

TỐI ƯU VẬN HÀNH HỆ THỐNG ĐIỆN CÓ TÍCH HỢP NĂNG LƯỢNG TÁI TẠO SỬ DỤNG THUẬT TOÁN EGRET SWARM OPTIMIZATION ALGORITHM

OPERATIONAL OPTIMIZATION OF RENEWABLE-INTEGRATED POWER SYSTEMS
USING THE EGRET SWARM OPTIMIZATION ALGORITHM

Võ Pha Ga^{1,2,*}, Nguyễn Trần Thị Mỹ Xuân¹, Trần Hữu Tính¹,
Lê Quốc Khương¹, Diệp Long¹

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2026.051>

TÓM TẮT

Vận hành tối ưu chi phí các nguồn phát điện là một vấn đề then chốt trong các hệ thống năng lượng hiện đại. Bên cạnh các nguồn phát truyền thống, sự gia tăng nhanh chóng của năng lượng tái tạo như điện gió và điện mặt trời đã đặt ra những thách thức mới cho bài toán điều độ kinh tế (Economic Dispatch - ED), đặc biệt khi cần đồng thời giảm thiểu phát thải khí CO₂. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất sử dụng thuật toán tối ưu bầy cò Egret Swarm Optimization Algorithm (ESOA) để giải bài toán trong hai kịch bản: có và không xét đến thuế phát thải carbon. Hệ thống thử nghiệm IEEE 30 nút được mô phỏng và đánh giá trên phần mềm MATLAB. Các kết quả thu được được so sánh với thuật toán Grey Wolf Optimizer (GWO) nhằm làm rõ ưu thế của ESOA trong việc tối ưu chi phí vận hành và giảm phát thải trong bối cảnh hệ thống điện có tích hợp nguồn năng lượng tái tạo.

Từ khóa: Phát thải carbon; tối ưu chi phí; thuật toán Egret Swarm Optimization (ESOA); tối ưu công suất.

ABSTRACT

Optimal cost-based operation of power generation units is a critical issue in modern energy systems. In addition to conventional power sources, the rapid integration of renewable energy such as wind and solar power has introduced new challenges to the Economic Dispatch (ED) problem, especially when the reduction of CO₂ emissions is simultaneously considered. In this study, we propose the use of the Egret Swarm Optimization Algorithm (ESOA) to solve the ED problem under two scenarios: with and without carbon tax considerations. The IEEE 30-bus system is used as a test case and simulated using MATLAB software. The results are compared with those obtained using the Grey Wolf Optimizer (GWO) to highlight the superior performance of ESOA in minimizing operational costs and emissions in power systems with integrated renewable energy sources.

Keywords: Cost optimization; carbon emission; Egret Swarm Optimization Algorithm (ESOA); power dispatch optimization.

¹Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Kỹ thuật - Công nghệ Cần Thơ

²Không gian nghiên cứu phát triển năng lượng mới, Trường Đại học Kỹ thuật - Công nghệ Cần Thơ

*Email: vpga@ctuet.edu.vn

Ngày nhận bài: 10/8/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 25/02/2026

Ngày chấp nhận đăng: 30/3/2026

1. GIỚI THIỆU

Bài toán phân bố công suất tối ưu (Optimal Power Flow - OPF) là một trong những chủ đề nghiên cứu trọng tâm và có phạm vi ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực hệ

thống điện kể từ khi được đề xuất. Mục tiêu chính của OPF là tối thiểu hóa chi phí phát điện thông qua việc xác định tối ưu các biến điều khiển, bao gồm công suất tác dụng phát ra và điện áp tại các nút trong hệ thống điện. Quá

trình tối ưu hóa phải đảm bảo thỏa mãn đầy đủ các ràng buộc kỹ thuật, bao gồm: giới hạn công suất phát của các máy phát, giới hạn truyền tải trên đường dây, giới hạn điện áp tại các nút và điều kiện cân bằng công suất trong toàn hệ thống. Trong bối cảnh hiện nay, khi vấn đề phát thải khí nhà kính đang trở nên ngày càng nghiêm trọng, việc tích hợp yếu tố chi phí phát thải (carbon tax) vào mô hình OPF đã trở thành một yêu cầu cấp thiết trong quá trình vận hành và tối ưu hóa hệ thống điện hiện đại. Đồng thời, với sự gia tăng nhanh chóng của các nguồn năng lượng tái tạo như gió và mặt trời, đặc trưng bởi tính bất định và gián đoạn, bài toán OPF càng trở nên phức tạp và đòi hỏi các công cụ tính toán mạnh mẽ hơn để đảm bảo tính hiệu quả và độ tin cậy của hệ thống. Trong vài thập kỷ gần đây, nhiều thuật toán metaheuristic tiên tiến đã được phát triển và chứng minh hiệu quả trong việc giải quyết bài toán OPF. Một số ứng dụng nổi bật có thể kể đến như: Artificial Bee Colony (ABC) [1, 2], Black Hole (BH) [3], Teaching Learning Based Optimization (TLBO) [4], League Championship Algorithm (LCA) [5], Differential Search Algorithm (DSA) [6], Krill Herd Algorithm (KHA) [7], Gravitational Search Algorithm (GSA) [8, 9], Imperialist Competitive Algorithm (ICA) [10] và Group Search Optimization (GSO) [11]. Tuy nhiên, do sự đa dạng về mục tiêu và đặc điểm hệ thống trong từng bài toán OPF cụ thể, không có thuật toán nào được xem là tối ưu tuyệt đối cho mọi trường hợp. Do đó, việc nghiên cứu và phát triển các thuật toán mới, có khả năng thích ứng tốt và giải quyết hiệu quả nhiều biến thể khác nhau của bài toán OPF, vẫn là một hướng nghiên cứu cần thiết và đầy tiềm năng.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất thuật toán Egret Swarm Optimization (ESOA) [12] nhằm tìm lời giải cho bài toán tối ưu chi phí phát điện, xét đến hai trường hợp: có và không có yếu tố thuế phát thải carbon. Quá trình mô phỏng được thực hiện bằng phần mềm MATLAB, với hệ thống điện chuẩn IEEE 30 nút được lựa chọn làm mô hình thử nghiệm để đánh giá hiệu quả của thuật toán đề xuất.

