

THIẾT KẾ BỘ BIẾN ĐỔI BUCK-BOOST NHIỀU PHA CHO PIN MẶT TRỜI SỬ DỤNG THUẬT TOÁN MPPT DESIGN OF A MULTI-PHASE BUCK-BOOST CONVERTER FOR SOLAR PANELS USING MPPT ALGORITHM

VŨ NGỌC MINH*, PHẠM THỊ HỒNG ANH

Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: minhvn.ddt@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.1098>

Tóm tắt

Bài báo này trình bày phân tích và thiết kế bộ biến đổi buck-boost nhiều pha sử dụng thuật toán theo dõi điểm công suất tối đa (MPPT) cho hệ thống pin mặt trời (PV). Bộ biến đổi 3 pha, mỗi pha 2kW, dải điện áp vào từ 200 đến 450V. Thuật toán MPPT được mô hình hóa và mô phỏng bằng phần mềm PSIM. Thiết kế bắt đầu bằng việc xác định điểm làm việc của hệ thống bằng cách thiết lập mối quan hệ giữa đầu vào, đầu ra và tỷ số điều biến của bộ chuyển đổi, từ đó xác định cơ chế theo dõi công suất tối đa dưới các nhiễu loạn hệ thống như sự thay đổi bức xạ mặt trời. Để đạt được hiệu suất tối ưu, thuật toán nhiễu loạn và quan sát (P&O) được áp dụng để theo dõi điểm công suất tối đa, kết hợp với phương pháp điều biến PWM tạo ra tín hiệu điều khiển cho các van IGBT.

Từ khóa: Pin mặt trời, bộ biến đổi Buck-boost.

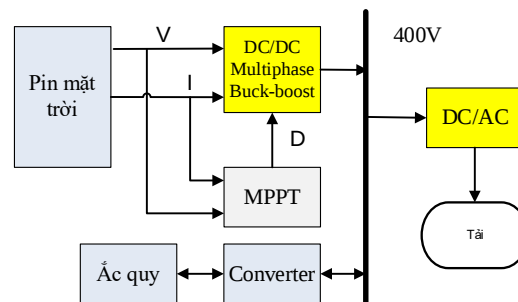
Abstract

This paper presents the analysis and design of a multiphase buck-boost converter using the Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm for a solar (PV) system. The converter is a 3-phase, 2kW per phase with an input voltage range of 300V to 450V. The MPPT algorithm is modeled and simulated using PSIM software. The design process begins by determining the system's operating point by establishing the relationship between the input, output, and modulation ratio of the converter, thereby determining the mechanism for tracking maximum power under disturbances affecting the system, such as changes in solar radiation. To achieve optimal efficiency, the perturbation and observation (P&O) algorithm is applied to track the maximum power point, combined with PWM modulation to generate control signals for the IGBTs.

Keywords: Solar PV, Buck-boost converter.

1. Đặt vấn đề

Ngày nay pin mặt trời có chi phí thấp, lắp đặt đơn giản, được ứng dụng nhiều để triển khai điện mái nhà. Các hộ gia đình thường lắp đặt bộ pin mặt trời với công suất 3kW-20kW, được ghép từ các tấm pin 100W-500W. Điện một chiều từ pin mặt trời được biến đổi để nạp cho ắc quy hoặc biến đổi thành điện xoay chiều. Hình 1 trình bày cấu trúc cơ bản của hệ thống biến đổi năng lượng pin mặt trời [1].



Hình 1. Cấu trúc hệ thống pin mặt trời

Đối với pin mặt trời, cường độ ánh sáng chiếu vào pin thay đổi theo thời gian trong ngày và điều kiện thời tiết. Sự không ổn định về cường độ ánh sáng này dẫn đến sự thay đổi điện áp đầu ra của các tấm pin mặt trời. Vì vậy, cấu trúc hệ thống biến đổi năng lượng dùng cho pin mặt trời thường gồm 2 khâu biến đổi chính. Khâu băm xung DC-DC tạo ra điện áp một chiều ổn định V_o khoảng 400V. Khâu nghịch lưu DC-AC tạo ra điện xoay chiều ổn định tần số và điện áp cấp cho phụ tải hoặc nối lưới. Ngoài ra, có thể tích hợp thêm ắc quy đi kèm với bộ biến đổi Converter hai chiều cho quá trình nạp/xả điện ắc quy.

