

# ÁP DỤNG MÔ HÌNH MISOCP ĐỂ TỐI ƯU HÓA VỊ TRÍ VÀ DUNG LƯỢNG CỦA DG CÓ XÉT TẢI ZIP TRONG LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI

MISOCP-BASED OPTIMAL DG LOCATION AND SIZING CONSIDERING ZIP LOAD MODEL IN POWER DISTRIBUTION SYSTEMS

Hà Duy Giang<sup>1</sup>, Lê Toàn<sup>1</sup>,  
Phạm Năng Văn<sup>1,\*</sup>, Nguyễn Thị Hoài Thu<sup>1</sup>

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.031>

## TÓM TẮT

Hiện nay, các nguồn điện phân tán (DG) được tích hợp ngày càng nhiều vào lưới điện phân phối. Điều này dẫn đến nhiều vấn đề khó khăn trong quy hoạch và lập kế hoạch vận hành lưới điện, trong đó có vấn đề xác định vị trí và dung lượng của DG. Bài báo này trình bày mô hình tối ưu để xác định vị trí và dung lượng của DG với hàm mục tiêu là cực tiểu tổng vốn đầu tư của DG, chi phí vận hành của DG và chi phí mua điện từ thị trường bán buôn. Các ràng buộc được xem xét trong mô hình tối ưu là hệ phương trình trào lưu công suất, giới hạn công suất phát của DG, giới hạn điện áp nút, giới hạn công suất truyền tải, giới hạn tổng số DG và tổng số nút đặt DG. Đồng thời, mô hình tối ưu này có xét sự phụ thuộc của công suất tiêu thụ của phụ tải theo điện áp (mô hình tải ZIP). Vì mô hình tối ưu có dạng quy hoạch phi tuyến nguyên thực hỗn hợp (MINLP) nên lời giải tìm được có thể không phải là nghiệm tối ưu toàn cục. Do đó, bài báo này đề xuất phương pháp để biến đổi mô hình MINLP sang mô hình quy hoạch nón bậc hai nguyên thực hỗn hợp (MISOCP) bằng cách xây dựng mô hình nón bậc hai của hệ phương trình trào lưu công suất và phụ tải ZIP. Lời giải tối ưu toàn cục của mô hình MISOCP có thể đạt được bằng các bộ giải thương mại như CPLEX/GAMS. Lưới điện 15 nút IEEE được sử dụng để đánh giá mô hình đề xuất. Kết quả tính toán cho thấy rằng, vị trí, số lượng, công suất phát của DG và phân bố điện áp trong lưới điện phụ thuộc đáng kể vào đặc tính chi phí sản xuất của DG và giá điện tại điểm kết nối với lưới truyền tải.

**Từ khóa:** Lưới điện phân phối, nguồn điện phân tán (DG), vị trí đặt DG, dung lượng DG, tải ZIP, quy hoạch nón bậc hai nguyên thực hỗn hợp (MISOCP).

## ABSTRACT

The increasing penetration of Distributed Generation (DG) is likely to result in many difficulties in planning and operating power distribution systems. One of these challenges is to determine the DG's optimal location and capacity. This paper presents a mathematical model of optimally allocating DG with the aim of minimizing the total DG's investment cost, DG's operation cost and the power exchange cost with the upper-level transmission network. Constraints considered in this optimization model are power flow equations, DG's power output limits, voltage magnitude bounds, thermal limits of branches, the number of installed DGs, and the number of buses for DG placement. In addition, this optimization formulation consists of modelling the voltage-dependent loads (ZIP load modelling). Since this optimal problem is denoted as a Mixed-Integer Non-Linear Programming (MINLP) model, the solution to be found can not be globally optimal. Therefore, this paper deploys methods to convert the MINLP model into a Mixed-Integer Second-Order Cone Programming model (MISOCP). The globally optimal solution of the MISOCP-based model can be obtained by commercial solvers such as CPLEX/GAMS. An IEEE 15-bus system is deployed to evaluate the proposed model. The calculation results reveal that the optimal placement, sizing, generating output of DG and voltage profile in the distribution system are contingent on the DG cost function and the power exchange price with the transmission grid.

