

# TỐI ƯU VỊ TRÍ VÀ CÔNG SUẤT NGUỒN ĐIỆN PHÂN TÁN TRÊN LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI HÌNH TIA KHÔNG CÂN BẰNG SỬ DỤNG THUẬT TOÁN WHALE OPTIMIZATION

## OPTIMIZE THE POSITION AND SIZE OF THE DISTRIBUTED POWER SOURCE ON THE NON-BALANCED DISTRIBUTION GRID USING THE WHALE OPTIMIZATION ALGORITHM

**Tôn Ngọc Triều<sup>1</sup>, Nguyễn Tùng Linh<sup>2</sup>, Trương Việt Anh<sup>1</sup>, Hoàng Ngọc Tuyền<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. HCM, <sup>2</sup>Trường Đại học Điện lực, <sup>3</sup>Cao đẳng Công nghệ Thủ Đức

Ngày nhận bài: 02/11/2020, Ngày chấp nhận đăng: 28/06/2021, Phản biện: TS. Nguyễn Bá Nghiễn

### **Tóm tắt:**

Bài báo này trình bày một phương pháp tối ưu vị trí và công suất của nguồn điện phân tán (Distributed Generation - DG) trên hệ thống điện phân phối hình tia không cân bằng (Unbalanced Radial Distribution System - URDS). Phương pháp đề xuất sử dụng thuật toán tối ưu Whale Optimization Algorithm (WOA) để tối ưu vị trí và công suất của DG nhằm giảm thiểu tổn thất công suất tác dụng trên URDS. Ngoài việc giảm thiểu tổn thất công suất tác dụng, phương pháp đề xuất còn cải thiện điện áp ở các nút có điện áp thấp trên hệ thống điện phân phối. Thuật toán WOA bắt chước hành vi của cá voi tìm kiếm thức ăn bằng cá thể gắn lưới bong bóng. Điểm đặc biệt là các tế bào não trong cá voi tương tự như tế bào người gọi là tế bào trục chính và có số lượng nhiều hơn con người. Với đặc điểm và cá thể này của cá heo được sử dụng để xác định vị trí và công suất tối ưu của DG vào URDS đã cho một giải pháp tối ưu toàn cục. Kết quả của phương pháp đề xuất này được kiểm tra trong bài toán tối ưu vị trí và công suất của DG trên URDS 25 nút và URDS 37 nút đã cho thấy tính hiệu quả của phương pháp đề xuất.

### **Từ khóa:**

Nguồn điện phân tán, hệ thống điện phân phối, không cân bằng, tổn thất công suất, WOA.

### **Abstract:**

This paper presents a method to optimize the position and size of distributed power sources (Distributed Generation - DG) on the Unbalanced Radial Distribution System (URDS). The proposed method uses the Whale Optimization Algorithm (WOA) optimization algorithm to optimize the position and size of DG to minimize the loss of active power on URDS. In addition to minimizing active power loss, the proposed method also improves the voltage at low voltage nodes on the distribution power system. The WOA algorithm mimics the behavior of whales foraging by attaching a bubble net. The special feature is that the brain cells in whales are similar to human cells called spindle cells and have more numbers than humans. With this feature and mechanism of the dolphin used to determine the optimal position and size of DG into URDS, it gives a global optimal solution. The results of this proposed method were examined in the problem of optimizing the position and size of DG on 25-node URDS and 37-node URDS showed the effectiveness of the proposed method.

**Keywords:**

Distributed generation, electric distribution system, unbalanced, power losses, WOA.

## 1. GIỚI THIỆU

DG ngày càng được phát triển trên EDS bởi vì lợi ích kinh tế và an ninh năng lượng là rất lớn [1]. Vì vậy, lắp đặt DG tùy theo mục tiêu để EDS hoạt động linh hoạt hơn và khai thác lợi ích tiềm năng tối đa của DG cũng như tối thiểu chi phí [2]. Khi tối ưu lắp đặt DG cần phải thỏa mãn về hạn chế kỹ thuật và tối ưu hóa các mục tiêu kinh tế [3]-[5]. Các bài toán tối ưu về lắp đặt DG chủ yếu là tối ưu vị trí và công suất của các DG. Các nghiên cứu về vị trí và công suất của DG là rất nhiều, nhưng chủ yếu với EDS cân bằng [6]. Trên thực tế thì các EDS đang vận hành hầu như trong điều kiện không cân bằng (KCB) với tổn thất công suất là rất lớn. Vì vậy, bài toán tối ưu vị trí và công suất của DG nhằm giảm thiểu tổn thất công suất tác dụng trong URDS là rất quan trọng [7].

Hiện nay, để tối ưu vị trí và công suất của các DG trong URDS thường có hai phương pháp tiếp cận là cổ điển và kinh nghiệm (“heuristics”). Cách tiếp cận thứ nhất là phương pháp cổ điển được sử dụng như quy hoạch tuyến tính (Linear Programming - LP), quy hoạch phi tuyến tính (Non-Linear Programming - NLP) [8], quy hoạch số nguyên hỗn hợp (Mixed Integer NLP - MINLP) [9], tối ưu hóa thứ tự (Ordinal Optimization - OO) [10]. Trong các nghiên cứu [8] - [10] thường cho kết quả tối ưu có độ hội tụ chậm hoặc rơi vào cực trị địa phương. Cách tiếp cận

