

INCREASE THE POWER OF THE SOLAR CONNECTED DISTRIBUTED BATTERY SYSTEM TO REDUCES COSTS

Ton Ngoc Trieu^{1,3}, Nguyen Tung Linh^{2*}, Truong Viet Anh¹, Pham Van Loi³

¹Ho Chi Minh City University of Technology and Education

²Electric Power University

³Thu Duc College of Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 04/8/2021	This paper presents the problem of expanding the operating capacity of a battery energy storage system (BESS) on a distribution grid connected to a solar energy source for about 24 hours. During the 24-hour period the survey was divided into sub-periods of peak hours, standard hours and off-peak hours. The goal is to find the node and the optimal capacity to install its BESS in each interval to minimize the cost of purchasing electricity and the cost of energy loss. The cuckoo search algorithm (Cuckoo Search Algorithm - CSA) is applied to optimize the location and expand the operating capacity of BESS. The efficiency of the proposed problem has been tested on the 33-node LDPP. The test results show that the proposed method is capable of reducing energy costs as well as contributing to the reduction of peak load during 24 hours.
Revised: 14/10/2021	
Published: 15/10/2021	
KEYWORDS	
Battery energy storage system	
Distribution power	
Expand BESS	
Cuckoo search algorithm	
Electricity purchase costs	

NÂNG CAO CÔNG SUẤT CỦA HỆ THỐNG PIN LƯU TRỮ TRÊN LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI CÓ KẾT NỐI NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI NHẪM GIẢM CHI PHÍ

Tôn Ngọc Triều^{1,3}, Nguyễn Tùng Linh^{2*}, Trương Việt Anh¹, Phạm Văn Lợi³

¹Trường Đại học Sư phạm kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

²Trường Đại học Điện lực, ³Trường Cao đẳng Công nghệ Thủ Đức

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 04/8/2021	Bài báo này trình bày vấn đề mở rộng công suất hoạt động của hệ thống lưu trữ năng lượng pin (Battery Energy Storage System - BESS) trên lưới điện phân phối có kết nối nguồn năng lượng mặt trời trong khoảng 24 giờ. Trong khoảng thời gian 24 giờ khảo sát được chia thành các khoảng thời gian nhỏ là giờ cao điểm, giờ tiêu chuẩn và giờ thấp điểm. Mục tiêu là tìm ra nút và công suất tối ưu để lắp đặt BESS của nó trong mỗi khoảng thời gian để giảm thiểu chi phí mua điện và chi phí tổn thất năng lượng. Thuật toán cuckoo search (Cuckoo Search Algorithm) được áp dụng để tối ưu vị trí và mở rộng công suất vận hành của BESS. Hiệu quả của bài toán đề xuất đã được kiểm tra trên lưới điện phân phối 33 nút. Kết quả kiểm nghiệm cho thấy, phương pháp đề xuất có khả năng giảm chi phí năng lượng cũng như góp phần giảm phụ tải cao điểm trong thời gian 24 giờ.
Ngày hoàn thiện: 14/10/2021	
Ngày đăng: 15/10/2021	
TỪ KHÓA	
Hệ thống lưu trữ năng lượng pin	
Lưới điện phân phối	
Chi phí mua điện	
Mở rộng BESS	
Cuckoo search	

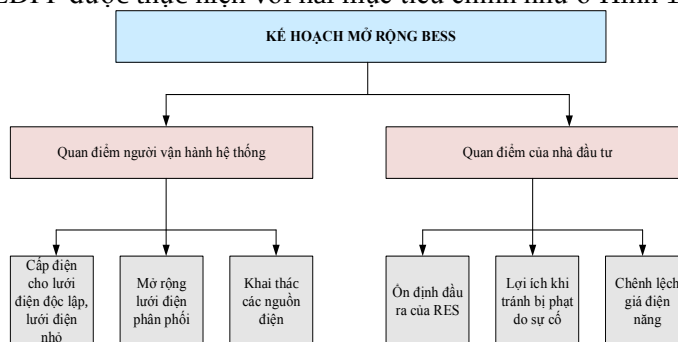
DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.4846>

* Corresponding author. Email: ntlinh1505@gmail.com or linhnt@epu.edu.vn

1. Giới thiệu

Ngày nay, lưới điện phân phối (LĐPP) phải chủ động khai thác tối đa tiềm năng của hệ thống năng lượng tái tạo (RES) nhằm nâng cao hiệu quả cũng như các vấn đề môi trường [1]. Việc kết nối các nguồn điện phân tán (DG) vào LĐPP hiện tại chưa đáp ứng được nhu cầu kinh tế cũng như về kỹ thuật [2]. Với các ưu điểm như cải thiện tính linh hoạt và tính ổn định, giảm tác động của dao động tạo ra bởi các DG tái tạo, đặc biệt là các nguồn năng lượng mặt trời nên BESS rất hấp dẫn và ngày càng được công nhận là cần thiết đối với LĐPP [3]. Pin Li-ion là loại pin nổi bật nhất trong số các loại BESS vì kích thước nhỏ gọn, trọng lượng thấp, dễ triển khai, tiết kiệm và thời gian đáp ứng nhanh hơn so với các loại BESS khác [4], [5]. Bài toán mở rộng phạm vi hoạt động của BESS để lắp đặt vị trí và kích thước của BESS trong LĐPP là một bài toán phức tạp [6]. Nếu BESS được lắp đặt phù hợp thì nó thực sự phát huy được hiệu quả, ngược lại sẽ gây ảnh hưởng đáng kể về hiệu quả kinh tế, kỹ thuật trong LĐPP [7].

