

USING SECOND-ORDER CONE PROGRAMMING FOR POWER FLOW ANALYSIS CONSIDERING ZIP LOAD MODEL IN POWER DISTRIBUTION SYSTEMS

Ha Duy Giang, Le Toan, Pham Nang Van*

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

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	10/11/2022	This paper presents a second-order cone programming (SOCP) model aiming at power flow analysis in radial power distribution systems. Calculation results obtained from this SOCP formulation are almost identical compared to the solutions using the Newton-Raphson method. In addition, the proposed SOCP model facilitates the incorporation of the system of nonlinear and non-convex power flow equations into optimization problems in the radial electrical distribution grid. The optimization problems based on the second-order conic model of the power flow equations are convex; therefore, the solutions to be found are globally optimal. At the same time, the proposed SOCP model considers the variation in power consumption of loads according to the voltage (ZIP load model) using the Newton binomial approximation approach. The developed SOCP model is validated on an IEEE 33-node distribution network using the programming language GAMS and the commercial solver CPLEX.
Revised:	11/01/2023	
Published:	12/01/2023	
KEYWORDS		
Power distribution systems		
Power flow analysis		
Optimization methods		
ZIP load model		
Second-order cone programming (SOCP)		

SỬ DỤNG QUY HOẠCH NÓN BẬC HAI ĐỂ PHÂN TÍCH TRÀO LƯU CÔNG SUẤT CỦA LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI CÓ XÉT MÔ HÌNH TẢI ZIP

Hà Duy Giang, Lê Toàn, Phạm Năng Văn*

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

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT	
Ngày nhận bài: 10/11/2022	Bài báo đề xuất mô hình quy hoạch nón bậc hai (SOCP) để phân tích trào lưu công suất của lưới điện phân phối. Lời giải đạt được từ mô hình quy hoạch nón bậc hai này có sai số rất nhỏ so với lời giải sử dụng phương pháp Newton-Raphson. Ngoài ra, mô hình SOCP đề xuất giúp tích hợp hệ phương trình trào lưu công suất phi tuyến và không lồi vào các bài toán tối ưu hóa trong lưới điện phân phối hình tia. Các bài toán tối ưu sử dụng mô hình nón bậc hai của hệ phương trình trào lưu công suất có dạng lồi và nghiệm tìm được là tối ưu toàn cục. Đồng thời, mô hình SOCP đề xuất có xét sự thay đổi công suất tiêu thụ của phụ tải theo điện áp (mô hình tải ZIP) sử dụng phương pháp xấp xỉ nhị thức Newton. Mô hình quy hoạch nón bậc hai đề xuất được đánh giá trên lưới điện 33 nút IEEE sử dụng ngôn ngữ lập trình GAMS và phần mềm thương mại CPLEX.	
Ngày hoàn thiện: 11/01/2023		
Ngày đăng: 12/01/2023		
TỪ KHÓA		
Lưới điện phân phối		
Phân tích trào lưu công suất		
Phương pháp tối ưu		
Mô hình tải ZIP		
Quy hoạch nón bậc hai (SOCP)		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.6915>

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

1. Giới thiệu

Hiện nay, với sự phát triển của lưới điện thông minh và mức độ tham gia ngày càng cao của các nguồn điện phân tán (DG), lưới điện phân phối có sự thay đổi rõ rệt về cấu trúc, phương thức vận hành và điều khiển. Sự thay đổi này đòi hỏi các mô hình tối ưu mới để nâng cao hiệu quả trong quy hoạch và vận hành lưới điện phân phối. Bài toán chế độ vận hành hệ thống điện được mô tả bằng hệ phương trình trào lưu công suất. Đặc điểm của hệ phương trình này là phi tuyến và không lồi. Do đó, các phương pháp lặp như Gauss-Seidel, Newton-Raphson (NR) và cộng công suất... thường được áp dụng để giải hệ phương trình trào lưu công suất. Tuy nhiên, khi áp dụng các phương pháp lặp này để phân tích trào lưu công suất của lưới điện phân phối, ta cần xét đến các đặc điểm của lưới điện này như tỷ số R/X lớn, cấu trúc hình tia, tích hợp các nguồn DG có khả năng điều chỉnh điện áp và sự không đối xứng. Một số nghiên cứu về phân tích trào lưu công suất và tích hợp hệ phương trình trào lưu công suất của lưới phân phối vào các bài toán tối ưu được trình bày như dưới đây.

