

OPTIMIZING OF REACTIVE POWER IN DISTRIBUTION GRID INTEGRATED PHOTOVOLTAIC-ENERGY STORAGE HYBRID SYSTEMS (PESHS)

Ha Thanh Tung^{1*}, Nguyen Thanh Ha², Pham Thi Hong Anh³

¹TNU - University of Technology, ²Thai Nguyen University

³TNU - University of Information and Communication Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 10/3/2022 Revised: 23/5/2022 Published: 25/5/2022	Integrating Photovoltaic-Energy Storage Hybrid Systems (PESHS) into the Distribution Grid (DG) has become increasingly popular, which has brought in new resources and challenges for its optimal operation. This paper presents the mechanism of influence of PESHS on the loss (voltage and power) of the DG. The Double Objectives Extended Reactive Power Optimization (DERPO) model is built with an objective function to minimize power loss and reduce the risk of voltage over shoot, while considering additional control variables: active power of the electrical storage device and the reactive power of the Photovoltaic (PV) battery. The Non-dominated Sorting Genetic Algorithms (NSGA-II) are applied to solve the optimization problem using fuzzy set theory to get the optimal compromising solution. Comparative simulation results between DERPO and other reactive power optimization methods prove that the proposed model can perform unified and coordinated optimization between active and reactive power flows, and at the same time improve the voltage safety margin and reduce the loss in the DPG.
KEYWORDS Optimization Reactive power Solar power Storage device NSGA-II	

TỐI ƯU HÓA CÔNG SUẤT PHẢN KHÁNG TRONG LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI TÍCH HỢP HỆ THỐNG PHÁT ĐIỆN – KẾT HỢP LƯU TRỮ NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI

Hà Thanh Tùng^{1*}, Nguyễn Thanh Hà², Phạm Thị Hồng Anh³

¹Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp – ĐH Thái Nguyên, ²Đại học Thái Nguyên,

³Trường Đại học Công nghệ thông tin và Truyền thông – ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 10/3/2022 Ngày hoàn thiện: 23/5/2022 Ngày đăng: 25/5/2022	Tích hợp hệ thống điện mặt trời (Photovoltaic-Energy Storage Hybrid Systems, PESHS) vào mạng lưới điện phân phối trở nên phổ biến đã mang lại nguồn lực và thách thức mới cho việc vận hành tối ưu nó. Bài báo này trình bày cơ chế ảnh hưởng của PESHS đến tổn thất (điện áp và công suất) của lưới điện phân phối. Mô hình Tối ưu hóa công suất phản kháng mở rộng (Double Objectives Extended Reactive Power Optimization, DERPO) được xây dựng với hàm mục tiêu nhằm giảm thiểu tổn thất điện năng và giảm nguy cơ quá giới hạn điện áp có xét bổ sung các biến điều khiển gồm công suất tác dụng của thiết bị lưu trữ điện và công suất phản kháng của Pin quang điện (Photovoltaic, PV). Thuật toán di truyền (Non-dominated Sorting Genetic Algorithms, NSGA-II) được áp dụng để giải quyết bài toán tối ưu sử dụng lý thuyết tập mờ để có được giải pháp tối ưu. Kết quả mô phỏng so sánh giữa DERPO và các phương pháp tối ưu hóa công suất phản kháng khác chứng minh rằng mô hình được đề xuất có thể thực hiện tối ưu hóa thống nhất và phối hợp giữa dòng công suất tác dụng và phản kháng, đồng thời nâng cao biên độ an toàn điện áp và giảm tổn thất trong lưới điện phân phối.
TỪ KHÓA Tối ưu hóa Công suất phản kháng Điện mặt trời Thiết bị tích trữ NSGA-II	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.5665>

* Corresponding author. Email: tunganh@tnut.edu.vn

1. Giới thiệu

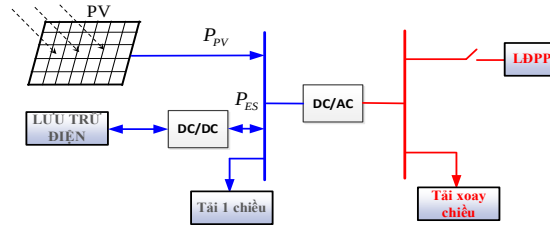
Tối ưu hóa công suất phản kháng của hệ thống điện (HTĐ) là một bài toán lập trình phi tuyến phức tạp, đa biến, nhiều ràng buộc. Mục đích chủ yếu là xác định trạng thái các thiết bị phản kháng khác nhau của hệ thống trong một khoảng thời gian nhất định nhằm giảm tổn thất, nâng cao chất lượng điện áp, đảm bảo an toàn và tiết kiệm trong vận hành lưới điện. Điều này có thể thực hiện thông qua việc điều chỉnh kích từ máy phát điện, điều chỉnh đầu phân áp máy biến áp có điều áp dưới tải, đặt các tụ bù và nhất là sử dụng công nghệ máy bù tĩnh (Static Var Compensator, SVC). Tuy vậy, do HTĐ là rất lớn và liên tục phát triển, cũng như các vấn đề khó khăn trong việc sản xuất, cung ứng điện năng; để có thể đáp ứng các tiêu chuẩn điện áp tại bất kì thời điểm nào thực sự là một vấn đề không hề đơn giản.

