

# TÍNH TOÁN ĐIỀU ĐỘ TỐI ƯU TRONG HỆ THỐNG ĐIỆN CÓ MÁY PHÁT ĐIỆN GIÓ SỬ DỤNG THUẬT TOÁN TỐI ƯU CÁ VOI

## OPTIMAL POWER FLOW IN WIND POWER INTEGRATED SYSTEMS USING WHALE OPTIMIZATION ALGORITHM

Lê Đình Lương\*

*Viện Kỹ thuật HUTECH, Trường Đại học Công nghệ TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam<sup>1</sup>*

\*Tác giả liên hệ / Corresponding author: ld.luong@hutech.edu.vn

(Nhận bài / Received: 07/4/2024; Sửa bài / Revised: 07/7/2024; Chấp nhận đăng / Accepted: 11/7/2024)

**Tóm tắt** - Hiện nay, các nguồn năng lượng hóa thạch đang cạn kiệt dần, dẫn đến khả năng phát điện từ các nguồn này cũng bị hạn chế. Trong khi nhu cầu sử dụng năng lượng điện trên khắp thế giới ngày một gia tăng lên. Đòi hỏi trong hệ thống điện phải tích hợp thêm các nguồn năng lượng tái tạo vào mạng điện. Bài báo này giới thiệu công cụ tính toán mới là thuật toán tối ưu cá voi (WOA) để đáp ứng việc tính toán điều độ công suất tối ưu trong mạng điện có tích hợp nhà máy phát năng lượng điện gió. WOA được sử dụng để giải quyết các bài toán phi tuyến trong cả hai trường hợp có và không có năng lượng gió. Việc tính toán được thực hiện trên hệ thống mạng điện IEEE 30 nút và kết quả thu được được so sánh với một số phương pháp trước đây. Từ kết quả phân tích có thể suy ra rằng, phương pháp này đã cải thiện kết quả tính toán tốt hơn một số phương pháp hiện có.

**Từ khóa** - Điều độ tối ưu công suất; Năng lượng tái tạo; Nhà máy điện gió; Thuật toán tối ưu cá voi; mạng điện IEEE 30 nút

### 1. Đặt vấn đề

Bài toán điều độ tối ưu công suất (OPF) đóng vai trò rất quan trọng trong lĩnh vực vận hành và điều khiển hệ thống điện nhằm đạt hiệu quả cao nhất công suất phát của các nhà máy để đáp ứng nhu cầu điện năng của toàn mạng điện. Điều độ tối ưu công suất xảy ra trong hệ thống điện do hệ thống phát điện tại các nhà máy chưa được phát đúng công suất phù hợp với chi phí phát điện hiệu quả của từng nhà máy. Để đánh giá hoạt động hiệu quả của hệ thống phát điện, một số thông số được xem xét để đánh giá như độ ổn định điện áp của hệ thống phát điện, tổn thất, chi phí nhiên liệu liên quan đến phát điện... Để đạt được mục tiêu tối ưu của hệ thống, điều độ tối ưu công suất được đặt thành các giá trị kiểm soát cụ thể của nhà máy phát điện dựa trên các giá trị tối ưu, các giá trị ràng buộc cân bằng và bất cân bằng cũng được kiểm tra cho mục tiêu phát điện tại mỗi thời điểm của hệ thống. Các ràng buộc cân bằng và bất cân bằng của hệ thống phát điện được tối ưu hóa gián tiếp bởi các yếu tố khác như các biến điều khiển, hiệu quả vận hành của các biến phụ thuộc... [1]. Trên thế giới, hầu hết các nhà nghiên cứu đã phát hiện ra rằng, mục tiêu chính của bài toán điều độ tối ưu công suất là giảm chi phí nhiên liệu của hệ thống phát điện. Các nhà nghiên cứu đã đưa ra các phương pháp toán học hoàn toàn khác nhau để giải quyết những vấn đề của bài toán điều độ tối ưu công suất, có thể là những bài toán tuyến tính, phi tuyến tính hoặc hỗn hợp vừa tuyến tính vừa phi tuyến. Để khắc phục nhược điểm hiện có liên quan đến bài toán điều độ tối ưu, các kỹ thuật

**Abstract** - Currently, the gradual depletion of fossil energy sources has limited their ability to generate electricity. In the meantime, there is a growing global demand for electrical energy. This requires the power system to integrate more renewable energy sources into the power network. This article introduces the Whale Optimization Algorithm (WOA), a new calculation method for determining optimal power flow in power networks with integrated wind power plants. WOA is used to tackle nonlinear problems in both cases, with and without wind energy. The calculation is conducted on an IEEE 30 bus test system, and the findings are compared with those obtained from previous methods. The analysis results indicate that, this method has outperformed some existing methods in terms of calculation accuracy.

