

OPTIMIZATION OF DISTRIBUTED GENERATION FOR POWER LOSS AND PHASE IMBALANCE REDUCTION IN UNBALANCED THREE-PHASE DISTRIBUTION NETWORKS

Ton Ngoc Trieu

Thu Duc College of Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Received: 10/7/2025</p> <p>Revised: 26/11/2025</p> <p>Published: 26/11/2025</p>	<p>This paper presents a multi-objective optimization approach for planning distributed generation in unbalanced three-phase distribution networks. The proposed model considers real world asymmetries, including unequal line impedances, uneven load distribution, and generation units connected to single or two phases. The objective is to minimize active power losses, voltage deviations, and phase imbalance. The Weighted Interaction Optimizer is employed to solve the nonlinear and mixed-variable optimization problem. The method is tested on two benchmark power systems with 18-bus and 33-bus. Simulation results show that the proposed approach effectively reduces power losses and improves phase balancing, especially under highly unbalanced operating conditions. The model offers a practical and efficient solution for integrating renewable energy sources into modern distribution networks.</p>
<p>KEYWORDS</p> <p>Distributed generation</p> <p>Phase balancing</p> <p>INFO algorithm</p> <p>Power loss minimization</p> <p>Multi-objective optimization</p>	

TỐI ƯU HÓA NGUỒN ĐIỆN PHÂN TÁN NHẪM GIẢM TỶ SỐ CÔNG SUẤT VÀ ĐỘ LỆCH PHA TRONG HỆ THỐNG ĐIỆN PHÂN PHỐI BA PHA KHÔNG ĐỐI XỨNG

Tôn Ngọc Triều

Trường Cao đẳng Công nghệ Thủ Đức

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
<p>Ngày nhận bài: 10/7/2025</p> <p>Ngày hoàn thiện: 26/11/2025</p> <p>Ngày đăng: 26/11/2025</p>	<p>Bài báo này trình bày một phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu cho bài toán quy hoạch nguồn phát phân tán trong lưới điện phân phối ba pha không đối xứng. Mô hình đề xuất xét đến các bất đối xứng thực tế trong lưới điện như trở kháng đường dây không đồng đều, phân bố tải lệch pha và các nguồn phát một pha hoặc hai pha. Mục tiêu tối ưu là giảm tổn thất công suất, sai lệch điện áp và độ lệch pha. Giải thuật Weighted Interaction Optimizer được áp dụng để giải bài toán phi tuyến có biến hỗn hợp. Phương pháp được kiểm nghiệm trên hai lưới điện tiêu chuẩn gồm 18 nút và 33 nút. Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp đạt hiệu quả cao trong việc giảm tổn thất công suất và cải thiện cân bằng pha, đặc biệt trong điều kiện lưới không đối xứng. Mô hình là một giải pháp hiệu quả và thực tiễn cho việc tích hợp các nguồn năng lượng tái tạo vào lưới điện phân phối hiện đại.</p>
<p>TỪ KHÓA</p> <p>Nguồn phát phân tán</p> <p>Cân bằng pha</p> <p>Giải thuật INFO</p> <p>Giảm tổn thất công suất</p> <p>Tối ưu đa mục tiêu</p>	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.13206>

Email: tonngoctrieu@gmail.com

<http://jst.tnu.edu.vn>

377

Email: jst@tnu.edu.vn

1. Giới thiệu

Hệ thống điện phân phối (Distribution Networks - DN) hiện đại ngày càng chứng kiến sự gia tăng tích hợp của các nguồn phát phân tán (Distributed Generation - DG), đặc biệt là năng lượng tái tạo như điện mặt trời và điện gió [1]. Việc quy hoạch vị trí và công suất các nguồn DG hợp lý không chỉ góp phần giảm tổn thất công suất, cải thiện điện áp mà còn tăng cường hiệu quả vận hành hệ thống [2]. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu hiện nay giả định hệ thống là cân bằng ba pha, trong khi thực tế cho thấy đa số DN tại Việt Nam và nhiều quốc gia đang phát triển là ba pha không đối xứng, do ảnh hưởng từ tải không đồng đều, trở kháng dây dẫn khác nhau và kết nối DG một hoặc hai pha [3]. Sự bất đối xứng này gây ra hiện tượng lệch pha, sụt áp cục bộ và chất lượng điện năng kém, đặc biệt khi có sự hiện diện của DG nếu không được tối ưu đúng phương pháp [4]. Điều này đặt ra yêu cầu cần có một mô hình tối ưu mới có thể quy hoạch DG phù hợp với điều kiện ba pha không đối xứng, đồng thời đảm bảo giảm tổn thất, duy trì điện áp ổn định và cân bằng pha toàn hệ thống [5].

