

Optimal Placement and Sizing of Wind Turbines in Distribution Networks Using the GAO Algorithm for Power Loss Reduction

Minh Cong Pham¹, Cong Minh Nguyen¹, Dinh Chung Phan^{*1}
The University of Danang - University of Science and Technology, Vietnam

*Corresponding author. Email: pdchung@dut.udn.vn

ARTICLE INFO

Received: 19/04/2025
Revised: 07/05/2025
Accepted: 30/06/2025
Published: 28/11/2025

KEYWORDS

Electrical energy loss;
Distribution grid;
Position;
Power loss;
Wind turbine number.

ABSTRACT

This paper aims to determine the optimal placement and sizing of wind energy-based generators in a distribution network to reduce power/electrical energy losses. To achieve the above-mentioned goal, in this research, historical wind data are utilized to identify the appropriate type of wind turbine that should be installed at each bus. Subsequently, the Green Anaconda Optimization (GAO) algorithm is developed to determine the optimal locations, number of turbines, and power factors at these sites. The proposed method is coded in MATLAB software, and then we use this code to test the standard IEEE 33-bus distribution system. The testing results indicated the location, number of turbines, rated capacities, power factors of the turbines that should be installed, and the resulting electrical energy loss in the network, which is lower than that without these wind turbines. The comparison result with other studies indicates that the energy loss in our research is lower.

Tối ưu vị trí và công suất của Turbine gió trong lưới điện phân phối bằng thuật toán GAO nhằm giảm tổn thất công suất

Phạm Minh Công¹, Nguyễn Công Minh¹, Phan Đình Chung^{*1}
Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng, Việt Nam

*Tác giả liên hệ. Email: pdchung@dut.udn.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 19/04/2025
Ngày hoàn thiện: 07/05/2025
Ngày chấp nhận đăng: 30/06/2025
Ngày đăng: 28/11/2025

TỪ KHÓA

Lưới phân phối;
Vị trí;
Số lượng turbine;
Tổn thất công suất;
Tổn thất điện năng.

TÓM TẮT

Bài báo nhằm xác định vị trí và công suất tối ưu của các turbine gió trong lưới điện phân phối nhằm giảm tổn thất công suất/tổn thất điện năng trong lưới điện phân phối. Để đạt được mục đích trên, trong nghiên cứu này, tác giả sẽ dựa vào dữ liệu về gió trong quá khứ để xác định loại turbine gió nên được sử dụng tại các nút, sau đó tác giả sẽ phát triển thuật toán GAO (Green Anaconda Optimization) để xác định vị trí, số lượng turbine, và hệ số công suất của turbine tại các vị trí đó. Phương pháp đề xuất được xây dựng trên phần mềm MATLAB và thử nghiệm trên lưới điện phân phối tiêu chuẩn IEEE 33 nút. Kết quả chạy thử nghiệm đã chỉ rõ vị trí, số lượng turbine, công suất định mức, hệ số công suất của turbine cần lắp đặt, và tổn thất điện năng trong lưới sau khi lắp đặt các turbine gió thấp hơn so với trường hợp không có lắp đặt chúng. Kết quả so sánh với các nghiên cứu khác cho thấy thuật toán đề xuất cho tổn thất điện năng thấp hơn.

Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.2025.1884>

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây, việc sản xuất điện năng từ các nguồn năng lượng tái tạo đã và đang là một xu hướng phát triển tất yếu trong ngành công nghiệp năng lượng. Việc sản xuất điện năng từ các

nguồn năng lượng tái tạo (phổ biến nhất hiện nay là năng lượng mặt trời và gió) và tích hợp chúng vào hệ thống điện mang lại cả những cơ hội và thách thức cho lưới điện [1]. Việc khai thác các nguồn tái tạo này giúp đảm bảo việc đáp ứng được nhu cầu điện năng ngày càng tăng, giảm chi phí phát điện và giảm phát thải khí nhà kính, vãn vãn. Tuy nhiên, việc xuất hiện các nguồn điện phân tán (DG-distributed generator) trong lưới điện phân phối có thể gây nên nhiều vấn đề như gia tăng tổn thất, quá tải cục bộ, hoặc điện áp nút không đảm bảo nếu vị trí kết nối và công suất của các DG không được tính toán một cách cẩn thận. Do vậy, việc xác định vị trí tối ưu để lắp đặt các nguồn DGs trong lưới điện là một thách thức lớn do tính chất phi tuyến và phức tạp của bài toán tối ưu hóa [2].