**Keywords:** Power distribution systems, Distributed Generation (DG), DG's location, DG's capacity, ZIP load, Mixed-Integer Second-Order Cone Programming (MISOCP).

<sup>1</sup>Khoa Điện, Trường Điện - Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội

\*Email: van.phamnang@hust.edu.vn

Ngày nhận bài: 25/10/2022

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 05/02/2023

Ngày chấp nhận đăng: 15/3/2023

## 1. GIỚI THIỆU

Cuộc khủng hoảng năng lượng toàn cầu và các vấn đề về môi trường nghiêm trọng như khí thải từ các nhà máy điện truyền thống, hành lang tuyến của các lưới điện

truyền tải... dẫn đến việc xây dựng các nhà máy điện truyền thống và truyền tải công suất với khoảng cách dài không còn phù hợp. Để giải quyết vấn đề này, sử dụng các nguồn điện phân tán (DG) là một giải pháp đang được áp dụng rất

rộng rãi. Từ đó đã dẫn đến việc gia tăng sự thâm nhập của các DG vào lưới điện, đặc biệt là ở lưới điện phân phối. Các lợi ích mà DG có thể mang lại là giảm tổn thất điện năng trên lưới điện, cải thiện độ tin cậy và giảm phát thải chất ô nhiễm [1]. Tuy nhiên, DG cũng có những nhược điểm như gây quá điện áp tại điểm kết nối và dòng điện ngắn mạch tăng lên [2]. Do đó, việc vận hành hiệu quả các DG phụ thuộc rất nhiều vào việc lựa chọn đúng vị trí và dung lượng của DG trong lưới điện. Việc lựa chọn vị trí và dung lượng tối ưu của DG có thể đóng góp vào việc khai thác lợi thế của các nguồn điện phân tán và ngăn chặn những bất lợi đối với hệ thống phân phối. Vì vậy, bài toán tối ưu hóa vị trí và dung lượng của DG đang thu hút rất nhiều người làm nghiên cứu.

Các tác giả [3] đã đưa ra thuật toán bậc hai để tính toán công suất của DG với vị trí đặt và tổng công suất của các DG đã biết nhằm đạt được hàm mục tiêu mong muốn. Phương pháp này sử dụng quy trình lặp và có thể không tìm được nghiệm trong một số trường hợp. Trong [4], vị trí DG được tích hợp trong các nghiên cứu quy hoạch lưới phân phối. Vì mô hình trong [4] được xây dựng dưới dạng MINLP nên bài toán có thể không đạt được nghiệm tối ưu toàn cục. Phương pháp giải tích để đặt DG tối ưu nhằm giảm thiểu tổn thất công suất của hệ thống được trình bày trong [5]. Phương pháp này có thể hiệu quả nhưng chỉ có thể áp dụng với các trường hợp có một DG được quyết định đặt trong lưới điện. Bài báo [6] đã giới thiệu phương pháp dựa trên thuật toán di truyền để xác định vị trí và dung lượng của DG trong lưới phân phối. Tuy nhiên, thuật toán này không đảm bảo lời giải tối ưu toàn cục. Phương pháp dựa trên phân tích độ nhạy để xác định vị trí và dung lượng DG nhằm tối thiểu hóa tổn thất công suất tác dụng và công suất phản kháng được đề xuất trong [7]. Tài liệu tham khảo [8] đưa ra một mô hình nhằm tối ưu hóa đồng thời vị trí và dung lượng của tụ bù và nguồn phân tán. Mô hình tối ưu [8] có xét đến tính bất định của các nguồn phân tán. Một phương pháp khác nhằm tối ưu hóa vị trí và công suất phát của DG dựa trên Moth Flame cải biên được trình bày trong [9]. Bài báo [10] đưa ra phương pháp tối ưu Harris Hawks nhằm tìm vị trí các nguồn điện phân tán trong lưới phân phối có cấu trúc hình tia.