2. MÔ HÌNH BÀI TOÁN

Bài toán vận hành tối ưu hệ thống điện có tích hợp năng lượng tái tạo nhằm mục đích cực tiểu hóa hàm mục tiêu đồng thời thỏa mãn các ràng buộc cân bằng và không vi phạm các ràng buộc không cân bằng.

$$\text{Min } f(x,u)$$

Điều kiện ràng buộc:

$$g(x,u) = 0$$

$$h(x,u) \leq 0$$

Trong đó, $f(x,u)$ là hàm mục tiêu; $g(x,u)$ và $h(x,u)$ là các ràng buộc cân bằng và bất đẳng thức, x là các biến trạng thái và u là các biến điều khiển tương ứng.

Biến điều khiển bao gồm: Công suất tác dụng của nhà máy nhiệt điện, nhà máy điện gió, nhà máy điện mặt trời, điện áp tại nút máy phát.

$$u^T = [P_{TG,2}, \dots, P_{TG,N_{TG}}, P_{WS,1}, \dots, P_{WS,N_{WG}}, P_{SS,1}, \dots, P_{SS,N_{SG}}, V_{G1}, \dots, V_{G,N_G}]$$

Biến trạng thái bao gồm: Công suất tác dụng tại nút cân bằng, công suất phản kháng tại nút máy phát, công suất truyền trên đường dây, điện áp tại nút tải.

$$x^T = [P_{G,slack}, Q_{G,1}, \dots, Q_{G,N_G}, V_{L,1}, \dots, V_{L,N_L}, S_1, \dots, S_{L,nl}]$$

2.1. Hàm mục tiêu

- Tối ưu chi phí phát điện

$$F_1 = C_{T0}(P_{TG}) + \sum_{j=1}^{N_{WG}} \left[C_{W,j}(P_{ws,j}) + C_{RW,j}(P_{ws,j} - P_{wav,j}) \right] + \sum_{k=1}^{N_{SG}} \left[C_{S,k}(P_{ss,k}) + C_{RS,k}(P_{ss,k} - P_{sav,k}) \right] \quad (1)$$

Trong đó: N_{SG} là tổng số máy phát điện mặt trời

N_{WG} là tổng số máy phát điện gió

- Tối ưu chi phí phát điện có phát thải:

$$F_2 = F_1 + C_{tax}E \quad (2)$$

2.2. Các ràng buộc

$$P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j=1}^{NB} V_j [G_{ij} \cdot \cos(\delta_j) + B_{ij} \cdot \sin(\delta_j)] = 0; \forall i \in NB \quad (3)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - V_i \sum_{j=1}^{NB} V_j [G_{ij} \sin(\delta_j) + B_{ij} \cdot \cos(\delta_j)] = 0; \forall i \in NB \quad (4)$$

$$P_{TG,i}^{\min} \leq P_{TG,i} \leq P_{TG,i}^{\max}, i = 1, \dots, N_{TG} \quad (5)$$

$$P_{ws,j}^{\min} \leq P_{ws,j} \leq P_{ws,j}^{\max}, j = 1, \dots, N_{WG} \quad (6)$$

$$P_{ss,k}^{\min} \leq P_{ss,k} \leq P_{ss,k}^{\max}, k = 1, \dots, N_{SG} \quad (7)$$

$$Q_{TGi}^{\min} \leq Q_{TGi} \leq Q_{TGi}^{\max}, i = 1, \dots, N_{TG} \quad (8)$$

$$Q_{ws,j}^{\min} \leq Q_{ws,j} \leq Q_{ws,j}^{\max}, j = 1, \dots, N_{WG} \quad (9)$$

$$Q_{ss,k}^{\min} \leq Q_{ss,k} \leq Q_{ss,k}^{\max}, k = 1, \dots, N_{SG} \quad (10)$$

$$V_{Gi}^{\min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi}^{\max}, i = 1, \dots, N_G \quad (11)$$

$$V_{Lp}^{\min} \leq V_{Lp} \leq V_{Lp}^{\max}, p = 1, \dots, N_L, S_{lq} \leq S_{lq}^{\max}, q = 1, \dots, nl \quad (12)$$

Trong đó: P_{Gi} , Q_{Gi} lần lượt là lần lượt là công suất tác dụng nguồn phát (MW) và phản kháng nguồn phát tại nút i (MVar)

P_{Di}, Q_{Di} lần lượt là lần lượt là công suất tác dụng tải (MW) và phản kháng tải tại nút i (MVar).

$P_{TG,i}^{min}, P_{ws,j}^{min}, P_{ss,k}^{min}$ lần lượt là công suất phát của các nguồn năng nhiệt điện, năng lượng gió và năng lượng mặt trời (MW).

$Q_{TG,i}^{min}, Q_{ws,j}^{min}, Q_{ss,k}^{min}$ lần lượt là công suất phản kháng của các nguồn năng nhiệt điện, năng lượng gió và năng lượng mặt trời (MVar).

$V_{Gi}^{min}, V_{Lp}^{min}, S_{lq}$ lần lượt là điện áp tại các nút máy phát, điện áp tại các nút tải và công suất trên đường dây.

