

TỐI ƯU DUNG LƯỢNG BESS CHO VẬN HÀNH KINH TẾ
NHÀ MÁY ĐIỆN MẶT TRỜI QUY MÔ LỚN BẰNG THUẬT TOÁN DI TRUYỀN:
TRƯỜNG HỢP NHÀ MÁY ĐIỆN MẶT TRỜI VĨNH TÂN 2
OPTIMAL SIZING OF BESS FOR COST-EFFICIENT OPERATION OF
LARGE-SCALE PV PLANT USING GENETIC ALGORITHM:
THE CASE OF VINH TAN 2 SOLAR POWER PLANT

Trần Việt Thành^{1,3*}, Nguyễn Hữu Hiếu², Lê Cao Quyền³, Lê Ngô Trí Toàn³
¹Nghiên cứu sinh ngành kỹ thuật Điện, Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng, Việt Nam
²Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng, Đà Nẵng, Việt Nam
³Công ty Cổ phần Tư vấn Xây dựng Điện 4, Khánh Hòa, Việt Nam

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: tranvietthanh90@gmail.com
(Nhận bài / Received: 28/02/2025; Sửa bài / Revised: 30/6/2025; Chấp nhận đăng / Accepted: 04/7/2025)
DOI: 10.31130/ud-jst.2025.23(7).112

Tóm tắt - Bài báo nghiên cứu xác định dung lượng tối ưu cho hệ thống pin lưu trữ (BESS) trong lưới điện vận hành kết hợp giữa điện mặt trời - BESS. Thực hiện mô hình hóa các thiết bị điện, BESS, cấu trúc lưới điện trên phần mềm HOMER Pro. Bài báo thực hiện giả định các kịch bản khi toàn bộ lưới vận hành có/không có hệ thống BESS. Các kết quả nghiên cứu tập trung vào chi phí vận hành, chi phí mua điện từ lưới, sản lượng của nhà máy điện mặt trời và BESS cung cấp cho tải,... Để tối ưu các loại chi phí này, bài báo đề xuất ứng dụng hệ thống BESS với giá trị công suất/dung lượng sẽ được tìm ra bằng Thuật toán tối ưu đa mục tiêu di truyền, từ đó chứng minh tính ưu việt của thiết bị BESS trong bài toán tối ưu chi phí vận hành cũng như giảm thiểu tối đa sự lãng phí năng lượng mà nhà máy điện mặt trời công suất lớn đầu nối vào hệ thống phát dư thừa lên lưới.

Từ khóa - Điện mặt trời; BESS; Thuật toán di truyền; Tối ưu đa mục tiêu; Hệ thống điện

Abstract - This paper investigated and determined the optimal capacity for a Battery Energy Storage System (BESS) in a power grid operating in combination with solar power and BESS. The models of electrical devices, BESS, and grid structure have been implemented based on HOMER Pro software. The study assumes scenarios where the entire grid operates with and without a BESS. The research results focus on operating costs, electricity purchase costs from the grid, energy supplied by the BESS and PV plants to the load. To optimize these costs, the paper proposes applying a BESS with optimal power/capacity values determined through a Multi-objective genetic optimization algorithm. This approach demonstrates the advantages of BESS in optimizing operating costs and minimizing energy wastage from large-scale solar power plants generating excess power into the grid.

Key words - Photovoltaic cell; BESS; Genetic Algorithm; Multi-Objective Optimization; Power system

1. Đặt vấn đề

Phát triển các nguồn năng lượng tái tạo (NLTT) đang là xu hướng và mục tiêu quan trọng của ngành năng lượng trên toàn thế giới nói chung và Việt Nam nói riêng. Công suất lắp đặt các nguồn NLTT trên toàn cầu đã tăng gần 50% lên gần 510 giga-watt (GW) vào năm 2023, tốc độ tăng trưởng nhanh nhất trong hai thập kỷ qua. Trên toàn cầu, chỉ riêng năng lượng mặt trời đã chiếm 3/4 tổng công suất bổ sung các nguồn năng tái tạo [1]. Tuy nhiên, việc đầu nối ồ ạt các dự án điện mặt trời ở nước ta giai đoạn đỉnh điểm (2019-2021) đã tạo áp lực cực lớn lên hệ thống điện, đặc biệt là vấn đề ổn định tần số, điện áp cũng như cân bằng phụ tải, tối ưu hóa chi phí vận hành hệ thống điện [2], [3], [4] do bản chất phụ thuộc rất nhiều vào điều kiện thời tiết. Do đó, các nhà vận hành buộc phải cắt giảm công suất các nhà máy điện mặt trời để đảm bảo an ninh hệ thống điện, nhất là ở các tỉnh Ninh Thuận và Bình Thuận - khu vực có mật độ tập trung các nhà máy điện mặt trời cao nhất.

Tuy nhiên, phương án này lại gây ra sự lãng phí rất lớn năng lượng mặt trời vào những ngày nắng to khi không có giải pháp lưu trữ chúng để tận dụng vào những thời điểm lưới điện bị thiếu hụt công suất phát hoặc vào thời điểm nhu cầu tải cực đại.

Bảng 1. Số liệu công suất của các nhà máy điện mặt trời khu vực Nam Trung Bộ theo Quy hoạch điện VIII [5]

Các tỉnh	Phú Yên	Khánh Hòa	Ninh Thuận	Bình Thuận
Công suất đã được phê duyệt bổ sung quy hoạch				
MWp	694	645	3130	1527
Công suất tiềm năng				
MWp	5265	1284	5562	5979

Trong bối cảnh đó, phương án lắp đặt BESS trong lưới điện phân phối có thể cải thiện hiệu suất của hệ thống, tùy thuộc vào vị trí lắp đặt và công suất của BESS. Do đó, việc tìm ra dung lượng phù hợp nhất cho BESS là một nhiệm vụ

¹ Faculty of Electricity, The University of Danang – University of Science and Technology, Vietnam (Tran Viet Thanh)

² The University of Danang – University of Science and Technology, Da Nang, Vietnam (Nguyen Huu Hieu)

³ Power Engineering Consulting Joint Stock Company 4, Khanh Hoa, Vietnam (Tran Viet Thanh, Le Cao Quyen, Le Ngo Tri Toan)

quan trọng cần được nghiên cứu và xem xét nhằm nâng cao độ tin cậy trong phát điện, hiệu suất của hệ thống, đồng thời giảm thiểu chi phí vận hành. Đã có nhiều nghiên cứu được thực hiện nhằm tìm ra các phương pháp xác định tham số này để tối ưu cho BESS. Chẳng hạn: nghiên cứu [6] thực hiện, dựa trên thuật toán phức hồi trạng thái sác của một hệ thống kết hợp giữa gió-diesel-BESS ở huyện đảo Phú Quý, đã giúp duy trì dung lượng của BESS luôn nằm trong ngưỡng vận hành ổn định, từ đó tăng tuổi thọ pin và ổn định nhanh các dao động đến từ các nguồn NLTT. Ở các nghiên cứu [7-9], các tác giả đã đưa ra các giải pháp xác định công suất/dung lượng BESS phù hợp với từng yêu cầu của bài toán, khi kết hợp với các nguồn NLTT cho lưới điện quy mô nhỏ, đảm bảo vận hành tối ưu và hiệu quả hệ thống. Trong [10], A. Fathy đã đề xuất thuật toán *Chim ruồi nhân tạo* (Artificial Hummingbird Algorithm) để xác định vị trí và kích thước tối ưu cho các tổ máy phát điện phân tán sử dụng sinh khối trong lưới phân phối hình rẽ nhánh có sử dụng BESS, giúp giảm thiểu tổn thất công suất tác dụng và độ lệch điện áp. N. Jayasekara và cộng sự [11] đã giới thiệu giải pháp lắp đặt tối ưu BESS kết hợp với hệ thống điện mặt trời-gió bằng *Phương pháp điểm nội* (Interior Point Method) trong điều khiển vận hành phối hợp với hệ thống quản lý dữ liệu và năng lượng của lưới điện phân phối IEEE 33-Bus, giúp giảm chi phí vận hành hệ thống phân phối và chi phí thay pin. Trong [12], M. Khalid và cộng sự đã xác định vị trí lắp đặt và công suất tối ưu cho BESS và các tổ máy phát phân tán trong hệ thống microgrid độc lập 17-Bus kết nối với các tải dân cư và xe điện (EV) bằng thuật toán *Tối ưu dựa trên học - dạy* (Teaching Learning-based Optimization), kết quả cho thấy tồn tại hệ thống đã giảm đi rõ rệt và chất lượng điện áp được cải thiện. Tuy đã có nhiều phương pháp được sử dụng để xác định dung lượng/công suất tối ưu cho BESS trong hệ thống phân phối nhằm giảm chi phí hệ thống như: chi phí lắp đặt và thay thế, tổn thất truyền tải, điều chỉnh điện áp, chi phí công suất đỉnh,... thế nhưng phần lớn các nghiên cứu chỉ xem xét một hoặc hai loại chi phí hệ thống, mặc dù tất cả các chi phí đều đóng vai trò quan trọng. Vì vậy, một số nghiên cứu đã xem xét nhiều hơn hai loại chi phí bằng cách áp dụng một số thuật toán tối ưu mới. Trong [13], S. Khunkitti và cộng sự đề xuất sử dụng đồng thời thuật toán *Tối ưu bầy đàn* (Particle Swarm Optimization) và *Bầy đàn Salp* (Salp Swarm Algorithm) nhằm xác định vị trí và kích thước tối ưu cho BESS trong lưới phân phối kết nối với các tổ máy phát phân tán, qua đó giúp giảm các loại chi phí như tổn thất truyền tải, điều chỉnh điện áp và chi phí công suất đỉnh. Ngoài ra, V. Janamala và cộng sự [14] sử dụng hai thuật toán *Tối ưu Coyote* (Coyote Optimization Algorithm) kết hợp với *Tối ưu Sói xám* (Grey Wolf Optimization) để tìm ra phương án tích hợp tối ưu hệ thống PV liên tuyến cho từng mức độ thâm nhập của tải xe điện (EV), hướng đến mục tiêu giảm tổn thất công suất tác dụng và cải thiện điện áp lưới. Tuy nhiên, đa phần các nghiên cứu này chỉ xem xét bài toán chi phí vận hành và bảo trì hệ thống mà không bao gồm chi phí đầu tư và chi phí thay thế pin.