Sự hiện diện của các RES trong hệ thống điện dẫn đến những thách thức như độ tin cậy, bảo mật và vấn đề ổn định. BESS là công cụ hữu ích để giảm thiểu những thách thức này cũng như việc thị trường điện vận hành trong thời gian tới của Việt Nam. Lúc này, BESS sẽ linh hoạt, kiểm soát và cải thiện hoạt động của LĐPP. Những năm qua, BESS đã được sử dụng cho LĐPP còn hạn chế do công nghệ và giá thành. Hiện nay, với những tiến bộ trong công nghệ, việc nghiên cứu và sử dụng BESS được chú trọng cũng như tăng tích hợp các RES trên LĐPP. BESS thực hiện rất hiệu quả việc chuyển dịch thời gian, làm trơn RES khi tham gia vào LĐPP. BESS rất quan trọng đối với các RES liên tục như PV, WT, sóng biển, thủy triều... Vì vậy, lập kế hoạch mở rộng BESS là một vấn đề nghiên cứu trong LĐPP được cho là cấp thiết. Việc lập kế hoạch mở rộng BESS trong LĐPP được thực hiện với hai mục tiêu chính như ở Hình 1 [8].



Hình 1. Kế hoạch mở rộng BESS

Cách tiếp cận phổ biến để giải quyết các vấn đề tối ưu lắp đặt BESS là sử dụng tính theo kinh nghiệm và mạng nơ-ron nhân tạo thông qua các tính năng đơn giản và dễ thực hiện. Hầu hết các thuật toán này đều cho kết quả cực trị địa phương và tốc độ hội tụ chậm [9]. Trong [10] đề xuất một giải pháp giảm tổn thất năng lượng khi có BESS tham gia trong LĐPP. Trong [11] đề xuất một chiến lược mở tối ưu hóa để phân tích vị trí tối ưu của BESS có thể ảnh hưởng ở các mức độ khác nhau trong LĐPP. Trong [12] đề xuất một kỹ thuật để tối ưu vị trí và kích thước của BESS trong LĐPP nhỏ không cân bằng. Phương pháp này cho thấy khối lượng tính toán là rất lớn. Trong [13] trình bày một phương pháp mới tối ưu vận hành BESS nhằm giảm thiểu tổn thất điện năng ở LĐPP sử dụng giải thuật gen (GA). Trong [14] đề xuất một phương pháp tối ưu vị trí và kích thước của BESS nhằm giảm tổn thất công suất. Bài báo này đã cải tiến thuật toán COA (ICOA) nhằm giải quyết vấn đề tối ưu. Trong [15] đề xuất một phương pháp tối ưu vị trí và kích thước có xét đến tuổi thọ của BESS với sự tham gia DGs là năng lượng mặt trời và năng lượng gió. Các nghiên cứu [15] - [16] chỉ đề cập đến sự ảnh hưởng hoặc vấn đề tối ưu vị trí, dung lượng của BESS trong LĐPP với mục tiêu giảm thiểu tổn thất công suất hay tổn thất năng lượng mà chưa đề cập đến vấn đề chi phí năng lượng. Trong [17]-[18] đề xuất tối ưu vị trí, kích thước và

sạc/xả hàng ngày của BESS có điện áp thấp với pin quang điện (PV) dựa trên hàm chi phí. Trong [19] chỉ đề xuất tối ưu kích thước của BESS là san bằng đỉnh, cân bằng tải và quản lý hệ thống. Trong [20] đề xuất tối ưu kích thước của DG và BESS là đồng thời. Việc lập kế hoạch vận hành LDPP hàng giờ được thực hiện với mục tiêu là giảm thiểu tổn thất năng lượng và chi phí năng lượng. Các nghiên cứu này đề cập đến vấn đề chi phí năng lượng nhưng chưa cho thấy về lợi nhuận chi phí mua điện ở mỗi thời điểm cũng như giảm dao động về năng lượng. Trong [21], các tác giả đã đề xuất vị trí và công suất vận hành của BESS nhằm giảm chi phí năng lượng. Tuy nhiên, bài báo này chưa đề cập đến các RES khi tham gia vào LDPP.

