

TỐI ƯU HÓA PHỐI HỢP BẢO VỆ RƠ-LE QUÁ DÒNG CÓ HƯỚNG SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP TỐI ƯU CÁ VOI

OPTIMAL COORDINATION OF DIRECTION OVERCURRENT RELAYS USING WHALE OPTIMIZATION ALGORITHM

Nguyễn Phúc Khải^{1,2*}, Đỗ Minh Hải^{1,3}

¹Trường Đại học Bách khoa Tp. Hồ Chí Minh

²Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

³Tổng Công ty Điện lực thành phố Hồ Chí Minh

*Tác giả liên hệ: phuckhai@hcmut.edu.vn

(Nhận bài: 26/8/2021; Chấp nhận đăng: 25/11/2021)

Tóm tắt - Bài báo trình bày phương pháp tối ưu cá voi tính toán phối hợp bảo vệ tối ưu cho rơ-le bảo vệ có hướng trên lưới điện phân phối. Bài toán phối hợp bảo vệ rơ-le dùng các thuật toán tối ưu để tính toán phối hợp bảo vệ sao cho thời gian loại trừ sự cố trên lưới điện là nhỏ nhất. Trong nghiên cứu này, các tác giả sử dụng thuật toán tối ưu cá voi – một phương pháp tìm kiếm thông minh thể hệ mới và phần mềm MATLAB để tính toán, kiểm chứng các kết quả đạt được. Nghiên cứu được thực hiện trên lưới IEEE 3 nút, 8 nút và phát tuyến 473 Tân Xuân của lưới điện trung thế Tp. Hồ Chí Minh. So với các phương pháp tối ưu khác, các kết quả đạt được khi sử dụng thuật toán tối ưu cá voi được đánh giá tối ưu hơn và có khả năng áp dụng được vào lưới điện thực tế.

Từ khóa - Tối ưu hóa; phối hợp bảo vệ; rơ-le quá dòng có hướng; phương pháp tối ưu cá voi

1. Đặt vấn đề

Hệ thống điện đóng vai trò quan trọng và điện năng được sử dụng trong tất cả các lĩnh vực của đời sống. Đảm bảo việc cung cấp điện một cách an toàn, tin cậy cũng chính là đảm bảo an ninh năng lượng, góp phần thúc đẩy sự phát triển của một quốc gia. Việc sản xuất, truyền tải cũng như phân phối điện năng phải trải qua nhiều khâu, nhiều giai đoạn phức tạp nên không thể tránh khỏi những sự cố hư hỏng. Do đó, hệ thống bảo vệ rơ-le giữ vai trò thiết yếu giúp duy trì sự làm việc liên tục, ổn định cho hệ thống điện, nâng cao độ tin cậy cung cấp điện, đảm bảo an toàn cho con người và thiết bị.

Trong hệ thống bảo vệ rơ-le, một trong những yêu cầu khó khăn nhất là phải phối hợp các rơ-le sao cho thời gian tác động là nhỏ nhất nhưng vẫn phải đảm bảo thời gian dự phòng theo hướng công suất của lưới điện. Để giải quyết vấn đề này, nhiều nhà khoa học trên thế giới đã đề xuất các thuật toán tìm kiếm tối ưu dựa trên quần thể. Một số thuật toán tối ưu dựa trên quần thể được sử dụng như: Water Cycle Algorithm [1], Grey Wolf Optimization (GWO) [2] hay Particle Swarm Optimization được sử dụng để khảo sát cho lưới mẫu IEEE 3 nút và 8 nút [3]. Ưu điểm chung của các phương pháp tối ưu này là khả năng áp dụng rộng cho đa dạng các bài toán, thỏa mãn các điều kiện ràng buộc phức tạp, nhưng kết quả có thể chưa phải là giá trị tốt nhất. Bên cạnh đó, tại Việt Nam, các tác giả cũng chưa tìm thấy

Abstract - This paper presents the optimal coordination of directional overcurrent relays in the electricity distribution network using the Whale Optimization Algorithm (WOA). The objective of the coordination of overcurrent relays is to minimize the tripping time isolating the fault. In this research, the authors utilize the WOA, one of the latest optimization algorithms, and validate the results using MATLAB. The WOA is evaluated on the IEEE 3 and 8-bus systems as well as 473 Tan Xuan Feeder – a line of Ho Chi Minh City distribution power grid. The obtained results show that the WOA provides efficient and promising results compared to other techniques mentioned in this paper as well as employ WOA to Ho Chi Minh City distribution power network.

