



BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT  
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

PHẠM ĐÌNH THÁI

TỐI ƯU HÓA LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI BA PHA CÂN BẰNG  
VÀ KHÔNG CÂN BẰNG CÓ MÁY PHÁT PHÂN TÁN

LUẬN ÁN TIẾN SĨ  
NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỆN

Tp. Hồ Chí Minh, tháng 07/2025





**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT  
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH**

**PHẠM ĐÌNH THÁI**

**TỐI ƯU HÓA LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI BA PHA CÂN BẰNG  
VÀ KHÔNG CÂN BẰNG CÓ MÁY PHÁT PHÂN TÁN**

**NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỆN - 9520201**

Người hướng dẫn khoa học 1: TS. Nguyễn Trung Thắng

Người hướng dẫn khoa học 2: PGS. TS. Lê Chí Kiên

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Tp. Hồ Chí Minh, tháng 07/2025



## QUYẾT ĐỊNH

Về việc giao đề tài luận án và người hướng dẫn NCS khóa 2021 - 2024

HIỆU TRƯỞNG TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP. HỒ CHÍ MINH

Căn cứ Luật Giáo dục đại học ngày 18/6/2012 và Luật sửa đổi, bổ sung một số điều của Luật Giáo dục đại học ngày 19/11/2018;

Căn cứ Nghị định 99/2019/NĐ-CP ngày 30/12/2019 của Chính phủ Quy định chi tiết và hướng dẫn thi hành một số điều của Luật sửa đổi, bổ sung một số điều của Luật giáo dục đại học;

Căn cứ Quyết định số 937/QĐ-TTg ngày 30/6/2017 của Thủ tướng Chính phủ về việc phê duyệt đề án thi điểm đổi mới cơ chế hoạt động của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM;

Căn cứ Nghị quyết số 11/NQ-HĐT ngày 08/01/2021 của Hội đồng trường ban hành Quy chế tổ chức và hoạt động của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM;

Căn cứ Nghị quyết số 25/NQ-HĐT ngày 29/4/2021 của Hội đồng trường về công tác cán bộ lãnh đạo của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM;

Căn cứ Thông tư số 08/2017/TT-BGDĐT ngày 04/4/2017 của Bộ Giáo dục và Đào tạo về việc Ban hành Quy chế tuyển sinh và đào tạo trình độ tiến sĩ;

Căn cứ Quyết định số 1557/QĐ-ĐHSPKT ngày 30/8/2017 của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh về việc ban hành Quy định đào tạo tiến sĩ của trường đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM;

Theo nhu cầu công tác và khả năng cán bộ;

Theo đề nghị của Trường khoa Điện - Điện tử và Trường phòng Đào tạo,

### QUYẾT ĐỊNH:

**Điều 1.** Giao đề tài luận án tiến sĩ và người hướng dẫn cho:

Nghiên cứu sinh : **Phạm Đình Thái**

Ngành : **Kỹ thuật điện**

Khoá: **2021 – 2024**

Tên luận án : **Tối ưu hóa lưới điện phân phối ba pha cân bằng và không cân bằng có máy phát phân tán**

Người HD thứ nhất (HD chính): **TS. Nguyễn Trung Thắng**

Người HD thứ hai : **PGS.TS. Lê Chí Kiên**

Thời gian thực hiện : **01/9/2021 đến ngày 01/9/2024**

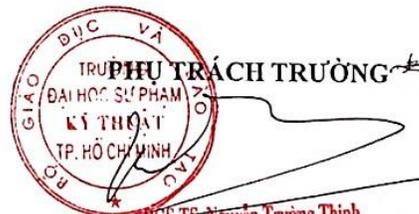
**Điều 2.** Giao cho Phòng Đào tạo quản lý, thực hiện theo đúng Quy chế đào tạo trình độ tiến sĩ của Bộ Giáo dục & Đào tạo và Nhà trường đã ban hành.

**Điều 3.** Trường các đơn vị, phòng Đào tạo, các Khoa/Viện quản ngành tiến sĩ và các Ông (Bà) có tên tại Điều 1 chịu trách nhiệm thi hành quyết định này.

Quyết định có hiệu lực kể từ ngày ký./.

Nơi nhận:

- BGH (để biết);
- Như điều 2, 3;
- Lưu: VT, ĐT (4b).



PGS.TS. Nguyễn Trường Thịnh

# LÝ LỊCH CÁ NHÂN

## I. THÔNG TIN CÁ NHÂN

Họ và tên: PHẠM ĐÌNH THÁI

Phái: Nam

Ngày/ tháng/ năm sinh: 18/ 02/ 1992

Tại: Phú Yên

## II. QUÁ TRÌNH ĐÀO TẠO

- Từ 2010 – 2014: Sinh viên ngành Điện công nghiệp, trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. Hồ Chí Minh.
- Từ 2015 – 2017: Học viên cao học ngành Kỹ thuật điện, trường National Chung Cheng University, Đài Loan.
- Từ 2021 – nay: Nghiên cứu sinh ngành Kỹ thuật điện, trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. Hồ Chí Minh.

## III. QUÁ TRÌNH CÔNG TÁC

- Từ 2018 – 2019: Cán bộ Xí nghiệp Khai thác các công trình khí (Vietsovpetro Gas) thuộc Liên doanh Việt – Nga Vietsovpetro (VSP).
- Từ 2019 – nay: Cán bộ Liên doanh Điều hành Cửu Long (Cuulong JOC) thuộc tổng Công ty Thăm dò Khai thác Dầu khí (PVEP).

*TP. Hồ Chí Minh, ngày 19 tháng 07 năm 2025*

Phạm Đình Thái

# LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của tôi.

Các số liệu, kết quả nêu trong Luận án là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

*TP. Hồ Chí Minh, ngày 19 tháng 07 năm 2025*

Phạm Đình Thái

# LỜI CẢM TẠ

Trong suốt thời gian dài học tập, nghiên cứu và hoàn thành luận án này, tôi đã nhận nhiều sự động viên, chỉ bảo, hỗ trợ từ gia đình, thầy cô, đồng nghiệp và bạn bè.

Tôi xin chân thành bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới hai thầy hướng dẫn là TS. Nguyễn Trung Thắng và PGS. TS. Lê Chí Kiên cho sự hướng dẫn nhiệt tình và tận tâm trong quá trình thực hiện các nghiên cứu. Nếu không có sự đóng góp của hai thầy thì luận án này không thể hoàn thành được.

Tôi xin cảm ơn chân thành tới ba Phạm Đình Châu, mẹ Lê Thị Hồng Phán, vợ Nguyễn Thị Minh Phi, và con Phạm Khôi Nguyên & Phạm Anh Khôi cho sự động viên và cổ vũ tôi khi mệt mỏi, chán nản trong quá trình dài học hành và nghiên cứu.

Tôi cũng xin gửi lời biết ơn sâu sắc tới người thầy kính mến GS. TS. Gary W. Chang, phó hiệu trưởng trường National Chung Cheng University là thầy hướng dẫn của tôi hệ thạc sĩ ở Đài Loan. Xin gửi lời cảm ơn chân thành tới PGS. TS. Quyền Huy Ánh, PGS. TS. Trương Việt Anh, TS. Nguyễn Phan Thanh, TS. Nguyễn Ngọc Âu và TS. Lê Trọng Nghĩa là những người thầy tận tâm đã hướng dẫn đồ án tốt nghiệp hệ đại học cũng như giảng dạy các môn trong chương trình tiến sĩ ở trường đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. Hồ Chí Minh.

Tôi cũng rất biết ơn các lãnh đạo gồm giám trưởng Bùi Mạnh Cường & Vũ Thế Cường, trưởng bộ phận Nguyễn Văn Huy & Dương Minh Bảo Phác, và tất cả đồng nghiệp ở tàu chứa và xử lý dầu FPSO (THAIBINH VN) cũng như 4 giàn khai thác dầu giếng (A, B, E và F) thuộc Liên doanh Điều hành Cửu Long (Lô dầu khí 15-1) cho sự hỗ trợ và tạo điều kiện tốt nhất cho tôi hoàn thành chương trình học.

Tôi xin gửi lời cảm ơn tới những người bạn Lê Minh Mẫn, Đồng Lưu Đức Tôn, Nguyễn Công Chính và Trần Văn Luân cho sự ủng hộ và giúp đỡ tôi.

Tôi cũng xin gửi lời biết ơn sâu sắc tới Quỹ đổi mới sáng tạo (VINIF), Viện nghiên cứu dữ liệu lớn (VNCDLL) đã tài trợ học bổng đào tạo tiến sĩ trong nước năm 2023, mã số học bổng VINIF.2023.TS.106.

# ABSTRACT

This thesis develops a novel algorithm called Modified Coyote Optimization Algorithm (MCOA) to solve the optimization problem of the installation of distributed generation sources (DGs) in distribution systems. MCOA is a modified version of the original COA algorithm that has better performance and stability. To demonstrate the outstanding performance of the proposed algorithm, MCOA is applied to determine the solution of location and installation capacity for DGs in various system types to maximize economic benefits while still meeting technical criteria. The types of distribution systems implemented in this study:

- Balanced three-phase distribution system: The system has the same power of loads in each phase of the three phases.
- Unbalanced three-phase distribution system: The system has different power of loads in each phase and the number of phases in the system can also different.

Three typical problems are applied in the study. At the first problem, MCOA is developed to determine the suitable location and sizing of wind power sources (WFs), solar power sources (PFs), capacitor bank (CB) and battery energy storage system (BESS). The study is implemented in the balanced distribution system considering the time variation of generation and load demand. The optimal solution from the MCOA is compared with the optimal solution from other compared algorithms to evaluate the performance of the proposed algorithm. At the second problem, MCOA is applied to find the suitable installation of WFs and PFs in the unbalanced three-phase distribution system with small-scale. At the third problem, MCOA is used to find the optimal placement and sizing of WFs, PFs and BESS in the large-scale unbalanced three-phase distribution system with many existing devices on the grid. The research in the second and third problems used Beta and Rayleigh probability distribution functions to simulate the distribution of solar radiation and wind speed, thereby calculating the predicted power output for photovoltaic modules and wind turbines, respectively. Besides, the research also proposed the application of co-simulation between two open source software,

OpenDSS and MATLAB, to solve optimization problems quickly and conveniently through COM.

The research purpose of the above problems is to minimize the total cost, including three different costs:

- Investment, operation and maintenance costs of grid-connected distributed generation sources such as WFs, PFs, CB and BESS;
- Cost for generating electricity from the main grid to supply the load demand;
- Emission cost from conventional power plants using fossil fuels.

Through comparison, the simulation results have shown that the optimal solution from the proposed algorithm can bring about better savings in total system operating cost compared to the original system case with the level reaching up to 22.44% for the first problem, 10.70% for the second problem and 14.33% for the third problem. In addition to economic benefits, the found solution also meets the technical criteria. The constraints on node voltage, branch current, harmonics and the limit of penetration of generators in the system are also satisfied in this thesis.

The obtained results in the thesis have demonstrated the great economic and technical benefits in determining the appropriate location and sizing of distributed generation sources in distribution systems. Moreover, the proposed method (MCOA) also shows its superiority in terms of efficiency and stability in solving optimization problems compared to the original algorithm and other algorithms.

# TÓM TẮT

Luận án phát triển một thuật toán mới gọi là Modified Coyote Optimization Algorithm (MCOA) để giải quyết vấn đề tối ưu về sự lắp đặt của các nguồn phát năng lượng phân tán (DGs) trong các hệ thống phân phối. MCOA là phiên bản cải tiến từ thuật toán gốc COA mà có hiệu suất và độ ổn định tốt hơn. Để chứng minh hiệu suất nổi bật của thuật toán đề xuất, MCOA được áp dụng để xác định nghiệm về vị trí và công suất lắp đặt cho các DGs trong đa dạng các loại hệ thống khác nhau nhằm tối đa lợi ích kinh tế mà vẫn đáp ứng các tiêu chí kỹ thuật. Các loại hệ thống phân phối được thực hiện trong nghiên cứu này gồm:

- Hệ thống phân phối ba pha cân bằng: Hệ thống có công suất các tải ở mỗi pha trong ba pha giống nhau.
- Hệ thống phân phối ba pha không cân bằng: Hệ thống có công suất các tải ở mỗi pha khác nhau và số lượng pha trong hệ thống cũng khác nhau.

Ba bài toán điển hình được áp dụng trong nghiên cứu gồm: Bài toán thứ nhất là nghiên cứu áp dụng MCOA để xác định vị trí và công suất lắp đặt phù hợp của nguồn phát điện năng lượng gió (WFs), nguồn phát điện năng lượng mặt trời (PFs), tụ bù (CB) và hệ thống lưu trữ năng lượng pin (BESS). Nghiên cứu được triển khai trong hệ thống phân phối cân bằng có xét đến đến sự thay đổi theo thời gian của nguồn phát và nhu cầu tải. Nghiệm tối ưu từ thuật toán MCOA được so sánh với nghiệm tối ưu từ các thuật toán khác cho việc đánh giá khách quan hiệu suất của thuật toán đề xuất. Bài toán tiếp theo là ứng dụng MCOA để xác định sự lắp đặt phù hợp cho WFs và PFs trong hệ thống phân phối ba pha không cân bằng quy mô nhỏ. Bài toán cuối cùng là áp dụng thuật toán này để tìm kiếm vị trí và công suất lắp đặt tối ưu cho WFs, PFs và BESS trong hệ thống phân phối ba pha không cân bằng quy mô lớn, phức tạp với nhiều thiết bị đã tồn tại trên lưới. Nghiên cứu trong bài toán thứ hai và thứ ba đã sử dụng hàm phân bố xác suất Beta và Rayleigh để mô phỏng sự phân bố bức xạ mặt trời và tốc độ gió, từ đó tính toán dự đoán công suất phát cho mô-đun quang điện và tua-bin gió tương ứng. Thêm vào đó, nghiên cứu cũng đề xuất ứng dụng sự phối hợp mô phỏng giữa hai phần mềm nguồn mở là OpenDSS và MATLAB thông qua cổng COM để giải quyết các vấn đề tối ưu một cách nhanh chóng và thuận tiện.

Mục đích nghiên cứu của các bài toán trên là giảm thiểu tổng chi phí, gồm ba chi phí khác nhau:

- Chi phí đầu tư, vận hành và bảo trì các nguồn phát phân tán nối lưới cho WFs, PFs, CB và BESS;
- Chi phí cho việc phát điện từ lưới chính để cung cấp cho nhu cầu phụ tải;
- Chi phí phát thải từ nhà máy điện truyền thống sử dụng nhiên liệu hóa thạch.

Thông qua sự so sánh, kết quả mô phỏng đã cho thấy giải pháp tối ưu từ thuật toán đề xuất có thể mang lại hiệu quả tiết kiệm về tổng chi phí vận hành hệ thống tốt hơn so với trường hợp hệ thống ban đầu với mức đạt lên tới 22,44% cho bài toán thứ nhất, 10,70% cho bài toán thứ hai và 14,33% cho bài toán thứ ba. Bên cạnh phúc lợi về kinh tế thì giải pháp tìm ra cũng đáp ứng các tiêu chí kỹ thuật. Các ràng buộc về điện áp nút, dòng điện nhánh, sóng hài và giới hạn thâm nhập các nguồn phát trong hệ thống cũng được thỏa mãn trong luận án này.

Các kết quả đạt được trong luận án đã chứng minh điểm mạnh to lớn về kinh tế lẫn kỹ thuật nhờ việc xác định vị trí và công suất lắp đặt phù hợp của các nguồn phát phân tán trong các hệ thống phân phối. Ngoài ra, phương pháp đề xuất (MCOA) còn cho thấy tính ưu việt về mức độ hiệu quả và tính ổn định trong việc giải các bài toán tối ưu so với thuật toán gốc và các thuật toán so sánh khác.

# NỘI DUNG

LÝ LỊCH CÁ NHÂN.....	i
LỜI CAM ĐOAN.....	ii
LỜI CẢM ƠN.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TÓM TẮT.....	vi
NỘI DUNG.....	viii
DANH SÁCH CHỮ VIẾT TẮT.....	xi
DANH SÁCH HÌNH.....	xiii
DANH SÁCH BẢNG.....	xv
DANH SÁCH KÝ HIỆU.....	xvi
CHƯƠNG 1: GIỚI THIỆU.....	1
1.1 Đặt vấn đề.....	1
1.2 Các bài toán nghiên cứu.....	2
1.3 Mục tiêu của nghiên cứu.....	3
1.3.1 Mục tiêu liên quan đến hệ thống phân phối điện.....	4
1.3.2 Mục tiêu liên quan đến phương pháp đề xuất.....	5
1.4 Phạm vi và giới hạn của nghiên cứu.....	5
1.5 Hướng tiếp cận và phương pháp nghiên cứu.....	7
1.6 Điểm mới và đóng góp của luận án.....	8
1.7 Cấu trúc của luận án.....	9
CHƯƠNG 2: TỔNG QUAN VÀ THUẬT TOÁN ĐỀ XUẤT.....	10
2.1 Giới thiệu tổng quan bài toán nghiên cứu.....	10
2.2 Các nghiên cứu ngoài nước.....	11
2.3 Các nghiên cứu nổi bật trong nước.....	18
2.4 Các đóng góp và thiếu sót còn tồn tại của nghiên cứu trước.....	19
2.4.1 Các đóng góp của các nghiên cứu trước đây.....	19
2.4.2 Thiếu sót còn tồn tại của các nghiên cứu trước đây.....	20
2.5 Giới thiệu thuật toán đề xuất.....	21
2.6 Coyote Optimization Algorithm.....	22
2.7 Modified Coyote Optimization Algorithm.....	26

2.7.1	Sự cải tiến trong công thức khởi tạo nghiệm mới thứ nhất .....	28
2.7.2	Sự cải tiến trong công thức khởi tạo nghiệm mới thứ hai .....	28
2.8	Tổng kết .....	31
<b>CHƯƠNG 3: ÁP DỤNG THUẬT TOÁN TỐI ƯU XÁC ĐỊNH VỊ TRÍ VÀ CÔNG SUẤT LẮP ĐẶT CHO CÁC NGUỒN PHÁT PHÂN TÁN TRONG HỆ THỐNG PHÂN PHỐI BA PHA CÂN BẰNG .....</b>		<b>32</b>
3.1	Giới thiệu .....	32
3.2	Mô tả bài toán .....	32
3.2.1	Hệ thống phân phối ba pha cân bằng.....	33
3.2.2	Phương pháp Backward/ Forward (BW/FW).....	34
3.2.3	Hàm mục tiêu.....	36
3.2.4	Các ràng buộc cho hàm mục tiêu.....	37
3.3	Áp dụng phương pháp đề xuất để giải quyết vấn đề tối ưu .....	41
3.3.1	Khởi tạo nghiệm ban đầu.....	41
3.3.2	Hiệu chỉnh sự vi phạm cho các nghiệm mới tạo ra .....	42
3.3.3	Lưu giữ các nghiệm tốt .....	42
3.3.4	Lưu đồ giải thuật cho việc áp dụng MCOA tìm kiếm nghiệm tối ưu .....	43
3.4	Kết quả mô phỏng.....	45
3.4.1	Hệ thống phân phối chuẩn IEEE 69 nút và dữ liệu mô phỏng .....	45
3.4.2	Phân tích kết quả mô phỏng .....	47
3.5	Tổng kết .....	56
<b>CHƯƠNG 4: ÁP DỤNG THUẬT TOÁN TỐI ƯU XÁC ĐỊNH VỊ TRÍ VÀ CÔNG SUẤT LẮP ĐẶT CHO CÁC NGUỒN PHÁT PHÂN TÁN TRONG HỆ THỐNG PHÂN PHỐI BA PHA KHÔNG CÂN BẰNG .....</b>		<b>59</b>
4.1	Giới thiệu .....	59
4.1.1	Mô phỏng tính bất định .....	59
4.1.2	Hệ thống phân phối ba pha không cân bằng.....	62
4.1.3	Sự phối hợp mô phỏng giữa MATLAB và OpenDSS.....	63
4.2	Mô tả bài toán thứ nhất .....	69
4.2.1	Hàm mục tiêu.....	70
4.2.2	Các ràng buộc cho hàm mục tiêu.....	71
4.2.3	Áp dụng phương pháp đề xuất giải quyết vấn đề tối ưu.....	73

4.2.4	Kết quả mô phỏng.....	77
4.2.5	Tổng kết bài toán thứ nhất.....	87
4.3	Mô tả bài toán thứ hai.....	89
4.3.1	Hàm mục tiêu.....	90
4.3.2	Các ràng buộc cho hàm mục tiêu.....	91
4.3.3	Áp dụng thuật toán đề xuất giải quyết vấn đề tối ưu đang xem xét ...	93
4.3.4	Kết quả mô phỏng.....	96
4.3.5	Tổng kết bài toán thứ hai.....	106
CHƯƠNG 5: KẾT LUẬN VÀ ĐỊNH HƯỚNG NGHIÊN CỨU TƯƠNG LAI..		108
5.1	Đóng góp chính của luận án.....	108
5.1.1	Bài toán cho hệ thống cân bằng.....	108
5.1.2	Bài toán cho hệ thống không cân bằng.....	108
5.2	Hạn chế chính của luận án.....	110
5.2.1	Bài toán cho hệ thống cân bằng.....	110
5.2.2	Bài toán thứ nhất cho hệ thống không cân bằng.....	111
5.2.3	Bài toán thứ hai cho hệ thống không cân bằng.....	112
5.3	Hướng phát triển.....	113
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....		115
CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ.....		125
PHỤ LỤC.....		126

# DANH SÁCH CHỮ VIẾT TẮT

ABC	Artificial Bee Colony Algorithm
ACO	Ant Colony Optimization Algorithm
AEO	Artificial Ecosystem Optimization
BBO	Biogeographic Based Optimization Algorithm
BESS	Hệ thống lưu trữ năng lượng bằng pin
BW/FW	Backward/Forward method
CB	Tụ bù công suất phản kháng
COA	Coyote Optimization Algorithm
COA	Coyote Optimization Algorithm
CSA	Cuckoo Search Algorithm
DAM	Direct Approach Method
DGs	Các nguồn phát phân tán
EO	Equilibrium Optimizer
GA	Genetic Algorithm
GJO	Golden Jackal Optimization
GWOCs	Grey Wolf Optimization và Cuckoo Search Algorithm
HHO	Harris Hawks Optimizer
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IHD	Độ méo hài riêng lẻ
IPSO	Improved Particle Swarm Optimization
MCOA	Modified Coyote Optimization Algorithm
NGO	Northern Goshawk Optimization
O&M	Vận hành và bảo trì
OOA	Osprey Optimization Algorithm
PFs	Các nguồn phát phân tán năng lượng mặt trời
PSO	Particle Swarm Optimization
RRA	Runner Root Algorithm
SALFJA	Self- Adaptive Lévy Flight Jaya Algorithm
SFO	Sunflower Optimization Algorithm
SFSA	Stochastic Fractal Search Algorithm

SGRSO	Success Rate Group Search Algorithm
SMA	Slime Mould Algorithm
SSA	Salp Swarm Algorithm
THD	Tổng độ méo hài
WFs	Các nguồn phát phân tán năng lượng gió
WOA	Whale Optimization Algorithm

# DANH SÁCH HÌNH

<b>Hình 2.1:</b> Minh họa hành vi loài chó sói.....	23
<b>Hình 2.2:</b> Lưu đồ ứng dụng COA để giải quyết bài toán tối ưu.....	27
<b>Hình 2.3:</b> Lưu đồ ứng dụng MCOA để xác định nghiệm cho bài toán tối ưu. ....	30
<b>Hình 3.1:</b> Hệ thống phân phối tích hợp các nguồn phát phân tán. ....	33
<b>Hình 3.2:</b> Đường dây phân phối ba pha cân bằng. ....	33
<b>Hình 3.3:</b> Hệ thống hình tia hai nút. ....	34
<b>Hình 3.4:</b> Lưu đồ áp dụng phương pháp BW/FW.....	35
<b>Hình 3.5:</b> Lưu đồ ứng dụng MCOA cho bài toán Chương 3. ....	44
<b>Hình 3.6:</b> Hệ số công suất của mô-đun quang điện, tua-bin gió và tải. ....	46
<b>Hình 3.7:</b> Hệ thống phân phối chuẩn IEEE 69 nút.....	47
<b>Hình 3.8:</b> Đặc tính hội tụ của các phương pháp thực thi.....	51
<b>Hình 3.9:</b> Công suất tiêu thụ và công suất phát năng lượng tái tạo. ....	51
<b>Hình 3.10:</b> Các giai đoạn nạp và xả công suất của BESS. ....	52
<b>Hình 3.11:</b> Dung lượng lưu trữ theo thời gian của BESS. ....	53
<b>Hình 3.12:</b> Sự phát công suất phản kháng của tụ bù. ....	53
<b>Hình 3.13:</b> Tổn thất công suất trước và sau khi có sự tích hợp các nguồn phát. ....	54
<b>Hình 3.14:</b> Điện áp nút trước khi tích hợp các nguồn phát phân tán. ....	55
<b>Hình 3.15:</b> Điện áp nút sau khi tích hợp các nguồn phát phân tán.....	55
<b>Hình 3.16:</b> Giá trị lớn nhất của THD và IHD trước và sau khi tích hợp.....	56
<b>Hình 4.1:</b> Đường dây hệ thống phân phối. ....	63
<b>Hình 4.2:</b> Cấu trúc của OpenDSS.....	64
<b>Hình 4.3:</b> Mô hình đường dây 3-pha với dây trung tính. ....	65
<b>Hình 4.4:</b> Mô hình tương đương đường dây 3-pha sau áp dụng Kron Reduction. ..	66
<b>Hình 4.5:</b> Lưu đồ áp dụng phương pháp DAM trong OpenDSS. ....	67
<b>Hình 4.6:</b> Nguyên lý cơ bản sự phối hợp mô phỏng giữa MATLAB và OpenDSS. 68	
<b>Hình 4.7:</b> Mô hình hệ thống phân phối tích hợp nguồn phát năng lượng tái tạo. ....	70
<b>Hình 4.8:</b> Sự phối hợp mô phỏng giữa MATLAB và OpenDSS thông qua COM. ..	75
<b>Hình 4.9:</b> Ứng dụng MCOA cho bài toán thứ nhất của Chương 4. ....	76
<b>Hình 4.10:</b> Sơ đồ đơn tuyến hệ thống phân phối chuẩn IEEE 25 nút. ....	77
<b>Hình 4.11:</b> Khu vực khảo sát thực hiện nghiên cứu (Can Gio, Vietnam). ....	78

<b>Hình 4.12:</b> Hệ số công suất của các nguồn phát và nhu cầu tải. ....	79
<b>Hình 4.13:</b> Giá trị tốt nhất và giá trị trung bình hàm mục tiêu trong các lần chạy. .	81
<b>Hình 4.14:</b> Tổng công suất tiêu thụ và công suất phát theo thời gian. ....	83
<b>Hình 4.15:</b> Tổng tổn thất công suất trước và sau khi tích hợp PFs và WFs. ....	84
<b>Hình 4.16:</b> Điện áp pha lớn nhất và bé nhất trước và sau kết nối PFs và WFs. ....	85
<b>Hình 4.17:</b> Điện áp pha trung bình trước khi có sự kết nối PFs và WFs. ....	85
<b>Hình 4.18:</b> Điện áp pha trung bình sau khi có sự kết nối PFs và WFs. ....	86
<b>Hình 4.19:</b> Giá trị lớn nhất THD trước và sau kết nối PFs và WFs. ....	87
<b>Hình 4.20:</b> Độ lệch điện áp không cân bằng lớn nhất trước và sau kết nối PFs và WFs. ....	87
<b>Hình 4.21:</b> Hệ thống phân phối tích hợp các nguồn phát năng lượng tái tạo và hệ thống lưu trữ. ....	90
<b>Hình 4.22:</b> Lưu đồ ứng dụng MCOA cho bài toán thứ hai của Chương 4. ....	96
<b>Hình 4.23:</b> Sơ đồ đơn tuyến hệ thống phân phối chuẩn IEEE 123 nút. ....	97
<b>Hình 4.24:</b> Khu vực khảo sát thực hiện nghiên cứu (Scotland). ....	99
<b>Hình 4.25:</b> Hệ số công suất của WF, PFs và nhu cầu tải. ....	100
<b>Hình 4.26:</b> Công suất phát của WF, PFs và BESS từ nghiệm của MCOA ....	102
<b>Hình 4.27:</b> Quá trình lưu trữ năng lượng của BESS ....	104
<b>Hình 4.28:</b> Quá trình nạp và xả năng lượng của BESS. ....	104
<b>Hình 4.29:</b> Tổn thất công suất trước và sau kết nối PFs, WF và BESS. ....	105
<b>Hình 4.30:</b> Điện áp pha thấp nhất và cao nhất trước và sau kết nối PFs, WF và BESS. ....	105
<b>Hình 4.31:</b> Giá trị lớn nhất THD trước và sau kết nối PFs, WF và BESS. ....	106

## DANH SÁCH BẢNG

<b>Bảng 3.1:</b> Thông tin các thông số liên quan đến việc tính toán hàm tổng chi phí. ..	45
<b>Bảng 3.2:</b> Phổ hài tải phi tuyến. ....	47
<b>Bảng 3.3:</b> So sánh các giá trị của hàm đánh giá và thời gian chạy trung bình của các phương pháp thực thi. ....	47
<b>Bảng 3.4:</b> Kết quả tốt nhất của các phương pháp trong hệ thống IEEE 69 nút.....	48
<b>Bảng 3.5:</b> So sánh các chi phí liên quan đến tổng chi phí hệ thống tích hợp trong thời gian 20 năm chu kỳ dự án.....	48
<b>Bảng 4.1:</b> Phổ hài của tải phi tuyến và các biến tần nguồn phát năng lượng tái tạo.	79
<b>Bảng 4.2:</b> Kết quả tốt nhất của các phương pháp trong hệ thống IEEE 25 nút.....	81
<b>Bảng 4.3:</b> Kết quả tốt nhất của các phương pháp trong hệ thống IEEE 123 nút....	100
<b>Bảng 4.4:</b> Sự so sánh các chi phí liên quan trong 20 năm chu kỳ dự án.....	101
<b>Bảng A3.1:</b> Dữ liệu hệ số công suất của tải, mô-đun quang điện và tua-bin gió..	126
<b>Bảng A3.2:</b> Dữ liệu hệ thống phân phối chuẩn IEEE 69 nút. ....	127
<b>Bảng A4.1:</b> Dữ liệu tải của hệ thống phân phối chuẩn IEEE 25 nút.....	129
<b>Bảng A4.2:</b> Thông số cấu hình đường dây hệ thống phân phối IEEE 25 nút. ....	130
<b>Bảng A4.3:</b> Thông số của mô-đun quang điện .....	130
<b>Bảng A4.4:</b> Thông số của tua-bin gió.....	131
<b>Bảng A4.5:</b> Dữ liệu mô phỏng hệ số công suất tua-bin gió cho hệ thống phân phối IEEE 25 nút.....	131
<b>Bảng A4.6:</b> Dữ liệu mô phỏng hệ số công suất cho mô-đun quang điện của hệ thống phân phối IEEE 25 nút.....	133
<b>Bảng A4.7:</b> Dữ liệu mô phỏng hệ số tải cho hệ thống IEEE 25 nút.....	134
<b>Bảng A4.8:</b> Dữ liệu mô phỏng hệ số công suất mô-đun quang điện cho hệ thống IEEE 123 nút.....	136
<b>Bảng A4.9:</b> Dữ liệu mô phỏng hệ số công suất tua-bin gió của IEEE 123 nút.....	137
<b>Bảng A4.10:</b> Dữ liệu hệ số tải IEEE RTS-96 cho hệ thống IEEE 123 nút. ....	138
<b>Bảng A4.11:</b> Dữ liệu khóa mở của hệ thống phân phối IEEE 123 nút. ....	139
<b>Bảng A4.12:</b> Dữ liệu tụ bù công suất phản kháng của hệ thống IEEE 123 nút. ....	139
<b>Bảng A4.13:</b> Dữ liệu tải cho hệ thống phân phối chuẩn IEEE 123 nút.....	140
<b>Bảng A4.14:</b> Dữ liệu đường dây của hệ thống phân phối chuẩn IEEE 123 nút.....	143
<b>Bảng A4.15:</b> Cấu hình đường dây của hệ thống phân phối IEEE 123 nút.....	146

# DANH SÁCH KÝ HIỆU

$N_{po}, N_{pk}, N_{ce}$	Dân số, số nhóm và số con sói trong mỗi nhóm
$rd, rd_1, rd_2, rd_3, rd_4, rd_5$	Số được phát ra ngẫu nhiên trong giới hạn từ 0 đến 1
$S_{bestPk,pk}, S_{cent,pk}$	Nghiệm tốt nhất và nghiệm trung tâm của nhóm thứ $pk$
$S_{bestPop}$	Nghiệm tốt nhất trong dân số hiện tại
$S_{rd1,pk}, S_{rd2,pk}$	Các nghiệm được lấy ngẫu nhiên từ nhóm thứ $pk$
$S_{pk,ce}, S_{pk,ce}^{New}$	Nghiệm hiện tại và nghiệm mới thứ $ce$ ở nhóm thứ $pk$
$SF_{pk,ce}, SF_{pk,ce}^{New}$	Giá trị đánh giá cho nghiệm hiện tại và nghiệm mới thứ $ce$ trong nhóm thứ $pk$
$N_C, N_M$	Số cặp nghiệm gần và tổng số cặp nghiệm
$C_{PF}^{Cap}, C_{WF}^{Cap}, C_{BESS}^{Cap}, C_{BESS}^{Aux}$	Chi phí vốn của PFs (\$/MW), WFs (\$/MW), BESS (\$/MWh) và các thành phần phụ trợ (\$/MW)
$C_{PF}^{O\&M}, C_{WF}^{O\&M}, C_{BESS}^{O\&M}$	Chi phí bảo trì và vận hành (O&M) cho PFs và WFs (\$/MWh), và BESS (\$/MWyear).
$P_{PF,j}^{Rated}, P_{WF,i}^{Rated}, P_{BESS,k}^{Rated}$	Công suất danh định PF thứ $j$ , WF thứ $i$ và BESS thứ $k$
$E_{BESS,k}^{rated}$	Dung lượng danh định của BESS thứ $k$
$LOC_{CB,c}, Q_{CB,c}^{rated}$	Vị trí lắp và công suất danh định của tụ bù thứ $c$
$N_{PF}, N_{WF}, N_{BESS}, N_{CB}$	Số lượng PFs, WFs, BESS và CB cho việc lắp đặt
$P_{h,y}^{Grid}$	Giá điện cho việc cung cấp điện từ lưới điện chính ở giờ thứ $h$ và năm thứ $y$
$N_d, N_b, N_s$	Số lượng tải, nhánh và nút
$P_{PF,j,h,y}, P_{WF,i,h,y}$	Công suất tác dụng phát ra thực tế của PF thứ $j$ và WF thứ $i$ ở giờ thứ $h$ và năm thứ $y$
$P_{BESS,k,h,y}^{DisCh}, P_{BESS,k,h,y}^{Ch}$	Công suất tác dụng phát ra và tiêu thụ của BESS thứ $k$ ở giờ thứ $h$ và năm thứ $y$
$P_{Sub,h,y}, Q_{Sub,h,y}$	Công suất tác dụng và công suất phản kháng được cung cấp bởi lưới điện chính ở giờ thứ $h$ và năm thứ $y$

$P_{d,h,y}, Q_{d,h,y}$	Công suất tác dụng và phản kháng của tải thứ $d$ , giờ thứ $h$ và năm thứ $y$
$P_{b,h,y}, Q_{b,h,y}$	Tồn thất công suất tác dụng và công suất phản kháng của nhánh thứ $b$ , giờ thứ $h$ và năm thứ $y$
$Q_{CB,c,h,y}$	Công suất phản kháng phát ra của tụ thứ $c$ , giờ thứ $h$ và năm thứ $y$
$Q_{PF,j,h,y}, Q_{WF,i,h,y}$	Công suất phản kháng phát ra của PF thứ $j$ và WF thứ $i$ trong giờ thứ $h$ và năm thứ $y$
$Pf_{PF,j}, Pf_{WF,j}$	Hệ số công suất vận hành của PF thứ $j$ và WF thứ $i$
$V^{Max}, V^{Min}$	Điện áp cao nhất và thấp nhất cho phép
$V_{s,h,y}$	Điện áp ở nút thứ $s$ , giờ thứ $h$ và năm thứ $y$
$N_h, N_y$	Số giờ và số năm xem xét trong nghiên cứu
$I_{b,h,y}^{Max}, I_{b,h,y}$	Dòng điện cho phép lớn nhất và dòng điện ở nhánh thứ $b$ , giờ thứ $h$ và năm thứ $y$
$THD^{Max}, IHD^{Max}$	Giá trị THD và IHD lớn nhất cho phép
$THD_{s,h,y}$	Giá trị THD ở nút thứ $s$ , giờ thứ $h$ và năm thứ $y$
$IHD_{s,h,y}^o$	Giá trị IHD bậc thứ $o$ , nút thứ $s$ , pha $p$ , giờ thứ $h$ , năm $y$
$H_r$	Bậc hài lớn nhất xem xét
$V_{s,h,y}^1$	Điện áp ở bậc thứ nhất của nút thứ $s$ , giờ thứ $h$ , năm $y$
$V_{s,h,y,o}$	Điện áp ở bậc thứ $o$ của nút thứ $s$ , giờ thứ $h$ , năm $y$
$P_{WF}^{Min}, P_{WF}^{Max}$	Công suất tác dụng nhỏ nhất và lớn nhất của WFs
$P_{PF}^{Min}, P_{PF}^{Max}$	Công suất tác dụng nhỏ nhất và lớn nhất của PFs
$Q_{CB}^{Min}, Q_{CB}^{Max}$	Công suất phản kháng nhỏ nhất và lớn nhất của CB
$L_i^{Min}, L_i^{Max}$	Giới hạn vị trí nhỏ nhất và lớn nhất cho WF thứ $i$
$P_i^{Min}, P_i^{Max}$	Giới hạn công suất nhỏ nhất và lớn nhất cho WF thứ $i$
$L_j^{Min}, L_j^{Max}$	Giới hạn vị trí nhỏ nhất và lớn nhất cho PF thứ $j$
$P_j^{Min}, P_j^{Max}$	Giới hạn công suất nhỏ nhất và lớn nhất cho PF thứ $j$
$L_{BESS,k}^{Min}, L_{BESS,k}^{Max}$	Giới hạn vị trí nhỏ nhất và lớn nhất cho BESS thứ $k$

$P_{BESS,k,h}^{Min}, P_{BESS,k,h}^{Max}$	Giới hạn công suất xả ( nạp) nhỏ nhất và lớn nhất cho BESS thứ $k$ ở giờ thứ $h$
$L_c^{Min}, L_c^{Max}$	Giới hạn vị trí nhỏ nhất và lớn nhất cho CB thứ $c$
$SF_{pk,ce}, TC_{Total,pk,ce}$	Giá trị đánh giá và giá trị mục tiêu của nghiệm thứ $ce$ thuộc nhóm thứ $pk$
$\Delta V_{s,pk,ce}$	Lượng phạt vi phạm cho điện áp ở nút thứ $s$ của nghiệm thứ $ce$ trong nhóm thứ $pk$
$\Delta I_{b,pk,ce}$	Lượng phạt vi phạm cho dòng điện ở nhánh thứ $b$ của nghiệm thứ $ce$ trong nhóm thứ $pk$
$\Delta IHD_{s,pk,ce}, \Delta THD_{s,pk,ce}$	Lượng phạt vi phạm cho IHD và THD ở nút thứ $s$ của nghiệm thứ $ce$ trong nhóm thứ $pk$
$\sigma_V, \sigma_I, \sigma_{THD}, \sigma_{IHD}$	Hằng số phạt cho điện áp nút, dòng nhánh, THD và IHD
$R_v^{Min}, R_v^{Max}$	Giới hạn cho phép nhỏ nhất và lớn nhất của biến điều khiển thứ $v$ trong mỗi nghiệm
$N_{var}$	Số lượng biến điều khiển trong mỗi nghiệm
$It, It^{Max}$	Số vòng lặp hiện tại và số vòng lặp lớn nhất
$TC_{Inv}, TC_{OM}$	Tổng chi phí vốn và tổng chi phí vận hành & bảo trì
$TC_{Grid}, TC_{Emis}$	Tổng chi phí cho việc phát điện lưới chính và tổng chi phí phát thải từ các nhà máy điện truyền thống
$Pr_{Emis}, G_{Emis}$	Giá phát thải (\$/kg) và lượng phát thải từ nhà máy điện truyền thống (kg/MWh)
$P_{b,h,y}^{Aft}, Q_{b,h,y}^{Aft}$	Tổn thất công suất tác dụng và phản kháng ở nhánh $b$ , giờ thứ $h$ và năm thứ $y$ sau kết nối các nguồn phát phân tán
$P_{b,h,y}^{Bef}, Q_{b,h,y}^{Bef}$	Tổn thất công suất tác dụng và phản kháng ở nhánh $b$ , giờ thứ $h$ và năm thứ $y$ trước kết nối các nguồn phát phân tán

# CHƯƠNG 1: GIỚI THIỆU

## 1.1 Đặt vấn đề

Sự phát triển không ngừng của các công nghệ chuyển đổi năng lượng khác nhau bên cạnh cuộc khủng hoảng năng lượng, đã tạo ra nhiều đột phá lớn trong việc kết nối các nguồn phát điện phân tán (DGs) trong hệ thống phân phối nhằm góp phần giảm thiểu sự phụ thuộc vào các nguồn năng lượng tập trung truyền thống như nhà máy thủy điện, nhiệt điện, ... Các nhà máy điện truyền thống thường có quy mô lớn, ở xa nơi tiêu thụ và việc vận hành có tác động xấu đến môi trường. Trong đó, quá trình truyền tải và phân phối điện đến phụ tải gây tổn thất công suất rất lớn cũng như ảnh hưởng nghiêm trọng đến chất lượng điện năng. Vì vậy, việc kết nối các nguồn phát điện phân tán, đặc biệt là các nguồn năng lượng tái tạo như năng lượng mặt trời, năng lượng gió, năng lượng địa nhiệt, năng lượng sinh khối... vào hệ thống phân phối được coi như là giải pháp tuyệt vời để khắc phục các vấn đề tồn tại nêu trên. Nhiều nghiên cứu đã cho thấy rằng việc tích hợp các DGs có thể mang lại nhiều lợi ích về kinh tế, kỹ thuật và môi trường. Việc xác định sự lắp đặt thích hợp các DGs trong hệ thống đã chứng minh việc giảm thiểu đáng kể tổn thất điện năng trên các nhánh phân phối, nâng cao độ tin cậy của hệ thống điện, giảm thiểu ô nhiễm môi trường và tiết kiệm chi phí trong vận hành hệ thống. Ngược lại, việc kết nối không phù hợp các DGs có thể gây ra nhiều vấn đề không mong muốn do thay đổi cấu trúc của lưới điện như quá điện áp, tăng tổn thất, giảm chất lượng điện năng, và mức độ ảnh hưởng phụ thuộc chính vào vị trí cũng như quy mô của các DGs được tích hợp. Do đó, việc xác định kế hoạch kết nối các DGs trong hệ thống phân phối là vô cùng cần thiết để tối đa hóa lợi ích thu được và tránh những tác động tiêu cực đến hệ thống điện hiện hữu.

Mặt khác, xu hướng chung của thế giới là giảm thiểu việc sử dụng năng lượng hóa thạch vì nhiều lý do như trữ lượng giảm sút mạnh, giá cả biến động và tác động tiêu cực đến môi trường. Vì vậy, các nước trên thế giới luôn có những chính sách để khuyến khích việc sử dụng các nguồn phát điện phân tán năng lượng tái tạo để nối lưới nhằm hạn chế sự phụ thuộc vào năng lượng hóa thạch. Như đã đề cập, lợi ích đạt được bao nhiêu còn phụ thuộc vào chất lượng của giải pháp lắp đặt các DGs trong hệ thống phân phối. Do đó, để tối đa phúc lợi kinh tế đồng thời đáp ứng các ràng buộc kỹ thuật,

nhiều nhà nghiên cứu đã phát triển các phương pháp khác nhau như mạng nơ-ron, điều khiển logic mờ, deterministic algorithms và meta-heuristic algorithms cho việc giải quyết các bài toán tối ưu hóa. Đặc biệt, nhóm meta-heuristic algorithms thu hút sự quan tâm mạnh mẽ của các nhà nghiên cứu vì tính ưu việt của nó so với các thuật toán khác trong việc tìm kiếm nghiệm tối ưu toàn cục. Tuy nhiên, nhóm này vẫn còn tồn tại những nhược điểm mà có thể ảnh hưởng đến hiệu suất cũng như độ ổn định của thuật toán, đặc biệt trong việc giải quyết các bài toán tối ưu phức tạp với vùng tìm kiếm rộng lớn và có nhiều ràng buộc. Vì vậy, việc phát triển các thuật toán mới mà có thể khắc phục được những thiếu sót của các thuật toán trước đó thì luôn được khuyến khích.

## 1.2 Các bài toán nghiên cứu

Việc tìm kiếm nghiệm tối ưu cho việc kết nối các DGs vào hệ thống phân phối nhằm giảm thiểu tối đa tổn thất điện năng và cải thiện điện áp đã nhận được nhiều sự quan tâm trong hầu hết các nghiên cứu trước đây. Tuy nhiên, vấn đề kinh tế là quan trọng nhất nhưng vẫn chưa có nhiều sự xem xét đầy đủ. Một cách thực tế, các chủ đầu tư luôn mong muốn xây dựng được một hệ thống hiệu quả với chi phí thấp nhất mà vẫn đáp ứng được các tiêu chí kỹ thuật. Bên cạnh đó, vấn đề giảm thiểu tổng chi phí trong vận hành hệ thống trước đây cũng chưa được đề cập nhiều. Ngoài ra, công suất phát của các nguồn năng lượng tái tạo như năng lượng mặt trời (PFs) và năng lượng gió (WFs) phụ thuộc chủ yếu vào điều kiện tự nhiên nên việc tính toán công suất ngõ ra cho các nguồn này cần dựa trên dự đoán bức xạ mặt trời và tốc độ gió thông qua việc sử dụng dữ liệu lịch sử đã ghi lại được. Không chỉ vậy, bên cạnh việc kết nối các nguồn phát điện phân tán như PFs và WF, cũng cần xem xét tích hợp tụ điện (CB) cho việc phát công suất phản kháng và hệ thống lưu trữ năng lượng (BESS) với các chiến lược nạp/ xả thích hợp vào lưới để tối đa lợi ích thu được.

Trong luận án này, ba bài toán quy hoạch cho sự kết nối tối ưu các DGs được giải quyết trong hai hệ thống phân phối khác nhau bao gồm:

- Bài toán trong hệ thống cân bằng: Áp dụng thuật toán đề xuất (MCOA) để tìm kiếm vị trí và công suất của PFs, WF, CB và BESS xem xét sự thay đổi theo thời gian của nguồn phát và nhu cầu tải dưới sự thâm nhập cao của các tải phi tuyến trong hệ thống phân phối cân bằng. Mục tiêu chính là giảm thiểu tổng chi phí gồm (1) chi phí đầu tư, (2) chi phí vận hành và bảo trì (O&M), và (3) chi

phí mua năng lượng từ lưới cho tải và tổn thất dưới các ràng buộc kỹ thuật về điện áp nút, dòng điện nhánh, nhiễu sóng hài và giới hạn thâm nhập các nguồn phát kết nối.

- Bài toán thứ nhất trong hệ thống không cân bằng: Áp dụng MCOA cho việc xác định vị trí và công suất lắp đặt của các nguồn phát điện phân tán gồm PFs và WFs có xét đến tính bất định của bức xạ mặt trời và tốc độ gió. Mục tiêu chính là giảm thiểu tổng chi phí trong việc đầu tư, vận hành cũng như là giảm khí thải từ các nhà máy truyền thống sử dụng nhiên liệu hóa thạch. Nghiên cứu được thực hiện trên hệ thống phân phối ba pha không cân bằng và dữ liệu về bức xạ mặt trời cũng như tốc độ gió được thu thập trong ba năm liên tiếp ở miền nam Việt Nam.
- Bài toán thứ hai trong hệ thống không cân bằng: Áp dụng MCOA xác định vị trí và công suất của PFs, WFs và BESS trong hệ thống phân phối ba pha không cân bằng phức tạp với nhiều thiết bị tồn tại sẵn trên lưới. Mục tiêu chính là giảm thiểu tổng chi phí đầu tư, O&M cho các nguồn phân tán và chi phí phát năng lượng từ lưới cho nhu cầu tải và chi phí phát thải từ các nhà máy điện truyền thống.

Ba bài toán trên được thực hiện trên hai loại hệ thống phân phối ba pha cân bằng và không cân bằng, xem xét sự thay đổi theo thời gian của nhu cầu tải và công suất ngõ ra của các nguồn phát phân tán. Nghiên cứu cũng đề cập đến sự nhiễu sóng hài từ các tải phi tuyến và từ các thiết bị chuyển đổi công suất của PFs, WFs và BESS. Bên cạnh đó, các ràng buộc cho các vấn đề trên cũng bao gồm điện áp nút, dòng điện nhánh, mức thâm nhập của các nguồn phát phân tán cũng như các giới hạn sóng hài để thỏa mãn các tiêu chuẩn như IEEE Std. 519 và IEEE Std. 45-2002. Thêm vào đó, nghiên cứu đã đề xuất việc sử dụng Open source Distribution System Simulator (OpenDSS) mà được công bố bởi Viện nghiên cứu năng lượng Mỹ (EPRI) cho việc giải quyết vấn đề trào lưu công suất ở các miền tần số một cách nhanh chóng. Luận án cũng áp dụng thành công sự phối hợp mô phỏng linh hoạt giữa hai phần mềm nguồn mở là OpenDSS và MATLAB cho việc giải quyết các vấn đề tối ưu một cách nhanh chóng và thuận tiện.

### **1.3 Mục tiêu của nghiên cứu**

Mục tiêu chính của nghiên cứu trong luận án này có thể được tóm tắt như bên dưới.

### 1.3.1 Mục tiêu liên quan đến hệ thống phân phối điện

- Giảm thiểu tổng chi phí: Yếu tố liên quan đến kinh tế luôn được coi là quan trọng nhất trong việc đầu tư thiết lập một hệ thống phân phối tích hợp các nguồn phát phân tán. Trong nghiên cứu này, mục tiêu là để giảm thiểu tổng chi phí gồm (1) chi phí đầu tư, vận hành và bảo trì cho các nguồn phát nối lưới, (2) chi phí phát điện từ nguồn chính cho nhu cầu tải và tổn thất hệ thống, và (3) chi phí cho việc phát thải từ các nhà máy điện truyền thống sử dụng nhiên liệu hóa thạch. Việc giảm thiểu tổng chi phí trên mà vẫn đảm bảo thỏa mãn tất cả các tiêu chí kỹ thuật là điều vô cùng quan trọng trong việc tối đa phúc lợi đạt được và đó là một trong các mục tiêu chính của luận án này.
- Đảm bảo nâng cao chất lượng điện năng: Việc kết nối các nguồn phát năng lượng phân tán trong hệ thống phân phối không chỉ mang lại các lợi ích về kinh tế mà còn về kỹ thuật. Bằng việc xác định sự kết nối một cách phù hợp cho các nguồn phát, điện áp của hệ thống được cải thiện, giảm thiểu tổn thất công suất trên các nhánh, giảm sự nhiễu sóng hài và nâng cao độ tin cậy hệ thống. Do đó, bên cạnh việc giảm thiểu tổng chi phí thì nghiên cứu xem xét các yếu tố kỹ thuật gồm điện áp, dòng nhánh, chỉ số đại diện sự nhiễu sóng hài và mức độ thâm nhập của các nguồn phát nối lưới cũng được xem xét để đảm bảo cải thiện chất lượng điện năng tốt hơn so với hệ thống ban đầu.
- Phân tích và chứng minh sự ảnh hưởng của các nguồn phát phân tán lên lưới phân phối: Hệ thống phân phối ba pha cân bằng và không cân bằng luôn tồn tại trong thế giới thực và mỗi loại hệ thống có những đặc tính riêng biệt. Việc tích hợp các nguồn phát điện phân tán lên mỗi loại hệ thống khác nhau thì sẽ có mức độ ảnh hưởng khác nhau. Do đó, nghiên cứu xem xét và phân tích mức độ ảnh hưởng của các nguồn phát lên các loại lưới điện phân phối khác nhau nhằm đánh giá khách quan và chính xác cho các lưới điện.
- Cự đại sự thâm nhập của các nguồn phát năng lượng tái tạo: Việc phát triển mạnh mẽ của các công nghệ chuyển đổi năng lượng đã thúc đẩy sự thâm nhập cao của các nguồn năng lượng tái tạo nối lưới. Nhiều quốc gia cũng đã có những chính sách khuyến khích việc sử dụng các nguồn năng lượng tái tạo nhằm giảm thiểu sự phụ thuộc vào nguồn nhiên liệu hóa thạch mà đang cạn

kiệt dần. Do đó, nghiên cứu xem xét để tối đa sự thâm nhập của các nguồn phát phân tán năng lượng tái tạo nhằm mang lại lợi ích tốt nhất.

### **1.3.2 Mục tiêu liên quan đến phương pháp đề xuất**

- Phát triển thuật toán cải tiến hiệu quả cao: Nghiên cứu đề xuất áp dụng thuật toán mới mà được gọi là Modified Coyote Optimization Algorithm cho việc tìm kiếm vị trí và công suất lắp đặt đồng thời của các nguồn phát phân tán. Thuật toán đề xuất được so sánh cùng mục tiêu và các ràng buộc với các thuật toán tối ưu khác nhằm kiểm tra mức độ hiệu quả và độ ổn định của thuật toán trong việc giải quyết các bài toán tối ưu.
- Phát triển công cụ mô phỏng kết hợp: Sự phối hợp mô phỏng giữa hai phần mềm nguồn mở (OpenDSS và MATLAB) nhằm giải quyết các bài toán tối ưu cho các hệ thống tích hợp cũng được đưa vào thử nghiệm tính hiệu quả trong nghiên cứu này.

### **1.4 Phạm vi và giới hạn của nghiên cứu**

Phạm vi và giới hạn của nghiên cứu có thể được liệt kê như sau.

- Lưới điện áp dụng: Việc áp dụng các hệ thống thực tế như ở Việt Nam vào nghiên cứu là một sự khuyến khích nhưng do hạn chế về tiếp cận dữ liệu hệ thống thực nên luận án này chỉ mới áp dụng dữ liệu từ các hệ thống tương đương của IEEE. Cụ thể, nghiên cứu này xem xét ba lưới điện có đặc tính khác nhau gồm lưới phân phối chuẩn IEEE 69 nút, IEEE 25 nút và IEEE 123 nút. Dữ liệu về các loại hệ thống này đã được công bố và ứng dụng rộng rãi trong nhiều nghiên cứu trước đây trên thế giới.
- Chủ đầu tư và triển khai dự án: Để góp phần tăng tỉ trọng năng lượng sạch quốc gia và giảm thiểu tác động tới môi trường, nghiên cứu này đã giả sử dự án thực hiện dưới góc nhìn của đơn vị điện lực, mà đang được giao đầu tư và triển khai dự án với mục tiêu đảm bảo tính kinh tế và kỹ thuật trong vận hành hệ thống. Nghiên cứu xem xét việc kết nối các nguồn phát phân tán năng lượng tái tạo để giảm thiểu tổng chi phí gồm chi phí đầu tư, vận hành & bảo trì, chi phí phát thải từ các nhà máy điện truyền thống và chi phí phát điện từ lưới chính cho nhu cầu tải cũng như tổn thất hệ thống mà vẫn đáp ứng đủ tiêu chí kỹ thuật.

- Thông số tải của lưới điện: Giá trị các tải thực tế trong một hệ thống luôn có sự thay đổi liên tục ở mỗi thời điểm, tuy nhiên nghiên cứu này chỉ xem xét sự thay đổi của tải ở mỗi giờ và dữ liệu tải được tham chiếu từ IEEE RTS-96. Nghiên cứu này cũng đã giả định ba tình huống phổ biến cho việc mô phỏng sự thay đổi của tải trong 24 giờ (1 ngày đại diện), 96 giờ (4 ngày đại diện) và 288 giờ (12 ngày đại diện cho 12 tháng trong năm). Các giá trị tải tương ứng với các tình huống trên được giả sử lặp lại theo chu kỳ trong suốt một năm và các năm thì giống nhau trong suốt vòng đời dự án (20 năm).
- Công suất nguồn phát từ năng lượng mặt trời và năng lượng gió: Nghiên cứu này tính toán công suất ngõ ra cho các nguồn phát năng lượng tái tạo xem xét tính bất định. Nghiên cứu sử dụng hàm phân phối xác suất Beta và Rayleigh để mô phỏng bức xạ mặt trời và tốc độ gió phục vụ việc tính toán công suất ngõ ra của mô-đun quang điện và tua-bin gió một cách tương ứng.
- Vị trí lắp đặt của các nguồn phát phân tán nối lưới: Một trong những yếu tố chính mà ảnh hưởng trực tiếp đến sự lắp đặt của các nguồn phát năng lượng mặt trời và năng lượng gió là vị trí địa lý. Vị trí phù hợp để lắp đặt phải là nơi có quỹ đất đủ rộng để tiến hành lắp đặt, có nguồn bức xạ và nguồn gió dồi dào, ... Tuy nhiên, nghiên cứu này đã giả sử tất cả các vị trí (nút) trong hệ thống đều được coi là phù hợp cho việc lắp đặt các nguồn phát nối lưới. Do đó, những vị trí tối ưu tốt nhất được chọn trong nghiên cứu này có thể không phù hợp với việc lắp đặt thực tế.
- Hiệu suất thiết bị chuyển đổi công suất: Ngày nay, dưới sự phát triển của khoa học – công nghệ thì nhiều nghiên cứu cũng đã cho thấy rằng hiệu suất của các thiết bị chuyển đổi công suất cho mô-đun quang điện và tua-bin gió có thể đạt tới 99,75% thông qua việc áp dụng công nghệ hệ thống chuyển đổi năng lượng hiệu suất cao (HEECS). Do đó, để đơn giản trong việc tính toán, nghiên cứu này giả sử hiệu suất của thiết bị chuyển đổi công suất là 100% cho mô-đun quang điện và tua-bin gió, và 90% cho quá trình nạp/ phát công suất của hệ thống lưu trữ năng lượng.
- Tuổi thọ của các nguồn phát phân tán: Trong nghiên cứu này, tổng chi phí đầu tư vào các nguồn phát phân tán nối lưới bao gồm chi phí vốn, và chi phí O&M.

Nghiên cứu giả định hiệu suất của các nguồn phát được cho là đảm bảo không thay đổi trong suốt thời gian dự án và chi phí O&M là đã bao gồm chi phí cho việc sửa chữa, thay thế thiết bị để có thể duy trì trong cả vòng đời của dự án.

- Sóng hài từ tải phi tuyến và thiết bị chuyển đổi công suất: Nghiên cứu xem xét hai trường hợp của sự phát sóng hài gồm (1) sự phát sóng hài chỉ ở các tải phi tuyến và (2) sự phát sóng hài từ các tải phi tuyến và từ thiết bị chuyển đổi công suất của các nguồn phát phân tán. Đối với trường hợp thứ nhất, nghiên cứu giả sử sóng hài từ các thiết bị chuyển đổi công suất của các nguồn phát nối lưới bị triệt tiêu nhờ các bộ lọc sóng hài và chỉ còn lại nguồn phát sóng hài từ tải phi tuyến. Đối với trường hợp thứ hai, nhiều nghiên cứu trước đây cũng đã chứng minh mức độ ảnh hưởng của sóng hài lên hệ thống phụ thuộc chính vào sự thâm nhập của các nguồn phát phân tán do các thiết bị chuyển đổi công suất gây ra. Việc tồn tại sóng hài sẽ tiêu tốn chi phí cao cho việc áp dụng các giải pháp để giảm thiểu về tiêu chuẩn. Do đó, nghiên cứu đã xem xét sự phát sóng hài ở tất cả các nguồn gồm tải phi tuyến và thiết bị chuyển đổi công suất. Vị trí cho các tải phi tuyến trong nghiên cứu được lựa chọn một cách ngẫu nhiên, và phổ hài được chọn là những loại điển hình và được sử dụng phổ biến trong các nghiên cứu trước đây. Điều này được xem như là sự giả định trong nghiên cứu này.
- Chất lượng điện năng: Nghiên cứu này xem xét các yếu tố liên quan đến chất lượng điện năng như điện áp, dòng điện và sóng hài. Nghiên cứu này không tập trung nâng cao các thông số kỹ thuật nêu trên tới mức tốt nhất mà chỉ giữ các giá trị này ở tiêu chuẩn cho phép của IEEE Std. 1547, IEEE Std. 519 và 30/2019/TT-BCT. Ngoài ra, trong một số trường hợp công suất phát thực tế của các nguồn phát tăng hoặc giảm thì có thể gây ra mất cân bằng lưới, điện áp và tần số không ổn định thì lưới chính được giả sử sẽ tiêu thụ hoặc đền bù công suất thông qua biến áp một cách phù hợp nhằm giữ các thông số ổn định theo tiêu chuẩn.