Từ các nghiên cứu [3 - 10], ta thấy rằng bài toán tối ưu hóa vị trí và dung lượng của DG thường được giải sử dụng công thức giải tích, phương pháp độ nhạy, kỹ thuật tối ưu heuristic và phương pháp MINLP. Nhược điểm chính của các kỹ thuật tối ưu này là không đảm bảo tìm được nghiệm tối ưu toàn cục. Ngoài ra, các nghiên cứu này cũng chưa xét ảnh hưởng của giá điện tại thị trường bán buôn đến lời giải của bài toán tối ưu hóa vị trí và công suất của DG. Do đó, mục đích của bài báo này là trình bày mô hình quy hoạch hình nón bậc hai nguyên thực hỗn hợp (MISOCP) nhằm xác định tối ưu vị trí và dung lượng của DG với hàm mục tiêu là cực tiểu tổng chi phí của lưới điện phân phối, bao gồm chi phí mua điện từ thị trường điện bán buôn, chi phí vận hành và chi phí đầu tư các nguồn DG. Mô hình MISOCP đảm bảo rằng lời giải tìm được là nghiệm tối ưu toàn cục. 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, sự thay đổi của công suất tác dụng và công suất phản kháng lần lượt là 1,6% đến 3% khi điện áp biến đổi 1% [11]. Do đó, trong bài báo này, tải ZIP được xem xét trong mô hình MISOCP bằng cách áp dụng phương pháp xấp xỉ nhị thức Newton để biến đổi mô hình tải ZIP thành tải ZP tương đương [12].

Bài báo gồm bốn phần: Phần 1 trình bày giới thiệu nội dung nghiên cứu; Phần 2 trình bày mô hình MISOCP của bài toán xác định vị trí và dung lượng của DG, bao gồm hàm mục tiêu và các ràng buộc; Phần 3 áp dụng mô hình để xuất để tính toán cho lưới 15 nút IEEE. Những kết luận và hướng nghiên cứu trong tương lai được mô tả trong phần 4.

## 2. MÔ HÌNH QUY HOẠCH HÌNH NÓN BẬC HAI NGUYÊN THỰC HỖN HỢP

Mô hình tối ưu MISOCP được đề xuất với các giả thiết rằng (1) chủng loại DG được cho trước và (2) chỉ xét một loại DG. Mô hình tối ưu này có hàm mục tiêu được trình bày ở mục 2.1 và các ràng buộc được trình bày ở các mục từ 2.2 đến 2.8.

### 2.1. Hàm mục tiêu

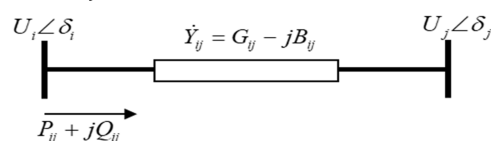
Hàm mục tiêu của bài toán xác định vị trí và dung lượng của DG là cực tiểu tổng chi phí của lưới điện phân phối, bao gồm chi phí mua điện từ thị trường điện bán buôn, chi phí vận hành các nguồn DG và chi phí đầu tư của DG. Do đó, tổng chi phí của lưới điện phân phối trong khoảng thời gian T được biểu diễn như sau:

$$\min \sum_{t=1}^T \alpha_t P_{in,t} S_{cb} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=2}^N (z_i a_i + b_i P_{Gi,t} S_{cb}) + \frac{1}{365} \sum_{i=2}^N z_i C_{i,j} \frac{r(1+r)^T}{(1+r)^T - 1} \quad (1)$$