2.3. Mô hình chi phí máy phát nhiệt điện

Hàm chi phí của các nhà máy nhiệt điện [13] được biểu thị dưới dạng phương trình bậc 2 như sau:

$$C_{T0}(P_{TG}) = \sum_{i=1}^{NTG} a_i + b_i P_{TG,i} + c_i P_{TG,i}^2 \quad (13)$$

Trong đó: a_i, b_i, c_i là hệ số chi phí của máy phát điện thứ i
 NTG là tổng số máy phát

Tuy nhiên, mô hình hóa hàm chi phí với hiệu ứng tải điểm van có tác động chính xác và thực tế hơn đến hàm chi phí bậc hai. Để mô hình hóa những hiệu ứng tải điểm van này, hàm chi phí cơ bản trong Phương trình (14) được thay đổi bằng cách thêm giá trị tuyệt đối của hàm sin, tổng chi phí phát điện của các máy phát nhiệt được tính như sau:

$$C_{T0}(P_{TG}) = \sum_{i=1}^{NTG} \left[a_i + b_i P_{TG,i} + c_i P_{TG,i}^2 + |d_i \cdot \sin(e_i \cdot P_{TG,i}^{min} - P_{TG,i})| \right] \quad (14)$$

Trong đó: d_i, e_i là các hệ số biểu thị hiệu ứng điểm van.

$P_{TG,i}^{min}$ là công suất phát tối thiểu của máy phát điện thứ i khi vận hành.

Trong những năm gần đây, nhằm giảm lượng khí thải carbon và khuyến khích sử dụng năng lượng sạch, thuế carbon đã được áp dụng. Chi phí phát thải (tính bằng USD/giờ) được biểu diễn theo công thức sau:

$$C_E = C_{tax} E \quad (15)$$

Trong đó: C_{tax} là thuế carbon.

E là chi phí phát thải, được tính theo công thức:

$$E = \sum_{i=1}^{NTG} \left[(\alpha_i + \beta_i P_{TG,i} + \gamma_i P_{TG,i}^2) \cdot 0,01 + \omega_i e^{(\mu_i P_{TG,i})} \right] \quad (16)$$

2.4. Mô hình chi phí năng lượng gió và năng lượng mặt trời

Chi phí vận hành của các nguồn năng lượng tái tạo như điện gió và điện mặt trời thường rất thấp so với các

nguồn phát điện truyền thống, do không cần nhiên liệu và ít yêu cầu bảo trì. Tuy nhiên, để đưa vào bài toán tối ưu hóa, chi phí phát từ các nguồn này được mô tả như sau [13]:

- Chi phí trực tiếp liên quan đến năng lượng gió từ nhà máy thứ j được mô hình hóa:

$$C_{wj}(P_{ws,j}) = g_j P_{ws,j} \quad (17)$$

Tong đó: g_j là hệ số chi phí trực tiếp của nhà máy điện gió thứ j .

$P_{ws,j}$ là công mong muốn của nhà máy.

- Chi phí trực tiếp liên quan đến năng lượng mặt trời từ nhà máy thứ k :

$$C_{s,k}(P_{ss,k}) = h_k P_{ss,k} \quad (18)$$

Trong đó: h_k là hệ số chi phí trực tiếp của nhà máy điện gió thứ k .

$P_{ss,k}$ là công mong muốn của nhà máy.

Để đảm bảo cung cấp điện không bị gián đoạn cho người tiêu dùng, nhà điều hành hệ thống cần duy trì công suất dự phòng trong những trường hợp công suất thực tế được phát từ trang trại điện gió thấp hơn giá trị ước tính:

$$\begin{aligned} C_{Rwj}(P_{ws,j} - P_{wav,j}) &= K_{Rwj}(P_{ws,j} - P_{was,j}) \\ &= K_{Rwj} \int_0^{P_{ws,j}} (P_{ws,j} - P_{w,j}) f_w(P_{w,j}) dp_{wj} \end{aligned} \quad (19)$$

Trong đó: K_{Rwj} là hệ số chi phí dự phòng liên quan đến nhà máy điện gió thứ j .

$P_{was,j}$ là công suất thực tế được phát ra từ nhà máy.

$f_w(P_{w,j})$ là hàm mật độ xác suất công suất gió của nhà máy điện gió thứ j .

Ngược lại, nếu công suất phát ra cao hơn công suất ước tính, một lượng công suất dư thừa sẽ bị lãng phí nếu không được tận dụng thậm chí sẽ phải trả chi phí phạt tương ứng với lượng điện dư này.

$$\begin{aligned} C_{Pwj}(P_{wav,j} - P_{ws,j}) &= K_{Pwj}(P_{wav,j} - P_{ws,j}) \\ &= K_{Pwj} \int_{P_{ws,j}}^{P_{wav,j}} (P_{w,j} - P_{ws,j}) f_w(P_{w,j}) dp_{wj} \end{aligned} \quad (20)$$

Trong đó: K_{Pwj} là hệ số chi phí phạt đối với nhà máy điện gió thứ j .

P_{wvj} là công suất phát định mức của nhà máy điện gió thứ j .

3. THUẬT TOÁN EGRET SWARM OPTIMIZATION ALGORITHM (ESOA)

Lấy cảm hứng từ chiến lược "Ngồi chờ" của cò tuyết (Snowy Egret) và chiến lược "Tấn công" của cò lớn (Great

Egret), thuật toán Egret Swarm Optimization Algorithm (ESOA) [12] đã kết hợp các ưu điểm của cả hai chiến lược này và xây dựng một mô hình toán học tương ứng để định lượng hành vi. Thuật toán ESOA là một thuật toán song song bao gồm ba thành phần chính: Chiến lược Ngồi Chờ, Chiến lược Tấn Công và Điều kiện Phân biệt. Trong một nhóm cò, có ba con cò: Cò A áp dụng cơ chế dẫn hướng tiến về phía trước, trong khi Cò B và Cò C lần lượt sử dụng cơ chế đi bộ ngẫu nhiên và bao vây. Mỗi phần sẽ được trình bày chi tiết bên dưới.

