

MINIMIZING BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM COST IN THE ELECTRICITY MARKET FOR VOLTAGE REGULATION APPLICATION IN THE POWER DISTRIBUTION SYSTEM

Nguyen Thi Anh^{1*}, Nguyen Van Hanh², Duong Minh Khanh³

¹School of Electrical and Electronic Engineering - Hanoi University of Science and Technology

²Nghi Son 2 Power Limited Liability Company, ³Northern Region Load Dispatch Centre

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 15/10/2023	High photovoltaic penetration in the distribution network can cause voltage violations due to reverse power flow. This paper proposes a method by using battery energy storage system (BESS) for solving this problem and achieving minimum cost. This cost is expressed through an objective function, which takes into account the cost of capacity loss and the cost of buying and selling electricity. In which, electricity prices are under market conditions and vary by time of day. The optimization problem results determine the nominal capacity of BESS and the optimal operation schedule. Simulations have implemented through MATLAB 2016a software and MATPOWER 7.1, which demonstrated the voltage regulation capabilities of BESS. With the operating schedule obtained from the simulation results, the grid voltage problem has been solved while achieving the lowest cost for BESS. The simulation changes the BESS installation location on the power grid, thereby proving that the economic efficiency of the method is also different for different installation locations.
Revised: 23/11/2023	
Published: 24/11/2023	
KEYWORDS	
Photovoltaic	
BESS	
Distribution network	
Electricity market	
Optimization	

CỰC TIỂU HÓA CHI PHÍ HỆ THỐNG ẮC QUY LƯU TRỮ NĂNG LƯỢNG CHO ỨNG DỤNG ĐIỀU CHỈNH ĐIỆN ÁP LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI TRONG ĐIỀU KIỆN VẬN HÀNH THỊ TRƯỜNG ĐIỆN CẠNH TRANH

Nguyễn Thị Anh^{1*}, Nguyễn Văn Hạnh², Dương Minh Khánh³

¹Trường Điện – Điện tử - Đại học Bách khoa Hà Nội, ²Công ty Trách nhiệm hữu hạn Điện Nghi Sơn 2,

³Trung tâm Điều độ Hệ thống điện Miền Bắc

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 15/10/2023	Mức độ xâm nhập cao của điện mặt trời vào lưới điện phân phối có thể gây ra hiện tượng quá điện áp do dòng công suất ngược. Bài báo này đề xuất giải pháp sử dụng hệ thống ắc quy lưu trữ năng lượng (Battery Energy Storage System, BESS) nhằm giải quyết vấn đề này và mục đích tối thiểu hóa chi phí cho BESS. Trong đó, chi phí này được biểu diễn qua một hàm mục tiêu bao gồm các thành phần chi phí cho tổn thất dung lượng và chi phí mua – bán điện. Giá điện thay đổi trong ngày và chịu ảnh hưởng của thị trường điện. Bài toán tối ưu được giải nhằm xác định dung lượng danh định và lịch vận hành tối ưu cho BESS. Các mô phỏng được thực hiện thông qua phần mềm MATLAB 2016a và thư viện MATPOWER 7.1 đã chứng minh được hiệu quả điều chỉnh điện áp của BESS. Với lịch vận hành thu được từ kết quả mô phỏng, vấn đề điện áp lưới điện đã được giải quyết đồng thời đạt được mức chi phí cho BESS thấp nhất. Mô phỏng cũng tiến hành thay đổi vị trí lắp đặt BESS trên lưới điện, từ đó chứng minh được hiệu quả kinh tế của phương pháp cũng khác nhau ứng với các vị trí lắp đặt khác nhau.
Ngày hoàn thiện: 23/11/2023	
Ngày đăng: 24/11/2023	
TỪ KHÓA	
Điện mặt trời	
BESS	
Lưới phân phối	
Thị trường điện	
Tối ưu hóa	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.8984>

* Corresponding author. Email: anh.nguyenthi@hust.edu.vn

1. Giới thiệu

Nhằm đạt được các mục tiêu về an ninh năng lượng cũng như giảm khí phát thải, công nghệ phát điện bằng năng lượng mặt trời đã dần trở nên phổ biến. Đến cuối năm 2022, công suất lắp đặt các nguồn năng lượng tái tạo trên toàn cầu đạt 3382 GW, trong đó năng lượng mặt trời chiếm 31%, đạt mức 1061 GW và cung cấp 1033926 GWh điện năng trong năm 2022 [1]. Sự gia tăng của nguồn năng lượng này đã góp phần đáp ứng sự tăng trưởng của phụ tải. Tuy nhiên, do đặc điểm công suất phát phụ thuộc vào thời tiết nên sự gia tăng của điện mặt trời cũng gây ra những ảnh hưởng không mong muốn đến lưới điện [2]. Nhằm giải quyết các vấn đề này, việc lắp đặt hệ thống BESS là một giải pháp mang tính linh hoạt cao và có thể áp dụng.

