

TỐI ƯU PHỐI HỢP ROLE QUÁ DÒNG ĐIỆN TRONG LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI BẰNG THUẬT TOÁN TIẾN HÓA VI PHÂN

Nguyễn Hữu Phúc¹, Huỳnh Nhật Huy¹ và Đặng Tuấn Khanh¹

¹ Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP. HCM

Email: dtkhanh2002@hcmut.edu.vn

Thông tin chung:

Ngày nhận bài:

22/5/2025

Ngày nhận bài sửa:

01/7/2025

Ngày duyệt đăng:

15/7/2025

Từ khóa:

Bảo vệ lưới điện phân phối, Bảo vệ quá dòng điện, Phối hợp role, Thuật toán di truyền, Thuật toán tiến hóa vi phân.

TÓM TẮT

Lưới điện phân phối hiện nay ngày càng phức tạp, việc tối ưu phối hợp role quá dòng điện trở thành một bài toán phi tuyến, có nhiều ràng buộc chặt chẽ. Bài báo này đề xuất sử dụng thuật toán tiến hóa vi phân (Differential Evolution - DE) làm công cụ để giải quyết bài toán tối ưu phối hợp role, đồng thời so sánh hiệu quả với thuật toán di truyền (Genetic Algorithm - GA). Hai kịch bản được xem xét bao gồm: phi tuyến và hỗn hợp số nguyên phi tuyến, phản ánh đầy đủ tính chất thực tế của lưới điện. Các thử nghiệm được tiến hành trên các hệ thống chuẩn IEEE 8 nút và lưới điện phân phối thực tế 22 kV. Kết quả cho thấy thuật toán DE mang lại hiệu quả cao trong việc giảm tổng thời gian tác động của role chính với sự cải thiện kết quả tối ưu là 12,98% và 61,25% lần lượt đối với hai kịch bản áp dụng cho lưới chuẩn IEEE 8 nút ngoài ra còn cải thiện tốc độ hội tụ, mở ra tiềm năng ứng dụng trong bài toán phối hợp role trong lưới điện phân phối.

1. GIỚI THIỆU

Trong quá trình vận hành hệ thống điện, đặc biệt là lưới điện phân phối, hiện tượng quá tải và ngắn mạch là không thể tránh khỏi. Do đó, cần có một hệ thống bảo vệ quá tải và ngắn mạch hiệu quả nhằm giảm thiểu tác động của các sự cố. Một hệ thống bảo vệ tốt cần đảm bảo các yếu tố như: tính chọn lọc, tác động nhanh, độ nhạy, độ tin cậy và tính kinh tế [1], trong đó tính chọn lọc là yếu tố then chốt [2]. Tuy nhiên, sự mở rộng của hệ thống điện làm gia tăng số lượng role, khiến việc chỉnh định tối ưu gặp nhiều khó khăn.

Gần đây, các nghiên cứu tập trung tìm giải pháp tối ưu cho việc phối hợp role quá dòng điện thông qua nhiều phương pháp khác nhau. Phương pháp truyền thống dựa vào các kỹ thuật toán học như quy hoạch tuyến tính [3],

quy hoạch tuyến tính khoảng [4], giải thuật đơn hình [5] và đơn hình hai pha [6]. Trong khi đó, các phương pháp metaheuristic như thuật toán tối ưu hóa bầy hạc [7], sinh vật [8], đàn kiến [9] và các thuật toán khác thể hiện khả năng tìm kiếm hiệu quả trên không gian lớn, vượt trội so với các phương pháp truyền thống. Ngoài ra, phương pháp lai như thuật toán di truyền lai [10] hoặc kết hợp với quy hoạch phi tuyến [11] cũng được quan tâm.

Nhóm tác giả đề xuất áp dụng thuật toán Differential Evolution (DE) [12] để giải bài toán tối ưu phi tuyến đơn mục tiêu có ràng buộc. Bài toán tập trung tối ưu hệ số nhân thời gian (TDS) và hệ số nhân dòng điện (PS), nhằm giảm tổng thời gian tác động của role chính. Kết quả thu được từ các lưới điện IEEE 8 nút và lưới phân phối thực tế 22 kV sẽ được dùng để so sánh hiệu quả của thuật toán DE

so với thuật toán Genetic Algorithm (GA) với hai kịch bản tối ưu cho cả hai biến TDS và PS, thứ nhất là tối ưu phi tuyến với cả hai điều là các biến tối ưu liên tục; thứ hai là tối ưu hỗn hợp phi tuyến với TDS là biến tối ưu liên tục và PS là biến tối ưu rời rạc.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Thuật toán tiến hoá vi phân