thứ hai là một số phương pháp tìm kiếm lai. Một số thuật toán điển hình như thuật toán di truyền (Gene Algorithm - GA) [11], thuật toán Monte Carlo (Monte Carlo Algorithm - MCA) [12], thuật toán bầy đàn (Particle Swarm Algorithm - PSO) [13], thuật toán chó sói (Coyote Algorithm (COA) [14], thuật toán Salp Swarm (Salp Swarm Algorithm - SSA) [15]. Trong [11]-[15] đã đề xuất kỹ thuật mới để tối ưu vị trí và công suất các DG trong EDS với mục tiêu cơ bản là giảm thiểu tổn thất công suất. Các phương pháp này đã cho thấy kết quả hội tụ nhanh và tối ưu toàn cục. Các phương pháp này chủ yếu áp dụng tối ưu các DG cho EDS cân bằng. Trong các nghiên cứu [16]-[23], các tác giả đã trình bày các kỹ thuật khác nhau để tối ưu vị trí và công suất của các DG trong các URDS nhằm giảm tổn thất công suất. Trong [24], các tác giả đề xuất mô hình dựa vào thông số nút trên URDS để tối ưu các DG thông qua tính toán dòng phân bố dòng công suất KCB. Các yếu tố này tham gia vô hướng phản ánh các tham số của URDS, phân bố tải và công suất DG được áp dụng để giảm thiểu tổn thất công suất của hệ thống. Trong [25], các tác giả đề xuất phương pháp dòng điện ba pha theo tọa độ cực để phân tích ổn định điện áp. Phương trình của dòng điện ba pha và mô hình hóa của DG cũng được phát triển. Trong [26], các tác giả đề xuất phương pháp dòng công suất ba pha trong các mô hình thành phần

được thiết lập theo thứ tự thuận - nghịch - zero. Trong [27], tác giả đề xuất phương thức xác định nút có thể được sử dụng làm điểm chuẩn và sau đó bù tách rời, phương pháp này rất nhanh nhưng cho kết quả không chính xác. Trong [28], các tác giả đề xuất phương pháp mới để tối ưu hóa có tính đến sự mất cân bằng pha, loại tải khác nhau, cấp trung tính và các đặc điểm khác của URDS. Các phương pháp trong các tài liệu [24]-[28] tính toán dựa vào các phương pháp khác nhau với hàm mục tiêu là tổn thất công suất và cải thiện điện áp ở các nút. Các phương pháp này thường cho kết quả tối ưu chưa toàn cục vì mỗi giải pháp đưa ra ứng với các thông số là một thay đổi ngẫu nhiên để lựa chọn bất kỳ điểm nào trong không gian tìm kiếm. Sau đó, thuật toán sẽ được khởi động lại khi mà hàm mục tiêu cải thiện không đáng kể sau một số thế hệ nhất định.

Thuật toán WOA là thuật toán tối ưu hóa siêu heuristic mới. Thuật toán này bắt chước hành vi của cá voi tìm kiếm thức ăn (con mồi) bằng cá thể gắn lưới bong bóng. Cá thể này được sử dụng để tìm vị trí và công suất tối ưu của DG trong EDS. Theo tài liệu tham khảo [29], các tác giả đã cho thấy các tế bào não trong cá voi tương tự như tế bào người gọi là tế bào trực chính và chúng có số lượng nhiều hơn con người. Hành vi ở cá voi có phần đặc biệt và hành vi này gọi là phương pháp cho ăn bằng bong bóng. Hành vi này là duy nhất và chỉ được quan sát thấy ở cá voi lưng gù [30]. Phương pháp tìm kiếm này dựa trên việc tạo ra các bong bóng

bằng cách bao quanh hoặc thông qua đường dẫn có hình xoắn ốc [31] và hành vi tìm kiếm này được mô hình hóa theo mô hình toán học thành hai giai đoạn: Giai đoạn đầu là tìm kiếm và bao vây con mồi; giai đoạn tiếp theo là cập nhật vị trí và tần công [32]. Thuật toán WOA cũng được áp dụng cho bài toán tối ưu DG trong EDS cân bằng và đã cho kết quả rất tốt. Tuy nhiên, việc áp dụng tối ưu lắp đặt DG cho URDS chưa được thực hiện. Trong bài báo này, WOA được sử dụng tối ưu vị trí và công suất của DG trên URDS nhằm giảm tổn thất công suất tác dụng. Hiệu quả của phương pháp được đánh giá trên URDS 25 nút và 37 nút. Kết quả kiểm tra được so sánh với phương pháp trong [23] đã cho thấy tính hiệu quả của nó.

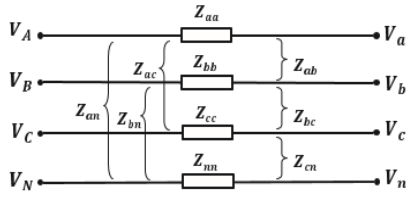
## 2. MÔ HÌNH TOÁN HỌC

### 2.1. Mô hình của EDS

EDS cân bằng và KCB được mô hình hóa như hình 1. Các tuyến dây và cáp ngầm của EDS được mô hình hóa với ma trận trở kháng như ở phương trình (1).

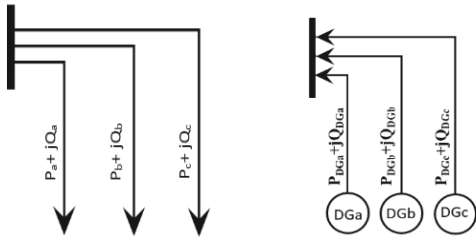
$$[Z_{abcn}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Trong cấu trúc của EDS, giả sử rằng đường dây trung tính của các tuyến dây được nối đất ở cả hai phía. Do đó, sử dụng phương pháp giản đơn Kron's, ta có ma trận  $Z_{abc}$  như phương trình (2) [17], [33].



