

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP.HCM

PHẠM ĐÌNH THÁI

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

Chuyên ngành: KỸ THUẬT ĐIỆN

Mã số chuyên ngành: 9520201

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH – năm 2025

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM**

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:

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án Cấp trường họp tại

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. HCM

vào ngày tháng năm

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 tích hợp 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 và ở xa nơi tiêu thụ nên quá trình truyền tải và phân phối điện gây tổn thất công suất rất lớn cũng như ảnh hưởng xấu đến chất lượng điện năng. Vì vậy, việc kết nối phù hợp các nguồn phát điện phân tán, đặc biệt là các nguồn năng lượng tái tạo vào hệ thống phân phối được coi như là giải pháp tuyệt vời để khắc phục các vấn đề tồn tại nêu trên. Ngược lại, việc kết nối không kế hoạch các nguồn phát có thể gây ra nhiều vấn đề không mong muốn do thay đổi cấu trúc của lưới điện như quá áp, tăng tổn thất, chất lượng điện năng giảm, và mức độ ảnh hưởng phụ thuộc chính vào vị trí cũng như quy mô của các DGs được kết nối. Do đó, việc xác định giải pháp kết nối các DGs trong hệ thống phân phối thì cần thiết để tối đa điểm mạnh và tránh những tác động tiêu cực đến lưới điện.

1.2 Mục tiêu và nhiệm vụ của nghiên cứu

- Giảm thiểu tổng chi phí xem xét mà vẫn đảm bảo thỏa mãn tất cả các tiêu chí kỹ thuật
- Đảm bảo nâng cao chất lượng điện năng gồm điện áp nút, dòng nhánh và nhiễu sóng hài.
- Chứng minh sự ảnh hưởng của các nguồn phát phân tán lên lưới phân phối ba pha cân bằng và không cân bằng.
- Cụ thể sự thâm nhập của các nguồn phát phân tán năng lượng tái tạo trong lưới phân phối.
- Phát triển thuật toán tối ưu cải tiến hiệu quả cao (Modified Coyote Optimization Algorithm).
- Phát triển sự phối hợp mô phỏng giữa OpenDSS và MATLAB cho các bài toán tối ưu.

1.3 Phạm vi và giới hạn của nghiên cứu

- Lưới điện áp dụng: Lưới phân phối chuẩn IEEE 69 nút, IEEE 25 nút và IEEE 123 nút.
- Thông số tải của lưới điện: Dữ liệu tải được tham chiếu từ IEEE RTS-96.
- Công suất nguồn phát từ năng lượng mặt trời và năng lượng gió: 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.
- Vị trí lắp đặt của các nguồn phát phân tán nối lưới: Đã giả sử tất cả các vị trí đều được coi là phù hợp cho việc lắp đặt các nguồn phát. Bức xạ mặt trời và tốc độ gió cũng được coi là như nhau tại mỗi vị trí trong hệ thống.
- Hiệu suất thiết bị chuyển đổi công suất: 100% cho mô-đun quang điện và tua-bin gió, và 90% cho BESS.
- Sóng hài từ tải phi tuyến và thiết bị chuyển đổi công suất: Phổ hài được chọn là từ các nghiên cứu trước đây.
- Chất lượng điện năng: Tuân theo IEEE Std. 1547, IEEE Std. 519, 30/2019/TT-BCT và IEEE Std. 45-2002.

1.4 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.

1.5 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.

- 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 để tuân theo tiêu chuẩn IEEE Std. 519 và quy định 30/2019/TT-BCT.
- 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 bài toán liên quan đến sự tối ưu phức tạp một cách thuận tiện.

Dựa trên kết quả thu được, sự đóng góp của nghiên cứu trong luận án này như sau:

- Xem xét ràng buộc về sóng hài và độ lệch điện áp không cân bằng: Độ méo sóng hài đã đưa về giới hạn cho phép của IEEE Std. 519. Chỉ số đại diện sự sai lệch điện áp không cân bằng cũng tuân theo IEEE Std. 45-2002.
- Đề xuất công cụ phối hợp mô phỏng: Phát triển thành công công cụ phối hợp mô phỏng giữa phần mềm MATLAB và OpenDSS thông qua cổng COM mang tính linh hoạt trong việc giải quyết các bài toán tối ưu.
- Phát triển thuật toán tối ưu: Cải tiến và phát triển thành công thuật toán MCOA với hiệu suất và ổn định tốt.

1.6 Cấu trúc của luận án

Luận án này được chia thành 6 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 cho 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 cho 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 Tổng quan các nghiên cứu trước đây

Hầu hết các nghiên cứu trước đây đều đề xuất các thuật toán meta-heuristic do tính ưu việt của nó so với các phương pháp khác trong việc giải các bài toán tối ưu khác nhau. 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. Các thuật toán meta-heuristic mà được sử dụng phổ biến cho việc giải quyết các bài toán liên quan tới sự tích hợp tối ưu các DGs gồm: Genetic Algorithm (GA) [1], Particle Swarm Optimization (PSO) [2], Cuckoo Search Algorithm (CSA) [3], Artificial Bee Colony Algorithm (ABC) [4], Ant Colony Optimization (ACO) [5], Biogeographic Based Optimization (BBO) [6], Equilibrium Optimizer (EO) [7], Sunflower Optimization Algorithm (SFO) [8], Coyote Optimization Algorithm (COA) [9], Whale Optimization Algorithm (WOA) [10], Ant Lion Optimization Algorithm (ALOA) [11], Harmony Search Algorithm (HSA) [12], Shuffled Frog Leaping Algorithm (SFLA) [13], Bat Algorithm (BA) [14], Success Rate Group Search Algorithm (SRGSO) [15], Self- Adaptive Lévy Flight Jaya Algorithm (SALFJA) [16], Runner Root Algorithm (RRA) [17], Human Opinion Dynamics Algorithm (HODA) [18], Water Cycle Algorithm (WCA) [19] and Different Cat Swarm Optimization Algorithm (DCSOA) [20]. Để giải quyết nhiều bài toán tối ưu hóa phức tạp, đặc biệt là số lượng biến lớn trong không gian tìm kiếm rộng, việc đề xuất các phương pháp hiệu quả mới luôn được hoan nghênh. Vì vậy, trong luận án này, một thuật toán mới hiệu quả và có độ ổn định cao được phát triển để nâng cao chất lượng nghiệm cho các bài toán tối ưu khác nhau.

2.2 Đề xuất khắc phục các tồn tại của các nghiên cứu trước

Tất cả những vấn đề mà các nghiên cứu trước đây còn tồn tại như bên dưới sẽ được giải quyết trong luận án này.

- Trong các nghiên cứu trước đây, 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 trung. Do đó, giải pháp tìm được có thể không tối ưu ở các mức tải khác nhau.
- Công suất đầu ra của các nguồn phát năng lượng tái tạo phụ thuộc vào điều kiện tự nhiên và chúng thay đổi theo thời gian, nhưng việc xem xét sự thay đổi các nguồn phát chưa nhận được nhiều sự chú ý trong quá khứ.
- Hệ thống phân phối ba pha không cân bằng do sự chênh lệch tải và trở kháng đường dây vẫn chưa nhận được nhiều sự quan tâm trước đây.
- Việc xác định mức độ xâm 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.
- Sẽ có lợi hơn nếu tích hợp hệ thống dự trữ năng lượng để tích trữ và phát năng lượng một cách hợp lý nhằm tiết kiệm chi phí trong vận hành. Tuy nhiên, các nghiên cứu trước đây chưa có đánh giá đầy đủ.
- Việc giảm thiểu tổng chi phí sẽ góp phần đáng kể nâng cao hiệu quả kinh tế trong vận hành hệ thống nhưng vẫn chưa có nhiều nghiên cứu về vấn đề này.

2.3 Modified Coyote Optimization Algorithm

Một thuật toán tích cực mà dựa vào hành vi thông minh của loài sói đã được Dr. Pierezan và Dr. Coelho phát triển và được gọi là COA [9]. Tuy nhiên, thuật toán này vẫn còn tồn tại các nhược điểm mà cần phải khắc phục nhằm nâng cao tính hiệu quả và độ ổn định của thuật toán. Do đó, một phiên bản cải tiến hiệu quả gọi là MCOA được ra đời. Trong thuật toán này, các giải pháp ban đầu được phân phối ngẫu nhiên trong giới hạn được xác định trước:

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

Vị trí của các giải pháp mới trong mỗi nhóm được cập nhật theo phương trình phát giải pháp thế hệ thứ nhất như sau:

$$S_{pk,ce}^{New} = S_{pk,ce} + rd_1 \cdot (S_{bestPk,pk} - S_{rd1,pk}) + rd_2 \cdot (S_{bestPop} - S_{rd2,pk}); pk = 1, 2, \dots, N_{pk} \ \& \ ce = 1, 2, \dots, N_{ce} \quad (2.2)$$

Trong phương trình cải tiến này, giải pháp tốt nhất của dân số hiện tại được chọn để thay thế cho giải pháp trung tâm kém hiệu quả. Trong sự phát giải pháp mới thứ hai, mỗi nhóm được giả định chỉ có một giải pháp mới được tạo ra bằng cách áp dụng phương trình (2.3) hoặc (2.4) thay cho cơ chế phát giải pháp ngẫu nhiên không tích cực ở phiên bản gốc.

$$S_{pk}^{New} = S_{bestPop} + rd_3 \cdot (S_{bestPop} - S_{best,r1}) + rd_4 \cdot (S_{bestPop} - S_{best,r2}) \quad (2.3)$$

$$S_{pk}^{New} = S_{bestPop} + rd_3 \cdot (S_{bestPop} - S_{best,r1}) + rd_4 \cdot (S_{bestPop} - S_{best,r2}) + rd_5 \cdot (S_{bestPop} - S_{best,r3}) \quad (2.4)$$

Để quyết định thời điểm thích hợp để áp dụng phương trình nào trong việc phát giải pháp mới thứ hai, tỷ lệ giữa số cặp nghiệm gần (N_C) và số cặp nghiệm tối đa (N_M) được thiết lập. Giá trị tính toán của tỷ lệ này được so sánh với ngưỡng xác định trước (δ). Nếu kết quả của N_C/N_M nhỏ hơn δ thì phương trình (2.3) được chọn và ngược lại, phương trình (2.4) được chọn. Ngoài ra, hành động trao đổi giải pháp cũng được thực hiện. Hai giải pháp được chọn ngẫu nhiên từ hai nhóm ngẫu nhiên khác nhau trong cộng đồng sẽ được hoán đổi vị trí nếu điều kiện của phương trình (2.5) thỏa mãn [9].

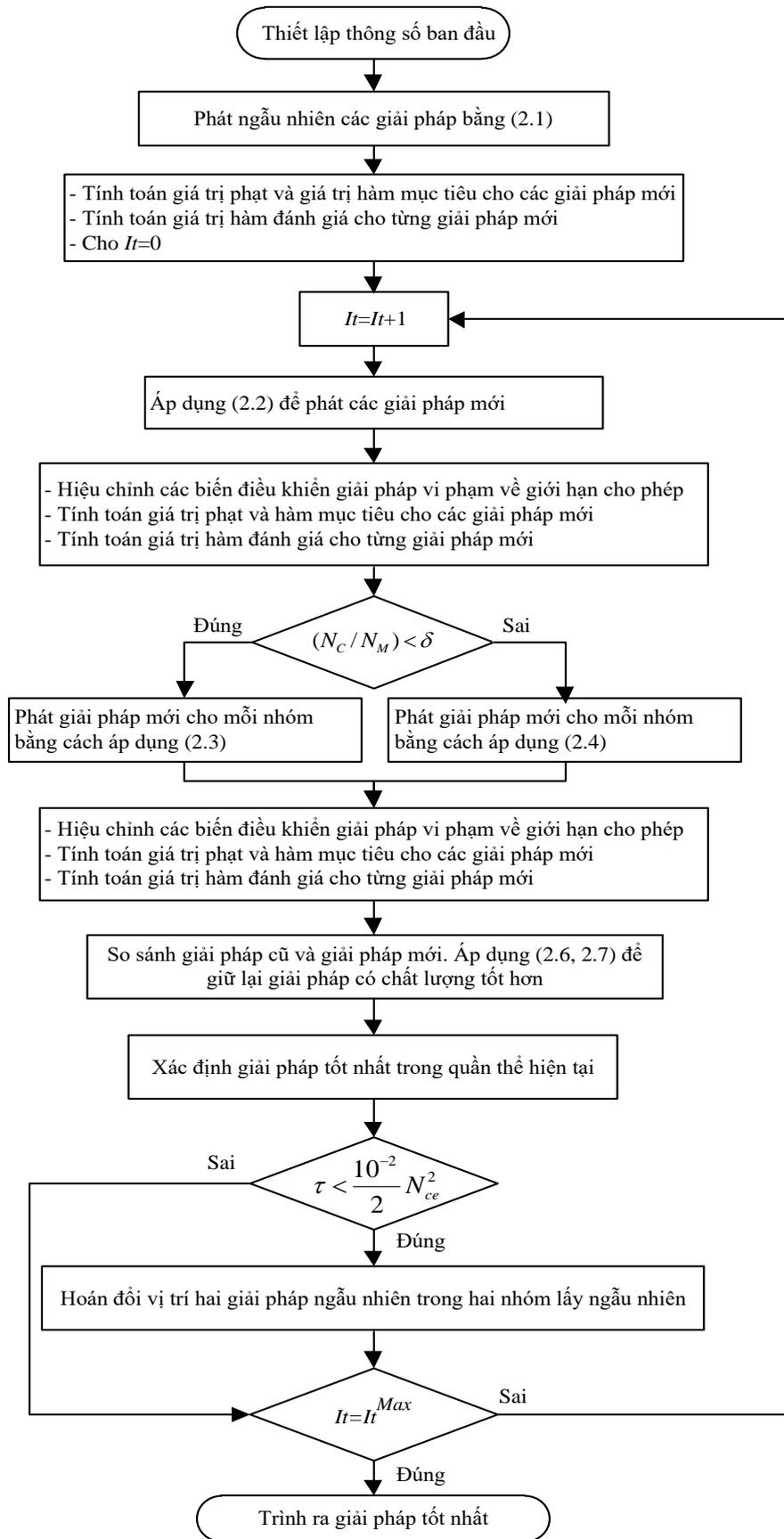
$$\tau < \frac{10^{-2}}{2} \times N_{ce}^2 \quad (2.5)$$

Dựa trên kết quả đánh giá cho tất cả các giải pháp, các giải pháp tốt được cập nhật theo quy luật sau:

$$S_{pk,ce} = \begin{cases} S_{pk,ce}^{New} & \text{nếu } SF_{pk,ce}^{New} < SF_{pk,ce} \\ S_{pk,ce} & \text{các trường hợp khác} \end{cases}; pk = 1, 2, \dots, N_{pk}; ce = 1, 2, \dots, N_{ce} \quad (2.6)$$

$$SF_{pk,ce} = \begin{cases} SF_{pk,ce}^{New} & \text{nếu } SF_{pk,ce}^{New} < SF_{pk,ce} \\ SF_{pk,ce} & \text{các trường hợp khác} \end{cases}; pk = 1, 2, \dots, N_{pk}; ce = 1, 2, \dots, N_{ce} \quad (2.7)$$

Sơ đồ áp dụng MCOA để giải bài toán tối ưu có thể được trình bày ngắn gọn như Hình 2.1.