**Key words** - Optimal power flow; Renewable energy; Wind power; Whale Optimization Algorithm; IEEE 30 bus

lập trình khác nhau được phát triển như phương pháp tuyến tính, phi tuyến và phương pháp tính toán Newton được phát triển [2]. Hệ thống phát điện thường có những vấn đề như kích thước hệ thống lớn, có nhiều biến tuyến tính và phi tuyến. Phần lớn các bài toán hệ thống điện gặp khó khăn trong giải quyết ở việc có nhiều biến không liên tục, không tuyến tính, dẫn đến các phương pháp giải truyền thống gặp khó khăn trong việc tính toán tối ưu. Trong xu thế phát triển của các thuật toán, nhiều phương pháp tiến hóa được phát triển và áp dụng vào giải quyết các bài toán tối ưu trong kỹ thuật và cho nhiều kết quả hiệu quả hơn so với các phương pháp truyền thống [3]-[5]. Trong các phương pháp tối ưu được phát triển thời gian gần đây nổi bật có phương pháp thuật toán tối ưu cá voi (WOA) được áp dụng vào những bài toán kỹ thuật khác nhau và đã cho nhiều kết quả tính toán tốt hơn so với các phương pháp khác [6].

Với công cụ hiệu quả của các phương pháp tiến hóa đã được áp dụng trong bài toán hệ thống điện, trong nghiên cứu này sẽ phát triển một hàm mục tiêu làm giảm thiểu chi phí phát điện và vẫn duy trì ổn định giá trị điện áp của hệ thống điện trong khoản cho phép bằng cách tích hợp thêm vào mạng điện các nhà máy phát điện gió.

Trong bài báo này, bài toán phân bố công suất tối ưu được giải quyết cho một hệ thống bao gồm cả máy phát điện gió và nhiệt. Bản chất không liên tục của trang trại điện gió được giả định tuân theo phân phối Weibull [7]. Hai loại trang trại gió khác nhau với các yếu tố hình dạng khác nhau được xem xét để phân tích hiệu suất [8]-[9].

<sup>1</sup> HUTECH Institute of Engineering, HUTECH University, Vietnam (Le Dinh Luong)

Thuật toán tối ưu hóa cá voi được thực hiện để giải quyết bài toán điều độ tối ưu có tích hợp trang trại điện gió do sự đơn giản của việc giải quyết các vấn đề ràng buộc. Phương pháp tối ưu cá voi được đưa vào tính toán, phân tích và so sánh với các phương pháp khác để nói lên sự ưu việt của WOA trong giải bài toán vận hành tối ưu hệ thống điện.

## 2. Bài toán

### 2.1. Bài toán điều độ tối ưu

Mục đích chính của bài toán OPF là làm giảm chi phí phát điện nhưng vẫn đảm bảo các chế độ vận hành của hệ thống điện. Hàm chi phí phát điện của hệ thống được mô tả như sau:

Cực tiểu chi phí  $F_j(P_j)$

$$F_j(P_j) = \sum_{j=1}^n (a_j P_j^2 + b_j P_j + c_j) \quad (1)$$

Trong đó:  $F_j$  là chi phí phát điện của nhà máy thứ  $j$ ;  $a_j$ ,  $b_j$  và  $c_j$  là các hệ số của hàm chi phí nhiên liệu bậc hai.

### Ràng buộc cân bằng

Phương trình cân bằng công suất cho hệ thống điện được cho bởi:

$$\sum_{j=1}^m P_j - P_d - P_l = 0 \quad (2)$$

Trong đó:

$P_d$  là công suất yêu cầu của hệ thống (MW);

$P_l$  là công suất tổn hao trong hệ thống (MW).

Tổn hao truyền tải được tính toán bằng phương pháp hệ số B, biểu diễn bằng biểu thức sau:

$$P_l = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i B_{ij} P_j \quad (3)$$

### Ràng buộc bất phương trình

Ràng buộc công suất tác dụng: Giới hạn phát công suất tác dụng cho các máy phát nhiệt điện được quy ước bởi (4).

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{max} \quad (4)$$

Ràng buộc điện áp: Điện áp tại các thanh cái phải nằm trong giới hạn quy định theo biểu thức (5).

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad (5)$$

Ràng buộc đường dây tải điện: Dòng công suất tác dụng trên đường dây tải điện phải nằm trong giới hạn quy định và được biểu thị bằng (6).

$$S_i \leq S_{i,max} \quad i = 1, 2, \dots, NTL \quad (6)$$

### 2.2. Mô hình nhà máy điện gió

Để mô tả sự không ổn định về tốc độ gió được mô hình hóa toán học bằng hàm phân phối weibull. Hàm phân phối xác suất của tốc độ gió được biểu diễn bởi (7).

$$f_v(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (7)$$

Trong đó:  $k$  là hệ số hình dạng và  $c$  là hệ số tỷ lệ

Công suất đầu ra của một tuabin gió được cho bởi:

$$P_{wr} = \begin{cases} 0 & v < v_{in} \text{ or } v > v_{out} \\ (a \cdot v^3 + b \cdot P_r) & v_{in} \leq v \leq v_r \\ P_r & v_r \leq v \leq v_{out} \end{cases} \quad (8)$$

Với  $a = \frac{P_r}{(v_r^3 - v_{in}^3)}$ ,  $b = \frac{v_{in}^3}{(v_r^3 - v_{in}^3)}$  là những hằng số.

Sản lượng điện gió được sản xuất ra mô tả như sau:

$$P_{we} = P_w \cdot x \cdot f_v(V) \quad (9)$$

### 2.3. Bài toán điều độ công suất tối ưu kết hợp với năng lượng điện gió

Phương trình cân bằng công suất được điều chỉnh thành:

$$\sum_{j=1}^n P_j + \sum_{i=1}^m P_{iw} - P_D - P_L = 0 \quad (10)$$

Hàm chi phí tương ứng với năng lượng gió phát ra được tính bởi biểu thức sau:

$$F_i(P_{iw}) = d_i(P_{iw}) \quad (11)$$

Trong đó,  $d_i$  là chi phí trực tiếp của năng lượng gió phát ra từ nhà máy điện thứ  $i$ .