Hiện nay, có nhiều thuật toán heuristic và metaheuristic đã được đề xuất để xác định vị trí và công suất của các DG trong lưới điện phân phối [2]-[10]. Trong số các thuật toán trên, Genetic Algorithm (GA) [3], Particle Swarm Optimization (PSO) [4], và Artificial Bee Colony (ABC) [5] đã được áp dụng rộng rãi để giải quyết bài toán tối ưu vị trí DG và đã mang lại hiệu quả trong việc giảm tổn thất điện năng và cải thiện chất lượng điện áp [6], [9]. Tuy nhiên, hầu hết các thuật toán này đều áp dụng cho việc xác định các DG nói chung mà chưa đi cụ thể vào loại DG. Ví dụ ở [4], công suất tối ưu của DG là 1229,8kW; như vậy chúng ta chỉ có thể lắp đặt Diesel hoặc thủy điện nhỏ thì mới có thể phát được công suất như mong muốn; 1229,8kW với turbine gió thì điều này bất khả thi vì công suất phát của turbine gió không ổn định. Đối với turbine gió, nhiều phương pháp để tìm vị trí tối ưu và công suất tối ưu trong lưới điện phân phối đã đề xuất [11]-[16]. Tuy nhiên ở nghiên cứu [11] tốc độ gió được sử dụng là tốc độ gió trung bình; ở [13]-[16] loại turbine gió được sử dụng ở đó được chỉ định trước chứ tác giả chưa xem xét loại turbine đó đã tối ưu chưa và không phụ thuộc vào tìm năng gió tại các vị trí khác nhau trong lưới; một số nghiên cứu đã xem xét đến dữ liệu gió trong quá khứ nhưng dữ liệu này được sử dụng để ước tính tốc độ gió trong 1 ngày để từ đó tính toán vị trí tối ưu, có nghĩa rằng tác giả chưa xem xét tìm năng gió là giống nhau tại tất cả các nút [12]-[14].

Bài báo này tác giả sẽ đề xuất thuật toán để xác định vị trí, số lượng và hệ số công suất tối ưu của turbine gió trong lưới điện phân phối nhằm giảm tổn thất công suất/điện năng. Thuật toán được phát triển dựa trên thuật toán GAO (Green anacoda optimization). Ở đây, thuật toán sẽ xem xét đến tìm năng năng lượng gió tại các vị trí khác nhau trong lưới điện phân phối. Thuật toán được triển khai trên phần mềm Matlab và sử dụng lưới điện mẫu IEEE 33 nút để kiểm tra đánh giá. Kết quả kiểm tra sẽ được phân tích và so sánh với các thuật toán khác.

2. Turbine gió và bài toán tối ưu

2.1. Turbine gió

Máy phát điện gió làm nhiệm vụ chuyển động năng của gió sang cơ năng trên trục quay của turbine và máy phát để sản sinh ra điện năng. Khi bỏ qua tổn hao trong turbine, công suất phát của 1 turbine P có thể được tính theo tốc độ gió V như sau [11]:

$$P(V) = \begin{cases} 0 & V < V_{cut_in} \\ P_{rated} \left(\frac{V - V_{cut_in}}{V_{rated} - V_{cut_in}} \right)^3 & V_{cut_in} \leq V < V_{rated} \\ P_{rated} & V_{rated} \leq V < V_{cut_out} \\ 0 & V \geq V_{cut_out} \end{cases} \quad (1)$$

trong đó, V là tốc độ gió (m/s); V_{cut_in} , V_{cut_out} lần lượt là tốc độ gió bắt đầu đưa turbine vào hoạt động và cắt turbine ra khỏi lưới (m/s); V_{rated} và P_{rated} là tốc độ định mức và công suất định mức của turbine. Do tốc độ gió luôn thay đổi theo thời gian, để thuận tiện trong việc xác định loại turbine và số lượng turbine, ta có thể tính công suất trung bình của tuabin gió dựa vào hàm mật độ xác suất $f(V)$ từ mô hình hóa phân bố Weibull của tốc độ gió [16]:

$$P_{W_avg} = \int_{V_{cut_in}}^{V_{cut_out}} P(V) \cdot f(V) dv \quad (2)$$

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right) \cdot \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (3)$$

với k là hệ số hình dạng (shape factor), đặc trưng cho sự phân tán của dữ liệu tốc độ gió và c là hệ số tỷ lệ (scale factor), đơn vị m/s. Như vậy, tùy theo dữ liệu gió khác nhau mà công suất trung bình khác nhau. Loại turbine được lắp đặt tại mỗi nút nên dựa vào công suất gió trung bình này.

2.2. Bài toán tối ưu

Mục tiêu chính của bài toán tối ưu kết nối turbine gió vào lưới điện phân phối là tối thiểu hóa tổn thất công suất/ tổn thất điện năng nhưng vẫn phải đảm bảo điều kiện vận hành an toàn của lưới điện bao gồm điện áp tại các nút luôn nằm trong giới hạn cho phép đồng thời tất cả các đoạn đường dây không bị quá tải. Do vậy, bài toán tối ưu được phát biểu như sau:

$$\Delta P_{loss} = \sum_{l=1}^N I_l^2 R_l = f(l_o, n_o, P_{ro}, pf_o) \rightarrow \min \quad (4)$$