Hình 2.1 Lưu đồ ứng dụng MCOA để giải quyết cho bài toán tối ưu.

2.4 Tổng kết

COA là một thuật toán meta-heuristic mạnh với độ ổn định tốt, nhưng nó vẫn tồn tại các giới hạn mà ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả của thuật toán. Những cải tiến trong phương trình khởi tạo mới trong nghiên cứu 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.

CHƯƠNG 3: ỨNG 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 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 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 được trình bày như mục bên dưới.

2.2 Mô tả bài toán

2.2.1 Hàm mục tiêu

$$\text{Giảm tối đa } TC_{Total} = TC_{WF-PVF-BESS-CB}^{Inv\&OM} + TC_{Grid}(\$) \quad (3.1)$$

2.2.1.1 Tổng chi phí cho việc đầu tư và O&M cho các nguồn phát phân tán:

$$TC_{WF-PVF-BESS-CB}^{Inv\&OM} = TC_{PVF} + TC_{WF} + TC_{BESS} + TC_{CB}(\$) \quad (3.2)$$

Trong đó, các chi phí thành phần được tìm ra từ các phương trình như bên dưới:

$$TC_{PF} = \sum_{j=1}^{N_{PF}} (C_{PF}^{Cap} \cdot P_{PF,j}^{Rated}) + 365 \cdot \sum_{y=1}^{20} \sum_{h=1}^{24} \sum_{j=1}^{N_{PF}} (\theta_y \cdot C_{PF}^{O\&M} \cdot P_{PF,j,h,y}) (\$) \quad (3.3)$$

$$TC_{WF} = \sum_{i=1}^{N_{WF}} (C_{WF}^{Cap} \cdot P_{WF,i}^{Rated}) + 365 \cdot \sum_{y=1}^{20} \sum_{h=1}^{24} \sum_{i=1}^{N_{WF}} (\theta_y \cdot C_{WF}^{O\&M} \cdot P_{WF,i,h,y}) (\$) \quad (3.4)$$

$$TC_{BESS} = \sum_{k=1}^{N_{BESS}} (C_{BESS}^{Cap} \cdot E_{BESS,k}^{Rated}) + \sum_{y=1}^{20} \sum_{k=1}^{N_{BESS}} (\theta_y \cdot C_{BESS}^{O\&M} \cdot E_{BESS,k,y}^{Rated}) + \sum_{k=1}^{N_{BESS}} (C_{BESS}^{Aux} \cdot P_{BESS,k}^{Rated}) (\$) \quad (3.5)$$

$$TC_{CB} = \sum_{c=1}^{N_{CB}} (C_{CB}^{Cap} \cdot Q_{CB,c}^{Rated}) + \sum_{c=1}^{N_{CB}} (Loc_{CB,c}) (\$) \quad (3.6)$$

Trong phương trình (3.3 – 3.5),
$$\theta_y = \left(\frac{1}{1+dc} \right)^y \quad (3.7)$$

2.2.1.2 Chi phí phát điện từ lưới điện chính:

$$TC_{Grid} = 365 \cdot \sum_{y=1}^{20} \sum_{h=1}^{24} (\theta_y \cdot Pr_{h,y}^{Grid} \cdot P_{Sub,h,y}) (\$) \quad (3.8)$$

2.2.2 Các ràng buộc cho hàm mục tiêu

2.2.2.1 Ràng buộc về cân bằng công suất

$$P_{Sub,h,y} + \sum_{j=1}^{N_{PF}} P_{PF,j,h,y} + \sum_{i=1}^{N_{WF}} P_{WF,i,h,y} + \sum_{k=1}^{N_{BESS}} P_{BESS,k,h,y}^{DisCh} = \sum_{b=1}^{N_b} P_{b,h,y} + \sum_{d=1}^{N_d} P_{d,h,y} \quad (3.9)$$

$$P_{Sub,h,y} + \sum_{j=1}^{N_{PF}} P_{PF,j,h,y} + \sum_{i=1}^{N_{WF}} P_{WF,i,h,y} = \sum_{b=1}^{N_b} P_{b,h,y} + \sum_{d=1}^{N_d} P_{d,h,y} + \sum_{k=1}^{N_{BESS}} P_{BESS,k,h,y}^{Ch} \quad (3.10)$$

$$Q_{Sub,h,y} + \sum_{i=1}^{N_{WF}} Q_{WF,i,h,y} + \sum_{j=1}^{N_{PF}} Q_{PF,j,h,y} = \sum_{b=1}^{N_b} Q_{b,h,y} + \sum_{d=1}^{N_d} Q_{d,h,y} \quad (3.11)$$

Trong đó, $Q_{PF,j,h,y} = P_{PF,j,h,y} \cdot \beta_{PF,j}$; với $\beta_{PF,j} = \tan(\cos^{-1}(PF_{PF,j}))$ (3.12)

và $Q_{WF,i,h,y} = P_{WF,i,h,y} \cdot \beta_{WF,i}$; với $\beta_{WF,i} = \tan(\cos^{-1}(PF_{WF,i}))$ (3.13)

2.2.2.2 Giới hạn điện áp nút

$$V^{Min} \leq V_{s,h,y} \leq V^{Max}, \quad s = 1, 2, \dots, N_b, \quad h = 1, 2, \dots, N_h, \quad y = 1, 2, \dots, N_y \quad (3.14)$$

2.2.2.3 Giới hạn dòng điện nhánh

$$I_{b,h,y} \leq I_{b,h,y}^{Max}; \quad b = 1, 2, \dots, N_b \quad (3.15)$$

2.2.2.4 Giới hạn nhiễu sóng hài

$$THD^{Max} \geq THD_{s,h,y}; \quad s=1, 2, \dots, N_b, \quad h = 1, 2, \dots, N_h, \quad o = 2, \dots, Hr \quad (3.16)$$

$$IHD^{Max} \geq IHD_{s,h,y}^o; \quad s=1, 2, \dots, N_b, \quad h = 1, 2, \dots, N_h, \quad o = 1, 2, \dots, Hr \quad (3.17)$$

Trong đó,

$$THD_{s,h,y}(\%) = \left[\frac{\sum_{o=2}^{Hr} (V_{s,h,y,o})^2}{V_{s,h,y}^1} \right] \times 100 (\%) \quad (3.18)$$

$$IHD_{s,h,y}^o (\%) = \left[\frac{V_{s,h,y,o}}{V_{s,h,y}^1} \right] \times 100 (\%) \quad (3.19)$$

2.2.2.5 Giới hạn công suất nạp và xả của BESS

$$P_{BESS}^{Rated} \cdot \varepsilon^{Char} \geq P_{BESS,k,h}^{Ch} \geq 0 \quad (3.20)$$

$$-P_{BESS}^{Rated} \cdot \varepsilon^{DisCh} \leq P_{BESS,k,h}^{DisCh} \leq 0 \quad (3.21)$$

2.2.2.6 Giới hạn dung lượng của BESS:

$$E_{BESS}^{Min} \leq E_{BESS,h} \leq E_{BESS}^{Max} \quad (3.22)$$

$$E_{BESS,0} = E_{BESS,24} \quad (3.23)$$

2.2.2.7 Giới hạn sự xâm nhập của WFs, PVFs và CB

$$P_{PF}^{Min} \leq P_{PF,j}^{Rated} \leq P_{PF}^{Max}; j = 1, 2, \dots, N_{PF} \quad (3.24)$$

$$P_{WF}^{Min} \leq P_{WF,i}^{Rated} \leq P_{WF}^{Max}; i = 1, 2, \dots, N_{WF} \quad (3.25)$$

$$Q_{CB}^{Min} \leq Q_{CB,c}^{Rated} \leq Q_{CB}^{Max}; c = 1, 2, \dots, N_{CB} \quad (3.26)$$

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

2.3.1 Khởi tạo nghiệm ban đầu

Các nghiệm ban đầu được phát ra trong giới hạn xác định trước như phương trình (3.27 và 3.28). Mỗi nghiệm được tạo ra mới cần phải được đánh giá chất lượng bởi hàm đánh giá (3.29).

$$S^{Min} = [L_i^{Min}, P_i^{Min}, L_j^{Min}, P_j^{Min}, L_{BESS,k}^{Min}, P_{BESS,k,h}^{Min}, L_c^{Min}] \quad (3.27)$$

$$S^{Max} = [L_i^{Max}, P_i^{Max}, L_j^{Max}, P_j^{Max}, L_{BESS,k}^{Max}, P_{BESS,k,h}^{Max}, L_c^{Max}] \quad (3.28)$$

$$SF_{pk,ce} = TC_{Total,pk,ce} + \sigma_V \cdot \sum_{s=1}^{N_s} \Delta V_{s,pk,ce}^2 + \sigma_I \cdot \sum_{b=1}^{N_b} \Delta I_{b,pk,ce}^2 + \sigma_{THD} \cdot \sum_{s=1}^{N_s} \Delta THD_{s,pk,ce}^2 + \sigma_{IHD} \cdot \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{o=1}^{Hr} (\Delta IHD_{s,pk,ce}^o)^2 \quad (3.29)$$

Trong (3.29),

$$\Delta V_{s,pk,ce} = \begin{cases} V_{s,pk,ce} - V^{Max} & \text{nếu } V_{s,pk,ce} > V^{Max} \\ V^{Min} - V_{s,pk,ce} & \text{nếu } V_{s,pk,ce} < V^{Min} \\ 0 & \text{các trường hợp còn lại} \end{cases} \quad (3.30)$$

$$\Delta I_{b,pk,ce} = \begin{cases} I_{b,pk,ce} - I_b^{Max} & \text{nếu } I_{b,pk,ce} > I_b^{Max} \\ 0 & \text{các trường hợp khác} \end{cases} \quad (3.31)$$

$$\Delta THD_{s,pk,ce} = \begin{cases} THD_{s,pk,ce} - THD^{Max} & \text{nếu } THD_{s,pk,ce} > THD^{Max} \\ 0 & \text{các trường hợp khác} \end{cases} \quad (3.32)$$

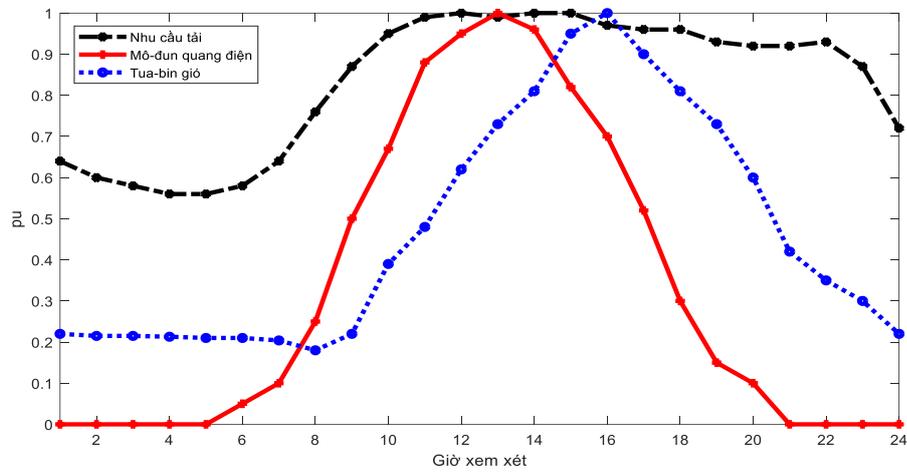
$$\Delta IHD_{s,pk,ce}^o = \begin{cases} IHD_{s,pk,ce}^o - IHD^{Max} & \text{nếu } IHD_{s,pk,ce}^o > IHD^{Max} \\ 0 & \text{các trường hợp khác} \end{cases} \quad (3.33)$$

2.4 Kết quả mô phỏng

2.4.1 Hệ thống thực thi và dữ liệu mô phỏng

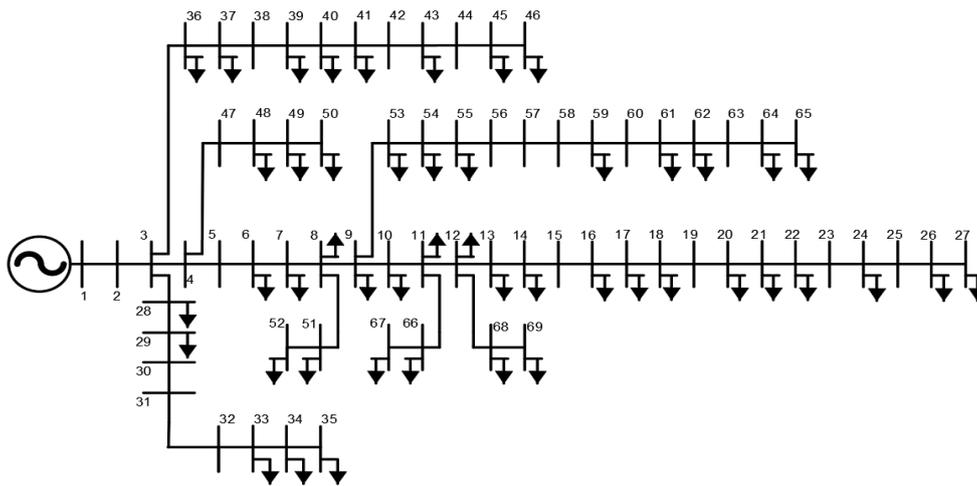
Bảng 3.1 Thông tin về các thông số liên quan đến việc tính toán tổng chi phí

Mục	Giá trị
Pr_h^{Grid} ở giờ cao điểm, tiêu chuẩn & thấp điểm [21]	128,9 \$/MWh, 70,0 \$/MWh & 45,4 \$/MWh
dc [14]	9 %
C_{PF}^{Cap} & $C_{PF}^{O\&M}$ [22]	770000 \$/MW & 10,0 \$/MWh
C_{WF}^{Cap} & $C_{WF}^{O\&M}$ [23]	1882000 \$/MW & 10,0 \$/MWh
C_{CB}^{Cap} & Loc_{CB} [24]	20000 \$/MVA & 1000 \$/vị trí
C_{BESS}^{Cap} ; $C_{BESS}^{O\&M}$ & C_{BESS}^{Aux} [25]	200000 \$/MW; 7000 \$/MWnăm & 380000 \$/MW



Hình 3.1 Hệ số công suất của mô-đun quang điện, tua-bin gió và tải

Nghiên cứu được thực hiện sự tích hợp 3 PFs và 3 WFs trên lưới điện phân phối chuẩn IEEE 69 nút. Lưới gồm có 69 nút và 48 tải với tổng nhu cầu tiêu thụ là 3,802 MW/ 2,694 MVar. Dữ liệu về tải và đường dây được miêu tả trong nghiên cứu [27]. Thông số về sóng hài được miêu tả trong nghiên cứu [28].



