

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP LAI TRONG BÀI TOÁN LỰA CHỌN HỢP LÝ VỊ TRÍ VÀ DUNG LƯỢNG HỆ THỐNG LƯU TRỮ NĂNG LƯỢNG TRONG HỆ THỐNG ĐIỆN

EXPLORING THE APPLICATION OF HYBRID METHODS FOR OPTIMAL LOCATION AND POWER SELECTION OF ENERGY STORAGE SYSTEMS IN POWER SYSTEMS

Trương Việt Anh¹,
Nguyễn Tùng Linh^{2*}, Đinh Ngọc Sang³

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.100>

TÓM TẮT

Hệ thống lưu trữ năng lượng trong lưới điện truyền tải đang trở thành một lĩnh vực nghiên cứu và ứng dụng ngày càng quan trọng. Bài báo này đề xuất một phương pháp lai mới, nó đưa ra một định hướng xác định vị trí lắp đặt hệ thống lưu trữ năng lượng (ESS) phù hợp. Điều đó giúp cải thiện khả năng ổn định của lưới điện, giảm thiểu sự gián đoạn và sự cố, tăng cường tính linh hoạt và đáp ứng tốt hơn với nhu cầu sử dụng năng lượng của các khách hàng trước khi cần quy hoạch mở rộng truyền tải điện (TEP). Phương pháp này kết hợp lai giải thuật Min Cut (MC) với thuật toán di truyền (GA). Trước tiên, MC được cải tiến bằng một hình thức phạt để giảm thiểu không gian tìm kiếm cho bài toán tối ưu mà không làm mất đi nghiệm toàn cục. Tiếp theo, thuật toán GA được áp dụng để giải bài toán tối ưu trong không gian đã được giới hạn để tìm ra vị trí và công suất ESS phù hợp nhất có thể. Nghiên cứu được thử nghiệm và cho ra kết quả khả thi trên hệ thống điện IEEE 24-bus. Kết quả nghiên cứu cho thấy phương pháp đề xuất giảm đáng kể khối lượng tính toán so với các bài toán trước đây và từ đó rút ngắn thời gian tính toán giúp các nhà đầu tư đưa ra quyết định đầu tư hệ thống ESS kịp thời và cạnh tranh.

Từ khóa: Thuật toán Mincut, thuật toán di truyền, bộ lưu trữ năng lượng, quy hoạch lưới truyền tải, thị trường điện.

ABSTRACT

Energy storage systems (ESS) within the transmission system have emerged as a critical area of research and application. This paper presents a novel hybrid approach that offers a framework for determining optimal locations and power for deploying ESS. The primary objective is to enhance grid stability, minimize disruptions and failures, bolster flexibility, and effectively meet the energy demands of consumers prior to the need for transmission expansion planning (TEP). The proposed methodology combines the Min Cut (MC) algorithm with the genetic algorithm (GA). Initially, the MC algorithm is improved through the incorporation of a penalty mechanism, aimed at reducing the search space for the optimization problem while preserving global optimality. Subsequently, the GA algorithm is employed to solve the optimization problem within the constrained search space, thereby identifying the most suitable local and power for the ESS. The research findings are evaluated on the IEEE 24-bus power system and demonstrate promising feasibility. Notably, the proposed approach significantly reduces computational complexity when compared to previous separate methodologies, consequently diminishing computation time and facilitating timely and competitive investment decisions pertaining to ESS systems.

Keywords: Min cut algorithm, gene algorithm, energy storage systems, transmission expansion plan, electricity market.

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

²Trường Đại học Điện lực

³Trường Đại học Kiến trúc Thành phố Hồ Chí Minh

*Email: linhnt@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 15/4/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 05/6/2023

Ngày chấp nhận đăng: 15/6/2023

1. GIỚI THIỆU

Quy hoạch TEP và GEP đã được trình bày trong nghiên cứu [1, 2], theo đó TEP vẫn là giải pháp chính về lâu dài để phát triển mạng lưới năng lượng, đáp ứng nhu cầu thiết

yếu cho công cuộc phát triển kinh tế và xã hội. Tuy nhiên, không phải lúc nào giải pháp xử lý quá tải hoặc tắc nghẽn, là các biện pháp chính trong quy hoạch TEP, cũng hoàn hảo để đạt được độ ổn định và độ tin cậy [3]. Vì vậy, các

biện pháp quy hoạch tối ưu và kinh tế hơn thường được sử dụng để cải thiện hệ thống điện, chẳng hạn như tái cấu trúc lưới điện có xét đến nguồn điện [4], điều khiển dòng công suất điện bằng thiết bị chuyển tải dòng điện linh hoạt (FACTS) [5], hoặc giải pháp xây dựng các nguồn năng lượng tái tạo mới [6, 7]. Kết quả, những phương pháp này cũng có nhiều ưu điểm nhưng cũng phát sinh các nhược điểm ở các mức độ khác nhau và chúng không thể thay thế cho nhau một cách hoàn hảo.

Trong giai đoạn phát triển mạnh mẽ của nguồn năng lượng tái tạo thời gian vừa qua, đặc biệt sau sự khủng hoảng năng lượng năm 2022 do giới hạn nguồn cung khí đốt từ một số quốc gia, thì năng lượng từ mặt trời và gió đã phát triển nhanh chóng ở nhiều nước trên thế giới [6, 7]. Toàn cầu đã bổ sung hơn 50 GW công suất hàng năm kể từ năm 2014. Riêng năm 2018 điện gió đạt 591GW, tăng 9,6% so với năm 2017 [8]. Nhưng hậu quả của nguồn năng lượng tái tạo để lại theo một khía cạnh vận hành hệ thống điện trong thị trường điện cạnh tranh là không hề nhỏ, như sự không chắc chắn, sự mất ổn định, sự mất an ninh,

Trong khi nhu cầu phụ tải điện ngày càng tăng để phục vụ cho phát triển kinh tế xã hội, kết hợp với sự phát triển của nguồn năng lượng tái tạo như vừa nêu có thể đẩy lưới điện đi đến quá tải cục bộ, hay còn gọi là tắc nghẽn truyền tải tại một thời điểm nào đó. Có nhiều cách để giải quyết các tắc nghẽn hệ thống điện [9-12], mở rộng lưới điện là cách kinh điển nhất chủ yếu dành cho quy hoạch dài hạn, điều chỉnh phân bố công suất bằng các thiết bị FACTS và trong bài báo này hướng đến phương pháp quy hoạch nguồn ESS [5, 13]. Phương pháp mở rộng lưới điện truyền tải thường có kinh phí khá lớn và cần các điều kiện khá khó khăn khác như: đền bù giải tỏa, thay đổi điều kiện sống người dân nơi đường dây điện đi qua. Trong khi đó, mặc dù vốn đầu tư hiện nay không thấp nhưng ESS khá linh động vị trí lắp đặt và mang lại hiệu quả kép: giải quyết tắc nghẽn (như bài báo đề xuất) và cải thiện sự không chắc chắn mà nguồn năng lượng tái tạo gây ra.

