

CỰC TIỂU TỔN THẤT CÔNG SUẤT TÁC DỤNG TRÊN LƯỚI ĐIỆN TRUYỀN TẢI CÓ NHÀ MÁY ĐIỆN GIÓ VÀ THIẾT BỊ FACTS

Nguyễn Anh Tuấn¹, Lê Chí Kiên¹, Cao Thị Xuân Thùy², Nguyễn Trung Thăng^{3*}

¹Khoa Điện-Điện tử, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

²Khoa Điện-Điện tử, Học viện Hàng không Việt Nam, Thành phố Hồ Chí Minh

³Nhóm Nghiên cứu Tối ưu hoá Hệ thống Điện, Khoa Điện-Điện tử,
Trường Đại học Tôn Đức Thắng, Thành phố Hồ Chí Minh

*Email: nguyentrungthang@tdtu.edu.vn

Ngày nhận bài: 02/4/2025; Ngày nhận bài sửa: 26/5/2025; Ngày chấp nhận đăng: 03/6/2025

TÓM TẮT

Nghiên cứu này giải bài toán tối ưu dòng công suất (Optimal power flow - OPF) trên hệ thống điện truyền tải với mục tiêu cực tiểu tổn thất công suất tác dụng (active power loss - APL). Để đạt được mục tiêu đề ra, nghiên cứu đã áp dụng Thuật toán tối ưu bầy đàn (Particle swarm optimization-PSO) và một phiên bản cải tiến dựa trên hệ số co giãn trong quá trình cập nhật nghiệm mới (constriction factor-based Particle swarm optimization: CF-PSO). Hai phương pháp này được áp dụng cho lưới điện truyền tải tiêu chuẩn IEEE 30 nút với sự tích hợp các nguồn năng lượng tái tạo và các thiết bị bù công suất phản kháng như thiết bị bù nối tiếp điều khiển bằng Thyristor (TCSC) và thiết bị bù công suất phản kháng tĩnh (SVC). Bốn trường hợp nghiên cứu xem xét lưới chỉ có năng lượng tái tạo, lưới có cả hệ thống năng lượng tái tạo và các thiết bị thuộc hệ thống truyền tải điện xoay chiều linh hoạt (FACTS). Việc thay đổi cấu hình hệ thống trong các trường hợp này dẫn đến sự thay đổi đáng kể trong không gian nghiệm của bài toán, tạo ra một nền tảng thử nghiệm lý tưởng để so sánh hiệu suất của PSO và CF-PSO. Kết quả nghiên cứu cho thấy CF-PSO vượt trội hơn hẳn so với PSO gốc trên cả hai khía cạnh: độ ổn định của quá trình tối ưu hóa và tốc độ hội tụ đến nghiệm tối ưu. Cụ thể, CF-PSO đã giảm được tổn thất công suất tác dụng lần lượt là 4,8%, 6,6%, 0,9% và 0,4% so với PSO trong bốn trường hợp nghiên cứu. Những kết quả này khẳng định CF-PSO là một công cụ tối ưu hóa hiệu quả và mạnh mẽ cho bài toán OPF trong hệ thống điện hiện đại, đặc biệt khi có sự tham gia của các nguồn năng lượng tái tạo và các thiết bị bù. Nghiên cứu này cung cấp một cái nhìn sâu sắc về tiềm năng của CF-PSO trong việc giải quyết các bài toán tối ưu hóa phức tạp trong lĩnh vực năng lượng.

Từ khóa: Cực tiểu tổn thất công suất tác dụng, lưới điện truyền tải, năng lượng gió, thiết bị FACTS, thuật toán tối ưu bầy đàn.

1. GIỚI THIỆU

Các thành phần cơ bản nhất của một hệ thống điện là các nhà máy điện, hệ thống các máy biến áp, lưới truyền tải, lưới phân phối và phụ tải [1]. Nhà máy điện là nơi sản xuất ra công suất điện. Tại đầu ra của nhà máy điện thường được trang bị các máy biến áp tăng áp để nâng cao điện áp, tạo điều kiện thuận lợi cho việc truyền tải dòng công suất lên hệ thống đường dây truyền tải một cách hiệu quả, giảm thiểu tổn thất năng lượng. Hệ thống các máy biến áp, bao gồm cả máy biến áp tăng áp tại nguồn và máy biến áp giảm áp tại các trạm trung gian và trạm phân phối, đóng vai trò thiết yếu trong việc điều chỉnh điện áp để truyền tải và phân phối điện năng đến phụ tải [2]. Đường dây phân phối nhận điện từ đường dây truyền tải và cung cấp điện cho phụ tải. Các đường dây phân phối đóng vai trò trung gian trong việc truyền tải điện áp ở các cấp trung thế đến phụ tải [3]. Vì vậy, bài toán tối ưu hóa dòng công suất (OPF) cho mạng lưới điện truyền tải đã trở thành một vấn đề quan trọng trong hệ thống điện.

Bài toán tối ưu hóa dòng công suất (OPF) truyền thống đã thu hút nhiều nghiên cứu, tập trung vào các mục tiêu như giảm chi phí nhiên liệu phát điện [4], giảm lượng phát thải sinh ra trong quá trình đốt

các loại nhiên liệu hóa thạch để phát điện của các nhà máy nhiệt điện (TPs) [5], và cải thiện điện áp [6]. Với xu hướng sử dụng năng lượng tái tạo ngày càng tăng, các nhà máy điện gió và điện mặt trời quang điện đang được xem xét cùng với TP như các nguồn điện chính trong lưới truyền tải [7]. Tuy nhiên, sự cố đường dây truyền tải vẫn là một thách thức lớn, đặc biệt khi các nhà máy điện nâng cấp công suất hoặc nhu cầu phụ tải tăng lên [8]. Các yếu tố như lắp đặt thêm tổ máy phát nhiệt, nhà máy điện gió và điện mặt trời mới, hoặc nâng cấp các nhà máy hiện có, cũng như thay đổi công nghệ, đều có thể dẫn đến tình trạng quá dòng trên đường dây truyền tải [9].

Mục tiêu chính của OPF là tìm ra kế hoạch vận hành tối ưu cho các tổ máy phát điện và thiết bị điện khác, nhằm giảm chi phí sản xuất điện, giảm tổn thất năng lượng, và nâng cao chất lượng điện (tần số, điện áp, độ tin cậy) trong khi vẫn đảm bảo tuân thủ tất cả các ràng buộc [10]. Trong quá trình mô phỏng bài toán OPF, phần mềm hỗ trợ mô hình hóa các thông số của thiết bị điện thành biến điều khiển và biến phụ thuộc. Các biến điều khiển được xem là dữ liệu đầu vào, còn biến phụ thuộc là kết quả của phương pháp Newton-Graphson [11]. Một giải pháp được coi là hợp lệ nếu cả hai loại biến đều nằm trong giới hạn cho phép. Tuy nhiên, một giải pháp tối ưu cần thỏa mãn tất cả các ràng buộc và có hàm mục tiêu tốt [12].

Việc xem xét vấn đề sự cố làm tăng thêm độ phức tạp cho việc tìm kiếm giải pháp OPF, thậm chí có thể không tìm thấy giải pháp hợp lệ ngay cả với các phương pháp mạnh mẽ nhất. Xu hướng hiệu quả hiện nay là kết hợp các phương pháp dòng công suất như Gauss-Seidel/Newton-Graphson với các thuật toán metaheuristic [13-15]. Ví dụ, Mathpower đã được sử dụng để tính toán dòng công suất, trong khi các thuật toán như thuật toán di truyền cải tiến [13], tìm kiếm chim cu gáy cải tiến [14], và thuật toán tìm kiếm sứa (JSA) [15] đã được áp dụng thành công để tìm các biến điều khiển. Tuy nhiên, ngay cả những phương pháp hiệu suất cao này cũng có thể không tìm được giải pháp hợp lý khi các nhà máy điện phải sản xuất và truyền tải một lượng điện lớn đến phụ tải.