Hình 3.2 Hệ thống phân phối chuẩn IEEE 69 nút

4.4.2 Phân tích kết quả mô phỏng

Kết quả Bảng 3.2 đã cho thấy phương pháp MCOA có thể tìm ra giải pháp tối ưu và độ ổn định tốt hơn các phương pháp khác. Bên cạnh đó, giải pháp tốt nhất trong 40 lần chạy thử mà được báo cáo trong bảng 3.3 mang lại nhiều phúc lợi về kinh tế hơn khi có thể tiết kiệm lên tới 4,662 triệu \$ (tương đương 22,42%) như đã so sánh trong Bảng 3.4.

Bảng 3.2 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	16,723 triệu \$	16,562 triệu \$	16,501 triệu \$
Giá trị trung bình	16,521 triệu \$	16,314 triệu \$	16,271 triệu \$
Giá trị tốt nhất	16,356 triệu \$	16,148 triệu \$	16,130 triệu \$
Thời gian trung bình	4211 giây	4282 giây	4267 giây

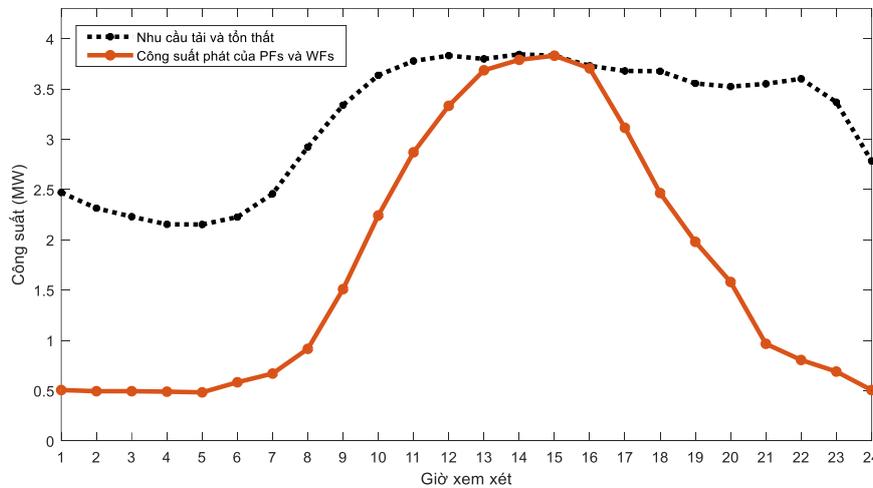
Bảng 3.3 Giải pháp tốt nhất của các phương pháp trong hệ thống IEEE 69 nút

P/P	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 MVar
COA	Nút: 63 – 2162 mô-đun Nút: 49 – 15386 mô-đun	Nút: 65 – 10 tua-bin Nút: 61 – 08 tua-bin	Nút: 28 – 0,793 MW/ 2,681 MWh	Nút: 59 – 1,11 MVar

	Nút: 53 – 8670 mô-đun	Nút: 21 – 05 tua-bin		
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 MVar

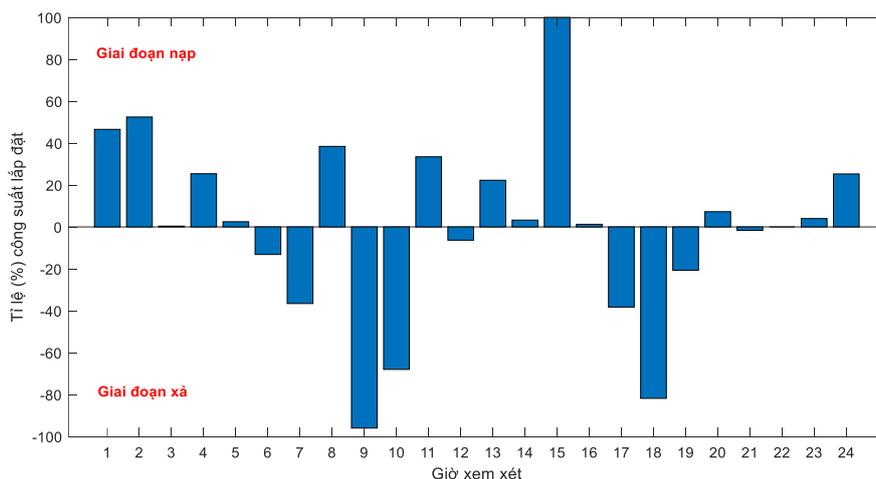
Bảng 3.4 So sánh các chi phí liên quan đến tổng chi phí trong hệ thống tích hợp trong 20 năm chu kỳ dự án

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
$TC_{WF-PVF-BESS-CB}^{Inv\&OM}$, 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

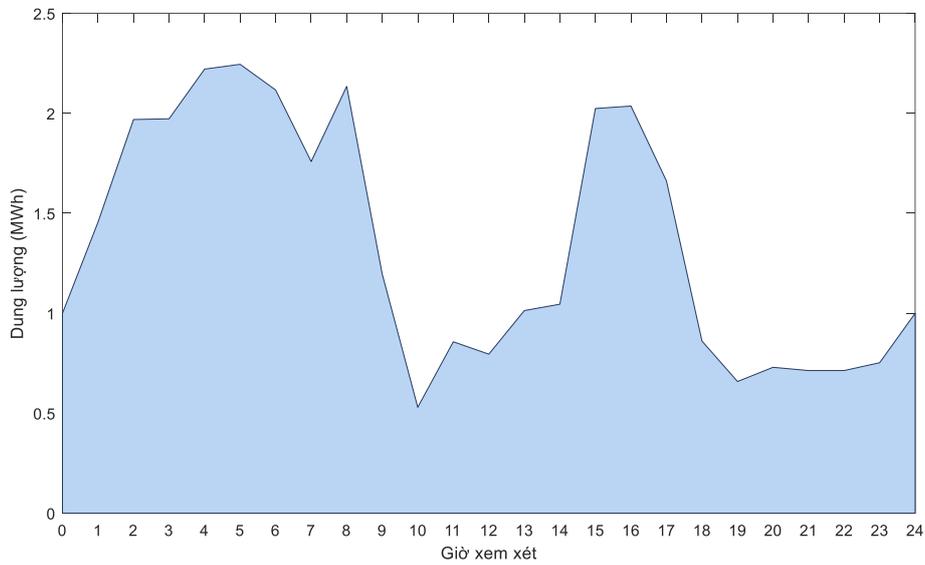


Hình 3.3 Công suất tiêu thụ và công suất phát năng lượng tái tạo

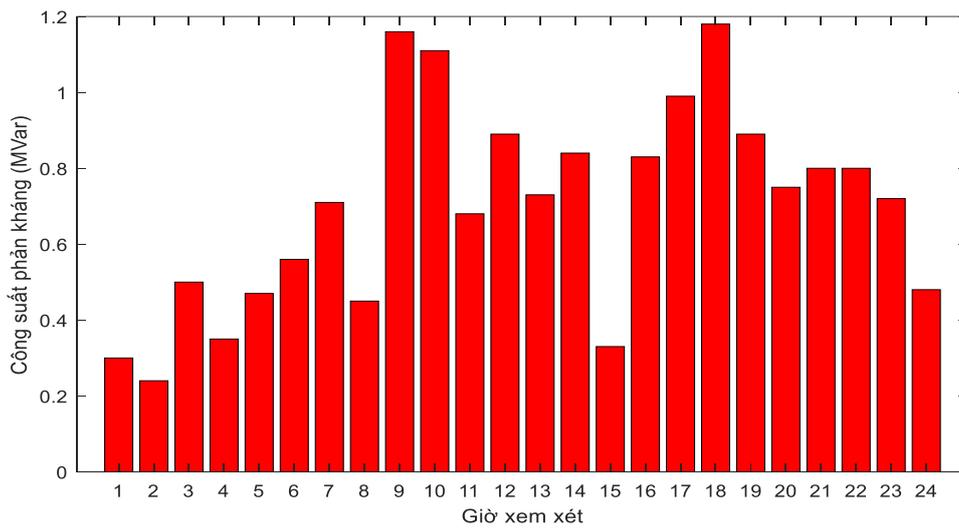
Bằng việc áp dụng giải pháp tối ưu toàn cục của MCOA, tổng mức độ xâm nhập bởi các nguồn phát năng lượng tái tạo lên tới 54,55% so với tổng nhu cầu tiêu thụ của hệ thống như Hình 3.3. Hình 3.4 và 3.5 thể hiện công suất phát mỗi giờ và dung lượng lưu trữ của BESS. Nhìn chung, BESS có xu hướng nạp năng lượng ở giờ thấp điểm và phát năng lượng ở giờ cao điểm nhằm tiết kiệm chi phí trong việc vận hành lưới. Bên cạnh đó, để giữ hệ số công suất không bé hơn 0,9 thì tụ bù phát ra lượng công suất phản kháng lên lưới theo mỗi thời điểm như hình 3.6.



Hình 3.4 Các giai đoạn nạp và xả của BESS.

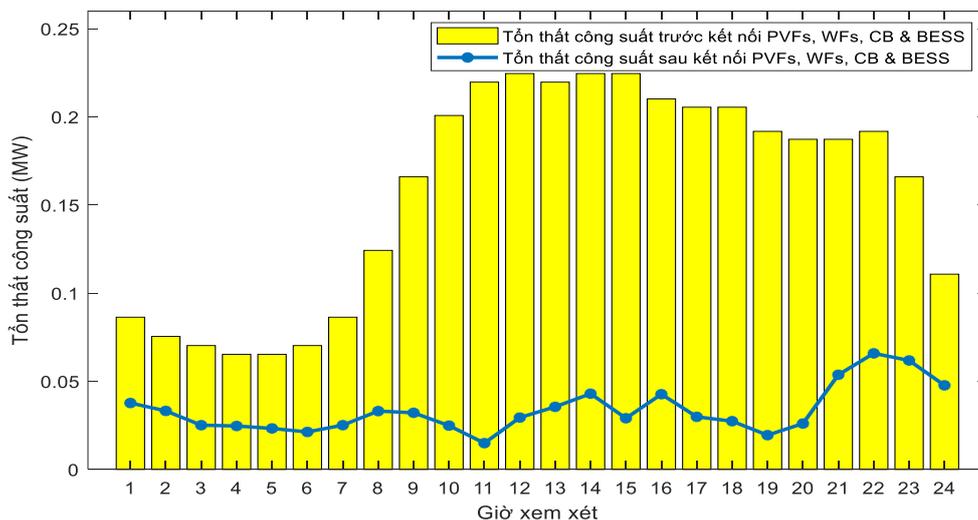


Hình 3.5 Dung lượng lưu trữ theo thời gian BESS.

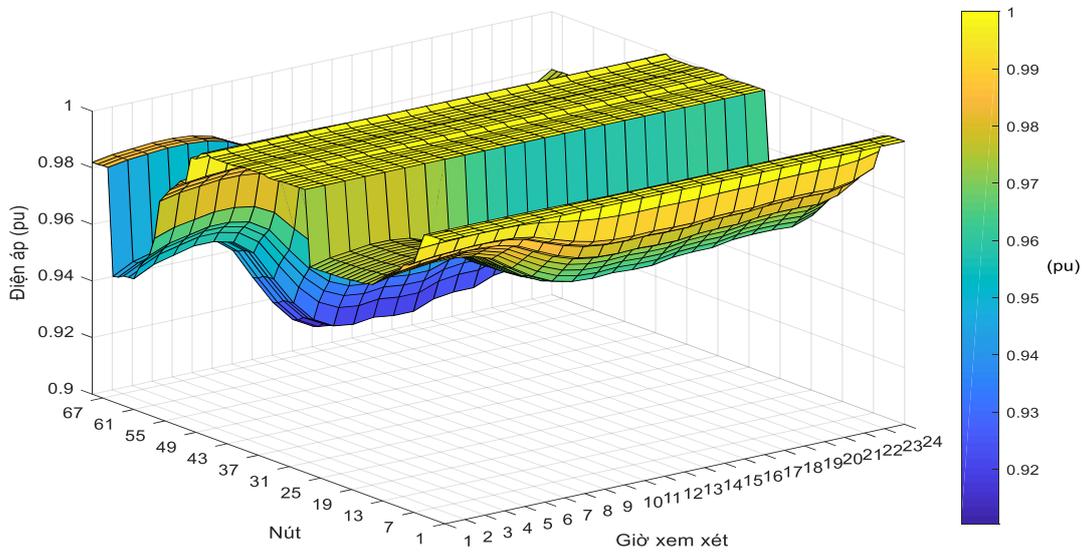


Hình 3.6 Sự phát công suất phản kháng của tụ bù.