Hiện nay, CSA ứng dụng để tối ưu vị trí và công suất vận hành của BESS trong mỗi khoảng thời gian đã được áp dụng thành công và hơn hẳn các thuật toán khác [21]. CSA là một thuật toán mạnh mẽ với cơ chế tìm kiếm khám phá và khai thác dựa trên bước đi ngẫu nhiên. CSA là một trong những thuật toán được ứng dụng thành công để tìm ra giải pháp tối ưu trong tái cấu hình LDPP [22], điều phối giữa các nguồn phát [23], xác định vị trí DG [22], tối ưu vị trí và công suất vận hành BESS [21]. Giảm tổn thất điện năng khi lắp đặt BESS trong LDPP là không đáng kể do năng lượng nạp và xả là không đổi trong một thời gian nhất định. Vì vậy, mở rộng phạm vi hoạt động của BESS cần phải xem xét hàm chi phí liên quan đến giá điện ở mỗi thời điểm, giảm dao động về năng lượng cung cấp để thấy lợi ích thật sự của BESS. Bài báo này đề xuất mở rộng phạm vi công suất hoạt động của BESS trên LDPP có tham gia PV nhằm giảm chi phí mua điện trong một ngày và giảm dao động năng lượng cung cấp trong LDPP.

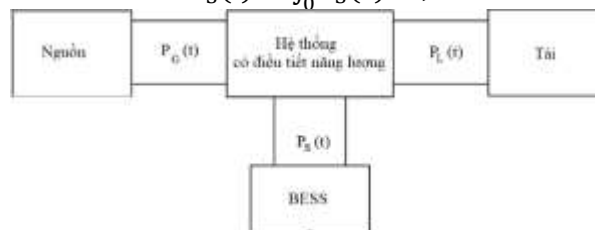
2. Mô hình bài toán nghiên cứu

$$PS(t) = PG(t) - PL(t) \quad (1)$$

$$W_G(t) = \int_0^t P_G(\tau) d\tau;$$

$$W_L(t) = \int_0^t P_L(\tau) d\tau;$$

$$W_S(t) = \int_0^t P_S(\tau) d\tau; \quad (2)$$



Hình 2. Hệ thống đơn giản có sử dụng BESS

Một mô hình lý tưởng hóa của hệ thống có sự tham gia của BESS đơn giản được trình bày trong Hình 2. Hệ thống bao gồm nguồn, tải, BESS và hệ thống có điều hòa nguồn công suất. Trong đó, công suất được giả định là lý tưởng và bỏ qua tổn thất. Năng lượng có thể được tiêu thụ trực tiếp bởi tải hoặc được lưu trữ để sử dụng, được thể hiện như công thức (1). $PS(t)$ được xác định bằng số dư công suất trong (1). Năng lượng được xác định bằng cách tích hợp công suất như trong (2). Trong đó: $PG(t)$ là công suất do nguồn tạo ra và nó được giả định là hoàn toàn có thể kiểm soát được; $PL(t)$ là công suất do tải tiêu thụ. Nó là được xác định độc lập bởi tải (không điều khiển được); $PS(t)$ là đầu vào nguồn thiết bị lưu trữ. $W_S(t)$ là năng lượng lưu trữ của BESS [24].

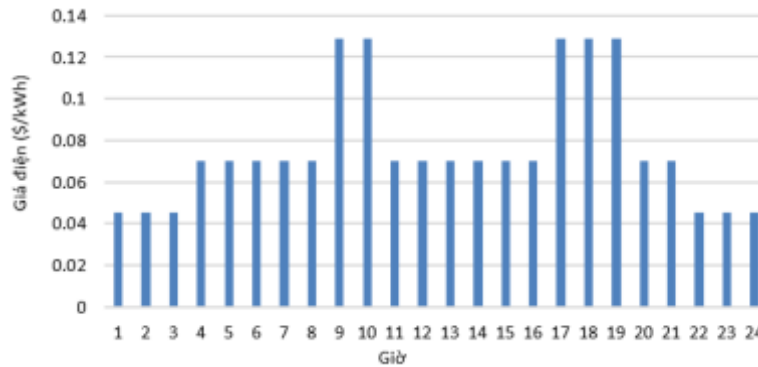
$$\text{Thời gian sạc: } Et+1 = Et + Pt * \eta \quad (3) \quad \text{Thời gian xả: } Et+1 = Et - Pt \quad (4)$$

Dung lượng của BESS được đo bằng cả mức công suất tối đa (kW) và khả năng lưu trữ năng lượng (kWh). BESS có 2 trường hợp: Giai đoạn sạc và xả được thể hiện trong công thức (3) và (4). Trong đó: Et (kWh) là năng lượng tích trữ trong BESS tại thời điểm t , Pt (kW) là điện năng nạp hoặc xả tại thời điểm t , khoảng thời gian t là 1 giờ, và η là hiệu suất của BESS [25]. Trong thị trường điện phi điều tiết, công ty phân phối chịu trách nhiệm mua điện để phục vụ khách hàng của mình. Do chênh lệch giá giữa các thời điểm, công ty phân phối có thể mua điện rẻ hơn trong các thời kỳ khi nhu cầu điện thấp để sạc BESS, để năng lượng giá rẻ có thể được sử dụng hoặc

bán sau này khi giá điện cao. Hình 3 cho thấy giá năng lượng trung bình cho mỗi giờ của một nguồn trên TTĐ. Các biến trạng thái được biểu diễn bởi (5). Trong thời gian sạc, $P_i = -P_i^-$ và $P_i = P_i^+$ khi BESS xả. Do đó, lợi ích của chênh lệch giá năng lượng có thể được biểu thị như công thức (6). Trong đó C_i là giá năng lượng của giờ thứ i và T_1 là lợi ích thu được của chênh lệch giá năng lượng.

