JTE HCMUTE
ISSN: 1859-1272

TẠP CHÍ KHOA HỌC GIÁO DỤC KỸ THUẬT
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Website: https://jte.edu.vn
Email: jte@hcmute.edu.vn

Design of Battery Control Strategy for Hybrid PV/BESS System

Huu-Thai Pham, Dinh-Nhon Truong, Van-Phong Vu, Hoai-An Trinh*
Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Vietnam

*Corresponding author. *Email: anth@hcmute.edu.vn*

ARTICLE INFO

Received: 18/01/2025
Revised: 25/02/2025
Accepted: 07/05/2025
Published: 28/05/2025

KEYWORDS

Battery control strategy;
Hybrid power system;
Photovoltaic;
Hardware-in-the-loop;
Real-time simulation.

ABSTRACT

Renewable energy systems are becoming an unavoidable trend worldwide, particularly solar energy, which has the advantage of being a clean and easy-to-use energy source. In solar energy systems, lithium-ion batteries are commonly utilized to store energy. In recent years, researchers and developers have been interested in guaranteeing safety when using battery systems and enhancing their performance. In this paper, a hybrid power configuration combining a stand-alone photovolatic (PV) power system and a lithium-ion battery energy storage system (BESS) is constructed to enhance the efficiency of solar energy harvesting. In addition, the battery control strategy is designed to ensure the safety of the hybrid power system, meet the load power requirements and stabilize the voltage on the DC bus. To evaluate the effectiveness of the proposed control strategy, real-time simulations based on a hardware-in-the-loop (HIL) system are performed using a combination of a Typhoon HIL404 system and a TMS320F28069 controller. The obtained results show that the hybrid power system and control strategy ensure the system performance, the battery storage system operates safely and stabilizes the voltage on the DC bus under different load operating conditions.

Thiết Kế Chiến Lược Điều Khiển Pin cho Hệ Thống Nguồn Lai PV/Pin Lưu Trữ

Phạm Hữu Thái, Trương Đình Nhơn, Vũ Văn Phong, Trịnh Hoài Ân*
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

*Tác giả liên hệ. *Email: anth@hcmute.edu.vn*

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 18/01/2025
Ngày hoàn thiện: 25/02/2025
Ngày chấp nhận đăng: 07/05/2025
Ngày đăng: 28/05/2025

TỪ KHÓA

Chiến lược điều khiển pin;
Hệ thống nguồn lai;
Pin mặt trời;
Hardware-in-the-loop;
Mô phỏng thời gian thực.

TÓM TẮT

Việc phát triển các hệ thống năng lượng tái tạo đang trở thành xu thế tất yếu trên toàn cầu, đặc biệt là năng lượng mặt trời với ưu điểm là nguồn năng lượng sạch và dễ dàng khai thác. Trong các hệ thống năng lượng mặt trời, việc lưu trữ năng lượng sử dụng pin lithium-ion được sử dụng rộng rãi. Các vấn đề về đảm bảo an toàn khi sử dụng và nâng cao hiệu suất cho hệ thống pin lưu trữ đang được quan tâm nghiên cứu và phát triển trong thời gian qua. Trong bài báo này, cấu hình nguồn lai kết hợp hệ thống pin năng lượng mặt trời độc lập và hệ thống pin lưu trữ sử dụng pin lithium-ion được xây dựng để nâng cao hiệu suất năng lượng mặt trời thu được. Bên cạnh đó, chiến lược điều khiển pin được thiết kế để đảm bảo an toàn cho hệ thống nguồn lai, đáp ứng các yêu cầu công suất tải và điều chỉnh ổn định điện áp trên DC bus. Để đánh giá hiệu quả của chiến lược điều khiển được đề xuất, các mô phỏng theo thời gian thực dựa trên hệ thống hardware-in-the-loop (HIL) được thực hiện bằng cách sử dụng kết hợp hệ thống Typhoon HIL404 và bộ điều khiển TMS320F28069. Các kết quả thu được cho thấy hệ thống nguồn lai và chiến lược điều khiển được đề xuất đảm bảo hiệu suất hoạt động của hệ thống, hệ thống pin lưu trữ hoạt động an toàn và ổn định điện áp trên DC bus với những điều kiện hoạt động khác nhau của tải.

Doi: https://doi.org/10.54644/jte.2025.1805

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

1. Giới thiệu

Sự phát triển nhanh chóng của các nguồn năng lượng tái tạo, đặc biệt là năng lượng mặt trời, đang đóng vai trò quan trọng trong việc thay đổi cơ cấu của ngành năng lượng toàn cầu. Năng lượng mặt trời có tiềm năng rất lớn trong việc thay thế các nguồn năng lượng truyền thống và góp phần sản xuất điện do đây là nguồn năng lượng sạch và sẵn có [1]. Tuy nhiên, nguồn năng lượng này có nhược điểm là tính không liên tục, phụ thuộc vào thời tiết và chu kỳ ngày đêm nên cần phải có sự kết hợp với lưới hoặc hệ thống lưu trữ để tăng độ ổn định và hiệu suất chuyển đổi năng lượng. Nhu cầu về sử dụng năng lượng trên thế giới liên tục tăng đòi hỏi việc lưu trữ năng lượng cố định phải lớn để đảm bảo cho sự gia tăng công suất tải [2]. Tại Việt Nam, phát triển sử dụng nguồn năng lượng tái tạo nhất là năng lượng mặt trời đang trở thành lĩnh vực tiềm năng đóng góp vào cơ cấu các nguồn năng lượng quốc gia. Trong hệ thống năng lượng mặt trời, việc tích hợp các hệ thống lưu trữ nhằm tăng cường ổn định năng lượng và nâng cao hiệu suất sử dụng của pin mặt trời [3]. Hệ thống nguồn lai pin năng lượng mặt trời có lưu trữ PV-BESS đã được chứng minh là giải pháp hiệu quả để tăng cường độ tin cậy và tính độc lập về năng lượng [4]. Nhiều công trình nghiên cứu trong nước và quốc tế tập trung vào việc nâng cao hiệu quả của các hệ thống lưu trữ tích hợp năng lượng mặt trời như tối ưu hóa cấu hình BESS để thu hoạch năng lượng tốt hơn [5], phát triển các chiến lược kiểm soát để đảm bảo an toàn và tuổi thọ của pin [6], tối ưu hóa hệ thống quản lý năng lượng (EMS) để vận hành hiệu quả trong lưới điện DC siêu nhỏ [7], sử dụng PV-BESS với máy phát điện để ổn định điện áp [8]. Liên quan đến phát triển cấu trúc hệ thống, nhiều nghiên cứu đã triển khai các thuật toán theo dõi điểm công suất cực đại (MPPT) để khai thác năng lượng mặt trời hiệu quả [9] và kết hợp pin lithium-ion với siêu tụ điện để trao đổi năng lượng cân bằng [10].