Tổng chi phí của hệ thống nhiệt gió kết hợp được tính toán bằng biểu thức như sau:

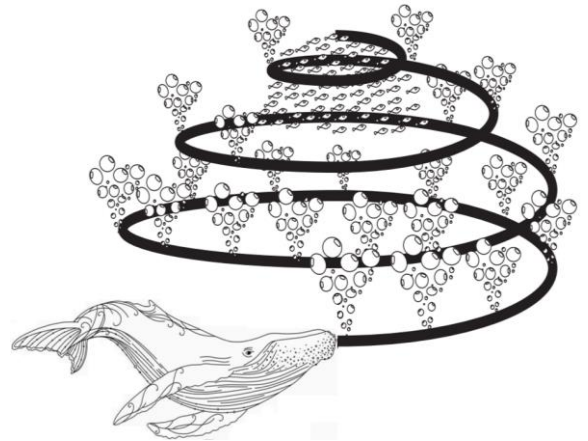
$$T(P_g) = F_j(P_j) + F_i(P_{iw}) \quad (12)$$

## 3. Thuật toán tối ưu cá voi giải quyết bài toán điều độ tối ưu công suất có tích hợp nhà máy điện gió

### 3.1. Thuật toán tối ưu cá voi

Thuật toán tối ưu cá voi được Seyedali Mirjalili và Andrew Lewis phát triển vào năm 2016 [9]. Phương pháp này mô phỏng các hành vi xã hội và săn mồi của loài cá voi lưng gù trong tự nhiên để phát triển thành thuật toán giải các bài toán tối ưu. Điều thú vị nhất về những con cá voi lưng gù là phương pháp săn đặc biệt kiếm thức ăn bằng mạng lưới bong bóng của chúng [10]. Cá voi lưng gù săn mồi bằng cách tạo ra các bong bóng đặc biệt theo một vòng tròn xoắn ốc như trong Hình 1. Hành vi khi săn mồi của cá voi bao gồm những phần chính như sau:

- Tiếp cận con mồi.
- Truy đuổi và bao vây con mồi cho đến khi con mồi ngừng di chuyển.
- Tấn công con mồi.



**Hình 1.** Đặc tính lưới bong bóng săn mồi của cá voi [11]

#### 3.1.1. Tiếp cận con mồi

Bắt đầu quy trình săn mồi, khi cá voi lưng gù phát hiện ra vị trí của con mồi và tiến hành bao vây chúng. Ban đầu thuật toán WOA chưa biết được vị trí nghiệm tối ưu trong không gian tìm kiếm nên thuật toán giả định rằng lời giải tốt nhất hiện thời là con mồi mục tiêu đang dự định săn. Sau khi cá thể tìm kiếm tốt nhất được xác định, các cá thể

tìm kiếm khác sẽ hướng theo cập nhật vị trí của mình đối với cá thể tìm kiếm tốt nhất đó [12]. Hành vi này được mô hình toán học dưới dạng biểu thức sau đây:

$$\vec{D} = |\vec{C} \times \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (13)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \times \vec{D} \quad (14)$$

Trong đó:

$t$  là vòng lặp hiện tại;

$A$  và  $C$  là các véc-tơ hệ số;

$X^*$  là véc-tơ vị trí tốt nhất đạt được;

$X$  là véc-tơ vị trí;

Toán tử  $|\cdot|$  là giá trị tuyệt đối.

Véc-tơ  $X^*$  cần được cập nhật sau mỗi lần lặp nếu tìm được một lời giải khác tốt hơn.

$$\vec{A} = 2\vec{a} \times \vec{r} - \vec{a} \quad (15)$$

$$\vec{C} = 2 \times \vec{r} \quad (16)$$

Trong đó:

$a$  là thành phần giảm tuyến tính từ 2 xuống 0 trong quá trình lặp cho cả hai giai đoạn tiếp cận và truy đuổi con mồi;

$r$  là véc-tơ ngẫu nhiên có giá trị trong khoảng  $[0,1]$ .

### 3.1.2. Truy đuổi con mồi

Thu hẹp và bao vây: Hành vi này có thể đạt được bằng cách giảm giá trị của véc-tơ  $a$  trong phương trình (15). Lưu ý rằng biên độ dao động của  $A$  cũng được giảm theo sự thay đổi của  $a$ . Nói cách khác,  $A$  có giá trị ngẫu nhiên trong khoảng  $[-a, a]$  khi  $a$  được giảm từ 2 xuống 0 trong quá trình lặp. Qua việc thiết lập các giá trị ngẫu nhiên cho  $A$  trong khoảng  $[-1,1]$ , vị trí mới có thể được thiết lập bất cứ nơi nào ở giữa vị trí ban đầu và các vị trí tốt nhất hiện tại [11], [13].