Vấn đề xác định vị trí và công suất ESS thích hợp để giải quyết tắc nghẽn cục bộ cho hệ thống điện hiện có nhiều phương pháp, trong số đó có thể kể đến như mô hình toán AC và DC, thuật toán meta-heuristic như: bầy đàn (PSO), GA [2, 14]. Theo các nghiên cứu thời gian gần đây, một bài toán tối ưu có thể đề xuất phát triển theo chiều hướng hiệu quả hơn như sau:

Thuật toán tối ưu hóa cổ điển được sử dụng nhiều trước đây: là một kỹ thuật phân tích thường được sử dụng và kết quả thường là các giải pháp tối ưu toàn cục cho phiên bản phổ quát của bài toán số nguyên ban đầu, trong đó dữ liệu ban đầu là các số nguyên, được thay thế bằng các biến liên tục. Khối lượng tính toán trong các thuật toán này thường rất lớn và phương pháp này có thể can thiệp vào vấn đề hội tụ trong một số trường hợp, như trong [15, 16];

Giải thuật MC: khác với các thuật toán khác, nó luôn cho kết quả khá chính xác, khối lượng tính toán tương đối thấp, nhưng đôi khi rơi vào cực trị địa phương do chưa xét đến

phân bố công suất. Vì vậy, một số nghiên cứu sử dụng nó để tìm vị trí tối ưu lắp đặt FACTS [5, 17], giải quyết nút cổ chai trong hệ thống điện [17], cũng như các nghiên cứu về độ ổn định và độ tin cậy trong quy hoạch mở rộng truyền tải [18, 19].

Các thuật toán meta-heuristic: là các thuật toán lấy cảm hứng từ sự tối ưu hóa trong các quy luật tự nhiên. Chúng được mở rộng cho các thủ tục tìm kiếm cụ thể và có thể được sử dụng trong hầu hết mọi trường hợp, và đây là một giải pháp đặc biệt thích hợp cho các bài toán phức tạp với nhiều ràng buộc không chắc chắn. Các thuật toán thường được sử dụng để xác định kết quả tối ưu hoặc không tối ưu của các vấn đề chung, ngay cả đối với các hệ thống lớn tương ứng liên quan đến nỗ lực tính toán lớn [20].

Mặc dù có các ưu điểm nhất định nhưng xác suất hội tụ và khối lượng tính toán lớn của thuật toán meta-heuristic là mối quan tâm của các nhà nghiên cứu và đây là cơ hội để đề xuất áp dụng một phương pháp lai ghép trong bài báo này. Sự lai tạo này dẫn đến một thuật toán kết hợp hai giai đoạn. Đầu tiên, cải tiến thuật toán MC để phù hợp với mục tiêu của vấn đề tối ưu hóa, được gọi là "giới hạn không gian tìm kiếm". Giai đoạn tiếp theo, được gọi là "Tối ưu hóa giải pháp", sử dụng thuật toán GA để tìm ra kết quả tối ưu toàn cục trong không gian thu hẹp của giai đoạn trước. Quá trình này được thiết kế hoàn hảo để khắc phục nhược điểm của thuật toán meta-heuristic như vừa đề cập.

Kết quả mô phỏng trên hệ thống IEEE 24 bus cho quy trình 5 bước chứng minh tính hiệu quả của biện pháp đề xuất trong việc tìm ra vị trí và công suất tối ưu để lắp đặt ESS. Những đóng góp chính của bài báo là:

i) Đề xuất thay đổi nguyên lý giải thuật MC và lai tạo với thuật toán GA để tạo ra một phương pháp tối ưu mới trong quy hoạch mở rộng lưới điện truyền tải;

ii) Đề xuất mô hình đầu tư ESS để giải quyết tắc nghẽn ngắn hạn và ứng dụng phương pháp tối ưu mới để tìm vị trí và công suất ESS;

iii) Sử dụng hệ thống điện mẫu của IEEE 24-bus tích hợp ESS để thử nghiệm trong nghiên cứu này.

2. MÔ HÌNH TOÁN

2.1. Mô hình ESS trong hệ thống điện

Một trong các loại hình nguồn điện chủ động như ESS có thể cung cấp điện khi hệ thống điện bị tắc nghẽn ở phụ tải cao điểm và đảm bảo hệ thống điện vận hành ổn định mà không cần mở rộng hệ thống điện truyền tải. Mặt khác, ESS còn nâng cao khả năng truyền tải của hệ thống bằng cách đưa thêm công suất lên lưới nhằm giảm ùn tắc và áp lực lên các nguồn điện hiện có, đảm bảo an ninh hệ thống điện [13, 21]. Trong thị trường thương mại gần đây với các công nghệ lưu trữ năng lượng khác nhau, pin vẫn là thiết bị lưu trữ phổ biến nhất hiện nay [21]. Ngoài ra, để giải quyết vấn đề thiếu hụt công suất trong thời gian ngắn còn có các loại công nghệ khác như bánh đà, siêu tụ điện. Lưu trữ năng lượng bằng Hydrogen, khí nén là những công nghệ có công suất lớn hơn, khả năng lưu trữ năng lượng cao hơn

nên linh hoạt hơn trong hệ thống điện. Các điều kiện ứng dụng cụ thể tương ứng với từng loại công nghệ được phân loại như hình 1.