Trong nghiên cứu này, một bài toán tối ưu đa mục tiêu được xây dựng với ba mục tiêu chính: giảm tổn thất công suất, giảm sai lệch điện áp và giảm độ lệch pha, được đo lường thông qua chỉ số lệch pha UPI (Unbalance Performance Index). Giải thuật Weighted Interaction Optimizer (INFO) [6], một phương pháp tối ưu mới có khả năng khai thác khai phá hiệu quả, được sử dụng để giải bài toán phức tạp này. Mô hình được kiểm chứng trên các hệ thống IEEE 18 nút và 33 nút đã được mở rộng thành lưới ba pha không đối xứng. Kết quả được so sánh với nhiều giải thuật metaheuristic như Grey Wolf Optimizer (GWO) [7], Arithmetic Optimization Algorithm (AOA) [8], Marine Predators Algorithm (MPA) [9], Reptile Search Algorithm (RSA) [10] và Whale Optimization Algorithm (WOA) [11], nhằm đánh giá hiệu quả tương đối của phương pháp đề xuất.

Những đóng góp chính của bài báo này bao gồm: (i) đề xuất một mô hình tối ưu cho quy hoạch DG, trong đó có xét đến đặc tính bất đối xứng ba pha của DN thực tế; (ii) xây dựng hàm mục tiêu đa tiêu chí tích hợp ba yếu tố quan trọng là tổn thất công suất, sai lệch điện áp và độ lệch pha thông qua chỉ số UPI; (iii) lần đầu tiên áp dụng giải thuật INFO cho bài toán tối ưu DG trong môi trường ba pha không đối xứng; và (iv) thực hiện đánh giá toàn diện hiệu quả của mô hình đề xuất thông qua so sánh với nhiều giải thuật metaheuristic hiện đại trên hai hệ thống thử nghiệm chuẩn IEEE 18 và 33 nút đã được mở rộng thành lưới ba pha không đối xứng.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Mô hình lưới điện phân phối ba pha không đối xứng

Trong hệ thống điện ba pha không đối xứng, các thông số đường dây, phụ tải và DG được xác định riêng biệt cho từng pha. Trở kháng đường dây được biểu diễn dưới dạng ma trận 3×3 bao gồm tương tác giữa các pha:

$$Z_{ij} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Phụ tải tại mỗi nút cũng được mô tả theo từng pha:

$$S_{load,i} = [P_{ia} + jQ_{ia}, P_{ib} + jQ_{ib}, P_{ic} + jQ_{ic}] \quad (2)$$

Việc kết nối DG có thể theo từng pha riêng lẻ, hai pha hoặc ba pha, tạo nên sự bất đối xứng bổ sung cho hệ thống. Do đó, bài toán quy hoạch cần xét đồng thời cả vị trí, công suất và phân pha của từng nguồn DG. Với các biến quyết định:

- Vị trí DG: lựa chọn nút $i \in N$ để đặt nguồn DG.
 - Công suất DG theo từng pha: $P_i^{DG} = [P_{ia}^{DG}, P_{ib}^{DG}, P_{ic}^{DG}]$
 - Tổng số DG được cài đặt là n_{DG} , được xác định trước hoặc tối ưu cùng lúc.
- Bài toán tối ưu được xây dựng dưới dạng đa mục tiêu, kết hợp ba yếu tố chính:

$$(1) \text{ Tổn thất công suất toàn hệ thống: } P_{loss}^{total} = \sum_{(i,j) \in L} \sum_{ph \in \{a,b,c\}} I_{ij,ph}^2 \cdot R_{ij,ph} \quad (3)$$

$$(2) \text{ Sai lệch điện áp giữa các nút: } \sigma_V = \sqrt{\frac{1}{3N} \sum_{i=1}^N \sum_{ph} (V_{i,ph} - 1)^2} \quad (4)$$

$$(3) \text{ Độ lệch pha (UPI): } UPI = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{|I_{ia} - I_{ib}| + |I_{ib} - I_{ic}| + |I_{ic} - I_{ia}|}{3 \cdot I_{avg,i}} \right) \quad (5)$$

$$\text{Trong đó } I_{avg,i} = \frac{I_{ia} + I_{ib} + I_{ic}}{3} \quad (6)$$

$$\text{Hàm mục tiêu tổng hợp: } \min F = w_1 \cdot P_{\text{loss}}^{\text{total}} + w_2 \cdot UPI + w_3 \cdot \sigma_V \quad (7)$$

Trong đó w_1, w_2, w_3 là các hệ số trọng số phản ánh mức độ ưu tiên giữa các mục tiêu.