Đã có nhiều nghiên cứu về ứng dụng BESS trong hệ thống điện. Đối với lưới điện siêu nhỏ, BESS đóng một vai trò quan trọng, được sử dụng với mục đích điều chỉnh tần số và làm nguồn dự phòng nóng [3]. Trong nghiên cứu [4], chiến lược vận hành BESS bằng lô-gic mờ được đề xuất nhằm giải quyết vấn đề điện áp trong lưới điện siêu nhỏ. Hai yếu tố được sử dụng bởi lô-gic mờ là độ lệch điện áp và trạng thái sạc của ắc quy. Chiến lược đề xuất đã chứng minh được hiệu quả điều chỉnh điện áp trên lưới điện được mô phỏng. Trong bài báo [5], thuật toán tối ưu được đề xuất nhằm lập kế hoạch vận hành BESS trong một ngày với mục tiêu làm giảm công suất đỉnh của phụ tải. Bên cạnh đó, những nghiên cứu, phân tích kinh tế với giải pháp sử dụng BESS cũng được thực hiện. Nghiên cứu [6] đã nghiên cứu ảnh hưởng của dung lượng BESS và chiến lược vận hành nhằm tối thiểu hóa chi phí hoặc tối đa hóa giá trị hiện tại thuần (NPV) của dự án điện mặt trời nối lưới. Trong khi đó, nghiên cứu [7] đã xây dựng chiến lược bán buôn điện cho BESS trong thị trường điện nhằm nâng cao lợi nhuận. Cùng với mục đích nâng cao lợi nhuận do BESS mang lại, bài báo [8] đã xây dựng mô hình nhằm dự báo giá điện trên thị trường. Nghiên cứu [9] đặt ra và giải quyết bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu với việc đảm bảo lợi ích khi BESS tham gia thị trường điện, đồng thời tham gia vào thị trường dịch vụ phụ trợ.

Bài báo này đề xuất giải pháp sử dụng BESS nhằm giải quyết hiện tượng quá điện áp do dòng công suất ngược trên lưới điện và cực tiểu hóa chi phí trong điều kiện vận hành thị trường điện cạnh tranh. Hai yếu tố được sử dụng để đánh giá là: chi phí cho suy hao dung lượng ắc quy và lợi nhuận do BESS mang lại khi tận dụng sự thay đổi về giá điện trong ngày trong quá trình sạc/xả. Mục đích của bài toán tối ưu được đặt ra là xác định dung lượng danh định cho BESS và lịch vận hành tối ưu trong một ngày. Bài báo được trình bày gồm bốn phần. Phần một nêu lên tính cần thiết của việc sử dụng BESS khi hệ thống điện có tỉ trọng năng lượng mặt trời cao và các nghiên cứu liên quan. Phần hai trình bày về mô hình bài toán vận hành tối ưu và phương pháp giải. Mô phỏng được thực hiện trên lưới điện 15 nút với các dữ liệu thu thập từ thực tế nhằm kiểm chứng giải pháp đề xuất, được trình bày trong phần ba. Các mô phỏng được thực hiện bao gồm xác định dung lượng danh định, lịch vận hành tối ưu của BESS và đánh giá ảnh hưởng của vị trí lắp đặt tới kết quả bài toán. Phần thứ tư trình bày kết luận và hướng nghiên cứu tiếp theo.

2. Phương pháp nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, mô hình lão hóa tuyến tính của ắc quy và mô hình BESS khi vận hành trong thị trường điện cạnh tranh sẽ được xem xét đồng thời nhằm tìm lời giải cho bài toán vận hành tối ưu khi BESS được sử dụng để giải quyết vấn đề điện áp trong lưới điện có sự thâm nhập cao của điện mặt trời.

2.1. Mô hình BESS được sử dụng trong bài toán tối ưu

2.1.1. Mô hình lão hóa tuyến tính

Trong mô hình này, quá trình lão hóa được đo lường thông qua sự suy giảm dung lượng ắc quy. Theo mô hình này, dung lượng ắc quy được giả sử giảm tuyến tính trong quá trình xả dựa trên một hệ số suy giảm [10] - [12]. Mô hình này được đề xuất thông qua kết quả thực nghiệm được tiến hành bởi viện nghiên cứu INES.