Hình 1. Mô hình EDS

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} - \frac{1}{Z_{nn}} \begin{bmatrix} Z_{an} \\ Z_{bn} \\ Z_{cn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} \end{bmatrix} \quad (2)$$



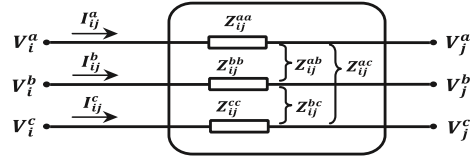
Hình 2. Mô hình tải và mô hình DG 3 pha

Do đó, trong EDS có bốn dây hoặc ba dây thì các đường dây được mô hình hóa bằng ma trận  $3 \times 3$  như phương trình (2). Hình 2, mô hình hóa của tải và DG cho EDS cân bằng và KCB. Tải được coi là có đặc tính công suất không đổi và được mô hình hóa bằng mô hình PQ có thể cân bằng hoặc KCB, tùy thuộc vào điều kiện vận hành. Trong mô hình hóa các DG, giả định rằng các nguồn này được vận hành ở chế độ PQ và có thể được kiểm soát độc lập.

## 2.2. Hàm mục tiêu

Giảm tổn thất công suất tác dụng thường được coi là mục tiêu quan trọng trong vấn đề vận hành EDS. Ngoài ra, các yếu tố cần được xem xét như cải thiện được cấu hình điện áp và giảm công suất truyền tải. Mô hình đường dây của EDS được đưa ra như hình 3. Do đó, tổn thất của từng nhánh được tính toán thông qua các mối

quan hệ trong các phương trình (3), (4) và (5) [34].



Hình 3. Mô hình đường dây

$$P_{Loss,br(ij)}^a = \text{Re}\{(V_i^a - V_j^a)(I_{ij}^a)^*\} \quad (3)$$

$$P_{Loss,br(ij)}^b = \text{Re}\{(V_i^b - V_j^b)(I_{ij}^b)^*\} \quad (4)$$

$$P_{Loss,br(ij)}^c = \text{Re}\{(V_i^c - V_j^c)(I_{ij}^c)^*\} \quad (5)$$

Với  $P_{Loss,br(ij)}^a$ : Tổng tổn thất công suất tác dụng của pha “a”. Đối với URDS, tổng tổn thất của một đường dây được tính bằng tổng các tổn thất các pha như phương trình (6):

$$P_{Loss,br(ij)}^{Total} = P_{Loss,br(ij)}^a + P_{Loss,br(ij)}^b + P_{Loss,br(ij)}^c \quad (6)$$

Hàm mục tiêu của bài toán tối ưu DG trên URDS thể hiện như phương trình (7):

$$f = \min\left(\sum_{Loss,br(ij)} P_{Loss,br(ij)}^{Total}\right) \quad (7)$$

## 2.3. Các ràng buộc trên URDS

Khi lắp đặt DGs trên URDS phải đảm bảo công suất các DG nằm trong giới hạn cho phép như ở phương trình (8) và (9).

$$P_{DG,i,\min} \leq P_{DG,i} \leq P_{DG,i,\max}; i = 1, 2, \dots, N_{DG} \quad (8)$$

$$Q_{DG,i,\min} \leq Q_{DG,i} \leq Q_{DG,i,\max}; i = 1, 2, \dots, N_{DG} \quad (9)$$

Với  $P_{DG,i,\min}$  và  $P_{DG,i,\max}$  lần lượt là giới hạn công suất tác dụng nhỏ nhất và lớn nhất của DG thứ  $i$ ;  $Q_{DG,i,\min}$  và  $Q_{DG,i,\max}$  lần lượt là công suất phản kháng nhỏ nhất và lớn nhất của DG thứ  $i$ ;  $P_{DG,i}$  là công suất phát của DG thứ  $i$ ;  $Q_{DG,i}$  là công suất phát của DG thứ  $i$ ;  $N_{DG}$  là số lượng DG

kết nối trên EDS. Giới hạn dòng điện trên các nhánh và điện áp các nút:

$$|I_i| \leq I_{i,max}, \text{ với } i = 1, 2, \dots, N_{bus}; \quad (10)$$

$$V_{i,min} \leq |V_i| \leq V_{i,max}, \text{ với } i = 1, 2, \dots, N_{bus} \quad (11)$$

Điện áp tại mỗi nút trong hệ thống nằm trong phạm vi có thể chấp nhận được là 0,95 pu và 1,05 pu. Trong đó:  $N_{bus}$  là số nút trong lưới điện;  $I_{i,max}$  là giới hạn dòng điện trên nhánh thứ  $i$ ;  $V_{i,min}$  và  $V_{i,max}$  lần lượt là giới hạn điện áp nút nhỏ nhất và lớn nhất cho phép. Ngoài ra, trong quá trình lắp đặt DGs trên LĐPP cần phải thỏa mãn các điều kiện ràng buộc cân bằng công suất, điện áp và dòng điện nằm trong giới hạn cho phép. Do đó, hàm thích nghi của bài toán được mô tả như sau:

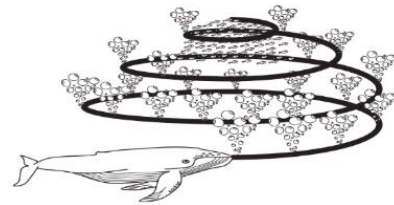
$$fit = f + K \cdot [\max(V_{min}^{lim} - V_{min}, 0) + \max(V_{max} - V_{max}^{lim}, 0) + \max(LCF_{max} - LCF_{max}^{lim}, 0)] \quad (12)$$

Trong đó:  $fit$  là giá trị hàm thích nghi,  $K$  là hệ số phạt vi phạm ràng buộc điện áp và dòng điện.  $V_{min}^{lim}$  và  $V_{min}$  là giới hạn điện áp thấp nhất cho phép và biên độ điện áp bé nhất trong EDS.  $V_{max}^{lim}$  và  $V_{max}$  là giới hạn điện áp lớn nhất cho phép và biên độ điện áp lớn nhất trong EDS.  $LCF_{max}$  và  $LCF_{max}^{lim}$  là hệ số mang tải lớn nhất và hệ số mang tải cho phép trong EDS.

