo yêu cầu thiết kế; f_{sw} là tần số đóng cắt của bộ biến đổi.

Dựa trên giới hạn độ gợn sóng của điện áp đầu ra ΔV_{OUT} , giá trị điện dung của tụ lọc được tính như sau:

$$C = \frac{I_{OUT} \cdot D}{f_{sw} \cdot \Delta V_{OUT}} \quad (6)$$

2.3. Mạch nghịch lưu ba pha

Trong các hệ thống PV nối lưới quy mô vừa và nhỏ, bộ nghịch lưu nguồn áp ba pha là cấu hình phổ biến nhờ sự vận hành linh hoạt. Khâu này đảm nhận nhiệm vụ biến đổi năng lượng từ điện áp DC-link thành điện áp xoay chiều ba pha đồng bộ với lưới điện. Bằng cách kiểm soát dòng điện và công suất bơm lên lưới, bộ nghịch lưu giúp ổn định chất lượng điện năng. Nghiên cứu này triển khai chiến lược điều khiển dòng trên hệ tọa độ quay dq tựa theo vector điện áp lưới, kết hợp với PLL để đạt được sự đồng bộ hóa chính xác.

Sở với kỹ thuật SPWM truyền thống thường có hàm lượng sóng hài cao và hiệu suất sử dụng điện áp DC thấp, kỹ thuật SVPWM được áp dụng như là giải pháp tối ưu. SVPWM không chỉ tạo ra điện áp ngõ ra tiệm cận sin chuẩn mà còn giảm thiểu tổn hao chuyển mạch và cải thiện đáp ứng động. Việc tích hợp SVPWM vào cấu trúc điều khiển dòng điện cho phép hệ thống duy trì quá trình phát công suất ổn định với chất lượng điện năng cao.

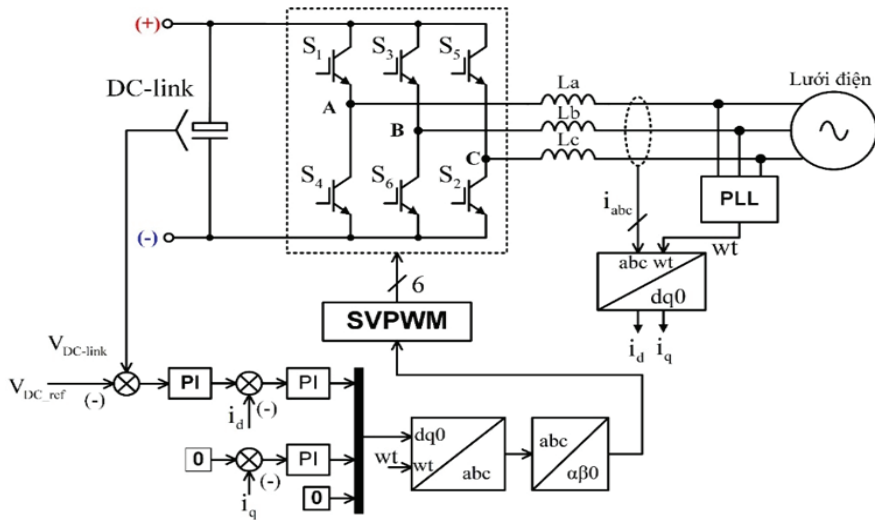
Cấu trúc chi tiết của bộ nghịch lưu ba pha dựa trên kỹ thuật SVPWM được minh họa tại Hình 7.

3. Các thuật toán điều khiển trong hệ thống

3.1. Thuật toán điều khiển bám MPP

Trong số các phương pháp MPPT, thuật toán P&O được sử dụng rộng rãi nhờ cấu trúc đơn giản và khả năng triển khai linh hoạt. Nguyên lý cốt lõi của thuật toán dựa trên việc quan sát sự biến thiên công suất ΔP theo sự thay đổi điện áp ΔV để xác định hướng điều chỉnh, nhằm đưa điểm vận hành của giàn pin về MPP.