### **1.5 Hướng tiếp cận và phương pháp nghiên cứu**

- Dựa vào các công trình nghiên cứu mà đã được công bố trong và ngoài nước trước đây về thuật toán tối ưu và bài toán nghiên cứu liên quan trong các lưới phân phối.

- Mô phỏng các thuật toán tối ưu và phát triển thuật toán để tìm ra các công thức cập nhật nghiệm cũng như các thông số điều khiển phù hợp nhằm nâng cao hiệu suất thuật toán. Các thuật toán được lập trình trên MATLAB và phối hợp mô phỏng với OpenDSS để tính toán trào lưu công suất cho hệ thống.

## 1.6 Điểm mới và đóng góp của luận án

Các điểm mới của luận án này có thể được trình bày như sau:

- Xem xét sự kết nối tối ưu một cách đồng thời cho các nguồn phát năng lượng mặt trời, năng lượng gió, tụ bù và hệ thống lưu trữ năng lượng vào hệ thống phân phối để giảm thiểu tổng chi phí. Các chi phí xem xét bao gồm (1) chi phí đầu tư, (2) chi phí O&M, (3) chi phí phát điện từ lưới chính cho nhu cầu phụ tải và (4) chi phí phát thải từ các nhà máy điện truyền thống. Đây được xem như một sự xem xét toàn diện cả về mặt kinh tế, kỹ thuật và môi trường.
- Xem xét sự thâm nhập của sóng hài do các tải phi tuyến và từ các thiết bị chuyển đổi công suất gây ra trên lưới điện. Việc thâm nhập của sóng hài gây ra nhiều ảnh hưởng tiêu cực đến lưới nên chúng cần tuân theo tiêu chuẩn IEEE Std. 519 và quy định 30/2019/TT-BCT. Điều này hầu như chưa nhận được sự quan tâm xem xét một cách đầy đủ từ các nghiên cứu trước đây trên thế giới.
- Đề xuất cải tiến thuật toán COA thành MCOA để áp dụng cho các bài toán nghiên cứu. Thuật toán này có các tính năng hội tụ vượt trội, hiệu suất cao và độ ổn định tốt. Bên cạnh đó, nghiên cứu còn đề xuất áp dụng sự phối hợp mô phỏng giữa hai phần mềm MATLAB và OpenDSS để giải quyết các vấn đề liên quan đến sự tối ưu phức tạp một cách thuận tiện. Đây được coi là điểm mới vì ít nghiên cứu trước đây thực hiện thành công các điều này.

Dựa trên kết quả thu được từ phương pháp đề xuất và các phương pháp so sánh khác, sự đóng góp chính của nghiên cứu trong luận án này có thể được trình bày một cách ngắn gọn như sau:

- Khảo sát về sóng hài: Nghiên cứu này không chỉ xem xét các sóng hài được tạo ra bởi các tải phi tuyến mà còn từ các thiết bị biến đổi điện tử công suất của PFs, WFs và BESS. Kết quả chỉ ra rằng các giá trị biểu thị độ méo hài như THD và IHD đều nằm trong giới hạn cho phép của IEEE Std. 519 và 30/2019/TT-BCT.

- Đề xuất công cụ phối hợp mô phỏng: Một đóng góp quan trọng khác của nghiên cứu này là đề xuất áp dụng thành công công cụ phối hợp mô phỏng giữa MATLAB và OpenDSS thông qua COM. Sự phối hợp mô phỏng đồng thời này đã mang lại nhiều lợi thế về tính linh hoạt và tốc độ xử lý trong việc tính toán trào lưu công suất cũng như giải quyết các bài toán tối ưu phức tạp khác nhau.
- Thuật toán tối ưu cải tiến MCOA có hiệu quả cao: Một thuật toán tối ưu mới gọi là MCOA đã xác định thành công nghiệm phù hợp cho vị trí và công suất lắp đặt của PFs, WFs, CB và BESS mà mang lại kinh tế tốt hơn hơn so với hệ thống ban đầu. Ngoài ra, MCOA cũng còn được so sánh công bằng trong cùng điều kiện với nhiều thuật toán khác như IPSO, SMA, CSA, SSA và COA để chứng minh hiệu suất vượt trội của MCOA trong việc giải quyết các vấn đề tối ưu khác nhau.

## **1.7 Cấu trúc của luận án**

Luận án này được chia thành 5 chương như sau:

Chương 1: Giới thiệu

Chương 2: Tổng quan và thuật toán đề xuất

Chương 3: Áp dụng thuật toán tối ưu xác định vị trí và công suất lắp đặt của các nguồn phát phân tán trong hệ thống phân phối ba pha cân bằng.

Chương 4: Áp dụng thuật toán tối ưu xác định vị trí và công suất lắp đặt của các nguồn phát phân tán trong hệ thống phân phối ba pha không cân bằng.

Chương 5: Kết luận và định hướng nghiên cứu trong tương lai.

## CHƯƠNG 2: TỔNG QUAN VÀ THUẬT TOÁN ĐỀ XUẤT

### 2.1 Giới thiệu tổng quan bài toán nghiên cứu

Sự thâm nhập của các nguồn phát phân tán trong các hệ thống phân phối ngày càng trở nên phổ biến do nhiều lợi ích to lớn về các khía cạnh kinh tế, kỹ thuật và môi trường. Tuy nhiên, các lợi ích đạt được phụ thuộc chủ yếu vào vị trí và công suất lắp đặt của các nguồn phát điện phân tán trong hệ thống nên nhiều phương pháp khác nhau đã được đề xuất để tìm ra giải pháp tốt nhất. Có nhiều nhóm phương pháp được sử dụng để giải quyết vấn đề tối ưu này như nhóm mathematical programming, nhóm heuristics và nhóm meta-heuristics [1]. Trong đó, nhóm mathematical programming thường thu được các giải pháp có chất lượng tốt nhưng quá trình tính toán phức tạp và tốc độ xử lý tiêu tốn nhiều thời gian. Đối với nhóm heuristics thì có tốc độ tính toán nhanh hơn nhiều so với mathematical programming nhưng nhược điểm lớn nhất là dễ bị kẹt trong vùng tối ưu cục bộ địa phương, dẫn tới chất lượng giải pháp kém. Cuối cùng là nhóm meta-heuristics mà được phát triển từ việc lấy cảm hứng từ các sự vật, hiện tượng ngoài tự nhiên. Nhóm này có thể tìm ra giải pháp tối ưu toàn cục tốt nhưng tiêu tốn thời gian xử lý dữ liệu hơn so với nhóm heuristics và so với nhóm mathematical programming thì có cấu trúc thuật toán đơn giản hơn trong việc thực hiện [1]. Do đó, nhóm phương pháp meta-heuristic được áp dụng rộng rãi nhất so với các nhóm phương pháp khác, nhất là trong việc giải các bài toán tối ưu phức tạp. Nguyên tắc chung của các thuật toán meta-heuristic là tạo ngẫu nhiên các nghiệm ban đầu trong các giới hạn được xác định trước và sau đó sử dụng các công thức cập nhật để phát ra các nghiệm mới cho thế hệ tiếp theo. Mỗi nghiệm mới được khởi tạo ra sẽ được đánh giá chất lượng bằng hàm mục tiêu. Dựa trên kết quả đánh giá, các nghiệm tốt được lưu giữ như là thế hệ tiếp theo. Các nghiệm mới với chất lượng tốt hơn sẽ luôn được cập nhật qua từng lần lặp để đạt được nghiệm tối ưu toàn cục. Tuy nhiên, nhược điểm lớn nhất của các thuật toán này là dễ hội tụ về vùng tối ưu cục bộ dẫn đến hiệu suất kém. Vì vậy, trong những năm gần đây, nhiều thuật toán mới đã được các nhà khoa học ngoài nước cũng như trong nước phát triển nhằm khắc phục những nhược điểm còn tồn tại của các phương pháp trước đây. Mặt khác, việc thực hiện các nghiên cứu để xác định giải pháp tối ưu cho sự thâm nhập các nguồn phát phân tán lên lưới phân phối ba pha cân bằng và không cân bằng vẫn tồn tại nhiều thách thức. Việc

xem xét toàn diện để thỏa mãn các mặt về kinh tế, kỹ thuật và môi trường cho một dự án tích hợp dài hạn kéo dài cả vòng đời dự án trên các kiểu lưới phân phối khác nhau thì cần được thực hiện. Các nghiên cứu liên quan trên hệ thống phân phối ba pha cân bằng đã được thực hiện trong nhiều nghiên cứu trước đây, nhưng hệ thống phân phối ba pha không cân bằng vẫn còn nhiều hạn chế do sự phức tạp của loại hệ thống này. Hệ thống không cân bằng có thể tồn tại sự lệch công suất tải trên các pha ở mỗi nút hoặc/ và sự lệch trở kháng đường dây giữa các pha hoặc/ và xuất hiện sự đa pha trong lưới. Do cấu trúc của hệ thống không cân bằng phức tạp hơn nhiều so với hệ thống cân bằng nên loại hệ thống này cần được triển khai nghiên cứu để có được giải pháp tối ưu phù hợp và đa dạng với các tình huống hệ thống thực tế. Do đó, việc nghiên cứu để áp dụng thuật toán tối ưu xác định giải pháp tốt nhất cho sự thâm nhập của các nguồn phát phân tán, dưới sự xem xét các khía cạnh kinh tế, kỹ thuật và môi trường trong đa dạng các loại hệ thống phân phối khác nhau được tiến hành trong luận án này.

## **2.2 Các nghiên cứu ngoài nước**

Việc áp dụng các thuật toán tối ưu để xác định giải pháp phù hợp cho việc kết nối các nguồn phát phân tán vào hệ thống phân phối ba pha cân bằng và không cân bằng cũng đã được thực hiện phổ biến. Một trong những thuật toán lâu đời nhất được giới thiệu vào năm 1975 là Genetic Algorithm (GA) [2]. GA có nguồn gốc từ cơ chế di truyền và dựa trên sự chọn lọc tự nhiên. Trong thuật toán này, các nghiệm có chất lượng kém sẽ bị loại bỏ và chỉ những nghiệm có chất lượng tốt mới được duy trì. GA được sử dụng rất phổ biến trong các vấn đề tối ưu hóa khác nhau. Tuy nhiên, các nhà nghiên cứu cũng đã chỉ ra nhược điểm lớn của GA là hiệu suất thuật toán phụ thuộc nhiều vào các tham số điều khiển (tỷ lệ đột biến và tỷ lệ giao thoa), dẫn tới dễ hội tụ sớm tại các điểm tối ưu địa phương nên rất khó để có thể xác định giải pháp có chất lượng tốt nhất so với các thuật toán khác [3]. Thêm vào đó, thời gian hội tụ của thuật toán cũng tương đối dài so với các thuật toán khác do trải qua quá trình thực hiện phức tạp dựa trên sự mô phỏng tiến hóa của sinh vật trong tự nhiên. Nhiều nghiên cứu đã sử dụng GA để tìm vị trí và công suất phù hợp cho việc kết nối các DGs trong các hệ thống phân phối chuẩn ba pha cân bằng như IEEE 14 nút và IEEE 33 nút [4, 5]. Trong nghiên cứu [4], các tác giả này đã thành công trong việc giảm thiểu hàm mục tiêu là tổn thất công suất trên các nhánh trong hệ thống nhờ việc kết nối phù hợp từ một đến bốn nguồn phát. Kết quả thu được đã chỉ ra rằng sự giảm tổn thất tăng dần khi tăng số

lượng nguồn phát trong nghiên cứu đó. Một cách tương tự, nghiên cứu trong [5] cũng đã xác định được sự lắp đặt cho ba trường hợp gồm một nguồn phát, hai nguồn phát và ba nguồn phát để kiểm tra mức độ hiệu quả trong việc giảm tổn thất của mỗi trường hợp. Các ràng buộc kỹ thuật về điện áp nút và dòng điện nhánh cũng được thỏa mãn trong các nghiên cứu đó. Mặc dù các nghiên cứu trên đã đạt được mục tiêu đề ra nhưng các tác giả đã sử dụng hệ thống phân phối có quy mô nhỏ và hàm mục tiêu đơn giản cho việc thử nghiệm, nên rất khó để nhận định chính xác mức độ hiệu quả từ việc kết nối các DGs trong các nghiên cứu đó. Ngoài GA, các tác giả khác cũng đề xuất Particle Swarm Optimization (PSO) để giải quyết bài toán tối ưu với mục tiêu tương tự. Nghiên cứu trong [6] đã chứng minh điểm mạnh của việc xác định sự kết nối thích hợp của các DGs trong việc xem xét hàm đa mục tiêu nhằm cải thiện điện áp và giảm tổn thất công suất trong hai hệ thống phân phối ba pha cân bằng như IEEE 33 nút và IEEE 69 nút. Với cùng thuật toán đề xuất, nhóm tác giả ở [7] cũng đã sử dụng PSO để giảm tối đa chi phí đầu tư bên cạnh tổn thất, độ lệch điện áp với sự xem xét đa dạng các loại DGs như năng lượng mặt trời, năng lượng gió và pin nhiên liệu. Các ràng buộc về điện áp, dòng điện nhánh cũng như mức độ thâm nhập của các nguồn phát trên cũng được thiết lập trong nghiên cứu đó. Mặc dù các nghiên cứu đã áp dụng PSO thành công trong việc giải quyết vấn đề tối ưu đặt ra nhưng các nghiên cứu này chưa có xem xét sự biến đổi theo thời gian của nhu cầu tải. Nên giải pháp tối ưu đạt được có thể sẽ không hiệu quả cho các trường hợp tải thay đổi. PSO được công bố lần đầu tiên vào năm 1995 và là một phương pháp tối ưu bầy đàn hiệu quả [7]. Cấu trúc của thuật toán này tương đối đơn giản nhưng có thể xử lý các vấn đề phức tạp với nhiều hàm mục tiêu và ràng buộc khác nhau. Do cấu trúc thuật toán đơn giản nên PSO được sử dụng rộng rãi trong việc giải các bài toán tối ưu. Tuy nhiên, các nhà nghiên cứu cũng đã nhận ra các nhược điểm quan trọng của thuật toán này là giải pháp tìm ra dễ rơi vào bẫy cục bộ trong không gian tìm kiếm rộng lớn, tính ổn định phụ thuộc nhiều vào tham số điều khiển và có tỉ lệ hội tụ thấp trong quá trình thực hiện sự lặp của thuật toán [8]. Ngoài ra, một phương pháp khác cũng được nhiều người biết đến về tính hiệu quả là Cuckoo Search Algorithm (CSA) [9]. CSA được phát triển dựa trên chiến lược ấp trứng và ký sinh hung hãn của một số loài chim cu gáy. Loài chim cu gáy thường có xu hướng đẻ trứng vào tổ của các loài chim khác để ấp cho đến khi trứng chim cu nở. Chim cu gáy rất thông minh khi chọn những con chim chủ mà trứng có màu sắc và

kích thước khá giống trứng của chúng để đánh lừa chim chủ. Sau khi trứng chim cu gáy nở, chim cu sẽ đẩy trứng của chim chủ ra khỏi tổ để tăng thêm nguồn thức ăn do chim chủ cung cấp. Mặc dù CSA khá hiệu quả trong nhiều bài toán tối ưu hóa nhưng thuật toán này có nhiều nhược điểm như cấu trúc thuật toán phức tạp, tốc độ xử lý chậm và độ ổn định thuật toán chưa được tốt. Bằng việc áp dụng CSA, các nghiên cứu [10, 11] cũng đã cho thấy sự giảm thiểu đồng thời cả tổn thất điện năng và sụt áp nhờ sự thâm nhập của các DGs. Các nghiên cứu đó xem xét nhiều trường hợp với hệ số công suất của các nguồn phát kết nối lưới khác nhau và đã chứng minh được mức giảm tổn thất và sụt áp phụ thuộc nhiều vào giá trị hệ số công suất. Nhìn chung, CSA cũng thực sự hiệu quả đối với các vấn đề tối ưu hóa liên quan đến việc xác định sự lắp đặt DGs. Cả hai nghiên cứu đã tìm ra được giải pháp khả thi phù hợp cho vấn đề tối ưu nhưng lại bị giới hạn về điều kiện xem xét khi không đề cập đến sóng hài do các tải phi tuyến hoặc các nguồn phát nối lưới tạo ra. Cũng tương tự như trên, một phương pháp phổ biến khác là Artificial Bee Colony Algorithm (ABC) cũng được giới thiệu trong nghiên cứu [12]. ABC được phát triển dựa trên các đặc tính của bầy ong trong tự nhiên. Trong thuật toán này, nguồn thức ăn được coi là nghiệm khả thi và mức độ phù hợp của nghiệm được sử dụng để đo lường lượng thức ăn. ABC hoạt động dựa trên đặc tính của ba loại ong trong tổ bao gồm: ong thợ, ong quan sát và ong trinh sát. Thông thường, số lượng ong thợ và số lượng ong quan sát trong một tổ được chọn bằng nhau. Mặc dù ong trinh sát được dùng để tìm nguồn thức ăn mới bằng cách sử dụng ngẫu nhiên các thể hệ trong không gian tìm kiếm. Tuy nhiên, điều này không mang lại nhiều hiệu quả cho thuật toán này. Do đó, ABC có tỉ lệ rơi vào vùng tối ưu địa phương cao và tốc độ xử lý dữ liệu của thuật toán khá chậm do phải trải qua 3 giai đoạn để tạo ra các thể hệ nghiệm mới. ABC cũng được sử dụng rộng rãi để xử lý các vấn đề tối ưu hóa liên quan đến việc xác định sự lắp đặt của các DGs [13, 14]. Bên cạnh việc giảm tổn thất điện năng trên các nhánh trong hệ thống phân phối như một mục đích chính trong [13] cho hệ thống phân phối chuẩn IEE 14 nút và IEEE 57 nút, thì nghiên cứu [14] đề xuất cắt giảm chi phí nhập khẩu năng lượng từ lưới điện chính trong IEEE 33 nút và IEEE 69 nút. Trong nghiên cứu đó, ABC đã chứng minh sự đa phức lợi từ việc áp dụng giải pháp của phương pháp đề xuất so với các phương pháp được so sánh khác trong các hệ thống phân phối khác nhau. Tuy nhiên, các nghiên cứu này tồn tại các thiếu sót chính như chưa có sự tính toán chi phí đầu tư cho việc lắp đặt các DGs và

cũng chưa xem xét hệ số công suất của các nguồn phát phân tán nối lưới. Ngoài ra, một thuật toán khác là Ant Colony Optimization (ACO) cũng được sử dụng phổ biến trong nhiều nghiên cứu nhằm tìm ra lời giải tối ưu cho các bài toán thực tế [15]. ACO thuộc loại meta-heuristic algorithm được giới thiệu lần đầu tiên vào năm 1991 và được lấy cảm hứng từ hành vi sinh học trong giao tiếp của loài kiến. Kiến sử dụng pheromone để chia sẻ thông tin về nguồn thức ăn với nhau. ACO được coi là một phương pháp tối ưu tốt và đã được sử dụng để giải quyết nhiều vấn đề phức tạp, bao gồm cả việc tìm kiếm vị trí lắp đặt tối ưu cho các DGs nhằm giảm thiểu tổng tổn thất và độ lệch điện áp dưới các ràng buộc về dòng điện nhánh và điện áp nút [16]. Điểm nổi bật của nghiên cứu này là sử dụng ETAP để mô phỏng trực quan hệ thống phân phối hình tia ba pha cân bằng IEEE 30 nút. Cũng giống như các nghiên cứu khác mà đã đề cập ở trên, nghiên cứu này chưa có sự thử nghiệm đa dạng các kiểu nguồn phát và cũng chưa xem xét sự thay đổi của nhu cầu tải. Thêm vào đó, thuật toán áp dụng này có nhiều tham số điều khiển mà có thể ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng của thuật toán nên cũng cần phải nghiên cứu và khảo sát trước khi quyết định lựa chọn giá trị phù hợp cho từng ứng dụng cụ thể [17]. Một thuật toán hữu hiệu khác gọi là Biogeographic Based Optimization (BBO) cũng được đề xuất để xử lý vấn đề tối ưu sự kết nối của các DGs [18]. Vấn đề xem xét cũng tương tự với các thuật toán trên, nghiên cứu trong [19] đã sử dụng BBO để giảm thiểu sóng hài bên cạnh việc giảm thiểu tổn thất và cải thiện điện áp như là các mục tiêu chính cho các hệ thống phân phối khác nhau. Nhóm các tác giả cũng cho thấy một trong những lợi ích bổ sung của việc giảm méo dạng sóng hài là nhờ sự thâm nhập phù hợp từ các DGs. Khi có sự thâm nhập của DGs, dòng từ nguồn chính cung cấp cho lưới phân phối giảm xuống nên dẫn tới dòng hài từ tải phi tuyến giảm theo, và chính điều này đã góp phần làm giảm chỉ số sóng hài. Mặc dù nghiên cứu này đã thành công trong việc giảm thiểu sóng hài về tiêu chuẩn IEEE 519 cho hai hệ thống phân phối gồm IEE 33 nút và IEEE 69 nút, nhưng nghiên cứu lại chưa có sự xem xét đa dạng các kiểu phổ sóng hài khác nhau từ tải phi tuyến và từ các thiết bị chuyển đổi công suất của các nguồn phát. BBO là một phương pháp mạnh được phát triển dựa trên sự phân bố của các loài sinh vật trong tự nhiên theo thời gian và không gian [20]. Thuật toán này có thể mở rộng vùng tìm kiếm để xác định các nghiệm khả thi và tránh các bẫy cục bộ hiệu quả. BBO có ưu điểm trong việc giải các bài toán tối ưu với không gian tìm kiếm lớn nhưng phương

pháp này có nhiều thông số điều khiển và tốc độ hội tụ tương đối chậm. Ngoài ra, một thuật toán tuyệt vời khác mà được công bố gần đây có tên là Equilibrium Optimizer (EO) [21]. EO được lấy cảm hứng từ mô hình cân bằng khối lượng điều khiển được sử dụng để dự đoán trạng thái cân bằng và trạng thái động. Trong thuật toán này, mỗi hạt với nồng độ chịu trách nhiệm tìm ra các nghiệm khả thi trong vùng được xác định trước. Nồng độ của các tác nhân này sẽ được cập nhật liên tục với mục đích là tìm ra nghiệm tốt nhất để có thể đạt đến trạng thái cân bằng. Do đạt lợi thế về hiệu suất, EO và các phiên bản cải tiến được sử dụng rộng rãi để giải quyết nhiều vấn đề phức tạp, bao gồm cả việc xác định vị trí và công suất lắp đặt của các DGs. Một cách cụ thể, các tác giả trong các nghiên cứu [22] đã đề xuất áp dụng thuật toán EO cho việc cải thiện điện áp và giảm tổn thất bằng cách tái cấu trúc hệ thống phân phối bên cạnh sự kết nối thêm các nguồn phát phân tán. Không chỉ vậy, nghiên cứu [23] cũng đề xuất áp dụng phiên bản cải tiến của EO nhằm cải thiện độ lệch điện áp và giảm tổn thất năng lượng cho hệ thống IEEE 33 nút, 69 nút và 137 nút ở ba mức tải khác nhau dưới điều kiện kết hợp đồng thời tái cấu trúc lưới và lắp đặt DGs. Hai nghiên cứu trên đã chứng minh sự kết hợp này mang lại nhiều lợi thế tốt hơn so trong việc đạt mục tiêu tối ưu so với việc lắp đặt các DGs. Tuy nhiên các nghiên cứu này vẫn tồn tại các nhược điểm về bài toán như chưa xem xét sự thay đổi công suất ngõ ra của nguồn phát phân tán và chưa đánh giá sự hiệu quả của giải pháp trong môi trường tồn tại sóng hài trên lưới. Ngoài ra, một thuật toán khác mà đã được phát triển trong những năm gần đây là Sunflower Optimization Algorithm (SFO) [24]. Thuật toán này được lấy cảm hứng từ hành vi tự nhiên của loài hoa hướng dương để xác định phương hướng tốt nhất về phía mặt trời. Những bông hoa hướng dương này có xu hướng nghiêng về phía mặt trời để nhận bức xạ mặt trời tốt hơn. Những bông hoa ở gần mặt trời hơn sẽ bình tĩnh hơn vì chúng nhận được nhiều bức xạ mặt trời hơn và những bông hoa ở xa mặt trời hơn sẽ hoạt động mạnh hơn vì chúng nhận được ít bức xạ mặt trời hơn. Vì vậy, những bông hoa ít bức xạ này sẽ tiến những bước lớn để di chuyển đến gần mặt trời để nhận được nhiều nhiệt hơn và từ đó có được nghiệm tối ưu toàn cục. Những năm gần đây, các phiên bản cải tiến trong công thức cập nhật nghiệm mới đã được triển khai để giải quyết vấn đề về vị trí và kích thước tối ưu của các DGs trong các loại hệ thống phân phối khác nhau [25]. Trong nghiên cứu đó, các tác giả cũng đã thành công trong việc chứng minh tính hiệu quả của phiên bản cải tiến so với phiên bản gốc và các phương pháp so sánh khác

trong việc tối đa chi phí đầu tư và vận hành liên quan đến sự giảm tổng tổn thất của hệ thống phân phối điện dưới các ràng buộc về điện áp, dòng nhánh và giới hạn phát của DGs trong hệ thống hình tia IEEE 33 nút và 84 nút. Đây thực sự là một nghiên cứu tốt khi xem xét mục tiêu liên quan đến tính kinh tế, tuy nhiên, nghiên cứu lại chưa có sự đề cập đến sự nhiễu sóng hài từ các nguồn tiềm năng trong lưới điện và thêm vào đó là hệ số công suất các nguồn phát cũng chưa có sự xem xét. Ngoài ra, một thuật toán hiệu quả khác có độ ổn định vượt trội là Coyote Optimization Algorithm (COA) [26]. COA được phát triển dựa theo tập tính loài chó sói đồng cỏ trong tự nhiên. Cộng đồng chó sói này được coi là loài động vật có vú thông minh nhất ở Bắc Mỹ. Trong thuật toán COA, mỗi cá thể sói được đặc trưng bởi hai yếu tố, bao gồm điều kiện xã hội và chất lượng của điều kiện xã hội. Trong khi điều kiện xã hội đại diện nghiệm tối ưu thì chất lượng của điều kiện xã hội phản ánh tính phù hợp của nghiệm. COA không chỉ tập trung khai thác các nghiệm tối ưu hiện tại mà còn tiếp tục khám phá các nghiệm khác trong vùng không gian tìm kiếm được xác định trước. Điều này đã góp phần đáng kể để trở thành một thuật toán mạnh và ổn định. Hiệu quả của thuật toán cũng đã được chứng minh thông qua so sánh hiệu suất với các thuật toán khác trong việc giải quyết các vấn đề tối ưu khác nhau, trong đó có việc xác định vị trí và công suất lắp đặt của các DGs trong các lưới phân phối [27]. Trong nghiên cứu [27], nhóm tác giả đã áp dụng COA cho việc giảm thiểu tối đa tổn thất nhánh, nâng cao sự ổn định điện áp và giảm chi phí vận hành nhờ sự kết nối phù hợp của các DGs trong các hai hệ thống thử nghiệm gồm hệ thống phân phối ba pha cân bằng IEEE 33 nút và IEEE 69 nút. Nghiên cứu này cũng đã thành công trong việc xác định giải pháp tối ưu cho sự kết nối các DGs trong lưới với sự xem xét các hệ số công suất vận hành khác nhau. Kết quả thu được cũng đã chứng minh tầm quan trọng của việc lựa chọn hệ số công suất phù hợp cho việc tối đa phúc lợi. Tuy nhiên nghiên cứu này có sự thiếu sót trong việc không xem xét sự thay đổi của tải và công suất phát của các nguồn tái tạo nối lưới.

Bên cạnh các nghiên cứu trên hệ thống phân phối cân bằng thì cũng có một vài nghiên cứu cho hệ thống phân phối phức tạp hơn là ba pha không cân bằng cũng được thực hiện như nghiên cứu trong [28, 29]. Các nghiên cứu này, các hệ thống phân phối ba pha không cân bằng có sự chênh lệch về tải ở mỗi pha của nút cũng như thông số đường dây trên nhánh trong các hệ thống như IEEE 25 nút, IEEE 34 nút và IEEE 123 nút. Các thuật toán truyền thống như GA và PSO được áp dụng để tìm nghiệm tối ưu

nhằm giảm thiểu tổn thất công suất như là mục tiêu chính trong các nghiên cứu đó. Tương tự, như trong nghiên cứu [30], nhóm tác giả đã xác định nghiệm cho vị trí và công suất phát của các nguồn phát năng lượng mặt trời trên hệ thống ba pha không công bằng chuẩn IEEE 123 nút nhằm giảm thiểu tổn thất công suất và nâng cao chất lượng điện áp với sự phát tối đa của nguồn phát ở mức tải đỉnh bằng COA. Trong nghiên cứu này, hệ thống có sự không cân bằng là do tồn tại nhiều tải một pha và nhờ sự kết nối của các nguồn phát ở các nút ba pha và một pha đã góp phần làm cân bằng lại tải hệ thống, dẫn tới độ lệch điện áp trong các pha đã được cải thiện một cách đáng kể. Tuy nhiên, nghiên cứu này chưa có sự xem xét sự thay đổi của tải và nguồn phát năng lượng mặt trời. Một nghiên cứu khác là [31], cũng đã áp dụng Improved Particle Swarm Optimization (IPSO) cho việc xem xét sự kết nối của các DGs trong hệ thống phân phối ba pha không cân bằng chuẩn IEEE 37 nút. Kết quả mô phỏng thu được đã cho thấy tổn thất hệ thống và hệ số không cân bằng điện áp được giảm thiểu, điện áp mỗi pha và lợi nhuận cho công ty phân phối được cải thiện nhờ sự kết nối phù hợp các nguồn phát năng lượng gió và năng lượng mặt trời trong lưới. Thêm vào đó, nhóm tác giả trong [32] cũng áp dụng thuật toán lai giữa Grey Wolf Optimization và Cuckoo Search Algorithm (GWOCS) cho việc xác định sự lắp đặt tối ưu của DGs để giảm tổn thất công suất trong hệ thống IEEE 34 nút. Đây cũng là hệ thống phân phối ba pha không cân bằng với đa dạng kiểu tải khác nhau, và nhiều thiết bị nối lưới như biến áp, tụ điện và bộ điều chỉnh điện áp. Nghiên cứu này cũng đã thành công trong việc áp dụng sự phối hợp mô phỏng giữa hai phần mềm nguồn mở là MATLAB và OpenDSS cho việc tính toán trào lưu công suất. Ngoài ra, các tác giả khác như trong nghiên cứu [33] đã đề xuất sự phối hợp mô phỏng giữa phần mềm ETAP và MATLAB cho việc xác định sự lắp đặt tối ưu của các DGs trong hệ thống không cân bằng IEEE 13 nút. Kết quả thu được cũng đã chứng minh lợi ích của việc kết nối các DGs trong việc nâng cao độ tin cậy hệ thống và giảm thiểu tổn thất trên đường truyền mà vẫn đáp ứng được các ràng buộc kỹ thuật về điện áp pha và dòng điện nhánh. Mặc dù các nghiên cứu trên đã thành công trong việc thực hiện mô phỏng để xác định giải pháp tốt nhất cho vấn đề tối ưu nhưng nhược điểm của các nghiên cứu này là chưa có sự xem xét hàm mục tiêu toàn diện về mặt kinh tế và kỹ thuật. Bên cạnh đó, nghiên cứu cũng thiếu sót việc xem xét sự phát sóng hài từ các nguồn phát và tải phi tuyến tồn tại trong lưới phân phối.

### 2.3 Các nghiên cứu nổi bật trong nước

Bên cạnh các nghiên cứu thực hiện ở nước ngoài, thì các nhà khoa học trong nước cũng có những đóng góp đáng kể lên quan tới bài toán tối ưu đang xem xét. Việc xác định tối ưu vị trí và công suất phát của các nguồn phân tán trong lưới phân phối mang lại nhiều lợi ích trong việc giảm thiểu tổn thất công suất trên các nhánh, cải thiện điện áp nút cũng như giảm chi phí phát điện của lưới chính. Một cách cụ thể, các tác giả trong nước đã thành công cho việc áp dụng thuật toán Golden Jackal Optimization (GJO) trong việc tái cấu trúc lưới điện với mục tiêu chính là giảm tổn thất công suất trên đường truyền trong hai hệ thống phân phối ba pha cân bằng chuẩn IEEE 33 nút và IEEE 69 nút với các ràng buộc kỹ thuật về dòng nhánh và điện áp nút [34]. GJO là một thuật toán được xây dựng dựa trên hành vi săn mồi một cách hợp tác của bầy sói rừng vàng, tuy nhiên nhược điểm lớn nhất của thuật toán này là dễ rơi vào vùng tối ưu cục bộ và khả năng khai thác kém hiệu quả. Thêm vào đó, nghiên cứu cũng tồn tại các thiếu sót khi không xem xét hệ thống trong điều kiện bị ảnh hưởng bởi sóng hài từ các tải phi tuyến. Trong một nghiên cứu tương tự, các tác giả trong [35] cũng đã đề xuất Stochastic Fractal Search Algorithm (SFSA) cho việc giảm thiểu tổn thất và nâng cao điện áp nhờ việc tái cấu trúc và tích hợp thêm các DGs. Nghiên cứu này cũng đã chứng minh sự tích cực nổi bật của SFSA so với các phương pháp được công bố trước đó thông qua việc thực thi trên 5 hệ thống phân phối gồm 33 nút, 69 nút, 84 nút, 119 nút và 136 nút. Nghiên cứu này cũng đã chỉ ra sự hiệu quả so với nhiều phương pháp khác trong việc giải quyết vấn đề tối ưu. Tuy nhiên, về mặt bài toán thì hàm mục tiêu của nghiên cứu còn khá đơn giản và nghiên cứu cũng chưa xem xét sự thay đổi theo thời gian của tải và nguồn phát nối lưới. Thêm vào đó, nhóm tác giả trong nghiên cứu [36] cũng đã áp dụng Walrus Optimization Algorithm (WOA) cho việc xác định vị trí lắp đặt tối ưu của các nguồn phát năng lượng gió trong hệ thống phân phối chuẩn IEEE 85 nút với mục tiêu là giảm tối đa tổng tổn thất công suất trên các nhánh phân phối. Nghiên cứu đó cũng đã cho thấy sự vượt trội so với thuật toán so sánh Osprey Optimization Algorithm (OOA) trong việc giải quyết cùng vấn đề tối ưu. Tuy nhiên, WOA là một thuật toán mới chỉ được công bố gần đây nên hiệu suất của thuật toán cần được kiểm chứng thêm qua các vấn đề tối ưu thực tế khác nhau [37]. Hơn nữa, nghiên cứu trong [38] cũng đã đề xuất việc sử dụng Artificial Ecosystem Optimization (AEO) cho việc xác định vị trí và dung lượng của hệ thống lưu trữ năng lượng (BESS) dưới

sự xem xét các DGs đã được lắp cố định từ trước cho việc giảm mua năng lượng trên ba hệ thống phân phối chuẩn IEEE 18 nút, IEEE 33 nút và IEEE 69 nút. AEO được lấy cảm hứng phát triển từ dòng năng lượng trong một hệ sinh thái trên trái đất và mô phỏng lại ba hành vi của các sinh vật sống như sản xuất, tiêu thụ và phân hủy [39]. Nghiên cứu đó cũng đã chứng minh việc áp dụng AEO tốt hơn PSO cũng như Harris Hawks Optimizer (HHO). Nghiệm tối ưu cho sự lắp đặt BESS đã được xác định thành công với chi phí điện đã được cắt giảm đáng kể, và đồng thời giải pháp lắp đặt mà được tìm ra cũng thỏa mãn cho các ràng buộc về công suất phát và dung lượng lưu trữ của BESS. Mặc dù AEO là một phương pháp đơn giản cho việc thực hiện để giải quyết các vấn đề tối ưu nhưng hiệu suất và độ ổn định của phương pháp này còn phụ thuộc nhiều vào các thông số thiết lập ban đầu. Nhìn chung, các phương pháp được công bố trước đây đều có thể tìm ra được các nghiệm khả thi cho các vấn đề tối ưu. Tuy nhiên, để giải quyết nhiều vấn đề phức tạp, đặc biệt là các bài toán có số lượng biến lớn và trong không gian tìm kiếm rộng với các ràng buộc nghiêm ngặt thì việc đề xuất các thuật toán tối ưu hữu hiệu mới luôn được hoan nghênh. Không chỉ vậy, phần lớn các nghiên cứu này chỉ tập trung vào các mục tiêu đơn giản liên quan đến tổn thất và điện áp lưới mà chưa có sự tính toán về khía cạnh kinh tế. Ngoài ra, sự thay đổi theo thời gian của nguồn phát và nhu cầu tải cũng chưa được xem xét đầy đủ nên cũng được coi là các khuyết điểm của nghiên cứu trên.

## **2.4 Các đóng góp và thiếu sót còn tồn tại của các nghiên cứu trước**

Nhìn chung thì các nghiên cứu trước đây cũng đã có những đóng góp nhất định trong việc xác định nghiệm phù hợp cho sự lắp đặt tối ưu các nguồn phát phân tán. Tuy nhiên, các nghiên cứu trong quá khứ vẫn còn tồn tại nhiều thiếu sót mà cần được cải thiện. Các đóng góp và thiếu sót của nghiên cứu trước đây được trình bày một cách ngắn gọn như sau.

### **2.4.1 Các đóng góp của các nghiên cứu trước đây**

- Các nghiên cứu cũng đã thành công trong việc áp dụng các phương pháp tối ưu khác nhau trong việc xác định nghiệm khả thi cho việc lắp đặt các nguồn phát phân tán trong các hệ thống phân phối.

- Các nghiên cứu đã phân tích và chỉ ra các lợi ích trong việc xác định sự kết nối phù hợp các nguồn phát phân tán trong việc giảm tổn thất công suất và cải thiện chất lượng điện áp một cách đáng kể.

#### **2.4.2 Thiếu sót còn tồn tại của các nghiên cứu trước đây**

- Các nghiên cứu trước đây chỉ tập trung tìm nghiệm tối ưu cho việc lắp đặt các DGs với mục tiêu chính là giảm thiểu tổn thất điện năng và cải thiện điện áp trong hệ thống phân phối ở một mức tải đỉnh hoặc một vài mức tải tượng trưng. Do đó, nghiệm tìm được là tối ưu ở mức tải được xem xét nhưng có thể không tối ưu ở các mức tải khác nhau.
- Công suất đầu ra của các nguồn phát năng lượng tái tạo như năng lượng mặt trời và năng lượng gió phụ thuộc vào các điều kiện tự nhiên như bức xạ mặt trời và tốc độ gió nhưng các nghiên cứu nêu trên chỉ xem xét công suất đầu ra cố định của các nguồn phát này. Điều này sẽ dẫn đến sự sai lệch nhiều so với tình hình thực tế.
- Việc thu thập dữ liệu qua các năm về bức xạ mặt trời và tốc độ gió nên được thực hiện, và các hàm phân bố xác suất như Beta và Rayleigh cần được áp dụng để ước tính xác suất bức xạ mặt trời và tốc độ gió phục vụ cho việc tính toán công suất ngõ ra của các mô-đun quang điện và tua-bin gió. Nhưng những điều như vậy chưa nhận được nhiều sự chú ý trong các nghiên cứu ở quá khứ.
- Hệ thống phân phối ba pha không cân bằng do sự chênh lệch tải cũng tồn tại trong thực tế nhưng vẫn chưa nhận được nhiều sự quan tâm trước đây. Không chỉ vậy, việc xác định mức độ thâm nhập của sóng hài do tải phi tuyến và thiết bị chuyển đổi công suất của các nguồn phát phân tán năng lượng tái tạo thì cũng không kém phần quan trọng, nhưng các nghiên cứu trước đây chưa có sự xem xét đầy đủ. Vì vậy, để đánh giá chính xác các tiêu chí kỹ thuật của hệ thống tích hợp, cần nghiên cứu sự thay đổi theo thời gian của nhu cầu phát và phụ tải với điều kiện có tồn tại sóng hài trong hệ thống do các tải phi tuyến và thiết bị chuyển đổi công suất.
- Sẽ có lợi hơn nếu tích hợp hệ thống dự trữ năng lượng để tích trữ năng lượng khi tải nhỏ và giá điện thấp cũng như phát năng lượng ra lưới trong thời gian tải

cao và giá điện cao nhằm tiết kiệm chi phí trong vận hành hệ thống. Tuy nhiên, các nghiên cứu trước đây chưa có đánh giá đầy đủ về sự tích hợp này.

- Việc giảm tổn thất điện năng và sụt điện áp không đủ để đánh giá hiệu quả của một hệ thống phân phối tích hợp. Vì vậy, điều quan trọng là phải xem xét tổng chi phí vận hành hệ thống phân phối, bao gồm chi phí đầu tư, chi phí O&M, chi phí khí thải cũng như chi phí liên quan đến việc phát điện từ lưới chính cho nhu cầu. Việc giảm thiểu tổng chi phí sẽ góp phần đáng kể nâng cao hiệu quả kinh tế trong vận hành hệ thống mà vẫn đáp ứng các chỉ tiêu kỹ thuật.

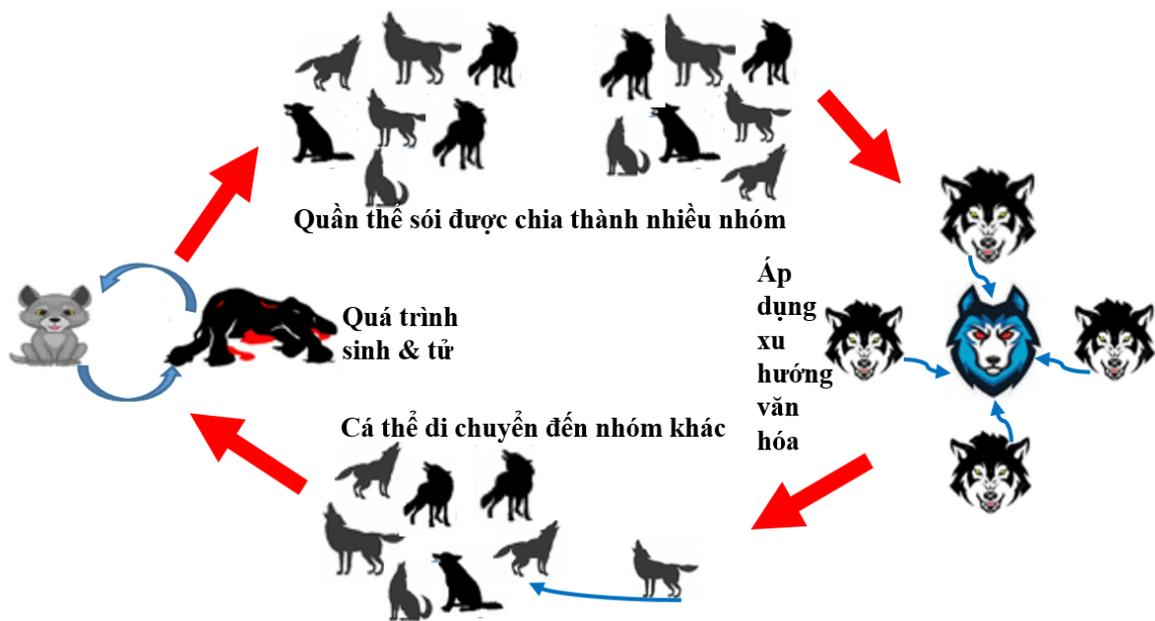
## 2.5 Giới thiệu thuật toán đề xuất

Hành vi thông minh của các hiện tượng tự nhiên từ động vật đến thực vật là nguồn cảm hứng phổ biến nhất để các nhà nghiên cứu phát triển các thuật toán tối ưu cho việc giải quyết nhiều vấn đề trong lĩnh vực kinh tế và kỹ thuật. Trong những năm gần đây, một thuật toán meta-heuristic hiệu quả mà đã được Dr. Pierezan và Dr. Coelho công bố, và được gọi là Coyote Optimization Algorithm (COA) đã thu hút rất nhiều sự chú ý trên toàn thế giới. Thuật toán COA ở nghiên cứu ban đầu đã được chứng minh tính hiệu quả vượt trội trong việc tìm kiếm các nghiệm khả thi cho các vấn đề tối ưu khác nhau của các hàm benchmark [26]. Trong nghiên cứu đó, hiệu suất và tính ổn định cao của COA thì nổi bật hơn so với nhiều phương pháp khác trong so sánh ngang hàng với cùng hàm mục tiêu và các ràng buộc. Do đó mà COA được các nhà khoa học lựa chọn ứng dụng rộng rãi để giải quyết nhiều vấn đề tối ưu thế giới thực. Như trong nghiên cứu [40], nhóm tác giả đã xác định chiến lược quản lý năng lượng tối ưu cho hệ thống lai pin nhiên liệu dựa vào thuật toán COA. Kết quả thu được đã chứng minh hiệu suất cao của phương pháp đề xuất so với các phương pháp so sánh khác. Bên cạnh đó, nghiên cứu ở [41] cũng áp dụng COA cho việc dự đoán các tham số chưa biết đến liên quan đến các mô hình khác nhau như mô hình diode đơn, diode đôi và diode ba của mô-đun quang điện. Các kết quả mô phỏng đã xác định được các giá trị cho các mô hình trên với độ ổn định khá cao. Không chỉ vậy, cũng nhờ thuật toán này mà nghiên cứu [42] cũng đã xác định thành công sự tích hợp tối ưu của các nguồn phát năng lượng mặt trời trong hệ thống phân phối chuẩn IEEE 123 nút. Nghiệm từ COA cũng đã được chứng minh là tốt hơn nhiều so với các phương pháp so sánh khác như GA, PSO, BBO và GWO trong việc

cải thiện chất lượng điện năng cũng như giảm tổn thất công suất. Một cách tương tự, nhóm tác giả trong [43] cũng đã áp dụng thành công COA trong việc xác định việc kết nối phù hợp của các nguồn phát điện phân tán trong hệ thống phân phối chuẩn IEEE 33 và 69 nút nhằm giảm tổn thất, nâng cao chỉ số ổn định điện áp và giảm chi phí vận hành. Qua đó, COA cũng đã chỉ ra sự nổi trội trong việc giải quyết các vấn đề phức tạp với hàm đa mục tiêu. Ngoài ra còn có nhiều ứng dụng thành công khác cho các vấn đề tối ưu mà sử dụng COA như xác định thông số PI của bộ điều khiển nhằm nâng cao hiệu suất của hệ thống bơm nước năng lượng mặt trời [44], đề xuất phương án cấu hình lại quá trình vận hành hệ thống quang điện một cách tối ưu để giảm thiểu sự ảnh hưởng của bóng mây lên các mô-đun quang điện [45], tìm kiếm nghiệm cho cấu trúc tối ưu của thiết bị đầu cuối hệ thống quang điện một cách tiết kiệm chi phí nhất [46], và tương tự, [47] cũng đã áp dụng COA thành công trong việc giảm chi phí vận hành thông qua việc tối ưu lịch trình phát điện của các tổ máy trong nhà máy điện. Nhìn chung, COA đã được chứng minh là một phương pháp hiệu quả và được ứng dụng phổ biến trong việc giải quyết đa dạng các vấn đề tối ưu khác nhau một cách tích cực. Tuy nhiên, thuật toán này vẫn còn tồn tại các nhược điểm mà cần được khắc phục để góp phần gia tăng hiệu suất làm việc của thuật toán. Do đó, trong nghiên cứu này, COA cũng được lựa chọn để trở thành thuật toán tối ưu cho các bài toán đang xem xét nhưng với sự cải tiến để nâng cao hiệu quả thuật toán và thuật toán mới được ra đời với tên gọi là Modified Coyote Optimization Algorithm (MCOA). MCOA được xây dựng dựa trên nền COA nên thuật toán không những kế thừa các đặc tính tốt của thuật toán gốc mà còn chứa những sửa đổi hợp lý góp phần cải thiện hiệu suất thuật toán.

## **2.6 Coyote Optimization Algorithm**

Coyote Optimization Algorithm được phát triển dựa trên hành vi thông minh của loài chó sói đồng cỏ (tên khoa học: *canis latrans*) mà dựa trên cấu trúc xã hội và trao đổi kinh nghiệm của chúng trong quần thể.



**Hình 2.1:** Minh họa hành vi loài chó sói.

Đây là loài chó sói mà được coi là động vật có vú thông minh nhất ở khu vực Bắc Mỹ. Trong một cộng đồng chó sói, nhiều nhóm (hoặc bầy) sói nhỏ được thành lập để cộng tác với nhau trong việc bảo vệ lãnh thổ và kiếm thức ăn. Chó sói trong mỗi nhóm có xu hướng đi theo con đầu đàn di chuyển đến những vùng đất có điều kiện sống tốt và đây được coi là xu hướng văn hóa của mỗi nhóm. Trong một vòng đời, một hoặc một số chó sói có thể rời nhóm của mình để gia nhập các nhóm khác để tìm kiếm môi trường sống tốt hơn. Giống như quy luật tự nhiên, những con sói này trong quần thể đều có thể chết do tuổi già và những con sói non mới được chào đời. Quá trình sinh tử như một quy luật bất biến của mỗi loài trong tự nhiên nhằm cân bằng quần thể. Sơ đồ các loài chó sói có thể được minh họa ngắn gọn như Hình 2.1 [27]. Dựa trên đặc điểm thông minh của loài này, COA đã được phát triển và thuật toán được thiết kế để xem xét tổ chức xã hội của chó sói cũng như khả năng thích ứng với môi trường nhằm giải quyết các vấn đề tối ưu hóa trong thế giới thực. Như đã đề cập, cộng đồng chó sói được chia thành nhiều nhóm ( $N_{pk}$ ) và có nhiều cá thể tồn tại trong mỗi nhóm ( $N_{ce}$ ). Do đó, ( $N_{pk} \times N_{ce}$ ) được xem xét như là dân số quần thể của loài sói ( $N_{po}$ ). Các biến điều khiển đầu vào ( $N_{pk}$  và  $N_{ce}$ ) có giá trị phụ thuộc vào bài toán tối ưu nên chúng sẽ được tiến hành khảo sát để xác định giá trị phù hợp nhất trong mỗi trường hợp khác nhau. Trong COA, điều kiện sống và chất lượng điều kiện sống là hai yếu tố chính đặc trưng cho mỗi cá thể. Trong khi điều

kiện sống đại diện nghiệm khả thi cho vấn đề tối ưu hóa thì chất lượng điều kiện sống lại phản ánh tính phù hợp của nghiệm đó.

Giống như các thuật toán ngẫu nhiên khác, cộng đồng chó sói ban đầu là một tập hợp các con chó sói, mỗi vị trí chó sói tương ứng với một điều kiện xã hội (tức là một nghiệm). Các nghiệm ban đầu đại diện cho các con chó sói trong mỗi đàn được phân phối một cách ngẫu nhiên trong giới hạn được xác định trước và được miêu tả dưới dạng toán học như sau [27]:

$$S_{pk,ce} = S^{Min} + rd \cdot (S^{Max} - S^{Min}); pk = 1, 2, 3 \dots N_{pk}, ce = 1, 2, 3 \dots, N_{ce} \quad (2.1)$$

Trong đó,  $rd$  là số được phát ra ngẫu nhiên trong phạm vi từ 0 đến 1;  $S^{Min}$  and  $S^{Max}$  được định nghĩa là tập hợp giới hạn nhỏ nhất và giới hạn lớn nhất của các biến điều khiển trong nghiệm đề xuất cho vấn đề tối ưu, và chúng được mô tả giống công thức (2.2 và 2.3).

$$S^{Max} = [Va_v^{Max}]; v = 1, \dots, N_{var} \quad (2.2)$$

$$S^{Min} = [Va_v^{Min}]; v = 1, \dots, N_{var} \quad (2.3)$$

Trong đó,  $Va_v^{Max}$  and  $Va_v^{Min}$  là giá trị lớn nhất và nhỏ nhất của biến điều khiển thứ  $v$  trong giới hạn được xác định trước trong không gian tìm kiếm mà phụ thuộc vào vấn đề tối ưu cụ thể. Sau khi các nghiệm ban đầu được tạo ra một cách ngẫu nhiên, chất lượng của từng nghiệm được tính toán bằng cách sử dụng hàm mục tiêu và hàm phạt. Nghiệm có mức độ phù hợp tốt nhất trong mỗi nhóm sẽ được xác định nhằm phục vụ việc tính toán để phát ra các nghiệm mới ở thế hệ tiếp theo.

Vị trí của các nghiệm mới trong mỗi nhóm được cập nhật theo công thức khởi tạo nghiệm thế hệ thứ nhất mà được mô tả trong công thức toán học như bên dưới [26]:

$$S_{pk,ce}^{New} = S_{pk,ce} + rd_1 \cdot (S_{bestPk,pk} - S_{rd1,pk}) + rd_2 \cdot (S_{cent,pk} - S_{rd2,pk}); \quad (2.4)$$

$$pk = 1, 2, 3 \dots, N_{pk} \ \& \ ce = 1, 2, 3 \dots, N_{ce}$$

Trong công thức (2.4),  $S_{rd1,pk}$  and  $S_{rd2,pk}$  là hai nghiệm mà được lấy một cách ngẫu nhiên từ nhóm thứ  $pk$ , và  $S_{bestPk,pk}$  và  $S_{cent,pk}$  là nghiệm tốt nhất của nhóm và nghiệm trung tâm của nhóm thứ  $pk$  mà đại diện cho xu hướng văn hóa di chuyên của nhóm. Trong đó,  $S_{cent,pk}$  có thể xác định được bằng cách áp dụng công thức (2.5).

$$S_{cent,pk} = \begin{cases} Va_{v,cent1}, & \text{nếu } N_{ce} \text{ số lẻ} \\ Va_{v,cent2}, & \text{nếu } N_{ce} \text{ số chẵn} \end{cases} \quad (2.5)$$

Trong công thức (3.5),  $Va_{v,cent1}$  và  $Va_{v,cent2}$  được định nghĩa là các biến trung tâm, nơi  $Va_{v,cent1}$  sẽ được gán là giá trị của biến thứ  $v$  ở vị trí  $\frac{N_{ce}+1}{2}$  nếu  $N_{ce}$  là một số lẻ và  $Va_{v,cent2}$  sẽ là giá trị của biến thứ  $v$  ở vị trí trung bình giữa  $\frac{N_{ce}}{2}$  và  $\frac{N_{ce}}{2} + 1$  nếu  $N_{ce}$  là số chẵn. Một cách rõ ràng, như thể hiện trong công thức (2.4), các nghiệm mới được tạo ra được định hướng di chuyển với hai bước nhảy  $rd \cdot (S_{bestPk,pk} - S_{rd1,pk})$  và  $rd \cdot (S_{cent,pk} - S_{rd2,pk})$ . Trong khi bước nhảy của  $rd \cdot (S_{bestPk,pk} - S_{rd1,pk})$  có xu hướng tiếp cận nghiệm tốt nhất cục bộ trong nhóm, thì bước nhảy còn lại của  $rd \cdot (S_{cent,pk} - S_{rd2,pk})$  tìm kiếm xung quanh nghiệm ở giữa trong nhóm để tìm nghiệm khả thi. Bằng cách khai thác các nghiệm xung quanh các nghiệm tốt nhất và trung bình trong mỗi nhóm, hiệu suất của thuật toán có thể được cải thiện đáng kể. Các nghiệm mới được tạo ra đều sẽ được đánh giá chất lượng bằng hàm đánh giá. Dựa trên giá trị đánh giá được tính toán cho từng nghiệm, nghiệm tốt nhất trong mỗi nhóm nghiệm sẽ được xác định.

Theo quy luật sinh tử giả định cho cộng đồng chó sói trong tự nhiên, trong thuật toán này, mỗi nhóm chỉ có một con sói hay một nghiệm mới được tạo ra và một nghiệm hiện hữu bị mất đi. Đây được coi là sự khởi tạo nghiệm mới thứ hai và có thể được tạo ra bằng cách áp dụng cơ chế ngẫu nhiên hóa như sau [26]:

$$S_{pk}^{New} = \begin{cases} S_{rd3,pk}, & \text{nếu } rd < 1/N_{va} \\ S_{rd4,pk}, & \text{nếu } 1/N_{va} \leq rd < 0.5 + 1/N_{va} \\ S_{rd5,pk}, & \text{trường hợp khác} \end{cases} \quad (2.6)$$

Một cách rõ ràng, có ba nghiệm được tạo ngẫu nhiên theo các điều kiện lựa chọn như công thức (2.6) đã trình bày.  $S_{rd3,pk}$  và  $S_{rd4,pk}$  là hai nghiệm được tạo ra trong mỗi nhóm mà được chọn ngẫu nhiên từ việc lấy các biến có sẵn trong nhóm ngẫu nhiên. Thêm vào đó,  $S_{rd5,pk}$  cũng được tạo ra một cách ngẫu nhiên trong giới hạn của  $S^{Min}$  và  $S^{Max}$ . Việc phát ngẫu nhiên nghiệm mới trong vùng tìm kiếm ở mỗi nhóm sẽ mang lại nhiều cơ hội hơn cho việc tìm kiếm nghiệm mới hứa hẹn chất lượng cao hơn. Cũng giống như cơ chế chọn lọc tự nhiên, nghiệm mới tạo ra sẽ

được so sánh với nghiệm kém chất lượng nhất trong nhóm và nghiệm tốt hơn sẽ được giữ lại (hay nghiệm có chất lượng kém hơn sẽ bị loại bỏ). Nhờ loại bỏ nghiệm kém chất lượng nhất trong mỗi nhóm, chất lượng chung của quần thể hiện tại cũng được cải thiện.

Ngoài ra, để mô phỏng sự di chuyển từ đàn sói này sang đàn sói khác, hành động trao đổi nghiệm được thực hiện. Hai nghiệm được chọn ngẫu nhiên từ hai nhóm ngẫu nhiên khác nhau trong cộng đồng sẽ được hoán đổi vị trí nếu điều kiện của công thức (2.7) được thỏa mãn [26].

$$\tau < \frac{10^{-2}}{2} \times N_{ce}^2 \quad (2.7)$$

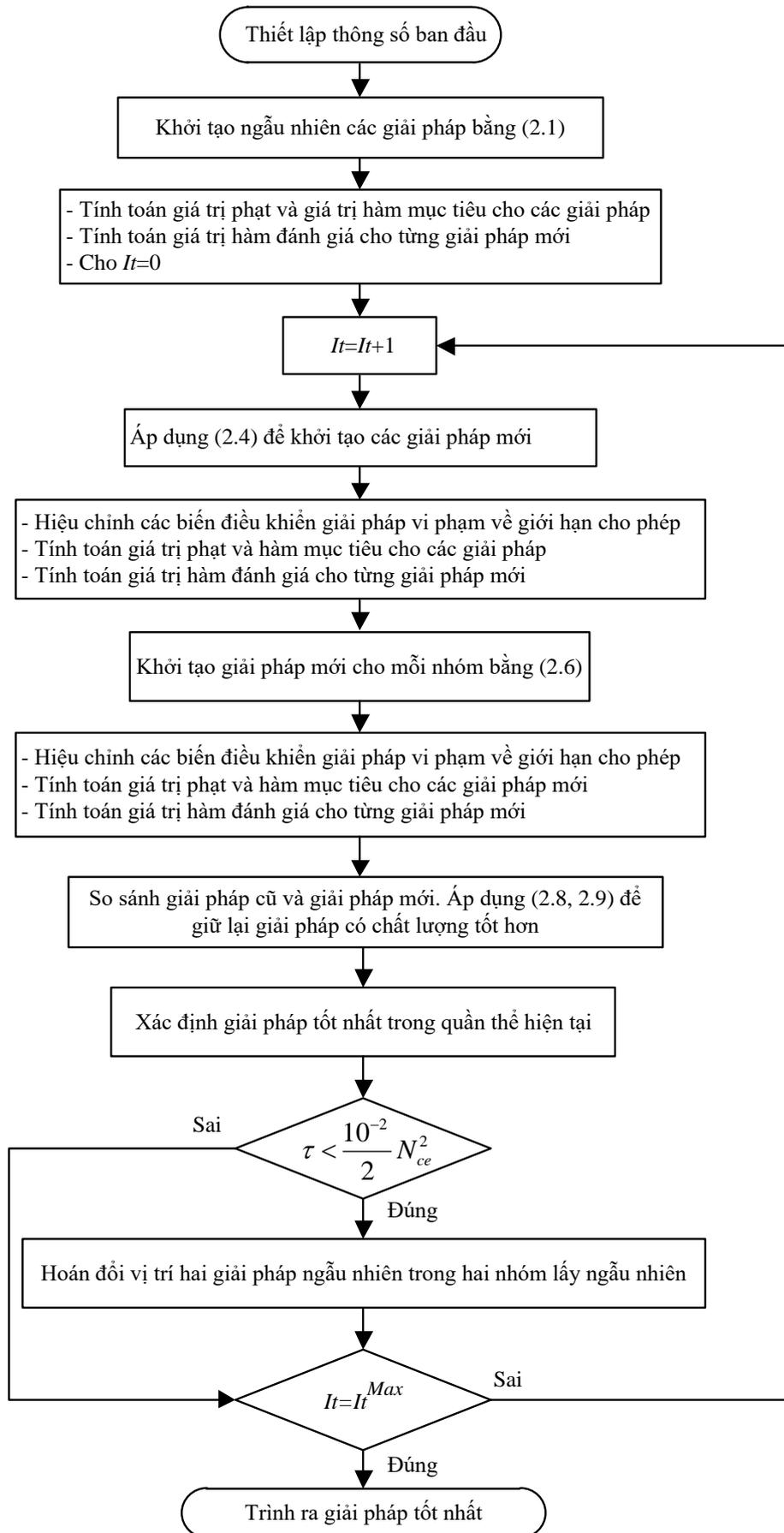
Ở đây,  $\tau$  là một số được tạo ngẫu nhiên trong khoảng từ 0 đến 1. Rõ ràng, tốc độ di cư của chó sói tỷ lệ thuận với số lượng quần thể trong mỗi đàn. Số lượng chó sói trong mỗi nhóm càng lớn thì xác suất xảy ra hành động trao đổi sói trong nhóm càng cao.