Key words - Optimization; Coordinated protection; Direction overcurrent relay; Whale optimization algorithm

nghiên cứu ứng dụng các kỹ thuật tối ưu này để tính toán cho lưới điện thực tế.

Các thuật toán tối ưu dựa trên giá trị ngẫu nhiên vẫn được cải tiến và phát triển mới không ngừng từ các nhà khoa học trên thế giới. Những kỹ thuật tính toán mới hơn hứa hẹn khả năng tìm lời giải toàn cục tốt hơn so với những phương pháp trước đây. Năm 2016, Seyedali Mirjalili và Andrew Lewis giới thiệu thuật toán tối ưu cá voi Whale Optimization Algorithm (WOA) [4]. Thuật toán được so sánh với các phương pháp tối ưu hiện nay qua 29 hàm tối ưu mẫu và một số bài toán thiết kế cơ khí. Kết quả cho thấy thuật toán tối ưu cá voi cho kết quả tính toán tối ưu toàn cục tốt hơn trong đa số các bài toán. Trong lĩnh vực kỹ thuật điện, thuật toán tối ưu cá voi cũng được ứng dụng và đạt được một số thành công. D. Prasad và các đồng sự đã áp dụng thuật toán để giải các dạng của bài toán phân bố tối ưu công suất [5], [6]; Hay A. Kumar và các đồng sự ứng dụng thành công thuật toán cho bài toán điều độ kinh tế tối ưu [7].

Bài báo này trình bày ứng dụng thuật toán tối ưu cá voi Whale Optimization Algorithm (WOA) để khảo sát bài toán cực tiểu thời gian bảo vệ rơ-le quá dòng có hướng cho lưới điện. Các tác giả áp dụng cho lưới các điện chuẩn IEEE 3 nút, 8 nút và đồng thời cũng áp dụng cho phát tuyến 473 Tân Xuân của lưới điện trung thế Tp. Hồ Chí Minh.

¹ Ho Chi Minh City University of Technology (Khai Phuc Nguyen, Do Minh Hai)

² Vietnam National University Ho Chi Minh City (Khai Phuc Nguyen)

³ Ho Chi Minh City Power Corporation (Do Minh Hai)

2. Thuật toán tối ưu WOA

Thuật toán tối ưu WOA là phương pháp tìm kiếm thông minh do Seyedali Mirjalili và Andrew Lewis phát triển năm 2016 dựa trên hành vi xã hội và tập tính săn mồi của loài cá voi lưng gù.

2.1. Hành vi săn mồi của cá voi

Các hành vi săn mồi của cá voi cũng là yếu tố chính trong giải thuật này, bao gồm:

- Theo dõi và tiếp cận con mồi.
- Truy đuổi, bao vây và quấy nhiễu con mồi cho đến khi con mồi ngừng di chuyển.
- Tấn công con mồi.

2.1.1. Bao vây con mồi

Cá voi lưng gù có thể nhận ra con mồi và bao vây chúng. Vì vị trí nghiệm tối ưu trong không gian tìm kiếm là không biết được, nên giả định rằng, lời giải tốt nhất hiện thời là vị trí gần nhất xung quanh con mồi. Sau khi xác định được cá thể tìm kiếm tốt nhất, các cá thể khác sẽ cập nhật vị trí của mình theo cá thể tìm kiếm tốt nhất đó. Hành vi này được thể hiện bởi các biểu thức sau:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{Z}^*(t) - \vec{Z}(t)| \quad (1)$$

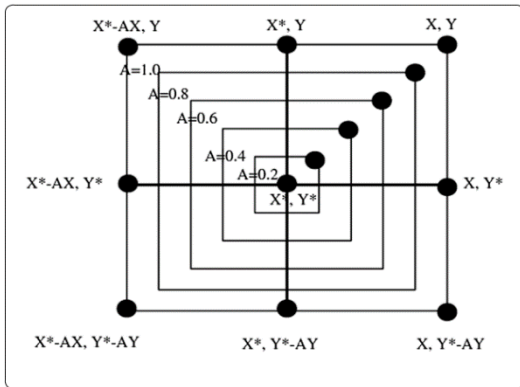
$$\vec{Z}^*(t+1) = \vec{Z}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (2)$$