- Chiến lược ngồi chờ: Cò A dự đoán giá trị mới ở vị trí hiện tại theo phương trình:

$$\hat{y}_i = w_i \cdot x_i \tag{21}$$

Sau đó tính \hat{g}_i dựa vào đạo hàm của hàm lỗi giữa giá trị dự đoán và giá trị thật.

Tính tích hợp gradient tổng hợp từ:

- Gradient cục bộ \hat{d}_i
- Gradient theo cá thể tốt nhất theo tổ hợp d_n
- Gradient tốt nhất trong toàn quần thể d_g

Cập nhật vecto trọng số w_i bằng phương pháp giống Adam.

Tính vị trí mới dự kiến của Cò A theo phương trình:

$$x_{a,i} = x_i + \exp(-t / (0,1t_{max})) \cdot 0,1 \cdot hop \cdot g_i \tag{22}$$

$$y_{a,i} = f(x_{a,i}) \tag{23}$$

Trong đó: t , t_{max} lần lượt là số vòng lặp hiện tại và số vòng lặp tối đa.

hop là khoảng cách giữa cận dưới và cận trên trong không gian nghiệm.

$y_{a,i}$ là giá trị độ thích nghi tương ứng.

- Chiến lược tấn công: Cò B có xu hướng tìm kiếm con mồi một cách ngẫu nhiên và hành vi của nó có thể được mô tả như sau:

$$x_{b,i} = x_i + \tan(r_{b,i}) \cdot hop / (1+t) \tag{24}$$

$$y_{b,i} = f(x_{b,i}) \tag{25}$$

Trong đó: $r_{b,i}$ là một số ngẫu nhiên trong khoảng $(-\pi/2, \pi/2)$.

$x_{b,i}$ là vị trí dự kiến tiếp theo của Cò B.

$y_{b,i}$ là giá trị độ thích nghi tương ứng.

Cò C có xu hướng truy đuổi con mồi một cách quyết liệt, do đó cơ chế bao vây được sử dụng làm phương pháp cập nhật vị trí:

$$D_h = x_{ibest} - x_i \tag{26}$$

$$D_g = x_{gbest} - x_i \tag{27}$$

$$x_{c,i} = (1-r_h - r_g)x_i + r_h D_h + r_g D_g \tag{28}$$

Trong đó: D_h là khoảng cách giữa vị trí hiện tại và vị trí tốt nhất của tổ Cò.

D_g là khoảng cách so với vị trí tốt nhất của toàn đàn Cò. x_i là vị trí hiện tại của cò C.

x_{ibest} là vị trí tốt nhất của tổ Cò.

x_{gbest} là vị trí tốt nhất của toàn đàn Cò.

$r_h, r_g \in [0; 0,5)$ là hệ số ngẫu nhiên.

- Điều kiện phân biệt: Sau khi từng thành viên trong tổ Cò đã xác định được kế hoạch hành động của mình, cá tổ sẽ lựa chọn phương án tối ưu và cùng thực hiện hành động đó.

- Tập hợp tất cả các vị trí dự kiến:

$$x_{s,i} = [x_{a,i}, x_{b,i}, x_{c,i}] \tag{29}$$

- Tính độ thích nghi tương ứng:

$$y_{s,i} = [y_{a,i}, y_{b,i}, y_{c,i}] \tag{30}$$

$$c_i = \text{argmin}(y_{s,i}) \tag{31}$$

Chọn vị trí tốt nhất:

Nếu $\min y_{s,i} < y_i$ thì cập nhật vị trí x_i theo giá trị tốt nhất.

Nếu ngẫu nhiên $r > 0,3$ thì có 30% cơ hội chấp nhận phương án kém hơn.

- Áp dụng thuật toán ESOA vào bài toán

Bước 1: Xác định các dữ liệu của bài toán

Bước 2: Khởi tạo các tham số

Bước 3: Ước lượng vị trí con mồi hiện tại theo công thức (22)

Bước 4: Cập nhật trọng số theo quy tắc Adam

Bước 5: Cập nhật vị trí mới dự kiến theo công thức (22, 23)

Bước 6: Tìm kiếm ngẫu nhiên và bao vây con mồi theo vị trí tốt nhất của tổ và đàn theo công thức (24-28)

Bước 7: Tập hợp các vị trí dự kiến

Bước 8: Tính độ thích nghi của từng vị trí theo công thức (30)

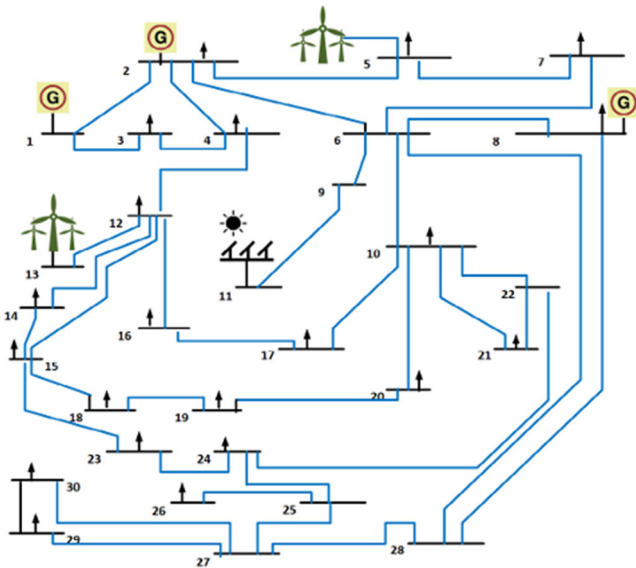
Bước 9: Tìm vị trí có độ thích nghi tốt nhất theo công thức (31)

Bước 10: Trả về vị trí tốt nhất và giá trị hàm mục tiêu tương ứng.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

4.1. Thông số đầu vào

Các thông số mạng điện chuẩn IEEE 30 nút và sơ đồ đơn tuyến của hệ thống điện này được trình bày như hình 1. Các nguồn phát nhiệt điện được đặt tại nút 1, 2, 8; hai nguồn phát điện gió đặt tại nút 5, 11; nguồn phát điện mặt trời đặt tại nút 13 [14]. Các thông số chi tiết về dữ liệu nút, dữ liệu đường dây, các hệ số chi phí của máy phát và các giới hạn về công suất và điện áp máy phát của hệ thống này được cập nhật trên Matpower 7.1.