Các tác giả [1] đã chỉ ra rằng tỷ số R/X lớn làm giảm khả năng hội tụ của phương pháp Newton-Raphson (trường hợp giải kém). Do đó, với lưới điện phân phối có cấu trúc hình tia, các phương pháp lặp Ladder thường được áp dụng [2]. Tuy nhiên, các kỹ thuật lặp Ladder sẽ không áp dụng được với lưới điện hình tia được tích hợp các DG có khả năng điều chỉnh điện áp [3]. Ngoài ra, do vấn đề mất cân bằng pha nên phương pháp trào lưu công suất một pha không thể được áp dụng cho lưới điện phân phối. Vì vậy, bài báo [4] đã đề xuất phương pháp mô hình mạch tương đương với các biến điện áp và dòng điện để phân tích trào lưu công suất ba pha. Các năm gần đây, sự phát triển của lưới điện thông minh yêu cầu các phương pháp phân tích trào lưu công suất có khả năng tính toán nhanh để áp dụng vào các bài toán điều khiển và vận hành thời gian thực. Do đó, bài báo [5] đã đưa ra phương pháp NR có khả năng tính toán với số phức, tốc độ tính toán nhanh và phù hợp với các bộ vi xử lý hiện nay. Mặc dù vậy, phương pháp này lại không thể áp dụng được vào các bài toán tối ưu do tính toán bằng số phức. Ngoài ra, với sự hình thành của thị trường điện bán lẻ, vấn đề mô hình hóa và tìm lời giải của bài toán cân bằng thị trường một cách hiệu quả đã thu hút rất nhiều các nhà nghiên cứu. Khó khăn chính của các bài toán tối ưu là hệ phương trình trào lưu công suất phi tuyến và không lồi. Để giải quyết vấn đề này, bài báo [6] đã đề xuất mô hình trào lưu công suất tuyến tính cải biên (MD). Tuy nhiên, nhược điểm của các mô hình tuyến tính là gần đúng và có sai số lớn trong nhiều trường hợp. Do đó, các hướng nghiên cứu về kỹ thuật biến đổi hệ phương trình trào lưu công suất như mô hình quy hoạch nón bậc hai (SOCP) đang trở nên phổ biến [7]–[11]. Ngoài ra, sự phụ thuộc của công suất phụ tải theo điện áp đóng góp một phần quan trọng đến công suất nút. Theo tổ chức B.C Hydro, công suất tác dụng và công suất phản kháng của phụ tải thay đổi lần lượt là 1,6% và 3% khi điện áp thay đổi 1% [12]. Vì vậy, việc tích hợp mô hình tải ZIP trong các bài toán quy hoạch và vận hành lưới điện phân phối có ý nghĩa quan trọng. Tuy nhiên, mô hình tải ZIP không thể được tích hợp trực tiếp vào mô hình quy hoạch nón bậc hai.

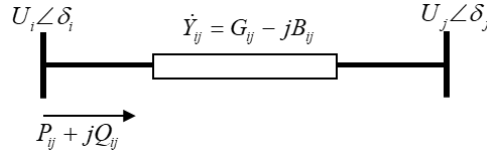
Từ các nghiên cứu đã trình bày ở trên, ta thấy rằng ba nhóm phương pháp chính để phân tích trào lưu công suất của lưới phân phối là kỹ thuật lặp giải trực tiếp hệ phương trình phi tuyến, phương pháp tuyến tính hóa gần đúng và phương pháp nón lồi SOCP. Do đó, mục đích của bài báo là đề xuất mô hình SOCP có xét tải ZIP để phân tích trào lưu công suất của lưới điện phân phối. Các đóng góp chính của bài báo bao gồm: (1) Xây dựng mô hình tải ZP tương đương từ mô hình tải ZIP sử dụng phương pháp xấp xỉ nhị thức Newton; (2) So sánh lời giải của bài toán phân tích trào lưu công suất có xét tải ZIP sử dụng phương pháp SOCP và phương pháp NR; (3) So sánh điện áp nút của lưới điện khi sử dụng mô hình tải ZIP và tải công suất hằng.

Bài báo gồm bốn phần. Phần 2 trình bày phương pháp nghiên cứu, bao gồm mô hình nón bậc hai của hệ phương trình trào lưu công suất, mô hình phụ tải ZP tương đương và mô hình bài toán phân tích trào lưu công suất sử dụng SOCP. Phần 3 áp dụng tính toán 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. Mô hình nón bậc hai của hệ phương trình trào lưu công suất lưới phân phối

Xét đường dây phân phối kết nối hai nút i và j như Hình 1.