Để tính toán điện áp nút, dòng điện nhánh và tổn thất công suất trong môi trường ba pha không đối xứng, nghiên cứu này sử dụng phương pháp giải tích dựa trên thuật Backward/Forward [12], [13]. Phương pháp này cho phép tính toán luồng công suất hiệu quả trong hệ thống hình tia, xử lý các đặc tính bất đối xứng do tải lệch pha, trở kháng không đồng đều và DG nối một hoặc hai pha. Việc áp dụng thuật toán này giúp đảm bảo độ chính xác cao và thời gian tính toán nhanh, đặc biệt phù hợp khi tích hợp bên trong vòng lặp đánh giá của các giải thuật tối ưu metaheuristic.

Với các ràng buộc kỹ thuật:

- Điện áp từng pha $V_{\min} \leq V_{i,ph} \leq V_{\max} \quad \forall i, ph \in \{a, b, c\}, V_{\min} = 0,95, V_{\max} = 1,05$ (pu)
- Giới hạn công suất DG theo pha: $0 \leq P_{i,ph}^{DG} \leq P_{i,ph}^{\max}$
- Cân bằng công suất theo từng pha (phương trình dòng điện và điện áp ba pha).
- Ràng buộc cấu trúc lưới dạng hình tia
- Giới hạn số lượng DG: $n_{DG} \leq n_{DG}^{\max}$

2.2. Phương pháp giải quyết bài toán

Giải thuật INFO mô phỏng hành vi tương tác có trọng số giữa các cá thể trong quần thể. INFO sử dụng ba cơ chế chính: tương tác khai phá, tương tác khai thác, và tương tác cân bằng, nhằm duy trì độ đa dạng trong quần thể nhưng vẫn đảm bảo tốc độ hội tụ. Nhờ cấu trúc linh hoạt và khả năng điều chỉnh hướng tìm kiếm theo hiệu suất cá thể, INFO được đánh giá là phù hợp với các bài toán tối ưu phi tuyến, nhiều ràng buộc như quy hoạch DG trong hệ thống điện không đối xứng.

Trong bài toán này, mỗi cá thể trong quần thể được mã hóa dưới dạng một chuỗi chứa thông tin về vị trí và công suất pha của từng nguồn DG. Cấu trúc vector lời giải như sau:

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_{n_{DG}}, P_a^{(1)}, P_b^{(1)}, P_c^{(1)}, \dots, P_a^{(n_{DG})}, P_b^{(n_{DG})}, P_c^{(n_{DG})}] \quad (8)$$

Trong đó: $x_i \in \{1, 2, \dots, N\}$ là vị trí nút nơi đặt nguồn DG thứ i , $P_{ph}^{(i)}$ là công suất phát của DG i trên pha $ph \in \{a, b, c\}$, Tổng chiều dài vector tùy thuộc vào số lượng nguồn n_{DG} được xét.

Mỗi cá thể được đảm bảo nằm trong giới hạn công suất cho phép, và vị trí đặt không trùng lặp nếu bài toán yêu cầu. Thuật toán INFO được triển khai theo các bước chính như sau:

1. Khởi tạo quần thể: Tạo ngẫu nhiên một tập hợp các lời giải khả thi dựa trên ràng buộc hệ thống.
2. Đánh giá cá thể: Mỗi cá thể được tính toán giá trị hàm mục tiêu tổng hợp F , gồm tổn thất công suất, độ lệch điện áp và chỉ số bất đối xứng pha (UPI).
3. Tương tác giữa các cá thể: Trong giai đoạn khai phá, cá thể có chất lượng kém bị ảnh hưởng mạnh bởi các cá thể tốt hơn để mở rộng không gian tìm kiếm. Trong giai đoạn khai thác, các cá thể tốt cải thiện lời giải bằng cách trao đổi thông tin với các cá thể có chất lượng gần tương đương. Giai đoạn cân bằng được điều chỉnh động thông qua tham số thích nghi nhằm duy trì độ đa dạng và kiểm soát hội tụ.
4. Cập nhật quần thể: Các lời giải tốt nhất sau tương tác sẽ được chọn để hình thành thế hệ mới.
5. Dừng thuật toán: Thuật toán kết thúc khi đạt đến số vòng lặp tối đa hoặc khi không còn cải thiện.