Sao cho

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad (5)$$

$$I_l \leq I_{l,max} \quad (6)$$

$$n_o^T P_{ro} \leq P_{yc} \quad (7)$$

$$pf_{\min} \leq pf_o \leq 1 \quad (8)$$

$$l_{o,min} \leq l_o \leq l_{o,max} \quad (9)$$

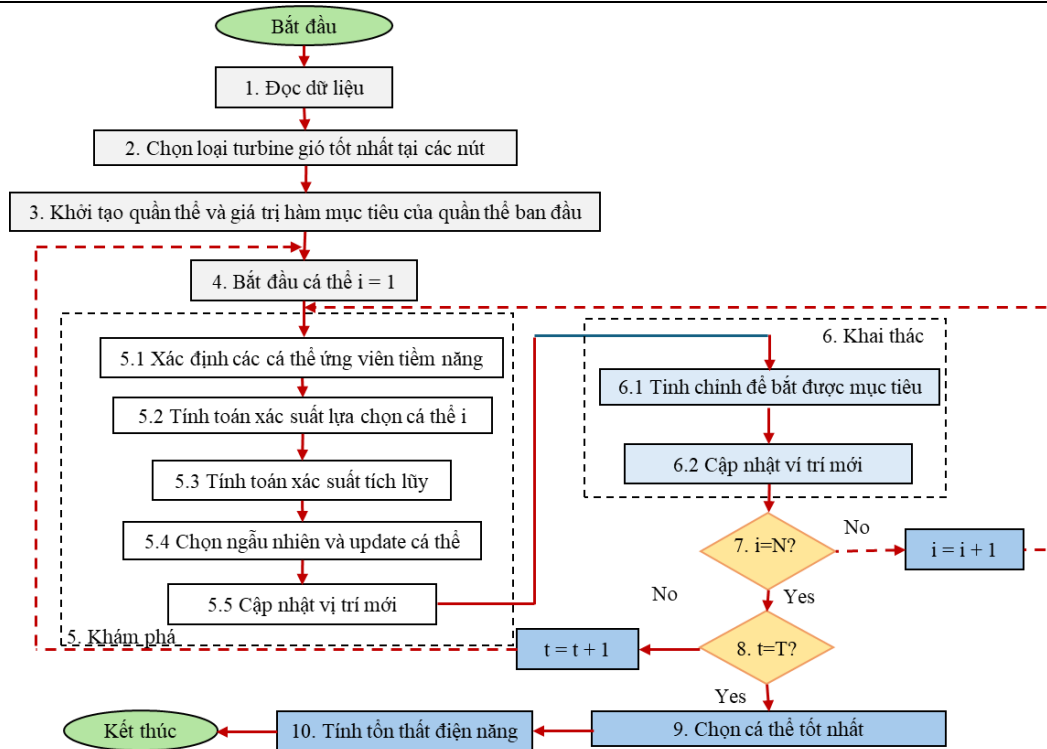
$$0 \leq n_o \leq n_{o,min} \quad (10)$$

$$P_{r,min} \leq P_{ro} \leq P_{r,max} \quad (11)$$

trong đó I_l, R_l lần lượt là dòng điện và điện trở trên đoạn đường dây thứ l ; l_o, n_o, P_{ro}, pf_o lần lượt là véc tơ chứa các vị trí lắp đặt, số lượng, công suất định mức, hệ số công suất của turbine và các biến này luôn bị giới hạn giữa giá trị min và max; U_i là điện áp tại nút thứ i bất kỳ trong lưới điện và U_{\min}, U_{\max} là các giá trị giới hạn của nó; P_{yc} là tổng công suất cho phép lắp đặt trong lưới điện.

3. Xây dựng thuật toán

Thuật toán GAO (Green Anaconda Optimization) [17] được biết đến với khả năng tìm kiếm toàn cục và tránh rơi vào cực trị cục bộ nhờ cơ chế mô phỏng hành vi sinh học tìm kiếm bạn tình trong mùa giao phối của loài trăn xanh Nam Mỹ. Trong thuật toán tối ưu GAO, mỗi cá thể trăn xanh được xem như một cá thể trong quần thể. Từ góc độ toán học, mỗi cá thể trăn xanh mang các thông tin khác nhau, mỗi thông tin đó tương ứng với 1 biến trong bài toán tối ưu. Mỗi cá thể trăn xanh trong quần thể có vị trí xác định, vị trí này được xác định dựa vào các thông tin của nó. Do đó, mỗi cá thể trăn xanh có thể được mô hình hóa dưới dạng một vector, và quần thể của các cá thể này có thể được biểu diễn bằng một ma trận. Quá trình tìm kiếm giải pháp tối ưu được thực hiện dựa trên việc xác định vị trí tối ưu nhất của các cá thể trăn xanh trong quần thể. Khác với nhiều thuật toán tối ưu hóa khác, thuật toán GAO không yêu cầu các thông số điều chỉnh phức tạp trong quá trình tính toán. Các thông số khởi tạo ban đầu bao gồm: Số lượng cá thể trong quần thể (N), số lượng biến của bài toán tối ưu (m) hoặc số lượng thông tin đặc trưng của mỗi cá thể, số vòng lặp tối đa (T), giới hạn dưới của các biến (Lb), giới hạn trên của các biến (Ub). Chi tiết thuật toán này được mô tả trong [17]. Đóng góp của nghiên cứu này là phát triển thuật toán này để sử dụng các biến thập phân và biến nguyên và áp dụng nó cho việc xác định vị trí, số lượng turbine để tối thiểu tổn thất điện năng trong lưới điện phân phối.