Dung lượng suy hao có thể được tính theo công thức (1):

$$\Delta C = Z * C_{B, nom} * (SOC_{bf} - SOC_{af}) \quad (1)$$

Trong đó:

- ΔC là dung lượng suy hao của ắc quy (Wh hoặc Ah)
- Z là hệ số suy hao tuyến tính, được cung cấp bởi nhà sản xuất hoặc qua thí nghiệm
- $C_{B, nom}$ dung lượng định mức của ắc quy
- SOC_{bf} là mức năng lượng trước khi xả
- SOC_{af} là mức năng lượng sau khi xả

Ưu điểm của mô hình này là nó có thể tính được độ suy hao tùy theo mức độ hoạt động của ắc quy. Do đó, mô hình này sẽ được sử dụng nhằm đánh giá kinh tế trong vận hành hệ thống BESS.

2.1.2. Mô hình BESS trong vận hành thị trường điện cạnh tranh

Sự chuyển dịch từ thị trường điện truyền thống sang thị trường điện cạnh tranh là xu thế phát triển của ngành hệ thống điện. Trong bài báo này, các chỉ tiêu kinh tế - kỹ thuật và chiến lược vận hành của BESS sẽ được phân tích khi tham gia thị trường điện bán buôn điện cạnh tranh. BESS được coi là tài sản của công ty phân phối điện. Quá trình sạc-xả của BESS đồng nghĩa với việc mua-bán điện và chịu sự chi phối của biểu đồ giá điện.

Theo quy định trong thông tư 45/2018/TT-BCT [13], giá điện năng thị trường toàn phần áp dụng cho đơn vị mua buôn điện trong chu kỳ giao dịch i là CFMP(i) (đồng/kWh). Đây là mức giá phải trả cho một kWh điện mà công ty mua điện mua từ thị trường điện giao ngay. Giá này được tính như sau:

$$CFMP(i) = CSMP(i) + CCAN(i) \quad (2)$$

$$= k(i) \times SMP(i) + CAN(i) \quad (3)$$

Với SMP(i) (đồng/kWh) và CAN(i) (đồng/kWh) lần lượt là giá điện năng thị trường và giá công suất thị trường áp dụng cho đơn vị phát điện trong chu kỳ giao dịch i . Hai đại lượng này được tính toán bởi đơn vị vận hành thị trường điện

Đại lượng $k(i)$ trong công thức (3) là hệ số quy đổi tổn thất điện năng trong chu kỳ giao dịch i , được tính bằng công thức (4)

$$k(i) = \frac{Q_G(i)}{Q_L(i)} \quad (4)$$

Trong đó:

+ $Q_G(i)$: Tổng sản lượng điện năng trong chu kỳ giao dịch i của các nhà máy điện nối lưới truyền tải, các nguồn nhập khẩu điện, các nhà máy điện đấu nối vào lưới phân phối điện có tham gia thị trường hoặc ký hợp đồng mua bán điện với Tập đoàn Điện lực Việt Nam (kWh);

+ $Q_L(i)$: Tổng sản lượng điện năng giao nhận đầu nguồn của các đơn vị mua điện trong chu kỳ giao dịch i , bao gồm sản lượng giao nhận của đơn vị mua điện (có đơn vị xuất khẩu điện) với lưới truyền tải điện và sản lượng giao nhận với các nhà máy điện đấu nối vào lưới phân phối điện có tham gia thị trường hoặc có ký hợp đồng mua bán điện với Tập đoàn Điện lực Việt Nam (kWh).

2.2. Hàm mục tiêu, ràng buộc và phương pháp giải

2.2.1. Hàm mục tiêu

Hàm mục tiêu là cực tiểu hóa chi phí cho BESS trong khoảng thời gian vận hành D . Chi phí này được biểu diễn bởi hàm mục tiêu F_{tt} bao gồm bốn thành phần như trong công thức :

$$F_{tt} = \lambda \cdot \sum_{t=1}^D \Delta C_{(t)} + \beta \cdot D \cdot C_{B, nom} + \frac{1}{\eta} \sum_{t=1}^D P_{c(t)} \cdot \Delta t \cdot c(t) - \eta \cdot \sum_{t=1}^D P_{d(t)} \cdot \Delta t \cdot c(t) \quad (5)$$

Thành phần $\lambda \cdot \sum_{t=1}^D \Delta C_{(t)}$ là chi phí khấu hao cho đầu tư được tính dựa trên dung lượng suy hao do quá trình lão hóa của BESS. Trong đó:

+ λ là chi phí khấu hao cho một đơn vị dung lượng ắc quy suy hao (USD/kWh), được xác định theo công thức (7) với C_0 là chi phí đầu tư cho mỗi đơn vị dung lượng hệ thống BESS (USD/kWh).

