

CHIẾN LƯỢC TỐI ƯU ĐA MỤC TIÊU NHẪM TĂNG CƯỜNG HIỆU SUẤT HỆ THỐNG ĐIỆN PHÂN PHỐI KHI TÍCH HỢP NGUỒN ĐIỆN PHÂN TÁN

MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION STRATEGY FOR ENHANCING DISTRIBUTION POWER SYSTEM EFFICIENCY WITH INTEGRATED DISTRIBUTED GENERATION

Tôn Ngọc Triều*, Lê Minh Phong, Lê Minh Tân

Trường Cao đẳng Công nghệ Thủ Đức, Tp. Thủ Đức, Tp. Hồ Chí Minh, Việt Nam¹

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: tonngoctrieu@gmail.com

(Nhận bài / Received: 09/01/2025; Sửa bài / Revised: 13/3/2025; Chấp nhận đăng / Accepted: 14/3/2025)

DOI: 10.31130/ud-jst.2025.016

Tóm tắt - Nghiên cứu này đề xuất một giải pháp nhằm hạn chế tổn thất công suất và tăng cường hiệu quả hoạt động của hệ thống điện phân phối (DPS) thông qua việc bố trí hợp lý các nguồn điện phân tán (DG). Chiến lược này tổng hợp nhiều yếu tố quan trọng như giảm tổn thất công suất, cải thiện độ ổn định điện áp, tối ưu hệ số tải và hệ số công suất, giúp DPS vận hành hiệu quả hơn. Thuật toán Raccoon Optimization Algorithm (ROA) là một phương pháp tối ưu meta-heuristic mới, được áp dụng và đối chiếu với các thuật toán như Firefly Algorithm (FA), Moth Flame Optimization (MFO), Salp Swarm Algorithm (SSA), và Whale Optimization Algorithm (WOA). Kết quả thử nghiệm trên lưới điện 33 nút và 69 nút chứng tỏ rằng, ROA có ưu thế vượt trội cả về hiệu suất và độ tin cậy. Nghiên cứu này khẳng định ROA là một biện pháp hữu hiệu, có tiềm năng ứng dụng cao trong các DPS hiện đại tích hợp DG.

Từ khóa - Nguồn điện phân tán (DG); thuật toán Raccoon Optimization Algorithm (ROA); hệ thống điện phân phối (DPS); đa mục tiêu; tổn thất công suất

1. Giới thiệu

Sự gia tăng không ngừng của nhu cầu điện năng, cùng với các yêu cầu khắt khe về độ tin cậy và hiệu suất đã thúc đẩy việc tích hợp các DG vào các DPS. DG không chỉ nâng cao khả năng cung cấp điện cục bộ mà còn cải thiện hiệu suất của DPS, tăng cường độ ổn định vận hành và hỗ trợ điều phối nguồn điện hiệu quả hơn tại các khu vực có phụ tải cao. Tuy nhiên, khi tích hợp DG, một thách thức lớn là tối ưu các DG đạt hiệu quả toàn diện, không chỉ tối thiểu tổn thất công suất (P_{loss}) mà còn tăng cường sự ổn định điện áp (σ_{voltage}), hệ số tải (LF) và hệ số công suất (PF). Điều này cần phải có một chiến lược tối ưu đa mục tiêu nhằm đảm bảo các yếu tố vận hành trọng yếu đều được xem xét để DPS hoạt động hiệu quả nhất [1].

Trước đây, nhiều thuật toán tối ưu meta-heuristic đã được sử dụng để nâng cao hiệu suất vận hành khi tích hợp DG trong DPS. Một số thuật toán như Particle Swarm Optimization (PSO) và Genetic Algorithm (GA) đã thực hiện có hiệu quả nhất định, đặc biệt hiệu quả trong việc giảm P_{loss} hoặc tối ưu σ_{voltage} [2]. Gần đây, một số thuật toán như Moth-Flame Optimization (MFO) [3], Whale Optimization Algorithm (WOA) [4], và Firefly

Abstract - This paper introduces an optimization strategy aimed at minimizing power losses and enhancing the operational efficiency of the distribution power system (DPS) through the proper allocation of distributed generation (DG). This strategy integrates key factors such as power loss reduction, voltage stability improvement, load factor optimization, and power factor enhancement, ensuring more efficient DPS operation. The Raccoon Optimization Algorithm (ROA), a newly developed meta-heuristic optimization method, is applied and compared with algorithms such as Firefly Algorithm (FA), Moth-Flame Optimization (MFO), Salp Swarm Algorithm (SSA), and Whale Optimization Algorithm (WOA). Experimental results on 33-bus and 69-bus systems demonstrate that ROA outperforms other methods in both efficiency and reliability. This study confirms that ROA is an effective solution with high potential for application in modern DPS integrating DG.