Tiến hóa vi phân (DE) [12] là một thuật toán tối ưu hóa ngẫu nhiên quần thể dựa trên lý thuyết tiến hóa như Thuật toán di truyền, Chiến lược tiến hóa và Lập trình tiến hóa. Trong DE, có rất nhiều cách tạo vector thử nghiệm, từ đó tìm được vector phù hợp với một bài toán cụ thể. Hơn nữa, ba thông số kiểm soát của DE là kích thước quần thể, hệ số đột biến và tỷ lệ bắt chéo cũng có thể ảnh hưởng đáng kể đến khả năng tối ưu của DE. Dưới đây là tóm tắt các bước của thuật toán DE:

Bước 1: Khởi tạo

Thiết lập tham số cài đặt của thuật toán như NP (Kích thước quần thể), MaxFE (tham số dừng), D (số chiều) và khởi tạo quần thể ngẫu nhiên.

Bước 2: Vòng lặp tối ưu

Thực hiện lần lượt cho tới khi thỏa tham số dừng: Đột biến, Lai ghép, Chọn lọc để liên tục tạo ra thế hệ mới tốt hơn và cập nhật giải pháp tốt nhất (X_{best}) sau mỗi vòng lặp.

Bước 3: Kết thúc

Khi thỏa tham số dừng thì kết thúc vòng lặp và đưa ra kết quả cuối cùng.

Cụ thể hơn, mỗi bước trong thuật toán DE có nội dung như sau:

Khởi tạo: Tạo quần thể ban đầu, mỗi cá thể được chọn ngẫu nhiên nằm trong khoảng tối đa và tối thiểu.

Đột biến: tiến hành hoạt động đột biến để tạo ra đột biến V dựa trên cá thể X . Công thức (1) và (2) là hai phương pháp tạo một vector đột biến lần lượt là DE/best/1, DE/best/2 dùng trong thuật toán DE với các chỉ số a, b, c, d, e là số cá thể được chọn ngẫu nhiên; F là hệ số đột biến ($F = 0.6$):

$$V_{(i)}^g = X_{best}^g + F(X_{(a)}^g - X_{(b)}^g) \quad (1)$$

$$V_{(i)}^g = X_{best}^g + F(X_{(a)}^g - X_{(b)}^g) + F(X_{(c)}^g - X_{(d)}^g) \quad (2)$$

Lai ghép: sau khi đột biến, mỗi vector mục tiêu $X_{(i)}^g$ và vector đột biến $V_{(i)}^g$ sẽ bắt cặp với nhau để lai ghép và tạo ra vector thử $U_{(i)}^g$. Mỗi gen trong vector $U_{(i)}^g$ được xác định với hệ số lai ghép (Cr) theo (3), trong đó $U(0;1)$ là giá trị ngẫu nhiên trong khoảng (0;1):

$$u_{(i,j)}^g = \begin{cases} v_{(i,j)}^g & \text{if } U(0;1) \leq Cr, \\ x_{(i,j)}^g & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

Chọn lọc: khởi tạo lại ngẫu nhiên các cá thể trong vector thử có giá trị vượt quá khoảng giới hạn, sau đó đánh giá chất lượng vector thông qua hàm mục tiêu. Phép chọn lọc cho thế hệ tiếp theo được xác định dựa trên cá thể tốt nhất về hàm mục tiêu giữa cá thể ban đầu và cá thể sau khi thực hiện lai chéo theo (4):

$$X_{(i)}^{g+1} = \begin{cases} U_{(i)}^g & \text{if } F_1(U_{(i)}^g) \leq F_1(X_{(i)}^g) \\ X_{(i)}^g & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

Các thông số kích thước quần thể (NP), hệ số đột biến F và tỷ lệ lai ghép (CR) có ảnh hưởng đến khả năng tối ưu thuật toán: NP lớn đồng nghĩa quần thể lớn, làm tăng sự đa dạng của không gian tìm kiếm được khám phá nhưng cũng làm tăng chi phí tính toán cho mỗi thế hệ. NP còn là nguồn cung cấp các cá

thể để lựa chọn cho các phép toán đột biến và lai ghép. Hệ số đột biến F kiểm soát độ lớn hoặc mức độ khuếch đại của vector đột biến V, giá trị F nhỏ dẫn đến các bước đột biến nhỏ hơn, giúp tìm kiếm tinh chỉnh hơn xung quanh các giải pháp hiện có (khai thác - exploitation), nhưng có thể hội tụ chậm hơn, ngược lại F lớn dẫn đến các bước đột biến lớn hơn, giúp khám phá các vùng mới của không gian tìm kiếm nhanh hơn (khám phá - exploration), nhưng có thể nhảy qua điểm tối ưu. Tỷ lệ lai ghép CR kiểm soát xác suất mà vector thử $U_{(i)}^g$ sẽ được thừa hưởng từ vector đột biến $V_{(i)}^g$ thay vì từ vector mục tiêu $X_{(i)}^g$.