### 3. TỐI ƯU VỊ TRÍ VÀ CÔNG SUẤT CỦA DG TRONG UDRS SỬ DỤNG WOA

Kỹ thuật săn mồi bằng lưới bong bóng ở cá voi lưng gù được xem là một trong những hành vi kiếm ăn độc đáo và phức tạp nhất trong thế giới động vật. Cá voi lưng gù vốn là loài động vật thích hoạt

động độc lập nhưng trong hành vi kiếm ăn này, chúng dường như hợp sức lại để săn mồi hiệu quả hơn. Các con cá voi được quan sát thấy cùng nhau tạo ra xoáy bong bóng lớn để dồn những con cá nhỏ và động vật nhuyễn thể vào bên trong, cho phép chúng nuốt hàng nghìn con mồi một lúc. Điều đặc biệt là hành vi này không được quan sát thấy ở tất cả cá voi lưng gù. Đó không phải cách săn mồi bản năng mà dường như là kỹ thuật được sáng tạo ra bởi một số con cá voi thông minh và có nhiều kinh nghiệm săn mồi [32]. Phương pháp tìm kiếm được mô hình hóa thành 2 giai đoạn:



Hình 4. Cá voi hoạt động tìm kiếm theo đường hình xoắn ốc

- Giai đoạn 1: Tìm kiếm và bao vây con mồi: Tìm kiếm con mồi có thể được trình bày như phương trình (13) và (14).

$$D = |C \cdot X_{rand} - X| \quad (13)$$

$$X(t+1) = X_{rand} - A \cdot D \quad (14)$$

Trong đó các biến  $A$  và  $C$  là các vectơ hệ số được biểu diễn dưới dạng (15), (16)

$$A = 2 \cdot a \cdot r - a \quad (15)$$

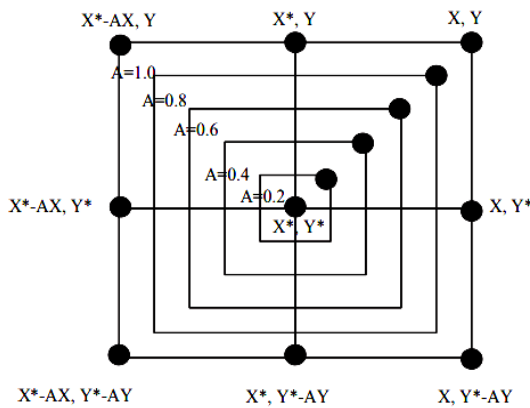
$$C = 2 \cdot r \quad (16)$$

Trong đó,  $a$  giảm tuyến tính từ 2 đến 0 và  $r$  là số ngẫu nhiên trong  $[0, 1]$

$$D = |C \cdot X^*(t) - X(t)| \quad (17)$$

$$X(t+1) = X^*(t) - A \cdot D \quad (18)$$

Nếu  $A \geq 1$ , thì phương trình (13) và (14) được sử dụng. Có nghĩa là cá voi vẫn đang tìm kiếm con mồi, quá trình này được gọi là cá thể tìm kiếm con mồi. Nếu  $A < 1$ , thì phương trình (17) và (18) được sử dụng, có nghĩa là cá voi đã tìm kiếm con mồi xong và bây giờ nó phải tấn công, quá trình này được gọi là bao vây con mồi bằng cá thể thu nhỏ. Trong đó  $t$  là lần lặp hiện tại,  $X$  là vector vị trí và  $X^*$  là giá trị tốt nhất của vector vị trí cho đến thời điểm hiện tại.



Hình 5. Cá thể tìm kiếm bong bóng trong WOA

- Cập nhật vị trí và tấn công: Cập nhật vị trí được thể hiện như phương trình (19)

$$x(t+1) = \begin{cases} X^*(t) - A \cdot D & , \text{nếu } p < 0,5 \\ D \cdot e^{bl} \cdot \cos(2p1) + X^*(t) & , \text{nếu } p \geq 0,5 \end{cases} \quad (19)$$

Trong đó:  $p$  là số ngẫu nhiên ở  $[0, 1]$ ,  $l$  trong giá trị trong  $[-1, 1]$  và  $b$  là hằng số để mô tả hình dạng xoắn ốc.

Hình 5 cho thấy cá thể tìm kiếm bong bóng trong WOA và hình 6 cho thấy lưu

đồ của phương pháp WOA. Phương pháp dựa trên WOA để tối ưu lắp đặt DG trong URDS cho mục tiêu giảm thiểu tổn thất công suất như sau:

Bước 1: Nhập các thông số đầu vào của đường dây và phụ tải của URDS.

Bước 2: Tính tổng tổn thất công suất tác dụng trên toàn URDS sử dụng phương pháp Backward/Forward cải tiến [35].

Bước 3: Khởi tạo số lượng cá thể tìm kiếm được tối ưu hóa về vị trí và công suất của DG với các ràng buộc.

Bước 4: Khởi tạo bộ đếm.

Bước 5: Tính toán hàm thích nghi cho từng cá thể tìm kiếm theo phương trình (12) và xác định cá thể tốt nhất ban đầu.