$$P_i = P_i^+ - P_i^- \quad \text{với } i = 1 \dots 24 \quad (5)$$

$$T_1 = \sum_i (P_i^+ - P_i^-) \cdot C_i \quad (6)$$



Hình 3. Giá năng lượng cho mỗi giờ

Vào giờ cao điểm, để đáp ứng nhu cầu điện năng cao, nhiều nhà máy điện với nhiều nguồn năng lượng sơ cấp khác nhau, thậm chí có những nguồn có giá cao được kích hoạt. Điều này dẫn đến hiệu quả thấp về mặt kinh tế và vận hành của LĐPP. Vì vậy, việc lắp đặt BESS trong LĐPP là một trong những giải pháp tiết kiệm chi phí hiệu quả. BESS có thể lưu trữ năng lượng vào giờ thấp điểm và cung cấp cho LĐPP vào giờ cao điểm. Ngoài ra, vị trí phù hợp của BESS cũng có thể giúp giảm chi phí tổn thất điện năng của LĐPP. Hàm mục tiêu (OF) cho tối ưu hóa vị trí và công suất vận hành của BESS trong khoảng thời gian 24 giờ được xác định như sau:

$$OF(S) = \sum_{i=1}^{24} (P_{s,i} + P_{loss,i}) C_i \quad (7)$$

Trong đó, $P_{s,i}$ là công suất được mua từ hệ thống ở khoảng thời gian thứ i . $P_{loss,i}$ là công suất tổn thất của LĐPP tại khoảng thời gian thứ i . C_i là giá điện tại khoảng thứ i . S là giải pháp cho vị trí và công suất vận hành của BESS. Nó được thể hiện như sau: $S = [x_1, x_2, \dots, x_{25}]$ (8)

Trong đó, biến thứ nhất đại diện cho vị trí của BESS, trong khi các biến còn lại đại diện cho công suất của BESS trong mỗi khoảng thời gian. Các biến này được biểu thị bằng phần trăm công suất định mức của BESS. Từ công suất của BESS trong mỗi khoảng thời gian, dung lượng lưu trữ của BESS tương ứng với vector S có thể được tính như sau:

$$BESS_{capacity}(S) = \max(|\text{cumulative_sum}(x_2, \dots, x_{25})|) \quad (9)$$

Trong đó, cumulative_sum là hàm trả về một chuỗi các tổng một phần của vector của $[x_2, \dots, x_{25}]$. Giá trị của S trong 24 giờ của BESS là $\{50; 100; -50; -100; 50; 100; -50; -100; 50; 100; -50; -100; 50; 100; -50; -100; 50; 100; -50; -100; 50; 100; -50; -100\}$. Công suất định mức của BESS được giả định là 1MW và giá trị âm đại diện cho công suất tạo ra và giá trị dương đại diện cho công suất tích điện của BESS. Để vận hành BESS cho trạng thái trên, dung lượng lưu trữ của BESS phải đạt 150% công suất định mức tương ứng với 1,5 MWh [21]. Để nâng cao hiệu quả của BESS, dung lượng lưu trữ của BESS trong giai đoạn khảo sát bằng không. Điều này giúp duy trì giai đoạn ban đầu đến cuối cùng của BESS sau khoảng thời gian 24 giờ và đảm bảo BESS có thể hoạt động cho kế hoạch của ngày tiếp theo. Do đó, bài toán tối ưu hóa vị trí và công suất vận hành của BESS cần thỏa mãn các ràng buộc dưới đây: $\sum_{i=1}^{24} P_{BESS,i} = 0$ (10)

Trong đó, $P_{BESS,i}$ là công suất tích lũy của BESS trong khoảng thứ i . Để thỏa mãn ràng buộc này, đối với mỗi vector nghiệm được xem xét, tổng lũy của BESS trong mỗi khoảng được tính. Sau đó, tích của giá trị tuyệt đối của giá trị này với hệ số phạt sẽ được thêm vào giá trị hàm mục

tiêu để phản ánh các ràng buộc ảnh hưởng đến vector nghiệm này. Vì vậy, giá trị phạt cho ràng buộc này sẽ bằng không. Nếu tổng công suất của nó lớn hơn hoặc nhỏ hơn 0, giá trị phạt phụ thuộc vào mức độ vi phạm đối với ràng buộc này sẽ được thêm vào giá trị phù hợp của vector giải pháp. Ngoài ra, việc lắp đặt BESS không được ảnh hưởng tiêu cực đến điện áp và dòng điện của LĐPP. Do đó, các hạn chế dưới đây cần được xem xét.

$$\begin{cases} V_i > V_{low} \text{ và } V_i < V_{high} ; i = 1, 2, \dots, n_{bus} \\ I_j < I_{j,rate} ; j = 1, 2, \dots, n_{branch} \end{cases} \quad (11)$$

Trong đó, V_i là điện áp tại nút thứ i . V_{low} và V_{high} là giới hạn điện áp ngưỡng dưới và ngưỡng trên. I_j và $I_{j,rate}$ là dòng điện hiện tại và dòng điện giới hạn của nhánh thứ j . n_{bus} và n_{branch} là số nút và nhánh trong LĐPP. Sự kết hợp của hàm mục tiêu và các ràng buộc được thể hiện trong hàm thích nghi như sau:

$$F = OF + p \cdot [\max(V_{low} - V_{min}, 0) + \max(V_{max} - V_{high}, 0) + \max(KI_{max} - KI_{rate}) + \sum_{i=1}^{24} P_{BESS,i}] \quad (12)$$

Trong đó, V_{min} và V_{max} là điện áp tối thiểu và tối đa trong LĐPP. KI_{max} và KI_{rate} là hệ số mang tải tốc độ và tối đa của LĐPP và p là hệ số phạt.