Key words - Distributed generation (DG); Raccoon Optimization Algorithm (ROA); distribution power system (DPS); multi-objective; power losses

Algorithm (FA) [5] đã được sử dụng và mang lại các kết quả đáng khích lệ trong việc tối ưu một số chỉ số riêng lẻ của DPS. Tuy nhiên, một số phương pháp này vẫn còn hạn chế trong việc tối ưu đồng thời nhiều yếu tố vận hành, dẫn đến giải pháp chưa thực sự toàn diện. Do đó, cần một hướng tiếp cận mới có khả năng xử lý các bài toán phức tạp liên quan đến nhiều tiêu chí nhằm nâng cao hiệu suất của DPS [6].

Bài viết này giới thiệu một phương pháp tìm kiếm đa mục tiêu dựa trên Raccoon Optimization Algorithm (ROA) [7] nhằm đáp ứng đồng thời các yêu cầu vận hành của DPS khi tích hợp DG. ROA mô phỏng từ quá trình tiến hóa của loài gấu mèo, có khả năng cân bằng giữa khai thác cục bộ và thăm dò toàn cục, giúp phương pháp tìm kiếm đạt hiệu quả cao để xử lý các vấn đề tối ưu hóa liên quan đến nhiều tiêu chí [7]. Kết quả mô phỏng trên hệ thống điện 33 nút và 69 nút cho thấy, ROA có ưu điểm nổi trội so với các phương pháp khác, mang lại giải pháp tối ưu hơn giúp hệ thống DPS hoạt động hiệu quả hơn.

2. Mô tả bài toán

Việc tích hợp DG không chỉ là một thách thức kỹ thuật mà còn chịu tác động từ nhu cầu tiêu thụ và các chính

¹ Thu Duc College of Technology, Thu Duc City, Ho Chi Minh City, Vietnam (Ton Ngọc Triều, Lê Minh Phong, Lê Minh Tân)

sách năng lượng hiện hành. Người dùng quyết định đầu tư DG dựa trên lợi ích kinh tế cũng như hỗ trợ từ chính phủ [8], nhưng nếu không được quy hoạch hợp lý thì DG có thể gây mất cân đối trong DPS và tác động xấu đến hiệu quả vận hành. Nghiên cứu này cung cấp một hướng tiếp cận lắp đặt DG nhằm cân bằng giữa lợi ích riêng lẻ và hệ thống, phù hợp với các chính sách năng lượng tái tạo (RES). Các nước như Đức, Mỹ, Nhật Bản đã triển khai FiT, net-metering để khuyến khích DG [9]. Tại Việt Nam, quy hoạch điện VIII đặt mục tiêu phát triển vượt bậc DG, đặc biệt là khai thác tiềm năng của năng lượng mặt trời và điện gió quy mô nhỏ.

Vấn đề này được coi là một bài toán tối ưu, trong đó các chỉ số điều phối hệ thống phải đạt mức tốt nhất có thể, đảm bảo sự cân bằng giữa tính hiệu quả về mặt tài chính và các quy định kỹ thuật. Bài toán này thuộc nhóm tối ưu toàn diện, với yêu cầu quan trọng bao gồm giảm P_{loss} , cải thiện σ_{voltage} nâng cao LF và tối ưu PF của DPS. Hàm mục tiêu tiếp cận một cách toàn diện để tối ưu DPS khi có sự tích hợp DG. Bằng cách xem xét đồng thời kết hợp các yếu tố cốt lõi nhằm tăng độ tin cậy và tăng hiệu quả vận hành của DPS, đồng thời đáp ứng tốt cả tiêu chí kỹ thuật lẫn kinh tế. Hàm mục tiêu đa tiêu chí F được tối ưu thông qua P_{loss} nhằm giảm thiểu tổn thất để tăng hiệu suất hệ thống, σ_{voltage} để duy trì sự ổn định điện áp, LF để tăng hệ số tải để phân bổ phụ tải đồng đều và PF duy trì hệ số công suất cao.