Với t là vòng lặp hiện tại; A và C là các vector hệ số; $\vec{Z}^*(t)$ là vector vị trí tốt nhất đạt được; $\vec{Z}(t)$ là vector vị trí. Quan trọng ở đây là $\vec{Z}^*$ cần được cập nhật trong mỗi lần lặp nếu có kết quả tối ưu hơn.

$$\vec{A} = 2\vec{a} \times \vec{r} - \vec{a} \quad (3)$$

$$\vec{C} = 2 \times \vec{r} \quad (4)$$

Trong đó, r là một vector ngẫu nhiên trong khoảng $[0, 1]$ và a là thành phần giảm tuyến tính từ 2 về 0.



Hình 1. Vị trí tối ưu trong không gian 2D [4]

2.1.2. Giai đoạn săn mồi

Quá trình săn mồi của cá voi lưng gù được thể hiện bằng 2 cơ chế chính:

Cơ chế thu hẹp vòng vây: Hành vi này có thể đạt được bằng cách giảm giá trị của a trong phương trình (3). Giá trị của a giảm từ 2 xuống 0 trong quá trình lặp, do đó A sẽ nhận giá trị trong khoảng $[-a; a]$. Chính vì vậy, vị trí mới có thể được định nghĩa bất cứ nơi nào giữa vị trí ban đầu và các vị trí tốt nhất hiện tại.

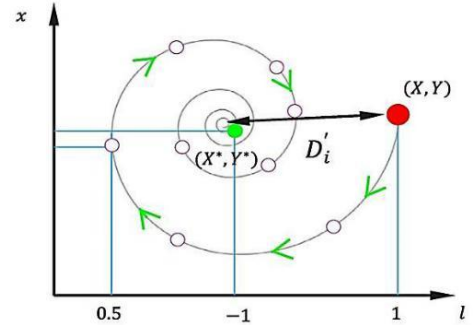
Cơ chế cập nhật vị trí theo hình xoắn ốc: Ngoài việc cập

nhật vị trí so với con mồi theo quỹ đạo hình tròn, cá voi lưng gù còn tiếp cận con mồi theo quỹ đạo hình xoắn ốc. Phương trình hình xoắn ốc như sau:

$$\vec{Z}(t+1) = D' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{Z}^*(t) \quad (5)$$

$$D' = |\vec{Z}^*(t) - \vec{Z}(t)| \quad (6)$$

Trong đó, D' chỉ ra khoảng cách của con cá voi thứ i tới con mồi; b là hằng số xác định hình dạng của đường xoắn ốc lô-ga-rít; l là một số ngẫu nhiên nằm trong đoạn $[-1, 1]$.



Hình 2. Cập nhật vị trí theo hình xoắn ốc [4]

Giả định rằng có xác suất 50% cá voi lưng gù sẽ lựa chọn một trong hai cơ chế chuyển động trình bày ở các công thức (1), (2), (5), (6) suy ra được phương trình cập nhật vị trí của cá voi lưng gù như sau:

$$\vec{Z}(t+1) = \begin{cases} \vec{Z}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} & \text{nếu } p \leq 0,5 \\ D' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{Z}^*(t) & \text{nếu } p > 0,5 \end{cases} \quad (7)$$

Với p là số ngẫu nhiên nằm trong khoảng $[0; 1]$.

2.1.3. Tấn công con mồi

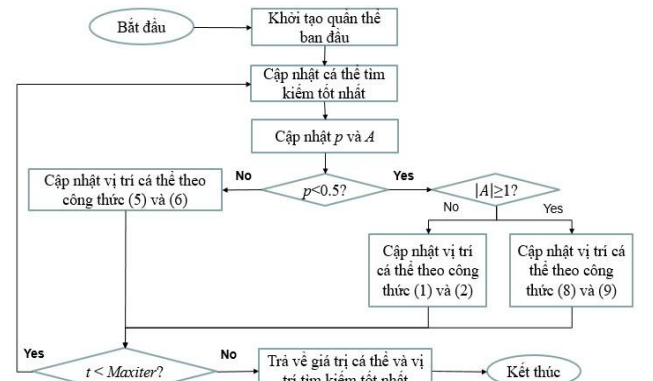
Khi tấn công con mồi, mô hình toán học được thể hiện như sau:

$$\vec{E} = |\vec{C} \cdot \vec{Z}_{rand} - \vec{Z}| \quad (8)$$

$$\vec{Z}(t+1) = \vec{Z}_{rand} - \vec{A} \cdot \vec{E} \quad (9)$$

Trong đó, $\vec{Z}_{rand}$ là một vector ngẫu nhiên (cá voi ngẫu nhiên) trong quần thể.