Bước 6: Đối với mỗi cá thể tìm kiếm cập nhật lại  $a$ ,  $A$ ,  $C$ ,  $l$  và  $p$  bằng cách sử dụng các phương trình (15) và (16). Trong đó  $l$  và  $p$  là các số ngẫu nhiên.

Bước 7: Nếu  $(p < 0,5)$ , chuyển sang Bước 8, ngược lại chuyển sang Bước 10.

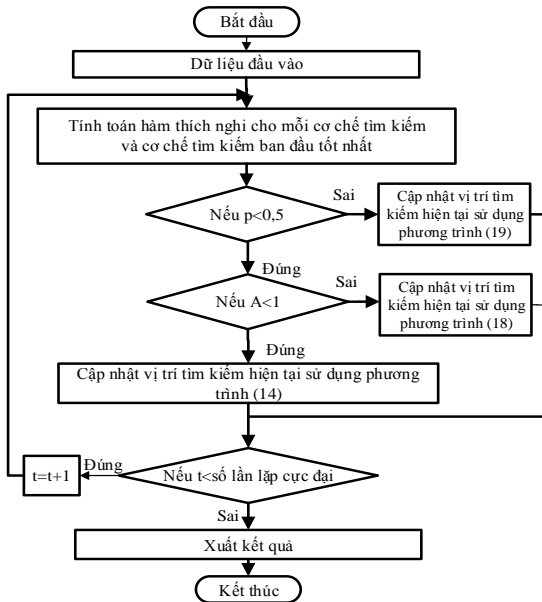
Bước 8: Nếu  $|A| < 1$ , cập nhật vị trí hiện tại bằng cách sử dụng phương trình (14).

Bước 9: Nếu  $|A| \geq 1$ , tính toán cá thể tìm kiếm mới và cập nhật vị trí của nó bằng cách sử dụng phương trình (18).

Bước 10: Cập nhật vị trí của cá thể tìm kiếm hiện tại bằng phương trình (19).

Bước 11: Kiểm tra bộ đếm đạt mức tối đa giá trị đặt. Nếu đúng chuyển đến Bước 12, ngược lại thì quay lại Bước 5.

Bước 12: Xuất kết quả.



Hình 6. Lưu đồ của thuật toán WOA

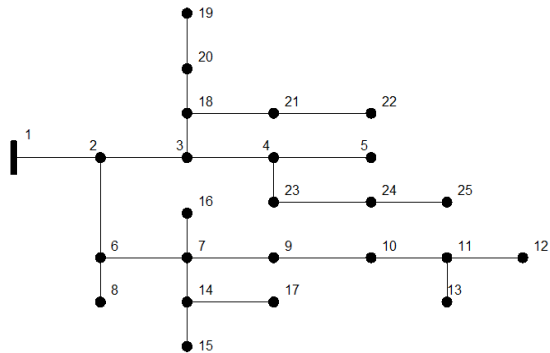
#### 4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Phương pháp đề xuất đã được đánh giá trên URDS 25 nút và URDS 37 nút. Trong mỗi URDS, có 1 DG có công suất tối đa là 20% tổng công suất của hệ thống được cài đặt. Phương pháp tối ưu vị trí và công suất DGs dựa trên WOA được xây dựng trong môi trường Matlab. Thông số điều khiển của WOA được thiết lập cho cả 2 hệ thống với số vòng lặp lớn nhất được chọn bằng 300. Trên mỗi URDS, thuật toán WOA được chạy độc lập 50 lần, kết quả tối ưu thu được từ WOA được so sánh với tài liệu [23].

##### 4.1. URDS - 25 nút

Phương pháp WOA đề xuất được thử nghiệm trên URDS - 25 nút với điện áp 4,16 kV với sơ đồ nguyên lý như hình 7. Dữ liệu đường dây và tải tham khảo ở

[23]. Tổng thất công suất ban đầu của hệ thống là 150,12 kW với điện áp thấp nhất trong các pha A, B & C tương ứng là 0,9284 p.u; 0,9284 p.u; 0,9366 p.u đều ở tại nút 12 của URDS - 25 nút. Sau khi sử dụng thuật toán WOA để tối ưu vị trí và công suất với 1 DG, kết quả cho thấy DG được xác định ở vị trí tối ưu tại nút 13 với công suất là 3×215 kW có hệ số công suất trễ 0,87.

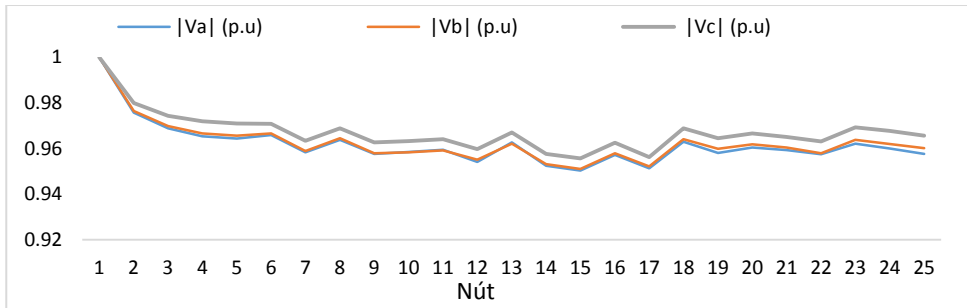


Hình 7. Sơ đồ đơn tuyến URDS-25 nút

Bảng 1 cho thấy kết quả trước và sau khi lắp đặt DG của phương pháp được đề xuất với phương pháp trong [23]. Khi kết nối DG trong URDS ở vị trí nút 13, tổng tổn thất của toàn bộ hệ thống là 86,25 kW. Điện áp thấp nhất trong các pha A, B và C lần lượt là 0,9542 p.u; 0,9552 p.u; 0,9598 p.u đều ở tại nút số 12. Từ kết quả, tổng tổn thất công suất trên toàn hệ thống giảm từ 150,12 kW xuống còn 86,25 kW và điện áp ở nút 12 cũng được cải thiện trong cả ba pha A, B và C từ 0,9284 p.u, 0,9284 p.u; 0,9366 p.u lên 0,9542 p.u; 0,9552 p.u; 0,9598 p.u. Kết quả của phương pháp đề xuất cũng cho thấy tổn thất công suất thấp hơn so với phương pháp trong [23]. Ngoài việc giảm tổn thất công suất, điện áp ở tất cả các nút cũng được cải thiện