Thông qua kết quả đánh giá tất cả các nghiệm bằng cách sử dụng hàm đánh giá, vị trí cũng như giá trị đánh giá của các nghiệm tốt được cập nhật theo quy luật sau:

$$S_{pk,ce} = \begin{cases} S_{pk,ce}^{New} & \text{nếu } SF_{pk,ce}^{New} < SF_{pk,ce} \\ S_{pk,ce} & \text{các trường hợp khác} \end{cases}; pk = 1, 2, \dots, N_{pk}; ce = 1, 2, \dots, N_{ce} \quad (2.8)$$

$$SF_{pk,ce} = \begin{cases} SF_{pk,ce}^{New} & \text{nếu } SF_{pk,ce}^{New} < SF_{pk,ce} \\ SF_{pk,ce} & \text{các trường hợp khác} \end{cases}; pk = 1, 2, \dots, N_{pk}; ce = 1, 2, \dots, N_{ce} \quad (2.9)$$

Cuối cùng, nghiệm tốt nhất trong cộng đồng cũng được xác định bằng cách so sánh các giá trị đánh giá của chúng. Lưu đồ áp dụng COA để giải bài toán tối ưu có thể được trình bày ngắn gọn như Hình 2.2.



**Hình 2.2:** Lưu đồ ứng dụng COA để giải quyết cho bài toán tối ưu.

## 2.7 Modified Coyote Optimization Algorithm

### 2.7.1 Sự cải tiến trong công thức khởi tạo nghiệm mới thứ nhất

So với các thuật toán meta-heuristic khác, đặc điểm khác biệt nhất của COA là sử dụng nghiệm trung tâm  $S_{cent,pk}$  như đã trình bày trong biểu thức (2.4). Trong nghiên cứu ban đầu của COA ở [26], nghiệm tổng thể của các hàm benchmark là nghiệm trung tâm bao gồm các biến có xu hướng ở gần giá trị 0. Trong trường hợp đó, việc sử dụng nghiệm trung tâm là lựa chọn tốt nhất và COA dễ dàng đạt được hiệu quả cao trong việc giải quyết vấn đề cho các hàm benchmark. Tuy nhiên, trong nhiều bài toán thực tế, các nghiệm tối ưu có thể có giá trị khác 0. Vì vậy, việc lựa chọn và sử dụng nghiệm trung tâm không thể đạt được hiệu quả tích cực trong việc tìm ra nghiệm tốt. Để khắc phục nhược điểm này, nghiệm tốt nhất trong dân số hiện tại được áp dụng nhằm thay thế nghiệm trung tâm và điều này được coi là lựa chọn khả thi. Sự khởi tạo nghiệm mới trong MCOA đầu tiên được xây dựng theo công thức toán học (2.10) như sau:

$$S_{pk,ce}^{New} = S_{pk,ce} + rd_1 \cdot (S_{bestPk,pk} - S_{rd1,pk}) + rd_2 \cdot (S_{bestPop} - S_{rd2,pk}); \quad (2.10)$$
$$pk = 1, 2, 3 \dots, N_{pk} \ \& \ ce = 1, 2, 3 \dots, N_{ce}$$

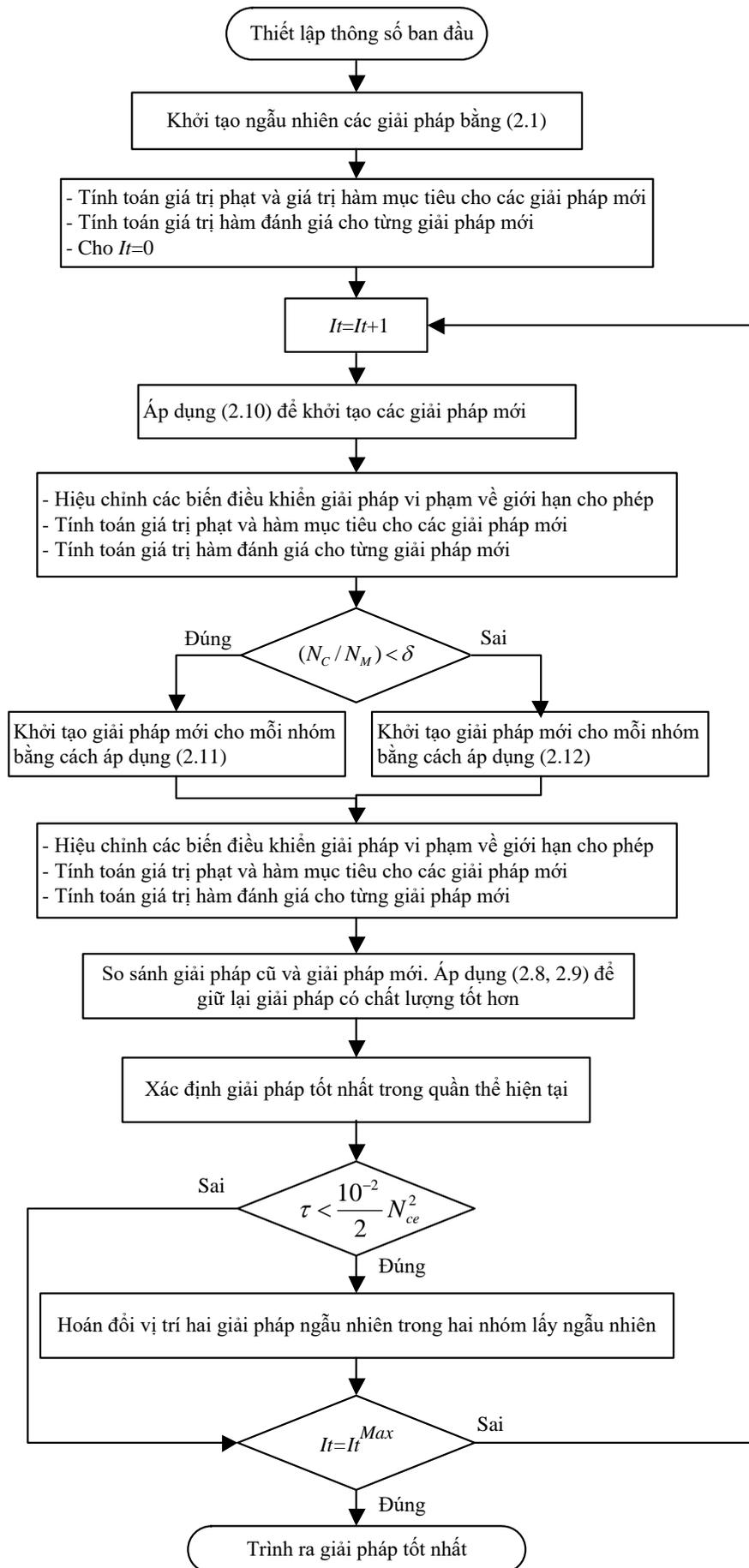
### 2.7.2 Sự cải tiến trong công thức khởi tạo nghiệm mới thứ hai

Trong sự khởi tạo nghiệm mới thứ hai bằng cách sử dụng công thức (2.6), các biến mới thu được là kết quả của ba lựa chọn ngẫu nhiên. Trong đó, hai nghiệm đầu là từ hai nghiệm có sẵn và một nghiệm sau thì được lựa chọn ngẫu nhiên trong giới hạn tối thiểu và tối đa của không gian tìm kiếm. Một cách rõ ràng, cả 3 nghiệm này không theo bất kỳ một xu hướng nào nên rất khó có thể để tìm ra nghiệm khả thi có hiệu quả tốt. Kết quả là đa phần nghiệm được tạo ở mỗi nhóm bằng cách áp dụng công thức (2.6) có chất lượng kém, đặc biệt trong việc giải các bài toán phức tạp với không gian tìm kiếm rộng lớn. Để khắc phục nhược điểm còn lại này, cần đề xuất xác định những hướng tích cực để tăng khả năng tạo ra nghiệm mới có chất lượng tốt cho từng nhóm. Do đó, công thức (2.6) được loại bỏ và thay thế bằng công thức (2.11) và công thức (2.12) như thể hiện bên dưới.

$$S_{pk}^{New} = S_{bestPop} + rd_3 \cdot (S_{bestPop} - S_{best,r1}) + rd_4 \cdot (S_{bestPop} - S_{best,r2}) \quad (2.11)$$

$$S_{pk}^{New} = S_{bestPop} + rd_3 \cdot (S_{bestPop} - S_{best,r1}) + rd_4 \cdot (S_{bestPop} - S_{best,r2}) + rd_5 \cdot (S_{bestPop} - S_{best,r3}) \quad (2.12)$$

Trong khi  $S_{bestPop}$  là nghiệm tốt nhất của quần thể hiện tại,  $S_{best,r1}$ ,  $S_{best,r2}$  và  $S_{best,r3}$  là nghiệm tốt nhất trong mỗi nhóm mà được lựa chọn một cách ngẫu nhiên trong các nhóm có sẵn. Chọn nghiệm tốt nhất từ mỗi nhóm cho các công thức (2.11 và 2.12) mang lại cơ hội tốt hơn so với việc chọn nghiệm ngẫu nhiên như được đề xuất bởi công thức (2.6) của thuật toán gốc. Các nghiệm mới được tạo ra có xu hướng di chuyển xung quanh nghiệm tốt nhất trong quần thể hiện tại để tìm ra các nghiệm khả thi hơn. Điều này đã góp phần rất lớn vào việc nâng cao chất lượng của nghiệm mới nói chung. Ngoài ra, để tránh rơi vào bẫy cục bộ nhiều nhất có thể, việc tạo nghiệm mới ở giai đoạn này được chia thành hai công thức với số bước nhảy khác nhau gồm công thức (2.11) và công thức (2.12). Trong khi công thức (2.11) chỉ sử dụng hai bước nhảy thì công thức (2.12) sử dụng thêm một bước nhảy bổ sung nữa để xác định vị trí đủ xa so với nghiệm tốt nhất ( $S_{bestPop}$ ). Điều này có thể mở ra những cơ hội mới cho việc tìm kiếm các nghiệm mới trong vùng tìm kiếm rộng lớn và tránh bỏ sót các nghiệm có chất lượng tốt. Vì vậy, điều quan trọng là phải xác định được điều kiện để lựa chọn công thức nghiệm mới phù hợp nhằm nâng cao hiệu quả của thuật toán. Để quyết định thời điểm thích hợp để áp dụng công thức nào trong việc tính toán nghiệm mới thứ hai, tỉ lệ giữa số cặp nghiệm gần ( $N_C$ ) và số cặp nghiệm tối đa ( $N_M$ ) được thiết lập. Giá trị tính toán của tỉ lệ này được so sánh với ngưỡng xác định trước ( $\delta$ ). Nếu kết quả của  $N_C/N_M$  nhỏ hơn  $\delta$  thì công thức (2.11) được chọn và ngược lại thì công thức (2.12) được sử dụng. Giá trị  $\delta$  này có sự phụ thuộc vào bài toán tối ưu, nên giá trị của nó cũng sẽ được tiến hành khảo sát trong giới hạn từ 0.2 đến 1.0 với mỗi bước là 0.2, để xác định giá trị phù hợp nhất cho mỗi bài toán. Lưu đồ áp dụng MCOA để giải bài toán tối ưu có thể mô tả ngắn gọn như hình 2.3.



**Hình 2.3:** Lưu đồ ứng dụng MCOA để xác định nghiệm cho bài toán tối ưu.

## 2.8 Tổng kết

- COA là một thuật toán meta-heuristic mạnh với độ ổn định tốt. Thuật toán này đã được ứng dụng một cách rộng rãi trong việc giải quyết các vấn đề tối ưu khác nhau trong thế giới thực.
- Mặc dù thuật toán COA được đánh giá là tích cực trong nhiều vấn đề tối ưu nhưng vẫn tồn tại các giới hạn mà ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả của thuật toán và điều này cần phải khắc phục. Trong nghiên cứu này, những nhược điểm của hai công thức tạo nghiệm mới từ COA đã được phân tích, và những cải tiến trong các công thức tính toán nghiệm thứ nhất và thứ hai của việc tạo nghiệm mới đã được thực hiện. Những cải tiến này đã tạo ra phương pháp mới gọi là MCOA mà đã nâng cao đáng kể tính hiệu quả và ổn định của thuật toán trong việc giải các bài toán tối ưu khác nhau.

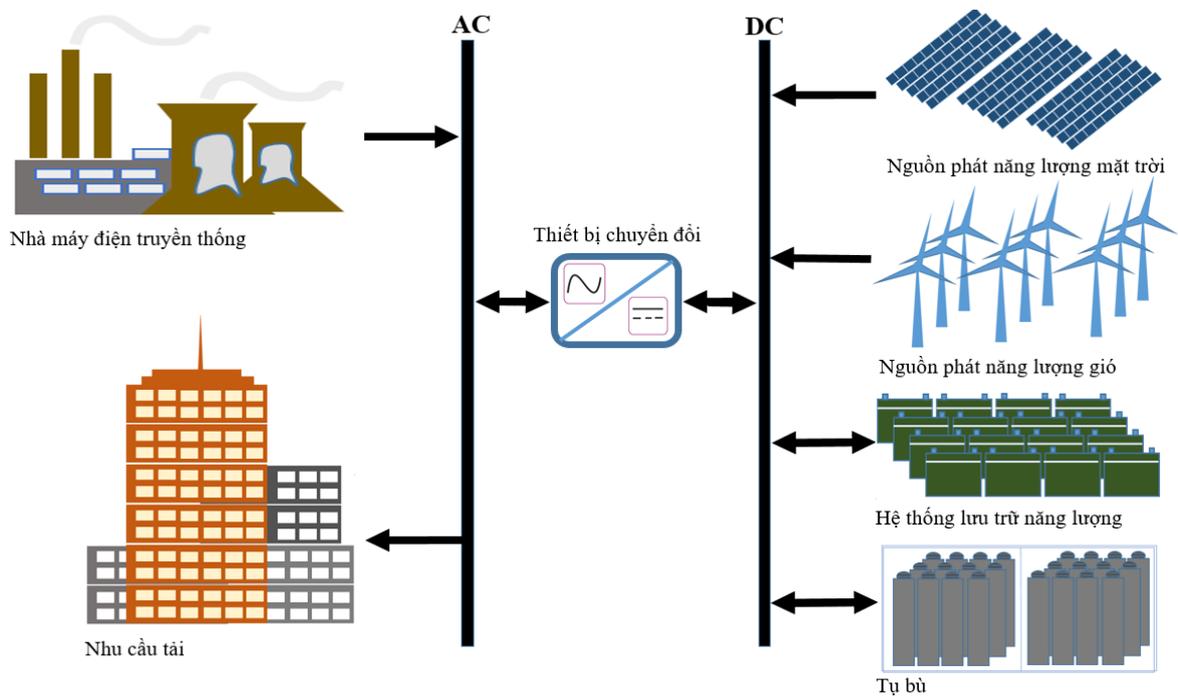
# **CHƯƠNG 3: ÁP DỤNG THUẬT TOÁN TỐI ƯU XÁC ĐỊNH VỊ TRÍ VÀ CÔNG SUẤT LẮP ĐẶT CHO CÁC NGUỒN PHÁT PHÂN TÁN TRONG HỆ THỐNG PHÂN PHỐI BA PHA CÂN BẰNG**

## **3.1 Giới thiệu**

Chương này trình bày việc ứng dụng thuật toán tối ưu Modified Coyote Optimization Algorithm (MCOA) cho việc xác định vị trí và công suất lắp đặt của đa dạng các nguồn phát phân tán trong hệ thống phân phối ba pha cân bằng. Mục đích chính của việc lắp đặt phù hợp các nguồn phát phân tán là nhằm giảm thiểu tối đa chi phí trong việc đầu tư và vận hành hệ thống. Bên cạnh đó, các ràng buộc kỹ thuật về điện áp nút, dòng điện nhánh, chỉ số sóng hài và mức độ thâm nhập của các nguồn phát cũng cần được thỏa mãn một cách đầy đủ. Chi tiết về mô hình bài toán cho việc tìm kiếm vị trí và công suất tối ưu cho việc lắp đặt các nguồn phát phân tán được trình bày như mục bên dưới.

## **3.2 Mô tả bài toán**

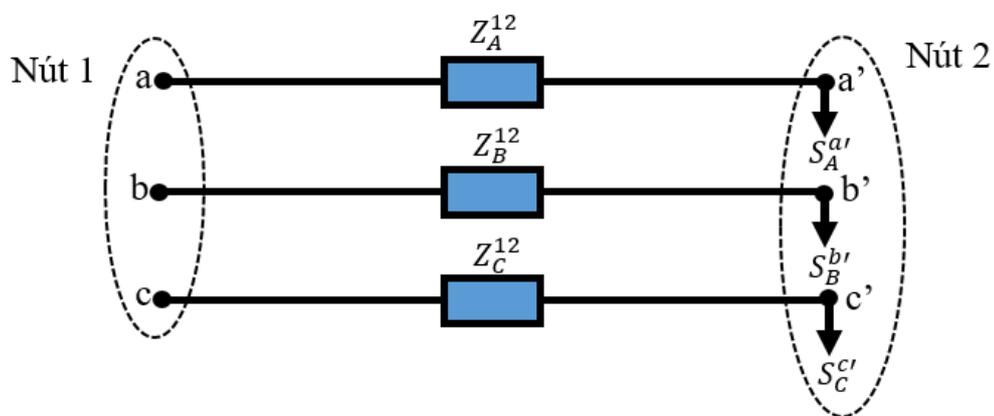
Nghiên cứu xem xét sự kết nối của các nguồn phát năng lượng nối lưới gồm nguồn phát năng lượng gió (WFs), nguồn phát năng lượng mặt trời (PFs), tụ bù (CB) và hệ thống lưu trữ năng lượng (BESS) trong hệ thống phân phối như Hình 3.1 đã minh họa. Mục tiêu của bài toán là tập trung vào việc xem xét tính kinh tế bằng việc giảm thiểu tối đa tổng chi phí của hệ thống kết nối nguồn phát phân tán dài hạn nhưng vẫn đảm bảo các tiêu chí kỹ thuật được thỏa mãn hoàn toàn. Trong nghiên cứu này, mục tiêu cụ thể là giảm thiểu tổng chi phí đầu tư, vận hành và bảo trì (O&M) cũng như chi phí mua năng lượng từ lưới điện chính cho nhu cầu tải trong điều kiện xem xét nhu cầu phụ tải và nguồn phát thay đổi theo thời gian. Hệ thống phân phối chuẩn IEEE 69 nút được lựa chọn cho việc mô phỏng nghiên cứu và phương pháp Backward/Forward (BW/FW) được áp dụng để giải quyết vấn đề trào lưu công suất. Kết quả tốt nhất thu được từ thuật toán đề xuất được so sánh với các thuật toán khác để chứng minh tính hiệu quả của thuật toán trong việc giải quyết vấn đề tối ưu đang xem xét.



**Hình 3.1:** Hệ thống phân phối tích hợp các nguồn phát phân tán

### 3.2.1 Hệ thống phân phối ba pha cân bằng

Trong hệ thống ba pha cân bằng, một đường dây phân phối kết nối nút 1 và nút 2 với ba dây dẫn có cùng trở kháng và tải ở pha A, pha B và pha C tại nút nhận 2 như Hình 3.2. Ba trở kháng đường dây kết nối được biểu diễn dưới dạng  $Z_A^{12}$ ,  $Z_B^{12}$  và  $Z_C^{12}$ . Trong đó, mỗi trở kháng có hai phần: điện trở và điện kháng được thể hiện như trong công thức (3.1). Một cách tương tự, tải của các pha cũng được biểu thị dưới dạng  $S_A^{a'}$ ,  $S_B^{b'}$  và  $S_C^{c'}$  ở nút 2 như trong công thức (3.2).



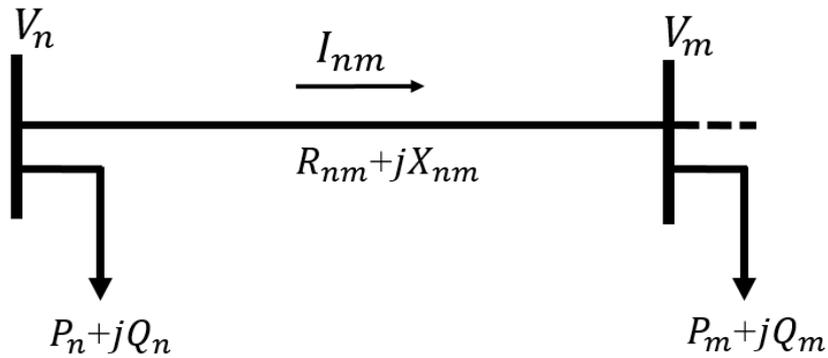
**Hình 3.2:** Đường dây phân phối ba pha

$$\begin{cases} Z_A^{12} = R_A^{12} + jX_A^{12} \\ Z_B^{12} = R_B^{12} + jX_B^{12} \\ Z_C^{12} = R_C^{12} + jX_C^{12} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\begin{cases} S_A^{a'} = P_A^{a'} + jQ_A^{a'} \\ S_B^{b'} = P_B^{b'} + jQ_B^{b'} \\ S_C^{c'} = P_C^{c'} + jQ_C^{c'} \end{cases} \quad (3.2)$$

### 3.2.2 Phương pháp Backward/Forward (BW/FW)

Nhiều nghiên cứu cũng đã chứng minh việc sử dụng phương pháp BW/FW trong việc giải quyết vấn đề trào lưu công suất do có nhiều đặc điểm nổi bật hơn các phương pháp khác như Newton-Rapshon và Gauss-Seidel về mặt thời gian tính toán và số bước lặp nhỏ cho sự hội tụ [48, 49]. Do đó, phương pháp BW/FW được đề xuất áp dụng trong nghiên cứu này. Trong BW/FW thì có 2 quá trình là Backward (BW) và Forward (FW). Trong quá trình BW, dòng điện nhánh được tính toán với điện áp được cập nhật bắt đầu từ nút cuối cùng di chuyển về phía nút gốc. Việc tính toán dòng công suất trong mỗi nhánh cũng được hiện trong quá trình truyền ngược này thông qua việc xem xét điện áp nút của các lần lặp trước đó.



**Hình 3.3:** Hệ thống hình tia hai nút

Giả sử hệ thống có 2 nút n và m như Hình 3.3, dòng điện nút và dòng điện trên nhánh giữa hai nút được xác định bởi công thức (3.3-3.5) [48].

$$I_n = \left( \frac{P_n + jQ_n}{V_n} \right)^* \quad (3.3)$$

$$I_m = \left( \frac{P_m + jQ_m}{V_m} \right)^* \quad (3.4)$$

$$I_{nm} = I_m + \sum I_{mr} \quad (3.5)$$

Trong đó,  $I_n$  là dòng nút n,  $I_m$  là dòng nút m,  $I_{nm}$  là dòng trên nhánh giữa nút n và m và  $I_{mr}$  là dòng trong các nhánh phát ra từ nút m.  $V_n$  và  $V_m$  là điện áp ở nút n và nút m.  $P_n, Q_n$  là công suất tác dụng và công suất phản kháng tải ở nút n, và  $P_m, Q_m$  là công suất tác dụng và phản kháng tải ở nút m.

Trong quá trình FW, mục đích chính của quá trình này là dùng để tính toán độ sụt điện áp theo sự cập nhật của dòng nhánh. Ở đây, điện áp nút được cập nhật bắt đầu từ nút gốc đến nút cuối cùng. Giá trị điện áp nút sau mỗi lần cập nhật được so sánh với giá trị trước đó của nó nhằm kiểm tra dung sai cho sự hội tụ. Quá trình lặp dừng lại khi tiêu chí hội tụ được thỏa mãn và đồng thời các tổn thất đường dây cũng được xác định [48]. Điện áp được tính toán từ nút gốc đến nút cuối như công thức (3.6):

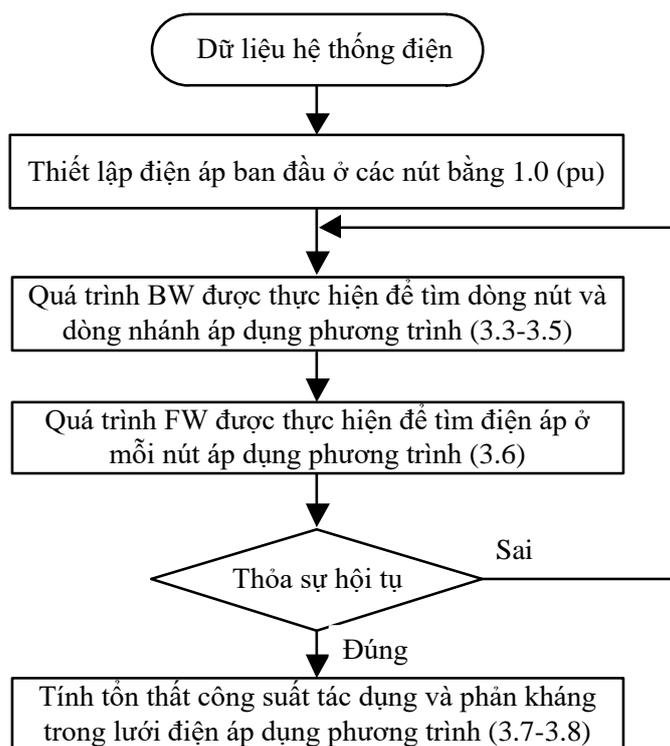
$$V_m = V_n - I_{nm}(R_{nm} + jX_{nm}) \quad (3.6)$$

Tổn thất công suất tác dụng ( $P_{loss}$ ) và phản kháng ( $Q_{loss}$ ) được tính toán bởi công thức (3.7) và (3.8).

$$P_{loss} = \sum R_{nm} \cdot I_{nm}^2 \quad (3.7)$$

$$Q_{loss} = \sum X_{nm} \cdot I_{nm}^2 \quad (3.8)$$

Trong các công thức (3.6-3.8),  $R_{nm}$  và  $X_{nm}$  là điện trở và điện kháng của dây dẫn nối giữa nút n và m. Quá trình áp dụng phương pháp BW/FW cho vấn đề trào lưu công suất được trình bày ngắn gọn bằng như Hình 3.4 [48]. Trong lưu đồ này, sự dừng vòng lặp khi một trong hai điều kiện được thỏa mãn gồm khi đạt được tổng số vòng lặp thiết lập hoặc sai số giữa hai vòng lặp liên tiếp thỏa điều kiện ( $e$ ),  $e < 10^{-4}$ .



**Hình 3.4:** Lưu đồ áp dụng phương pháp BW/FW

### 3.2.3 Hàm mục tiêu

Nhằm tăng tỉ trọng nguồn năng lượng sạch trong cơ cấu nguồn điện của quốc gia, giả sử dưới góc nhìn của đơn vị điện lực đang được giao đầu tư và thực hiện dự án tích hợp các nguồn phát phân tán tái tạo vào lưới điện hiện hữu để đảm bảo tính kinh tế và kỹ thuật trong vận hành hệ thống. Nghiên cứu này đề ra mục tiêu là giảm thiểu tổng chi phí từ việc đầu tư, bảo trì & vận hành lưới điện, và cùng với chi phí nhập khẩu điện từ lưới chính để tối đa trong việc tiết kiệm chi phí vận hành so với hệ thống ban đầu, bên cạnh việc đáp ứng đầy đủ các tiêu chí kỹ thuật khắt khe. Cụ thể cho nghiên cứu này thì tổng chi phí vận hành hệ thống mà có sự tích hợp đồng thời của WFs, PFs, CB và BESS sẽ bao gồm 1) chi phí đầu tư và O&M cho các nguồn phát phân tán nối lưới, 2) chi phí phát điện từ lưới chính cho nhu cầu tải và tổn thất trong hệ thống phân phối. Các chi phí này được giảm thiểu tối đa dưới sự xem xét các ràng buộc kỹ thuật. Hay nói cách khác, nghiệm tối ưu được tìm ra phải vừa mang tính kinh tế và đồng thời phải đáp ứng được các tiêu chí kỹ thuật cho việc vận hành hệ thống dài hạn. Các mục tiêu kinh tế được mô hình hóa trong công thức toán học như sau:

$$\text{Giảm tối đa } TC_{Total} = TC_{WF-PF-BESS-CB}^{Inv\&OM} + TC_{Grid}(\$) \quad (3.9)$$

Trong đó,  $TC_{Total}$  là tổng chi phí;  $TC_{WF-PF-BESS-CB}^{Inv\&OM}$  là các chi phí cho việc đầu tư và O&M cho WFs, PFs, BESS và CB;  $TC_{Grid}$  là chi phí phát điện từ lưới điện chính cho nhu cầu tải và tổn thất công suất hệ thống.

#### 3.2.3.1 Tổng chi phí cho việc đầu tư và O&M của các nguồn phát phân tán

$TC_{WF-PF-BESS-CB}^{Inv\&OM}$  là một phần quan trọng về mặt kinh tế mà cần phải xem xét để xác định lắp đặt phù hợp cho các nguồn phát điện phân tán vào hệ thống phân phối một cách tối ưu. Tổng chi phí trong nghiên cứu này bao gồm chi phí đầu tư một lần ở giai đoạn đầu của dự án và các chi phí O&M của các thành phần được kết nối trong suốt vòng đời của dự án. Chi phí này có thể được tính toán như sau:

$$TC_{WF-PF-BESS-CB}^{Inv\&OM} = TC_{PF} + TC_{WF} + TC_{BESS} + TC_{CB}(\$) \quad (3.10)$$

Trong công thức (3.10), các thành phần chi phí có thể được tìm ra từ các công thức như bên dưới:

$$TC_{PF} = \sum_{j=1}^{N_{PF}} (C_{PF}^{Cap} \cdot P_{PF,j}^{Rated}) + 365 \cdot \sum_{y=1}^{20} \sum_{h=1}^{24} \sum_{j=1}^{N_{PF}} (\theta_{y,h} \cdot C_{PF}^{O\&M} \cdot P_{PF,j,h,y}) (\$) \quad (3.11)$$

$$TC_{WF} = \sum_{i=1}^{N_{WF}} (C_{WF}^{Cap} \cdot P_{WF,i}^{Rated}) + 365 \cdot \sum_{y=1}^{20} \sum_{h=1}^{24} \sum_{i=1}^{N_{WF}} (\theta_y \cdot C_{WF}^{O\&M} \cdot P_{WF,j,h,y}) (\$) \quad (3.12)$$

$$TC_{BESS} = \sum_{k=1}^{N_{BESS}} (C_{BESS}^{Cap} \cdot E_{BESS,k}^{Rated}) + \sum_{y=1}^{20} \sum_{k=1}^{N_{BESS}} (\theta_y \cdot C_{BESS}^{O\&M} \cdot E_{BESS,k,y}^{Rated}) + \sum_{k=1}^{N_{BESS}} (C_{BESS}^{Aux} \cdot P_{BESS,k}^{Rated}) (\$) \quad (3.13)$$

$$TC_{CB} = \sum_{c=1}^{N_{CB}} (C_{CB}^{Cap} \cdot Q_{CB,c}^{Rated}) + \sum_{c=1}^{N_{CB}} (Loc_{CB,c}) (\$) \quad (3.14)$$

Nghiên cứu này đã giả sử vòng đời của dự án là 20 năm có tính đến sự biến đổi theo thời gian của tải và nguồn phát trong một ngày thông thường (tức là 24 giờ) và một năm có 365 ngày. Tuy nhiên, chi phí O&M được thanh toán khác nhau qua các năm, nên cần phải quy giá trị đồng tiền trong tương lai về giá trị hiện tại để thuận tiện cho việc đánh giá hiệu quả của dự án trong cả vòng đời. Do đó, hàm  $\theta_y$  được thêm vào hàm tính toán chi phí O&M và được xác định bởi (3.15) [50]:

$$\theta_y = \left( \frac{1}{1+dc} \right)^y \quad (3.15)$$

Trong đó,  $y$  được coi như là số năm xem xét trong vòng đời của dự án và  $dc$  là tỉ lệ chiết khấu.

### 3.2.3.2 Chi phí phát điện từ lưới điện chính

Nếu sản lượng điện phát ra từ các nguồn phát phân tán không đủ cung cấp cho nhu cầu phụ tải và tổn thất điện năng trên các nhánh trong hệ thống, thì lưới điện chính cần phải phát điện. Chi phí cho việc phát điện được tính ra như sau:

$$TC_{Grid} = 365 \times \sum_{y=1}^{20} \sum_{h=1}^{24} (\theta_y \cdot Pr_{h,y}^{Grid} \cdot P_{Sub,h,y}) (\$) \quad (3.16)$$

Trong đó,  $Pr_{h,y}^{Grid}$  (\$/MWh) là giá phát điện theo giờ của lưới điện chính,  $P_{Sub,h,y}$  (MW) là công suất tác dụng mà được cung cấp bởi lưới chính thông qua trạm biến áp ở giờ thứ  $h$  và năm thứ  $y$  cho các tải tiêu thụ và tổn thất. Trong trường hợp này, tổn thất công suất tác dụng ( $P_b$ ) ở mỗi nhánh trong hệ thống có thể được xác định bởi:

$$P_b = 3 \cdot I_b^2 R_b \quad (3.17)$$

Trong đó,  $R_b$  và  $I_b$  là trở kháng đường dây và dòng điện nhánh thứ  $b$  trong hệ thống.

### 3.2.4 Các ràng buộc cho hàm mục tiêu

Để đáp ứng các tiêu chí kỹ thuật sau khi có sự kết nối của các nguồn phát phân tán vào lưới thì các ràng buộc kỹ thuật phải được thiết lập trong giới hạn cho phép.

### 3.2.4.1 Ràng buộc về cân bằng công suất

Để giữ tần số và điện áp hệ thống ở trạng thái ổn định, tổng công suất phát phải bằng tổng công suất tiêu thụ [51]. Khi kết nối các nguồn phát trong hệ thống phân phối, tổng công suất phát là tổng công suất được cung cấp bởi lưới điện chính và công suất do PFs và WFs tạo ra. Thêm vào đó, trong nghiên cứu này, hệ thống lưu trữ năng lượng (BESS) được xem xét tích hợp và có thể ở trạng thái nạp hoặc xả năng lượng tới lưới điện. Như vậy, công thức cân bằng công suất tác dụng nên được chia thành hai công thức tương ứng với hai trạng thái của BESS và được thể hiện như sau:

Công thức cân bằng công suất ở trạng thái xả năng lượng của BESS:

$$P_{Sub,h,y} + \sum_{j=1}^{N_{PF}} P_{PF,j,h,y} + \sum_{i=1}^{N_{WF}} P_{WF,i,h,y} + \sum_{k=1}^{N_{BESS}} P_{BESS,k,h,y}^{DisCh} = \sum_{b=1}^{N_b} P_{b,h,y} + \sum_{d=1}^{N_d} P_{d,h,y} \quad (3.18)$$

Công thức cân bằng công suất ở trạng thái nạp năng lượng của BESS:

$$P_{Sub,h,y} + \sum_{j=1}^{N_{PF}} P_{PF,j,h,y} + \sum_{i=1}^{N_{WF}} P_{WF,i,h,y} = \sum_{b=1}^{N_b} P_{b,h,y} + \sum_{d=1}^{N_d} P_{d,h,y} + \sum_{k=1}^{N_{BESS}} P_{BESS,k,h,y}^{Ch} \quad (3.19)$$

Công thức cân bằng công suất phản kháng:

$$Q_{Sub,h,y} + \sum_{i=1}^{N_{WF}} Q_{WF,i,h,y} + \sum_{j=1}^{N_{PF}} Q_{PF,j,h,y} + \sum_{c=1}^{N_{CB}} Q_{CB,c,h,y} = \sum_{b=1}^{N_b} Q_{b,h,y} + \sum_{d=1}^{N_d} Q_{d,h,y} \quad (3.20)$$

Trong công thức trên,  $Q_{PF,j,h,y}$  và  $Q_{WF,i,h,y}$  có thể được xác định bởi công thức (3.21) và (3.22) cho việc phát công suất phản kháng:

$$Q_{PF,j,h,y} = P_{PF,j,h,y} \times \beta_{PF,j}; \text{ với } \beta_{PF,j} = \tan(\cos^{-1}(Pf_{PF,j})) \quad (3.21)$$

$$Q_{WF,i,h,y} = P_{WF,i,h,y} \times \beta_{WF,i}; \text{ với } \beta_{WF,i} = \tan(\cos^{-1}(Pf_{WF,i})) \quad (3.22)$$

### 3.2.4.2 Giới hạn điện áp nút

Điện áp nút sẽ có sự thay đổi nhiều khi các nguồn phát phân tán được tích hợp tại các nút của hệ thống. Vì vậy, tất cả giá trị của điện áp nút phải được giữ trong giới hạn cho phép. Theo tiêu chuẩn BS EN 50160, tất cả các tải nên được vận hành trong phạm vi điện áp từ 0.90 pu đến 1.10 pu. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này, điện áp được giữ trong phạm vi nghiêm ngặt hơn là từ 0.95 pu đến 1.05 pu giống như đề

xuất của nhiều nghiên cứu [52, 53]. Sự ràng buộc của điện áp được biểu diễn dưới dạng toán học như sau:

$$V^{Min} \leq V_{s,h,y} \leq V^{Max}, s = 1, 2, \dots, N_b, h = 1, 2, \dots, N_h, y = 1, 2, \dots, N_y \quad (3.23)$$

### 3.2.4.3 Giới hạn dòng điện nhánh

Khi các nguồn phân tán thâm nhập vào hệ thống phân phối truyền thống, dòng điện trên các nhánh phân phối có thể thấp hơn hoặc cao hơn dòng điện trên hệ thống ban đầu. Do đó, dòng điện của các nhánh nên được giữ trong giới hạn cho phép [51]:

$$I_{b,h,y} \leq I_{b,h,y}^{Max}; b = 1, 2, \dots, N_b \quad (3.24)$$

### 3.2.4.4 Giới hạn nhiễu sóng hài

Sự biến dạng sóng hài có thể gây ra những tác động không mong muốn như tăng dòng điện, tăng tổn thất, suy giảm chất lượng điện, tăng nhiệt độ và giảm tuổi thọ của các thiết bị điện [54]. Vì vậy, sóng hài được coi là một trong những hạn chế mà cần phải né tránh. Hai chỉ số đại diện mà phản ánh sự biến dạng sóng hài là tổng độ méo hài và độ méo hài riêng lẻ. Theo IEEE Std. 519, giới hạn tối đa cho phép của hai thông số này là 3% và 5%, nên tiêu chuẩn này được áp dụng để trở thành ràng buộc về sự nhiễu sóng hài [55].

$$THD^{Max} \geq THD_{s,h,y}; s=1, 2, \dots, N_b, h = 1, 2, \dots, N_h, o = 2, \dots, Hr \quad (3.25)$$

$$IHD^{Max} \geq IHD_{s,h,y}^o; s=1, 2, \dots, N_b, h = 1, 2, \dots, N_h, o = 2, \dots, Hr \quad (3.26)$$

Trong đó, giá trị  $THD_{s,h,y}$  có thể được xác định bởi công thức (3.27) và giá trị  $IHD_{s,h,y}^{Hr}$  có thể được tìm ra bởi công thức (3.28) như bên dưới [55]:

$$THD_{s,h,y}(\%) = \left[ \frac{\sqrt{\sum_{o=2}^{Hr} (V_{s,h,y,o})^2}}{V_{s,h,y}^1} \right] \times 100 \quad (3.27)$$

$$IHD_{s,h,y}^o(\%) = \left[ \frac{V_{s,h,y,o}}{V_{s,h,y}^1} \right] \times 100 \quad (3.28)$$

### 3.2.4.5 Giới hạn công suất nạp và xả của BESS

Giới hạn công suất nạp và xả cho hệ thống lưu trữ năng lượng nên tuân theo ràng buộc như bên dưới cho từng giai đoạn hoạt động:

$$P_{BESS}^{Rated} \cdot \varepsilon^{Ch} \geq P_{BESS,k,h}^{Ch} \geq 0 \quad (3.29)$$

$$-P_{BESS}^{Rated} \cdot \varepsilon^{DisCh} \leq P_{BESS,k,h}^{DisCh} \leq 0 \quad (3.30)$$

Trong đó,  $\varepsilon^{Ch}$  and  $\varepsilon^{DisCh}$  là hiệu suất nạp và xả của BESS;  $P_{BESS,k,h}^{Ch}$  và  $P_{BESS,k,h}^{DisCh}$  là công suất nạp và xả ở giờ thứ  $h$  của BESS thứ  $k$ .

#### 3.2.4.6 Giới hạn dung lượng của BESS

Dung lượng của BESS ở mỗi giờ nên được xác định bằng việc áp dụng công thức (3.31). Trong đó,  $\Delta E_{BESS}$  là lượng dung lượng thay đổi ở hai thời điểm liên tiếp nhau và nó có thể nhận giá trị âm (hoặc dương) tùy thuộc vào trạng thái của BESS đang xả (hoặc nạp). Để hạn chế việc hủy hoại về vật lý cho pin thì dung lượng lưu trữ ở mỗi thời điểm phải nằm trong giới hạn cho phép nhỏ nhất ( $E_{BESS}^{Min}$ ) và lớn nhất ( $E_{BESS}^{Max}$ ) của BESS. Do đó, giới hạn này được thiết lập với tỉ lệ 20% và 90% của dung lượng định mức [38].

$$E_{BESS,h} = E_{BESS,h-1} + \Delta E_{BESS} \quad (3.31)$$

$$E_{BESS}^{Min} \leq E_{BESS,h} \leq E_{BESS}^{Max} \quad (3.32)$$

Bên cạnh đó, năng lượng ở giai đoạn bắt đầu của một ngày hay năng lượng ban đầu ( $E_{BESS,0}$ ) nên bằng năng lượng ở cuối ngày ( $E_{BESS,24}$ ) để đảm bảo BESS có thể tiếp tục cho sự hoạt động ở ngày tiếp theo mà không có bất kỳ sự vi phạm nào.

$$E_{BESS,0} = E_{BESS,24} \quad (3.33)$$

#### 3.2.4.7 Giới hạn sự thâm nhập của WFs, PFs và CB

Sự thâm nhập của WFs, PFs và CB nên được thiết lập trong giới hạn xác định trước như sau:

$$P_{PF}^{Min} \leq P_{PF,j}^{Rated} \leq P_{PF}^{Max}; j = 1, 2, \dots, N_{PF} \quad (3.34)$$

$$P_{WF}^{Min} \leq P_{WF,i}^{Rated} \leq P_{WF}^{Max}; i = 1, 2, \dots, N_{WF} \quad (3.35)$$

$$Q_{CB}^{Min} \leq Q_{CB,c}^{Rated} \leq Q_{CB}^{Max}; c = 1, 2, \dots, N_{CB} \quad (3.36)$$

### 3.3 Áp dụng phương pháp đề xuất để giải quyết vấn đề tối ưu

#### 3.3.1 Khởi tạo nghiệm ban đầu

Mỗi nghiệm được phát ra bao gồm tập hợp các biến đại diện cho mỗi phần tử mà cần tìm kiếm như ma trận (3.37).

$$S = \begin{bmatrix} S_{11}, & S_{12}, & S_{13}, & \dots, & S_{1(N_{var}-1)}, & S_{1N_{var}} \\ S_{21}, & S_{22}, & S_{23}, & \dots, & S_{2(N_{var}-1)}, & S_{2N_{var}} \\ & & & \vdots & & \\ S_{N_{po}1}, & S_{N_{po}2}, & S_{N_{po}3}, & \dots, & S_{N_{po}(N_{var}-1)}, & S_{N_{po}N_{var}} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Trong đó,  $N_{var}$  là số lượng các biến trong mỗi nghiệm và  $N_{po}$  là số lượng nghiệm trong mỗi sự phát dân số. Trong ma trận (3.37), vị trí và công suất lắp đặt của WFs và PFs là các biến thuộc tập nghiệm. Bên cạnh đó, nghiên cứu này cũng xem xét sự phát/ tiêu thụ công suất tối ưu từ BESS nên vị trí và công suất phát/ tiêu thụ ở mỗi thời điểm cũng là các biến trong tập nghiệm mà cần xác định. Trong trường hợp này, nghiên cứu chỉ tìm kiếm vị trí lắp đặt phù hợp cho tụ bù tương với công suất phát được tính toán ở mỗi thời điểm khác nhau nhằm duy trì hệ số công suất của hệ thống luôn lớn hơn hoặc bằng 0.9 để hạn chế sự ảnh hưởng của công suất phản kháng lên hệ thống hiện hữu. Do đó, biến cuối cùng trong mỗi nghiệm là đại diện cho vị trí của tụ bù. Công suất phát của tụ bù được xác định trong mỗi thời điểm phụ thuộc vào sự thay đổi của nhu cầu tải và ngõ ra công suất nguồn phát nối lưới, và lượng công suất này cho tụ bù được xác định dựa theo công thức tính toán trong nghiên cứu [56]. Các phần tử trong nghiệm ban đầu mà các thuật toán phát ra như (3.37) phải được giữ trong giới hạn xác định trước của  $S^{Min}$  và  $S^{Max}$  như (3.38) và (3.39):

$$S^{Min} = [L_i^{Min}, P_i^{Min}, L_j^{Min}, P_j^{Min}, L_{BESS,k}^{Min}, P_{BESS,k,h}^{Min}, L_c^{Min}] \quad (3.38)$$

$$S^{Max} = [L_i^{Max}, P_i^{Max}, L_j^{Max}, P_j^{Max}, L_{BESS,k}^{Max}, P_{BESS,k,h}^{Max}, L_c^{Max}] \quad (3.39)$$

Trong sự phát các nghiệm ban đầu, các biến trong mỗi nghiệm được tạo ra một cách ngẫu nhiên trong vùng xác định trước như các công thức (3.38 và 3.39). Sau đó, phương pháp BW/FW được sử dụng nhằm giải quyết vấn đề trào lưu công suất để phục vụ việc tính toán giá trị hàm mục tiêu và hàm phạt. Cuối cùng, giá trị của hàm đánh giá mà được kết hợp giữa hàm mục tiêu và hàm phạt được thiết lập như sau:

$$SF_{pk,ce} = TC_{Total,pk,ce} + \sigma_V \cdot \sum_{s=1}^{N_s} \Delta V_{s,pk,ce}^2 + \sigma_I \cdot \sum_{b=1}^{N_b} \Delta I_{b,pk,ce}^2 + \sigma_{THD} \cdot \sum_{s=1}^{N_s} \Delta THD_{s,pk,ce}^2 + \sigma_{IHD} \cdot \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{o=1}^{Hr} (\Delta IHD_{s,pk,ce}^o)^2 \quad (3.40)$$

Trong công thức (3.40), lượng phạt cho sự vi phạm về điện áp nút, dòng điện nhánh, chỉ số sóng hài có thể được xác định như bên dưới:

$$\Delta V_{s,pk,ce} = \begin{cases} V_{s,pk,ce} - V^{Max} & \text{nếu } V_{s,pk,ce} > V^{Max} \\ V^{Min} - V_{s,pk,ce} & \text{nếu } V_{s,pk,ce} < V^{Min} \\ 0 & \text{các trường hợp khác} \end{cases} \quad (3.41)$$

$$\Delta I_{b,pk,ce} = \begin{cases} I_{b,pk,ce} - I_b^{Max} & \text{nếu } I_{b,pk,ce} > I_b^{Max} \\ 0 & \text{các trường hợp khác} \end{cases} \quad (3.42)$$

$$\Delta THD_{s,pk,ce} = \begin{cases} THD_{s,pk,ce} - THD^{Max} & \text{nếu } THD_{s,pk,ce} > THD^{Max} \\ 0 & \text{các trường hợp khác} \end{cases} \quad (3.43)$$

$$\Delta IHD_{s,pk,ce}^o = \begin{cases} IHD_{s,pk,ce}^o - IHD^{Max} & \text{nếu } IHD_{s,pk,ce}^o > IHD^{Max} \\ 0 & \text{các trường hợp khác} \end{cases} \quad (3.44)$$

### 3.3.2 Hiệu chỉnh sự vi phạm cho các nghiệm mới được tạo ra

Các biến điều khiển ( $R_{v,pk,ce}^{New}$ ) trong các nghiệm mới mà được tạo ra ở sự khởi tạo đầu tiên bằng việc sử dụng công thức (2.4) và sự khởi tạo nghiệm thứ hai bằng việc sử dụng công thức (2.5) hoặc (2.6) được kiểm tra và hiệu chỉnh trong giới hạn xác định trước của  $S^{Min}$  và  $S^{Max}$ . Điều này được trình bày dưới dạng toán học như công thức (3.45):

$$R_{v,pk,ce}^{New} = \begin{cases} R_v^{Min} & \text{nếu } R_{v,pk,ce}^{New} < R_v^{Min} \\ R_v^{Max} & \text{nếu } R_{v,pk,ce}^{New} > R_v^{Max}; \quad v = 1, 2, \dots, N_{var}; \\ R_{v,pk,ce}^{New} & \text{các trường hợp khác} \end{cases} \quad (3.45)$$

$$pk = 1, 2, \dots, N_{pk}; ce = 1, 2, \dots, N_{ce}$$

### 3.3.3 Lưu giữ các nghiệm tốt

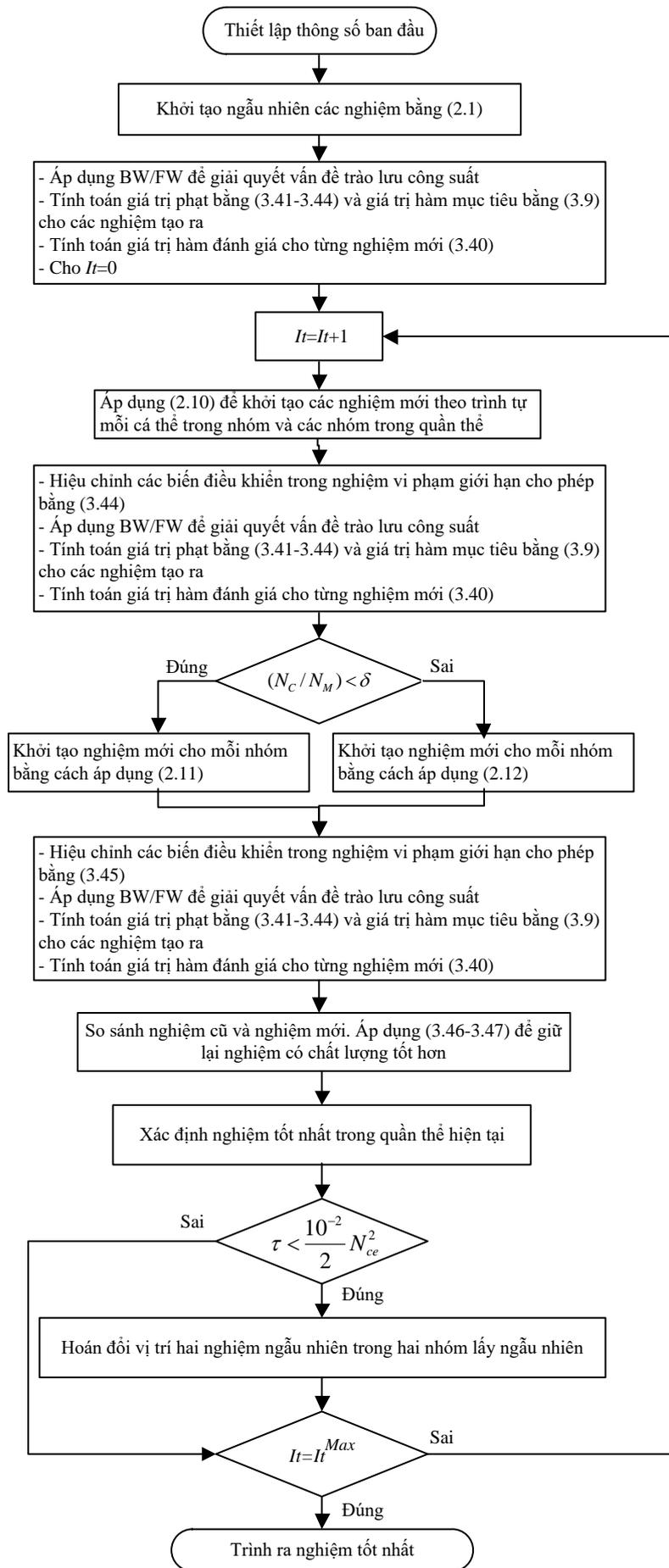
Sau khi hiệu chỉnh các biến điều khiển vi phạm cho các nghiệm mới, tất cả các nghiệm được đánh giá chất lượng bằng việc áp dụng công thức (3.40) và các nghiệm có chất lượng tốt nên được cập nhật theo quy luật như sau:

$$S_{pk,ce} = \begin{cases} S_{pk,ce}^{New} & \text{nếu } SF_{pk,ce}^{New} < SF_{pk,ce} \\ S_{pk,ce} & \text{các trường hợp khác} \end{cases}; pk = 1, 2, \dots, N_{pk}; ce = 1, 2, \dots, N_{ce} \quad (3.46)$$

$$SF_{pk,ce} = \begin{cases} SF_{pk,ce}^{New} & \text{nếu } SF_{pk,ce}^{New} < SF_{pk,ce} \\ SF_{pk,ce} & \text{các trường hợp khác} \end{cases}; pk = 1, 2, \dots, N_{pk}; ce = 1, 2, \dots, N_{ce} \quad (3.47)$$

### 3.3.4 Lưu đồ giải thuật cho việc áp dụng MCOA tìm kiếm nghiệm tối ưu

Để giải quyết vấn đề tối ưu sự tích hợp của các nguồn phát năng lượng gió, năng lượng mặt trời, tụ bù và hệ thống lưu trữ năng lượng nhằm giảm thiểu tổng chi phí trong hệ thống phân phối, Modified Coyote Optimization Algorithm được đề xuất. Thuật toán này được thực hiện theo nguyên lý lặp để tìm ra nghiệm tốt nhất cho vấn đề tối ưu trên. Khi số lần lặp đạt đến giá trị tối đa được xác định trước ( $It^{Max}$ ), nghiệm tối ưu tốt nhất toàn cục sẽ được xác định. Lưu đồ giải thuật cho việc tìm kiếm nghiệm tối ưu được trình bày như Hình 3.5.



**Hình 3.5:** Lưu đồ ứng dụng MCOA cho bài toán Chương 3

### 3.4 Kết quả mô phỏng

#### 3.4.1 Hệ thống phân phối chuẩn IEEE 69 nút và dữ liệu mô phỏng

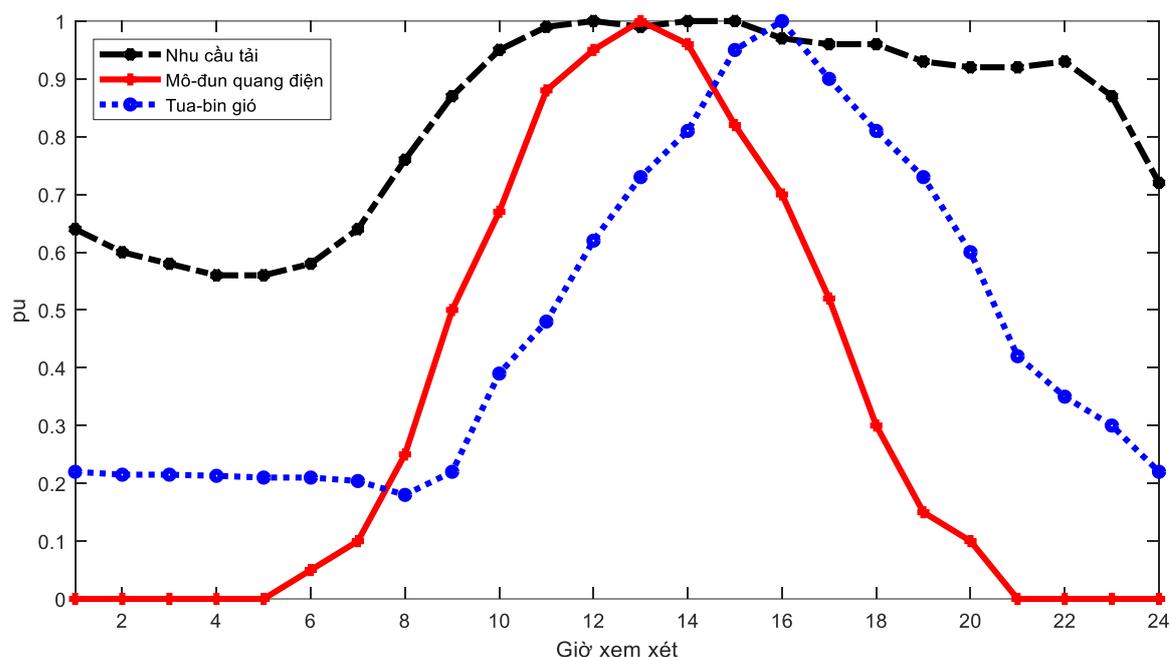
Trong nghiên cứu này, ba thuật toán gồm SMA, COA và MCOA được thực hiện để xác định nghiệm tối ưu cho sự lắp đặt của WFs, PFs, CB và BESS nhằm giảm tối đa tổng chi phí trong lưới phân phối chuẩn IEEE 69 nút. Cho việc thực hiện mô phỏng, số lượng chó sói trong mỗi nhóm và số lượng nhóm sói trong cộng đồng được khảo sát với giá trị dao động từ 3 đến 5 (bước nhảy là 1) và kết quả được chọn lần lượt là 5 và 4 cho cả COA và MCOA, và dân số của SMA được chọn là 25. Bên cạnh đó, ngưỡng ( $\delta$ ) được xác định dựa vào khảo sát từ 0,2 tới 0,8 với mỗi bước nhảy là 0,2, và trong trường hợp này giá trị phù hợp là 0,2. Tổng số vòng lặp được chọn là 300 và số lần chạy thử với dân số ban đầu được phát ngẫu nhiên là 40. Tất cả các phương pháp được thực hiện trên máy tính cá nhân (2,1 GHz processor, 16,0 GB RAM) bằng phần mềm MATLAB (R2022b). Ngoài ra, các thông số cho việc tính toán chi phí vận hành lưới cũng được miêu tả một cách cụ thể như Bảng 3.1.

