

Energy Storage Application for Improving Operation Performance of Distribution Networks Integrated with Wind and Solar Powers

Duy Quang Nguyen¹, Minh Khoa Ngo^{2*}

¹Vinh Son - Song Hinh Hydropower Joint Stock Company, Binh Dinh, Vietnam

²Quy Nhon University, Binh Dinh, Vietnam

*Corresponding author. Email: ngominhkhoa@qnu.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 20/06/2024
Revised: 05/08/2024
Accepted: 19/08/2024
Published: 28/08/2024

KEYWORDS

Battery energy storage system;
Wind power;
Solar power;
Distributed generator;
Microgrid.

ABSTRACT

This paper presents a technique for integrating battery energy storage systems (BESS) into a distribution network with penetration of wind and solar power in order to improve the operation efficiency of distribution networks, exploit renewable energy capability, and reduce operation issues. The IEEE 33-bus distribution network is modified by connecting wind and solar power plants at buses on the network. Power flow results for various scenarios to propose the solution for choosing suitable energy storage systems. Additionally, in this work the energy storage systems are selected as Battery Energy Storage Systems 2C-CAB-690V on IEEE 33-bus distribution network with wind and solar power plants, when a fault occurs at source side, a microgrid will be formed and it can be maintained at a normal operating status during about three hours, contributing to improve the reliability and operation performance of wind and solar power plants in the distribution network.

Ứng Dụng Lưu Trữ Năng Lượng Nhằm Nâng Cao Hiệu Quả Vận Hành Của Lưới Điện Phân Phối Có Tích Hợp Điện Gió và Điện Mặt Trời

Nguyễn Duy Quang¹, Ngô Minh Khoa^{2*}

¹Công ty Cổ phần Thủy điện Vinh Sơn - Sông Hinh, Bình Định, Việt Nam

²Trường Đại học Quy Nhơn, Bình Định, Việt Nam

*Tác giả liên hệ. Email: ngominhkhoa@qnu.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 20/06/2024
Ngày hoàn thiện: 05/08/2024
Ngày chấp nhận đăng: 19/08/2024
Ngày đăng: 28/08/2024

TỪ KHÓA

Lưu trữ năng lượng;
Điện gió;
Điện mặt trời;
Nguồn điện phân tán;
Lưới điện siêu nhỏ.

TÓM TẮT

Bài báo này đưa ra giải pháp tích hợp các hệ thống lưu trữ năng lượng dạng pin (BESS) vào lưới điện phân phối (LDPP) có sự xâm nhập của nguồn điện gió và điện mặt trời nhằm mục đích nâng cao hiệu quả vận hành lưới điện, khai thác tối đa nguồn năng lượng tái tạo (NLTT) và giảm thiểu các vấn đề vận hành lưới điện. Mô hình lưới điện IEEE 33 nút được hiệu chỉnh bằng cách kết nối các nguồn điện gió và điện mặt trời vào vị trí các nút trên lưới điện. Các kết quả phân tích về trào lưu công suất trong các kịch bản khác nhau để đưa ra giải pháp lựa chọn hệ thống lưu trữ năng lượng phù hợp. Đồng thời, trong nghiên cứu này với sự tham gia của hệ thống lưu trữ năng lượng dạng ắc quy 2C-CAB-690V trên lưới điện IEEE 33 nút có sự tham gia của nguồn điện gió và điện mặt trời, khi xuất hiện sự cố ở phía nguồn lưới thì sẽ hình thành một lưới siêu nhỏ và có thể duy trì hoạt động bình thường trong suốt khoảng thời gian 3 giờ. Điều này góp phần nâng cao độ tin cậy cung cấp điện và hiệu quả vận hành của các nguồn điện gió và điện mặt trời trên LDPP.

Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.2024.1614>

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

1. Giới thiệu

Các nguồn năng lượng tái tạo (NLTT) dần được khai thác một cách triệt để và từng bước thay thế các nguồn năng lượng truyền thống. Tuy nhiên, sự thay đổi này đã tác động rất lớn đến hệ thống điện nói chung và lưới điện phân phối (LĐPP) nói riêng, cũng như ảnh hưởng đến yếu tố vận hành và kiểm soát LĐPP một cách ổn định và tin cậy [1], [2]. Thông thường, LĐPP có cấu trúc hình tia có trào lưu công suất theo một hướng từ nguồn đến phụ tải. Tuy nhiên, khi có sự tham gia các nguồn phân tán (Distributed Generator - DG) thì trào lưu công suất sẽ bị thay đổi. Do vậy, việc mô hình hóa LĐPP có tích hợp các nguồn điện gió, điện mặt trời, hệ thống lưu trữ năng lượng cần được thực hiện để nghiên cứu. Trong [3], phương pháp mô hình hóa LĐPP sử dụng các phương trình Carson đã hiệu chỉnh được đề xuất. Đồng thời, phương pháp Newton - Raphson được ứng dụng để giải bài toán trào lưu công suất ba pha cho lưới điện này. Mô hình toán học để cực tiểu tổn thất công suất trong việc tái cấu trúc LĐPP có khảo sát đến các ràng buộc về giới hạn điện áp nút và dòng điện nhánh được đề xuất trong [4].

Lưới điện siêu nhỏ là một mạng điện độc lập, nó cho phép phát điện tại chỗ và kết nối, giám sát và kiểm soát các nguồn năng lượng phân tán đồng thời nâng cao hiệu suất, khả năng bền vững và khả năng phục hồi [5], [6]. Ngoài ra, các công trình công bố đã nghiên cứu sâu về việc mô hình hóa, điều khiển và quản lý sự cố đối với các lưới điện siêu nhỏ [7], [8] thiết lập các tham số nhằm đảm bảo ổn định lưới điện siêu nhỏ [9], [10], xây dựng mô hình vận hành lưới điện siêu nhỏ trong thời gian thực có xét đến các yếu tố bất định của các nguồn NLTT và hệ khung tham chiếu để đánh giá các khía cạnh kỹ thuật - môi trường - kinh tế trong các lưới siêu nhỏ [11]-[13].

Trong các lưới điện siêu nhỏ, hệ thống lưu trữ năng lượng (cụ thể là Battery Energy Storage System - BESS) được sử dụng để ổn định và nâng cao hiệu quả vận hành thông qua việc điều khiển nạp (charging) hoặc xả (discharging) năng lượng từ BESS và cung cấp công suất cho LĐPP [14]-[21]. Trong [14], các tác giả đã phân tích và đánh giá sự xâm nhập sâu và gia tăng mạnh mẽ của các NLTT vào LĐPP dẫn đến khó duy trì được các mức giới hạn cho phép về chất lượng điện năng (sự dao động điện áp và tần số của lưới điện), bài báo đã đưa ra giải pháp sử dụng và điều khiển BESS để điều tiết công suất tác dụng (CSTD), công suất phát kháng (CSPK) để cải thiện và cân bằng chất lượng công suất của lưới điện. Công trình [15] đề xuất phương pháp xác định công suất của BESS dựa trên đặc tính điều khiển để phục vụ cho mục đích điều khiển điện áp và trường hợp tải thay đổi. Bên cạnh đó, còn có nhiều công trình khác đã nghiên cứu về điều khiển BESS trong lưới điện siêu nhỏ: Nghiên cứu mô hình toán học của BESS áp dụng cho lưới điện siêu nhỏ [16], đề xuất bộ điều khiển CSTD và CSPK cho BESS trong lưới điện siêu nhỏ [17], ứng dụng BESS để ổn định và cân bằng các lưới điện siêu nhỏ bằng giải pháp điều khiển độ trôi ngược [18], thiết lập mô hình toán học để tối ưu hóa lưới điện có tích hợp BESS [19]. Các tác giả trong [20], [21] đã nghiên cứu việc xác định công suất và khả năng lưu trữ năng lượng của BESS để ổn định điện áp nút tại vị trí có tích hợp hệ thống năng lượng mặt trời lớn.