Trong những năm gần đây, do nhu cầu điện năng tăng liên tục, sự thiếu hụt năng lượng truyền thống và việc mở cửa thị trường điện đang là động lực thúc đẩy sự phát triển nhanh chóng và quy mô ngày càng lớn của các loại nguồn điện phân tán (Distributed Generator, DG) [1]. Trong đó phải kể đến pin quang điện (Photovoltaic, PV) – loại hình có tốc độ thâm nhập ngày càng cao trong mạng lưới điện phân phối (LĐPP). Sự thay đổi này đã dẫn đến những thách thức lớn trong công tác quy hoạch, vận hành và bảo vệ LĐPP truyền thống [2]-[4]. Một trong số đó là vấn đề tối ưu hóa công suất phản kháng [5]-[11]. Điển hình như: thiết lập mô hình đa trạng thái cho tải của PV đồng thời tối ưu hóa cấu hình PV cung cấp công suất phản kháng trong LĐPP [5]; xây dựng mô hình mạng phân phối điện tích cực [6]; tính toán dòng công suất trong LĐPP xem xét tính ngẫu nhiên của PV [7]; thiết lập mô hình tối ưu hóa công suất phản kháng của LĐPP có xét đến sự gián đoạn công suất phát của PV sử dụng thuật toán đàn ong nhân tạo (Artificial Bee Colony, ABC) [8].

Tỷ lệ hệ thống lưu trữ năng lượng trong LĐPP gia tăng đã giúp cho hệ thống phát điện kết hợp lưu trữ quang điện (Photovoltaic-energy storage hybrid systems, PESHs) ngày càng ổn định và hiệu quả [12]. Cấu trúc của thị trường điện thay đổi đã đặt ra yêu cầu cấp bách cần phải cải cách HTĐ [13]. Chẳng hạn như bên bán điện (các đơn vị bán điện) tham gia cạnh tranh có thể có quyền vận hành mạng LĐPP và đầu tư vào việc lắp đặt PESHs trong LĐPP hoặc vi lưới (Micro Grid, MG) mà họ vận hành [14], [15]. Bởi vì PESHs có thể cắt giảm đỉnh và lấp đầy đồ thị phụ tải của LĐPP, giảm chi phí mua điện đỉnh, giảm chi phí đầu tư mở rộng hệ thống, cải thiện chất lượng điện áp, giảm tổn thất điện năng, nâng cao độ tin cậy cung cấp điện [16], [17], thúc đẩy bảo tồn năng lượng và giảm phát thải, tạo ra các lợi ích kinh tế - xã hội quan trọng. Ngoài ra, chi phí đầu tư của PESHs đang giảm dần qua từng năm, loại hình này sẽ ngày càng được áp dụng phổ biến trong LĐPP. Trong bối cảnh đó, PESHs sẽ trở thành một nguồn lực quan trọng để điều phối công suất phản kháng và chủ động trong LĐPP do khả năng điều tiết linh hoạt của nó.

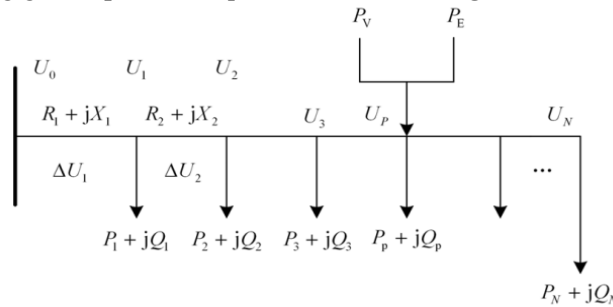
Do cấu trúc của mạng phân phối khác với mạng truyền tải, tỷ số R/X lớn, phân bố của dòng công suất tác dụng và phản kháng có tác động lớn hơn đến tổn thất và chất lượng điện áp của LĐPP. Hơn nữa, do sự biến động ngẫu nhiên của tải trong LĐPP, rất khó có thể dự đoán chính xác sản lượng điện của nó [18]. Cần đảm bảo rằng điện áp thực của từng nút có đủ biên độ an toàn trong quá trình vận hành tránh xảy ra hiện tượng điện áp vượt quá giới hạn [19]. Vì những lý do nêu trên, bài báo này đề xuất mô hình *Tối ưu hóa công suất phản kháng mở rộng đa mục tiêu (Doubleobjectives Extended Reactive Power Optimization, DERPO)* cho LĐPP có tích hợp PESH với hàm mục tiêu giảm tổn thất mạng và giảm nguy cơ quá giới hạn điện áp. Bằng cách xem xét khả năng điều chỉnh công suất phản kháng và hoạt động của hệ thống phát điện kết hợp lưu trữ quang điện, thuật toán tối ưu (Non-dominated Sorting Genetic Algorithms, NSGA-II) được áp dụng sử dụng lý thuyết tập mờ để có được giải pháp thỏa hiệp tối ưu. Thông qua việc so sánh mô phỏng với mô hình tối ưu hóa công suất phản kháng có xét đến các biến điều khiển khác nhau, kết quả cho thấy mô hình DERPO được đề xuất trong bài báo này có thể thực hiện tối ưu hóa thống nhất và phối hợp giữa dòng công suất tác dụng và dòng công suất phản kháng, đồng thời có thể khai thác triệt để tiềm năng tiết kiệm năng lượng và giảm tiêu hao trong hệ thống, đồng thời nâng cao biên độ an toàn vận hành điện áp của LĐPP.