2.2. Thành lập bài toán

Bài toán phối hợp bảo vệ có thể được xây dựng như một bài toán tối ưu hóa trong đó mục tiêu là giảm thiểu tổng thời gian hoạt động của tất cả các role liên quan đến ràng buộc thời gian phối hợp giữa role dự phòng và role chính. Do đó, hàm mục tiêu (OF) được tính theo (5) với n là số role của lưới điện:

$$OF = \text{Min} \left(\sum_{i=1}^n t_{\text{chính}_i} \right) \quad (5)$$

Thời gian hoạt động của role được tính theo (6):

$$t = \frac{K_1 \times TDS}{\left(\frac{I_{SC}}{PS \times CT} \right)^{K_2} - 1} + L \quad (6)$$

Trong phương trình (6), I_{SC} là dòng điện ngắn mạch chạy qua role. Đối với role bảo vệ quá dòng thì đặc tính dốc chuẩn có $K_1 = 0,14$, $K_2 = 0,02$, $L = 0$, đặc tính rất dốc có $K_1 = 13,5$, $K_2 = 1$, $L = 0$, còn đặc tính cực dốc có $K_1 = 80$, $K_2 = 2$, và $L = 0$.

2.2.1. Các ràng buộc trong bài toán tối ưu

Trong quá trình phối hợp bảo vệ, role chính và role phụ phải có sự phối hợp thời gian để đảm bảo tính chọn lọc (CTI) trong vận hành như (7):

$$t_{\text{dự phòng}} - t_{\text{chính}} \geq CTI \quad (7)$$

Trong đó, đối với role điện cơ thì giá trị của CTI trong khoảng từ 0,3 giây đến 0,4 giây, còn đối với role kỹ thuật số giá trị CTI nằm trong khoảng từ 0,1 giây đến 0,2 giây.

2.2.2. Hệ số TDS và hệ số PS

Hệ số TDS và hệ số PS có thể điều chỉnh thời gian hoạt động của role khi dòng ngắn mạch lớn hơn hoặc bằng dòng chỉnh định, nằm trong phạm vi theo (8) và (9). Trong bài báo này, giá trị biên của TDS, PS sẽ phụ thuộc vào cấu trúc của từng mạng điện khác nhau.

$$TDS_{\text{min}} \leq TDS \leq TDS_{\text{max}} \quad (8)$$

$$PS_{\text{min}} \leq PS \leq PS_{\text{max}} \quad (9)$$

Với TDS_{min} và TDS_{max} là giới hạn dưới, trên của biến hệ số TDS.

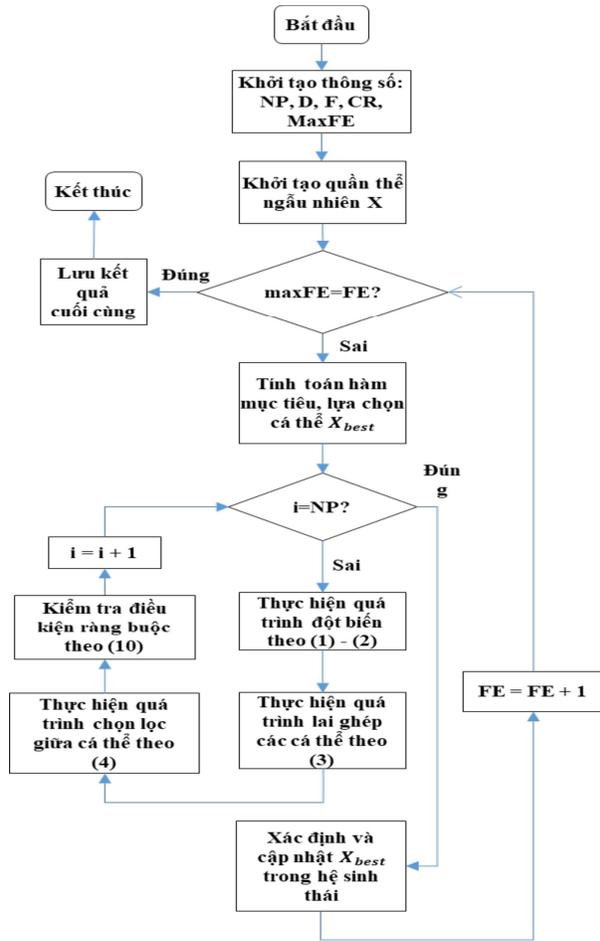
PS_{min} và PS_{max} là giới hạn dưới, trên của hệ số PS.