Để giải quyết các thách thức đã đề cập, việc tích hợp các thiết bị thuộc hệ thống truyền tải điện xoay chiều linh hoạt (FACTS) vào hệ thống điện đã được đề xuất. Nhiều bộ điều khiển FACTS khác nhau đã được triển khai để giảm thiểu tổn thất công suất tác dụng, giảm sụt áp và ngăn ngừa các tình huống khẩn cấp của hệ thống. Chúng bao gồm, thiết bị bù tĩnh (SSSC) [16], thiết bị bù đồng bộ tĩnh (STATCOM) [17], thiết bị nối tiếp điều khiển bằng Thyristor (TCSC) [18-24] với nhiều thuật toán khác nhau (thuật toán tối ưu bầy đàn [18], thuật toán sư tử kiến [19], thuật toán Gen [20], tổng quan nhiều thuật toán metaheuristic và các mức độ thâm nhập của năng lượng tái tạo [21], thuật toán Gradient [22], thuật toán lập trình toán học [23] và thuật toán lai giữa hai phương pháp [24]), thiết bị điều khiển dòng công suất thống nhất (UPFC) [25, 26], thiết bị hiệu chỉnh góc pha điều khiển bằng Thyristor (TCPAR) [25], và các cấu hình kết hợp như sự kết hợp giữa TCPAR và TCSC [27-29], SVC và TCSC [30].

Nghiên cứu này sẽ áp dụng phương pháp tối ưu hóa bầy đàn (PSO) và một biến thể cải tiến, CF-PSO, để giải quyết bài toán tối ưu dòng công suất (OPF) trên lưới truyền tải 30 nút chuẩn IEEE với mục tiêu giảm thiểu tổn thất công suất tác dụng (APL). PSO là một thuật toán meta-heuristic được đề xuất lần đầu bởi Kennedy và Eberhart vào năm 1995 [31]. Lấy cảm hứng từ hành vi tập thể của các nhóm động vật như đàn chim hoặc đàn cá trong quá trình tìm kiếm thức ăn, PSO mô phỏng chuyển động của các cá thể trong một không gian tìm kiếm xác định. Mỗi cá thể, được đặc trưng bởi vị trí và vận tốc, ban đầu khám phá không gian dựa trên vận tốc riêng của nó. Khi một vị trí giàu tài nguyên hơn được phát hiện (ví dụ: vị trí có nhiều thức ăn hoặc nguồn sống phù hợp), thông tin này sẽ lan truyền trong toàn bộ đàn. Quá trình này lặp lại cho đến khi đàn xác định được một vị trí tối ưu, nơi các điều kiện sống và nguồn thức ăn là tối ưu cho cả đàn. CF-PSO [32] là một phiên bản cải tiến của thuật toán PSO gốc, tích hợp thêm một hệ số co giãn nhằm tăng tốc quá trình tìm kiếm và do đó, cải thiện hiệu quả tổng thể khi áp dụng cho các bài toán tối ưu.

Các điểm mới và đóng góp chính của nghiên cứu này được liệt kê như sau:

- Áp dụng thành công PSO và CF-PSO để giải quyết bài toán OPF với các trường hợp khác nhau.
- Làm rõ hiệu quả của CF-PSO so với phiên bản gốc PSO dựa trên các yếu tố so sánh và số liệu cụ thể.
- Xem xét mức độ ảnh hưởng của việc tích hợp nhà máy điện gió, TCSC, và SVC lên lưới khi giải quyết bài toán với hàm mục tiêu chính là cực tiểu tổn thất công suất tác dụng APL.
- Chỉ ra trường hợp mà cụ thể mà sự kết hợp giữa các thiết bị đã nêu đối với giá trị tổn thất công suất nhỏ nhất.

Ngoài phần giới thiệu, các phần còn lại của nghiên cứu được cấu trúc như sau: Phần 2 trình bày mô hình bài toán, bao gồm hàm mục tiêu và các ràng buộc liên quan. Phần 3 giới thiệu chi tiết về phương pháp PSO và CF-PSO, đồng thời phân tích sự khác biệt trong quá trình cập nhật nghiệm của hai phương pháp. Phần 4 trình bày kết quả và thảo luận liên quan đến các trường hợp nghiên cứu và hiệu quả của các phương pháp. Cuối cùng, Phần 5 tổng hợp các kết luận chính của toàn bộ nghiên cứu.

2. MÔ HÌNH BÀI TOÁN

2.1 Hàm mục tiêu

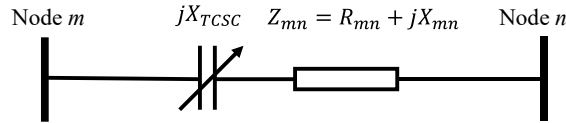
Như đã đề cập trước đó, nghiên cứu này tập trung vào việc giảm thiểu tổn thất công suất tác dụng (APL) [11] biểu thức toán học của chúng được trình bày như sau:

$$APL = \sum_{m=1}^{N_{No}} \sum_{n=1; m \neq n}^{N_{No}} CD_{mn} \times (U_m^2 + U_n^2 - 2 \times U_m \times U_n \times \cos\varphi_{mn}) \text{ (MW)} \quad (1)$$

Trong Công thức (1), U_m và U_n lần lượt là điện áp tại nút m và nút n ; $\cos\varphi_{mn}$ được xác định bằng $\varphi_{mn} = \varphi_m - \varphi_n$ trong đó φ_m là góc pha của điện áp tại nút m ; φ_n là góc pha của điện áp tại nút n .

2.2 Mô hình của TCSC

Bộ bù nối tiếp điều khiển bằng Thyristor (TCSC) là một loại thiết bị truyền tải dòng công suất xoay chiều linh hoạt (FACTS). Các thiết bị FACTS được lắp đặt trên lưới truyền tải điện nhằm đạt hiệu quả kinh tế và các mục tiêu kỹ thuật, chẳng hạn như tối ưu hóa dòng công suất truyền tải, giảm thiểu sụt áp, và giảm thiểu tổn thất công suất tác dụng. Một đường dây truyền tải tích hợp TCSC được mô tả như sau:



Hình 1 . Mô hình đường dây với thiết bị TCSC

Cảm kháng của đường dây truyền tải mn sau khi lắp đặt TCSC được xác định như sau:

$$X'_{mn} = X_{mn} - X_{TCSC} \quad (2)$$

X'_{mn} và X_{mn} lần lượt là cảm kháng của đường dây sau và trước khi lắp đặt TCSC; X_{TCSC} cảm kháng của TCSC. Mặt khác, điện dẫn và điện nạp của đường dây cũng bị thay đổi sau khi TCSC được lắp đặt và được xác định như sau [33]:

$$C_{mn}^{TCSC} = \frac{R_{mn}}{R_{mn}^2 + (X_{mn} - X_{TCSC})^2} \quad (3)$$

$$S_{mn}^{TCSC} = \frac{-(X_{mn} - X_{TCSC})}{R_{mn}^2 + (X_{mn} - X_{TCSC})^2} \quad (4)$$

Trong đó, C_{mn}^{TCSC} và S_{mn}^{TCSC} lần lượt là điện dẫn và điện nạp của đường dây truyền tải mn sau khi TCSC được lắp đặt. R_{mn} và X_{mn} là điện trở và cảm kháng của đường dây truyền tải mn trước khi lắp đặt TCSC; X_{TCSC} là cảm kháng của TCSC.