2.2. Lưu đồ giải thuật của thuật toán WOA



Hình 3. Lưu đồ giải thuật của thuật toán tối ưu WOA

Hình 3 trình bày lưu đồ giải thuật tổng quát của thuật toán tối ưu WOA khi giải các bài toán. Vị trí của mỗi cá voi tương ứng với một lời giải của bài toán. Ban đầu vị trí của từng cá voi trong quần thể sẽ được khởi tạo một cách ngẫu nhiên. Sau đó, thuật toán sẽ cập nhật cá thể tìm kiếm

tốt nhất trong quần thể. Giá trị A được tính toán theo công thức (3) và giá trị của p được tạo một cách ngẫu nhiên. Tùy thuộc vào giá trị của p , mà vectơ $\vec{Z}(t)$ và khoảng cách D được cập nhật theo các nhóm công thức khác nhau. Nếu số lần lặp chưa đạt giá trị cực đại $Maxiter$ được quy định trước, thì quá trình cập nhật lại vị trí của các cá thể trong quần thể cá voi sẽ được lặp lại.

3. Áp dụng thuật toán WOA vào phối hợp tối ưu bảo vệ rơ-le quá dòng có hướng

3.1. Đặc tuyến thời gian - dòng điện của rơ-le bảo vệ quá dòng có hướng

Rơ-le quá dòng có hướng (DOCR) có đặc tuyến dòng điện – thời gian nghịch đảo bao gồm một tập hợp các đường cong phụ thuộc vào giá trị của TMS . Thời gian hoạt động của rơ-le phụ thuộc vào giá trị của dòng ngắn mạch. Điều này có nghĩa là thời gian tác động trở nên dài hơn khi dòng điện sự cố giảm. Phương trình thể hiện đặc tuyến thời gian – dòng điện của DOCR:

$$T_i = \frac{\alpha}{\left(\frac{I_f}{PS}\right)^\beta - 1} \times TMS \quad (10)$$

Trong đó, α và β là các hệ số được chọn tùy theo loại đặc tuyến có độ dốc khác nhau (xem Bảng 1); I_f là dòng sự cố; PS là dòng điện cài đặt; TMS là thời gian đặt của rơ-le. Các giá trị của α và β tuân theo quy định của Ủy ban kỹ thuật điện quốc tế (IEC) theo chuẩn IEC 60255 [8] dành cho rơ-le bảo vệ.

3.2. Hàm mục tiêu và các ràng buộc của bài toán

3.2.1. Hàm mục tiêu

Mục tiêu của bài toán tối ưu hóa phối hợp bảo vệ rơ-le là tổng thời gian vận hành của sự cố cuối đường dây là cực tiểu hóa. Hàm mục tiêu được xác định như sau:

$$\text{Min } z = \sum_1^m T_i \quad (11)$$

Trong đó, m là số rơ-le tham gia bảo vệ cho đoạn đường dây bị sự cố; T_i là thời gian vận hành của mỗi rơ-le tại sự cố.

3.2.2. Các ràng buộc

- Giới hạn ràng buộc về thời gian đặt (TMS):

Thời gian vận hành của tất cả các rơ-le đều được xác định bởi giá trị thời gian đặt TMS . Giới hạn TMS được cho là:

$$TMS_{\min} \leq TMS \leq TMS_{\max} \quad (12)$$

Trong đó, $TMS_{\min}$ là giới hạn nhỏ nhất và $TMS_{\max}$ là giới hạn lớn nhất của mỗi giá trị TMS của mỗi rơ-le R_i

- Giới hạn ràng buộc về dòng điện đặt (PS):

Dòng điện đặt PS của mỗi rơ-le cần phải lớn hơn dòng làm việc cực đại và nhỏ hơn dòng sự cố nhỏ nhất với các bảo vệ dự phòng. Ràng buộc PS được xác định như sau:

$$PS_{\min} \leq PS \leq PS_{\max} \quad (13)$$

Trong đó, $PS_{\min}$ là giá trị nhỏ nhất và $PS_{\max}$ là giá trị lớn nhất của giá trị dòng điện đặt PS .