Để nâng công suất ra và tối ưu về chi phí, các tấm pin mặt trời được ghép song song và/hoặc nối tiếp thành các bộ pin. Điện áp pin mặt trời sinh ra trong ngày biến đổi theo cả hai hướng lớn hơn hoặc nhỏ hơn

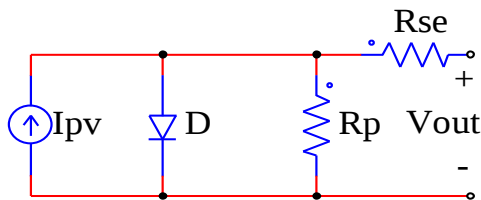
V_o [2]. Bên cạnh đó, khi các tấm pin mắc song song bị suy hao không đều theo thời gian hoặc khi thay thế pin hỏng bằng các tấm pin mới sẽ hình thành hiện tượng chênh lệch điện áp giữa các tấm pin. Dòng quân chảy trong các bộ pin mắc song song vừa làm giảm hiệu suất pin mặt trời vừa làm nóng và giảm tuổi thọ của các tấm pin [6].

Trong bài báo này, tác giả thiết kế bộ biến đổi nhiều pha buck-boost cho khâu DC-DC trong hệ thống điện mặt trời. Bộ biến đổi này vừa có khả năng thiết lập điện áp ra cao hơn hoặc thấp hơn điện áp đầu vào giúp chúng ta duy trì điện áp đầu ra mong muốn, đồng thời nó có thể sử dụng cho nhiều nhánh pin mặt trời mắc song song để tăng hiệu suất biến đổi của pin mặt trời. Cấu trúc điều khiển PWM kết hợp với bộ điều khiển MPPT giữ ổn định và nâng cao chất lượng công suất điện được sinh ra là mục tiêu chính của thiết kế này.

2. Thiết kế bộ biến đổi

2.1. Mô hình pin mặt trời

Năng lượng bức xạ mặt trời được biến đổi thành điện năng nhờ hiệu ứng quang điện trên pin mặt trời. Cường độ ánh sáng, nhiệt độ và trạng thái làm việc của pin ảnh hưởng trực tiếp đến sự chuyển hóa quang năng thành điện năng. Hình 2 trình bày mạch tương đương của một tấm pin mặt trời. Mạch có một nguồn dòng quang điện I_{pv} . Diode D và điện trở song song R_p được mắc song song với nguồn dòng. Mạch cũng có một điện trở nối tiếp R_{se} [2].



Hình 2. Sơ đồ tương đương của pin mặt trời

Dòng điện đầu ra của pin mặt trời:

$$I = I_{pv} - I_d - I_{rd} \quad (1)$$

Dòng điện nội tại do pin mặt trời sinh ra:

$$I_{pv} = I_{sc} + (T_c - T_r)G \quad (2)$$

Biểu thức xác định dòng điện của diode nội:

$$I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{q}{nkT_c N_s} + I R_{se}\right) V - 1 \right) \quad (3)$$

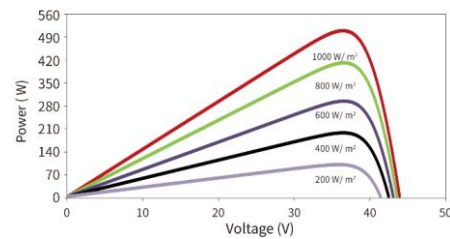
Trong đó, I_{sc} là dòng điện ngắn mạch ở 25°C và 1kW/m^2 , K là hệ số nhiệt độ của pin mặt trời, T_c và T_r lần lượt là nhiệt độ của pin và nhiệt độ tham chiếu của pin. I_s là dòng điện bão hòa của diode, k là hằng số Boltzmann [$1,38 \times 10^{-23} \text{J/K}$], điện tích electron được ký

hiệu là q [$1,60 \times 10^{-19} \text{C}$], và n là hệ số lý tưởng của diode. Hệ số lý tưởng của diode được ký hiệu là ' n ' tùy thuộc vào công nghệ được sử dụng.