$$F = w_1 P_{\text{loss}} + w_2 \sigma_{\text{voltage}} + w_3 (1 - LF) + w_4 (1 - PF) \quad (1)$$

+ P_{loss} là tổn thất công suất

$$P_{\text{loss}} = \sum_{k=1}^m R_k I_k^2 \quad (2)$$

trong đó, m biểu thị tổng số nhánh, R_k tượng trưng cho điện trở tại nhánh k và I_k là cường độ dòng điện chạy qua nhánh k.

+ σ_{voltage} là độ lệch về điện áp

$$\sigma_{\text{voltage}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2}{N}} \quad (3)$$

trong đó, \bar{V} : Giá trị trung bình điện áp tại các nút; V_i là điện áp tại nút i; N là tổng số nút.

+ LF là hệ số tải

$$LF = \frac{P_{\text{avg}}}{P_{\text{max}}} \quad (4)$$

trong đó, P_{avg} đại diện cho mức tải trung bình, và P_{max} biểu thị công suất tải cực đại.

+ PF là hệ số công suất

$$PF = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (5)$$

+ w_1, w_2, w_3, w_4 là các trọng số tương ứng với mức độ ưu tiên của từng yếu tố.

Hàm mục tiêu này được lựa chọn vì mang lại một cách tiếp cận toàn diện trong tối ưu tích hợp DG vào DPS. Các chỉ tiêu quyết định như giảm P_{loss} đảm bảo độ ổn định σ_{voltage} đảm bảo tính hiệu quả, LF và nâng cao PF đều được xem xét trong hàm mục tiêu. Việc giảm P_{loss} không chỉ hạn

chế lãng phí năng lượng mà còn nâng cao hiệu suất của DPS, trong khi đảm bảo σ_{voltage} giúp bảo toàn chất lượng điện năng và bảo vệ thiết bị. Tối ưu LF giúp phân bổ tải đồng đều, giảm áp lực lên hệ thống và kéo dài tuổi thọ thiết bị. Nâng cao PF giúp giảm tổn thất và cải thiện khả năng truyền tải điện. Hơn nữa, hàm mục tiêu này kết hợp các yếu tố trên để đạt được sự cân bằng giữa hiệu quả và chất lượng điện năng của DPS. Tóm lại, hàm mục tiêu này góp phần cải thiện hiệu suất và độ tin cậy của DPS. Để thỏa mãn ràng buộc dòng điện và điện áp, sẽ sử dụng hàm phạt để đánh giá các giải pháp không thỏa mãn ràng buộc. Nếu một giải pháp vi phạm bất kỳ điều kiện ràng buộc nào thì hàm fitness sẽ tăng giá trị để loại giải pháp đó ra khỏi tập giải pháp tối ưu.

- Điện áp tại các nút: $V_{\text{min}} \leq V_i \leq V_{\text{max}}, \forall i \in N$

- Dòng điện qua các nhánh: $I_j \leq I_{\text{max}}, \forall j \in B$

- Ràng buộc công suất DG:

$$0 \leq P_{\text{DG}}^k \leq P_{\text{DG,max}}^k \quad \forall k \in K$$

- Ràng buộc cân bằng công suất:

$$\sum_{i=1}^N P_{\text{load}}^{(i)} = \sum_{k=1}^K P_{\text{DG}}^{(k)} + P_{\text{gird}} - P_{\text{load}}$$

- Ràng buộc về vị trí của DG: Các DG phải được đặt tại các nút cho phép với số lượng và vị trí phù hợp.

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{nếu DG đặt tại nút } i \\ 0 & \text{nếu không có DG tại nút } i \end{cases}$$

Trong đó, P_{DG}^k là công suất của DG thứ k; $P_{\text{DG,max}}^k$ là công suất tối đa mà DG thứ k có thể phát; $\sum_{i=1}^N P_{\text{load}}^{(i)}$ là công suất tải tại nút I; $\sum_{k=1}^K P_{\text{DG}}^{(k)}$ là công suất của DG thứ k; P_{gird} là công suất từ lưới điện chính và P_{load} là tổng tổn thất.