2. Cơ chế ảnh hưởng của hệ thống phát điện kết hợp lưu trữ năng lượng mặt trời đến mạng lưới phân phối điện



Hình 1. Cấu trúc PESHS

Cấu trúc điển hình của PESHS được thể hiện trong Hình 1. Thiết bị tích trữ là một giải pháp cơ bản để nâng cao độ tin cậy cung cấp điện và hiệu quả kinh tế của PV bằng cách kết hợp với PV trong bài toán quy hoạch và vận hành để giảm chi phí đầu tư, vận hành và ô nhiễm môi trường, nâng cao hiệu quả kinh tế bằng cách điều chỉnh đồ thị phụ tải nhằm giảm chi phí mua điện từ hệ thống. Ngoài ra, thiết bị này cũng được sử dụng để điều chỉnh đồ thị phụ tải bằng cách tích trữ điện năng trong giờ thấp điểm và phát trở lại lưới vào giờ cao điểm.



Hình 2. Mô hình đơn giản của PESHS kết nối LDPP

Mô hình đơn giản của một PESHS duy nhất được kết nối với LDPP được thể hiện trong Hình 2. Điện áp tại thanh cái nguồn là U_0 , với N phụ tải đường dây, công suất tải thứ i là $P_i + jQ_i$, điện áp của nút tải tương ứng là U_i và trở kháng đường dây giữa nút tải thứ i và $i-1$ là $R_i + jQ_i$. PESHS được kết nối tại nút thứ p ($1 \leq p \leq N$), trong đó công suất của nguồn quang điện là P_V và công suất của thiết bị lưu trữ năng lượng là P_E .

Trong đường dây phân phối, thành phần sụt áp ngang nhỏ. Để đơn giản hóa việc tính toán (bỏ qua ảnh hưởng của thành phần sụt áp ngang), điện áp U_m của tải tại nút thứ m và tổng tổn hao P_{LOSS} của đường dây phân phối được xác định lần lượt là:

$$U_m = U_0 - \sum_{i=1}^m \frac{\sum_{n=1}^N P_n R_i + \sum_{n=1}^N Q_n X_i}{U_i} \quad (1)$$

$$P_{LOSS} = \sum_{i=1}^N \frac{\left(\sum_{n=1}^i P_n \right)^2 + \left(\sum_{n=1}^i Q_n \right)^2}{U_i^2} R_i \quad (2)$$

Sau khi PESHS được kết nối với nút p , điện áp của nút p là:

$$U_p = U_0 - \sum_{i=1}^p \frac{\left[\sum_{n=i}^N P_n - (P_V + P_E) \right] R_i + \sum_{n=1}^N Q_n X_i}{U_i} \quad (3)$$

Từ công thức toán học (3), có thể thấy rằng điện áp của nút nối lưới lưu trữ quang điện có quan hệ mật thiết với công suất tác dụng, công suất phản kháng và trở kháng đường dây tương ứng. Công suất đầu ra của PESHs chắc chắn ảnh hưởng đến dòng công suất trong bộ nạp, dẫn đến điện áp nút thay đổi. Coi dòng công suất tác dụng trong lưới phân phối thường lớn hơn dòng công suất phản kháng. Khi trở kháng tương đối lớn (≈ 1 hoặc ≥ 1), thành phần điều chỉnh điện áp tác dụng sẽ lớn hơn thành phần điều chỉnh điện áp phản. Khi đó, tổng tổn thất được xác định:

$$P'_{LOSS} = \sum_{i=1}^p \frac{\left(\sum_{n=i}^N P_n - P_V - P_E \right)^2 + \left(\sum_{n=1}^N Q_n \right)^2}{R_i} + \sum_{i=p+1}^N \frac{\left(\sum_{n=i}^N P_n \right)^2 + \left(\sum_{n=i}^N Q_n \right)^2}{U_i^2} \quad (4)$$

Nếu công suất của PESHs được coi là một biến số, thì công thức (4) là một hàm bậc hai bao gồm cả biến số này và có giá trị nhỏ nhất. Do đó, điều chỉnh sản lượng điện năng hoạt động P_E của bộ lưu trữ năng lượng có thể làm giảm thiểu tổn thất LĐPP. Xét rằng dòng công suất tác dụng trong mạng phân phối thường lớn hơn dòng công suất phản kháng, hệ thống lưu trữ lúc này sẽ có tác dụng tương tự như bù công suất phản kháng, hoặc thậm chí có tác dụng điều chỉnh tốt hơn. Có thể thấy, việc đưa công suất phản kháng của hệ thống lưu trữ vào là một trong các biến điều khiển của việc tối ưu hóa công suất phản kháng của LĐPP là rất quan trọng.

2.1. Các biến điều khiển

Biến điều khiển tối ưu hóa công suất phản kháng truyền thống có thể được biểu thị bằng các biến $[T_k, Q_C]$, trong đó T_k là vị trí nấc của máy biến áp điều chỉnh điện áp dưới tải và Q_C là công suất phản kháng của khối tụ điện. Trên cơ sở đó, bài báo này bổ sung hai loại biến điều khiển: công suất tác dụng của thiết bị lưu trữ năng lượng và công suất phản kháng của PV. Xét khả năng điều chỉnh công suất phản kháng PV và các ràng buộc giới hạn của dòng điện, mô hình toán tối ưu được xây dựng với hàm mục tiêu tổn thất công suất min trong giới hạn điện áp cho phép. Các biến điều khiển của mô hình DERPO được mở rộng thành $[T_k, Q_C, P_{ES}, Q_{PV}]$, trong đó P_{ES} là công suất của thiết bị lưu trữ năng lượng trong PESHs, Q_{PV} là công suất phản kháng của PV. Để đơn giản trong tính toán, ở đây chỉ xem xét điều khiển công suất hoạt động tích trữ năng lượng, còn điều khiển công suất hoạt động của PV không được xem xét.