Trong bối cảnh đó, nhận thấy vấn đề phải thường xuyên cắt giảm công suất phát của các nhà máy đã gây ra sự lãng phí to lớn cho hệ thống điện, cũng như các nghiên cứu về tối ưu dung lượng/công suất BESS có xét đến đầy đủ các loại chi phí chiến lược vẫn còn khá ít, do vậy bài báo tiến hành nghiên cứu trang bị hệ thống BESS với dung

lượng/công suất được tối ưu để đánh giá tác động của nó đến nhà máy điện mặt trời (NMĐMT) Vĩnh Tân 2 thông qua hệ thống phối hợp giữa điện mặt trời - BESS - phụ tải xuất tro bay của nhà máy Nhiệt điện Vĩnh Tân 2 nằm cạnh đó. Phần mềm HOMER Pro và Thuật toán tối ưu đa mục tiêu di truyền được sử dụng trong quá trình mô phỏng, phân tích giải quyết vấn đề này.

2. Phương pháp luận và mô hình tính toán

Với mục đích xác định được dung lượng tối ưu của hệ thống BESS nhằm xác định được thời điểm cần thiết để kích hoạt chế độ sạc/xả của nó. Qua đó đảm bảo được chi phí vận hành tối ưu hệ thống cũng như đảm bảo mục tiêu nâng cao ổn định lưới điện thông qua các ràng buộc của hệ thống điện (Cân bằng giữa tải và nguồn, giới hạn vận hành của hệ thống BESS, giới hạn dung lượng và công suất BESS,...), bài báo sẽ tập trung phân tích, tính toán thông qua các mục tiêu dưới đây:

Mục tiêu 01: Tối ưu chi phí đầu tư để xác định kích cỡ của hệ thống BESS;

Mục tiêu 02: Tối ưu chi phí thay thế để xác định tuổi thọ của hệ thống BESS;

Mục tiêu 03: Tối ưu chi phí vận hành và bảo trì để xác định chi phí điều chỉnh điện áp, chi phí tổn thất truyền tải và chi phí cho nhu cầu tải đỉnh.

2.1. Thuật toán Tối ưu đa mục tiêu di truyền

Khi xét một bài toán Tối ưu đa mục tiêu, điều kiện tiên quyết để tìm ra lời giải là phải cực tiểu hoá/cực đại hoá một số hàm mục tiêu mà vẫn đảm bảo đáp ứng được các ràng buộc mà bài toán đặt ra. Bất kỳ giải pháp khả thi nào được tìm thấy (bao gồm cả các giải pháp tối ưu) đều bắt buộc phải thoả mãn các ràng buộc này [15]. Dưới đây là một số dạng hàm mục tiêu được sử dụng trong các bài toán tối ưu:

$$\begin{aligned} f_m(x) & \quad m = 1, 2, \dots, M; \\ g_j(x) & \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, J; \\ h_k(x) & = 0 \quad k = 1, 2, \dots, K; \\ x_i^{(L)} & \leq x_i \leq x_i^{(U)} \quad i = 1, 2, \dots, n; \end{aligned}$$

Trong đó, $x \in R^n$ là vector của n biến quyết định $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$. Các nghiệm thỏa mãn các ràng buộc tạo thành *Không gian biến quyết định khả thi* $S \subset R^n$. Trong các bài toán MO, các hàm mục tiêu tạo thành một không gian đa chiều (M-dimensional), được gọi là *Không gian mục tiêu* $Z \subset R^M$. Đối với mỗi nghiệm x trong Không gian biến quyết định khả thi S , tồn tại một điểm $z \in R^M$ trong Không gian mục tiêu Z . Quá trình phân loại sẽ chọn ra các giải pháp không bị chiếm ưu thế (Non-dominated solutions), còn được gọi là giải pháp tối ưu Pareto (Pareto-optimal solutions - POS) [16]. Để xác định POS của một thuật toán tối ưu đa mục tiêu di truyền, thuật toán di truyền được áp dụng.

Thuật toán di truyền (Genetic Algorithms - GA) là được lấy cảm hứng từ lý thuyết tiến hóa và chọn lọc tự nhiên của Darwin. Nó phản ánh một quá trình chọn lọc khắc khe, chọn ra những cá thể ưu tú nhất “để sinh sản và tạo ra thế hệ tiếp theo”. Áp dụng nguyên lý đó, thuật toán GA sẽ bắt đầu bằng việc tạo ra một *quần thể cha-mẹ chứa các giải pháp ban đầu*, trải qua nhiều giai đoạn đánh giá đối với từng hàm mục tiêu để xác định giá trị tương thích của từng

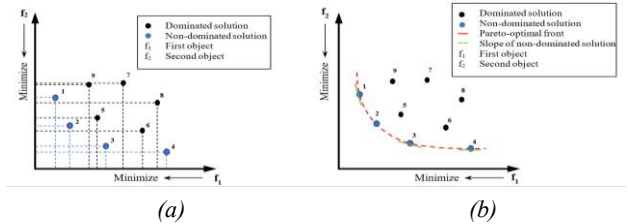
giải pháp. Sau đó, mỗi cặp giải pháp bất kì được đưa vào quá trình phân loại (chọn lọc), từng cặp được so sánh với nhau nhằm kiểm tra xem các điều kiện sau đây có được thoả mãn không [17]:

- Giải pháp x_1 tốt hơn giải pháp x_2 về mọi tiêu chí. Các giải pháp được so sánh dựa trên giá trị tương thích của chúng đối với các hàm mục tiêu;
- Giải pháp x_1 hoàn toàn tốt hơn giải pháp x_2 với ít nhất một mục tiêu.

Khi đó, x_2 được xem là *Giải pháp bị chi phối* (Dominated solution) bởi x_1 . Các giải pháp bị chi phối không được xem là tối ưu vì có một giải pháp khác tốt hơn nó ở mọi mặt hoặc ít nhất một mặt. Theo đó, quá trình phân loại sẽ đánh giá tất cả các giải pháp để xác định những *Giải pháp không bị chi phối* (Non-dominated solution hay Pareto-optimal) - các phương án tốt nhất mà nếu muốn cải thiện một mục tiêu nào đó thì phải chấp nhận “đánh đổi” ít nhất một yếu tố khác. Các tiêu chí để kết thúc quy trình phân loại bao gồm: Giới hạn về mức độ tương thích; thời gian; số thế hệ; sai số hàm mục tiêu và điểm kết thúc của các vòng lặp. Nếu các tiêu chí kết thúc chưa đạt đến, thuật toán di truyền tiếp tục tạo ra *một quần thể con từ tập hợp quần thể đã được chọn*. Ngược lại, quá trình tối ưu hóa trả về các giải pháp không bị chi phối.

GA sử dụng hai toán tử để tạo ra quần thể con: Lai ghép và Đột biến. Lai ghép sẽ cho ra một giải pháp tổng thể được tối ưu từ hai giải pháp trở lên. Đột biến sẽ xáo trộn các giải pháp dựa trên sự thay đổi ngẫu nhiên, tạo điều kiện để thuật toán thoát khỏi các nghiệm tối ưu cục bộ và tìm ra nghiệm tối ưu toàn cục. Một tập hợp chứa các giải pháp nhất định (hoặc các điểm tương ứng trên Không gian mục tiêu, minh họa Hình 1) có thể thực hiện so sánh từng cặp bằng cách sử dụng 02 điều kiện đã trình bày ở trên và xác định xem một điểm có bị chi phối bởi điểm khác hay không [18].

Các điểm không bị chi phối bởi bất kỳ một điểm nào trong tập hợp được gọi là *Non-dominated points*. Tập hợp các điểm này cùng nhau cấu thành *Pareto-optimal front* trong không gian mục tiêu. Các vector biên quyết định x được gọi là *Giải pháp tối ưu Pareto* (Pareto-optimal solutions). Độ dốc của nghiệm không bị chi phối được sử dụng để đánh giá mối quan hệ “đánh đổi” giữa các hàm mục tiêu trong bài toán tối ưu đa mục tiêu: Độ dốc càng lớn thì bất kỳ sự thay đổi nào (dù là một ít) trong một mục tiêu sẽ làm ảnh hưởng đáng kể đến các mục tiêu càng lại.



Hình 1. Tập hợp các điểm (a) và Pareto-optimal front (b) [18]

Nhờ vào những đặc điểm độc đáo này mà thuật toán tối ưu đa mục tiêu di truyền đã cho thấy sự vượt trội của nó khi so với các thuật toán truyền thống như: tối ưu bầy đàn (PSO), tìm kiếm chim Cuckoo (CS), tối ưu sói xám (GWO), tìm kiếm Fractal ngẫu nhiên (SFS),... Tuy thuật toán có tốc độ hội tụ chậm hơn các thuật toán khác nhưng bù lại, nhờ có Lai ghép và Đột biến, thuật toán có thể dễ

dàng xử lý các ràng buộc đầu vào song song và các hạn chế cố hữu của bài toán tối ưu, cũng như cải thiện khả năng tìm ra các giải pháp tối ưu toàn cục trong không gian tìm kiếm rộng lớn. Bảng dưới đây thể hiện các đặc điểm chính của thuật toán đề xuất khi so sánh với các thuật toán phổ biến.