Tuy nhiên, các phương pháp điều khiển truyền thống chủ yếu tập trung vào MPPT của module PV mà chưa chú trọng đến việc phối hợp với hệ thống lưu trữ. Điều này dẫn đến lãng phí năng lượng và giảm hiệu quả của toàn bộ hệ thống [11], [12]. Việc thiếu kết nối giữa các nghiên cứu này gây khó khăn cho quá trình tổng hợp và phát triển các giải pháp toàn diện hệ thống nguồn lai PV-BESS. Trong đó, nghiên cứu về hệ thống quản lý pin (BMS) thường tập trung vào quản lý pin lưu trữ riêng lẻ, trong khi nghiên cứu EMS chỉ tập trung vào việc tối ưu hóa dòng năng lượng cho toàn bộ hệ thống [13]. Mặt khác, các nghiên cứu về tối ưu hóa thường ưu tiên tối đa hóa việc khai thác năng lượng tái tạo mà không xem xét các yếu tố khác của hệ thống [14]. Hơn nữa, việc dựa vào các mô hình lý thuyết và mô phỏng mà không xem xét mô hình thực tế dẫn đến các thuật toán có thể không hoạt động hiệu quả trong thực tế do dữ liệu đầu vào khác nhau hoặc các hạn chế về xử lý [15], [16].

Từ những phân tích nêu trên, bài báo này đề xuất một chiến lược điều khiển pin lưu trữ trong hệ thống nguồn lai PV/BESS tập trung vào việc thiết lập chiến lược điều khiển phối hợp quá trình sạc và xả của hệ thống pin nhằm đảm bảo ổn định và cân bằng quá trình trao đổi năng lượng, đặc biệt là đảm bảo an toàn cho hệ thống pin và cân bằng giữa các cell pin. Nghiên cứu này có ba nội dung chính. Một là, mô hình hệ thống nguồn lai PV/BESS được thiết kế trên phần mềm Typhoon HIL bao gồm thiết kế mạch động lực và bộ điều khiển cho các bộ biến đổi DC-DC để kiểm tra và đánh giá hiệu quả của phương pháp điều khiển pin được đề xuất. Thứ hai, thuật toán điều khiển phối hợp để sạc và xả, cân bằng cell và bảo vệ pin lưu trữ được thiết kế và triển khai trên bộ điều khiển DSP TMS320F28069. Bên cạnh đó, một hệ thống giám sát mô phỏng các điều kiện thực tế theo thời gian thực được thiết lập thông qua HIL SCADA để kiểm tra hiệu quả các giải pháp điều khiển được đề xuất trước khi triển khai thực tế, giúp giảm thiểu rủi ro và nâng cao hiệu suất hệ thống. Cuối cùng, các mô phỏng được thực hiện với các điều kiện hoạt động khác nhau của tải để kiểm chứng và đánh giá hiệu quả của mô hình nguồn lai và chiến lược điều khiển được đề xuất.

Các nội dung trong bài báo được trình bày bao gồm năm phần. Giới thiệu được trình bày ở phần 1. Phần 2 mô tả cấu trúc của hệ thống nguồn lai. Chiến lược điều khiển hệ thống pin lưu trữ được trình bày ở phần 3. Phần 4 sẽ trình bày các kết quả thực hiện được thông qua mô phỏng thời gian thực trên hệ thống Typhoon HIL404. Phần 5 sẽ trình bày kết luận và các hướng phát triển của nghiên cứu.

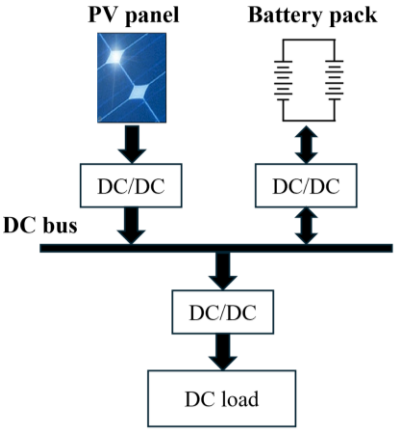
JTE
HCMUTE
ISSN: 1859-1272

TẠP CHÍ KHOA HỌC GIÁO DỤC KỸ THUẬT
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Website: https://jte.edu.vn
Email: jte@hcmute.edu.vn

2. Cấu trúc hệ thống nguồn lai

2.1. Cấu trúc tổng quát của hệ thống nguồn lai

Hệ thống nguồn lai PV/BESS được mô tả như Hình 1. Trong đó, năng lượng mặt trời được sử dụng làm nguồn chính và một bộ pin lithium-ion đóng vai trò là thiết bị lưu trữ năng lượng. Các nguồn này được kết nối song song với DC bus thông qua các bộ chuyển đổi DC-DC. Hệ thống có thể điều chỉnh hoạt động một cách linh hoạt để đáp ứng nhu cầu tải, xả hoặc sạc pin khi cần. Hơn nữa, pin đóng vai trò quan trọng trong việc bù phần năng lượng điện bị thiếu trong các quá trình hoạt động của tải như khởi động ban đầu, công suất tải cực đại, những biến động tạm thời đối với nguồn cung cấp năng lượng hoặc lưu trữ năng lượng tái sinh do tải tạo ra. Kiến trúc linh hoạt này cho phép điều khiển điện áp bus DC và nâng cao hiệu quả chung của hệ thống nguồn lai.



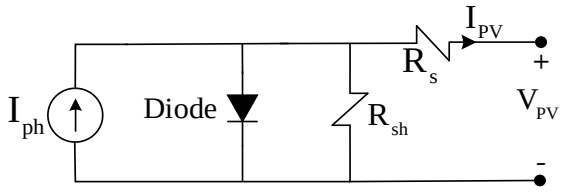
Hình 1. *Cấu hình hệ thống nguồn lai PV/BESS.*

2.2. Đặc tính của quang điện

Đặc tính điện áp-dòng điện (V-I) của mô hình PV được định nghĩa như sau [17]:

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

trong đó V_{pv} là điện áp pin mặt trời (V), I_{pv} biểu thị dòng điện của pin mặt trời (A), I_S là dòng điện bão hòa diode (A), k là hằng số Boltzmann (1,381 J/K), q biểu thị điện tích electron, n là hệ số lý tưởng của diode, T là nhiệt độ tính bằng K, và R_{sh} và R_s và lần lượt là điện trở phân luồng và chuỗi nội tại của pin mặt trời. Sơ đồ nguyên lý của mô hình quang điện này được đưa ra trong Hình 2.