Để đảm bảo lời giải thỏa mãn các ràng buộc kỹ thuật như giới hạn điện áp, công suất và cấu trúc hình tia, bài toán sử dụng hàm phạt hiệu chỉnh hàm mục tiêu. Hàm mục tiêu có dạng:

$$F' = F + \sum_k \lambda_k \cdot \max(0, g_k(X)) \quad (9)$$

Trong đó, $g_k(X)$ là độ vi phạm của ràng buộc thứ k , còn λ_k là hệ số phạt tương ứng. Cách tiếp cận này giúp thuật toán duy trì được sự linh hoạt trong tìm kiếm lời giải, nhưng vẫn đảm bảo tính khả thi về mặt kỹ thuật.

INFO đặc biệt phù hợp với bài toán quy hoạch DG trong lưới ba pha không đối xứng do khả năng xử lý biến rời rạc (vị trí DG), biến liên tục (công suất từng pha), và mô hình phi tuyến đa ràng buộc. Khả năng duy trì sự đa dạng quần thể và chiến lược cập nhật linh hoạt giúp INFO tránh được việc hội tụ sớm và tìm ra các cấu hình DG tối ưu có hiệu quả về tổn thất, điện áp và cân bằng pha.

Trong quá trình tối ưu, mỗi lời giải do giải thuật INFO sinh ra bao gồm thông tin vị trí và công suất mỗi pha của các nguồn DG. Để đánh giá chất lượng của từng lời giải, mô-đun giải tích công suất ba pha không đối xứng sẽ được gọi lặp lại trong mỗi vòng lặp của giải thuật tối ưu. Cụ thể, với mỗi cá thể, phương pháp Backward/Forward sẽ được thực hiện để tính toán điện áp tại các nút, tổn thất công suất, và UPI. Những giá trị này sẽ được tổng hợp thành hàm mục tiêu tổng hợp để thuật toán sử dụng trong việc cập nhật và lựa chọn cá thể tốt hơn ở các thế hệ tiếp theo. Việc tích hợp chặt chẽ giữa giải thuật tối ưu và mô hình mô phỏng giúp đảm bảo độ chính xác và tính khả thi của lời giải trong môi trường vận hành thực tế của hệ thống điện phân phối không đối xứng.

3. Kết quả và bàn luận

Bảng 1. Thông số mô phỏng của lưới IEEE 18 và 33 nút

Thông số	IEEE 18 nút	IEEE 33 nút
Số nút (bus)	18	33
Số nhánh (line)	17	32
Tổng công suất tải (P/Q)	1070 kW / 660 kVar	3715 kW / 2300 kVar
Phân bố tải pha A/B/C	40% / 35% / 25%	37% / 33% / 30%
Giới hạn điện áp	0,95 – 1,05 pu	0,95 – 1,05 pu
Số DG	2	2
Công suất tối đa mỗi DG	300 kW	300 kW

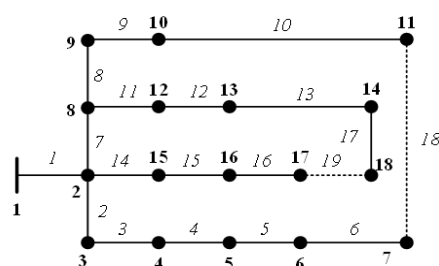
Bảng 2. Thông số cấu hình các giải thuật tối ưu

Thuật toán	Kích thước quần thể (Np)	Số vòng lặp tối đa (Gmax)	Tham số nội
INFO	30	200	Tự thích nghi
GWO	30	200	-
AOA	30	200	$\alpha = 5; \mu = 0,5$
MPA	30	200	$\beta = 1,5; r = 0,2$
RSA	30	200	$\eta = 2; Q = 1,5$
WOA	30	200	$a \in [2 \rightarrow 0]; b = 1$

Để đánh giá hiệu quả của mô hình và giải thuật đề xuất, hai hệ thống phân phối IEEE gồm 18 nút và 33 nút được sử dụng làm nền tảng mô phỏng. Cấu trúc ban đầu của lưới 18 nút được tham khảo từ [14], trong khi lưới 33 nút dựa trên mô hình được tham khảo từ [15]. Nhằm phản ánh đặc điểm vận hành thực tế trong các lưới điện ba pha không đối xứng, cả hai hệ thống được mở rộng bằng cách thiết lập trở kháng đường dây dưới dạng ma trận 3×3 với trở kháng pha A/B/C được phân theo tỷ lệ 1,0/1,05/1,1 để thử nghiệm, trong đó pha A được chọn làm chuẩn. Việc sử dụng các hệ số lớn hơn hoặc bằng 1,0 giúp đơn giản hóa mô hình và đảm bảo tính ổn định, đồng thời vẫn phản ánh rõ hiệu ứng bất đối xứng trong tính toán tổn thất và độ lệch pha. Phụ tải tại các nút cũng được điều chỉnh để phân bố không đều giữa ba pha, phù hợp với cấu hình ở Bảng 1. Mô hình sau khi mở rộng được sử dụng để đánh giá hiệu quả của thuật toán INFO so với các thuật toán metaheuristic phổ biến khác gồm: GWO, AOA, MPA, RSA và WOA. Tất cả các thuật toán đều được thiết lập với cùng kích thước quần thể và số vòng lặp tối đa nhằm đảm bảo tính công bằng trong so sánh. Các tham số cài đặt cụ thể được trình bày trong Bảng 2. Toàn bộ mô phỏng được thực hiện trên nền MATLAB R2021b.