Bảng 2. So sánh thuật toán đề xuất với một số thuật toán khác

Tiêu chí	Đề xuất	GWO	CS	PSO	SFS
Khả năng tránh rơi vào giá trị cục bộ	Rất tốt (Lai ghép và Đột biến)	Tốt (Mô phỏng hành vi săn mồi của sói xám)	Tốt (Loại bỏ “tổ”, tức nghiệm xấu nhanh chóng)	Đề rơi vào cực bộ nếu không điều chỉnh	Tốt (Tìm kiếm dựa trên phân dạng)
Khả năng Tối ưu đa mục tiêu	Rất mạnh (Tập nghiệm Pareto rõ)	Cần mở rộng để xử lý	Khó tích hợp trực tiếp	Có thể mở rộng để xử lý	Hiếm thấy áp dụng
Khả năng mở rộng số lượng Mục tiêu	Tốt	Không hỗ trợ	Hạn chế	Trung bình	Hiếm thấy áp dụng
Xử lý các bài toán rời rạc/tổ hợp	Rất tốt (Nhờ mã hóa nhị phân)	Trung bình	Hạn chế	Cần cải tiến	Tốt
Tốc độ hội tụ	Chậm hơn PSO/GWO	Nhanh	Nhanh	Nhanh nhất	Chậm
Khả năng xử lý song song các ràng buộc	Rất tốt	Tốt	Tốt	Tốt	Tốt
Ảnh hưởng tới khởi tạo ban đầu	Ổn định	Trung bình	Cao	Rất cao	Tốt
Độ trực quan hóa kết quả	Rất cao	Trung bình	Không rõ ràng	Tốt	Không rõ ràng
Khả năng mô phỏng BESS phức tạp	Rất cao	Trung bình	Giới hạn	Cao	Tốt
Khả năng kết hợp các thuật toán khác	Rất cao	Tốt	Trung bình	Tốt	Trung bình
Yêu cầu điều chỉnh tham số	Phức tạp	Đơn giản	Đơn giản	Đơn giản	Trung bình

2.2. Mô hình thuật toán và các phần tử trong hệ thống

2.2.1. Phương pháp luận và phần mềm ứng dụng

Phương pháp xây dựng các kịch bản mô phỏng cần phải xem xét đến khả năng diễn biến cân bằng giữa cung và cầu, sự thay đổi của phụ tải, bản chất và thời gian biểu của các dự án nguồn điện đã lên kế hoạch khác, các giả định về chi phí nhiên liệu và những yếu tố khác. Việc phân tích phải xét đến các mô hình phụ tải hằng ngày để đánh giá nhu cầu hỗ trợ, đạt đỉnh và liệu nhu cầu đó có đáp ứng tốt nhất thông qua Hệ thống BESS hay không. Nhà máy Nhiệt điện Vĩnh Tân 2, NĐMT Vĩnh Tân 2 và hệ thống BESS, cũng như sự vận hành của chúng trong thời gian thực của kỳ quy hoạch được mô phỏng và tính toán bằng phần mềm HOMER Pro.

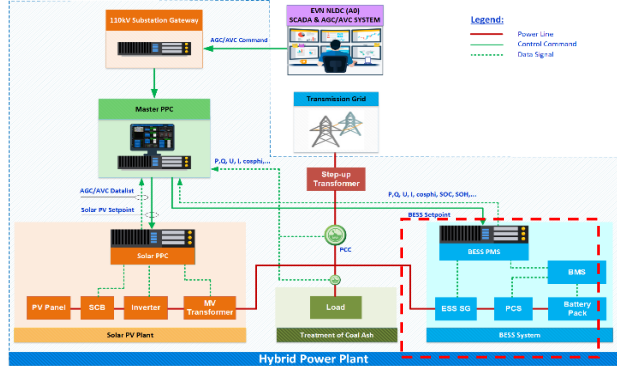
Đối với yêu cầu bài toán, bài báo lựa chọn chế độ Scheduled Rate cho phép xác định giá mua bán điện theo các thời gian cụ thể tại hợp đồng mua bán điện của tải tự dùng, chi tiết tại Bảng 3.

Bảng 3. Quy định giá bán điện 3 pha cho phụ tải tự dùng nhà máy (theo hợp đồng mua bán điện)

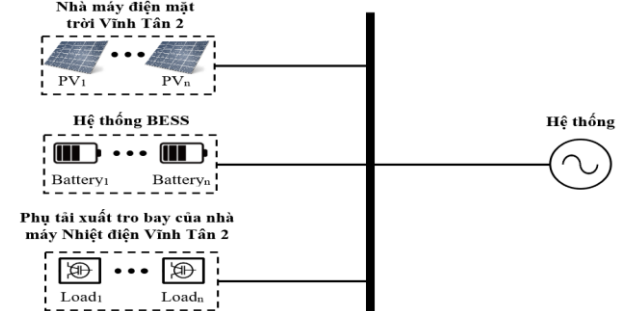
Khung giờ tính giá điện	Giá mua (VND)	Giá mua (USD)	Ghi chú
Giờ bình thường	1.536	0,063	Gồm các ngày từ thứ Hai đến thứ Bảy: +Từ 04 giờ 00 đến 9 giờ 30 (05 giờ và 30 phút); +Từ 11 giờ 30 đến 17 giờ 00 (05 giờ và 30 phút); +Từ 20 giờ 00 đến 22 giờ 00 (02 giờ). Ngày Chủ nhật: +Từ 04 giờ 00 đến 22 giờ 00 (18 giờ).
Giờ thấp điểm	970	0,04	Tất cả các ngày trong tuần: +Từ 22 giờ 00 đến 04 giờ 00 sáng ngày hôm sau (6 giờ)
Giờ cao điểm	2.759	0,12	Gồm các ngày từ thứ Hai đến thứ Bảy: +Từ 09 giờ 30 đến 11 giờ 30 (02 giờ); +Từ 17 giờ 00 đến 20 giờ 00 (03 giờ). Ngày Chủ nhật: không có giờ cao điểm.

Mô hình nguyên lý kết nối và điều khiển hệ thống bao gồm NMĐMT Vĩnh Tân 2 (Solar PV Plant) và hệ thống BESS (BESS System) thể hiện ở Hình 2. Hệ thống *Master PPC* sẽ giao tiếp với hệ thống điều khiển *Solar PPC* hiện hữu, hệ thống *BESS PMS* giám sát điều khiển BESS, đồng thời thu thập các tín hiệu đo lường và trạng thái của các ngăn lộ tổng, lộ ra máy biến áp cấp điện cho phụ tải, để thực hiện các logic điều khiển tùy theo điều kiện vận hành tại NMĐMT Vĩnh Tân 2 dựa trên các lệnh điều độ của Trung tâm điều độ Hệ thống điện Quốc gia A0 (NLDC).

Xét về độ tin cậy và lợi ích kinh tế, bài báo đề xuất mô hình hệ thống với phụ tải ở trạng thái nổi lưới. Sơ đồ nguyên lý được thể hiện ở Hình 3.



Hình 2. Mô hình nguyên lý kết nối và điều khiển hệ thống gồm Solar PV Plant và BESS System



Hình 3. Mô hình hệ thống được đề xuất với phụ tải xuất tro bay ở trạng thái nổi lưới

Kết quả tính toán sản lượng điện mà phụ tải mua từ lưới (theo các tháng trong các năm tính toán) sẽ thể hiện kết quả sản lượng điện vận hành của hệ thống cần trong một năm. Sau khi xác định được quy mô sản lượng điện và thời điểm vận hành thì bài báo tập trung vào các chi phí vận hành thể hiện vào các khung giờ (giờ thấp điểm, giờ bình thường và giờ cao điểm), từ đó tính ra Chi phí mua điện từ lưới cho kịch bản “Không sử dụng hệ thống BESS” và “BESS được chọn đưa vào trong hệ thống điện”. Cuối cùng kết quả nhận được sẽ là Sự chênh lệch chi phí vận hành hằng năm từ 02 kịch bản ở trên, từ đó đưa ra đánh giá cho từng kịch bản.

2.2.2. Các kịch bản tính toán

Để tính toán xác định chi phí tối ưu dung lượng của hệ thống BESS, bài báo sẽ sử dụng mô hình tính toán tối ưu hóa chi phí cực tiểu và thuật toán mới nêu trên trong phần mềm HOMER Pro. Phần mềm cho phép người dùng xây dựng các kịch bản tính toán cho hệ thống điện bằng cách kết hợp với nhiều thuật toán. Trong nghiên cứu này, bài báo áp dụng thuật toán tối ưu đa mục tiêu di truyền ở chế độ Scheduled Rate nhằm tính toán và xác định các chi phí trong quá trình vận hành của hệ thống BESS, cũng như vai trò của nó trong cơ cấu nguồn điện của Việt Nam.

