

AN ITERATIVE LINEAR PROGRAMMING-BASED MODEL USING FICTITIOUS NODAL DEMAND FOR SOLVING THE OPTIMAL POWER FLOW PROBLEM IN POWER DISTRIBUTION SYSTEMS

Ha Duy Giang, Duong Duy Long, Pham Nang Van*

School of Electrical and Electronic Engineering - Hanoi University of Science and Technology

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	07/3/2023	This paper proposes an iterative method based on a linear programming model to efficiently solve the problem of optimal power flow in power distribution systems integrated with distributed energy sources. The proposed method is computationally efficient and highly suitable for real-time applications. The iteration approach is developed using the fictitious nodal demand model with the aim of dealing with the nonlinearity of the power loss formula and eliminating the dependence of solutions on the slack bus selection. The constraints of quadratic branch flow limits are linearized using the regular polygon with 12 sides. The validation of the proposed method is implemented on the IEEE 33-node distribution grid using the CPLEX commercial optimization solver under the GAMS programming language. Calculation results regarding the active and reactive powers of distributed generation and nodal voltages clearly show that the proposed model has a tiny error compared with the general nonlinear optimal power flow model solved using MATPOWER software.
Revised:	11/4/2023	
Published:	16/4/2023	
KEYWORDS		
Power distribution systems		
Optimal power flow (OPF)		
Fictitious nodal demand (FND)		
Distributed Generation (DG)		
Linear programming (LP)		

GIẢI BÀI TOÁN TRÀO LƯU CÔNG SUẤT TỐI ƯU TRONG LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI SỬ DỤNG QUY HOẠCH TUYẾN TÍNH LẬP VỚI PHỤ TẢI GIẢ TƯƠNG

Hà Duy Giang, Dương Duy Long, Phạm Năng Văn*

Trường Điện – Điện tử - Đại học Bách khoa Hà Nội

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	07/3/2023	Bài báo đề xuất phương pháp lập sử dụng mô hình quy hoạch tuyến tính để giải bài toán trào lưu công suất tối ưu trong lưới điện phân phối có các nguồn điện phân tán. Phương pháp lập đề xuất hiệu quả về mặt tính toán và phù hợp với các ứng dụng thời gian thực. Phương pháp đề xuất được xây dựng sử dụng khái niệm phụ tải giả tưởng. Mô hình phụ tải giả tưởng giúp giải quyết tính phi tuyến của biểu thức tổn thất công suất và loại bỏ sự phụ thuộc của lời giải vào sự lựa chọn nút cân bằng. Ràng buộc giới hạn truyền tải công suất trên các nhánh được tuyến tính hóa sử dụng đa giác đều với 12 cạnh. Phương pháp đề xuất được đánh giá trên lưới điện phân phối 33 nút IEEE sử dụng bộ giải thương mại CPLEX với ngôn ngữ lập trình GAMS. Các kết quả tính toán cho thấy công suất tác dụng và công suất phản kháng phát của các nguồn điện phân tán và điện áp nút tính được từ mô hình đề xuất có sai số rất nhỏ so với lời giải đạt được từ mô hình trào lưu công suất tối ưu phi tuyến tổng quát sử dụng phần mềm MATPOWER.
Ngày hoàn thiện:	11/4/2023	
Ngày đăng:	16/4/2023	
TỪ KHÓA		
Lưới điện phân phối		
Trào lưu công suất tối ưu (OPF)		
Phụ tải giả tưởng (FND)		
Nguồn điện phân tán (DG)		
Quy hoạch tuyến tính (LP)		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.7491>

* Corresponding author. Email: van.phamnang@hust.edu.vn

1. Giới thiệu

Bài toán trào lưu công suất tối ưu (Optimal Power Flow – OPF) đã được phát triển ở lưới truyền tải từ những năm 60 của thế kỷ XX [1] để xác định công suất phát của các tổ máy với hàm mục tiêu là cực tiểu chi phí vận hành của hệ thống. Bài toán OPF cho phép tối ưu hóa nhiều kiểu hàm mục tiêu và xét được ràng buộc hệ phương trình trào lưu công suất cũng như các giới hạn vận hành. Ngoài ra, với sự phát triển của thị trường điện bán buôn ở lưới điện truyền tải, bài toán OPF còn được áp dụng để tính toán và phân tách các thành phần của giá biên nút (Locational Marginal Price – LMP).

Hiện nay, lưới điện phân phối đã và đang được tích hợp nhiều nguồn điện phân tán (DG) và các hệ thống lưu trữ năng lượng. Do đó, phương thức vận hành lưới điện phân phối như truyền thống không còn phù hợp, tức là đơn vị vận hành lưới điện phân phối cần phải lập kế hoạch vận hành tối ưu các nguồn điện và hệ thống tích trữ năng lượng, thực hiện các giải pháp để quản lý nghẽn mạch trong lưới điện. Ngoài ra, sự phát triển của thị trường điện bán lẻ theo phương thức tập trung ở lưới phân phối đòi hỏi phải tính toán và phân tách các thành phần của giá biên nút phân phối (Distribution Locational Marginal Price – DMLP).