3.1. Kết quả trên hệ thống IEEE 18 nút

LĐPP 18 nút có cấp điện áp danh định 12,6 kV, với sơ đồ đơn tuyến được trình bày như trong Hình 1 [14]. Hệ thống bao gồm 17 nút phụ tải và một nút nguồn, được cấu hình thành lưới hình tia điển hình, có đặc điểm bất đối xứng giữa các pha về cả phụ tải và trở kháng đường dây. Dữ liệu phụ tải được phân bố không đều giữa ba pha, với tổng công suất danh định là 1070 kW và 660 kVar, chia theo tỷ lệ 40% pha A, 35% pha B, 25% pha C.



Hình 1. LĐPP 18 nút

Bảng 3 trình bày kết quả tối ưu từ các thuật toán, gồm vị trí đặt nguồn phát phân tán, công suất theo pha, tổn thất công suất, độ lệch điện áp và chỉ số lệch pha. Trên lưới 18 nút, INFO cho kết quả vượt trội ở cả ba tiêu chí: tổn thất thấp nhất (22,45 kW), giảm từ 5,9% đến 10,3% so với các thuật toán khác; sai lệch điện áp trung bình thấp (0,0172 pu), cho thấy độ ổn định cao; và chỉ số lệch pha nhỏ nhất (0,0441), thấp hơn đáng kể so với RSA (0,0592). Về vị trí, hầu hết các thuật toán đều chọn nút 6 và 15, trong đó INFO và AOA đồng thuận lựa chọn cặp nút trung tâm này, phù hợp với cấu trúc tải. Khác biệt chính nằm ở phân bố công suất: INFO ưu tiên phát nhiều hơn tại pha A và C – hai pha chịu tải cao hơn. Tại nút 6, pha A đạt 290 kW, lớn hơn pha B (240 kW); tại nút 15, pha A là 260 kW so với 210 kW ở pha B. Trong khi đó, RSA và MPA phát công suất thấp hơn, khiến hiệu quả bù lệch và giảm tổn thất kém hơn. GWO và WOA phân bố công suất đều nhưng không đủ mạnh để xử lý mất cân bằng tại các nhánh tải lớn.

Bảng 3. Kết quả tối ưu cho hệ thống 18 nút không cân bằng

Thuật toán	Vị trí DG	Công suất DG (kW):			Tổn thất (kW)	Sai lệch áp (pu)	UPI
		Pa/Pb/Pc					
INFO	6, 15	290/240/270, 260/210/200			22,45	0,0172	0,0441
GWO	7, 14	270/230/250, 240/190/190			24,13	0,0211	0,0578
AOA	6, 15	275/235/260, 245/200/195			23,85	0,0197	0,0526
MPA	8, 14	265/225/250, 230/180/185			24,64	0,0209	0,0563
RSA	7, 13	260/220/240, 225/175/180			25,02	0,0228	0,0592
WOA	6, 14	270/230/255, 235/185/190			24,75	0,0206	0,0531

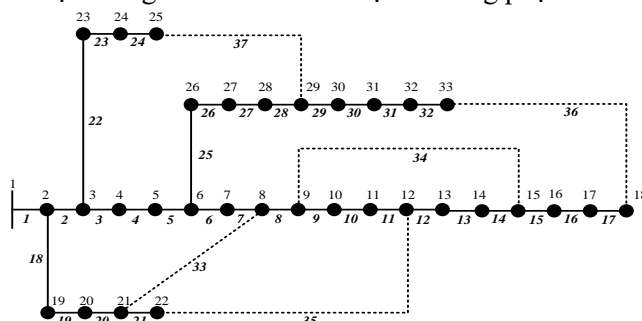
Kết quả này chứng minh rằng INFO không chỉ tìm được vị trí DG tối ưu mà còn khai thác hiệu quả tính không đối xứng theo pha, từ đó giảm tổn thất, giữ điện áp ổn định và cân bằng hệ thống tốt hơn. Đây là điểm mạnh nổi bật của INFO khi áp dụng vào các bài toán có không gian tìm kiếm kết hợp rời rạc, liên tục và ràng buộc nhiều lớp như quy hoạch DG cho DN ba pha không đối xứng. INFO đạt hiệu suất tốt nhất với mức giảm tổn thất hơn 7% và giảm đáng kể chỉ số lệch pha UPI so với các thuật toán còn lại. Vị trí đặt DG tại các nút trung tâm (6, 15) kết hợp với phân bố công suất phù hợp theo pha giúp cân bằng hệ thống hiệu quả hơn.