- Giới hạn thời gian vận hành của rơ-le:

Thời gian vận hành của rơ-le phải nhỏ hơn thời gian trễ cho phép và lớn hơn thời gian nhỏ nhất khi vận hành:

$$T_{i \min} \leq T_i \leq T_{i \max} \quad (14)$$

Trong đó, $T_{i \min}$ và $T_{i \max}$ là thời gian vận hành nhỏ nhất và lớn nhất của rơ-le.

- Ràng buộc về sự phối hợp giữa rơ-le bảo vệ chính và bảo vệ dự phòng:

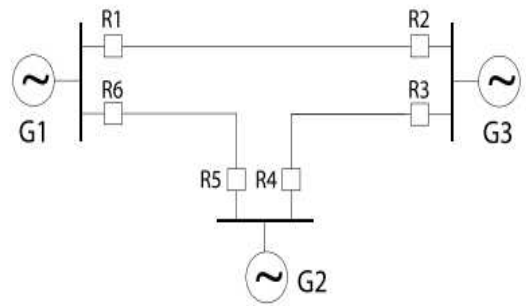
$$\Delta T = T_{\text{backup } i} - T_i \geq 0,2 \quad (15)$$

3.3. Áp dụng thuật toán WOA tính toán bảo vệ rơ-le cho lưới IEEE 3 nút và 8 nút

Trong bài báo này chọn đặc tuyến Very Inverse với các hệ số $\alpha = 13,5$ và $\beta = 1$ để tiến hành tính toán phối hợp tối ưu bảo vệ rơ-le.

3.3.1. Áp dụng cho lưới IEEE 3 nút

Xét hệ thống điện IEEE 3 nút có các thành phần bao gồm 3 máy phát, 3 thanh cái và 6 rơ-le bảo vệ quá dòng có hướng. Sơ đồ hệ thống như Hình 4. Giá trị các dòng điện sự cố, dòng điện dự phòng và tỷ số biến dòng của hệ thống được cho ở [3]. Dựa trên sơ đồ Hình 4, rơ-le bảo vệ dự phòng cho các rơ-le bảo vệ chính 1, 2, 3, 4, 5, và 6 theo thứ tự lần lượt là 5, 4, 1, 6, 3 và 2. Các rơ-le bảo vệ chính và bảo vệ dự phòng có ràng buộc về thời gian phối hợp như biểu thức (15).



Hình 4. Sơ đồ hệ thống điện IEEE 3 nút

Bảng 1. Kết quả tính toán phối hợp cho hệ thống IEEE 3 nút

Rơ-le	TMS	PS	T_i (s)	Ràng buộc (ΔT) (s)
1	0,1856	0,9213	0,072	0,2
2	0,0975	0,7775	0,0273	0,2218
3	0,1201	1,1727	0,0464	0,2001
4	0,1171	1,2368	0,0673	0,2366
5	0,0727	0,9493	0,0254	0,2002
6	0,2045	0,5791	0,0742	0,2841

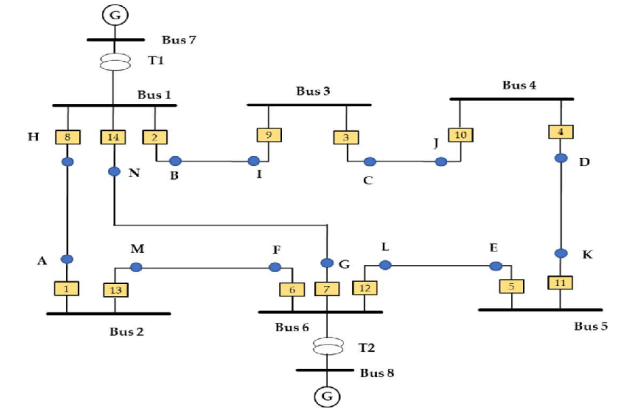
Bảng 2. So sánh kết quả WOA với một số thuật toán khác [3]

Rơ-le	GSO [3]	GWO [3]	WOA
	TMS	TMS	TMS
1	1,1	0,2876	0,1856
2	1,049	0,1184	0,0975
3	1,1	0,2770	0,1201
4	1,1	0,1569	0,1171
5	1,1	0,1771	0,0727
6	1,1	0,1104	0,2045
Tổng (s)	0,4643	0,32	0,3126

Kết quả tính toán của thuật WOA được trình bày ở Bảng 1 cho thấy, kết quả tính toán của thuật toán WOA đã đáp ứng các điều kiện ràng buộc của bài toán. So sánh với các thuật toán khác ở Bảng 2 cho thấy, phương pháp WOA cho tổng thời gian tác động của các rơ-le ngắn hơn các phương pháp đã được công bố như GSO và GWO.

