

TỐI ƯU PHÂN BỐ CÔNG SUẤT TRONG HỆ THỐNG ĐIỆN SỬ DỤNG THUẬT TOÁN CÂN BẰNG

NGUYỄN NGỌC ANH, DƯƠNG THANH LONG, NGUYỄN THANH THUẬN
Khoa Công nghệ Điện, Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh
nguyennngocanh@iuh.edu.vn

Tóm tắt. Tối ưu phân bố công suất (OPF) để đạt các mục tiêu kinh tế và kỹ thuật là một trong những bài toán quan trọng trong vận hành hệ thống điện. Bài toán này đã thu hút được nhiều sự quan tâm từ các nhà nghiên cứu trong những năm gần đây. Trong bài báo này, thuật toán tối ưu hóa cân bằng (EO) được đề xuất để giải quyết bài toán tối ưu phân bố công suất (OPF), với các hàm mục tiêu khác nhau như giảm thiểu chi phí nhiên liệu, chi phí phát thải, giảm tổn thất công suất thực trên hệ thống, giảm độ lệch điện áp tại các nút tải và nâng cao độ ổn định điện áp. Phương pháp đề xuất (EO) đã được kiểm tra trên hệ thống chuẩn IEEE 30 nút và so sánh với các phương pháp tối ưu hóa bầy đàn (PSO), thuật toán tiến hóa vi phân (DE), đàn ong (ABC) và thuật toán sói sấm (GWO) đã cho thấy khả năng và độ mạnh của giải thuật trong việc giải quyết bài toán OPF.

Từ khóa: Thuật toán cân bằng (EO), tối ưu phân bố công suất (OPF), chi phí máy phát, chi phí phát thải, cải thiện điện áp tải, ổn định điện áp, tổn thất công suất

OPTIMAL POWER FLOW IN THE POWER SYSTEM USING THE EQUILIBRIUM OPTIMIZER

Abstract: Finding the optimal power flow which is achieved economic and technical aims is one of the important problems in the power system operation. This issue is attracted a lot of attention from researchers in recent years. In this paper, the Equilibrium optimizer (EO) algorithm is proposed to solve the optimal power flow (OPF) problem with various target functions such as cost reduction of fuel and emissions, minimizes power loss, minimizes voltage deviation, and improves voltage stability. The proposed EO method is tested on the standard IEEE 30 bus system and compared with the other methods as PSO, DE, ABC, and GWO that is show the ability and strength of the algorithm in solving OPF problems.

Keywords: Equilibrium optimizer algorithm, Optimal power flow (OPF), Fuel cost, Minimization of Voltage Deviation, Voltage stability enhancement, power loss.

1. GIỚI THIỆU

Tối ưu phân bố công suất (OPF) để đạt các hàm mục tiêu tối ưu khác nhau như tổng chi phí nhiên liệu, tổng tổn thất công suất, tổng chi phí phát thải, cải thiện ổn định điện áp hay nâng cao phúc lợi xã hội. v.v.. thông qua xác định các biến điều khiển tối ưu của các máy phát điện sao cho hệ thống thỏa mãn các ràng buộc đẳng thức như cân bằng công suất, cũng như thỏa mãn các ràng buộc bất đẳng thức như giới hạn công suất máy phát, giới hạn điện áp các nút, giới hạn nấc điều chỉnh đầu phân áp, giới hạn dung lượng các bộ tụ cũng như giới hạn công suất truyền tải trên các nhánh dây là một trong những bài toán phức tạp trong vận hành hệ thống điện. Nhiều công trình nghiên cứu đã đề xuất để tìm lời giải tối ưu cho bài toán (OPF). Những phương pháp tối ưu cổ điển trước đây như lập trình tuyến tính (LP) [1], lập trình phi tuyến (NLP) [2], lập trình bậc hai (QP) [3], phương pháp Newton [4],[5] và phương pháp điểm trong (IPM)[6], đã được sử dụng để giải quyết bài toán OPF. Những phương pháp này đặc trưng sử dụng thông tin độ dốc của bài toán để tìm kiếm không gian và lời giải. Nhìn chung, những phương pháp cổ điển là hệ thống lập trình toán học phức tạp, có thể tìm được lời giải hiệu quả với những không gian tìm kiếm tuyến tính. Tuy nhiên, các phương pháp đó rất dễ mắc kẹt ở tối ưu cục bộ khi không gian tìm kiếm là phi tuyến, bao gồm các bài toán không lồi. Hơn một thập kỷ trở lại đây, các nhà nghiên cứu nhìn nhận cách giải quyết bài toán ở một góc độ khác. Họ xem như bài toán cân giải quyết là một hộp đen với các biến ngẫu nhiên đầu vào. Bài toán sẽ được giải quyết bởi hộp đen thông qua các thuật toán tìm kiếm lấy cảm hứng từ tự nhiên như các hiện tượng vật lý, hành vi động vật hay các khái niệm tiến hóa để tìm ra được các biến tối ưu đầu ra. Những thuật toán

tìm kiếm điển hình như thuật toán di truyền (GA), GA thích nghi (AGA), GA nâng cao (EGA), GA được mã hóa (RCGA), lập trình (EP), EP cải tiến (IEP), tìm kiếm tabu (TS).

Tối ưu hóa dựa trên địa sinh học (BBO), đàn ong (ABC), tối ưu hóa dựa trên quá trình dạy và học (TLBO), tối ưu hóa bầy đàn (PSO), thuật toán tìm kiếm hấp dẫn (GSA) và thuật toán krill-herd (KHA), đã được áp dụng trong việc giải quyết các bài toán OPF với các hàm mục tiêu khác nhau.

Một trong những kỹ thuật tối ưu hóa gần đây dựa trên trạng thái cân bằng vật lý (EO) đã được đề xuất bởi tác giả “Faramarzi và các cộng sự”[7]. Bài báo này đã áp dụng giải thuật EO vào giải bài toán phân bố công suất tối ưu OPF với các hàm mục tiêu khác nhau: giảm thiểu chi phí nhiên liệu với hàm chi phí bậc 2 và có xét thêm các hàm chi phí không trơn và hàm chi phí tải điểm van với 2 máy phát tại G1 và G2; chi phí phát thải, tổn thất công suất thực, cải thiện ổn định điện áp. Kết quả mô phỏng được kiểm chứng trên hệ thống IEEE30-nút và so sánh với các phương pháp tối ưu PSO, GA, CSA và GWO đã cho thấy khả năng và độ mạnh của giải thuật trong việc giải quyết bài toán OPF.

2. THÀNH LẬP BÀI TOÁN OPF

Tối ưu phân bố công suất (OPF) với các hàm mục tiêu khác nhau thông qua xác định trạng thái thiết lập tối ưu của các biến điều khiển sao cho hệ thống thỏa mãn các ràng buộc về đẳng thức và bất đẳng thức có thể được trình bày như sau.

$$\begin{aligned} & \text{Min} F(x, u) \\ \text{Thỏa mãn} \quad & g(x, u) = 0 \\ & h(x, u) \leq 0 \end{aligned}$$

Trong đó $g(x, u)$ và $h(x, u)$ thể hiện cho các hàm ràng buộc đẳng thức và bất đẳng thức, x, u tương ứng là tập hợp các biến điều khiển và biến trạng thái

2.1. Các hàm mục tiêu của bài toán OPF

Trong bài báo này các hàm mục tiêu của bài toán OPF được xem xét bao gồm:

- Tổng chi phí máy phát với chi phí nhiên liệu là hàm bậc hai
- Tổng chi phí máy phát với chi phí nhiên liệu là hàm bậc hai theo từng mảng
- Chi phí phát thải
- Tổn hao truyền tải
- Giảm chi phí máy phát với chi phí nhiên liệu là hàm bậc hai và cải thiện độ lệch điện áp
- Giảm chi phí máy phát với chi phí nhiên liệu là hàm bậc hai và ổn định điện áp

2.1.1. Chi phí máy phát.

Tổng chi phí nhiên liệu của máy phát điện với hai loại đường cong chi phí nhiên liệu khác nhau được xem xét theo [8] với các hệ số được đưa ra trong các bảng [A2-A3]:

$$F_{obj} = \sum_{i=1}^{N_g} (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2) \quad (\$/h) \quad (1)$$

- Tổng chi phí máy phát với chi phí nhiên liệu là hàm bậc hai

$$F_1 = F_{obj} \quad \text{Với các hệ số chi phí máy phát } a_i, b_i, c_i \text{ được cho trong bảng B1}$$

- Tổng chi phí máy phát với chi phí nhiên liệu là hàm bậc hai theo từng mảng

$$F_2 = F_{obj} \quad \text{Với các hệ số chi phí máy phát } a_i, b_i, c_i \text{ được cho trong bảng B1, B2}$$

2.1.2. Chi phí phát thải

Khí thải của các nhà máy phát điện gây ô nhiễm cho môi trường, gây ảnh hưởng trực tiếp tới con người. Trong bài báo này hàm chi phí phát thải do 2 dạng khí thải SO_2 phát sinh từ hàm lượng lưu huỳnh trong than, và NO_x phát sinh từ Nitrogen trong không khí và trong nhiên liệu khi cháy ở nhiệt độ cao được [9] xây dựng như sau:

$$F_3 = \sum_{i=1}^{N_g} (\alpha_i + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i P_{Gi}^2 + \xi_i \exp(\lambda_i P_{Gi})) \quad \text{tấn/h} \quad (2)$$

Trong đó $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \xi_i, \lambda_i$ là các hệ số phát thải của máy phát thứ i

2.1.3. Tổn hao truyền tải

Tổn thất công suất thực trên đường dây truyền tải và được biểu diễn như sau:

$$F_4 = \sum_{i=1}^{N_g} P_{Gi} - \sum_{j=1}^{N_l} P_{Dj} \quad (3)$$

Ở đây P_{Gi} và P_{Dj} tương ứng là công suất thực tại nút máy phát i và nút tải j . N_g, N_l lần lượt là tổng nút máy phát và tổng nút tải