Bài báo này nghiên cứu tính toán LĐPP có tích hợp điện gió, điện mặt trời và BESS dựa trên các mô hình toán học và số liệu thực tế. Đồng thời, các nghiên cứu trong bài báo nhằm mục đích chứng minh khả năng hoạt động của BESS trong việc ổn định và nâng cao hiệu quả vận hành của LĐPP ở chế độ nối lưới và chế độ tách đảo độc lập dưới dạng lưới điện siêu nhỏ. Các kịch bản của bài báo được xây dựng dựa trên những số liệu thực tế như biểu đồ phụ tải ngày, dữ liệu thời tiết tại địa phương khảo sát và được áp dụng tính toán mô phỏng trên lưới điện chuẩn IEEE 33 nút. Sau đó căn cứ trên các kết quả mô phỏng bài báo tiến hành lựa chọn công suất lắp đặt các nguồn DG cho lưới điện và công suất của BESS theo catalogue của nhà sản xuất một cách phù hợp để nâng cao hiệu quả vận hành của lưới điện.

Các đóng góp mới của bài báo này có thể được tóm lược như sau:

- Thiết lập mô hình hóa nguồn điện gió, điện mặt trời và BESS, đồng thời xây dựng lưu đồ thuật toán để tính toán trào lưu công suất LĐPP có tích hợp các nguồn DG và BESS.

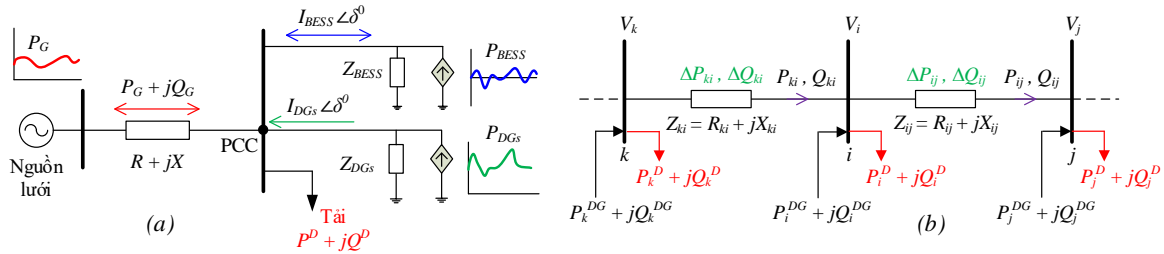
- Lựa chọn phù hợp công suất và vị trí lắp đặt BESS trên LĐPP nhằm nâng cao hiệu quả vận hành của lưới điện có tích hợp điện gió và điện mặt trời.

- Duy trì sự vận hành trong suốt một khoảng thời gian nhất định dưới dạng lưới điện siêu nhỏ khi xuất hiện sự cố phía nguồn lưới nhờ vào sự kết hợp giữa các nguồn DG và BESS.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Mô hình lưới phân phối

Lưới điện phân phối (LĐPP) là phần lưới điện bao gồm các đường dây và trạm biến áp có cấp điện áp đến 110 kV. LĐPP có chức năng truyền tải điện năng từ các trạm biến áp trung gian đến các phụ tải sử dụng điện. Vì lý do kỹ thuật và điều kiện vận hành nên LĐPP đa phần có cấu trúc hình tia, có nhiều loại phụ tải khác nhau, các phụ tải này phân bố không đều giữa các đường dây, điều này gây ra quá tải cục bộ đường dây, làm tăng tổn thất và sụt áp... trên LĐPP [3], [4]. Để khắc phục các nhược điểm trên, LĐPP cần phải được tái cấu trúc sơ đồ lưới điện, đóng/cắt, khép mạch vòng... các nhánh hoặc nút, với mục tiêu chính là giảm tối thiểu tổn thất điện năng nhưng phải đảm bảo các điều kiện vận hành như: cân bằng công suất giữa nguồn và phụ tải, điện áp tại các nút phải nằm trong giới hạn cho phép, hệ thống bảo vệ role phải hoạt động tin cậy, đường dây, máy biến áp (MBA) và các thiết bị khác không bị quá tải... Hình 1a mô tả hệ thống LĐPP có tích hợp các nguồn điện phân tán DG (điện gió, điện mặt trời) và BESS. DG và BESS hoạt động bơm CSTD và CSPK vào LĐPP thông qua các bộ biến đổi công suất, các bộ biến đổi này sử dụng giải pháp PLL để đồng bộ hóa với lưới điện.



Hình 1. (a) Lưới phân phối có tích hợp các DGs và BESS; (b) Mô hình hoá LĐPP

Mô hình hoá LĐPP được mô tả như Hình 1b và các công thức toán học từ (1) đến (5). Mục đích của bài toán là tìm vị trí lắp đặt và công suất của các DG để cực tiểu hóa tổng tổn thất CSTD (ΔP) được thể hiện bởi phương trình (1) trong khi vẫn đảm bảo các điều kiện ràng buộc về cân bằng công suất (2), (3), giới hạn điện áp nút (4) và dòng điện nhánh (5). Cụ thể, mô hình bài toán được thiết lập như sau:

Hàm mục tiêu:

$$\text{Min } \Delta P = \sum_{ij \in m} \Delta P_{ij} \quad (1)$$

Ràng buộc về cân bằng CSTD và CSPK dựa trên định luật Kirchhoff I tại nút i :

$$P_i^{DG} + \sum_{k=1}^n P_{ki} = \sum_{j=1}^n P_{ij} + \sum_{j=1}^n \Delta P_{ij} + P_i^D \quad (2)$$

$$Q_i^{DG} + \sum_{k=1}^n Q_{ki} = \sum_{j=1}^n Q_{ij} + \sum_{j=1}^n \Delta Q_{ij} + Q_i^D \quad (3)$$

Ràng buộc về điện áp tại các nút:

$$V_{min} \leq |V_i| \leq V_{max} \quad (4)$$

Ràng buộc về dòng điện trên các nhánh:

$$|I_{ij}| \leq I_{ij}^{max} \quad (5)$$

Trong đó: m là tập hợp các nhánh của lưới điện, n là số nút, ΔP_{ij} và ΔQ_{ij} là tổn thất CSTD và tổn thất CSPK của nhánh ij . P_{ij} và Q_{ij} lần lượt là CSTD và CSPK của nhánh ij truyền đến nút j . P_i^{DG} và Q_i^{DG} lần lượt là CSTD, CSPK bơm vào nút i . P_i^D và Q_i^D công suất tải tại nút i . $|V_i|$, V_{min} và V_{max} lần

lượt là biên độ điện áp, giới hạn nhỏ nhất và lớn nhất của điện áp tại nút thứ i . $|I_{ij}|$ và I_{ij}^{max} lần lượt là cường độ dòng điện và dòng điện lớn nhất của nhánh ij . R_{ij} và X_{ij} là điện trở và điện kháng nhánh ij .