Hình 1. Mô hình đường dây lưới phân phối

Dòng công suất trên đường dây ij được biểu diễn như sau:

$$P_{ij} = G_{ij}U_i^2 - G_{ij}U_iU_j \cos \delta_{ij} + B_{ij}U_iU_j \sin \delta_{ij} \quad (1)$$

$$Q_{ij} = B_{ij}U_i^2 - B_{ij}U_iU_j \cos \delta_{ij} - G_{ij}U_iU_j \sin \delta_{ij} \quad (2)$$

trong đó, P_{ij} và Q_{ij} lần lượt là công suất tác dụng và công suất phản kháng tại nút i trên đường dây ij ; G_{ij} và B_{ij} lần lượt là phần thực và phần ảo của tổng dẫn nhánh ij ; U_i và U_j lần lượt là mô-đun điện áp nút i và nút j ; $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ là độ lệch góc pha điện áp giữa nút i với nút j .

Đặt $u_i = U_i^2 / \sqrt{2}$, $R_{ij} = U_iU_j \cos \delta_{ij}$ và $I_{ij} = U_iU_j \sin \delta_{ij}$. Khi đó, với hệ thống điện có N nút (nút nguồn được đánh số là 1), từ (1) và (2), ta có hệ phương trình cân bằng công suất nút:

$$\sum_{j \in \Omega_i} P_{ij} = \sqrt{2}u_i \sum_{j \in \Omega_i} G_{ij} - \sum_{j \in \Omega_i} (G_{ij}R_{ij} - B_{ij}I_{ij}) = P_{Gi} - P_{Di}; \quad i = 2, 3, \dots, N \quad (3)$$

$$\sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij} = \sqrt{2}u_i \sum_{j \in \Omega_i} B_{ij} - \sum_{j \in \Omega_i} (B_{ij}R_{ij} + G_{ij}I_{ij}) = Q_{Gi} - Q_{Di}; \quad i = 2, 3, \dots, N \quad (4)$$

trong đó, P_{Gi} và P_{Di} lần lượt là công suất tác dụng của nguồn DG và phụ tải tại nút i ; Q_{Gi} và Q_{Di} lần lượt là công suất phản kháng của nguồn DG và phụ tải tại nút i ; Ω_i là tập các nút kết nối với nút i .

Mối quan hệ giữa R_{ij} và I_{ij} cho mỗi đường dây ij :

$$2u_iu_j = R_{ij}^2 + I_{ij}^2 \quad (5)$$

Biểu thức (3), (4) và (5) là hệ phương trình trào lưu công suất nút của lưới phân phối hình tia. Biểu thức (5) là phương trình phi tuyến làm cho hệ phương trình trào lưu công suất không lồi. Bằng cách biến đổi ràng buộc đẳng thức này thành ràng buộc bất đẳng thức, ta được:

$$2u_iu_j \geq R_{ij}^2 + I_{ij}^2 \quad (6)$$

Biểu thức (6) có dạng lồi và các biểu thức (3), (4) và (6) mô tả dạng nón bậc hai của hệ phương trình trào lưu công suất.

2.2. Mô hình nón bậc hai của tải ZIP

Ta có nhị thức Newton:

$$(1+x)^n = \sum_{k=0}^n C_n^k x^k \quad (7)$$

Khi $|x| \ll 1$ và $|nx| \ll 1$, biểu thức (7) có thể được xấp xỉ thành hai số hạng đầu tiên.

Trong chế độ vận hành bình thường, mô-đun điện áp của tất cả các nút xấp xỉ bằng 1 pu nên áp dụng (7), ta có:

$$U_i^\eta = (1 + \Delta U_i)^\eta \approx 1 + \eta \Delta U_i \quad (8)$$

trong đó, U_i là mô-đun điện áp nút i (pu) và η là hằng số sao cho $|\eta \Delta U_i| \ll 1$.

Với $\eta = 2$ và $U_i = 1 + \Delta U_i$, ta có:

$$U_i^2 = (1 + \Delta U_i)^2 = 1 + 2\Delta U_i \quad (9)$$

Mô hình tải ZIP có dạng đa thức bậc hai được biểu diễn như sau:

$$P_{Di} = P_{D0i} (a_i^p U_i^2 + b_i^p U_i + c_i^p); \quad a_i^p + b_i^p + c_i^p = 1 \quad (10)$$

trong đó, a_i^p, b_i^p và c_i^p lần lượt là các hệ số của mô hình tải ZIP tại nút i ; P_{D0i} là công suất tác dụng của phụ tải nút i tại điện áp định mức (pu).