2.2.3. Xử lý ràng buộc bị vi phạm

Trong quá trình tính toán tối ưu hoá, các ràng buộc thời gian phối hợp trong phương trình (7) có thể bị vi phạm, khi ấy, thuật toán sẽ kết hợp với cơ chế phạt như là hàm phạt động, hàm phạt tĩnh, hàm phạt cứng tùy thuộc vào hàm mục tiêu bài toán, trong bài báo này sử dụng công thức (10) để làm tăng giá trị hàm mục tiêu với: OF là giá trị hàm mục tiêu (5), α là hệ số phạt, N_{CTI} là số cặp vi phạm CTI.

$$\text{Fitness} = OF + \alpha \times N_{CTI} \quad (10)$$

Lưu đồ thuật toán của DE được thể hiện trong Hình 1.



Hình 1. Lưu đồ thuật toán DE

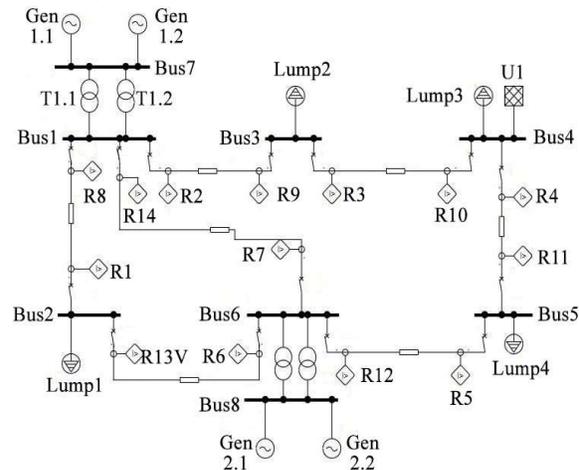
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Thuật toán DE với 5000 vòng lặp và kích thước quần thể là 50 đã được thử nghiệm trên hệ thống điện IEEE 8 nút trong hai kịch bản: (1) tối ưu phi tuyến với cả hai tham số TDS và PS là liên tục; (2) tối ưu hỗn hợp với TDS liên tục và PS rời rạc. Kết quả thu được từ DE được so sánh với thuật toán di truyền (GA), trong đó các cài đặt cho thuật toán GA: quá trình chọn lọc sử dụng phương pháp Tournament, lai ghép sử dụng hai kiểu là Single-point và Two-point, còn đột biến được thực hiện theo hai phương pháp Gaussian và Uniform. Các thông số cài đặt của DE và GA

lần lượt gồm: tỷ lệ đột biến là 0,6 và 0,05; tỷ lệ lai ghép là 0,7 và 0,9.

3.1. Lưới IEEE 8 nút

Lưới điện IEEE 8 nút gồm 8 nút, 7 đường dây, 14 role và 20 cặp role chính-dự phòng, kết hợp với 2 nguồn DG, 2 máy biến áp và lưới 400 MVA. Tỷ số biến dòng là 1200/5 cho nhóm role (1,2,4,5,6,8,10,11,12,13) và 800/5 cho nhóm (3,7,9,14) [13]. Số biến tối ưu gồm 14 biến *TDS* (0,1-1) và 14 biến *PS* (0,5-2), với chi tiết dòng ngăn mạch theo [13]. Sơ đồ minh họa cho lưới điện IEEE 8 nút chi tiết trong Hình 2.