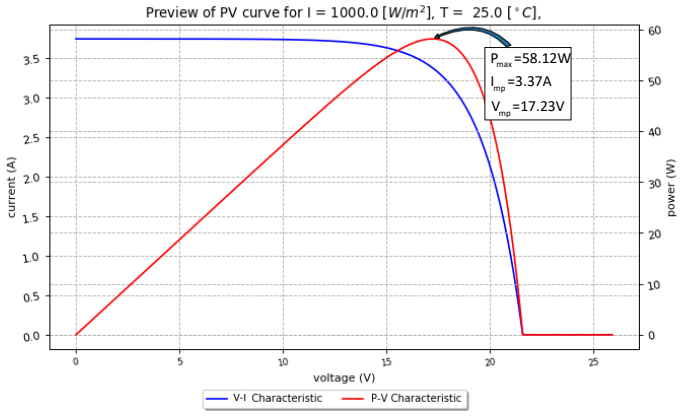


Hình 2. *Sơ đồ mạch tương đương của PV.*

Các đường đặc tính V-I, P-V của pin mặt trời được thể hiện như Hình 3 với các đặc tính tương ứng của dòng điện, điện áp và công suất. Điểm hoạt động MPPT là điểm đạt được công suất đầu ra cực đại ứng với đường cong đặc tính thay đổi theo điều kiện môi trường.

JTE
HCMUTE
ISSN: 1859-1272

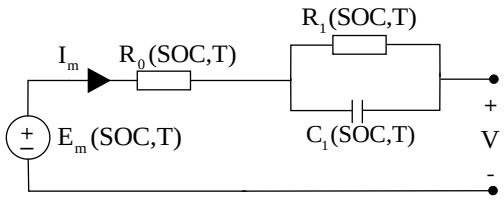
TẠP CHÍ KHOA HỌC GIÁO DỤC KỸ THUẬT
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Website: https://jte.edu.vn
Email: jte@hcmute.edu.vn



Hình 3. *Các đường đặc tính V-I và P-V của tấm pin RS-M618-60W-EN50530.*

2.3. Đặc tính của pin lưu trữ

Hệ thống pin lưu trữ được sử dụng là pin Lithium-ion có mô hình được mô tả như Hình 4.



Hình 4. *Mô hình mạch tương đương của pin.*

Trạng thái sạc (SOC) của một tế bào thường được biểu thị như là điện tích còn lại trên tế bào đó trong quá trình hoạt động. Nó là một hàm của điện dung C_Q và điện tích Q_e [18]:

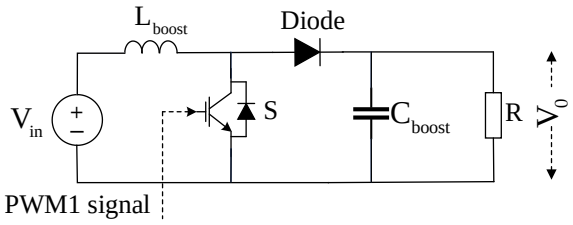
$$SOC=1-\frac{Q_e}{C_Q} \tag{2}$$

Giả sử pin được sạc đầy tại thời điểm t = 0, Q_e có thể được định nghĩa là [18]:

$$Q_e(t)=\int_0^t I_m(\tau)d\tau \tag{3}$$

2.4. Đặc tính bộ chuyển đổi DC-DC

Trong hệ thống pin mặt trời, các mạch DC-DC tăng áp được kết hợp với pin mặt trời để khai thác hiệu quả hơn việc sử dụng nguồn năng lượng thu được cũng như nâng cao điện áp ngõ ra để phù hợp cung cấp nguồn cho các thiết bị điện. Mô hình của bộ DC-DC tăng áp được mô tả như Hình 5.



Hình 5. *Mô hình DC-DC tăng áp.*

Trong đó, độ tự cảm (L_{boost}) của bộ chuyển đổi được tính toán bằng cách sử dụng công thức sau:

$$L_{boost} \geq L_{boost_min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \tag{4}$$

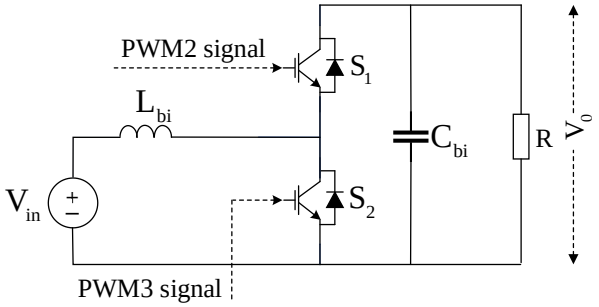
Hệ số chu kỳ hoạt động (D – duty cycle) của mạch DC-DC tăng áp được xác định như công thức:

$$D = 1 - \frac{V_{in}\eta}{V_o} \tag{5}$$

Độ gợn điện áp đầu ra được tính:

$$\frac{\Delta V_0}{V_0} = \frac{D}{f \times R \times C_{boost}} \tag{6}$$

Ngoài ra, bộ chuyển đổi DC-DC hai chiều được sử dụng để kết nối hệ thống pin lưu trữ và DC bus trong hệ thống nguồn lai. Cấu trúc của bộ chuyển đổi DC-DC hai chiều được mô tả như Hình 6. Khi hệ thống PV tạo ra công suất cao, tín hiệu điều khiển được cấp cho van S_1, cho phép mạch hoạt động theo chế độ giảm áp và sạc năng lượng vào pin. Ngược lại, khi công suất của hệ thống PV thấp, tín hiệu điều khiển được cấp cho van S_2, kích hoạt mạch hoạt động theo chế độ tăng áp cho phép pin xả và cung cấp điện cho tải. Các thông số của bộ chuyển đổi hai chiều được thiết kế bằng cách sử dụng (4)–(8).



Hình 6. *Bộ chuyển đổi DC-DC hai chiều.*

Đối với chế độ hoạt động giảm áp, độ tự cảm (L_{bi}) được tính bằng cách sử dụng công thức sau [18]:

$$L_{bi} \geq L_{bi_min} = \frac{(1-D)R}{2f} \tag{7}$$

Gợn sóng điện áp đầu ra có thể được định nghĩa như [18]:

$$\frac{\Delta V_0}{V_0} = \frac{1-D}{8L_{bi}C_{bi}f^2} \tag{8}$$

3. Thiết kế chiến lược quản lý pin

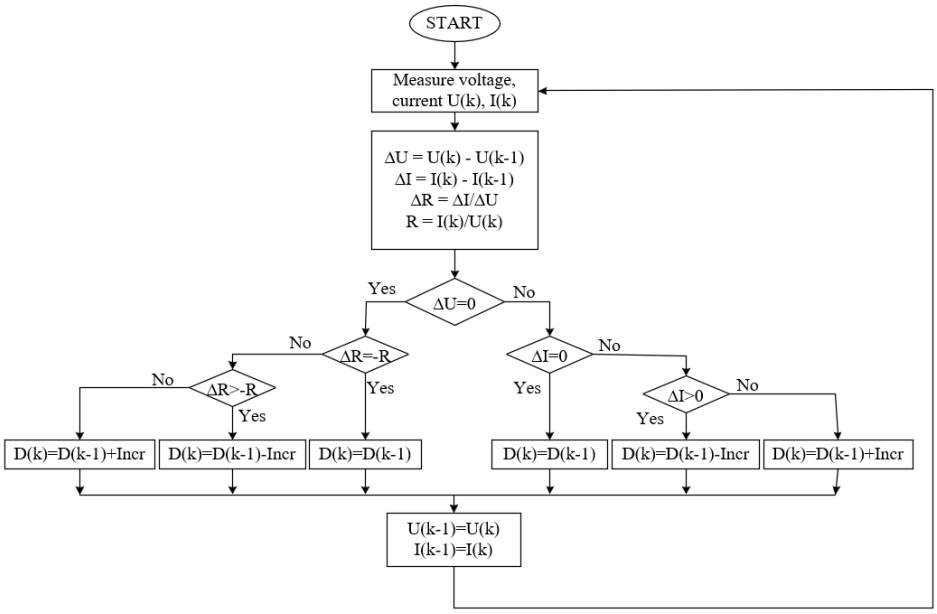
Các hệ thống pin lưu trữ hiện nay sử dụng pin Lithium-ion có khả năng lưu trữ cao và có nhiều ưu điểm hơn so với hệ thống ắc-quy thông thường nhưng lại dễ phát nóng và tìm ẩn nguy cơ mất an toàn do cháy nổ. Do đó, việc điều khiển và quản lý pin là quan trọng để theo dõi, bảo vệ, giám sát điều kiện hoạt động của pin dựa trên các điều kiện như dòng điện, điện áp, và nhiệt độ (từng tế bào (cell) pin hoặc cả bộ pin) theo thông số cho phép để đảm bảo an toàn cho việc sạc, xả, và cân bằng pin.

3.1. Điều khiển quá trình sạc/xả các nguồn năng lượng

Trong nghiên cứu này, bộ chuyển đổi tăng áp sử dụng thuật toán độ dẫn gia tăng (INC) cho MPPT được minh họa trong Hình 7, với D là chu kỳ hoạt động của bộ chuyển đổi tăng áp.

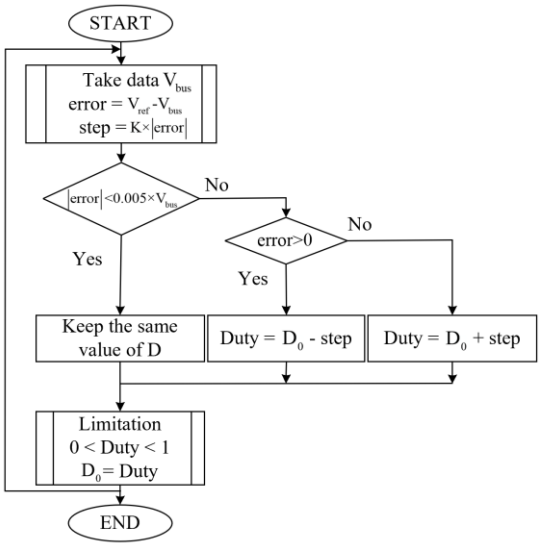
JTE
HCMUTE
ISSN: 1859-1272

TẠP CHÍ KHOA HỌC GIÁO DỤC KỸ THUẬT
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Website: https://jte.edu.vn
Email: jte@hcmute.edu.vn



Hình 7. *Thuật toán MPPT INC algorithm.*

Mạch chuyển đổi điện áp DC-DC hai chiều điều khiển chiều dòng điện giữa hệ thống pin lưu trữ và DC bus ở cả chế độ sạc và xả. Thuật toán điều khiển ổn định điện áp được mô tả như sơ đồ khối trong Hình 8, với D là chu kỳ hoạt động của bộ chuyển đổi hai chiều.



Hình 8. *Thuật toán điều khiển ổn định điện áp.*

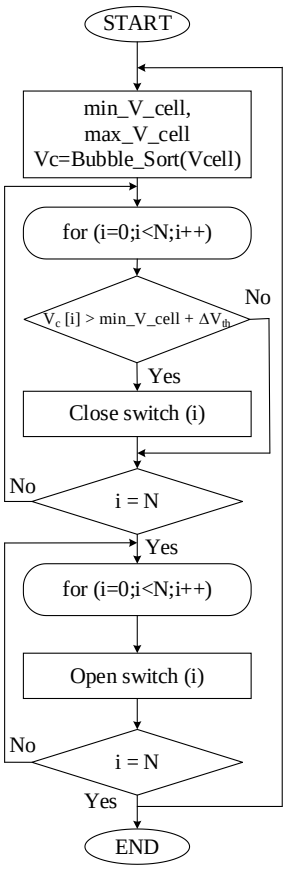
3.2. Cân bằng cell pin

Trong quá trình sạc hoặc xả, một cell pin bất kỳ bị mất cân bằng gây nên tình trạng tăng hoặc giảm điện áp so với các cell pin còn lại, dẫn đến năng lượng giữa các cell pin bị chênh lệch. Do đó, để giải quyết vấn đề này, phương pháp cân bằng pin thụ động sẽ được áp dụng bằng cách mắc song song trở xả với các cell pin. Lưu đồ quá trình cân bằng được mô tả như Hình 9. Trong đó, quá trình cân bằng sẽ kết thúc khi điện áp giữa các cell pin chênh lệch nhau nhỏ hơn ngưỡng ΔV_{th}. Nếu phát hiện sự chênh lệch vượt ngưỡng ΔV_{th}, các cell pin sẽ được kết nối với điện trở xả bằng cách đóng công tắc để năng lượng dư thừa được tiêu tán và counter sẽ tiến hành đếm thời gian cân bằng. Sau

JTE
HCMUTE
ISSN: 1859-1272

TẠP CHÍ KHOA HỌC GIÁO DỤC KỸ THUẬT
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Website: https://jte.edu.vn
Email: jte@hcmute.edu.vn

khi counter đếm xong, công tắc sẽ mở ra và kiểm tra sự chênh lệch giữa các cell pin. Nếu sự chênh lệch nằm trong ngưỡng ΔV_{th}, các cell pin sẽ kết thúc quá trình cân bằng.