3. Mở rộng hoạt động của hệ thống lưu trữ Pin năng lượng trên hệ thống điện phân phối có kết nối năng lượng mặt trời nhằm giảm chi phí năng lượng trong khoảng thời gian 24 giờ

Mỗi giải pháp bao gồm các biến đại diện cho vị trí của BESS và các biến khác đại diện cho công suất của BESS trong mỗi khoảng thời gian. Trong nghiên cứu này, số lượng BESS được giới hạn là một và khoảng thời gian được khảo sát bao gồm 24 giờ. Do đó, mỗi giải pháp ứng viên được biểu thị ở công thức (8). Trong đó, các biến từ x_2 đến x_{25} được biểu thị bằng phần trăm công suất định mức của BESS. Bằng cách sử dụng kỹ thuật biểu thức này, tất cả các biến đều là số nguyên. Quá trình tìm kiếm giải pháp tốt nhất cho vấn đề tối ưu hóa vị trí và khả năng vận hành của BESS bằng CSA [21] được mô tả chi tiết hơn như sau:

Bước 1: Khởi tạo

Khi bắt đầu CSA, tập hợp giải pháp được tạo ra một cách ngẫu nhiên như công thức (13). Trong đó, n là kích thước của tập hợp giải pháp. x_{low} and x_{high} là giới hạn của các biến.

$$S_i = \text{round}(x_{low} + \text{rand.}(x_{high} - x_{low})); i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

Đối với biến được xác định cho vị trí của BESS, giới hạn dưới và trên là 2 và là nút cao nhất trong LĐPP; trong khi giới hạn của các biến còn lại nằm trong khoảng $[-100; 100]$. Trong đó, giá trị âm đại diện cho trạng thái xả, giá trị dương đại diện cho trạng thái sạc của BESS. Tập hợp giải pháp được đánh giá bằng giá trị phù hợp bằng cách sử dụng (12) và giải pháp tốt nhất (S_{gbest}) được tìm thấy.

Bước 2: Cập nhật tập hợp giải pháp dựa trên kỹ thuật Lévy

Để khám phá không gian tìm kiếm, tập hợp mới được tạo ra như công thức (14). Trong đó, φ là hệ số phân phối trong $[0, 2]$. Sau đó, dân số mới được đánh giá bằng hàm thích nghi sử dụng công thức (14). Các giải pháp mới được so sánh với các giải pháp tương ứng hiện tại và chúng được thay thế cho các giải pháp hiện tại nếu hàm thích nghi của chúng tốt hơn các giải pháp tương ứng. Ở cuối bước này, S_{gbest} cũng được cập nhật.

$$S_i^{new} = \text{round}(S_i + (S_i - S_{gbest}) \cdot \text{Levy}(\varphi)); i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

Bước 3: Cập nhật quần thể giải pháp dựa trên cơ chế phát hiện trùng ngoài không gian tìm kiếm. Để khai thác không gian tìm kiếm, tập hợp mới thứ hai được tạo ra như sau:

$$S_i^{new} = \text{round}(S_i + \text{rand}(0,1) \cdot (S_j - S_k) \oplus M(i,:)); i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

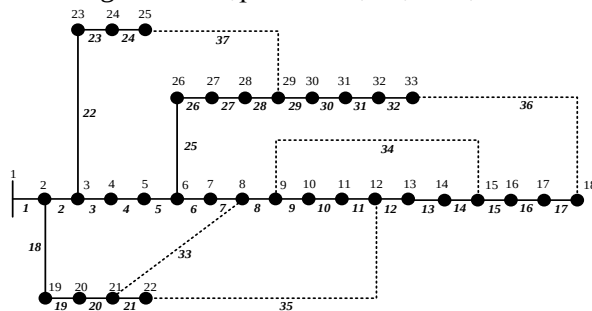
Trong đó, S_j và S_k là giải pháp được chọn ngẫu nhiên trong tổng thể. Biểu tượng của $\oplus$ là viết tắt của sản phẩm không giao hoán. $M(i,:)$ là hàng thứ i của ma trận M được tính bằng $M = \text{rand}(n, 25) > Pa$. Trong đó, Pa là yếu tố đột biến thường được chọn đến 0,25.

Sau đó, dân số mới được đánh giá bằng hàm thích nghi (12). Dựa trên sự so sánh giữa các giải pháp mới và hiện tại, dân số và S_{gbest} được cập nhật một lần nữa tương tự như giai đoạn cuối của bước 2.