Hình 1. Lưu đồ thuật toán

Mục tiêu chính của chúng ta là xây dựng thuật toán để xác định vị trí, số lượng, chủng loại và hệ số công suất tối ưu của turbine gió trong lưới điện phân phối nhằm giảm tổn thất công suất/điện năng. Dữ liệu đầu vào là thông số k và c tại các nút khả dụng trong lưới. Để đạt được mục tiêu này, chúng tôi xây dựng thuật toán dựa vào thuật toán GAO. Ở đây, tùy thuộc vào số nút cần lắp đặt turbine, n_{DG} , mà vector x có $m = 3n_{DG}$ biến như (12). Thuật toán đề xuất như Hình 1 và được mô tả như sau

$$x = [l_o^T \quad n_o^T \quad pfo^T] \quad (12)$$

Bước 1. Đọc dữ liệu

Ở bước này, chương trình sẽ đọc dữ liệu về lưới gồm thông số đường dây, phụ tải, điện áp, dữ liệu gió tại các nút của lưới điện, và các loại turbine gió trong thực tế.

Bước 2. Chọn loại turbine gió tốt nhất tại các nút

Giả sử đây, khái toán cho suất đầu tư 1kW điện gió là hằng số. Tính công suất trung bình của gió ứng với các loại turbine gió khác nhau (2) và chọn loại turbine cho tỷ số giữa công suất trung bình và công suất định mức lớn nhất.

Bước 3. Khởi tạo quần thể và giá trị hàm mục tiêu của quần thể ban đầu

Quần thể ban đầu có N cá thể với mỗi cá thể có m tọa độ (12), như vậy, quần thể được biểu diễn là một ma trận X có kích thước $N \times m$ được như (13)

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_i \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \dots & x_{1,d} & \dots & x_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i,1} & \dots & x_{i,d} & \dots & x_{i,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N,1} & \dots & x_{N,d} & \dots & x_{N,m} \end{bmatrix} \quad (13)$$

trong đó: $x_{i,d}$ là tọa độ thứ d của cá thể thứ i được xác định dựa vào (14) với $r_{i,d}$ là một số ngẫu nhiên trong khoảng $[0,1]$,

$$x_{i,d} = Lb_d + r_{i,d} \times (Ub_d - Lb_d) \quad (14)$$

với $r_{i,d}$ là số ngẫu nhiên trong khoảng $[0,1]$, Ub_d và Lb_d là giới hạn trên và dưới của các biến. Chú ý do l_o, n_o chỉ chứa các số nguyên cho nên chúng ta phải làm tròn l_o, n_o và đảm bảo (8)-(10).

Để xác định giá trị hàm mục tiêu, chúng ta cập nhật dữ liệu của lưới gồm công suất tác dụng và công suất phản kháng trung bình của các turbine dựa vào x_i . Sau đó, chạy bài toán phân bố công suất để xác định tổn thất công suất ứng với cá thể x_i . Chú ý, khi chạy bài toán phân bố công suất, nếu cá thể x_i nào mà làm 1 trong các ràng buộc (5)-(7) không thỏa mãn thì tổn thất (giá trị hàm mục tiêu) được đặt giá trị vô cùng lớn để cá thể đó không được chọn. Như vậy, chúng ta xác định được vector chứa giá trị hàm mục tiêu (15).

$$Fitness = [F(x_1) \dots F(x_i) \dots F(x_N)]^T \quad (15)$$

Bắt đầu vòng lặp thứ t , với $t=1$

Bước 4. Bắt đầu cá thể đầu tiên $i=1$

Bước 5. Giai đoạn khám phá

Bước 5.1. Xác định danh sách cá thể tiềm năng

Các cá thể x_k có giá trị hàm mục tiêu tốt hơn giá trị hàm mục tiêu của các cá thể x_i được coi là các cá thể tiềm năng. Tập hợp các cá thể tìm năng được xác định như sau

$$CFL_i = \{x_k \mid F(x_k) < F(x_i)\} \quad (16)$$

Giả sử CFL_i có N_i cá thể và giá trị hàm mục tiêu tương ứng các cá thể này là CFF_i

Bước 5.2. Tính toán xác suất lựa chọn cá thể i

Xác suất lựa chọn P_j cho cá thể x_j trong danh sách các cá thể tìm năng CFL_i được tính toán như (17)

$$P_j = \frac{CFF(x_j) - CFF_{min}}{\sum_{k=1}^{N_i} (CFF(x_k) - CFF_{min})} \quad (17)$$

trong đó, CFF_{min} là giá trị hàm mục tiêu nhỏ nhất trong danh sách cá thể tìm năng CFL_i .

Bước 5.3. Tính toán xác suất tích lũy

Xác suất tích lũy C_j của cá thể thứ j trong CFL_i được tính theo công thức (18)

$$C_j = \sum_{k=1}^j P_k / C_{Ni} \quad (18)$$

Bước 5.4. Chọn ngẫu nhiên và update cá thể

Chọn ngẫu nhiên 1 cá thể thứ j trong danh sách các cá thể tìm năng CFL_i sao cho

$$SF_i = CFL_i: C_{j-1} \leq rand \leq C_j \quad (19)$$

Cập nhật vị trí mới của cá thể x_i

$$x'_i = x_i + rand \times (SF_i - x_i) \quad (20)$$

Chúng ta phải làm tròn các tọa độ ứng với l_o, n_o trong x'_i và đảm bảo x'_i phải nằm trong giới hạn **Ub** và **Lb**.