Hình 8 trình bày lưu đồ của thuật toán P&O.



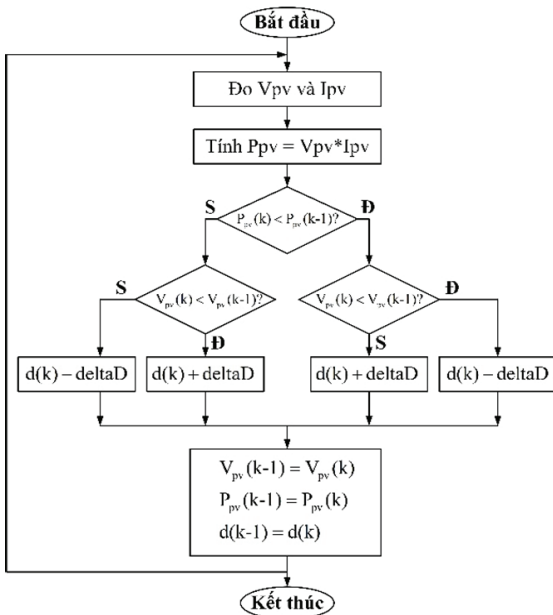
Hình 7. Sơ đồ cấu trúc của hệ thống nghịch lưu ba pha nối lưới sử dụng thuật toán điều chế SVPWM

Dựa vào việc phân tích hướng thay đổi công suất, thuật toán sẽ thiết lập tín hiệu điều khiển phù hợp để hiệu chỉnh tỉ số chu kỳ D, đảm bảo hệ thống luôn khai thác tối đa công suất từ nguồn PV.

nghĩa như sau:

- Nếu $S_x = 1$, khoá trên đóng và khoá dưới ngắt.
- Nếu $S_x = 0$, khoá trên ngắt và khoá dưới đóng.

Tám vectơ không gian được trình bày ở Bảng 2.

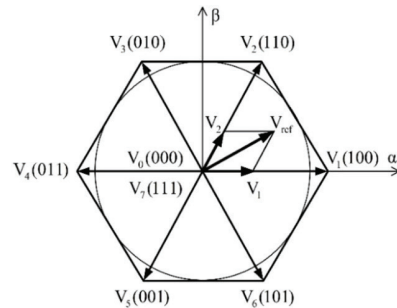


Hình 8. Lưu đồ thuật toán bám điểm P&O

3.2. Cơ sở lý thuyết về SVPWM

Trong kỹ thuật SVPWM, vectơ điện áp tham chiếu V_{ref} trên hệ trục tọa độ $\alpha-\beta$ được tổng hợp từ các vectơ không gian đặc trưng. Ứng với tám trạng thái đóng cắt, có tám vectơ điện áp cơ bản được thiết lập trong không gian vectơ. Như trên Hình 9, trong số tám trạng thái chuyển mạch, sáu trạng thái tạo ra các vector hoạt động (V_1 đến V_6) có cùng độ lớn bằng $\frac{2}{3}V_{DC}$ và cách nhau 60° trong không gian vectơ. Hai trạng thái còn lại tạo ra các vector Zero (V_0 và V_7) có độ lớn bằng không.