2.2. Mô hình điện gió, điện mặt trời

Căn cứ vào loại của máy phát điện được sử dụng mà tuabin gió chia thành 4 loại cơ bản [22] bao gồm: Double Fed Induction Generators - DFIGs [17], [23], Spiral Case Induction Generators - SCIGs [24], Wound Rotor Synchronous Generators - WRSGs [25] và Permanent Magnet Synchronous Generators - PMSGs [17]. Mặt khác, ngày nay có rất nhiều công nghệ tuabin gió được sử dụng. Các công nghệ này khác nhau về chi phí, độ phức tạp, hiệu quả khai thác năng lượng gió và thiết bị được sử dụng. Theo [17], tuabin gió được chia thành 4 loại cơ bản: (i) Tuabin gió tốc độ cố định (loại 1 - fixed speed), (ii) Tuabin gió biến thiên trượt (loại 2 - variable slip), (iii) Tuabin gió cảm ứng nguồn kép (loại 3 - DFIG) [26], (iv) Tuabin gió nối lưới thông qua bộ biến đổi đầy đủ (loại 4 - full converter). Năng lượng mặt trời là dạng năng lượng thu được từ ánh sáng mặt trời và được chuyển hóa thành điện năng. Nó được khai thác thông qua các tế bào quang điện (Photovoltaic cells - PV). Các kỹ thuật điều khiển hiện đại đã góp phần nâng cao hiệu quả, tính linh hoạt, tiết kiệm và nâng cao hiệu suất năng lượng của điện mặt trời, chẳng hạn như: kỹ thuật theo dõi điểm công suất tối đa (MPPT), kỹ thuật điều khiển biến tần, kỹ thuật quản lý năng lượng và kiểm soát phản hồi, kỹ thuật điều khiển dự báo (MPCC)... [1], [2].

2.3. Mô hình hệ thống lưu trữ năng lượng

Một hệ thống lưu trữ năng lượng dạng pin (BESS) [27] thường bao gồm 3 thành phần chính như sau [15]-[17]: (i) *Mảng pin*: Bao gồm nhiều ắc quy được mắc nối tiếp với nhau thành từng hàng và giữa các hàng mắc song song với nhau để tổ hợp thành một cụm, (ii) *Bộ chuyển đổi công suất*: Là bộ biến đổi điện tử công suất, có chức năng nghịch lưu dòng DC thành AC cho tải hoặc lưới điện hoặc nghịch lưu dòng AC thành DC trong trường hợp sạc dàn ắc quy. Hệ thống này hoạt động dựa trên tín hiệu điều khiển của hệ thống điều khiển và giám sát, (iii) *Hệ thống điều khiển và giám sát*: Là hệ thống cốt lõi của BESS trong việc điều chỉnh điện áp, tần số và thay đổi công suất.

Trạng thái của BESS:

$$SoC_{min} \leq SoC(t) \leq SoC_{max} \quad (6)$$

Trong đó: SoC_{max} trạng thái sạc đầy, tương đương với tổng dung lượng (C_n) lưu trữ định mức và tỉ lệ với tổng số N_b , số lượng dàn pin N_{bs} và công suất pin C_b .

$$C_n = C_b \left(\frac{N_b}{N_{bs}} \right) \quad (7)$$

SoC_{min} là trạng thái năng lượng cho phép thấp nhất của hệ thống lưu trữ năng lượng pin điện hóa.

$$SoC_{min} = (1 - DoD) \cdot SoC_{max} \quad (8)$$

Trong đó: $DoD(\%)$ khả năng phóng điện của pin. Giống với các bộ biến đổi công suất được sử dụng cho DG, bộ biến đổi công suất của BESS cho phép điều khiển CSTD và CSPK ở cả 4 góc phần tư (có thể thu hoặc phát P và Q một cách độc lập) trong giới hạn dòng điện định mức của bộ điện tử công suất.

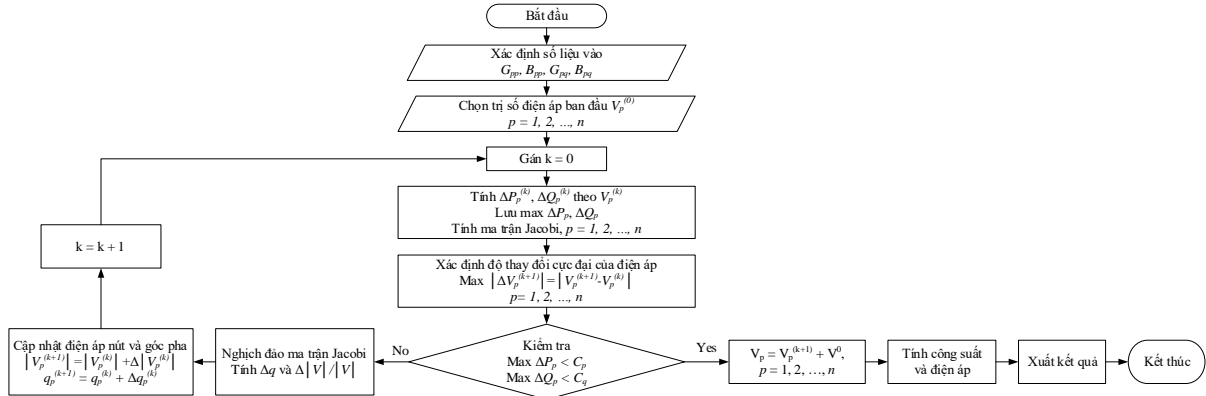
2.4. Mô hình lưới điện siêu nhỏ

Lưới điện siêu nhỏ có thể vận hành một cách tự chủ ở chế độ độc lập hoặc chế độ nối lưới. Trong trường hợp xuất hiện sự cố ở chế độ nối lưới, lưới điện siêu nhỏ sẽ có khả năng tự ngắt kết nối với lưới và tự hoạt động cung cấp công suất cho tải trong lưới điện siêu nhỏ. Thành phần của lưới điện siêu nhỏ bao gồm các tải xoay chiều, một chiều, các nguồn phát phân tán và đặc biệt là hệ thống lưu trữ năng lượng. Từ cấu hình cơ bản, một lưới điện siêu nhỏ sẽ được tích hợp từ nhiều thành phần. Các DG (điện mặt trời, điện gió) được mô hình như các nguồn DC đi kèm với bộ biến đổi công suất (VSC - Voltage-Sourced Converter), các tải của lưới điện siêu nhỏ được mô hình dưới dạng tải RLC, lưới điện siêu nhỏ được nối với lưới thông qua bộ lọc RL, MBA tăng áp và máy cắt đường dây [28]. Máy cắt sẽ mở khi lưới điện siêu nhỏ hoạt động ở chế độ tách đảo, tải RLC được nối ở phía cao áp của MBA và một hệ thống điều khiển được sử dụng để điều khiển VSC. Mô hình lưới điện siêu nhỏ được biểu diễn bằng các

phương trình phi tuyến được trình bày trong [29].

2.5. Tính toán trào lưu công suất

Việc tính toán trào lưu công suất cho LĐPP được thực hiện cho tất cả các trường hợp của bài báo nhằm mục đích xác định các thông số của lưới điện như giá trị và góc pha điện áp tại các nút, tổn thất đường dây của lưới điện và dòng điện trên các nhánh... để có cơ sở đánh giá chất lượng của lưới điện trước và sau khi tích hợp các DG và BESS. Bài báo sử dụng phần mềm MATLAB để lập trình tính toán trào lưu công suất theo phương pháp Newton - Raphson theo lưu đồ thuật toán như Hình 2 cho các trường hợp của kịch bản.