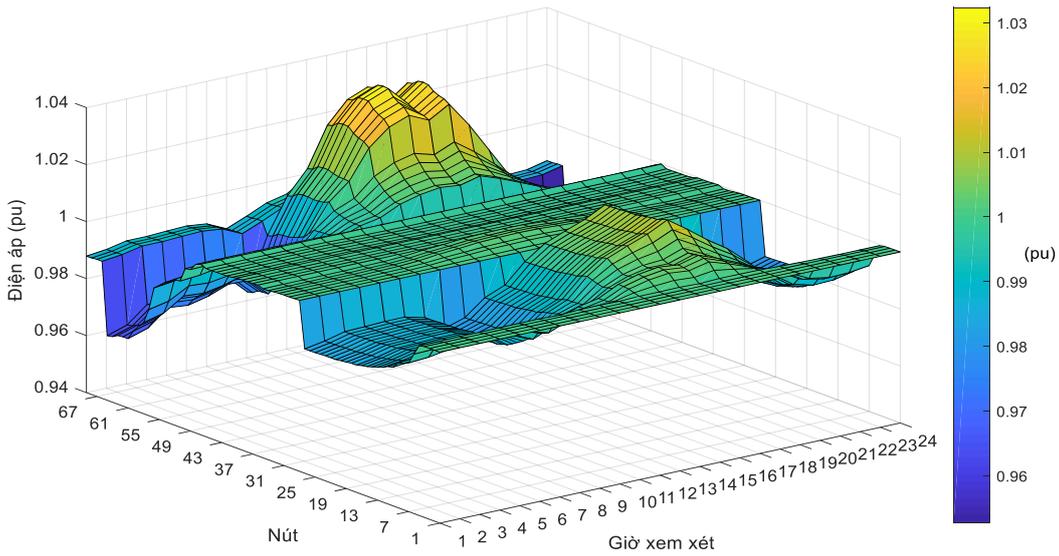
Thêm vào đó, sau khi tích hợp các nguồn phát phân tán thì tổng tổn thất công suất cũng giảm đáng kể lên tới 78,692% so với hệ thống ban đầu như Hình 3.7 trình bày. Điện áp cũng được cải thiện một cách rõ rệt từ vùng [0,911 1,00] (pu) lên tới [0,950 1,032] (pu) và hoàn toàn thỏa mãn ràng buộc như hình 4.8 và 4.9. Ngoài ra, các giá trị liên quan sóng hài *THD* và *IHD* cũng được giảm thiểu với giá trị lớn nhất từ 5,265% và 3,403% về 4,499% và 2,908% sau tích hợp. Như vậy các chỉ số về sóng hài cũng đã thỏa tiêu chuẩn IEEE Std. 519.



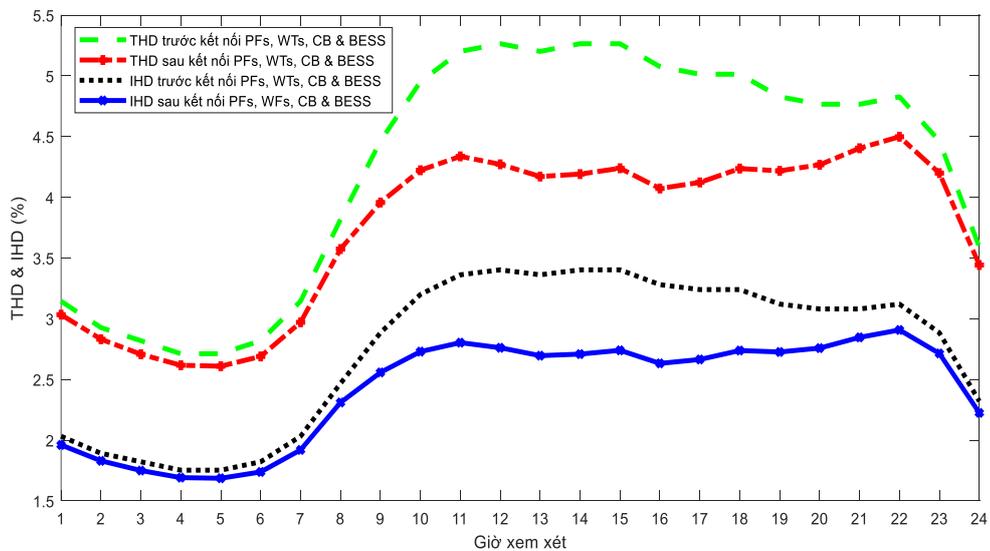
Hình 3.7 Tổn thất công suất trước và sau khi tích hợp các nguồn phát phân tán



Hình 3.8 Điện áp nút trước khi tích hợp các nguồn phát phân tán



Hình 3.9 Điện áp nút sau khi tích hợp các nguồn phát phân tán



Hình 3.10 Giá trị lớn nhất của THD và IHD trước và sau khi tích hợp các nguồn phát phân tán

2.5 Tổng kết

- Nghiên cứu này đã thành công trong việc xác định vị trí và quy mô của các nguồn phát điện PFs, WFs, CB và BESS trong lưới điện chuẩn IEEE 69 nút với sự xâm 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 mua năng lượng từ lưới cho phụ tải và tổn thất trên các nhánh phân phối. 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 xâm nhập của các nguồn phát.

- Nghiên cứu này đã giới thiệu một thuật toán mới gọi là MCOA để giải quyết bài toán tối ưu sự kết nối các nguồn phát phân tán. Kết quả thu được cho thấy MCOA tốt hơn các phương pháp so sánh khác với cùng mục tiêu và các ràng buộc.

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 (MCOA) cho việc xác định vị trí và công suất lắp đặt tối ưu cho các nguồn phát điện phân tán trong lưới phân phối ba pha không cân bằng nhằm giảm thiểu tổng chi phí trong việc đầu tư, vận hành và bảo trì hệ thống. Trong chương này, nghiên cứu áp dụng thuật toán đề xuất để giải quyết hai bài toán trên hai kiểu của 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.

4.2 Mô tả bài toán thứ nhất

4.2.1 Hàm mục tiêu

$$\text{Giảm tối đa } TC_{Total} = TC_{Inv} + TC_{OM} + TC_{Grid} + TC_{Emis} (\$) \quad (4.1)$$

Trong đó, các thành phần của hàm mục tiêu được định nghĩa như sau:

$$TC_{Inv} = C_{PF}^{Cap} \cdot P_{PF}^{Rated} + C_{WF}^{Cap} \cdot P_{WF}^{Rated} (\$) \quad (4.2)$$

$$TC_{OM} = 30,4167 \cdot \sum_{y=1}^{20} \sum_{h=1}^{288} \theta_y \cdot (C_{PF}^{O\&M} \cdot P_{PF,h,y} + C_{WF}^{O\&M} \cdot P_{WF,h,y}) (\$) \quad (4.3)$$

$$TC_{Grid} = 30,4167 \cdot \sum_{y=1}^{20} \sum_{h=1}^{288} \theta_y \cdot (Pr_{h,y}^{Grid} \cdot P_{Sub,h,y}) (\$) \quad (4.4)$$

$$TC_{Emis} = 30,4167 \cdot \sum_{y=1}^{20} \sum_{h=1}^{288} \theta_y \cdot (Pr_{Emis} \cdot G_{Emis} \cdot P_{Sub,h,y}) (\$) \quad (4.5)$$

4.2.2 Các ràng buộc

4.2.2.1 Ràng buộc về cân bằng công suất

$$P_{Sub,h,y} + \sum_{i=1}^{N_{WF}} P_{WF,i,h,y} + \sum_{j=1}^{N_{PF}} P_{PF,j,h,y} = \sum_{d=1}^{N_d} P_{d,h,y} + \sum_{b=1}^{N_b} P_{b,h,y} \quad (4.6)$$

$$Q_{Sub,h,y} + \sum_{i=1}^{N_{WF}} Q_{WF,i,h,y} + \sum_{j=1}^{N_{PF}} Q_{PF,j,h,y} = \sum_{d=1}^{N_d} Q_{d,h,y} + \sum_{b=1}^{N_b} Q_{b,h,y} \quad (4.7)$$

4.2.2.2 Giới hạn về dòng điện nhánh

$$I_b^{Max} \geq I_b^p; b = 1,2 \dots, N_b \& p = 1,2 \dots, N_p \quad (4.8)$$

4.2.2.3 Giới hạn về điện áp

$$V^{Min} \leq |V_s^p| \leq V^{Max}, s = 1,2 \dots, N_s \& p = 1,2 \dots, N_p \quad (4.9)$$

4.2.2.4 Giới hạn về độ lệch điện áp không cân bằng

$$UV_{dev,s}(\%) \leq UVD_{Std}^{Max}(\%) \quad (4.10)$$

$$\text{Trong đó } UV_{dev,s}(\%) = 100 \times \frac{V_{dif,s}^{Max}}{V_{un,s}^{Mean}}, s = 1,2 \dots, N_s \quad (4.11)$$

Việc tính toán $V_{un,s}^{Mean}$ và $V_{dif,s}^{Max}$ có thể được trình bày như sau:

$$V_{un,s}^{Mean} = \frac{V_s^1 + V_s^2 + V_s^3}{3}, s = 1, \dots, N_s \quad (4.12)$$

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.

$$V_{un,s}^{\Delta A} = |V_{un,s}^{Mean} - V_s^1|, s = 1, \dots, N_s \quad (4.13)$$

$$V_{un,s}^{\Delta B} = |V_{un,s}^{Mean} - V_s^2|, s = 1, \dots, N_s \quad (4.14)$$

$$V_{un,s}^{\Delta C} = |V_{un,s}^{Mean} - V_s^3|, s = 1, \dots, N_s \quad (4.15)$$

$$V_{dif,s}^{Max} = \max [V_{un,s}^{\Delta A}, V_{un,s}^{\Delta B}, V_{un,s}^{\Delta C}], s = 1, \dots, N_s \quad (4.16)$$

4.2.2.5 Giới hạn về nhiễu sóng hài

$$THD^{Max}(\%) \geq THD_{s,h,y}(\%) \quad (4.17)$$

$$IHD^{Max}(\%) \geq IHD_{s,h,y}^o(\%) \quad (4.18)$$

4.2.2.6 Ràng buộc về sự thuyên giảm về tổn thất

$$\sum_{b=1}^{N_b} P_{b,h,y}^{Bef} > \sum_{b=1}^{N_b} P_{b,h,y}^{Aft} \quad (4.19)$$

$$\sum_{b=1}^{N_b} Q_{b,h,y}^{Bef} > \sum_{b=1}^{N_b} Q_{b,h,y}^{Aft} \quad (4.20)$$

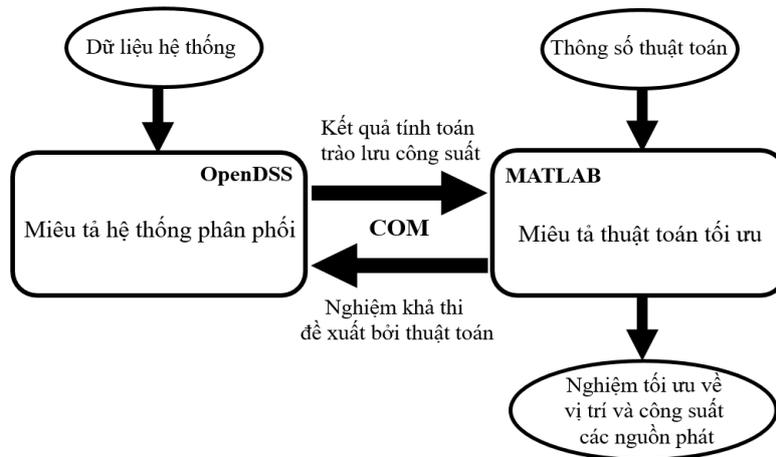
4.2.2.7 Ràng buộc về giới hạn lắp đặt của các nguồn phát

$$P_{PF}^{Min} \leq P_{PF}^{Rated} \leq P_{PF}^{Max} \quad (4.21)$$

$$P_{WF}^{Min} \leq P_{WF}^{Rated} \leq P_{WF}^{Max} \quad (4.22)$$

$$P_{PF,h,y} + P_{WF,h,y} \leq \sum_{d=1}^{N_d} P_{d,h,y} + \sum_{b=1}^{N_b} P_{b,h,y}^{Aft} \quad (4.23)$$

4.2.3 Sử dụng phương pháp đề xuất để giải quyết vấn đề tối ưu

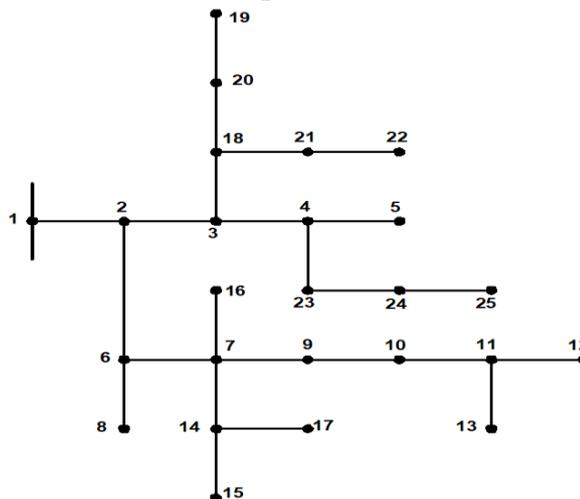


Hình 4.1 Sự phối hợp mô phỏng giữa OpenDSS và MATLAB thông qua COM

4.2.4 Kết quả mô phỏng

4.2.4.1 Hệ thống phân phối chuẩn IEEE 25 nút

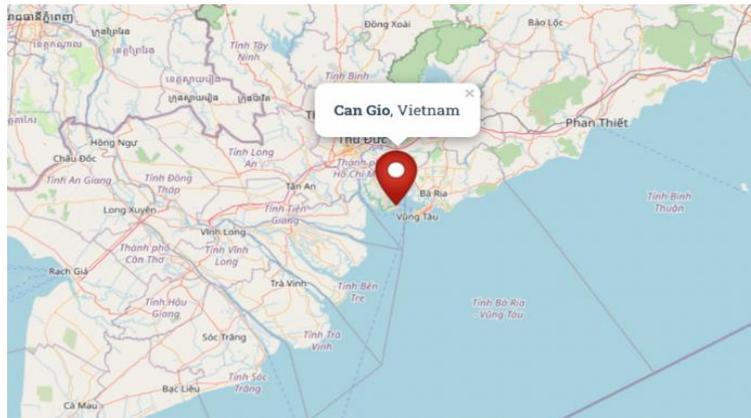
Trong nghiên cứu này, lưới điện phân phối chuẩn IEEE 25 nút mà đặc trưng cho loại hệ thống ba pha không cân bằng, được chọn để thực hiện mô phỏng. Hệ thống này hoạt động ở điện áp 4,16 kV với nhu cầu phụ tải là 3,3466 MW/ 2,5267 MVar. Hệ thống gồm có tất cả 25 nút, 24 nhánh và 22 phụ tải. Dữ liệu chi tiết được miêu tả trong nghiên cứu [29].