Các hệ số của mô hình tải ZIP a^p, b^p và c^p (chỉ số tương ứng với nút i được bỏ qua) có thể được xác định sử dụng phương pháp hồi quy. Khi đó, các hệ số này là nghiệm của bài toán tối ưu có hàm mục tiêu và ràng buộc dưới đây.

$$\min \sum_{j=1}^{N_V} [P_{D0} (a^p U_j^2 + b^p U_j + c^p) - P_{Dj}]^2 \quad (11)$$

trong đó, $[U_j, P_{Dj}]$ là tập dữ liệu đo được thứ j và N_V là tổng số tập dữ liệu đo được. thỏa mãn ràng buộc:

$$a^p + b^p + c^p = 1 \quad (12)$$

Bài toán tối ưu (11)-(12) có thể được giải sử dụng phương pháp hàm Lagrange. Hàm Lagrange:

$$L = \sum_{j=1}^{N_V} [P_{D0} (a^p U_j^2 + b^p U_j + c^p) - P_{Dj}]^2 + \lambda (a^p + b^p + c^p - 1) \quad (13)$$

Điều kiện tối ưu theo định lý Karush-Kuhn-Tucker:

$$\frac{\partial L}{\partial a^p} = 2P_{D0} \sum_{j=1}^{N_V} U_j^2 [P_{D0} (a^p U_j^2 + b^p U_j + c^p) - P_{Dj}] + \lambda = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial L}{\partial b^p} = 2P_{D0} \sum_{j=1}^{N_V} U_j [P_{D0} (a^p U_j^2 + b^p U_j + c^p) - P_{Dj}] + \lambda = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial L}{\partial c^p} = 2P_{D0} \sum_{j=1}^{N_V} [P_{D0} (a^p U_j^2 + b^p U_j + c^p) - P_{Dj}] + \lambda = 0 \quad (16)$$

$$a^p + b^p + c^p = 1 \quad (17)$$

Giải hệ phương trình (14)-(17), ta được các hệ số của mô hình tải ZIP tương ứng với công suất tác dụng. Các hệ số của mô hình tải ZIP tương ứng với công suất phản kháng cũng được xác định tương tự. Lưu ý rằng, vì mô hình tối ưu có dạng toàn phương và lồi nên nghiệm đạt được là tối ưu toàn cục.

Mô hình tải ZIP có thể được xấp xỉ thành mô hình ZP tương đương với các hệ số có thể đạt được từ mô hình tải ZIP ban đầu. Từ các biểu thức (9) và (10), ta có:

$$\begin{aligned} P_{Di} &= P_{D0i} [c_i^p + a_i^p U_i^2 + b_i^p (1 + \Delta U_i)] \approx P_{D0i} \left[c_i^p + a_i^p U_i^2 + b_i^p \left(1 + \frac{U_i^2 - 1}{2} \right) \right] \\ &\approx P_{D0i} \left[\left(c_i^p + \frac{b_i^p}{2} \right) + \left(a_i^p + \frac{b_i^p}{2} \right) U_i^2 \right] \approx P_{D0i} \left[\left(c_i^p + \frac{b_i^p}{2} \right) + \left(a_i^p + \frac{b_i^p}{2} \right) \sqrt{2} u_i \right] \end{aligned} \quad (18)$$

Tương tự, biểu thức xác định công suất phản kháng trong mô hình ZP tương đương được biểu diễn như sau:

$$Q_{Di} = Q_{D0i} \left[\left(c_i^Q + \frac{b_i^Q}{2} \right) + \left(a_i^Q + \frac{b_i^Q}{2} \right) \sqrt{2} u_i \right] \quad (19)$$

2.3. Mô hình quy hoạch nón bậc hai

Trào lưu công suất của lưới điện phân phối trong khoảng thời gian T có xét mô hình tải ZIP được phân tích dựa trên mô hình quy hoạch nón bậc hai với hàm mục tiêu:

$$\max \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in \Omega_L} R_{ij,t} \quad (20)$$

thỏa mãn các ràng buộc:

$$\sum_{j \in \Omega_i} P_{ij,t} = \sqrt{2} u_{i,t} \sum_{j \in \Omega_i} G_{ij} - \sum_{j \in \Omega_i} (G_{ij} R_{ij,t} - B_{ij} I_{ij,t}) = P_{Gi,t} - P_{Di,t}; \quad i = 2, 3, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (21)$$

$$\sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij,t} = \sqrt{2} u_{i,t} \sum_{j \in \Omega_i} B_{ij} - \sum_{j \in \Omega_i} (B_{ij} R_{ij,t} + G_{ij} I_{ij,t}) = Q_{Gi,t} - Q_{Di,t}; \quad i = 2, 3, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (22)$$

$$2u_{i,t} u_{j,t} \geq R_{ij,t}^2 + I_{ij,t}^2; \quad \forall ij \in \Omega_L; t = 1, \dots, T \quad (23)$$