Cập nhật vị trí xoắn ốc: Như trong Hình 2, phương pháp này đầu tiên tính toán khoảng cách giữa các con cá voi  $(X,Y)$  và con mồi ở tọa độ  $(X^*,Y^*)$ . Phương trình xoắn ốc được tạo ra giữa các vị trí của cá voi và con mồi để bắt chước chuyển động xoắn hình của cá voi lưng gù như sau:

$$\vec{X}(t+1) = \vec{D}' \times e^{bl} \times \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad (17)$$

$$\vec{D}' = |\vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (18)$$

Trong đó:

$D'$  chỉ ra khoảng cách của con cá voi thứ  $i$  tới con mồi (lời giải tốt nhất đạt được cho đến nay);

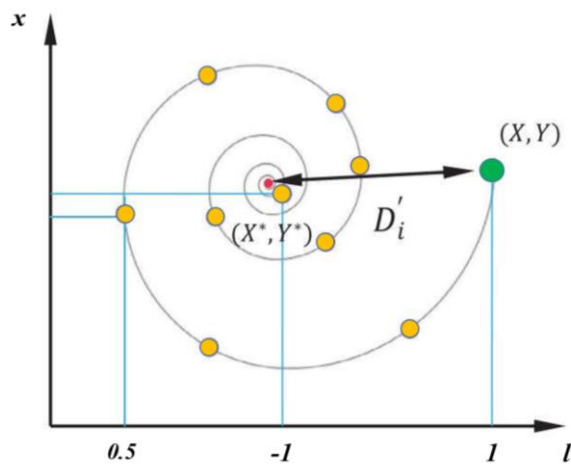
$b$  là một hằng số để xác định hình dạng của đường xoắn ốc logarit;

$l$  là một số ngẫu nhiên có giá trị trong khoảng  $[-1,1]$ .

Lưu ý rằng những con cá voi lưng gù bơi quanh con mồi với phạm vi thu hẹp vòng tròn và dọc theo đường xoắn ốc cùng một lúc. Để mô phỏng hành vi đồng thời này, giả định rằng có một xác suất khoảng 50% để lựa chọn giữa một trong hai cơ chế săn mồi để cập nhật vị trí cá voi trong suốt quá trình tối ưu. Từ đây, ta có được biểu thức hàm cập nhật vị trí như (19).

$$\vec{X}(t+1) \begin{cases} \vec{X}^*(t) - \vec{A} \times \vec{D} & \rho < 0,5 \\ \vec{D}' \times e^{bl} \times \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) & \rho \geq 0,5 \end{cases} \quad (19)$$

Với  $\rho$  là số ngẫu nhiên có giá trị trong khoảng  $[0,1]$ .



Hình 2. Cập nhật vị trí theo vòng xoắn ốc [11]

### 3.1.3. Tấn công con mồi

Trong thực tế, cá voi lưng gù thường tìm kiếm ngẫu nhiên theo vị trí của nhau. Do đó, việc sử dụng véc-tơ  $A$  với các giá trị ngẫu nhiên lớn hơn 1 hoặc nhỏ hơn -1 để bắt buộc các cá thể tìm kiếm di chuyển ra xa một vị trí tham chiếu. Ngược lại với giai đoạn săn mồi, cần cập nhật vị trí của một cá thể tìm kiếm trong giai đoạn tấn công căn cứ theo sự lựa chọn ngẫu nhiên của cá thể thay vì cá thể tốt nhất hiện tại. Cơ chế này cùng với  $|A| > 1$  nhấn mạnh việc săn mồi và cho phép thuật toán WOA thực hiện tìm kiếm toàn cục. Mô hình toán học như sau:

$$\vec{D} = |\vec{C} \times \vec{X}_{rand} - \vec{X}| \quad (20)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_{rand} - \vec{A} \times \vec{D} \quad (21)$$

Trong đó:  $X_{rand}$  là một véc-tơ ngẫu nhiên trong quần thể.

### 3.2. Các bước tính toán của thuật toán tối ưu cá voi

```

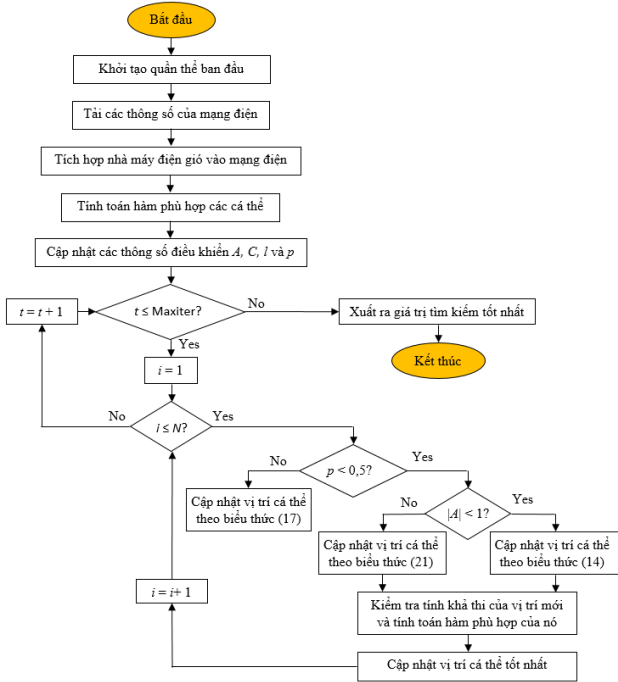
Khởi tạo tập các cá thể cá voi ban đầu  $X_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 
Tính toán hàm đánh giá cho mỗi cá thể
 $X^*$  được chọn làm cá thể tốt nhất
while  $t <$  số vòng lặp tối đa
  for đối với mỗi cá thể
    Cập nhật  $a, A, C, l$  và  $p$ 
    if  $p < 0,5$ 
      if  $|A| < 1$ 
        Cập nhật vị trí cá thể hiện tại theo công thức (13)
      else if  $|A| \geq 1$ 
        Chọn lựa một cá thể ngẫu nhiên  $X_{rand}$ 
        Cập nhật vị trí của cá thể hiện tại theo công thức (21)
      end if
    else if  $p \geq 0,5$ 
      Cập nhật vị trí của cá thể hiện tại theo công thức (17)
    end if
  end for
  Kiểm tra bất cứ cá thể nào đi quá giới hạn và hiệu chỉnh
  Tính toán hàm đánh giá mỗi cá thể
  Cập nhật  $X^*$  nếu có lời giải tốt hơn
   $t = t + 1$ 
end while
Trả về giá trị  $X^*$ 