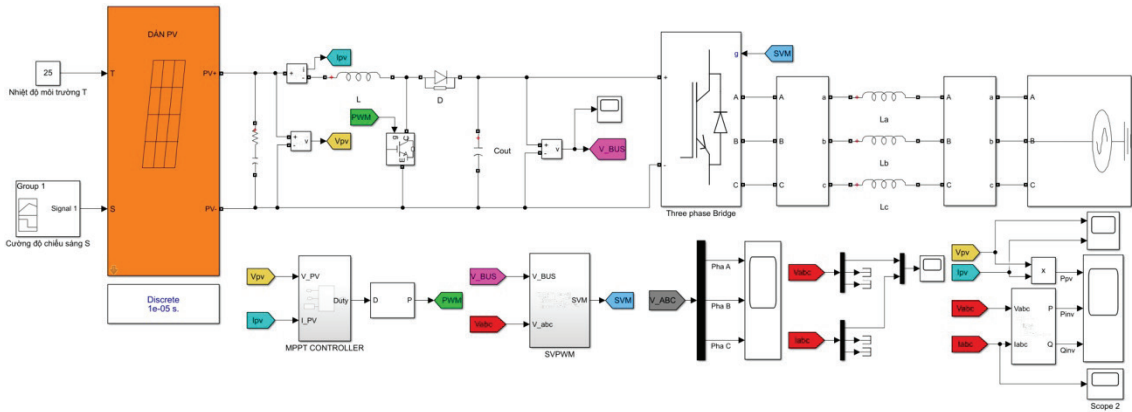
Hàm chuyển mạch S_x ($x = a, b, c$) được định



Hình 9. Biểu diễn vectơ không gian của điện áp Bảng 2. Trạng thái chuyển mạch SVPWM của nghịch lưu nguồn áp ba pha

Vecto	S_a	S_b	S_c	V_a	V_b	V_c
V_0	0	0	0	0	0	0
V_1	1	0	0	$\frac{2}{3}V_{dc}$	$-\frac{1}{3}V_{dc}$	$-\frac{1}{3}V_{dc}$
V_2	1	1	0	$\frac{1}{3}V_{dc}$	$\frac{1}{3}V_{dc}$	$-\frac{2}{3}V_{dc}$
V_3	0	1	0	$-\frac{1}{3}V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	$-\frac{1}{3}V_{dc}$
V_4	0	1	1	$-\frac{2}{3}V_{dc}$	$\frac{1}{3}V_{dc}$	$\frac{1}{3}V_{dc}$
V_5	0	0	1	$-\frac{1}{3}V_{dc}$	$-\frac{1}{3}V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$
V_6	1	0	1	$\frac{1}{3}V_{dc}$	$-\frac{2}{3}V_{dc}$	$\frac{1}{3}V_{dc}$
V_7	1	1	1	0	0	0

Nguyên lý của SVPWM là xấp xỉ V_{ref} bằng cách xác định thời gian duy trì (T_1, T_2, T_0) cần thiết để kích hoạt các vector cơ bản của bộ nghịch lưu.



Hình 10. Mô hình mô phỏng hệ thống với phần mềm Matlab/Simulink

Đầu tiên V_{ref} được tính toán và xác định vị trí ở một trong sáu khu vực. Sau đó, các khoảng thời gian duy trì của hai vector hoạt động liên kế (V_a, V_b) và vector Zero được tính toán dựa trên độ lớn và góc pha của V_{ref} theo công thức tổng hợp vector sau:

$$V_{ref} \cdot T_s = V_a \cdot T_1 + V_b \cdot T_2 + V_{Zero} \cdot T_0 \quad (7)$$

với $T_s = T_1 + T_2 + T_0$.

Cuối cùng các thời gian T_1, T_2 và T_0 được sắp xếp thành một trình tự chuyển mạch đối xứng trong chu kỳ chuyển mạch T_s đảm bảo giảm thiểu tổn hao và duy trì cân bằng điện áp.

4. Mô phỏng và thảo luận

Mô hình hệ thống quang điện ba pha nối lưới được thiết lập trên nền tảng MATLAB/Simulink, tích hợp thuật toán MPPT P&O và kỹ thuật điều chế SVPWM như minh họa tại Hình 10. Hệ thống vận hành với bộ nghịch lưu công suất định mức 20 kW, kết nối với giàn pin PV gồm 98 tấm RS-P630-230. Để đáp ứng các yêu cầu về điện áp và công suất ngõ ra, các tấm pin được cấu hình thành 7 dãy song song, mỗi dãy gồm 14 mô-đun nối tiếp. Bảng 3 trình bày các thông số kỹ thuật chi tiết của hệ thống.