$$u_{1,t} = \frac{U_{1,t}^2}{\sqrt{2}}, \quad u_{i,t} \geq 0; \quad i = 2, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (24)$$

$$R_{ij,t} \geq 0; \quad \forall ij \in \Omega_L; t = 1, \dots, T \quad (25)$$

$$P_{Di,t} = P_{D0i} \left[\left(c_i^P + \frac{b_i^P}{2} \right) + \left(a_i^P + \frac{b_i^P}{2} \right) \sqrt{2} u_{i,t} \right]; \quad i = 2, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (26)$$

$$Q_{Di,t} = Q_{D0i} \left[\left(c_i^Q + \frac{b_i^Q}{2} \right) + \left(a_i^Q + \frac{b_i^Q}{2} \right) \sqrt{2} u_{i,t} \right]; \quad i = 2, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (27)$$

trong đó, Ω_L là tập các nhánh của lưới điện; $P_{Gi,t}$ và $Q_{Gi,t}$ lần lượt là công suất tác dụng và công suất phản kháng của DG tại nút i trong thời điểm t ; $P_{Di,t}$ và $Q_{Di,t}$ lần lượt là công suất tác dụng và công suất phản kháng của phụ tải tại nút i trong thời điểm t .

Nghiệm của mô hình tối ưu SOCP (20)-(27) là lời giải của bài toán phân tích trào lưu công suất lưới điện phân phối có xét mô hình phụ tải phụ thuộc điện áp. Lời giải của bài toán phân tích trào lưu công suất đạt được khi hai vế của (23) bằng nhau.

3. Kết quả tính toán và thảo luận

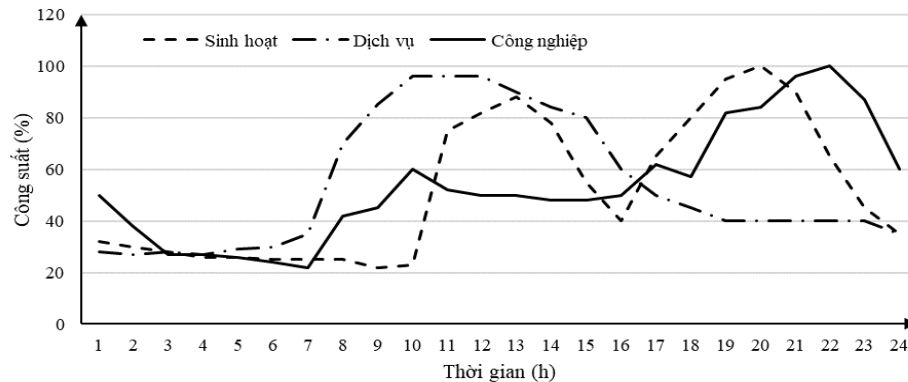
Trong mục này, mô hình SOCP với tải ZIP đã xây dựng ở mục 2 được áp dụng tính toán với lưới 33 nút IEEE có DG [13]. Mô hình SOCP được lập trình sử dụng ngôn ngữ GAMS [14] với phần mềm thương mại CPLEX. Tất cả các tính toán được thực hiện trên máy tính cá nhân với vi xử lý AMD Ryzen 5 5600G 3,9GHz và 32GB RAM. Phân tích trào lưu công suất theo phương pháp Newton-Raphson (NR) trên phần mềm POWERWORLD [15] được sử dụng để đánh giá độ chính xác của phương pháp đề xuất. Điện áp vận hành của nguồn điện tại nút 1 bằng 1,05 pu.

3.1. Dữ liệu tính toán

Trong bài báo này, ba loại phụ tải được xem xét là sinh hoạt, dịch vụ và công nghiệp tương ứng với đồ thị phụ tải được mô tả trong Hình 2. Kiểu phụ tải tương ứng với các nút của lưới điện

được biểu diễn trong Bảng 1. Các hệ số của mô hình tải ZIP của các loại phụ tải trong hệ đơn vị tương đối được biểu diễn như sau [16]:

- Sinh hoạt: $a_i^p = 0,24; b_i^p = 0,62; c_i^p = 0,13; a_i^q = 2,44; b_i^q = -1,94; c_i^q = 0,50$
- Dịch vụ: $a_i^p = 0,16; b_i^p = 0,80; c_i^p = 0,04; a_i^q = 3,26; b_i^q = -3,10; c_i^q = 0,84$
- Công nghiệp: $a_i^p = -0,07; b_i^p = 0,24; c_i^p = 0,83; a_i^q = 1,00; b_i^q = 0; c_i^q = 0$