Về mặt toán học, bài toán OPF tổng quát có dạng phi tuyến và không lồi. Phương pháp quy hoạch tuyến tính (Linear Programming – LP) dựa trên trào lưu công suất một chiều (Direct Current Power Flow – DCPF), trong đó tổn thất công suất được bỏ qua và coi điện áp tại các nút bằng điện áp định mức, thường được áp dụng rộng rãi trong mô hình OPF cho lưới truyền tải. Tuy nhiên, lưới điện phân phối có các đặc điểm khác với lưới điện truyền tải như sau: (1) do đường dây phân phối có tỷ số R/X cao nên tổn thất công suất không thể được bỏ qua; (2) lưới phân phối có điện áp thấp, cấu trúc hình tia với chiều dài đường dây tương đối lớn nên tổn thất điện áp lớn và không thể coi điện áp các nút bằng điện áp định mức. Các nghiên cứu hiện tại về phương pháp giải bài toán OPF trong lưới điện phân phối được trình bày như dưới đây.

Bài báo [2] đã đề xuất phương pháp lặp Lambda để giải bài toán OPF. Tuy nhiên, phương pháp này chỉ có thể áp dụng được cho bài toán OPF có các ràng buộc của nguồn điện mà chưa xét các ràng buộc về lưới điện như giới hạn điện áp nút và giới hạn truyền tải công suất trên các nhánh. Mô hình quy hoạch hình nón bậc hai (SOCP) [3] đã được áp dụng để giải bài toán OPF. Mô hình SOCP có dạng lồi, do đó, nghiệm đạt được từ mô hình này là nghiệm tối ưu toàn cục [4]. Bài báo [5] đã đề xuất mô hình OPF có xét phụ tải nhạy theo giá. Mô hình này được giải bởi phương pháp lặp điểm cố định (a fixed-point iteration algorithm) và tiêu chuẩn heuristic được đề xuất để kiểm tra sự hội tụ của lời giải. Kỹ thuật tối ưu hai lớp được áp dụng để xét các ràng buộc an toàn với mô hình lớp trên biểu diễn sự cố dựa trên biến nhị phân và lớp dưới biểu diễn mô hình ACOPF [6]. Đặc điểm của các phương pháp giải mô hình tối ưu hai lớp rất phức tạp và khó áp dụng trong thực tế. Ngoài các kỹ thuật về quy hoạch toán học, một số kỹ thuật về học máy như học tăng cường đã được áp dụng để tăng tốc độ tính toán, phù hợp với vận hành thời gian thực [7]. Ngoài ra, kỹ thuật mạng học sâu cho ràng buộc điện áp đã được áp dụng để tìm mối quan hệ giữa công suất phụ tải và điện áp nút [8]. Tuy nhiên, nhược điểm của các phương pháp này là không đảm bảo nghiệm tối ưu toàn cục của lời giải tìm được. Bài báo [9] đề xuất thuật toán ADMM với hai vòng lặp để tìm nghiệm tối ưu toàn cục của mô hình ACOPF. Trong [9], phương pháp quy hoạch tuyến tính liên tiếp đã được áp dụng để giải mô hình OPF [10]. Mô hình OPF tuyến tính định hướng dữ liệu cho lưới điện phân phối được đề xuất trong [11]. Bài báo [12] trình bày sự áp dụng của hệ số độ nhạy để xây dựng mô hình OPF tuyến tính và xác định LMP. Ba phương pháp để giải bài toán OPF nhiều giai đoạn có xét tính bất định được mô tả trong [13].

Từ các nghiên cứu đã trình bày ở trên, ta thấy rằng có nhiều phương pháp khác nhau để giải bài toán trào lưu công suất tối ưu. Tuy nhiên, các đơn vị vận hành trên toàn thế giới sử dụng phổ biến mô hình dựa trên phương pháp quy hoạch tuyến tính do độ tin cậy cao, hiệu quả về mặt tính toán và rất phù hợp trong các ứng dụng thời gian thực. Do đó, mục đích của bài báo là đề xuất phương pháp lặp dựa trên quy hoạch tuyến tính với phụ tải giả tưởng để giải bài toán trào lưu

công suất tối ưu trong lưới điện phân phối có các nguồn điện phân tán. Các đóng góp chính của bài báo bao gồm: (1) Trình bày kỹ thuật tuyến tính hóa hệ phương trình trào lưu công suất; (2) Đề xuất phương pháp tuyến tính hóa ràng buộc giới hạn truyền tải công suất nhánh; (3) Áp dụng khái niệm phụ tải giả tưởng để xây dựng phương pháp giải bài toán OPF trong lưới phân phối sử dụng quy hoạch tuyến tính; (4) So sánh lời giải của phương pháp đề xuất với lời giải đạt được từ mô hình trào lưu công suất tối ưu phi tuyến tổng quát.