Các ràng buộc này không chỉ giúp đảm bảo rằng, bài toán tối ưu đáp ứng các mục tiêu mong muốn, mà còn tuân thủ nghiêm ngặt các giới hạn kỹ thuật, yêu cầu an toàn và điều kiện vận hành của DPS. F là hàm mục tiêu chính ở công thức (1); λ là hệ số phạt; Penalty là tổng các hàm phạt áp dụng khi vi phạm ràng buộc. Hàm fitness như sau:

$$\text{Fitness} = F + \lambda \sum \text{Penalty} \quad (6)$$

3. Ứng dụng ROA trong tối ưu DPS

ROA là một thuật toán tối ưu lấy từ hành vi sinh tồn và tìm kiếm thức ăn của loài gấu mèo (raccoon). Thuật toán này cân bằng giữa việc mở rộng tìm kiếm và khai thác chuyên sâu, giúp tìm ra phương án tối ưu một cách hiệu quả.

3.1. Thuật toán ROA

1. Ban đầu, một tập hợp gồm nhiều phương án khác nhau được ngẫu nhiên khởi tạo

Mỗi cá thể sẽ đại diện cho một giải pháp bố trí vị trí và công suất DG trong DPS. Các cá thể này mô phỏng đặc điểm của gấu mèo, mang những thuộc tính quan trọng như vị trí lắp đặt và mức công suất của từng DG, đảm bảo cho vấn đề đa dạng của không gian tìm kiếm và tạo điều kiện cho quá trình tối ưu tiếp theo.

2. Tìm kiếm và khai thác không gian giải pháp: thuật toán bao gồm hai giai đoạn:

- Khám phá: một nhóm cá thể trong quần thể di chuyển đến một số vị trí mới, mô phỏng hành vi tìm kiếm thức ăn của gấu mèo. Quá trình này nhằm mở rộng phạm vi tìm kiếm, giúp xác định các vùng tiềm năng chứa lời giải tối ưu và hạn chế nguy cơ mắc kẹt tại cực trị địa phương.

- Khai thác: các cá thể còn lại duy trì vị trí của mình nhưng tiến hành tìm kiếm cục bộ xung quanh các cá thể có lời giải tốt nhất đã xác định trước đó. Điều này cho phép ROA tập trung vào những khu vực tiềm năng cao, cải thiện chất lượng lời giải và tối ưu kết quả một cách hiệu quả hơn.

3. Cập nhật vị trí và đánh giá hàm mục tiêu

Mỗi cá thể trong quần thể tạo ra giải pháp mới, được đánh giá dựa trên hàm mục tiêu đã thiết lập, bao gồm việc tối ưu các thông số P_{loss} , $\sigma_{voltage}$, LF và PF. Kết quả đánh giá được dùng để cập nhật giá trị hàm F của từng cá thể, giúp tìm ra giải pháp tối ưu hơn.

4. Lựa chọn và duy trì giải pháp tốt nhất

Trong quá trình đánh giá các phương án, thuật toán sẽ lựa chọn những cá thể có giá trị hàm mục tiêu cao nhất và tiếp tục duy trì trong các vòng lặp sau. Cách tiếp cận này giúp ROA duy trì lợi thế tìm kiếm mạnh nhất, tận dụng hiệu quả dữ liệu để thu hẹp phạm vi tìm kiếm vào những khu vực có tiềm năng tối ưu nhất.

5. Điều kiện dừng

Thuật toán tiếp tục thực hiện quá trình tìm kiếm và khai thác cho đến khi đạt điều kiện hội tụ, vượt quá số vòng lặp giới hạn hoặc không còn cải thiện đáng kể về kết quả tối ưu. Khi tiêu chí dừng được đáp ứng, thuật toán xác định phương án bố trí DG hợp lý cả về vị trí và công suất, đảm bảo yêu cầu kỹ thuật và nâng cao hiệu quả vận hành của DPS.

3.2. Áp dụng ROA vào bài toán tối ưu DPS

- ROA sử dụng **hàm mục tiêu đa tiêu chí**, tập trung vào việc giảm P_{loss} đồng thời giúp cải thiện $\sigma_{voltage}$, LF và PF. Phương pháp này giúp DPS hoạt động hiệu quả hơn, đảm bảo các tiêu chí về độ tin cậy và chất lượng điện năng.