Bước 5.5. Cập nhật vị trí mới

Sau khi di chuyển đến vị trí mới x'_i , chạy bài toán phân bố công suất để xác định giá trị hàm mục tiêu (tổn thất công suất). Nếu giá trị hàm mục tiêu tại vị trí mới x'_i tốt hơn giá trị hiện tại, vị trí và giá trị hàm mục tiêu của cá thể x_i sẽ được cập nhật như sau

$$\text{Nếu } F(x_i') < F(x_i) \text{ thì } \begin{cases} x_i = x_i' \\ \text{Fitness}(i) = F(x_i') \end{cases} \quad (21)$$

Bước 6: Giai đoạn khai thác

Bước 6.1. Tinh chỉnh để bắt được mục tiêu

Vị trí mới của cá thể x_i được xác định như (22)

$$x_i'' = x_i + (1 - 2 \times \text{rand}) \times \frac{Ub - Lb}{t} \quad (22)$$

Sau khi tính được vị trí mới của cá thể, chúng ta phải làm tròn các tọa độ ứng với l_o, n_o trong x_i'' và đảm bảo x_i'' phải nằm trong giới hạn **Ub** và **Lb**.

Bước 6.2. Cập nhật vị trí mới

Chạy bài toán phân bố công suất để xác định giá trị hàm mục tiêu tương ứng với vị trí mới x_i'' . Nếu giá trị hàm mục tiêu tại vị trí mới tốt hơn giá trị hiện tại thì vị trí và giá trị hàm mục tiêu của cá thể thứ i sẽ được cập nhật như (23)

$$\text{Nếu } F(x_i'') < F(x_i) \text{ thì } \begin{cases} x_i = x_i'' \\ \text{Fitness}(i) = F(x_i'') \end{cases} \quad (23)$$

Bước 7. Kiểm tra tất cả các cá thể đã được khám phá và khai thác xong chưa $i=N$, nếu chưa thì tăng $i=i+1$ và quay lại bước 5

Bước 8. Kiểm tra số vòng lặp đã đủ chưa $t=T$, nếu chưa thì tăng $t=t+1$ và quay lại bước 4

Bước 9. Chọn cá thể cho hàm mục tiêu bé nhất

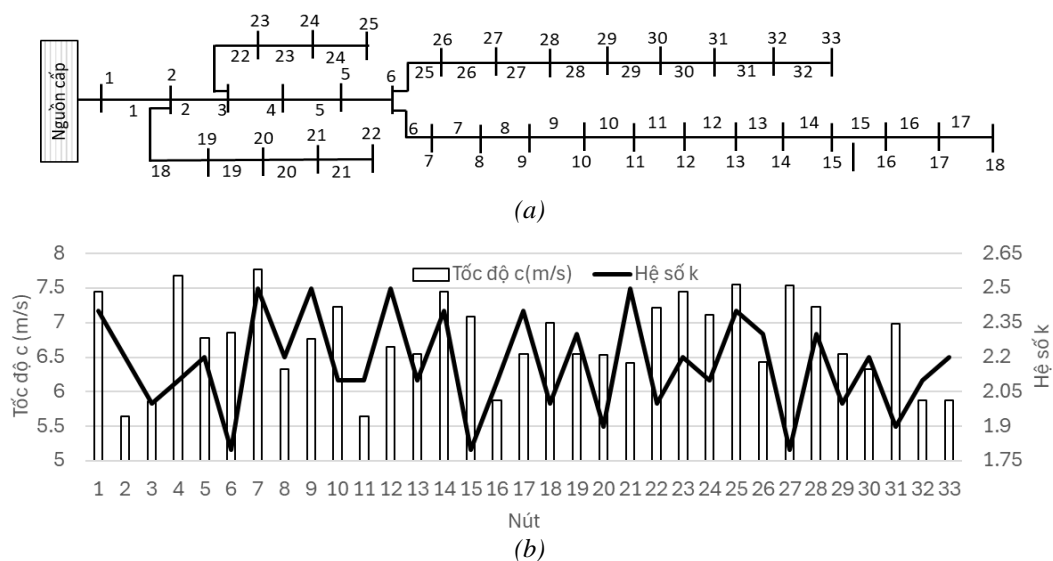
Bước 10. Tính tổn thất điện năng

$$\Delta E = \sum_{s=1}^{N_s} \Delta P_s \times 8760 \times \varphi_s \quad (24)$$

trong đó, ΔP_s là tổn thất công suất trong lưới tương ứng với tổ hợp thứ s của tốc độ gió tại các nút trong lưới, N_s là số lượng phân tử trong tổ hợp tốc độ gió, và φ_s là xác suất để có tổ hợp tốc độ gió đó, xác suất này được tính từ (3).