**Bảng 3.1:** Thông tin về các thông số liên quan đến việc tính toán tổng chi phí

Mục	Giá trị
$Pr_h^{Grid}$ ở giờ cao điểm [38]	128,9 \$/MWh
$Pr_h^{Grid}$ ở giờ tiêu chuẩn [38]	70,0 \$/MWh
$Pr_h^{Grid}$ ở giờ thấp điểm [38]	45,4 \$/MWh
$dc$ [50]	9,0 %
$C_{PF}^{Cap}, C_{PF}^{O\&M}$ [57]	770000 \$/MW, 10,0 \$/MWh
$C_{WF}^{Cap}, C_{WF}^{O\&M}$ [58]	1882000 \$/MW, 10,0 \$/MWh
$C_{CB}^{Cap}, Loc_{CB}$ [59]	20000 \$/MVar, 1000 \$/vị trí
$C_{BESS}^{Cap}, C_{BESS}^{Aux}, C_{BESS}^{O\&M}$ [60]	200000 \$/MWh, 380000 \$/MW, 7000 \$/MWnăm

Trong Bảng 3.1, giờ cao điểm được xác định từ 9h00 đến 11h00 và từ 17h00 đến 20h00; giờ tiêu chuẩn là từ 4h00 đến 9h00, 11h00 đến 17h00 và 20h00 đến 22h00; giờ thấp điểm là số giờ còn lại trong ngày, tức là từ 22h00 đến 4h00 ngày hôm sau [38]. Ngoài ra, dữ liệu một ngày thông thường được sử dụng để đại diện

cho 365 ngày trong một năm và vòng đời dự án là 20 năm. Trong nghiên cứu này, dữ liệu công suất ngõ ra của WFs, PFs và nhu cầu tải được tham khảo từ nghiên cứu [61], và chúng được minh họa như trong Hình 3.6.

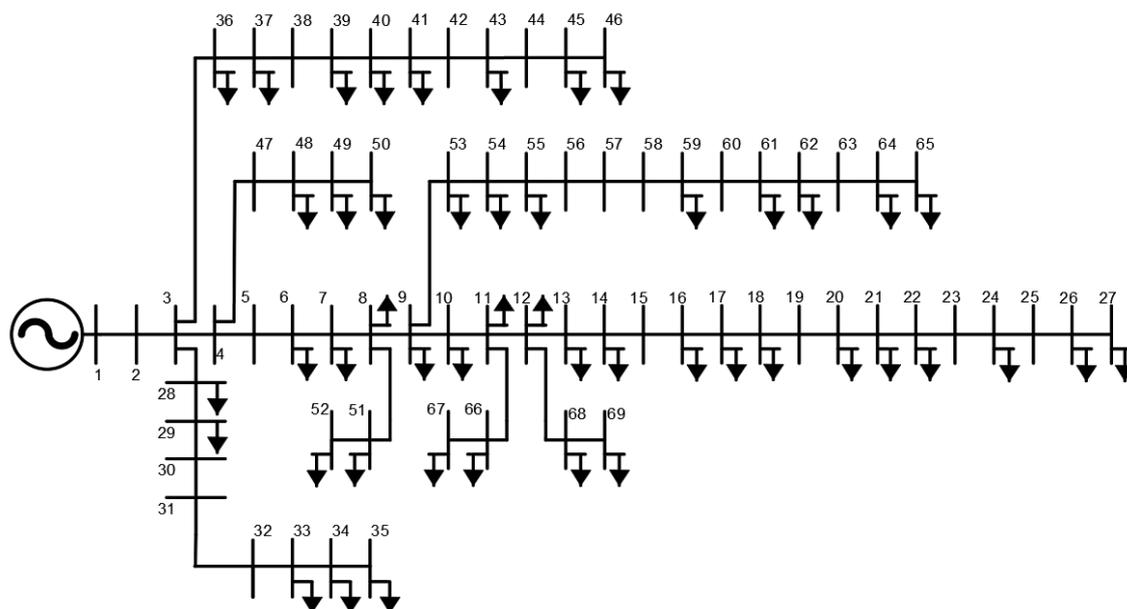


**Hình 3.6:** Hệ số công suất của mô-đun quang điện, tua-bin gió và tải

Trong nghiên cứu này, 03 WFs và 03 PFs mà sử dụng các biến tần hoạt động với hệ số công suất 0.9 (lagging) [61] được tích hợp vào hệ thống với số lượng lớn nhất và nhỏ nhất là (10 và 02 tua-bin gió) và (20000 và 2000 mô-đun quang điện). Công suất danh định được giả sử là 100 kW cho tua-bin gió và 75 W cho mô-đun quang điện [62]. Thêm vào đó, hệ thống BESS mà sử dụng pin loại lithium-ion với tuổi thọ cao được xem xét kết nối với công suất nạp/ xả tối đa là 2,0 MW và dung lượng tối đa là 6,0 MWh. Năng lượng ban đầu ( $E_{BESS,0}$ ) được giả định là 1,0 MWh cho BESS với hiệu suất nạp và xả ( $\varepsilon^{Ch}$  và  $\varepsilon^{DisCh}$ ) cũng được giả sử là 90%. Thêm vào đó, một tụ bù cũng được kết nối cho việc bù công suất phản kháng và giữ hệ số công suất của hệ thống tối thiểu là 0,9. Giống như đã đề cập, hệ thống có sự thâm nhập cao của nhiều tải phi tuyến và chúng tọa lạc ở các nút số 8, 12, 18, 22, 24, 34, 46, 55 và 65 với phổ hài được giả sử tuân theo như Bảng 3.2 [63]. Mặt khác, lưới điện chuẩn IEEE 69 nút cũng được lựa chọn làm hệ thống thực nghiệm. Hệ thống này có 69 nút và 48 tải với tổng nhu cầu tiêu thụ là 3.802 MW/ 2.694 MVar [64]. Cấu trúc hệ thống được vẽ như Hình 3.7.

**Bảng 3.2:** Phổ hài tải phi tuyến

Bậc hài	Biên độ (%)	Góc (°)
5, 7, 11, 13, 17	76,5, 62,7, 24,8, 12,7, 7,1	28, -180, -59, 79, -253

**Hình 3.7:** Hệ thống phân phối chuẩn IEEE 69 nút.

### 3.4.2 Phân tích kết quả mô phỏng

Do tính chất ngẫu nhiên của các phương pháp meta-heuristic mà được sử dụng trong trường hợp này, 40 lần chạy thử đã được thực hiện để đánh giá hiệu suất các phương pháp một cách khách quan. Các giá trị thích hợp tốt nhất, trung bình và kém nhất được báo cáo chi tiết trong Bảng 3.3.

**Bảng 3.3:** Bảng so sánh giá trị của hàm đánh giá và thời gian chạy trung bình của các phương pháp thực thi

Phương pháp	SMA	COA	MCOA
Giá trị tệ nhất (triệu \$)	16,723	16,562	16,501
Giá trị trung bình (triệu \$)	16,521	16,314	16,271
Giá trị tốt nhất (triệu \$)	16,356	16,148	16,130
Thời gian trung bình (giây)	4211	4282	4267

Một cách rõ ràng, vùng dao động của các giá trị hàm đánh giá của MCOA là tốt nhất với phạm vi [16,130, 16,501] (triệu \$), trong khi phạm vi này là [16,356, 16,723]

(triệu \$) cho SMA và [16,148, 16,562] (triệu \$) đối với COA. Không chỉ vậy, giá trị trung bình hàm đánh giá mà thể hiện tính ổn định của các phương pháp qua 40 lần chạy thử ngẫu nhiên cũng được tính toán. Cụ thể, giá trị lần lượt là 16,521 triệu \$, 16,314 triệu \$ và 16,271 triệu \$ cho SMA, COA và MCOA. Qua đó cho thấy MCOA không chỉ có hiệu suất cao hơn mà còn có độ ổn định tốt hơn các phương pháp khác. Ngoài ra, thời gian chạy trung bình của 40 lần chạy thử cũng được so sánh. Thời gian trung bình trên mỗi lần chạy thử của MCOA (4277 giây) chậm hơn SMA (4211 giây) nhưng nhanh hơn COA (4282 giây), mặc dù không đáng kể. Tuy nhiên, điều này cũng góp phần chứng minh những cải tiến của MCOA có hiệu quả trong việc nâng cao tốc độ giải quyết bài toán tối ưu.

**Bảng 3.4:** Kết quả tốt nhất của các phương pháp trong hệ thống IEEE 69 nút

Thuật toán	PFs	WFs	BESS	CB
SMA	Nút: 09 – 9432 mô-đun Nút: 54 – 3651 mô-đun Nút: 69 – 14170 mô-đun	Nút: 17 – 04 tua-bin Nút: 65 – 10 tua-bin Nút: 63 – 08 tua-bin	Nút: 46 – 1,092 MW/ 3,228 MWh	Nút: 61 – 1,29 MVA <sub>r</sub>
COA	Nút: 63 – 2162 mô-đun Nút: 49 – 15386 mô-đun Nút: 53 – 8670 mô-đun	Nút: 65 – 10 tua-bin Nút: 61 – 08 tua-bin Nút: 21 – 05 tua-bin	Nút: 28 – 0,793 MW/ 2,681 MWh	Nút: 59 – 1,11 MVA <sub>r</sub>
MCOA	Nút: 32 – 5952 mô-đun Nút: 05 – 2000 mô-đun Nút: 61 – 18814 mô-đun	Nút: 15 – 07 tua-bin Nút: 57 – 09 tua-bin Nút: 62 – 07 tua-bin	Nút: 05 – 1,088 MW/ 2,495 MWh	Nút: 61 – 1,18 MVA <sub>r</sub>

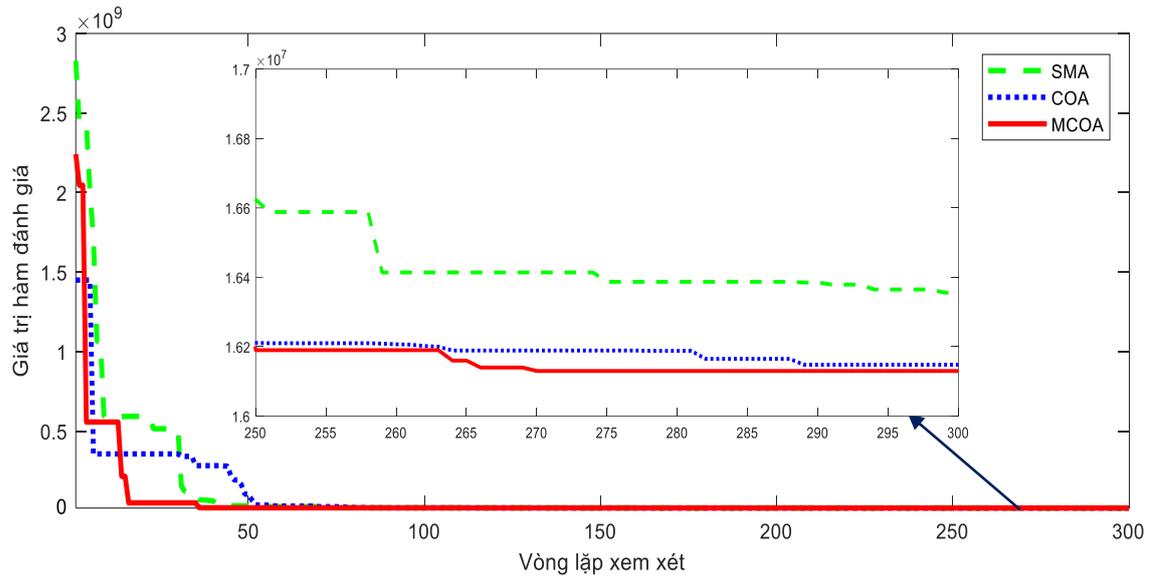
**Bảng 3.5:** So sánh các chi phí liên quan đến tổng chi phí trong hệ thống tích hợp trong thời gian 20 năm chu kỳ dự án

Phương pháp	Hệ thống ban đầu	SMA	COA	MCOA
$TC_{PF}$ , triệu \$	-	2,115	2,030	2.075
$TC_{WF}$ , triệu \$	-	4,961	5,187	5,187

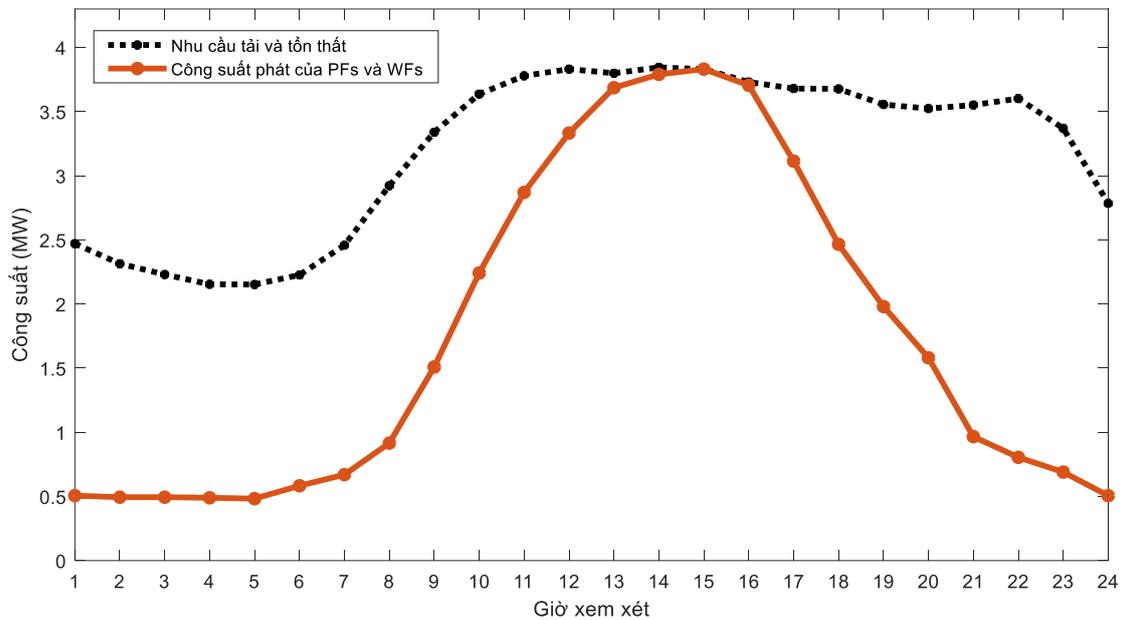
$TC_{BESS}$ , triệu \$	-	1,267	1,009	1,030
$TC_{CB}$ , ngàn \$	-	26,800	26,800	26,800
$TC_{WF-PF-BESS-CB}^{Inv\&OM}$ , triệu \$	-	8,370	8,253	8,319
$TC_{Grid}$ , triệu \$	20,792	7,986	7,895	7,811
Tổng chi phí ( $TC_{Total}$ , triệu \$)	20,792	16,356	16,148	16,130
Tiết kiệm so với hệ thống ban đầu (triệu \$)	-	4,436	4,644	4,662
Tỉ lệ tiết kiệm so với hệ thống ban đầu	-	21,335%	22,336%	22,422%

Nghiệm tối ưu nhất của các phương pháp thực thi được trình bày chi tiết tại Bảng 3.4. Vị trí và công suất lắp đặt cho các nguồn phát năng lượng mặt trời (PFs), nguồn phát năng lượng gió (WFs) và tụ bù công suất phản kháng (CB) được xác định. Thêm vào đó, vị trí, công suất nạp/ xả và dung lượng lắp đặt cho hệ thống lưu trữ năng lượng (BESS) cho việc tích hợp vào hệ thống phân phối nhằm đạt được tổng chi phí nhỏ nhất cũng được trình bày. Các phương pháp khác nhau thì đã đề xuất các nghiệm tối ưu khác nhau. Ngoài ra, kết quả tính toán các chi phí liên quan trong giai đoạn dự án 20 năm của tất cả các phương pháp cũng được trình bày trong Bảng 3.5. Sau khi các thành phần như PFs, WFs, CB và BESS được kết nối, tổng chi phí vận hành hệ thống đã giảm đáng kể từ 20,792 triệu \$ xuống còn 16,356 triệu \$, 16,148 triệu \$ và 16,130 triệu \$ tương ứng cho SMA, COA và MCOA. Rõ ràng, tổng chi phí từ việc áp dụng nghiệm đề xuất (MCOA) thấp hơn so với các nghiệm từ các phương pháp so sánh khác. Một cách cụ thể, chi phí đầu tư và O&M cho sự thâm nhập của các nguồn phát năng lượng mặt trời và năng lượng gió lên lưới chiếm phần lớn trong tổng chi phí, lần lượt tiêu tốn 2,115 triệu \$ và 4,961 triệu \$ cho giải pháp từ SMA, 2,030 triệu \$ và 5,187 triệu \$ cho giải pháp của COA, và 2,075 triệu \$ và 5,187 triệu \$ cho giải pháp của MCOA trong suốt vòng đời dự án. Dựa vào kết quả trên có thể thấy rằng chi phí lắp đặt và vận hành nguồn phát năng lượng gió có chi phí cao hơn so với việc kết nối nguồn phát năng lượng mặt trời. Sự chênh lệch chi

phí này lên tới 2,846 triệu \$ cho SMA, 3,157 triệu \$ cho COA và 3,112 triệu \$ cho MCOA, và sự chênh lệch này phụ thuộc vào công suất phát và số lượng kết nối các nguồn phát trong hệ thống. Bên cạnh đó, chi phí đầu tư và O&M của nguồn phân tán nối lưới BESS cũng lần lượt tiêu tốn 1,267 triệu \$ cho giải pháp từ SMA, 1,009 triệu \$ cho giải pháp từ COA, và 1,030 triệu \$ cho giải pháp từ COA. Cuối cùng, với nguồn phân tán còn lại là CB cũng góp phần tiêu tốn 26,800 ngàn \$ cho cả ba phương pháp. Từ chi phí cho các nguồn phát phân tán có thể xác định được tổng chi phí của việc đầu tư và O&M cho cả vòng đời dự án là 8,370 triệu \$, 8,253 triệu \$ và 8,319 triệu \$, tương ứng với giải pháp của SMA, COA và MCOA. Rõ ràng, tổng chi phí này của MCOA thì thấp hơn SMA là 51,0 ngàn \$ và cao hơn COA là 66,0 ngàn \$. Mặt khác, xem xét chi phí phát điện từ lưới điện chính cho nhu cầu phụ tải thì chi phí này từ MCOA thì thấp hơn, chỉ 7,811 triệu \$, trong khi các phương pháp còn lại lên tới 7,986 triệu \$ (SMA) và 7,895 triệu \$ (COA), giúp tiết kiệm được nhiều tiền hơn. Theo tính toán, chi phí tiết kiệm so với hệ thống ban đầu khi chưa có sự tích hợp các nguồn phát của SMA, COA và MCOA lần lượt là 4,436 triệu \$, 4,644 triệu \$ và 4,662 triệu \$, tương ứng với 21,335%, 22,336% và 22,422%. Nói tóm lại, tỉ lệ phần trăm đã thể hiện số tiền tiết kiệm được từ giải pháp của MCOA là cao nhất và điều này cho thấy phương pháp được đề xuất là tốt nhất. Bên cạnh hiệu suất cao và độ ổn định tốt, đặc tính hội tụ của MCOA cũng được so sánh và tốt hơn các phương pháp khác. Rõ ràng, MCOA có thể tìm ra các nghiệm có chất lượng tốt hơn với giá trị hàm đánh giá thấp hơn COA và SMA ngay từ giai đoạn đầu như được minh họa trong Hình 3.8. Các lập luận trên đã chứng minh rằng việc cải tiến trong các công thức khởi tạo nghiệm mới là tích cực và MCOA là một phương pháp tuyệt vời để giải quyết việc lắp đặt tối ưu các PFs, WFs, CB và BESS trong hệ thống phân phối.



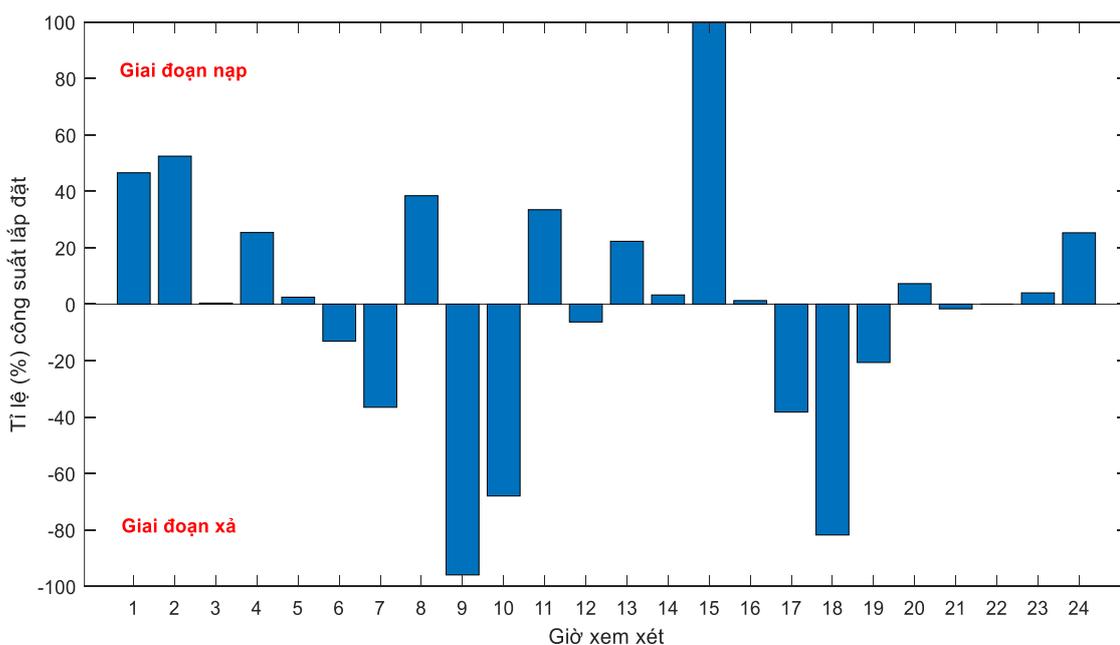
**Hình 3.8:** Đặc tính hội tụ của các phương pháp thực thi.



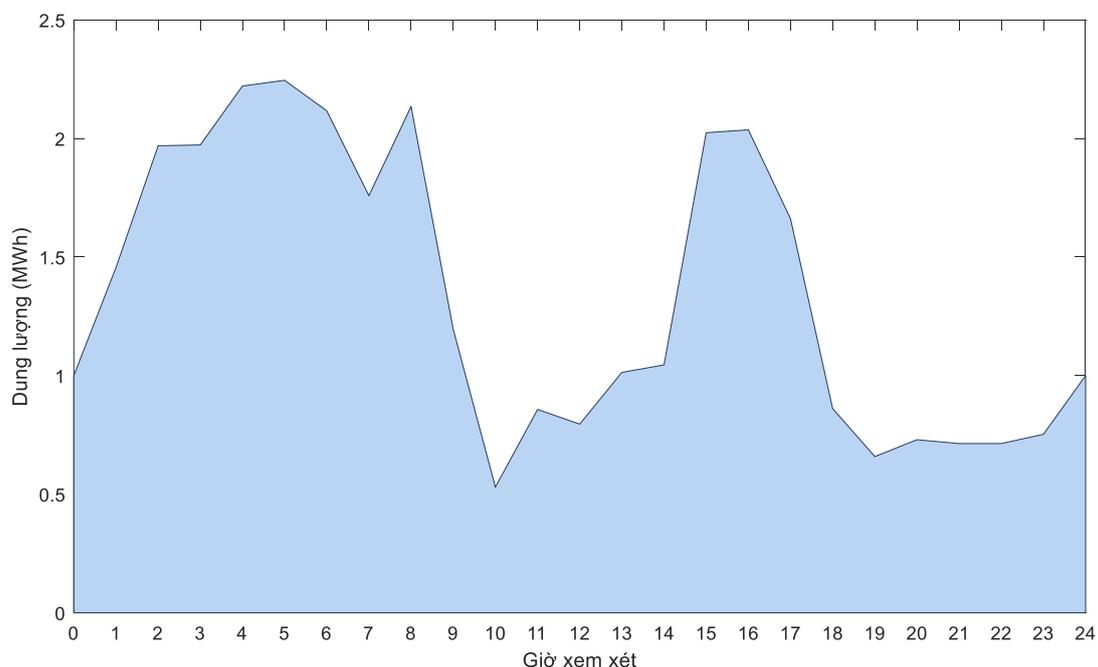
**Hình 3.9:** Công suất tiêu thụ và công suất phát năng lượng tái tạo

Hình 3.9 cho thấy mức tiêu thụ và sản lượng điện phát ra thay đổi theo thời gian của các nguồn phát năng lượng tái tạo từ phương pháp đề xuất cho một ngày thông thường. Như đã trình bày trên, tổng điện năng phát từ các nguồn năng lượng PFs và WFs chỉ là 41,71 MW, trong khi tổng điện năng tiêu thụ lên tới 76,46 MW. Qua đó thể hiện sự thiếu hụt năng lượng và lượng thiếu hụt này sẽ được lưới điện chính và BESS cung cấp theo chiến lược tối ưu nhất. Như đã đề cập, ngoài vị trí lắp đặt và dung lượng lưu trữ cho BESS thì ma trận nghiệm giải pháp cũng bao gồm công suất nạp và xả ở mỗi giai đoạn của BESS. BESS sẽ phát công suất vào lưới điện cũng

như lấy điện từ lưới cho việc lưu trữ một cách thích hợp, tùy thuộc vào điều kiện ở mỗi giai đoạn khác nhau của thời gian. Các giai đoạn nạp và xả của BESS được xác định dựa trên kết quả thu được của ma trận giải pháp và được biểu diễn như trên Hình 3.10. Rõ ràng, vào các giờ cao điểm như từ 9h00 đến 11h00 và 17h00 đến 20h00, BESS xả điện vào hệ thống phân phối để tiết kiệm chi phí phát điện từ lưới chính do giá điện cao vào những thời điểm này. Mặt khác, vào các giờ thấp điểm như từ 22h00 đến 4h00, BESS còn có xu hướng nạp điện để tích trữ do giá điện thấp. Các giờ còn lại trong ngày, BESS linh hoạt trong việc sạc và xả điện năng để giảm thiểu tổng chi phí. Một cách tương tự, Hình 3.11 biểu thị sự thay đổi dung lượng từ quá trình tích điện và giải phóng điện của BESS. Trong trường hợp cụ thể này, lượng năng lượng tích trữ trong BESS đạt 2,245 MWh, BESS được coi là đã sạc đầy và năng lượng tích trữ trong BESS giảm xuống còn 0,499 MWh, BESS sẽ ngừng xả để tránh pin bị phá hủy do tính chất vật lý. Nhìn chung, BESS có xu hướng tích trữ năng lượng trong những khoảng thời gian giá điện thấp và phụ tải nhỏ để phát ra năng lượng trong những khoảng thời gian giá điện cao và phụ tải lớn. Điều này đã góp phần rất lớn vào việc tiết kiệm tiền mua năng lượng, dẫn đến giảm chi phí trong hệ thống vận hành.

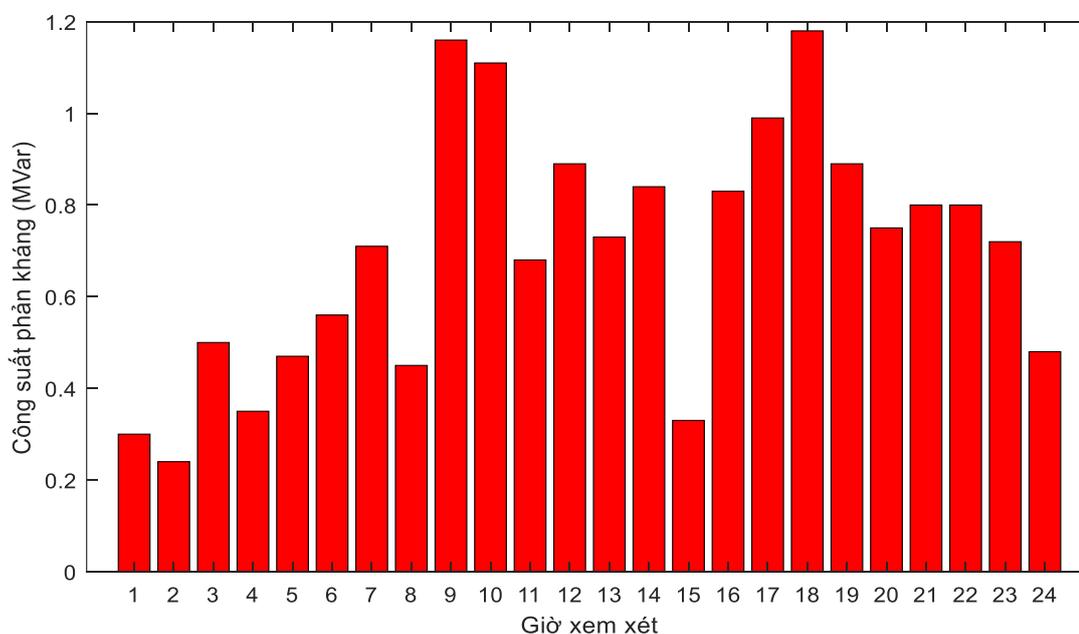


**Hình 3.10:** Các giai đoạn nạp và xả của BESS.



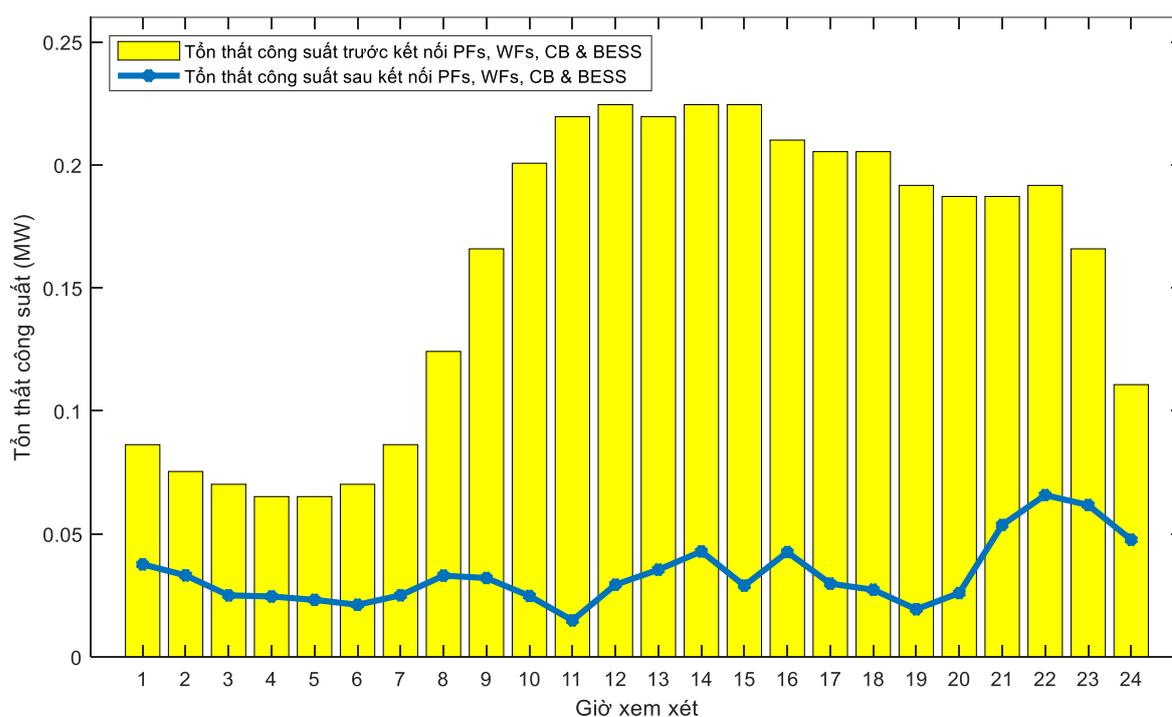
**Hình 3.11:** Dung lượng lưu trữ theo thời gian của BESS.

Trong nghiên cứu này, tụ bù cũng được xem xét để kết nối cho việc đền bù công suất phản kháng. Vị trí lắp đặt tụ điện được xác định tối ưu và công suất ra thay đổi theo thời gian được tính toán để giữ hệ số công suất của hệ thống bằng hoặc cao hơn 0,9 như giả định ban đầu. Như minh họa trên Hình 3.12, công suất phát tối đa tìm được của tụ điện được coi là công suất lắp đặt. Một cách cụ thể, vị trí và công suất định mức nên là nút 61 và 1,18 MVar với mỗi bước thay đổi là 10,0 kVar để giảm thiểu chi phí tối đa cho tụ bù mà không bị phạt công suất phản kháng.

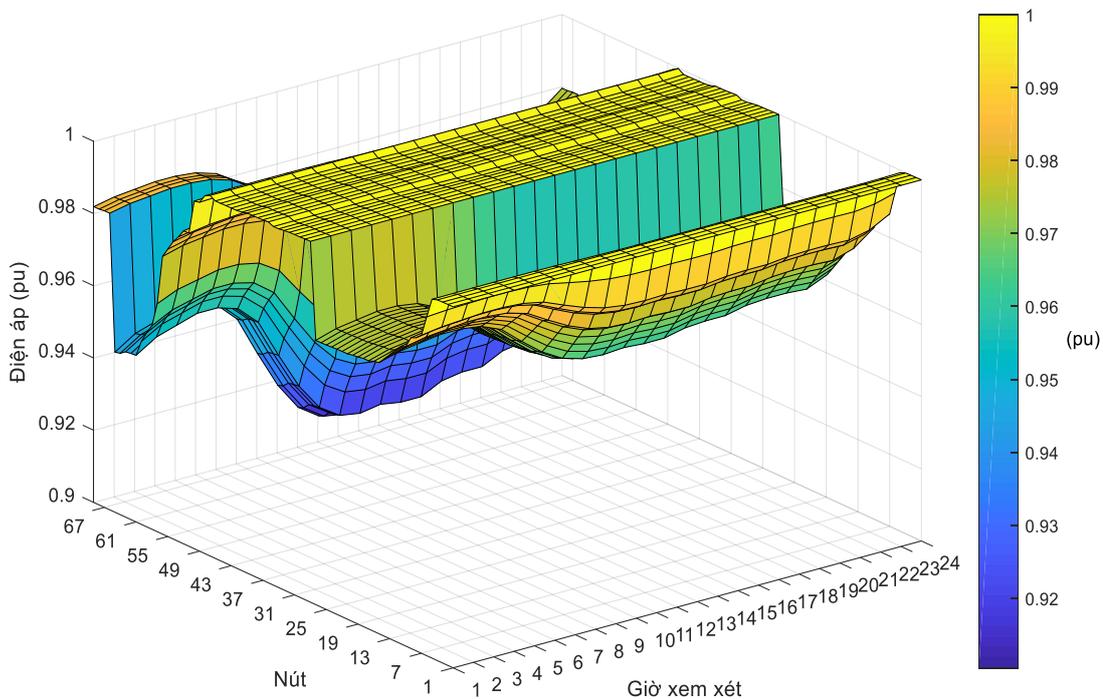


**Hình 3.12:** Sự phát công suất phản kháng của tụ bù

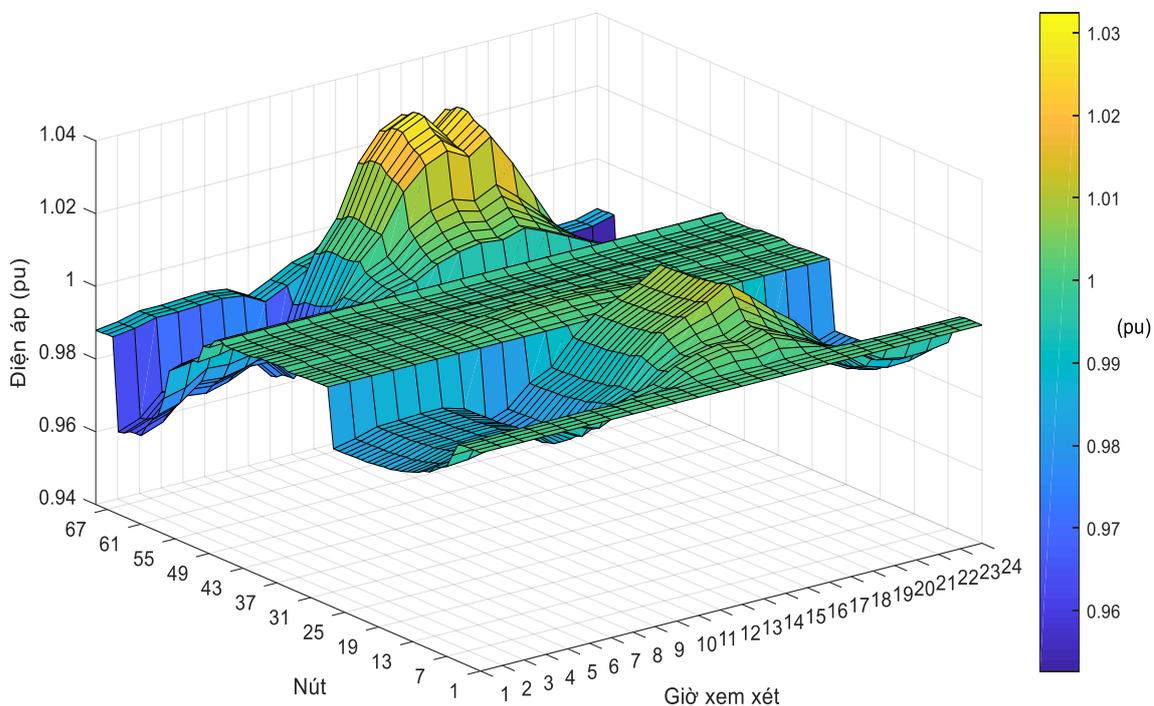
Như đã đề cập, một trong những lợi ích lớn nhất của việc kết nối các nguồn phát phân phối phù hợp là giảm tổn thất điện năng trên các hệ thống. Như đã thể hiện trong Hình 3.13, tổng tổn thất của nhánh trong một ngày thông thường đã giảm đáng kể từ 3,778 MW xuống 0,805 MW bằng cách sử dụng nghiệm tối ưu của phương pháp đề xuất. Nói cách khác, tỉ lệ giảm tổn thất điện năng đã đạt 78,692% và điều này đã góp phần lớn trong việc tiết kiệm chi phí vận hành hệ thống trong giai đoạn dự án dài hạn. Ngoài ra, nhờ áp dụng nghiệm tích hợp phù hợp của phương pháp đề xuất nên biểu đồ điện áp của hệ thống được nâng cao đáng kể như đã so sánh giữa Hình 3.14 và Hình 3.15. Trong hệ thống ban đầu, ở hầu hết các trường hợp, cấu hình điện áp luôn có các giá trị điện áp nút thấp dưới giới hạn cho phép của 0,950 pu. Trong đó, giá trị điện áp nút thấp nhất là 0,911 pu ở giai đoạn tải đỉnh của hệ thống. Nhưng sau khi áp dụng nghiệm tối ưu cho việc kết nối các nguồn phát, giá trị điện áp nút thấp nhất và giá trị điện áp nút cao nhất trong toàn bộ thời gian xem xét tăng mạnh lần lượt lên 0,953 pu và 1,032 pu. Rõ ràng, các ràng buộc về điện áp nút đã hoàn toàn được thỏa mãn. Điều này đã cho thấy một trong những lợi ích to lớn của việc kết nối PFs, WFs, CB và BESS thích hợp là góp phần nâng cao điện áp trong hệ thống phân phối.



**Hình 3.13:** Tổn thất công suất trước và sau khi tích hợp các nguồn phát phân tán.



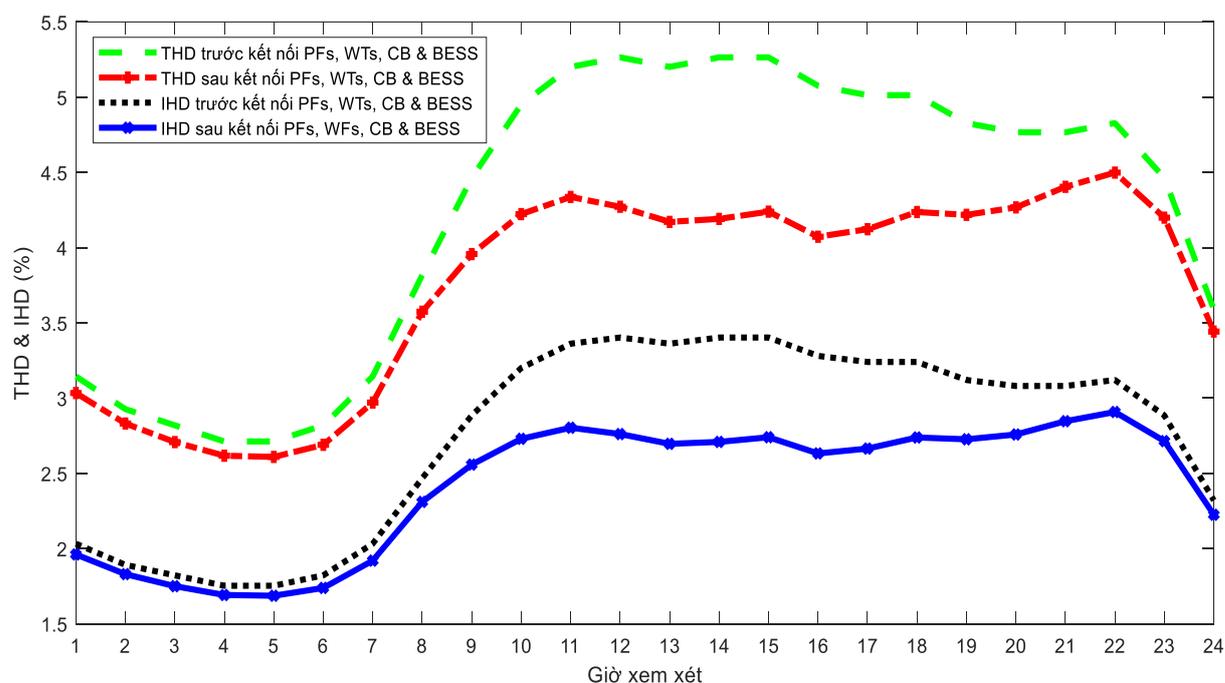
**Hình 3.14:** Điện áp nút trước khi tích hợp các nguồn phát phân tán



**Hình 3.15:** Điện áp nút sau khi tích hợp các nguồn phát phân tán.

Như đã nêu, hệ thống có sự tích hợp của nhiều tải phi tuyến và do đó, tồn tại hiện tượng méo hài trong hệ thống. Giống minh họa trong Hình 3.16, có nhiều giá trị THD và IHD vượt quá giới hạn chấp nhận của IEEE Std. 519 như từ giờ thứ 10 đến giờ thứ 22. Đặc biệt, vào các giai đoạn phụ tải cao điểm ở hệ thống ban đầu như giờ 12, 14 và 15, THD và IHD đạt giá trị cao nhất với 5,265% và 3,403%, một cách

tương ứng. Tuy nhiên, nhờ sự kết nối phù hợp của các PFs và WFs trong lưới đã làm giảm thiểu dòng phân bố trên các nhánh nên đã góp phần làm giảm thiểu giá trị của chỉ số sóng hài. Thêm vào đó, sự phát công suất phản kháng từ tụ bù cũng đóng góp đáng kể trong việc giảm sóng hài. Do đó, như kết quả thu được thì giá trị tối đa cho THD và IHD đã được giảm thiểu một cách tương ứng xuống còn 4,499% và 2,908%. Các giá trị này không vượt quá giới hạn cho phép của IEEE Std. 519. Kết quả thu được ở trên đã chứng minh thêm một lợi ích nữa trong việc cải thiện chất lượng điện năng của hệ thống thông qua việc tích hợp PFs, WFs, CB và BESS.



**Hình 3.16:** Giá trị lớn nhất của THD và IHD trước và sau khi tích hợp

### 3.5 Tổng kết

Các kết quả thu được và những hạn chế của chương này có thể được trình bày một cách tóm tắt như sau:

- Nghiên cứu này đã thành công trong việc xác định vị trí và kích thước của các nguồn phát điện phân tán PFs, WFs, CB và BESS trong lưới điện phân phối chuẩn IEEE 69 nút với sự thâm nhập cao của nhiều tải phi tuyến.
- Mục tiêu chính của nghiên cứu là giảm thiểu tổng chi phí đầu tư, O&M cho PFs, WFs, CB và BESS cũng như chi phí phát năng lượng của lưới cho phụ tải và tổn thất hệ thống. Kết quả thu được chỉ ra rằng tổng chi phí có thể được cắt giảm một cách đáng kể thông qua việc kết nối phù hợp các nguồn phát phân tán. Nghiên cứu không chỉ đạt được lợi ích về kinh tế mà còn thoả mãn

được các yêu cầu về ràng buộc kỹ thuật như điện áp nút, dòng điện nhánh, độ méo sóng hài và khả năng thâm nhập của các nguồn phát.

- Nghiên cứu này đã giới thiệu một thuật toán mới gọi là MCOA cho việc giải quyết vấn đề tối ưu sự kết nối các nguồn phát phân tán. Để chứng minh tính ưu việt của MCOA so với các phương pháp so sánh khác thì nghiệm tối ưu phương pháp đề xuất được so sánh về hiệu suất và độ ổn định với cùng mục tiêu và các ràng buộc. Kết quả thu được cho thấy MCOA tốt hơn các phương pháp khác.
- MCOA là một phương pháp phù hợp để giải quyết vấn đề tối ưu đang xem xét. Trong trường hợp cụ thể này, nghiệm từ MCOA có thể tiết kiệm nhiều hơn về chi phí vận hành hệ thống lên tới 22,422%, trong khi SMA là 21,335% và COA là 22,336% so với hệ thống ban đầu. Mặc dù MCOA là một phương pháp mạnh và ổn định nhưng vẫn có một số nhược điểm cần khắc phục. Trong nghiên cứu này, MCOA đã giải quyết thành công vấn đề về vị trí và công suất của các nguồn phát phân tán. Về công suất, WFs và PFs có công suất được xác định thay đổi lần lượt từ 2000 mô-đun quang điện đến 20000 mô-đun quang điện và từ 2 tua-bin đến 10 tua-bin. Trong khi đó, công suất tối đa của BESS được ấn định là 2,0 MW và 6,0 MWh. Đối với vị trí của PFs, WFs, CB và BESS, giá trị thay đổi từ 2 đến 69 trong hệ thống phân phối chuẩn IEEE 69 nút. Một cách rõ ràng, không gian tìm kiếm nghiệm tối ưu cho trường hợp này tương đối hẹp, nhưng MCOA yêu cầu 300 lần lặp với dân số là 20. Do đó, trong các hệ thống phức tạp và không gian tìm kiếm lớn, nghiệm tối ưu tìm được từ phương pháp đề xuất có thể không được đảm bảo. Ngoài ra, như trong Bảng 4.3, tốc độ xử lý của MCOA chậm hơn SMA và nhanh hơn COA một cách không đáng kể. Nhìn chung, MCOA là một phương pháp tích cực để giải quyết vấn đề đang xét nhưng cần được cải tiến hơn nữa để giải các bài toán phức tạp với vùng tìm kiếm rộng.
- Ngoài ra, nghiên cứu này sử dụng dữ liệu của một ngày điển hình gồm 24 giá trị để biểu thị một năm và các năm này giống nhau trong suốt chu kỳ dự án như đã giả định. Sự chênh lệch giữa công suất dự đoán và thực tế sẽ được lưới điện chính bù đắp để cân bằng. Tuy nhiên, để giảm mức bù này, số ngày được xem xét cần thiết phải tăng lên.

- Nghiên cứu xem xét sự thâm nhập cao của các tải phi tuyến mà đã được giả định có phổ hài giống nhau để chứng minh thêm phúc lợi của việc tích hợp các nguồn phát phân tán trong việc giảm thiểu sóng hài để thoả tiêu chuẩn IEEE Std. 519. Tuy nhiên, trong thực tế, khi có sự thâm nhập cao các tải phi tuyến lên hệ thống thì sẽ được làm giảm mức độ sóng hài tới tiêu chuẩn bằng việc kết nối các bộ lọc sóng hài để né tránh sự ảnh hưởng nhiều lên lưới. Do đó, việc xem xét sự thâm nhập của các tải phi tuyến phù hợp với thực tế là điều cần thiết.

# **CHƯƠNG 4: ÁP DỤNG THUẬT TOÁN TỐI ƯU XÁC ĐỊNH VỊ TRÍ VÀ CÔNG SUẤT LẮP ĐẶT CHO CÁC NGUỒN PHÁT PHÂN TÁN TRONG HỆ THỐNG PHÂN PHỐI BA PHA KHÔNG CÂN BẰNG**

## **4.1 Giới thiệu**

Các hệ thống phân phối ba pha trong thực tế rất khó đạt được sự cân bằng do luôn tồn tại sự bất đối xứng giữa các tải ở mỗi pha trong hệ thống. Do đó, việc xem xét hệ thống phân phối ba pha không cân bằng thì phức tạp. Chương này áp dụng thuật toán đề xuất cho việc xác định vị trí và công suất lắp đặt phù hợp cho các nguồn phát điện phân tán trong lưới phân phối ba pha không cân bằng nhằm hướng tới việc xem xét tính kinh tế, kỹ thuật và môi trường một cách đồng thời. Nghiên cứu xem xét toàn diện các khía cạnh cho một dự án tích hợp các nguồn phát phân tán trong dài hạn, lên tới 20 năm. Nghiên cứu tập trung giảm thiểu tổng chi phí liên quan cho toàn hệ thống phân phối mà vẫn đảm bảo được các tiêu chí kỹ thuật và môi trường luôn được thỏa mãn yêu cầu đã đề ra. Mục tiêu cụ thể của nghiên cứu là giảm thiểu tối đa tổng chi phí trong việc đầu tư, vận hành và bảo trì hệ thống có sự tích hợp các nguồn phát phân tán nối lưới. Trong chương này, nghiên cứu áp dụng thuật toán đề xuất (MCOA) để giải quyết hai bài toán của hai kiểu hệ thống không cân bằng khác nhau. Bên cạnh đó, nghiên cứu cũng đề xuất áp dụng sự phối hợp mô phỏng giữa MATLAB và OpenDSS cho việc giải quyết vấn đề trào lưu công suất một cách nhanh chóng và thuận tiện.

### **4.1.1 Mô phỏng tính bất định**

Giống như đã đề cập, các hàm phân phối xác suất Rayleigh và Beta được sử dụng để mô phỏng sự phân bố tốc độ gió cho các tua-bin và bức xạ mặt trời cho các mô-đun dựa trên dữ liệu lịch sử được thu thập trong ba năm từ địa điểm nghiên cứu. Từ đó, công suất ngõ ra cho tua-bin gió và mô-đun quang điện được tính toán một cách phù hợp.

#### 4.1.1.1 Mô phỏng tính bất định cho mô-đun quang điện

Hàm phân phối xác suất Beta thường được sử dụng để mô phỏng bức xạ mặt trời ở mỗi giờ trong nhiều nghiên cứu trước đây [62, 65-67]. Và trong nghiên cứu này, hàm Beta cũng được ứng dụng để mô phỏng tính chất xác suất của bức xạ mặt trời và được biểu diễn theo công thức toán học như sau [65]:

$$\mathcal{B}_s(\iota) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\gamma + \rho)}{\Gamma(\gamma) + \Gamma(\rho)} \cdot \iota^{(\gamma-1)} \cdot (1 - \iota)^{\rho-1}, & \text{nếu } 0 \leq \iota \leq 1; \gamma, \rho \geq 0 \\ 0, & \text{trường hợp còn lại} \end{cases} \quad (4.1)$$

Trong công thức (4.1),  $\mathcal{B}_s(\iota)$  là giá trị của hàm Beta cho bức xạ mặt trời  $\iota$  (kW/m<sup>2</sup>),  $\Gamma(\bullet)$  là hàm gamma,  $\gamma$  và  $\rho$  là các thông số của hàm Beta mà có thể được tính toán bằng việc sử dụng độ lệch tiêu chuẩn ( $d$ ) và giá trị trung bình ( $m$ ) của các giá trị bức xạ mặt trời. Giá trị của  $\gamma$  và  $\rho$  có thể được xác định bởi công thức (4.2) và công thức (4.3).

$$\rho = (1 - m) \times \left( \frac{m \times (1-m)}{d^2} - 1 \right) \quad (4.2)$$

$$\text{và } \gamma = \frac{m \times \beta}{1-m} \quad (4.3)$$

Trong mỗi giờ cụ thể, xác suất bức xạ mặt trời được tính bằng:

$$\zeta_s(\iota) = \int_{\iota_{s2}}^{\iota_{s1}} \mathcal{B}_s(\iota) \cdot d\iota \quad (4.4)$$

Trong đó,  $\iota_{s1}$  và  $\iota_{s2}$  được coi là giới hạn bức xạ mặt trời của giai đoạn  $s$  (Nghiên cứu đã giả định bao gồm 20 giai đoạn  $s$  với bước nhảy 0.05 kW/m<sup>2</sup> cho phạm vi xem xét của từng điểm bức xạ mặt trời). Công suất đầu ra dự kiến của mô-đun quang điện có xét đến bức xạ mặt trời và nhiệt độ môi trường xung quanh ( $T_A$ ) có thể được xác định bằng [62]:

$$\mathcal{F}O_{PVF}(\iota) = \mathcal{F}_s(\iota) \times \zeta_s(\iota) \quad (4.5)$$

Trong đó  $\mathcal{F}_s(\iota)$  là công suất đầu ra của mô-đun quang điện tương ứng với từng bức xạ mặt trời ( $\iota$ ).  $\mathcal{F}_s(\iota)$  có thể được biểu thị dưới dạng công thức (4.6) và việc tính toán các giá trị thành phần được mô tả rõ ràng trong nghiên cứu [66]:

$$\mathcal{F}_s(\iota) = \mathcal{NP} \times \mathcal{FF} \times \mathcal{J}(\iota) \times \mathcal{V}(\iota) \quad (4.6)$$

Các thành phần trong công thức (4.6) có thể được xác định bằng việc áp dụng các biểu thức toán học bên dưới:

$$\mathcal{FF} = \frac{V_{MPPT} \times I_{MPPT}}{V_{OC} \times I_{SC}} \quad (4.7)$$

$$\mathcal{V}(l) = V_{OC} - K_V \times T_{Ce} \quad (4.8)$$

$$\mathcal{J}(l) = A_{Ir} \times [I_{SC} + K_I \cdot (T_{Ce} - 25)] \quad (4.9)$$

$$T_{Ce} = T_{Am} + A_{Ir} \times \frac{N_{OT} - 20}{0,8} \quad (4.10)$$

Trong công thức từ (4.7 – 4.10),  $\mathcal{NP}$  được định nghĩa là số lượng mô-đun quang điện;  $\mathcal{FF}$  là hệ số lấp đầy mà thường được dùng để đo hiệu suất của mô-đun quang điện;  $I_{SC}$  (A) và  $V_{OC}$  (V) là dòng điện ngắn mạch và điện áp hở mạch;  $V_{MPPT}$  (V) và  $I_{MPPT}$  (A) là điện áp và dòng điện ở điểm công suất cực đại;  $K_V$  (V/°C) và  $K_I$  (A/°C) là các hệ số nhiệt độ cho điện áp và dòng điện;  $T_{Ce}$  (°C) và  $T_{Am}$  (°C) là nhiệt độ của các cell trên mô-đun quang điện và nhiệt độ môi trường;  $N_{OT}$  (°C) và  $A_{Ir}$  (kW/m<sup>2</sup>) được coi như là nhiệt độ hoạt động của các cell trên mô-đun quang điện và bức xạ mặt trời trung bình.

Cuối cùng, tổng công suất đầu ra dự kiến của mô-đun quang điện tại một giờ cụ thể được tính bằng cách áp dụng công thức dưới đây:

$$\mathcal{P}_{PVF} = \int_0^1 \mathcal{F} \mathcal{O}_{PVF}(l) dt \quad (4.11)$$

#### 4.1.1.2 Mô phỏng tính bất định cho tua-bin gió

Hàm phân phối xác suất Rayleigh thường được lựa chọn sử dụng để mô phỏng về tốc độ gió trong các công trình đã công bố trước đây [46]. Trong đó, hai thông số quan trọng đó là chỉ số hình dạng ( $sh$ ) và chỉ số tỷ lệ ( $sc$ ). Trong nhiều nghiên cứu trước đây, khi  $sh = 2$  và  $sc = 1,128 \times v^m$  ( $v^m$  là giá trị tốc độ gió trung bình) được gọi là hàm Rayleigh và hàm này đã được chứng minh là phù hợp hơn trong việc mô phỏng tốc độ gió cho tua-bin [62, 68]. Hàm Rayleigh được trình bày dưới dạng biểu thức toán học như sau [62]:

$$\mathcal{R}_p(v) = \frac{2 \times v}{(1,128 \times v^m)^2} \times \exp \left[ - \left( \frac{v}{1,128 \times v^m} \right)^2 \right] \text{ for } 0 < v < \infty \quad (4.12)$$

Xác suất tốc độ gió tại một giờ cụ thể có thể được mô tả như công thức dưới đây.

$$\mathcal{L}_p(v) = \int_{v_{p1}}^{v_{p2}} \mathcal{R}_p(v) \cdot dv \quad (4.13)$$

Trong công thức (4.13),  $v_{p1}$  và  $v_{p2}$  được định nghĩa là giới hạn tốc độ gió của giai đoạn  $p$  (Công việc này được giả sử chia phạm vi đang xem xét thành 20 giai đoạn  $p$

với bước là 1.0 m/s cho mỗi điểm tốc độ gió). Công suất đầu ra dự kiến của tua-bin gió xét đến tốc độ gió có thể đạt được bằng [67]:

$$\mathcal{F}_{OWF}(v) = \mathcal{H}_p(v) \cdot \mathcal{L}_p(v) \quad (4.14)$$

Trong đó,  $\mathcal{H}_p(v)$  là công suất đầu ra của tua-bin gió tương ứng với từng tốc độ gió ( $v$ ) và công thức (4.15) có thể được sử dụng để xác định giá trị này [68]:

$$\mathcal{H}_p(v) = \begin{cases} 0, & \text{if } v \leq v_{in} \text{ hoặc } v \geq v_{out} \\ P_{rated} \cdot \left( \frac{v-v_{in}}{v_{rated}-v_{in}} \right), & \text{nếu } v_{in} \leq v \leq v_{rated} \\ P_{rated}, & \text{nếu } v_{rated} \leq v \leq v_{out} \end{cases} \quad (4.15)$$

Ở đây,  $v_{out}$ ,  $v_{in}$ , and  $v_{rated}$  lần lượt là tốc độ gió cho phép lớn nhất, tốc độ gió cho phép bé nhất mà tua-bin bắt đầu hoạt động và tốc độ định mức của tua-bin;  $P_{rated}$  là công suất đầu ra định mức của tuabin gió. Cuối cùng, tổng công suất đầu ra dự kiến của tua-bin gió trong một khoảng thời gian cụ thể có thể được xác định như sau:

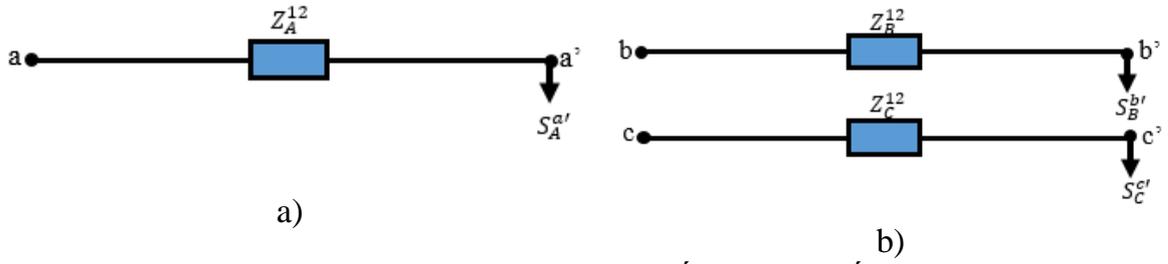
$$\mathcal{E}_{WF} = \int_0^{\infty} \mathcal{F}_{OWT}(v) \cdot dv \quad (4.16)$$

#### 4.1.2 Hệ thống phân phối ba pha không cân bằng

Trong thực tế, hệ thống phân phối ba pha không cân bằng vẫn tồn tại và nguyên nhân chủ yếu là do các tải ở các pha không có sự cân bằng và/ hoặc trở kháng trên đường dây ba pha không tương đồng nhau [69]. Một cách cụ thể, trong hệ thống mà tải không cân bằng, có một vài trường hợp có thể xảy ra như công suất của các tải ở ba pha không cân bằng hoặc công suất tải ở hai trong ba pha tương đồng nhưng pha còn lại thì khác. Những trường hợp nêu trên có thể được biểu diễn dưới dạng công thức toán học như công thức (4.17):

$$\begin{cases} S_A^{a'} \neq S_B^{b'} \neq S_C^{c'} \\ S_A^{a'} = S_B^{b'} \neq S_C^{c'} \\ S_B^{b'} = S_C^{c'} \neq S_A^{a'} \\ S_A^{a'} = S_C^{c'} \neq S_B^{b'} \end{cases} \quad (4.17)$$

Nhu cầu về ba pha có thể không được yêu cầu trong một số trường hợp mà trong khi đó lại có nhu cầu cung cấp tải từ một pha và hai pha. Do đó, sự phân bố không cân bằng có thể được miêu tả bằng mô hình như bên dưới:



**Hình 4.1:** Đường dây hệ thống phân phối

Như trong Hình 4.1, hình a thể hiện đường dây phân phối một pha và hình b thể hiện đường dây phân phối hai pha. Trong đó, đường dây phân phối một pha cung cấp điện cho tải một pha ở pha A và đường dây phân phối hai pha cung cấp điện cho hai phụ tải ở pha A và pha B. Hai số liệu có thể được biểu diễn toán học như sau:

$$\begin{cases} S_A^{a'} \neq 0 \\ S_B^{b'} = 0 \\ S_C^{c'} = 0 \end{cases} \quad (4.18)$$

$$\begin{cases} S_A^{a'} = S_B^{b'} \neq 0 \text{ hoặc } S_A^{a'} \neq S_B^{b'} \neq 0 \\ S_C^{c'} = 0 \end{cases} \quad (4.19)$$

Công thức (4.18) cho thấy trường hợp có tải ở pha A. Vì vậy, tải ở pha B và pha C bằng 0. Ngược lại, công thức (4.19) có thể biểu thị đặc tính của cả tải hai pha cân bằng và tải hai pha không cân bằng. Tải ở pha A và pha B là như nhau đối với trường hợp tải hai pha cân bằng trong khi tải khác nhau đối với trường hợp tải hai pha không cân bằng. Về trở kháng đường dây, các đường phân phối có thể được biểu diễn dưới dạng công thức sau:

$$\begin{cases} Z_A^{12} = R_A^{12} + jX_A^{12} \\ Z_B^{ab} = \infty \\ Z_C^{ab} = \infty \end{cases} \quad (4.20)$$

$$\begin{cases} Z_A^{12} = R_A^{12} + jX_A^{12} \\ Z_B^{12} = R_B^{12} + jX_B^{12} \\ Z_C^{12} = \infty \end{cases} \quad (4.21)$$

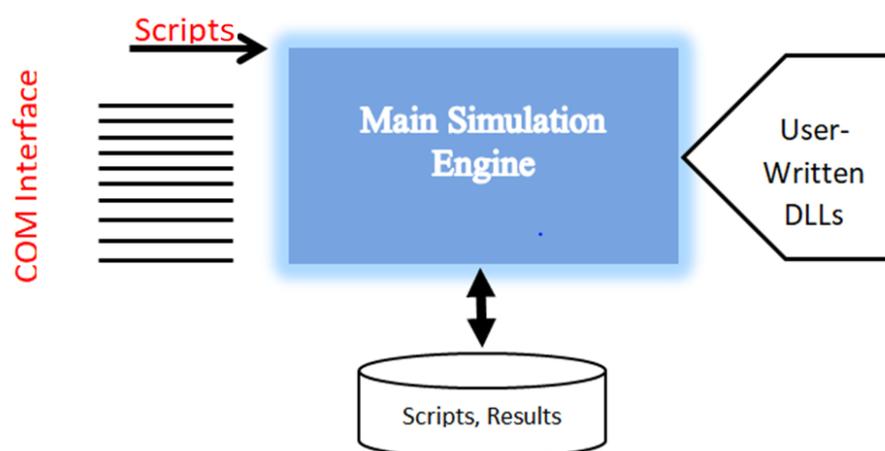
Tóm lại, hệ thống phân phối không cân bằng trong thực tế rất phức tạp như được thể hiện trong các hình và công thức trên.