```

Hình 3. Các bước tổng thể của thuật toán WOA [11]

Thuật toán WOA bắt đầu với một tập hợp các lời giải ngẫu nhiên. Tại mỗi lần lặp, việc cập nhật vị trí tìm kiếm đối với cá thể tìm kiếm được chọn ngẫu nhiên hoặc các lời giải tốt nhất. Các tham số  $a$  được giảm từ 2 đến 0 để cung cấp cho việc săn mồi, tấn công tương ứng. Việc tìm kiếm ngẫu nhiên được chọn khi  $|A| > 1$ , trong khi đó lời giải tốt nhất được chọn khi  $|A| < 1$  để cập nhật vị trí của các cá thể tìm kiếm. Tùy thuộc vào giá trị của  $p$ , thuật toán WOA có thể chuyển đổi giữa xoắn ốc hay chuyển động tròn. Cuối cùng, thuật toán WOA kết thúc khi thỏa mãn một điều kiện nào đó. Các bước tổng thể của thuật toán WOA được cho như trong Hình 3.

**3.3. Các bước tính toán điều độ tối ưu công suất có tích hợp nhà máy điện gió bằng thuật toán tối ưu cá voi**



Hình 4. Thuật toán WOA giải bài toán điều độ tối ưu có máy phát điện gió

**4. Kết quả tính toán**

Điều độ tối ưu công suất trong mạng điện có tích hợp nhà máy phát điện gió được tính toán bằng phương pháp WOA. Các ràng buộc được xét trong bài toán bao gồm: ràng buộc công suất tác dụng, ràng buộc điện áp và ràng buộc giới hạn trên đường dây truyền tải. Thuật toán đề xuất được thử nghiệm trên mạng điện IEEE 30 nút [14]-[15] và kết quả tính toán được so sánh với các phương pháp khác cùng tính toán mạng điện trên. Các giới hạn phát điện và hệ số chi phí máy phát điện của hệ thống thử nghiệm được đưa ra trong Bảng 1.

Bảng 1. Hệ số chi phí máy phát điện và giới hạn công suất tác dụng của mạng điện IEEE 30 nút

Unit	$a_i$ (\$/MW <sup>2</sup> )	$b_i$ (\$/MW)	$c_i$	$P_{gmin}$	$P_{gmax}$
1	0,00375	2	0	50	200
2	0,0175	1,75	0	20	80
3	0,0625	1	0	15	50
4	0,00834	3,25	0	10	55
5	0,025	3	0	10	30
6	0,025	3	0	12	40

**4.1. Điều độ tối ưu không có nhà máy điện gió**

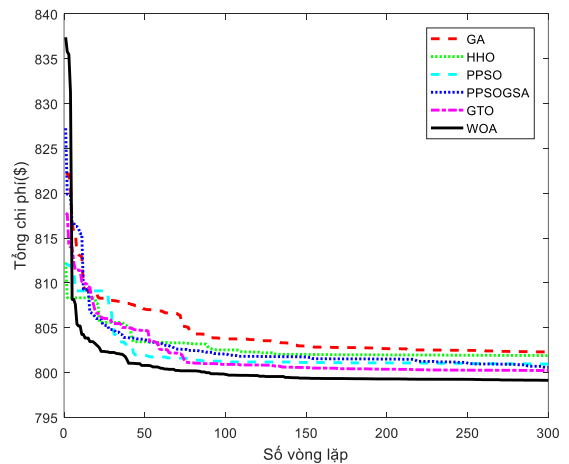
Trong trường hợp này, công suất phát được tạo ra bởi các nhà máy nhiệt điện được và tính toán điều độ công suất tối ưu. Mục tiêu chính ở đây là giảm thiểu chi phí nhiên liệu và duy trì cấu hình điện áp ở giới hạn mong muốn. Cũng cần phải đáp ứng điều kiện về việc đường dây được vận hành trong giới hạn nhiệt của chúng. Kết quả thu được cho trường hợp này được trình bày trong Bảng 2 và 3.