4. Dữ liệu mô phỏng và kết quả

4.1. Dữ liệu



Hình 2. Dữ liệu lưới điện: (a) Sơ đồ lưới điện và (b) dữ liệu về gió tại các nút

Để đánh giá thuật toán đề xuất ở trên chúng ta sử dụng lưới điện phân phối mẫu IEEE 33 nút [18] như Hình 2. Ở lưới này, điện áp định mức 12,66 kV và tổng công suất phụ tải 3,72 + j2,3 MVA với kết cấu lưới như Hình 2a. Lưới này có tổn thất công suất 210kW và nút 18 là nút có điện áp thấp nhất, khoảng 0,913pu. Ở đây, giả sử thời gian sử dụng công suất cực đại trong lưới trong 1 năm là 8760 giờ như vậy, tổn thất điện năng trong 1 năm là 1839,6 MWh. Giả sử rằng chúng ta thu thập được dữ liệu về tốc độ gió tại các nút trong lưới như Hình 2b, số lượng nút cho phép lắp đặt turbine gió là 3. Thông số của một vài turbine gió thực tế với dải công suất từ 100kW đến 900kW có thể kết nối vào lưới phân phối như Bảng 1. Giá trị điện áp nhỏ nhất cho phép được xác định dựa vào điện áp tại nút 18 ở trường hợp chưa có turbine gió được nối vào, giá trị điện áp lớn nhất cho phép là 1,05pu. Các turbine có hệ số công suất nhỏ nhất là 0,7.

Bảng 1. Thông số của một số turbine thực tế

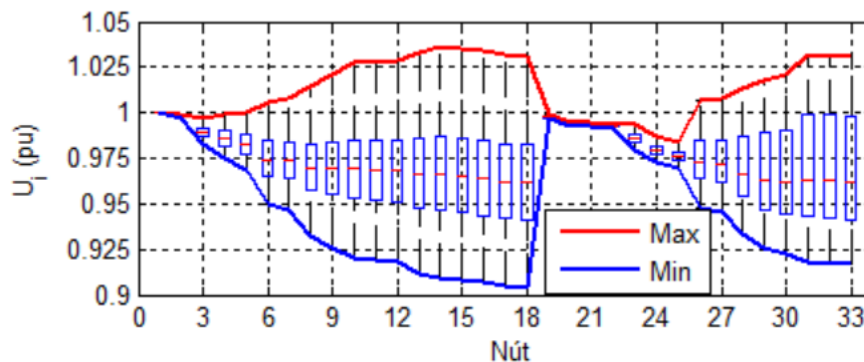
Công suất định mức (kW)	100	250	275	300	330	500	660	750	850	900
Tốc độ gió định mức (m/s)	10	8,5	12	11,5	13	8,5	14	11,5	12	8,5
Tốc độ cut-in (m/s)	3	3	4	3	3,5	3	4	3	3,5	3
Tốc độ cut-out (m/s)	25	25	30	25	28	25	25	25	25	25

4.2. Kết quả tính toán cho lưới IEEE-33 nút

Bảng 2. Kết quả tính toán tối ưu kết nối turbine gió vào lưới

STT	Vị trí	Số lượng turbine	Hệ số công suất pf	P_r (kW)	Tổn thất điện năng ΔE (MWh)
1	14	3	0,7	250	724,12
2	10	1	0,7	500	
3	31	3	0,7	500	

Với dữ liệu trên, khi chạy thuật toán ở Hình 1 với số lượng cá thể được chọn là 500 và số vòng lặp là 1000, kết quả như Bảng 2 và Hình 3. Từ bảng 2, chúng ta thấy chúng ta chỉ cần lắp đặt turbine gió tại nút 14, 10 và nút 31. Nút 14 được kiến nghị lắp 3 turbine loại 250kW, nút 10 chỉ cần 1 turbine loại 500kW, trong khi nút 31 cần lắp 3 turbine loại 500kW. Hệ số công suất của các turbine ở nút này đều ở mức 0,7. Với các turbine này và dữ liệu gió như Hình 1b, tổn thất điện năng trong lưới 724,12 MWh. Hình 3 cho thấy điện áp tại tất cả các nút đều nằm trong giới hạn từ 0,913 pu đến 1,03 pu, với trung vị nằm trong phạm vi 0,95 pu đến 1 pu. Như vậy, so với trường hợp chưa có các turbine gió nối vào lưới điện, điện áp tại tất cả các nút đều được cải thiện đáng kể ngoại trừ trường hợp turbine gió bị cắt ra khỏi lưới do tốc độ gió vượt ra khỏi phạm vi hoạt động cho phép của turbine, tổn thất điện năng trong 1 năm trên lưới đã giảm đi đáng kể 60,64%. Tuy nhiên, điện áp tại các nút sẽ bị giao động tùy thuộc vào trạng thái công suất phát hoặc phụ thuộc vào tốc độ gió.



Hình 3. Điện áp của các nút trước và sau khi tối ưu kết nối tuabin gió vào lưới

4.3. So sánh với các nghiên cứu khác

Để có thể so sánh với các nghiên cứu khác, ở đây tác giả sẽ lựa chọn các nghiên cứu có hàm mục tiêu tương tự (giảm tổn thất công suất hoặc giảm tổn thất điện năng) và sử dụng kết quả của nghiên cứu đó để lựa chọn số lượng turbine tương ứng, sau đó tính tổn thất điện năng dựa vào turbine đã chọn và dữ liệu gió tại nút đó. Kết quả so sánh như ở Bảng 3. Chú ý, trong bảng này, các cột có ký hiệu “*” là dữ liệu được tính toán lại dựa vào kết quả trong tài liệu tham khảo đó.