Bài báo gồm bốn phần. Phần 2 trình bày phương pháp nghiên cứu, bao gồm bài toán trào lưu công suất tối ưu tổng quát, kỹ thuật tuyến tính các ràng buộc phi tuyến, mô hình trào lưu công suất tối ưu tuyến tính sử dụng tải giả tưởng. Phần 3 trình bày các kết quả tính toán và thảo luận khi áp dụng mô hình đề xuất cho lưới điện phân phối 33 nút IEEE. Những kết luận và hướng nghiên cứu trong tương lai được trình bày trong phần 4.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Bài toán trào lưu công suất tối ưu tổng quát cho lưới điện phân phối (ACOPF)

Trong bài báo này, giả sử rằng lưới điện phân phối vận hành theo cơ chế thị trường (thị trường bán lẻ), trong đó, các nguồn điện phân tán chào giá để bán điện với bản chào nhiều block. Khi đó, đơn vị vận hành lưới điện phân phối cần giải bài toán trào lưu công suất tối ưu để xác định công suất phát tối ưu của các DG và giá biên nút phân phối (DLMP). Hàm mục tiêu của bài toán trào lưu công suất tối ưu này là cực tiểu tổng chi phí của lưới điện phân phối, bao gồm chi phí mua điện từ các nguồn điện phân tán và chi phí mua điện từ lưới điện truyền tải.

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{b=1}^{N_i} C_{Gib} P_{Gib} \quad (1)$$

thỏa mãn các ràng buộc:

$$\sum_{i=1}^N P_{Gi} = \sum_{i=1}^N P_{Di} + \Delta P \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N Q_{Gi} = \sum_{i=1}^N Q_{Di} + \Delta Q \quad (3)$$

$$P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \leq S_{ij,\max}^2; \quad ij \in \Omega_L \quad (4)$$

$$P_{Gi,\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,\max}; \quad i = 1, \dots, N \quad (5)$$

$$Q_{Gi,\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,\max}; \quad i = 1, \dots, N \quad (6)$$

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max}; \quad i = 1, \dots, N \quad (7)$$

$$0 \leq P_{Gib} \leq P_{Gib}^{\max}; \quad \forall i, \forall b \quad (8)$$

$$P_{Gi} = \sum_{b=1}^{N_i} P_{Gib}; \quad \forall i \quad (9)$$

trong đó, N là tổng số nút của lưới điện; N_i là tổng số block chào giá của tổ máy DG thứ i ; C_{Gib} là giá chào tương ứng với block thứ b của tổ máy DG thứ i ; P_{Gib} là công suất phát ứng với block b của tổ máy i ; P_{Gi} và Q_{Gi} lần lượt là công suất tác dụng và công suất phản kháng của nguồn điện tại nút thứ i ; P_{Di} và Q_{Di} lần lượt là công suất tác dụng và công suất phản kháng của phụ tải tại nút thứ i ; ΔP và ΔQ là tổn thất công suất tác dụng và tổn thất công suất phản kháng của lưới điện; P_{ij} và Q_{ij} lần lượt là công suất tác dụng và công suất phản kháng trên đường dây ij tại nút i ; $S_{ij,\max}$ là giới hạn truyền tải công suất trên đường dây ij ; Ω_L là tập các nhánh của lưới điện; $P_{Gi,\min}$ và $P_{Gi,\max}$ lần lượt là công suất tác dụng nhỏ nhất và lớn nhất của tổ máy thứ i ; $Q_{Gi,\min}$ và $Q_{Gi,\max}$ lần lượt là công suất phản kháng tối thiểu và tối đa của tổ máy thứ i ; U_i là điện áp tại nút i ; $U_{i,\min}$ và $U_{i,\max}$ lần lượt là giới hạn dưới và giới hạn trên của điện áp tại nút i ; $P_{Gib}^{\max}$ là công suất phát lớn nhất ứng với block b của tổ máy i .

Ràng buộc (2) và (3) là hệ phương trình cân bằng công suất tác dụng và công suất phản kháng của toàn lưới điện. Ràng buộc (4) đảm bảo giới hạn dòng công suất truyền tải trên các nhánh. Biểu thức (5) biểu diễn giới hạn công suất tác dụng phát của nguồn điện. Giới hạn công suất phản kháng của nguồn điện được mô tả trong (6). Biểu thức (7) mô tả giới hạn điện áp nút. Ràng buộc (8) mô tả giới hạn công suất phát từng block. Biểu thức (9) mô tả rằng công suất phát của tổ máy bằng tổng công suất của tất cả các block được chấp nhận.

Mô hình trào lưu công suất tối ưu tổng quát (1)-(3) có dạng phi tuyến do hệ phương trình trào lưu công suất (2)-(3) và ràng buộc giới hạn truyền tải công suất (4). Mô hình tối ưu phi tuyến có nhược điểm là thời gian tính toán chậm và không khả thi trong các ứng dụng thời gian thực.