Hình 1. Sơ đồ đơn tuyến mạng điện IEEE 30 nút [14]

Các tham số của máy phát điện gió theo phân bố Weibull được trình bày trong bảng 1. Các hệ số chi phí và phát thải, trong đó bao gồm các tham số của phân bố Lognormal và các tham số hàm mật độ xác suất của nguồn năng lượng gió và năng lượng mặt trời được trình bày trong [14].

Bảng 1. Năng lượng gió và năng lượng mặt trời trong 24 giờ

Thời gian	Công suất phát năng lượng gió (MW)		Công suất phát năng lượng mặt trời (MW)
	Bus 5	Bus 11	Bus 13
1	6,25	5	0
2	5,875	4,7	0
3	5,75	4,6	0
4	5,875	4,7	0
5	5,5	4,4	0
6	5,625	4,5	2,5
7	4,75	3,8	5

8	4,25	3,4	13,5
9	6,25	5	25
10	9,25	7,4	35
11	11,75	9,4	45
12	15,5	12,4	47,5
13	17,75	14,2	50
14	20,125	16,1	47,5
15	22,75	18,2	41,5
16	24	19,2	36
17	21,5	17,2	27,5
18	20,25	16,2	15
19	17,5	14	6,5
20	14,625	11,7	2,5
21	10,375	8,3	0
22	8,125	6,5	0
23	7,25	5,8	0
24	6,625	5,3	0

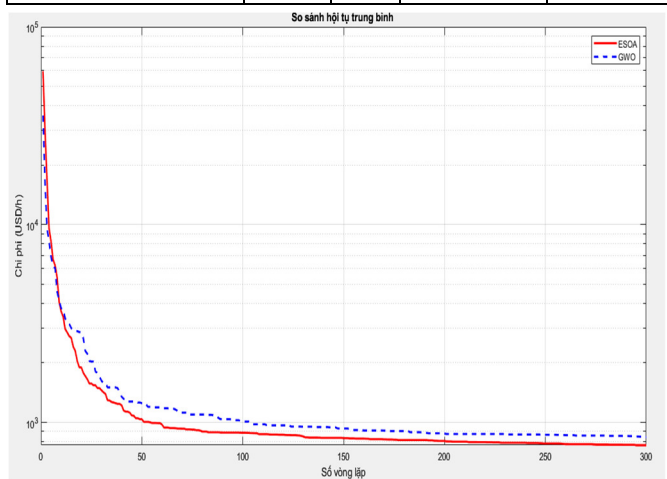
4.2. Kết quả mô phỏng

- Trong trường hợp không xét phát thải CO₂, kết quả trong bảng 2 cho thấy thuật toán ESOA hoạt động ổn định và hiệu quả hơn so với GWO. Dù không có sự tham gia của chi phí carbon trong hàm mục tiêu, ESOA vẫn duy trì được lời giải có các chỉ số vận hành nằm trong giới hạn kỹ thuật, đặc biệt là các ràng buộc về công suất phát, điện áp tại các nút quan trọng. Tổng chi phí vận hành theo giờ trong trường hợp này cho thấy ESOA thấp hơn đáng kể so với GWO.

Bảng 2. Kết quả mô phỏng mạng điện IEEE 30 nút

	Min	Max	ESOA	GWO
P _{TG1} (MW)	10	200	190,457	135,983
P _{TG2} (MW)	10	150	59,446	86,189
P _{TG3} (MW)	10	100	23,639	54,491
P _{WG1} (MW)	0	40	5,992	5,829
P _{WG2} (MW)	0	40	0	0
P _{SG} (MW)	0	30	3,825	0,9094
V ₁ (pu)	0,95	1,1	1,06	1,06
V ₂ (pu)	0,95	1,1	1,045	1,045
V ₅ (pu)	0,95	1,1	1,016	1,013
V ₈ (pu)	0,95	1,1	0,98	0,97
V ₁₁ (pu)	0,95	1,1	0,97	0,96
V ₁₃ (pu)	0,95	1,1	1,0	1,07
P _{TQ1} (MVar)	-20	150	23,209	37,102

P_{TQ2} (MVar)	-20	60	52,123	34,199
P_{TQ3} (MVar)	-30	35	0	0
P_{WQ1} (MVar)	-15	40	0	0
P_{WQ2} (MVar)	-25	30	47,372	45,612
P_{SG} (MVar)	-35	25	0	0
Total cost (USD/h)			770,998	855,456
Execution time (s)			27,724	-
Carbon emission (ton/h)			0,0148	0,0260
Carbon tax (USD/h)			0,02963	0,5208