Hình 2. Đồ thị phụ tải

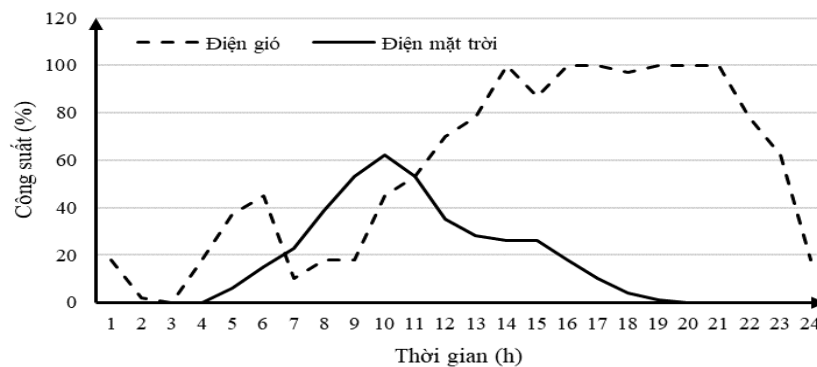
Bảng 1. Tính chất của phụ tải

Phụ tải	Nút
Sinh hoạt	2, 5, 12, 14, 19, 22, 31, 32
Dịch vụ	4, 7, 8, 10, 11, 13, 15, 17, 20, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 33
Công nghiệp	3, 6, 9, 16, 18, 21, 27

Ngoài ra, lưới điện phân phối có đặt các DG với các thông số của DG được mô tả trong Bảng 2 và công suất phát của DG trong 24h được biểu diễn trong Hình 3.

Bảng 2. Thông số của DG

Nguồn	Nút	$P_{\max}$ (kW)	$\cos\phi$
Điện gió	10	400	0,95
	33	300	
Điện mặt trời	7	350	0,95
	14	450	



Hình 3. Công suất phát của DG

3.2. Kết quả tính toán

Kết quả tính toán điện áp nút tại thời điểm $t = 12$ có xét tải ZIP sử dụng phương pháp SOCP đề xuất và phương pháp NR được trình bày trong Bảng 3. Kết quả tính toán cho thấy rằng sai số

lớn nhất về điện áp nút giữa hai phương pháp là $2,23 \times 10^{-3}\%$ (nút 18). Sai số này hoàn toàn có thể bỏ qua trong các áp dụng thực tế.

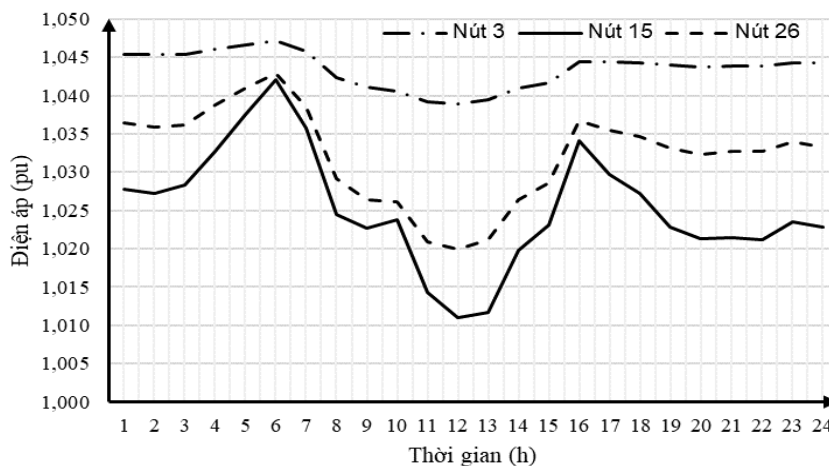
Bảng 3. So sánh điện áp nút theo phương pháp SOCP và Newton-Raphson tại $t = 12$

Nút	U (pu)		Sai số ($10^{-3}\%$)	Nút	U (pu)		Sai số ($10^{-3}\%$)	Nút	U (pu)		Sai số ($10^{-3}\%$)
	SOCP	NR			SOCP	NR			SOCP	NR	
1	1,0500	1,0500	0,000	12	1,0152	1,0152	1,388	23	1,0356	1,0356	0,495
2	1,0480	1,0480	0,044	13	1,0126	1,0127	1,335	24	1,0292	1,0292	0,221
3	1,0390	1,0390	0,339	14	1,0119	1,0119	1,523	25	1,0261	1,0261	0,327
4	1,0349	1,0349	0,091	15	1,0110	1,0110	2,109	26	1,0200	1,0200	0,081
5	1,0311	1,0311	0,324	16	1,0102	1,0102	1,577	27	1,0183	1,0183	0,258
6	1,0213	1,0213	0,036	17	1,0089	1,0090	1,618	28	1,0104	1,0105	0,201
7	1,0198	1,0198	0,601	18	1,0087	1,0087	2,230	29	1,0049	1,0049	0,228
8	1,0182	1,0182	0,102	19	1,0476	1,0476	0,487	30	1,0027	1,0027	0,275
9	1,0171	1,0171	0,260	20	1,0449	1,0449	0,368	31	1,0012	1,0012	0,310
10	1,0163	1,0163	0,488	21	1,0444	1,0444	0,069	32	1,0011	1,0011	0,033
11	1,0158	1,0159	0,981	22	1,0439	1,0439	0,358	33	1,0015	1,0015	0,422