2.2. Kỹ thuật tuyến tính hóa các ràng buộc phi tuyến

2.2.1. Tuyến tính hóa hệ phương trình trào lưu công suất

Giả sử nút trạm nguồn của lưới phân phối (điểm kết nối với lưới truyền tải) được đánh số 1. Hệ phương trình trào lưu công suất của lưới phân phối được biểu diễn như sau:

$$\sum_{k \in \Omega_{pr(i)}} \left(P_{ki} - r_{ki} \frac{P_{ki}^2 + Q_{ki}^2}{U_k^2} \right) - \sum_{j \in \Omega_{cr(i)}} P_{ij} = P_{Di} - P_{Gi}; \quad i = 2, \dots, N \quad (10)$$

$$\sum_{k \in \Omega_{pr(i)}} \left(Q_{ki,t} - x_{ki} \frac{P_{ki}^2 + Q_{ki}^2}{U_k^2} \right) - \sum_{j \in \Omega_{cr(i)}} Q_{ij} = Q_{Di} - Q_{Gi}; \quad i = 2, \dots, N \quad (11)$$

$$U_i^2 - U_j^2 - 2(r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} = 0; \quad \forall j \in \Omega_{cr(i)}; i = 1, \dots, N \quad (12)$$

trong đó, r_{ij} và x_{ij} lần lượt là điện trở và điện kháng của đường dây ij ; $\Omega_{pr(i)}$ là tập các nút kết nối và cung cấp điện trực tiếp cho nút i ; $\Omega_{cr(i)}$ là tập các nút kết nối và nhận điện trực tiếp từ nút i .

Trong chế độ vận hành bình thường, tổn thất công suất trên các đường dây thường nhỏ hơn nhiều với dòng công suất nhánh. Do đó, thành phần tổn thất công suất nhánh có thể được bỏ qua. Ngoài ra, mô-đun điện áp nút thường xấp xỉ bằng 1 pu.

$$(U_i - 1)^2 = U_i^2 - 2U_i + 1 \approx 0 \quad (13)$$

Thế (13) vào (12), ta có:

$$U_j = U_i - (r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) \quad (14)$$

Khi đó, mô hình trào lưu công suất tuyến tính của lưới điện phân phối được mô tả như sau:

$$\sum_{k \in \Omega_{pr(i)}} P_{ki} - \sum_{j \in \Omega_{cr(i)}} P_{ij} = P_{Di} - P_{Gi}; \quad i = 2, \dots, N \quad (15)$$

$$\sum_{k \in \Omega_{pr(i)}} Q_{ki} - \sum_{j \in \Omega_{cr(i)}} Q_{ij} = Q_{Di} - Q_{Gi}; \quad i = 2, \dots, N \quad (16)$$

$$U_j = U_i - (r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij}); \quad \forall j \in \Omega_{cr(i)}; i = 1, \dots, N \quad (17)$$

2.2.2. Tuyến tính hóa ràng buộc giới hạn truyền tải công suất

Tuyến tính hóa ràng buộc (4) sử dụng đa giác đều [14] được mô tả như Hình 1.

Độ dài lớn nhất từ dây cung bc đến cung tròn bc đặc trưng cho sai số của tuyến tính:

$$e_{\max} = S - \sqrt{S^2 - (L_n/2)^2} \quad (18)$$

trong đó, S là bán kính của đường tròn và L_n là độ dài dây cung của phân đoạn thứ n .

Mối quan hệ giữa độ dài dây cung L_n và góc chắn cung của phân đoạn thứ n :

$$L_n = \sqrt{2S} \sqrt{1 - \cos(\Delta\theta_n)} \quad (19)$$

Thay L_n trong (18) vào (19), ta có:

$$\Delta\theta_n = \cos^{-1} \left[2(1 - e_{\max} / S)^2 - 1 \right] \quad (20)$$

Tuyến tính hóa sử dụng đa giác đều được biểu diễn như sau:

$$L_n = L_{\text{reg}}; e_{\max} = e_{\text{reg}}; \quad n = 1, \dots, M_{\text{reg}} \quad (21)$$

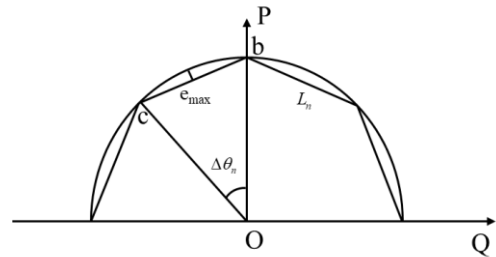
$$\Delta\theta_n = \Delta\theta_{\text{reg}} = 2\pi / M_{\text{reg}}; \quad n = 1, \dots, M_{\text{reg}} \quad (22)$$

$$M_{\text{reg}} = \frac{2\pi}{\cos^{-1} \left[2(1 - e_{\text{reg}} / S_i)^2 - 1 \right]} \quad (23)$$

trong đó, M_{reg} là tổng số phân đoạn tuyến tính.

Từ biểu thức (21)-(23) có thể thấy rằng, khi cho trước e_{reg} có thể xác định được số phân đoạn tuyến tính hóa, góc chấn cung và độ dài dây cung của các phân đoạn.

Khi đó, ràng buộc giới hạn công suất nhánh ij có thể được tuyến tính hóa sử dụng đa giác đều có M cạnh như sau:



Hình 1. Tuyến tính hóa đa giác đều

$$L_n : \alpha_{n,0} P_{ij} + \alpha_{n,1} Q_{ij} + \alpha_{n,2} S_{ij,\max} \leq 0, \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (24)$$

trong đó, $\alpha_{n,0}, \alpha_{n,1}$ và $\alpha_{n,2}$ là các hệ số của các ràng buộc được tuyến tính hóa.