2.1.4. Cực tiểu độ lệch điện áp

Sự chênh lệch điện áp tại các nút tải là một chỉ số đánh giá về mặt chất lượng điện năng, được [10] đưa ra, độ lệch điện áp tại các nút tải được xem xét với hàm mục tiêu như sau:

$$F_V = \sum_{i=1}^{N_l} |V_{Li} - V_{ref}| \quad (4)$$

$$F_5 = F_1 + w1F_V \quad (5)$$

$w1$ là trọng số trong hàm tối ưu đa mục tiêu này – ($w1=100$)

2.1.5. Cải thiện ổn định điện áp.

Công suất tải có xu thế thay đổi liên tục, tình trạng này dẫn đến không kiểm soát được, thậm chí dẫn đến sụp đổ điện áp. Thông thường chỉ số L có giá trị trong khoảng $[0,1]$. Khi $L=0$ cho biết tất cả các tải trong hệ thống đang hoạt động ổn định nhưng khi $L=1$ thì hệ thống đang bị nhiễu loạn mất ổn định và sự sụp đổ điện áp sẽ sớm xảy ra như trong bài báo [11] trình bày. Do đó việc cải thiện ổn định điện áp bằng việc giảm thiểu chỉ số L là rất quan trọng. Mục tiêu của L có thể được thành lập như sau

Xem xét một hệ thống có N_b nút trong đó có N_g máy phát, mối liên hệ giữa dòng điện và điện áp được biểu thị như sau:

$$\begin{bmatrix} I_G \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{GG} & Y_{GL} \\ Y_{LG} & Y_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_G \\ V_L \end{bmatrix} \quad (6)$$

I_G, V_G và I_L, V_L là dòng điện và điện áp tại các nút máy phát và tải

Xếp xếp lại hệ phương trình ta thu được:

$$\begin{bmatrix} V_L \\ I_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{LL} & F_{LG} \\ K_{GL} & Y_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_G \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\text{ở đây } F_{LG} = -[Y_{LL}]^{-1}[Y_{LG}]$$

Khi đó chỉ số L tại nút thứ j được xác định bởi

$$L_j = \left| 1 - \sum_{i=1}^{N_g} F_{ji} \frac{V_i}{V_j} \angle(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \right| \quad j = 1, 2, \dots, N_{PQ} \quad (8)$$

Trong đó $V_i, V_j, \delta_i, \delta_j$ là cường độ điện áp và góc pha điện áp tại nút máy phát i và j , θ_{ij} là góc pha của F_{ji} . N_{PQ} là số máy phát PQ. Do đó ổn định điện áp bằng cách giảm thiểu chỉ số L được xác định hàm mục tiêu sau:

$$F_L = \max(L_j) \quad (9)$$

$$F_6 = F_1 + w2 F_L$$

$w2$ là trọng số trong hàm tối ưu đa mục tiêu – ($w2 = 6000$)

2.2 Điều kiện ràng buộc

2.2.1 Ràng buộc đẳng thức

Ràng buộc về cân bằng công suất: tổng công suất thực và công suất phản kháng tại một nút bất kỳ bằng không

$$P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j=1}^{N_b} |V_j| (G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N_b \quad (10)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - V_i \sum_{j=1}^{N_b} |V_j| (G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N_b \quad (11)$$

Với N_b là tổng số nút của hệ thống. P_{Gi} và Q_{Gi} là công suất thực và công suất phản kháng của nút máy phát thứ i ; P_{Di} và Q_{Di} là công suất thực và công suất phản kháng tại nút tải i ; G_{ij} và B_{ij} lần lượt là phần thực và phần ảo của phần tử thứ “ i ” trong ma trận tổng dẫn; V_i , δ_i và V_j , δ_j lần lượt là biên độ và góc pha điện áp tại nút “ i ” và “ j ”;

2.2.2 Ràng buộc bất đẳng thức

- Giới hạn công suất các máy phát

$$P_{Gi,min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,max} \quad , i = 1, 2, \dots, N_g \quad (12)$$

$$Q_{Gi,min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,max} \quad , i = 1, 2, \dots, N_g \quad (13)$$

- Giới hạn điện áp tại các nút

$$V_{Gi,min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi,max} \quad , i = 1, 2, \dots, N_g \quad (14)$$

$$V_{Li,min} \leq V_{Li} \leq V_{Li,max} \quad , i = 1, 2, \dots, N_l \quad (15)$$

- Giới hạn dung lượng các bộ tụ bù

$$Q_{Ci,min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci,max} \quad , i = 1, 2, \dots, N_c \quad (16)$$

- Giới hạn nấc phân áp của máy biến áp

$$T_{k,min} \leq T_k \leq T_{k,max} \quad , k = 1, 2, \dots, N_T \quad (17)$$

- Giới hạn đường dây truyền tải

$$S_l \leq S_{l,max} \quad , l = 1, 2, \dots, N_l \quad (18)$$

3. THUẬT TOÁN CÂN BẰNG EO

3.1 Thuật toán cân bằng EO

Thuật toán cân bằng EO là một thuật toán tối ưu hóa được lấy cảm hứng từ cân bằng một khối hỗn độn đơn giản trên một khối điều khiển được sử dụng để ước tính cả trạng thái động và trạng thái cân bằng. Trong EO, mỗi hạt (dung dịch) với nồng độ (vị trí) nó hoạt động như một tác nhân tìm kiếm. Cơ chế của các tác nhân tìm kiếm được cập nhật ngẫu nhiên dựa vào các ứng cử viên cân bằng để cuối cùng đạt được trạng thái cân bằng và xem đó là giải pháp khả thi cho bài toán tối ưu hóa. Quá trình thực hiện giải pháp (EO) cho bài toán tối ưu hóa có thể được trình bày tóm tắt như sau.

Một phương trình vi phân bậc nhất biểu thị cho sự cân bằng khối lượng trong một khối điều khiển mà có sự thay đổi khối lượng theo thời gian với khối lượng vào và ra là bằng nhau được mô tả bằng phương trình cân bằng sau:

$$E = QC_{equ} - QC + G \quad (19)$$

Trong đó C nồng độ bên trong khối điều khiển E , E là tốc độ thay đổi khối lượng trong khối điều khiển, Q là tốc độ lưu lượng thể tích vào và ra khỏi khối điều khiển, C_{equ} đại diện cho nồng độ ở trạng thái cân bằng mà không có sự tạo ra bên trong thể tích khối điều khiển, G là khối lượng thể hệ bên trong khối điều khiển. Các bước cơ bản của thuật toán EO được thực hiện qua các bước sau:

• Khởi tạo

EO sử dụng tập hợp ban đầu để bắt đầu quá trình tối ưu hóa. Các nồng độ ban đầu được xây dựng dựa trên số lượng hạt và kích thước với sự khởi tạo ngẫu nhiên đồng nhất trong không gian tìm kiếm như [19]

$$C_n^{initial} = C_{min} + R_n (C_{max} - C_{min}) \quad n = 1, 2, \dots, N_b \quad (20)$$

$C_n^{initial}$ là vecto nồng độ ban đầu của hạt thứ n , và C_{max} , C_{min} là giới hạn của nồng độ, R_n là giá trị ngẫu nhiên trong khoảng $[0, 1]$ và N_b là số lượng hạt như một tập hợp. Các hạt được đánh giá về chức năng hàm mục tiêu của chúng và sau đó được sắp xếp để xác định các ứng viên cân bằng. Nồng độ được cập nhật ngẫu nhiên để phù hợp với các giải pháp được gọi là ứng viên cân bằng.

• Nhóm cân bằng

Nhóm cân bằng được định nghĩa là những dung dịch có nồng độ tốt nhất được lựa chọn kết hợp với giá trị trung bình cộng của nồng độ các dung dịch đó

$$C_{equ.pool} = \{ C_{equ} 1, C_{equ} 2, C_{equ} 3, C_{equ} 4, C_{equ} avg \} \quad (21)$$

Để cập nhật lại nhóm cân bằng mới trong (EO) thì hai thuật ngữ hàm mũ (F) và tỷ lệ tạo (G) được xem xét

• Hàm mũ F:

$$F = e^{-\lambda(t-t_0)} \quad (22)$$

Trong đó thời gian được định nghĩa như một hàm thay đổi của sự lặp lại (Iter) và số lần lặp tối đa (Max_iter), λ có giá trị trong khoảng $[0, 1]$.

$$t = \left(1 - \frac{Iter}{Max_iter}\right)^{\left(a_2 \frac{Iter}{Max_iter}\right)} \quad (23)$$

$$t_0 = \frac{1}{\lambda} \ln(-a_1 \text{sign}(r - 0.5)[1 - e^{-\lambda t}]) + t \quad (24)$$

a_1, a_2 là hai thông số quản lý khả năng khám phá và khả năng khai thác của giải thuật

• Tỷ lệ tạo G:

Là một trong những thuật ngữ quan trọng nhất trong thuật toán được đề xuất để cung cấp giải pháp chính xác bằng cách cải thiện giai đoạn khai thác.

$$G = G_0 e^{[-\lambda(t-t_0)]} = G_0 F \quad (25)$$

Với G_0 là giá trị ban đầu được xác định như sau:

$$G_0 = GCP (C_{eq} - \lambda C) \quad (26)$$

$$GCP = \begin{cases} 0.5r_1 & r_2 \geq GP \\ 0 & r_2 < GP \end{cases} \quad (27)$$

Trong đó r_1, r_2 là các giá trị ngẫu nhiên có giá trị trong khoảng $[0, 1]$, GP là thông số quan trọng trong việc điều chỉnh khả năng khám phá hay khai thác của giải thuật $GP = [0, 1]$. $GP=1$, giải thuật chỉ có khả năng khám phá, dẫn đến giải thuật khó tìm kiếm được tối ưu toàn cầu. ngược lại với $GP=0$, giải thuật chỉ có khả năng khai thác điều này dễ dẫn đến tìm kiếm tối ưu cục bộ. Do đó để cân bằng giữa khả năng khám phá và khai thác thì giá trị GP được chọn là 0.5.