trong đó,  $P_{in,t}$  là công suất trao đổi với thị trường điện bán buôn tại thời điểm t;  $\alpha_t$  là giá điện tại thị trường điện bán buôn tại thời điểm t;  $a_i$  và  $b_i$  lần lượt là các hệ số liên quan đến đặc tính chi phí sản xuất của DG tại nút i;  $P_{Gi,t}$  là tổng công suất tác dụng của DG tại nút i trong thời điểm t (pu);  $z_i$  là biến nguyên biểu diễn số lượng DG tại một nút; N là tổng số nút của lưới điện; T là số khoảng thời gian (bài báo này tính toán cho 24 khoảng thời gian trong một ngày đêm, mỗi khoảng thời gian là 1 giờ) (h);  $C_{i,j}$  là chi phí đầu tư cho một DG tại nút i (\$); r là hệ số chiết khấu,  $r = 7\%$ ;  $\tau$  là thời gian vòng đời của DG (20 năm);  $S_{cb}$  là công suất cơ bản được lựa chọn trong hệ đơn vị tương đối (MVA).

### 2.2. Mô hình nón bậc hai của hệ phương trình trào lưu công suất

Trong phần này, chỉ số t được bỏ đi để đơn giản hóa khi trình bày biểu thức toán học. Xét đường dây phân phối kết nối hai nút i và j như hình 1.



Hình 1. Mô hình đường dây phân phối

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

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

$$Q_{ij} = B_{ij}U_i^2 - B_{ij}U_iU_j \cos \delta_{ij} - G_{ij}U_iU_j \sin \delta_{ij} \quad (3)$$

trong đó,  $P_{ij}$  và  $Q_{ij}$  lần lượt là công suất tác dụng và công suất phản kháng 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 (2)-(3), ta có hệ phương trình trào lưu công suất:

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

$$\sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij} = \sqrt{2}u_i \sum_{j \in \Omega_i} B_{ij} - \sum_{j \in \Omega_i} (B_{ij}R_{ij} + G_{ij}I_{ij}) = Q_{Gi} - Q_{Di}; \quad i = 2, 3, \dots, N \quad (5)$$

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

Mối quan hệ giữa  $R_{ij}$  và  $I_{ij}$ :

$$2u_i u_j = R_{ij}^2 + I_{ij}^2 \quad (6)$$

Biểu thức (4), (5) và (6) là hệ phương trình trào lưu công suất nút của lưới phân phối hình tia. Biểu thức (6) là phương trình phi tuyến làm cho hệ phương trình trào lưu công suất không lồi. Bằng cách nối lỏng ràng buộc đẳng thức này thành ràng buộc bất đẳng thức, ta sẽ thu được dạng hình nón của bài toán.

$$2u_i u_j \geq R_{ij}^2 + I_{ij}^2 \quad (7)$$

### 2.3. Mô hình nón bậc hai của tải ZIP

Trong phần này, chỉ số t được bỏ đi để đơn giản hóa khi trình bày biểu thức toán học. Trong chế độ vận hành bình thường, mô-đun điện áp của tất cả các nút xấp xỉ bằng 1 pu nên áp dụng khai triển nhị thức Newton, ta có:

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

trong đó,  $U_i$  là mô-đun điện áp nút i (pu) và  $\eta$  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 với 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,  $a_i^p, b_i^p, c_i^p$  là các hệ số của mô hình tải ZIP tại nút thứ i;  $P_{D0i}$  là công suất tác dụng tại điện áp định mức của tải tại nút i (pu).