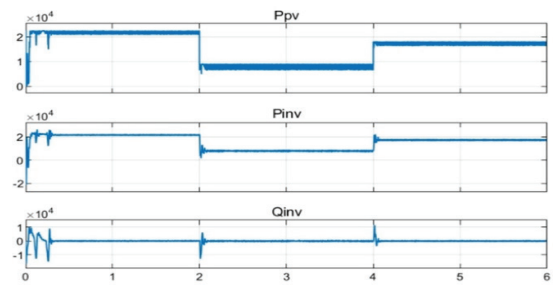
Bảng 3. Các thông số mô phỏng hệ thống

Thông số	Giá trị
Dàn PV	$P_{mpp} = 22540W$
	$V_{oc} = 518,28V; I_{sc} = 58,38A$
	$V_{mpp} = 414,4V; I_{mpp} = 54,53A$
Khối Boost	$L_{boost} = 4,1mH; C_{out} = 330\mu F$
	$f_{sw} = 5 kHz$
Thuật toán P&O	$\Delta D = 0,0002$
Khối phát xung cho nghịch lưu	$V_{dc,ref} = 800V$
	$K_{pv} = 0,11; K_{tv} = 85$
	$K_{pi,d} = 0,005; K_{li,d} = 1$
	$K_{pi,q} = 0,01; K_{li,q} = 1$
Bộ lọc	$L_a = L_b = L_c = 0,0172 mH$
Thông số lưới điện	$V_{p-p} = 380V_{rms}; f = 50Hz$

Để đánh giá hiệu suất vận hành và đặc tính đáp ứng động của bộ biến đổi, một kịch bản mô phỏng với sự thay đổi đột ngột của điều kiện môi trường đã được thiết lập. Nhiệt độ luôn được duy trì tại 25°C, trong khi cường độ bức xạ S được điều chỉnh theo ba giai đoạn:

- ❖ 0 – 2 s: Bức xạ đạt mức tiêu chuẩn 1000 W/m²;
- ❖ 2 – 4 s: Bức xạ giảm đột ngột xuống 500 W/m²;
- ❖ 4 – 6 s: Bức xạ tăng và ổn định ở mức 800 W/m².

4.1. Kết quả mô phỏng ở tầng thứ nhất



Hình 11. Đặc tính công suất giàn pin PV và ngõ ra bộ nghịch lưu.

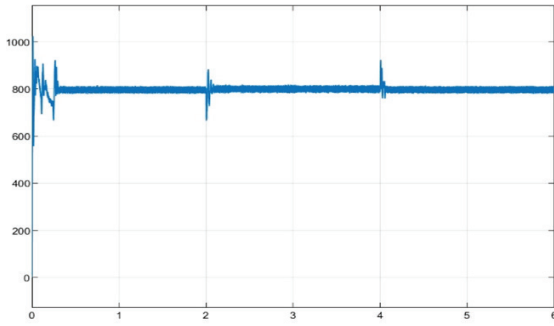
Bảng 4. Bảng kết quả tổng hợp của thuật toán MPPT với trường hợp S thay đổi

S (W/m ²)	MPP của dàn PV (W)	Công suất dao động (W)	Điểm MPP (W)
1000	22562,93	954	22508
800	17735,16	1156	17706
400	8537,76	1255	8501