2.3 Các ràng buộc của bài toán OPF với TCSC

2.3.1. Các ràng buộc cân bằng

Công suất tác dụng và công suất phản kháng tại nút m phải thỏa mãn các công thức sau đây:

$$P_{G,m} - P_{D,m} = U_m \sum_{n=1}^{N_{no}} U_n \times \left[\begin{array}{l} C_{mn}^{TCSC} \times \cos(\varphi_{mn}) \\ + S_{mn}^{TCSC} \times \sin(\varphi_{mn}) \end{array} \right] \quad (5)$$

$$Q_{G,m} + Q_{SC,m} - Q_{D,m} = U_m \sum_{n=1}^{N_{no}} U_n \times \left[\begin{array}{l} C_{mn}^{TCSC} \times \cos(\varphi_{mn}) \\ - S_{mn}^{TCSC} \times \sin(\varphi_{mn}) \end{array} \right] \quad (6)$$

$P_{G,m}$ và $Q_{G,m}$ là công suất tác dụng và công suất phản kháng bơm vào nút m bởi các nguồn phát điện; $P_{D,m}$ và $Q_{D,m}$ là công suất tác dụng và công suất phản kháng của tải tại nút m ; $Q_{SC,m}$ là công suất phản kháng cung cấp bởi các thiết bị bù tại nút m .

2.3.2. Ràng buộc bất cân bằng

Những ràng buộc này được xem xét để thỏa mãn các ràng buộc vận hành của các thành phần điện trong mạng lưới truyền tải điện, chẳng hạn như máy phát nhiệt, tụ điện, tải, máy biến áp, đường dây truyền tải và các thiết bị. Các ràng buộc được thể hiện như sau [11, 12]:

$$P_{G,i}^{min} \leq P_{G,i} \leq P_{G,i}^{max} \quad (7)$$

$$Q_{G,i}^{min} \leq Q_{G,i} \leq Q_{G,i}^{max} \quad (8)$$

$$Q_{SC,q}^{min} \leq Q_{SC,q} \leq Q_{SC,q}^{max} \quad (9)$$

$$V_{LD,l}^{min} \leq V_{LD,l} \leq V_{LD,l}^{max} \quad (10)$$

$$V_{G,i}^{min} \leq V_{G,i} \leq V_{G,i}^{min} \quad (11)$$

$$ST_t^{min} \leq ST_t \leq ST_t^{max} \quad (12)$$

$$S_b \leq S_b^{max} \quad (13)$$

$$X_{TCSC,p}^{min} \leq X_{TCSC,p} \leq X_{TCSC,p}^{max} \quad (14)$$

Trong đó, $P_{G,i}^{min}$ và $P_{G,i}^{max}$ lần lượt là lượng công suất tác dụng nhỏ nhất và lớn nhất phát bởi tổ máy thứ i ; $Q_{G,i}^{min}$ và $Q_{G,i}^{max}$ lần lượt là lượng công suất phản kháng nhỏ nhất và lớn nhất phát bởi tổ máy thứ i ; $V_{LD,l}^{min}$ và $V_{LD,l}^{max}$ lần lượt là giới hạn điện áp nhỏ nhất và lớn nhất của tải thứ l ; $V_{G,i}^{min}$ và $V_{G,i}^{max}$ lần lượt là điện áp phát nhỏ nhất và lớn nhất của máy phát thứ i ; ST_t^{min} và ST_t^{max} lần lượt là giới hạn nhỏ nhất và lớn nhất của đầu phân áp của máy biến áp thứ t với $t = 1, 2, \dots, N_{TR}$ và N_{TR} là số lượng máy biến áp trong hệ thống; S_b và S_b^{max} lần lượt là lượng công suất biểu kiến và lượng công suất biểu kiến lớn nhất chạy trên nhánh thứ b với $b = 1, 2, \dots, N_B$ và N_B là số lượng nhánh của lưới điện được xem xét; $Q_{SC,q}$ là lượng công suất kháng được cung cấp bởi thiết bị bù thứ q với $q = 1, 2, \dots, N_{SC}$ với N_{SC} là số lượng thiết bị bù trên lưới; $V_{LD,l}$ và $V_{G,i}$ lần lượt là điện áp của tải tại nút thứ l và điện áp phát của máy phát thứ i ; ST_t vị trí thiết lập đầu phân áp của máy biến áp thứ t ; $X_{TCSC,p}^{min}$ và $X_{TCSC,p}^{max}$ lần lượt là giá trị cảm kháng nhỏ nhất và lớn nhất của thiết bị TCSC thứ p với $p = 1, 2, \dots, N_{TCSC}$ với N_{TCSC} là số lượng TCSC trên lưới.

3. THUẬT TOÁN TỐI ƯU BẦY ĐÀN (PSO)

3.1 Thuật toán tối ưu bầy đàn (PSO)

Như đã được đề cập trong Phần Giới thiệu, thuật toán tối ưu bầy đàn (Particle swarm optimization: PSO) được xây dựng dựa trên việc mô tả quá trình tìm kiếm thức ăn của các bầy quần xã sinh vật trong tự nhiên. Quá trình tìm kiếm kết thúc khi xác định được vị trí tốt nhất toàn cục, biểu thị giải pháp tối ưu cho vấn đề đang xem xét. Cơ chế cập nhật vận tốc cho mỗi cá thể đóng vai trò quan trọng trong việc xác định vị trí tối ưu toàn cục này:

$$VT_s^{new} = VT_s + gt_1 \times \delta \times (X_{B,s} - X_i) + gt_2 \times \delta \times (X_{GB} - X_i) \quad (15)$$

$$X_i^{new} = X_i + VT_i^{new} \quad (16)$$

Trong đó VT_s^{new} và X_i^{new} lần lượt là vận tốc mới và vị trí mới của cá thể thứ s với $s = 1, 2, \dots, N_S$ với N_S là kích thước dân số ban đầu, VT_s và X_i là vận tốc hiện tại và vị trí hiện tại của cá thể s ; gt_1 và gt_2 lần lượt là các hệ số gia tốc; δ là giá trị ngẫu nhiên trong khoảng từ 0 đến 1; $X_{B,s}$ và X_{GB} là vị trí tốt nhất của cá thể thứ s tính cho đến thời điểm đang xét và vị trí tốt nhất của toàn bộ dân số.