3.2. Kết quả trên hệ thống IEEE 33 nút

LĐPP 33 nút được trình bày trong Hình 2, với cấu hình sơ đồ đơn tuyến tương ứng với Hình 2 trong [15]. Hệ thống này vận hành ở cấp điện áp danh định 12,66 kV, bao gồm 32 nhánh và 32 nút phụ tải, là một trong những mô hình lưới chuẩn thường được sử dụng để đánh giá các thuật toán tối ưu cho DN. Tổng công suất tải của hệ thống vào khoảng 3715 kW và 2300 kVar, với phân bố tải không đều giữa các pha: 37% pha A, 33% pha B và 30% pha C. Mô hình trở kháng dây dẫn được thiết lập dưới dạng bất đối xứng, phù hợp với đặc điểm thực tế của DN tại Việt Nam.

Kết quả từ Bảng 4 trên hệ thống 33 nút, giải thuật INFO tiếp tục chứng minh hiệu quả vượt trội so với các thuật toán so sánh. Cụ thể, tổn thất công suất sau tối ưu của INFO chỉ còn 34,88 kW, thấp hơn 3,27 kW so với GWO (tốt đứng thứ hai), tương ứng với mức tiết kiệm khoảng 8,6%. Đồng thời, INFO duy trì sai lệch điện áp ở mức thấp 0,0226 pu, và đặc biệt là chỉ số UPI

đạt 0,0513, thấp nhất trong tất cả các phương pháp. Về vị trí và công suất DG, INFO lựa chọn đặt các nguồn tại nút 11 và 30, đây đều là các nút giữa hoặc cuối lưới, có vai trò quan trọng trong việc cải thiện điện áp khu vực xa nguồn chính và hỗ trợ cân bằng phụ tải theo pha.



Hình 2. LDPP 33 nút

Bảng 4. Kết quả tối ưu cho hệ thống 33 nút không cân bằng

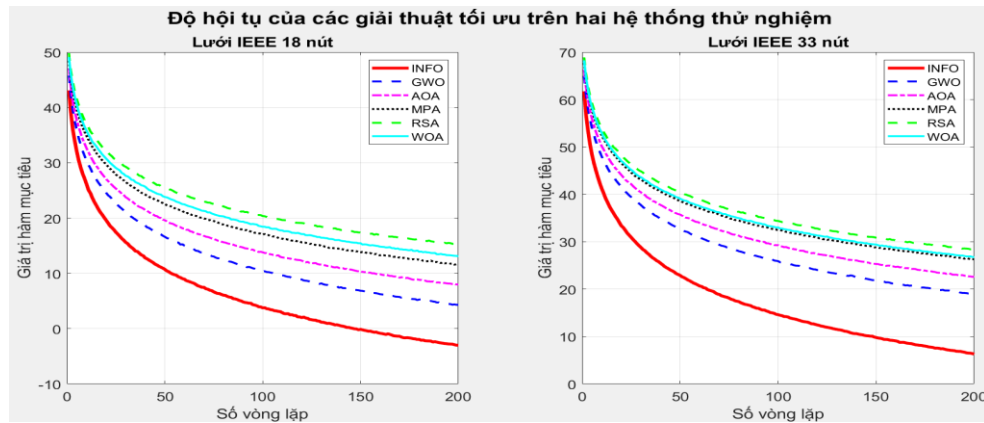
Thuật toán	Vị trí DG	Công suất DG (kW): Pa/Pb/Pc	Tổn thất (kW)	Sai lệch áp (pu)	UPI
INFO	11, 30	295/275/285, 270/260/250	34,88	0,0226	0,0513
GWO	12, 29	280/260/270, 255/240/245	38,15	0,0272	0,0627
AOA	10, 30	285/270/275, 260/250/240	36,79	0,0254	0,0601
MPA	12, 28	275/260/265, 250/235/240	38,02	0,0269	0,0634
RSA	13, 27	270/255/260, 245/230/235	39,10	0,0287	0,0659
WOA	11, 28	280/265/270, 255/245/240	37,65	0,0256	0,0610