2.2. Hàm mục tiêu

a. Tổng tổn thất công suất min

Tổn thất công suất tác dụng là một chỉ tiêu kinh tế quan trọng trong vận hành lưới điện. Việc thiết lập hợp lý trạng thái của các thiết bị công suất phản kháng khác nhau trong hệ thống và sản lượng công suất phản kháng, tác dụng của PESHs có thể cải thiện phân bố dòng công suất của hệ thống và kiểm soát tốt tổn thất. Biểu thức toán học của nó là:

$$P_{LOSS} = \sum_{i=1}^n V_i \sum_{j \in \Gamma} V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (5)$$

Trong đó: P_{LOSS} là tổng tổn thất công suất của LĐPP; V_i là biên độ điện áp của nút thứ i ; G_{ij} , B_{ij} , δ_{ij} lần lượt là điện dẫn, điện trở và độ lệch pha giữa các nút i và j tương ứng; n là tổng số các nút; Γ là tập hợp các nút được kết nối với nút j .

b. Chỉ số rủi ro vượt giới hạn điện áp nút

$$V_{LIM} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{V_i - V_{ei}}{V_{ei}} \right)^2 \quad (6)$$

Trong công thức: V_{LIM} là chỉ số rủi ro vi phạm giới hạn điện áp; V_{ei} là giá trị kỳ vọng điện áp của nút thứ i . Thông thường, việc xảy ra điện áp vượt quá giới hạn sẽ ảnh hưởng đến khả năng vận hành ổn định và an toàn của LĐPP. V_{LIM} có thể phản ánh mức độ mà điện áp nút lệch khỏi giá trị mong đợi. Điện áp nút càng gần với giá trị kỳ vọng, nguy cơ vượt quá giới hạn càng thấp.

Do đó, ngay cả khi điện áp thực tế dao động do sự không chắc chắn của đầu ra PV, với mạng phân phối được điều khiển bởi giá trị điện áp dự kiến (miễn là giá trị điện áp dự kiến nằm xa ranh giới ràng buộc), việc kiểm soát tốt công suất thiết bị lưu trữ năng lượng sẽ hạn chế vấn đề quá giới hạn điện áp.

Tóm lại, hàm mục tiêu của mô hình toán bao gồm: giảm thiểu tổn thất LDPP và giảm thiểu nguy cơ điện áp vượt giới hạn định mức:

$$\min F = \min [P_{\text{LOSS}}, V_{\text{LIM}}] \quad (7)$$

2.3. Các ràng buộc toán học

a. Cân bằng công suất tác dụng và phản kháng

Phân bố công suất của mạng lưới điện có thể thông qua phương trình cân bằng công suất nút cơ bản:

$$\begin{aligned} P_i - V_i \sum_{j \in \Gamma} V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) &= 0 \\ Q_i - V_i \sum_{j \in \Gamma} V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Trong đó, $P_{E,i}^G(t), Q_{E,i}^G$ là công suất tác dụng và phản kháng của máy phát điện chảy vào nút thứ i ; $P_{E,i}^D(t), Q_{E,i}^D$ là công suất tác dụng và phản kháng của phụ tải điện tại nút thứ i . V_i, V_j là Giá trị điện áp tại nút thứ i và nút thứ j . $G_{E,ij}, B_{E,ij}$, và δ_{ij} lần lượt là điện dẫn, điện dẫn trung tính của dây dẫn và góc lệch pha từ nút thứ i đến j . n_e là số lượng điểm nút của mạng lưới điện.

b. Ràng buộc bất đẳng thức

Các biến trong bài toán tối ưu hóa công suất phản kháng của LDPP có ràng buộc bất đẳng thức có thể được chia thành biến điều khiển và biến trạng thái. Chúng gồm có:

$$\begin{cases} Q_{C,\min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{C,\max} & i \in S_C \\ T_{k,\min} \leq T_{ki} \leq T_{k,\max} & i \in S_k \\ P_{ES,\min} \leq P_{ESi} \leq P_{ES,\max} & i \in S_{ES-PV} \\ \lambda_{PV,\min} \leq \lambda_{PVi} \leq \lambda_{PV,\max} & i \in S_{ES-PV} \end{cases} \quad (9)$$

Trong công thức (9): $Q_{C,\min}, Q_{C,\max}, T_{k,\min}, T_{k,\max}, P_{ES,\min}, P_{ES,\max}, \lambda_{PV,\min}, \lambda_{PV,\max}$ lần lượt thể hiện là các giá trị cực đại và cực tiểu công suất phản kháng của thiết bị bù trên lưới, vị trí của đầu phân áp máy biến áp điều chỉnh điện áp dưới tải, công suất tác dụng của thiết bị lưu trữ năng lượng và hệ số công suất của PV. Khả năng điều chỉnh công suất phản kháng của PV sẽ bị hạn chế bởi công suất của bộ biến tần và công suất hoạt động của nó:

$$|Q_{PVi}| \leq \sqrt{S_{PVi}^2 - P_{PVi}^2} \quad (10)$$

Trong đó: S_{PVi} và P_{PVi} lần lượt là công suất biến tần và công suất phát của PV thứ i .