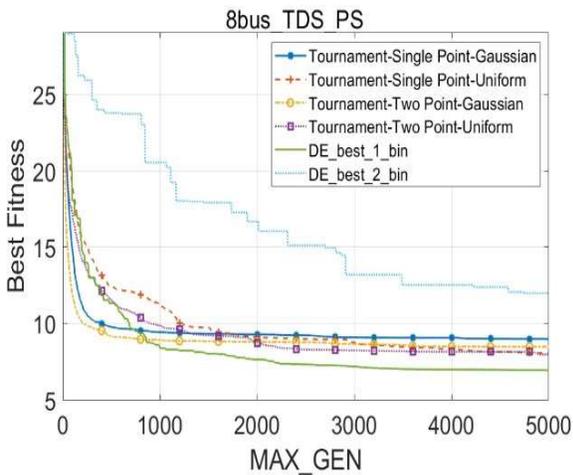


Hình 2. Sơ đồ một sợi lưới điện IEEE 8 nút

3.1.1. Tối ưu phi tuyến

Kết quả tối ưu phối hợp bảo vệ sử dụng thuật toán DE cho thấy giá trị hàm mục tiêu tốt nhất đạt được là 6,95 giây. So với thuật toán GA đạt được 7,9842 giây, kết quả này thể hiện mức cải thiện lên đến 12,98% trên lưới điện IEEE 8 nút trong bài toán tối ưu phi tuyến. Tuy nhiên, thời gian thực hiện của DE là 38,55 giây, cao hơn đáng kể so với GA, vốn chỉ mất 18,44 giây. Ngoài ra, biến thể DE/best/2 của thuật toán DE thể hiện tốc độ hội tụ vượt trội so với các biến thể còn lại cũng như bốn cấu hình khác nhau của GA, được minh họa rõ qua Hình 3. Thông tin chi tiết về kết quả tối ưu, bao gồm các giá trị TDS

và PS tương ứng của từng role, được trình bày trong Bảng 2.



Hình 3. Đồ thị hội tụ kịch bản 1 của lưới điện IEEE 8 nút

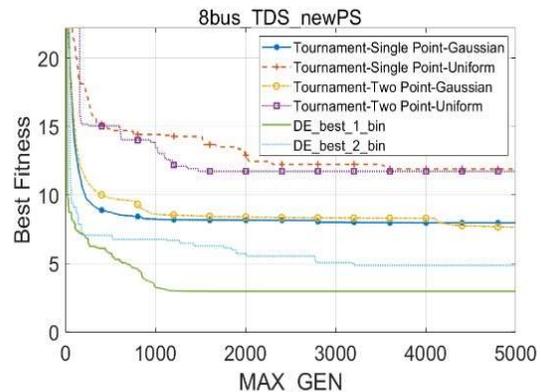
Bảng 2. Kết quả thời gian phối hợp lưới điện IEEE 8 nút kịch bản 1

Role chính	Role phụ	TDS role chính	PS role chính	CTI
1	6	0,1000	19,499	0,2005
2	1	0,2418	19,081	0,2229
2	7	0,2418	19,081	0,2009
3	2	0,2536	12,175	0,2018
4	3	0,1499	19,813	0,2017
5	4	0,1007	19,941	0,2014
6	5	0,1574	19,777	0,3238
6	14	0,1574	19,777	0,4469
7	5	0,2280	19,024	0,2003
7	13	0,2280	19,024	0,3384
8	7	0,1867	13,681	0,4025
8	9	0,1867	13,681	0,32
9	10	0,1426	19,995	0,2006
10	11	0,1639	20,000	0,2001
11	12	0,1967	16,409	0,2002
12	13	0,2849	13,781	0,2157
12	14	0,2849	13,781	0,2006
13	8	0,1000	19,724	0,2017
14	1	0,2284	19,998	0,3046
14	9	0,2284	19,998	0,2

3.1.2. Tối ưu hỗn hợp phi tuyến

Thuật toán DE đạt thời gian tác động tối ưu là 2,97 giây, so với 7,67 giây của thuật toán di truyền GA, thể hiện mức cải thiện đáng kể lên đến 61,25%. Các giá trị CTI giữa các cặp role dao động trong khoảng từ 0,2 đến 0,5 giây, đảm bảo yêu cầu phối hợp bảo vệ. Trong các biến thể của DE, biến thể DE/best/1 cho thấy tốc độ hội tụ nhanh nhất, như được minh họa trong Hình 4. Thông tin chi tiết về kết quả tối ưu, bao gồm các giá trị TDS và PS tương ứng của từng role, được trình bày trong Bảng 3.

Điều này chứng tỏ khả năng khai thác và khai phá không gian tìm kiếm của DE vượt trội so với GA, giúp giảm đáng kể thời gian cắt trong khi vẫn duy trì tính ổn định của hệ thống. Thêm vào đó, DE_best_1 không chỉ hội tụ nhanh hơn mà còn đạt độ chính xác cao hơn trong việc tối ưu hóa thông số TDS và PS, góp phần nâng cao hiệu quả phối hợp bảo vệ giữa các role.