Bảng 3. So sánh với các nghiên cứu khác

Thuật toán	Vị trí	Công suất tính toán (kW)	pf	$n \times P_r^*$ (kW)	ΔE^* (MWh)	$U_{i,max}@i^*$ (pu)	$\bar{U}_{i,min}@i^*$ (pu)
[18]	14	739,0424	0,882467	8x100	1226,26	1@1	0,9283@18
	24	1048,879	0,83921	11x100			
	30	1156,84	0,8	12x100			
PSO [19]	24	1080	0,9007	11x100	1234,4	1@1	0,9275@18
	14	752	0,9062	8x100			
	30	1053	0,7179	11x100			
DSCA-SOCP[20]	13	794	0,9049	8x100	1285,0	1@1	0,9266@18
	24	1070	0,9003	11x100			
	30	1029,7	0,7134	11x100			
Proposed method	10		0,7	1x500	724,12	1,0454@14	0,9645@18
	14		0,7	4x250			
	31		0,7	3x500			

Bảng 3 cho thấy, với các thuật toán đề xuất ở tài liệu [18], [19], và [20], tổng công suất định mức của turbine gió cần lắp đặt ít nhất là 3000 kW nhưng tổn thất điện năng (ΔE) cao hơn 1200 MWh trong khi đó với thuật toán đề xuất của chúng tôi, ta chỉ cần lắp đặt 2750 kW turbine điện gió nhưng tổn thất điện năng được giảm đến còn 724,12 MWh. Như vậy, về hiệu quả của thuật toán được đề xuất tốt hơn so với các tài liệu tham chiếu. Liên quan đến điện áp tại các nút, điện áp nhỏ nhất ($U_{i,min}$) xuất hiện ở nút 18 khi tất cả các wind turbine bị cắt ra khỏi lưới, điện áp lớn nhất ($U_{i,max}$) trong quá trình vận hành với thuật toán đề xuất là 1,0454 pu ở nút 14, giá trị này có cao hơn so với các thuật toán khác nhưng vẫn đảm bảo nằm trong giới hạn cho phép, giá trị trung vị của điện áp tại các nút ($\bar{U}_{i,min}$) trong quá trình vận hành ở nút 18 đạt nhỏ nhất ở tất cả các thuật toán, giá trị này ở thuật toán đề xuất có cao hơn khá nhiều so với các thuật toán khác. Như vậy, xét về mục tiêu nghiên cứu thì thuật toán của chúng tôi đạt được tổn thất điện năng thấp hơn nhiều so với các thuật toán khác.

5. Kết luận

Nghiên cứu này đã đề xuất thuật toán để tối ưu hóa tích hợp turbine gió vào lưới điện phân phối bằng cách phát triển thuật toán Green Anaconda Optimizer (GAO). Thuật toán đã xem xét đến dữ liệu về gió trong quá khứ tại các nút để xác định vị trí lắp đặt, loại turbine gió tốt nhất, số lượng turbine nhằm giảm tổn thất công suất/ tổn thất điện năng trong lưới điện phân phối. Với 1 lưới điện mẫu, thuật toán đã đề xuất được vị trí, số lượng chủng loại turbine, và hệ số công suất turbine cần lắp đặt để đạt kết quả tổn thất điện năng nhỏ nhất mà vẫn đảm bảo điều kiện làm việc cho phép của lưới điện. Các kết quả cho thấy với cùng 1 lưới điện và cùng dữ liệu tốc độ gió trong quá khứ, thuật toán trong nghiên cứu này có thể giảm tổn thất điện năng nhiều hơn các thuật toán khác.