Các ràng buộc của biến trạng thái bao gồm ràng buộc điện áp nút và ràng buộc công suất nhánh, cụ thể là:

$$\begin{cases} V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max} & i \in S_B \\ |I_i| \leq I_{i,\max} & i \in S_L \end{cases} \quad (11)$$

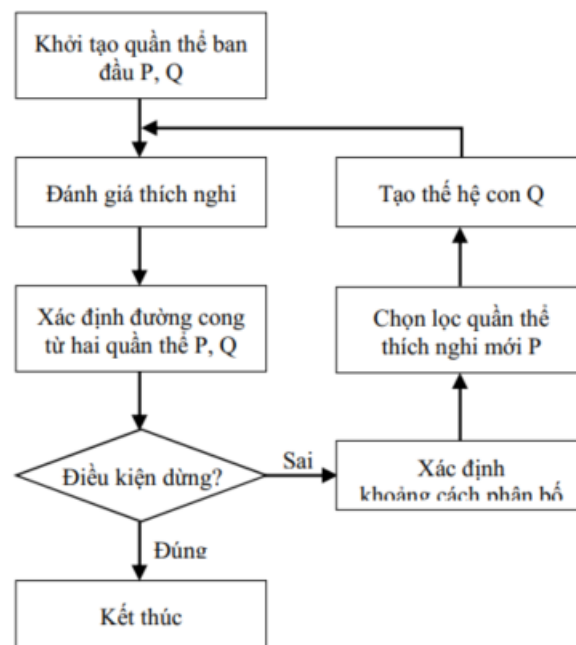
Trong đó: I_i là dòng điện của nhánh thứ i ; $V_{i,\min}$ và $V_{i,\max}$ lần lượt thể hiện giá trị nhỏ nhất và lớn nhất của điện áp nút thứ i ; $I_{i,\max}$ là giá trị lớn nhất của dòng điện nhánh; S_B và S_L là các tập của các nút và nhánh.

3. Công cụ giải bài toán tối ưu

3.1. Tối ưu Pareto (Pareto optimality)

Trong tối ưu hóa đa mục tiêu, thường không có tập nghiệm để làm cho tất cả các hàm mục tiêu đạt đến tối ưu đồng thời. Hiệu quả Pareto hay còn gọi là tối ưu Pareto là một trong những lý thuyết trung tâm của kinh tế học với nhiều ứng dụng rộng rãi trong lý thuyết trò chơi, các ngành kỹ thuật, cũng như khoa học xã hội [20], [21]. Với 1 nhóm các cá nhân và nhiều cách phân bổ nguồn lực khác nhau cho mỗi cá nhân trong nhóm đó, việc chuyển từ một phân bổ này sang một phân bổ khác mà làm ít nhất một cá nhân có điều kiện tốt hơn nhưng không làm cho bất cứ một cá nhân nào khác có điều kiện xấu đi được gọi là một sự cải thiện Pareto hay một sự tối ưu hóa Pareto. Khi đạt được một phân bổ mà không còn cách nào khác để đạt thêm sự cải thiện Pareto, cách phân bổ đó được gọi là hiệu quả Pareto hoặc tối ưu Pareto. Trong bài báo này, vấn đề thỏa mãn của mỗi hàm mục tiêu tương ứng với mỗi giải pháp tối ưu Pareto được tính toán theo hàm liên thuộc [21]. Chúng được chuẩn hóa và so sánh với nhau để tìm ra phương án tối ưu hóa với sự thỏa mãn lớn nhất được chọn (nghĩa là giải pháp thỏa hiệp tốt nhất).

3.2. NSGA-II giải quyết bộ giải pháp Pareto



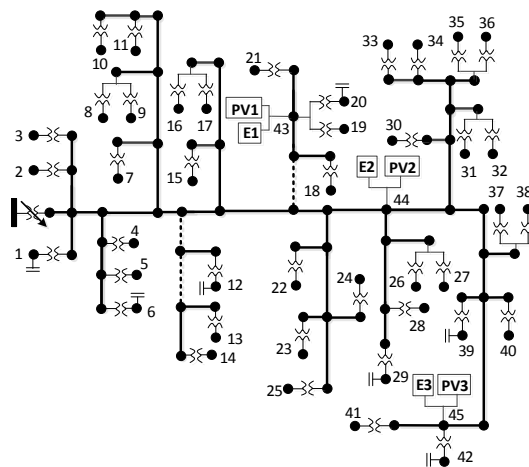
Hình 3. Lưu đồ thuật toán NSGA-II [21]

NSGA-II là một thuật toán để giải quyết hiệu quả các bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu. Nó áp dụng chiến lược lưu giữ tối ưu và giới thiệu toán tử lựa chọn dựa trên mức độ sắp xếp và khoảng cách tập trung để cải thiện sự đa dạng và cải thiện đáng kể hiệu suất của thuật toán. Trong thuật toán này, có hai quần thể có kích thước không đổi được sử dụng: P là quần thể tốt nhất được chọn lọc qua các thế hệ, Q là quần thể con được sinh ra từ quần thể P bởi các quy luật di truyền (qua các phương pháp lai ghép và đột biến). Trong bài báo này, bộ công cụ MATPOWER trong Matlab được sử dụng làm cơ sở tính toán dòng công suất và thuật toán với NSGA-II là công cụ chính để tính toán tối ưu công suất phản kháng. Đầu tiên ta sử dụng thuật toán NSGA-II để tạo ngẫu nhiên các giá trị ban đầu của các biến điều khiển thỏa mãn các ràng buộc, chuyển chúng đến MATPOWER để tính toán giá trị hàm mục tiêu tương ứng và sau đó sử dụng thuật toán NSGA-II để sắp xếp các biến. Tiếp theo, cập nhật các biến kiểm soát theo nguyên tắc chiến lược tối ưu. Sau đó, các biến điều khiển mới lại được chuyển vào MATPOWER [22] để tính giá trị hàm mục tiêu. Lưu đồ cụ thể của chương trình được thể hiện trong Hình 3 [21], [23], [24].