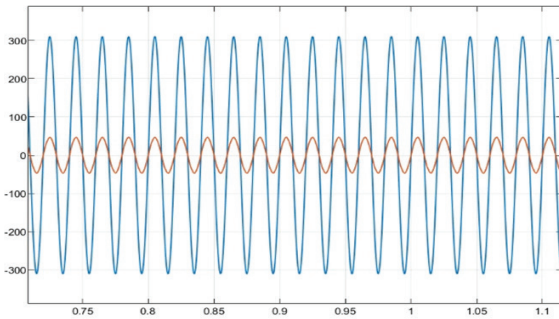
Hình 11 là kết quả đặc tính công suất, bao gồm công suất trích xuất từ giàn pin P_{pv} , công suất phản kháng Q_{inv} và tác dụng P_{inv} tại ngõ ra bộ nghịch lưu. Nhằm để đánh giá độ tin cậy của hệ thống, Bảng 4 đối chiếu kết quả tính toán lý thuyết với các giá trị mô phỏng. Từ kết quả có thể kết luận rằng hệ thống làm việc ổn định, công suất tác dụng bám sát điểm MPP bất chấp sự biến đổi đột ngột của bức xạ tại các thời điểm 2 s và 4 s. Đặc biệt, Q_{inv} được duy trì xấp xỉ bằng 0, khẳng định khả năng điều khiển hệ số công suất lý tưởng của chiến lược dq kết hợp SVPWM. Những dữ liệu này minh chứng cho hiệu

suất chuyển đổi cao và đặc tính đáp ứng động nhanh chóng của toàn hệ thống.

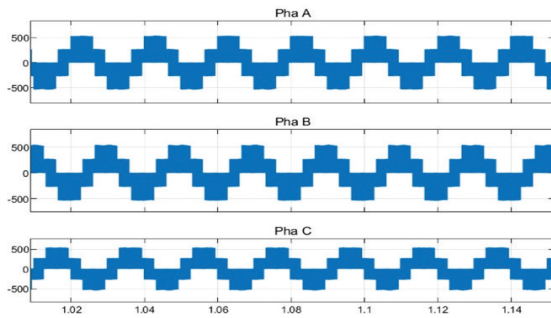
4.2. Kết quả mô phỏng ở tầng thứ hai



Hình 12. Dạng sóng điện áp DC-link



Hình 13. Dạng sóng dòng điện và điện áp ngõ ra pha A



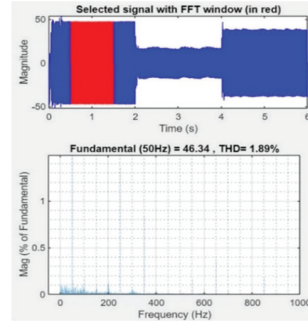
Hình 14. Dạng sóng điện áp pha của ba pha

Đặc tính điện áp trên bus DC trung gian được minh họa tại Hình 12. Kết quả cho thấy giá trị điện áp DC-link luôn duy trì ổn định quanh giá trị đặt 800 V với biên độ dao động nhỏ (trong khoảng 785 – 815 V). Tại các thời điểm bức xạ biến đổi đột ngột, hệ thống thể hiện khả năng đáp ứng động nhanh chóng phục hồi và xác lập lại trạng thái ổn định chỉ sau khoảng 0,05 s. Thời gian quá độ ngắn này khẳng định tính hiệu quả giữa sự phối hợp giữa thuật toán MPPT và khâu điều khiển điện áp bus DC, giúp duy trì cân bằng năng lượng tối ưu giữa hai tầng biến đổi.

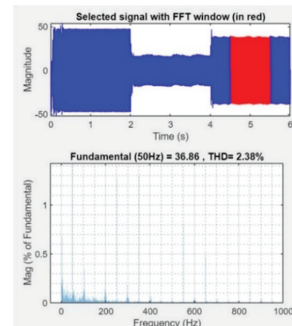
Trong Hình 11, khi cường độ chiếu sáng S đạt 1000W/m² thì công suất P_{inv} đo được là 22450W và Q_{inv} đo được là 450VAR. Kết quả này cho thấy năng lượng phát lên lưới chủ yếu là công suất hữu công. Đồng thời, dạng sóng điện áp và dòng điện pha A tại Hình 13 thể hiện sự đồng nhất hoàn toàn về pha,

khẳng định hệ thống vận hành với hệ số công suất lý tưởng.