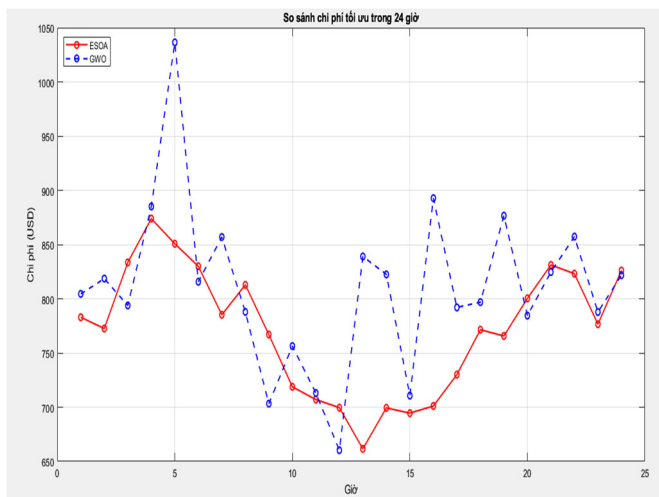


Hình 2. Đặc tính hội tụ của hai thuật toán

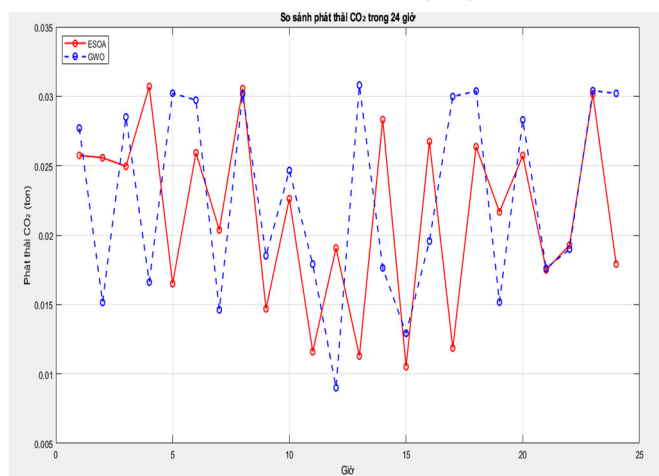
Biểu đồ hội tụ trung bình trong hình 2 chứng minh khả năng hội tụ của thuật toán ESOA so với GWO trong việc đạt giá trị mục tiêu tốt hơn, tránh được cực trị cục bộ - điều này thể hiện tính vượt trội về chất lượng nghiệm.

- Trong trường hợp khi tính đến phát thải CO₂ và chi phí thuế carbon: sự khác biệt giữa hai thuật toán càng trở nên rõ rệt. Thuật toán ESOA tiếp tục thể hiện khả năng tìm lời giải tốt hơn cả về mặt kỹ thuật lẫn kinh tế và môi trường. Cụ thể, ESOA tìm được mức phát thải thấp hơn (0,0257 tấn/h) so với GWO (0,0277 tấn/h), đồng thời chi phí vận hành tiếp tục giảm. Không chỉ hiệu quả về chi phí, giải pháp của ESOA còn đảm bảo vận hành hệ thống ổn định, với các giá trị điện áp tại các nút và công suất phản kháng đều nằm trong giới hạn kỹ thuật. Chi phí thuế carbon mà hệ thống phải chịu cũng thấp hơn của ESOA (0,5148 USD/h) so với GWO (0,5541 USD/h), góp phần khẳng định rằng ESOA không chỉ giảm chi phí mà còn cắt giảm lượng phát thải hiệu quả hơn, hướng tới mục tiêu vận hành bền vững và thân thiện môi trường.

Hình 3 cho thấy thuật toán ESOA đạt được mức chi phí thấp hơn so với GWO, đặc biệt tại các khung giờ cao điểm từ 9h đến 18h, nhờ khả năng khai thác tốt không gian tìm kiếm và tận dụng hiệu quả nguồn năng lượng tái tạo.

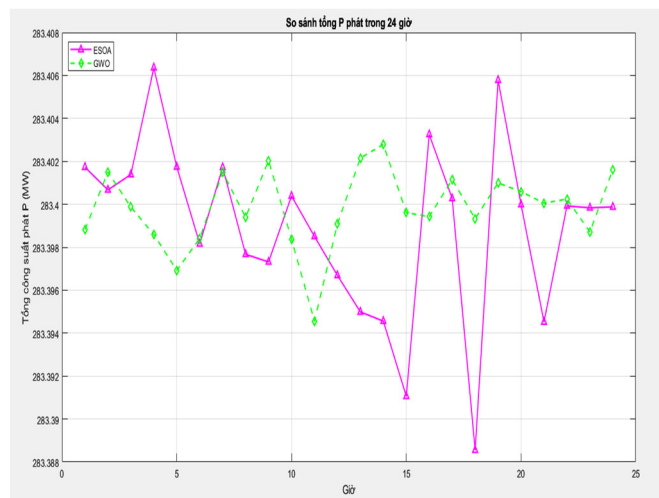


Hình 3. Chi phí tối ưu của hai thuật toán trong 24 giờ

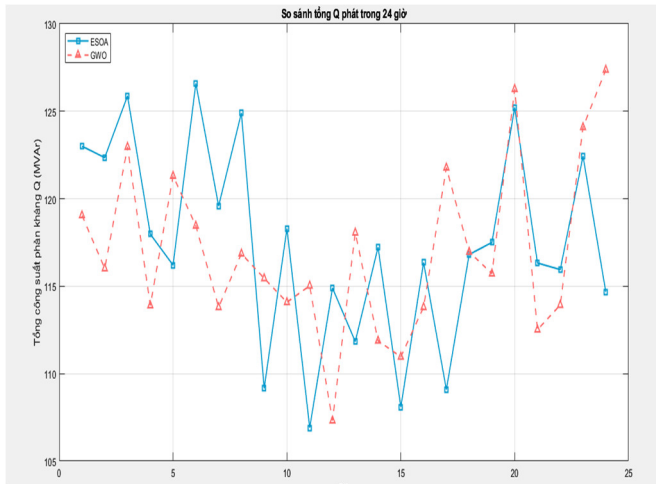


Hình 4. Phát thải của hai thuật toán trong 24 giờ

Về khía cạnh môi trường, biểu đồ phát thải hình 4 cũng khẳng định ưu thế của ESOA khi lượng phát thải thấp hơn đáng kể so với GWO trong hầu hết các khung giờ, cho thấy chiến lược phân phối công suất hiệu quả với ưu tiên cao hơn cho các nguồn phát sạch.