Bảng 2. Bảng so sánh chi phí phát điện các nhà máy trong mạng điện IEEE 30 nút

Phương pháp	GA [16]	PPSO [17]	PPSOGSA [18]	HHO [19]	GTO [20]	WOA
G1 (MW)	177,9992	176,532	177,11	176,97	177,022	177,3745
G2 (MW)	51,8479	48,774	48,579	48,877	48,6342	48,2903
G3 (MW)	20,3332	21,494	21,367	21,425	21,3899	21,1688
G4 (MW)	17,6587	21,592	21,437	22,020	21,3763	21,5500
G5 (MW)	12,3484	12,0387	11,935	12,29	11,9614	11,6617
G6 (MW)	12,8551	12	12,002	11,206	12,056	12,0363
PG (MW)	293,0425	292,431	292,43	292,788	292,4398	292,0816
PL (MW)	9,6426	9,03	9,027	9,386	9,0206	9,001
Chi phí (\$/hr)	802,296	800,6665	800,528	801,829	800,0028	799,2501

Bảng 3. So sánh cấu hình điện áp giữa các phương pháp

Thông số	PPSO [17]	PPSOGSA [18]	GTO [20]	WOA
V1	1,06	1,0842	1,0832	1,10
V2	1,043	1,0652	1,0630	1,0873
V3	1,01	1,0339	1,0331	1,0618
V4	1,01	1,0379	1,0379	1,0711
V5	1,082	1,0934	1,0804	1,0974
V6	1,071	1,0433	1,0472	1,0997

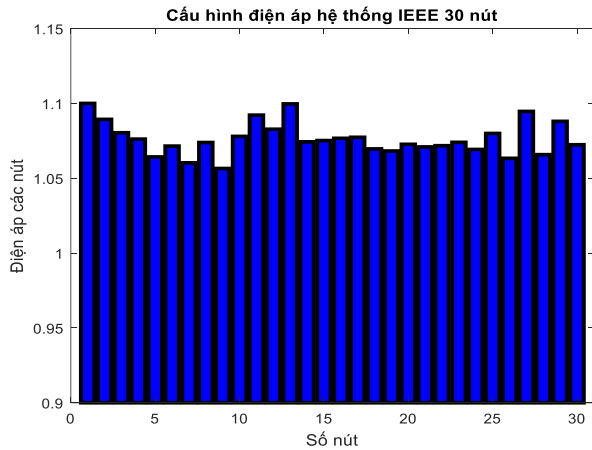


Hình 5. Đặc tính hội tụ chi phí tối ưu mạng điện IEEE 30 nút không có nhà máy điện gió

Trong Bảng 2, kết quả thu được từ phương pháp WOA được so sánh với một số phương pháp giải trên mạng điện này gần đây. Có thể thấy, chi phí thu được khi sử dụng phương pháp WOA là 799,2501 \$/giờ, thấp hơn so với các phương pháp khác. Thuật toán WOA mất 8,216 giây để hội

tự cho lời giải tối ưu chứng tỏ tính hiệu quả của nó trong việc giải các bài toán phi tuyến tính. Tồn thất điện năng của phương pháp đề xuất tính toán cho các nhà máy cũng ít hơn so với những phương pháp khác. Trong Bảng 3, cấu hình điện áp thu được tại các nút máy phát được đưa ra và so sánh với các phương pháp khác, kết quả cho thấy tất cả các nút nằm trong giới hạn điện áp cho phép và điều này cũng được minh họa như trên Hình 6.

Đường đặc tính hội tụ cực tiểu chi phí nhiên liệu phát điện bằng các thuật toán GA, HHO, PPSO, PPSOGSA, GTO và WOA được hiển thị trong Hình 6. Từ hình vẽ, có thể thấy, thuật toán đáp ứng giải quyết bài toán tối ưu trong mạng điện và đưa đến kết quả hội tụ khá tốt.



Hình 6. Cấu hình điện áp tính toán bằng phương pháp WOA của mạng điện IEEE 30 nút

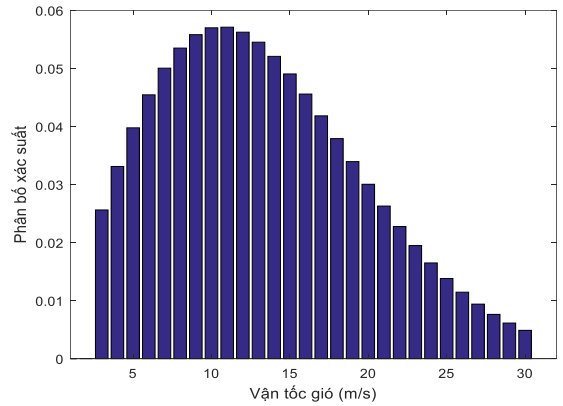
4.2. Điều độ tối ưu có xét nhà máy điện gió

Trong trường hợp này, bài toán điều độ tối ưu được tính toán có xét đến nhà máy điện gió trong hệ thống điện. Hai nhà máy điện gió có công suất 50MW với các thông số khác nhau được xem xét cho nghiên cứu. Các thông số dữ liệu liên quan đến tuabin gió được cho trong Bảng 4 [17]. Sản lượng từ các nhà máy điện gió được tính toán bằng hàm phân phối weibull và được kết hợp cung cấp nhu cầu phụ tải trong hệ thống thử nghiệm. Xác suất sản lượng gió từ nhà máy điện gió 2 được biểu diễn trong Hình 7.