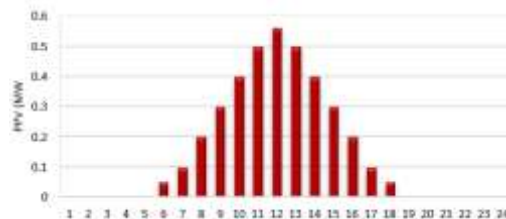
Bước 4: Kiểm tra. Quá trình cập nhật tập hợp giải pháp ở bước 2 và bước 3 thực hiện liên tục cho đến khi số lần lặp đạt giá trị lớn nhất đặt trước ($iter_{max}$). Khi đó, S_{gbest} được coi là câu trả lời cho vấn đề.

4. Kiểm tra kết quả mô phỏng

Vấn đề tối ưu hóa vị trí và công suất vận hành của BESS thông qua phần mềm Matlab 2016a và chạy trên PC có RAM 4GHz và CPU core i5 2,4 GHz. LĐPP 33 nút được sử dụng kiểm tra để tìm vị trí và mở rộng công suất vận hành tối ưu của BESS. Tải tại mỗi nút của hai LĐPP thử nghiệm được giả định là tải trung bình trong một giờ. Giả thiết rằng tại mỗi nút của hệ thống có ba loại phụ tải gồm phụ tải thương mại, dân dụng và công nghiệp. Thời gian xả và thời gian sạc của BESS trên mỗi đơn vị công suất được giả định là bằng nhau và công suất xả hoặc sạc danh định của BESS mỗi giờ được giả định bằng 1 MW. Giá trị của hệ số phạt trong hàm thích nghi được chọn là 1000. Định nghĩa về số giờ sử dụng điện và giá điện tương ứng được lựa chọn dựa trên thông tin của Tập đoàn Điện lực Việt Nam như trong Bảng 1, áp dụng cho lưới điện 33 nút.



Hình 4. Lưới điện mẫu IEEE- 33 nút



Hình 5. Công suất phát của PV

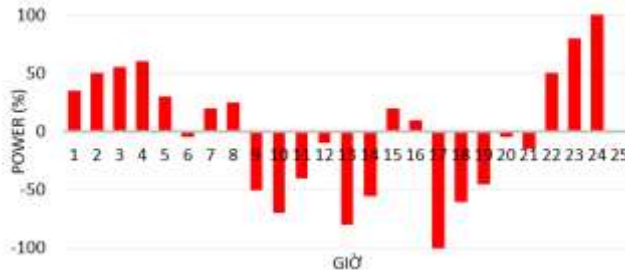
Bảng 1. Số giờ sử dụng điện và giá tương ứng

Thông số	Giờ cao điểm	Giờ bình thường	Giờ thấp điểm
Giờ	9:00 đến 11:00 17:00 đến 20:00	4:00 đến 9:00 11:00 đến 17:00 20:00 đến 22:00	22:00 đến 4:00
Giá điện (\$/kWh)	0,1289	0,0700	0,0454

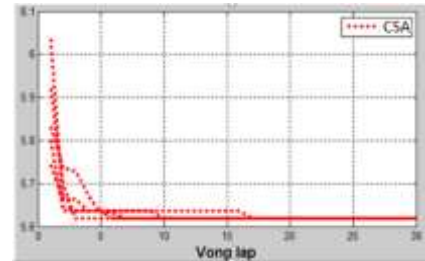
LĐPP 33 nút có cấp điện áp 12,66 kV bao gồm 37 nhánh và 33 nút. Thông số nhánh và nút của LĐPP được tham khảo [24]. Tổng công suất của hệ thống là $3,72 + j2,3$ MVA. Sơ đồ đơn tuyến của hệ thống được cho ở Hình 4. Dòng điện định mức giả định của các nhánh là 255A [25]. Loại tải và tỷ lệ loại tải được tham khảo trong [21]. Với PV được kết nối vào LĐPP ở nút 6, 18 và 22 có công suất phát như Hình 5.

Sau khi thực hiện tìm kiếm bằng CSA, vị trí tối ưu của BESS là nút thứ 11 với công suất tối ưu của BESS trong khoảng thời gian 24 giờ tính bằng phần trăm công suất định mức của BESS là {35; 50; 55; 60; 30; -5; 21; 25; -51; -70; -40; -10; -80; -55; 20; 10; -100; -60; -45; -5; -15; 50; 80; 100}. Công suất thu được của BESS trong khoảng thời gian 24 giờ được thể hiện trong Hình 5. Từ Hình 5 cho thấy công suất của BESS tại mỗi khoảng thời gian không vượt quá giới hạn định mức và tổng công suất trong khoảng thời gian khảo sát bằng không. Kết quả này đảm bảo rằng BESS có thể vận hành cho kế hoạch ngày hôm sau. Để tính toán khả năng lưu trữ của BESS, trước hết phải xác định tổng tích lũy của công suất tối ưu của BESS trong khoảng thời gian 24 giờ. Khi đó, phần tử lớn nhất của mảng tổng tích lũy đã được lấy giá trị tuyệt đối được coi là phần lưu trữ. Do đó, tổng tích lũy của các phần tử của công suất tối ưu của BESS cho LĐPP 18