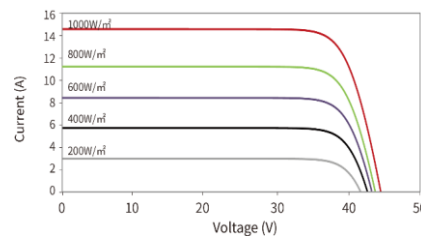
Chọn module Jinko Solar có các thông số kỹ thuật trong Bảng 1 [3]. Biểu đồ đường đặc tuyến I-V, P-V như thể hiện ở Hình 3, Hình 4.

Bảng 1. Thông số Jinko Solar 475-500W

Công suất cực đại (Pmax)	500 W
Điện áp tại Pmax (Vmpp)	36.79 V
Dòng tại Pmax (Impp)	13.59 A
Điện áp hở mạch (Voc)	44.21 V
Dòng ngắn mạch (Isc)	14.17 A



Hình 3. Đường đặc tính P-V



Hình 4. Đường đặc tính I-V

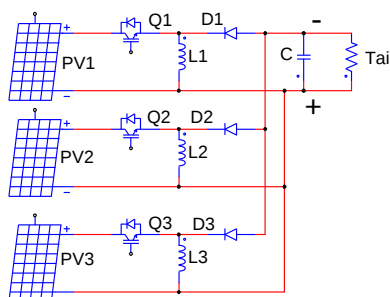
2.2. Cấu trúc bộ biến đổi buck-boost nhiều pha

Cấu trúc bộ biến đổi buck-boost nhiều pha được trình bày trên Hình 5. Tác giả thiết kế ba bộ pin mặt trời được nối với ba mạch buck-boost đảo pha đầu chung tải đầu ra. Các van $Q1$, $Q2$, $Q3$ điều khiển theo phương pháp PWM với cùng một bộ tạo tần số điều biến và góc pha ban đầu lệch nhau 120° . Tín hiệu điều biến cho ba pha được trình bày trên Hình 6.

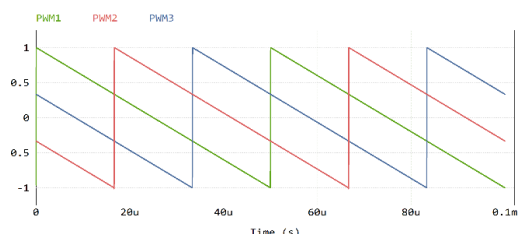
Xem xét pha đầu tiên chuyển đổi buck-boost bao gồm van công suất $Q1$, cuộn cảm $L1$, diode $D1$, tụ lọc C và điện trở tải RL . Van $Q1$ được điều khiển dẫn/khóa theo tần số chuyển mạch $f_c = 1/T$ với tỷ số điều biến (D) = ton/T , trong đó ton là khoảng thời gian van $Q1$ dẫn. Hình 7. thể hiện mạch tương đương của bộ chuyển đổi buck-boost cho chế độ dẫn liên tục, khi $Q1$ dẫn, diode tắt, và khi $Q1$ khóa thì diode dẫn.

Trong khoảng thời gian $0 < t \leq DT$, $Q1$ dẫn và diode tắt, như được chỉ ra trong Hình 7a. Điện áp của diode là $-(V_i + V_o)$ và điều này giữ cho diode tắt. Điện áp

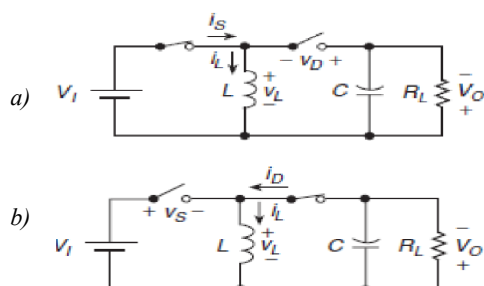
cuộn cảm là V_i và làm tăng dòng điện cuộn cảm một cách tuyến tính với độ dốc là V_i/L . Trong khoảng thời gian $DT < t \leq T$, van $Q1$ tắt và diode bật, mạch điện tương đương như Hình 7b. Điện áp cuộn cảm là $-V_o$ và làm cho dòng điện cuộn cảm giảm tuyến tính với độ dốc là $-V_o/L$. Điện áp trên $Q1$ là $V_i + V_o$. Khi $t = T$, van $Q1$ dẫn và một chu kỳ mới bắt đầu.