### 4.1.3 Sự phối hợp mô phỏng giữa MATLAB và OpenDSS

#### 4.1.3.1 Open source Distribution System Simulator (OpenDSS)

OpenDSS là một phần mềm mô phỏng (DSS) và là phiên bản mã nguồn mở dùng để hỗ trợ việc tính toán, mô phỏng cho các hệ thống phân phối trong các miền

tần số. OpenDSS được Viện nghiên cứu năng lượng của Mỹ (Electric Power Research Institute - EPRI) phát triển để khắc phục những nhược điểm của các phần mềm chuyên dụng tồn tại trước đó. Thêm vào đó, OpenDSS được xây dựng để tạo ra một nền tảng nghiên cứu linh hoạt và đáng tin cậy nhằm phục vụ các ứng dụng phân tích hệ thống phân phối, đặc biệt là hệ thống phân phối có sự tích hợp các nguồn phát điện phân tán như máy phát điện đồng bộ, máy phát năng lượng mặt trời/ năng lượng gió, tụ bù, v.v. Cấu trúc của phần mềm này có thể được trình bày ngắn gọn như trong Hình 4.2 [70].

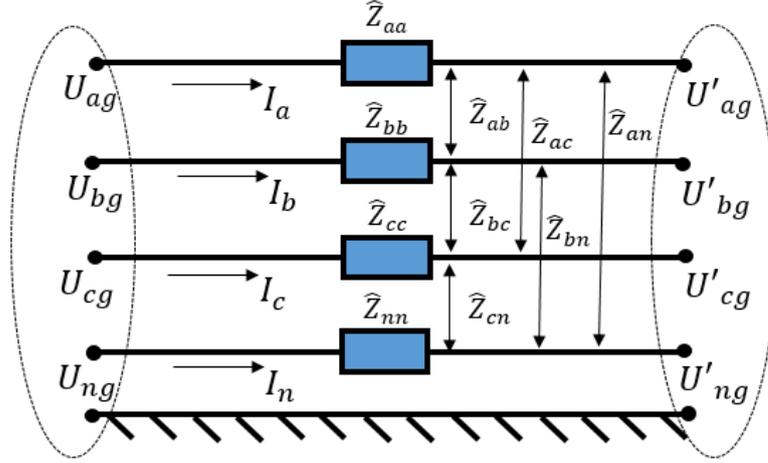


**Hình 4.2:** Cấu trúc của OpenDSS

Đối với cấu trúc này, OpenDSS cho phép người dùng viết chương trình miêu tả vào phần mềm và sử dụng các hàm chức năng để tính toán cho ra kết quả một cách nhanh chóng nhằm giúp giải quyết các vấn đề liên quan đến trào lưu công suất. Môi trường trong OpenDSS chứa các tệp tập lệnh mà dùng để định nghĩa hệ thống với đầy đủ thông tin kỹ thuật như máy biến áp, dữ liệu đường dây, dữ liệu tải, v.v. Các tệp tập lệnh này được người dùng định nghĩa một cách thích hợp theo cú pháp mà được quy định riêng bởi phần mềm. Đặc biệt, lợi thế chính của OpenDSS so với các phần mềm chuyên dụng khác là được phát triển để cho phép tương tác với các phần mềm phổ biến khác như MATLAB, PYTHON, VBA, C+ và C#. Sự tương tác này được coi là sự phối hợp mô phỏng và điều này được thực hiện thông qua windows component objective model (COM) [71]. Nói cách khác, OpenDSS cho phép phát triển hoặc sửa đổi nội dung tập dữ liệu từ môi trường ở phần mềm khác để điều khiển mô hình OpenDSS thông qua cổng COM này.

#### **4.1.3.2 Phương pháp tính trào lưu công suất trong OpenDSS**

Trong chương này, OpenDSS được đề xuất áp dụng để giải quyết vấn đề trào lưu công suất cho hệ thống không cân bằng 3-pha. Mô hình đường dây 3-pha có dây trung tính được minh họa như Hình 4.3.



**Hình 4.3:** Mô hình đường dây 3-pha với dây trung tính

Trong mô hình này, trở kháng của bản thân dây dẫn và trở kháng lẫn nhau giữa các dây có thể được xác định bằng việc áp dụng các công thức Modified Carson [72]. Ma trận tính toán điện áp nút được miêu tả như công thức (4.22) [72, 73].

$$\begin{bmatrix} U_{ag} \\ U_{bg} \\ U_{cg} \\ U_{ng} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U'_{ag} \\ U'_{bg} \\ U'_{cg} \\ U'_{ng} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aa} & \hat{Z}_{ab} & \hat{Z}_{ac} & \hat{Z}_{an} \\ \hat{Z}_{ba} & \hat{Z}_{bb} & \hat{Z}_{bc} & \hat{Z}_{bn} \\ \hat{Z}_{ca} & \hat{Z}_{cb} & \hat{Z}_{cc} & \hat{Z}_{cn} \\ \hat{Z}_{na} & \hat{Z}_{nb} & \hat{Z}_{nc} & \hat{Z}_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Công thức (4.22) có thể được viết lại như công thức (4.23) như sau:

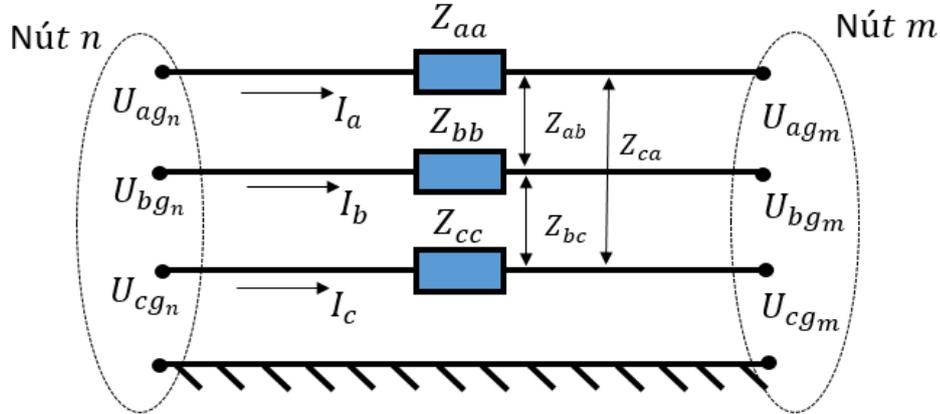
$$\begin{bmatrix} [U_{abc}] \\ [U_{ng}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [U'_{abc}] \\ [U'_{ng}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\hat{Z}_{ij}] & [\hat{Z}_{in}] \\ [\hat{Z}_{nj}] & [\hat{Z}_{nn}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I_{abc}] \\ [I_n] \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Trong OpenDSS, để giảm thiểu quá trình tính toán, phương pháp Kron Reduction có thể được ứng dụng với giả định là dây trung tính được nối đất nên  $U_{ng}$  được xem xét bằng với  $U'_{ng}$ . Do đó,  $I_n$  có thể được tìm ra bởi công thức (4.24) [73]. Bằng việc lấy công thức (4.22) thay vào công thức (4.23) thì ma trận trở kháng nguyên thủy (Primitive impedance matrix) được rút gọn thành ma trận trở kháng pha (Phase impedance matrix) như trình bày trong công thức (4.25) [72]. Điều này góp phần nâng cao tốc độ tính toán thông qua giảm thiểu kích thước ma trận tính toán.

$$[I_n] = -[\hat{Z}_{nn}]^{-1} \cdot [\hat{Z}_{nj}] \cdot [\hat{I}_{abc}] \quad (4.24)$$

$$[V_{abc}] = [V'_{abc}] + \left[ [\hat{Z}_{ij}] - [\hat{Z}_{in}] \cdot [\hat{Z}_{nm}]^{-1} \cdot [\hat{Z}_{nj}] \right] \cdot [I_{abc}] \quad (4.25)$$

Rõ ràng, nhờ việc áp dụng Kron Reduction thì hàng và cột của ma trận trở kháng nguyên thủy đã được rút gọn từ 4x4 xuống còn 3x3, và kết quả có thể được thể hiện như Hình 5.4. Bằng việc áp dụng Kirchhoff's Voltage Law thì sơ đồ mạch Hình 4.4 được biểu diễn như công thức (4.26) [72].



**Hình 4.4:** Mô hình tương đương đường dây 3-pha sau khi áp dụng Kron Reduction

$$\begin{bmatrix} U_{ag} \\ U_{bg} \\ U_{cg} \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} U_{ag} \\ U_{bg} \\ U_{cg} \end{bmatrix}_m + \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Quá trình tính toán để xác định ma trận trở kháng pha có thể được áp dụng tương tự cho hệ thống có đường dây 2-pha và 1-pha. Trong đường dây 2-pha thì công thức trở kháng nguyên thủy có kích thước là 3x3 thông qua việc áp dụng công thức Modified Carson và kích thước ma trận trở kháng này cũng được rút gọn lại thành ma trận 2x2 nhờ việc áp dụng phương pháp Kron Reduction. Một cách tương tự cho đường dây 1-pha, kích thước ma trận trở kháng giảm từ 2x2 xuống còn 1x1 [73]. Trong OpenDSS, Direct Approach Method (DAM) được ứng dụng cho việc tính toán trào lưu công suất do phương pháp này có nhiều ưu điểm về tốc độ tính toán so với các phương pháp khác như Newton-Rapshon, Gauss-Seidel và BW/FW [28]. Phương pháp DAM được xây dựng dựa trên hai ma trận gồm ma trận quan hệ giữa dòng điện nhánh với điện áp nút  $[BCBV]$  và ma trận quan hệ giữa dòng điện nút với dòng điện nhánh  $[BIBC]$ . Một cách ngắn gọn cho phương pháp này, dựa vào định luật Kirchhoff I cho mỗi nút mà các dòng điện nhánh  $[B]$  được xây dựng từ các dòng điện nút tương ứng  $[I]$ . Từ đó, ma trận  $[BIBC]$  và ma trận  $[BCBV]$  có thể được trình bày như biểu thức sau [28].

$$\begin{cases} [B] = [BIBC][I] \\ [\Delta V] = [BCBV][B] \end{cases} \quad (4.27)$$

Từ đó, mối quan hệ giữa dòng điện nút với điện áp được trình bày như sau:

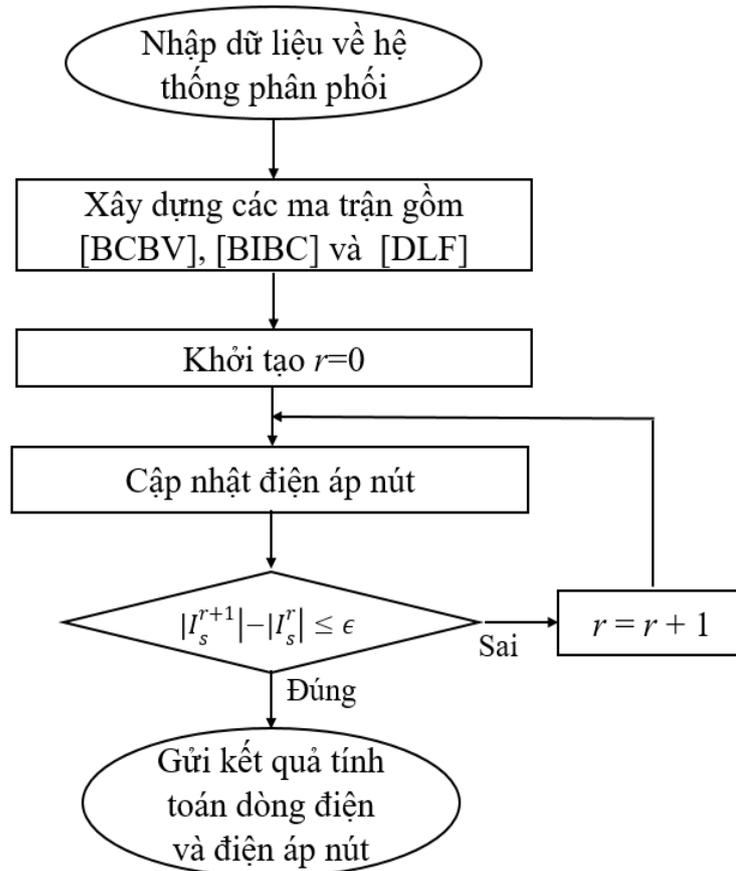
$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I] = [DLF][I] \quad (4.28)$$

Phương pháp DAM thực hiện việc tính toán dòng công suất trong mạng phân phối hình tia thông qua việc giải quyết các công thức sau dựa trên phương pháp lặp và quá trình này chỉ dừng lại khi điều kiện dừng vòng lặp được thỏa mãn [28]:

$$I_s^r = \left( \frac{P_s + jQ_s}{V_s^r} \right)^* \quad (4.29)$$

$$\begin{cases} [\Delta V^{r+1}] = [DLF][I^r] \\ [V^{r+1}] = [V^0] - [\Delta V^{r+1}] \end{cases} \quad (4.30)$$

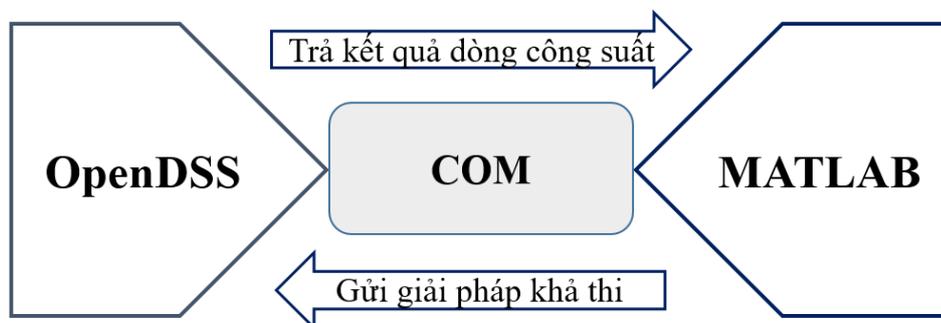
Trong các công thức này,  $P_s$  và  $Q_s$  là công suất tác dụng và công suất phản kháng của tải ở nút thứ  $s$ .  $I_s^r$  và  $V_s^r$  là dòng điện và điện áp nút thứ  $s$  của bước lặp thứ  $r$ . Quá trình áp dụng phương pháp DAM cho tính toán trào lưu công suất được trình bày ngắn gọn bằng lưu đồ như sau [28].



**Hình 4.5:** Lưu đồ áp dụng phương pháp DAM trong OpenDSS

### 4.1.3.3 Sự phối hợp mô phỏng giữa OpenDSS và MATLAB

Giống như đã đề cập, OpenDSS có thể được điều khiển bởi phần mềm khác thông qua COM. Do đó, trong nghiên cứu này, sự phối hợp mô phỏng giữa OpenDSS và MATLAB được thực hiện nhằm phân tích ảnh hưởng của các nguồn phát trong hệ thống phân phối cũng như việc giải quyết vấn đề tối ưu sự tích hợp của các nguồn phát này. Quá trình phối hợp giữa OpenDSS và MATLAB trong nghiên cứu này được tóm tắt ngắn gọn như Hình 4.6 [71].



**Hình 4.6:** Nguyên lý cơ bản sự phối hợp mô phỏng giữa MATLAB và OpenDSS

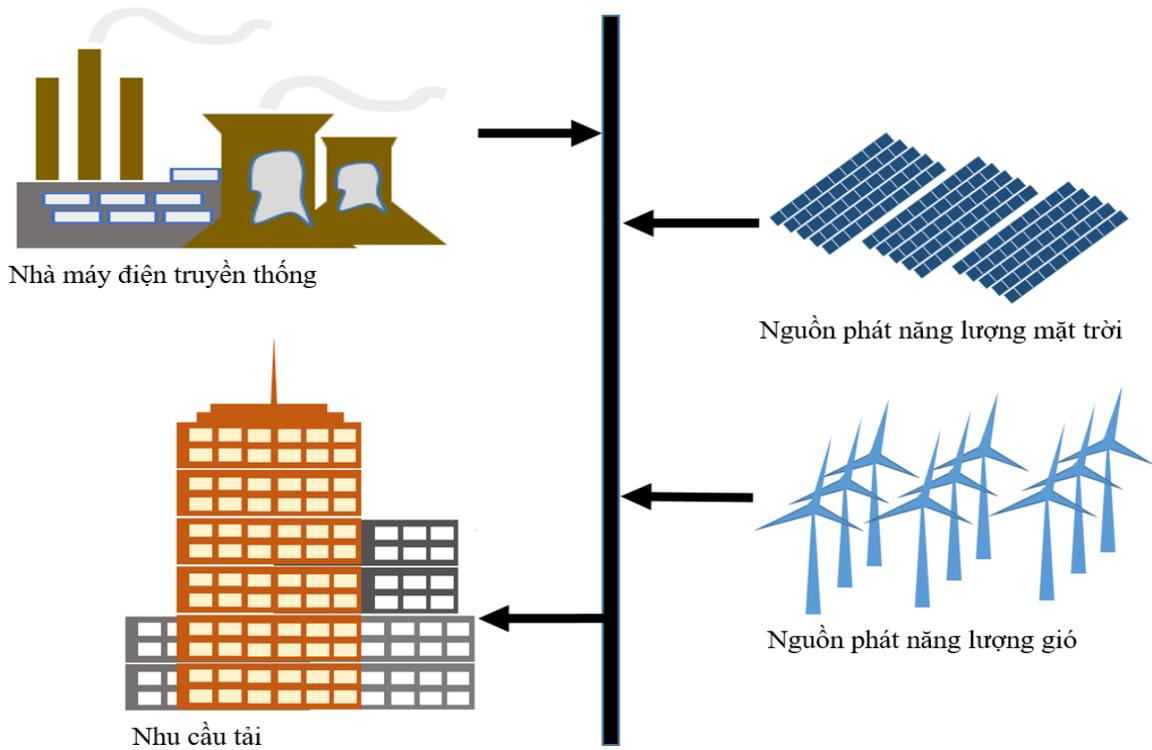
Trong nghiên cứu này, một giao diện được xây dựng để truyền dữ liệu cần thiết qua lại giữa hai phần mềm nguồn mở một cách liên tục. OpenDSS bị hạn chế trong việc giải quyết vấn đề liên quan đến việc tự động thay đổi biến điều khiển. Do vậy, trong nghiên cứu này, OpenDSS cần phối hợp với MATLAB để giải quyết bài toán đang xét trong hệ thống phân phối. OpenDSS là một nguồn mở chuyên dụng trong việc giải quyết vấn đề trào lưu công suất trong các miền tần số ở các hệ thống phân phối với tốc độ xử lý dữ liệu cao và MATLAB được sử dụng để điều khiển các hoạt động cũng như sửa đổi tập lệnh dữ liệu của OpenDSS nhờ thông qua cổng COM. COM trong trường hợp này là một chương trình code được viết trong MATLAB nhằm mục đích chính là vận hành (hay điều khiển) OpenDSS từ MATLAB. Quá trình phối hợp mô phỏng này chỉ cần được thực hiện trên một máy tính mà đã có cài đặt sẵn hai phần mềm nguồn mở là MATLAB và OpenDSS. Việc ứng dụng thành công sự phối hợp linh hoạt này đã tạo ra một công cụ mô phỏng tuyệt vời cho sự giải quyết các vấn đề tối ưu khác nhau một cách nhanh chóng và thuận tiện. Đối với trường hợp cụ thể trong nghiên cứu này, dữ liệu về hệ thống được mô tả trong môi trường OpenDSS, trào lưu công suất được tính toán và các kết quả cần thiết thu được sẽ được chuyển tới MATLAB. Song song với đó, thuật toán tối ưu mà được miêu tả trong MATLAB có nhiệm vụ tính toán để đánh giá chất lượng nghiệm và dựa trên

đó để đề xuất nghiệm phù hợp trong việc tích hợp các nguồn phát phân tán vào lưới đang xem xét. Nghiệm đề xuất này được chuyển tới OpenDSS cũng thông qua COM để tính toán lại trào lưu công suất. Quá trình này được thực hiện lặp lại cho đến khi yêu cầu vòng lặp của thuật toán được thỏa mãn.

Thuật toán MCOA và sự phối hợp mô phỏng giữa MATLAB và OpenDSS được áp dụng để giải quyết cho hai bài toán liên quan đến việc xác định vị trí và công suất tối ưu của các nguồn phát phân tán trong hệ thống phân phối ba pha không cân bằng được trình bày như mục bên dưới.

#### **4.2 Mô tả bài toán thứ nhất**

Nghiên cứu xem xét sự tích hợp của các nguồn phát năng lượng mặt trời (PFs) và các nguồn phát năng lượng gió (WFs) trong hệ thống phân phối ba pha không cân bằng như Hình 4.7 đã minh họa. Mục đích chính của nghiên cứu là tìm kiếm vị trí và công suất tối ưu của PFs và WFs nhằm giảm thiểu tổng chi phí gồm (1) chi phí cho việc đầu tư, (2) chi phí cho O&M, (3) chi phí cho việc phát điện từ lưới chính và (4) chi phí phát thải từ các nhà máy truyền thống sử dụng năng lượng hoá thạch trong vòng 20 năm chu kỳ dự án. Hàm phân phối xác suất Beta và Rayleigh được sử dụng để mô phỏng phân bố bức xạ mặt trời và tốc độ gió trong vùng địa lý nghiên cứu để từ đó tính toán công suất ngõ ra của nguồn phát năng lượng mặt trời và năng lượng gió. Nghiên cứu cũng xem xét dòng hài (HF) được tạo ra bởi các tải phi tuyến và các bộ biến đổi công suất của các nguồn phát phân tán mà được kết nối vào lưới. Các thuật toán meta-heuristic được thực hiện trên MATLAB, sau đó OpenDSS được sử dụng để tính toán trào lưu công suất. Kết quả tốt nhất cho thấy tổng chi phí có thể được tiết kiệm một cách đáng kể nhờ sự kết nối của các nguồn phát mà vẫn đáp ứng được các tiêu chí kỹ thuật. Qua đó cho thấy việc áp dụng nghiệm tối ưu của thuật toán đề xuất cho vị trí và công suất lắp đặt cho các nguồn phát phân tán mang lại hiệu quả tích cực hơn trong việc giảm thiểu tổng chi phí trong các hệ thống phân phối không cân bằng so với các thuật toán khác.



**Hình 4.7:** Mô hình hệ thống phân phối tích hợp các nguồn phát năng lượng tái tạo

#### 4.2.1 Hàm mục tiêu

Nghiên cứu này giả sử đơn vị điện lực đang được giao đầu tư và triển khai hệ thống nối lưới năng lượng tái tạo để tăng cường nguồn năng lượng sạch cho quốc gia và giảm thiểu tác động đến môi trường thì tính kinh tế, kỹ thuật và môi trường được xem xét. Trong chương này, các nguồn phân tán năng lượng mặt trời và năng lượng gió (PFs và WFs) được thực thi để tích hợp trong hệ thống phân phối ba pha không cân bằng nhằm giảm thiểu tổng chi phí để tối đa lợi nhuận thu được so với lưới ban đầu, đồng thời thỏa mãn các ràng buộc kỹ thuật. Tổng chi phí bao gồm chi phí đầu tư, chi phí O&M, chi phí phát điện của lưới chính và chi phí phát thải từ nhà máy điện truyền thống. Mục tiêu trên được biểu diễn bằng công thức toán học như (4.31):

$$\text{Giảm tối đa } TC_{Total} = TC_{Inv} + TC_{OM} + TC_{Grid} + TC_{Emis} (\$) \quad (4.31)$$

Trong đó, các thành phần chi phí của hàm mục tiêu có thể được xác định như sau:

$$TC_{Inv} = C_{PF}^{Cap} \cdot P_{PF}^{Rated} + C_{WF}^{Cap} \cdot P_{WF}^{Rated} (\$) \quad (4.32)$$

$$TC_{OM} = 30,4167 \times \sum_{y=1}^{20} \sum_{h=1}^{288} \theta_y \cdot (C_{PF}^{O\&M} \cdot P_{PF,h,y} + C_{WF}^{O\&M} \cdot P_{WF,h,y}) (\$) \quad (4.33)$$

$$TC_{Grid} = 30,4167 \times \sum_{y=1}^{20} \sum_{h=1}^{288} \theta_y \cdot (Pr_{h,y}^{Grid} \cdot P_{Sub,h,y}) (\$) \quad (4.34)$$

$$TC_{Emis} = 30,4167 \times \sum_{y=1}^{20} \sum_{h=1}^{288} \theta_y \cdot (Pr_{Emis} \cdot G_{Emis} \cdot P_{Sub,h,y}) (\$) \quad (4.35)$$

Trong các công thức (4.32 - 4.35), các ký hiệu được định nghĩa cụ thể như trong danh sách các ký hiệu. Nghiên cứu này giả sử đang xem xét vòng đời dự án là 20 năm với 365 ngày mỗi năm và 24 giờ 1 ngày. Mỗi ngày đại diện cho một tháng và 288 là kết quả từ phép nhân của 12 ngày và 24 giờ. Hệ số 30,4167 trong các công thức (5.33 - 5.35) là kết quả của tỉ lệ giữa 8760 giờ trong một năm với 288. Ngoài ra, để thuận tiện cho việc đánh giá hiệu quả kinh tế của dự án, toàn bộ chi phí phải trả trong tương lai của dự án phải được quy đổi thành giá trị hiện tại, do đó hàm  $\theta_y$  được thêm vào các công thức tính  $TC_{OM}$ ,  $TC_{Grid}$  và  $TC_{Emis}$ , và  $\theta_y$  có thể được xác định một cách rõ ràng trong nghiên cứu [50].

#### 4.2.2 Các ràng buộc cho hàm mục tiêu

Nghiệm tối ưu được xác định theo hàm mục tiêu thì cần phải đảm bảo thỏa mãn tất cả các ràng buộc kỹ thuật mà được thiết lập như bên dưới.

##### 4.2.2.1 Ràng buộc về cân bằng công suất

Để giữ tần số và điện áp ở trạng thái ổn định, tổng công suất phát ra phải bằng tổng công suất tiêu thụ. Khi đặt PFs và WFs trong hệ thống phân phối, tổng công suất phát là tổng công suất được cung cấp bởi lưới điện chính và công suất do PFs và WFs tạo ra. Tổng công suất tiêu thụ là tổng công suất tải và tổn thất công suất trên đường truyền. Do đó, các công thức cân bằng công suất tác dụng và phản kháng được biểu thị như sau:

$$P_{Sub,h,y} + \sum_{i=1}^{N_{WF}} P_{WF,i,h,y} + \sum_{j=1}^{N_{PF}} P_{PF,j,h,y} = \sum_{d=1}^{N_d} P_{d,h,y} + \sum_{b=1}^{N_b} P_{b,h,y} \quad (4.36)$$

$$Q_{Sub,h,y} + \sum_{i=1}^{N_{WF}} Q_{WF,i,h,y} + \sum_{j=1}^{N_{PF}} Q_{PF,j,h,y} = \sum_{d=1}^{N_d} Q_{d,h,y} + \sum_{b=1}^{N_b} Q_{b,h,y} \quad (4.37)$$

Trong (4.37),  $Q_{WF,i,h,y}$  và  $Q_{PF,j,h,y}$  được xác định bởi (4.38) và (4.39) cho việc phát công suất phản kháng [41]:

$$Q_{WF,h,y} = P_{WF,h,y} \times \beta_{WF,j}; \text{ Trong đó, } \beta_{WF,j} = \tan(\cos^{-1}(Pf_{WF,j})) \quad (4.38)$$

$$Q_{PF,h,y} = P_{PF,h,y} \times \beta_{PF,i}; \text{ Trong đó, } \beta_{PF,i} = \tan(\cos^{-1}(Pf_{PF,i})) \quad (4.39)$$

##### 4.2.2.2 Giới hạn về dòng điện nhánh

Cường độ dòng điện trên mỗi nhánh phân phối không được vượt quá giới hạn tối đa cho phép của chúng [53]:

$$I_b^{Max} \geq I_b^p ; b = 1,2 \dots, N_b \& p = 1,2 \dots, N_p \quad (4.40)$$

#### 4.2.2.3 Giới hạn về điện áp

Trong nghiên cứu này, điện áp ở mỗi pha được giữ trong phạm vi từ 0.95 đến 1.05 pu [53]. Sự ràng buộc giới hạn cho điện áp pha được biểu diễn dưới dạng toán học như sau:

$$V^{Min} \leq |V_s^p| \leq V^{Max}, s = 1, 2, \dots, N_s \text{ \& } p = 1, 2, \dots, N_p \quad (4.41)$$

#### 4.2.2.4 Giới hạn về độ lệch điện áp không cân bằng

Nghiên cứu này xét đến hệ thống phân phối ba pha không cân bằng nên điện áp tại mỗi pha của các nút sẽ có sự chênh lệch. Độ lệch điện áp không cân bằng ( $UV_{dev,s}$ ) phải được giữ trong giới hạn theo tiêu chuẩn IEEE Std. 45-2002 [74]:

$$UV_{dev,s}(\%) \leq UVD_{Std}^{Max}(\%) \quad (4.42)$$

$$\text{Trong đó } UV_{dev,s}(\%) = 100 \times \frac{V_{dif,s}^{Max}}{V_{un,s}^{Mean}}, s = 1, 2, \dots, N_s \quad (4.43)$$

Trong công thức (4.42),  $UVD_{Std}^{Max}$  là giới hạn cho phép lớn nhất của sự lệch điện áp không cân bằng mà được lựa chọn là 3% theo như tiêu chuẩn.  $V_{un,s}^{Mean}$  và  $V_{dif,s}^{Max}$  là điện áp pha trung bình và sự lệch điện áp lớn nhất từ điện áp pha trung bình ở nút thứ  $s$ . Việc tính toán  $V_{un,s}^{Mean}$  và  $V_{un,s}^{Max}$  có thể được trình bày như sau:

$$V_{un,s}^{Mean} = \frac{V_s^1 + V_s^2 + V_s^3}{3}, s = 1, 2, \dots, N_s \quad (4.44)$$

Trong đó,  $V_s^1$ ,  $V_s^2$  và  $V_s^3$  là giá trị điện áp của pha A, B và C của nút thứ  $s$ .

$$V_{un,s}^{\Delta A} = |V_{un,s}^{Mean} - V_s^1|, s = 1, 2, \dots, N_s \quad (4.45)$$

$$V_{un,s}^{\Delta B} = |V_{un,s}^{Mean} - V_s^2|, s = 1, 2, \dots, N_s \quad (4.46)$$

$$V_{un,s}^{\Delta C} = |V_{un,s}^{Mean} - V_s^3|, s = 1, 2, \dots, N_s \quad (4.47)$$

Trong đó,  $V_{un,s}^{\Delta A}$ ,  $V_{un,s}^{\Delta B}$  và  $V_{un,s}^{\Delta C}$  được định nghĩa là sự chênh lệch điện áp giữa pha A và giá trị điện áp trung bình, giữa pha B và giá trị điện áp trung bình, và giữa pha C và giá trị điện áp trung bình ở nút thứ  $s$ , một cách tương ứng. Cuối cùng, giá trị lớn nhất về sự chênh lệch điện áp ( $V_{dif,s}^{Max}$ ) được xác định như sau:

$$V_{dif,s}^{Max} = \max [V_{un,s}^{\Delta A}, V_{un,s}^{\Delta B}, V_{un,s}^{\Delta C}], s = 1, \dots, N_s \quad (4.48)$$

#### 4.2.2.5 Giới hạn về nhiễu sóng hài

Giới hạn về sự thâm nhập của sóng hài trong hệ thống điện sẽ dẫn tới sự giới hạn cho mức độ thâm nhập của các nguồn phát phân tán năng lượng tái tạo. Trong nghiên cứu này, hai giá trị tổng biến dạng điện áp sóng hài (THD) và biến dạng điện

áp riêng lẻ (IHD) không nên vượt quá giới hạn cho phép lớn nhất (tương ứng là 5% và 3%) của quy định 30/2019/TT-BCT và tiêu chuẩn IEEE Std. 519 [55].

$$THD^{Max}(\%) \geq THD_{s,h,y}(\%) \quad (4.49)$$

$$IHD^{Max}(\%) \geq IHD_{s,h,y}^o(\%) \quad (4.50)$$

#### 4.2.2.6 Ràng buộc về sự giảm về tổn thất sau kết nối các nguồn phát

Trong nghiên cứu này, các máy phát điện phân tán được tích hợp vào hệ thống không cân bằng cũng một phần là để giảm tổn thất điện năng. Do đó, tổng tổn thất trên tất cả các nhánh sau khi kết nối các nguồn phát phải nhỏ hơn tổng tổn thất công suất ở hệ thống ban đầu [75].

$$\sum_{b=1}^{N_b} P_{b,h,y}^{Bef} > \sum_{b=1}^{N_b} P_{b,h,y}^{Aft} \quad (4.51)$$

$$\sum_{b=1}^{N_b} Q_{b,h,y}^{Bef} > \sum_{b=1}^{N_b} Q_{b,h,y}^{Aft} \quad (4.54)$$

#### 4.2.2.7 Ràng buộc về giới hạn lắp đặt của các nguồn phát

Giới hạn công suất lắp đặt cho phép của các nguồn phát phân tán phải nằm trong giới hạn được xác định trước như sau [50]:

$$P_{PF}^{Min} \leq P_{PF}^{Rated} \leq P_{PF}^{Max} \quad (4.53)$$

$$P_{WF}^{Min} \leq P_{WF}^{Rated} \leq P_{WF}^{Max} \quad (4.54)$$

$$P_{PF,h,y} + P_{WF,h,y} \leq \sum_{d=1}^{N_d} P_{d,h,y} + \sum_{b=1}^{N_b} P_{b,h,y} \quad (4.55)$$

### 4.2.3 Áp dụng phương pháp đề xuất giải quyết vấn đề tối ưu

#### 4.2.3.1 Khởi tạo dân số ban đầu

Để khởi tạo dân số ban đầu bằng việc sử dụng công thức khởi tạo nghiệm (2.1), thì tập nghiệm được tạo ra có ma trận tương tự như (3.37). Trong đó, mỗi biến trong ma trận phải nằm trong giới hạn  $S^{Max}$  và  $S^{Min}$  mà được định nghĩa như công thức (4.56) và (4.57).

$$S^{Max} = [L_i^{Max}, P_i^{Max}, L_j^{Max}, P_j^{Max}]; i = 1, 2, \dots, N_{PF}, j = 1, 2, \dots, N_{WF} \quad (4.56)$$

$$S^{Min} = [L_i^{Min}, P_i^{Min}, L_j^{Min}, P_j^{Min}]; i = 1, 2, \dots, N_{PF}, j = 1, 2, \dots, N_{WF} \quad (4.57)$$

Trong nghiên cứu này, vị trí và công suất lắp đặt cho các nguồn phát năng lượng mặt trời và năng lượng gió được xem xét như là các biến mà cần phải xác định trong mỗi tập nghiệm. Vị trí nhỏ nhất dành cho PFs và WFs ( $L_i^{Min}$  and  $L_j^{Min}$ ) được coi là nút số 2 và vị trí lớn nhất ( $L_i^{Max}$  and  $L_j^{Max}$ ) sẽ là nút số  $N_s$ . Bên cạnh đó, nhờ sự phối hợp mô phỏng giữa OpenDSS và MATLAB cho việc tính toán trào lưu công suất ở

các bậc tần số khác nhau, các kết quả thu được (bao gồm dòng điện, điện áp, THD và IHD) sẽ được sử dụng để tính toán các điều khoản phạt của hàm đánh giá. Cuối cùng, giá trị hàm đánh giá chất lượng của mỗi nghiệm được xác định như sau:

$$SF_{pk,ce} = TC_{Total,pk,ce} + \sigma_V \cdot \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{p=1}^{N_p} \Delta V_{s,pk,ce}^p + \sigma_I \cdot \sum_{b=1}^{N_b} \sum_{p=1}^{N_p} \Delta I_{b,pk,ce}^p + \sigma_{THD} \cdot \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{p=1}^{N_p} \Delta THD_{s,pk,ce}^p + \sigma_{IHD} \cdot \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{o=1}^{Hr} \Delta IHD_{s,pk,ce}^{o,p} \quad (4.58)$$

Trong công thức (4.58), lượng phạt cho các thành phần có thể được tìm ra bởi:

$$\Delta V_{s,pk,ce}^p = \begin{cases} V_{s,pk,ce}^p - V^{Max} & \text{nếu } V_{s,pk,ce}^p > V^{Max} \\ V^{Min} - V_{s,pk,ce}^p & \text{nếu } V_{s,pk,ce}^p < V^{Min} \\ 0 & \text{trường hợp khác} \end{cases} \quad (4.59)$$

$$\Delta I_{b,pk,ce}^p = \begin{cases} I_{b,pk,ce}^p - I_{b,p}^{Max} & \text{nếu } I_{b,pk,ce}^p > I_{b,p}^{Max} \\ 0 & \text{trường hợp khác} \end{cases} \quad (4.60)$$

$$\Delta THD_{s,pk,ce}^p = \begin{cases} THD_{s,pk,ce}^p - THD^{Max} & \text{nếu } THD_{s,pk,ce}^p > THD^{Max} \\ 0 & \text{trường hợp khác} \end{cases} \quad (4.61)$$

$$\Delta IHD_{s,pk,ce}^{o,p} = \begin{cases} IHD_{s,pk,ce}^{o,p} - IHD^{Max} & \text{nếu } IHD_{s,pk,ce}^{o,p} > IHD^{Max} \\ 0 & \text{trường hợp khác} \end{cases} \quad (4.62)$$

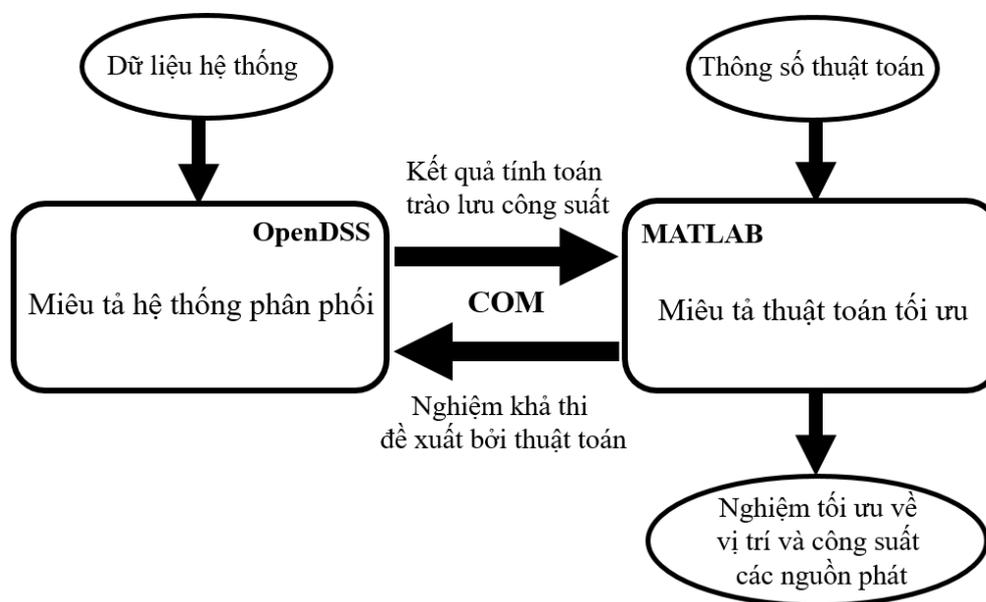
#### 4.2.3.2 Hiệu chỉnh các nghiệm mới về giới hạn xác định trước

Giống như đã đề cập, phương pháp MCOA thực hiện hai sự khởi tạo nghiệm mới là  $S_{pk,ce}^{New}$  mà sử dụng công thức (2.10) và  $S_{pk}^{New}$  sử dụng công thức (2.11) hoặc (2.12). Do đó, một vài các biến điều khiển mới được tạo ra có thể vi phạm giới hạn cho phép. Nếu giá trị của biến vượt quá giới hạn lớn nhất cho phép của biến đó thì giá trị lớn nhất sẽ được gán là giá trị mới của biến và ngược lại, nếu như giá trị của biến nhỏ hơn giới hạn nhỏ nhất cho phép của biến đó thì giá trị nhỏ nhất cũng sẽ được gán là giá trị mới của biến. Quy luật này đảm bảo tất cả các giá trị biến mới được tạo ra luôn nằm trong vùng giới hạn cho phép của các biến.

#### 4.2.3.3 Lưu đồ giải thuật MCOA cho việc xác định sự lắp đặt tối ưu các nguồn phát phân tán

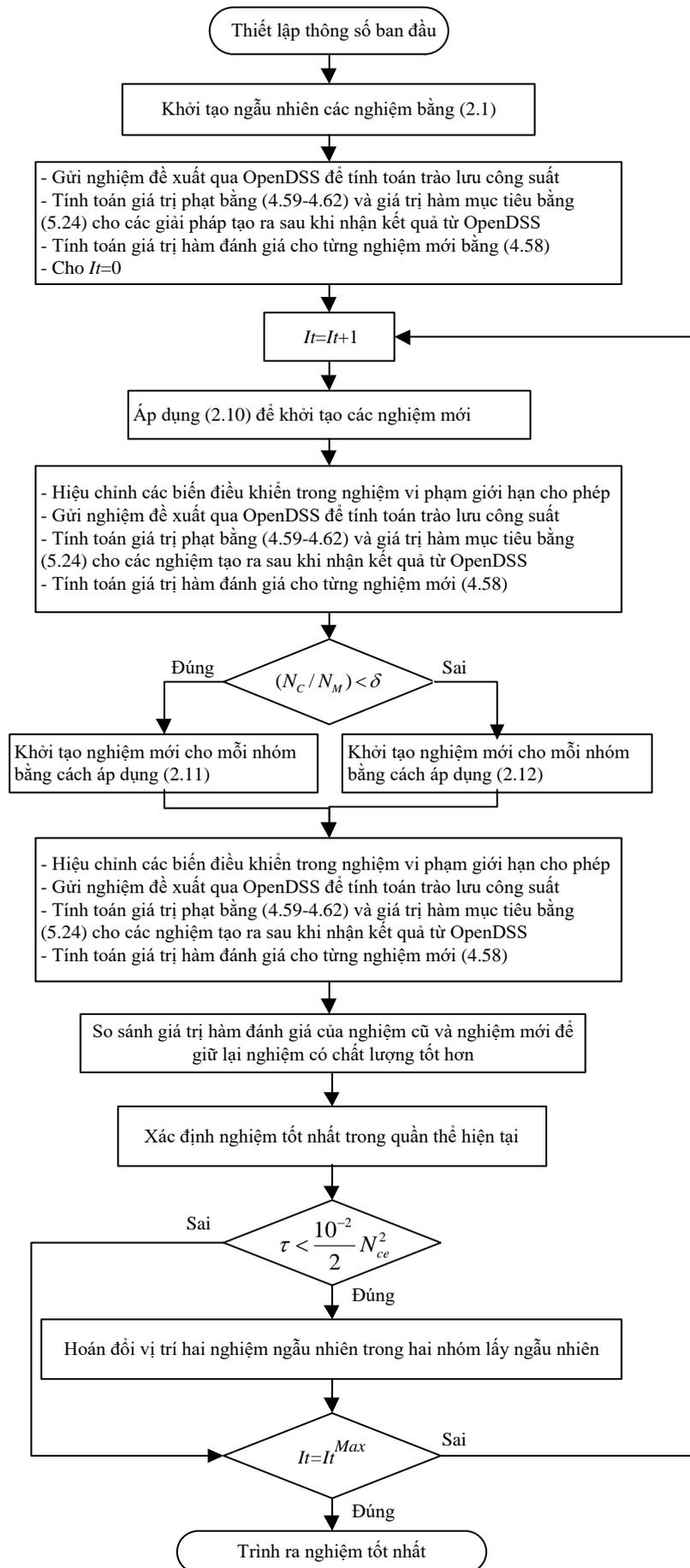
MCOA thực hiện việc lặp lại nhiều lần để tìm kiếm nghiệm tốt nhất cho sự kết nối PFs và WFs cho đến khi đạt đến số lần lặp tối đa được xác định trước ( $It^{Max}$ ). Khi thuật toán lặp ngừng hoạt động, điều đó có nghĩa là một lần chạy đã hoàn tất và

thu được một nghiệm tối ưu toàn cục. Do đó, MCOA cần thực hiện nhiều lần để đạt được một bộ nghiệm tốt và sau đó xác định nghiệm tốt nhất trong bộ nghiệm đó. Quá trình lặp trên của thuật toán được thực hiện một cách trình tự trong MATLAB dưới sự phối hợp mô phỏng với OpenDSS. Quá trình phối hợp mô phỏng giữa MATLAB và OpenDSS được trình bày ngắn gọn như Hình 4.8.



**Hình 4.8:** Sự phối hợp mô phỏng giữa OpenDSS và MATLAB thông qua COM

Như đã đề cập, một sự phối hợp mô phỏng giữa OpenDSS và MATLAB được phát triển để giải quyết vấn đề tối ưu một cách nhanh chóng và thuận tiện. Trong nghiên cứu này, OpenDSS dùng để mô tả hệ thống phân phối và MATLAB thì chứa thuật toán tối ưu. Nghiệm về sự lặp đặt tối ưu của PFs và WFs mà được thuật toán đề xuất được truyền qua cho OpenDSS thông qua COM. Sau khi nhận được nghiệm khả thi thì OpenDSS sẽ gán các giá trị trong nghiệm đó vào hệ thống và giải quyết vấn đề trào lưu công suất ở các miền tần số. Kết quả thu được về điện áp, dòng điện, tổn thất, ... được gửi trở lại MATLAB cho việc tính toán giá trị hàm mục tiêu và hàm phạt. Từ đó, giá trị hàm đánh giá của mỗi nghiệm được xác định cho mỗi nghiệm. Quá trình này được lặp lại cho tới khi thỏa mãn sự dừng vòng lặp mà được thiết lập trước trong thuật toán tối ưu. Kết quả nghiệm tối ưu toàn cục được xác định sau khi sự lặp kết thúc. Thuật toán lặp của MCOA được áp dụng để đạt được nghiệm tốt nhất cho việc giải quyết vấn đề đang xem xét cũng được tóm tắt ngắn gọn như trong lưu đồ Hình 4.9.

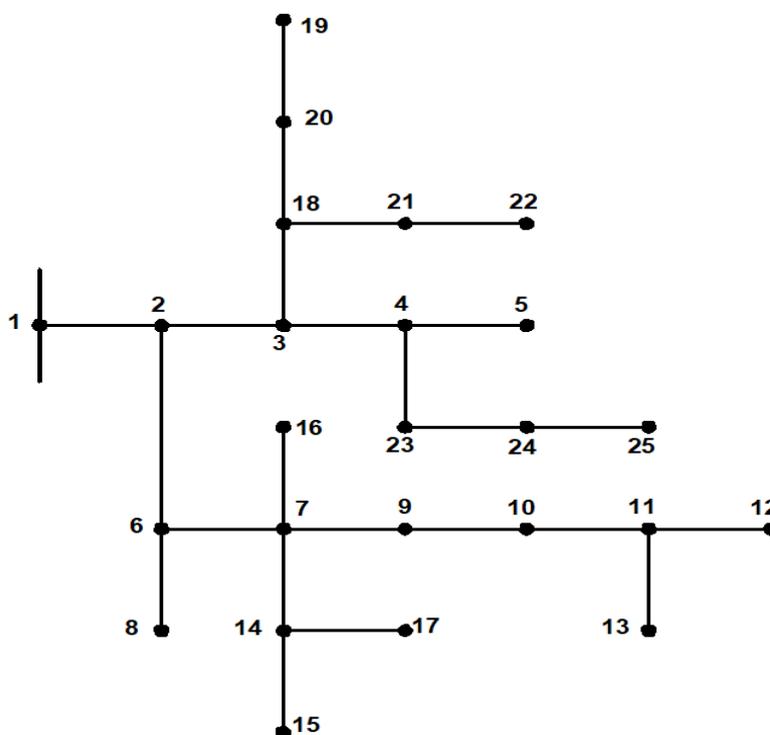


**Hình 4.9:** Lưu đồ ứng dụng MCOA cho bài toán thứ nhất của Chương 4

## 4.2.4 Kết quả mô phỏng

### 4.2.4.1 Hệ thống phân phối chuẩn IEEE 25 nút

Trong nghiên cứu này, PFs và WFs với bộ biến tần mà có thể hoạt động ở hệ số công suất 0,9 [61] được xem xét tích hợp đồng thời vào hệ thống phân phối để giảm thiểu tổng chi phí. Hệ thống phân phối ba pha không cân bằng do sự chênh lệch điện áp giữa các pha do tải không đồng đều và các thông số đường dây không đối xứng vẫn tồn tại rộng rãi trong thế giới thực. Trong trường hợp này, lưới phân phối chuẩn IEEE 25 nút mà đặc trưng cho loại hệ thống ba pha không cân bằng được chọn để thực hiện mô phỏng. Hệ thống này hoạt động ở điện áp 4,16 kV với nhu cầu phụ tải là 3,3466 MW và 2,5267 MVar. Hệ thống gồm có tất cả 25 nút, 24 nhánh và 22 phụ tải. Trong 22 tải này thì có 5 tải ba pha cân bằng và 17 tải ba pha không cân bằng do sự chênh lệch công suất trên tải giữa các pha trong cùng một nút. Sơ đồ đơn tuyến của hệ thống được vẽ như trong Hình 4.10, dữ liệu nút và đường dây được trình bày rõ ràng trong nghiên cứu [75].

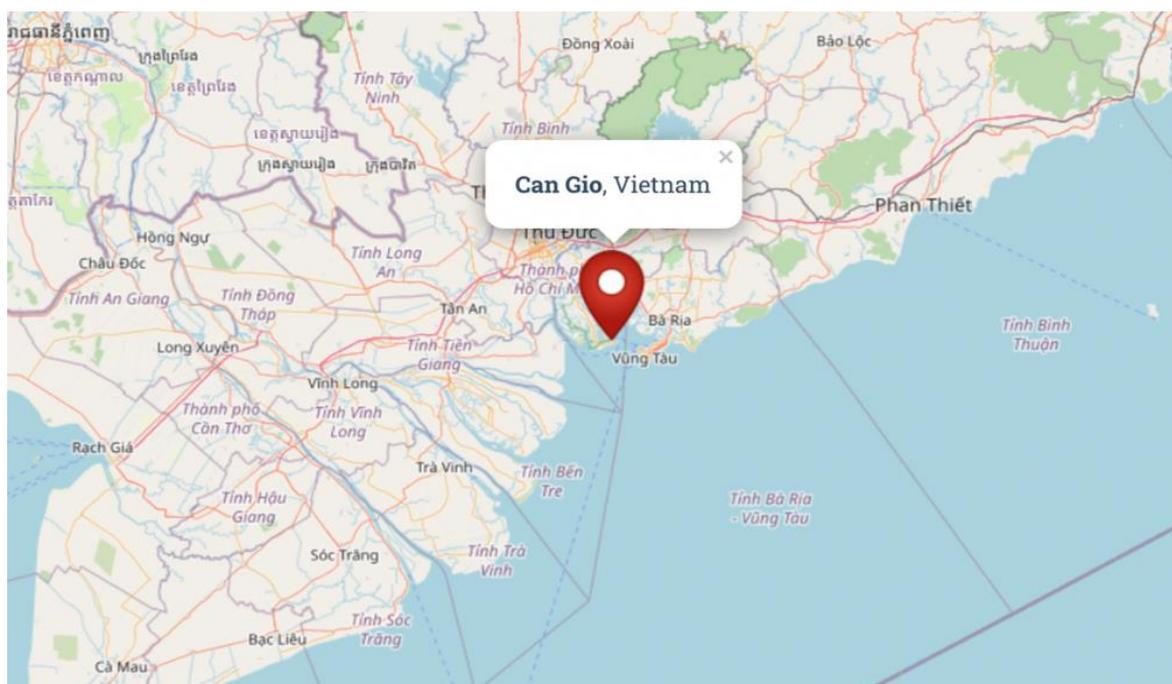


**Hình 4.10:** Sơ đồ đơn tuyến hệ thống phân phối chuẩn IEEE 25 nút

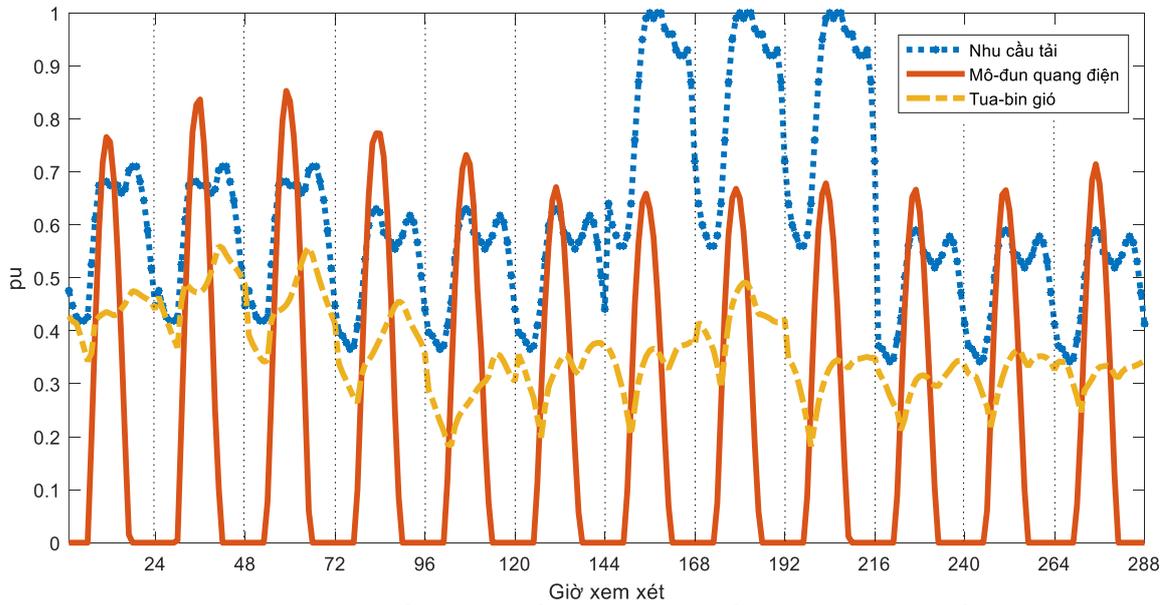
### 4.2.4.2 Dữ liệu mô phỏng

Số lượng mô-đun quang điện tối thiểu và tối đa cho PFs lần lượt là (3000 và 30000 mô-đun), và số lượng tua-bin gió cho WFs lần lượt là (3 và 30 tua-bin). Các thông số chính của mô-đun quang điện và tua-bin gió lựa chọn thì được mô tả như

Bảng A4.3 và A4.4 trong Phụ lục. Trong nghiên cứu này, khu vực thu thập dữ liệu là miền Nam Việt Nam (huyện Cần Giò, thành phố Hồ Chí Minh) như thể hiện vị trí địa lý trên Hình 4.11 [76]. Khu vực này có tiềm năng lớn để phát triển các nguồn năng lượng tái tạo như năng lượng mặt trời và năng lượng gió. Ngoài ra, số liệu sử dụng để tính toán sản lượng điện của PFs và WFs được thu thập trong 3 năm (2019, 2020 và 2021) từ khu vực trên. Một cách chi tiết, các giá trị về bức xạ mặt trời và tốc độ gió thay đổi theo thời gian với 288 điểm dữ liệu được sử dụng để hiển thị 12 tháng trong 1 năm (24 giờ trong ngày tương trưng cho một tháng) và các điểm dữ liệu này là giá trị trung bình của tập dữ liệu trong ba năm. Trong trường hợp này, hàm phân phối xác suất Beta và Rayleigh được áp dụng để mô phỏng bức xạ mặt trời và tốc độ gió dựa trên dữ liệu thực tế ở vùng khảo sát, nhằm tính toán hệ số công suất đầu ra cho các mô-đun quang điện và tua-bin gió tương ứng. Bên cạnh đó, để mô phỏng nhu cầu tải của hệ thống, 288 điểm dữ liệu được áp dụng để hiển thị những thay đổi về tải và các dữ liệu này được tham khảo từ nghiên cứu [62]. Các kết quả thu được cho hệ số của công suất ngõ ra từ các nguồn phát phân tán nối lưới thông việc áp dụng hàm Beta và Rayleigh, và hệ số tải tiêu thụ cũng được thể hiện trong Hình 4.12.



**Hình 4.11:** Khu vực khảo sát thực hiện nghiên cứu (Cần Giò, Việt Nam)



**Hình 4.12:** Hệ số công suất của các nguồn phát và nhu cầu tải

Như đã đề cập, các biến dạng sóng hài được tạo ra từ tải phi tuyến và thiết bị chuyển đổi công suất của mô-đun quang điện và tua-bin gió được xem xét đầy đủ trong trường hợp này. Nghiên cứu này giả định rằng tải phi tuyến tại nút 13, 23, 08 và 19, và phổ hài của các nguồn sóng hài từ các tải phi tuyến này cũng như các nguồn phát dựa trên bộ biến tần đã được tham khảo từ nghiên cứu [77]. Chi tiết về phổ hài được trình bày như trong Bảng 4.1.