- Trong mỗi vòng lặp, ROA sẽ đánh giá và kiểm tra các giới hạn kỹ thuật liên quan đến việc kiểm soát điện áp, dòng điện, công suất DG và cân bằng công suất giúp đảm bảo phương án tối ưu không vi phạm giới hạn vận hành của DPS

- ROA mang lại ưu thế đáng kể trong tối ưu DPS, nhờ khả năng cân bằng khai thác và thăm dò, giúp tìm ra giải pháp tối ưu mà không mắc kẹt tại cực trị cục bộ. Đồng thời, ROA xử lý hiệu quả các bài toán đa mục tiêu phức tạp và dễ dàng triển khai trong nhiều mô hình khác nhau. Nhờ đó, việc bố trí DG bằng ROA giúp tối ưu vận hành trong DPS hiện đại.

4. Kết quả kiểm tra

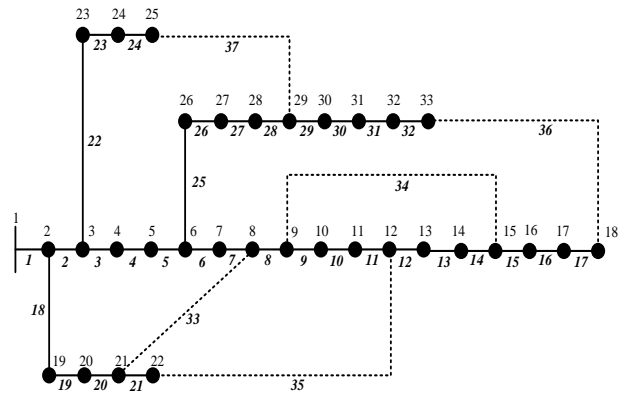
Bài toán tối ưu phương án bố trí DG trong DPS được phân tích dựa trên dữ liệu thử nghiệm thu được từ hai hệ thống 33 và 69 nút. ROA cho thấy, ưu thế về hiệu suất khi đối chiếu với WOA, MFO, SSA và FA. Các tham số đánh giá gồm P_{loss} , $\sigma_{voltage}$, LF và PF của DPS. Thử nghiệm cho

bài toán được thực thi trên phần mềm MATLAB, với công suất DG không vượt quá 2,0 MW.

Trong bài nghiên cứu này, các thuật toán được áp dụng bao gồm ROA, WOA, MFO, SSA, và FA với các thông số cơ bản giống nhau: kích thước (50), số vòng lặp (200), và bước nhảy (1, trừ WOA và MFO là 1,2 và 1,1). Tỷ lệ khám phá và khai thác được điều chỉnh tùy theo mỗi thuật toán, ROA và SSA là 40% - 60%, WOA là 30% - 70%, MFO là 35% - 65%, FA là 50% - 50%. Trọng số w_1, w_2, w_3, w_4 được thiết lập khác nhau, phù hợp cho mục tiêu của từng thuật toán.

4.1. Hệ thống điện phân phối 33 nút

Hệ thống điện phân phối 33 nút vận hành với điện áp danh định 12,66 kV, bao gồm tổng cộng 33 nút và 37 nhánh liên kết. Tổng công suất đạt 3,72 + j2,3 MVA. Hình 1 minh họa sơ đồ đơn tuyến, trong đó các thông số liên quan đến nhánh và nút như trong tài liệu [10].