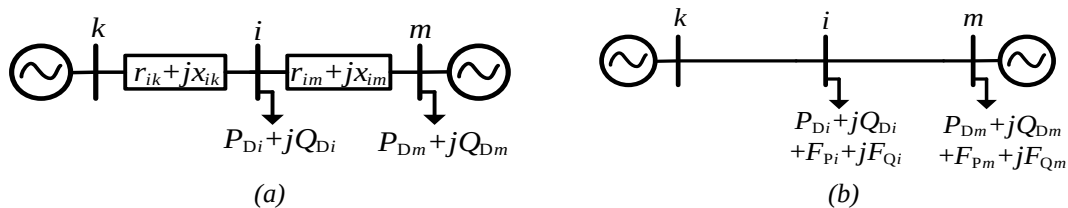
Vì các đỉnh của đa giác đều nằm trên chu vi của đường tròn nên ta có thể xác định được tọa độ của các đỉnh này. Do đó, các hệ số tuyến tính hóa trong (24) được tính toán.

Trong bài báo này, hệ số M được lựa chọn bằng 12 để sai số $e_{\max} < 1\%$ và không làm tăng nhiều kích cỡ của mô hình tối ưu.

2.3. Mô hình trào lưu công suất tối ưu tuyến tính sử dụng phụ tải giả tưởng

2.3.1. Khái niệm về phụ tải giả tưởng

Phụ tải giả tưởng (FND) được sử dụng để biểu diễn tổn thất công suất của lưới điện. Ý tưởng của phụ tải giả tưởng là chia đôi tổn thất công suất trên đường dây thành hai phần bằng nhau và cộng vào công suất phụ tải tại hai đầu của đường dây đó [15]. Mô hình lưới phân phối với phụ tải giả tưởng được minh họa trong Hình 2.



Hình 2. (a) Mô hình lưới điện phân phối có tổn thất với điện trở và điện kháng nhánh;
(b) Mô hình lưới phân phối có tổn thất với tải giả tưởng

Phụ tải giả tưởng tại nút i được xác định như sau:

$$F_{Pi} = \frac{1}{2} \sum_{j \in \Omega_i} r_{ij} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2}; \quad F_{Qi} = \frac{1}{2} \sum_{j \in \Omega_i} x_{ij} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} \quad (25)$$

trong đó, Ω_i là tập các nút được kết nối trực tiếp với nút i .

2.3.2. Mô hình trào lưu công suất tối ưu tuyến tính sử dụng phụ tải giả tưởng

Sử dụng hệ phương trình trào lưu công suất tuyến tính ở mục 2.2.1 và phụ tải giả tưởng (FND) trong mục 2.3.1, mô hình trào lưu công suất tối ưu (OPF) tuyến tính của lưới điện phân phối được mô tả dưới đây. Hàm mục tiêu:

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{b=1}^{N_i} C_{Gib} P_{Gib} \quad (26)$$

thỏa mãn các ràng buộc:

$$\sum_{k \in \Omega_{pr(i)}} P_{ki} - \sum_{j \in \Omega_{cr(i)}} P_{ij} = P_{Di} - P_{Gi} + F_{pi}; \quad i = 2, \dots, N \quad (27)$$

$$\sum_{k \in \Omega_{pr(i)}} Q_{ki} - \sum_{j \in \Omega_{cr(i)}} Q_{ij} = Q_{Di} - Q_{Gi} + F_{Qi}; \quad i = 2, \dots, N \quad (28)$$

$$U_j = U_i - (r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}); \quad \forall j \in \Omega_{cr(i)}; i = 1, \dots, N \quad (29)$$

$$P_{Gi, \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi, \max}; \quad i = 1, \dots, N \quad (30)$$

$$\frac{-P_{Gi} \sqrt{1 - (\cos \varphi_{\min})^2}}{\cos \varphi_{\min}} \leq Q_{Gi} \leq \frac{P_{Gi} \sqrt{1 - (\cos \varphi_{\min})^2}}{\cos \varphi_{\min}}; \quad i = 2, \dots, N \quad (31)$$

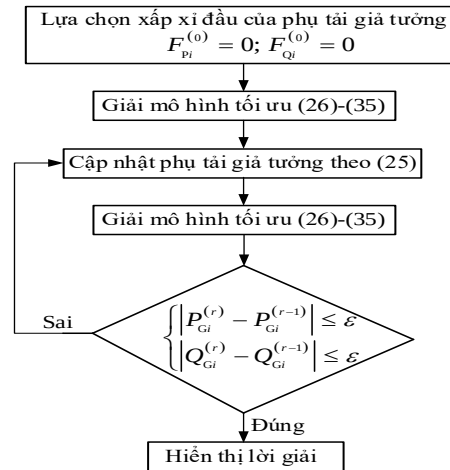
$$U_{i, \min} \leq U_i \leq U_{i, \max}; \quad i = 1, \dots, N \quad (32)$$