3.2 Thuật toán tối ưu bầy đàn cải tiến (CF-PSO)

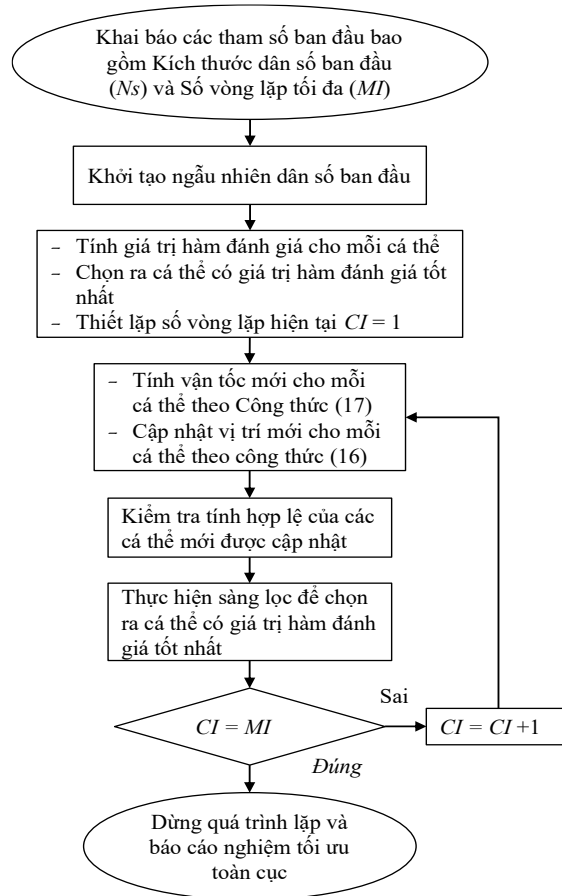
Để nâng cao hiệu quả của quá trình cập nhật vận tốc, nghiên cứu [32] đã đề xuất một cải tiến nhỏ, dẫn đến việc hình thành một biến thể mới của thuật toán PSO, được gọi là PSO với hệ số co giãn (constriction factor-based Particle swarm optimization: CF-PSO). Cụ thể, một hệ số co giãn được tích hợp vào quy trình cập nhật vận tốc của mỗi cá thể. Quy trình cập nhật vận tốc mới được mô hình hóa như sau:

$$VT_i^{new} = CF \times (VT_i + gt_1 \times \delta \times (X_{B,i} - X_i) + gt_2 \times \delta \times (X_{GB,i} - X_i)) \quad (17)$$

Trong đó CF là hệ số co giãn, được xác định bằng công thức sau đây:

$$CF = \frac{2}{|2 - (gt_1 + gt_2) - \sqrt{(gt_1 + gt_2)^2 - 4 \times (gt_1 + gt_2)}|} \quad (18)$$

Toàn bộ quá trình tìm kiếm của CF-PSO cho một bài toán tối ưu cơ bản được trình bày như lưu đồ giải thuật ở Hình 2.



Hình 2. Quá trình tìm kiếm của CF-PSO cho một bài toán tối ưu cơ bản

Lưu ý rằng, lưu đồ thực thi của CF-PSO và PSO chỉ khác nhau duy nhất ở bước cập nhật vận tốc mới cho mỗi cá thể. Cụ thể là, quá trình cập nhật vận tốc mới của PSO sẽ được sử dụng Công thức (15) thay cho Công thức (17) như trong Hình 2.

4. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

Trong phần này, PSO và CF-PSO sẽ được áp dụng để xác định nghiệm tối ưu cho bài toán cực tiểu tổn thất công suất tác dụng trên lưới truyền tải IEEE 30 nút với sự hiện diện của nhà máy điện gió, TCSC, và SVC theo bốn trường hợp dưới đây:

- Trường hợp 1: Lưới có sự hiện diện của 02 nhà máy điện gió. Mỗi nhà máy có công suất lắp đặt 10 MW,
- Trường hợp 2: Lưới có sự hiện diện của 02 nhà máy điện gió như Trường hợp 1 và có thêm 01 TCSC,
- Trường hợp 3: Lưới có sự hiện diện của 02 nhà máy điện gió như Trường hợp 1 và 01 SVC,
- Trường hợp 4: Lưới có sự hiện diện của 02 nhà máy điện gió như Trường hợp 1 kết hợp với 01 TCSC và 01 SVC.

Các thông tin cơ bản của lưới điện truyền tải IEEE 30 nút được trích dẫn từ nghiên cứu [11] và sơ đồ đơn tuyến của lưới được thể hiện trong Hình 3. Đối với PSO và CF-PSO, hai phương pháp này sẽ được cài đặt các thông số điều khiển giống nhau về kích thước đàn số ban đầu (N_S) và số lượng vòng lặp tối đa (MI) để phục vụ việc đánh giá và so sánh. Bên cạnh đó, mỗi phương pháp sẽ được chạy thử 50 lần để chọn ra lần chạy tốt nhất trước khi tiến hành các so sánh khác. Chi tiết của các thông số điều khiển của PSO và CF-PSO cho 04 trường hợp nghiên cứu được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số điều khiển của PSO và CF-PSO

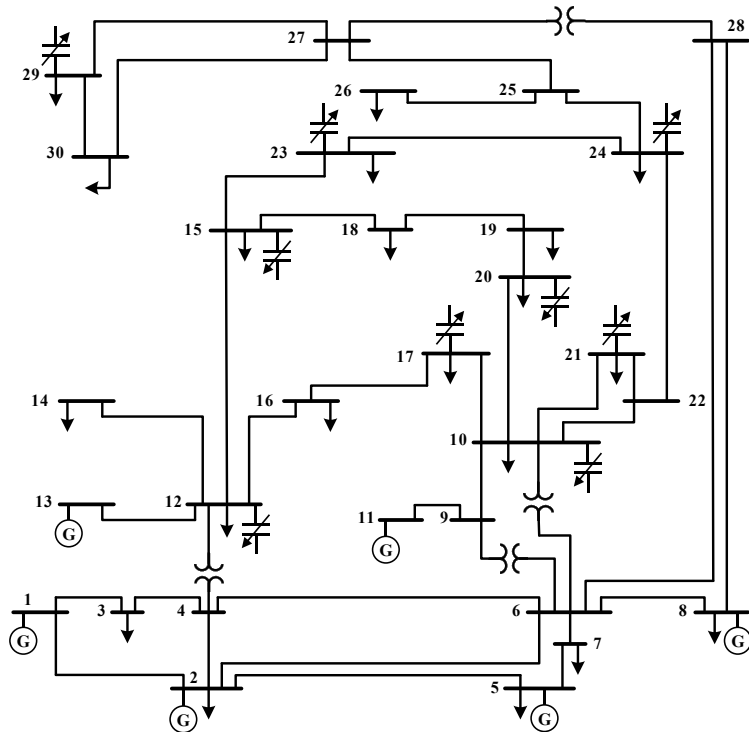
Phương pháp	PSO		CF-PSO	
	N_S	MI	N_S	MI
Trường hợp 1	100	300	100	300
Trường hợp 2	100	500	100	500
Trường hợp 3	100	500	100	500
Trường hợp 4	100	600	100	600

Việc thiết lập các tham số điều khiển - cụ thể là kích thước quần thể ban đầu (N_S) và số vòng lặp tối đa (MI) - cho cả hai thuật toán PSO và CF-PSO được thực hiện dựa trên đánh giá quy mô bài toán. Quy mô ở đây chính là số lượng biến điều khiển cần được xác định tối ưu. Bảng 2 trình bày số lượng biến này cho từng trường hợp: Trường hợp 1 có ít biến nhất, Trường hợp 2 và 3 có cùng số biến, và Trường hợp 4 có nhiều biến nhất. Căn cứ vào đó, các giá trị tham số trong Bảng 1 được chọn như sau: Trường hợp 1 - ít biến nhất có N_S và MI nhỏ nhất; Trường hợp 2 và 3 với số biến bằng nhau có cùng giá trị N_S và MI ; và Trường hợp 4 - nhiều biến nhất có N_S và MI lớn nhất.