Kết quả so sánh tổng tổn thất công suất tại thời điểm $t = 12$ giữa phương pháp SOCP và phương pháp NR được mô tả trong Bảng 4. Kết quả tính toán cho thấy rằng sai số về tổng tổn thất công suất tác dụng và tổng tổn thất công suất phản kháng theo phương pháp SOCP so với phương pháp NR lần lượt là 0,015% và 0,267%. Do đó, mô hình SOCP hoàn toàn phù hợp để tính toán trào lưu công suất của lưới điện phân phối.

Bảng 4. So sánh tổng tổn thất công suất theo phương pháp SOCP và NR tại $t = 12$

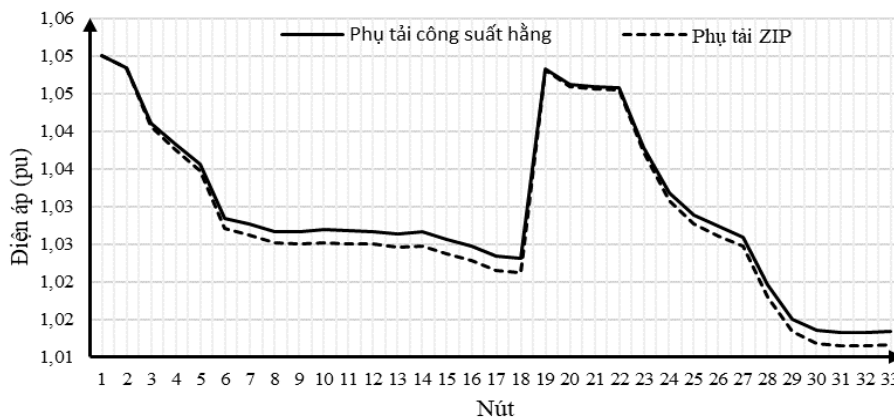
	SOCP	NR	Sai số (%)
ΔP (kW)	76,552	76,563	0,015
ΔQ (kVAr)	49,727	49,860	0,267



Hình 4. Phân bố điện áp trong 24h tại các nút 3, 15 và 26

Phân bố điện áp trong 24h tại các nút 3, 15 và 26 được biểu diễn trong Hình 4. Tại $t = 6$, điện áp tại các nút 3, 15 và 26 là lớn nhất. Tại thời điểm này, công suất tiêu thụ của phụ tải sinh hoạt, dịch vụ và công nghiệp lần lượt bằng 25%, 30% và 24% phụ tải cực đại; công suất phát của điện gió và điện mặt trời lần lượt bằng 45% và 15% công suất phát cực đại. Tại $t = 12$, điện áp tại các nút khảo sát là nhỏ nhất. Tại thời điểm này, công suất tiêu thụ của phụ tải sinh hoạt, dịch vụ và công nghiệp lần lượt bằng 82%, 96% và 50% phụ tải cực đại; công suất phát của điện gió và điện mặt trời lần lượt bằng 70% và 30% công suất phát cực đại.

Phân bố điện áp khi xét phụ tải công suất hằng và phụ tải ZIP tại thời điểm $t = 10$ được mô tả trong Hình 5. Hình vẽ này cho thấy rằng điện áp tại tất cả các nút trong hai trường hợp đều lớn hơn 1 pu. Ngoài ra, điện áp tại tất cả các nút (trừ nút nguồn) với mô hình phụ tải ZIP nhỏ hơn so với mô hình phụ tải công suất hằng. Điều này là do phụ tải ZIP mô hình chính xác sự phụ thuộc của công suất phụ tải vào điện áp nên khi điện áp lớn hơn 1 pu thì công suất phụ tải theo mô hình ZIP lớn hơn mô hình công suất hằng. Vì vậy, tổn thất điện áp của lưới điện với mô hình tải ZIP lớn hơn so với mô hình tải công suất hằng.