Cuối cùng việc cập nhật lại trạng thái cân bằng của giải thuật (EO) sẽ như sau

$$C = C_{eq} + (C_0 - C_{eq})F + \frac{G}{\lambda V} (1 - F) \quad (28)$$

V: được xem như là chỉ số đơn vị và thông thường chọn $V=1$.

3.2. Áp dụng thuật toán EO vào bài toán OPF

Để áp dụng thuật toán EO để giải bài toán OPF, mỗi vị trí cá thể thể hiện các biến điều khiển được xác định như sau:

$$X_{id} = [P_{G2}, \dots, P_{GN_G}, V_{G1}, \dots, V_{GN_G}, T_1, \dots, T_{N_T}, Q_{c1}, \dots, Q_{cN_C}] \quad d = 1, \dots, N_p \quad (29)$$

Trong đó X_d là hạt thứ d và N_p là số hạt

Giá trị ban đầu X_{id} được khởi động như sau:

$$X_{id}^{(0)} = X_{id}^{min} + rand * (X_{id}^{max} - X_{id}^{min}) \quad (30)$$

Ở đây X_{idmax} và X_{idmin} giới hạn trên và dưới của từng hạt d , và $rand_i$ là giá trị ngẫu nhiên từ $[0,1]$.

Hàm mục tiêu cần được cực tiểu trong OPF dựa trên hàm mục tiêu của bài toán và các biến phụ thuộc bao gồm công suất phát thực tại nút cân bằng, công suất phản kháng tại nút máy phát, điện áp tại nút tải, công suất biểu kiến của đường dây truyền tải, hàm mục tiêu được tích hợp trong hàm đánh giá như sau:

$$FT = f(x, u) + K_p * (P_{g1} - P_{g1}^{lim})^2 + K_q \sum_{i=1}^{N_g} (Q_{gi} - Q_{gi}^{lim})^2 \\ + K_v \sum_{i=1}^{N_d} (V_{gi} - V_{gi}^{lim})^2 + K_s \sum_{i=1}^{N_l} (S_{li} - S_{li}^{max})^2 \quad (31)$$

Trong đó K_p, K_q, K_v và K_s lần lượt là hệ số phạt của công suất thực nút cân bằng, công suất phản kháng máy phát, điện áp tải và công suất truyền tải. $f(x, u)$ tương đương với các hàm mục tiêu từ F_1 tới F_6

Các bước áp dụng thuật toán EO giải bài toán OPF như sau:

Bước 1: Cài đặt các thông số điều khiển của EO bao gồm

Số lượng hạt N_p , Số lần lặp tối đa $Itmax$, hệ số kiểm soát số lượng thăm dò, khai thác a_1 và a_2 , Xác suất thể hệ GP ($[0, 1]$), hệ số phạt K_p, K_q, K_v, K_s cho các ràng buộc.

Bước 2: Khởi tạo một quần thể có N_p cá thể ban đầu trong đó mỗi cá thể chứa vector của các biến điều khiển theo công thức (29), (30)

Bước 3: Khởi tạo nhóm cân bằng ban đầu như sau:

$$\begin{aligned} X_{equ1} &= \text{zeros}(1, dim); & FT1 &= inf; \\ X_{equ2} &= \text{zeros}(1, dim); & FT2 &= inf; \\ X_{equ3} &= \text{zeros}(1, dim); & FT3 &= inf; \end{aligned}$$

$X_{equ\ 4} = \text{zeros}(1, dim); \quad FT4 = inf;$
 $X_{equ\ avg} = (X_{equ\ 1} + X_{equ\ 2} + X_{equ\ 3} + X_{equ\ 4})/4;$
 $X_{equ.pool} = \{X_{equ\ 1}, X_{equ\ 2}, X_{equ\ 3}, X_{equ4}, X_{equ\ avg}\}$

Trong đó “dim” là độ dài của biên điều khiển, “inf” được định nghĩa là số vô cùng lớn

Bước 4: Tính giá trị của hàm mục tiêu FT thông qua giải bài toán phân bố công suất cho từng hạt theo công thức (31)

Bước 5: Tính toán tạo ra các trạng thái hạt mới

Tính toán tạo ra các trạng thái hạt mới theo các công thức (22), (23),... (28)

Bước 6: Kiểm tra giới hạn và cập nhật lại các hạt mới được tạo ra theo công thức (32)

$$X_{id}^{(n)} = \begin{cases} X_{id}^{max} & \text{if } X_{id}^{(n)} > X_{id}^{max} \\ X_{id}^{min} & \text{if } X_{id}^{(n)} < X_{id}^{min} \\ X_{id}^{(n)} & \text{Trường hợp còn lại} \end{cases} \quad (32)$$

Bước 7: Kiểm tra điều kiện dừng

Nếu $n < Itmax$, tăng số vòng lặp $n = n + 1$ và quay lại bước 4, ngược lại thì dừng thuật toán và xuất kết quả.

4. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN

4.1. Hệ thống điện chuẩn IEEE-30 nút

Thuật toán được áp dụng tính toán trên mạng điện chuẩn IEEE 30 nút [12], gồm 6 nút máy phát, 24 nút tải và 41 nhánh. Các máy phát được nối vào các nút 1, 2, 5, 8, 11 và 13 với 4 máy biến áp nằm ở các nhánh 6-9, 6-10, 4-12 và 27-28. Hệ thống có các dây tụ nằm ở các nút 10, 12, 15, 17, 20, 21, 23, 24, và 29. Số biến điều khiển của hệ thống là 24 bao gồm điện áp ở 6 nút máy phát, chỉnh nấc của 4 máy biến áp và công suất phản kháng ở 9 dây tụ. Thông số mạng điện IEEE 30 nút, hệ số chi phí nhiên liệu, giới hạn công suất các máy phát cũng như giới hạn công suất trên đường dây có thể tìm thấy trong các Bảng B1, Bảng B2, Bảng B3 và Bảng B4. Ngoài ra điện áp các nút máy phát có giới hạn trong khoảng [0.95, 1.1] pu. Điện áp tại các nút tải có giới hạn trong khoảng [0.95, 1.05] pu

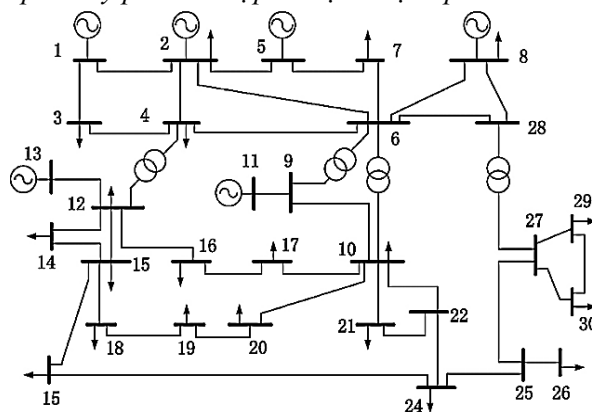
Với mức độ phức tạp của bài toán (OPF) và sau rất nhiều lần thử nghiệm để tìm được lời giải chấp nhận được với thời gian chạy mô phỏng nhỏ chúng tôi lựa chọn bộ thông số cài đặt của thuật toán EO cho hệ thống này với tất cả các hàm mục tiêu như sau :

Số lượng cá thể ban đầu $N_p = 20$, số lần lặp tối đa $ITmax = 500$, các hệ số $a1 = 2$, $a2 = 1$ và giá trị hàm phạt là như nhau với tất cả các biến trạng thái $K_q = K_v = K_s = 10^{10}$, $C_p = 0,5$

4.2 Kết quả các hàm mục tiêu

Kết quả tính toán từ phương pháp EO cho hệ thống IEEE 30 nút với hàm mục tiêu khác nhau được đưa ra trong Bảng 1

- Trường hợp 1 : *Cực tiểu chi phí máy phát với hệ số chi phí là hàm bậc hai*
- Trường hợp 2 : *Cực tiểu chi phí máy phát với hệ số chi phí là hàm bậc hai từng mảng*
- Trường hợp 3 : *Giảm thiểu chi phí phát thải*
- Trường hợp 4 : *Giảm tổn thất công suất thực*
- Trường hợp 5 : *Cực tiểu chi phí máy phát kết hợp ổn định điện áp nút tải*
- Trường hợp 6 : *Cực tiểu chi phí máy phát kết hợp ổn định điện áp*



Hình 1. Sơ đồ hệ thống điện IEEE 30 nút

Bảng 1. Thông số các biến điều khiển tốt nhất được tìm thấy từ giải thuật EO với các hàm mục tiêu khác nhau