$$\alpha_{n,0} P_{ij} + \alpha_{n,1} Q_{ij} + \alpha_{n,2} S_{ij, \max} \leq 0; \quad n = 1, \dots, 12 \quad (33)$$

$$0 \leq P_{Gib} \leq P_{Gib}^{\max}; \quad \forall i, \forall b \quad (34)$$

$$P_{Gi} = \sum_{b=1}^{N_i} P_{Gib}; \quad \forall i \quad (35)$$

Hàm mục tiêu (36) là cực tiểu tổng chi phí của lưới điện phân phối, bao gồm chi phí mua điện từ thị trường bán buôn và chi phí mua điện từ các DG. Biểu thức (27), (29) là hệ phương trình trào lưu công suất tuyến tính sử dụng mô hình tải giả tưởng. Ràng buộc (30) là giới hạn công suất tác dụng phát của nguồn điện. Biểu thức (31) đảm bảo hệ số công suất tối thiểu tại điểm đầu nối của nguồn điện phân tán với lưới phân phối. Trong bài báo này, hệ số công suất tối thiểu của nguồn điện phân tán tại điểm kết nối với lưới điện được lấy bằng 0,95 cho cả miền phát và tiêu thụ công suất phản kháng. Ràng buộc (32) là giới hạn điện áp nút. Ràng buộc (33) mô tả giới hạn truyền tải công suất trên các đường dây được tuyến tính hóa.



Hình 3. Lưu đồ thuật toán đề xuất

Vì tổn thất công suất trên các đường dây của lưới điện là một đại lượng chưa biết nên thuật toán lặp được đề xuất để giải mô hình trào lưu công suất tối ưu tuyến tính (26)-(35). Hình 3 là lưu đồ thuật toán của phương pháp lặp đề xuất, trong đó r là chỉ số bước lặp, ε là sai số cho phép và trong nghiên cứu này $\varepsilon = 10^{-6}$ kVA. Thuật toán gồm các bước như sau:

Bước 1: Lựa chọn xấp xỉ đầu của phụ tải giả tưởng: F_{pi} và F_{Qi} .

Bước 2: Giải mô hình tối ưu (26)-(35) để xác định công suất phát, dòng công suất nhánh và điện áp các nút.

Bước 3: Cập nhật xấp xỉ mới của phụ tải giả tưởng sử dụng (37).

Bước 4: Giải mô hình tối ưu (26)-(35) để xác định công suất phát, dòng công suất nhánh và điện áp các nút.

Bước 5: Kiểm tra trị số công suất phát trong hai bước lặp liên tiếp. Nếu sự sai khác về công suất phát trong hai bước lặp liên tiếp nhỏ hơn hoặc bằng sai số cho trước thì thuật toán dừng. Ngược lại, ta quay lại Bước 3.

3. Kết quả tính toán và thảo luận

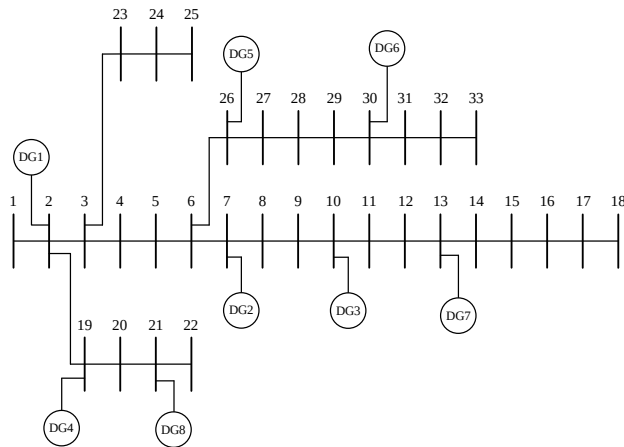
Trong mục này, mô hình OPF đã xây dựng ở mục 2.3.2 được áp dụng tính toán với lưới 33 nút IEEE có nguồn điện phân tán [12]. Mô hình OPF đề xuất được lập trình sử dụng ngôn ngữ GAMS với bộ giải thương mại CPLEX [17]. Tất cả các tính toán được thực hiện trên máy tính cá nhân với vi xử lý AMD Ryzen5 5600G 3,9GHz và 32GB RAM. Mô hình tối ưu phi tuyến tổng quát (ACOPF) trong mục 2.1 được giải sử dụng phần mềm MATPOWER [18] với mục đích đánh giá độ chính xác của mô hình tối ưu tuyến tính đề xuất.

3.1. Dữ liệu lưới điện

Lưới điện 33 nút IEEE với 8 nguồn điện phân tán (DG) được mô tả trong Hình 4. Thông số kỹ thuật của các DG được mô tả ở Bảng 1.

Giá mua điện tại điểm kết nối với lưới truyền tải (LMP) là 10 \$/MWh. Trị số LMP này được tham khảo từ bài báo [19], trong đó giá điện bán buôn ngày tối của thị trường điện PJM (Mỹ) biến thiên từ 10 \$/MWh đến 70 \$/MWh.

Giới hạn dòng công suất truyền tải trên các đường dây của lưới điện là 10-MVA.