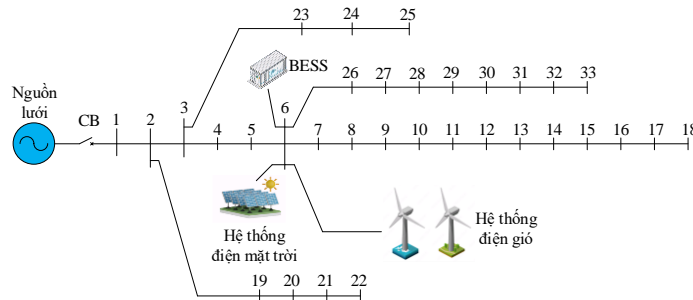


Hình 2. Lưu đồ thuật toán tính toán trào lưu công suất trên LĐPP

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Mô tả hệ thống nghiên cứu

Bài báo sử dụng sơ đồ lưới điện IEEE 33 nút để nghiên cứu như Hình 3. Đây là sơ đồ lưới phân phối hình tia, bao gồm 1 nhánh chính từ nút số 1 đến nút số 18 và 3 nhánh rẽ tại các nút số 2, số 3 và số 6. Tổng công suất của phụ tải của lưới là $P = 3655$ kW và $Q = 2260$ kVAR. Các DG được giả định đầu nối lần lượt tại tất cả các nút của sơ đồ, sau đó được tính toán để xác định vị trí tối ưu, tổn thất và công suất lắp đặt của DG là nhỏ nhất nhưng vẫn đáp ứng các điều kiện ràng buộc về cân bằng công suất của phụ tải, sụt áp thấp nhất và dòng điện trên các nhánh nằm trong giới hạn cho phép. Bên cạnh đó, bài báo nghiên cứu về BESS, được xem như là “trái tim” của LĐPP nói chung và lưới điện siêu nhỏ nói riêng trong việc cân bằng hệ thống khi lưới điện có tích hợp các nguồn DG (điện gió, điện mặt trời). BESS góp phần cân bằng công suất (P, Q) và ổn định điện áp của lưới điện khi các nguồn NLTT có sự dao động và khả năng cung cấp điện liên tục. Ngoài ra, bài báo còn nghiên cứu và đánh giá trường hợp tách đảo của LĐPP và hoạt động như một lưới điện siêu nhỏ độc lập trong khoảng thời gian 3 giờ khi lưới truyền tải gặp sự cố và các nguồn DG ngừng cung cấp điện. Ứng với từng kịch bản, bài báo đề xuất tính toán công suất của BESS để có thể đáp ứng các yêu cầu của bài toán nghiên cứu, qua đó nâng cao hiệu quả vận hành và hệ số sẵn sàng của LĐPP.



Hình 3. Sơ đồ lưới điện IEEE 33 nút có tích hợp các DG và BESS

Việc tính toán trào lưu công suất trên phần mềm MATLAB được thực hiện rất nhiều lần (bằng các chương trình lặp), cụ thể: trước khi tích hợp các DG, trào lưu công suất được tính toán cho tất cả 33 nút lần lượt là nút cân bằng để xác định vị trí tối ưu đặt DG và công suất DG cần thiết để đáp ứng các yêu cầu ràng buộc của lưới điện, sau đó sử dụng phần mềm PSS/Adept để mô phỏng lưới điện trên đó có kết nối các DG tại các vị trí tối ưu và công suất đặt đã được xác định ở bước trên. Căn cứ vào kết quả mô phỏng, bước kế tiếp là tiến hành kiểm tra các điều kiện ràng buộc bằng cách xuất các báo cáo mẫu của chương trình PSS/Adept. Và thực hiện lặp lại các bước trên cho tất cả 48 thời điểm (30 phút/lần) trong vòng 24 giờ của ngày 01/04/2024 theo biểu đồ phụ tải để xác định công suất phát của các DG theo các điều kiện về thời tiết (cường độ bức xạ mặt trời và tốc độ gió) và quá trình hoạt động của BESS. Từ các kết quả mô phỏng, để đáp ứng được các yêu cầu của lưới điện IEEE 33 nút hoạt động trong ngày 01/04/2024, bài báo tiến hành tính toán công suất lắp đặt tối thiểu cần thiết của các nguồn DG và BESS.

Khi tiến hành mô phỏng trên phần mềm PSS/Adept và không tích hợp các nguồn DG thì lưới IEEE 33 nút có đến 18 nút bị sụt áp hơn 5%, đa số bố trí ở cuối các nhánh hình tia. Để cải thiện chất lượng điện áp tại các nút, bài báo đề xuất các kịch bản vận hành với việc tích hợp các nguồn DG và BESS để khắc phục hiện tượng sụt áp, giảm tổn thất công suất và ổn định lưới điện. Trình tự mô phỏng như sau:

Bước 1: Chạy trào lưu công suất và tính toán tổn thất ở chế độ cơ bản (không có DG), sử dụng phần mềm MATLAB và kiểm chứng trên PSS/Adept.

Bước 2: Chạy trào lưu công suất và tính toán tổn thất ứng với các trường hợp nút từ 1 đến 33 lần lượt là nút cân bằng để xác định vị trí tối ưu nhất để đặt các DG. Sử dụng phần mềm MATLAB và kiểm chứng trên PSS/Adept.

Bước 3: Kiểm tra các điều kiện ràng buộc về phân bố công suất, chất lượng điện áp tại các nút và dòng điện trên các đường dây.

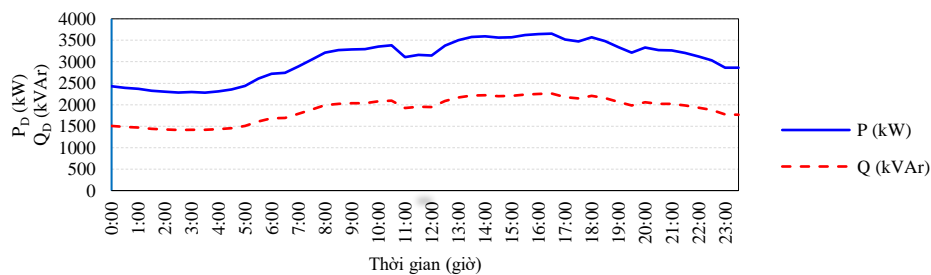
Bước 4: Lựa chọn vị trí đặt các DG có tổn thất CSTD và tổn thất CSPK nhỏ nhất. Đây cũng chính là vị trí đặt BESS.

Bước 5: Tính toán công suất các DG và BESS để đảm bảo cân bằng công suất của toàn bộ lưới và hệ thống đảm bảo vận hành trong chu kỳ 24 giờ của kịch bản.

Bước 6: Chạy trào lưu công suất với lưới 33 nút sau khi đấu nối tất cả các DG và BESS vào lưới tại vị trí đã tối ưu.

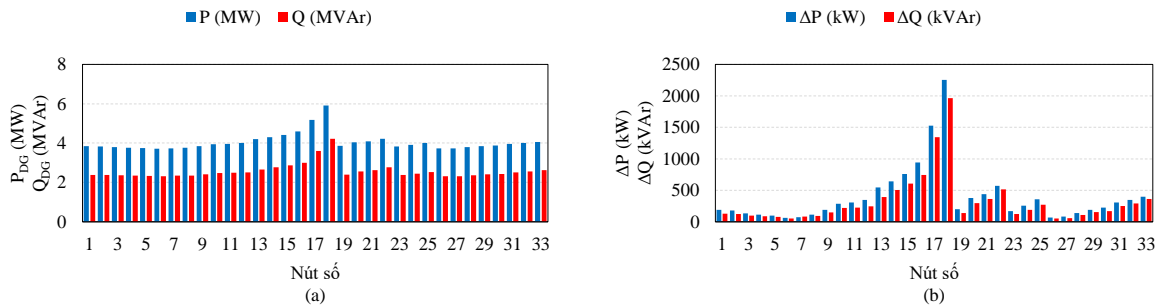
3.2. Kịch bản 1: Chế độ vận hành nối lưới

Đô thị phụ tải của lưới điện IEEE 33 nút được giả lập như một LĐPP ở Việt Nam, nguồn cung cấp lưới được lấy từ phía sau MBA 110/13,8 kV với thời gian vận hành lưới là 24 giờ. Trên lưới IEEE 33 nút sẽ đặt các DG và BESS để cung cấp cho phụ tải của lưới điện. Vị trí đặt và công suất đặt các DG này đảm bảo cân bằng công suất tải, tổn thất công suất là nhỏ nhất, chất lượng điện áp và dòng điện đảm bảo theo yêu cầu. Các dữ liệu sử dụng cho kịch bản này được lấy theo giá trị thực tế ngày 01/04/2024 với biểu đồ phụ tải như Hình 4. Theo dữ liệu của lưới điện IEEE 33 nút thì tổng công suất tải lớn nhất của hệ thống là: $P_{max} = 3655 \text{ kW}$ và $Q_{max} = 2260 \text{ kVar}$. Giả thiết rằng, đây chính là công suất đỉnh của đồ thị phụ tải ngày vào lúc 16:30.