Hình 5. Cấu trúc bộ biến đổi buck-boost ba pha vào



Hình 6. Tín hiệu điều chế PWM ba kênh



Hình 7. Mạch điện tương đương của một pha chế độ dẫn liên tục

Hai pha còn lại có nguyên lý hoạt động tương tự, nhưng điểm khởi đầu chu kỳ điều biến lần lượt lệch so với pha ban đầu một khoảng thời gian là $T/3$, $2T/3$.

Mối quan hệ giữa điện áp đầu ra bộ biến đổi và điện áp vào từ pin mặt trời theo chu kỳ điều khiển như sau:

$$V_o = V_{in} \left(\frac{D}{1-D} \right) \quad (4)$$

Trong đó:

V_o : Điện áp ra của bộ biến đổi;

V_{in} : Điện áp vào của bộ biến đổi;

D : Tỷ số chu kỳ điều khiển.

Từ thông số bộ biến đổi trong Bảng 2, thay vào phương trình (4) sẽ được $D_{min} = 0,47$; $D_{max} = 0,67$.

Bảng 2. Thông số bộ biến đổi

Thông số	Ký hiệu	Giá trị
Điện áp vào nhỏ nhất	$V_{in \min}$	200V
Điện áp vào lớn nhất	$V_{in \max}$	450V
Công suất mỗi pha	P_{pha}	2kW
Công suất tổng	P	6kW
Tần số làm việc	f	20kHz
Dòng điện giới hạn pha	I_{lim}	30A
Điện áp ra	V_o	400V

Hàm truyền của bộ biến đổi tính theo công thức:

$$M_{VDC} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (5)$$

Thay số vào ta có $M_{VDCmin} = 0,889$; $M_{VDCmax} = 2$.

Tải tương đương của một pha bộ biến đổi:

$$R_L = \frac{V_{out}^2}{P} = \frac{400^2}{2000} = 80\Omega \quad (6)$$

Điện cảm nhỏ nhất của một pha L_{min} được tính:

$$L_{min} = \frac{R_L (1-D_{min})^2}{2f_c} \approx 555\mu H \quad (7)$$

$$\Delta L_{min} = \frac{V_{out} (1-D_{min})}{f_c L} \approx 12A \quad (8)$$

Dòng điện làm việc trên một pha:

$$I_L \approx \frac{I_{out}}{1-D_{max}} = \frac{5}{1-0,67} \approx 15,5A \quad (9)$$

Điện áp lớn nhất trên van IGBT:

$$V_{out \max} = V_{in \max} + V_o = 850V \quad (10)$$

V_{cp} là độ nhấp nhô cho phép của điện áp đầu ra được chọn có giá trị 0,2V. Giá trị tụ điện tối thiểu một pha để mạch hoạt động được tính theo công thức:

$$C_{min} = \frac{D_{max}}{f_s R_L} \frac{V_o}{V_{cp}} = 837\mu F \quad (11)$$

Từ các công thức (7), (10), để dòng làm việc liên tục, tác giả chọn giá trị linh kiện cho một pha của bộ biến đổi $L1=L2=L3=600\mu H$; điện dung tính toán cho mỗi pha là $860\mu F$. Vì 3 pha đầu chung đầu ra, nên tác giả sử dụng chung tụ C trên Hình 5.