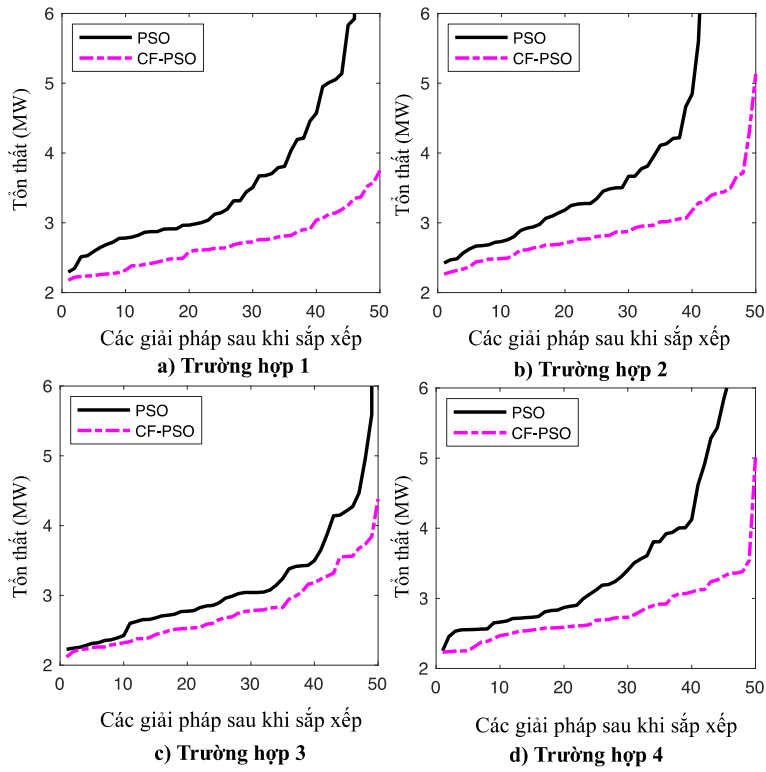
Bảng 2. Số lượng các biến điều khiển cần được xác định tương ứng với mỗi trường hợp nghiên cứu

Số thứ tự	Biến điều khiển	Trường hợp 1	Trường hợp 2	Trường hợp 3	Trường hợp 4
1	$P_{G,2} (MW)$	x	x	x	x
2	$P_{G,3} (MW)$	x	x	x	x
3	$P_{G,4} (MW)$	x	x	x	x
4	$P_{G,5} (MW)$	x	x	x	x
5	$P_{G,6} (MW)$	x	x	x	x
6	$V_{G,1} (V)$	x	x	x	x
7	$V_{G,2} (V)$	x	x	x	x

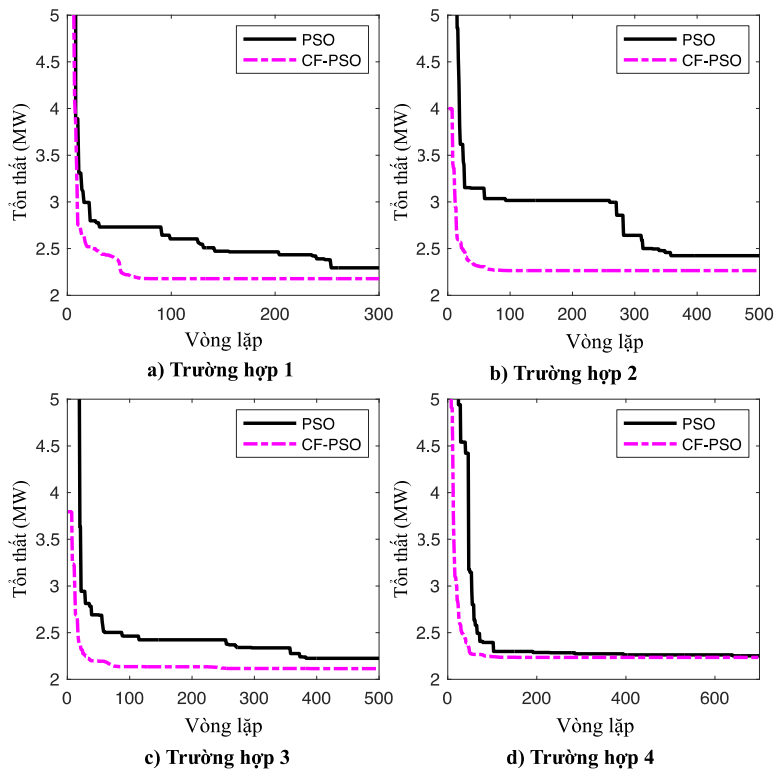
Số thứ tự	Biến điều khiển	Trường hợp 1	Trường hợp 2	Trường hợp 3	Trường hợp 4
8	$V_{G,3} (V)$	x	x	x	x
9	$V_{G,4} (V)$	x	x	x	x
10	$V_{G,5} (V)$	x	x	x	x
11	$V_{G,6} (V)$	x	x	x	x
12	$ST_1 (\%)$	x	x	x	x
13	$ST_2 (\%)$	x	x	x	x
14	$ST_3 (\%)$	x	x	x	x
15	$ST_4 (\%)$	x	x	x	x
16	VT_{TCSC1}		x		x
17	$X_{TCSC1} (pu)$		x		x
18	VT_{SVC1}			x	x
19	$DL_{SVC1} (MVar)$			x	x
20	VT_{TW1}	x	x	x	x
21	VT_{TW2}	x	x	x	x
Tổng số lượng biến điều khiển cần xác định		17	19	19	21



Hình 3. Sơ đồ đơn tuyến của lưới truyền tải IEEE 30-nút



Hình 4. Giá trị tồn thất sau 50 lần chạy của PSO và CF-PSO cho 4 trường hợp



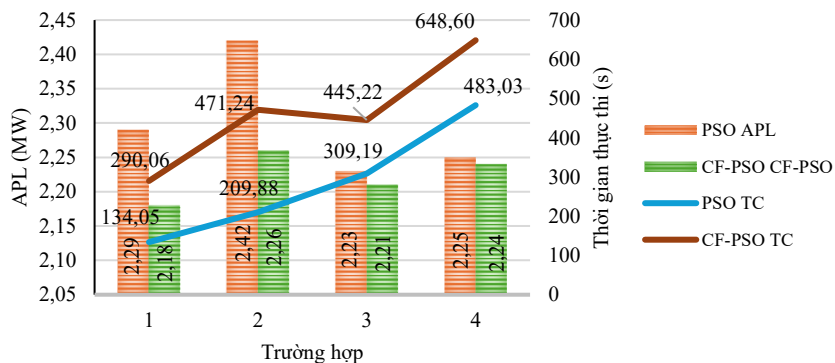
Hình 5. Đặc tính hội tụ của lần chạy tốt nhất đạt được bởi PSO và CF-PSO cho 4 trường hợp