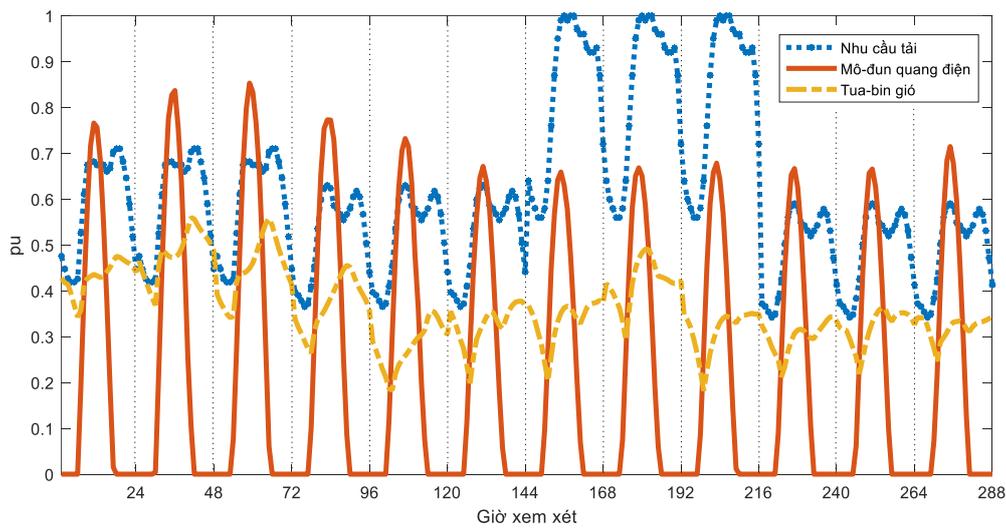
Hình 4.2 Sơ đồ đơn tuyến lưới điện phân phối chuẩn IEEE 25 nút.

4.2.4.2 Dữ liệu mô phỏng

Nghiên cứu xác định giải pháp tích hợp tối ưu cho các nguồn phát năng lượng mặt trời và năng lượng gió ở huyện Cần Giờ, Tp. Hồ Chí Minh. Dữ liệu trong ba năm (2019-2021) được thu thập và 288 điểm dữ liệu được sử dụng để hiển thị 12 tháng trong 1 năm (24 giờ trong ngày tương ứng cho một tháng). Nghiên cứu xem xét sự phát sóng hài từ tải phi tuyến và thiết bị chuyển đổi công suất với phổ hài như Bảng 4.1. Các thông số cho hàm chi phí như Bảng 3.1 trình bày.



Hình 4.3 Khu vực khảo sát thực hiện nghiên cứu (Cần Giờ, Việt Nam)



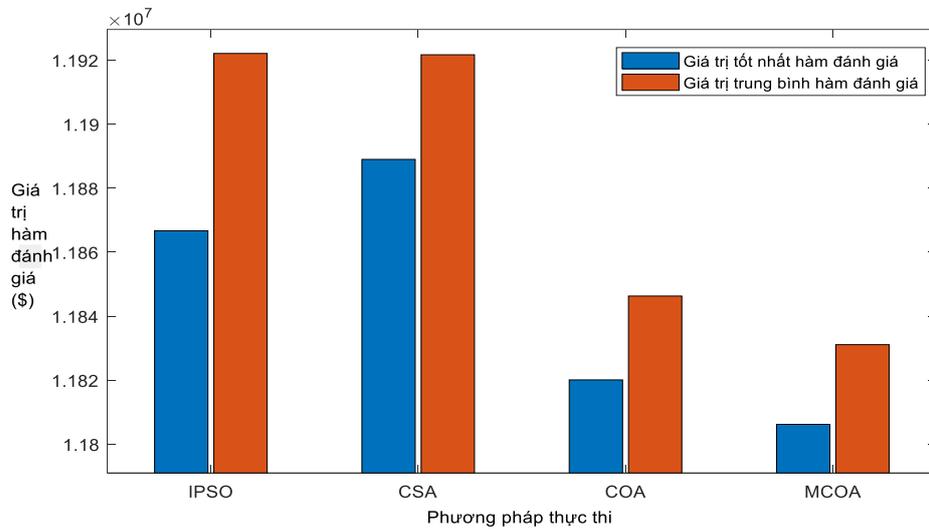
Hình 4.4 Hệ số công suất của các nguồn phát và nhu cầu tải

Bảng 4.1 Phổ hài của tải phi tuyến và các inverters của các nguồn phát năng lượng tái tạo [30].

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
Inverters	Biên độ (%) cho inverters 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 Phân tích kết quả mô phỏng

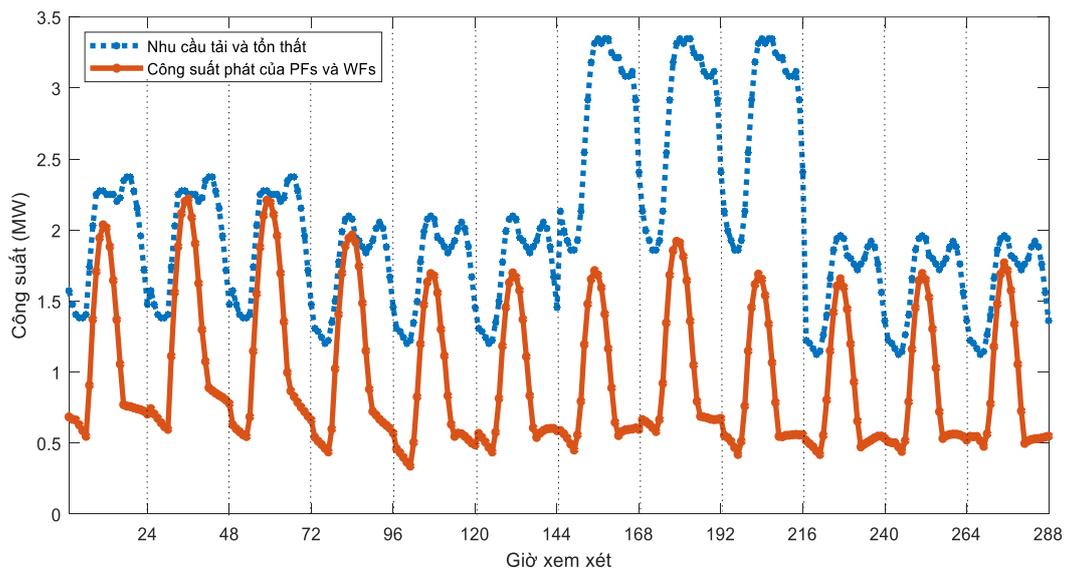
Trong nghiên cứu này, MCOA là phương pháp tốt nhất và ổn định nhất so với các phương pháp khác như Hình 4.5 đã so sánh. Giải pháp từ MCOA có thể tiết kiệm tổng chi phí tới 10,69% so với hệ thống ban đầu và bên cạnh đó, MCOA cũng mang lại nhiều điểm mạnh về kinh tế hơn so với COA, CSA và IPSO giống như Bảng 4.2 đã trình bày.



Hình 4.5 Giá trị tốt nhất và giá trị trung bình hàm mục tiêu trong các lần chạy thử

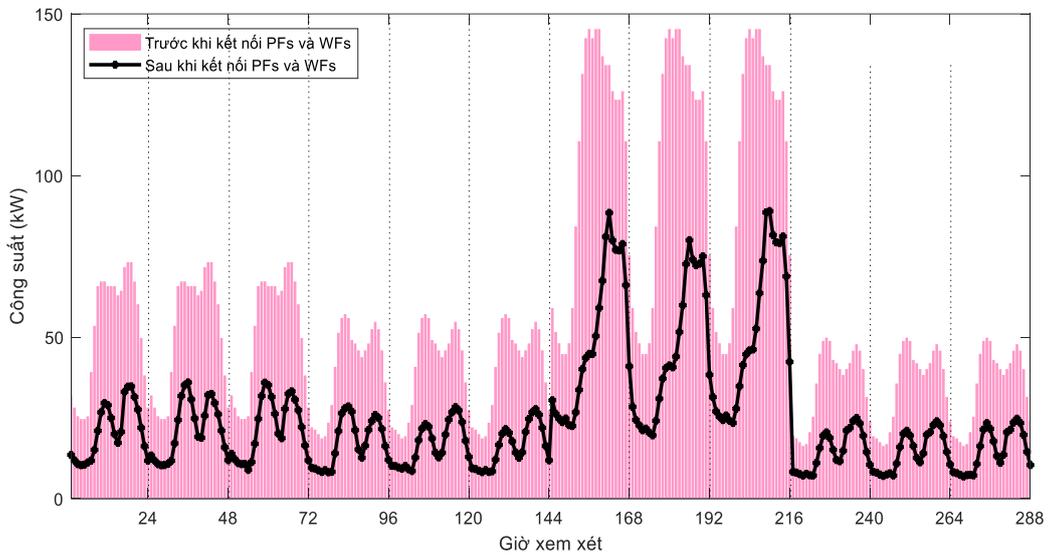
Bảng 4.2 Kết quả tốt nhất trong các lần chạy thử ngẫu nhiên cho bài toán tối ưu.

Phương pháp	Giải pháp tối ưu	TC_{Inv} (triệu \$)	TC_{OM} (triệu \$)	TC_{Grid} (triệu \$)	TC_{Emis} (triệu \$)	$TC_{TotalCosts}$ (triệu \$)
	PFs & WFs					
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

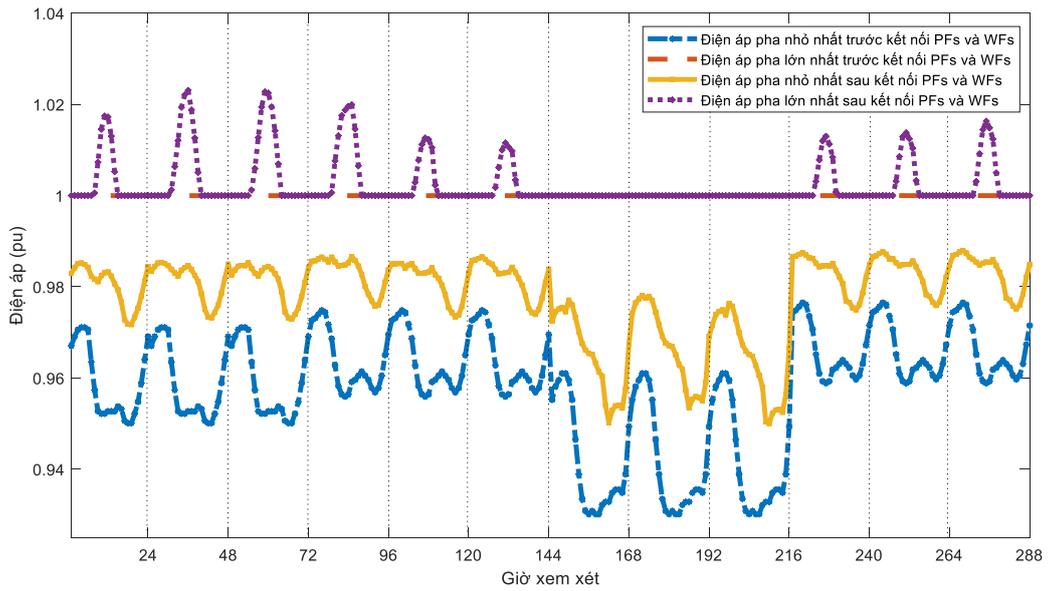


Hình 4.6 Tổng công suất tiêu thụ và công suất phát theo thời gian

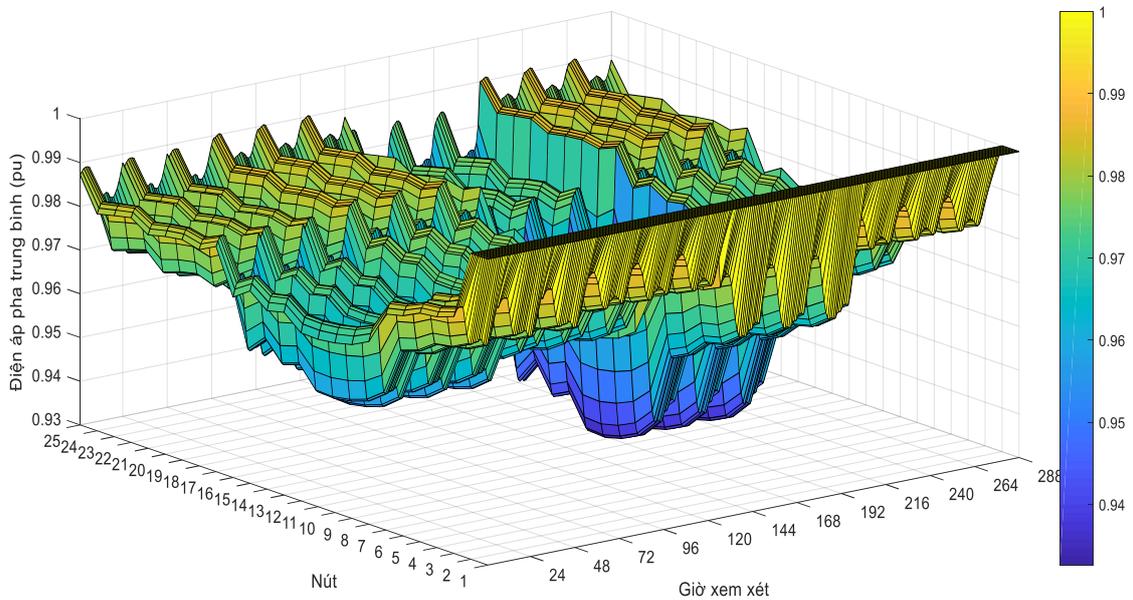
Bằng việc áp dụng giải pháp từ MCOA, tổng công suất phát chiếm tới 47,42% so với tổng nhu cầu của lưới như Hình 4.6. Bên cạnh đó, tổn thất công suất cũng giảm một cách đáng kể lên tới 56,23% so với hệ thống ban đầu như Hình 4.7. Hơn nữa, điện áp pha cũng được cải thiện từ vùng [0,93 1,00] (pu) lên [0,950 1,023] (pu) như Hình 4.8 đã trình bày. Điện áp trung bình cũng được nâng cao từ [0,93 1,00] (pu) như Hình 4.9 lên [0,952 1,022] (pu) như Hình 4.10, và đã thỏa mãn ràng buộc ban đầu.