Trong quá trình khởi động và quá trình quá độ khi

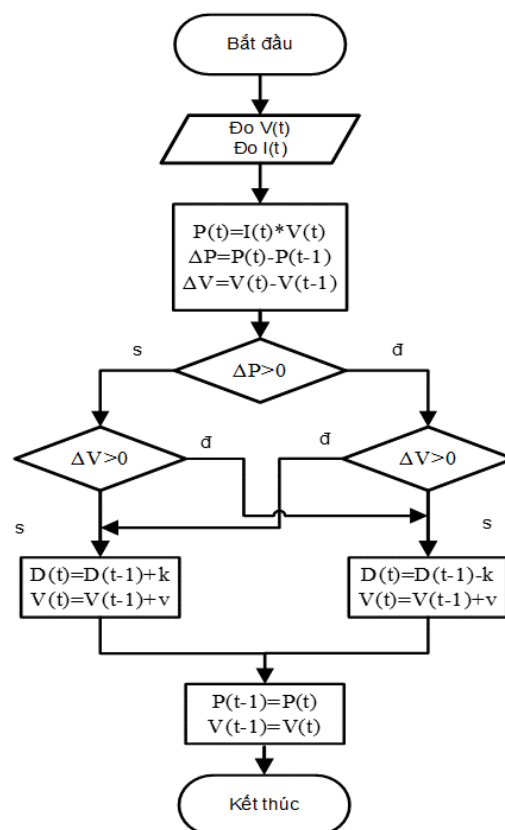
tải thay đổi, dòng điện quá độ sẽ rất lớn, để đảm bảo an toàn cho van công suất, mạch điều khiển được tác giả thêm vào bộ giới hạn dòng điện van $I_{Qmax} = 30A$.

2.3. Xây dựng mô hình trên PSIM

Nhằm nâng cao hiệu quả biến đổi điện năng cho pin mặt trời, tác giả thiết kế bộ điều khiển sử dụng thuật toán MPPT điều khiển công suất tối ưu từ pin mặt trời. Bộ điều khiển này có tác dụng giúp hệ thống thu năng lượng từ pin mặt trời cao nhất. Để thực hiện được yêu cầu này tác giả sử dụng phương pháp P&O [4], [5] với lưu đồ điều khiển được thể hiện ở Hình 8. Thuật toán sử dụng theo dõi điểm công suất tối đa dựa trên nhiễu loạn và quan sát. Nguyên lý hoạt động của thuật toán này dựa trên sự so sánh liên tục giữa điện áp và công suất do bộ pin mặt trời cung cấp để xác định điểm hoạt động của hệ thống và thực hiện hành động thích hợp. Đầu chu kỳ điều khiển PWM, đo dòng điện $I(t)$ và điện áp $V(t)$ của pin mặt trời, tính toán công suất tại thời điểm t là $P(t)$. Công suất $P(t-1)$ là công suất của chu kỳ trước đó, từ đó tính được $\Delta P = P(t) - P(t-1)$. Tương tự, sẽ tính toán được $\Delta V = V(t) - V(t-1)$. Dựa vào dấu của ΔP và ΔV sẽ xác định được trạng thái cần điều khiển của chu kỳ là tăng hay giảm $V(t)$. Nếu ΔP , ΔV có kết quả dương, điều đó cho thấy tín hiệu điện áp hoặc công suất đang tăng. Ngược lại, nếu kết quả âm, nghĩa là tín hiệu đang giảm. Khi cả công suất và điện áp cùng tăng hoặc cùng giảm sẽ cần hiệu chỉnh tăng điện áp. Khi điện áp và công suất tăng hoặc giảm theo hướng ngược nhau thì hiệu chỉnh giảm điện áp.

Hình 9 trình bày sơ đồ mô phỏng bộ biến đổi buck-boost nhiều pha trên phần mềm PSIM. Tác giả thiết kế ba pha buck-boost sử dụng cho ba bộ pin mặt trời với bộ điều khiển MPPT dùng độc lập. Nếu sử dụng