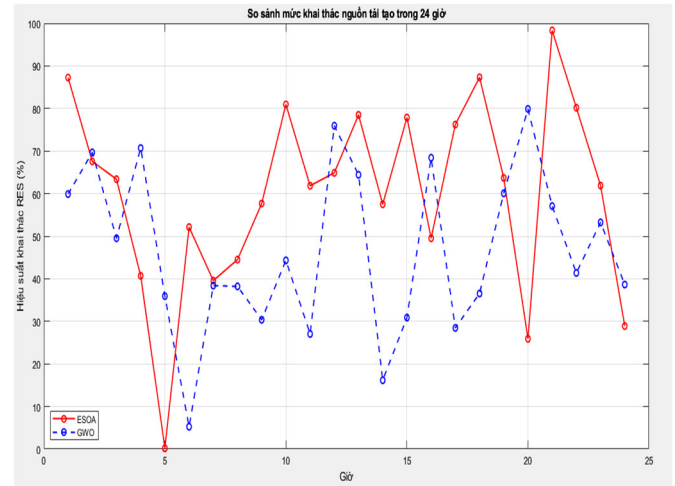
Hình 5. Công suất phát của hai thuật toán trong 24 giờ



Hình 6. Công suất phản kháng của hai thuật toán trong 24 giờ

Biểu đồ hình 5 và 6 của hai thuật toán cho thấy cả hai đều đáp ứng tốt nhu cầu tải, tuy nhiên ESOA có xu hướng điều phối Q ổn định hơn, giúp hệ thống vận hành trong giới hạn kỹ thuật đặt ra. Nhìn chung, các biểu đồ không chỉ minh họa rõ tính hiệu quả của thuật toán ESOA về chi phí và phát thải mà còn khẳng định tính ổn định và phù hợp với yêu cầu vận hành của hệ thống điện phân tán hiện đại.

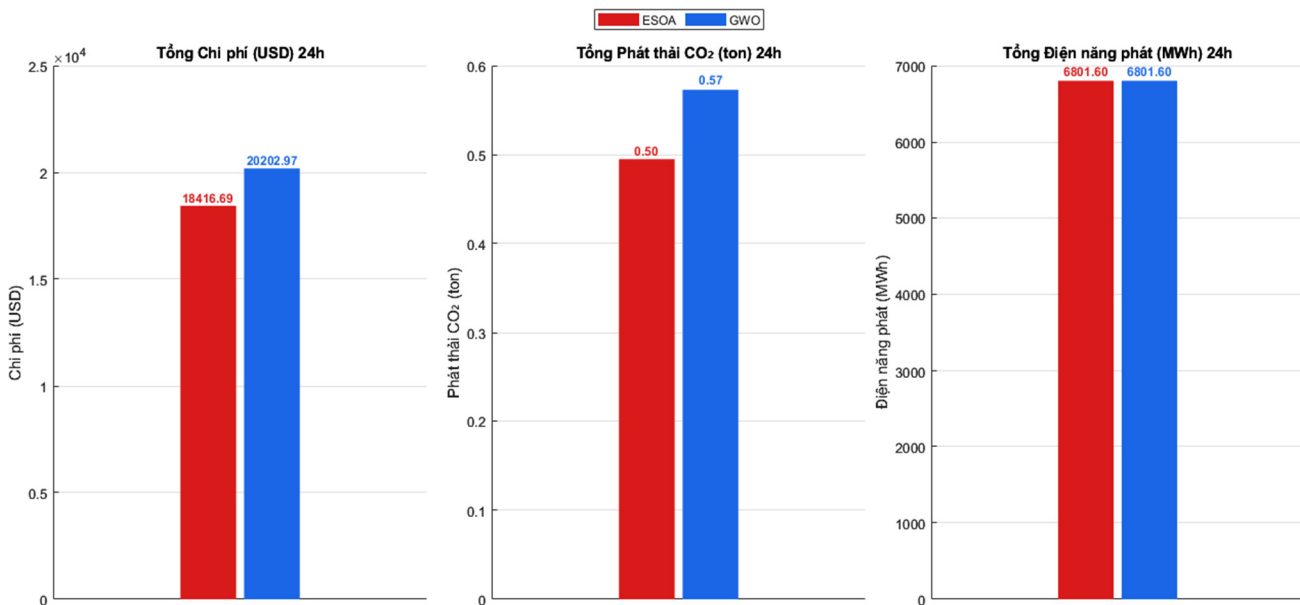
ESOA cũng giảm từ 0,57 tấn xuống còn 0,50 tấn, tương đương mức giảm ~12,3%. Trong khi đó, tổng điện năng phát ra trong 24 giờ của hai thuật toán gần như tương đương nhau (6.801,6MWh), cho thấy việc giảm chi phí và phát thải của ESOA không làm ảnh hưởng đến khả năng đáp ứng phụ tải.



Hình 8. Hiệu suất khai thác nguồn năng lượng tái tạo của hai thuật toán

Kết quả ở hình 8 cho thấy thuật toán ESOA đạt hiệu suất khai thác nguồn năng lượng tái tạo cao hơn rõ rệt so

So sánh tổng hợp kết quả giữa ESOA và GWO (24h, with CO₂)