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:

$$P_{Di} = P_{D0i} [c_i^p + a_i^p U_i^2 + b_i^p (1 + \Delta U_i)] \approx P_{D0i} [(c_i^p + b_i^p / 2) + (a_i^p + b_i^p / 2) \sqrt{2}u_i] \quad (11)$$

Tương tự, công suất phản kháng trong mô hình ZP tương đương:

$$Q_{Di} = Q_{D0i} [(c_i^q + b_i^q / 2) + (a_i^q + b_i^q / 2) \sqrt{2}u_i] \quad (12)$$

### 2.4. Giới hạn công suất phát

Giới hạn công suất tác dụng của DG được xác định như sau:

$$z_{DG}^{P_{min}} \leq P_{Gi,t} \leq z_{DG}^{P_{max}}; \quad i = 2, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (13)$$

Để giữ hệ số công suất tại điểm đấu nối nằm trong giá trị cho phép, giới hạn công suất phản kháng tại điểm đấu nối được biểu diễn như sau:

$$\frac{-P_{Gi,t} \sqrt{1 - (\cos \varphi)_{i,lagging}^2}}{\cos \varphi_{i,lagging}} \leq Q_{Gi,t} \leq \frac{P_{Gi,t} \sqrt{1 - (\cos \varphi)_{i,leading}^2}}{\cos \varphi_{i,leading}}; \quad (14)$$

$$i = 2, \dots, N; t = 1, \dots, T$$

trong đó,  $P_{DG}^{min}$  và  $P_{DG}^{max}$  lần lượt là công suất phát cực tiểu và cực đại của DG;  $Q_{Gi,t}$  là công suất phản kháng của DG tại nút thứ i;  $\cos \varphi_{i,leading}$  là hệ số công suất sớm pha tại nút i;  $\cos \varphi_{i,lagging}$  là hệ số công suất chậm pha tại nút i.

### 2.5. Giới hạn điện áp nút

Giới hạn điện áp nút được biểu diễn như sau:

$$U_{min}^2 / \sqrt{2} \leq u_{i,t} \leq U_{max}^2 / \sqrt{2}; \quad i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (15)$$

trong đó,  $U_{min}$  và  $U_{max}$  là điện áp nhỏ nhất và lớn nhất tại nút thứ i.

### 2.6. Giới hạn dòng công suất truyền tải trên các nhánh

Giới hạn công suất truyền tải được biểu diễn sử dụng các ràng buộc sau:

$$P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 \leq S_{ij,t}^2; \quad S_{ij,t} = S_{ij}^{max}; \quad \forall ij \in \Omega_L; t = 1, \dots, T \quad (16)$$

trong đó,  $S_{ij,t}$  là công suất biểu kiến trên nhánh ij trong khoảng thời gian t;  $S_{ij}^{max}$  là giới hạn công suất biểu kiến trên nhánh ij;  $\Omega_L$  là tập các nhánh của lưới điện.

### 2.7. Giới hạn số lượng DG

Giới hạn số lượng DG trong lưới được biểu diễn như sau:

$$\sum_{i=2}^N z_i \leq M \quad (17)$$

trong đó, M là số lượng DG tối đa được đặt trong lưới.

### 2.8. Giới hạn số nút đặt DG

Giới hạn số nút đặt DG được biểu diễn như sau:

$$P_{Gi,t} \leq y_i K; \quad i = 2, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (18)$$

$$z_i \geq y_i; \quad i = 2, \dots, N; \quad \sum_{i=2}^N y_i \leq F \quad (19)$$

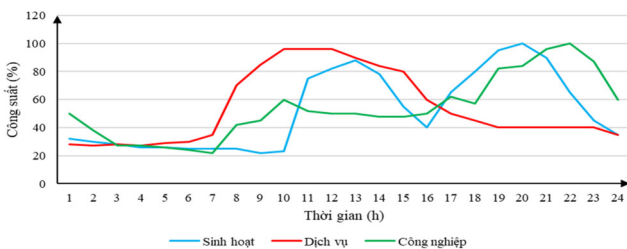
trong đó,  $K$  là hằng số đủ lớn;  $y_i$  là biến nhị phân nhận giá trị 1 khi DG được đặt tại nút  $i$  và nhận giá trị 0 khi DG không được đặt tại nút  $i$ ;  $F$  là số nút tối đa được đặt DG.