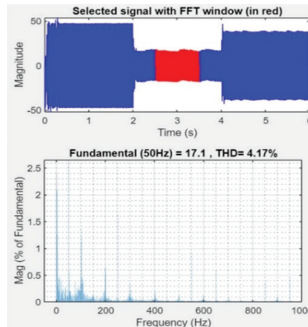
Điện áp đầu ra ở các pha A, B và C gồm năm mức điện áp: $\frac{2}{3}V_{dc}$, $\frac{1}{3}V_{dc}$, 0, $-\frac{1}{3}V_{dc}$ và $-\frac{2}{3}V_{dc}$, như trình bày trên Hình 14.



Hình 15. Dạng sóng dòng điện ngõ ra nghịch lưu và kết quả phân tích THD khi S = 1000W/m²



Hình 16. Dạng sóng dòng điện ngõ ra nghịch lưu và kết quả phân tích THD khi S = 800W/m²



Hình 17. Dạng sóng dòng điện ngõ ra nghịch lưu và kết quả phân tích THD khi S = 400W/m²

Dạng sóng dòng điện ngõ ra và kết quả phân tích phổ hài bậc cao tại các mức bức xạ 1000 W/m², 800 W/m² và 400 W/m² được minh họa lần lượt từ Hình 15 đến Hình 17.

Từ kết quả có thể thấy rằng khi S giảm, công suất phát và biên độ dòng điện hòa lưới có xu hướng giảm tương ứng. Khi thành phần cơ bản suy giảm trong khi các hài bậc cao từ quá trình đóng cắt ít biến đổi, tỉ lệ THD có xu hướng gia tăng. Cụ thể, giá trị THD được ghi nhận tăng dần từ 1,89%, 2,38% đến 4,17% tỉ lệ thuận với mức sụt giảm của bức xạ. Dù vậy, các chỉ số này vẫn thấp hơn giới hạn 5%, đáp ứng nghiêm ngặt tiêu chuẩn IEEE Std. 519-2022 về chất lượng điện năng.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng thành công mô hình mô phỏng hệ thống PV ba pha nối lưới với cấu trúc biến đổi hai tầng và kỹ thuật điều chế SVPWM. Kết quả cho thấy thuật toán P&O bám sát MPP và duy trì điện áp DC-link ổn định tại giá trị đặt 800 V, bất chấp sự biến thiên của bức xạ mặt trời. Việc ứng dụng kỹ thuật SVPWM kết hợp điều khiển dòng điện không chỉ cải thiện chất lượng điện năng với chỉ số THD luôn dưới 5%, mà còn đáp ứng nghiêm ngặt tiêu chuẩn IEEE Std. 519. Sự phối hợp giữa

thuật toán P&O và chiến lược điều chế SVPWM đã tối ưu hóa công suất chuyển đổi, đồng thời đảm bảo sự ổn định cung cấp điện của hệ thống PV nối lưới.

Cam kết về mâu thuẫn lợi ích

Các tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên trong đề tài mã số: UTEHY.L.2025.