4. Kết quả tính toán

Cấu trúc mạng LĐPP được giới thiệu trong Hình 4 [12]. Trong hệ thống có một máy biến áp điều chỉnh điện áp dưới tải, gồm 17 nấc điều chỉnh (mỗi nấc là 1,25%) và hai bộ tụ bù song song có thể chuyển đổi được lắp đặt tại các nút 1, 6, 12, 20, 29, 39 và 42 với công suất tương ứng mỗi bộ là 75 kVAr, 40 kVAr, 105 kVAr, 50 kVAr, 50 kVAr, 40 kVAr, 20 kVAr. Các nút 43, 44, 45 được kết nối với PESHS. Công suất sạc/xả tối đa của thiết bị lưu trữ năng lượng tại mỗi nút là 1 MW. Hệ số công suất của PV là 0,85.

Để xác minh tính hiệu quả của phương pháp tối ưu DERPO được đề xuất trong bài báo này, bốn kịch bản tính toán với dữ liệu là tải min vào ngày nắng, tải max vào ngày nắng, tải min vào ngày nhiều mây và tải max vào ngày nhiều mây là được chọn để so sánh mô phỏng. Trong kịch bản ngày nhiều mây, sản lượng của PV được đặt bằng 1/3 ngày nắng. Trong kịch bản tải max của lưới phân phối, phụ tải phía hạ áp của mỗi máy biến áp phân phối được đặt gấp 3 lần tải min.



Hình 4. Cấu trúc LĐPP đề xuất tính toán [12]

Trong mỗi kịch bản, 4 nhóm mô hình tối ưu hóa so sánh được thiết lập. Ngoại trừ các biến điều khiển khác nhau, các mô hình này đều có chung hàm mục tiêu và các ràng buộc. Cụ thể, các biến điều khiển của mô hình I là Q_C và T_k ; các biến điều khiển của mô hình II là Q_C , T_k và λ_{PV} ; Các biến điều khiển của mô hình III là Q_C , T_k và P_{ES} ; các biến điều khiển của mô hình IV là Q_C , T_k , P_{ES} và Q_{PV} .

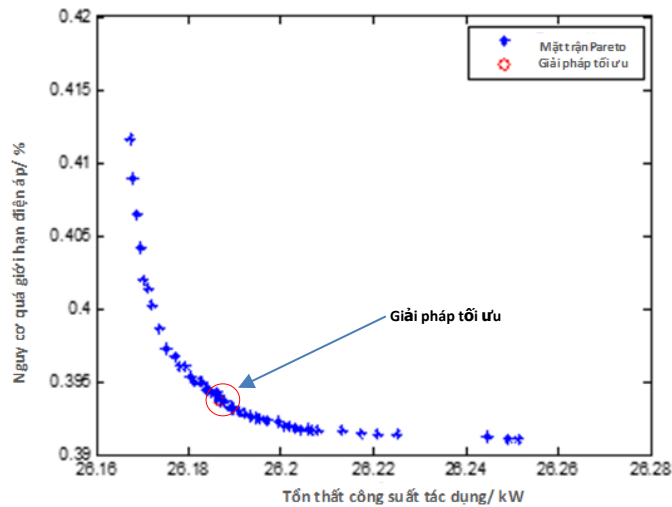
4.1. Kết quả tính toán của 1 kịch bản điển hình

Bảng 1. Thông số phụ tải tính toán

Nút	Công suất / kVA	Nút	Công suất / kVA	Nút	Công suất / kVA	Nút	Công suất / kVA	Nút	Công suất / kVA	Nút	Công suất / kVA
1	84+j36	8	24+j9	15	65+j31	22	96+j44	29	88+j29	36	10+j4
2	36+j15	9	58+j19	16	37,5+j18	23	28+j11	30	64+j31	37	38+j14
3	116+j49	10	60+j28	17	72,5+j29	24	13+j6	31	26+j11	38	28+j10
4	44+j17	11	78+j28	18	100+j43	25	84+j31	32	23+j9	39	56+j22
5	80+j32	12	175+j75	19	70+j23	26	90+j33	33	22+j7	40	15,5+j5
6	38+j15	13	77,5+j31	20	70+j26	27	50+j20	34	38+j16	41	75+j30
7	26+j11	14	95+j40	21	47,5+j17	28	75+j34	35	12+j4	42	27+j9

Do giới hạn trình bày nội dung, bài báo tập trung phân tích một kịch bản điển hình: Phụ tải min vào ngày nắng, giá trị phụ tải của máy biến áp phân phối hạ áp thể hiện trong Bảng 1. Công suất tác dụng dự đoán của PV1, PV2 và PV3 lần lượt là 700 kW, 500 kW và 300 kW tương ứng. Thuật toán NSGA-II được sử dụng để giải quyết bốn nhóm mô hình tối ưu hóa ở trên trong kịch bản này cho kết quả như trong Bảng 2. Các giá trị hàm mục tiêu tương ứng với các giải pháp thỏa hiệp tối ưu của từng nhóm mô hình được thể hiện trong Bảng 3. Trong trường hợp này, việc giải

quyết Mô hình IV dẫn đến giải pháp thỏa hiệp tối ưu và biên giới Pareto (kết quả được thể hiện trong Hình 5).



Hình 5. Biên giới Pareto

Bảng 3 cho thấy:

1) So với mô hình I, tổn thất công suất và chỉ số rủi ro quá giới hạn điện áp của mô hình II lần lượt giảm 6,6% và 2,1%, trong khi mô hình III giảm tương ứng 8,8% và 12,2%. Thay đổi công suất PV có ưu điểm là giảm tổn thất và điều chỉnh điện áp.