+ $\Delta C_{(t)}$ là dung lượng BESS suy hao trong khoảng thời gian D , được xác định theo công thức (8) [10]-[12] hoặc theo 2 công thức đơn giản hóa là (9) và (10). Trong đó, Z hệ số suy hao, $SOC_{(t)}$ là mức năng lượng (State of charge) của BESS tại thời điểm t . $E_{(t)}$ và $C_{(t)}$ lần lượt là năng lượng và dung lượng BESS tại thời điểm t .

Thành phần β . D . $C_{B.nom}$ là chi phí bảo trì, bảo dưỡng và các chi phí phụ. Trong đó:

+ β là chi phí bổ sung cho mỗi đơn vị dung lượng của BESS (USD/kWh), được xác định theo công thức (6) với r là lãi suất ngân hàng và OM là chi phí bảo trì, bảo dưỡng.

+ $C_{B.nom}$ là dung lượng danh định của BESS.

Thành phần $\frac{1}{\eta} \sum_{t=1}^D P_{c(t)} \cdot \Delta t \cdot c(t)$ và $\eta \cdot \sum_{t=1}^D P_{d(t)} \cdot \Delta t \cdot c(t)$ lần lượt là chi phí mua điện và bán điện trong ngày. Trong đó:

+ $c(t)$ là giá điện tại thời điểm t , η là hiệu suất của hệ thống BESS.

+ $P_{c(t)}$ và $P_{d(t)}$ lần lượt là công suất sạc, xả tại thời điểm t (kW).

+ Δt là bước thời gian, chọn là 1 giờ.

$$\beta = \frac{(r + OM) \times C_0}{365} \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{\text{Chi phí đầu tư cho dung lượng}}{\text{Tồn thất dung lượng}} = \frac{C_0 \times C_{B.nom}}{20\% \times C_{B.nom}} \quad (7)$$

$$\Delta C_{(t)} = Z \times C_{B.nom} \times (SOC_{(t-1)} - SOC_{(t)}) \quad (8)$$

$$\approx Z \times C_{B.nom} \times \frac{E_{(t-1)} - E_{(t)}}{C_{(t-1)}} \quad (9)$$

$$\approx Z \times C_{B.nom} \times \frac{P_{d(t)} \times \Delta t}{C_{(t-1)}} \quad (10)$$

2.2.2. Các ràng buộc

Các ràng buộc liên quan đến trạng thái vận hành của BESS và yêu cầu vận hành của lưới điện được đề cập trong Bảng 1.

Bảng 1. Các điều kiện ràng buộc [14]

STT	Điều kiện ràng buộc	Công thức
1	Năng lượng của BESS	$E_{(t)} = E_{(t-1)} + P_{c(t)} \times \Delta t - P_{d(t)} \times \Delta t$
2	Trạng thái sạc và xả của BESS	$P_{c(t)} \times P_{d(t)} = 0$
3	Giới hạn về công suất sạc và xả của BESS	$P_{c(t)} \leq \frac{80\% \times C_{B.nom}}{T_c}$
		$P_{d(t)} \leq \frac{80\% \times C_{B.nom}}{T_d}$
4	Ràng buộc về mức năng lượng của BESS	$SOC_{min} \leq SOC_{(t)} \leq SOC_{max}$
		$SOC_{(t)} = \frac{E_{(t)}}{C_{(t)}} \times 100\%$
5	Dung lượng suy hao của BESS do quá trình lão hóa	$\Delta C_{(t)} = Z \times C_{B.nom} \times \frac{P_{d(t)} \times \Delta t}{C_{(t-1)}}$
6	Điều kiện về điện áp	$C_{(t)} = C_{(t-1)} - \Delta C_{(t)}$
		$V_{min} \leq V_{(t)}^k \leq V_{max}$

Trong điều kiện 3, T_c và T_d lần lượt là thời gian sạc và xả tối thiểu của ắc quy.

2.2.3. Phương pháp giải

Bài toán tối ưu sẽ được giải bằng hàm $fmincon$ của phần mềm MATLAB. Đây là hàm có thể xác định giá trị nhỏ nhất của một hàm $f(x)$ với các ràng buộc phi tuyến. Trong bài toán này, các nghiệm cần xác định: $P_d(t)$, $P_c(t)$, $C(t)$, $E(t)$. Thêm vào đó, dung lượng danh định của BESS phải được xác định tại thời điểm là giờ thứ 0 nên sẽ có thêm một nghiệm nữa là $C_{B,nom}$.

Ứng với mỗi thời điểm t , phương pháp lặp Newton-Raphson được sử dụng giải bài toán tìm thông số vận hành của hệ thống điện ở chế độ xác lập và kiểm tra điều kiện ràng buộc về điện áp vận hành của các nút. Các bước lặp của bài toán tối ưu được thực hiện đến khi các điều kiện dừng thỏa mãn.