Tài liệu tham khảo

- [1] R. Mechouma, B. Azoui, and M. Chaabane, "Three-phase grid connected inverter for photovoltaic systems, a review," in *Proc. 1st Int. Conf. Renew. Energies Veh. Technol.*, Nabeul, Tunisia, 2012, pp. 37–42.
- [2] A. Shawky, M. E. Ahmed, and M. Orabi, "Performance analysis of isolated DC-DC converters utilized in Three-phase differential inverter," in *Proc. 18th Int. Middle East Power Syst. Conf. (MEPCON)*, Cairo, Egypt, 2016, pp. 821–826.
- [3] B. Rooholahi, "A New Two-Stage Single-Phase Transformerless Inverter Topology with a Novel DC/DC High Gain Boost Converter and a Three-Level Neutral-Point-Clamped Inverter for Photovoltaic Systems," in *Proc. 23rd Eur. Conf. Power Electron. Appl. (EPE'21 ECCE Europe)*, Ghent, Belgium, 2021, pp. 1–9.
- [4] K. Jain, M. Gupta, and A. K. Bohre, "Implementation and Comparative Analysis of P&O and INC MPPT Method for PV System," in *Proc. 8th IEEE India Int. Conf. Power Electron. (IICPE)*, Jaipur, India, 2018, pp. 1–6.
- [5] H. Saber, A. E. Bendaouad, L. Rahmani, and H. Radjeai, "A comparative study of the FLC, INC and P&O methods of the MPPT algorithm for a PV system," in *Proc. 19th Int. Multi-Conf. Syst. Signals Devices (SSD)*, Sétif, Algeria, 2022, pp. 2010–2015.
- [6] H. Zhang et al., "Three-phase grid-connected photovoltaic system with SVPWM current controller," in *Proc. 6th Int. Power Electron. Motion Control Conf.*, Wuhan, China, 2009, pp. 2161–2164.
- [7] S. A. Lakshmanan, B. S. Rajpourhit, and A. Jain, "Modeling and analysis of 3-phase VSI using SPWM technique for grid connected solar PV system," in *Proc. IEEE Students' Conf. Electr. Electron. Comput. Sci.*, Bhopal, India, 2014, pp. 1–6.
- [8] S. Umashankar, V. K. A. Shankar, G. Jain, and M. L. Kolhe, "Comparative evaluation of pulse width modulation techniques on effective DC link voltage utilization of grid connected inverter," in *Proc. Int. Conf. Electr. Electron. Optim. Tech. (ICEEOT)*, Chennai, India, 2016, pp. 2376–2383.
- [9] M. Dabboussi, A. Hmidet, and O. Boubaker, "An efficient Fuzzy Logic MPPT Control Approach for Solar PV System: A Comparative Analysis with the Conventional Perturb and Observe Technique," in *Proc. 6th IEEE Int. Energy Conf. (ENERGYCON)*, Gammarth, Tunisia, 2020, pp. 366–371.
- [10] M. Kumar, G. Panda, and D. V. S. K. R. K., "Analysis of Conventional and Interleaved Boost Converter with Solar Photovoltaic System," in *Proc. Int. Conf. Intell. Controller Comput. Smart Power (ICICCCSP)*, Hyderabad, India, 2022, pp. 1–6.
- [11] Texas Instruments, "Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage," Application Report SLVA372D, 2022. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/an/slva372d/slva372d.pdf>
- [12] M. W. Lotfy, S. M. Dabour, R. M. Mostafa, D. J. Almakhles, and M. F. Elmorshedy, "Modeling and Control of a Voltage-Lift Cell Split-Source Inverter With MPPT for Photovoltaic Systems," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 54699–54712, 2023.

SIMULATION STUDY OF A THREE-PHASE GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEM USING SVPWM TECHNIQUE FOR THE INVERTER

Abstract:

This paper presents the design and simulation of a two-stage grid-connected three-phase photovoltaic (PV) system using the MATLAB/Simulink platform. The research focuses on evaluating the performance of the Perturb and Observe (P&O) MPPT algorithm integrated with Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM). Simulation results under varying irradiance conditions demonstrate that the P&O algorithm provides a fast dynamic response while maintaining a stable DC-link voltage at 800 V. Furthermore, the proposed control scheme optimizes the quality of the grid-injected current, achieving a Total Harmonic Distortion (THD) range of 1.89% to 4.17%, which strictly complies with the IEEE Std. 519-2022 requirements. The study confirms that the synergy between P&O and SVPWM effectively enhances the efficiency and reliability of high-power PV systems.

Keywords: Three-phase PV system, P&O algorithm, Three-phase VSI, SVPWM technique.