Xung đột lợi ích

Các tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích trong bài báo này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. H. Javed, P. H. Nguyen, J. Morren, and J. G. H. Slootweg, "Review of operational challenges and solutions for DER integration with distribution networks," *2021 56th Int. Univ. Power Eng. Conf. (UPEC)*, Middlesbrough, United Kingdom, pp. 1-6, 2021.
- [2] M. H. Moradi and M. Abedini, "Optimal placement and sizing of distributed generation in distribution networks: A comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 8, pp. 5225–5238, 2012.
- [3] E. A. Almabsout, R. A. El-Schiemy, and A. S. A. Bayoumi, "Enhanced real coded genetic algorithm for optimal DG placement in a radial distribution system," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol.18, pp. 2581–2597, 2023.
- [4] K. Mahesh, P. A. Nallagownden, and I. A. Elamvazuthi, "Optimal placement and sizing of DG in distribution system using accelerated PSO for power loss minimization," *2015 IEEE Conf. Energy Conver.*, Johor Bahru, Malaysia, pp. 193-198, 2015.
- [5] A. A. Seker and M. H. Hocaoglu, "Artificial Bee Colony algorithm for optimal placement and sizing of distributed generation," *8th Int. Conf. Electr. Electron. Eng.*, Bursa, Turkey, pp. 127-131, 2013.
- [6] A. Mohamed, V. Salehi, and O. Mohammed, "A comprehensive review of heuristic and metaheuristic algorithms for optimal integration of distributed generation in power systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 80, pp. 1298–1312, 2017.
- [7] G. V. N. Lakshmi, A. Jayalaxmi, and V. Veeramsetty, "Optimal placement of distributed generation based on DISCO's financial benefit with loss and emission reduction using hybrid Jaya–Red Deer optimizer," *Electr. Eng.*, vol. 105, pp. 965–977, 2023.
- [8] T. D. Pham, T. T. Nguyen, and B. H. Dinh, "Find optimal capacity and location of distributed generation units in radial distribution networks by using enhanced coyote optimization algorithm," *Neural Comput. Applic.*, vol. 33, pp. 4343–4371, 2021.
- [9] A. A. Ogunsinu, M. O. Petinrin, and O. O. Petinrin, "Optimal distributed generation location and sizing for loss minimization and voltage profile optimization using ant colony algorithm," *SN Appl. Sci.*, vol. 3, pp. 248, 2021.
- [10] M. Kumar, A. M. Soomro, W. Uddin, and L. Kumar, "Optimal multi-objective placement and sizing of distributed generation in distribution system: a comprehensive review," *Energies*, vol. 15, no. 21, pp. 7850, 2022.
- [11] Y. M. Merzoug, A. Bouanane, and B. Larbi, "Optimal placement of wind turbine in a radial distribution network using PSO method," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 11, no. 2, pp. 1074–1081, 2020.
- [12] W. G. González, O. D. Montoya, L. F. G. Noreña, A. J. P. Moreno, and Q. H. Escobedo, "Optimal placement and sizing of wind generators in ac grids considering reactive power capability and wind speed curves," *Sustainability*, vol. 12, pp. 2983, 2020.
- [13] M. Kumar, P. Nallagownden, and I. Elamvazuthi, "Optimal placement and sizing of renewable distributed generations and capacitor banks into radial distribution systems," *Energies*, vol. 10, pp. 811, 2017.
- [14] M. Yarahmadi and M. R. Shakarami, "An analytical and probabilistic method to determine wind distributed generators penetration for distribution networks based on time-dependent loads," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 103, pp. 404-413, 2018.
- [15] T. M. Phan, M. P. Duong, A. T. Doan, M. Q. Duong, and T. T. Nguyen, "Optimal design and operation of wind turbines in radial distribution power grids for power loss minimization," *Appl. Sci.*, vol. 14, pp. 1462, 2024.
- [16] Y. M. Atwa and E. F. E. Saadany, "Probabilistic approach for optimal allocation of wind based distributed generation in distribution systems," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 5, no. 1, pp. 79–88, 2011.
- [17] F. Wilson, A. M. Rahmani, M. Bendeche, A. Jolfaei, and K. K. R. Choo, "Green Anaconda Optimization: A new bio-inspired metaheuristic algorithm for solving optimization problems," *Biomimetics*, vol. 8, no. 1, p. 121, 2023.
- [18] G. Memarzadeh, M. Arabzadeh, and F. Keynia, "A new optimal allocation of DGs in distribution networks by using Coot bird optimization method," *Energy Inform.*, vol. 6, no. 30, 2023.
- [19] I. A. Moses, L. L. Kiprono, and S. M. Talai, "Optimal placement and sizing of distributed generation (DG) units in electrical power distribution networks," *Int. J. Electr. Electron. Eng. Stud.*, vol. 9, no. 1, pp. 66–124, 2023.
- [20] O. D. Montoya, A. M. Cabrera, H. R. Chamorro, L. A. Barrios, and E. R. Trujillo, "A Hybrid Approach Based on SOCP and the Discrete Version of the SCA for Optimal Placement and Sizing DGs in AC Distribution Networks," *Electron.*, vol. 10, no. 1, pp. 26, 2021.

Minh Cong Pham is currently a fifth-year student at the Faculty of Electrical Engineering at The university of Danang-University of Science and Technology (DUT), Vietnam. His main research areas include renewable energy, smart grids, and optimization of power systems. He can be contacted at email: congpham1907@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7754-6671>.

Cong Minh Nguyen is currently a fifth-year student at the Faculty of Electrical Engineering at The university of Danang-University of Science and Technology (DUT), Vietnam. His main research interests include power system analysis and the integration of renewable energy sources into distribution grids. He can be contacted at email: nguyenc.minh2002@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8069-2228>

Dinh Chung Phan has been a lecturer at the Faculty of Electrical Engineering, The university of Danang-University of Science and Technology in Vietnam since 2004. He obtained an Engineering degree, a master's degree, and a philosophy degree in electrical engineering from the University of Danang-University of Science and Technology in 2004, Dongguk University in Korea in 2011, and Kanazawa University in Japan in 2017, respectively. His research activities are in the fields of renewable energy, power systems, and control. He can be contacted at email: pdchung@dut.udn.vn. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7222-2942>
Further info on his homepage: <http://scv.udn.vn/phandinhchung>.