Hệ thống điện tự dùng cấp nguồn cho hệ thống xuất tro bay NMĐ Vĩnh Tân 2. Xem xét bỏ qua các chi phí đầu tư, chi phí ngoại sinh, chi phí huy động tổ máy...) chỉ tập trung phân tích các chi phí sản xuất điện với 02 Kịch bản:

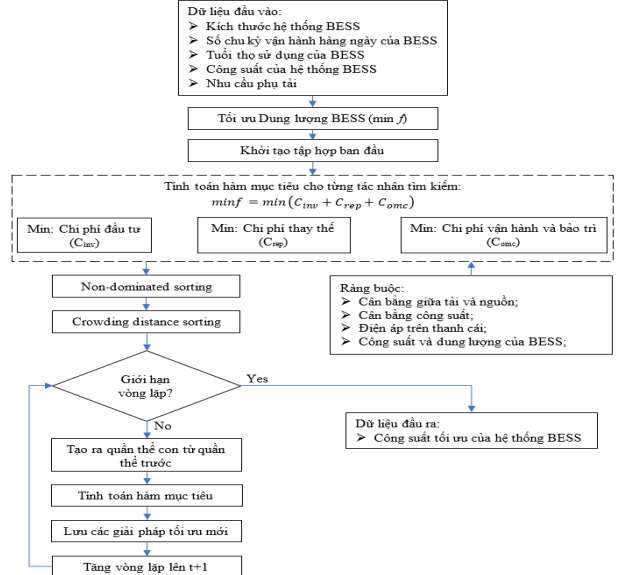
Kịch bản 1: xem xét vận hành hệ thống điện mà không có hệ thống BES;

Kịch bản 2: xem xét vận hành hệ thống điện có hệ thống BESS;

Tương ứng với 02 kịch bản, bài báo sẽ phân tích luận chứng sự cần thiết đầu tư xây dựng hệ thống BESS với các mục tiêu sử dụng sản lượng điện chưa được huy động (do quá tải lưới điện 110 kV).

2.3. Mô hình thuật toán

Lưu đồ thuật toán của bài toán được thể hiện ở Hình 4 dưới đây.



Hình 4. Lưu đồ bài toán Tối ưu dung lượng hệ thống BESS bằng thuật toán tối ưu đa mục tiêu di truyền

2.3.1. Nguyên tắc tìm kiếm Tối ưu đa mục tiêu di truyền

Trong bài toán tối ưu đa mục tiêu, mức độ quan trọng của từng mục tiêu là ngang nhau. Các giải pháp khác nhau sẽ sinh ra sự mâu thuẫn giữa các kết quả cho từng mục tiêu. Nếu muốn chọn một giải pháp chỉ thỏa mãn một mục tiêu, đòi hỏi phải có sự cân nhắc kỹ càng (đánh đổi) với các mục tiêu khác. Điều này là để ngăn chặn việc chọn một giải pháp tối ưu chỉ thỏa mãn một mục tiêu duy nhất mà bỏ qua các mục tiêu khác [19]. Do đó, quy trình xử lý các bài toán tối ưu đa mục tiêu hoạt động theo nguyên tắc sau:

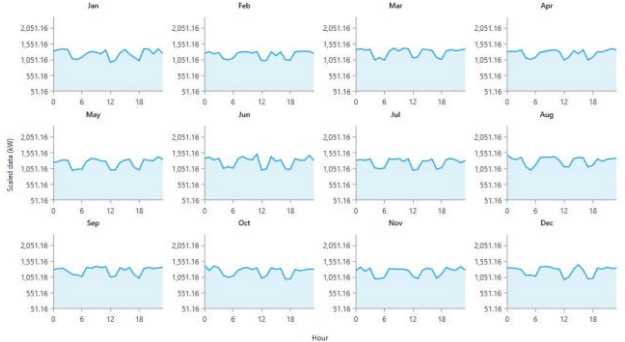
- Bước 1: Tìm các điểm Non-dominated points càng gần với Pareto-optimal front càng tốt, với “vùng cân nhắc” rộng trên toàn bộ các mục tiêu;

- Bước 2: Chọn một trong các giải pháp (đã nhận được từ bước 1) và tiến hành đánh giá mức độ tương thích của nó đối với bài toán.

2.4. Các thông số dữ liệu đầu vào

2.4.1. Mô hình phụ tải

Trong bài toán này, vì tải chưa đi vào hoạt động nên việc có được dữ liệu tải tiêu thụ theo giờ liên tục suốt 1 năm là chưa có để sử dụng. Bài toán đưa ra mô hình của tải tiêu thụ dựa trên lượng tải tiêu thụ trung bình hàng ngày. Theo đó, hệ thống xuất tro bay NMNĐ Vĩnh Tân 2 được giả định là tải tiêu thụ công nghiệp với lượng tiêu thụ tải trung bình một ngày là 38.500 kWh/ngày. Nguồn điện cấp cho tải có 2 cấp điện áp là 6,6 kV và 0,4 kV AC với tổng công suất tải phục vụ tương ứng là 1400 kW và 994.715 kW tương đương với tổng công suất tải là 2.394,715 kW.



Hình 5. Đồ thị đặc tính vận hành của phụ tải xuất tro bay trong 01 ngày

2.4.2. Bức xạ mặt trời

Thông tin dữ liệu bức xạ mặt trời và độ quang mây được trích xuất từ phần mềm Meteonorm 8.0 cho dữ liệu trung bình từ năm 1995-2025 tại khu vực Vĩnh Tân, huyện Tuy Phong, tỉnh Bình Thuận. Bảng 4 minh họa giá trị trung bình tháng của bức xạ mặt trời của khu vực trong 1 năm.

Bảng 4. Dữ liệu bức xạ mặt trời (điển hình 1 năm)

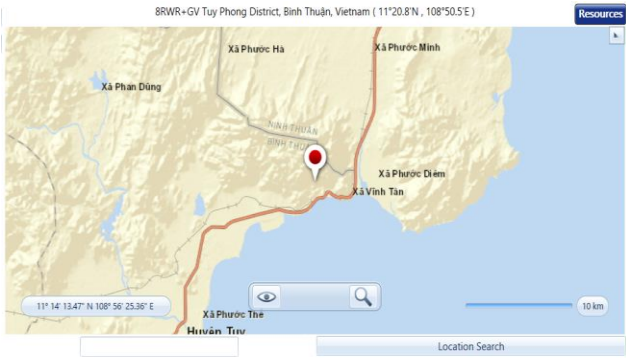
Tháng	Bức xạ mặt trời toàn phần theo phương ngang - GHI (kWh/m ²)	Bức xạ mặt trời trực tiếp theo phương vuông góc - DNI (kWh/m ²)	Nhiệt độ (°C)
1	155,1	65,9	24,6
2	154,3	62,7	25,2
3	173,7	77,2	27,1
4	189,7	76,9	28,6
5	181,1	74,5	29,5

Tháng	Bức xạ mặt trời toàn phần theo phương ngang - GHI (kWh/m ²)	Bức xạ mặt trời trực tiếp theo phương vuông góc - DNI (kWh/m ²)	Nhiệt độ (°C)
6	177,2	77,7	28,6
7	165,0	84,3	28,2
8	167,6	87,6	27,9
9	141,8	73,4	27,0
10	150,1	78,4	27,0
11	108,5	64,5	26,2
12	141,4	69,0	25,4
Tổng	1.905,6	892,2	27,1

2.4.3. Các tấm pin mặt trời

NMĐMT Vĩnh Tân 2 có công suất là 42,65 MWp có sẵn. Do đó, có thể mô phỏng lại nhà máy trong HOMER Pro bằng cách sử dụng mô hình có sẵn trong phần mềm, tên gọi là “Generic flat plate PV” với các thông số được tùy chỉnh cho tấm pin theo thực tế của Nhà máy:

- Số lượng tấm pin: 121.856 tấm;
- Loại: Pin quang điện Poly C-Si;
- Công suất lớn nhất: 350 Wp;
- Điện áp tại điểm công suất (P_{mpp}): 39,11 V;
- Dòng điện tại điểm công suất (I_{mpp}): 8,95 A;
- Điện áp hở mạch (U_{oc}): 47,10 V;
- Dòng điện ngắn mạch (I_{sc}): 8,95 A;
- Hiệu suất Module: 17,8%;
- Dải nhiệt độ vận hành hệ thống: $-40^{\circ}\text{C} \div +85^{\circ}\text{C}$;
- Điện áp tối đa của hệ thống: 1,500 VDC;
- Tuổi thọ của các tấm pin: 25 năm.



Hình 6. Tọa độ địa lý của khu vực đặt NMĐMT Vĩnh Tân 2

2.4.4. Hệ thống BESS

Loại pin được sử dụng trong hệ thống là mô hình pin lý tưởng (Idealized Battery Model) có sẵn trong thư viện phần mềm HOMER có:

- Điện áp: 600V;
- Dung lượng: 1.670 Ah;
- Tuổi thọ tối đa của pin theo công nghệ hiện tại: khoảng 12 năm;
- Hiệu suất khứ hồi của pin: 0,9 (đã bao gồm hao phí do bộ chuyển đổi DC-to-DC);
- Trạng thái lưu trữ thấp nhất của pin: 5%;
- Trạng thái ban đầu khi được tính toán: 0%;

- Thời gian hoạt động tối thiểu: ít nhất 10 năm.