Hình 9. *Lưu đồ cân bằng cell pin dựa trên điện áp.*

3.3. Bảo vệ quá dòng, quá/thấp áp, quá nhiệt/thấp nhiệt

Hệ thống bảo vệ quá dòng, quá/thấp áp, quá nhiệt/thấp nhiệt đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo an toàn cho hệ thống pin. Hệ thống bảo vệ quá áp ngăn chặn tình trạng dòng điện sạc quá cao vào pin, có thể gây hư hại pin hoặc thậm chí cháy nổ. Ngược lại, hệ thống bảo vệ thấp áp sẽ ngăn chặn tình trạng pin bị xả quá mức, dẫn đến giảm tuổi thọ và hiệu suất hoạt động. Hệ thống bảo vệ quá nhiệt sẽ tự động ngắt dòng điện khi nhiệt độ pin quá cao, tránh nguy cơ cháy nổ. Trong khi đó, hệ thống bảo vệ thấp nhiệt đảm bảo pin không hoạt động trong môi trường quá lạnh, hạn chế ảnh hưởng đến hiệu suất sạc và xả. Nhờ vào sự kết hợp của các hệ thống bảo vệ này, hệ thống pin được bảo vệ toàn diện, đảm bảo hoạt động an toàn, ổn định và kéo dài tuổi thọ. Để bảo vệ hệ thống pin tránh khỏi các yếu tố đó, hệ thống bảo vệ sẽ tuân theo Bảng 1. Để tránh trường hợp hệ thống được sạc/xả quá mức, các ngưỡng giá trị bảo vệ sẽ được cài đặt. Trong trường hợp quá áp, hệ thống pin sẽ xả năng lượng từ từ qua tải. Còn trong trường hợp thấp áp, sẽ ngắt hết các tải, ưu tiên sạc cho hệ thống pin.

Bảng 1. *Bảng điều khiển quá trình đóng/ngắt của hệ thống*

	Contactor_load (phía tải)	Contactor (phía hệ thống pin)
Quá nhiệt	☑	☒
Quá áp	☑	☑
Thấp nhiệt	☑	☒
Thấp áp	☒	☑

trong đó ☑: đóng, ☒: ngắt

JTE
HCMUTE
ISSN: 1859-1272

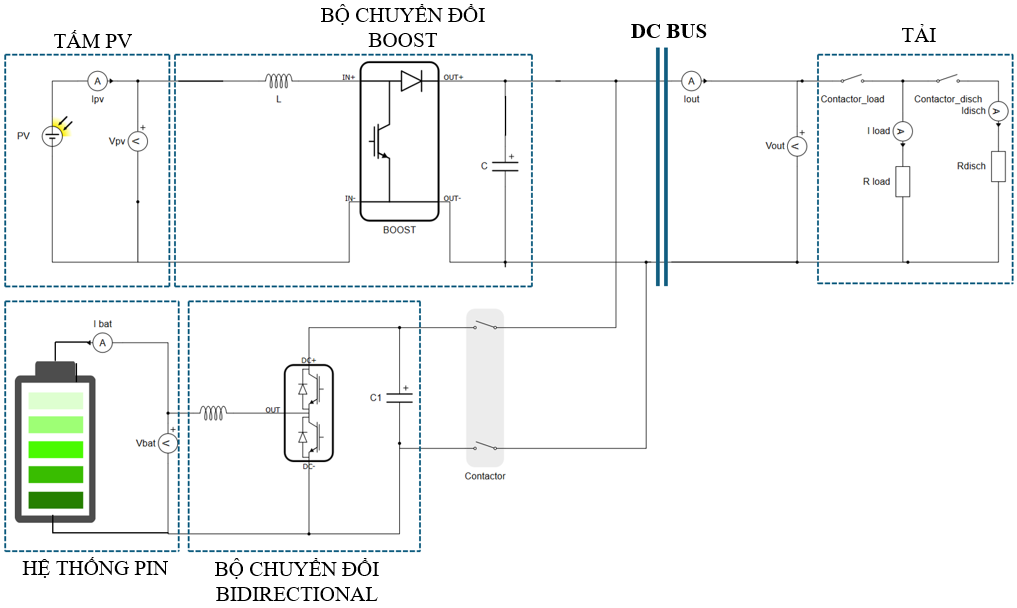
TẠP CHÍ KHOA HỌC GIÁO DỤC KỸ THUẬT
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Website: https://jte.edu.vn
Email: jte@hcmute.edu.vn

Chế độ bảo vệ dòng là một cơ chế quan trọng để đảm bảo an toàn cho cả hệ thống điện và pin. Dòng điện quá lớn có thể gây ra những vấn đề nghiêm trọng như quá nóng, hỏng pin, rò rỉ điện, thậm chí là cháy nổ. Do đó, bảo vệ quá dòng diễn ra khi SOC > 70% nhằm mục đích hạn chế dòng sạc vào pin lớn gây nguy hiểm cho hệ thống pin có thể chịu được.

4. Kết quả mô phỏng sử dụng hệ thống HIL

4.1. Thiết kế mô hình và cài đặt thông số mô phỏng

Mô hình của hệ thống nguồn lai được thiết kế dựa trên phần mềm Typhoon HIL như mô tả Hình 10. Trong đó, tấm pin mặt trời là nguồn năng lượng chính, mạch DC-DC tăng áp đóng vai trò lấy năng lượng mặt trời và điều chỉnh điện áp từ tấm pin lên mức phù hợp cho sạc pin và bus DC. Hệ thống pin dùng để lưu trữ năng lượng, mạch chuyển đổi DC-DC hai chiều giúp quản lý dòng năng lượng hai chiều để sạc/xả pin và cân bằng bus DC. Tải tiêu thụ năng lượng từ bus DC.



Hình 10. *Mô hình mô phỏng hệ thống nguồn lai.*

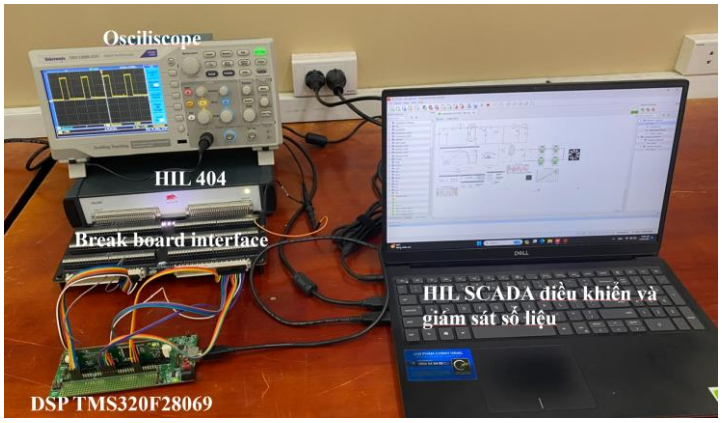
Hệ thống gồm nguồn pin PV, pin lưu trữ Lithium-ion, bộ chuyển đổi DC-DC tăng áp, bộ chuyển đổi DC-DC hai chiều, mô hình tải và các bộ điều khiển. Các thông số kỹ thuật của hệ thống nguồn lai được mô tả như Bảng 2.