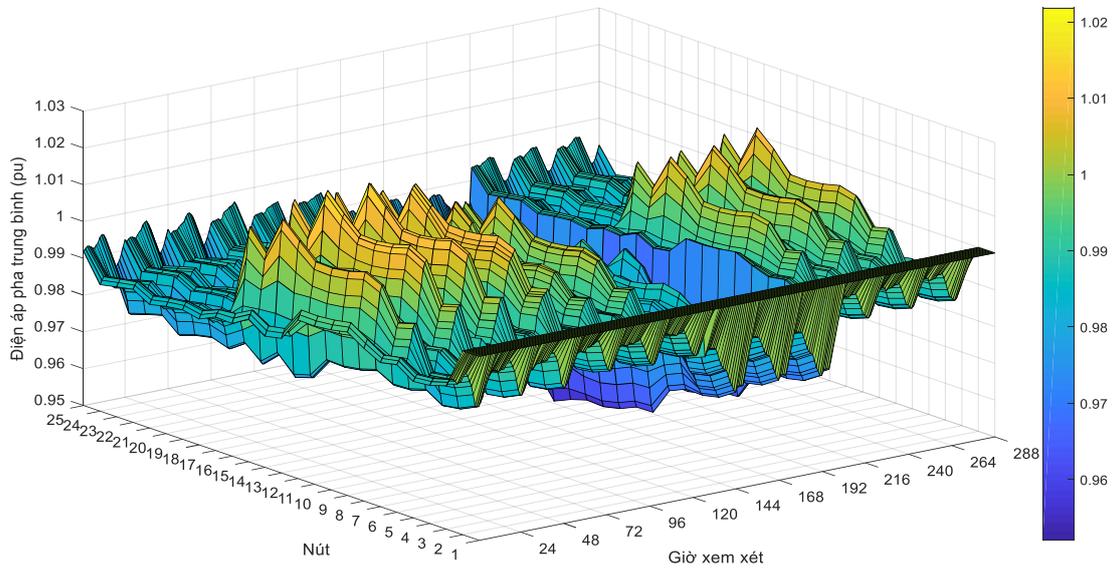
Hình 4.7 Tổng tổn thất công suất trước và sau khi tích hợp DGs.



Hình 4.8 Điện áp pha lớn nhất và bé nhất trước và sau khi có sự kết nối DGs.

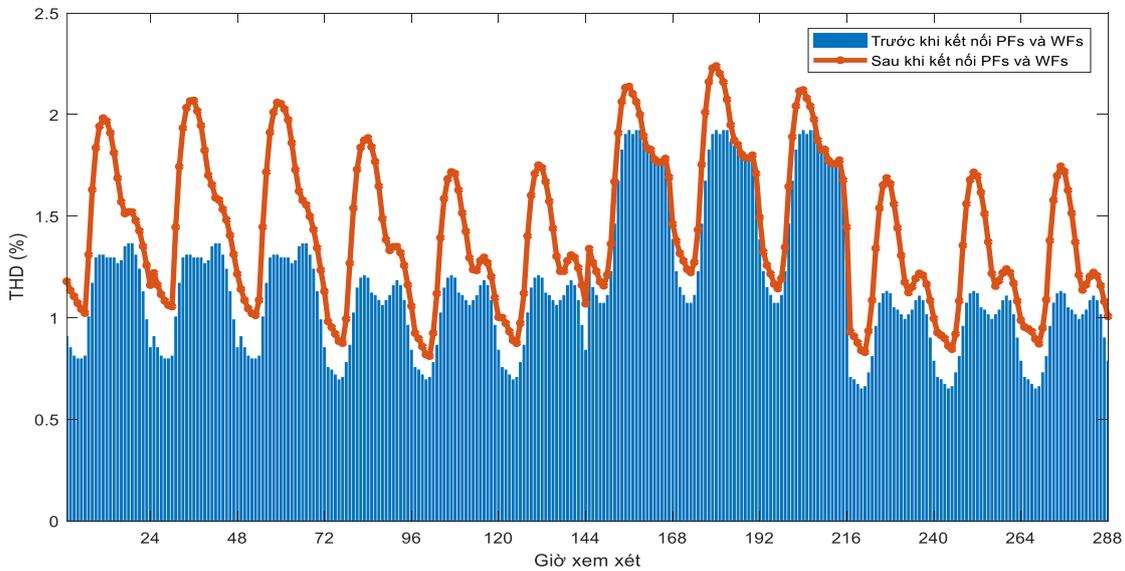


Hình 4.9 Điện áp pha trung bình trước khi có sự kết nối PFs and WFs

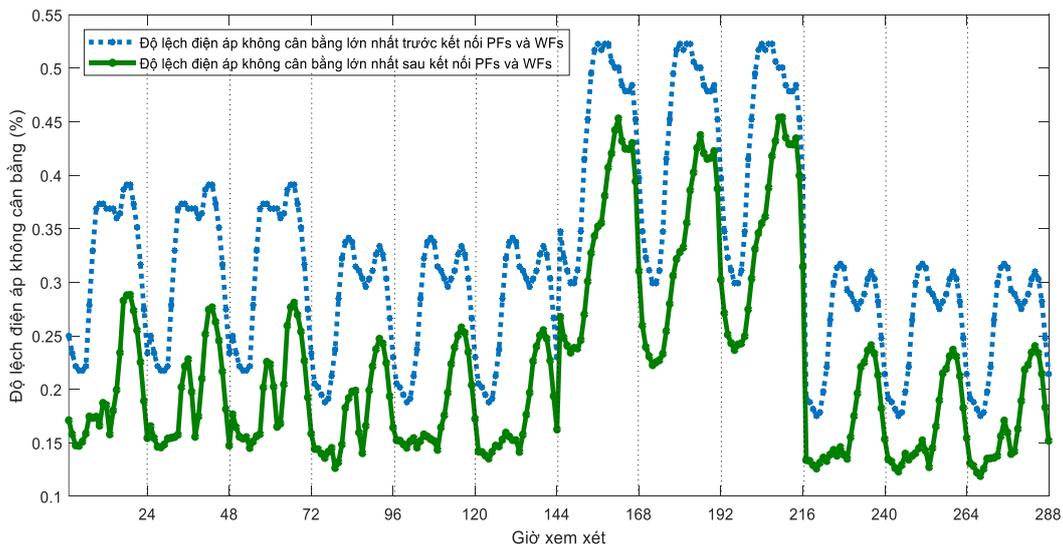


Hình 4.10 Điện áp pha trung bình sau khi có sự kết nối PFs and WFs

Giống như đã đề cập, nghiên cứu này xem xét độ lệch điện áp giữa các pha trong cùng một nút trong hệ thống phân phối không cân bằng. Giống như Hình 4.11 đã trình bày, chỉ số độ lệch điện áp không cân bằng cũng tốt hơn thông qua việc giảm từ 0,523% đối hệ thống ban đầu xuống còn 0,454% đối hệ thống đã được tích hợp các nguồn phát phân tán và đã đáp ứng IEEE Std. 45-2002. Không chỉ vậy, như Hình 4.12 đã thể hiện, chỉ số liên quan sóng hài *THD* cũng thỏa mãn IEEE Std. 519 và 30/2019/TT-BTC với giá trị *THD* lớn nhất là 2,24% sau tích hợp.



Hình 4.11 Giá trị lớn nhất *THD* trước và sau kết nối các PFs và WFs



Hình 4.12 Độ lệch điện áp không cân bằng lớn nhất trước và sau khi kết nối PFs và WFs

4.2.4.4 Tổng kết

- Nghiên cứu đã thành công trong việc áp dụng MCOA để xác định giải pháp tối ưu về vị trí và công suất phát của các nguồn phát điện phân tán tua-bin gió và năng lượng mặt trời trong lưới điện phân phối chuẩn không cân bằng IEEE 25 nút với sự xâm 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 các 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. 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.
- Nghiên cứu cũng đã phát triển thành công công cụ phối hợp mô phỏng giữa OpenDSS và MATLAB trong việc giải quyết các bài toán tối ưu khác nhau trong hệ thống phân phối một cách thuận lợi và nhanh chóng.

4.3 Mô tả bài toán thứ hai

4.3.1 Hàm mục tiêu

$$\text{Giảm tối đa } TC_{Total} = TC_{WF-PF-BESS}^{Inv\&OM} + TC_{Grid}(\$) \quad (4.24)$$

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

$$TC_{WF-PF-BESS}^{Inv\&OM} = TC_{WF} + TC_{PF} + TC_{BESS}(\$) \quad (4.25)$$

$$\text{Trong (4.25), } TC_{WF} = \sum_{i=1}^{N_{WF}} (C_{WF}^{Cap} \cdot P_{WF,i}^{Rated}) + 91,25 \sum_{y=1}^{20} \sum_{h=1}^{96} \sum_{i=1}^{N_{WF}} (\theta_y \cdot C_{WF}^{O\&M} \cdot P_{WF,i,h,y}) (\$) \quad (4.26)$$

$$TC_{PF} = \sum_{j=1}^{N_{PF}} (C_{PF}^{Cap} \cdot P_{PF,j}^{Rated}) + 91,25 \sum_{y=1}^{20} \sum_{h=1}^{96} \sum_{j=1}^{N_{PF}} (\theta_y \cdot C_{PF}^{O\&M} \cdot P_{PF,j,h,y}) (\$) \quad (4.27)$$

$$TC_{BESS} = \sum_{k=1}^{N_{BESS}} (C_{BESS}^{Cap} \cdot E_{BESS,k}^{Rated}) + \sum_{k=1}^{N_{BESS}} (C_{BESS}^{Aux} \cdot P_{BESS,k}^{Rated}) + \sum_{y=1}^{20} \sum_{k=1}^{N_{BESS}} (\theta_y \cdot C_{BESS}^{O\&M} \cdot E_{BESS,k,y}^{Rated}) (\$) \quad (4.28)$$

4.3.1.2 Chi phí phát điện từ lưới điện chính

$$TC_{Grid} = 91,25 \sum_{y=1}^{20} \sum_{h=1}^{96} (\theta_y \cdot Pr_{h,y}^{Grid} \cdot P_{Sub,h,y}) (\$) \quad (4.29)$$

4.3.2 Ràng buộc

4.3.2.1 Ràng buộc về cân bằng công suất

$$P_{Sub,h,y} + \sum_{i=1}^{N_{WF}} P_{WF,i,h,y} + \sum_{j=1}^{N_{PF}} P_{PF,j,h,y} = \sum_{b=1}^{N_b} P_{b,h,y}^{Aft} + \sum_{d=1}^{N_d} P_{d,h,y} + \sum_{k=1}^{N_{BESS}} P_{BESS,k,h,y}^{Ch} \quad (4.30)$$

$$P_{Sub,h,y} + \sum_{i=1}^{N_{WF}} P_{WF,i,h,y} + \sum_{j=1}^{N_{PVF}} P_{PVF,j,h,y} + \sum_{k=1}^{N_{BESS}} P_{BESS,k,h,y}^{DisCh} = \sum_{b=1}^{N_b} P_{b,h,y}^{Aft} + \sum_{d=1}^{N_d} P_{d,h,y} \quad (4.31)$$

$$Q_{Sub,h,y} + \sum_{i=1}^{N_{WF}} Q_{WF,i,h,y} + \sum_{j=1}^{N_{PF}} Q_{PF,j,h,y} = \sum_{b=1}^{N_b} Q_{b,h,y}^{Aft} + \sum_{d=1}^{N_d} Q_{d,h,y} \quad (4.32)$$

4.3.2.2 Giới hạn về dòng điện nhánh

$$I_b^{Max} \geq I_{b,p}; \quad b = 1, 2, \dots, N_b \& p = 1, 2, \dots, N_p \quad (4.33)$$

4.3.2.3 Giới hạn về điện áp pha

$$V^{Max} \geq V_{s,h,y}^p \geq V^{Min}, \quad s = 1, 2, \dots, N_b \& p = 1, 2, \dots, N_p \quad (4.34)$$

4.3.2.4 Ràng buộc về công suất nạp và xả của BESS

$$0 \leq P_{BESS,k,h}^{Ch} \leq \epsilon^{Ch} \cdot P_{BESS}^{Rated}; \quad h = 1, 2, \dots, 96 \& k=1, 2, \dots, N_{BESS} \quad (4.35)$$

$$0 \geq P_{BESS,k,h}^{DisCh} \geq -P_{BESS}^{Rated} \cdot \epsilon^{DisCh}; \quad h = 1, 2, \dots, 96 \& k=1, 2, \dots, N_{BESS} \quad (4.36)$$