**Bảng 4.1:** Phổ hài của tải phi tuyến và các bộ biến tần của các nguồn phát năng lượng tái tạo.

Bậc hài		1	5	7	11	13	17	19	23	25	29	31
Tải phi tuyến	Biên độ (%) kiểu 1 ở nút 13 và nút 23	100	20,0	14,3	9,1	7,7	5,9	5,3	4,3	4,0	3,4	3,2
	Biên độ (%) kiểu 2 ở nút 08 và nút 19	100	19,1	13,1	7,2	5,6	3,3	2,4	1,2	0,8	0,2	0,2
Biến tần	Biên độ (%) cho biến tần của DGs	100	4,0	4,0	2,0	2,0	1,5	1,5	0,6	0,6	0,6	0,6

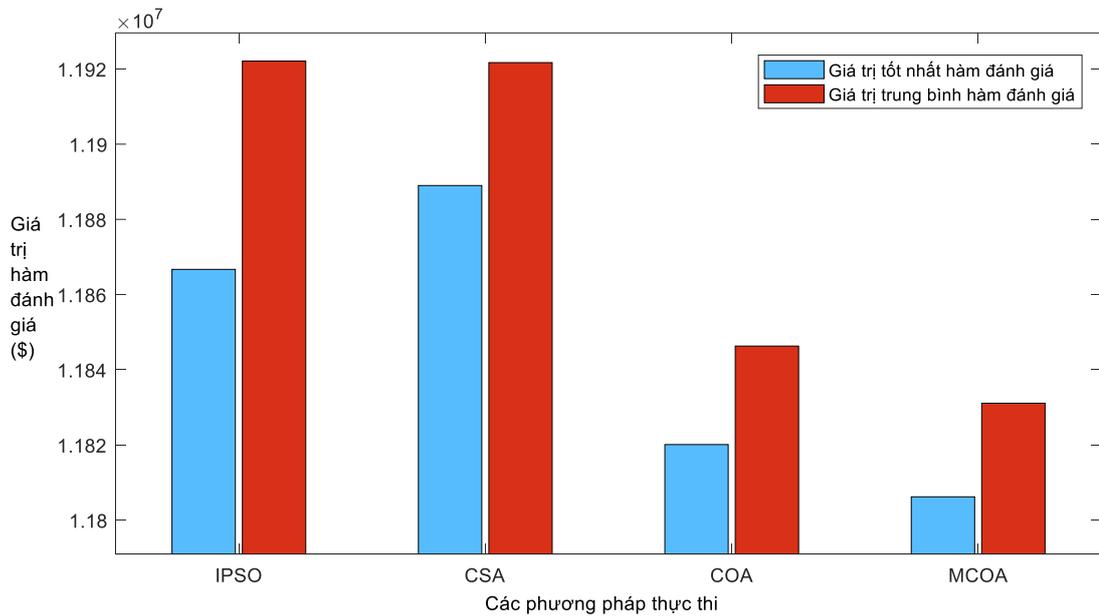
#### 4.2.4.3 Thông số điều khiển cho các thuật toán áp dụng

Trong nghiên cứu này, MCOA, IPSO, CSA và COA được thực hiện với cùng hàm mục tiêu và các ràng buộc để chứng minh hiệu suất vượt trội của phương pháp được đề xuất. Đối với mô phỏng của IPSO, quần thể được chọn là 25 và các hệ số

gia tốc  $C_{1i}$ ,  $C_{2i}$ ,  $C_{1f}$  và  $C_{2f}$  được chọn lần lượt là 2,5, 0,5, 0,5 và 2,5. Ngoài ra hệ số trọng lượng quán tính cũng được chọn như sau:  $\alpha_w=0,9$  và  $\beta_w=0,5$  [78]. Cho việc triển khai thực hiện phương pháp CSA, quần thể ( $N$ ) được đặt thành 25 và xác suất phát hiện trùng lặp ( $P\alpha$ ) được chọn là 0,25 [79]. Cho việc mô phỏng cả COA và MCOA, hệ số ( $\delta$ ) được khảo sát và chọn là 0,2, số lượng nhóm ( $N_{pk}$ ) và số lượng cá thể trong mỗi nhóm ( $N_{ce}$ ) được thiết lập tương ứng là 5 và 4. Để so sánh công bằng, số lần lặp ( $It^{Max}$ ) được khảo sát và chọn là 80 và số lần chạy thử ( $Num_{Trial}$ ) là 30 cho tất cả các phương pháp được triển khai. Mặt khác, giá trị tối đa của biến dạng sóng hài ( $THD_V^{Max}$  và  $IHD_V^{Max}$ ) được đặt thành 5% và 3% theo IEEE Std. 519 [54]. Độ lệch điện áp không cân bằng ( $UVD_{Std}^{Max}$ ) được chọn là 3% để đáp ứng IEEE Std. 45-2002 [74] và dải giới hạn điện áp pha được thiết lập cho nghiên cứu này là [0,95, 1,05] (pu) [53]. Hơn nữa, các tham số liên quan để tính toán các hàm chi phí, chẳng hạn như  $C_{PF}^{Cap}$ ,  $C_{PF}^{O\&M}$ ,  $C_{WF}^{Cap}$  and  $C_{WF}^{O\&M}$  được chọn là 770000 (\$/MW), 10,0 (\$/MWh), 1882000 (\$/MW) và 10,0 (\$/MWh), một cách tương ứng [57, 58].  $Pr_{Emis}$  được chọn là 0,004 (\$/kg) và  $G_{Emis}$  là 724 (kg/MWh) cho sự phát khí thải từ các nhà máy điện truyền thống thông thường [80]. Ngoài ra, giá phát điện ( $Pr_{h,y}^{Grid}$ ) ở các giờ cao điểm, giờ tiêu chuẩn và giờ thấp điểm lần lượt là 128,9 \$/MWh, 70,0 \$/ MWh và 45,4 USD/MWh [38].

#### 4.2.4.4 Phân tích kết quả mô phỏng

Trong nghiên cứu này, IPSO, CSA, COA và MCOA được triển khai để giảm thiểu tổng chi phí bao gồm đầu tư, O&M, phát điện của lưới chính và phát thải từ nhà máy truyền thống. Do tính chất ngẫu nhiên của các thuật toán meta-heuristic nên 30 lần chạy thử được thực hiện một cách độc lập với kết quả thu được trình bày như Hình 4.13.



**Hình 4.13:** Giá trị tốt nhất và giá trị trung bình hàm mục tiêu trong các lần chạy thử

Một cách chi tiết, giá trị tốt nhất cho hàm cực tiểu chi phí trong các lần chạy của MCOA là bé nhất (11,8062 triệu \$) so với các phương pháp khác như IPSO (11,8667 triệu \$), CSA (11,8890 triệu \$) và COA (11,8201 triệu \$). Bên cạnh đó, để đánh giá độ ổn định của mỗi phương pháp thì giá trị trung bình của các lần chạy cũng được tính toán. Giá trị trung bình của MCOA thì cũng tốt hơn với 11,8311 triệu \$, trong khi các phương pháp còn lại là 11,9221 triệu \$, 11,9217 triệu \$ và 11,8463 triệu \$ cho IPSO, CSA và COA, một cách tương ứng. Qua đó cho thấy, phương pháp MCOA không những có hiệu suất cao hơn khi đã tìm ra nghiệm tối ưu chất lượng hơn mà còn có sự ổn định tốt hơn các phương pháp so sánh khác trong việc giải quyết cùng vấn đề tối ưu.

**Bảng 4.2:** Kết quả tốt nhất của các phương pháp trong hệ thống IEEE 25 nút

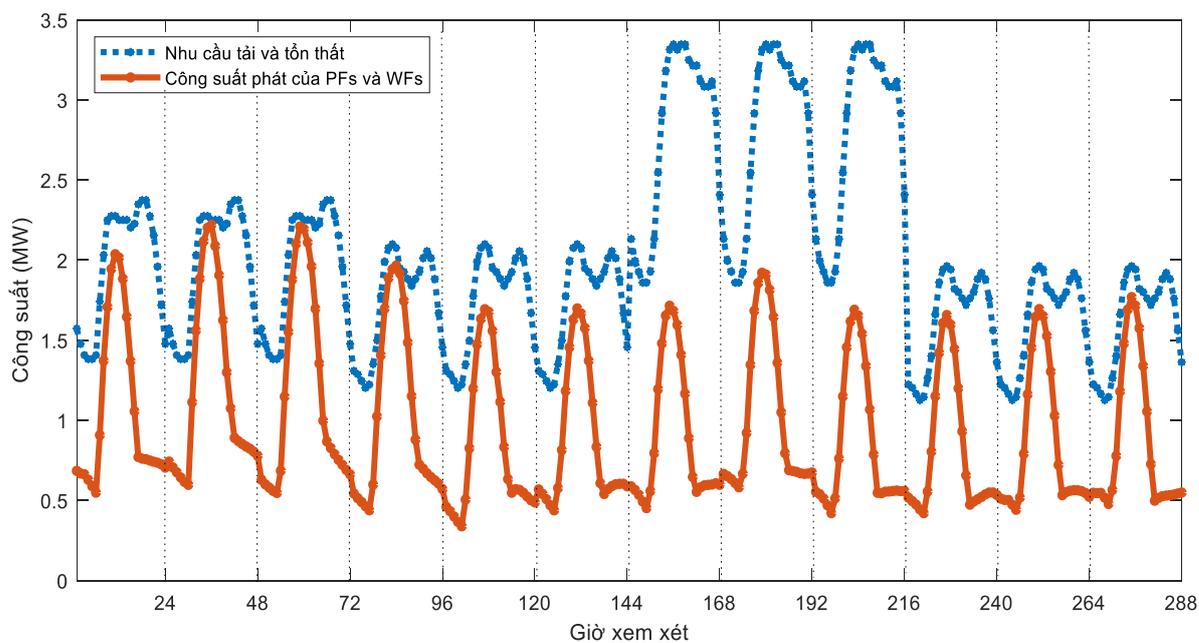
Phương pháp	Nghiệm tối ưu	$TC_{Inv}$ (triệu \$)	$TC_{OM}$ (triệu \$)	$TC_{Grid}$ (triệu \$)	$TC_{Emis}$ (triệu \$)	$TC_{TotalCosts}$ (triệu \$)
Ban đầu	-	-	-	12,7520	0,4683	13,2203
IPSO	Nút 05 – 21440 mô-đun Nút 09 – 18 tua-bin	4,6258	0,8002	6,2105	0,2302	11,8667
CSA	Nút 03 – 19933 mô-đun Nút 09 – 20 tua-bin	4,9151	0,8384	5,9170	0,2185	11,8890

COA	Nút 07 – 22916 mô-đun Nút 10 – 16 tua- bin	4,3346	0,7617	6,4827	0,2412	11,8201
MCOA	Nút 15 – 23317 mô-đun Nút 10 – 16 tua- bin	4,3577	0,7669	6,4418	0,2397	11,8062

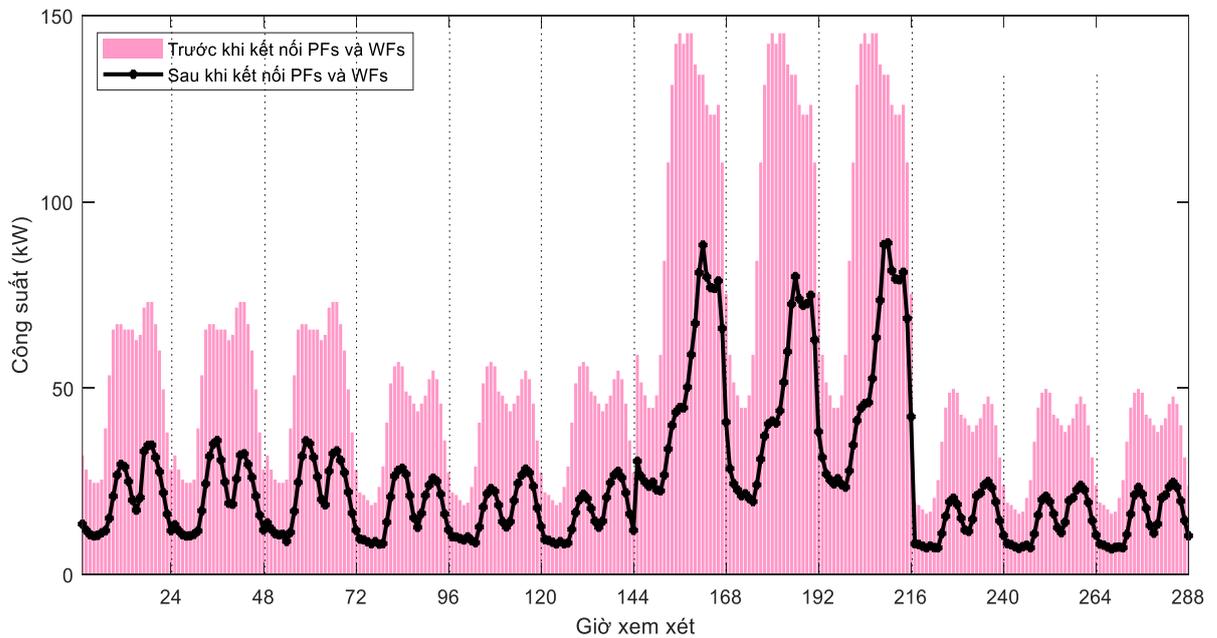
Kết quả tốt nhất trong các thử nghiệm với việc tạo ngẫu nhiên quần thể ban đầu được trình bày chi tiết trong Bảng 4.2. Trong bảng này, vị trí lắp đặt cũng như là số lượng các nguồn phát phân tán năng lượng tái tạo và cùng với các chi phí liên quan của mỗi phương pháp thực thi cũng được liệt kê. Một cách rõ ràng, với giải pháp tối ưu từ phương pháp đề xuất, tổng chi phí ( $TC_{TotalCosts}$ ) đã giảm mạnh từ 13,2203 triệu \$ xuống còn 11,8062 triệu \$. Nó tiết kiệm lên tới 1,4141 triệu \$, tương đương 10,70% so với hệ thống ban đầu khi chưa có sự kết nối bất kỳ nguồn phát phân tán nào. Điều này cho thấy rằng việc kết nối phù hợp các nguồn phát năng lượng tái tạo trong hệ thống phân phối có thể giảm chi phí vận hành hệ thống một cách đáng kể. Mặt khác, giải pháp từ MCOA cũng cho thấy tổng chi phí thấp hơn so với IPSO, COA và CSA.  $TC_{TotalCosts}$  của MCOA chỉ là 11,8062 triệu \$, trong khi đó, chi phí này lần lượt là 11,8667 triệu \$, 11,8890 triệu \$ và 11,8201 triệu \$ cho IPSO, CSA và COA. Cho việc xem xét các thành phần chi phí trong tổng chi phí, chi phí đầu tư ( $TC_{Inv}$ ) cho việc thậm nhập của nguồn phát năng lượng gió và mặt trời từ giải pháp của MCOA là 4,3577 triệu \$, và nó thấp hơn so với 4,6258 triệu \$ của IPSO và 4,9151 triệu \$ của CSA, nhưng lại cao hơn một chút so với 4,3346 triệu \$ của COA. Bên cạnh đó, chi phí O&M ( $TC_{OM}$ ) cho các nguồn phát năng lượng tái tạo của MCOA (0,7669 triệu \$) cũng thấp hơn 33,3 ngàn \$ so với IPSO (0,8002 triệu \$) và 71,5 ngàn \$ so với CSA (0,8384 triệu \$), nhưng lại cao hơn 5,2 ngàn \$ so với COA (0,7617 triệu \$). Qua đó cho thấy chi phí đầu tư và O&M từ MCOA tiết kiệm hơn IPSO và CSA nhưng lại kém hơn không đáng kể so với COA. Các thành phần còn lại của hàm mục tiêu là chi phí nhập khẩu điện từ lưới chính ( $TC_{Grid}$ ) và chi phí phát thải từ các nhà máy điện truyền thống ( $TC_{Emis}$ ). Trong đó, chi phí  $TC_{Grid}$  từ giải pháp tối ưu của phương pháp MCOA (6,4418 triệu \$) mang nhiều lợi ích kinh tế hơn so với COA (6,4827 triệu \$), nhưng lại kém hơn các phương pháp khác như CSA (5,9170 triệu \$) và IPSO (6,2105 triệu \$). Tương tự, chi phí  $TC_{Emis}$  của

phương pháp MCOA cũng thấp hơn 1,5 ngàn \$ so với COA và cao hơn 21,2 ngàn \$ so với CSA và 9,5 ngàn \$ so với IPSO. Tóm lại, dựa vào giá trị mục tiêu tổng chi phí mà đã được trình bày trong bảng tổng hợp ở Bảng 4.2, có thể tuyên bố rằng MCOA đã tìm ra nghiệm có tổng chi phí vận hành hệ thống tốt nhất trong các phương pháp thực hiện cho việc giải quyết cùng bài toán tối ưu và cùng điều kiện xem xét.

Giống như được minh họa rõ ràng trong Hình 4.14, tổng công suất tiêu thụ tại 288 điểm dữ liệu mà đại diện cho một năm là 582,437 MW, nhưng tổng sản lượng điện phát ra từ các nguồn phát DGs (PFs và WFs) chỉ có 276,199 MW, tương đương 47,42%. Điều này cho thấy rằng sự thâm nhập của DGs trong trường hợp này có thể cung cấp gần một nửa tổng lượng tiêu thụ và do đó lưới điện chính sẽ cung cấp cho nhu cầu còn lại thông qua trạm biến áp. Ngoài ra, như đã đề cập, một trong những lợi ích lớn nhất của việc kết nối các DGs trong hệ thống là giảm tổn thất ở các nhánh phân phối, và tổng tổn thất điện năng trước và sau khi có sự thâm nhập các DGs được thể hiện như trên Hình 4.15. Tổng tổn thất giảm mạnh từ 16,61 MW xuống còn 7,27 MW, tức là bằng 56,23% sự giảm tổn thất điện năng theo tính toán. Điều này giúp giảm đáng kể chi phí vận hành hệ thống phân phối tích hợp các DGs về lâu dài.

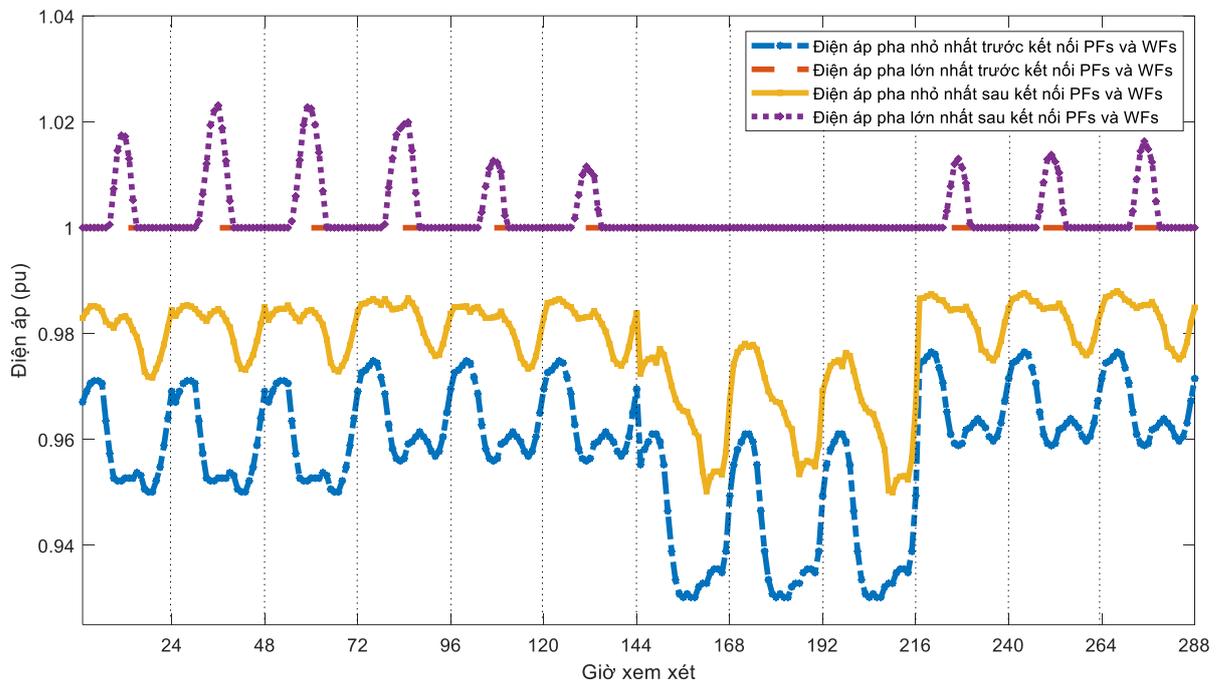


**Hình 4.14:** Tổng công suất tiêu thụ và công suất phát theo thời gian

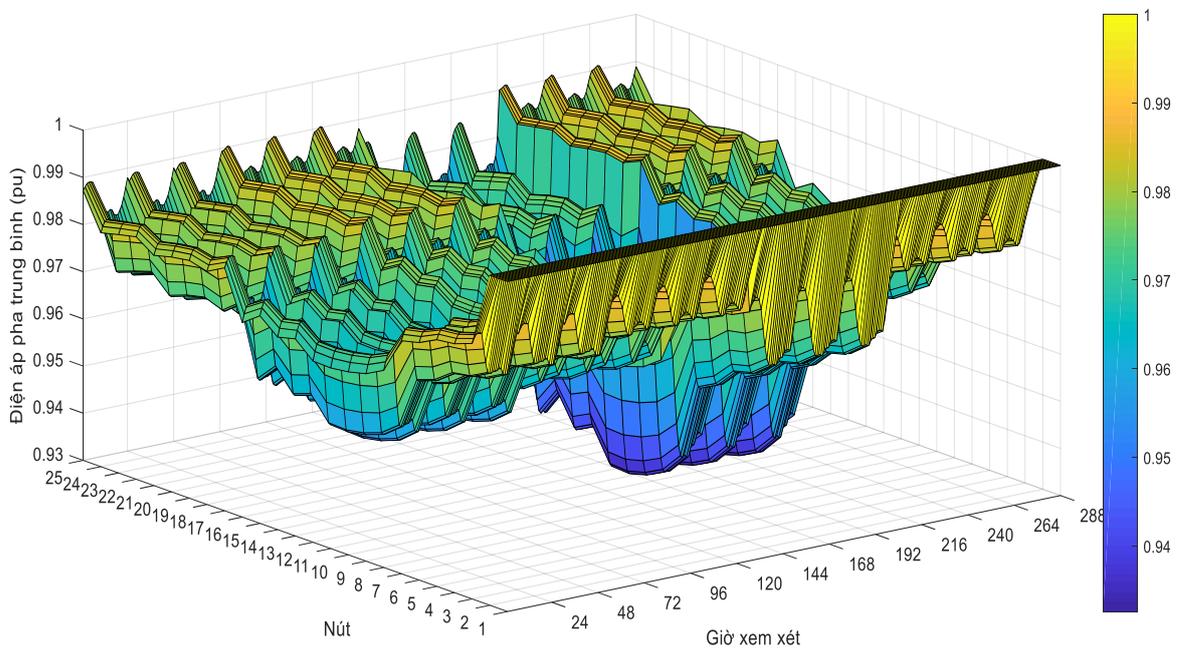


**Hình 4.15:** Tổng tổn thất công suất trước và sau khi tích hợp các DGs.

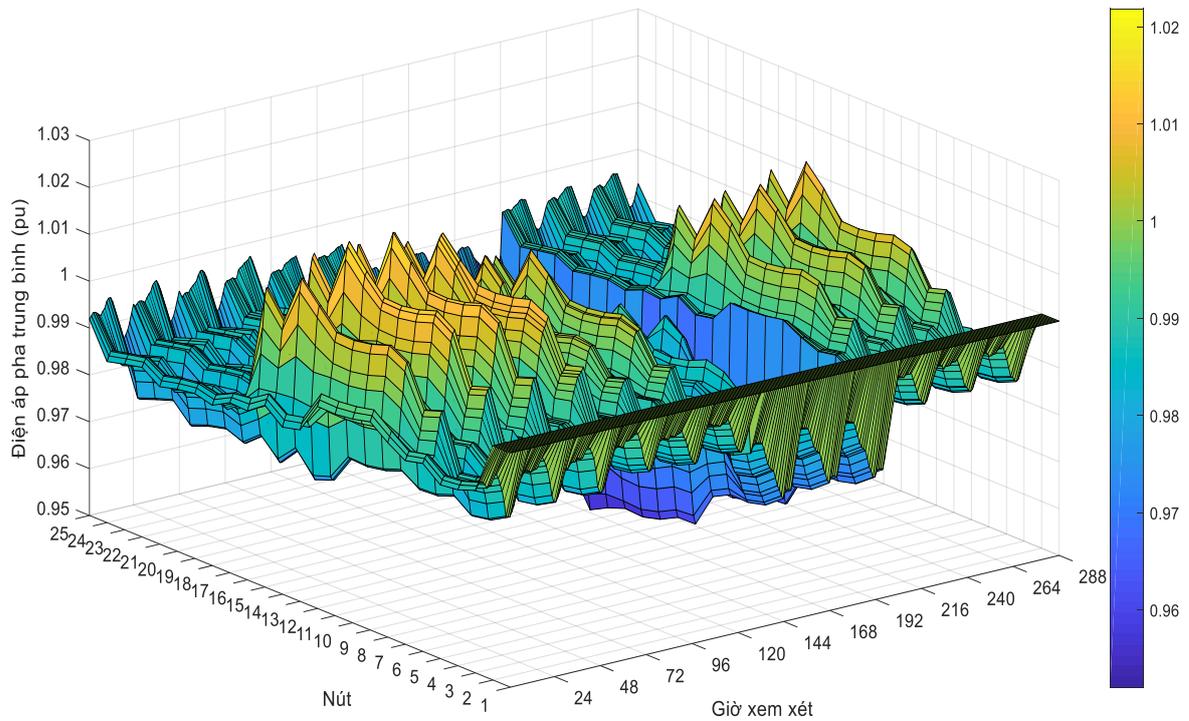
Do tính chất của hệ thống phân phối ba pha không cân bằng, giá trị điện áp giữa các pha trong cùng một nút có thể khác nhau. Vì vậy, cần phải xem xét điện áp của từng pha để đảm bảo chúng đáp ứng được các ràng buộc. Như đã hiển thị trong Hình 4.16, điện áp pha tối thiểu và tối đa của hệ thống ban đầu là 0,93 pu và 1,00 pu, nhưng các giá trị này được nâng lên 0,950 pu và 1,023 pu nhờ tích hợp thích hợp của các DGs tương ứng. Ngoài ra, điện áp pha trung bình của hệ thống trong từng khoảng thời gian cũng đều được minh họa rõ ràng trong nghiên cứu này. Theo đồ thị trên Hình 4.17, các giá trị điện áp pha tại các giờ gần và bằng tải đỉnh đã vi phạm giới hạn cho phép trong nghiên cứu này, vùng điện áp pha trung bình đã dao động trong khoảng [0,93, 1,00] (pu) cho hệ thống ban đầu. Tuy nhiên, điều này đã được khắc phục thành công với điện áp lên tới [0,952, 1,022] (pu) sau khi kết nối các DGs như được trình bày trong Hình 4.18. Cụ thể, điện áp pha trung bình thấp nhất là 0,930 pu khi tải cực đại trong hệ thống ban đầu và được cải thiện một cách mạnh mẽ lên đến 0,952 pu nhờ sự thâm nhập phù hợp của các DGs. Nhìn chung, tất cả các điện áp pha tại mỗi giờ đều thỏa mãn giới hạn điện áp trong khoảng [0,95, 1,05] (pu) nhờ sự lắp đặt phù hợp của các DGs. Đây được xem là một trong những lợi ích to lớn của việc xác định mức độ thâm nhập các nguồn năng lượng phân tán trong hệ thống phân phối.



**Hình 4.16:** Giá trị điện áp pha lớn nhất và bé nhất trước và sau khi có sự kết nối PFs và WFs



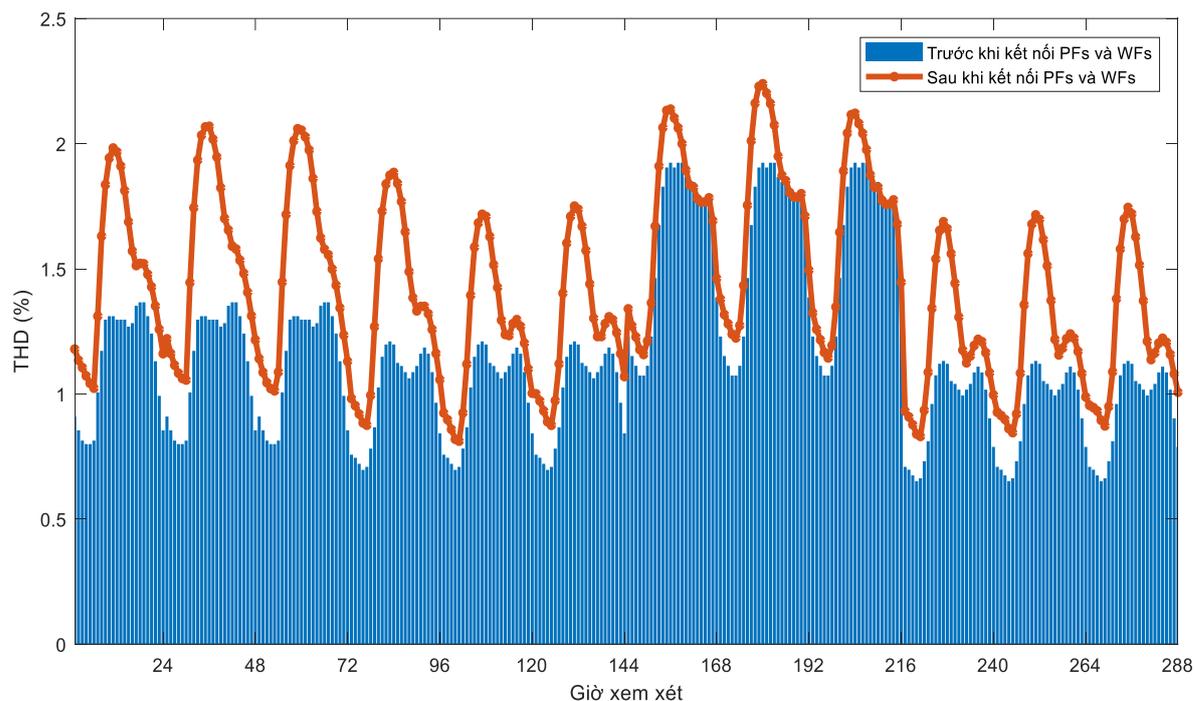
**Hình 4.17:** Điện áp pha trung bình trước khi có sự kết nối PFs và WFs



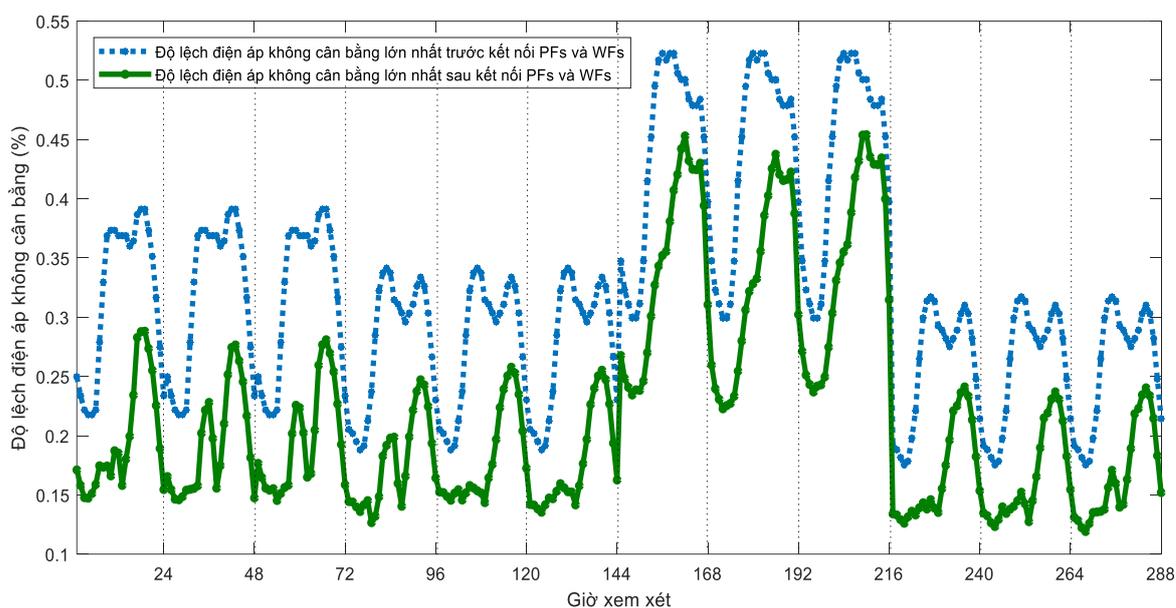
**Hình 4.18:** Điện áp pha trung bình sau khi có sự kết nối PFs và WFs

Như đã nêu, bên cạnh các nguồn sóng hài từ tải phi tuyến, nghiên cứu này sử dụng các DGs mà có cơ chế hoạt động dựa trên bộ biến tần, cũng có khả năng tạo ra sóng hài cho hệ thống. Vì vậy, điều cần thiết trong trường hợp này là phải xem xét các nguồn phát sóng hài từ tải phi tuyến và bộ biến tần. Như được biểu thị trong Hình 4.19, giá trị tối đa của THD tại mỗi giờ trước và sau khi tích hợp các DGs vào hệ thống lần lượt là 1,92% và 2,24%. Rõ ràng, độ méo hài đã tăng lên và chúng phụ thuộc vào mức độ thâm nhập của các DGs. Vì chỉ số THD không vượt quá 3% nên chỉ số IHD luôn nằm trong giới hạn cho phép. Điều này cho thấy các giá trị THD và IHD đại diện cho ảnh hưởng của sóng hài đều tuân thủ tiêu chuẩn IEEE Std. 519 và quy định 30/2019/TT-BTC sau khi xác định mức thâm nhập của các DGs phù hợp. Hơn nữa, nghiên cứu này được thực hiện trên hệ thống phân phối ba pha không cân bằng nên giá trị điện áp pha tại mỗi nút có thể xảy ra sự chênh lệch. Giống như đã thể hiện trên Hình 4.20, giá trị tối đa của độ lệch điện áp không cân bằng sau khi kết nối các PFs và WFs không chỉ đáp ứng IEEE Std. 45-2002 mà những giá trị này cũng tốt hơn so với hệ thống ban đầu. Cụ thể, độ lệch điện áp không cân bằng lớn nhất của hệ thống ban đầu là 0,523%, nhưng giá trị này giảm nhẹ xuống còn 0,454% khi tích hợp các DGs. Qua đó cho thấy nhờ việc phát công suất phản kháng từ các

bộ biến tần của PFs và WFs vào hệ thống phân phối đã cải thiện điện áp pha và góp phần làm giảm nhẹ độ lệch điện áp không cân bằng.



**Hình 4.19:** Giá trị lớn nhất  $THD$  trước và sau kết nối các PFs và WFs



**Hình 4.20:** Độ lệch điện áp không cân bằng lớn nhất trước và sau khi kết nối PFs và WFs

#### 4.2.5 Tổng kết bài toán thứ nhất

Các kết quả thu được và những hạn chế trong nghiên cứu này có thể được trình bày tóm tắt như sau:

- Nghiên cứu đã thành công trong việc xác định nghiệm tối ưu về vị trí và công suất phát của các nguồn phát điện phân tán năng lượng mặt trời và năng lượng gió trong hệ thống phân phối với sự thâm nhập của đa dạng nguồn sóng hài.
- Mục tiêu chính của công việc này là giảm thiểu tổng chi phí gồm (1) chi phí đầu tư, (2) chi phí vận hành và bảo trì cho PFs và WFs, (3) chi phí mua năng lượng từ lưới điện chính cho nhu cầu phụ tải và tổn thất điện năng, và (4) chi phí phát thải từ các nhà máy truyền thống. Kết quả cho thấy tổng chi phí vận hành hệ thống có thể giảm đáng kể bằng cách tích hợp các nguồn phát phù hợp. Nghiên cứu không chỉ đạt được lợi ích kinh tế so với hệ thống ban đầu mà còn thỏa mãn các ràng buộc kỹ thuật về điện áp nút, dòng điện nhánh và độ méo dạng do sóng hài.
- Trong nghiên cứu này, một thuật toán meta-heuristic mới gọi là MCOA được đề xuất áp dụng thành công nhằm giải quyết bài toán tối ưu hóa đang xem xét. MCOA là phiên bản cải tiến của COA ở các công thức tạo nghiệm mới cho ra mức độ hiệu quả vượt trội. MCOA được so sánh với các phương pháp mạnh mà đã công bố trước đó như IPSO, CSA và COA với cùng mục tiêu và các điều kiện ràng buộc để chứng minh tính ưu việt của MCOA. Kết quả thu được cho thấy phương pháp đề xuất tốt hơn các phương pháp khác về hiệu suất và độ ổn định.
- Nghiên cứu cũng đã phát triển thành công công cụ phối hợp mô phỏng giữa hai phần mềm là OpenDSS và MATLAB. Sự phối hợp mô phỏng này đã trở nên hiệu quả trong việc giải quyết vấn đề trào lưu công suất cũng như hỗ trợ giải quyết các vấn đề tối ưu trong hệ thống phân phối một cách chính xác và nhanh chóng.
- Như đã trình bày, mục tiêu chính là giảm thiểu tổng chi phí của hệ thống sau khi tích hợp PFs và WFs có xét đến tính bất định của tốc độ gió và bức xạ mặt trời. Trong trường hợp cụ thể này, các hàm phân bố xác suất Rayleigh và Beta được sử dụng để mô phỏng tốc độ gió và bức xạ mặt trời dựa trên dữ liệu lịch sử được thu thập từ địa điểm nghiên cứu trong ba năm (2019, 2020 và 2021). Nghiệm được tìm ra từ phương pháp đề xuất đã cắt giảm đáng kể

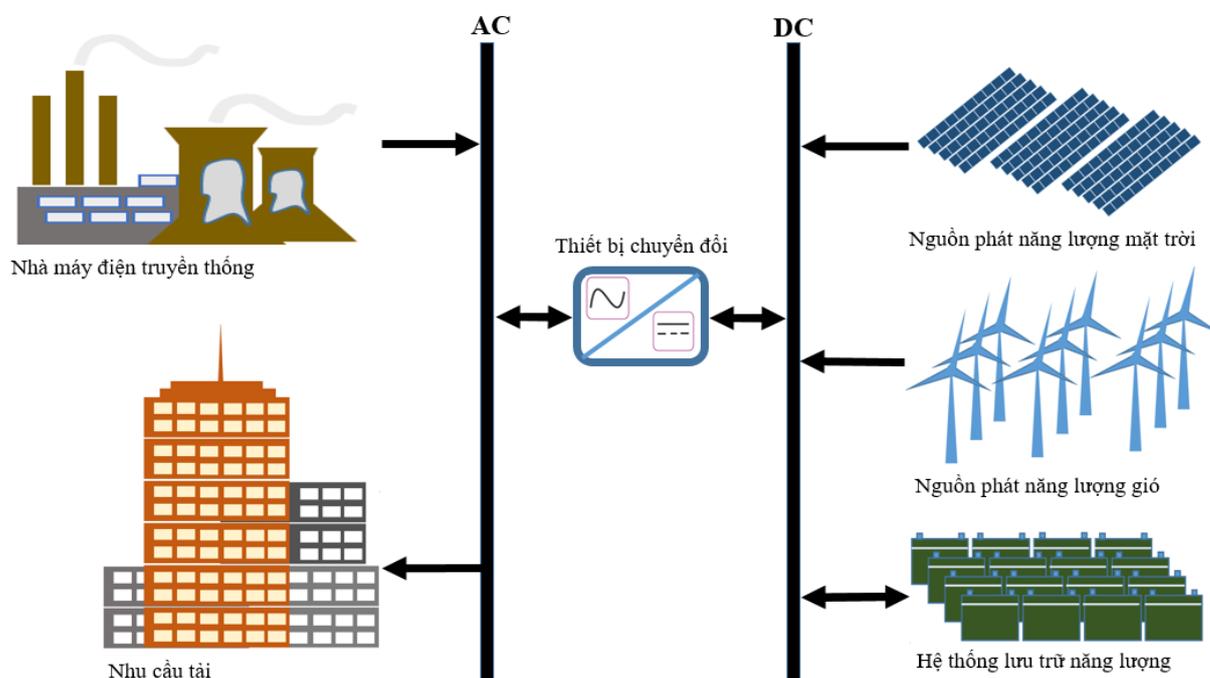
tổng chi phí từ 13,2203 triệu \$ xuống còn 11,8062 triệu \$ cho hệ thống phân phối chuẩn IEEE 25 nút. Qua đó cho thấy lợi ích to lớn về kinh tế lẫn kỹ thuật khi hệ thống được tích hợp PFs và WFs một cách hợp lý.

- Những cải tiến trong MCOA đã có hiệu quả trong việc nâng cao hiệu suất của thuật toán. Một cách cụ thể, MCOA tiết kiệm chi phí hơn 10,70% so với hệ thống ban đầu, trong khi các phương pháp khác lần lượt là từ 10,07% đến 10,59% cho hệ thống phân phối IEEE 25 nút. Mặc dù MCOA là một phương pháp mạnh để giải quyết các bài toán tối ưu hóa nhưng vẫn còn nhiều nhược điểm cần được cải thiện. Trong nghiên cứu này, MCOA chỉ giải quyết được bài toán vị trí và kích thước tối ưu cho PFs và WFs với sự thay đổi công suất của chúng lần lượt là từ 3000 mô-đun đến 30000 mô-đun và 03 tua-bin đến 30 tua-bin. Ngoài ra, vùng tìm kiếm vị trí cho các nguồn phát thay đổi từ 2 đến 25 đối với hệ thống phân phối IEEE 25 nút trong nghiên cứu này. Qua đó cho thấy không gian tìm kiếm nghiệm toàn cục của bài toán đang xét tương đối nhỏ nhưng phải mất tới 80 lần lặp với dân số 20 để đảm bảo sự hội tụ. Do đó, trong trường hợp các hệ thống phức tạp và không gian tìm kiếm rộng lớn, nghiệm tối ưu toàn cục thu được từ MCOA có thể không được đảm bảo. Nhìn chung, những cải tiến trong MCOA đều đã có hiệu quả, nhưng mức độ hiệu quả không nhiều so với COA gốc và các phương pháp khác.

### **4.3 Mô tả bài toán thứ hai**

Trong bài toán này, nguyên cứu tìm kiếm nghiệm tối ưu về vị trí và công suất lắp đặt cho sự tích hợp đồng thời của các nguồn phát năng lượng tái tạo và hệ thống lưu trữ năng lượng trong hệ thống ba pha không cân bằng phức tạp với nhiều thiết bị đã nối lưới sẵn. Nghiên cứu cũng đề xuất áp dụng hàm phân phối xác suất Beta và Rayleigh để mô phỏng bức xạ mặt trời và tốc độ gió cho mô-đun quang điện và tua-bin gió một cách phù hợp giống như đã miêu tả chi tiết trong mục 4.1.1. Không chỉ vậy, để cho thấy sự ảnh hưởng của sóng hài lên hệ thống lưới thì nghiên cứu còn xem xét sóng hài phát ra không chỉ từ tải phi tuyến mà còn từ các bộ biến đổi điện tử công suất của PFs, WFs và BESS với phổ hài như Bảng 4.1. Nghiên cứu cũng đề xuất áp dụng sự phối hợp mô phỏng giữa hai phần mềm nguồn mở OpenDSS và MATLAB cho việc giải quyết vấn đề tối ưu đang xem xét mà cũng đã được trình

bày ở mục 4.1.3. Cuối cùng, kết quả thu được từ thuật toán đề xuất (MCOA) được so sánh với các thuật toán khác nhằm chứng minh tính hiệu quả trong việc giải quyết các vấn đề tối ưu, nhất là bài toán phức tạp với không gian tìm kiếm tương đối rộng lớn. Mô hình bài toán thứ hai ở chương này được trình bày như bên dưới.



**Hình 4.21:** Hệ thống phân phối tích hợp các nguồn phát năng lượng tái tạo và hệ thống lưu trữ

### 4.3.1 Hàm mục tiêu

Nghiên cứu này giả sử dưới góc nhìn của đơn vị điện lực mà đang được giao đầu tư và triển khai hệ thống tích hợp các nguồn phát năng lượng tái tạo nối lưới nhằm gia tăng tỉ trọng năng lượng sạch quốc gia. Trong trường hợp này, tính kinh tế và kỹ thuật của dự án được quan tâm. Nghiên cứu xem xét giảm thiểu tổng số chi phí cho toàn bộ dự án để tối đa chi phí tiết kiệm được so với việc vận hành hệ thống ở trạng thái ban đầu, chưa có sự tích hợp các nguồn phân tán. Nghiên cứu xem xét yếu tố kinh tế trong việc triển khai dự án tích hợp đồng thời WFs, PFs và BESS trong lưới điện như là mục tiêu chính mà vẫn phải thỏa mãn các yếu tố kỹ thuật. Những chi phí này cần được biểu thị bằng công thức toán học như sau:

$$\text{Giảm tối đa } TC_{Total} = TC_{WF-PF-BESS}^{Inv\&OM} + TC_{Grid}(\$) \quad (4.63)$$

Trong đó,  $TC_{Total}$  là tổng chi phí của hệ thống đang xem xét;  $TC_{WF-PF-BESS}^{Inv\&OM}$  là chi phí đầu tư, vận hành và bảo trì WFs, PFs và BESS;  $TC_{Grid}$  là chi phí phát điện cho nhu cầu phụ tải và tổn thất điện năng từ lưới điện chính.

#### 4.3.1.1 Chi phí đầu tư, bảo trì và vận hành của PFs, WFs và BESS

$TC_{WF-PF-BESS}^{Inv\&OM}$  là yếu tố về kinh tế quan trọng cần được xác định để xây dựng chiến lược kết nối phù hợp cho các tổ máy phát điện phân tán. Tổng chi phí này bao gồm chi phí đầu tư, O&M cho PFs, WFs và BESS.

$$TC_{WF-PF-BESS}^{Inv\&OM} = TC_{WF} + TC_{PF} + TC_{BESS} \text{ (\$)} \quad (4.64)$$

Trong đó,  $TC_{WF}$ ,  $TC_{PF}$  and  $TC_{BESS}$  là chi phí cho WFs, PFs và BESS, và các giá trị này được xác định bằng cách áp dụng các công thức tính toán như sau [62].

$$TC_{WF} = \sum_{i=1}^{N_{WF}} (C_{WF}^{Cap} \cdot P_{WF,i}^{Rated}) + 91,25 \sum_{y=1}^{20} \sum_{h=1}^{96} \sum_{i=1}^{N_{WF}} (\theta_y \cdot C_{WF}^{O\&M} \cdot P_{WF,i,h,y}) \text{ (\$)} \quad (4.65)$$

$$TC_{PF} = \sum_{j=1}^{N_{PF}} (C_{PF}^{Cap} \cdot P_{PF,j}^{Rated}) + 91,25 \sum_{y=1}^{20} \sum_{h=1}^{96} \sum_{j=1}^{N_{PF}} (\theta_y \cdot C_{PF}^{O\&M} \cdot P_{PF,j,h,y}) \text{ (\$)} \quad (4.66)$$

$$TC_{BESS} = \sum_{k=1}^{N_{BESS}} (C_{BESS}^{Cap} \cdot E_{BESS,k}^{Rated}) + \sum_{k=1}^{N_{BESS}} (C_{BESS}^{Aux} \cdot P_{BESS,k}^{Rated}) + \sum_{y=1}^{20} \sum_{k=1}^{N_{BESS}} (\theta_y \cdot C_{BESS}^{O\&M} \cdot E_{BESS,k,y}^{Rated}) \text{ (\$)} \quad (4.67)$$

Nghiên cứu này giả định vòng đời của dự án là 20 năm, một năm có 365 ngày, 4 ngày tượng trưng cho 4 mùa để thể hiện sự thay đổi về nhu cầu phụ tải và công suất phát của các nguồn phân tán trong năm. Do đó, hằng số 91,25 ở công thức (4.65) và (4.66) là thương của 8760 giờ (1 năm) và 96 giờ (4 ngày đại diện). Bên cạnh đó, chi phí O&M mà được trả trong giai đoạn tương lai cũng được quy về giá trị hiện tại và hàm  $\theta_y$  được thêm vào giá trị hiện tại trong nghiên cứu này [50].

#### 4.3.1.2 Chi phí phát điện từ lưới chính

Chi phí phát điện để cung cấp cho phụ tải và tổn thất từ lưới điện chính sẽ được chi trả nếu như sản lượng điện từ các nguồn phát năng lượng tái tạo không đủ cung cấp. Chi phí này được tính bằng việc áp dụng công thức sau:

$$TC_{Grid} = 91,25 \times \sum_{y=1}^{20} \sum_{h=1}^{96} (\theta_y \cdot Pr_{h,y}^{Grid} \cdot P_{Sub,h,y}) \text{ (\$)} \quad (4.68)$$

Trong đó,  $Pr_{h,y}^{Grid}$  (\$/MWh) và  $P_{Sub,h,y}$  (MW) lần lượt là giá phát điện từ lưới và công suất tác dụng được cung cấp bởi lưới điện chính qua trạm biến áp vào năm thứ  $y$  và giờ thứ  $h$ .

#### 4.3.2 Các ràng buộc cho hàm mục tiêu

Nghiệm tối ưu được tìm ra theo hàm mục tiêu cần phải thỏa mãn các ràng buộc kỹ thuật đã đề ra như được liệt kê ở bên dưới.

#### 4.3.2.1 Ràng buộc về cân bằng công suất

Trong trường hợp này, hệ thống lưu trữ năng lượng mà được kết nối với hệ thống có thể hoạt động ở chế độ nạp hoặc xả năng lượng lên lưới. Do đó, công thức cân bằng công suất tác dụng nên bao gồm hai giai đoạn nạp và xả như các công thức bên dưới:

$$P_{Sub,h,y} + \sum_{i=1}^{N_{WF}} P_{WF,i,h,y} + \sum_{j=1}^{N_{PVF}} P_{PVF,j,h,y} = \sum_{b=1}^{N_b} P_{b,h,y}^{Aft} + \sum_{d=1}^{N_d} P_{d,h,y} + \sum_{k=1}^{N_{BESS}} P_{BESS,k,h,y}^{Ch} \quad (4.69)$$

$$P_{Sub,h,y} + \sum_{i=1}^{N_{WF}} P_{WF,i,h,y} + \sum_{j=1}^{N_{PVF}} P_{PVF,j,h,y} + \sum_{k=1}^{N_{BESS}} P_{BESS,k,h,y}^{DisCh} = \sum_{b=1}^{N_b} P_{b,h,y}^{Aft} + \sum_{d=1}^{N_d} P_{d,h,y} \quad (4.70)$$

Công thức cân bằng công suất phản kháng có thể được biểu diễn như sau:

$$Q_{Sub,h,y} + \sum_{i=1}^{N_{WF}} Q_{WF,i,h,y} + \sum_{j=1}^{N_{PVF}} Q_{PVF,j,h,y} = \sum_{b=1}^{N_b} Q_{b,h,y}^{Aft} + \sum_{d=1}^{N_d} Q_{d,h,y} \quad (4.71)$$

#### 4.3.2.2 Giới hạn về dòng điện nhánh

Dòng điện của mỗi nhánh không được vượt quá giới hạn tối đa có thể chấp nhận được của hệ thống phân phối [50].

$$I_b^{Max} \geq I_{b,p}; \quad b = 1, 2, \dots, N_b \& p = 1, 2, \dots, N_p \quad (4.72)$$

#### 4.3.2.3 Giới hạn về điện áp pha

Điện áp pha tại các nút cần được giữ ở giới hạn cho phép của 1,05 pu và 0,95 pu [52].

$$V^{Max} \geq V_{s,h,y}^p \geq V^{Min}, \quad s = 1, 2, \dots, N_b \& p = 1, 2, \dots, N_p \quad (4.73)$$

#### 4.3.2.4 Ràng buộc về công suất nạp và xả

Các giới hạn về công suất sạc và xả của hệ thống lưu trữ năng lượng nên bị ràng buộc như sau [38]:

$$0 \leq P_{BESS,k,h}^{Ch} \leq \varepsilon^{Ch} \cdot P_{BESS}^{Rated}; \quad h = 1, 2, \dots, 96 \& k=1, 2, \dots, N_{BESS} \quad (4.74)$$

$$0 \geq P_{BESS,k,h}^{DisCh} \geq -P_{BESS}^{Rated} \cdot \varepsilon^{DisCh}; \quad h = 1, 2, 3 \dots, 96 \& k=1, 2, 3 \dots, N_{BESS} \quad (4.75)$$

Trong các công thức (4.74 và 4.75),  $\varepsilon^{DisCh}$  và  $\varepsilon^{Ch}$  là hiệu suất của các giai đoạn xả và nạp;  $P_{BESS,h}^{DisCh}$  và  $P_{BESS,h}^{Ch}$  lần lượt là công suất phát điện và công suất sạc của BESS giờ thứ  $h$ .

#### 4.3.2.5 Giới hạn về sóng hài

Trong nghiên cứu này, sóng hài lan truyền trong hệ thống do việc kết nối các nguồn phát phân tán mà sử dụng các thiết bị chuyển đổi công suất cũng như tải phi tuyến nên các giới hạn cho các chỉ số về sóng hài cần phải được thiết lập. Giá trị cho phép lớn nhất của hai chỉ số mà đại diện cho mức độ nhiễu sóng hài là  $THD^{Max}$  và  $IHD^{Max}$  được ấn định là 5% và 3% theo quy định 30/2019/TT-BCT và tiêu chuẩn IEEE Std. 519 [55].

$$THD^{Max} \geq THD_{s,h,y}; s=1, 2, 3, \dots, N_b \quad (4.76)$$

$$IHD^{Max} \geq IHD_{s,h,y}^{Hr}; s=1, 2, 3, \dots, N_b \quad (4.77)$$

#### 4.3.2.6 Giới hạn về mức độ thâm nhập của PFs, WFs và BESS

Công suất lắp đặt cho mỗi WF và PVF phải nằm trong giới hạn mà được xác định trước:

$$P_{WF}^{Max} \geq P_{WF,i}^{Rated} \geq P_{WF}^{Min}; i = 1, 2, \dots, N_{WF} \quad (4.78)$$

$$P_{PF}^{Max} \geq P_{PF,j}^{Rated} \geq P_{PF}^{Max}; j = 1, 2, \dots, N_{PF} \quad (4.79)$$

Dung lượng của BESS tại mỗi giờ nên được xác định bởi công thức (4.80). Trong đó,  $\Delta E_{BESS}$  được coi là dung lượng thay đổi ở hai thời điểm liên tiếp nhau và dung lượng này có thể nhận giá trị âm (hoặc dương) tùy thuộc vào trạng thái của BESS. Bên cạnh đó, giới hạn cho phép tối thiểu ( $E_{BESS}^{Min}$ ) và giới hạn cho phép tối đa ( $E_{BESS}^{Max}$ ) của dung lượng lưu trữ cũng lần lượt là 20% và 90% so với giá trị danh định để giảm thiểu sự hủy hoại cho pin [38]:

$$E_{BESS,h} = E_{BESS,h-1} + \Delta E_{BESS} \quad (4.80)$$

$$E_{BESS}^{Min} \leq E_{BESS,h} \leq E_{BESS}^{Max}; h = 1, 2, \dots, 96 \quad (4.81)$$

### 4.3.3 Áp dụng thuật toán đề xuất giải quyết vấn đề tối ưu đang xem xét

#### 4.3.3.1 Khởi tạo dân số ban đầu

Giống như đã đề cập, nghiên cứu tìm kiếm vị trí và công suất của các WFs và PFs. Do đó, mỗi nghiệm trong nghiên cứu này phải chứa các biến mà đại diện cho vị trí và công suất của các WFs và PFs. Ngoài WFs và PFs, biến vị trí và công suất

phát ở mỗi thời điểm xem xét của BESS cũng được bao gồm trong tập nghiệm. Tập các biến này có thể được biểu diễn dưới dạng ma trận tương tự như (3.37) và các biến của nghiệm tạo ra phải được giữ trong giới hạn được xác định trước giữa  $S^{Min}$  và  $S^{Max}$ .

$$S^{Min} = [L_i^{Min}, P_i^{Min}, L_j^{Min}, P_j^{Min}, L_{BESS,k}^{Min}, P_{BESS,k,h}^{Min}] \quad (4.82)$$

$$S^{Max} = [L_i^{Max}, P_i^{Max}, L_j^{Max}, P_j^{Max}, L_{BESS,k}^{Max}, P_{BESS,k,h}^{Max}] \quad (4.83)$$

Trong công thức (4.82) và công thức (4.83),  $i = 1, 2, \dots, N_{PF}, j = 1, 2, \dots, N_{WF}, k = 1, 2, \dots, N_{BESS}$  và  $h = 1, 2, \dots, 96$

#### 4.3.3.2 Đánh giá chất lượng cho mỗi nghiệm

Mỗi nghiệm được tạo ra sẽ được tính giá trị hàm mục tiêu và đánh giá mức độ phù hợp bằng cách sử dụng hàm thích nghi như được trình bày trong biểu thức bên dưới.

$$SF_{pk,ce} = TC_{Total,pk,ce} + \sigma_V \cdot \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{p=1}^{N_p} \Delta V_{s,pk,ce}^p + \sigma_I \cdot \sum_{b=1}^{N_b} \sum_{p=1}^{N_p} \Delta I_{b,pk,ce}^p \quad (4.84)$$

$$+ \sigma_{THD} \cdot \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{p=1}^{N_p} \Delta THD_{s,pk,ce}^p + \sigma_{IHD} \cdot \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{o=1}^{Hr} \Delta IHD_{s,pk,ce}^{o,p}$$

Trong đó, các thành phần của hàm phạt có thể được tìm ra bởi việc áp dụng các công thức từ (4.85) – (4.88).

$$\Delta V_{s,pk,ce}^p = \begin{cases} V_{s,pk,ce}^p - V^{Max} & \text{nếu } V_{s,pk,ce}^p > V^{Max} \\ V^{Min} - V_{s,pk,ce}^p & \text{nếu } V_{s,pk,ce}^p < V^{Min} \\ 0 & \text{trường hợp khác} \end{cases} \quad (4.85)$$

$$\Delta I_{b,pk,ce}^p = \begin{cases} I_{b,pk,ce}^p - I_{b,p}^{Max} & \text{nếu } I_{b,pk,ce}^p > I_{b,p}^{Max} \\ 0 & \text{trường hợp khác} \end{cases} \quad (4.86)$$

$$\Delta THD_{s,pk,ce}^p = \begin{cases} THD_{s,pk,ce}^p - THD^{Max} & \text{nếu } THD_{s,pk,ce}^p > THD^{Max} \\ 0 & \text{trường hợp khác} \end{cases} \quad (4.87)$$

$$\Delta IHD_{s,pk,ce}^{o,p} = \begin{cases} IHD_{s,pk,ce}^{o,p} - IHD^{Max} & \text{nếu } IHD_{s,pk,ce}^{o,p} > IHD^{Max} \\ 0 & \text{trường hợp khác} \end{cases} \quad (4.88)$$

#### 4.3.3.3 Điều chỉnh và cập nhật nghiệm mới

Các biến của từng nghiệm mới tạo ra cần được kiểm tra giới hạn cho phép và hiệu chỉnh nếu có vi phạm theo quy luật của công thức (4.89). Sau đó, các nghiệm mới sẽ được đánh giá bằng cách sử dụng hàm đánh giá và các nghiệm có chất lượng

tốt sẽ được giữ lại thông qua so sánh bằng cách áp dụng các công thức (4.90 và 4.91).

$$\mathcal{R}_{v,pk,ce}^{New} = \begin{cases} \mathcal{R}_v^{Min} & \text{nếu } \mathcal{R}_{v,pk,ce}^{New} < \mathcal{R}_v^{Min} \\ \mathcal{R}_v^{Max} & \text{nếu } \mathcal{R}_{v,pk,ce}^{New} > \mathcal{R}_v^{Max}; \\ \mathcal{R}_{va,pk,ce}^{New} & \text{trường hợp khác} \end{cases} \quad (4.89)$$

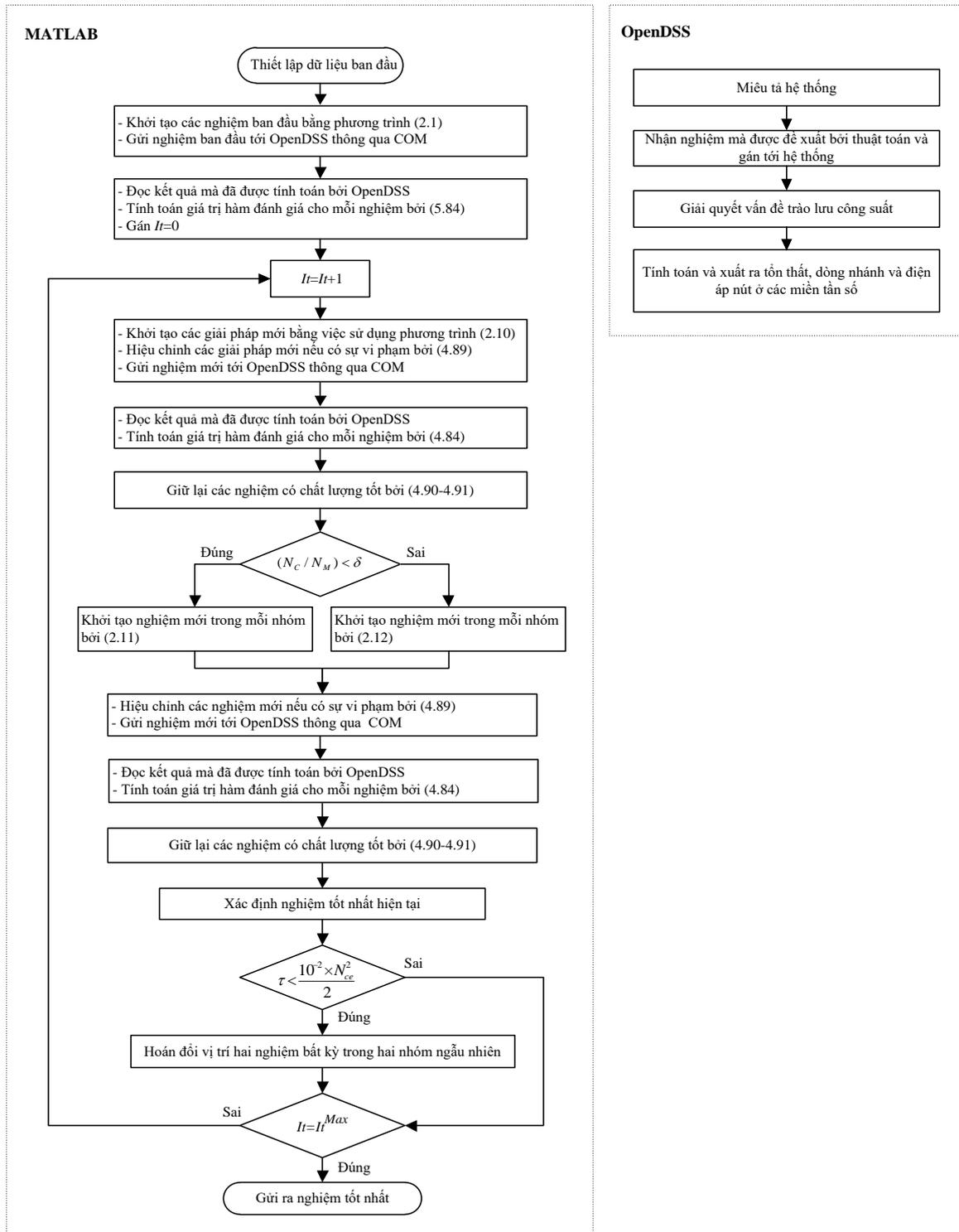
$$v = 1, 2, \dots, N_{var}; pk = 1, 2, 3 \dots, N_{pk}; ce = 1, 2, 3 \dots, N_{ce}$$

$$S_{pk,ce} = \begin{cases} S_{pk,ce}^{New} & \text{nếu } SF_{pk,ce}^{New} < SF_{pk,ce} \\ S_{pk,ce} & \text{trường hợp khác} \end{cases} \quad (4.90)$$

$$SF_{pk,ce} = \begin{cases} SF_{pk,ce}^{New} & \text{nếu } SF_{pk,ce}^{New} < SF_{pk,ce} \\ SF_{pk,ce} & \text{trường hợp khác} \end{cases} \quad (4.91)$$

#### 4.3.3.4 Lưu đồ giải thuật cho việc áp dụng MCOA để giải quyết vấn đề tối ưu

Nghiên cứu này xem xét việc tích hợp đồng thời WFs, PFs và BESS trong lưới điện phân phối chuẩn IEEE 123 nút. Nghiệm toàn cục được xác định bằng cách sử dụng thuật toán tối ưu MCOA với sự phối hợp mô phỏng giữa MATLAB và OpenDSS như là công cụ tính toán hiệu quả để giải quyết vấn đề trên. Lưu đồ giải thuật cho công việc cụ thể này được trình bày một cách ngắn gọn như Hình 4.22.