Hình 4. Lưới điện 33 nút IEEE

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của các nguồn điện phân tán

Nguồn	Vị trí	P_{Gmin} (kW)	P_{Gmax} (kW)	$\cos\phi_{min}$
DG1	2	0	600	0,95
DG2	7	0	600	
DG3	10	0	800	
DG4	19	0	600	
DG5	26	0	400	
DG6	30	0	500	
DG7	13	0	700	
DG8	21	0	500	

Bản chào gồm 3 block của các DG được mô tả trong Bảng 2.

Bảng 2. Dữ liệu bản chào của các nguồn điện phân tán

Nguồn	Block	Công suất chào (kW)	Giá chào (\$/MWh)	Nguồn	Block	Công suất chào (kW)	Giá chào (\$/MWh)
DG1	1	250	6	DG5	1	150	9
	2	200	8		2	100	14
	3	150	12		3	150	19
DG2	1	250	8	DG6	1	500	7
	2	150	11		2	300	11
	3	200	15		3	200	14

Nguồn	Block	Công suất chào (kW)	Giá chào (\$/MWh)	Nguồn	Block	Công suất chào (kW)	Giá chào (\$/MWh)
DG3	1	350	7	DG7	1	300	7
	2	200	9		2	200	14
	3	250	13		3	200	20
DG4	1	250	8	DG8	1	300	9
	2	200	14		2	100	17
	3	150	16		3	100	25

3.2. Kết quả tính toán

Kết quả tính toán điện áp nút sử dụng mô hình trào lưu công suất tối ưu tuyến tính đề xuất và mô hình trào lưu công suất tối ưu tổng quát (ACOPF) được trình bày trong Bảng 3. Kết quả tính toán cho thấy rằng sự khác nhau lớn nhất về điện áp nút giữa hai mô hình là 0,118% (tại các 32 và 33). Sai số này hoàn toàn có thể bỏ qua trong các áp dụng thực tế.

Bảng 3. So sánh điện áp các nút sử dụng mô hình OPF tuyến tính đề xuất và mô hình OPF tổng quát

Nút	U (pu)		Sai số (%)	Nút	U (pu)		Sai số (%)	Nút	U (pu)		Sai số (%)
	Mô hình đề xuất	ACOPF			Mô hình đề xuất	ACOPF			Mô hình đề xuất	ACOPF	
1	1,0500	1,0500	0,000	12	1,0330	1,0323	0,071	23	1,0388	1,0383	0,049
2	1,0490	1,0490	0,005	13	1,0309	1,0301	0,078	24	1,0325	1,0318	0,072
3	1,0422	1,0418	0,036	14	1,0289	1,0280	0,084	25	1,0294	1,0286	0,081
4	1,0399	1,0395	0,045	15	1,0276	1,0267	0,088	26	1,0316	1,0309	0,076
5	1,0380	1,0374	0,053	16	1,0264	1,0255	0,091	27	1,0303	1,0295	0,080
6	1,0325	1,0317	0,073	17	1,0246	1,0236	0,096	28	1,0241	1,0232	0,097
7	1,0319	1,0311	0,075	18	1,0240	1,0231	0,097	29	1,0199	1,0188	0,107
8	1,0316	1,0308	0,076	19	1,0493	1,0492	0,004	30	1,0185	1,0174	0,110
9	1,0325	1,0318	0,073	20	1,0493	1,0493	0,003	31	1,0147	1,0135	0,116
10	1,0340	1,0332	0,068	21	1,0497	1,0497	0,002	32	1,0139	1,0127	0,118
11	1,0336	1,0329	0,069	22	1,0491	1,0490	0,005	33	1,0136	1,0124	0,118

Kết quả so sánh công suất phát của các nguồn điện sử dụng mô hình tuyến tính đề xuất và mô hình trào lưu công suất tối ưu tổng quát (ACOPF) được trình bày ở Bảng 4. Kết quả tính toán cho thấy rằng sai số lớn nhất về công suất tác dụng và công suất phản kháng phát của các nguồn điện giữa hai mô hình lần lượt là 0,348% và 0,1407%. Sai số này hoàn toàn có thể bỏ qua trong các áp dụng thực tế.

Bảng 4. So sánh công suất phát sử dụng mô hình OPF tuyến tính đề xuất và mô hình OPF tổng quát

Nguồn	P _G (MW)		Sai số (%)	Q _G (MVar)		Sai số (%)
	Mô hình đề xuất	ACOPF		Mô hình đề xuất	ACOPF	
Lưới truyền tải	1,0158	1,0123	0,348	1,4305	1,4285	0,1407
DG1	0,45	0,45	0,000	0,1479	0,1478	0,0541
DG2	0,25	0,25	0,000	0,0822	0,0822	0,0114
DG3	0,55	0,55	0,000	0,1808	0,1808	0,0030
DG4	0,25	0,25	0,000	0,0822	0,0820	0,1931
DG5	0,15	0,15	0,000	0,0493	0,0493	0,0204
DG6	0,50	0,50	0,000	0,1643	0,1643	0,0036
DG7	0,30	0,30	0,000	0,0986	0,0986	0,0090
DG8	0,30	0,30	0,000	0,0986	0,0986	0,0459