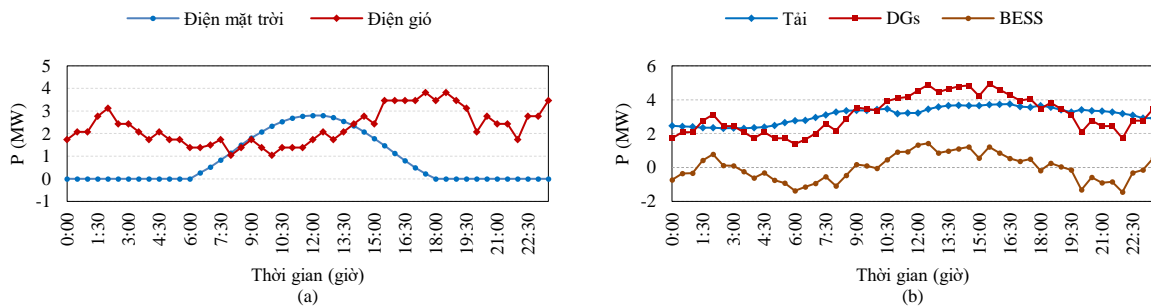
Hình 4. Biểu đồ phụ tải ngày 01/04/2024

Đồ thị phụ tải được lấy từ số liệu phụ tải của hệ thống điện Việt Nam ngày (01/04/2024) và được giả thiết tỷ lệ với lưới IEEE 33 nút trong chu kỳ 24 giờ. Đồ thị phụ tải được vẽ từ 48 thời điểm tương đương 30 phút/lần. Ngoài ra, để thiết lập thông số các nguồn DG, bài báo sử dụng số liệu thực tế thu thập trong ngày 01/4/2024 tại Hà Nội theo trang thông tin thời tiết [30]. Đối với nguồn năng lượng mặt trời, các nguồn phát năng lượng mặt trời trong ngày 01/04/2024 có thời gian hoạt động từ 06:00 đến 18:00, năng lượng mặt trời đạt cực đại 0,76 kW lúc 11:45. Đối với nguồn năng lượng gió, vận tốc gió trong ngày 01/04/2024 được thu thập từ 00:00 đến 23:30. Hệ thống lưu trữ năng lượng được sử dụng trong kịch bản là loại BESS. Từ kết quả tính toán và mô phỏng ta thấy, tại vị trí nút số 6 là vị trí tối ưu để đặt DG và hệ thống lưu trữ năng lượng, vì công suất đặt các DG tại các nút (như Hình 5a) và tổn thất trên toàn lưới điện tương ứng với công suất đặt của các nguồn phân tán (như Hình 5b) là nhỏ nhất mà vẫn thỏa mãn các điều kiện giới hạn về điện áp tại các nút và dòng điện trên các nhánh.



Hình 5. (a) Công suất phát DG tại các nút; (b) Tổn thất công suất ứng với công suất DG lắp đặt tại các nút

Đối với kịch bản 1 thì lưới IEEE 33 nút vẫn sẽ được duy trì kết nối với nguồn lưới tại nút 1, giữ vai trò là nút cân bằng, ta đặt nguồn năng lượng phân tán vào vị trí nút 6 (vai trò như là nút PV), với công suất đặt đã được tính toán và tối ưu ở bước trên. Để đáp ứng công suất cho nhu cầu phụ tải toàn lưới điện trong vòng 24 tiếng (với 48 thời điểm thu thập dữ liệu), ta thay đổi công suất tại các nút và tiến hành chạy trào lưu công suất cho tất cả các trường hợp thay đổi công suất để xác định công suất phát của nguồn điện mặt trời và điện gió tối ưu tại nút 6 như Hình 6a để đáp ứng lưới trong vòng 24 giờ.



Hình 6. (a) Biểu đồ công suất phát của DG; (b) Biểu đồ phân bố công suất lưới IEEE 33 nút

Công suất của các DG và hệ thống lưu trữ năng lượng được xác định dựa trên kết quả tính toán mô phỏng ở bảng trên và các lập luận về điều kiện vận hành của các nguồn năng lượng gió và mặt trời để đáp ứng nhu cầu công suất của lưới. Theo kịch bản 1 để đảm bảo yêu cầu phụ tải trong 24 giờ thì bài báo đã xác định công suất của các DG như sau: Nguồn năng lượng mặt trời: 2,8 MW; nguồn năng lượng gió: 3,82 MW; Hệ thống lưu trữ năng lượng: 2,5 MVA (chi tiết như Bảng 1).

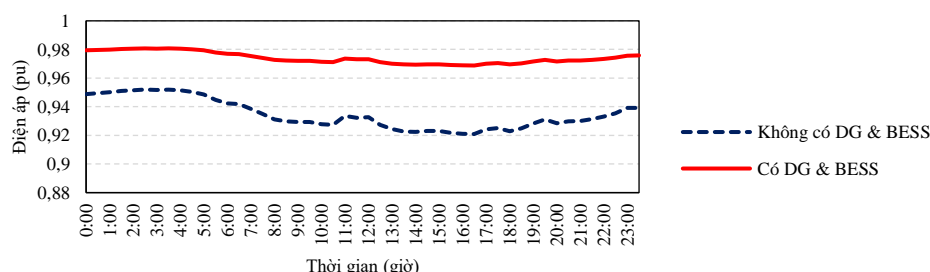
Bảng 1. Lựa chọn BESS 2C-CAB-690V (kịch bản 1)

kVA \ kWh	4888	5703	6517	7332	8147	8961	9776	10591	11406	12220	13035
2000	2,3 h	2,6 h	3,0 h	3,4 h	3,8 h	4,2 h					
2500		2,1 h	2,4 h	2,7 h	3,0 h	3,3 h	3,6 h	4,0 h			
3000			2,0 h	2,3 h	2,5 h	2,8 h	3,0 h	3,3 h	3,5 h	3,8 h	4,1 h

Khi lưới điện siêu nhỏ có sự tham gia của các DG là các dạng NLTT (gió, mặt trời...) thì hệ thống lưu trữ năng lượng đóng vai trò quan trọng để duy trì hệ thống ổn định khi có sự dao động về công suất phát do ảnh hưởng các điều kiện thời tiết, khí hậu... Đề cập trong bài báo này, hệ thống lưu trữ năng lượng sẽ hoạt động trong phạm vi dung lượng từ 20% đến 100% tương ứng với các giới hạn nạp (charging) và xả (discharging) của ắc quy. Hệ thống này sẽ được điều khiển nạp và xả để cân bằng công suất giữa nguồn phát và tải, cũng như ổn định điện áp lưới điện khi tham gia phát CSPK lên lưới trong các trường hợp cụ thể để giảm thiểu tổn thất của lưới điện. BESS trong bài báo sẽ nạp khi công suất phát các DG lớn hơn nhu cầu của phụ tải và sẽ phát công suất ngược lên lưới để bù phần công suất thiếu của các nguồn khác.