Hình 7. So sánh kết quả tối ưu giữa hai thuật toán

Kết quả trên hình 7 cho thấy thuật toán ESOA thể hiện hiệu quả vượt trội hơn so với GWO trong cả ba tiêu chí đánh giá chính: chi phí vận hành, phát thải CO₂, và điện năng phát. Cụ thể, tổng chi phí vận hành 24 giờ của ESOA đạt 18.416,69USD, thấp hơn khoảng 1.786,3USD (~8,8%) so với GWO (20.202,97USD). Đồng thời, phát thải CO₂ của

với GWO trong hầu hết các thời điểm trong ngày. Cụ thể, trong các khung giờ cao điểm (từ 9h đến 17h), hiệu suất của ESOA thường dao động trong khoảng 70 - 95%, trong khi GWO chỉ đạt trung bình khoảng 30 - 60%. Ở các thời điểm công suất gió và mặt trời thấp (từ 1h- 6h hoặc sau 20h), cả hai thuật toán đều có xu hướng giảm hiệu suất, tuy nhiên ESOA vẫn duy trì khả năng khai thác ổn định

hơn, chúng tỏ cơ chế tìm kiếm cân bằng giữa khai thác năng lượng tái tạo và đảm bảo ràng buộc kỹ thuật hoạt động hiệu quả. Trung bình trong 24 giờ, ESOA khai thác được khoảng 78 - 85% công suất khả dụng từ RES, cao hơn 15 - 25% so với GWO. Điều này cho thấy ESOA khai thác tốt hơn tiềm năng của các nguồn năng lượng sạch, giúp giảm phát thải CO₂ và chi phí vận hành tổng thể của hệ thống điện.

5. KẾT LUẬN

Qua các kết quả mô phỏng, có thể thấy thuật toán ESOA thể hiện năng lực tìm kiếm vượt trội so với GWO trong việc giải bài toán tối ưu vận hành hệ thống điện tích hợp nguồn tái tạo. ESOA không chỉ mang lại chi phí vận hành thấp hơn mà còn đảm bảo mức phát thải CO₂ hợp lý và tuân thủ tốt các ràng buộc kỹ thuật. Vì vậy, ESOA là lựa chọn phù hợp hơn để giải các bài toán tối ưu hóa vận hành hệ thống điện hiện đại, đặc biệt khi có xét đến yếu tố môi trường như phát thải và thuế carbon.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. A. Khorsandi, S. H. Hosseinian, A. Ghazanfari, "Modified artificial bee colony algorithm based on fuzzy multi-objective technique for optimal power flow problem," *Electr. Power Syst. Res.*, 95, 206-213, 2013. doi: 10.1016/j.epsr.2012.09.002.
- [2]. K. Ayan, U. Kiliç, B. Barakli, "Chaotic artificial bee colony algorithm based solution of security and transient stability constrained optimal power flow," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 64, 136-147, 2015. doi: 10.1016/j.ijepes.2014.07.018.
- [3]. H. R. E. H. Boucekara, "Optimal power flow using black-hole-based optimization approach," *Appl. Soft Comput. J.*, 24, 879-888, 2014. doi: 10.1016/j.asoc.2014.08.056.
- [4]. H. R. E. H. Boucekara, M. A. Abido, M. Boucherma, "Optimal power flow using Teaching-Learning-Based Optimization technique," *Electr. Power Syst. Res.*, 114, 49-59, 2014. doi: 10.1016/j.epsr.2014.03.032.
- [5]. H. R. E. H. Boucekara, M. A. Abido, A. E. Chaib, R. Mehasni, "Optimal power flow using the league championship algorithm: A case study of the Algerian power system," *Energy Convers. Manag.*, 87, 58-70, 2014. doi: 10.1016/j.enconman.2014.06.088.
- [6]. H. R. E. H. Boucekara, M. A. Abido, "Optimal power flow using differential search algorithm," *Electr. Power Components Syst.*, 42, 15, 1683-1699, 2014. doi: 10.1080/15325008.2014.949912.
- [7]. A. Mukherjee, V. Mukherjee, "Solution of optimal power flow using chaotic krill herd algorithm," *Chaos, Solitons and Fractals*, 78, 10-21, 2015. doi: 10.1016/j.chaos.2015.06.020.

[8]. S. Duman, U. Güvenç, Y. Sönmez, N. Yörükeren, "Optimal power flow using gravitational search algorithm," *Energy Convers. Manag.*, 59, 86-95, 2012. doi: 10.1016/j.enconman.2012.02.024.

[9]. A. R. Bhowmik, A. K. Chakraborty, "Solution of optimal power flow using non dominated sorting multi objective opposition based gravitational search algorithm," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 64, 1237-1250, 2015. doi: 10.1016/j.ijepes.2014.09.015.

[10]. M. Ghasemi, S. Ghavidel, M. M. Ghanbarian, H. R. Massrur, M. Gharibzadeh, "Application of imperialist competitive algorithm with its modified techniques for multi-objective optimal power flow problem: A comparative study," *Inf. Sci. (Ny.)*, 281, no. June, 225-247, 2014. doi: 10.1016/j.ins.2014.05.040.

[11]. N. Daryani, M. T. Hagh, S. Teimourzadeh, "Adaptive group search optimization algorithm for multi-objective optimal power flow problem," *Appl. Soft Comput. J.*, 38, 1012-1024, 2016. doi: 10.1016/j.asoc.2015.10.057.

[12]. Z. Chen, et al., "Egret Swarm Optimization Algorithm: An Evolutionary Computation Approach for Model Free Optimization," *Biomimetics*, 7, 4, 1-10, 2022. doi: 10.3390/biomimetics7040144.

[13]. P. P. Biswas, P. N. Suganthan, G. A. J. Amaratunga, "Optimal power flow solutions incorporating stochastic wind and solar power," *Energy Convers. Manag.*, 148, 1194-1207, 2017. doi: 10.1016/j.enconman.2017.06.071.

[14]. I. U. Khan, N. Javaid, K. A. A. Gamage, C. James Taylor, S. Baig, X. Ma, "Heuristic Algorithm Based Optimal Power Flow Model Incorporating Stochastic Renewable Energy Sources," *IEEE Access*, 8, 148622-148643, 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3015473.

AUTHORS INFORMATION

**Vo Pha Ga^{1,2}, Nguyen Tran Thi My Xuan¹, Tran Huu Tinh¹,
Le Quoc Khuong¹, Diep Long¹**

¹Faculty of Electrical and Electronic Engineering, Can Tho University of Technology, Vietnam

²Research Space for New Energy Development, Can Tho University of Technology, Vietnam