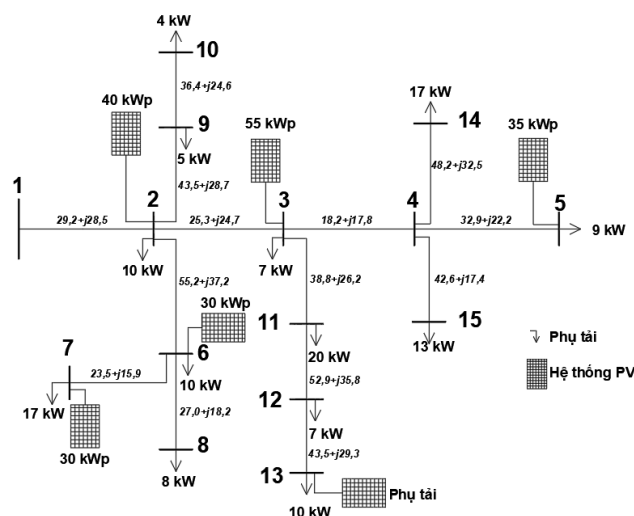
3. Kết quả và bàn luận

Trong phần này, mô phỏng sẽ được thực hiện nhằm kiểm chứng hiệu quả kinh tế - kỹ thuật của BESS trong việc điều chỉnh điện áp lưới điện đồng thời xét đến ảnh hưởng của thị trường điện cạnh tranh.

3.1. Lưới điện mô phỏng

Lưới điện mô phỏng là lưới phân phối hình tia 15 nút với cấp điện áp 0,4 kV. Cấu trúc lưới, thông số nhánh cũng như công suất đặt của các hệ thống PV cũng như tải được cho trong Hình 1.

Nhằm đơn giản hóa quá trình mô phỏng, các phụ tải được coi là có cùng hệ số công suất là 0,95 và cùng dạng đồ thị phụ tải trong một ngày. Tương tự đối với các hệ thống PV. Các dạng đồ thị này, với kích thước lắp đặt được quy về 1 kW được thể hiện trong Hình 2.



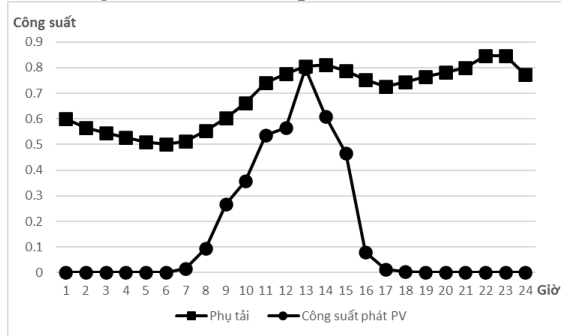
Hình 1. Thông số lưới điện mô phỏng

Trong bài báo này, ắc quy chì – axit được lựa chọn để mô phỏng với các thông số kinh tế, kỹ thuật được cho trong Bảng 2. Dữ liệu về giá điện năng thị trường (SMP) sẽ được sử dụng để tính giá điện thị trường điện toàn phần áp dụng cho đơn vị mua điện (CFMP). Giá CFMP(i) được tính toán với bước thời gian là 1 giờ. Các hệ số cần cho quá trình tính toán $k(i)$ và $CAN(i)$ sẽ được cho cùng một giá trị tại mọi thời điểm trong ngày do hạn chế về nguồn dữ liệu. Hình 3 thể hiện giá SMP của thị trường điện Việt Nam, đã quy về đơn vị USD trong ngày 30/09/2018. Đối với giá CAN, giá CAN trung bình năm 2018 là 215 đồng/kWh, tức 0,0107 USD/kWh được sử dụng cho mọi chu kỳ giao dịch trong ngày. Còn hệ số k sẽ được tính từ tỷ lệ tổn thất điện năng trên lưới điện Việt Nam năm 2018 là 6,9%. Theo công thức (4), ta có:

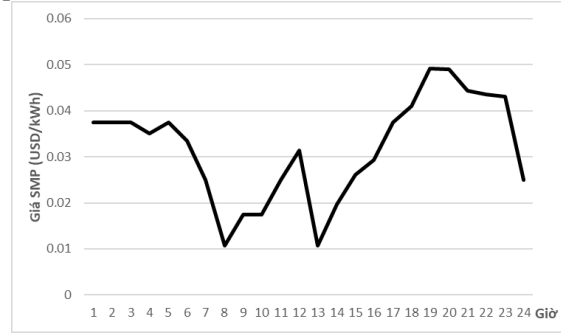
$$k = \frac{Q_G}{Q_L} = \frac{Q_G}{(1 - 0.069) \cdot Q_G} = \frac{1}{0.931} = 1.074$$

Vậy ta lấy $k=1.074$ cho mọi chu kỳ giao dịch trong ngày.