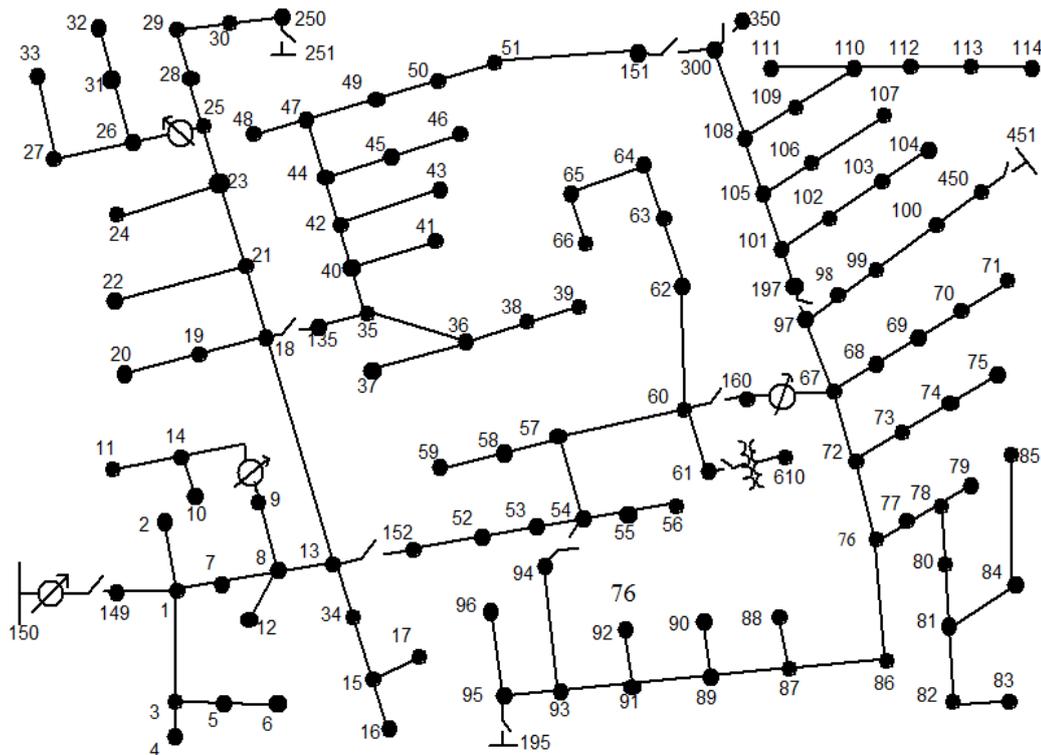
**Hình 4.22:** Lưu đồ ứng dụng MCOA cho bài toán thứ hai của Chương 4

### 4.3.4 Kết quả mô phỏng

#### 4.3.4.1 Hệ thống phân phối chuẩn IEEE 123 nút

Mục đích của nghiên cứu này xác định vị trí và công suất lắp đặt của WFs và PFs cũng như chiến lược nạp/ xả năng lượng của BESS một cách tối ưu trong hệ thống phân phối chuẩn IEEE 123 nút [81]. Đây là hệ thống ba pha không cân bằng

hoạt động ở điện áp 4,16 kV với nhiều thiết bị nối lưới như tụ điện, khóa mở, bộ điều chỉnh điện áp, và đa dạng kiểu phân phối tải. Trong đó, loại tải một pha kết nối ở các nút chiếm tỉ lệ cao nhất tới 94.1%, loại tải ba pha không cân bằng chiếm tỉ lệ thấp nhất là 2.4% và còn lại tải ba pha cân bằng chiếm 3.5%. Sự phân bố về số lượng tải chỉ ra rằng có các đường phân phối ba pha và một pha trong hệ thống không cân bằng và tải của từng pha tại cùng một nút có thể bằng hoặc hoàn toàn khác nhau. Sơ đồ đơn tuyến của hệ thống thử nghiệm trên được biểu thị như trong Hình 4.23.



**Hình 4.23:** Sơ đồ đơn tuyến hệ thống phân phối chuẩn IEEE 123 nút

#### 4.3.4.2 Dữ liệu mô phỏng và thông số điều khiển

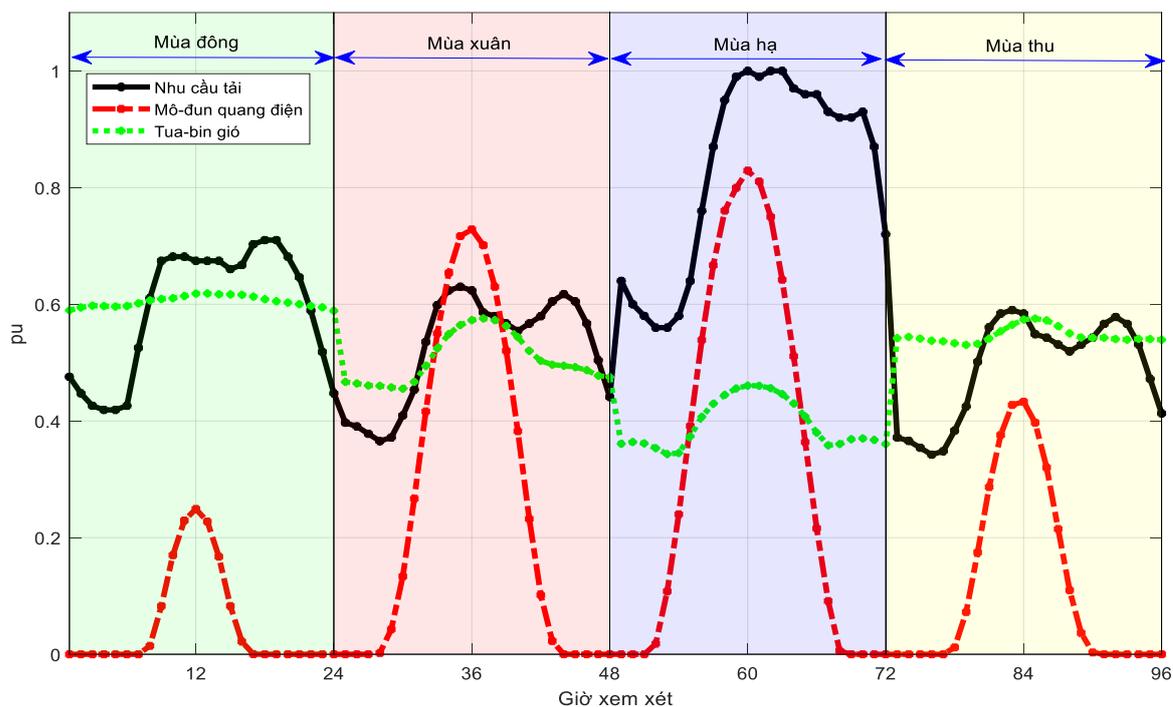
Nghiên cứu này áp dụng MCOA và các phương pháp mạnh khác như SSA và COA cho mục tiêu là giảm thiểu tổng chi phí trong hệ thống phân phối IEEE 123 nút. Dữ liệu về tốc độ gió và bức xạ mặt trời trong 3 năm (2018, 2019 và 2020) được lấy từ khu vực có vĩ độ  $56,4907^\circ$  Bắc và kinh độ  $4,2026^\circ$  Tây (Scotland) như Hình 5.24 để phục vụ tính toán công suất phát của WFs và PFs. Dữ liệu lịch sử trên được thu thập từ bộ dữ liệu thực của POWER Data Access Viewer [76]. Như đã đề cập, một năm được chia thành 4 mùa và một ngày đại diện cho một mùa để thể hiện sự thay đổi theo thời gian của các nguồn phát phân tán. Trong công việc cụ thể này, ngày

điển hình đại diện cho mỗi mùa được chia thành 24 giai đoạn thời gian (mỗi giờ trong ngày là một đoạn thời gian). Như vậy, có tổng cộng 96 điểm thời gian đại diện được xem xét trong một năm. Nghiên cứu thu thập dữ liệu lịch sử của 3 năm, trong đó xem xét 30 ngày mỗi tháng và 3 tháng mỗi mùa, do đó, có tổng cộng 26280 điểm dữ liệu về tốc độ gió và bức xạ mặt trời được xem xét. Cho việc mô phỏng tất cả các phương pháp, số lần lặp cho mỗi lần chạy thử ( $I^{Max}$ ) là 200 để đảm bảo sự hội tụ hoàn toàn và số lần chạy thử độc lập ( $Num_{Trial}$ ) được chọn là 40. Để lập mô hình cho cả MCOA và COA, số lượng chó sói trong mỗi nhóm ( $N_{ce}$ ) bằng số lượng nhóm trong quần thể ( $N_{pk}$ ) và là 4. Ngưỡng ( $\delta$ ) được chọn là 0,2 thông qua khảo sát. Cho việc mô phỏng SSA, dân số được chọn là 20 và các thông số còn lại của chúng được tham chiếu từ các nghiên cứu trong [80]. Các phương pháp đã triển khai được mô phỏng trên MATLAB từ máy tính để bàn có RAM 16 GB và bộ xử lý 3,70 GHz. Như đã đề cập, nghiên cứu này xem xét các nguồn phát sóng hài từ tải phi tuyến và từ các bộ biến tần của WFs, PFs và BESS. Trong đó, tải phi tuyến ở nút số 32, 41, 70 và 95 được giả sử là có biên độ hài kiểu 1, và tải phi tuyến ở nút 12, 55, 84 và 111 là có biên độ hài kiểu 2. Thông tin về biên độ các nguồn sóng hài được trình bày rõ ràng như trong Bảng 4.1. Nghiên cứu này giả định rằng có hai nguồn phát năng lượng gió và hai nguồn phát năng lượng mặt trời được tích hợp vào hệ thống phân phối bằng cách áp dụng các bộ biến tần có hệ số công suất là 0,9. Ngoài ra, số lượng tối thiểu và lớn nhất đối với WFs và PFs được xem xét là (2 tua-bin gió và 30 tua-bin gió) có công suất định mức mỗi tua-bin là 100 kW và (2000 mô-đun quang điện và 30000 mô-đun quang điện) với công suất mỗi mô-đun là 75 W, một cách tương ứng. Hơn nữa, hệ thống lưu trữ năng lượng BESS được xem xét để kết nối với hệ thống với giá trị dung lượng và công suất định mức lớn nhất cho BESS giả định lần lượt là 4,0 MWh và 1,0 MW. Trong trường hợp này, năng lượng ban đầu cũng được giả định là 1,0 MWh. Hiệu suất nạp năng lượng ( $\varepsilon^{Ch}$ ) và phát năng lượng ( $\varepsilon^{DisCh}$ ) từ BESS là 90% đối với ắc quy. Ngoài ra, các thông số tính toán tổng chi phí đầu tư, O&M cho WFs, PFs và BESS cũng được liệt kê một cách rõ ràng trong Bảng 3.1 ở Chương 3.



**Hình 4.24:** Khu vực khảo sát thực hiện nghiên cứu (Scotland)

Trên thực tế, giả sử các nguồn phát điện phân tán (WFs, PFs và BESS) không có đủ công suất để cung cấp cho nhu cầu phụ tải thì việc phát năng lượng điện từ lưới điện chính thông qua trạm biến áp là cần thiết. Tuy nhiên, giá điện giờ cao điểm, giờ chuẩn và giờ thấp điểm cũng khác nhau. Do đó, nghiên cứu này giả định giá điện theo giờ ( $Pr_h^{Grid}$ ) được công bố giống như Bảng 3.1 ở Chương 3. Để mô phỏng sự thay đổi nhu cầu tải theo giờ, dữ liệu tải được lấy từ IEEE RTS-96 như đã đề cập trong nghiên cứu [62]. Ngoài ra, các hàm phân phối xác suất Rayleigh và Beta cũng được sử dụng trong mô phỏng tốc độ gió và bức xạ mặt trời dựa trên dữ liệu thực tế ở vùng khảo sát, để tính toán hệ số ngõ ra công suất tua-bin gió và mô-đun quang điện tương ứng. Các kết quả tính toán thu được về hệ số công suất ngõ ra của cho tua-bin gió và mô-đun quang điện, và hệ số nhu cầu tải cũng được biểu thị dưới dạng đường cong như trong Hình 4.25.



**Hình 4.25:** Hệ số công suất của mô-đun quang điện, tua-bin gió và tải

#### 4.3.4.3 Phân tích kết quả mô phỏng

Với tính chất ngẫu nhiên của các phương pháp áp dụng, 40 lần chạy thử được thực hiện để xác định vị trí và công suất lắp đặt phù hợp nhất cho WFs, PFs và BESS. Kết quả tốt nhất thu được từ các phương pháp được trình bày rõ ràng trong Bảng 4.3. Trong bảng này, vị trí lắp đặt và số lượng các nguồn phát năng lượng gió và năng lượng mặt trời được xác định thành công với công suất định mức cho mỗi tua-bin và mô-đun quang điện như đã đề cập trong mục dữ liệu mô phỏng. Bên cạnh các nguồn phát năng lượng tái tạo, vị trí, công suất nạp/ xả và dung lượng lắp đặt cho hệ thống lưu trữ năng lượng cũng được thể hiện. Từ các giải pháp tốt nhất của các phương pháp thực thi gồm SSA, COA và MCOA, các chi phí liên quan của từng thành phần cũng được tính toán và trình bày chi tiết như trong Bảng 4.4.

**Bảng 4.3:** Kết quả tốt nhất của các phương pháp trong hệ thống IEEE 123 nút

P/P	WFs	PFs	BESS
SSA	Nút: 95 – 07 tua-bin – 03 pha	Nút: 55 – 3010 mô-đun – 03 pha	Nút: 108 – 0,222 MW/
	Nút: 21 – 13 tua-bin – 03 pha	Nút: 59 – 8873 mô-đun – 01 pha	1,889 MWh – 03 pha
COA	Nút: 15 – 15 tua-bin	Nút: 300 – 8901 mô-đun	Nút: 300 –

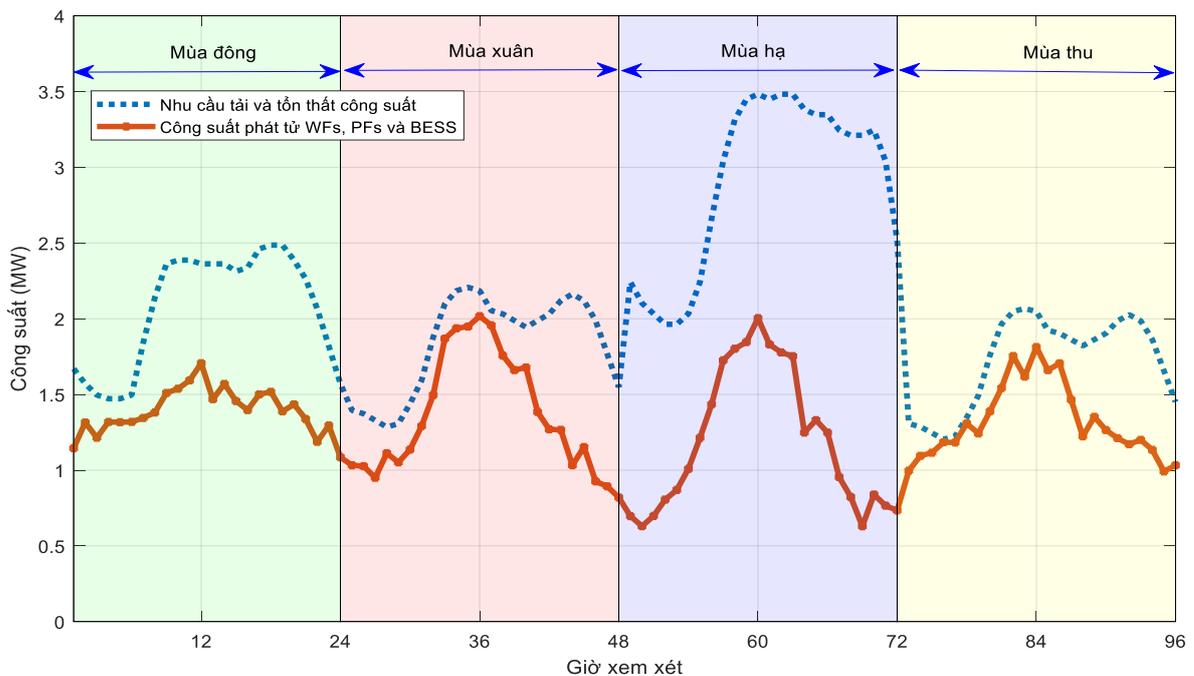
	– 01 pha Nút: 34 – 07 tua-bin – 01 pha	– 03 pha Nút: 94 – 6586 mô-đun – 01 pha	0,444 MW/ 1,445 MWh – 03 pha
MCOA	Nút: 19 – 12 tua-bin – 01 pha Nút: 300 – 10 tua-bin – 03 pha	Nút: 53 – 3018 mô-đun – 03 pha Nút: 15 – 9747 mô-đun – 01 pha	Nút: 15 – 0,232 MW/ 1,513 MWh – 01 pha

**Bảng 4.4:** Sự so sánh các chi phí liên quan trong 20 năm chu kỳ dự án

Mục	Hệ thống gốc	SSA	COA	MCOA
$TC_{WF}$ (triệu \$)	-	4,5365	4,9975	5,0339
$TC_{PF}$ (triệu \$)	-	0,8195	1,0681	0,8803
$TC_{BESS}$ (triệu \$)	-	0,5829	0,5500	0,4874
$TC_{WF-PF-BESS}^{Inv\&OM}$ (triệu \$)	-	5,9389	6,6156	6,4016
$TC_{Grid}$ (triệu \$)	13,4079	5,7789	4,9024	5,0847
$TC_{Total}$ (triệu \$)	13,4079	11,7178	11,5180	11,4863
Tiết kiệm (triệu \$)	-	1,6901	1,8899	1,9216
Tỉ lệ tiết kiệm (%)	-	12,61	14,10	14,33

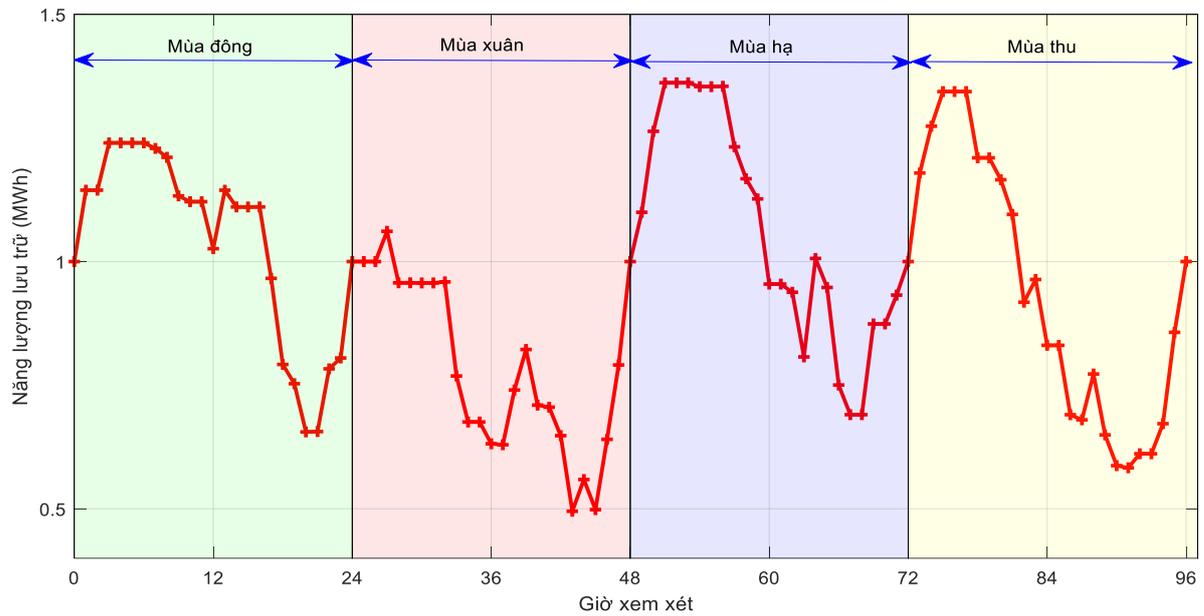
Giống như kết quả thu được trong Bảng 4.4, việc xác định giải pháp để tích hợp đồng thời WFs, PFs và BESS vào hệ thống phân phối đã mang lại lợi ích kinh tế lớn hơn nhiều so với hệ thống chưa tích hợp bất kỳ nguồn phát phân tán nào. Một cách cụ thể, tổng chi phí đã giảm từ 13,4079 triệu \$ xuống còn 11,4863 triệu \$, tương ứng với việc tiết kiệm 1,9216 triệu \$ nhờ việc kết nối các nguồn phát phân tán trên một cách hợp lý. Điều này đã chứng minh mạnh mẽ lợi ích kinh tế trong việc kết nối các nguồn phát trong hệ thống phân phối. Trong trường hợp này, so với các phương pháp so sánh, tổng chi phí của hàm mục tiêu từ giải pháp của MCOA là thấp nhất, với 11,4863 triệu \$, trong khi đó SSA và COA lần lượt là 11,7178 triệu \$ và 11,5180 triệu \$. Qua đó cho thấy việc áp dụng giải pháp của MCOA có thể mang lại tính kinh tế hơn so với COA và SSA. Để làm sáng tỏ điều này thì chi phí của từng thành phần trong hàm tổng chi phí cũng được xem xét. Như Bảng 4.4 đã thể

hiện, chi phí đầu tư và O&M cho sự thâm nhập của các nguồn phát phân tán (WFs, PFs và BESS) lần lượt là (4,5365 triệu \$, 0,8195 triệu \$ và 0,5829 triệu \$) cho giải pháp từ SSA, (4,9975 triệu \$, 1,0681 triệu \$, 0,5500 triệu \$) cho giải pháp từ COA và (5,0339 triệu \$, 0,8803 triệu \$, 0,4874 triệu \$) cho giải pháp từ MCOA. Từ các kết quả trên, tổng chi phí đầu tư và O&M cho các nguồn phát này có thể được tính toán lần lượt tương ứng với 5,9389 triệu \$, 6,6156 triệu \$ và 6,4016 triệu \$ cho SSA, COA và MCOA. Rõ ràng, tổng chi phí đầu tư và O&M từ giải pháp của MCOA thì cao hơn SSA tới 462,7 ngàn \$, nhưng lại thấp hơn so với COA là 214,0 ngàn \$. Mặt khác, xét đến chi phí mua năng lượng từ lưới điện chính thông qua trạm biến áp trong trường hợp các nguồn phát phân tán nối lưới không đủ điện năng cung cấp cho nhu cầu phụ tải thì chi phí phải trả từ MCOA chỉ là 5,0847 triệu \$, thấp hơn nhiều so với SSA là 5,7789 triệu \$ và nó cao hơn một chút so với COA là 4,9024 triệu \$. Hơn nữa, khi so sánh tỉ lệ chi phí tiết kiệm giữ các phương pháp thì giá trị này của MCOA chiếm tới 14,33% (tương đương 1,9216 triệu \$) và nó cũng cao hơn so với SSA và COA, lần lượt là 12,61% (1,6901 triệu \$) và 14,10% (1,8899 triệu \$). Từ đó cho thấy giải pháp tối ưu của MCOA có tính kinh tế hơn các giải pháp khác nên có thể khẳng định phương pháp đề xuất là phương pháp tốt nhất trong ba phương pháp đã được sử dụng.

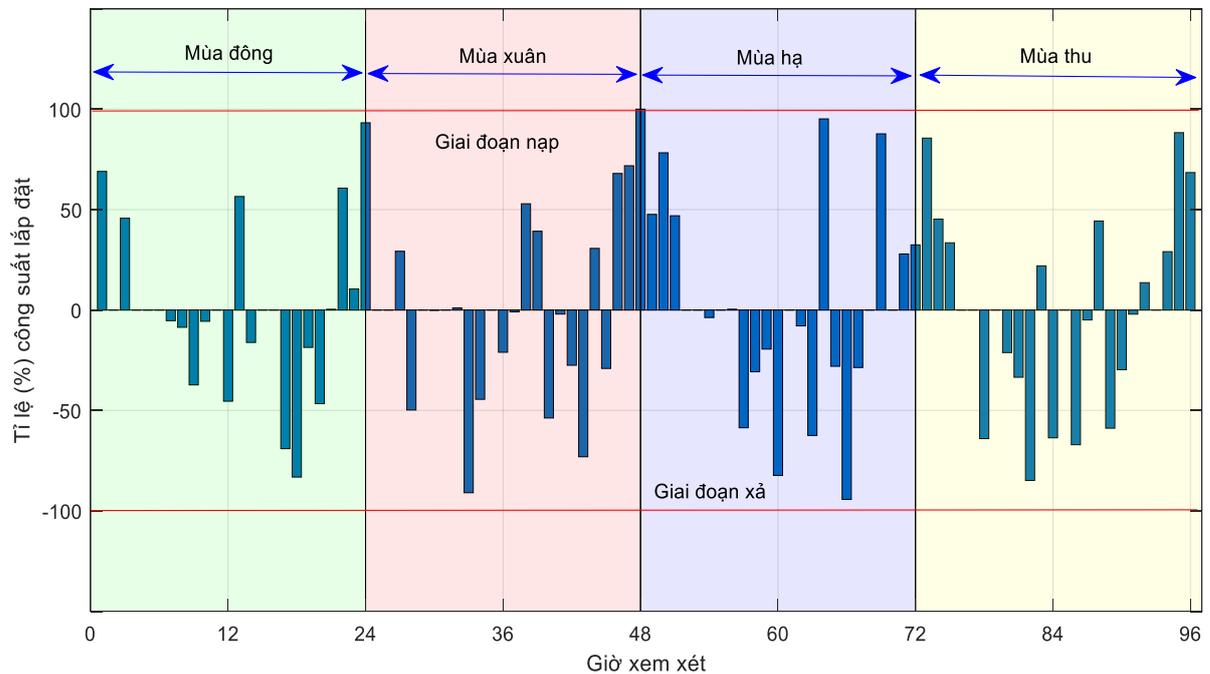


**Hình 4.26:** Công suất phát của WFs, PFs và BESS từ giải pháp của MCOA

Hình 4.26 cho thấy công suất phát ra thực tế của WFs, PFs và BESS từ giải pháp của MCOA so với nhu cầu tải và tổn thất. Như mô tả trên Hình 4.26 với sự tính toán trong 96 giờ đại diện, tổng công suất phát của các nguồn phát phân tán nối lưới là 126,335 MW, trong khi tổng nhu cầu phụ tải và tổn thất điện năng là 204,319 MW. Do đó, lưới điện chính sẽ bù đắp lượng điện thiếu hụt là 77,984 MW. Trong trường hợp này, cần thiết phải trả tiền mua lượng điện năng từ lưới điện chính và số tiền này phải được giảm thiểu. Để tăng khả năng tiết kiệm chi phí vận hành hệ thống, BESS được tích hợp để triển khai chiến lược sạc và xả năng lượng hợp lý như trong Hình 4.27 và 4.28. Trong đó, Hình 4.27 biểu thị dung lượng lưu trữ năng lượng và Hình 4.28 biểu thị các giai đoạn sạc và xả của BESS sau khi được kết nối vào hệ thống vào tất cả các mùa trong năm. Một cách cụ thể, BESS có xu hướng tích trữ năng lượng vào các khoảng thời gian phụ tải nhỏ và giờ thấp điểm do giá điện rẻ, và giải phóng năng lượng vào lưới phục vụ nhu cầu vào các thời điểm phụ tải lớn và các giờ cao điểm do giá điện cao nhằm hạn chế tối đa việc phát điện từ nguồn chính. Những giờ còn lại, BESS có chiến lược nạp/ xả năng lượng hợp lý để tối ưu chi phí mua năng lượng từ lưới điện. Việc nạp và xả năng lượng phù hợp đã góp phần đáng kể vào việc tiết kiệm chi phí vận hành hệ thống phân phối. Không chỉ vậy, quá trình lưu trữ để nạp và xả năng lượng của BESS cũng hoàn toàn đáp ứng các ràng buộc về giới hạn nạp và xả tối đa của BESS với lần lượt là 90% và 20% công suất định mức. Một cách cụ thể trong trường hợp này, giải pháp thu được từ phương pháp MCOA cho BESS là 0,232 MW/ 1,513 MWh, tức là hệ thống BESS có thể lưu trữ tới 1,362 MWh và được coi là đã sạc đầy, và ngược lại, BESS giảm xuống còn 0,303 MWh, nó sẽ dừng phát ra năng lượng vào lưới để né tránh hư hỏng vật lý.



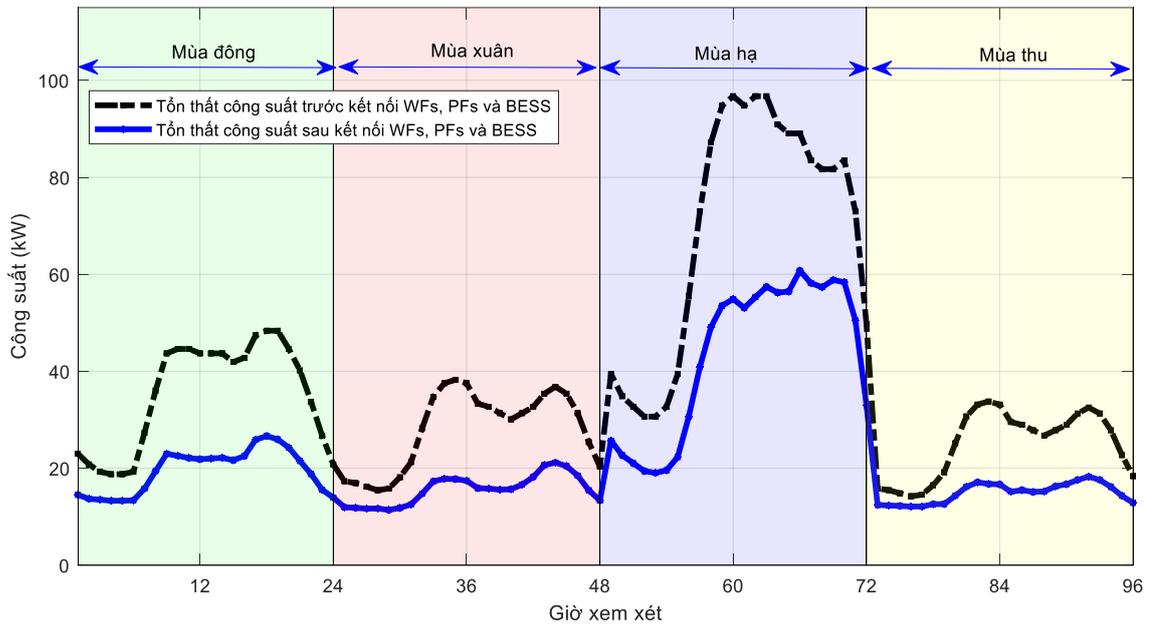
**Hình 4.27:** Quá trình lưu trữ năng lượng của BESS.



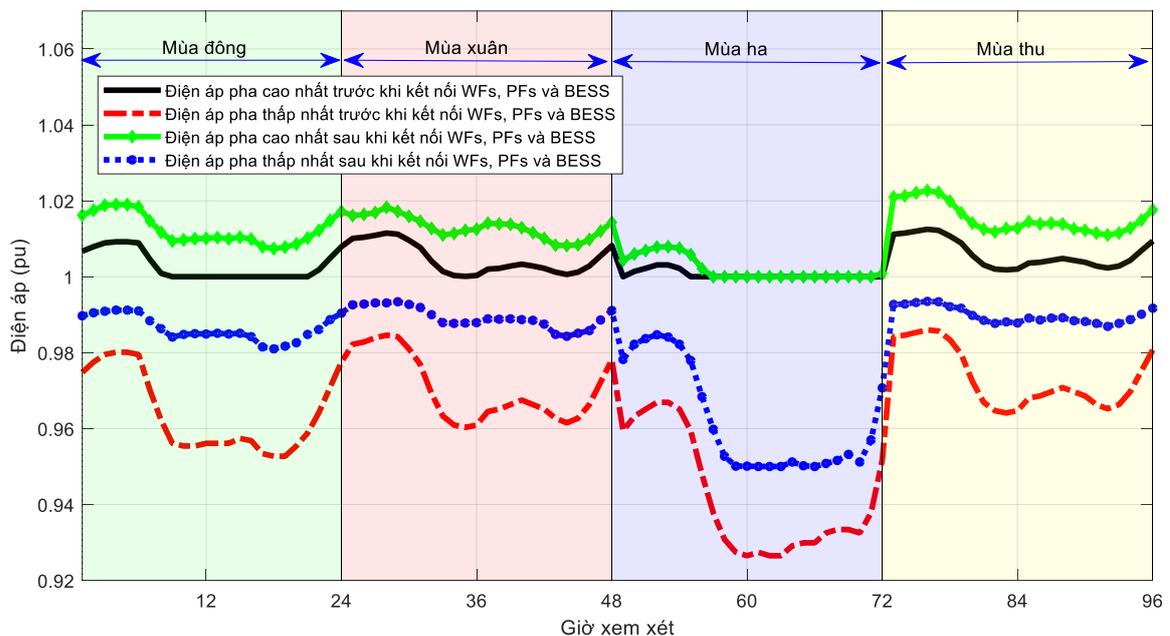
**Hình 4.28:** Quá trình nạp và xả năng lượng của BESS.

Như đã đề cập, việc kết nối WFs, PFs và BESS đáp ứng các tiêu chí kỹ thuật và mang lại lợi ích kinh tế đáng kể. Việc tích hợp các nguồn phát phân tán này còn có thể giảm đáng kể tổn thất trên các nhánh. Như đã trình bày trên Hình 4.29, tổn thất công suất của hệ thống phân phối giảm đáng kể từ 3,773 MW xuống 2,234 MW trong 96 giờ sau khi tích hợp các thành phần nối lưới, tương ứng với mức giảm tổn thất công suất là 40,79%. Bên cạnh đó, điện áp lưới cũng được nâng cao một cách rõ rệt. Cụ thể, trước khi kết nối các nguồn phát WFs, PFs và BESS, giá trị điện áp của

các pha nằm trong khoảng  $[0,9265, 1,0125]$  (pu) trong suốt thời gian xem xét. Tuy nhiên, sau khi kết nối phù hợp WFs, PFs và BESS có cả loại 3-pha và 1-pha vào hệ thống, độ lệch điện áp pha và các giá trị điện áp pha đã được cải thiện đáng kể với các giá trị dao động trong phạm vi  $[0,950, 1,0227]$  (pu) như thể hiện trong Hình 4.30. Qua đó cho thấy lợi ích to lớn của kết nối hợp lý của các nguồn phát phân tán WFs, PFs và BESS trong việc giảm tổn thất điện năng cũng như tăng cường điện áp pha của hệ thống phân phối.

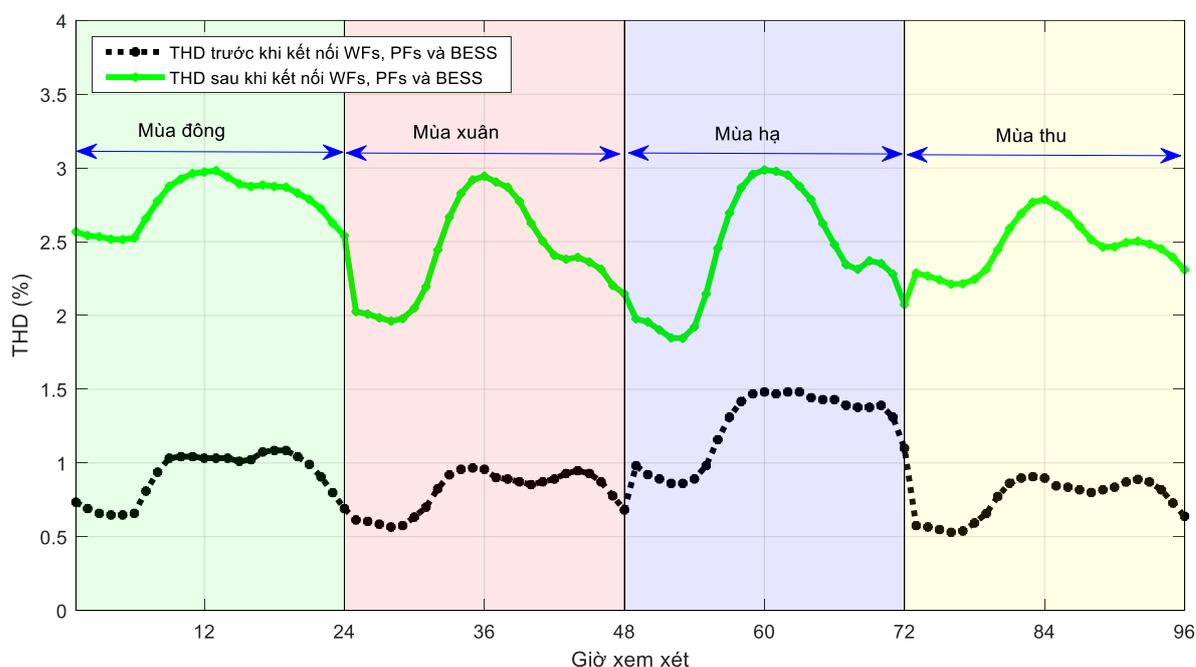


**Hình 4.29:** Tổn thất công suất trước và sau kết nối PFs, WFs và BESS.



**Hình 4.30:** Giá trị điện áp pha thấp nhất và cao nhất trước và sau kết nối PFs, WFs và BESS ở mỗi thời điểm

Như đã trình bày, nghiên cứu này xem xét các biến dạng sóng hài từ các tải phi tuyến và các bộ biến tần của WFs, PFs và BESS. Các tải phi tuyến gây ra sóng hài trong hệ thống ban đầu có giá trị THD cao nhất tại mỗi giờ được thể hiện trên Hình 4.31, trong đó giá trị cao nhất là 1,481% tại tải đỉnh ở các giờ thứ 60, 62 và 63. Tuy nhiên, sau khi PFs, WFs and BESS thâm nhập hệ thống, bộ biến tần của chúng đã góp phần tăng đáng kể sóng hài của hệ thống lên 2,987% đối với giá trị THD lớn nhất tại các giờ xem xét. Điều này cho thấy việc sử dụng các thiết bị chuyển đổi công suất tiềm ẩn nguy cơ làm tăng độ méo hài trong hệ thống phân phối và cần giữ các giá trị hài này không vượt quá giới hạn cho phép. Giống như kết quả thu được từ nghiên cứu này, giá trị THD sau khi tích hợp các nguồn phát phân tán đều thấp hơn giới hạn 5% và do đó, chúng hoàn toàn đáp ứng tiêu chuẩn IEEE Std. 519.



**Hình 4.31:** Giá trị lớn nhất THD trước và sau kết nối PFs, WFs và BESS.

#### 4.3.5 Tổng kết bài toán thứ hai

Các kết quả thu được và giới hạn của nghiên cứu này có thể được tóm tắt một cách ngắn gọn như sau:

- Nghiên cứu này đã thành công trong việc xác định sự lắp đặt tối ưu của WFs, PFs và BESS trong hệ thống phân phối ba pha không cân bằng phức tạp với nhiều thiết bị nối lưới.

- Mục tiêu của nghiên cứu là giảm thiểu tối đa tổng chi phí gồm (1) chi phí đầu tư, O&M cho WFs, PFs và BESS, và (2) chi phí mua năng lượng từ lưới chính cho nhu cầu tải và tổn thất trên các nhánh phân phối. Kết quả thu được chỉ ra rằng tổng chi phí cho hệ thống có thể được cắt giảm một cách đáng kể thông qua việc tích hợp các nguồn phát phù hợp. Nghiên cứu không chỉ đạt được lợi ích kinh tế mà còn đáp ứng được các yêu cầu kỹ thuật về giới hạn như điện áp thanh cái, dòng điện nhánh, độ méo sóng hài và khả năng thâm nhập của các nguồn phát.
- Như đã đề cập, mục tiêu chính là giảm thiểu tổng chi phí của hệ thống phân phối có tính đến sự thay đổi theo thời gian của nhu cầu phụ tải cũng như công suất ngõ ra các nguồn phát nổi lưới năng lượng tái tạo. Bằng cách xác định giải pháp khả thi phù hợp, phương pháp đề xuất đã tiết kiệm tới 1,9216 triệu \$ trong thời gian 20 năm của dự án, tương ứng với 14,33% so với hệ thống ban đầu. Bên cạnh lợi ích kinh tế, nghiệm tối ưu được tìm thấy còn thỏa mãn tất cả các ràng buộc về kỹ thuật.
- Nghiên cứu này đã áp dụng một thuật toán mới gọi là Modified Coyote Optimization Algorithm để giải quyết bài toán tối ưu sự tích hợp các nguồn phát phân tán. Cho việc chứng minh tính ưu việt của phương pháp đề xuất (MCOA) so với các phương pháp khác (SMA và COA), các phương pháp này được so sánh về hiệu suất và độ ổn định với cùng mục tiêu và các ràng buộc. Kết quả đạt được cho thấy MCOA tốt hơn các phương pháp khác.
- Nhìn chung, MCOA là một phương pháp phù hợp để giải quyết vấn đề tối ưu cho bài toán đang xem xét với hệ thống lớn như IEEE 123 nút. Trong nghiên cứu này, MCOA đã giải quyết thành công vấn đề về vị trí và công suất lắp đặt của PFs, WFs và BESS. Về công suất, WFs và PFs có công suất thay đổi lần lượt từ 2000 mô-đun đến 30000 mô-đun và từ 2 tua-bin đến 20 tua-bin. Bên cạnh đó, giá trị công suất và dung lượng lớn nhất của BESS được ấn định là 1 MW và 4 MWh. Đối với vị trí của WFs, PFs và BESS, nó thay đổi từ 2 đến 123 cho hệ thống IEEE 123 nút. Rõ ràng, không gian tìm kiếm giải pháp tối ưu tương đối rộng lớn và số lượng biến khá nhiều, nhưng MCOA chỉ yêu cầu 200 lần lặp với dân số là 20 là đủ để tìm ra nghiệm tối ưu. Điều này thể hiện sự hiệu quả vượt trội của thuật toán.

# CHƯƠNG 5: KẾT LUẬN VÀ ĐỊNH HƯỚNG NGHIÊN CỨU TRONG TƯƠNG LAI

## 5.1 Đóng góp chính của luận án

Luận án này đã thành công trong việc tìm kiếm nghiệm tối ưu cho các bài toán xác định sự lắp đặt phù hợp của các nguồn phát phân tán trong các loại hệ thống ba pha cân bằng và không cân bằng, nhằm tối đa lợi ích về kinh tế mà vẫn đảm bảo các tiêu chí kỹ thuật.

### 5.1.1 Bài toán cho hệ thống cân bằng

Nghiên cứu đã xác định vị trí và công suất lắp đặt tối ưu của các nguồn phát PFs, WF, CB và BESS trong hệ thống phân phối. Mục tiêu chính của nghiên cứu này là giảm thiểu tổng chi phí trong việc đầu tư, O&M cũng như giảm chi phí phát điện từ nguồn chính mà vẫn thỏa mãn các ràng buộc kỹ thuật. Nghiên cứu cũng đã phát triển thành công một thuật toán tối ưu mới, gọi là MCOA với hiệu suất và độ ổn định cao hơn các thuật toán so sánh khác. Bằng cách áp dụng nghiệm tối ưu từ thuật toán đề xuất MCOA vào hệ thống phân phối chuẩn IEEE 69 nút, tổng chi phí giảm đáng kể lên tới 22,422% so với hệ thống ban đầu. Nghiệm MCOA không chỉ tiết kiệm hơn so với phương pháp SMA và COA mà còn cải thiện chất lượng điện năng. Tổng tổn thất điện năng giảm trong ngày xem xét lên tới 78,692%, góp phần tiết kiệm chi phí trong vận hành hệ thống. Ngoài ra, điện áp nút cũng được cải thiện tốt và thỏa ràng buộc của giới hạn điện áp 0.95 (pu) sau khi kết nối các nguồn phát phân tán. Giá trị THD và IHD cũng được giảm xuống IEEE Std. 519. Hơn nữa, nghiên cứu cũng đã đề xuất chiến lược nạp và xả năng lượng theo thời gian của BESS một cách hợp lý nhằm giảm thiểu chi phí trong việc vận hành lưới. Cuối cùng, vị trí lắp đặt và công suất phát cho CB cũng được xác định một cách phù hợp để phát công suất phản kháng cho hệ thống mà không bị phạt.

### 5.1.2 Bài toán cho hệ thống không cân bằng

Trong chương 4, hai bài toán khác nhau được thực hiện trên hai hệ thống phân phối ba pha không cân bằng mà có các đặc tính khác nhau.

#### 5.1.2.1 Bài toán thứ nhất cho hệ thống không cân bằng

Nghiên cứu này đã được thực hiện thành công trong việc tìm nghiệm tối ưu về vị trí và công suất của các nguồn phát phân tán năng lượng tái tạo (PFs và WFs) trong lưới điện phân phối không cân bằng nhằm giảm thiểu tổng chi phí mà vẫn thỏa mãn các tiêu chí kỹ thuật. Nghiên cứu này không chỉ xem xét sự phát sóng hài từ tải phi tuyến mà còn xem xét sóng hài từ các thiết bị chuyển đổi công suất của PFs và WFs nhằm thỏa mãn tiêu chuẩn IEEE Std. 519 và quy định 30/2019/TT-BCT. Không chỉ vậy, một phần mềm nguồn mở được gọi là OpenDSS cũng đã được đề xuất cho việc giải quyết vấn đề trào lưu công suất một cách nhanh chóng. Hơn nữa, một sự phối hợp mô phỏng giữa OpenDSS và MATLAB cũng được áp dụng một cách thành công để giải quyết vấn đề tối ưu một cách linh hoạt và thuận tiện. Trong trường hợp này, MCOA cũng được đề xuất để giải quyết vấn đề tối ưu trên cho hệ thống phân phối chuẩn IEEE 25 nút. Kết quả đạt được sau khi kết nối các nguồn phát phân tán năng lượng mặt trời và năng lượng gió đã cho thấy rằng tổng chi phí có thể tiết kiệm tới 10,70% so với hệ thống ban đầu. Nghiệm tối ưu từ MCOA đã chứng minh việc mang lại nhiều lợi ích về kinh tế lẫn kỹ thuật tốt hơn so với các phương pháp so sánh khác như IPSO, CSA và COA với cùng mục tiêu và các ràng buộc. Điện áp pha cũng được nâng cao đáng kể tới vùng điện áp tốt nhất của [0.95, 1.05] (pu). Bên cạnh đó, một trong những lợi ích lớn của việc kết nối các nguồn phát phân tán trong hệ thống là giảm tổn thất ở các nhánh phân phối. Tổng tổn thất công suất cũng giảm mạnh chiếm tới 56,23% sự giảm tổn thất điện năng theo tính toán. Điều này giúp giảm đáng kể chi phí vận hành hệ thống phân phối tích hợp PFs và WFs về lâu dài. Trong nghiên cứu này, bên cạnh các nguồn sóng hài từ các tải phi tuyến, nghiên cứu đã xem xét các bộ biến tần của PFs và WFs mà cũng có khả năng tạo ra các nguồn sóng hài dồi dào cho hệ thống khi có sự thâm nhập cao của các nguồn phát nối lưới. Vì vậy, nghiên cứu cũng đã xem xét các nguồn tạo sóng hài gồm từ tải phi tuyến và bộ biến tần để giữ các chỉ số nằm trong giới hạn cho phép của IEEE Std. 519 sau khi kết nối PFs và WFs. Hơn nữa, nghiên cứu này được thực hiện trên hệ thống phân phối ba pha không cân bằng nên giá trị điện áp pha tại mỗi nút là khác nhau. Từ kết quả mô phỏng cho thấy giá trị lớn nhất của độ lệch điện áp không cân bằng sau khi kết nối PFs và WFs không chỉ đáp ứng IEEE Std. 45-2002 là không vượt quá 3%, mà những giá trị này cũng tốt hơn chỉ số của hệ thống ban đầu. Qua đó cho thấy việc kết nối PFs và WFs mà có khả năng phát công suất phản

kháng vào hệ thống phân phối cũng góp phần giảm độ lệch điện áp không cân bằng. Nói chung, qua nghiên cứu này, MCOA đã tỏ ra là một phương pháp tối ưu mạnh trong việc giải quyết vấn đề lắp đặt của các nguồn phát năng lượng tái tạo trong hệ thống phân phối.

#### *5.1.2.1 Bài toán thứ hai cho hệ thống không cân bằng*

Nghiên cứu này đã áp dụng phương pháp đề xuất (MCOA) cho việc tìm kiếm sự lắp đặt tối ưu của các nguồn phát năng lượng gồm PFs, WTs, và BESS trong lưới phân phối ba pha không cân bằng với mục tiêu giảm tổng chi phí từ việc đầu tư tới vận hành. Sự phối hợp mô phỏng giữa MATLAB và OpenDSS cũng được áp dụng thành công cho việc tạo nên công cụ mô phỏng linh hoạt. Bằng cách áp dụng nghiệm tối ưu mà được tìm ra bởi MCOA vào hệ thống thử nghiệm lớn và phức tạp của IEEE 123 nút với nhiều thiết bị nối lưới, tổng chi phí đã giảm chiếm tới 14,33% so với hệ thống ban đầu. Giải pháp từ MCOA không chỉ tiết kiệm hơn so với SSA và COA mà còn cải thiện chất lượng điện năng. Tổng tổn thất điện năng giảm trong các ngày xem xét lên tới 40,79%, góp phần tiết kiệm chi phí hệ thống vận hành. Ngoài ra, các giá trị điện áp pha được cải thiện đáng kể với các giá trị dao động trong phạm vi cho phép của [0,950, 1,05] (pu). Thêm vào đó, nghiên cứu này xem xét sự nhiễu sóng hài do tải phi tuyến và bộ biến đổi điện tử công suất của WFs, PFs và BESS gây ra. Kết quả đạt được từ những chỉ số về sóng hài này hoàn toàn thỏa mãn ràng buộc của IEEE Std. 519. Như đã đề cập, chiến lược nạp và xả năng lượng của BESS theo thời gian đã được xác định thành công và góp phần đáng kể trong việc tiết kiệm chi phí vận hành. Từ nghiên cứu này có thể khẳng định MCOA là một phương pháp phù hợp để giải quyết bài toán về xác định vị trí và công suất tối ưu của PFs, WFs và BESS trong hệ thống phân phối quy mô lớn và phức tạp.

## **5.2 Hạn chế chính của luận án**

Mặc dù nghiên cứu này đã thành công trong việc phát triển MCOA để trở thành một phương pháp tích cực trong việc giải quyết các bài toán tối ưu nhưng vẫn còn có một số khuyết điểm mà cần phải cải thiện. Thêm vào đó, dữ liệu đầu vào cho việc mô phỏng trong nghiên cứu này cũng tồn tại các hạn chế mà cần được xem xét thêm trong các nghiên cứu tương lai.

### **5.2.1 Bài toán trong hệ thống cân bằng**

#### Hạn chế về phương pháp đề xuất:

Một cách khách quan, MCOA có thể bị hạn chế trong việc giải các bài toán tối ưu phức tạp và vùng tìm kiếm rộng lớn. Đối với không gian tìm kiếm nhỏ như hệ thống IEEE 69 nút, MCOA đã sử dụng 300 lần lặp cho dân số là 20 để xác định nghiệm tốt nhất cho kết nối cho các nguồn phát phân tán. Một cách rõ ràng, không gian tìm kiếm nhỏ có lợi thế trong việc tìm kiếm lời giải tối ưu, tuy nhiên, chất lượng nghiệm rất khó để đảm bảo với không gian rộng lớn. Hơn nữa, tốc độ xử lý của MCOA cũng kém hơn SMA, mặc dù tốt hơn đáng kể so với COA. Qua đó cho thấy MCOA nên được cải tiến hơn nữa và điều này sẽ được thực hiện trong tương lai sau nghiên cứu này.

#### Hạn chế về tính thực tế và dữ liệu đầu vào:

Trong nghiên cứu này, do thiếu sự tiếp cận dữ liệu thực tế nên dữ liệu hệ thống phân phối chuẩn IEEE 69 nút và một phần dữ liệu tải IEEE RTS-96 được sử dụng cho việc thực nghiệm. Đây là các mô hình tương đương mà được công bố rộng rãi nhằm phục vụ việc nghiên cứu trên toàn thế giới. Các dữ liệu này thì có thể khác so với các dữ liệu hệ thống thực tế nên đây được xem như là hạn chế trong nghiên cứu này. Bên cạnh đó, để mô phỏng công suất đầu ra của các nguồn phát và phụ tải, nghiên cứu này đã sử dụng dữ liệu 24 giờ trong 1 ngày điển hình và giả định các ngày giống nhau trong 1 năm với dữ liệu không thay đổi trong suốt thời gian dự án. Và điều này không đúng trong kịch bản thực tế. Vì vậy, để giảm bớt sự chênh lệch giữa công suất dự đoán và thực tế của các nguồn năng lượng tái tạo, số ngày được xem xét cần được tăng lên trong nghiên cứu tương lai. Hơn nữa, nghiên cứu này chỉ xem xét sự thâm nhập cao từ các tải phi tuyến và đã giả định sóng hài từ các thiết bị chuyển đổi công suất cho các nguồn phát phân tán nối lưới bị triệt tiêu nhờ các bộ lọc tích cực và/ hoặc bộ lọc thụ động [83, 84]. Chi phí thêm cho việc sử dụng các bộ lọc này thì chưa được xem xét. Ngoài ra, chi phí cho việc đầu tư, O&M cho PFs, WFs, CB và BESS là các giá trị phổ biến mà được tham khảo từ các nghiên cứu khác trên thế giới nên chi phí thời điểm hiện tại có thể khác so với kết quả trong nghiên cứu này.

### **5.2.2 Bài toán thứ nhất trong hệ thống không cân bằng**

#### Hạn chế về phương pháp đề xuất:

Mặc dù MCOA là một phương pháp hữu hiệu cho vấn đề tối ưu này nhưng cũng cần xem xét để điều chỉnh hoặc cải tiến thêm nữa để khắc phục những tồn tại và nâng cao hiệu suất cũng như tính ổn định, nhất là cho các vấn đề tối ưu phức tạp. Trong trường hợp cụ thể của bài toán này, phạm vi tìm kiếm giải pháp tương đối hẹp với hệ thống thử nghiệm tương đối nhỏ như IEEE 25 nút. Tuy nhiên, thuật toán đề xuất yêu cầu tới 80 lần lặp cùng với dân số là 25. Nên đối với các hệ thống phức tạp và không gian tìm kiếm rộng, hiệu suất cũng như độ ổn định của các nghiệm khả thi trong MCOA có thể sẽ bị ảnh hưởng nhiều.