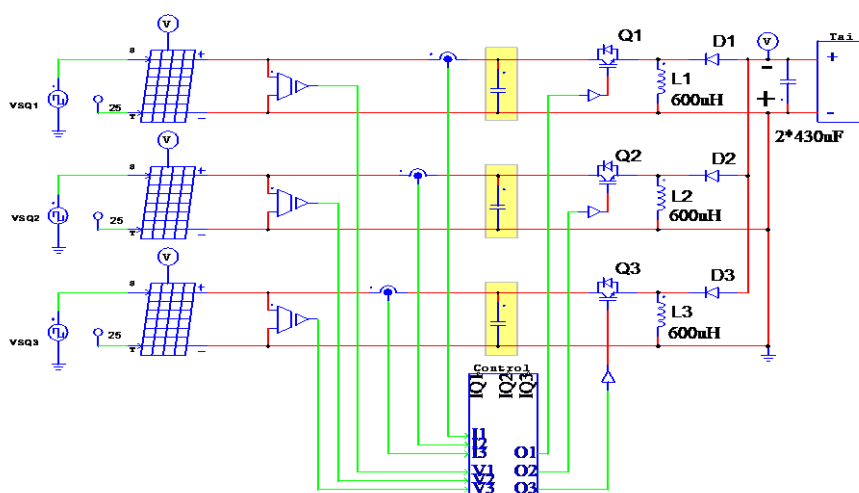
một bộ pin mặt trời, đầu vào của ba pha được mắc chung với nhau và sử dụng chung bộ điều khiển MPPT.



Hình 8. Lưu đồ thuật toán MPPT

3. Kết quả nghiên cứu

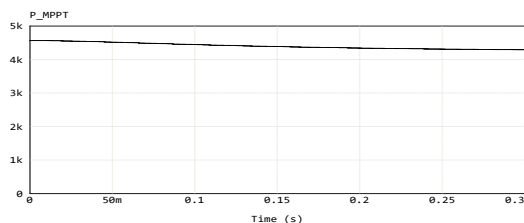
Phần này tác giả trình bày kết quả mô phỏng bộ biến đổi với chu kỳ lấy mẫu $T_s = 1e-8$ (s). Mỗi bộ pin được mắc nối tiếp từ 10 tấm pin có thông số kỹ thuật trong Bảng 1.



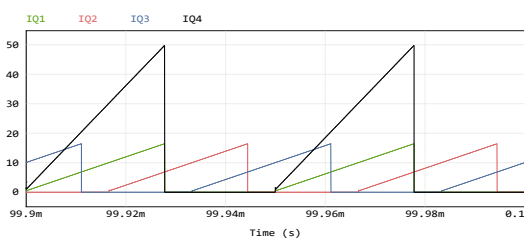
Hình 9. Mô hình bộ biến đổi buck-boost trên PSIM

3.1. Điều khiển vòng hở

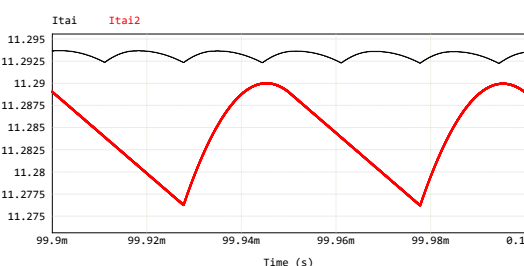
Thử nghiệm điều khiển vòng hở với tỉ số $D=0,52$, tải thuần trở $R=33\Omega$. Hình 10 trình bày dòng điện I_{Q1} , I_{Q2} , I_{Q3} trên các van IGBT của mạch buck-boost nhiều pha ở trạng thái xác lập. Kết quả cho thấy, dòng điện được phân bổ đều cho các van công suất, và chia đều theo thời gian của một chu kỳ điều khiển. Dòng điện đỉnh có giá trị 16,4A, chỉ bằng một phần ba so với $I_{Q4}=50A$ (dòng điện qua van của mạch buck-boost một pha cùng công suất 6kW). Ở Hình 11, độ nhấp nhô dòng điện tổng trên tải (I_{tai}) = 0,005A của bộ buck-boost nhiều pha có độ nhấp nhô nhỏ hơn rất nhiều so với bộ buck-boost thông thường (I_{tai2}) = 0,014A. Hình 12, Tổng công suất tổn hao trên 3 van IGBT (3_phase) cũng nhỏ hơn tương ứng (1_phase).