Các DG trong kịch bản 1 chủ yếu phát CSTD vì nút số 1 là nút cân bằng nên các nút có tích hợp DG (nút PV) chỉ đáp ứng cân bằng CSTD của lưới và đảm bảo điện áp nút (13,8 kV) dẫn đến việc phát CSPK bị hạn chế. Trào lưu CSPK của lưới trong kịch bản này vẫn được nhận từ lưới truyền tải và đi vào lưới từ nút số 1. Đối với kịch bản 1, bài báo tập trung vào tính toán và tối ưu phát CSTD của các DG, lượng CSPK sẽ được bổ sung và đáp ứng từ lưới truyền tải. Công suất của hệ thống lưu trữ năng lượng cũng được tính toán và lựa chọn để nạp (charging) và xả (discharging) CSTD để đáp ứng nhu cầu phụ tải cùng với các nguồn phát năng lượng mặt trời và gió. Công suất hệ thống này sẽ được tính toán lại trong kịch bản 2, khi chúng tham gia vào việc phát CSPK để ổn định lưới điện. Kết quả tính toán biểu đồ phân bố công suất của kịch bản 1 được thể hiện như hình Hình 6b.

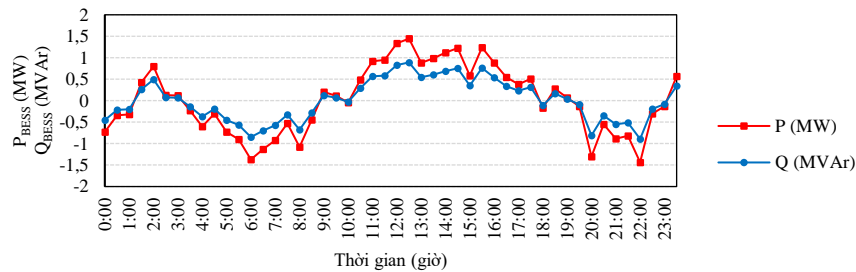
Bên cạnh các kết quả về tổn thất công suất của kịch bản 1 được thể hiện như trên, điện áp tại các nút trên lưới điện cũng được phân tích và đánh giá trong trường hợp này. Căn cứ trên sơ đồ cấu trúc và thông số của lưới điện IEEE 33 nút thì nút 33 là nút có điện áp thấp nhất trong các trường hợp nghiên cứu của bài báo này. Do đó, trong mục này kết quả điện áp nút 33 được thiết lập của kịch bản 1 trong hai trường hợp là không có DG & BESS và có DG & BESS như Hình 7. Trong trường hợp không có DG & BESS thì điện áp nút 33 trong vòng 24 giờ được thể hiện như đường màu đen nét đứt có điện áp thấp nhất vào giờ cao điểm lúc 16:30 là 0,921 pu và có điện áp cao nhất vào giờ thấp điểm lúc 2:30 là 0,952 pu. Như vậy trong khoảng thời gian từ 5:00 đến 24:00, điện áp nút 33 thấp hơn điện áp cực tiểu $V_{min} = 0,95$ pu. Tuy nhiên trong trường hợp có DG & BESS lắp đặt tại nút 6 thì điện áp của hầu hết các nút trên lưới điện được cải thiện. Trên Hình 7, đường màu đỏ nét liền thể hiện cho điện áp của nút 33 trong vòng 24 giờ. Rõ ràng giá trị điện áp của nút 33 vào giờ cao điểm lúc 16:30 là 0,969 pu và vào giờ thấp điểm lúc 2:30 là 0,981 pu. Điều này cho thấy rằng khi lắp đặt DG và BESS thì điện áp tại các nút trong lưới điện IEEE 33 nút đảm bảo nằm trong phạm vi cho phép $0,95 \text{ pu} \div 1,05 \text{ pu}$.



Hình 7. Kết quả điện áp tại nút 33 của kịch bản 1

3.3. Kịch bản 2: Chế độ vận hành tách đảo

Tương tự như kịch bản 1, tuy nhiên trên lưới điện IEEE 33 nút có thể hoạt động độc lập khi gặp sự cố trên lưới truyền tải, máy cắt đầu nguồn sẽ cắt ra và lưới điện sẽ hoạt động tách đảo như một lưới điện siêu nhỏ (chế độ vận hành tách đảo). Các DG trên lưới và BESS sẽ được tính toán và phân bố để lưới điện hoạt động bình thường cho đến khi lưới truyền tải được khôi phục trở lại. Đối với kịch bản 2, trong trường hợp máy cắt tại nút số 1 cắt ra, lưới IEEE 33 nút hoạt động như một lưới điện siêu nhỏ (chế độ vận hành tách đảo) thì BESS và các nguồn DG sẽ đảm nhiệm vai trò phát CSTD và CSPK để cân bằng lưới và đáp ứng các điều kiện về ổn định tần số, điện áp và dòng điện để lưới hoạt động bình thường. Như vậy vấn đề cần phải được giải quyết khác với kịch bản này là phát CSPK của các DG và hệ thống lưu trữ năng lượng. Trong trường hợp lưới điện IEEE 33 nút trở thành một lưới điện siêu nhỏ thì công suất phát P , Q và các tổn thất đều giảm so với kịch bản 1. Tuy nhiên trong trường hợp này, công suất của BESS cũng như công suất các DG bắt buộc phải lớn hơn vì phải cung cấp CSPK cho phụ tải hoặc phải lắp đặt các hệ thống thiết bị bù CSPK cho lưới điện. Và giả lập của kịch bản 2 là BESS có thể duy trì hoạt động bình thường của lưới điện siêu nhỏ trong vòng 3 giờ khi xảy ra sự cố làm nhảy máy cắt đường dây truyền tải.



Hình 8. Quá trình hoạt động của hệ thống BESS

Việc tính toán công suất phát cho các DG sẽ bao gồm 2 thành phần là CSTD và CSPK sẽ phải đảm bảo hệ số công suất làm việc trong chế độ liên tục và dài hạn là $\cos\phi = 0,85$. Trong trường hợp vẫn thiếu CSPK, lưới điện sẽ được tích hợp thêm các tụ bù để cung cấp cho tải và ổn định điện áp của lưới điện. Như lập luận ở kịch bản 1, các nguồn DG và BESS sẽ được lắp đặt tại cùng một vị trí tối ưu là nút 6 để đơn giản hóa bài toán mô phỏng. Ta giả thiết các nguồn DG (bao gồm điện mặt trời và điện gió) sẽ có hệ số công suất phát $\cos\phi = 0,85$ để cung cấp CSTD và CSPK cho lưới. Như vậy công suất BESS sẽ được tính toán để đảm bảo lưới điện hoạt động trong 2 điều kiện vận hành: một là phát P và Q hoặc tiêu thụ P và Q như Hình 8; hai là sẽ duy trì lưới trong vòng 3 giờ (phát P và Q) khi trong trường hợp sự cố. Với giả thiết rằng tổn thất các thành phần của BESS (ví dụ: inverter, ắc quy...) là không đáng kể.

Trong trường hợp lưới điện ở chế độ vận hành tách đảo, đồng thời các nguồn DG không hoạt động (trường hợp xấu nhất), ta xét trường hợp tại thời điểm tải lớn nhất là lúc 16:30 với công suất yêu cầu cho lưới là $P_{Gen} = 3,72$ MW và $Q_{Gen} = 2,311$ MVar ($S_{Gen} = 4,4$ MVA). Tương đương với năng lượng trong 3 giờ là: 11,16 MWh. Để đáp ứng được công suất trên ($S_{Gen} = 4,4$ MVA và năng lượng cần là 11,16 MWh) ta chọn 2 bộ BESS có thông số như Bảng 2.