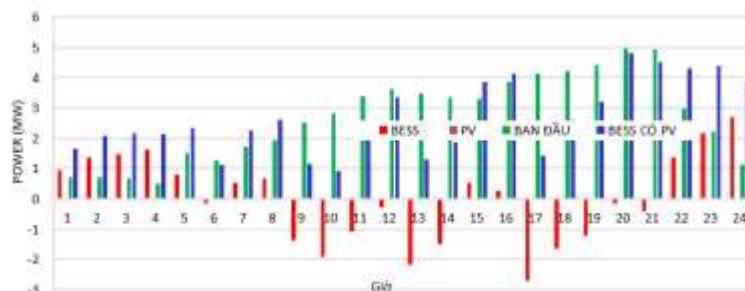
nút là {35; 85; 140; 200; 230; 225; 246; 271; 219; 150; 110; 100; 20; -35; -15; -5; -105; -165; -215; -230; -180; -100; 00} và giá trị lớn nhất của nó là 271. Do đó, dung lượng lưu trữ của BESS cần thiết để vận hành là 2,71 MWh.



Hình 6. Công suất vận hành BESS cho LDPP 33 nút có 3 PV



Hình 7. Đường cong hội tụ lưới 33 nút



Hình 8. Năng lượng mua trước và sau khi đặt BESS cho LDPP 33 nút có 3 PV

Kết quả tính toán do CSA thu được cho LDPP 33 nút có kết nối 3 PV được thể hiện trong Bảng 2. Từ Bảng 2, chi phí mua điện năng đã giảm từ 3971,4943\$ xuống 3246,8923\$. Sau khi lắp đặt BESS, chi phí mua điện đã giảm 724,6020\$ tương ứng với 5,88% cho ngày khảo sát. Hình 6 cho thấy công suất đã mua của hệ thống trước và sau khi lắp đặt BESS. Hình 6 cho thấy trong giờ cao điểm, BESS được xả ra để cung cấp điện cho hệ thống. Cụ thể, vào các khoảng thời gian thứ 10 và 11 tương ứng với khoảng thời gian từ 9 giờ đến 11 giờ là {-51; -70; -40}% và từ 17 giờ đến 20 giờ tương ứng là {-100; -60; -45; -5}% công suất định mức cung cấp cho hệ thống. Hình 7 cho thấy sau 17 vòng lặp thì giải thuật CSA cho kết quả hội tụ. Lượng dung lượng này được lưu trữ chủ yếu trong giờ tiêu chuẩn và thấp điểm. Ngoài ra, kết quả Hình 8 cho thấy tổn thất năng lượng và chi phí tổn thất năng lượng trong giờ cao điểm cũng đã giảm sau khi lắp đặt và vận hành BESS. Khi lắp đặt vận hành BESS cho LDPP có kết nối PV cho thấy việc lắp đặt và vận hành BESS không ảnh hưởng xấu đến cấu hình điện áp và dòng điện của hệ thống mà thậm chí được cải thiện tốt hơn.

Bảng 2. Kết quả tối ưu BESS của LDPP 33 nút có kết nối PV

Trạng thái	Vị trí (nút)	BESS (MW)	Chi phí mua điện (\$)	Chi phí tiết kiệm (\$)	Tổn thất năng lượng (KWh)	Chi phí tổn thất (\$)	Vmin (pu) I/Irate
Ban đầu	-	-	3971,4943	-	1506,884	137,777	-
BESS Không PV	2	1,77	3667,8305	303,6638	1506,4889	137,1419	Vmin=0,9556 I/Irate=0,9245
BESS Có PV	11	2,71	3246,8923	724,6020	865,3432	70,43894	Vmin=0,9724 I/Irate=0,8312

5. Kết luận

Trong bài báo này, mở rộng công suất hoạt động của BESS trong 24 giờ trên LDPP có kết nối PV nhằm giảm chi phí năng lượng. Hàm mục tiêu là tìm ra nút và công suất vận hành tối ưu của BESS trong mỗi khoảng thời gian để giảm thiểu chi phí mua điện. Thời gian 24 giờ khảo sát được, có giờ cao điểm, giờ tiêu chuẩn và giờ thấp điểm để mang lại giá trị về kinh tế do chênh lệch giá điện này. Thuật toán CSA được áp dụng để tối ưu vị trí và mở rộng công suất vận hành của BESS.