Cho đến nay, vốn đầu tư ESS về cơ bản dường như vẫn quá cao không thể mang lại lợi nhuận cho nhà đầu tư độc lập. Vì vậy, thường ESS chỉ được xây dựng để phục vụ các mục đích cần thiết cụ thể nào đó mà không có giải pháp thay thế khác [22-24]. Một trong số đó là ổn định hệ thống điện bởi nhiều từ các loại nguồn năng lượng tái tạo. Đó là kết quả ESS thường được xây dựng đồng bộ với các dự án năng lượng tái tạo. Một trong những tác dụng chính của chúng được sử dụng như một nguồn năng lượng để bù đắp cho sự thiếu hụt. ESS là loại năng lượng có thể cung cấp điện khi cần thiết và lưu trữ năng lượng khi quá nhu cầu [13, 21]. Chi phí đầu tư ESS trong thị trường có thể được tính gần đúng như biểu thức (1).

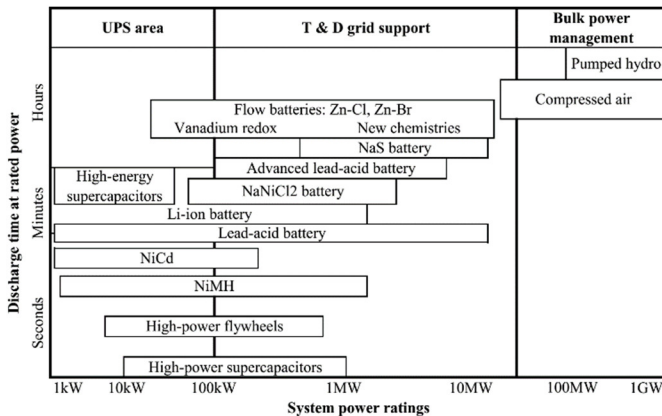
$$C_j^{ESS} = \sum_{i \in G_{ess}} P_i^{ess} \cdot c_{ess} + C_0 \quad (1)$$

Trong đó:

P_i^{ess} - Công suất định mức của ESS (MW).

c_{ess} - Vốn đầu tư nguồn ESS (USD).

C_0 - Chi phí cố định nguồn ESS (USD).



Hình 1. Phân loại các loại nguồn ESSs [6]

2.2. Mô hình cải tiến thuật toán MC

(i) Giải thuật mặt cắt tối thiểu gốc (Basic MC Algorithm - BMC)

Vào những năm 1950, bài toán tìm tắc nghẽn của đồ thị vô hướng được Ford và Fulkerson đề xuất bằng cách xác định lát cắt nhỏ nhất của đồ thị vô hướng đó. Giải pháp này là tiền đề cho giải thuật MC. Mechtilde Stoer và Frank Wagner đã phát triển thuật toán này để áp dụng cho các chương trình máy tính vào năm 1997 và gọi nó là thuật toán Min-Cut [25]. Mô hình này cũng được sử dụng để xác định vị trí tối ưu của TCSC nhằm giải quyết vấn đề tắc nghẽn trong HTĐ [5]. Sơ đồ thuật toán MC cơ bản được hiển thị trong hình 2.

Diễn giải:

Một ma trận (n x n) trọng lượng [A] (trọng lượng trong trường hợp này là công suất định mức các đường dây truyền tải điện).

n là số đỉnh.

$\sum s_j = \sum a_{sj}, \sum jt = \sum a_{jt}$ - tổng trọng lượng bên phía nguồn điện, bên phía phụ tải, của mặt cắt thứ i tương ứng nhánh thứ j.

S(i), T(i) - i mặt cắt hướng nguồn, hướng tải tương ứng.

u, v - các nút tương ứng.

{s}, {t} - tập hợp đỉnh hướng nguồn, tải.

MC(i) - mặt cắt tối thiểu của bước thứ i.

MF - cực đại phân bố công suất.

(ii) Giải thuật cải tiến min cut bằng kết hợp yếu tố phạt (Penalty MC Algorithm - PMC)

Giải thuật BMC như nêu trên bị hạn chế do không xét đến phân bố công suất truyền tải trên đường dây điện trong quá trình tìm ra vùng tắc nghẽn trên hệ thống điện. Do đó nhánh điện được chọn thay thế hay xây dựng mới để giải quyết tắc nghẽn có thể là nhánh điện còn non tải với khả năng dẫn điện vẫn có thể tăng cao hơn. Kết quả này dẫn đến có thể chưa tối ưu theo mục tiêu của bài toán. Cụ thể là mục tiêu của việc giải quyết tắc nghẽn khi phụ tải tăng lên phải được ưu tiên các tuyến đường dây điện có tỷ lệ công suất truyền tải cao trong quá trình vận hành. Trong khi đó, BMC vì không xét đến khả năng mang tải của các đường dây điện nên có thể bỏ qua các đường dây truyền tải có phân bố công suất lớn, trong khi đây là những vị trí xung yếu cần khắc phục hơn các đường dây có công suất mang tải thấp hơn. Vì lý do đó, cải tiến BMC để giải thuật có thể quan tâm hơn đến các nhánh mang công suất tải lớn hơn vào mặt cắt tối thiểu cuối cùng để nâng cao hiệu quả bài toán giải quyết tắc nghẽn.

Giải thuật PMC về cơ bản vẫn là phương pháp GRAPH như BMC để tìm ra một mặt cắt trong đó tổng trọng lượng các nhánh là nhỏ nhất giữa nguồn điện và phụ tải điện. Tuy nhiên, điểm khác biệt lớn đó là yếu tố phạt truyền tải. Giá trị trọng lượng của một nhánh sẽ được bổ sung thêm một lượng gọi là phạt truyền tải điện. Nghĩa là khi đường dây mang tải càng cao thì phạt càng lớn và trọng lượng của nhánh đó càng cao, và ngược lại. Phạt truyền tải điện (p), được tính trong mỗi vòng lặp phân bố công suất dựa theo tỷ lệ giữa công suất điện truyền tải P_{ij}^f trên nhánh thứ i so với công suất định mức P_i^r của cùng nhánh đó, như biểu thức (2).

$$p_j = \frac{P_{ij}^f}{P_i^r} \quad (2)$$

Tỷ trọng trọng lượng của mặt cắt trong bước 2 và 5 của lưu đồ BMC trên sẽ thay đổi trong mỗi bước lặp một lượng như (3).