Bảng 2. Lựa chọn BESS 2C-CAB-690V (kịch bản 2)

kVA \ kWh	4888	5703	6517	7332	8147	8961	9776	10591	11406	12220	13035
2000	2,3 h	2,6 h	3,0 h	3,4 h	3,8 h	4,2 h					
2500		2,1 h	2,4 h	2,7 h	3,0 h	3,3 h	3,6 h	4,0 h			
3000			2,0 h	2,3 h	2,5 h	2,8 h	3,0 h	3,3 h	3,5 h	3,8 h	4,1 h

Hai bộ BESS này có tổng công suất là $S_{total} = 4,5$ MVA. $E_{pin} = 14,664$ MWh với SoC làm việc từ 20% - 100%. Bộ BESS có công suất 2500 kVA sẽ được nối lưới liên tục để vận hành trong kịch bản 1, riêng bộ BESS có công suất 2000 kVA sẽ được hệ thống quản lý năng lượng (Energy Management System - EMS) điều khiển để nối lưới khi vận hành ở chế độ tách đảo (như kịch bản 2). Từ các số liệu

tính toán và lập luận bên trên, công suất của các DG và BESS sẽ là: Nguồn năng lượng mặt trời: 3,3 MVA ($\cos\varphi = 0,85$); nguồn năng lượng gió: 4,5 MVA ($\cos\varphi = 0,85$); Hệ thống BESS: 4,5 MVA (2 bộ BESS loại 2C-CAB-690V) (chi tiết như Bảng 2).

Qua kết quả mô phỏng và phân tích đánh giá đối với hai kịch bản ở trên, một vài nhận xét và bình luận được đưa ra như sau:

- Đối với kịch bản vận hành 1, khi đặt các DG và BESS vào nút số 6 thì chất lượng điện áp đã cải thiện rõ rệt. Trước khi đặt DG và BESS thì điện áp tại nút số 33 vào giờ cao điểm lúc 16:30 là 0,921 pu (tương đương 7,9%). Sau khi đặt các DG & BESS vào thì điện áp tại nút 33 giờ cao điểm lúc 16:30 là 0,969 pu, tương đương 3,1% và các kết quả điện áp tại các nút đều nằm trong giới hạn cho phép. Bên cạnh đó, tổn thất công suất trong lưới cũng giảm đáng kể. Trước khi đặt DG và BESS thì tổn thất $\Delta P = 192,208$ kW và $\Delta Q = 128,376$ kVAR. Sau khi đặt các DG và BESS vào thì tổn thất $\Delta P = 89,735$ kW và $\Delta Q = 65,637$ kVAR.

- Đối với kịch bản vận hành 2, chế độ vận hành tách đảo thì nút 6 đóng vai trò là nút cân bằng trong lưới điện ở kịch bản này do vậy điện áp của các nút từ nút 7 đến nút 18 và các nút từ nút 26 đến nút 33 không thay đổi gì so với kịch bản 1 có lắp đặt DG và BESS. Chỉ có điện áp của các nút còn lại (từ nút 1 đến nút 5, từ nút 19 đến nút 22 và từ nút 23 đến 25) thì mới có sự thay đổi nhẹ bởi vì có sự đảo ngược trào lưu công suất từ nguồn DG và BESS cấp điện đến các tải tại các nút này so với kịch bản 1. Tuy nhiên, kết quả mô phỏng và phân tích cho thấy rằng 100% điện áp tại các nút trong lưới IEEE 33 nút ở kịch bản 2 vận hành tách đảo đều nằm trong giới hạn cho phép. Thêm vào đó, tổng tổn thất công suất trong toàn lưới điện của kịch bản 2 chế độ tách đảo là $\Delta P = 65$ kW và $\Delta Q = 50,8$ kVAR.

- Đối với cả hai kịch bản, BESS được áp dụng để phân tích và đánh giá dưới góc nhìn kỹ thuật. Rõ ràng, BESS đã góp phần giải quyết các vấn đề kỹ thuật trong việc cân bằng công suất, điều chỉnh điện áp của lưới điện trong trường hợp dư thừa lượng công suất từ các nguồn DG. Nếu xảy ra sự cố nguồn lưới thì nhờ có BESS sẽ kích hoạt chế độ vận hành tách đảo để tiếp tục duy trì sự cung cấp điện cho các phụ tải trong một khoảng thời gian nhất định.

4. Kết luận

Bài báo đã nghiên cứu ứng dụng hệ thống lưu trữ năng lượng dạng pin (BESS) trong việc nâng cao hiệu quả vận hành và duy trì quá trình cung cấp điện cho lưới điện phân phối (LĐPP) có tích hợp các nguồn điện phân tán (DG). Phương pháp lựa chọn vị trí lắp đặt các nguồn DG theo hàm mục tiêu tổng tổn thất công suất trong lưới điện là bé nhất. Từ đó công suất của BESS được tính toán và lựa chọn vị trí lắp đặt phù hợp để góp phần điều chỉnh điện áp và cân bằng công suất trong trường hợp dư thừa công suất từ các nguồn DG hoặc sự cố nguồn lưới để dẫn đến chế độ vận hành tách đảo. Lưới điện IEEE 33 nút được lựa chọn để nghiên cứu trong bài báo này. Vị trí và dung lượng của BESS loại 2C-CAB-690V được lựa chọn và lắp đặt trên lưới để khảo sát hai kịch bản bao gồm kịch bản vận hành nối lưới và kịch bản vận hành tách đảo. Kết quả mô phỏng cho thấy rằng, nhờ có BESS duy trì lưới điện làm việc ổn định và trong trường hợp nguy hiểm nhất là mất nguồn lưới và giả định các nguồn DG không hoạt động thì lưới điện vẫn có thể duy trì làm việc trong suốt khoảng thời gian 3 giờ.

Hạn chế của bài báo này là chỉ đề cập đến yếu tố kỹ thuật, không đề cập đến yếu tố kinh tế thị trường và giá điện theo tính chất giờ cao điểm, thấp điểm nhưng cũng chứng minh được cách bố trí tối ưu các nguồn DG và BESS một cách tối ưu để mang lại hiệu quả kinh tế. Chính vì vậy, hướng nghiên cứu tiếp theo là thiết lập mô hình bài toán tổng quát nhằm phân tích đánh giá hiệu quả kinh tế đầu tư BESS cho các LĐPP khi có tích hợp các nguồn DG. Thêm vào đó, để mang lại hiệu quả kinh tế cho lưới điện hơn nữa, công tác dự báo phụ tải, dự báo thời tiết trong thời gian ngắn hạn hoặc dài hạn kết hợp với hệ thống điều khiển thông minh EMS sẽ giúp ích rất nhiều trong việc vận hành và điều khiển các nguồn DG và BESS trong LĐPP một cách hiệu quả.

Lời cảm ơn

Công trình này là một phần nội dung Luận văn Thạc sĩ Kỹ thuật điện, Trường Đại học Quy Nhơn của học viên Nguyễn Duy Quang dưới sự hướng dẫn khoa học của PGS.TS. Ngô Minh Khoa.