4.3.2.5 Giới hạn về sóng hài

$$THD^{Max} \geq THD_{s,h,y}; \quad s=1, 2, \dots, N_b \quad (4.37)$$

$$IHD^{Max} \geq IHD_{s,h,y}^{Hr}; \quad s=1, 2, \dots, N_b \quad (4.38)$$

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

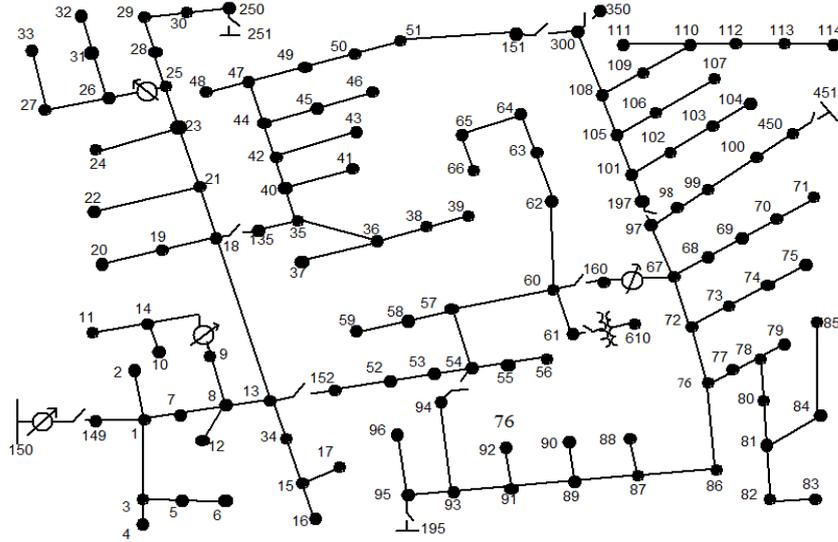
$$P_{WF}^{Max} \geq P_{WF,i}^{Rated} \geq P_{WF}^{Min}; \quad i = 1, 2, \dots, N_{WF} \quad (4.39)$$

$$P_{PF}^{Max} \geq P_{PF,j}^{Rated} \geq P_{PF}^{Min}; j = 1, 2, \dots, N_{PF} \quad (4.40)$$

$$E_{BESS}^{Min} \leq E_{BESS,h} \leq E_{BESS}^{Max}, h = 1, 2, \dots, 96 \quad (4.41)$$

4.3.3 Kết quả mô phỏng

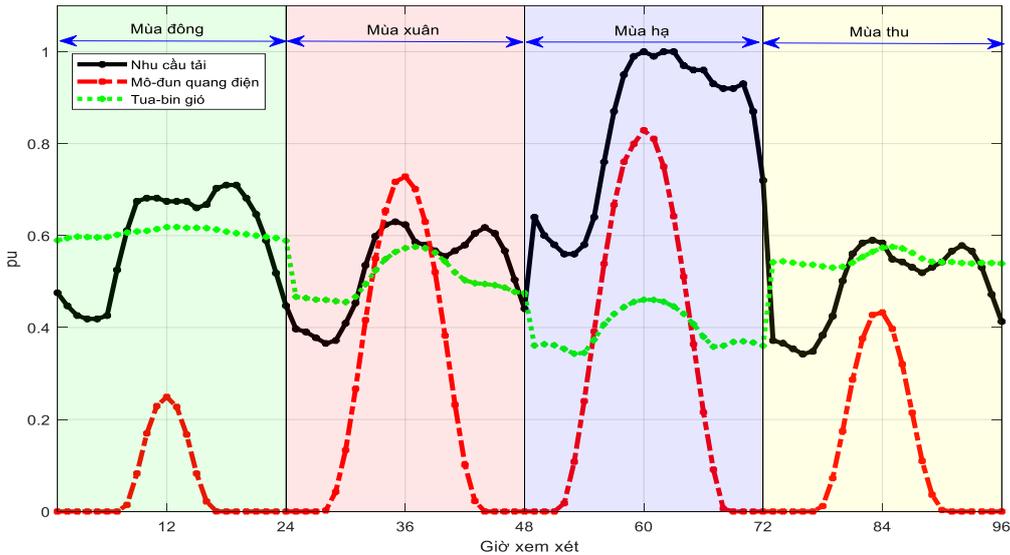
4.3.3.1 Hệ thống phân phối chuẩn IEEE 123 nút



Hình 4.13 Sơ đồ đơn tuyến hệ thống phân phối chuẩn IEEE 123 nút

Nghiên cứu này xác định vị trí và công suất của WFs, PFs và BESS một cách tối ưu trong việc tích hợp vào hệ thống phân phối phức tạp IEEE 123 nút. Đây là hệ thống ba pha không cân bằng hoạt động ở điện áp 4,16 kV với nhiều thiết bị đã nối lưới như tụ điện, khóa mở và bộ điều chỉnh điện áp. Thông số chi tiết được miêu tả trong nghiên cứu [31]. Thông tin liên quan đến tính toán hàm tổng chi phí ở Bảng 3.1 và phổ hài cho các nguồn phát sóng hài ở Bảng 4.1. Trong đó, giả định tải phi tuyến loại 1 ở các nút 32, 41, 70 và 95, và tải phi tuyến loại 2 ở các nút 12, 55, 84 và 111.

4.3.3.2 Dữ liệu mô phỏng và thông số điều khiển



Hình 4.14 Hệ số công suất của mô-đun quang điện, tua-bin gió và tải

4.3.3.3 Phân tích kết quả mô phỏng

Nghiệm tốt nhất từ các phương pháp thực thi được trình bày rõ ràng như trong Bảng 4.3. Theo như so sánh trong Bảng 4.4, nghiệm từ phương pháp đề xuất MCOA có thể tiết kiệm lên tới 1,9216 triệu \$ (tương đương 14,33%) so với hệ thống ban đầu. Không chỉ vậy, MCOA cũng tốt hơn các phương pháp khác trong cùng mục tiêu dưới các ràng buộc.

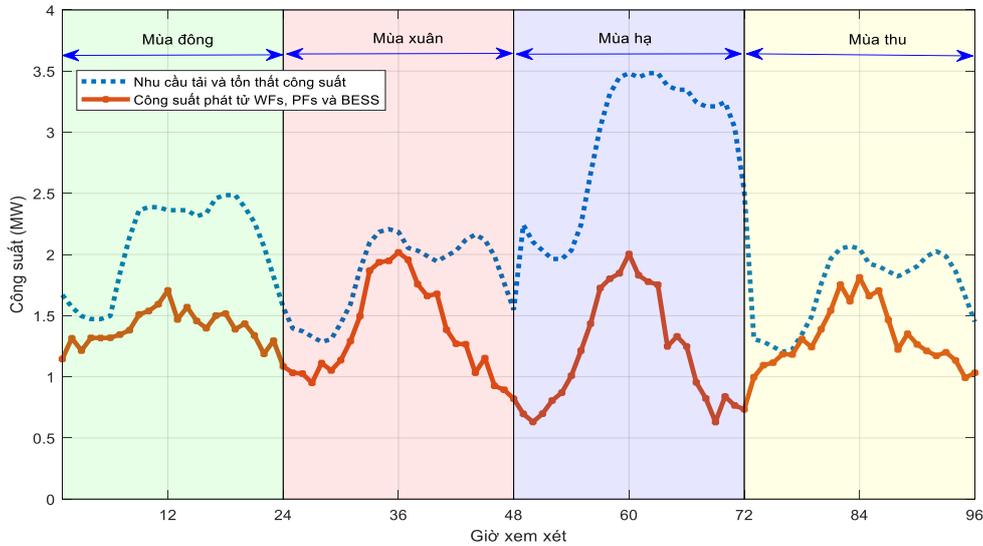
Bảng 4.3 Nghiệm tốt nhất của các phương pháp trong hệ thống IEEE 123 nút

P/P	WFs	PFs	BESS
SSA	Nút: 95 – 07 tua-bin – 3 pha	Nút: 55 – 3010 mô-đun – 3 pha	Nút: 108

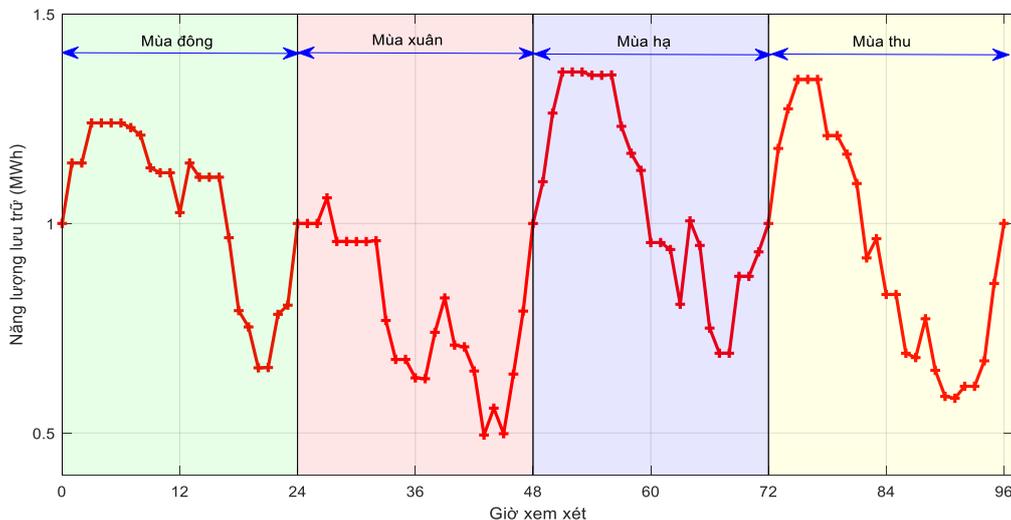
	Nút: 21 – 13 tua-bin – 3 pha	Nút: 59 – 8873 mô-đun – 1 pha	0,222 MW/ 1,889 MWh – 3 pha
COA	Nút: 15 – 15 tua-bin – 1 pha Nút: 34 – 07 tua-bin – 1 pha	Nút: 300 – 8901 mô-đun – 3 pha Nút: 94 – 6586 mô-đun – 1 pha	Nút: 300 0,444 MW/ 1,445 MWh – 3 pha
MCOA	Nút: 19 – 12 tua-bin – 1 pha Nút: 300 – 10 tua-bin – 3 pha	Nút: 53 – 3018 mô-đun – 3 pha Nút: 15 – 9747 mô-đun – 1 pha	Nút: 15 0,232 MW/ 1,513 MWh – 1 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
Ti lệ tiết kiệm (%)	-	12,61	14,10	14,33



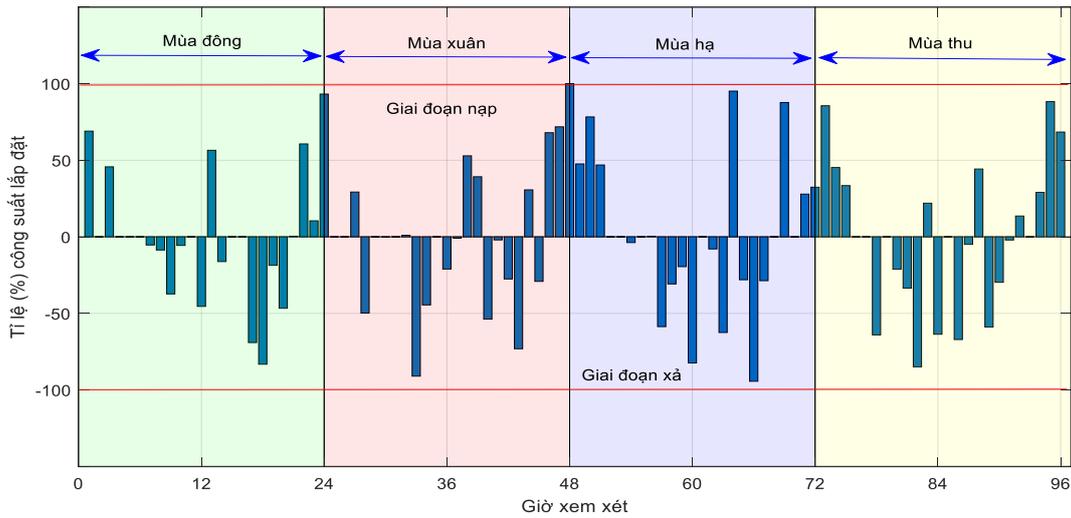
Hình 4.15 Công suất phát của WFs, PFs và BESS từ giải pháp của MCOA.



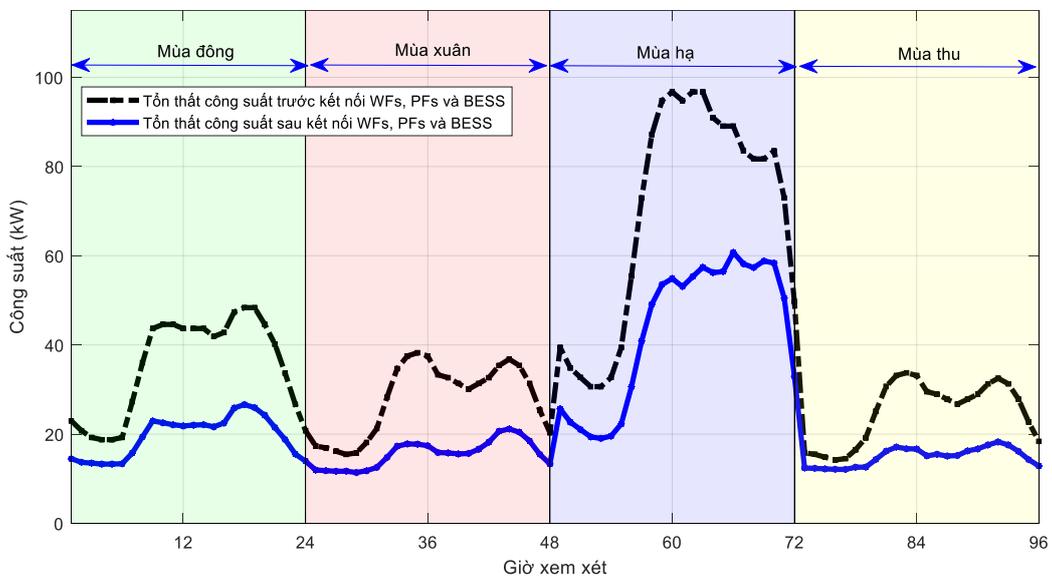
Hình 4.16 Quá trình lưu trữ năng lượng của BESS.