2) So với mô hình I, tổn thất công suất và chỉ số rủi ro quá giới hạn điện áp trong mô hình IV lần lượt giảm 17,4% và 20,4%, điều này cho thấy việc bổ sung thêm hai biến công suất tác dụng của thiết bị lưu trữ năng lượng và công suất phản kháng của PV đã dẫn đến tổng tổn thất giảm thiểu đáng kể.

Bảng 2. Kết quả tính toán của mô hình DERPO cho 04 kịch bản

Mô hình (i)	Vị trí đầu phân áp MBA	Công suất tích trữ/ kW			Công suất phản kháng PV/ kVar		
		E1	E2	E3	PV1	PV2	PV3
I	2		--			--	
II	2		--		319	213	61
III	1	430	360	60		--	
IV	1	320	420	-50	397	228	119

Bảng 3. Kết quả hàm mục tiêu của các giải pháp tối ưu

Mô hình (i)	P_{LOSS}/kW	$\Delta P\%$	$V_{LMI}/\%$	$\Delta V / \%$
I	31,7	--	0,49	--
II	29,6	6,6	0,48	2,1
III	28,9	8,8	0,43	12,2
IV	26,2	17,4	0,39	20,4

4.2. So sánh các kết quả tính toán giữa các kịch bản

Kết quả tính toán của hàm mục tiêu tương ứng với các giải pháp thỏa hiệp tối ưu của từng mô hình trong bốn kịch bản tính toán được tóm tắt trong Bảng 3 và 4. Mô hình DERPO được đề xuất trong bài báo này (Mô hình 4) giúp giảm đáng kể tổn thất và nguy cơ quá giới hạn điện áp so với các mô hình còn lại. Cụ thể, so với mô hình II, III và IV có mức tăng hơn 10% trong việc cải thiện nguy cơ quá giới hạn điện áp trong những ngày nắng; tổng tổn thất công suất giảm hơn 30% trong những ngày nhiều mây. Giả sử rằng thời gian được phân bổ đều cho bốn kịch bản trong năm, mô hình được đề xuất trong có thể tiết kiệm thêm khoảng 247 triệu chi phí tổn thất. Nhìn chung, mô hình DERPO được đề xuất trong bài báo này đem lại hiệu quả, có thể tối ưu hóa phối

hợp giữa dòng công suất tác dụng và dòng công suất phản kháng trong LĐPP, giảm tổn thất và nâng cao chất lượng điện áp và lợi ích kinh tế.

Bảng 4. Kết quả hàm mục tiêu của các giải pháp tối ưu theo các kịch bản tính toán

Mô hình (i)	P_{LOSS}/kW	$\Delta P\%$	$V_{LMI}/\%$	$\Delta V / \%$
Ngày nắng (tải min) 1	31,7	--	0,49	--
Ngày nắng (tải min) 2	29,6	6,6	0,48	2,1
Ngày nắng (tải min) 3	28,9	8,8	0,43	12,2
Ngày nắng (tải min) 4	26,2	17,4	0,39	20,4
Ngày nắng (tải max) 1	32,2	--	0,51	--
Ngày nắng (tải max) 2	30,4	5,59	0,5	1,96
Ngày nắng (tải max) 3	29,4	8,70	0,43	15,69
Ngày nắng (tải max) 4	26,7	17,08	0,4	21,57
Ngày nhiều mây (tải min) 1	48,4	--	0,64	--
Ngày nhiều mây (tải min) 2	46,4	4,13	0,42	34,38
Ngày nhiều mây (tải min) 3	28,9	40,29	0,41	35,94
Ngày nhiều mây (tải min) 4	26,2	45,87	0,4	37,5
Ngày nhiều mây (tải max) 1	50,3	--	0,67	--
Ngày nhiều mây (tải max) 2	48,2	4,17	0,45	32,84
Ngày nhiều mây (tải max) 3	29,4	41,55	0,43	35,82
Ngày nhiều mây (tải max) 4	27	46,32	0,42	37,31

Lưu ý: Các giá trị ΔP và ΔV trong bảng đại diện cho sự cải thiện của các mô hình khác liên quan đến kết quả tối ưu hóa của mô hình 1 tương ứng về tổn thất và rủi ro quá giới hạn điện áp.

5. Kết luận

Bài báo này đã xây dựng mô hình tối ưu DERPO cho LĐPP tích hợp PESHS với mục tiêu giảm thiểu tối đa tổn thất công suất và nguy cơ quá giới hạn điện áp. Các kết luận chính như sau:

1) PESHS là một nguồn lực quan trọng để điều chỉnh công suất phản kháng và hoạt động trong LĐPP. Mô hình DERPO được đề xuất trong bài báo này khai thác khả năng của PESHS trong việc bù công suất phản kháng và điều chỉnh công suất tác dụng. Kết quả tính toán cho thấy mô hình có thể cải thiện tỷ lệ sử dụng nguồn cung cấp từ hệ thống, tối ưu hóa dòng công suất tác dụng và phản kháng, đạt được hiệu quả giảm tổn thất và điều chỉnh điện áp đáng kể.

2) Thuật toán NSGA-II có thể phối hợp tốt hai mục tiêu tối ưu hóa là tổn thất công suất và chất lượng điện áp, đồng thời tìm chính xác Pareto của hàm đa mục tiêu; Biên giới và giải pháp tối ưu được phân bố đồng đều trong không gian mục tiêu.