Xung đột lợi ích

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

Tuyên bố dữ liệu sẵn có

Dữ liệu hỗ trợ cho các khám phá của nghiên cứu này khi độc giả yêu cầu một cách hợp lý sẽ được tác giả liên hệ cung cấp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] H. Yatimi and E. H. Aroudam, "A detailed study and modeling of photovoltaic module under real climatic conditions," *International Journal of Electronics Electrical Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 171-176, 2015.
- [2] K. Boucenna, T. Sebbagh, and N. E. Benchouia, "Modeling, Optimization, and Techno-Economic Assessment of a Hybrid System Composed of Photovoltaic-Wind-Fuel Cell and Battery Bank," *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 56, no. 1, p. 29, 2023.
- [3] S. O. Ayanlade, A. Jimoh, E. I. Ogunwole, A. B. Jimoh, and S. O. Ezekiel, "Mathematical modelling of the distribution network for three-phase power flow analysis," in *AIP Conference Proceedings*, 28 September 2023, vol. 2872, no. 1: AIP Publishing.
- [4] M. Mahdavi, H. H. Alhelou, N. D. Hatzargyriou, and A. Al-Hinai, "An efficient mathematical model for distribution system reconfiguration using AMPL," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 79961-79993, 2021.
- [5] L. T. H. Nhung, T. T. Phung, N. H. M. Vu, H. T. N. Thuong, and N. T. M. Sa, "Impact of the Charging Station on the Quality of Voltage and Frequency in the Microgrid," *Journal of Technical Education Science*, vol. 19, no. S102, pp. 77-89, 2024.
- [6] M. S. Mahmoud, S. A. Hussain, and M. A. Abido, "Modeling and control of microgrid: An overview," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 351, no. 5, pp. 2822-2859, 2014.
- [7] M. Moradian, F. M. Tabatabaei, and S. Moradian, "Modeling, control & fault management of microgrids," *Smart Grid and Renewable Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 99-112, 2013.
- [8] M. Al-Saadi, M. Al-Greer, and M. J. E. Short, "Strategies for controlling microgrid networks with energy storage systems: A review," *Energies*, vol. 14, no. 21, p. 7234, 2021.
- [9] Q. Ma, W. Wei, X. Chen, and S. Mei, "The admissible set of parameters guaranteeing small-signal stability of a microgrid," *IET Renewable Power Generation*, vol. 16, no. 13, pp. 2721-2731, 2022.
- [10] I. Bennis, Y. Daili, A. Harrag, H. Alrajhi, A. Saim, and J. M. Guerrero, "Stability and Reactive Power Sharing Enhancement in Islanded Microgrid via Small-Signal Modeling and Optimal Virtual Impedance Control," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 2024, no. 1, p. 5469868, 2024.
- [11] A. El Sayed, G. Poyrazoglu, and E. E. Ahmed, "An integrated framework for techno-enviro-economic assessment in nanogrids," *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 13, no. 2, pp. 340-350, 2024.
- [12] M. Noussan, "Economics of Electricity Battery Storage," in *The Palgrave Handbook of International Energy Economics*: Springer International Publishing Cham, 2022, pp. 235-253.
- [13] O. Pupo-Roncallo, D. Ingham, and M. Pourkashanian, "Techno-economic benefits of grid-scale energy storage in future energy systems," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 242-248, 2020.
- [14] S.-S. Shin, J.-S. Oh, S.-H. Jang, J.-H. Cha, and J. E. Kim, "Active and reactive power control of ESS in distribution system for improvement of power smoothing control," *Journal of Electrical Engineering Technology*, vol. 12, no. 3, pp. 1007-1015, 2017.
- [15] S. Akagi *et al.*, "Capacity determination of a battery energy storage system based on the control performance of load leveling and voltage control," *Journal of International Council on Electrical Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 94-101, 2016.
- [16] Z. Zulkifly, S. H. Yusoff, N. L. Tumeran, and N. S. I. Razali, "Battery Energy Storage System (BESS) Modeling for Microgrid," *IJUM Engineering Journal*, vol. 24, no. 1, pp. 57-74, 2023.
- [17] J. T. Gao, C. H. Shih, C. W. Lee, and K. Y. Lo, "An active and reactive power controller for battery energy storage system in microgrids," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 10490-10499, 2022.
- [18] M. E. Akdogan and S. Ahmed, "Energy storage system (ESS) for compensating unbalanced multi-microgrids using modified reverse droop control," in *2021 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2021, pp. 955-961: IEEE.
- [19] C. Eyisi, A. S. Al-Sumaiti, K. Turitsyn, and Q. Li, "Mathematical models for optimization of grid-integrated energy storage systems: a review," in *2019 North American Power Symposium (NAPS)*, 2019, pp. 1-5: IEEE.
- [20] O. M. A. A. Mansour, "Determining the Power and Energy Capacity of a Battery Energy Storage System Utilizing a Smoothing Feeder Profile to Accommodate High Photovoltaic Penetration on a Distribution Feeder," Portland State University, 2016.
- [21] M. Symeonidou and A. M. Papadopoulos, "Selection and dimensioning of energy storage systems for standalone communities: a review," *Energies*, vol. 15, no. 22, p. 8631, 2022.
- [22] C. Chong, A. Rigit, and I. Ali, "Wind turbine modelling and simulation using Matlab/SIMULINK," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1101, no. 1, p. 012034: IOP Publishing.
- [23] S. Muller, M. Deicke, and R. W. De Doncker, "Doubly fed induction generator systems for wind turbines," *IEEE Industry applications magazine*, vol. 8, no. 3, pp. 26-33, 2002.
- [24] J. Luis and D. Garcia, "Modeling and control of squirrel cage induction generator with full power converter applied to windmills," University OULU, 2009.
- [25] D. Y. Kwon, T. K. Bang, C. W. Kim, K. H. Shin, and J. Y. Choi, "Experimental verification and electromagnetic characteristics analysis of wound-rotor synchronous generator using magnetic equivalent circuit method," *AIP Advances*, vol. 10, no. 1, 2020.
- [26] Y. Lei, A. Mullane, G. Lightbody, and R. Yacimini, "Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies," *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 21, no. 1, pp. 257-264, 2006.
- [27] R. A. Biroon, P. Pisu, and D. Schoenwald, "Inter-Area Oscillation Damping via Hybrid LQR State Feedback Control of Large-Scale Battery," in *2020 52nd North American Power Symposium (NAPS)*, 2021, pp. 1-6: IEEE.
- [28] T. T. Teo, T. Logenthiran, W. L. Woo, and K. Abidi, "Advanced control strategy for an energy storage system in a grid-connected microgrid with renewable energy generation," *IET Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 96-103, 2018.
- [29] H. Karimi, H. Nikkhajoei, and R. Iravani, "Control of an electronically-coupled distributed resource unit subsequent to an islanding event," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 1, pp. 493-501, 2007.

- [30] *The Weather Year Round Anywhere on Earth*. Available: <https://weatherspark.com/h/d/116009/2024/4/1/Historical-Weather-on-Monday-April-1-2024-in-Hanoi-Vietnam>



Nguyen Duy Quang was born in Vietnam in 1984. He received the B.E. degree in Mechanical Engineering from Ho Chi Minh City University of Technology, Vietnam National University, Ho Chi Minh City, in 2007. He currently working toward the M.S. degree in Electrical Engineering at Quy Nhon University, Vietnam. His current research interests include smart grids, renewable energies.

Email: duyquangqn@yahoo.com

ORCID:  <https://orcid.org/0009-0004-7638-4757>



Ngô Minh Khoa was born in Vietnam in 1983. He received the B.Sc., M.Sc., and Ph.D. degrees in Electrical Engineering from University of Science and Technology, The University of Danang, Danang City, Vietnam, in 2006, 2010, and 2017, respectively. He became an associate professor in January 2024. He joined Quy Nhon University, Quy Nhon city, Vietnam in 2006, where he is currently a senior lecturer at Faculty of Engineering and Technology. His research interests include power quality, fault location, smart grid, and power system stability.

Email: ngominhkhoa@qnu.edu.vn

ORCID:  <https://orcid.org/0000-0003-3104-1692>