Các giá trị được cho với bước thời gian là 1 giờ. Trong khi đó, giá bán điện được tham khảo từ biểu giá bán điện cho phụ tải kinh doanh do Tập đoàn Điện lực Việt Nam ban hành.



Hình 2. Đồ thị phụ tải và PV



Hình 3. Giá SMP (USD/kWh)

Bảng 2. Thông số kinh tế - kỹ thuật của ắc quy [10]-[12]

Thông số kinh tế-kỹ thuật	Z	η	SOCmin	SOCmax	$T_c = T_d$	r	OM	C_0 (\$/kWh)
Giá trị	3.10^{-4}	0,9	0,2	0,9	3	0,06	0,02	600

3.2. Kết quả mô phỏng

3.2.1. Đánh giá hiệu quả của BESS trong bài toán vận hành đa mục tiêu

Xác định dung lượng danh định của BESS

Giả thiết một hệ thống BESS được lắp đặt tại nút 11. Dung lượng danh định của BESS phải được xác định sao cho BESS có thể điều chỉnh điện áp lưới điện về ngưỡng cho phép với mọi kịch bản của phụ tải, PV và đạt được mức chi phí thấp nhất. Do đó, quá trình mô phỏng phải được thực hiện thông qua mô phỏng tất cả các ngày trong năm. Chi phí cho BESS được xác định theo hàm mục tiêu F_{tt} . Tuy nhiên, trong hàm mục tiêu này có xét đến hai yếu tố chi phí bán điện và mua điện. Hai yếu tố này rất khó xác định và dự báo cho từng ngày do đó nhằm đơn giản hóa bài toán, quá trình xác định dung lượng danh định cho BESS sẽ sử dụng hàm mục tiêu chỉ bao gồm hai thành phần số một và hai.

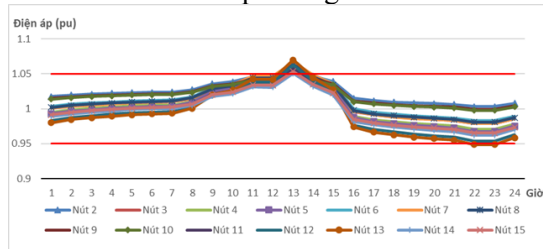
Dữ liệu về đồ thị phụ tải và dữ liệu về công suất phát PV được thu thập trong khoảng thời gian một năm. Kết quả mô phỏng đã xác định được dung lượng danh định cần thiết cho BESS là 312,46 kWh. Đây là dung lượng để đảm bảo BESS có thể điều chỉnh điện áp của lưới về ngưỡng cho phép với mọi kịch bản của phụ tải và PV trong năm.

Xác định lịch vận hành tối ưu cho BESS khi xét ảnh hưởng của thị trường điện

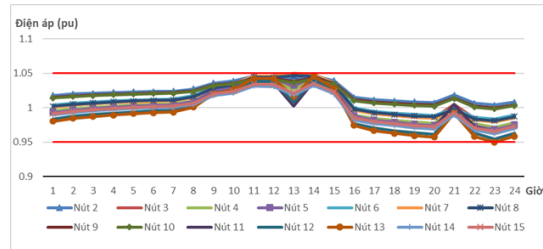
Với dung lượng danh định CB_{nom} của BESS thu được từ bài toán trên, lịch vận hành tối ưu cho BESS sẽ được xác định cho một ngày bất kỳ. Do lịch vận hành được xác định trong ngày nên sẽ xét đến ảnh hưởng của chi phí mua và bán điện. Hàm mục tiêu F_{tt} được thể hiện đầy đủ 4 thành phần như công thức (5).

Khi không có BESS, điện áp các nút dễ dàng nhận được từ việc giải bài toán xác định thông số vận hành hệ thống điện trong chế độ xác lập. Kết quả được biểu diễn trên Hình 4. BESS có dung lượng định mức CB_{nom} là 312,46 kWh khi được lắp đặt tại nút 11. Bài toán xác định lịch vận hành tối ưu cho BESS sẽ được giải và thu được kết quả như trong Hình 6. Hàm mục tiêu F_{tt} được xác định là 88,85 USD/ngày. Với lịch vận hành này, diễn biến điện áp các nút trong ngày được thể hiện trong Hình 5. Có thể nhận thấy với sự hoạt động của BESS, điện áp tại các nút trên lưới đã nằm trong ngưỡng cho phép.