Bảng 2. *Thông số kỹ thuật của hệ thống nguồn lai*

Tải	Bus DC	24V
	P_{load}	20W
Tấm PV	RS-M618-60W	
	P_{max}	60W
	V_{mp}	17.6V
	I_{mp}	3.41A
Mạch chuyển đổi boost	L_{boost}	6.48mH
	C_{boost}	$608\mu F$
	f_{boost}	10kHz
Mạch chuyển đổi bidirectional	L_{bi}	9.12mH

	C_{bi}	5.2 μF
	f_{bi}	10kHz
Hệ thống pin	Dung lượng	8.8Ah
	V_{bat}	14.8V

Trong nghiên cứu, mô hình mạch động lực trong HIL Schematic của thiết bị HIL404 kết nối với thiết bị ngoại vi để thiết lập mô phỏng hệ thống nguồn lai. Chiến lược điều khiển hệ thống pin được thực hiện thông qua vi điều khiển TMS320F28069 của hãng Texas Instruments để điều khiển phần cứng của hệ thống được xây dựng ở thiết bị HIL 404 và giám sát quá trình hoạt động trên giao diện màn hình HIL SCADA. Sơ đồ kết nối hệ thống được mô tả như Hình 11.

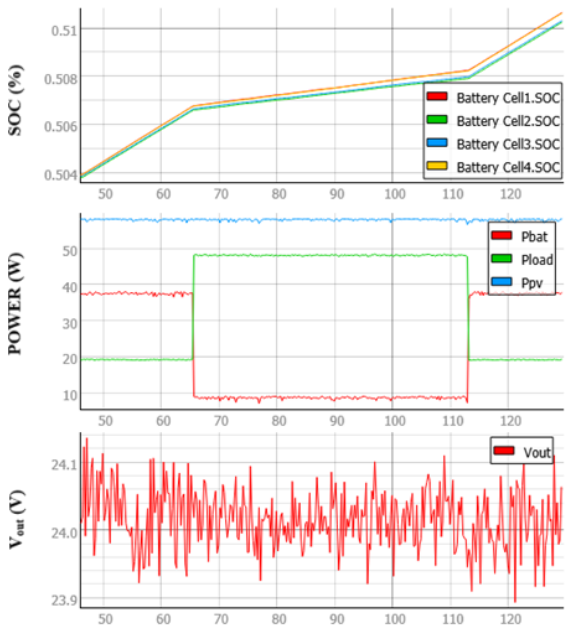


Hình 11. *Mô hình kết nối Typhoon HIL 404 và thiết bị ngoại vi.*

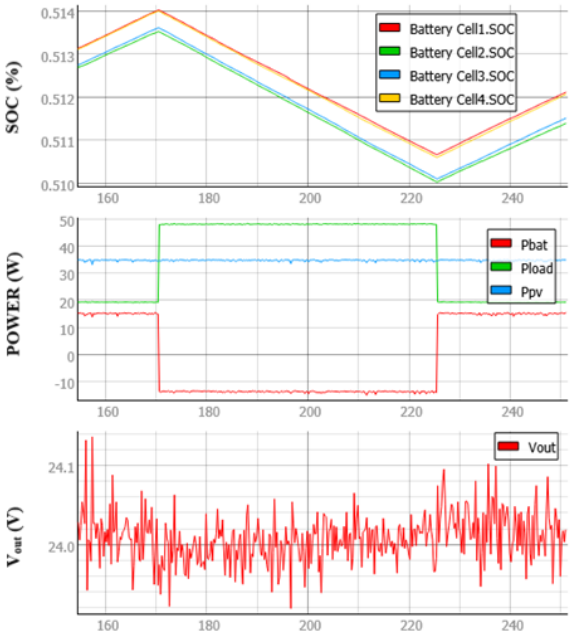
4.2. Kết quả thực hiện

4.2.1. Trường hợp 1: Công suất tải thay đổi

Khi công suất tải thay đổi với cùng điều kiện cường độ chiếu xạ của ánh sáng, kết quả đáp ứng công suất tải của hệ thống được mô tả như Hình 12.



Hình 12.(a) *Công suất tải thay đổi ở bức xạ 1000W/m²*

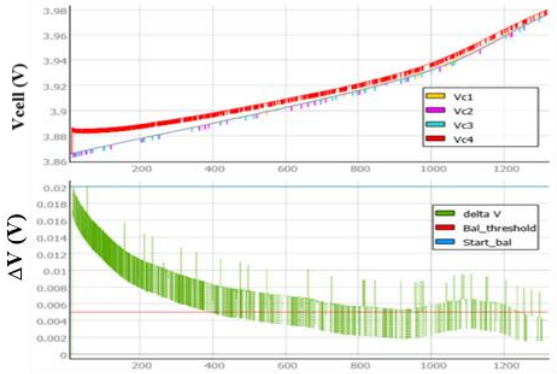


Hình 12.(b) *Công suất tải thay đổi ở bức xạ 600W/m²*

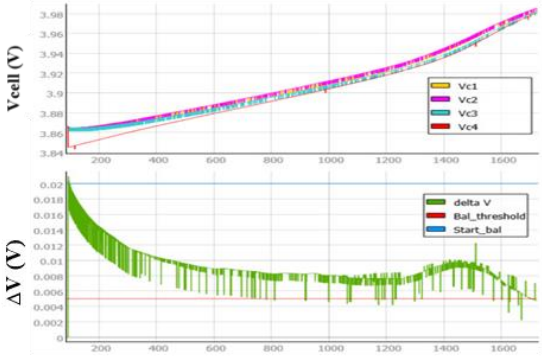
Kết quả trên Hình 12.(a) cho thấy, khi ở cường độ bức xạ 1000W/m2 và Ppv > Pload, hệ thống năng lượng mặt trời vừa cấp nguồn cho tải vừa sạc cho hệ thống pin. Sau khoảng 65s, tiến hành đóng thêm tải phụ vào hệ thống, Pload sẽ tăng lên nhưng vẫn nhỏ hơn Ppv, nên nguồn từ PV vẫn đủ để cung cấp cả 2 tải và hệ thống pin sẽ sạc chậm. Khoảng 60s tiếp theo, cắt tải phụ ra khỏi hệ thống và Ppv > Pload, hệ thống pin sẽ sạc nhanh hơn so với trường hợp hệ thống cung cấp nguồn cho 2 tải. Kết quả tương tự khi quan sát ở Hình 12.(b), nhưng khi đóng tải phụ, do Ppv < Pload, nên hệ thống pin sẽ xả năng lượng kết hợp năng lượng từ nguồn pin mặt trời cung cấp cho 2 tải. Điện áp ngõ ra trên bus DC quan sát trên cả 2 trường hợp đều dao động ổn định ở 24V.