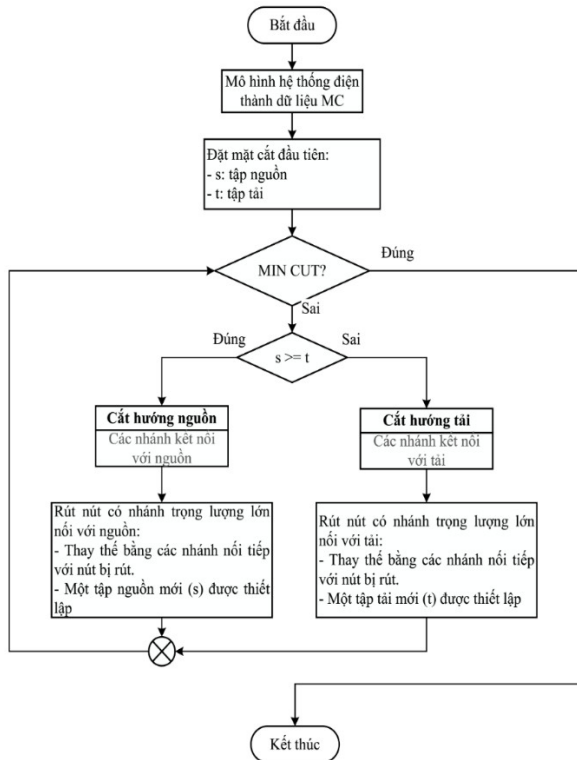
$$G_j = A(1 - p_j) \quad (3)$$

Các trọng lượng của mặt cắt được thay thế bằng các biểu thức (4) và (5).

$$s_j(\text{new}) = s_j + G_j \quad (4)$$

$$t_j(\text{new}) = t_j + G_j \quad (5)$$

A trong biểu thức (3) là hệ số tỷ lệ xét đến mức độ đóng góp của phân bố công suất trên các đường dây điện đến kết quả hội tụ của giải thuật PMC. Khi hệ số A được chọn quá lớn, các đường dây điện quá tải sẽ càng được ưu tiên nhưng vai trò mật cắt tối thiểu bị giảm đi, điều đó dẫn đến kết quả có thể loại vùng tắc nghẽn ra khỏi nghiệm. Trong khi đó nếu hệ số đó quá nhỏ, vai trò của các đường dây điện phân bố công suất cao không còn tác dụng dẫn đến kết quả không khác gì với giải thuật BMC. Thông thường, hệ số này được chọn tương ứng gần với công suất truyền tải định mức của các đường dây truyền tải điện.



Hình 2. Lưu đồ giải thuật BMC [5]

Với cải tiến bổ sung hình phạt truyền tải điện trong giải thuật PMC như vừa nêu, sự đóng góp của dòng công suất điện trên mỗi đường dây điện vào tỷ trọng trọng lượng của mỗi mật cắt, như trong biểu thức (4) và (5). Theo đó cho thấy khi công suất truyền tải càng lớn, theo biểu thức (6), thì trọng lượng càng nhỏ nên thông thường đường dây truyền tải điện có phân bố công suất lớn đó sẽ được ưu tiên chọn trong mật cắt tối thiểu. Kết quả là mục tiêu xác định vùng tắc nghẽn sẽ càng chính xác hơn so với phương pháp trước đây.

$$[P_i] = \text{runopf}(\text{sys}) \tag{6}$$

2.3. Hàm mục tiêu

(i) Hàm mục tiêu

Một số nghiên cứu gần đây về quy hoạch TEP đã xem xét việc lắp đặt ESS. Tuy nhiên, nó vẫn chưa phổ biến trên thị trường thương mại vì vốn đầu tư của ESS vẫn còn tương đối cao [26]. Vì vậy, bài toán tối ưu hóa vị trí và công suất của các ESS trong quy hoạch TEP để đạt được chi phí hợp lý

khi đầu tư nguồn ESS mới và chi phí đầu tư đường dây điện phải xây dựng mới hoặc cải tạo nâng cấp năng lực truyền tải điện được thể hiện bởi hàm mục tiêu sau:

$$\min C^T = \sum_{i \in L} C_i^L + \sum_{j \in \text{ESS}} C_j^{\text{ESS}} + \sum_{l \in B} C_l^{\text{AA}} \tag{7}$$

ở đây, C_i^L là chi phí đầu tư nâng cấp đường dây truyền tải thứ i , US\$, và C_l^{AA} là chi phí do tổn hao điện năng trên đường dây truyền tải thứ l , US\$, thuộc tập hợp B , là tập hợp đường dây truyền tải của hệ thống điện, chi phí này trong một chu kỳ xem xét T được tính theo công thức:

$$C_l^{\text{AA}} = \lambda \cdot \Delta P_l^{\text{max}} \cdot \text{LLF} \cdot T \tag{8}$$

Với λ là giá điện bình quân, US\$/kWh; ΔP_l^{max} là tổn hao công suất cự đại trên nhánh l , W; và LLF là tỷ số tổn hao.

Các ràng buộc về vận hành và giới hạn truyền tải của hệ thống điện thể trên các biểu thức (9) – (12) gồm:

$$P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j \in \text{bus}} V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \tag{9}$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - \sum_{j \in \text{bus}} V_i V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \tag{10}$$

$$V_{i \in \text{bus}}^{\min} \leq V_{i \in \text{bus}} \leq V_{i \in \text{bus}}^{\max} \tag{11}$$

$$S_{i \in \text{branch}} \leq S_{i \in \text{branch}}^{\max} \tag{12}$$

ở đây,

t - một chu kỳ đánh giá (năm).

$c_i(t)$ - chi phí nguồn điện thứ i ở chu kỳ t , US\$.

$P_{Gi}, Q_{Gi}, P_{Di}, Q_{Di}$ - công suất nguồn điện và phụ tải, MW và MVar.

$S_{i \in \text{branch}}^{\max}$ - công suất định mức của nhánh thứ i , MVA.

δ_{ij} - góc lệch điện áp nút.

$V_{i \in \text{bus}}^{\min}, V_{i \in \text{bus}}^{\max}$ - điện áp tối thiểu và cực đại của nút, kV.

(ii) Phương pháp lai hai bước (MCGA)

Bài toán tối ưu (7) với nhiều phương pháp giải đã được nghiên cứu trước đây bằng nhiều phương pháp trong đó có thuật toán heuristic, meta-heuristic hay toán học [14]. Các lợi thế và bất lợi của từng phương pháp không giống nhau, nhưng tất cả những vấn đề mà các nhà khoa học và quy hoạch quan tâm nhất đều liên quan đến việc tìm cực trị toàn cục của bài toán nhanh nhất, đặc biệt đối với các hệ thống điện lớn.