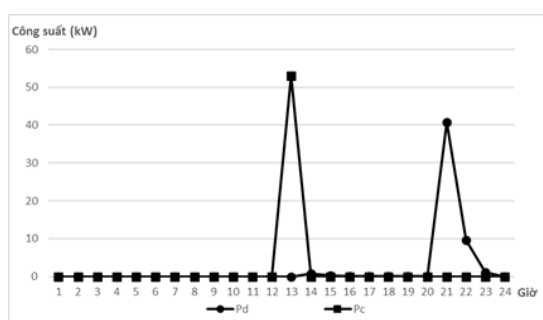
Với giá điện của ngày mô phỏng, BESS chỉ sạc vào thời điểm quá áp trên lưới nhằm giải quyết vấn đề kỹ thuật mà không sạc vào các thời điểm khác do chi phí khấu hao vẫn chiếm tỉ trọng cao so với lợi nhuận mà chênh lệch giá điện mang lại. Điều này giúp cho BESS hoạt động ít nhất và do đó chi phí tổng là nhỏ nhất.



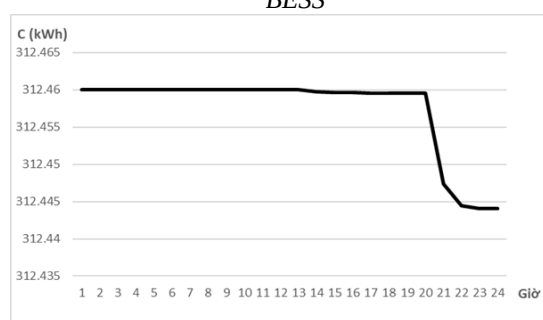
Hình 4. Điện áp các nút khi chưa lắp đặt BESS



Hình 5. Điện áp các nút khi có sự hoạt động của BESS



Hình 6. Lịch vận hành tối ưu BESS



Hình 7. Đồ thị suy hao dung lượng BESS

3.2.2. Đánh giá ảnh hưởng của vị trí lắp đặt tới dung lượng danh định cần thiết và chi phí cho BESS

Trong phần này, BESS sẽ được đặt ngẫu nhiên tại các nút 7, 10, 15 nhằm đánh giá ảnh hưởng của vị trí đến kết quả của bài toán tối ưu. Tương tự như khi BESS được lắp đặt tại nút 11, bài toán tối ưu được giải qua hai giai đoạn: xác định dung lượng danh định cần thiết và xác định lịch vận hành tối ưu. Ta có kết quả thu được như trong Bảng 3.

Bảng 3. So sánh kết quả thu được khi BESS lắp đặt tại các nút

Nút	7	10	11	15
CB_{nom} (kWh)	379,36	313,26	312,46	300,67
F_{tt} (USD/ngày)	96,12	88,11	79,5	78,47

Hàm mục tiêu F_{tt} chỉ là 78,47 USD/ngày khi BESS được lắp đặt tại nút 15 nhưng có thể lên đến 96,12 USD/ngày khi được lắp đặt tại nút 7. Tuy nhiên, không thể kết luận rằng BESS được lắp đặt tại nút 15 sẽ mang lại lợi ích kinh tế hơn so với khi lắp tại nút 7 do bài toán xác định lịch vận hành chỉ mô phỏng trong một ngày.

Khi BESS được lắp đặt tại các vị trí khác nhau, dung lượng danh định CB_{nom} cũng sẽ khác nhau. CB_{nom} càng lớn thì vốn đầu tư ban đầu dự án càng lớn. Do đó, ta có thể tiến hành mô phỏng BESS tại tất cả các nút trên lưới nhằm xác định xem khi BESS lắp đặt tại vị trí nào thì đạt được CB_{nom} nhỏ nhất. Điều này sẽ làm giảm vốn đầu tư ban đầu cho dự án.

4. Kết luận

Bài báo đã đề xuất giải pháp sử dụng hệ thống BESS nhằm giải quyết vấn đề điện áp trên lưới điện phân phối có tỷ trọng điện mặt trời cao. Với lịch vận hành tối ưu, hiệu quả điều chỉnh điện áp của BESS đã được chứng minh thông qua các mô phỏng với chi phí là nhỏ nhất có xét đến chênh lệch giá trong điều kiện vận hành thị trường điện cạnh tranh. Kết quả cũng cho thấy, với giá BESS ở thời điểm hiện tại và sự chênh lệch giá điện trên thị trường còn thấp giữa giờ cao điểm và thấp điểm, BESS có xu hướng hạn chế hoạt động và ưu tiên điều chỉnh điện áp. Điều này

giúp BESS giảm suy hao về dung lượng trong quá trình vận hành và do đó giảm chi phí. Mặt khác, nghiên cứu cũng chỉ ra vị trí lắp đặt BESS cũng có ý nghĩa quan trọng cần xem xét để tìm ra vị trí tối ưu, yêu cầu dung lượng lắp đặt là thấp nhất nhằm giảm chi phí đầu tư ban đầu.