Hình 1. Sơ đồ của DPS - 33 nút

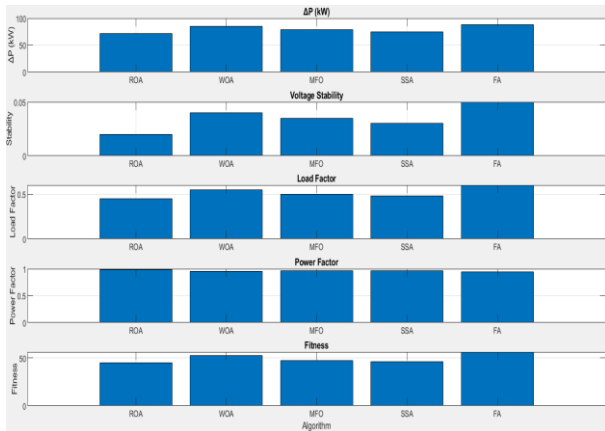
Từ kết quả thử nghiệm trên DPS-33 nút cho thấy ROA là thuật toán tối ưu tốt nhất trong hầu hết các tiêu chí được đánh giá. ROA có P_{loss} thấp nhất (71,46 kW), độ ổn định $\sigma_{voltage}$ tốt nhất (0,02), PF cao nhất (0,98) và giá trị hàm F thấp nhất (45,11). Điều này chứng minh rằng ROA có khả năng phân bổ DG hiệu quả, giúp giảm P_{loss} duy trì $\sigma_{voltage}$ và tối ưu PF. Cụ thể, ROA bố trí DG tại các vị trí 30; 14; 24, với mức công suất tương ứng là 1,1; 0,76; 1,2 MW, thể hiện sự hợp lý trong việc phân bổ DG.

Bảng 1. Kết quả tối ưu cho DPS - 33 nút

Thuật toán	Vị trí DG	P_{DG} (MW)	P_{loss} (kW)	$\sigma_{voltage}$	LF	PF
ROA	30; 14; 24	1,1; 0,76; 1,2	71,46	0,02	0,45	0,98
WOA	10; 22; 30	1,6; 1,5; 1,9	85,23	0,04	0,55	0,95
MFO	8; 17; 25	1,7; 1,6; 1,8	78,90	0,035	0,50	0,96
SSA	14; 19; 27	1,6; 1,7; 1,9	74,25	0,03	0,48	0,96
FA	3; 9; 18	1,5; 1,8; 1,7	88,45	0,05	0,60	0,94

Ở đây, LF được xác định dựa trên tỷ lệ giữa công suất tải trung bình và cực đại, phản ánh mức độ khai thác công suất của DPS. Mặc dù, FA đạt giá trị tối đa là 0,6, điều này không có nghĩa là hệ thống vận hành hiệu quả nhất. Trong bài toán tìm kiếm giải pháp tối ưu nhiều mục tiêu, việc tăng hệ số tải có thể ảnh hưởng đến các yếu tố quan trọng khác như mức tổn thất công suất hoặc độ ổn định điện áp. Do đó, ROA được đánh giá là phương pháp phù

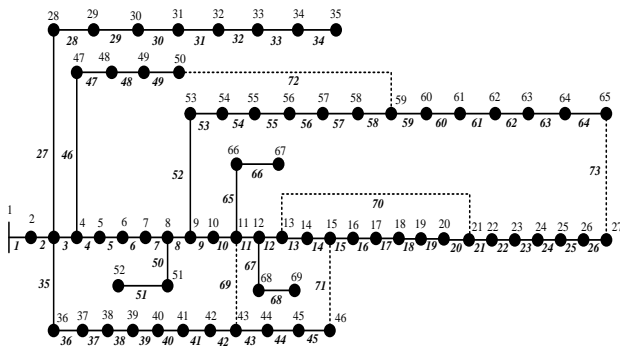
hợp hơn khi xem xét tổng thể các tiêu chí vận hành của DPS. Ngược lại, FA là thuật toán có hiệu suất thấp nhất với P_{loss} là cao nhất (88,45 kW), $\sigma_{voltage}$ kém nhất (0,05) và giá trị hàm F là cao nhất (56,32). Các thuật toán khác như WOA, MFO và SSA có hiệu suất trung bình, tuy nhiên, vẫn không thể vượt qua ROA về hiệu quả tổng thể. Những kết quả thu được chứng minh rằng, ROA cung cấp một phương án khả thi để tìm lời giải tối ưu cho DPS hiện đại. Tuy nhiên, các thuật toán như FA vẫn cần được cải tiến để nâng cao hiệu suất và cải thiện khả năng thích ứng với điều kiện vận hành của DPS.



Hình 2. So sánh các thông số của DPS - 33 nút

4.2. Hệ thống điện phân phối 69 nút

Hệ thống điện phân phối 69 nút hoạt động với điện áp danh định 12,66 kV, tổng công suất đạt 3,8 + j2,69 MVA. Hình 3 minh họa sơ đồ đơn tuyến của hệ thống, trong khi các thông số liên quan đến nhánh và nút được tham khảo từ tài liệu [10].