Hình 10. Dòng điện qua các van công suất



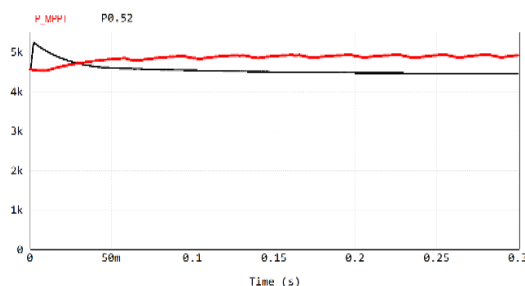
Hình 11. So sánh dòng qua tải



Hình 12. So sánh tổn hao công suất

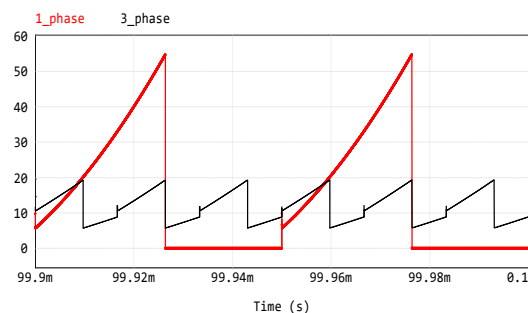
3.2. Điều khiển vòng kín MPPT

Mô phỏng điều khiển vòng kín để đánh giá khả năng tối ưu công suất pin mặt trời với điện áp ban đầu của pin mặt trời là 360V. Ba pha đều được mắc chung vào một bộ pin mặt trời. Theo tính toán từ phương trình (4), $D=0,55$ sẽ thu được công suất cực đại của pin mặt trời khi cường độ ánh sáng $1000W/m^2$.



Hình 13. Công suất tải nối chung bộ pin

Trên Hình 13, đường $P0,52$ là công suất ra tải của mạch buck-boost nhiều pha được điều khiển với giá trị cố định $D=0,52$, đây là giá trị điều biến gần đạt công suất cực đại của pin mặt trời. Đường P_MPPT là công suất ra tải khi áp dụng phương pháp điều khiển MPPT, công suất ra tải đã đạt giá trị cực đại của pin mặt trời 4,9kW.



Hình 14. Công suất tải nối ba bộ pin

Mô phỏng với trường hợp ba pha nối với ba bộ pin mặt trời riêng rẽ có cường độ sáng lần lượt là $400W/m^2$, $300W/m^2$, $300W/m^2$. Kết quả mô phỏng được trình bày trên Hình 14. Đường P_MPPT ổn định ở 4,52kW, phù hợp với công suất lớn nhất của các tấm pin mặt trời.

4. Kết luận

Bài báo nghiên cứu, thiết kế bộ biến đổi buck-boost nhiều pha sử dụng thuật toán điều khiển MPPT và mô phỏng sử dụng PSIM cho hệ thống điện mặt trời có cấu trúc lai ghép kiểu DC bus. Cấu trúc điều khiển MPPT dựa trên giải thuật P&O để tối ưu công suất ngõ ra của hệ thống kết hợp với nhiều pha của mạch công suất. Từ kết quả mô phỏng cho thấy bộ biến đổi buck-boost nhiều pha có công suất đầu ra tải ổn định và tối ưu cho pin mặt trời hơn bộ biến đổi buck-boost thông thường.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT25-26.68**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Lailis Syafaah, Amrul Faruq, Basri Noor Cahyadi, Khusnul Hidayat, Novendra Setyawan, Merinda Lestandy, (2023), *Buck-boost converter using GA-based MPPT for solar energy optimization*, Kinetik Game Technology Information System.. Vol. 8, No. 3, August, pp.607-614.
- [2] Djaafar Toumi (2023), *Comparative Study of P&O and INC MPPT Algorithms for Photovoltaic Systems*, Journal of Computational Mechanics, Power System and Control, Vol.6 No.3.
- [3] <https://jinkosolar.com.au/wp-content/uploads/2024/11/Datasheet-JKM490-510N-60HL4-V-Z1C1-OC.pdf>
- [4] S.SheikMohammed, D. Devaraj (2014), *Simulation and analysis of stand-alone photovoltaic system with boost converter using MATLAB/Simulink*, IEEEConference. DOI:10.1109/ICCPCT.2014.7054991
- [5] Abdulaziz J. Alateeq (2025), *Design of an MPPT charge controller using a DC-DC buck-boost converter under system disturbances*, International Journal of Advanced and Applied Sciences, 12(12) 2025, pp.62-74.

Ngày nhận bài:	02/04/2026
Ngày nhận bản sửa:	10/04/2026
Ngày duyệt đăng:	13/04/2026