3.3.2. *Áp dụng cho lưới IEEE 8 nút*

Xét hệ thống điện 8 nút có các thành phần bao gồm: 2 máy phát, 2 máy biến áp, 6 thanh cái, 7 đường dây và 14 rơ-le bảo vệ quá dòng có hướng có sơ đồ như trong Hình 5. Dòng điện sự cố, dòng điện dự phòng và tỷ số biến dòng của hệ thống 8 nút được trình bày ở Bảng 3 và Bảng 4. Dựa trên hướng phân bố công suất, các rơ-le bảo vệ chính thứ 2, 6, 7, 8, 12, và 14 có hai rơ-le dự phòng. Vì vậy, kết quả tính toán cần kiểm tra đầy đủ cả hai trường hợp bảo vệ. Điều kiện ràng buộc về thời gian phối hợp đối với các rơ-le bảo vệ chính này lần lượt là ΔT_1 và ΔT_2 .



Hình 5. Sơ đồ lưới điện IEEE 8 nút

Bảng 3. Dòng sự cố và dự phòng cho hệ thống 8 nút

Rơ-le bảo vệ chính	Dòng sự cố (I_f) (A)	Rơ-le bảo vệ dự phòng	Dòng sự cố dự phòng (I_p) (A)
1	3232	6	3232
2	5924	1	996
2	5924	7	1890
3	3556	2	3556
4	3783	3	2244
5	2401	4	2401
6	6109	5	1197
6	6109	14	1874
7	5223	5	1197
7	5223	13	987
8	6093	7	1890
8	6093	9	1165
9	2484	10	2484
10	3883	11	2344
11	3707	12	3707
12	5899	13	987
12	5899	14	1874
13	2991	8	2991
14	5199	1	996
14	5199	9	1165

Bảng 4. Tỷ số của các biến dòng cho hệ thống 8 nút

Số thứ tự rơ-le	Tỷ số biến dòng
3, 7, 9, 14	800:5
1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13	1200:5

Kết quả tính toán ở Bảng 5 cho thấy, các giá trị tính toán thỏa mãn điều kiện phối hợp giữa các rơ-le lớn hơn

hoặc bằng 0,2 giây. Đối với các rơ-le bảo vệ thứ 2, 6, 7, 8, 12, và 14 có 2 hướng dự phòng. Thời gian phối hợp của cả hai hướng đều đạt giá trị lớn hơn hoặc bằng 0,2 giây. So sánh kết quả tính toán tối ưu với các phương pháp Teaching-Learning Based Optimization (TLBO) và Hydrild Particle Swarm Optimization – Differential Evolutionary (PSO-DE), kết quả tính toán ở Bảng 6 cho thấy, phương pháp WOA cũng có thời gian phối hợp bảo vệ tối ưu hơn.

Bảng 5. Kết quả tính toán phối hợp cho hệ thống IEEE 8 nút

Rơ-le	TMS	PS	T_i (s)	ΔT_1 (s)	ΔT_2 (s)
1	0,0904	1,25	0,1248	0,4525	
2	0,4094	1,3746	0,3259	0,2001	0,2936
3	0,4495	1,2586	0,3642	0,201	
4	0,3425	1,25	0,3982	0,2001	
5	0,1121	2,0638	0,3933	0,2669	
6	0,323	1,5745	0,2875	0,7807	0,4139
7	0,3801	1,2726	0,2082	0,86	0,4443
8	0,1794	1,8559	0,191	0,4285	1,0938
9	0,4592	1,25	0,5428	0,2084	
10	0,4051	1,25	0,4578	0,4719	
11	0,4672	1,2548	0,5576	0,2005	
12	0,4001	1,901	0,4527	0,2	0,2487
13	0,1107	1,25	0,1666	0,2571	
14	0,4349	1,25	0,2348	0,2912	1,05
Tổng thời gian (s)			4,5636		