Hình 3. Sơ đồ của DPS - 69 nút

Bảng 2. Kết quả tối ưu cho DPS - 69 nút

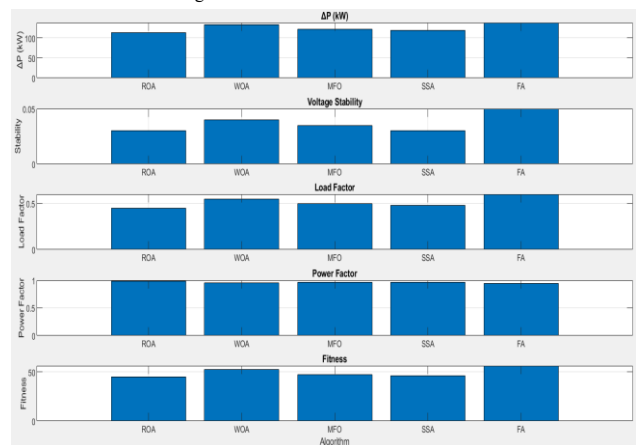
Thuật toán	Vị trí DG	P_{DG} (MW)	P_{loss} (kW)	$\sigma_{voltage}$	LF	PF
ROA	5; 13; 33	1,5; 1,7; 1,8	113,2	0,03	0,45	0,98
WOA	10; 22; 30	1,6; 1,5; 1,9	132,5	0,04	0,55	0,95
MFO	8; 17; 25	1,7; 1,6; 1,8	121,3	0,035	0,50	0,96
SSA	14; 19; 27	1,6; 1,7; 1,9	118,2	0,03	0,48	0,96
FA	3; 9; 18	1,5; 1,8; 1,7	137,8	0,05	0,60	0,94

Kết quả thử nghiệm trên DPS - 69 nút tiếp tục chứng minh rằng ROA là một trong những thuật toán tối ưu nhất, tương tự như trên DPS - 33 nút. Với P_{loss} là thấp nhất (113,2 kW) và sai số điện áp $\sigma_{voltage}$ nhỏ nhất (0,03), ROA

cho thấy khả năng phân bố DG hiệu quả, giúp nâng cao chất lượng vận hành DPS. Hệ số PF của ROA đạt 0,98, cho thấy phương án tối ưu không chỉ giúp giảm P_{loss} mà còn đảm bảo hiệu quả trong vận hành DPS. Ngược lại, FA có P_{loss} cao hơn (137,8 kW) và $\sigma_{voltage}$ lớn hơn (0,05). Điều này chứng tỏ, FA chưa thực sự đáp ứng tốt các bài toán phức tạp trên DPS quy mô lớn.

Các thuật toán khác như WOA, MFO và SSA có mức hiệu suất trung bình với P_{loss} lần lượt là 132,5 kW, 121,3 kW và 118,2 kW, nhưng vẫn không thể vượt qua kết quả đạt được từ ROA. Tuy nhiên, ROA tiếp tục chứng minh ưu thế vượt trội trên DPS - 69 nút nhờ khả năng hội tụ nhanh, giảm P_{loss} và tối ưu các chỉ số vận hành quan trọng. Những kết quả này đánh giá triển vọng ứng dụng của ROA trong DPS hiện đại, đặc biệt khi tích hợp DG với phương án hợp lý.