Trong số các thuật toán được sử dụng gần đây, GA là một trong các phương pháp tiêu chuẩn được sử dụng trong lập trình quy hoạch TEP để giải bài toán tối vì nó đơn giản. Tuy nhiên, đặc điểm của nó là khối lượng tính toán quá lớn trong một số trường hợp tương tự như hầu hết các phương pháp meta-heuristic khác và đôi khi kết quả của bài toán có thể bị mắc kẹt ở các cực trị cục bộ.

Vì vậy, phương pháp lai được đề xuất trong bài báo này nhằm giải quyết vấn đề cực trị toàn cục của bài toán quy hoạch TEP. Sự kết hợp hai giai đoạn đó là, thứ nhất dùng giải thuật PMC để giới hạn không tìm kiếm nhằm giảm số

lượng thao tác, và thứ hai là sử dụng thuật toán GA để tìm cực trị cho bài toán tối ưu trong không gian đã được thu nhỏ ở bước đầu.

Sơ đồ trong hình 3 mô tả vấn đề lại như đã đề cập ở trên theo trình tự năm bước:

- 1) Mô hình dữ liệu hệ thống điện.
- 2) Phân bố công suất tối ưu của hệ thống điện đang vận hành.
- 3) Tìm tập mặt cắt nhỏ nhất bằng giải thuật PMC.
- 4) Giới hạn không gian tìm kiếm căn cứ vào mặt cắt nhỏ nhất được xác định trong bước 2.
- 5) Giải bài toán tối ưu (7) bằng thuật toán GA trong không gian không gian thu nhỏ ở bước 3.
- 6) Cuối cùng là đánh giá vị trí và công suất của các nguồn ESS.

3. MÔ PHỎNG TRÊN LƯỚI ĐIỆN MẪU 24 NÚT (IEEE)

(i) Dữ liệu thử nghiệm

Hệ thống điện IEEE RTS 24-bus tiêu chuẩn được sử dụng để kiểm tra tính khả thi của phương pháp được đề xuất trong bài báo này. Thông số kỹ thuật thông lệ hệ thống này có 36 nhánh và 10 nguồn điện, dữ liệu của hệ thống điện này có thể được tìm thấy trong các tài liệu [27, 28], được thể hiện bảng 1, 2 và trong hình 4.

Bảng 1. Công suất nguồn điện

Generator	Bus	P_g (MW)	Q_g (MVar)
G1	1	192	62.375
G2	2	192	62.375
G3	7	300	75
G4	13	591	207
G5	15	215	66.313
G6	16	155	54.313
G7	18	400	100
G8	21	400	100
G9	22	300	60
G10	23	660	248.563

Bảng 2. Công suất phụ tải cực đại

Load	Bus	P_d (MW)	Q_d (MVar)
L1	1	108	22
L2	2	97	20
L3	3	180	37
L4	6	136	28
L5	7	125	25
L6	8	171	35
L7	10	195	40
L8	13	265	54
L9	14	194	39
L10	18	333	68
L11	19	181	37
L12	20	128	26

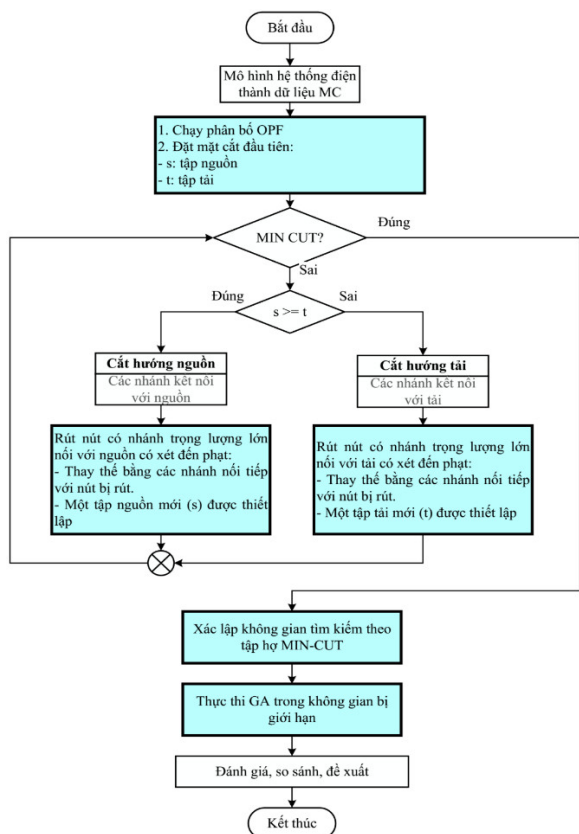
Để tạo vị trí tắc nghẽn trong hệ thống để thử nghiệm, bài báo giả thiết các kịch bản công suất phụ tải và nguồn phát cùng tăng như nhau tại tất cả các nút. Sau khi phân bố công suất tối ưu bằng công cụ Matpower được xây dựng sẵn trên nền tảng Matlab, kết quả các điểm mang tải cao trong hệ thống 24 bus được thể hiện ở bảng 3. Theo đó, với tỷ lệ này tăng lên từ 1,1 đến 1,5 thì phân bố công suất cũng tăng dần lên và nơi có công suất cao tập trung vào vị trí các nhánh 6-10, 7-8, và 14-16. Và tỷ lệ tăng tải lên đến 1,6 (tương ứng 160%) thì hệ thống bắt đầu xảy ra nghẽn mạch tại các nhánh 6-10 và 7-8.