4. Kết luận

Bài báo đề xuất mô hình trào lưu công suất tối ưu tuyến tính lặp. Mô hình có xét tổn thất công suất của lưới điện sử dụng phụ tải giả tưởng. Các ràng buộc của mô hình tối ưu đề xuất bao gồm hệ phương trình trào lưu công suất tuyến tính, giới hạn truyền tải công suất có dạng tuyến tính,

giới hạn điện áp nút và các ràng buộc của tổ máy phát. Trong đó, hệ phương trình trào lưu công suất được tuyến tính hóa sử dụng một số giả thiết hoàn toàn phù hợp với vận hành trong thực tế. Ràng buộc giới hạn công suất truyền tải được tuyến tính hóa sử dụng đa giác đều với 12 cạnh. Lưới điện 33 nút IEEE được sử dụng để đánh giá mô hình đề xuất. Các kết quả tính toán cho thấy sai số về công suất phát và điện áp nút giữa mô hình tối ưu tuyến tính đề xuất và mô hình trào lưu công suất tối ưu phi tuyến tổng quát rất nhỏ và có thể bỏ qua trong các áp dụng thực tế. Hướng nghiên cứu trong tương lai là áp dụng mô hình tối ưu tuyến tính đề xuất để tính toán và phân tách các thành phần của giá biên nút trong thị trường lưới phân phối.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] M. Huneault and F. D. Galiana, "A survey of the optimal power flow literature," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 6, no. 2, pp. 762–770, May 1991.
- [2] J. P. Zhan, Q. H. Wu, C. X. Guo, and X. X. Zhou, "Fast λ -iteration method for economic dispatch with prohibited operating zones," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 2, pp. 990–991, 2013.
- [3] B. Kocuk, S. S. Dey, and X. A. Sun, "Strong SOCP relaxations for the optimal power flow problem," *Oper. Res.*, vol. 64, no. 6, pp. 1177–1196, 2016.
- [4] D. G. Ha, T. Le, and N. V. Pham, "Using Second-Order cone programming for power flow analysis considering ZIP load model in power distribution systems," *TNU J. Sci. Technol.*, vol. 228, no. 2, pp. 184–192, Jan. 2023.
- [5] W. Wei, J. Wang, and L. Wu, "Distribution optimal power flow with real-time price elasticity," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 1, pp. 1097–1098, 2017.
- [6] X. Wu, A. J. Conejo, and N. Amjady, "Robust security constrained ACOPF via conic programming: Identifying the worst contingencies," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 6, pp. 5884–5891, 2018.
- [7] Z. Yan and Y. Xu, "Real-time optimal power flow: A lagrangian based deep reinforcement learning approach," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 35, no. 4, pp. 3270–3273, 2020.
- [8] W. Huang, X. Pan, M. Chen, and S. H. Low, "Deepopf-v: Solving ac-opf problems efficiently," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 37, no. 1, pp. 800–803, 2021.
- [9] K. Sun and X. A. Sun, "A two-level ADMM algorithm for AC OPF with global convergence guarantees," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 36, no. 6, pp. 5271–5281, 2021.
- [10] S. Mhanna and P. Mancarella, "An exact sequential linear programming algorithm for the optimal power flow problem," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 37, no. 1, pp. 666–679, 2021.
- [11] P. Li, W. Wu, X. Wang, and B. Xu, "A Data-Driven Linear Optimal Power Flow Model for Distribution Networks," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 38, no. 1, pp. 956–959, Jan. 2023.
- [12] S. R. Vaishya, A. R. Abhyankar, and P. Kumar, "A Novel Loss Sensitivity Based Linearized OPF and LMP Calculations for Active Balanced Distribution Networks," *IEEE Syst. J.*, vol. 17, no. 1, pp. 1340–1351, Mar. 2023.
- [13] M. Usman and F. Capitanescu, "Three Solution Approaches to Stochastic Multi-Period AC Optimal Power Flow in Active Distribution Systems," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 14, no. 1, pp. 178–192, Jan. 2023.
- [14] P. Pareek and A. Verma, "Piecewise Linearization of Quadratic Branch Flow Limits by Irregular Polygon," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 6, pp. 7301–7304, Nov. 2018.
- [15] F. Li and R. Bo, "DCOPF-based LMP simulation: algorithm, comparison with ACOPF, and sensitivity," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 4, pp. 1475–1485, 2007.
- [16] S. H. Dolatabadi, M. Ghorbanian, P. Siano, and N. D. Hatziargyriou, "An enhanced IEEE 33 bus benchmark test system for distribution system studies," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 36, no. 3, pp. 2565–2572, 2020.
- [17] GAMS. [Online]. Available: <https://www.gams.com/> [Accessed Jan. 30, 2023].
- [18] 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," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 1, pp. 12–19, 2010.
- [19] L. Bai, J. Wang, C. Wang, C. Chen, and F. Li, "Distribution Locational Marginal Pricing (DLMP) for Congestion Management and Voltage Support," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 4, pp. 4061–4073, Jul. 2018.