**3. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN VÀ THẢO LUẬN**

Trong mục này, mô hình MISOCP để xuất được áp dụng tính toán cho lưới điện 15 nút IEEE [13] với công suất phụ tải cực đại tại điện áp định mức được tăng hai lần so với dữ liệu ban đầu. Mô hình MISOCP được lập trình sử dụng ngôn ngữ GAMS [14] với bộ giải 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. Thời gian tính toán bằng 127,63s với sai số của lời giải biến nguyên (relative gap tolerance) bằng  $10^{-4}$ .

**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 (phần trăm theo công suất cực đại) được mô tả trong hình 2. Kiểu phụ tải tương ứng với các nút của lưới điện như sau: tải sinh hoạt (các nút 2, 6, 9, 11); tải dịch vụ (các nút 3, 4, 7, 10, 12) và tải công nghiệp (các nút 5, 8, 13, 14, 15). Dữ liệu mô hình tải ZIP được lấy theo [15].



Hình 2. Đồ thị phụ tải

Ngoài ra, DG có công suất định mức là 200kW, công suất phát tối thiểu bằng 0kW, vốn đầu tư là 85.000USD. Các đặc tính chi phí sản xuất tuyến tính khác nhau được xem xét là  $80P_G + 0,5$  (\$/h) và  $95P_G + 0,5$  (\$/h). Hệ số công suất vận hành của DG tại điểm đấu nối với lưới điện tối thiểu bằng 0,95 (cả miền phát và tiêu thụ công suất phản kháng). Giá điện tại điểm kết nối với lưới điện truyền tải tương ứng với các khoảng thời gian như sau: 85\$/MWh (0:00 ÷ 4:00), 75\$/MWh (4:00 ÷ 8:00), 115\$/MWh (8:00 ÷ 14:00) và 100\$/MWh (14:00 ÷ 24:00).

**3.2. Kết quả tính toán**

Vị trí DG với các đặc tính chi phí sản xuất khác nhau ( $b$  là chi phí sản xuất biên của tổ máy DG) được trình bày trong bảng 1.

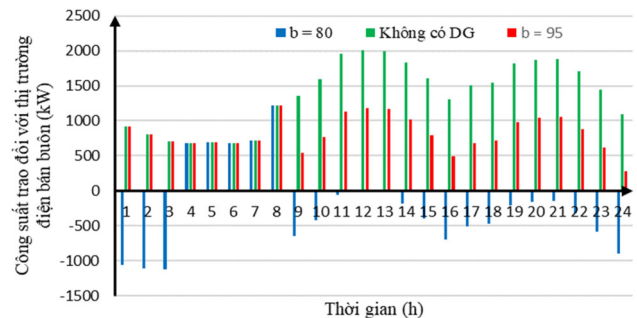
Bảng 1. Số lượng DG được đặt tại các nút

Nút	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$b = 80$	0	6	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
$b = 95$	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1

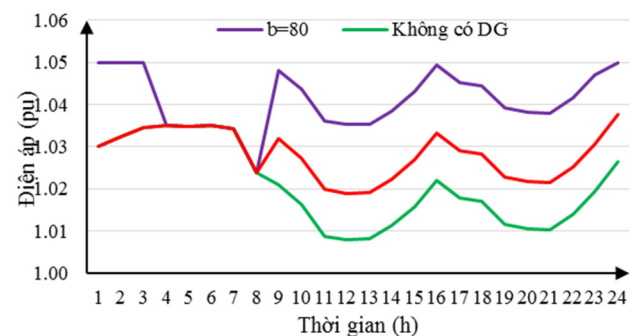
Bảng 1 cho thấy rằng đặc tính chi phí sản xuất của DG ảnh hưởng rất lớn đến vị trí và số lượng DG được đặt trong lưới điện. Với  $b = 80$ \$/MWh, DG được đặt tại các nút 2, 4, 6, 12, 15; có 6 DG được đặt tại nút 2 và các nút còn lại có 1 DG.