Hình 5. Phân bố điện áp với tải công suất hằng và tải ZIP tại thời điểm $t = 10$

4. Kết luận

Bài báo đề xuất mô hình quy hoạch nón bậc hai (SOCP) để tính toán trào lưu công suất của lưới điện phân phối có xét mô hình tải phụ thuộc điện áp (mô hình tải ZIP). Mô hình SOCP này bao gồm mô hình nón bậc hai của hệ phương trình trào lưu công suất và tải ZP tương đương. Tải ZP tương đương này được biến đổi từ mô hình tải ZIP sử dụng khai triển nhị thức Newton. Lưới điện 33 nút IEEE được sử dụng để đánh giá mô hình đề xuất. Các kết quả tính toán trào lưu công suất theo phương pháp SOCP và phương pháp Newton-Raphson có thể coi là hoàn toàn giống nhau. Ngoài ra, mô hình nón bậc hai của hệ phương trình trào lưu công suất có thể dễ dàng tích hợp vào các bài toán tối ưu trong lưới phân phối. Khi đó, các bài toán tối ưu này có dạng lồi và đảm bảo tìm được lời giải tối ưu toàn cục. Đồng thời, bài báo này cũng cho thấy rằng mô hình tải ZIP có ảnh hưởng đến điện áp tại các nút và do đó cần phải được xét đến khi phân tích trào lưu công suất của lưới phân phối. Hướng nghiên cứu trong tương lai là tích hợp mô hình SOCP đề xuất vào các bài toán tối ưu như tái cấu trúc lưới điện, lựa chọn tiết diện dây dẫn tối ưu và tối ưu hóa vị trí và dung lượng của tụ bù ngang.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] S. C. Tripathy, G. D. Prasad, O. P. Malik, and G. S. Hope, "Load-flow solutions for ill-conditioned power systems by a Newton-like method," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, no. 10, pp. 3648–3657, 1982.
- [2] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 9, no. 4, pp. 101–102, 1989.
- [3] J. Liu, M. M. A. Salama, and R. R. Mansour, "An efficient power flow algorithm for distribution systems with polynomial load," *Int. J. Electr. Eng. Educ.*, vol. 39, no. 4, pp. 371–386, 2002.
- [4] A. Pandey, M. Jereminov, M. R. Wagner, D. M. Bromberg, G. Hug, and L. Pileggi, "Robust power flow and three-phase power flow analyses," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, no. 1, pp. 616–626, 2018.
- [5] I. Džafić, R. A. Jabr, and T. Hrnjić, "High performance distribution network power flow using wirtinger calculus," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 3311–3319, 2018.
- [6] T. Yang, Y. Guo, L. Deng, H. Sun, and W. Wu, "A linear branch flow model for radial distribution networks and its application to reactive power optimization and network reconfiguration," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 12, no. 3, pp. 2027–2036, 2020.

-
- [7] S. H. Low, "Convex relaxation of optimal power flow—Part I: Formulations and equivalence," *IEEE Trans. Control Netw. Syst.*, vol. 1, no. 1, pp. 15–27, 2014.
 - [8] S. H. Low, "Convex relaxation of optimal power flow—Part II: Exactness," *IEEE Trans. Control Netw. Syst.*, vol. 1, no. 2, pp. 177–189, 2014.
 - [9] D. K. Molzahn and I. A. Hiskens, "A survey of relaxations and approximations of the power flow equations," *Found. Trends® Electr. Energy Syst.*, vol. 4, no. 1–2, pp. 1–221, 2019.
 - [10] F. Zohrizadeh, C. Jozs, M. Jin, R. Madani, J. Lavaei, and S. Sojoudi, "A survey on conic relaxations of optimal power flow problem," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 287, no. 2, pp. 391–409, 2020.
 - [11] R. A. Jabr, "Radial distribution load flow using conic programming," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 3, pp. 1458–1459, 2006.
 - [12] A. Dwyer, R. E. Nielsen, J. Stangl, and N. S. Markushevich, "Load to voltage dependency tests at BC Hydro," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 2, pp. 709–715, 1995.
 - [13] T. Le, D. L. Duong, D. G. Ha, T. A. Nguyen, and N. V. Pham, "A comparative study of power loss allocation methods for IEEE 33-bus distribution system," *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 227, no. 11, pp. 169–177, Aug. 2022.
 - [14] GAMS. [Online]. Available: <https://www.gams.com/> [Accessed November 02, 2022].
 - [15] POWERWORLD. [Online]. Available: <https://www.powerworld.com/> [Accessed November 02, 2022].
 - [16] J. R. Marti, H. Ahmadi, and L. Bashualdo, "Linear Power-Flow Formulation Based on a Voltage-Dependent Load Model," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 3, pp. 1682–1690, Jul. 2013.