4.2.2. Trường hợp 2: Cân bằng pin

Tiến hành mô phỏng thời gian thực và quan sát hệ thống trên HIL SCADA khi năng lượng mặt trời đang sạc hệ thống pin lưu trữ, đặc biệt tập trung vào cell số 4 của khối pin lưu trữ. Trong tình huống này, một cell pin đột nhiên tăng điện áp (sạc nhanh) so với các cell khác và một tình huống khác trong đó một cell đột nhiên giảm điện áp (sạc chậm) so với các cell khác. Chênh lệch điện áp giữa cell 4 và các cell khác vượt quá ngưỡng 20mV (tương đương với 1% dung lượng pin). Hệ thống cân bằng pin sẽ hoạt động và kết quả sẽ được hiển thị lần lượt trong Hình 13.



Hình 13.(a) *Trường hợp một cell pin (cell pin số 4) có áp cao hơn các cell còn lại*



Hình 13.(b) *Trường hợp một cell pin (cell pin số 4) có thấp áp hơn các cell còn lại*

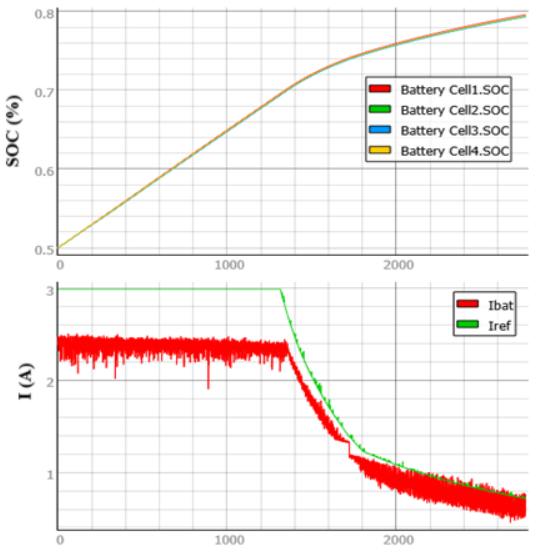
Trong trường hợp đang sạc, có một cell pin bất kỳ (cell pin số 4) điện áp cao đột ngột làm mất cân bằng điện áp giữa các cell còn lại như Hình 13.(a) hoặc có một cell pin bất kỳ (cell pin số 4) có điện áp thấp hơn các cell còn lại ở Hình 13.(b) Độ chênh lệch giữa cell pin số 4 và các cell pin còn lại đã vượt qua ngưỡng trước 20mV (tương đương với 1% pin). Đối với trường hợp Hình 13.(a), quá trình cân bằng diễn ra bằng cách cho cell pin số 4 xả, để giảm bớt năng lượng thông qua tải xả. Đối với trường hợp như Hình 13.(b), các cell pin còn lại sẽ xả bớt năng lượng qua tải xả được mắc song song nhằm giảm bớt năng lượng giữa các cell với cell số 4. Quá trình cân bằng này sẽ kết thúc khi sự chênh lệch điện áp giữa các cell pin nhỏ hơn ngưỡng ΔV_{th} (cụ thể nhỏ hơn 5mV) và SOC giữa các cell pin < 0.5%.

4.2.3 Trường hợp 3: Bảo vệ quá dòng

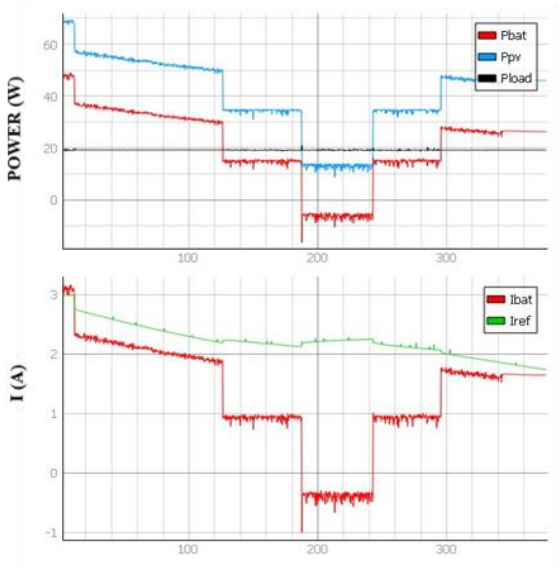
Khi hệ thống pin được sạc đến SOC > 70% ở cường độ bức xạ 1000W/m^2, Hình 14.(a), chế độ bảo vệ quá dòng được kích hoạt để hạn chế dòng sạc đi vào pin, đảm bảo không vượt qua giá trị ngưỡng cần bảo vệ để tránh gây hư hại cho pin. Khi cường độ bức xạ thay đổi từ cao xuống thấp hay từ không có nguồn bức xạ đến nguồn bức xạ cao, dòng điện đi vào hệ thống pin luôn nằm dưới ngưỡng mà hệ thống pin có thể chịu được như mô tả Hình 14.(b).

JTE
HCMUTE
ISSN: 1859-1272

TẠP CHÍ KHOA HỌC GIÁO DỤC KỸ THUẬT
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Website: https://jte.edu.vn
Email: jte@hcmute.edu.vn



Hình 14.(a) *Chế độ bảo vệ dòng với cường độ bức xạ 1000W/m².*



Hình 14.(b) *Chế độ bảo vệ dòng với cường độ bức xạ thay đổi.*

5. Kết luận và hướng phát triển

Bài báo đã trình bày xây dựng hệ thống nguồn lai PV/BESS và phát triển thành công mô hình mô phỏng HIL thời gian thực sử dụng phần mềm Typhoon HIL giả lập các tình huống thực tế có thể xảy ra và thực nghiệm giải thuật điều khiển bằng card DSP TMS320F28069 và HIL 404. Kết quả đạt được chứng minh rằng hệ thống hoạt động đạt yêu cầu và chiến lược điều khiển pin đảm bảo hiệu quả an toàn đồng thời cân bằng năng lượng cho hệ thống pin tích hợp với hệ thống pin mặt trời. Ba trường hợp nghiên cứu được thực hiện với công suất tải thay đổi, cân bằng pin và bảo vệ quá dòng được thực hiện trong mô phỏng thời gian thực với kết quả thu được giải quyết các vấn đề an toàn cho hệ thống pin, quá nhiệt, quá dòng, cân bằng cho hệ thống pin thể hiện các chế độ vận hành phù hợp và đảm bảo hệ thống hoạt động ổn định. Với mục đích cải thiện hiệu quả của các hệ thống lưu trữ năng lượng trong tương lai, nghiên cứu này sẽ tiếp tục phát triển các phương pháp dự đoán an toàn của hệ thống pin, bao gồm SOC và trạng thái sức khỏe (SOH), đồng thời đi sâu hơn vào bảo vệ nhiệt cho hệ thống pin. Cũng như để có thể ứng dụng với hệ thống không kết nối với lưới điện như tàu thuyền, các vùng sâu vùng xa, hải đảo phải còn nghiên cứu sâu hơn về hệ thống, giải thuật và mô hình thực nghiệm.