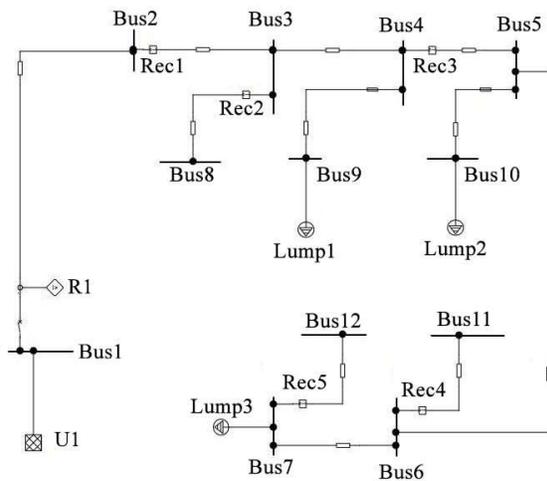
Hình 4. Đồ thị hội tụ kịch bản 2 của lưới điện IEEE 8 nút

Bảng 3. Kết quả thời gian phối hợp lưới điện IEEE 8 nút kịch bản 2

Role chính	Role phụ	TDS role chính	PS role chính	CTI
1	6	0,1157	1	0,2
2	1	0,2332	2	0,2
2	7	0,2332	2	0,2
3	2	0,2041	2	0,2

Role chính	Role phụ	TDS role chính	PS role chính	CTI
4	3	0,2507	1	0,2
5	4	0,11	1	0,2
6	5	0,1455	2	0,2
6	14	0,1455	2	0,3486
7	5	0,1799	2	0,2084
7	13	0,1799	2	0,5564
8	7	0,1558	2	0,2891
8	9	0,1558	2	0,2
9	10	0,3816	0,5	0,2
10	11	0,3446	1	0,2
11	12	0,3484	1	0,2
12	13	0,3746	1,5	0,3994
12	14	0,3746	1,5	0,2
13	8	0,1	1,5	0,2
14	1	0,1964	2	0,2945
14	9	0,1964	2	0,2054

3.2. Xuất tuyến thực tế 22 kV

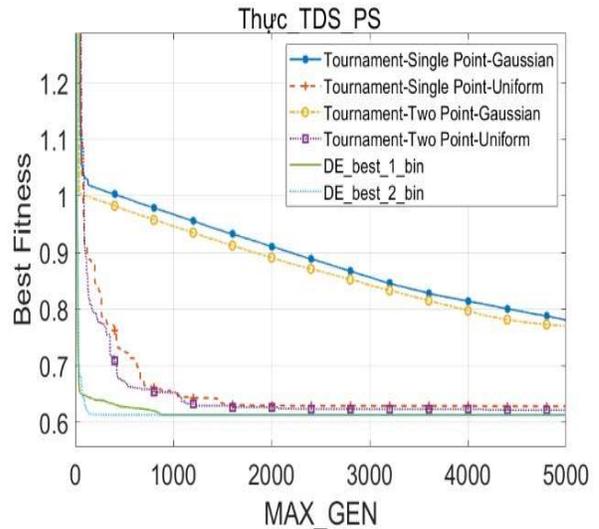


Hình 5. Sơ đồ một sợi xuất tuyến thực tế 22 kV điện lực Tây Ninh

Hình 5 là sơ đồ một sợi của xuất tuyến thực tế 22 kV, được áp dụng nhằm đánh giá được hiệu suất của thuật toán đề ra. Các biến *TDS* được giới hạn trong khoảng từ 0,05 đến 1,5 còn biến *PS* được giới hạn riêng biệt cho từng role.

3.2.1. Tối ưu phi tuyến

Đối với kịch bản thứ 1, bài toán tối ưu phi tuyến có độ phức tạp cao nhưng vùng tìm kiếm các giá trị tối ưu được mở rộng, chính vì thế kết quả với cùng lưới điện và thông số cài đặt trong kịch bản thứ 1 cho thấy tổng thời gian cắt chính đối với thuật toán DE đạt được giá trị là 0,61 giây với sự cải thiện 2,44%, ngoài ra thuật toán DE cho thấy tốc độ hội tụ đáng kể với hai biến thể được chọn trong Hình 6. Thông tin chi tiết về kết quả tối ưu, bao gồm các giá trị TDS và PS tương ứng của từng role, được trình bày trong Bảng 4.



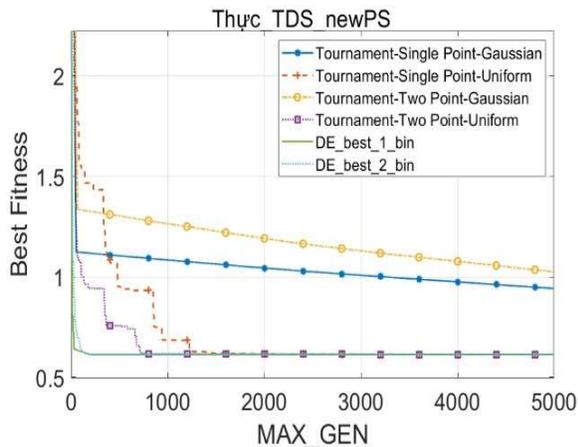
Hình 6. Đồ thị hội tụ kịch bản 1 của xuất tuyến 22 kV