Nhờ giải pháp tối ưu từ MCOA, 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

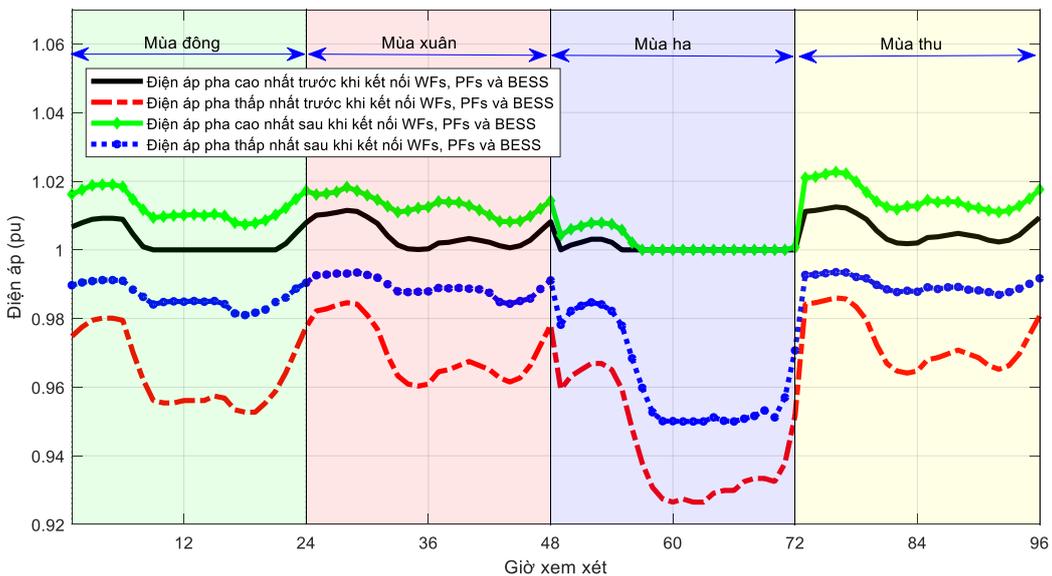
77,984 MW như Hình 4.15. Trong nghiên cứu này, chiến lược nạp/ xả năng lượng tới lưới của BESS cũng được trình bày như Hình 4.16 và 4.17. Nhìn chung, BESS có xu hướng phát ở giờ cao điểm và nạp ở giờ thấp điểm nhằm tiết kiệm chi phí mua điện. Tổng thất công suất cũng giảm mạnh lên tới 40,79% như hình 5.18 và điện áp cũng cải thiện từ [0,9265 1,0125] (pu) lên [0,950 1,0227] (pu) như Hình 4.19. Ngoài ra, giá trị *THD* cũng thỏa mãn tiêu chuẩn IEEE Std. 519 với giá trị lớn nhất là lên 2,987% như Hình 4.20.



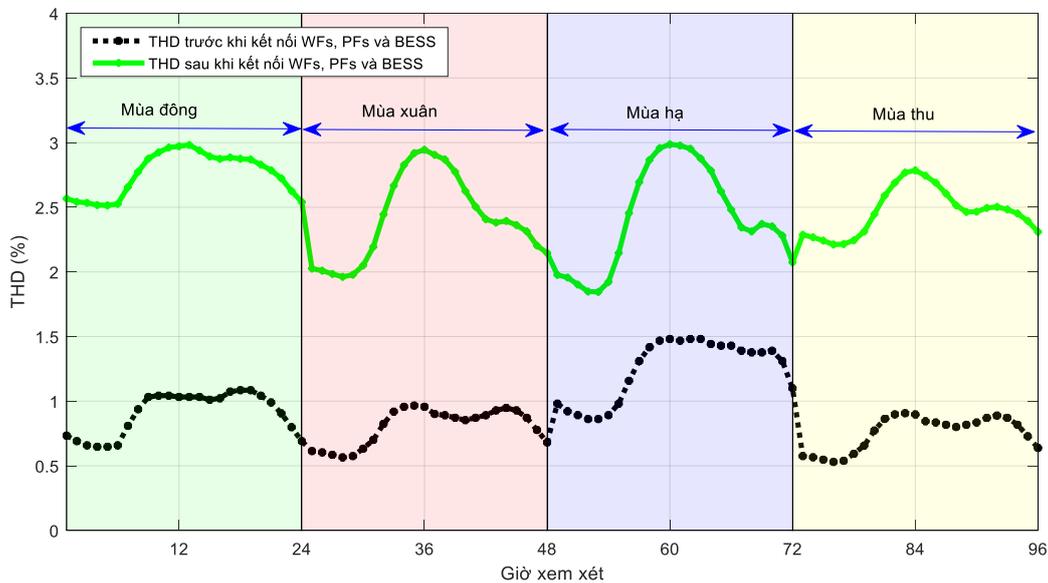
Hình 4.17 Quá trình nạp và xả năng lượng của BESS.



Hình 4.18 Tồn thất công suất trước và sau kết nối PFs, WFs và BESS.



Hình 4.19 Điện áp pha thấp và cao nhất trước và sau kết nối PFs, WFs và BESS ở mỗi thời điểm.



Hình 4.20 Giá trị lớn nhất *THD* ở mỗi giờ trước và sau kết nối PFs, WFs và BESS.

4.3.4 Tổng kết

- Nghiên cứu này đã thành công trong việc áp dụng phối hợp mô phỏng giữa OpenDSS và MATLAB cùng với thuật toán MCOA cho việc xác định sự lắp đặt tối ưu WFs, PFs và BESS cũng như là chiến lược nạp/ xả năng lượng của BESS trong hệ thống ba pha không cân bằng chuẩn IEEE 123 nút với sự xâm nhập nhiều tải phi tuyến.
- Mục tiêu chính là giảm thiểu tổng chi phí gồm đầu tư, vận hành và bảo trì, và chi phí mua năng lượng từ lưới cho nhu cầu tải và tổn thất trên các nhánh phân phối. Kết quả thu được chỉ ra tổng chi phí hệ thống có thể được cắt giảm một cách đáng kể thông qua việc tích hợp các nguồn phát phù hợp.

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

5.1 Đóng góp chính của nghiên cứu

- Luận án này giải quyết đa dạng các vấn đề tối ưu liên quan đến sự kết nối của các nguồn phát phân tán như WFs, PFs, CB và BESS. Mục tiêu của nghiên cứu là giảm thiểu tổng chi phí trong việc đầu tư, O&M cũng như giảm chi phí phát điện từ lưới chính và chi phí phát thải từ các nhà máy truyền thống mà vẫn thỏa mãn các ràng buộc 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, WFs và BESS nhằm thỏa mãn tiêu chuẩn IEEE Std. 519 và 30/2019/TT-BCT.
- Một thuật toán mạnh với độ ổn định cao mà gọi là Modified Coyote Optimization Algorithm cũng được phát triển và đề xuất cho việc giải quyết các bài toán tối ưu khác nhau.
- Một phần mềm nguồn mở được gọi là OpenDSS được đề xuất cho việc tính toán trào lưu công suất một cách nhanh chóng. Hơn nữa, sự phối hợp mô phỏng giữa hai phần mềm gồm OpenDSS và MATLAB cũng được xây dựng một cách thành công để giải quyết bài toán tối ưu một cách linh hoạt và thuận tiện.

5.2 Hạn chế của nghiên cứu:

- Hạn chế về tính thực tế và dữ liệu đầu vào: Nghiên cứu sử dụng mô hình hệ thống tương đương là ba lưới điện phân phối chuẩn IEEE 69 nút, IEEE 25 nút và IEEE 123 nút với dữ liệu cho việc mô phỏng bức xạ mặt trời và tốc độ gió được thu thập từ vùng thực tế trong ba năm gần đây. Bên cạnh đó, 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. Do đó, các dữ liệu này có thể không sát với tình hình thực tế ở các thời điểm cụ thể trong vùng xem xét. 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) [32]. Do đó, hiệu suất giả định trong nghiên cứu này thì chưa đúng với công nghệ hiện hữu. 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.

- Hạn chế về phương pháp đề xuất: Phương pháp MCOA được áp dụng cho việc giải quyết ba bài toán tối ưu liên quan đến sự tích hợp của các nguồn phát phân tán trong các hệ thống phân phối khác nhau. Tuy nhiên, MCOA có thể chưa đạt được sự hiệu quả đối với các bài toán phức tạp mà có số biến nhiều và vùng tìm kiếm rộng. Do đó, điều này được coi như hạn chế của phương pháp đề xuất.

5.3 Hướng phát triển

- 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 áp vượt quá giới hạn cho phép nên được thực hiện để tối đa phúc lợi hơn về kinh tế lẫn kỹ thuật.
- 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.
- Các hệ thống phân phối thực tế mà đi đôi với dữ liệu thực tế và vị trí lắp đặt tiềm năng cho các nguồn phát cũng cần được xác định trước thông qua khảo sát để đảm bảo giải pháp đề xuất cho dự án phát triển hệ thống tích hợp thỏa điều kiện về vị trí địa lý khả thi để tiến hành trong thực tế.
- Hơn nữa, phương pháp 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 bài toán tối ưu phức tạp với không gian tìm kiếm rộng lớn. Tất cả những công việc trên sẽ được thực hiện trong công việc sắp tới.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. Ganguly, and D. Samajpati, "Distributed generation allocation on radial distribution networks under uncertainties of load and generation using genetic algorithm," *IEEE transactions on sustainable energy*, vol. 6, no. 3, pp. 688-697, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2015.2406915>
- [2] S. Devi, and M. Geethanjali, "Optimal location and sizing determination of Distributed Generation and DSTATCOM using Particle Swarm Optimization algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 62, pp. 562-570, 2014. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.05.015>
- [3] M. Ghosh, S. Kumar, S. Mandal, 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.
- [4] 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: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.05.002>
- [5] A. A. Ogunsina, M. O. Petinrin, O. O. Petinrin, E. N. Offorndedo, 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: <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04226-y>
- [6] 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: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.01.030>
- [7] M. A. Shaik, P. L. Mareddy, 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: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.09.063>
- [8] G. F. Gomes, S. S. da Cunha, 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: <https://doi.org/10.1007/s00366-018-0620-8>

- [9] J. Pierezan, and 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, 2018, July. IEEE. Doi: <https://doi.org/10.1109/CEC.2018.8477769>
- [10] S. Ang, and U. Leeton, "Optimal placement and size of distributed generation in radial distribution system using whale optimization algorithm," *Suranaree J. Sci. Technol*, vol. 26, no. 1, pp. 1-12, 2019.
- [11] E. S. Ali, S. M. Abd Elazim, and A. Y. Abdelaziz, "Ant Lion Optimization Algorithm for optimal location and sizing of renewable distributed generations," *Renewable Energy*, vol. 101, pp. 1311-1324, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.023>
- [12] T. Yuvaraj, K. R. Devabalaji, and K. Ravi, "Optimal placement and sizing of DSTATCOM using harmony search algorithm," *Energy Procedia*, vol. 79, pp. 759-765, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.563>
- [13] C. Yammani, S. Maheswarapu, and S. Matam, "Multiobjective optimization for optimal placement and size of DG using shuffled frog leaping algorithm," *Energy Procedia*, vol. 14, pp. 990-995, 2012. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.1044>
- [14] R. Prakash, B. Lokeshgupta, B. Sivasubramani, "Multi-objective bat algorithm for optimal placement and sizing of DG," In *2018 20th National Power Systems Conference (NPSC)*, pp. 1-6, 2018, December. IEEE. Doi: <https://doi.org/10.1109/NPSC.2018.8771440>
- [15] M. Salari, and F. Haghghatdar Fesharaki, "Optimal placement and sizing of distributed generations and capacitors for reliability improvement and power loss minimization in distribution networks," *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 11, no. 43, pp. 83-94, 2020.
- [16] G. V. Naga Lakshmi, A. Jaya Laxmi, V. Veeramsetty, S. R. Salkuti, "Optimal Placement of Distributed Generation Based on Power Quality Improvement Using Self-Adaptive Lévy Flight Jaya Algorithm," *Clean Technologies*, vol. 4, no. 4, pp. 1242-1254, 2022. Doi: <https://doi.org/10.3390/cleantechnol4040076>
- [17] A. Viet Truong, T. Ngoc Ton, T. Thanh Nguyen, and T. L. Duong, "Two states for optimal position and capacity of distributed generators considering network reconfiguration for power loss minimization based on runner root algorithm," *Energies*, vol. 12, no. 1, p. 106, 2018. Doi: <https://doi.org/10.3390/en12010106>
- [18] R. Kaur, and S. Mehta, "Optimal placement and sizing of distributed generation unit using human opinion dynamics algorithm," In *2016 7th India International Conference on Power Electronics (IICPE), IEEE*, pp. 1-4, 2016, November. Doi: <https://doi.org/10.1109/IICPE.2016.8079399>
- [19] A. A. Abou El-Ela, R. A. El-Sehiemy, and A. S. Abbas, "Optimal placement and sizing of distributed generation and capacitor banks in distribution systems using water cycle algorithm," *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 4, pp. 3629-3636, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1109/JSYST.2018.2796847>
- [20] A. A. Abou El-Ela, R. A. El-Sehiemy, A. M. Kinawy, and E. S. Ali, "Optimal placement and sizing of distributed generation units using different cat swarm optimization algorithms," In *2016 Eighteenth international middle east power systems conference (MEPCON) IEEE*, pp. 975-981, 2016, December. Doi: <https://doi.org/10.1109/MEPCON.2016.7837015>
- [21] 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, pp. 118127, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118127>
- [22] S. R. Gampa, 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: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.10.047>
- [23] T. D. Pham, T. T. Nguyen, 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. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01972-6>
- [24] V. V. Thang, and 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: <https://doi.org/10.2174/1874129001711010165>

- [25] K. Mongird, 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: <https://doi.org/10.3390/en13133307>
- [26] Electric Power Research Institute (EPRI) Harmonic spectrum. Available online: <https://github.com/tshort/OpenDSS/blob/master/Test/indmactest/Spectrum.DSS>
- [27] 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_v using evolutionary programming,” *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 21, no. 8, pp. 2269-2282, 2013. Doi: <https://doi.org/10.3906/elk-1205-35>
- [28] 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*, pp. 1-18, 2023. Doi: <https://doi.org/10.1007/s40998-023-00613-w>
- [29] T. D. Pham, L. C. Kien, and T. T. Nguyen, “Minimize renewable distributed generator costs while achieving high levels of system uniformity and voltage regulation. *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 15, no. 6, 102720, 2024. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102720>
- [30] 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: <https://doi.org/10.1080/15325008.2020.1797934>
- [31] 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: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2760011>
- [32] A. Kawamuara, 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: <https://doi.org/10.1541/ieejia.21008251>

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. **T. D. Pham**, T. T. Nguyen, 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, pp. 1-24, 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, pp. 1-14, 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.