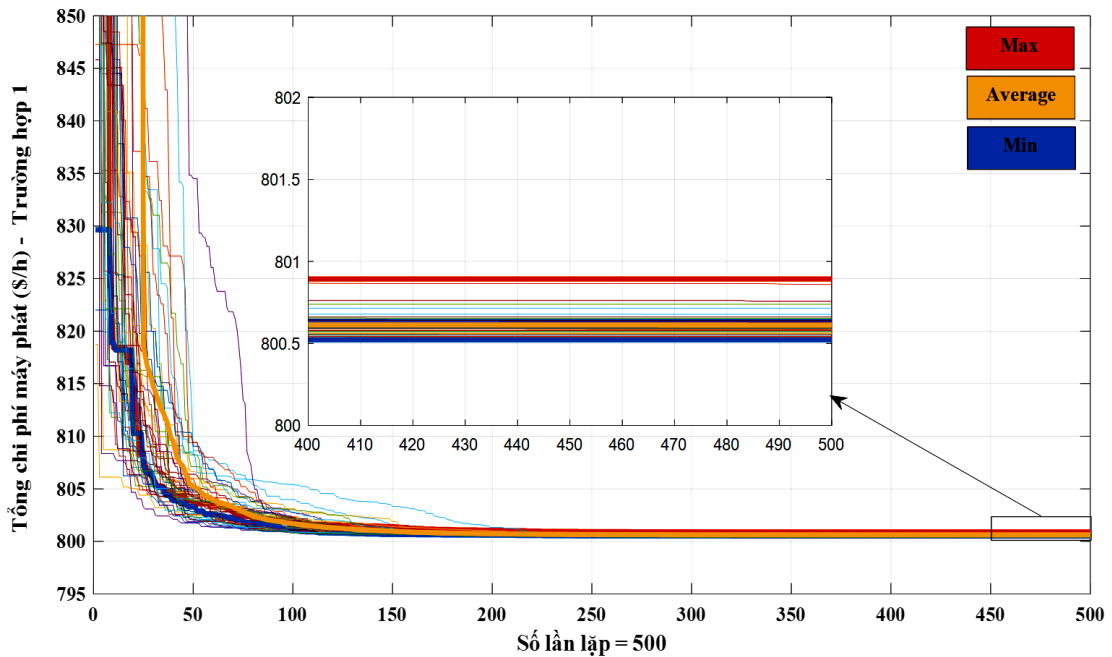
Biến trạng thái (u)	Trường hợp 1	Trường hợp 2	Trường hợp 3	Trường hợp 4	Trường hợp 5	Trường hợp 6
P2(MW)	48.6250	54.9957	67.5551	80.0000	48.8166	48.7411
P5(MW)	21.3637	24.6692	50.0000	49.9998	21.5962	20.9954
P8(MW)	21.2797	34.9021	35.0000	34.9995	22.2695	21.8743
P11(MW)	12.0227	18.5209	30.0000	30.0000	12.4716	11.3202
P13(MW)	12.0000	17.2629	40.0000	40.0000	12.0004	12.1026
V1 (p.u)	1.0837	1.0724	1.0627	1.0619	1.0430	1.0808
V2 (p.u)	1.0640	1.0570	1.0564	1.0578	1.0253	1.0624
V5 (p.u)	1.0315	1.0230	1.0370	1.0385	1.0118	1.0361
V8 (p.u)	1.0371	1.0404	1.0435	1.0449	1.0065	1.0463
V11(p.u)	1.0999	1.0855	1.0863	1.0784	1.0545	1.0996
V13(p.u)	1.0448	1.0973	1.0547	1.0517	0.9878	1.0606
T11(p.u)	1.0939	1.0087	1.0799	1.0837	1.0767	1.0332
T12(p.u)	0.9000	0.9022	0.9001	0.9100	0.9000	0.9041
T15(p.u)	0.9757	1.0335	1.0007	0.9939	0.9386	0.9773
T36(p.u)	0.9725	0.9543	0.9767	0.9771	0.9710	0.9596
QC10(MVAr)	2.6927	-	0.0016	4.1207	4.9483	0.0584
QC12(MVAr)	4.8884	-	4.7952	4.6747	0.0031	0.8889
QC15(MVAr)	3.8565	-	5.0000	3.5051	4.9839	0.9494
QC17(MVAr)	4.9918	-	4.9690	4.9992	0.0579	0.2721
QC20(MVAr)	3.6434	-	3.7332	4.0835	5.0000	0.0287
QC21(MVAr)	4.9998	-	4.9661	4.9933	4.9508	0.0566
QC23(MVAr)	3.1230	-	2.4263	3.1600	5.0000	1.5007
QC24(MVAr)	4.9955	-	4.9967	4.9964	4.9989	4.3108
QC29(MVAr)	2.3705	-	2.3589	2.3136	2.7592	0.1816
Fuel Cost (\$/h)	800.5222	647.4169	944.3617	967.6638	803.6827	801.0260
Emissions	0.3662	0.2835	0.2048	0.2073	0.3630	0.3676
PLoss(pu)	9.0297	6.9507	3.2355	3.1013	9.8228	9.2069
F _v	0.9072	0.7585	0.8835	0.8905	0.0965	0.8490
F _L	0.1380	0.1379	0.1387	0.1386	0.1490	0.1370

4.2.1 Trường hợp 1: Cực tiểu chi phí máy phát với hệ số chi phí là hàm bậc hai

Cực tiểu chi phí máy phát là một mục tiêu quan trọng bậc nhất trong bài toán OPF đó đó mục tiêu đầu tiên chúng tôi lựa chọn để thử nghiệm giải thuật EO là tiêu cực tiểu chi phí máy phát được định nghĩa trong (1) ở đây tất cả các đặc tính nhiều liêu được biểu diễn dưới dạng bậc 2 được so sánh với các phương pháp khác nhau được cho trong bảng 2

Bảng 2: So sánh kết quả cho mạng IEEE 30 nút với hàm mục tiêu cực tiểu chi phí máy phát, hàm chi phí nhiên liệu bậc 2 (Trường hợp1)

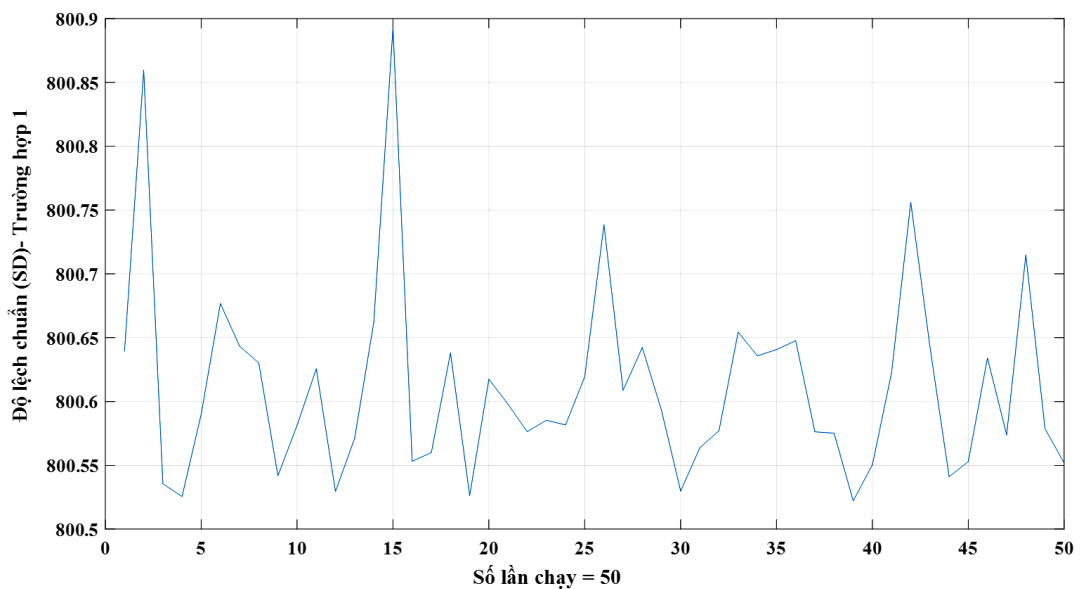
Thuật toán	Hàm chi phí bậc hai			Độ lệch chuẩn SD	Số lần chạy	Số cá thể ban đầu N _p	Số lần lặp tối đa
	Min	Average	Max				
MDE [13]	802.376	802.382	802.404	0.040	-	18	160
MSFLA [14]	802.287	802.4138	802.5087	-	-	10	100
LDI-PSO [9]	800.7398	801.5576	803.8698	-	-	-	-
ABC [9]	800.66	800.8715	801.1851	-	20	50	200
GWO [15]	801.413	801.655	801.958	0.1129	50	8-12	300
DE [15]	801.231	801.282	801.622	0.0663	50	7-11	300
BBO [16]	799.1116	799.1985	799.2042	-	50	50	200
EGADQLF [17]	799.56	-	-	-	20	200	-
EADDE [18]	800.2041	800.2412	800.2784	-	20	50	250
GSA [19]	798.6751	798.9131	799.0284	-	50	-	200
MSCA [20]	799.31	-	-	-	-	200-30	500
EO	800.5222	800.6117	800.8931	0.0768	50	20	500



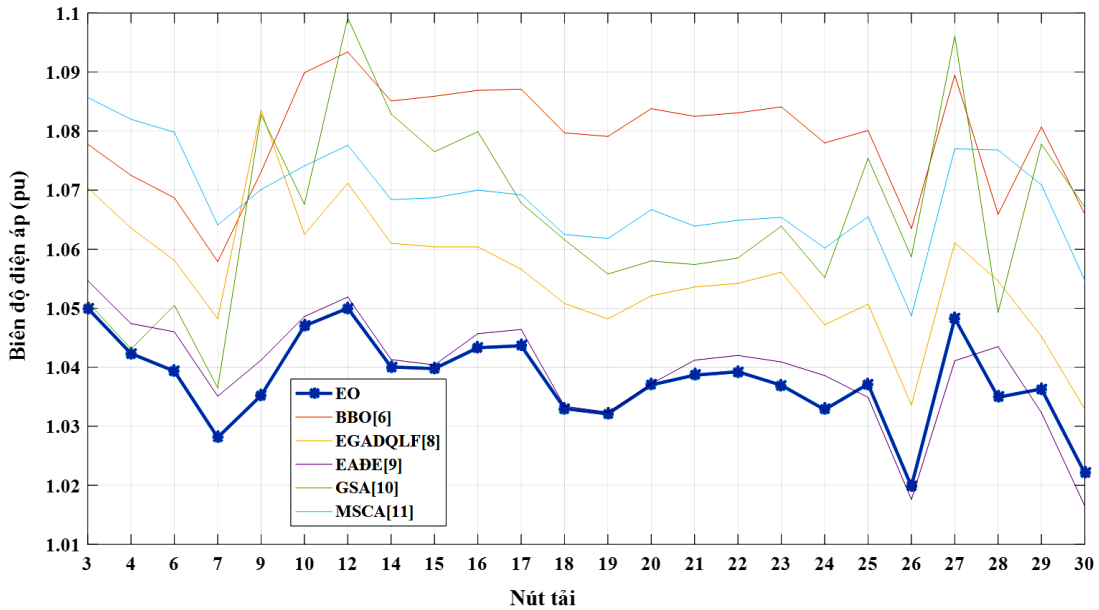
Hình 2. Tốc độ hội tụ của giải thuật EO trong trường hợp 1 với 50 lần chạy

Bảng 2 cho thấy kết quả tổng chi phí nhiên liệu tối thiểu thu được từ giải thuật EO là 800.5222(\$/h) với giá trị trung bình 800.6117 (\$/h) và giá trị tối đa 800.8931 (\$/h). Từ kết quả này cho thấy rằng, giá trị tối ưu của phương pháp EO tốt hơn một số giải thuật khác như MDE [13], MSFLA [14], LDI-PSO [9], ABC [9], GWO [15], DE [15]. Từ hình 2 và bảng 2, có thể thấy rằng giải thuật EO cũng là một trong giải thuật có khả năng hội tụ cao và độ lệch chuẩn thấp so với các giải thuật khác.