Bảng 3. Tắc nghẽn hệ thống theo tỷ lệ phụ tải và nguồn điện

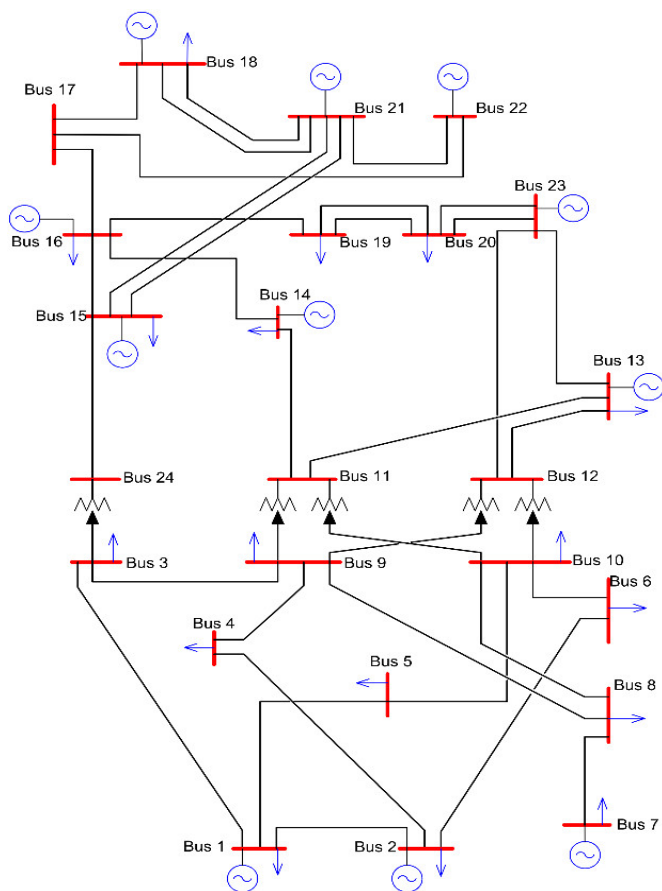
Kịch bản tăng tỷ lệ nguồn và tải	1.1	Nhánh mang tải cao nhất hoặc quá tải	6-10			
		Tỷ lệ mang tải (%)		97%		
1.2	Nhánh mang tải cao nhất hoặc quá tải	6-10				
	Tỷ lệ mang tải (%)		99%			
1.3	Nhánh mang tải cao nhất hoặc quá tải	6-10				
	Tỷ lệ mang tải (%)		100%			
1.4	Nhánh mang tải cao nhất hoặc quá tải	6-10	14-16			
	Tỷ lệ mang tải (%)		100%	100%		
1.5	Nhánh mang tải cao nhất hoặc quá tải	6-10	7-8	14-16		
	Tỷ lệ mang tải (%)		100%	100%	100%	
1.6	Nhánh mang tải cao nhất hoặc quá tải	6-10	7-8			
	Tỷ lệ mang tải (%)		133%	104%		
1.7	Nhánh mang tải cao nhất hoặc quá tải	6-10	7-8	8-9	8-10	
	Tỷ lệ mang tải (%)		120%	116%	111%	108%

Về nguồn ESS, chọn loại trữ năng bằng công nghệ Compressed Air thuận lợi để xây dựng cho mọi khu vực, vị trí, cũng như công suất yêu cầu lớn đáp ứng được nhu cầu cần thiết, đặc biệt có thể lắp ghép từ các modul để nâng công suất theo từng thời kỳ với kinh phí đầu tư tương đối hợp lý [9, 26]. Một trong những đặc điểm đáng chú ý của công nghệ trữ năng là có thể san bằng phụ tải giữa thời gian thấp điểm và cao điểm trong hệ thống điện như thể hiện trong [9, 10].

Phương pháp quy hoạch ở đây, thay vì phải có các biện pháp TEP để đảm bảo cung cấp điện cho nhu cầu tất cả các phụ tải trong thời gian đỉnh tải, nguồn trữ năng có thể cung cấp năng lượng trong thời gian quá tải do đỉnh tải gây ra để đảm bảo hệ thống điện hoạt động ổn định mà không cần TEP.



Hình 3. Lưu đồ giải thuật lai PMC và GA



Hình 4. Sơ đồ lưới điện chuẩn 24-bus IEEE

Bước

(ii) Thực thi

Ba kịch bản sẽ được xem xét để so sánh và đánh giá. Kịch bản thứ nhất sử dụng giải thuật BMC kết hợp với GA (BMC-GA), nó là kịch bản đơn giản để giải quyết một số bài toán tắc nghẽn trong hệ thống điện. Kịch bản thứ hai là lai PMC với GA như đề xuất trong bài báo này (PMC-GA). Kịch bản này sẽ được xem xét đánh giá hiệu quả sau khi thử nghiệm. Kịch bản thứ ba dùng phương pháp phân tích đánh giá số nguyên sau khi phân bố công suất tối ưu AC để tìm ra vị trí lắp đặt ESS (AC+). Kịch bản này đã được thể hiện tại [11].

Hai kịch bản đầu tiên tương ứng sáu bước theo quy trình cải tiến và đề xuất tại hình 3, được thực thi trên ngôn ngữ matlab trong đó có ứng dụng một số công cụ trong Matpower 6.0 được biên soạn sẵn. Phần lớn các nội dung giải thuật PMC và GA được lập trình để thực thi theo nội dung đã được trình bày trong phần 2.

Đối với thuật toán GA, phương pháp giải bài toán tối ưu tham khảo theo [29] và dữ liệu áp dụng trong trường hợp lưới điện IEEE 24 bus tham khảo [29, 30]. Tóm tắt một số thông số đầu vào cho ví dụ này gồm: khởi tạo với 20 biến số ngẫu nhiên ban đầu; tối đa 50 biến số trong quần thể; tỷ lệ lai tạo là 0,8; phương pháp lựa chọn lai tạo là "Roulette Wheel"; tỷ lệ đột biến 0,2.

Kết quả được thể hiện trong các bảng 4, 5.

Bảng 4. Kết quả Mincut thực thi trên hệ thống IEEE 24-bus

Trường hợp	MIN-CUT
	Branches
BMC	8-9; 8-10
PMC	6-2; 6-10; 8-7; 8-9; 8-10

Bảng 5. Phân bố công suất trên các nhánh thuộc min-cut

Nhánh	Tỷ lệ (%)
6-2	51
6-10	104
8-7	133
8-9	25
8-10	14

Bảng 6. Kết quả nguồn ESSs theo các kịch bản

Senario	Bus	Power (MW)	
1	BMC-GA	Nul	Nul
2	PMC-GA	6	10
		8	30
3	AC+	6	40

(iii) Thảo luận

Bảng 4 cho thấy sự khác biệt của các mặt cắt tối thiểu khi có sự tham gia của giá trị phạt công suất điện mang tải trên đường dây điện. Số lượng nhánh được chọn lựa trong mặt cắt tối thiểu nhiều hơn khi xét đến yếu tố phạt trong trường hợp PMC, 5 nhánh so với chỉ 2 nhánh trong trường hợp BMC. Điều đó dẫn đến giải thuật BMC có giới hạn

không gian tìm kiếm thu hẹp hơn, nhưng việc quá rút gọn này dẫn đến đôi khi loại bỏ các kết quả có thể là nghiệm của bài toán cần giải.