Hơn nữa, trong các mô phỏng được thực hiện, dữ liệu phụ tải và PV được dự báo từ trước. Tuy nhiên, các dữ liệu này trong thực tế có thể khác so với dự báo. Do đó, việc xây dựng kế hoạch vận hành cho BESS khi có sai khác so với dự báo là một hướng nghiên cứu tiếp theo cần thực hiện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] IRENA, "Renewable Energy Statistics," 2023. [Online]. Available: <https://www.irena.org/publications/2023/Jul/Renewable-energy-statistics-2023>. [Accessed Oct. 24, 2023].
- [2] E. Tourneboeuf, "Learning lessons from the European Experience with large scale solar," 2022. [Online]. Available: http://www.aie.org.au/aie/documents/solar_scholarship_report.pdf. [Accessed Oct. 10, 2022].
- [3] M. Q. Duong, N. T. N. Tran, G. N. Sava, and M. Scripcariu, "The impacts of distributed generation penetration into the power system," in *International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN)*, 2017, pp. 295–301.
- [4] C. Jamroen, A. Pannawan, and S. Sirisukprasert, "Battery Energy Storage System Control for Voltage Regulation in Microgrid with High Penetration of PV Generation," in *53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Glasgow, Sep. 2018, pp. 1–6, doi: 10.1109/UPEC.2018.8541888.
- [5] E. Reihani, S. Sepasi, L. R. Roose, and M. Matsuura, "Energy management at the distribution grid using a Battery Energy Storage System (BESS)," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 77, pp. 337–344, May 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.11.035.
- [6] M. Korpaas, A. T. Holen, and R. Hildrum, "Operation and sizing of energy storage for wind power plants in a market system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 25, no. 8, pp. 599–606, Oct. 2003, doi: 10.1016/S0142-0615(03)00016-4.
- [7] M. N. Faqiry, L. Edmonds, H. Zhang, A. Khodaei, and H. Wu, "Transactive-Market-Based Operation of Distributed Electrical Energy Storage with Grid Constraints," *Energies*, vol. 10, no. 11, Art. no. 11, Nov. 2017, doi: 10.3390/en10111891.
- [8] H. Chitsaz, P. Zamani-Dehkordi, H. Zareipour, and P. P. Parikh, "Electricity Price Forecasting for Operational Scheduling of Behind-the-Meter Storage Systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 6612–6622, Oct. 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2717282.
- [9] H. Akhavan-Hejazi and H. Mohsenian-Rad, "Optimal Operation of Independent Storage Systems in Energy and Reserve Markets With High Wind Penetration," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 1088–1097, Mar. 2014, doi: 10.1109/TSG.2013.2273800.
- [10] B. Ansari, D. Shi, R. Sharma, and M. G. Simoes, "Economic analysis, optimal sizing and management of energy storage for PV grid integration," in *Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, 2016 *IEEE/PES*, 2016, pp. 1–5.
- [11] Y. Riffonneau, S. Bacha, F. Barruel, and S. Ploix, "Optimal power flow management for grid connected PV systems with batteries," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 2, no. 3, pp. 309–320, 2011.
- [12] Y. Ru, J. Kleissl, and S. Martinez, "Storage size determination for grid-connected photovoltaic systems," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 68–81, 2013.
- [13] Electricity Regulation Authority of Vietnam, "Circular 45/2018/TT-BCT regulates the operation of the competitive wholesale electricity market and amends, supplements a number of articles of Circular No. 56/2014/TT-BCT dated December 19, 2014 of the Minister of Industry and Trade," 2014. [Online]. Available: <http://www.erav.vn/d4/van-ban/Thong-tu-452018TT-BCT-quy-dinh-van-hanh-thi-truong-ban-buon-dien-canh-tranh-va-sua-doi-bo-sung-mot-so-dieu-cua-Thong-tu-so-562014TT-BCT-ngay-19-thang-12-nam-2014-cua-Bo-truong-Bo-Cong-Thuong-4-1004.aspx>. [Accessed Jun. 19, 2022].
- [14] A. T. Nguyen, S. Chaitusaney, and A. Yokoyama, "Optimal strategies of siting, sizing, and scheduling of BESS: Voltage management solution for future LV network," *IEEE Trans. Electr. Electron. Eng.*, vol. 14, no. 5, pp. 694–704, May 2019, doi: 10.1002/tee.22856.