Hiệu quả của bài toán được kiểm tra trên LĐPP 33 nút cho thấy phương pháp đề xuất có khả năng giảm chi phí năng lượng cũng như góp phần giảm phụ tải cao điểm trong thời gian 24 giờ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] A. Ahadi, N. Ghadimi, and D. Mirabbasi, "Reliability assessment for components of large scale photovoltaic systems," *J. Power Sources*, vol. 264, pp. 211-219, 2014.
- [2] Y. Liu, W. Wang, and N. Ghadimi, "Electricity load forecasting by an improved forecast engine for building level consumers," *Energy*, vol. 139, pp. 18-30, 2017.
- [3] P. Akbary, M. Ghiasi, M. Reza, and R. Pourkheranjani, "Extracting Appropriate Nodal Marginal Prices for All Types of Committed Reserve," *Comput. Econ*, pp. 1-26, June 2017.
- [4] Y. Li, M. Vilathgamuwa, S. S. Choi, T. W. Farrell, N. T. Tran, and J. Teague, "Development of a degradation-conscious physics-based lithium-ion battery model for use in power system planning studies," *Appl. Energy*, vol. 248, pp. 512-525, 2019.
- [5] X. Luo and J. Wang, MarkDooner, JonathanClarke "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation," *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 511-536, 2015.
- [6] A. Anvari-moghaddam, T. Dragicevic, L. Meng, B. Sun, and J. M. Guerrero, "Optimal Planning and Operation Management of a Ship Electrical Power System with Energy Storage System," *IECON* 2016, pp. 2095-2099, 2016
- [7] H. Ebrahimian, S. Barmayoon, and M. Mohammadi, "The price prediction for the energy market based on a new method," *Econ. Res. Istraživanja*, vol. 31, no. 1, pp. 1-25, 2018.
- [8] M. R. Sheibani, G. R. Yousefi, M. A. Latify, and S. H. Dolatabadi, "Energy storage system expansion planning in power systems: A review," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 12, no. 11, pp. 1203-1221, 2018.
- [9] Y. Cao, Y. Li, G. Zhang, K. Jermisittiparsert, and N. Razmjoooy, "Experimental modeling of PEM fuel cells using a new improved seagull optimization algorithm," *Energy Reports*, vol. 5, pp. 1616-1625, 2019.
- [10] V. Kalkhambkar, R. Kumar, and R. Bhakar, "Energy loss minimization through peak shaving using energy storage," *Perspect. Sci.*, vol. 8, pp. 162-165, 2016.
- [11] R. Li and W. Wang, "Optimal planning of energy storage system in active distribution system based on fuzzy multi-objective bi-level optimization," *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 6, no. 2, pp. 342-355, 2018.
- [12] G. Carpinelli, F. Mottola, D. Proto, A. Russo, and P. Varilone, "A hybrid method for optimal siting and sizing of battery energy storage systems in unbalanced low voltage microgrids' Sci., vol. 8, no. 3, Journal applied Sciences, pp.1-26, 2018.
- [13] M. Farrokhi, "Loss minimization in medium voltage distribution grids by optimal management of energy storage devices," *2013 IEEE Grenoble Conf. PowerTech, POWERTECH 2013*, Mv, 2013, pp. 1-5.
- [14] Z. Yuan, W. Wang, H. Wang, and A. Yildizbasi, "A new methodology for optimal location and sizing of battery energy storage system in distribution networks for loss reduction," *J. Energy Storage*, vol. 29, pp.1-11 (101368), 2020.
- [15] J. Xiao, Z. Zhang, L. Bai, and H. Liang, "Determination of the optimal installation site and capacity of battery energy storage system in distribution network integrated with distributed generation," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 3, pp. 601-607, 2016.
- [16] C. Zhao, H. Yin, Z. Yang, and C. Ma, "Equivalent series resistance-based energy loss analysis of a battery semiactive hybrid energy storage system," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 3, pp. 1081-1091, 2015.
- [17] M. R. Jannesar, A. Sedighi, M. Savaghebi, and J. M. Guerrero, "Optimal placement, sizing, and daily charge/discharge of battery energy storage in low voltage distribution network with high photovoltaic penetration," *Appl. Energy*, vol. 226, pp. 957-966, 2018.
- [18] C. J. Bennett and R. A. Stewart, "Development of a three-phase battery energy storage scheduling and operation system for low voltage distribution networks," *Appl. Energy*, vol. 146, pp. 122-134, 2015.
- [20] E. E. Sfikas, Y.A.Katsigiannis, P.S.Georgilakis "Simultaneous capacity optimization of distributed generation and storage in medium voltage microgrids," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 67, pp.

- 101-113, 2015.
- [29] T. N. Ton, T. T. Nguyen, V. A. Truong, and P. T. Vu, "Optimal location and operation of battery energy storage system in the distribution system for reducing energy cost in 24-hour period," *Int Trans Electr Energy Syst*, vol. e12861, pp. 1-17, 2021.
- [20] T. T. Nguyen and T. T. Nguyen, "An improved cuckoo search algorithm for the problem of electric distribution network reconfiguration," *Appl. Soft Comput.*, vol. 84, pp.1-28 (105720), 2019.
- [21] K. Chandrasekaran and S. P. Simon, "Multi-objective scheduling problem: Hybrid approach using fuzzy assisted cuckoo search algorithm," *Swarm Evol. Comput.*, vol. 5, pp. 1-16, 2012.
- [22] Y. Levron and D. Shmilovitz, "Power systems' optimal peak-shaving applying secondary storage," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 89, pp. 80-84, 2012.
- [23] R. C. Leou, "An economic analysis model for the energy storage system applied to a distribution substation," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 34, no. 1, pp. 132-137, 2012.
- [24] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 2. pp. 1401-1407, 1989.
- [25] S. Ghasemi, "Radial distribution systems reconfiguration considering power losses cost and damage cost due to power supply interruption of consumers," *Int. J. Electr. Eng. Informatics*, vol. 5, no. 3, pp. 297-315, 2013.