Thật vậy, bảng 5 cho thấy phân bố công suất của các nhánh trong các mặt cắt tối thiểu đã tìm được. Theo đó, các nhánh quá tải 8-7 và 10-6 (với hệ số quá tải là 104% và 133%) đã bị loại khỏi mặt cắt tối thiểu trong giải thuật BMC, trong khi các nhánh có phân bố công suất trên đó rất thấp, chẳng hạn như các nhánh 9-8 hoặc 10-8 chỉ hoạt động ở khoảng 25% và 14% khả năng tải tương ứng, lại được bao gồm trong mặt cắt tối thiểu của giải thuật BMC. Kết quả là các cơ hội khả thi có thể dẫn đến là nghiệm của bài toán đã bị loại ra khỏi không gian tìm kiếm, điều đó dẫn đến trong kịch bản BMC-GA không tìm ra nghiệm như đã thể hiện trên bảng 6.

Ngược lại, với giải thuật cải tiến PMC nhờ có xem xét đến hệ số phạt mang tải công suất điện nên các nhánh mang tải cao, đặc biệt các nhánh quá tải 8-7 và 10-6 đã bị loại trong giải thuật BMC nói trên, lại được giữ lại trong không gian tìm kiếm như trong bảng 4. Để từ đó kết quả giải bài toán GA trong không gian giới hạn này đã tìm được vị trí và công suất tối ưu của các nguồn ESSs như trong bảng 6, đó là công suất 10MW tại nút 6 và 30MW tại nút 8.

So sánh với kịch bản AC+ trên bảng 6 nhận thấy có một sự trùng hợp về vị trí lắp đặt nguồn ESS tại bus 6. Với kịch bản PMC-GA chỉ cần công suất 10MW trong khi AC+ là 40MW, lớn hơn 30MW so với kịch bản PMC-GA. Tuy nhiên, thay vì phải đầu tư thêm 30MW tại bus 6 thì PMC-GA lại chọn đầu tư lượng công suất này tại bus 8. Việc đầu tư hai vị trí có thể dẫn đến gia tăng vốn đầu tư ban đầu nguồn ESS, nhưng xét góc độ vận hành hệ thống điện thì phân tán nguồn ESS có thể mang lại lợi ích nhiều hơn nhờ xác suất cung cấp năng lượng nhiều hơn. Hơn nữa, khi phân tán nguồn ESS cũng giảm công suất tổn hao cực đại trên các đường dây truyền tải của hệ thống điện xuống còn 109MW so với tổn hao cao hơn 114MW của phương án AC+. Cuối cùng, mặc dù kịch bản PMC-GA có nhiều vị trí đặt ESS hơn nhưng tổng dung lượng công suất của các nguồn ESSs là không đổi so với kịch bản AC+ nên hoàn toàn phù hợp.

Trong khi đó, khi lai hai thuật toán PMC với GA, khối lượng tính toán giảm đi rất lớn nhờ PMC lược bỏ đi phần lớn các nhánh chắc chắn không phải là nghiệm của bài toán GA. Cụ thể trong ví dụ trên hệ thống 24 bus nêu trên, nhờ PMC mà số nhánh được xem xét tính toán chỉ còn lại 5 nhánh, như trên bảng 4, trong khi phải khảo sát cả 36 nhánh đối với kịch bản không giới hạn không gian tìm kiếm trước đó. Trong khi đó, khối lượng phép toán được tính theo hàm mũ của số nhánh khảo sát, nên với 7 lần số nhánh nhỏ hơn làm giảm đi đáng kể lượng lớn phép tính trong quá trình tính toán bài toán GA, đặc biệt là với các hệ thống điện có số lượng nhánh cao.

4. KẾT LUẬN

Xây dựng nguồn ESS đang là vấn đề được quan tâm của toàn xã hội, đặc biệt là các nhà quản lý vận hành hệ thống

điện và các nhà đầu tư tài chính, để giải quyết sự không chắc chắn cũng như các hậu quả trong vận hành hệ thống điện của sự phát triển tăng cao nguồn năng lượng tái tạo. Vì vậy, quy hoạch TEP và GEP ngày nay luôn đặt vấn đề tìm kiếm vị trí và công suất tối ưu cho nguồn ESS để đảm bảo các điều kiện hoạt động và lợi ích nhất cho tất cả các bên, kể cả lợi ích xã hội.

Kết quả nghiên cứu và đề xuất phương pháp lai trình bày cụ thể trong bài báo này mang lại hiệu quả là khá cao. Việc kết hợp giữa thuật MC và thuật toán GA đã cải thiện kết quả tính toán trong bài toán quy hoạch TEP và GEP, ngoài ra việc đề xuất đưa thêm yếu tố phạt truyền tải vào tỷ trọng mặt cắt tối thiểu vào hàm mục tiêu cũng làm giảm thiểu đáng kể không gian tìm kiếm cho các giai đoạn sau mà không làm thay đổi kết quả nghiệm của bài toán tối ưu trong bài toán quy hoạch TEP và GEP.

Phương pháp đề xuất đã thử nghiệm trên hệ thống điện chuẩn IEEE 24-bus, một trong các hệ thống điện mà dữ liệu thường dùng để mô phỏng kiểm tra trong các nghiên cứu về hệ thống điện. Kết quả chứng minh được phương pháp lai được đề xuất có kết quả tương đồng hoặc tốt hơn so với nghiên cứu trước đây, nhưng hiệu quả hơn nhiều về quá trình và số lượng phải thực thi bài toán.

Với hiệu quả của phương pháp đề xuất như đã nêu, việc tìm vị trí lắp đặt cho các nguồn ESSs với công suất tối ưu có thể giúp cho các nhà quản lý xây dựng quy hoạch TEP và GEP hiệu quả hơn, khai thác tốt nhất nguồn năng lượng tái tạo. Mặt khác, phương pháp đề xuất có thể giúp hoạch định thị trường điện hiệu quả hơn khi định hướng được những nguồn ESSs và nguồn năng lượng tái tạo khi tham gia vào thị trường. Xa hơn nữa, nó còn có thể giúp nhà đầu tư tài chính yên tâm hoạch định và đầu tư các nguồn ESSs.