Bảng 4. Kết quả thời gian phối hợp các cặp role của xuất tuyến 22 kV kịch bản 1

Role chính	Role phụ	TDS role chính	PS role chính (A)	CTI (giây)
R1	----	0,05	1527,9	----
Rec1	R1	0,05	674,13	0,2
Rec2	Rec_1	0,05	132	0,2218
Rec3	Rec_1	0,05	388,47	0,2
Rec4	Rec_3	0,05	132	0,2
Rec5	Rec_3	0,05	80	0,2468

3.2.2. Tối ưu hỗn hợp phi tuyến

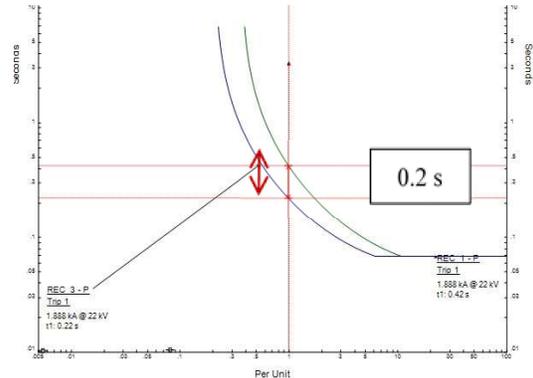
Trong kịch bản thứ 2, các biến đầu vào có cùng dữ liệu và cùng giới hạn trên dưới, chỉ thay đổi biến *PS* thành giá trị rời rạc với bước nhảy là 0,1. Kết quả thu được, có thể nhận xét sự thay đổi với kịch bản thứ 2 cũng cho kết quả tương đồng với kịch bản 1 là 0,61 giây đối với cùng biến thể thuật toán DE, một phần do kết hợp biến rời rạc dẫn đến kết quả kém hơn do độ “nhuyễn” khi thực hiện quá trình tối ưu. Tốc độ hội tụ thể hiện sự vượt trội của các biến thể trong thuật toán DE thông qua Hình 7. Thông tin chi tiết về kết quả tối ưu, bao gồm các giá trị TDS và PS tương ứng của từng role, được trình bày trong Bảng 5. Thực hiện kiểm chứng trên phần mềm mô phỏng ETAP hai cặp phối hợp bảo vệ Rec3, Rec1 đều thỏa điều kiện phối hợp CTI như Hình 8.



Hình 7. Đồ thị hội tụ kịch bản 2 của xuất tuyến 22 kV

Bảng 5. Kết quả thời gian phối hợp các cặp role của xuất tuyến 22 kV kịch bản 2

Role chính	Role phụ	TDS role chính	PS role chính (A)	CTI (giây)
R1	----	0,05	1527,9	----
Rec1	R1	0,05	674,1	0,2
Rec2	Rec_1	0,05	132	0,2218
Rec3	Rec_1	0,05	388,4	0,2
Rec4	Rec_3	0,05	132	0,2
Rec5	Rec_3	0,05	80	0,2468



Hình 8. Thời gian phối hợp bảo vệ cặp Rec3 và Rec1

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, bài toán tối ưu phối hợp role bảo vệ quá dòng trong lưới điện phân phối được giải quyết bằng thuật toán DE và so sánh kết quả với thuật toán GA. Các giá trị tối ưu của *TDS*, *PS* được tính toán thông qua việc áp dụng thuật toán vào hai kịch bản khác nhau ứng với hai loại lưới điện bao gồm: IEEE 8 nút và xuất tuyến 22 kV. Các kết quả thu được từ từng kịch bản trong từng trường hợp đã cho thấy rõ ràng sự vượt trội của thuật toán DE, cả về giá trị hàm mục tiêu lẫn tốc độ hội tụ, đồng thời đảm bảo tối thiểu tổng thời gian tác động của các role chính và duy trì tính chọn lọc thông qua khoảng thời gian phối hợp CTI giữa các cặp role. Mặc dù cả hai thuật toán DE và GA đều lấy cảm hứng từ các cơ chế tự nhiên, nhưng DE cho kết quả vượt trội hơn so với GA nhờ vào một số điểm cốt lõi thể hiện qua công thức (1) và (2), cho thấy khả năng di chuyển theo hướng hiệu số của các cá thể, đồng thời vẫn giữ lại nghiệm tốt nhất trong quần thể và tiếp tục di chuyển theo vector định hướng. Nhờ sự cân bằng hiệu quả giữa khai thác và khám phá DE có khả năng thoát khỏi bẫy cực trị địa phương tốt hơn so với GA - vốn chỉ phụ thuộc vào quá trình chọn lọc ngẫu