INFO phân bổ công suất giữa các pha khá đồng đều, đồng thời ưu tiên pha có tải cao. Tại nút 11, công suất phát là 295/275/285 kW; tại nút 30 là 270/260/250 kW, cho thấy sự điều chỉnh phù hợp với đặc điểm tải từng pha. Trong khi đó, các thuật toán như GWO, MPA và RSA chọn các nút khác nhưng thường phát công suất thấp hơn, đặc biệt ở pha B và C, dẫn đến hiệu quả kém trong giảm tổn thất và lệch pha. RSA có tổn thất cao nhất (39,10 kW) và chỉ số lệch pha lớn nhất (0,0659), phản ánh khả năng điều chỉnh kém. AOA và WOA cho kết quả khá cân bằng nhưng chưa vượt được INFO. Dù AOA đặt nguồn tại các nút tương tự INFO (10 và 30), công suất phát thấp hơn, thiếu bù theo tải pha, gây tổn thất cao hơn (36,79 kW) và lệch pha lớn hơn (0,0601). Nhìn chung, INFO không chỉ giảm tổn thất hiệu quả mà còn phân bổ công suất hợp lý theo từng pha, từ đó cải thiện chất lượng điện áp và vận hành ổn định trong lưới không đối xứng. Trên hệ thống lớn hơn, INFO vẫn dẫn đầu, giảm tổn thất hơn 10% so với RSA và cải thiện đáng kể chỉ số cân bằng pha.

3.3. Bàn luận kết quả

INFO cho thấy hiệu quả vượt trội trong tối ưu vị trí và công suất DG theo từng pha. Việc ưu tiên phát công suất ở pha có tải cao hoặc điện áp yếu giúp giảm dòng lệch pha và nâng cao độ ổn định hệ thống. Với khả năng xử lý biến hỗn hợp và cơ chế tương tác trọng số thích ứng, INFO thể hiện tính linh hoạt và khả năng khai thác không gian nghiệm hiệu quả. So với các giải thuật khác, INFO không chỉ giảm tổn thất công suất tốt nhất mà còn duy trì điện áp ổn định và cải thiện đáng kể độ lệch pha, thể hiện qua chỉ số bất đối xứng. Kết quả hội tụ ở Hình 3 đã cho thấy INFO đạt giá trị tối ưu nhanh và ổn định sau khoảng 60 vòng lặp, trong khi GWO, AOA, WOA hội tụ chậm và kém ổn định hơn. RSA và MPA có kết quả yếu nhất do dễ rơi vào cực trị cục bộ. Những kết quả này khẳng định INFO là công cụ hiệu quả để giải bài toán tối ưu trong lưới điện ba pha không đối xứng. Sự khác biệt về vị trí và công suất tối ưu giữa các thuật toán là do cơ chế tìm kiếm khác nhau. INFO duy trì cân bằng tốt giữa khai phá và khai thác nên tìm được lời giải hiệu

quả hơn, trong khi GWO, RSA dễ rơi vào cực trị cục bộ. Điều này dẫn đến sự hội tụ tại các vị trí DG khác nhau trong cùng một bài toán. Về kích thước quần thể $N_p = 30$, đây là lựa chọn phổ biến để đảm bảo công bằng khi so sánh các thuật toán. Tuy nhiên, với các hệ thống lớn như lưới 33 nút, một số thuật toán có thể cần N_p lớn hơn để tránh bỏ sót nghiệm tốt. Đây là yếu tố cần được cân nhắc trong các nghiên cứu mở rộng.