Mô hình pin lý tưởng giả định rằng các đặc tính của pin không đổi trong suốt thời gian sử dụng (không tính đến sự suy hao pin theo thời gian và sau mỗi lần sạc) và không bị ảnh hưởng bởi các yếu tố bên ngoài như nhiệt độ.

a. Kích thước của hệ thống BESS được cho bởi công thức sau [20]

$$N_{BESS} = \frac{|E_{BESS}^{max} - E_{BESS}^{min}|}{DOD^{max}}$$

Trong đó: N_{BESS} - kích thước của hệ thống BESS; E_{BESS}^{max} - năng lượng cực đại mà BESS có thể lưu trữ; E_{BESS}^{min} - năng lượng cực tiểu mà BESS có thể lưu trữ; DOD^{max} - độ xả sâu lớn nhất của BESS.

b. Số chu kỳ vận hành hàng ngày của BESS được tính như sau [20]

$$A_{BESS} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sum_{t=1}^T [E_{BESS}(t) - E_{BESS}(t-1)]}{DOD^{max} \cdot N_{BESS}} \right\}$$

Trong đó: A_{BESS} - số chu kỳ vận hành hàng ngày của hệ thống BESS; $E_{BESS}(t), E_{BESS}(t-1)$ - năng lượng trong BESS tại thời điểm t và $t-1$; T - chu kỳ vận hành của hệ thống BESS.

c. Tuổi thọ sử dụng của BESS được cho bởi [20]

$$B_{BESS} = \frac{Cyc_{life}}{A_{BESS} \cdot D}$$

Trong đó:

B_{BESS} - chu kỳ tuổi thọ thực tế của hệ thống BESS tính theo năm;

Cyc_{life} - số chu kỳ trong tuổi thọ danh nghĩa của BESS;
 D - số ngày vận hành.

d. Hàm mục tiêu “Tối ưu dung lượng BESS”

- Chi phí đầu tư (C_{inv})

Chi phí đầu tư cho hệ thống BESS được xác định bởi:

$$C_{inv} = N_{BESS} \cdot \gamma_{inv}$$

Trong đó: γ_{inv} là tỷ lệ chi phí lắp đặt của hệ thống BESS.

- Chi phí thay thế (C_{rep})

Chi phí thay thế của BESS được xác định bởi:

$$C_{rep} = N_{BESS} \cdot \gamma_{inv} \cdot \frac{t_{year}}{A_{BESS}}$$

Trong đó: t_{year} là thời gian xem xét thay thế, tính theo năm.

- Chi phí vận hành và bảo trì (C_{omc})

Chi phí vận hành và bảo trì cho hệ thống BESS được xác định bởi công thức sau:

$$C_{omc} = C_{vrc} + C_{loss} + C_{pdc}$$

$$C_{vrc} = \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N |V_i - V_{ref}| \right) \cdot \gamma_{VR}$$

$$C_{loss} = \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M |\Delta P| \right) \cdot \gamma_{loss}$$

$$C_{pdc} = P_{max} \cdot \Delta t \cdot \gamma_P$$

Trong đó: C_{vrc} - chi phí cho điều chỉnh điện áp; C_{loss} - chi phí do tổn thất truyền tải; C_{pdc} - chi phí cho

phụ tải đỉnh; N - tổng số thanh cái trong hệ thống; V_i - điện áp tại thanh cái i ; V_{ref} - điện áp tham chiếu; M - tổng số nhánh trong hệ thống; ΔP - tổn thất công suất thực tế trên mỗi đường dây; P_{max} - nhu cầu công suất cực đại; γ_{VR} - tỷ lệ chi phí cho Bộ điều chỉnh điện áp; γ_{loss} - tỷ lệ chi phí cho tổn thất truyền tải; γ_P - tỷ lệ chi phí cho nhu cầu năng lượng cực đại.

- Hàm mục tiêu “Tối ưu dung lượng hệ thống BESS” sẽ được tính bằng công thức:

$$f = C_{inv} + C_{rep} + C_{omc}$$

2.4.5. Các ràng buộc cho bài toán

a. Cân bằng giữa tải và nguồn

$$P_{load}(t) = P_g(t) - \Delta P(t)$$

Trong đó:

P_{load} - công suất phụ tải;

P_g - tổng công suất phát;

ΔP - tổn thất công suất trên đường dây truyền tải.

b. Ràng buộc về cân bằng công suất

Sự cân bằng công suất tại mỗi thanh cái của lưới microgrid được biểu diễn bằng đẳng thức sau:

$$P_{grid}(t) = P_D(t) - P_{PV}(t) \pm P_{BESS}(t) - \Delta P(t)$$

Trong đó: P_{grid} - công suất của lưới; P_D - công suất nhu cầu phụ tải; P_{PV} - công suất từ hệ thống PV; P_{BESS} - công suất từ hệ thống BESS; ΔP - tổn thất công suất trên đường dây truyền tải.

c. Ràng buộc về điện áp

Điện áp tại mỗi thanh cái yêu cầu phải nằm trong ngưỡng từ Điện áp tối thiểu đến Điện áp tối đa, sai lệch trong phạm vi $\pm 10\%$ so với điện áp tham chiếu [21]:

$$V_{i,min} \leq V_i(t) \leq V_{i,max}$$

Trong đó:

$V_i(t)$ - điện áp tại thời điểm t của thanh cái i ;

$V_{i,min}, V_{i,max}$ - điện áp tối thiểu và điện áp tối đa của thanh cái i .

d. Ràng buộc về công suất và dung lượng BESS [20]

Công suất và dung lượng của BESS phải nằm trong phạm vi được giới hạn bởi các bất đẳng thức sau:

$$P_{BESS}^{charge}(t) \geq P_{BESS}^{min}$$

$$P_{BESS}^{discharge}(t) \leq P_{BESS}^{max}$$

$$E_{BESS}^{min} \leq E_{BESS}(t) \leq E_{BESS}^{max}$$

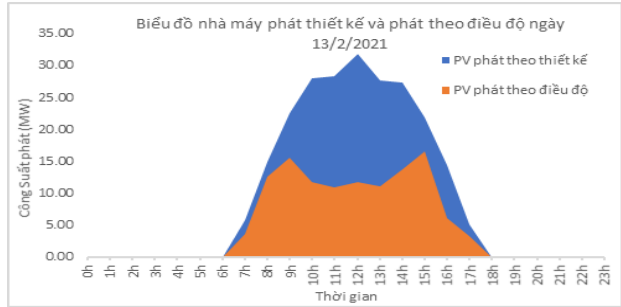
Trong đó: $P_{BESS}^{min}, P_{BESS}^{max}$ - công suất tối thiểu và công suất tối đa của BESS; $P_{BESS}^{charge}, P_{BESS}^{discharge}$ - công suất sạc và công suất xả của BESS tại thời điểm t ; $E_{BESS}(t)$ - dung lượng của BESS tại thời điểm t ; $E_{BESS}^{min}, E_{BESS}^{max}$ - dung lượng tối thiểu và dung lượng tối đa của BESS.

3. Các đối tượng được nghiên cứu

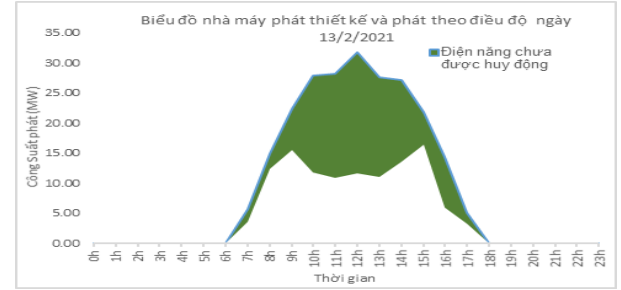
3.1. Nhà máy điện mặt trời Vĩnh Tân 2

Căn cứ tình hình vận hành thực tế của nhà máy giai đoạn 2021-2022 được ghi nhận, hầu như sản lượng thực tế của nhà máy chưa được huy động đầy đủ so với sản lượng

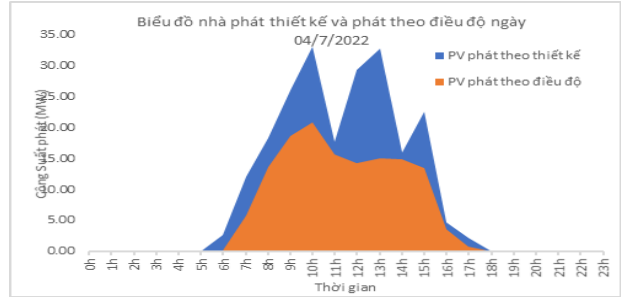
theo thiết kế. Chi tiết được thể hiện ở một vài tháng điển hình qua các Hình 7-10.



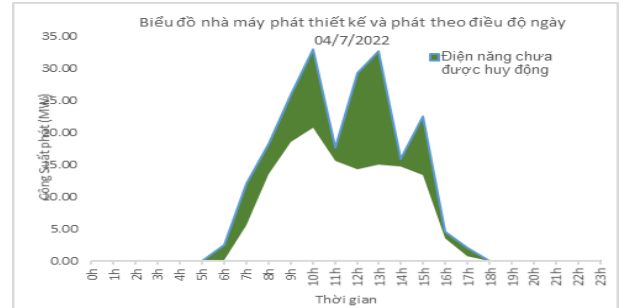
Hình 7. Biểu đồ vận hành thực tế và dự báo của nhà máy với ngày điển hình năm 2021



Hình 8. Sản lượng chưa được huy động của nhà máy với ngày điển hình năm 2021



Hình 9. Biểu đồ vận hành thực tế và dự báo của nhà máy với ngày điển hình năm 2022

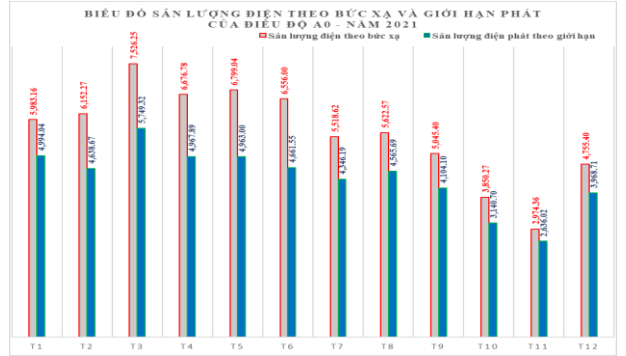


Hình 10. Sản lượng chưa được huy động của nhà máy với ngày điển hình năm 2022

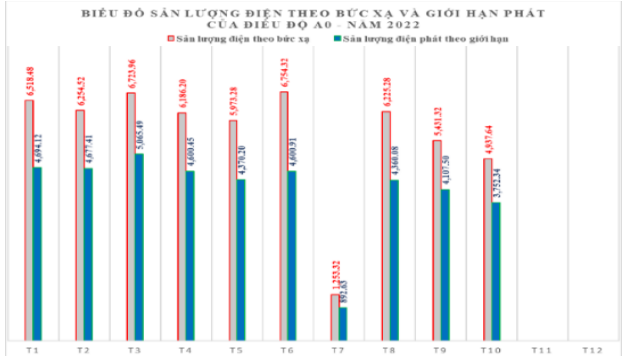
Theo các biểu đồ vận hành ở trên, công suất chưa được huy động dư thừa rất nhiều và có sự chênh lệch rất lớn so với công suất dự báo. Điều này làm tăng thời gian thu hồi vốn của NĐMT Vĩnh Tân 2. Nhằm sử dụng sản lượng điện chưa được huy động này, bài báo xem xét giải pháp cấp điện tự dùng cho hệ thống xuất tro bay của Nhà máy điện mặt trời Vĩnh Tân 2.