Giả thiết rằng, năng lượng gió sản xuất được sẽ bán cho tiện ích công cộng dựa trên mức giá cố định. Sản lượng thu được từ nhà máy điện gió được tích hợp vào hệ thống để tính toán điều độ tối ưu mạng điện. Kết quả tính toán trong Bảng 5 ở các trường hợp không có và có nhà máy điện gió được so sánh về mặt phát điện và tồn thất điện năng. Nhận thấy rằng, tồn thất điện năng trong trường hợp có nhà máy điện gió là rất thấp so với trường hợp không có nhà máy điện gió.

Bảng 4. Thông số kỹ thuật của tuabin gió

Nhà máy điện gió 1		Nhà máy điện gió 2	
Kw1	1	Kw2	2
C1	15	C2	15
Vin1	3 m/s	Vin2	3 m/s
Vout1	30 m/s	Vout2	30 m/s
Vr1	12 m/s	Vr2	12 m/s
Pr1	50 MW	Pr2	50 MW
d1	2 \$/hr	d2	2,25 \$/hr

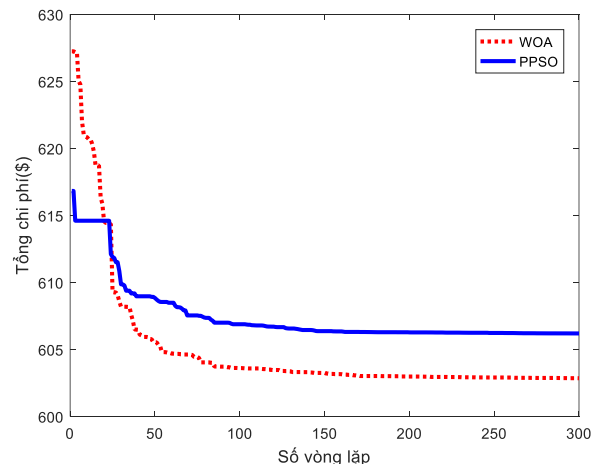


Hình 7. Hàm mật độ xác suất của nhà máy điện gió 2

Bảng 5. So sánh điều độ tối ưu mạng điện trong trường hợp không có và có nhà máy điện gió

Thông số (MW)	PPSO [17]		WOA	
	Không có nhà máy điện gió	Có nhà máy điện gió	Không có nhà máy điện gió	Có nhà máy điện gió
G1	176,5322	143,0481	177,3745	143,1112
G2	48,774	40,38001	48,2903	39,89631
G3	21,49417	18,10216	21,1688	17,77679
G4	21,59226	10	21,5500	10
G5	12,03878	10	11,6617	10
G6	12	12	12,0363	12,0363
WG1	-	34,2418	-	34,1153
WG2	-	21,6346	-	21,2531
PG	292,4314	289,4067	292,0816	288,9682
PL	9,03	6,0067	9,001	5,9154

Từ Bảng 6, có thể thấy, chi phí thu được cho hệ thống kết hợp có các nhà máy điện gió và nhiệt là 719,5035\$/giờ, giá trị rất thấp so với trường hợp không có điện gió. Đường cong hội tụ tính toán dựa trên các thuật toán PPSO và WOA cho trường hợp có sử dụng nhà máy năng lượng điện gió được thể hiện trên Hình 8. Từ Hình 8 cho thấy, độ hội tụ của thuật WOA khi áp dụng giải bài toán điều độ tối ưu công suất có máy phát điện gió cho sự ổn định trong tìm kiếm điểm tối ưu sau mỗi vòng lặp và đưa đến kết quả hội tụ khá nhanh chóng.



Hình 8. Đặc tính hội tụ tối ưu hóa chi phí mạng điện IEEE 30 nút có nhà máy điện gió

**Bảng 6.** So sánh chi phí phát điện trong trường hợp không có và có nhà máy điện gió bằng thuật toán WOA

Máy phát điện	Không có nhà máy điện gió	Có nhà máy điện gió
PT (MW)	292,0816	233,5998
$P_{w1}$ (MW)	-	34,1153
$P_{w2}$ (MW)	-	21,2531
$C_{Ther}$ (\$/hr)	799,2501	603,4534
$C_{w1}$ (\$/hr)	-	68,2306
$C_{w2}$ (\$/hr)	-	47,8195
Chi phí (\$/hr)	799,2501	719,5035
Số vòng lặp	300	300

Từ kết quả thu được, có thể thấy, tổn thất toàn hệ thống giảm khi tăng cường sử dụng nhà máy phát năng lượng điện gió trong hệ thống và chi phí phát điện để đáp ứng nhu cầu phụ tải cũng được giảm thiểu.