Hình 3 trình bày độ lệch chuẩn của giải thuật EO trong 50 lần chạy cho trường hợp 1 với khả năng ổn định cao khi giá trị tối đa chỉ là 800.8931 (\$/h).



Hình 3. Độ lệch chuẩn của giải thuật EO trong trường hợp 1 với 50 lần chạy



Hình 4. Biên độ điện áp của giải thuật EO và các giải thuật khác trong trường hợp 1

Từ bảng 2 cũng có thể thấy rằng, giá trị tối ưu của giải thuật EO cao hơn một tí so với các giải thuật đã công bố BBO [16], AGAPOP [10], EGA-DQLF [17], EADDE [18], GSA [19], MSCA [20]. Tuy nhiên, với giá trị tối ưu của các giải thuật BBO [16], AGAPOP [10], EGA-DQLF [17], EADDE [18], GSA [19], MSCA [20] thì một số ràng buộc về giới hạn điện áp, giới hạn công suất phản kháng và công suất trên các nhánh dây đã chạm tới giới hạn định mức của các thông số đó như ta thấy trong bảng phụ lục BảngA1 và hình 4.

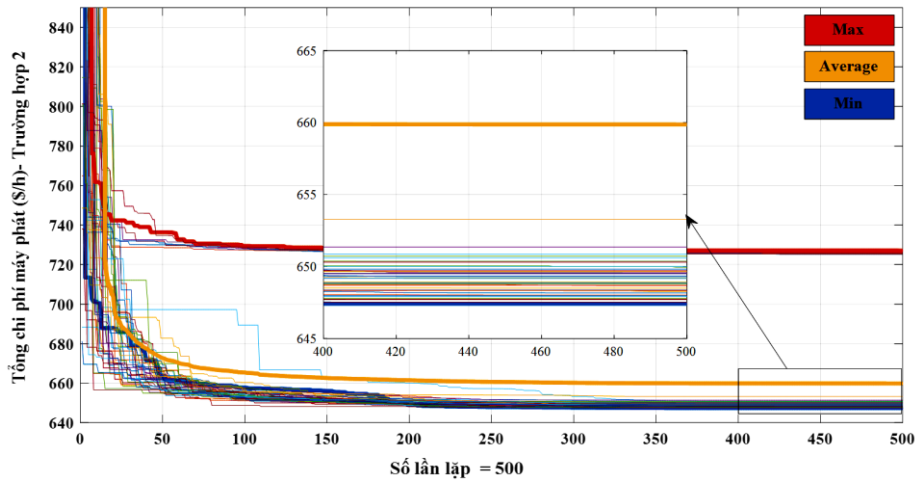
4.2.2 Trường hợp2: Cực tiểu chi phí máy phát với hệ số chi phí là hàm bậc hai từng mảng

Hàm mục tiêu được chọn là cực tiểu chi phí máy phát được định nghĩa trong (1). Ở trường hợp này các hàm chi phí nhiên liệu tại nút 1 và 2 theo từng phần được mô tả trong bảng phụ lục B2. Và để có sự so sánh công bằng với các phương pháp khác thì trong trường hợp này chúng tôi cũng sẽ không xét tới có sự tham gia của các bộ tụ VAR tại các nút 10, 12, 15, 17, 20, 21, 23, 24, và 29

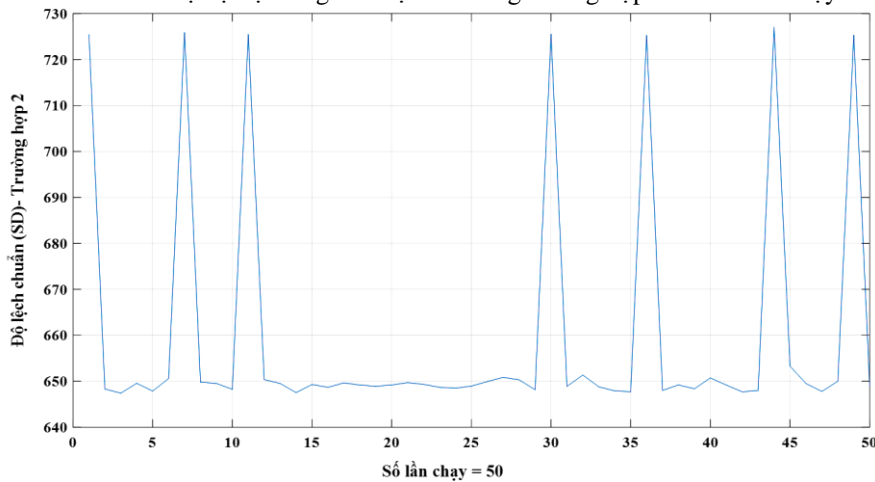
Từ bảng 3 cho thấy giải pháp EO đưa ra đạt kết quả tối ưu toàn cục là 647.4169 (\$/h) tốt hơn một số giải thuật khác như DE [21], AGA-POP [10], MDE [13], BBO [16], PSO [22], SCA [20], ABC [9]. Tuy nhiên xét độ ổn định của EO sau 50 lần lặp thì độ lệch chuẩn SD đạt được là 26,851 cao hơn rất nhiều như so với MDE [13], và so với SD chỉ là 0.44. Trong trường hợp này dễ dàng nhận thấy từ Hình 5 giải thuật EO bị mắc kẹt 7 lần trong vùng tối ưu cục bộ và quan sát kỹ ta sẽ thấy nếu EO có thể thoát ra khỏi tối ưu cục bộ đó thì EO dễ dàng chuyển sang vùng tối ưu toàn cục. Điều đó được quan sát rõ hơn trong hình 6.

Bảng 3. So sánh kết quả cho mạng IEEE 30 nút với hàm mục tiêu cực tiểu chi phí máy phát, hàm chi phí nhiên liệu bậc 2 từng mảng (Trường hợp2)

Thuật toán	Hàm chi phí bậc hai theo từng mảng			Độ lệch chuẩn SD
	Min	Average	Max	
DE [21]	650.8224	NA	NA	-
AGA-POP [10]	654.5391	NA	NA	-
MDE [13]	647.846	648.356	650.664	0.44
BBO [16]	647.7437	647.7645	647.7928	-
PSO [22]	647.69	647.73	647.87	-
GSA [19]	646.848066	646.896273	646.938163	-
SCA [20]	648.1366	NA	NA	-
MSCA [20]	646.36	NA	NA	-
ABC [9]	649.0855	654.0784	659.7708	-
EO	647.4169	659.8680	727.0140	26.8510



Hình 5. Tốc độ hội tụ của giải thuật EO trong trường hợp 2 với 50 lần chạy

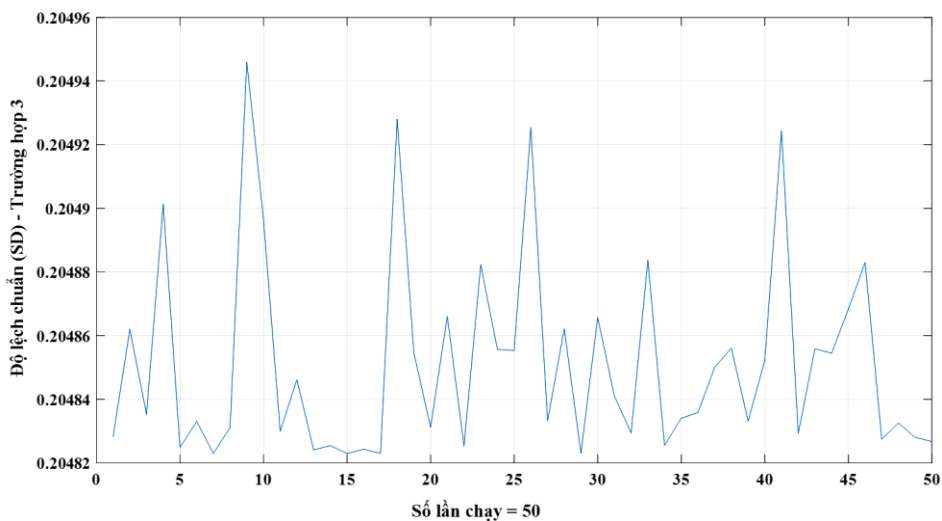


Hình 6. Độ lệch chuẩn của giải thuật EO trong trường hợp 2 với 50 lần chạy

Qua đó cho thấy để tìm kiếm giải pháp ổn định cho các bài toán có hàm mục tiêu không phải hàm lồi thì EO không phải là một giải pháp tốt.