LỜI CẢM ƠN

Bài báo này được hỗ trợ bởi Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam, theo đề tài T2022-69.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. M. Mahdavi, H. Monsef, 2011. *Review of Static Transmission Expansion Planning*. Journal of Electrical and Control Engineering, vol. 1, no. 1, pp. 11-17.
- [2]. S. Lumberras, A. Ramos, 2016. *The new challenges to transmission expansion planning. Survey of recent practice and literature review*. Electric Power Systems Research, vol. 134, pp. 19-29.
- [3]. C. Lee, S. K. Ng, J. Zhong, F. F. Wu, 2006. *Transmission Expansion Planning From Past to Future*. Proc Power Systems Conf. Expo., vol. PSCE 06, no. 03, pp. 257-265.
- [4]. M. Ilic, F. Galiana, L. Fink, 2013. *Power Systems Restructuring: Engineering and Economics*. New York: Springer Science & Business Media, LLC.

- [5]. T. L. Duong, J. Yao, V. A. Truong, 2013. *A new method for secured optimal power flow under normal and network contingencies via optimal location of TCSC*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 52, no. 8.
- [6]. G. M. J. Herbert, S. Iniyar, E. Sreevalsan, S. Rajapandiand, 2007. *A review of wind energy technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 11, no. 6, pp. 1117-1145.
- [7]. K. H. Solangi, M. R. Islam, R. Saidur, N. A. Rahim, H. Fayaz, 2011. *A review on global solar energy policy*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, no. 4, pp. 2149-2163.
- [8]. D. Cao, W. Hu, X. Xu, T. Dragičević, Q. Huang, Z. Liu, Z. Chen, F. Blabjerg, 2020. *Bidding strategy for trading wind energy and purchasing reserve of wind power producer - A DRL based approach*. Electrical Power & Energy Systems, vol. 117, p. 105648.
- [9]. D. Akinyele, R. Rayudu, 2014. *Review of energy storage technologies for sustainable power networks*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 8, pp. 74-91.
- [10]. J. Makansi, J. Abboud, 2002. *Energy Storage: the missing link in the electricity value chain-An ESC*. White Paper, Energy Storage Council, pp. 1-23.
- [11]. S. N. Dinh, L. T. Duong, A. V. Truong, T. T. Nguyen, 2020. *Determine the location and capacity of energy storage in the power system using the improved Min-Cut algorithm*. Science & Technology Development Journal – Engineering and Technology, vol. 3, no. 1, pp. 339-351.
- [12]. S. N. Dinh, V. H. Q. Nguyen, L. T. Duong, A. V. Truong, 2019. *Determining location for power system expansion planning using Min Cut algorithm*. Journal of Science and Technology, Hanoi University of Industry, vol. 50, pp. 15-20.
- [13]. L. Hadjipaschalis, A. Poullikkas, V. Efthimiou, 2009. *Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, no. 6-7, pp. 1513-1522.
- [14]. R. Hemmati, R.A. Hooshmand, A. Khodabakhshian, 2013. *Comprehensive review of generation and transmission expansion planning*. The Institution of Engineering and Technology, vol. 7, no. 9, p. 955 - 964.
- [15]. L. L. Garver, 1970. *Transmission Network Estimation Using Linear Programming*. IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vols. PAS-89, no. 7, pp. 1688-1697.
- [16]. I. G. Sánchez, R. Romero, J. R. S. Mantovani, M. J. Rider, 2005. *Transmission - Expansion Planning Using the DC Model and Nonlinear - Programming Technique*. IEEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, vol. 152, no. 6, pp. 763-769.
- [17]. T. L. Duong, J. Yao, V. A. Truong, 2014. *Application of Min Cut Algorithm for Optimal Location of FACTS Devices Considering System Loadability and Cost of Installation*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 63, no. 12.
- [18]. T. Tran, J. Choi, J. K. Park, S. I. Moon, A. A. El-Keib, 2004. *A fuzzy branch and bound-based transmission system expansion planning considering ambiguities*. IEEE Power Engineering Society General Meeting.
- [19]. J. S. Choi, T. T. Tran, S. R. Kang, D. H. Jeon, C. H. Lee, R. Billinton, Jaeseok, 2004. *A study on the optimal reliability criteria decision for a transmission system expansion planning*. IEEE Power Engineering Society General Meeting.
- [20]. M. C. Rocha, J. T. Saraiva, 2011. *Multiyear Transmission Expansion Planning Using Discrete Evolutionary Particle Swarm Optimization*. Energy Market (EEM), 2011 - 8th International Conference on the European, pp. 802-807.
- [21]. B. Dunn, H. Kamath, J. M. Tarascon, 2011. *Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices*. Science, vol. 334, pp. 928-935.
- [22]. H. Ding, P. Pinson, Z. Hu, Y. Song, 2016. *Integrated Bidding and Operating Strategies for Wind-Storage Systems*. IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 7, no. 1, pp. 163-172.
- [23]. A. A. Thatte, L. Xie, D. E. Viassolo, S. Singh, 2013. *Risk Measure Based Robust Bidding Strategy for Arbitrage Using a Wind Farm and Energy Storage*. IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 4, no. 4, pp. 2191-2199.
- [24]. L. M. Costa, F. Bourry, J. Juban, G. Kariniotakis, 2008. *Management of Energy Storage Coordinated with Wind Power under Electricity Market Conditions*. Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, p. 10646172.
- [25]. M. Stoer, F. Wagner, 1997. *A Simple Min-Cut Algorithm*. Journal of the ACM, vol. 44, no. 4, pp. 585-591.
- [26]. S. Teleke, 2011. *Energy Storage Overview: Applications, Technologies and Economical Evaluation*. White Paper, Quanta Technology, pp. 1-11.
- [27]. IEEE Commitee Report, 1979. *IEEE Reliability Test System*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vols. PAS-98, no. 6, pp. 2047-2054.
- [28]. IEEE Commitee Report, 1999. *The IEEE Reliability Test System - 1996*. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 14, no. 3, pp. 1010-1020.
- [29]. D. E. Goldberg, 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning - Third Edition*. Addison - Wesley.
- [30]. H. Abdi, M. Moradi, S. Lumberras, 2021. *Metaheuristics and Transmission Expansion Planning: A Comparative Case Study*. Energies, vol. 14, no. 12, p. 3618, 2021.

AUTHORS INFORMATION

Truong Viet Anh¹, Nguyen Tung Linh², Dinh Ngoc Sang³

¹Hochiminh City University of Technology and Education, Vietnam

²Electric Power University, Vietnam

³University of Architecture Hochiminh City, Vietnam