như hình 8. Đối với kết quả áp dụng cho URDS 25 nút, sau 30 lần lặp thì kết quả hội tụ. Giá trị nhỏ nhất, trung bình của

hàm thích nghi tương ứng là 86,48; 86,9 và 87,32 cho thấy chất lượng của giải pháp đề xuất.

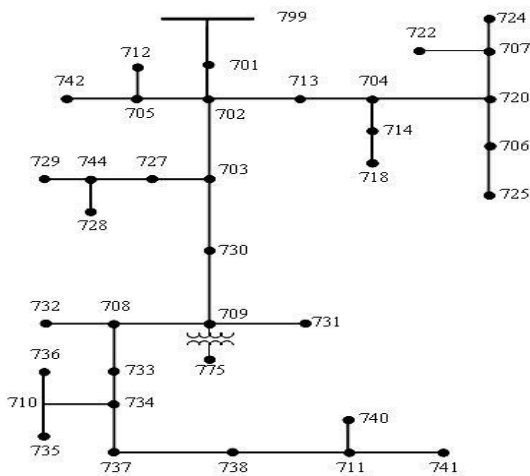


Hình 8. Cấu hình điện áp sau khi lắp đặt DG cho URDS - 25 nút

Bảng 1. Kết quả lắp đặt DG cho URDS – 25 nút

Thông số	Không có DG	Có DG [23]	Có DG - WOA
Vị trí	-	13	13
Công suất	-	3x215 kW, cos $\varphi$ = 0,85	3x223 kW, cos $\varphi$ = 0,87
Điện áp thấp nhất - nút	0,9284 (A) - 12 0,9284 (B) - 12 0,9366 (C) - 12	0,9504 (A) 0,9511 (B) 0,9557 (C)	0,9542 (A) 0,9552 (B) 0,9598 (C)
$\sum \Delta P$ (kW)	150,12	90,44	86,25
Giảm $\Delta P$ (%)	-	39,76	42,55

#### 4.2. URDS - 37 nút



Hình 9. Sơ đồ của URDS - 37 nút

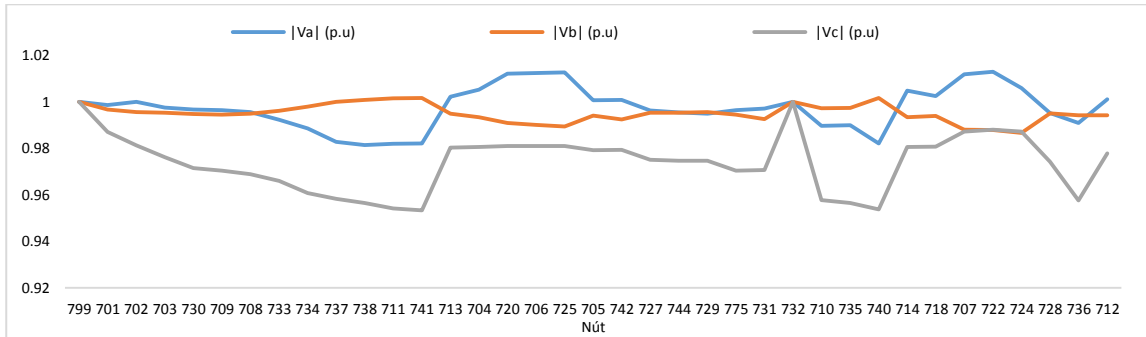
WOA được đề xuất được thử nghiệm trên URDS 37 nút với điện áp thử nghiệm 4,8 kW như hình 9. Dữ liệu đường dây và tải như trong [23]. Tất cả các tải là tải tại chỗ và bao gồm PQ không đổi và tải rất mất cân bằng trên hệ thống. Từ kết quả cho thấy nút 722 là vị trí tốt nhất cho vị trí DG với công suất  $3 \times 164$  kW ở hệ số công suất trễ 0,85. Bảng 2 cho thấy một bản tóm tắt các kết quả thử nghiệm trước và sau khi đặt DG của phương pháp được đề xuất với phương pháp được đề xuất trong [23]. Các điện áp tối thiểu cũng được làm



nổi bật, điện áp tối thiểu trong các pha A, B & C được cải thiện từ 0,9418 p.u (nút 738); 0,9559 p.u (nút 724); 0,9421 p.u (nút 740) (khi không có DG) được cải thiện 0,9814, 0,9863, 0,9534 p.u (khi có DG). Do đó, có sự cải thiện về điện áp tối thiểu khi so sánh với vị trí của DG trước và sau khi kết nối DG.