Hình 4 trình bày phân bố giá trị hàm mục tiêu thu được từ 50 lần thực thi độc lập của thuật toán PSO và CF-PSO cho cả bốn trường hợp nghiên cứu. Kết quả cho thấy CF-PSO đạt được giá trị hàm mục tiêu thấp hơn so với PSO trong toàn bộ 50 lần chạy. Đáng chú ý, CF-PSO là phương pháp duy nhất đạt được giá trị tối ưu của hàm mục tiêu trong tất cả bốn trường hợp nghiên cứu. Ngược lại, PSO cho thấy hiệu suất kém hơn CF-PSO về giá trị hàm mục tiêu sau mỗi lần chạy và không thể đạt được giá trị tối ưu. Các giá trị APL của CF-PSO sau 50 lần chạy thử trong cả bốn trường hợp nghiên cứu đều ở vị trí thấp hơn so với các giá trị tương ứng của PSO cũng chỉ ra rằng, CF-PSO là một phương pháp có hiệu suất tìm kiếm ổn định hơn nhiều so với PSO. Độ ổn định trong các lần chạy cùng với tốc độ hội tụ sớm đến giá trị tối ưu của hàm đánh giá được xem xét là hai tiêu chí hàng đầu để đánh giá hiệu quả toàn diện của một thuật toán tối ưu kiểu meta-heuristic khi so sánh với các phương pháp khác. Thông thường yếu tố “độ ổn định” của một thuật toán meta-heuristic sẽ được đo lường bằng giá trị của độ lệch chuẩn – STD. Một thuật toán meta-heuristic có STD cao trong khi giải quyết một bài toán tối ưu cụ thể, so với một thuật toán khác có cùng số lần thực thi nhưng STD thấp hơn, sự thiếu ổn định về mặt hiệu quả tìm kiếm và độ tin cậy thấp. Điều này có nghĩa là thuật toán có STD cao tạo ra các kết quả khác nhau và không đáng tin cậy qua nhiều lần chạy, bị ảnh hưởng nhiều bởi các thiết lập ban đầu ngẫu nhiên. Sự thất thường này thường xuất phát từ sự mất cân bằng giữa khả năng khám phá và khả năng khai thác các vùng không gian nghiệm khả thi. Do đó, hiệu suất của nó trên các bài toán mới trở nên khó dự đoán và ít tin cậy hơn cho các ứng dụng thực tế. Ngược lại, một giá trị STD thấp cho thấy hiệu suất của thuật toán ổn định và nhất quán hơn, ít bị ảnh hưởng bởi các điều kiện khởi tạo và có sự cân bằng tốt hơn giữa khám phá và khai thác. Các thuật toán như vậy có xu hướng tạo ra các kết quả có chất lượng tương đương nhau qua các lần chạy khác nhau, giúp dự đoán hiệu suất của chúng dễ dàng hơn và đáng tin cậy hơn.

Hình 5 minh họa đặc tuyến hội tụ tốt nhất đạt được bởi PSO và CF-PSO khi áp dụng cho bốn trường hợp nghiên cứu. Quan sát cho thấy CF-PSO vượt trội đáng kể so với PSO về tốc độ hội tụ, đạt được giá trị tối ưu của APL một cách nhanh chóng. Kết quả thử nghiệm cho thấy CF-PSO thể hiện khả năng hội tụ vượt trội so với PSO. Cụ thể, trong hai trường hợp đầu tiên, CF-PSO chỉ cần hơn 100 vòng lặp để đạt được giá trị APL tối thiểu, một hiệu suất mà PSO không thể sánh được ngay cả khi chạy với số lượng vòng lặp tối đa cho phép. Sự vượt trội của CF-PSO tiếp tục được khẳng định trong hai trường hợp còn lại. Đối với Trường hợp 3, CF-PSO hội tụ đến giá trị APL tối ưu chỉ sau hơn 300 vòng lặp, và khoảng 400 vòng lặp cho Trường hợp 4. Ngược lại, PSO đã không thể hội tụ đến giá trị tối ưu của APL trong bất kỳ lần chạy tốt nhất nào của nó.

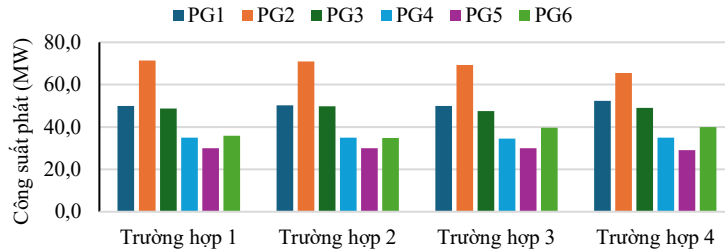
Khả năng hội tụ nhanh chóng của CF-PSO mang lại tính khả thi cao hơn khi ứng dụng vào giải quyết các bài toán thực tế. Nó giúp giảm đáng kể thời gian thực thi mà vẫn đảm bảo khả năng tìm được nghiệm tối ưu, đồng thời giảm thiểu việc tiêu thụ tài nguyên máy tính. Điều này đặc biệt quan trọng trong việc duy trì độ bền và tính ổn định của các hệ thống tính toán vật lý, bởi các thành phần quan trọng như CPU, RAM và ổ cứng không cần phải hoạt động liên tục ở mức hiệu suất cao.

Hình 6 trình bày chi tiết các giá trị tổn thất công suất tác dụng (APL) và thời gian thực thi của PSO và CF-PSO trong bốn trường hợp nghiên cứu. Dữ liệu từ hình cho thấy CF-PSO đạt được giá trị APL thấp hơn so với PSO trong tất cả các trường hợp. Cụ thể, CF-PSO hiệu quả hơn PSO lần lượt là 4,8% trong Trường hợp 1, 6,6% trong Trường hợp 2, 0,9% trong Trường hợp 3 và 0,4% trong Trường hợp 4. Khi kết hợp với các dữ liệu và phân tích đã được trình bày trước đó, CF-PSO được xác nhận là phương pháp hiệu quả hơn PSO trong việc giải quyết bài toán đang được xem xét trong nghiên cứu này.

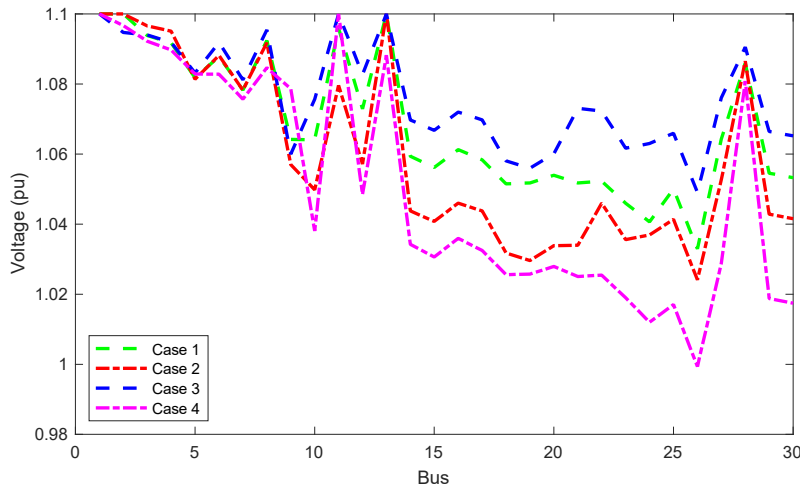


Hình 6. Giá trị tổn thất công suất (APL) và thời gian thực thi của PSO và CF-PSO trong 04 trường hợp

Hình 7 và Hình 8 lần lượt thể hiện giá trị công suất phát của các tổ máy và điện áp tại mỗi nút thu được bởi thuật toán CF-PSO tương ứng với bốn trường hợp nghiên cứu. Quan sát từ Hình 8 cho thấy, Trường hợp 3 mang lại mức cải thiện điện áp tại các nút cao nhất, trong khi Trường hợp 4 cho thấy mức cải thiện điện áp thấp nhất trong số các trường hợp nghiên cứu đã được mô tả trước đó. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng mục tiêu chính của nghiên cứu này là đạt được giá trị APL nhỏ nhất, chứ không phải là đạt được mức cải thiện điện áp cao nhất.