4.2.3 Trường hợp 3: Giảm thiểu chi phí phát thải

Với mục tiêu giảm thiểu chi phí phát thải đã được trình bày ở trên với hàm mục tiêu là công thức (2) thì giải thuật EO thu được kết quả tối thiểu 0.2048 (tấn/h) thấp hơn các giải pháp được so sánh như ta thấy trong bảng 4



Hình 7. Độ lệch chuẩn của giải thuật EO trong trường hợp 3 với 50 lần chạy

Mặt khác với tiêu chí đánh giá độ ổn định thì trong trường hợp này giải thuật EO cho thấy độ ổn định cao với chỉ số SD = 3.1423e-05 như trong bảng 4 và hình 7

Bảng 4: So sánh kết quả cho mạng IEEE 30 nút với hàm mục tiêu giảm thiểu chi phí phát thải (Trường hợp 3)

Thuật toán	Chi phí phát thải			Độ lệch chuẩn SD
	Min	Average	Max	
ABC [9]	0.204826	-	-	
MSFLA [14]	0.2056	-	-	
SFLA [14]	0.2063	-	-	
GA [14]	0.21170	-	-	
PSO [14]	0.2096	-	-	
EO	0.2048	0.2049	0.2049	3.1423e-05

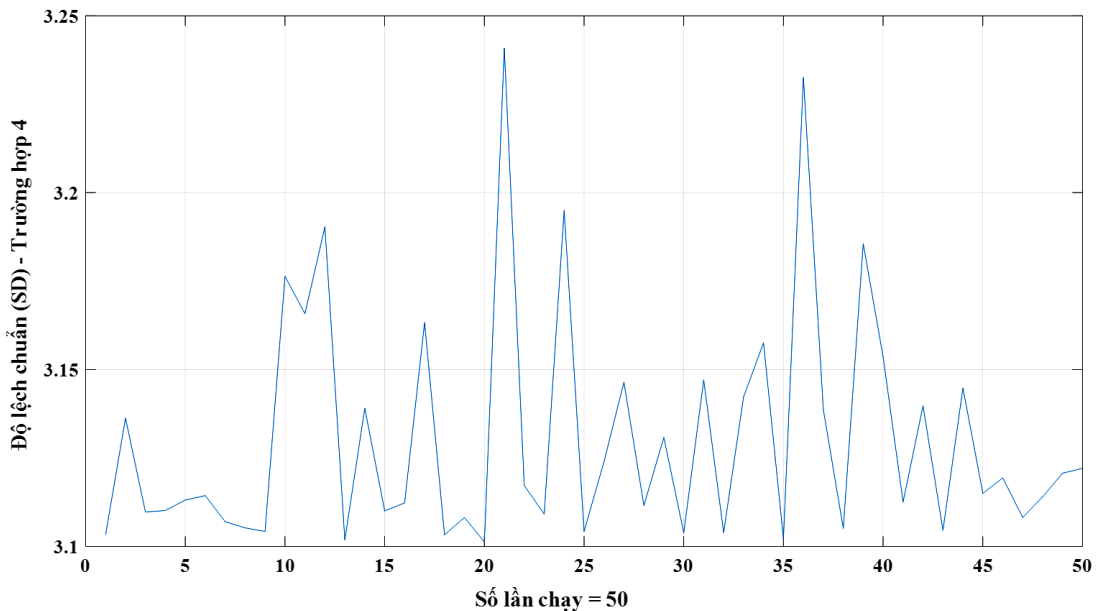
4.2.4 Trường hợp 4: Giảm tổn thất công suất công suất thực

Kết quả tính toán từ phương pháp EO cho hệ thống IEEE 30 nút với hàm mục tiêu là giảm tổn thất công suất được so sánh với kết quả từ các phương pháp khác như trong Bảng 5.

Bảng 5. So sánh kết quả cho mạng IEEE 30 nút với hàm mục tiêu giảm tổn thất công suất (Trường hợp 4)

Thuật toán	Tổn thất công suất thực			Độ lệch chuẩn SD
	Min	Average	Max	
ABC [9]	3.1078	-	-	
EGA-DQLF [17]	3.2008	-	-	
MSCA [20]	2.9334	-	-	
PSO [22]	3.6294	-	-	
Jaya [23]	3.1035	-	-	
EO	3.1013	3.1306	3.2408	0.0334

Từ kết quả ở bảng 5 cho thấy rằng giải thuật EO cho kết quả tương đối tốt khi đạt giá trị tối thiểu 3.1013 (MW), tốt hơn một số báo cáo khác như ABC [9] là 3.1078 (MW), EGA-DQLF [17] là 3.2008 (MW), PSO [22] là 3.6294 (MW) hay Jaya [23] là 3.1035 (MW), nhưng lại kém hơn MSCA [20] với cực tiểu là 2.9334(MW). Tuy nhiên với độ lệch chuẩn với 50 lần chạy độc lập tương đối thấp SD=0.0334,



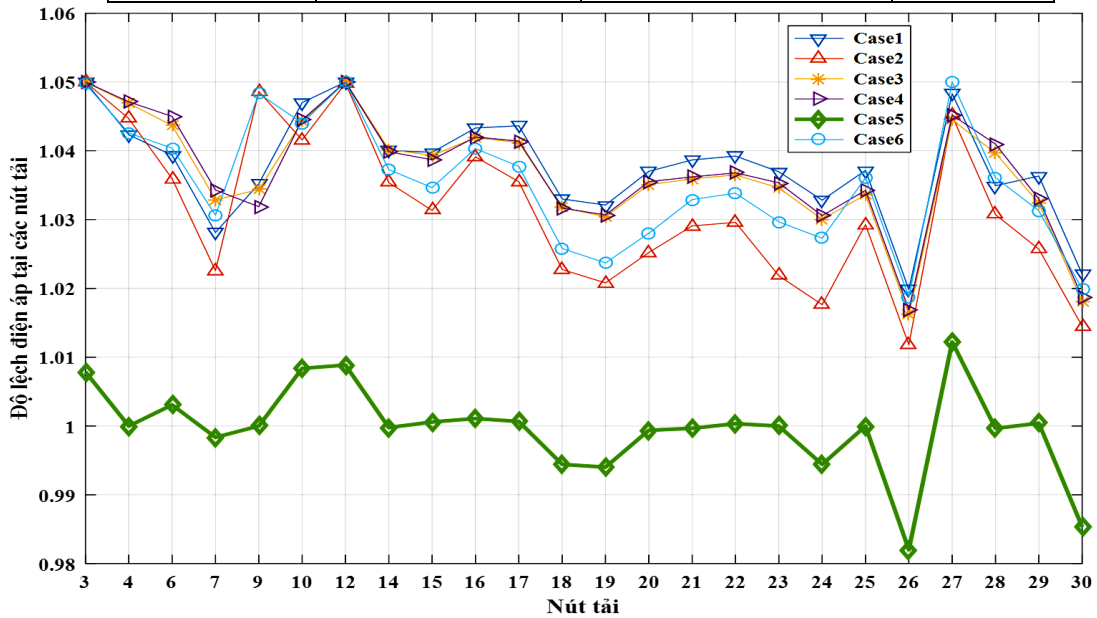
Hình 8. Độ lệch chuẩn của giải thuật EO trong trường hợp 4 với 50 lần chạy

4.2.5 Trường hợp 5: Giảm chi phí nhiên liệu kết hợp với giảm độ lệch điện áp nút tải

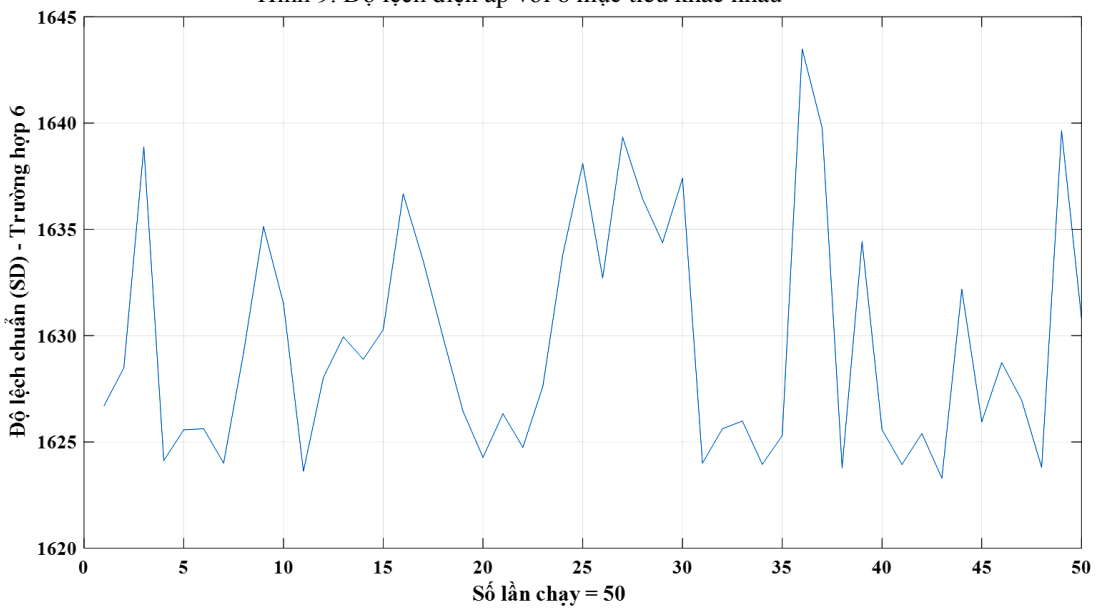
Với hàm đa mục tiêu bao gồm tối ưu hóa chi phí máy phát kết hợp với cải thiện độ lệch điện áp tại các nút tải như công thức (5) với trọng số w1=100. Thì EO cho ra giải pháp tốt hơn hẳn so với các giải pháp còn lại với giá trị hàm mục tiêu là 813.3304. Ngoài ra quan sát từ Hình 9 ta thấy với mục tiêu là trường hợp 5 thì độ lệch điện áp tại các nút tải được cải thiện đáng kể so với các trường hợp còn lại.