Bài toán phân bố DG một cách tối ưu lắp đặt DG trên DPS đã được giải quyết bằng ROA và so sánh với WOA, MFO, SSA, và FA. Kết quả thử nghiệm trên DPS - 33 nút và DPS - 69 nút cho thấy, ROA có lợi thế rõ rệt về mức P_{loss} thấp và $\sigma_{voltage}$ tốt nhất. Tuy nhiên, trong bài toán nhiều mục tiêu, mỗi thuật toán đều có sự cân nhắc riêng giữa các yếu tố. Cụ thể, mặc dù ROA đạt hiệu suất tốt về P_{loss} và $\sigma_{voltage}$, nhưng LF và công suất DG đưa vào lưới thấp hơn một số thuật toán khác. Điều này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc điều chỉnh trọng số theo yêu cầu thực tế của DPS. Vì vậy, ROA có thể là một lựa chọn phù hợp khi mục tiêu chính là giảm P_{loss} và duy trì ổn định điện áp. Trong đó, các thuật toán khác có thể hiệu quả hơn nếu ưu tiên hệ số tải hoặc mức công suất DG lớn. Sự khác biệt về vị trí tối ưu của DG giữa các thuật toán phản ánh đặc điểm tìm kiếm riêng của từng phương pháp. Để giảm thiểu nguy cơ tối ưu cục bộ, bài toán đã được kiểm chứng với nhiều lần chạy mô phỏng và ràng buộc kỹ thuật chặt chẽ. ROA cho thấy khả năng hội tụ tốt hơn khi tối ưu đồng thời P_{loss} và $\sigma_{voltage}$.



Hình 4. So sánh các thông số của DPS - 69 nút

5. Kết luận

Bài báo này đưa ra một chiến lược tối ưu hóa dựa trên ROA hướng đến nâng cao hiệu quả khai thác DPS có tích hợp DG. Kết quả thử nghiệm trên DPS - 33 nút và 69 nút chứng minh rằng, ROA đạt hiệu suất cao hơn so với các thuật toán WOA, MFO, SSA và FA trong việc giảm P_{loss} ,

cải thiện σ_{voltage} , tối ưu LF và PF. Thuật toán này cũng chứng minh khả năng tối ưu lắp đặt DG hợp lý, giúp tăng cường hiệu suất năng lượng và giảm tải hệ thống DPS. Phương pháp đề xuất mang lại triển vọng ứng dụng lớn trong các hệ thống DPS hiện đại. Trong tương lai, nghiên cứu theo hướng tích hợp hệ thống lưu trữ năng lượng hoặc điều chỉnh phương án tối ưu để thỏa mãn tốt hơn các tiêu chí về vận hành và an ninh năng lượng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] K. Kusakana, "Optimal operation control of a grid-connected photovoltaic - hybrid system", *IEEE PES PowerAfrica Conf. PowerAfrica 2016*, 2016, pp. 239 - 244, doi: 10.1109/PowerAfrica.2016.7556608.
- [2] W. Lip, J. Shiun, W. Shin, H. Hashim, and C. Tin, "Review of distributed generation (DG) system planning and optimisation techniques: Comparison of numerical and mathematical modelling methods", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 531–573, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.063.
- [3] M. Shehab, L. Abualigah, H. Al Hamad, H. Alabool, M. Alshinwan, and A. M. Khasawneh, "Moth-flame optimization algorithm: variants and applications", *Neural Comput. Appl.*, vol. 32, no. 14, pp. 9859–9884, 2020, doi: 10.1007/s00521-019-04570-6.
- [4] D. B. Prakash and C. Lakshminarayana, "Multiple DG placements in radial distribution system for multi objectives using Whale Optimization Algorithm", *Alexandria Eng. J.*, vol. 57, no. 4, pp. 2797–2806, 2018, doi: 10.1016/j.aej.2017.11.003.
- [5] S. Yang, "Firefly algorithms for multimodal optimization", *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 5792, pp. 169–178, 2009, doi: 10.1007/978-3-642-04944-6_14.
- [6] A. Baniasadi, D. Habibi, W. Al-saedi, M. A. S. Masoum, and C. K. Das, "Optimal sizing design and operation of electrical and thermal energy storage systems in smart buildings", *J. Energy Storage*, vol. 28, p. 101186, 2020. doi: 10.1016/j.est.2019.101186.
- [7] S. Z. Koohi, N. A. W. Abdul Hamid, M. Othman, and G. Ibragimov, "Raccoon Optimization Algorithm", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 5383–5399, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2882568.
- [8] International Energy Agency, "Renewables 2020", *Paris*, 2020, doi: 10.1002/peng.20026.
- [9] U. S. D. of E. (DOE), "Net Metering Policies by State – 2023", *U.S. Dep. Energy*, 2023.
- [10] N. T. Ton, 'Expansion of Distributed Generation and Energy Storage Systems in Distribution Networks', *Ph.D. dissertation, Department of Electrical Engineering*, Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Ho Chi Minh City, Vietnam, 2023.