#### Hạn chế về tính thực tế và dữ liệu đầu vào:

Hệ thống phân phối ba pha không cân bằng IEEE 25 nút được đưa vào xem xét như là một hệ thống thử nghiệm trong nghiên cứu này và có thể không giống với dữ liệu cho một hệ thống thực tế. Không chỉ vậy, nghiên cứu này còn xem xét tích hợp các nguồn phát năng lượng tái tạo thông qua thiết bị chuyển đổi công suất với hiệu suất là 100% như giả định. Tuy nhiên, với công nghệ hiện nay thì hiệu suất chỉ đạt hơn 99,5% thông qua việc tích hợp thêm công nghệ tối ưu hóa công suất và hiệu suất đạt cao nhất là 99,75% nhờ việc áp dụng công nghệ hệ thống chuyển đổi năng lượng hiệu suất cao (HEECS) [85]. Do đó, hiệu suất giả định trong nghiên cứu này thì chưa đúng với công nghệ hiện hữu. Hơn nữa, nghiên cứu đã sử dụng dữ liệu cho tải và nguồn phát thay đổi trong 12 ngày (tức là gồm 288 giá trị) để biểu thị 12 tháng trong 1 năm và dữ liệu từ năm này sang năm khác được giữ nguyên trong suốt chu kỳ dự án. Thêm vào đó, nghiên cứu còn giả định dữ liệu về tốc độ gió và bức xạ mặt trời cho tất cả các vị trí đang xem xét trong hệ thống tương đương là như nhau. Điều này có thể không đúng trong trường hợp thực tế. Mặc dù, chênh lệch giữa công suất ước tính và thực tế sẽ được cung cấp bởi lưới điện chính, tuy nhiên, để giảm lượng bù này, việc thu thập dữ liệu cho từng nhóm khu vực trong hệ thống nên được xem xét trong nghiên cứu tiếp theo.

### **5.2.3 Bài toán thứ hai trong hệ thống không cân bằng**

#### Hạn chế về phương pháp đề xuất:

Tương tự như hai bài toán trên, MCOA cũng nên được cải thiện hơn nữa để nâng cao hiệu suất và tính ổn định của thuật toán, nhất là trong việc giải quyết các

vấn đề tối ưu nhiều biến và không gian tìm kiếm rộng lớn. Điều này sẽ được thực hiện trong thời gian tới, sau luận án này.

✚ *Hạn chế về tính thực tế và dữ liệu đầu vào:*

Để mô phỏng cho công suất đầu ra, nghiên cứu này sử dụng dữ liệu tải IEEE RTS-96 và các nguồn phát thay đổi chỉ trong 96 giờ (tức là 4 ngày) cho việc mô phỏng đại diện 1 năm và dữ liệu không thay đổi trong suốt thời gian dự án. Điều này thì có thể chưa sát với kịch bản thực tế. Do đó, để giảm sự khác biệt giữa công suất dự đoán và thực tế của các nguồn năng lượng tái tạo, số ngày được xem xét cần được tăng lên trong nghiên cứu trong tương lai. Ngoài ra, nghiên cứu này còn sử dụng hệ thống phân phối chuẩn IEEE 123 nút và được coi như là mô hình tương đương nên kết quả nhận được có thể không hoàn toàn đúng với các hệ thống thực tế. Ngoài ra, do các nguồn phát phân tán năng lượng tái tạo nối lưới chịu ảnh hưởng mạnh bởi điều kiện tự nhiên nên công suất ngõ ra của các nguồn phát này có thể tăng hoặc giảm sâu, dẫn tới mất cân bằng giữa công suất phát và nhu cầu tải. Do đó, nghiên cứu này cũng đã giả định lưới chính có khả năng để tiêu thụ hoặc phát bổ sung công suất phù hợp thông qua biến áp để giữ ổn định hệ thống.

### **5.3 Hướng phát triển**

- Trong nghiên cứu tương lai, việc xem xét sự tích hợp bộ điều khiển điện áp cho việc điều chỉnh điện áp trong hệ thống khi điện áp ở các nút bị sụt hoặc tăng vượt quá giới hạn. Việc tích hợp bộ điều chỉnh điện áp vào hệ thống phân phối nên được thực hiện để tối đa phúc lợi đạt được về kinh tế lẫn kỹ thuật.
- Bên cạnh đó, nghiên cứu cũng sẽ xem xét điều chỉnh hiệu suất của các thiết bị chuyển đổi công suất cho các nguồn phát tích hợp một cách phù hợp với các công nghệ phổ biến hiện tại. Ngoài ra, các dữ liệu đầu vào về bức xạ mặt trời và tốc độ gió cũng sẽ được phân nhóm theo từng khu vực cụ thể nhằm nâng cao độ chính xác cho việc tính toán công suất ngõ ra của mô-đun quang điện và tua-bin gió.
- Hơn nữa, thuật toán đề xuất MCOA cũng cần được cải tiến hơn nữa để nâng cao hiệu suất cũng như độ ổn định trong việc giải quyết các vấn đề tối ưu phức tạp với không gian tìm kiếm rộng lớn. Bên cạnh đó, việc so sánh

MCOA với nhiều phương pháp hiệu quả khác như EO, SFO và các phiên bản cải tiến của chúng trong đa dạng các loại hệ thống khác nhau cũng sẽ được xem xét tiến hành. Tất cả những hướng nghiên cứu trên sẽ được thực hiện trong thời gian sắp tới.

- Trong tương lai, nghiên cứu cũng xem xét các mục tiêu khác liên quan đến cực tiểu tổn thất công suất, ổn định điện áp và nâng cao chất lượng điện năng bên cạnh mục tiêu về chi phí.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. Kerckhove, R. D'hulst, and D. Van Hertem, "Low voltage reconfiguration: A comparison of metaheuristic and mathematical programming approaches," *Electric Power Systems Research*, vol. 237, 110823, 2024. DOI: 10.1016/j.epsr.2024.110823
- [2] J. Carr, "An introduction to genetic algorithms," *Senior Project*, vol. 1, no. 40, 7, 2014.
- [3] S. Samsuddin, M. S. Othman, and L. M. Yusuf, "A review of single and population-based metaheuristic algorithms solving multi depot vehicle routing problem," *International Journal of Software Engineering and Computer Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 80-93, 2018. DOI:10.15282/ijsecs.4.2.2018.6.0050
- [4] T. R. Ayodele, A. S. O. Ogunjuyigbe, and O. O. Akinola, "Optimal location, sizing, and appropriate technology selection of distributed generators for minimizing power loss using genetic algorithm," *Journal of Renewable Energy*, 2015. DOI: 10.1155/2015/832917
- [5] A. Musa, and T. J. Tengku Hashim, "Optimal sizing and location of multiple distributed generation for power loss minimization using genetic algorithm," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 16, no. 2, pp. 956-963, 2019. DOI: 10.11591/ijeecs.v16.i2.pp956-963
- [6] D. Yang, J. Jia, W. Wu, W. Cai, D. An, K. Luo, and B. Yang, "Optimal placement and sizing of distributed generators based on multiobjective particle swarm optimization," *Frontiers in Energy Research*, vol. 9, 770342, 2021 DOI: 10.3389/fenrg.2021.770342
- [7] D. Wang, D. Tan, and L. Liu, "Particle swarm optimization algorithm: an overview," *Soft computing*, vol. 22, pp. 387-408, 2018. DOI:10.1007/s00500-016-2474-6
- [8] M. Li, W. Du, and F. Nian, "An adaptive particle swarm optimization algorithm based on directed weighted complex network", *Mathematical problems in engineering*, vol. 2014, no. 1, 434972, 2014. DOI: 10.1155/2014/434972
- [9] A. S. Joshi, O. Kulkarni, G. M. Kakandikar, and V. M. Nandedkar, "Cuckoo search optimization-a review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 8, pp. 7262-7269, 2017. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.07.055

- [10] Z. Moravej, A. Akhlaghi, “A novel approach based on cuckoo search for DG allocation in distribution network,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 44, no. 1, pp. 672-679, 2013. DOI: 10.1016/j.ijepes.2012.08.009
- [11] M. Ghosh, S. Kumar, S. Mandal, and K. K. Mandal, “Optimal sizing and placement of DG units in radial distribution system using cuckoo search algorithm,” *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 12, no. 1, 2017.
- [12] M. Valavala, “Optimal placement and sizing of distributed generation for loss minimization using ABC optimization,” *International Journal of Applied*, vol. 10, no. 4, pp. 347-354, 2021. DOI: 10.11591/ijape.v10.i4.pp347-354
- [13] R. Deshmukh, and A. Kalage, “Optimal placement and sizing of distributed generator in distribution system using artificial bee colony algorithm,” In *2018 IEEE Global Conference on Wireless Computing and Networking (GCWCN)*, pp. 178-181, IEEE, Nov. 2018. DOI: 10.1109/GCWCN.2018.8668633.
- [14] E. A. Al-Ammar, K. Farzana, A. Waqar, M. Aamir, A. U. Haq, M. Zahid, and M. Batool, “ABC algorithm based optimal sizing and placement of DGs in distribution networks considering multiple objectives,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 697-708, 2021. DOI: 10.1016/j.asej.2020.05.002
- [15] I. A. Farhat, “Ant colony optimization for optimal distributed generation in distribution systems,” *International Journal of Computer and Information Engineering*, vol. 7, no. 8, pp. 1094-1098, 2013.
- [16] A. A. Ogunsina, M. O. Petinrin, O. O. Petinrin, E. N. Offornedo, J. O. Petinrin, and G. O. Asaolu, “Optimal distributed generation location and sizing for loss minimization and voltage profile optimization using ant colony algorithm,” *SN Applied Sciences*, vol. 3, pp. 1-10, 2021. DOI: 10.1007/s42452-021-04226-y
- [17] F. M. Alhaddad, and M. El-Hawary, “Optimal filter placement and sizing using ant colony optimization in electrical distribution system,” In *2014 IEEE Electrical Power and Energy Conference*, pp. 128-133, Nov. 2014. IEEE. DOI: 10.1109/EPEC.2014.41
- [18] A. Gill, P. Singh, “Optimal penetration of distributed generation system in radial distribution network using adaptive scheme,” In *Journal of Physics: Conference*

*Series*, vol. 1914, no. 1, p. 012027, IOP Publishing, May 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/1914/1/012027

- [19] N. Ghaffarzadeh, H. Sadeghi, "A new efficient BBO based method for simultaneous placement of inverter-based DG units and capacitors considering harmonic limits," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 80, pp. 37-45, 2016. DOI: 10.1016/j.ijepes.2016.01.030
- [20] M. R. Surya, R. Neela, G. Radman, "Multi-objective optimization of DG sizing and placement using BBO technique," *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 6, pp. 623-629, 2017.
- [21] A. Faramarzi, M. Heidarinejad, B. Stephens, S. Mirjalili, "Equilibrium optimizer: A novel optimization algorithm," *Knowledge-Based Systems*, vol. 191, 105190, 2020. DOI: 10.1016/j.knosys.2019.105190
- [22] M. A. Shaik, P. L. Mareddy, and N. Visali, "Enhancement of Voltage Profile in the Distribution system by Reconfiguring with DG placement using Equilibrium Optimizer. *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 5, pp. 4081-4093, 2022. DOI: 10.1016/j.aej.2021.09.063
- [23] A. M. Shaheen, A. M. Elsayed, R. A. El-Sehiemy, and A. Y. Abdelaziz, "Equilibrium optimization algorithm for network reconfiguration and distributed generation allocation in power systems," *Applied Soft Computing*, vol. 98, 106867, 2021. DOI: 10.1016/j.asoc.2020.106867
- [24] G. F. Gomes, S. S. da Cunha, and A. C. Ancelotti, "A sunflower optimization (SFO) algorithm applied to damage identification on laminated composite plates," *Engineering with Computers*, vol. 35, pp. 619-626, 2019. DOI: 10.1007/s00366-018-0620-8
- [25] A. M. Shaheen, E. E. Elattar, R. A. El-Sehiemy, and A. E. Elsayed, "An improved sunflower optimization algorithm-based Monte Carlo simulation for efficiency improvement of radial distribution systems considering wind power uncertainty," *Ieee Access*, vol. 9, pp. 2332-2344, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3047671
- [26] J. Pierezan, L. D. S. Coelho, "Coyote optimization algorithm: a new metaheuristic for global optimization problems," In *2018 IEEE congress on evolutionary computation (CEC)*, pp. 1-8, IEEE, Jul. 2018. DOI: 10.1109/CEC.2018.8477769

- [27] E. M. Abdallah, M. I. El Sayed, M. M. Elgazzar, and A. A. Hassan, "Coyote multi-objective optimization algorithm for optimal location and sizing of renewable distributed generators," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 975-983, 2021. DOI: 10.11591/ijece.v11i2.pp975-983
- [28] S. A. Taher, and M. H. Karimi, "Optimal reconfiguration and DG allocation in balanced and unbalanced distribution systems," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 5, no. 3, pp. 735-749, 2014. DOI: 10.1016/j.asej.2014.03.009
- [29] M. Pushkarna, H. Ashfaq, R. Singh, and R. Kumar, "An optimal placement and sizing of type-IV DG with reactive power support using UPQC in an unbalanced distribution system using particle swarm optimization," *Energy Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 353-370, 2024. DOI: 10.1007/s12667-022-00551-2
- [30] G. W. Chang, and N. C. Chinh, "Coyote optimization algorithm-based approach for strategic planning of photovoltaic distributed generation," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 36180-36190, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2975107
- [31] F. Amini, and R. Kazemzadeh, "Distributed generations optimal placement and sizing in unbalanced distribution systems with respect to uncertainties," *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 7, no. 2, pp. 1-11, 2017.
- [32] S. A. Nur, and S. Emiroğlu, "Optimal allocation and sizing of distributed generation in the unbalanced distribution system using GWOCs algorithm," *Balkan 9<sup>th</sup> International Conference on Applied Sciences*, pp. 245-254, 2023.
- [33] I. U. Salam, M. Yousif, M. Numan, K. Zeb, and M. Billah, "Optimizing distributed generation placement and sizing in distribution systems: a multi-objective analysis of power losses, reliability, and operational constraints," *Energies*, vol. 16, no. 16, pp. 5907, 2023. DOI: 10.3390/en16165907
- [34] T. T. Nguyen, T. T. Nguyen, and C. Viet Vo, "Reconfiguration of Distribution Network Considering Photovoltaic System Placement Based on Metaheuristic Algorithms," In *Advances in Artificial Intelligence for Renewable Energy Systems and Energy Autonomy*, pp. 135-156, Cham: Springer International Publishing, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-26496-2\_7
- [35] T. T. Tran, K. H. Truong, D. N. Vo, "Stochastic fractal search algorithm for reconfiguration of distribution networks with distributed generations," *Ain Shams*

- Engineering Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 389-407, 2020. DOI: 10.1016/j.asej.2019.08.015
- [36] T. M. Phan, M. P. Duong, A. T. Doan, M. Q. Duong, and T. T. Nguyen, "Optimal Design and Operation of Wind Turbines in Radial Distribution Power Grids for Power Loss Minimization," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 4, 1462, 2024. DOI: 10.3390/app14041462
- [37] P. Trojovský, and M. Dehghani, "Walrus Optimization Algorithm: A New Bio-Inspired Metaheuristic Algorithm," 2020. DOI: 10.1038/s41598-023-35863-5
- [38] T. T. Nguyen, T. T. Nguyen, and B. Le, "Artificial ecosystem optimization for optimizing of position and operational power of battery energy storage system on the distribution network considering distributed generations," *Expert Systems with Applications*, vol. 208, 118127, 2022. DOI: 10.1016/j.eswa.2022.118127
- [39] W. Zhao, L. Wang, Z. Zhang, "Artificial ecosystem-based optimization: a novel nature-inspired meta-heuristic algorithm," *Neural Computing and Applications*, vol. 32, no. 13, pp. 9383-9425, 2020. DOI: 10.1007/s00521-019-04452-x
- [40] R. Venkatasatish, and D. Chittathuru, Coyote Optimization Algorithm-Based Energy Management Strategy for Fuel Cell Hybrid Power Systems. *Sustainability*, vol. 15, no. 12, 9638, 2023. DOI: 10.3390/su15129638
- [41] A. A. Z. Diab, H. M. Sultan, T. D. Do, O. M. Kamel, and M. A. Mossa, "Coyote optimization algorithm for parameters estimation of various models of solar cells and PV modules," *Ieee Access*, vol. 8, pp. 111102-111140, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3000770
- [42] G. W. Chang, and N. C. Chinh, "Coyote optimization algorithm-based approach for strategic planning of photovoltaic distributed generation," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 36180-36190, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2975107
- [43] E. M. Abdallah, M. I. El Sayed, M. M. Elgazzar, and A. A. Hassan, "Coyote multi-objective optimization algorithm for optimal location and sizing of renewable distributed generators," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 11, no. 2, 975, 2021. DOI: 10.11591/ijece.v11i2.pp975-983
- [44] J. Arfaoui, H. Rezk, M. Al-Dhaifallah, M. N. Ibrahim, and M. Abdelkader, "Simulation-based coyote optimization algorithm to determine gains of PI controller for enhancing the performance of solar PV water-pumping system," *Energies*, vol. 13, no. 17, 4473, 2020. DOI: 10.3390/en13174473

- [45] H. Rezk, A. Fathy, M. Aly, “A robust photovoltaic array reconfiguration strategy based on coyote optimization algorithm for enhancing the extracted power under partial shadow condition,” *Energy reports*, vol. 7, pp. 109-124, 2021. DOI: 10.1016/j.egy.2020.11.035
- [46] X. Jiang, L. Fang, R. Niu, W. Zhang, J. Liu, and L. Ge, “Application of coyote optimization algorithm based on mutation and opposition- based learning in optimal configuration of Photovoltaic intelligent edge terminal,” *Electric power construction*, vol. 42, no. 3, pp. 45-53, 2021. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2021.03.006
- [47] E. S. Ali, S. M. Abd Elazim, and A. S. Balobaid, “Implementation of coyote optimization algorithm for solving unit commitment problem in power systems,” *Energy*, vol. 263, 125697, 2023. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125697
- [48] J. H. Teng, and C. Y. Chang, “Backward/forward sweep-based harmonic analysis method for distribution systems,” *IEEE transactions on power delivery*, vol. 22, no. 3, pp. 1665-1672, 2007. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.899523
- [49] M. Nurdin, and N. Hariyanto, “The Backward-Forward Sweep Method in Radial Network Distribution Systems: A Study of the Effect of Measurement Data Conditions on State Estimation Based on Power Flow,” *International Journal on Electrical Engineering & Informatics*, vol. 15, no. 3, 2023. DOI: 10.15676/ijeei.2023.15.3.3
- [50] R. Prakash, B. Lokeshgupta, and S. Sivasubramani, “Multi-objective bat algorithm for optimal placement and sizing of DG,” In *2018 20th National Power Systems Conference (NPSC)*, pp. 1-6, Dec. 2018, IEEE. DOI: 10.1109/NPSC.2018.8771440
- [51] N. C. Chinh, “A Novel Meta-Heuristic Optimization Algorithm to Determine Optimal Access Point and Generation of Distributed Generators for Maximizing Economic and Technical Benefits,” *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, vol. 20, no. 3, 2024.
- [52] H. HassanzadehFard, and A. Jalilian, “Optimal sizing and location of renewable energy based DG units in distribution systems considering load growth,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 101, pp. 356-370. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.03.038
- [53] B. Singh, and B. J. Gyanish, “Impact assessment of DG in distribution systems from minimization of total real power loss viewpoint by using optimal power flow

- algorithms,” *Energy Reports*, vol. 4, pp. 407-417, 2018. DOI: 10.1016/j.egy.2018.07.003
- [54] V. R. Pandi, H. H. Zeineldin, W. Xiao, “Determining optimal location and size of distributed generation resources considering harmonic and protection coordination limits,” *IEEE transactions on power systems*, vol. 28, no. 2, pp. 1245-1254, 2012. DOI: 10.1109/TPWRS.2012.2209687
- [55] S. Daud, A. F. A. Kadir, C. K. Gan, A. Mohamed, and T. Khatib, “A comparison of heuristic optimization techniques for optimal placement and sizing of photovoltaic based distributed generation in a distribution system,” *Solar Energy*, vol. 140, pp. 219-226, 2016. DOI: 10.1016/j.solener.2016.11.013
- [56] A. SACE, “Power Factor Correction and Harmonic Filtering in Electrical Plants Technical Application Papers”, pp. 1-62, 2008.
- [57] S. R. Gampa, and D. Das, “Optimum placement and sizing of DGs considering average hourly variations of load,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 66, pp. 25-40, 2015. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.10.047
- [58] K. Zou, A. P. Agalgaonkar, K. M. Muttaqi, and S. Perera, “Distribution system planning with incorporating DG reactive capability and system uncertainties,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 112-123, 2011. DOI: 10.1109/TSTE.2011.2166281
- [59] V. V. Thang, N. D. Minh, “Optimal allocation and sizing of capacitors for distribution systems reinforcement based on minimum life cycle cost and considering uncertainties,” *The Open Electrical & Electronic Engineering Journal*, vol. 11, no. 1, 2017. DOI: 10.2174/1874129001711010165
- [60] K. Mongird, V. Viswanathan, P. Balducci, J. Alam, V. Fotedar, V. Koritarov, and B. Hadjerioua, “An evaluation of energy storage cost and performance characteristics,” *Energies*, vol. 13, no. 13, 3307, 2020. DOI: 10.3390/en13133307
- [61] D. Q. Hung, N. Mithulanathan, R. C. Bansal, “Analytical strategies for renewable distributed generation integration considering energy loss minimization,” *Applied Energy*, vol. 105, pp. 75-85, 2013. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.12.023
- [62] Y. M. Atwa, E. F. El-Saadany, M. M. A. Salama, R. Seethapathy, “Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization. *IEEE transactions on power systems*, vol. 25, no. 1, pp. 360-370, 2009. DOI: 10.1109/TPWRS.2009.2030276

- [63] Electric Power Research Institute (EPRI) Harmonic spectrum. Available online: <https://github.com/tshort/OpenDSS/blob/master/Test/indmactest/Spectrum.DSS>
- [64] A. F. A. Kadir, A. Mohamed, H. Shareef, and M. Z. C. Wanik, "Optimal placement and sizing of distributed generations in distribution systems for minimizing losses and THD<sub>v</sub> using evolutionary programming," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 21, no. 8, pp. 2269-2282, 2013. DOI:10.3906/elk-1205-35
- [65] S. Chakraborty, S. Verma, A. Salgotra, R. M. Elavarasan, D. Elangovan, and L. Mihet-Popa, "Solar-based dg allocation using harris hawks optimization while considering practical aspects," *Energies*, vol. 14, no. 16, 5206, 2021. DOI: 10.3390/en14165206
- [66] D. Q. Hung, N. Mithulananthan, and K. Y. Lee, "Determining PV penetration for distribution systems with time-varying load models," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 6, pp. 3048-3057, 2014. DOI: 10.1109/TPWRS.2014.2314133.
- [67] P. Kayal, C. K. Chanda, "Optimal mix of solar and wind distributed generations considering performance improvement of electrical distribution network," *Renewable energy*, vol. 75, pp. 173-186, 2015. DOI: 10.1016/j.renene.2014.10.003
- [68] A. Soroudi, M. Aien, and M. Ehsan, "A probabilistic modeling of photo voltaic modules and wind power generation impact on distribution networks," *IEEE Systems Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 254-259, 2011. DOI: 10.1109/JSYST.2011.2162994
- [69] T. D. Pham, T. T. Nguyen, and L. C. Kien, "Optimal Placement of Photovoltaic Distributed Generation Units in Radial Unbalanced Distribution Systems Using MATLAB and OpenDSS-Based Cosimulation and a Proposed Metaheuristic Algorithm," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2022. DOI: 10.1155/2022/1446479
- [70] Luis (Nando) Ochoa, "OpenDSS Training Material. Part 2: Introduction to OpenDSS," *The university of Melbourne*, 2022.
- [71] J. Castro Mendieta, "Intelligent distribution voltage control with distributed generation" (Doctoral dissertation, École de technologie supérieure), 2016.

- [72] S. Claeys, F. Geth, and G. Deconinck, "Optimal power flow in four-wire distribution networks: Formulation and benchmarking," *Electric Power Systems Research*, vol. 213, 108522, 2022. DOI: 10.1016/j.epsr.2022.108522
- [73] W. H. Kersting, "The computation of neutral and dirt currents and power losses," In *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, IEEE*, vol. 2004, pp. 213-218, Oct. 2004. DOI: 10.1109/PSCE.2004.1397573
- [74] E. W. Sinuraya, M. Soemantri, and I. R. Rafif, "Evaluation and Mitigation of Voltage and Current Unbalance at MSTP Undip Jepara," In *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2406, no. 1, p. 012013, Dec. 2022, IOP Publishing. DOI 10.1088/1742-6596/2406/1/012013
- [75] S. A. Adegoke, Y. Sun, A. S. Adegoke, and D. Ojeniyi, "Optimal placement of distributed generation to minimize power loss and improve voltage stability," *Heliyon*, vol. 10, no. 21, 2024. Doi: 10.1016/j.heliyon.2024/E39298
- [76] Available online: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [77] M. Milovanović, D. Tasić, J. Radosavljević, and B. Perović, "Optimal placement and sizing of inverter-based distributed generation units and shunt capacitors in distorted distribution systems using a hybrid phasor particle swarm optimization and gravitational search algorithm," *Electric Power Components and Systems*, vol. 48, no. 6-7, pp. 543-557, 2020. DOI: 10.1080/15325008.2020.1797934
- [78] L. Xu, B. Song, and M. Cao, "An improved particle swarm optimization algorithm with adaptive weighted delay velocity," *Systems Science & Control Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 188-197, 2021. DOI: 10.1080/21642583.2021.1891153
- [79] T. Yuvaraj, K. Ravi, and K. R. Devabalaji, "Optimal allocation of DG and DSTATCOM in radial distribution system using cuckoo search optimization algorithm," *Modelling and Simulation in Engineering*, 2017. DOI: 10.1155/2017/2857926
- [80] M. S. Alam, and S. A. Arefifar, "Cost & emission analysis of different DGs for performing energy management in smart grids," In *2018 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT)*, pp. 0667-0672, May 2018, IEEE. DOI: 10.1109/EIT.2018.8500168
- [81] K. P. Schneider, B. A. Mather, B. C. Pal, C. W. Ten, G. J. Shirek, H. Zhu, ... and W. Kersting, "Analytic considerations and design basis for the IEEE distribution test

- feeders,” *IEEE Transactions on power systems*, vol. 33, no. 3, pp. 3181-3188, 2017. DOI: 10.1109/TPWRS.2017.2760011
- [82] S. Mirjalili, A. H. Gandomi, S. Z. Mirjalili, S. Saremi, H. Faris, and S. M. Mirjalili, “Salp Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems,” *Advances in engineering software*, vol. 114, pp. 163-191, 2017. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2017.07.002
- [83] P. P. Biswas, P. N. Suganthan, and G. A. Amaratunga, “Minimizing harmonic distortion in power system with optimal design of hybrid active power filter using differential evolution,” *Applied Soft Computing*, vol. 61, pp. 486-496, 2017. DOI: 10.1016/j.asoc.2017.08.031
- [84] H. Hu, Q. Shi, Z. He, J. He, and S. Gao, “Potential harmonic resonance impacts of PV inverter filters on distribution systems,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, no. 1, pp. 151-161, 2014. DOI: 10.1109/TSTE.2014.2352931
- [85] A. Kawamura, Y. Nasu, Y. Miguchi, H. Setiadi, and H. Obara, “Proposal of Virtual Transformer-based Back-to-Back Asynchronous Loss Measurement using a Single Set of Measurement Instruments for One Inverter and Experimental Verification,” *IEEJ Journal of Industry Applications*, vol. 11, no. 1, pp. 175-184, 2022. DOI:10.1541/ieejia.21008251

## CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. **T. D. Pham**, T. T. Nguyen, and L. C. Kien, “Minimization of total costs for distribution systems with battery energy storage systems and renewable energy sources,” *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, 17147, 2025. (SCIE, Q1, IF=3.9).
2. **T. D. Pham**, T. T. Nguyen, and L. C. Kien, “Minimize renewable distributed generator costs while achieving high levels of system uniformity and voltage regulation,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 15, 102720, 2024. (SCIE, Q1, IF=6.0).
3. **T. D. Pham**, “Integration of Photovoltaic Units, Wind Turbine Units, Battery Energy Storage System, and Capacitor Bank in the Distribution System for Minimizing Total Costs Considering Harmonic Distortions,” *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, vol. 47, pp. 1265-1282, 2023. (SCIE, Q2, IF=2.4).
4. **T. D. Pham**, T. T. Nguyen, and L. C. Kien, “Optimal Placement of Photovoltaic Distributed Generation Units in Radial Unbalanced Distribution Systems Using MATLAB and OpenDSS-Based Cosimulation and a Proposed Metaheuristic Algorithm,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, pp. 1-21, 2022. (SCIE, Q2, IF=2.3).
5. **T. D. Pham**, T. D. Nguyen, and L. C. Kien, “An Improved Equilibrium Optimizer for Optimal Placement of Distributed Generators in Distribution Systems considering Harmonic Distortion Limits,” *Complexity*, pp. 1-23, 2022. (SCIE, Q2, IF=2.3).
6. **T. D. Pham**, H. D. Nguyen, and T. T. Nguyen, “Reduction of emission cost, loss cost and energy purchase cost for distribution systems with capacitors, photovoltaic distributed generators, and harmonics,” *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 11, pp. 36-49, 2023. (Scopus, Q4).
7. **T. D. Pham**, L. C. Kien, and T. H. Tinh, “Optimization Planning Method of Renewable distributed Generation in Radial Distribution Systems,” *VNUHCM Journal of Science and Technology Development*, vol. 26, pp. 2776-2790, 2023.

## PHỤ LỤC

**Bảng A3.1:** Dữ liệu hệ số công suất của tải, mô-đun quang điện và tua-bin gió

Giờ	Tải (pu)	Hệ số công suất mô-đun quang điện (pu)	Hệ số công suất tua-bin gió (pu)
1	0.64	0	0.220
2	0.60	0	0.215
3	0.58	0	0.215
4	0.56	0	0.213
5	0.56	0	0.210
6	0.58	0.050	0.210
7	0.64	0.100	0.204
8	0.76	0.250	0.180
9	0.87	0.500	0.220
10	0.95	0.670	0.390
11	0.99	0.880	0.480
12	1.00	0.950	0.620
13	0.99	1.000	0.730
14	1.00	0.960	0.810
15	1.00	0.820	0.950
16	0.97	0.700	1.000
17	0.96	0.520	0.900
18	0.96	0.300	0.810
19	0.93	0.150	0.730
20	0.92	0.100	0.600
21	0.92	0	0.420
22	0.93	0	0.350
23	0.87	0	0.300
24	0.72	0	0.220

**Bảng A3.2:** Dữ liệu hệ thống phân phối chuẩn IEEE 69 nút

Từ nút	Tới nút	R (Ohm)	X (Ohm)	P (kW)	Q (kVar)
1	2	0.0005	0.0012	0	0
2	3	0.0005	0.0012	0	0
3	4	0.0015	0.0036	0	0
4	5	0.0251	0.0294	0	0
5	6	0.3660	0.1864	2.6	2.2
6	7	0.3811	0.1941	40.4	30
7	8	0.0922	0.0470	75	54
8	9	0.0493	0.0251	30	22
9	10	0.8190	0.2707	28	19
10	11	0.1872	0.0619	145	104
11	12	0.7114	0.2351	145	104
12	13	1.0300	0.3400	8	5
13	14	1.0440	0.3450	8	5.5
14	15	1.0580	0.3496	0	0
15	16	0.1966	0.0650	45.5	30
16	17	0.3744	0.1238	60	35
17	18	0.0047	0.0016	60	35
18	19	0.3276	0.1083	0	0
19	20	0.2106	0.0690	1	0.6
20	21	0.3416	0.1129	114	81
21	22	0.0140	0.0046	5	3.5
22	23	0.1591	0.0526	0	0
23	24	0.3463	0.1145	28	20
24	25	0.7488	0.2475	0	0
25	26	0.3089	0.1021	14	10
26	27	0.1732	0.0572	14	10
3	28	0.0044	0.0108	26	18.6
28	29	0.0640	0.1565	26	18.6

29	20	0.3978	0.1315	0	0
30	31	0.0702	0.0232	0	0
31	32	0.3510	0.1160	0	0
32	33	0.8390	0.2816	14	10
33	34	1.7080	0.5646	19.5	14
34	35	1.4740	0.4873	6	4
3	36	0.0044	0.0108	26	18.55
36	37	0.0640	0.11565	26	18.55
37	38	0.1053	0.1230	0	0
38	39	0.0304	0.0355	24	17
39	40	0.0018	0.0021	24	17
40	41	0.7283	0.8509	1.2	1
41	42	0.3100	0.3623	0	0
42	43	0.0410	0.0478	6	4.3
43	44	0.0092	0.0116	0	0
44	45	0.1089	0.1373	39.22	26.3
45	46	0.0009	0.0012	39.22	26.3
4	47	0.0034	0.0084	0	0
47	48	0.0851	0.2083	79	56.4
48	49	0.2898	0.7091	384.7	274.5
49	50	0.0822	0.2011	384.7	274.5
8	51	0.0928	0.0473	40.5	28.3
51	52	0.3319	0.1114	3.6	2.7
9	53	0.1740	0.0886	4.35	3.5
53	54	0.2030	0.1034	26.4	19
54	55	0.2842	0.1447	24	17.2
55	56	0.2813	0.1447	0	0
56	57	1.5900	0.5337	0	0
57	58	0.7837	0.2630	0	0
58	59	0.3042	0.1006	100	72

59	60	0.3861	0.1172	0	0
60	61	0.5075	0.2585	1244	888
61	62	0.0974	0.0496	32	23
62	63	0.1450	0.0738	0	0
63	64	0.7105	0.3619	227	162
64	65	1.0410	0.5302	59	42
11	66	0.2012	0.0611	18	13
66	67	0.0047	0.0014	18	13
12	68	0.7394	0.2444	28	20
68	69	0.0047	0.0016	28	20

**Bảng A4.1:** Dữ liệu tải của hệ thống phân phối chuẩn IEEE 25 nút

Từ nút	Tới nút	Kiểu	Độ dài (feet)	$S_A$ (KVA)	$S_B$ (KVA)	$S_C$ (KVA)
1	2	1	1000	0	0	0
2	3	1	500	$35 + j25$	$40 + j30$	$45 + j32$
2	6	2	500	$40 + j30$	$45 + j32$	$35 + j25$
3	4	1	500	$50 + j40$	$60 + j45$	$50 + j35$
3	18	2	500	$40 + j30$	$40 + j30$	$40 + j30$
4	5	2	500	$40 + j30$	$40 + j30$	$40 + j30$
4	23	2	400	$60 + j45$	$50 + j40$	$50 + j35$
6	7	2	500	0	0	0
6	8	2	1000	$40 + j30$	$40 + j30$	$40 + j30$
7	9	2	500	$60 + j45$	$50 + j40$	$50 + j35$
7	14	2	500	$50 + j35$	$50 + j40$	$60 + j45$
7	16	2	500	$40 + j30$	$40 + j30$	$40 + j30$
9	10	2	500	$35 + j25$	$40 + j30$	$45 + j32$
10	11	2	300	$45 + j32$	$35 + j25$	$40 + j30$
11	12	3	200	$50 + j35$	$60 + j45$	$50 + j40$
11	13	3	200	$35 + j25$	$45 + j32$	$40 + j30$

14	15	2	300	$133.3 + j100$	$133.3 + j100$	$133.3 + j100$
14	17	3	300	$40 + j30$	$35 + j25$	$45 + j32$
18	20	2	500	$35 + j25$	$40 + j30$	$45 + j32$
18	21	3	400	$40 + j30$	$35 + j25$	$45 + j32$
20	19	3	400	$60 + j45$	$50 + j35$	$50 + j40$
21	22	3	400	$50 + j35$	$60 + j45$	$50 + j40$
23	24	2	400	$35 + j25$	$45 + j32$	$40 + j30$
24	25	3	400	$60 + j45$	$50 + j30$	$50 + j35$

**Bảng A4.2:** Thông số cấu hình đường dây hệ thống phân phối chuẩn IEEE 25 nút

Kiểu	Impedance matrix (Ohm/ mile)		
1	$0.3686 + j0.6852$	$0.0169 + j0.1515$	$0.0155 + j0.1098$
	$0.0169 + j0.1515$	$0.3757 + j0.6715$	$0.0188 + j0.2072$
	$0.0155 + j0.1098$	$0.0188 + j0.2072$	$0.3723 + j0.6782$
2	$0.9775 + j0.8717$	$0.0167 + j0.1697$	$0.0152 + j0.1264$
	$0.0167 + j0.1697$	$0.9844 + j0.8654$	$0.0186 + j0.2275$
	$0.0152 + j0.1264$	$0.0186 + j0.2275$	$0.9810 + j0.8648$
3	$1.9280 + j1.4194$	$0.0161 + j0.1183$	$0.0161 + j0.1183$
	$0.0161 + j0.1183$	$1.9308 + j1.4215$	$0.0161 + j0.1183$
	$0.0161 + j0.1183$	$0.0161 + j0.1183$	$1.9337 + j1.4236$

**Bảng A4.3:** Thông số của mô-đun quang điện

Mục	Thông số
Peak watt (W)	75
Open circuit volt (V)	21.98
Short circuit current (A)	5.32
Voltage at maximum power (V)	17.32
Current at maximum power (A)	4.76
Volt temperature coefficient (mV/°C)	14.4
Current temperature coefficient (mA/°C)	1.22

Nominal cell operating temperature (°C)	43.00
---	-------

**Bảng A4.4:** Thông số của tua-bin gió.

Rated power	Cut-in wind speed	Rated wind speed	Cut-out wind speed
100 kW	3 m/s	10 m/s	20 m/s

**Bảng A4.5:** Dữ liệu mô phỏng hệ số công suất tua-bin gió cho hệ thống phân phối IEEE 25 nút.

Giờ	Tháng 1	Tháng 2	Tháng 3	Tháng 4	Tháng 5	Tháng 6
1	0.4277	0.4639	0.3926	0.3390	0.2873	0.3551
2	0.4177	0.4408	0.3751	0.3211	0.2701	0.3377
3	0.4141	0.4220	0.3624	0.3062	0.2499	0.3171
4	0.3930	0.4022	0.3496	0.2897	0.2289	0.2936
5	0.3678	0.3846	0.3414	0.2740	0.2114	0.2736
6	0.3427	0.3684	0.3438	0.2648	0.1864	0.2367
7	0.3572	0.4539	0.4200	0.3129	0.1834	0.1984
8	0.4173	0.4894	0.4355	0.3361	0.2193	0.2545
9	0.4266	0.4831	0.4375	0.3447	0.2382	0.2942
10	0.4315	0.4757	0.4418	0.3558	0.2494	0.3123
11	0.4357	0.4725	0.4487	0.3698	0.2583	0.3278
12	0.4327	0.4727	0.4607	0.3842	0.2677	0.3426
13	0.4288	0.4785	0.4800	0.3993	0.2788	0.3533
14	0.4313	0.4913	0.5025	0.4156	0.2901	0.3536
15	0.4414	0.5111	0.5265	0.4324	0.2988	0.3401
16	0.4508	0.5364	0.5470	0.4468	0.3037	0.3248
17	0.4651	0.5599	0.5576	0.4557	0.3140	0.3176
18	0.4752	0.5562	0.5421	0.4517	0.3424	0.3375
19	0.4731	0.5433	0.5165	0.4358	0.3563	0.3564
20	0.4679	0.5323	0.4923	0.4178	0.3535	0.3682

21	0.4633	0.5224	0.4706	0.4034	0.3423	0.3753
22	0.4594	0.514	0.4513	0.3907	0.3272	0.3771
23	0.4530	0.5021	0.4313	0.3778	0.3129	0.3771
24	0.4405	0.4862	0.4139	0.3564	0.3047	0.3673
Giờ	Tháng 7	Tháng 8	Tháng 9	Tháng 10	Tháng 11	Tháng 12
1	0.3672	0.4160	0.3461	0.3233	0.3193	0.3422
2	0.3534	0.4071	0.3363	0.3099	0.3145	0.3408
3	0.3346	0.3957	0.3197	0.2963	0.3139	0.3417
4	0.3081	0.3803	0.2933	0.2776	0.2958	0.3231
5	0.2823	0.3635	0.2627	0.2625	0.2759	0.2986
6	0.2425	0.3345	0.2256	0.2500	0.2565	0.2743
7	0.2033	0.2919	0.1820	0.2123	0.2187	0.2463
8	0.2564	0.3556	0.2241	0.2335	0.2533	0.2877
9	0.3047	0.4164	0.2644	0.2684	0.2847	0.2980
10	0.3324	0.4490	0.2917	0.2905	0.3103	0.3090
11	0.3514	0.4702	0.3146	0.3071	0.3315	0.3245
12	0.3629	0.4829	0.3302	0.3145	0.3462	0.3315
13	0.3664	0.4908	0.3403	0.3164	0.3575	0.3331
14	0.3622	0.4899	0.3449	0.3124	0.3632	0.3340
15	0.3503	0.4762	0.3417	0.3032	0.3606	0.3305
16	0.3368	0.4520	0.3357	0.2962	0.3432	0.3164
17	0.3284	0.4317	0.3295	0.2957	0.3329	0.3114
18	0.3457	0.4302	0.3406	0.3079	0.3448	0.3224
19	0.3633	0.4271	0.3464	0.3170	0.3500	0.3287
20	0.3709	0.4237	0.3472	0.3259	0.3521	0.3312
21	0.3729	0.4181	0.3491	0.3358	0.3518	0.3327
22	0.3746	0.4158	0.3508	0.3431	0.3485	0.3354
23	0.3794	0.4174	0.3485	0.3432	0.3414	0.3393
24	0.3732	0.4214	0.3494	0.3335	0.3263	0.3431

**Bảng A4.6:** Dữ liệu mô phỏng hệ số công suất mô-đun quang điện hệ thống phân phối IEEE 25 nút

Giờ	Tháng 1	Tháng 2	Tháng 3	Tháng 4	Tháng 5	Tháng 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0.0042	0.0770	0.1002	0.1182	0.1131
7	0.1918	0.2210	0.2718	0.2993	0.3044	0.2843
8	0.4027	0.4446	0.4891	0.4965	0.4847	0.4439
9	0.5860	0.6355	0.6742	0.6553	0.6249	0.5630
10	0.7171	0.7757	0.7973	0.7540	0.7057	0.6462
11	0.7658	0.8267	0.8529	0.7728	0.7320	0.6713
12	0.7564	0.8367	0.8333	0.7724	0.7140	0.6397
13	0.6844	0.7565	0.7673	0.7294	0.6361	0.5778
14	0.5465	0.6400	0.6614	0.6179	0.4787	0.4605
15	0.3791	0.4615	0.4882	0.4540	0.3641	0.3230
16	0.1914	0.2521	0.2742	0.2491	0.1987	0.1798
17	0.0151	0.1022	0.0602	0.0859	0.0745	0.0567
18	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0
Giờ	Tháng 7	Tháng 8	Tháng 9	Tháng 10	Tháng 11	Tháng 12
1	0	0	0	0	0	0

2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0.0973	0.0749	0.0870	0.0887	0.0615	0.0722
7	0.2684	0.2596	0.2685	0.2657	0.2521	0.2193
8	0.4484	0.4446	0.4519	0.4440	0.4325	0.4115
9	0.5674	0.5815	0.5904	0.5670	0.5706	0.5735
10	0.6416	0.6505	0.6581	0.6526	0.6565	0.6845
11	0.6590	0.6681	0.6784	0.6665	0.6654	0.7145
12	0.6301	0.6503	0.6435	0.6253	0.6266	0.6775
13	0.5769	0.5881	0.5692	0.5363	0.5456	0.5961
14	0.4741	0.4921	0.4493	0.3998	0.4134	0.4602
15	0.3462	0.3418	0.2976	0.2550	0.2587	0.3009
16	0.1999	0.1866	0.1427	0.1040	0.0984	0.1259
17	0.0690	0.0591	0.0116	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0

**Bảng A4.7:** Dữ liệu mô phỏng hệ số tải hệ thống phân phối IEEE 25 nút

Giờ	Tháng 1	Tháng 2	Tháng 3	Tháng 4	Tháng 5	Tháng 6
1	0.4757	0.4757	0.4757	0.3969	0.3969	0.3969
2	0.4473	0.4473	0.4473	0.3906	0.3906	0.3906
3	0.426	0.426	0.426	0.378	0.378	0.378

4	0.4189	0.4189	0.4189	0.3654	0.3654	0.3654
5	0.4189	0.4189	0.4189	0.3717	0.3717	0.3717
6	0.426	0.426	0.426	0.4095	0.4095	0.4095
7	0.5254	0.5254	0.5254	0.4536	0.4536	0.4536
8	0.6106	0.6106	0.6106	0.5355	0.5355	0.5355
9	0.6745	0.6745	0.6745	0.5985	0.5985	0.5985
10	0.6816	0.6816	0.6816	0.6237	0.6237	0.6237
11	0.6816	0.6816	0.6816	0.63	0.63	0.63
12	0.6745	0.6745	0.6745	0.6237	0.6237	0.6237
13	0.6745	0.6745	0.6745	0.5859	0.5859	0.5859
14	0.6745	0.6745	0.6745	0.5796	0.5796	0.5796
15	0.6603	0.6603	0.6603	0.567	0.567	0.567
16	0.6674	0.6674	0.6674	0.5544	0.5544	0.5544
17	0.7029	0.7029	0.7029	0.567	0.567	0.567
18	0.71	0.71	0.71	0.5796	0.5796	0.5796
19	0.71	0.71	0.71	0.6048	0.6048	0.6048
20	0.6816	0.6816	0.6816	0.6174	0.6174	0.6174
21	0.6461	0.6461	0.6461	0.6048	0.6048	0.6048
22	0.5893	0.5893	0.5893	0.567	0.567	0.567
23	0.5183	0.5183	0.5183	0.504	0.504	0.504
24	0.4473	0.4473	0.4473	0.441	0.441	0.441
Giờ	Tháng 7	Tháng 8	Tháng 9	Tháng 10	Tháng 11	Tháng 12
1	0.64	0.64	0.64	0.3717	0.3717	0.3717
2	0.6	0.6	0.6	0.3658	0.3658	0.3658
3	0.58	0.58	0.58	0.354	0.354	0.354
4	0.56	0.56	0.56	0.3422	0.3422	0.3422
5	0.56	0.56	0.56	0.3481	0.3481	0.3481
6	0.58	0.58	0.58	0.3835	0.3835	0.3835
7	0.64	0.64	0.64	0.4248	0.4248	0.4248
8	0.76	0.76	0.76	0.5015	0.5015	0.5015

9	0.87	0.87	0.87	0.5605	0.5605	0.5605
10	0.95	0.95	0.95	0.5841	0.5841	0.5841
11	0.99	0.99	0.99	0.59	0.59	0.59
12	1	1	1	0.5841	0.5841	0.5841
13	0.99	0.99	0.99	0.5487	0.5487	0.5487
14	1	1	1	0.5428	0.5428	0.5428
15	1	1	1	0.531	0.531	0.531
16	0.97	0.97	0.97	0.5192	0.5192	0.5192
17	0.96	0.96	0.96	0.531	0.531	0.531
18	0.96	0.96	0.96	0.5428	0.5428	0.5428
19	0.93	0.93	0.93	0.5664	0.5664	0.5664
20	0.92	0.92	0.92	0.5782	0.5782	0.5782
21	0.92	0.92	0.92	0.5664	0.5664	0.5664
22	0.93	0.93	0.93	0.531	0.531	0.531
23	0.87	0.87	0.87	0.472	0.472	0.472
24	0.72	0.72	0.72	0.413	0.413	0.413

**Bảng A4.8:** Dữ liệu mô phỏng hệ số công suất mô-đun quang điện cho hệ thống IEEE 123 nút.

Giờ	Mùa đông	Mùa xuân	Mùa hạ	Mùa thu
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0022	0.0180	0.0000
5	0.0000	0.0427	0.1080	0.0000
6	0.0000	0.1335	0.2399	0.0118
7	0.0000	0.2667	0.3914	0.0723
8	0.0144	0.4163	0.5386	0.1746
9	0.0826	0.5500	0.6667	0.2866
10	0.1698	0.6535	0.7603	0.3759

11	0.2293	0.7168	0.7996	0.4274
12	0.2491	0.7283	0.8291	0.4329
13	0.2275	0.7012	0.8104	0.3970
14	0.1673	0.6299	0.7498	0.3201
15	0.0827	0.5203	0.6420	0.2147
16	0.0217	0.3824	0.5108	0.1097
17	0.0003	0.2320	0.3637	0.0364
18	0.0000	0.1014	0.2158	0.0032
19	0.0000	0.0227	0.0912	0.0000
20	0.0000	0.0000	0.0060	0.0000
21	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
22	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
23	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
24	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

**Bảng A4.9:** Dữ liệu mô phỏng hệ số công suất tua-bin gió cho hệ thống IEEE 123 nút.

Giờ	Mùa đông	Mùa xuân	Mùa hạ	Mùa thu
1	0.5896	0.4668	0.3608	0.5419
2	0.5945	0.4642	0.3638	0.5440
3	0.5976	0.4607	0.3615	0.5411
4	0.5968	0.4601	0.3533	0.5375
5	0.596	0.4575	0.3431	0.5364
6	0.5968	0.4552	0.3449	0.5331
7	0.6015	0.4670	0.3735	0.5303
8	0.6065	0.4941	0.4069	0.5322
9	0.6090	0.5242	0.4293	0.5412
10	0.6102	0.5489	0.4445	0.5536
11	0.6140	0.5643	0.4557	0.5647
12	0.6183	0.5727	0.4606	0.5737

13	0.6185	0.5756	0.4602	0.5755
14	0.6169	0.5727	0.4561	0.5724
15	0.6168	0.5628	0.4460	0.5625
16	0.6162	0.5437	0.4299	0.5500
17	0.6131	0.5200	0.4076	0.5430
18	0.6085	0.5030	0.3798	0.5425
19	0.605	0.4964	0.3582	0.5426
20	0.6028	0.4940	0.3604	0.5403
21	0.6000	0.4922	0.3680	0.5393
22	0.5971	0.4870	0.3700	0.5407
23	0.5947	0.4775	0.3674	0.5403
24	0.5887	0.4751	0.3603	0.5392

**Bảng A4.10:** Dữ liệu hệ số của tải IEEE RTS-96 (pu) cho hệ thống IEEE 123 nút.

Giờ	Mùa đông	Mùa xuân	Mùa hạ	Mùa thu
1	0.4757	0.3969	0.64	0.3717
2	0.4473	0.3906	0.6	0.3658
3	0.426	0.3780	0.58	0.3540
4	0.4189	0.3654	0.56	0.3422
5	0.4189	0.3717	0.56	0.3481
6	0.426	0.4095	0.58	0.3835
7	0.5254	0.4536	0.64	0.4248
8	0.6106	0.5355	0.76	0.5015
9	0.6745	0.5985	0.87	0.5605
10	0.6816	0.6237	0.95	0.5841
11	0.6816	0.6300	0.99	0.5900
12	0.6745	0.6237	1.00	0.5841
13	0.6745	0.5859	0.99	0.5487
14	0.6745	0.5796	1.00	0.5428
15	0.6603	0.5670	1.00	0.5310

16	0.6674	0.5544	0.97	0.5192
17	0.7029	0.5670	0.96	0.5310
18	0.7100	0.5796	0.96	0.5428
19	0.7100	0.6048	0.93	0.5664
20	0.6816	0.6174	0.92	0.5782
21	0.6461	0.6048	0.92	0.5664
22	0.5893	0.5670	0.93	0.5310
23	0.5183	0.5040	0.87	0.4720
24	0.4473	0.4410	0.72	0.4130

**Bảng A4.11:** Dữ liệu khóa mở của hệ thống phân phối IEEE 123 nút

Nút A	Nút B	Trạng thái
13	152	Đóng
18	135	Đóng
60	160	Đóng
61	610	Đóng
97	197	Đóng
150	149	Đóng
250	251	Mở
450	451	Mở
54	94	Mở
151	300	Mở
300	350	Mở

**Bảng A4.12:** Dữ liệu tụ bù công suất phản kháng hệ thống phân phối IEEE 123 nút

Nút	Pha A	Pha B	Pha C
	kVAr	kVAr	kVAr
83	200	200	200
88	50	0	0
90	0	50	0
92	0	0	50

Total	250	250	250
-------	-----	-----	-----

**Bảng A4.13:** Dữ liệu tải cho hệ thống phân phối IEEE 123 nút

Nút	Pha 1	Pha 1	Pha 2	Pha 2	Pha 3	Pha 3
	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
1	40	20	0	0	0	0
2	0	0	20	10	0	0
4	0	0	0	0	40	20
5	0	0	0	0	20	10
6	0	0	0	0	40	20
7	20	10	0	0	0	0
9	40	20	0	0	0	0
10	20	10	0	0	0	0
11	40	20	0	0	0	0
12	0	0	20	10	0	0
16	0	0	0	0	40	20
17	0	0	0	0	20	10
19	40	20	0	0	0	0
20	40	20	0	0	0	0
22	0	0	40	20	0	0
24	0	0	0	0	40	20
28	40	20	0	0	0	0
29	40	20	0	0	0	0
30	0	0	0	0	40	20
31	0	0	0	0	20	10
32	0	0	0	0	20	10
33	40	20	0	0	0	0
34	0	0	0	0	40	20
35	40	20	0	0	0	0
37	40	20	0	0	0	0
38	0	0	20	10	0	0

39	0	0	20	10	0	0
41	0	0	0	0	20	10
42	20	10	0	0	0	0
43	0	0	40	20	0	0
45	20	10	0	0	0	0
46	20	10	0	0	0	0
47	35	25	35	25	35	25
48	70	50	70	50	70	50
49	35	25	70	50	35	25
50	0	0	0	0	40	20
51	20	10	0	0	0	0
52	40	20	0	0	0	0
53	40	20	0	0	0	0
55	20	10	0	0	0	0
56	0	0	20	10	0	0
58	0	0	20	10	0	0
59	0	0	20	10	0	0
60	20	10	0	0	0	0
62	0	0	0	0	40	20
63	40	20	0	0	0	0
64	0	0	75	35	0	0
65	35	25	35	25	70	50
66	0	0	0	0	75	35
68	20	10	0	0	0	0
69	40	20	0	0	0	0
70	20	10	0	0	0	0
71	40	20	0	0	0	0
73	0	0	0	0	40	20
74	0	0	0	0	40	20
75	0	0	0	0	40	20
76	105	80	70	50	70	50

77	0	0	40	20	0	0
79	40	20	0	0	0	0
80	0	0	40	20	0	0
82	40	20	0	0	0	0
83	0	0	0	0	20	10
84	0	0	0	0	20	10
85	0	0	0	0	40	20
86	0	0	20	10	0	0
87	0	0	40	20	0	0
88	40	20	0	0	0	0
90	0	0	40	20	0	0
92	0	0	0	0	40	20
94	40	20	0	0	0	0
95	0	0	20	10	0	0
96	0	0	20	10	0	0
98	40	20	0	0	0	0
99	0	0	40	20	0	0
100	0	0	0	0	40	20
102	0	0	0	0	20	10
103	0	0	0	0	40	20
104	0	0	0	0	40	20
106	0	0	40	20	0	0
107	0	0	40	20	0	0
109	40	20	0	0	0	0
111	20	10	0	0	0	0
112	20	10	0	0	0	0
113	40	20	0	0	0	0
114	20	10	0	0	0	0
Total	1420	775	915	515	1155	635

**Bảng A4.14:** Dữ liệu đường dây của hệ thống phân phối IEEE 123 nút

Nút A	Nút B	Độ dài (ft.)	Kiểu
1	2	175	10
1	3	250	11
1	7	300	1
3	4	200	11
3	5	325	11
5	6	250	11
7	8	200	1
8	12	225	10
8	9	225	9
8	13	300	1
9	14	425	9
13	34	150	11
13	18	825	2
14	11	250	9
14	10	250	9
15	16	375	11
15	17	350	11
18	19	250	9
18	21	300	2
19	20	325	9
21	22	525	10
21	23	250	2
23	24	550	11
23	25	275	2
25	26	350	7
25	28	200	2
26	27	275	7
26	31	225	11
27	33	500	9
28	29	300	2
29	30	350	2
30	250	200	2
31	32	300	11
34	15	100	11
35	36	650	8
35	40	250	1
36	37	300	9
36	38	250	10

38	39	325	10
40	41	325	11
40	42	250	1
42	43	500	10
42	44	200	1
44	45	200	9
44	47	250	1
45	46	300	9
47	48	150	4
47	49	250	4
49	50	250	4
50	51	250	4
52	53	200	1
53	54	125	1
54	55	275	1
54	57	350	3
55	56	275	1
57	58	250	10
57	60	750	3
58	59	250	10
60	61	550	5
60	62	250	12
62	63	175	12
63	64	350	12
64	65	425	12
65	66	325	12
67	68	200	9
67	72	275	3
67	97	250	3
68	69	275	9
69	70	325	9
70	71	275	9
72	73	275	11
72	76	200	3
73	74	350	11
74	75	400	11
76	77	400	6
76	86	700	3
77	78	100	6
78	79	225	6

78	80	475	6
80	81	475	6
81	82	250	6
81	84	675	11
82	83	250	6
84	85	475	11
86	87	450	6
87	88	175	9
87	89	275	6
89	90	225	10
89	91	225	6
91	92	300	11
91	93	225	6
93	94	275	9
93	95	300	6
95	96	200	10
97	98	275	3
98	99	550	3
99	100	300	3
100	450	800	3
101	102	225	11
101	105	275	3
102	103	325	11
103	104	700	11
105	106	225	10
105	108	325	3
106	107	575	10
108	109	450	9
108	300	1000	3
109	110	300	9
110	111	575	9
110	112	125	9
112	113	525	9
113	114	325	9
135	35	375	4
149	1	400	1
152	52	400	1
160	67	350	6
197	101	250	3

**Bảng A4.15:** Cấu hình đường dây của hệ thống phân phối IEEE 123 nút

Kiểu	Ma trận trở kháng (Ohms/ mile)		
	1	0.4576 + j1.0780 0.1560 + j0.5017 0.1535 + j0.3849	0.1560 + j0.5017 0.4666 + j1.0482 0.1580 + j0.4236
2	0.4666 + j1.0482 0.1580 + j0.4236 0.1560 + j0.5017	0.1580 + j0.4236 0.4615 + j1.0651 0.1535 + j0.3849	0.1560 + j0.5017 0.1535 + j0.3849 0.4576 + j1.0780
3	0.4615 + j1.0651 0.1535 + j0.3849 0.1580 + j0.4236	0.1535 + j0.3849 0.4576 + j1.0780 0.1560 + j0.5017	0.1580 + j0.4236 0.1560 + j0.5017 0.4666 + j1.0482
4	0.4615 + j1.0651 0.1580 + j0.4236 0.1535 + j0.3849	0.1580 + j0.4236 0.4666 + j1.0482 0.1560 + j0.5017	0.1535 + j0.3849 0.1560 + j0.5017 0.4576 + j1.0780
5	0.4666 + j1.0482 0.1560 + j0.5017 0.1580 + j0.4236	0.1560 + j0.5017 0.4576 + j1.0780 0.1535 + j0.3849	0.1580 + j0.4236 0.1535 + j0.3849 0.4615 + j1.0651
6	0.4576 + j1.0780 0.1535 + j0.3849 0.1560 + j0.5017	0.1535 + j0.3849 0.4615 + j1.0651 0.1580 + j0.4236	0.1560 + j0.5017 0.1580 + j0.4236 0.4666 + j1.0482
7	0.4576 + j1.0780 0.0000 + j0.0000 0.1535 + j0.3849	0.0000 + j0.0000 0.0000 + j0.0000 0.0000 + j0.0000	0.1535 + j0.3849 0.0000 + j0.0000 0.4615 + j1.0651
8	0.4576 + j1.0780 0.1535 + j0.3849 0.0000 + j0.0000	0.1535 + j0.3849 0.4615 + j1.0651 0.0000 + j0.0000	0.0000 + j0.0000 0.0000 + j0.0000 0.0000 + j0.0000
9	1.3292 + j1.3475 0.0000 + j0.0000 0.0000 + j0.0000	0.0000 + j0.0000 0.0000 + j0.0000 0.0000 + j0.0000	0.0000 + j0.0000 0.0000 + j0.0000 0.0000 + j0.0000
10	0.0000 + j0.0000 0.0000 + j0.0000 0.0000 + j0.0000	0.0000 + j0.0000 1.3292 + j1.3475 0.0000 + j0.0000	0.0000 + j0.0000 0.0000 + j0.0000 0.0000 + j0.0000
11	0.0000 + j0.0000 0.0000 + j0.0000 0.0000 + j0.0000	0.0000 + j0.0000 0.0000 + j0.0000 0.0000 + j0.0000	0.0000 + j0.0000 0.0000 + j0.0000 1.3292 + j1.3475
12	1.5209 + j0.7521 0.5198 + j0.2775 0.4924 + j0.2157	0.5198 + j0.2775 1.5329 + j0.7162 0.5198 + j0.2775	0.4924 + j0.2157 0.5198 + j0.2775 1.5209 + j0.7521