Bảng 6: So sánh kết quả cho mạng IEEE 30 nút với hàm mục tiêu giảm chi phí nhiên liệu kết hợp giảm tổng độ lệch điện áp nút tải (Trường hợp 5)

Thuật toán	F _v	FualCost	Fitness
ABPPO [24]	0.09232	804.7339	813.9659
BBO [16]	0.1020	804.9982	815.1982
PSO [22]	0.0891	806.38	815.2900
EO	0.0965	803.6827	813.3304



Hình 9. Độ lệch điện áp với 6 mục tiêu khác nhau



Hình 8. Độ lệch chuẩn của giải thuật EO trong trường hợp 6 với 50 lần chạy

4.2.6 Trường hợp 6: Giảm chi phí nhiên liệu kết hợp với ổn định điện áp

Với hàm đa mục tiêu bao gồm tối ưu hóa chi phí máy phát kết hợp với ổn định điện áp như công thức (9) với trọng số $w_2=6000$. Thì EO cũng cho thấy được hiệu quả của phương pháp trong việc giải quyết bài toán đa mục tiêu với giá trị tối ưu thu được là 1623.296 bé hơn ABC [9] với 1629.065. Và kém hơn 3 giải pháp còn lại là PSO [22], EGA-DQLF [17], GSA [19] kết quả được tìm thấy trong Bảng 7. Tuy nhiên đã có những vi phạm về giới hạn điện áp các nút tải, giới hạn công suất phản kháng nút máy phát cũng như vi phạm giới hạn đường dây của 3 giải pháp này. Các giá trị kết quả ta có thể thấy trong Phụ lục A1 với các giá trị in đậm là những kết quả vi phạm

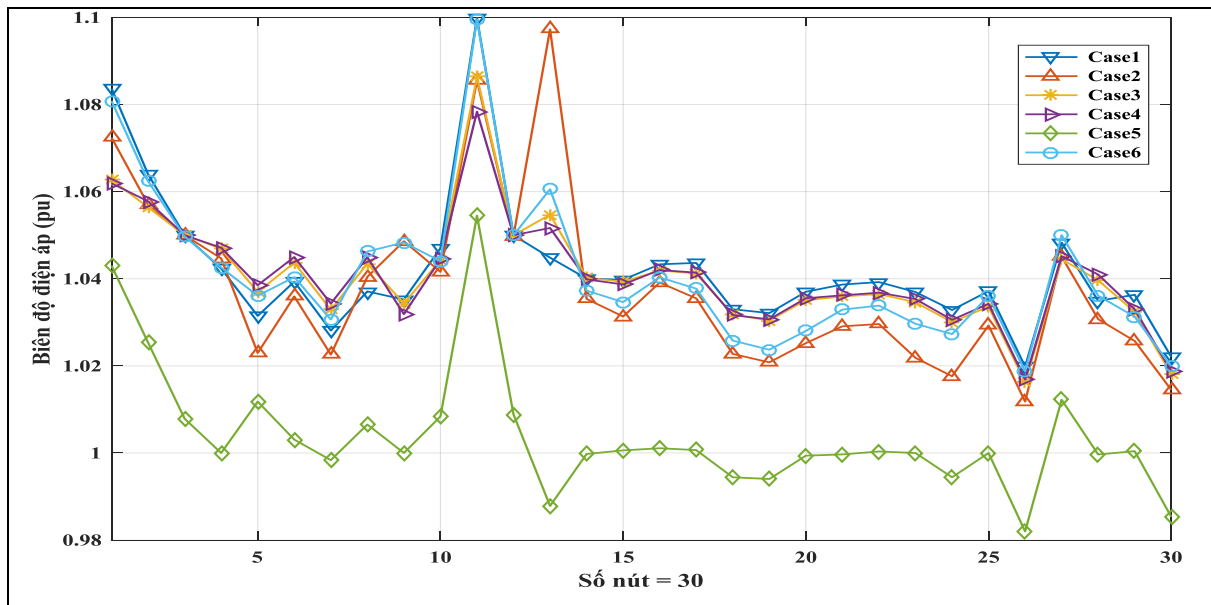
Bảng 7: So sánh kết quả cho mạng IEEE 30 nút với hàm mục tiêu giảm chi phí nhiên liệu kết hợp với ổn định điện áp (Trường hợp 6)

Thuật toán	F_L	FualCost (\$/h)	Fitness
PSO [22]	0.1246	801.16	1548.76
EGA-DQLF [17]	0.1056	802.06	1435.66
GSA [19]	0.116247	806.6013	1504.0833
ABC [9]	0.1379	801.6650	1629.065
EO	0.1370	801.0260	1623.296

5. KẾT LUẬN

Bài báo này đã áp dụng thành công giải thuật cân bằng (EO) cho bài toán OPF trong hệ thống điện. Phương pháp tiếp cận đã được thử nghiệm và kiểm tra với các hàm mục tiêu khác nhau bao gồm cực tiểu chi phí máy phát với các chi phí nhiên liệu khác nhau, tổng chi phí phát thải, tổng tổn thất điện năng hoạt động, cải thiện cấu hình điện áp, và ổn định điện áp. Kết quả thu được từ giải thuật (EO) so sánh với các phương pháp MDE [13], MSFLA [14], LDI-PSO [9], ABC [9], GWO [15], DE [15] cho thấy EO vượt trội so với các phương pháp đã thực hiện ở giải pháp tối ưu thu được. Ngoài ra, EO cũng cho thấy tính hiệu quả và ổn định trong việc tìm kiếm tối ưu toàn cầu với các bài toán thuộc dạng hàm lồi như trường hợp 1, 3, 4, 5 và 6, đối với những bài toán không lồi như trường hợp 2 thì độ ổn định của EO chưa thực sự cao. Hơn nữa, khả năng hội tụ đến giá trị tối ưu toàn cục với số vòng lặp bé của EO cho thấy EO có thể được áp dụng cho các hệ thống điện lớn.

Phụ lục A



Hình A1. Điện áp tại các nút trong các trường hợp

Bảng A1 : Kết quả phân bố công suất ứng với các biến điều khiển được các báo cáo đưa ra.

Biến điều khiển (x)	Trường hợp 1					Trường hợp 6		
	BBO [16]	EGADQLF [17]	EADDE [18]	GSA [19]	MSCA [20]	PSO [22]	EGADQLF [17]	GSA [19]
P1(pu)	177.0145	177.3486	177.2223	177.8284	177.6723	175.5493	177.0224	176.4023
Q1(pu)	-13.4748	3.1198	3.1176	44.0305	-16.4592	10.8160	-27.1786	-14.5099
Q2(pu)	26.7326	19.1340	22.4432	-50.8549	11.3316	27.5246	49.3754	12.0342
Q5(pu)	29.0221	29.4514	27.8416	33.7725	22.3812	39.7527	38.5779	61.5797
Q8(pu)	35.0907	44.9708	29.2258	113.6951	65.0477	55.6411	86.1290	83.0861
Q11(pu)	13.3833	6.1645	23.5323	-2.6287	15.9257	-10.9947	-13.2859	-23.4442
Q13 (p.u)	5.0974	13.1760	-7.4478	0.7379	17.6828	-16.0325	-18.9430	-27.7767
V3 (p.u)	1.0778	1.0704	1.0547	1.0511	1.0857	1.0488	1.0741	1.0737

V4 (p.u)	1.0725	1.0636	1.0474	1.0431	1.0820	1.0397	1.0681	1.0679
V6 (p.u)	1.0687	1.0581	1.0460	1.0505	1.0798	1.0381	1.0734	1.0730
V7(p.u)	1.0579	1.0482	1.0351	1.0365	1.0641	1.0336	1.0672	1.0739
V9(p.u)	1.0731	1.0836	1.0412	1.0828	1.0701	1.0502	1.1254	1.1448
V10(p.u)	1.0899	1.0625	1.0486	1.0676	1.0741	1.0521	1.1210	1.1443
V12(p.u)	1.0934	1.0712	1.0519	1.0992	1.0776	1.0513	1.1242	1.1355
V14(p.u)	1.0851	1.0610	1.0413	1.0829	1.0684	1.0418	1.1135	1.1288
V15(p.u)	1.0859	1.0604	1.0404	1.0765	1.0687	1.0419	1.1118	1.1304
V16(p.u)	1.0869	1.0604	1.0457	1.0799	1.0700	1.0461	1.1169	1.1345
V17(p.u)	1.0871	1.0566	1.0464	1.0678	1.0692	1.0479	1.1161	1.1398
V18(p.u)	1.0797	1.0508	1.0334	1.0616	1.0625	1.0361	1.1062	1.1284
V19(p.u)	1.0791	1.0482	1.0324	1.0558	1.0618	1.0358	1.1058	1.1301
V20(p.u)	1.0838	1.0521	1.0372	1.0580	1.0667	1.0410	1.1106	1.1358
V21(p.u)	1.0825	1.0536	1.0412	1.0574	1.0639	1.0439	1.1096	1.1349
V22(p.u)	1.0831	1.0542	1.0420	1.0585	1.0649	1.0445	1.1098	1.1346
V23(p.u)	1.0841	1.0561	1.0409	1.0639	1.0654	1.0426	1.1083	1.1287
V24(p.u)	1.0780	1.0472	1.0386	1.0552	1.0602	1.0380	1.0966	1.1189
V25(p.u)	1.0801	1.0507	1.0349	1.0754	1.0655	1.0416	1.0795	1.0953
V26(p.u)	1.0635	1.0336	1.0176	1.0587	1.0487	1.0243	1.0628	1.0789
V27(p.u)	1.0895	1.0611	1.0411	1.0961	1.0770	1.0522	1.0769	1.0886
V28(p.u)	1.0659	1.0546	1.0435	1.0493	1.0768	1.0376	1.0776	1.0777
V29(p.u)	1.0807	1.0452	1.0323	1.0778	1.0709	1.0487	1.0710	1.0821
V30(p.u)	1.0659	1.0329	1.0165	1.0671	1.0547	1.0309	1.0547	1.0663

Phần in đậm chỉ những giá trị vi phạm giới hạn

Phụ lục B

Bảng B1 : Hệ số chi phí máy phát và chi phí phát thải

	G1 - Bus1	G2 - Bus2	G3 - Bus5	G4 - Bus8	G5 - Bus11	G6 - Bus13
Hệ số chi phí máy phát						
a	0	0	0	0	0	0
b	2	1.75	1	3.25	3.00	3.00
c	0.00375	0.01750	0.06250	0.00834	0.02500	0.02500
Hệ số chi phí phát thải						
α_i	0.06490	0.05638	0.04586	0.03380	0.04586	0.05151
β_i	-0.05554	-0.06047	-0.05094	-0.03550	-0.05094	-0.05555
γ_i	0.04091	0.02543	0.04258	0.05326	0.04258	0.06131
ξ_i	0.0002	0.0005	0.000001	0.002	0.000001	0.00001
λ_i	2.857	3.333	8.000	2.000	8.000	6.667
Generator data limit						
Pmin (MW)	50	20	15	10	10	12
Pmax (MW)	200	80	50	35	30	40
Qmin (Mvar)	-20	-20	-15	-15	-10	-15
Qmax (Mvar)	200	100	80	60	50	60