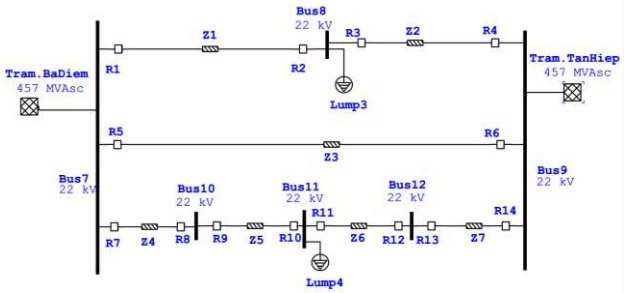
Bảng 6. So sánh kết quả của WOA với một số thuật toán khác [9]

Rơ-le	TLBO [9]	PSO-DE [9]	WOA
	TMS	TMS	TMS
1	0,378	0,4064	0,0904
2	0,3443	0,7506	0,4094
3	0,2553	0,3872	0,4495
4	0,3346	0,4031	0,3425
5	0,1005	0,2005	0,1121
6	0,2376	0,2011	0,323
7	0,3	0,2333	0,3801
8	0,472	0,2133	0,1794
9	0,414	0,2006	0,4592
10	0,3323	0,2265	0,4051
11	0,2518	0,261	0,4672
12	0,2704	0,239	0,4001
13	0,1735	0,2002	0,1107
14	0,2817	0,2837	0,4349
Tổng thời gian (s)	23,787	9,2671	4,5636

3.3.3. *Áp dụng vào phát tuyến 473 Tân Xuân*

Sơ đồ phát tuyến 473 Tân Xuân như Hình 6. Trong thực tế, phần lớn các phát tuyến trung thế của lưới điện Thành phố Hồ Chí Minh vận hành ở dạng hình tia, chỉ nhận một nguồn cung cấp. Tuy nhiên, trong một số trường hợp cần phải khép mạch vòng chuyển tải để thực hiện công tác trên lưới điện, lúc này lưới điện sẽ vận hành mạch hình vòng (có 2 nguồn cung cấp). Giá trị dòng điện ngắn mạch và dòng điện dự phòng và tỷ số các biến dòng được cho như Bảng 7 và Bảng 8. Kết quả tính toán phối hợp ở Bảng 9 cho

thấy, các giá trị tính toán đáp ứng yêu cầu phối hợp bảo vệ của các rơ-le trong trường hợp vận hành mạch vòng.



Hình 6. Sơ đồ tuyến 473 Tân Xuân vẽ bằng ETAP
Bảng 7. Dòng sự cố và dự phòng cho phát tuyến 473 Tân Xuân [10]

Rơ-le bảo vệ chính	Dòng sự cố (I_f) (A)	Rơ-le bảo vệ dự phòng	Dòng sự cố dự phòng (I_p) (A)
1	7311,6	6	2268
1	7311,6	8	1398
2	3878,4	4	3878,4
3	3589,2	1	3589,2
4	7330,8	13	1436,4
4	7330,8	5	2248,8
5	6238,8	2	1195,2
5	6238,8	8	1398
6	6267,6	13	1436,4
6	6267,6	3	1184,4
7	7108,8	2	1195,2
7	7108,8	6	2268
8	2980,8	10	2980,8
9	4267,2	7	4267,2
10	4659,6	12	2812,8
11	4539,6	9	2692,8
12	4448,4	14	4448,4
13	2881,2	11	2881,2
14	7078,8	3	1184,4
14	7078,8	5	2248,8

Bảng 8. Tỷ số biến dòng của cho tuyến 473 Tân Xuân

Số thứ tự rơ-le	Tỷ số biến dòng
3, 7, 9, 14	800:5
1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13	1200:5

Bảng 9. Kết quả tính toán phối hợp cho tuyến 473 Tân Xuân

Rơ-le	TMS	PS	T_i (s)	ΔT_1 (s)	ΔT_2 (s)
1	0,2355	2,2271	0,2507	0,2427	0,2003
2	0,0845	1,5	0,1167	0,2	
3	0,2266	1,5	0,341	0,2152	
4	0,1772	1,8894	0,1577	0,5475	0,3626
5	0,3226	1,5	0,1742	0,3175	0,2766
6	0,3027	1,5271	0,1657	0,5394	1,0331
7	0,3663	1,6495	0,2916	0,2001	0,2018
8	0,1612	1,5	0,1906	0,2776	
9	0,3772	1,5103	0,3056	0,2	
10	0,2525	1,5	0,2854	0,2616	
11	0,2597	1,5	0,3019	0,2001	