Hình 7. Công suất phát của các tổ máy xác định bởi CF-PSO trong 04 trường hợp nghiên cứu



Hình 8. Điện áp các nút trên lưới đạt được bởi CF-PSO trong 04 trường hợp nghiên cứu

Nghiệm tối ưu của bài toán đạt được bởi phương pháp CF-PSO được báo cáo trong Bảng 3.

Bảng 3. Nghiệm tối ưu tìm được bởi CF-PSO cho 4 trường hợp nghiên cứu

Tên biến	Trường hợp 1	Trường hợp 2	Trường hợp 3	Trường hợp 4
$P_{G,1} (MW)$	50,00	50,00	50,06	74,42
$P_{G,2} (MW)$	60,60	60,66	61,70	39,29
$P_{G,3} (MW)$	50,00	50,00	50,00	50,00
$P_{G,4} (MW)$	35,00	35,00	35,00	35,00
$P_{G,5} (MW)$	30,00	30,00	30,00	29,99
$P_{G,6} (MW)$	39,98	40,00	38,76	40,00
$V_{G,1} (V)$	1,10	1,10	1,10	0,95
$V_{G,2} (V)$	1,10	1,10	1,09	0,95
$V_{G,3} (V)$	1,08	1,08	1,08	0,95
$V_{G,4} (V)$	1,09	1,09	1,10	0,95
$V_{G,5} (V)$	1,10	1,08	1,10	0,95

$V_{G,6} (V)$	1,10	1,10	1,10	0,95
$ST_1 (\%)$	1,05	1,04	1,10	0,92
$ST_2 (\%)$	0,90	0,93	0,90	0,90
$ST_3 (\%)$	1,02	1,07	1,00	0,90
$ST_4 (\%)$	0,99	1,01	0,99	1,10
VT_{TCSC1}	0	29	0	16
$X_{TCSC1} (pu)$	0	0,80	0	0,80
VT_{SVC1}	0	0	21	30
$DL_{SVC1} (MVar)$	0	0	16,60	20
VT_{W1}	30	30	30	2
$P_{W1} (MW)$	10,00	10,00	10,00	10,00
VT_{W2}	19	24	24	4
$P_{W2} (MW)$	10,00	10,00	10,00	10
APL (MW)	2,18	2,26	2,12	5,31

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã thành công áp dụng thuật toán tối ưu bầy đàn (PSO) và một biến thể cải tiến từ thuật toán PSO với hệ số cơ giãn, CF-PSO, để giải bài toán tối ưu dòng công suất (OPF) với mục tiêu giảm thiểu tổn thất công suất tác dụng. Bốn trường hợp nghiên cứu khác nhau đã được xem xét, bao gồm sự tích hợp của nhà máy điện gió và các thiết bị bù như TCSC và SVC. Kết quả cho thấy CF-PSO vượt trội hơn PSO về cả độ ổn định và tốc độ hội tụ đến nghiệm tối ưu trong tất cả các kịch bản thử nghiệm. Sự vượt trội này được chứng minh thông qua giá trị hàm mục tiêu đạt được sau 50 lần chạy và đặc tuyến hội tụ tốt nhất của mỗi phương pháp. Mặc dù độ phức tạp của từng trường hợp nghiên cứu khác nhau do số lượng biến điều khiển cần tối ưu hóa khác nhau, CF-PSO vẫn thể hiện hiệu suất vượt trội so với PSO, cho thấy tính hiệu quả và độ tin cậy cao của phương pháp này.

Phân tích giá trị tổn thất công suất tác dụng (APL) cho thấy trường hợp 4, bao gồm nhà máy điện gió, TCSC và SVC, mang lại giá trị APL thấp nhất. Tuy nhiên, khi đánh giá mức độ cải thiện điện áp, trường hợp 3, kết hợp nhà máy điện gió và SVC, cho thấy mức độ cải thiện đáng kể nhất trong số bốn trường hợp nghiên cứu.

Lời cảm ơn: Bài báo này là sản phẩm của đề tài Cấp Bộ mã số B2024-SPK-08 dưới sự tài trợ của Bộ Giáo dục và Đào tạo Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Singh, R., & Powar, V. - The Future of Generation, Transmission, and Distribution of Electricity. In *The Advancing World of Applied Electromagnetics: In Honor and Appreciation of Magdy Fahmy Iskander* (pp. 349-383). Cham: Springer International Publishing (2024). https://doi.org/10.1007/978-3-031-39824-7_13
2. Singh, S. N. - *Electric power generation: transmission and distribution*. PHI Learning Pvt. Ltd (2008).
3. Phan, T. M., Nguyen, T. T., Duong, M. Q., & Nguyen, T. T. - Optimal design and operation of battery energy storage systems in renewable power plants to reach maximum total electric sale revenues. *Neural Computing and Applications* **36** (20) (2024) 12061-12082. <https://doi.org/10.1007/s00521-024-09769-w>.
4. Mohamed, S. A., Anwer, N., & Mahmoud, M. M. - Solving optimal power flow problem for IEEE-30 bus system using a developed particle swarm optimization method: towards fuel cost minimization. *International Journal of Modelling and Simulation* **45** (1) (2025) 307-320. <https://doi.org/10.1080/02286203.2023.2201043>.

5. Chen, X., Sun, A., Shi, W., & Li, N. - Carbon-aware optimal power flow. *IEEE Transactions on Power Systems* (2024). <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2024.3514516> .
6. Farhat, M., S. Kamel, A.M. Atallah and B. Khan - Developing a Marine Predator Algorithm for Optimal Power Flow Analysis considering Uncertainty of Renewable Energy Sources. *International Transactions on Electrical Energy Systems* **2022**, 1–16. <https://doi.org/10.1155/2022/3714475>
7. Suresh, G., D. Prasad and M. Gopila - An efficient approach based power flow management in smart grid system with hybrid renewable energy sources. *Renewable Energy Focus* **39** (2021) 110-122. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2021.07.009>
8. He, H., E. Du, N. Zhang, C. Kang and X. Wang - Enhancing the power grid flexibility with battery energy storage transportation and transmission switching. *Applied Energy* **290** (2021) 116692. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116692>
9. Sun, R. and X. Dang - Application of Multimedia Quality Evaluation Relying on Intelligent Robot Numerical Control Technology in New Energy Power Generation System. *Journal of Robotics* **2023**, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2023/7480917>
10. Khaloie, H., Dolanyi, M., Toubeau, J. F. and Vallée, F. - Review of Machine Learning Techniques for Optimal Power Flow. *Applied Energy* **388** (2025) 125637. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125637>
11. Babiker, A., Ahmad, S. S., Ahmed, I., Khalid, M., Abido, M. A., & Al-Ismail, F. S. - Optimal Power Flow: A Review of State-of-the-Art Techniques and Future Perspectives. *IEEE Access* 2025. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3556168>
12. Maheshwari, A., Sood, Y. R., & Jaiswal, S. - A Comprehensive Review on Stochastic Optimal Power Flow Problems and Solution Methodologies. *IETE Technical Review* **41** (2) (2024) 147-174. <https://doi.org/10.1080/02564602.2023.2224750>
13. Hassan, H.A. and M. Zellagui - Application of Grey Wolf Optimizer Algorithm for Optimal Power Flow of Two-Terminal HVDC Transmission System. *Advances in Electrical and Electronic Engineering* **15** (5) (2018). <https://doi.org/10.15598/aeec.v15i5.2110>
14. Pham, L.H., H.B. Dinh and T.T. Nguyen - Optimal power flow for an integrated wind-solar-hydro-thermal power system considering uncertainty of wind speed and solar radiation. *Neural Computing and Applications* **34** (13) (2022) 10655–10689. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07000-2>
15. Nguyen, T.T., H.D. Nguyen and M.Q. Duong - Optimal Power Flow Solutions for Power System Considering Electric Market and Renewable Energy. *Applied Sciences* **13** (5) (2023) 3330. <https://doi.org/10.3390/app13053330>
16. Chen, Y., D. Wang, J. Li, H. Fan, J. Li, Y. Luo And L. Li - A SSSC optimal configuration method to enhance available transfer capability considering multi-wind farm access. *IET Renewable Power Generation* **17** (16) (2023) 3777-3792. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12879>
17. Belkacem, M. - A novel tree seed algorithm for optimal reactive power planning and reconfiguration based STATCOM devices and PV sources. *SN Applied Sciences* **3** (3) (2021) 336. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04338-5>
18. Monal, P., L. Heistrene and V. Pandya - Optimal Power Flow in Power Networks with TCSC Using Particle Swarm Optimization Technique. In: Mehta A, Rawat A, Chauhan P (eds). *Advances in Electric Power and Energy Infrastructure*. Springer Singapore: Singapore, 2020, pp 91–101. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0206-4_8
19. Mahdad, B. - Improvement optimal power flow solution considering SVC and TCSC controllers using new partitioned ant lion algorithm. *Electrical Engineering* **102** (4) (2020) 2655–2672. <https://doi.org/10.1007/s00202-020-01033-3>
20. Nguyen, T.T. and F. Mohammadi - Optimal Placement of TCSC for Congestion Management and Power Loss Reduction Using Multi-Objective Genetic Algorithm. *Sustainability* **12** (7) (2020) 2813. <https://doi.org/10.3390/su12072813>
21. Alajrash, B. H., Salem, M., Swadi, M., Senjyu, T., Kamarol, M., & Motahhir, S. - A