Lời cám ơn

Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn Khoa Điện – Điện tử (FEEE) đã tạo điều kiện để nhóm thực hiện đề tài nghiên cứu khoa học cấp trường với mã số T2024-138 do Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM (HCMUTE) tài trợ kinh phí.

Xung đột lợi ích

Các tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích trong bài báo này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] B. Parida, S. Iniyan, and R. Goic, "A review of solar photovoltaic technologies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, issue. 3, 2011.
[2] BloombergNEF, "Energy Storage Investments Boom As Battery Costs Halve in the Next Decade." [Online]. Available: https://about.bnef.com/blog/energy-storage-investments-boom-battery-costs-halve-next-decade/
[3] Chính Phủ Việt Nam, "Kế hoạch thực hiện quy hoạch điện VIII." [Online]. Available: https://xaydungchinhsach.chinhphu.vn/toan-van-ke-hoach-thuc-hien-quy-hoach-dien-viii-119240401173827433.htm
[4] X. Wu and T. Kerekes, "Flexible active power control for pv-ess systems: A review," *Energies*, vol. 14, no. 21, 2021.
[5] J. Li, Y. Qiao, G. Liu, and Z. Lu, "Capacity Configuration of Battery Energy Storage System for Photovoltaic Generation System Considering the High Chargerate," *E3S Web of Conferences*, vol. 182. 2020.

[6] C. N. A. Campas, M. M. Martinez, and H. F. R. Paredes, "PV Power Curtailment and BESS Management for Distribution Networks: A Practical Approach," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 21, no. 1, pp. 133–141, Jan. 2023.
[7] N. V. Quynh, Z. M. Ali, M. M. Alhaider, A. Rezvani, and K. Suzuki, "Optimal energy management strategy for a renewable-based microgrid considering sizing of battery energy storage with control policies," *Int. J. Energy Res.*, vol. 45, no. 4, Mar. 2021.
[8] L. An and T. Tuan, "Dynamic Programming for Optimal Energy Management of Hybrid Wind–PV–Diesel–Battery," *Energies*, vol. 11, no. 11, p. 3039, Nov. 2018.
[9] N. B. Thành, V. T. Trịnh, and N. Q. Huy, "Thiết Kế , Thi Công Mạch Điều Khiển Sạc Mppt," *Tạp chí Khoa học Đại học Thủ Dầu Một*, no. 4, issue. 47. pp. 32–40, 2020.
[10] B. V. Huy, T. T. Chuong, and Q. D. Cuong, "Research And Simulation Of A Hybrid Supercapacitor-Lithium battery energy storage system for solar energy," *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 228, no. 14, pp. 214–221, 2023.
[11] B. Bendib, H. Belmili, and F. Krim, "A survey of the most used MPPT methods : Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 637–648, 2015.
[12] T. Esram and P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, 2007.
[13] J. John, A. Yoonus, F. Shijad, M. Aslam Mm, A. Thasneem, and L. Arun, "Isolated PV System with Fuzzy Logic based MPPT Controller and Battery Management System," in *2021 5th International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer Technologies and Optimization Techniques (ICEECCOT), IEEE*, Dec. 2021, pp. 194–199.
[14] A. Pichetjamroen, P. Chindamanee, N. Teerakawanich, and N. Somakettarin, "A Study on Performances of Flexible Power Control with Empirical Lithium-ion Battery Modeling in PV Power Systems," in *2022 19th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), IEEE*, May 2022, pp. 1–4.
[15] V. T. Tran, K. M. Muttaqi, and D. Sutanto, "A Robust Power Management Strategy With Multi-Mode Control Features for an Integrated PV and Energy Storage System to Take the Advantage of ToU Electricity Pricing," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 2, pp. 2110–2120, Mar. 2019.
[16] V. Sangeetha, C. M. N. Mukundan, P. Jayaprakash, and O. V. Asokan, "Control of a Multilevel Inverter based Grid Integration of Solar PV with BESS," *International Conference on Power Electronics and Renewable Energy Applications (PEREA), IEEE*, Nov. 2020, pp. 1–6.
[17] A. Al-Quraan and M. Al-Qaisi, "Modelling, design and control of a standalone hybrid PV-wind micro-grid system," *Energies*, vol. 14, no. 16, 2021.
[18] M. Rezal, M. Sabri, and M. Yusof, "Orion Battery Management System (BMS) for Lithium-Ion Battery Pack," *Conference: Colloquium of Education, Engineering & Technology*, pp. 80–85, 2014.

Pham Huu Thai received his master's degree in electrical engineering from Ho Chi Minh City University of Technology and Education (HCMUTE) in 2013. He has 16 years of teaching experience in the Faculty of Electrical and Electronics Engineering of this university, and is currently a PhD student in electrical engineering at HCMUTE. His research interests include: applications of power electronics and intelligent control techniques in microgrids, electric vehicles, etc.
Email: thaiph@hcmute.edu.vn. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5894-0640

Truong Dinh Nhon, Ph.D., is an Associate Professor at the Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology and Education (HCMUTE), Vietnam. He earned his Ph.D. in Electrical Engineering from National Cheng Kung University (NCKU), Tainan, Taiwan. His research interests encompass power system stability, renewable energy conversion systems, microgrids, and FACTS devices.
Email: nhontd@hcmute.edu.vn ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4015-6769

Vu Van Phong (Senior Member, IEEE) received the B.S. degree from the Department of Automatic Control, Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam, in 2007, the M.S. degree from the Department of Electrical Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology, Tainan, Taiwan, in 2010, and the Ph.D. degree from the Department of Electrical Engineering, National Central University, Zhongli, Taiwan, in 2017. He is currently a Lecturer with Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Ho Chi Minh City. His research interests include fuzzy systems, intelligent control, observer and controller design for uncertain systems, polynomial systems, fault estimation, and large-scale systems.
Email: phongvv@hcmute.edu.vn ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3243-1775

Trinh Hoai An received B.E. degree in electrical and electronic engineering technology and M.S. degree in electronics engineering from Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Ho Chi Minh City, Vietnam, in 2012 and 2015, respectively. In 2023, he obtained his Ph.D. in Mechanical and Automotive Engineering from University of Ulsan (UoU) in Ulsan, Korea. Currently, he is a lecturer in the Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology and Education (HCMUTE), Vietnam. His research interests include fuel cell applications, electric vehicles, renewable energy, energy management strategies for hybrid systems, DC-DC converters, and nonlinear and intelligent control.
Email: anth@hcmute.edu.vn. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1217-0325