Từ kết quả, tổng tổn thất điện năng trên toàn hệ thống giảm từ 85,67 kW xuống còn 48,24 kW. Kết quả của phương pháp được đề xuất cũng cho thấy việc tổn thất

công suất tác dụng thấp hơn so với phương pháp trong [23]. Ngoài việc giảm tổn thất công suất của hệ thống, điện áp ở tất cả các nút cũng được cải thiện như hình 10. Ngoài việc giảm tổn thất công suất cũng như điện áp ở tất cả các nút cũng được cải thiện (hình 10). Đối với kết quả áp dụng cho lưới điện URDS 37 nút, sau 30 lần lặp thì kết quả đã hội tụ. Giá trị nhỏ nhất, trung bình và cao nhất của hàm thích nghi tương ứng là 43,72; 43,87 và 44,02 đã cho thấy chất lượng của giải pháp đề xuất.



Hình 10. Cấu hình điện áp sau khi lắp đặt DG cho URDS – 37 nút

Bảng 2. Kết quả kiểm tra lắp đặt DG cho URDS – 37 nút

Thông số	Không có DG	Có DG [23]	Có DG - WOA
Vị trí	-	722	722
Công suất	-	3x160 kW, cos $\varphi$ = 0,85	3x164 kW, cos $\varphi$ = 0,85
Điện áp thấp nhất - nút	0,9418 (A) - 738 0,9559 (B) - 724 0,9421 (C) - 740	0,9814 (A) 0,9863 (B) 0,9534 (C)	0,9815 (A) 0,9867 (B) 0,9538 (C)
$\sum \Delta P$ (kW)	85,67	51,2	48,24
Giảm $\Delta P$ (%)	-	40,24	43,68

## 5. KẾT LUẬN

Bài báo này trình bày thuật toán WOA để giải quyết bài toán tối ưu vị trí và công

suất của DG trong URDS với hàm mục tiêu là giảm thiểu tổn thất công suất tác dụng. Phương pháp WOA đề xuất được

chứng minh và thử nghiệm trên URDS 25 nút và URDS 37 nút đã cho thấy hiệu quả và chất lượng của thuật toán. Vì vậy, phương pháp đề xuất là một phương pháp hiệu quả để giải quyết bài toán tối ưu vị trí và công suất của các DG trong các URDS.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] R.H.A. Zubo, G. Mokryani, H.S. Rajamani, J. Aghaei, T. Niknam, and P. Pillai, 'Operation and planning of distribution networks with integration of renewable distributed generators considering uncertainties: A review', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 72, no. May 2016, pp. 1177–1198, 2017.
- [2] R.H.A. Zubo, G. Mokryani, H.S. Rajamani, J. Aghaei, T. Niknam, and P. Pillai, 'Operation and planning of distribution networks with integration of renewable distributed generators considering uncertainties: A review', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 72, no. September, pp. 1177–1198, 2017.
- [3] P.S. Georgilakis and N.D. Hatziargyriou, 'Optimal distributed generation placement in power distribution networks: Models, methods, and future research', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 3420–3428, 2013.
- [4] 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.
- [5] B. Singh and J. Sharma, 'A review on distributed generation planning', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, no. December 2015, pp. 529–544, 2017.
- [6] M. Pesaran H.A, P.D. Huy, and V.K. Ramachandaramurthy, 'A review of the optimal allocation of distributed generation: Objectives, constraints, methods, and algorithms', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 75, no. September 2015, pp. 293–312, 2017.
- [7] M. Kumawat, N. Gupta, N. Jain, and R. C. Bansal, 'Optimally Allocation of Distributed Generators in Three-Phase Unbalanced Distribution Network', *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 749–754, 2017.
- [8] A. Keane and M. O'Malley, 'Optimal allocation of embedded generation on distribution networks', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 3, pp. 1640–1646, 2005.
- [9] Y.M. Atwa, E.F. El-Saadany, M.M.A. Salama, and R. Seethapathy, 'Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 1, pp. 360–370, 2010.
- [10] J.H. Teng, Y. H. Liu, C.Y. Chen, and C.F. Chen, 'Value-based distributed generator placements for service quality improvements', *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 29, no. 3, pp. 268–274, 2007.
- [11] A. Silvestri, A. Berizzi, and S. Buonanno, 'Distributed generation planning using genetic algorithms', *Int. Conf. Electr. Power Eng. PowerTech Budapest 1999*, p. 257, 1999.
- [12] W. El-khattam, S. M. Ieee, Y. G. Hegazy, M. Ieee, M. M. A. Salama, and F. Ieee, 'Investigating distributed generation systems performance using monte carlo simulation', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 2, pp. 524–532, 2006.
- [13] P. Kayal and C.K. Chanda, 'Placement of wind and solar based DGs in distribution system for power loss minimization and voltage stability improvement', *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 53, pp. 795–809, 2013.
- [14] T.N. Ton, T.T. Nguyen, V.A. Truong, and T.P. Vu, 'Optimal Location and Size of Distributed Generators in an Electric Distribution System Based on a Novel Metaheuristic Algorithm', *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 10, no. 1, pp. 5325–5329, 2020.