- Comprehensive Review of FACTS Devices in Modern Power Systems: Addressing Power Quality, Optimal Placement, and Stability with Renewable Energy Penetration. *Energy Reports* **11** (2024) 5350-5371. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3363237>
22. Aljumah, A.S., M.H. Alqahtani, A.M. Shaheen and A.M. Elsayed - Enhancing power system performance via TCSC Technology allocation with enhanced gradient-based optimization algorithm. *IEEE Access* **12** (2024) 97806-97832. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3428328>
 23. Pereira, J.S., E.A. Belati, C.F. Do Nascimento, P.F. Silva and P. Rossoni - A mathematical programming approach for allocation and analysis of TCSC in power transmission systems. *IEEE Latin America Transactions* **20** (7) (2022) 2001-2009. <https://doi.org/10.1109/TLA.2021.9827473>
 24. Le, L.D., D.N. Vo, S.T. Huynh, T.M. Nguyen-Hoang and P. Vasant - A Hybrid Differential Evolution and Harmony Search for Optimal Power Flow With FACTS Devices. *International Journal of Operations Research and Information Systems* **11** (3) (2020) 39–65. <https://doi.org/10.4018/IJORIS.2020070103>
 25. Jagtap, P. and V.K. Chandrakar - Advanced UPFC Controllers to Improve Transient and Dynamic Stability of Power System. In *Journal of Physics: Conference Series* **2763** (1) (2024) 012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2763/1/012003>
 26. Anil, N., G. Balaji, G. Sireesha and V. Naresh - Optimizing size and location of UPFC for enhanced system dynamic stability using hybrid approach. *Computers and Electrical Engineering* **120** (2024) 109777. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2024.109777>
 27. Gupta, V.K. and R. Babu - Reactive power planning problem considering multiple type of FACTS in power systems. *International Journal of System Assurance Engineering and Management* **13** (4) (2022) 1885-1894. <https://doi.org/10.1007/s13198-021-01588-9>
 28. Mohamed, A. A., Kamel, S., Hassan, M. H., Kamalov, F., & Safaraliev, M. - Optimizing FACTS Devices Location and Sizing in Integrated Wind Power Networks Using Tuna Swarm Optimization Algorithm. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* **149** (13) (2024) 7135-7153. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-12909-y>
 29. Nkan, I.E., E.E. Okpo and A.B. Inyang - Enhancement of power systems transient stability with TCSC: a case study of the Nigerian 330 kV, 48-bus network. *International Journal of Multidisciplinary Research and Analysis* **6** (10) (2023) 4828-4841. <https://doi.org/10.47191/ijmra/v6-i10-37>
 30. Kien, L.C., T.T. Bich Nga, T.M. Phan and T.T. Nguyen - Coot Optimization Algorithm for Optimal Placement of Photovoltaic Generators in Distribution Systems Considering Variation of Load and Solar Radiation. *Mathematical Problems in Engineering* **2022**, 1–17. <https://doi.org/10.1155/2022/2206570>
 31. Kennedy, J.; Eberhart, R. - Particle swarm optimization. *Proc IEEE Int Conf Neural Networks*, 1942–8 1995. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
 32. Tarekegn Nigatu, D., Gemechu Dinka, T., & Lulseged Tilahun, S. - Convergence Analysis of Particle Swarm Optimization Algorithms for Different Constriction Factors. *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics* **10** (2024) 1304268. <https://doi.org/10.3389/fams.2024.1304268>
 33. Ngei, U. M., Nyete, A. M., Moses, P. M., & Wekesa, C. - Optimal Sizing and Placement of STATCOM, TCSC and UPFC Using a Novel Hybrid Genetic Algorithm-Improved Particle Swarm Optimization. *Heliyon* **10** (23) (2024) e40682. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40682>

ABSTRACT

ACTIVE POWER LOSS MINIMIZATION OF TRANSMISSION POWER SYSTEMS WITH WIND POWER PLANTS AND FACTS DEVICES

Nguyen Anh Tuan¹, Le Chi Kien¹, Cao Thi Xuan Thuy², Nguyen Trung Thang^{3*}

¹*Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Ho Chi Minh City, Vietnam*

²*Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Vietnam Aviation Academy, Vietnam*

³*Power System Optimization Research Group, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Ton Duc Thang University, Ho Chi Minh City, Vietnam*

*Email: nguyentrongthang@tdtu.edu.vn

This study focuses on solving the optimal power flow (OPF) problem on the transmission system with the objective of minimizing the active power loss (APL). To achieve the proposed objective, the study applies the Particle swarm optimization (PSO) algorithm and the constraint factor-based Particle swarm optimization (CF-PSO). To evaluate the effectiveness of the two methods in solving the OPF problem on an IEEE 30-node grid with the integration of renewable energy sources and reactive power compensation devices such as TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator) and SVC (Static Power Compensator) using four different case studies. These cases consider the impact of integrating the components (renewable energy plants, TCSC, SVC) into the grid independently and together. Changing the system configuration in these cases leads to a significant change in the solution space of the problem, creating an ideal testbed to compare the performance of PSO and CF-PSO. The results show that CF-PSO outperforms the original PSO in both aspects: the stability of the optimization process and the speed of convergence to the optimal solution. Specifically, CF-PSO can reduce the active power loss by 4.8%, 6.6%, 0.9% and 0.4% compared to PSO in the four studied cases, respectively. These results confirm that CF-PSO is an effective and powerful optimization tool for the OPF problem in modern power systems, especially when renewable energy sources and compensation devices are involved. This study provides an insight into the potential of CF-PSO in solving complex optimization problems in the energy sector.

Keywords: Active power loss minimization, transmission power grids, wind energy, FACTS devices, particle swarm optimization.