Hình 3. Độ hội tụ của các phương pháp

4. Kết luận

Bài báo này đã đề xuất một phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu hiệu quả cho bài toán quy hoạch DG trong lưới điện phân phối ba pha không đối xứng, sử dụng giải thuật INFO. Mô hình đã xét đến các yếu tố bất đối xứng thực tế của lưới điện và hướng đến việc giảm tổn thất công suất, sai lệch điện áp và độ lệch pha thông qua một hàm mục tiêu tích hợp. Kết quả mô phỏng trên lưới 18 nút và 33 nút mở rộng cho thấy INFO vượt trội so với các giải thuật GWO, AOA, MPA, RSA, WOA về hiệu quả kỹ thuật và độ ổn định hội tụ. Đặc biệt, INFO đạt mức giảm tổn thất lên đến 10,3% và cải thiện đáng kể độ cân bằng điện áp và pha trong điều kiện lệch pha nặng. Phương pháp đề xuất có tính linh hoạt cao, phù hợp cho các lưới điện thực tế có nguồn DG một hoặc hai pha. Hướng nghiên cứu tiếp theo sẽ mở rộng mô hình để xét đến méo hài, chi phí đầu tư và biến động phụ tải ngẫu nhiên nhằm tăng cường khả năng ứng dụng thực tiễn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] A. Kharrazi, V. Sreeram, and Y. Mishra, "Assessment techniques of the impact of grid-tied rooftop photovoltaic generation on the power quality of low voltage distribution network - A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 120, 2020, Art. no. 109643, doi: 10.1016/j.rser.2019.109643.
- [2] B. Poornazaryan, P. Karimyan, G. B. Gharehpetian, and M. Abedi, "Optimal allocation and sizing of DG units considering voltage stability, losses and load variations," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 79, pp. 42–52, 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.12.034.
- [3] K. Ma, L. Fang, and W. Kong, "Review of distribution network phase unbalance: Scale, causes, consequences, solutions, and future research directions," *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 6, no. 3, pp. 479–488, 2020, doi: 10.17775/CSEEJPES.2019.03280.
- [4] E. Grover-Silva, R. Girard, and G. Kariniotakis, "Optimal sizing and placement of distribution grid connected battery systems through an SOCP optimal power flow algorithm," *Appl. Energy*, vol. 219, pp. 385–393, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.09.008.
- [5] M. J. E. Alam, K. M. Muttaqi, and D. Sutanto, "A three-phase power flow approach for integrated 3-wire MV and 4-wire multigrounded LV networks with rooftop solar PV," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 1728–1737, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2222940.
- [6] I. Ahmadianfar, A. A. Heidari, S. Noshadian, H. Chen, and A. H. Gandomi, "INFO: An efficient optimization algorithm based on weighted mean of vectors," *Expert Syst. Appl.*, vol. 195, no. January, 2022, doi: 10.1016/j.eswa.2022.116516.
- [7] M. M. Ansari, C. Guo, M. S. Shaikh, N. Chopra, I. Haq, and L. Shen, "Planning for Distribution

- System with Grey Wolf Optimization Method,” *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 15, no. 4, pp. 1485–1499, 2020, doi: 10.1007/s42835-020-00419-4.
- [8] J. Zhang, G. Zhang, Y. Huang, and M. Kong, “A Novel Enhanced Arithmetic Optimization Algorithm for Global Optimization,” *IEEE Access*, vol. 10, no. July, pp. 75040–75062, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3190481.
- [9] A. Faramarzi, M. Heidarinejad, S. Mirjalili, and A. H. Gandomi, “Marine Predators Algorithm: A nature-inspired metaheuristic,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 152, 2020, doi: 10.1016/j.eswa.2020.113377.
- [10] L. Abualigah, M. A. Elaziz, P. Sumari, Z. W. Geem, and A. H. Gandomi, “Reptile Search Algorithm (RSA): A nature-inspired meta-heuristic optimizer,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 27, 2023, doi: 10.1016/j.eswa.2021.116158.
- [11] M. N. Morshidi, I. Musirin, S. R. A. Rahim, M. R. Adzman, and M. H. Hussain, “Whale optimization algorithm based technique for distributed generation installation in distribution system,” *Bull. Electr. Eng. Informatics*, vol. 7, no. 3, pp. 442–449, 2018, doi: 10.11591/eei.v7i3.1276.
- [12] J. M. Rupa and S. Ganesh, “Power Flow Analysis for Radial Distribution System Using Backward / Forward Sweep Method,” *Int. J. Electr. Comput. Energ. Electron. Commun. Eng.*, vol. 8, no. 10, pp. 1537–1541, 2014, doi: 10.1999/1307-6892/10000126.
- [13] N. T. Ton, A. V. Truong, and T. P. Vu, “Applying improved Backward/Forward method in optimizing power distribution connected DG,” *Sci. Technol. Dev. J. – Eng. Technol.*, vol. 2, no. 2, pp. 105–115, 2019, doi: 10.15419/stdjet.v2i2.499.
- [14] K. Taleski and D. Rajicid, “Distribution Network Reconfiguration For Energy Loss Reduction,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 12, no. 1, pp. 398–406, 1997, doi: 10.1109/59.575733.
- [15] M. E. Baran and F. F. Wu, “Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing,” *Power Deliv. IEEE Trans.*, vol. 4, no. 2, pp. 1401–1407, 1989, doi: 10.1109/61.25627.