- [15] K.S. Sambaiah and T. Jayabarathi, 'Optimal allocation of renewable distributed generation and capacitor banks in distribution systems using salp swarm algorithm', *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 9, no. 1, pp. 96–107, 2019.
- [16] A. Parizad, A. H. Khazali, and M. Kalantar, 'Unbalanced distribution network planning by siting and sizing of distributed generation and harmonic filter due to losses and THD minimization', *Int. Rev. Electr. Eng.*, vol. 5, no. 2, pp. 726–737, 2010.
- [17] S.A. Taher and M.H. Karimi, 'Optimal reconfiguration and DG allocation in balanced and unbalanced distribution systems', *Ain Shams Eng. J.*, vol. 5, no. 3, pp. 735–749, 2014.
- [18] M.M. Othman, W. El-Khattam, Y.G. Hegazy, and A. Y. Abdelaziz, 'Optimal placement and sizing of voltage controlled distributed generators in unbalanced distribution networks using supervised firefly algorithm', *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 82, pp. 105–113, 2016.
- [19] M.M. Othman, W. El-Khattam, Y. G. Hegazy, and A. Y. Abdelaziz, 'Optimal placement and sizing of distributed generators in unbalanced distribution systems using supervised big bang-big crunch method', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 2, pp. 911–919, 2015.
- [20] A.Y. Abdelaziz, Y.G. Hegazy, W. El-Khattam, and M.M. Othman, 'Optimal allocation of stochastically dependent renewable energy based distributed generators in unbalanced distribution networks', *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 119, pp. 34–44, 2015.
- [21] P. Gangwar, S.N. Singh, and S. Chakrabarti, 'Network reconfiguration for the DG-integrated unbalanced distribution system', *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 13, no. 17, pp. 3896–3909, 2019.
- [22] F. Ding and K.A. Loparo, 'Feeder Reconfiguration for Unbalanced Distribution Systems With Distributed Generation : A Hierarchical Decentralized Approach', pp. 0–9, 2015.
- [23] T. Ramana, V. Ganesh, and S. Sivanagaraju, 'Distributed generator placement and sizing in unbalanced radial distribution system', *Cogener. Distrib. Gener. J.*, vol. 25, no. 1, pp. 52–71, 2010.
- [24] S. Tong and K.N. Miu, 'A network-based distributed slack bus model for DGs in unbalanced power flow studies', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 2, pp. 835–842, 2005.
- [25] X.P. Zhang, P. Ju, and E. Handschin, 'Continuation three-phase power flow: A tool for voltage stability analysis of unbalanced three-phase power systems', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 3, pp. 1320–1329, 2005.
- [26] X.P. Zhang and H. Chen, 'Asymmetrical three-phase load-flow study based on symmetrical component theory', *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 141, no. 3, pp. 248–252, 1994.
- [27] 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.
- [28] L.R. De Araujo, D.R.R. Penido, and F.D.A. Vieira, 'A multiphase optimal power flow algorithm for unbalanced distribution systems', *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 53, no. 1, pp. 632–642, 2013.
- [29] P.R. Hof and E. Van Der Gucht, 'Structure of the cerebral cortex of the humpback whale, *Megaptera novaeangliae* (Cetacea, Mysticeti, Balaenopteridae)', *Anat. Rec. Part A Discov. Mol. Cell. Evol. Biol.*, vol. 31, no. November 2006, pp. 1–31, 2006.
- [30] W.A. Watkins and W. E. Schevill, 'Aerial Observation of Feeding Behavior in Four Baleen Whales: *Eubalaena glacialis*, *Balaenoptera borealis*, *Megaptera novaeangliae*, and *Balaenoptera physalus*', *J. Mammal.*, vol. 60, no. 1, pp. 155–163, 1979.
- [31] J.A. Goldbogen, A. S. Friedlaender, J. Calambokidis, M.F. McKenna, M. Simon, and D. P. Nowacek, 'Integrative Approaches to the Study of Baleen Whale Diving Behavior, Feeding Performance, and Foraging Ecology', *Bioscience*, vol. 63, no. 2, pp. 90–100, 2013.

- [32] S. Mirjalili and A. Lewis, 'The Whale Optimization Algorithm', *Adv. Eng. Softw.*, vol. 95, pp. 51–67, 2016.
- [33] M. Lacey, 'Distribution systems', *J. / Am. Water Work. Assoc.*, vol. 93, no. 7, p. 2, 2001.
- [34] J.R. Fanchi, 'Electric Power Generation and Distribution', *Energy Technol. Dir. Futur.*, pp. 28–58, 2004.
- [35] T.N. Triều, T.V. Anh, and V.P. Tú, 'Áp dụng phương pháp Backward / Forward cải tiến trong bài toán tối ưu lưới điện phân phối có kết nối nguồn điện phân tán', *Tạp chí phát triển KH&CN*, vol. 2, no. 2, 2019.
- [36] A. Koirala, R. D'Hulst, and D. Van Hertem, 'Impedance modelling for European style Distribution Feeder', *SEST 2019 - 2nd Int. Conf. Smart Energy Syst. Technol.*, 2019.

### Giới thiệu tác giả:



Tác giả Tôn Ngọc Triều tốt nghiệp đại học và nhận bằng Thạc sĩ tại Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh năm 2005 và năm 2010. Hiện nay tác giả là giảng viên Trường Cao đẳng Công nghệ Thủ Đức, nghiên cứu sinh tại Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh.



Tác giả Trương Việt Anh tốt nghiệp đại học năm 1994, nhận bằng Thạc sĩ năm 1999 và Tiến sĩ năm 2004 tại Trường Đại học Bách khoa TP Hồ Chí Minh. Hiện nay tác giả công tác tại Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh.



Tác giả Nguyễn Tùng Linh tốt nghiệp đại học ngành hệ thống điện năm 2005 tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội; nhận bằng Thạc sĩ năm 2010, bằng Tiến sĩ ngành kỹ thuật điều khiển tự động hóa năm 2018 tại Viện Hàn lâm Khoa học Công nghệ Việt Nam. Hiện nay tác giả công tác tại Trường Đại học Điện lực.



Tác giả Hoàng Ngọc Tuyển tốt nghiệp đại học, nhận bằng Thạc sĩ tại Trường Đại học Bách khoa Thành phố Hồ Chí Minh năm 2007 và năm 2011. Hiện nay tác giả là giảng viên Trường Cao đẳng Công nghệ Thủ Đức