Theo số liệu vận hành và số liệu dự báo từ đơn vị vận hành, sản lượng chưa được huy động trong 2 năm qua với đánh giá chi phí được thể hiện ở các Hình 11, 12 và Bảng 5-8.

Theo thống kê dữ liệu từ 02 năm vận hành 2021 - 2022 hiện tại so với dữ liệu dự báo, hàng năm khả năng vận hành trung bình của nhà máy vào khoảng 70%-80% so với công suất khả dụng và sản lượng chưa được huy động là khoảng 15.000 MWh. Điều này gây ra tổn thất kinh tế vào khoảng 1,5 triệu USD/năm. Có thể thấy rất rõ NĐMT Vĩnh Tân 2 chưa đạt được hiệu quả như mục tiêu khi đầu tư.



Hình 11. Biểu đồ so sánh sản lượng dự báo và sản lượng huy động của năm 2021



Hình 12. Biểu đồ so sánh sản lượng dự báo và sản lượng huy động của năm 2022

Bảng 5. Tổng hợp sản lượng điện năm 2021

Tháng	Theo dữ liệu bức xạ thực tế (MWh)	Theo giới hạn chốt công tơ (MWh)	Tỷ lệ phát so với khả năng thực tế (%)	Ghi chú
1	5.983,2	4.994,0	83,5	Theo chế độ AGC
2	6.152,3	4.638,7	75,4	
3	7.526,3	5.749,3	76,4	
4	6.676,8	4.967,9	74,4	
5	6.799,0	4.963,0	73,0	
6	6.556,0	4.661,6	71,1	
7	5.518,7	4.346,2	78,8	
8	5.622,6	4.565,7	81,2	
9	5.045,4	4.104,1	81,3	
10	3.850,3	3.140,7	81,6	
11	2.974,4	2.636,0	88,6	
12	4.755,4	3.968,7	83,5	
Tổng	67.460,1	52.735,9	78,2	

Bảng 6. Tổng hợp sản lượng điện đến tháng 10 năm 2022

Tháng	Theo dữ liệu bức xạ thực tế (MWh)	Theo giới hạn chốt công tơ (MWh)	Tỷ lệ phát so với khả năng thực tế (%)	Ghi chú
1	6.518,5	4.694,1	72,0	Theo chế độ AGC
2	6.254,5	4.677,4	74,8	
3	6.723,9	5.065,5	75,3	

Tháng	Theo dữ liệu bức xạ thực tế (MWh)	Theo giới hạn chốt công tơ (MWh)	Tỷ lệ phát so với khả năng thực tế (%)	Ghi chú
4	6.186,2	4.600,5	74,4	
5	5.973,3	4.370,2	73,2	
6	6.754,3	4.600,9	68,1	
7	1.253,3	892,6	71,2	
8	6.225,3	4.360,1	70,0	
9	5.431,3	4.107,5	75,6	
10	4.937,6	3.752,3	76,0	
Tổng	56.258,3	41.121,1	73,1	

Bảng 7. Bảng tổng hợp sản lượng và chi phí chưa được
huy động từ A0 - Năm 2021

Đơn giá: 0,0935USD/1kWh

Tháng	Theo dữ liệu bức xạ thực tế (MWh)	Theo giới hạn chốt công tơ (MWh)	Sản lượng không huy động (MWh)	Chi phí (USD)
1	5.983,2	4.994,4	989,13	92.483,5
2	6.152,3	4.638,7	1.513,6	141.521,1
3	7.526,3	5.749,3	1.776,9	166.143,1
4	6.676,8	4.967,9	1.708,9	159.781,8
5	6.799,0	4.963,0	1.836,0	171.670,1
6	6.556,0	4.661,6	1.894,5	177.130,9
7	5.518,6	4.346,2	1.172,4	109.621,7
8	5.622,6	4.565,7	1.056,9	98.818,1
9	5.045,4	4.104,1	941,3	88.011,5
10	3.850,3	3.140,7	709,6	66.344,4
11	2.974,4	2.636,0	338,3	31.634,5
12	4.755,4	3.968,7	786,7	73.555,9
Tổng	67.460,1	52.735,9	14.724,2	1.376.716,8

Bảng 8. Bảng tổng hợp sản lượng và chi phí chưa được
huy động từ A0 - Năm 2022 (đến tháng 10/2022)

Đơn giá: 0,0935USD/1kWh

Tháng	Theo dữ liệu bức xạ thực tế (MWh)	Theo giới hạn chốt công tơ (MWh)	Sản lượng không huy động (MWh)	Chi phí (USD)
1	6.518,5	4.694,1	1.824,6	170.577,4
2	6.254,5	4.677,4	1.577,1	147.460,1
3	6.723,9	5.065,5	1.658,5	155.067,3
4	6.186,2	4.600,5	1.585,8	148.267,5
5	5.973,3	4.370,2	1.603,1	149.888,3
6	6.754,3	4.600,9	2.153,4	201.343,7
7	1.253,3	892,6	360,7	33.724,8
8	6.225,3	4.360,9	1.865,2	174.396,7
9	5.431,3	4.107,5	1.323,8	123.776,9
10	4.937,6	3.752,3	1.185,3	110.825,2
Tổng	56.258,3	41.121,1	15.137,2	1.415.327,9

3.2. Hệ thống BESS

Dựa theo những đánh giá đã nêu ở trên, hằng năm NĐMT Vĩnh Tân 2 đã phải cắt giảm đi một lượng công suất phát, đồng thời sự lãng phí sản lượng điện dư thừa do không được huy động đã làm trầm trọng thêm vấn đề. Hệ quả là thời gian thu hồi vốn của nhà máy đã bị tăng lên.

Để tiết kiệm chi phí và tận dụng hiệu quả sản lượng điện năng này để cấp điện cho phụ tải xuất tro bay của nhà

máy Nhiệt điện Vĩnh Tân 2, hệ thống BESS sẽ được đưa vào sử dụng để tối ưu vận hành, đồng thời sử dụng phần công suất chưa được huy động để cấp điện cho BESS lưu trữ. Hệ thống sẽ phát điện vào lúc NĐMT Vĩnh Tân 2 dừng phát. Bài toán sử dụng thuật toán tối ưu đa mục tiêu di truyền để xác định dung lượng BESS cần thiết để nuôi nguồn phụ tải.

4. Kết quả tính toán

Bài báo mô hình hóa hệ thống gồm NĐMT Vĩnh Tân 2 và hệ thống BESS có phụ tải xuất tro bay của nhà máy Nhiệt điện Vĩnh Tân 2 ở trạng thái nổi lưới bằng chương trình HOMER Pro. Các thông số liên quan lưới điện được mô hình hóa và xây dựng phù hợp với các quy định cho hệ thống điện và Quy hoạch điện VIII.

Mô hình phân tích sẽ tận dụng sản lượng điện chưa được huy động vào thời điểm NĐMT Vĩnh Tân 2 phát dư thừa, để cấp nguồn cho phụ tải hệ thống xuất tro bay của nhà máy Nhiệt điện Vĩnh Tân 2. Tuy nhiên, với giải pháp này chỉ sử dụng được một phần sản lượng chưa được huy động vì công suất phụ tải vận hành 24h/ngày, nhưng sản lượng điện của NĐMT Vĩnh Tân 2 lại phụ thuộc rất nhiều vào thời tiết và cường độ bức xạ vào ban ngày, do đó vào ban đêm nhà máy Nhiệt điện Vĩnh Tân 2 vẫn cần phải mua điện từ lưới địa phương.

4.1. Kết quả tính toán cho Kịch bản 1

Khi hệ thống vận hành không có hệ thống BESS, sản lượng điện của NĐMT Vĩnh Tân 2 không thể được tận dụng hết gây ra sự lãng phí rất lớn, vào ban đêm nhà máy Nhiệt điện Vĩnh Tân 2 buộc phải mua điện từ lưới điện địa phương do NĐMT không phát điện, hoặc lượng công suất chưa được huy động nhỏ hơn nhiều so với phụ tải tự dùng hệ thống xuất tro bay.

Sản lượng điện vận hành cùng với các chi phí mua điện trong một năm được cho trong các Bảng 9, 10.