12	0,2749	1,5058	0,3281	0,2079	
13	0,074	2,4765	0,2596	0,241	
14	0,2829	2,2812	0,3201	1,0157	0,2002
Tổng thời gian (s)			3,4889		

Kết quả tính toán tối ưu bảo vệ rơ-le bằng thuật toán WOA cho lưới IEEE 3 nút và 8 nút được thể hiện trong Bảng 1 và Bảng 5, đồng thời, sự so sánh kết quả này với các phương pháp khác được trình bày trong Bảng 2 và Bảng 6. Các kết quả cho thấy, việc sử dụng phương pháp WOA cho kết quả khả tối ưu hơn so với các thuật toán được sử dụng trước đó. Bên cạnh đó, Bảng 9 cũng trình bày kết quả của việc sử dụng thuật toán WOA để tính toán phối hợp bảo vệ rơ-le cho tuyến 473 Tân Xuân thuộc lưới điện Thành phố Hồ Chí Minh. Qua đó cho thấy, có thể áp dụng thuật toán WOA cho việc tính toán bảo vệ rơ-le cho lưới điện thực tế của Thành phố Hồ Chí Minh.

4. Kết luận

Qua nghiên cứu này, nhóm tác giả nhận thấy việc áp dụng thuật toán WOA trong phối hợp tối ưu bảo vệ rơ-le quá dòng có hướng đem lại kết quả tối ưu hơn khá nhiều so với các thuật toán đã được ứng dụng trước đó. Thuật toán cũng cho kết quả hội tụ trong thời gian khá nhanh, phương trình toán học được minh họa đơn giản, thích hợp để áp dụng cho các bài toán tối ưu có ít hàm mục tiêu và ràng buộc.

Nghiên cứu cũng đã trình bày kết quả tính toán tối ưu phối hợp bảo vệ rơ-le cho tuyến 473 Tân Xuân thuộc lưới điện trung thế Tp. Hồ Chí Minh và đem lại kết quả khá khả quan, hứa hẹn có khả năng áp dụng rộng rãi để tính toán phối hợp bảo vệ rơ-le cho lưới điện thực tế nhằm giúp các công ty điện lực nâng cao việc vận hành hiệu quả và đảm bảo độ tin cậy cung cấp điện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Kudkelwar, Sagar, and Dipu Sarkar. "Online implementation of time augmentation of over current relay coordination using water cycle algorithm." *SN Applied Sciences* 1.12 (2019): 1-15.

[2] KIM, Chang-Hwan, et al. "Gray wolf optimizer for the optimal coordination of directional overcurrent relay". *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2018, 13.3: 1043-1051.

[3] Võ Ngọc Điều, *Các phương pháp tối ưu ứng dụng trong Hệ thống điện*, Nhà xuất bản Đại học Quốc gia Thành Phố Hồ Chí Minh, 2020.

[4] Seyedali Mirjalili, Andrew Lewis, "The Whale Optimization Algorithm", *Advances in engineering software*, 95, 2016, 51-67.

[5] PRASAD, Dharmbir; MUKHERJEE, Aparajita; MUKHERJEE, V. Transient stability constrained optimal power flow using chaotic whale optimization algorithm. *Handbook of neural computation*. Academic Press, 2017. p. 311-332.

[6] PRASAD, Dharmbir, et al. Application of chaotic whale optimisation algorithm for transient stability constrained optimal power flow. *IET Science, Measurement & Technology*, 2017, 11.8: 1002-1013.

[7] Kumar, Arvind, et al. "Whale optimization algorithm for constrained economic load dispatch problems-a cost optimization" *Ambient Communications and Computer Systems*. Springer, Singapore, 2018. 353-366.

[8] IEC, *Measuring relays and protection equipment*, International Standard IEC60255-151, 2009.

[9] Tahir Khurshaid et al, "Improved Firefly Algorithm for the Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays", *IEEE Access*, 7, 2019, 78503-78514.

[10] Phòng Phương thức, Trung tâm Điều độ Hệ thống điện Thành Phố Hồ Chí Minh, *Sơ đồ lưới điện thành phố Hồ Chí Minh*, 2020.