Bảng B2: Hệ số chi phí máy phát G1 và G2 sử dụng cho Trường hợp 2

Máy phát	Limits in (MW)		Hệ số chi phí máy phát		
	p_i^{min}	p_i^{max}	a	b	c
Máy phát 1 (MW)	50	140	55.00	0.70	0.0050
	140	200	82.5	1.05	0.0075
Máy phát 2 (MW)	20	55	40	0.3	0.0100
	55	80	80	0.6	0.0200

Bảng B3: Thông số tải hệ thống IEEE-30 nút

Nút	Tải		Nút	Tải		Nút	Tải	
	P(p.u.)	Q(p.u.)		P(p.u.)	Q(p.u.)		P(p.u.)	Q(p.u.)
1	0.000	0.000	11	0.000	0.000	21	0.175	0.112
2	0.217	0.127	12	0.112	0.075	22	0.000	0.000
3	0.024	0.012	13	0.000	0.000	23	0.032	0.016

4	0.076	0.016	14	0.062	0.016	24	0.087	0.067
5	0.942	0.190	15	0.082	0.025	25	0.000	0.000
6	0.000	0.000	16	0.035	0.018	26	0.035	0.023
7	0.228	0.109	17	0.090	0.058	27	0.000	0.000
8	0.300	0.300	18	0.032	0.009	28	0.000	0.000
9	0.000	0.000	19	0.095	0.034	29	0.024	0.009
10	0.058	0.020	20	0.022	0.007	30	0.106	0.019

Bảng B4: Thông số đường dây hệ thống IEEE-30 nút

Nhánh	From	To	R (pu)	X (pu)	B (pu)	SImax	Nhánh	From	To	R (pu)	X (pu)	B (pu)	SImax
1	1	2	0.0192	0.0575	0.0264	130	22	15	18	0.1070	0.2185	0	16
2	1	3	0.0452	0.1852	0.0204	130	23	18	19	0.0639	0.1292	0	16
3	2	4	0.0570	0.1737	0.0184	65	24	19	20	0.0340	0.0680	0	32
4	3	4	0.0132	0.0379	0.0042	130	25	10	20	0.0936	0.2090	0	32
5	2	5	0.0472	0.1983	0.0209	130	26	10	17	0.0324	0.0845	0	32
6	2	6	0.0581	0.1763	0.0187	65	27	10	21	0.0348	0.0749	0	32
7	4	6	0.0119	0.0414	0.0045	90	28	10	22	0.0727	0.1499	0	32
8	5	7	0.0460	0.1160	0.0102	70	29	21	22	0.0116	0.0236	0	32
9	6	7	0.0267	0.0820	0.0085	130	30	15	23	0.1000	0.2020	0	16
10	6	8	0.0120	0.0420	0.0045	32	31	22	24	0.1150	0.1790	0	16
11	6	9	0	0.2080	0	65	32	23	24	0.1320	0.2700	0	16
12	6	10	0	0.5560	0	32	33	24	25	0.1885	0.3292	0	16
13	9	11	0	0.2080	0	65	34	25	26	0.2544	0.3800	0	16
14	9	10	0	0.1100	0	65	35	25	27	0.1093	0.2087	0	16
15	4	12	0	0.2560	0	65	36	28	27	0	0.3960	0	65
16	12	13	0	0.1400	0	65	37	27	29	0.2198	0.4153	0	16
17	12	14	0.1231	0.2559	0	32	38	27	30	0.3202	0.6027	0	16
18	12	15	0.0662	0.1304	0	32	39	29	30	0.2399	0.4533	0	16
19	12	16	0.0945	0.1987	0	32	40	8	28	0.0636	0.2000	0.0214	32
20	14	15	0.2210	0.1997	0	16	41	6	28	0.0169	0.0599	0.0065	32
21	16	17	0.0824	0.1932	0	16							

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] V. H. Quintana, S. Member, and C. F. De Electricidad, “Waterloo, 3G1,” no. 3. pp. 31–39, 1986.

[2] H. W. Dommel and W. F. Tinney, “Optimal Power Flow Solutions,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-87, no. 10. pp. 1866–1876, 1968, doi: 10.1109/TPAS.1968.292150.

[3] R. C. Burchett, H. H. Happ, and D. R. Vierath, “Quadratically Convergent Optimal Power Flow,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-103, no. 11. pp. 3267–3275, 1984, doi: 10.1109/TPAS.1984.318568.

[4] D. I. Sun, B. Ashley, B. Brewer, A. Hughes, and W. F. Tinney, “Optimal power flow by Newton approach,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-103, no. 10. pp. 2864–2880, 1984, doi: 10.1109/TPAS.1984.318284.

[5] A. Santos and G. R. M. da Costa, “Optimal-power-flow solution by Newton’s method applied to an augmented Lagrangian function,” *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, vol. 142, no. 1. pp. 33–36, 1995, doi: 10.1049/ip-gtd:19951586.

[6] X. Yan and V. H. Quintana, “Improving an interior-point-based off by dynamic adjustments of step sizes and tolerances,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 2. pp. 709–716, 1999, doi: 10.1109/59.761902.

[7] A. Faramarzi, M. Heidarinejad, B. Stephens, and S. Mirjalili, “Equilibrium optimizer: A novel optimization algorithm,” *Knowledge-Based Systems*, vol. 191. 2020, doi: 10.1016/j.knsys.2019.105190.

[8] A. E. Chaib, H. R. E. H. Bouchekara, R. Mehasni, and M. A. Abido, “Optimal power flow with emission and non-smooth cost functions using backtracking search optimization algorithm,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 81, pp. 64–77, 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2016.02.004.

[9] M. Rezaei Adaryani and A. Karami, “Artificial bee colony algorithm for solving multi-objective optimal power flow problem,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 53, no. 1, pp. 219–230, 2013, doi:

- 10.1016/j.ijepes.2013.04.021.
- [10] A. F. Attia, Y. A. Al-Turki, and A. M. Abusorrah, "Optimal power flow using adapted genetic algorithm with adjusting population size," *Electr. Power Components Syst.*, vol. 40, no. 11, pp. 1285–1299, 2012, doi: 10.1080/15325008.2012.689417.
- [11] P. Kessel and H. Glavitsch, "Estimating the voltage stability of a power system," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 1, no. 3, pp. 346–354, 1986, doi: 10.1109/TPWRD.1986.4308013.
- [12] O. Alsac and B. Stott, "Optimal load flow with steady-state security," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-93, no. 3, pp. 745–751, 1974, doi: 10.1109/TPAS.1974.293972.
- [13] S. Sayah and K. Zehar, "Modified differential evolution algorithm for optimal power flow with non-smooth cost functions," *Energy Convers. Manag.*, vol. 49, no. 11, pp. 3036–3042, 2008, doi: 10.1016/j.enconman.2008.06.014.
- [14] T. Niknam, M. rasoul Narimani, M. Jabbari, and A. R. Malekpour, "A modified shuffle frog leaping algorithm for multi-objective optimal power flow," *Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 6420–6432, 2011, doi: 10.1016/j.energy.2011.09.027.
- [15] A. A. El-Fergany and H. M. Hasanien, "Single and Multi-objective Optimal Power Flow Using Grey Wolf Optimizer and Differential Evolution Algorithms," *Electr. Power Components Syst.*, vol. 43, no. 13, pp. 1548–1559, 2015, doi: 10.1080/15325008.2015.1041625.
- [16] A. Bhattacharya and P. K. Chattopadhyay, "Application of biogeography-based optimisation to solve different optimal power flow problems," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 5, no. 1, pp. 70–80, 2011, doi: 10.1049/iet-gtd.2010.0237.
- [17] M. S. Kumari and S. Maheswarapu, "Enhanced Genetic Algorithm based computation technique for multi-objective Optimal Power Flow solution," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 32, no. 6, pp. 736–742, 2010, doi: 10.1016/j.ijepes.2010.01.010.
- [18] K. Vaisakh and L. R. Srinivas, "Evolving ant direction differential evolution for OPF with non-smooth cost functions," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 24, no. 3, pp. 426–436, 2011, doi: 10.1016/j.engappai.2010.10.019.
- [19] S. Duman, U. Güvenç, Y. Sönmez, and N. Yörükeren, "Optimal power flow using gravitational search algorithm," *Energy Convers. Manag.*, vol. 59, pp. 86–95, 2012, doi: 10.1016/j.enconman.2012.02.024.
- [20] A. F. Attia, R. A. El Sehiemy, and H. M. Hasanien, "Optimal power flow solution in power systems using a novel Sine-Cosine algorithm," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 99, no. November 2017, pp. 331–343, 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.01.024.
- [21] A. A. Abou El Ela, M. A. Abido, and S. R. Spea, "Optimal power flow using differential evolution algorithm," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 80, no. 7, pp. 878–885, 2010, doi: 10.1016/j.epsr.2009.12.018.
- [22] T. Hariharan and K. Mohana Sundaram, "Multiobjective optimal power flow using Particle Swarm Optimization," *Int. J. Control Theory Appl.*, vol. 9, no. 2, pp. 671–679, 2016.
- [23] W. Warid, H. Hizam, N. Mariun, and N. I. Abdul-Wahab, "Optimal power flow using the Jaya algorithm," *Energies*, vol. 9, no. 9, 2016, doi: 10.3390/en9090678.
- [24] A. Ananthi Christy and P. A. D. Vimal Raj, "Adaptive biogeography based predator-prey optimization technique for optimal power flow," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 62, pp. 344–352, 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.04.054.

Ngày nhận bài: 30/10/2020

Ngày chấp nhận đăng: 15/03/2021