Bảng 9. Sản lượng điện cấp cho phụ tải - Kịch bản 1

Đơn vị: MWh

Tháng	A _{PV}	A _{Load}	Sản lượng điện mua từ lưới			A _{PV-Load}	A _{Limit}	A _{Excess}
			t ₁	t ₂	t ₃			
1	5.983,2	1.050,5	129,9	226,8	184,2	575,7	5.407,5	413,4
2	6.152,3	938,5	115,5	159,7	155,3	526,4	5.625,9	987,2
3	7.526,3	1.068,4	131,1	181,8	175,0	599,8	6.926,5	1.177,1
4	6.676,8	1.023,6	125,9	176,2	167,1	573,1	6.103,7	1.135,8
5	6.799,0	1.043,7	128,6	162,3	177,6	596,8	6.202,2	1.239,2
6	6.556,0	1.027,6	127,1	166,9	168,8	585,9	5.970,1	1.308,5
7	5.518,6	1.049,3	128,1	182,5	172,3	584,7	4.933,9	587,8
8	5.622,6	1.073,0	131,6	179,9	181,0	599,1	5.023,5	457,8
9	5.045,4	1.026,6	124,9	188,4	169,5	559,1	4.486,3	382,2
10	3.850,3	1.050,6	129,8	187,2	198,6	544,3	3.306,0	165,3
11	2.974,4	1.011,8	124,6	183,6	333,7	135,6	2.838,8	202,7
12	4.755,4	1.056,3	129,2	200,1	194,2	540,6	4.214,8	246,1
Tổng	67.460,0	12.420,0	1.526,3	2.195,4	2.277,2	6.421,1	61.039,8	8.303,1

**Chú thích:* A_{PV}: Sản lượng phát của PV; A_{Load}: Điện năng tiêu thụ của tải; t₁, t₂, t₃: Giờ thấp điểm, Giờ bình thường, Giờ cao điểm; A_{PV-Load}: Sản lượng điện từ PV cấp cho tải; A_{Limit}: Theo giới hạn chốt công tơ - Năm 2021; A_{Excess}: Sản lượng dư không thể huy động.

Bảng 10. Tổng hợp các chi phí mua điện từ lưới - Kịch bản 1

Tháng	Sản lượng điện mua từ lưới			C _{t1} (USD)	C _{t2} (USD)	C _{t3} (USD)	C _{Grid} (USD)
	t ₁ (MWh)	t ₂ (MWh)	t ₃ (MWh)				
1	129,9	226,8	184,2	5.194,1	14.287,3	22.099,6	41.581,0
2	115,5	159,7	199,0	4.621,1	10.063,8	23.878,7	38.563,6
3	131,1	181,8	224,3	5.242,6	11.456,5	26.920,8	43.620,0
4	125,9	176,2	214,2	5.034,6	11.101,8	25.699,3	41.835,8
5	128,6	162,3	227,6	5.144,1	10.223,3	27.307,4	42.674,9
6	127,1	166,9	216,3	5.085,8	10.512,2	25.957,8	41.555,9
7	128,1	182,5	220,8	5.123,5	11.498,5	26.497,8	43.119,9
8	131,6	179,9	232,0	5.264,1	11.336,6	27.839,1	44.439,7
9	124,9	188,4	217,2	4.997,6	11.866,6	26.062,4	42.926,5
10	129,8	187,2	254,6	5.190,5	11.792,4	30.546,7	47.529,6
11	124,6	183,6	42707	4.985,0	11.568,7	51.325,6	67.879,4
12	129,2	200,1	249,0	5.167,3	12.603,3	29.874,3	47.644,9
Tổng	1.526,3	2.195,4	2.866,7	61.050,4	138.311,0	344.009,7	543.371,1

**Chú thích: C_{t1}, C_{t2}, C_{t3}: Chi phí giờ thấp điểm, Chi phí giờ bình thường, Chi phí giờ cao điểm; C_{grid}: Chi phí mua điện từ lưới.*

Với Kịch bản 01 không thực hiện đầu tư hệ thống BESS, ngoài việc sử dụng sản lượng điện chưa được huy động từ NMĐMT Vĩnh Tân 2 vào ban ngày, thì vào ban đêm khi NMĐMT ngừng phát (hay vào một số thời điểm NMĐMT phát thấp), chi phí trung bình hàng năm lên đến khoảng 543,371.1 USD/năm. Với lượng công suất chưa được huy động lên đến 8,303.1 MWh/năm.

4.2. Kết quả tính toán cho Kịch bản 2

Sau khi chạy Mô hình thuật toán Tối ưu đa mục tiêu di truyền kết hợp với chương trình HOMER Pro, kết quả thu được sẽ là các giá trị mục tiêu (hay Chi phí) được nêu ở đầu bài. Chúng sẽ là cơ sở để xác định công suất tối ưu của BESS mà bài toán đặt ra.

Bảng dưới đây thể hiện các giá trị đầu vào để tính toán các Chi phí bằng phần mềm HOMER Pro.

Bảng 11. Các thông số của bài toán Tối ưu công suất BESS [20]

Thông số	Tên đầy đủ	Giá trị
DOD _{max}	Độ xả sâu lớn nhất của BESS	0,8
V _{ref}	Điện áp tham chiếu	1,0 p.u
γ _{inv}	Chi phí lắp đặt của BESS	50-100 \$/kWh [22]
γ _{VR}	Chi phí cho Bộ điều chỉnh điện áp	0,142 \$/p.u
γ _{loss}	Chi phí cho tổn thất truyền tải	0,284 \$/kWh
γ _p	Chi phí cho nhu cầu năng lượng cực đại	200 \$/kWh/năm
t _{year}	Thời gian xem xét thay thế	12 năm [22]
E _{BESS}	Dung lượng của BESS	4-40 MWh
P _{BESS}	Công suất của BESS	1-10 MW

4.2.1. Chi phí đầu tư (C_{inv})

Tổng chi phí đầu tư cho hệ thống BESS sau khi tính toán sẽ rơi vào khoảng là:

C_{inv} = 2.500.000 USD

4.2.2. Chi phí thay thế (C_{rep})

Tổng chi phí thay thế pin cho hệ thống BESS sau khi đạt tới giới hạn tuổi thọ sẽ rơi vào khoảng là:

C_{rep} = 25.000 USD

4.2.3. Chi phí vận hành và bảo trì (C_{omc})

Tổng chi phí dành cho vận hành và bảo trì hệ thống BESS hàng năm sẽ rơi vào khoảng là:

C_{omc} = 2.528 USD/năm

Dung lượng tối ưu của hệ thống BESS sẽ là một hàm giá trị tối thiểu *min f* của tổng 03 loại chi phí này, kết hợp với các Ràng buộc của bài toán như đã liệt kê ở mục 2.4.5. Kết quả nhận được sau khi chạy Thuật toán tối ưu đa mục tiêu di truyền với sự hỗ trợ của phần mềm HOMER Pro là một hệ thống BESS có công suất/dung lượng là 2,5 MW/ 10 MWh.

Khi đưa hệ thống BESS vào lưới điện, nó sẽ làm nhiệm vụ hấp thụ lượng điện năng dư thừa từ NMĐMT Vĩnh Tân 2 và cấp nguồn cho phụ tải hệ thống xuất tro bay NMĐ Vĩnh Tân 2 vào ban đêm khi nhà máy ngừng vận hành, hoặc khi lượng công suất chưa được huy động nhỏ hơn nhiều so với phụ tải tự dùng.

Sản lượng điện vận hành cùng với các chi phí mua điện trong một năm khi áp dụng hệ thống BESS có công suất/dung lượng 2,5MW/10MWh, được cho trong các Bảng 12-14.

Bảng 12. Sản lượng điện cấp cho phụ tải - Kịch bản 2

Đơn vị: MWh

Tháng	A _{PV}	A _{Load}	Sản lượng điện mua từ lưới			A _{PV-Load}	A _{Limit}	A _{BESS-Load}	A _{PV-BESS}	A _{Excess}
			t ₁	t ₂	t ₃					
1	5.983,2	1.050,5	176,9	109,0	31,7	575,7	4.994,0	208,79	232,0	413,4
2	6.152,3	938,5	161,9	104,7	29,9	526,4	4.638,7	173,48	192,8	987,2
3	7.526,3	1.068,4	178,3	110,9	30,4	599,8	5.749,3	193,55	215,1	1.177,1
4	6.676,8	1.023,6	172,3	108,8	30,5	573,1	4.967,9	187,51	208,3	1.135,8
5	6.799,0	1.043,7	172,9	102,8	30,6	596,8	4.963,0	188,46	209,4	1.239,2
6	6.556,0	1.027,6	174,2	104,5	30,2	585,9	4.661,6	183,85	204,3	1.308,5
7	5.518,6	1.049,3	174,8	110,6	30,4	584,7	4.346,2	193,49	215,0	587,8
8	5.622,6	1.073,0	180,1	111,3	31,7	599,1	4.565,7	194,71	216,3	457,8
9	5.045,4	1.026,6	181,6	112,6	29,8	559,1	4.104,1	190,21	211,3	382,2
10	3.850,3	1.050,6	191,9	110,6	32,7	544,3	3.140,7	148,74	165,3	165,3
11	2.974,4	1.011,8	174,4	109,7	33,7	135,6	2.636,0	109,48	121,6	202,7
12	4.755,4	1.056,3	194,4	114,7	32,5	540,6	3.968,7	208,64	231,8	246,1
Tổng	67.460,0	12.420,0	2.133,6	1.310,2	374,1	6.421,1	52.735,9	2.180,9	2.423,2	8.303,1

**Chú thích:*

A_{BESS-Load}: Sản lượng điện từ BESS cấp cho tải;

A_{PV-BESS}: Sản lượng điện từ PV cung cấp cho BESS.