## 5. Kết luận

Trong bài báo này, bài toán điều độ tối ưu có nhà máy phát điện gió và nhiệt điện đã được giải quyết. Các trường hợp không có và có nhà máy phát điện gió đều được tiến hành nghiên cứu tính toán. Bản chất ngẫu nhiên và không liên tục của trạng thái gió được mô hình hóa bằng hàm phân phối weibull và đầu ra thu được tích hợp vào hệ thống điện. Việc phân tích được thực hiện trên hệ thống mạng điện IEEE 30 nút sử dụng thuật toán WOA và kết quả được so sánh thông qua một số phương pháp khác. Tăng sản lượng phát công suất nhà máy điện gió dẫn đến giảm chi phí vận hành hệ thống và tổn thất cũng được giảm thiểu. Kết quả nghiên cứu cũng chứng minh rằng thuật toán WOA giúp đạt được sự hội tụ nhanh chóng trong các trường hợp nghiên cứu để đạt được chi phí tối ưu.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. Frank, I. Steponavice, and S. Rebennack, "Optimal power flow: A bibliographic survey I, formulations and deterministic methods", *Energy Systems*, vol. 3, pp. 221–258, 2012.
- [2] J. D. Glover, M. S. Sarma, and T. J. Overbye, *Power system analysis and design*, 4<sup>th</sup> edition, Cengage Learning, Stamford, 2008.
- [3] M. J. Khan and Y. Kumar, "Optimal Power Flow (OPF) formulation and Reactive Power Optimization of Power Systems Using Conventional Optimization Technique (Interior Point Method)", *International Journal of Mathematics Research*, Vol. 8, No. 3, pp. 251-263, 2016.
- [4] L. D. Le, D. N. Vo, S. T. Huynh, T. M. Nguyen-Hoang, and P. Vasant, "Hybrid Differential Evolution and Harmony Search for Optimal Power Flow", *International Journal of Operations Research and Information Systems (IJORIS)*, Vol. 11, pp. 39-65, 2020.
- [5] P. Lakshmi, B. V. Rao, R. Devarapalli, and P. Rai, "Optimal Power Flow with BAT algorithm for a Power System to reduce transmission line losses using SVC", in *International Conference on Emerging Frontiers in Electrical and Electronic Technologies (ICEFEET)*, Patna, India, IEEE, 2020, pp. 15-22.
- [6] S. Mirjalili and A. Lewis, "The Whale Optimization Algorithm", *Advances in Engineering Software*, Vol. 95, pp. 51-67, 2016.
- [7] Z. Wang, A. Younesi, M. V. Liu, G. C. Guo, and C. L. Anderson, "AC Optimal Power Flow in Power Systems With Renewable Energy Integration: A Review of Formulations and Case Studies", *IEEE Access*, Vol. 11, pp. 102681-102712, 2023.
- [8] A. A. Mohamed, S. Kamel, M. H. Hassan, and J. L. Domínguez-García, "Optimal Power Flow Incorporating Renewable Energy Sources and FACTS Devices: A Chaos Game Optimization Approach", *IEEE Access*, pp. 121-128, 2024.
- [9] S. Li, W. Gong, L. Wang, and Q. Gu, "Multi-objective optimal power flow with stochastic wind and solar power", *Applied Soft Computing*, Vol. 114, pp. 241-249, 2022.
- [10] I. M. Chao, S. C. Hsiung, and J. L. Liu, "Improved Whale Optimization Algorithm Based on Inertia Weights for Solving Global Optimization Problems", *Advances in Technology Innovation*, Vol. 5, No. 3, pp. 147-155, 2020.
- [11] V. N. Dieu, *Optimization Methods Application In Power Systems*, 1<sup>st</sup> edition, Vietnam National University Ho Chi Minh City Press, 2020.
- [12] M. Mafarja, I. Jaber, and S. Ahmed, "Whale Optimization Algorithm for High-dimensional Small-Instance Feature Selection", *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, Vol. 36, pp. 80-96, 2021.
- [13] P. D. Thang and N. D. Trinh, "Developing Multiple Objective Whale Optimization Algorithm for Resource Trade-off in Project Scheduling", *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*, Vol. 15, pp. 145-156, 2021.
- [14] L. D. Le, D. N. Vo, and P. Vasant, "Artificial Bee Colony Algorithm for Solving Optimal Power Flow Problem", *The Scientific World Journal*, Vol. 2013, pp. 1-9, 2013.
- [15] V. Yadav and S. P. Ghoshal, "Optimal power flow for IEEE 30 and 118-bus systems using Monarch Butterfly optimization", *IEEE Xplore, in Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP)*, Bhubaneswar, India, IEEE, 2018, pp. 143-148.
- [16] H. Om and S. Shukla, "Optimal Power Flow Analysis of IEEE-30 bus System using Soft Computing Techniques", *International Journal of Engineering Research & Science (IJOER)*, Vol. 1, pp. 1-6, 2015.
- [17] C. Shilaja and K. Ravi, "Optimal Power Flow Considering Intermittent Wind Power Using Particle Swarm Optimization", *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol. 6, No. 2, pp. 504-509, 2016.
- [18] Z. Ullah, S. Wang, J. Radosavljević, and J. Laia, "A Solution to the Optimal Power Flow Problem Considering WT and PV Generation", *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 46763-46772, 2019.
- [19] M. Z. Islam *et al.*, "Optimal Power Flow using a Novel Harris Hawk Optimization Algorithm to Minimize Fuel Cost and Power loss," in *2019 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in 2019 Engineering and Technologies (CSUDET)*, Penang, Malaysia, IEEE, 2019, pp. 246-250.
- [20] A. Saini and O. P. Rahi, "Optimal Power Flow Solution Using Gorilla Troops Optimizer", in *2023 7th International Conference on Computer Applications in Electrical Engineering-Recent Advances (CERA)*, Roorkee, India, IEEE, 2023, pp. 211-216.