nhiên các gene từ cá thể bố mẹ rồi đột biến theo một hệ số mang tính ngẫu nhiên cao, thiếu tính định hướng thông qua nhiều thế hệ để có thể hình thành được quần thể tốt hơn sau mỗi vòng lặp. Trong tương lai, nhóm tác giả sẽ hướng đến mở rộng cho bài toán áp dụng vào những lưới điện phức tạp hơn, cải thiện hay kết hợp các kỹ thuật tối ưu hóa nhằm tăng hiệu quả tìm kiếm nghiệm tối ưu của bài toán cũng như phát triển các hàm mục tiêu mới có xét tới chi phí, hay tác động đường cong nhiệt của dây dẫn lên sự phối hợp của role.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu được tài trợ bởi Trường Đại học Bách Khoa - ĐHQG-HCM trong khuôn khổ đề tài mã số SVCQ-2024-ĐĐT-42. Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ thời gian và phương tiện vật chất cho nghiên cứu này. Các tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích.

Tài liệu tham khảo

[1] Anderson, P.M. Power System Protection. New York; 1999.

[2] Abdelaziz, A.Y., Talaat, H.E.A., Nosseir, A.I. et al. An adaptive protection scheme for optimal coordination of overcurrent relays. *Electric Power Systems Research*. 2002; 61(1): 1-9.

[3] Urdaneta, A.J., Restrepo, H., Márquez, S. et al. Coordination of directional overcurrent relay timing using linear programming. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1996; 11(1): 122-127.

[4] Noghabi, A.S., Mashhadi, H.R., and Sadeh, J. Optimal coordination of directional overcurrent relays considering different

network topologies using interval linear programming. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2010; 25(3): 1348-1354.

[5] Braga, A.S. and Saraiva, J.T. Coordination of overcurrent directional relays in meshed networks using the simplex method. *Proceedings of the Mediterranean Electrotechnical Conference - MELECON, Bari, Italy*. 1996. 1380-1383.

[6] Bedekar, P.P., Bhide, S.R., and Kale, V.S. Optimum coordination of overcurrent relays in distribution system using dual simplex method. *2nd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, ICETET 2009, Nagpur, India*. 2009. 752-757.

[7] Zeineldin, H.H., El-Saadany, E.F., and Salama, M.M.A. Optimal coordination of overcurrent relays using a modified particle swarm optimization. *Electric Power Systems Research*. 2006; 76(11): 988-995.

[8] Cheng, M.Y. and Prayogo, D. Symbiotic Organisms Search: A new metaheuristic optimization algorithm. *Computers & Structures*. 2014; 139: 98-112.

[9] Shih, M.Y., Castillo Salazar, C.A., and Enríquez, A.C. Adaptive directional overcurrent relay coordination using ant colony optimisation. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2015; 9(14): 1785-1794.

[10] Noghabi, A.S., Sadeh, J., and Mashhadi, H.R. Considering different network topologies in optimal overcurrent relay coordination using a hybrid GA. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2009; 24(4): 1857-1863.

[11] Bedekar, P.P. and Bhide, S.R. Optimum coordination of directional overcurrent relays using the hybrid GA-NLP approach. IEEE Transactions on Power Delivery. 2011; 26(1): 157-164.

[12] Thangaraj, R., Pant, M., and Deep, K. Optimal coordination of over-current relays using modified differential evolution

algorithms. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2010; 23(5): 820-829.

[13] El-Fergany, A. Optimal directional digital overcurrent relays coordination and arc-flash hazard assessments in meshed networks. International Transactions on Electrical Energy Systems. 2016; 26(1): 220-241.

OPTIMIZATION OF OVERCURRENT PROTECTION RELAY COORDINATION IN DISTRIBUTION NETWORKS USING THE DIFFERENTIAL EVOLUTION ALGORITHM

ABSTRACT

Modern distribution networks are becoming increasingly complex, making overcurrent relay coordination a highly nonlinear optimization problem with stringent constraints. This paper proposes using Differential Evolution (DE) to solve the relay coordination problem and compares its performance against the Genetic Algorithm (GA). Two scenarios are considered—purely nonlinear and mixed-integer nonlinear—both of which capture the practical characteristics of distribution systems. Experiments are conducted on the standard IEEE 8-bus system and an actual 22 kV distribution feeder. The DE algorithm reduces the total operating time of primary relays by 12.9756 % and 61.2469 % for the two scenarios on the IEEE 8-bus system, respectively, while also achieving faster convergence. These findings underscore the promising potential of DE for relay coordination in distribution networks.

Keywords: *Differential evolution algorithm, distribution network protection, genetic algorithm, overcurrent protection, relay coordination*