Mô hình DERPO được đề xuất trong bài báo này cũng có thể áp dụng cho việc phối hợp tối ưu hóa dòng công suất phản kháng và tác dụng trong mạng phân phối với các nguồn công suất phản kháng khác. Ngoài ra, nghiên cứu cần tiếp tục xem xét đến các hạn chế về dung lượng vật lý của thiết bị lưu trữ năng lượng và khả năng điều khiển công suất phát PV.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] Y. Yi, L. Dong, Y. Wenpeng, *et al.*, "Technology and Its trends of active distribution network," *Automation of Electric Power Systems*, vol. 36, no. 18, pp. 10-16, 2012.
- [2] H. Jinghan, L. Lin, D. Fanfan, *et al.*, "A new coordinated backup protection scheme for distribution network containing distributed generation," *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 2, no. 2, pp. 102-110, 2017.
- [3] C. Xu, Z. Yongjun, and H. Xiangmin, "Review of reactive power and voltage control method in the background of active distribution network," *Automation of Electric Power Systems*, vol. 40, no. 1, pp. 143-151, 2016.
- [4] S. Xin and C. Min, "Research on the influence of distributed power grid for distribution network," *Transactions of China Electrotechnical Society*, vol. 30, no. 1, pp. 343-351, 2015.

-
- [5] Z. Lu, T. Wei, C. Pengwei, *et al.*, "Optimal configuration of active-reactive power sources in distribution network with photovoltaic generation," *Proceedings of the CSEE*, vol. 34, no. 31, pp. 5525-5533, 2014.
- [6] X. Haijun, C. Haozhong, and Z. Yi, "Reactive power comprehensive optimization in distribution network based on multiple active management schemes," *Power System Technology*, vol. 39, no. 6, pp. 1504-1510, 2015.
- [7] W. Lizhen, J. Libo, and H. Xiaohong, "Reactive power optimization of active distribution network based on optimal scenario generation algorithm," *Power System Protection and Control*, vol. 45, no. 15, pp. 152-159, 2017.
- [8] G. Kang, X. Yuqin, Z. Li, *et al.*, "Reactive power optimization of distribution network considering PV station random output," *Power System Protection and Control*, vol. 40, no. 10, pp. 53-58, 2012.
- [9] Z. Yongjun, S. Jiehe, and Y. Yingqi, "Reactive power optimization based on interval arithmetic with distributed power grid," *Power System Protection and Control*, vol. 42, no. 15, pp. 21-26, 2014.
- [10] D. Lei, T. Aizhong, Y. Ting, *et al.*, "Reactive power optimization for distribution network with distributed generators based on mixed integer semi-definite programming," *Automation of Electric Power Systems*, vol. 39, no. 21, pp. 66-72, 2015.
- [11] Y. Yifen, W. Wenxuan, Z. Yi, *et al.*, "Bi-level optimal allocation of reactive power compensation considering active management measure," *Power System Protection and Control*, vol. 45, no. 12, pp. 60-66, 2017.
- [12] Z. Ming, Y. Yongqi, L. Yuanfei, *et al.*, "The Preliminary research for key operation mode and technologies of electrical power system with renewable energy sources under energy internet," *Proceedings of the CSEE*, vol. 36, no. 3, pp. 681-691, 2016.
- [13] B. Yang, X. Le, X. Qing, *et al.*, "Institutional design of chinese retail electricity market reform and related suggestions," *Automation of Electric Power Systems*, vol. 39, no. 14, pp. 1-7, 2015.
- [14] Z. Yu, D. Zhaoyang, H. Shilin, *et al.*, "Optimal integration of mobile battery energy storage in distribution system with renewables," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 3, no. 4, pp. 589-596, 2015.
- [15] L. Jianlin, M. Huimeng, and H. Dong, "Present development condition and trends of energy storage technology in the integration of distributed renewable energy," *Transactions of China Electrotechnical Society*, vol. 31, no. 14, pp. 1-10, 2016.
- [16] S. Zhenxin, L. Hanqiang, Z. Zhe, *et al.*, "Research on economical efficiency of energy storage," *Proceedings of the CSEE*, vol. 33(S), pp. 54-58, 2013.
- [17] M. Samper, D. Flores, and A. Vargas, "Investment valuation of energy storage systems in distribution networks considering distributed solar generation," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 4, pp. 1774-1779, 2016.
- [18] L. Qingjie, W. Shao, and L. Tinglei, "Active/reactive power integrated optimization in distribution networks with distributed generation," *Power System Protection and Control*, vol. 40, no. 10, pp. 71-76, 2012.
- [19] L. Yibing, W. Wenchuan, Z. Boming, *et al.*, "Overvoltage preventive control method based on active and reactive power coordinated optimization in active distribution network," *Automation of Electric Power Systems*, vol. 38, no. 9, pp. 184-191, 2014.
- [20] Q. H. Wu, Z. Lu, M. S. Li, *et al.*, "Optimal placement of FACTS devices by a group search optimizer with multiple producer," *Proceedings of IEEE World Congress on Computational Intelligence*, Hongkong, China, June 1-6, 2008, pp. 1033-1039.
- [21] H. H. Nguyen and D. Hoang, "Using algorithm NSGA II to solve the problem of minimizing power loss in electrical distribution networks," *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, vol. 11, no. 96, pp. 58-62, 2015.
- [22] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, and R. J. Thomas, "MATPOWER: Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education, Power Systems," *IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 1, pp. 12-19, Feb. 2011.
- [23] W. Xianqi, L. Zhilin, and T. Zeqi, "Multiobjective dynamic optimal dispatching of grid-connected microgrid based on TOU power price mechanism," *Power System Protection and Control*, vol. 45, no. 4, pp. 9-18, 2017.
- [24] S. L. Wen, H. Lan, Q. Fu, *et al.*, "Economic allocation for energy storage system considering wind power distribution," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 2, pp. 644-652, 2015.
-