Bảng 13. Tổng hợp các chi phí mua điện từ lưới - Kịch bản 2

Tháng	Sản lượng điện mua từ lưới			C _{t1} (USD)	C _{t2} (USD)	C _{t3} (USD)	C _{Grid} (USD)
	t ₁ (MWh)	t ₂ (MWh)	t ₃ (MWh)				
1	176,9	109,0	31,70	7.075,1	6.868,2	3.803,5	17.746,7
2	162,0	104,7	29,92	6.478,2	6.596,0	3.590,7	16.664,9
3	178,3	111,0	30,35	7.133,6	6.990,3	3.642,4	17.766,2
4	172,3	108,8	30,51	6.891,5	6.851,5	3.661,0	17.403,9
5	172,9	102,8	30,64	6.915,4	6.478,9	3.677,2	17.071,4
6	174,2	104,5	30,24	6.967,9	6.581,8	3.629,4	17.179,0
7	174,8	110,6	30,40	6.990,7	6.968,2	3.647,6	17.606,5
8	180,1	111,3	31,67	7.203,1	7.009,9	3.800,9	18.014,0
9	181,6	112,6	29,83	7.264,2	7.095,1	3.579,8	17.939,0
10	191,9	110,6	32,66	7.674,6	6.968,6	3.918,8	18.562,0
11	174,4	109,7	33,69	6.974,1	6.910,5	4.042,7	17.927,3
12	194,4	114,7	32,53	7.775,9	7.225,6	3.903,8	18.905,3
Tổng	2.133,6	1.310,2	374,1	85.344,2	82.544,4	44.897,6	212.786,2

Bảng 14. So sánh chi phí chênh lệch vận hành hằng năm

Tháng	Chi phí mua điện từ lưới (USD)		Chênh lệch PA1-PA2(USD)
	PA1	PA2	
1	41.580,9	17.746,8	23.834,2
2	38.563,6	16.664,9	21.898,8
3	43.619,9	17.766,2	25.853,7
4	41.835,8	17.403,9	24.431,9
5	42.674,9	17.071,4	25.603,5
6	41.555,9	17.179,0	24.376,9
7	43.119,9	17.606,5	25.513,3
8	44.439,7	18.013,9	26.425,8
9	42.926,5	17.938,9	24.987,6
10	47.529,6	18.562,0	28.967,6
11	67.879,4	17.927,3	49.952,1
12	47.644,9	18.905,3	28.739,6
Tổng	543.371,1	212.786,2	330.584,9

Với Kịch bản 02 thực hiện đầu tư hệ thống BESS, có thể thấy chi phí vận hành vào khung giờ bình thường và cao điểm trong 01 năm giảm rõ rệt (giảm 55,766.6 USD cho giờ bình thường, giảm 299,112.1 USD cho giờ cao điểm), đồng thời hàng năm sẽ tiết kiệm được khoảng 330,584.9 USD chi phí mua điện từ lưới điện địa phương. Thời gian thu hồi vốn dự kiến khoảng 7.6 năm.

5. Kết luận

Mô hình thuật toán Tối ưu đa mục tiêu di truyền với sự hỗ trợ của phần mềm HOMER Pro đã mang lại lời giải cho bài toán cân bằng trong hệ thống kết hợp giữa điện mặt trời- hệ thống BESS, đáp ứng được được nhiều mục tiêu đã đặt ra để tìm ra dung lượng tối ưu cho hệ thống BESS.

Với giải pháp đầu tư hệ thống BESS có công suất/dung lượng tối ưu là 2.5MW/10MWh, sau khi được kiểm tra bằng mô hình thuật toán kết hợp với chương trình HOMER Pro đã đáp ứng được các mục tiêu: Giảm thiểu đồng thời các chi phí đầu tư, chi phí thay thế và chi phí vận hành bảo trì của toàn hệ thống, tìm kiếm sự cân bằng giữa hiệu quả kinh tế và tính bền vững môi trường mà không phải vi phạm bất kỳ ràng buộc nào của hệ thống.

Do đặc tính của thiết bị BESS là có khả năng nạp và xả năng lượng khi cần thiết, vì vậy BESS rất phù hợp với việc hỗ trợ nhà máy điện mặt trời công suất lớn cũng như hệ thống. Ngoài sự ổn định, BESS có thể hỗ trợ về chạy phụ đỉnh (san bằng đồ thị phụ tải) - giảm tổn thất truyền tải, tăng khả năng phát công suất (cung cấp dự phòng quay).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Abriendomundo, “Renewables 2023 - Analysis and Forecast to 2028”, International Energy Agency (IEA), France, Science Report, January 2024.

[2] M. S. Rashid, S. Gheorghe, and L. Toma, “Analysis of the influence of Renewable Energy Sources on the power system operation”, *EMERG*, vol. 8, no. 2, pp. 77-94, 2022. DOI: 10.37410/EMERG. 2022.2.07.

[3] O. Smith, O. Cattell, E. Farcot, R. D. O’dea, and K. I. Hopcraft, “The effect of renewable energy incorporation on power grid stability and resilience”, *Science Advances*, vol. 8, no. 9, pp. 1-9, 2022. DOI: 10.38124/ijisrt/IJISRT24OCT1529.

[4] B. Qin, M. Wang, G. Zhang, and Z. Zhang, “Impact of renewable energy penetration rate on power system frequency stability”, *Energy Reports*, vol. 8, pp. 997-1003, 2022. DOI: 10.1016/j.egy.2022.05. 261.

[5] The Prime Minister, *Decision Approving The National Electricity Development Planning of 2021-2030 and vision for 2050*, No. 500/QĐ-TTg, 2023.

[6] N. H. V. Phuong, N.B. Nam, H. V. Luat, V. Q. Hai, L. Q. Cuong, and T. D. M. Duc, “Strategy for power control of battery storage system: Phu Quy Island study case”, *Journal of Science and Technology - The University of Danang*, vol. 19, no. 4.2, pp. 12-17, 2021.

[7] M. Q. Duong, D. T. Viet, T. N. T. Nam, G. Sava, and A. Kies, “A comparative study of wind turbine generators operating performance: A case study for the Vietnamese Ninh Thuan - Grid”, *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iasi*, vol. 63, no. 3, pp. 17-32, 2017.

[8] L. N. An, and T. Q. Tuan, “Dynamic Programming for Optimal Energy Management of Hybrid Wind-PV-Diesel-Battery”, *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 11, p. 3039, 2018.

[9] P. M. Cong, T. Q. Tuan, A. Hably, S. Bacha, and L. N. An, “Optimal Sizing of Battery Energy Storage System for an islanded microgrid”, in *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Oct. 2018, Washington DC, United States*.

[10] A. Fathy, “A novel artificial hummingbird algorithm for integrating renewable based biomass distributed generators in radial distribution systems”, *Applied Energy*, vol. 323, p. 119605, 2022. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.119605.

[11] N. Jayasekara, M. A. S. Masoum, and P. J. Wolfs, “Optimal operation of distributed energy storage systems to improve distributed network load and generation hosting capability”, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 1, pp. 250-261, 2016. DOI: 10.1109/TSTE.2015.2487360.

[12] M. Khalid, U. Akram, and S. Shafiq, “Optimal planning of multiple distributed generating units and storage in active distribution networks”, *IEEE Access*, vol. 6, pp. 55234-55244, 2018. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2872788.

[13] S. Khunkitti, P. Boonluk, and A. Siritariwat, “Optimal location and sizing of BESS for performance improvement of distribution systems with high DG penetration”, *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 2022, no. 1, pp. 1-16, 2022. DOI: 10.1155/2022/6361243.

[14] V. Janamala, and D. S. Reddy, “Coyote optimization algorithm for optimal allocation of interline - Photovoltaic battery storage system in islanded electrical distribution network considering EV load penetration”, *Journal of Energy Storage*, vol. 41, p. 102981. DOI: 10.1016/j.est.2021.102981.

[15] T.A. Shidhani, A. Ioannou, and G. Falcone, “Multi-Objective Optimisation for Power System Planning Integrating Sustainability Indicators”, *Energies 2020*, vol. 13, no. 9, pp. 1-32, 2020. DOI: 10.3390/en13092199.

[16] H. Song et al., “Smart optimization in battery energy storage systems: An overview”, *Energy and AI*, vol. 17, no. 4, pp. 1-17, 2024. DOI: 10.1016/j.egyai.2024.100378.

[17] K. Mansuwan, P. Jirapong, and P. Tharakak, “Optimal battery energy storage planning and control strategy for grid modernization using improved genetic algorithm”, *Energy Reports*, vol. 9, no. 11, pp. 236-241, 2023. DOI: 10.1016/j.egy.2023.09.017.

[18] T.V. Thanh et al., “Optimal operation of pumped storage power plant to improve the stability of Viet-nameese power system”, *Computational Intelligence Methods for Green Technology and Sustainable Development*, vol. 2, pp. 173-188, 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-76232-1_16.

[19] K. Deb, *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*; John Wiley & Sons: New York, NY, USA, 2001.

[20] D. C. Huynh, H. M. Pham, L. D. Ho, H. V. Nguyen, M. W. Dunnigan, and C. Barbalata, “Capacity Optimization of Battery Energy Storage Systems in a Microgrid”, in *7th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)*, Ho Chi Minh City, Vietnam, 2024, pp. 395-400. DOI: 10.1109/GTSD62346.2024.

[21] N. Pompern, S. Premrudeepreechacharn, A. Siritariwat, and S. Khunkitti, “Optimal placement and capacity of battery energy storage system in distribution networks integrated with PV and EVs using metaheuristic algorithms”, *IEEE Access*, vol. 11, pp. 68379-68394, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3291590.

[22] Exencell, “BESS Costs Analysis: Understanding the True Costs of Battery Energy Storage Systems”, *Exencell Blog*, October 28, 2024. [Online]. Available: <https://exencell.com/blogs/bess-costs-analysis-understanding-the-true-costs-of-battery-energy-storage-systems> [Accessed January 17, 2025].