Khi  $b = 95$ \$/MWh, DG được đặt tại các nút 4, 7, 12, 15 và mỗi nút đặt 1 DG.

Công suất trao đổi với thị trường điện bán buôn (công suất trao đổi với lưới điện truyền tải) trong các trường hợp không đặt DG và đặc tính chi phí sản xuất lần lượt là  $80P_G + 0,5$  (\$/h) và  $95P_G + 0,5$  (\$/h) được biểu diễn trong hình 3. Quy ước rằng khi công suất trao đổi có giá trị dương thì lưới phân phối mua điện từ thị trường điện bán buôn và ngược lại. Khi không đặt DG, lưới điện phân phối mua điện từ thị trường bán buôn trong tất cả các giờ với trị số lớn nhất bằng 2000 kW. Tuy nhiên, với đặc tính chi phí sản xuất  $80P_G + 0,5$  (\$/h) thì từ 4:00 ÷ 8:00, lưới điện mua điện từ thị trường điện bán buôn và trong các khoảng thời gian còn lại, lưới phân phối bán điện. Tổng điện năng mua và bán trong 24 giờ của lưới phân phối lần lượt là 3990,761kWh và 9040,686kWh. Khi đặc tính chi phí sản xuất là  $95P_G + 0,5$  (\$/h) thì lưới điện phối mua điện từ thị trường điện bán buôn trong tất cả các giờ với trị số lớn nhất bằng 1200 kW. Tổng điện năng mua trong 24 giờ của lưới phân phối là 19765,259kWh. Các kết quả trên là hoàn toàn phù hợp vì khi  $b = 80$ \$/MWh và giá điện là 75 \$/MWh thì chi phí mua điện nhỏ hơn chi phí phát của DG nên hệ thống mua điện từ thị trường điện bán buôn và trong các khoảng thời gian còn lại chi phí phát DG nhỏ hơn chi phí mua điện từ thị trường điện bán buôn nên hệ thống vận hành DG và bơm công suất lên lưới truyền tải.



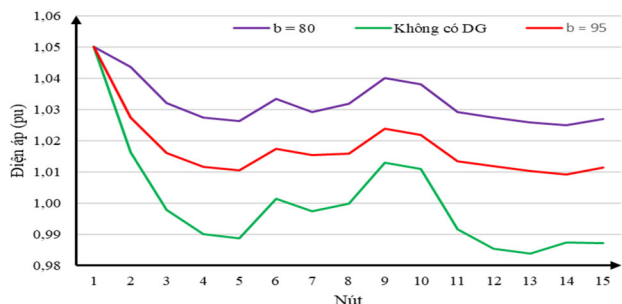
Hình 3. Công suất trao đổi với thị trường điện bán buôn



Hình 4. Phân bố điện áp tại nút 2 trong 24 giờ

Điện áp tại nút 2 trong 24 giờ được trình bày trên hình 4. Khi đặt DG với đặc tính chi phí sản xuất là  $80P_G + 0,5$  (\$/h), điện áp tại nút 2 được nâng cao hơn so với đặc tính chi phí sản xuất  $95P_G + 0,5$  (\$/h). Trong trường hợp đặt DG với đặc tính  $80P_G + 0,5$  (\$/h), trị số điện áp nhỏ nhất và lớn nhất

trong 24 giờ lần lượt là 1,024pu (thời điểm  $t = 8$ ) và 1,050pu (thời điểm  $t = 1 \div 3$  và  $t = 24$ ).



Hình 5. Phân bố điện áp các nút tại thời điểm  $t = 10$

Phân bố điện áp các nút tại thời điểm  $t = 10$  được mô tả trên hình 5. Hình vẽ này cho thấy rằng khi số lượng DG được đặt càng nhiều (với  $b = 80\$/MWh$ , 10 DG được đặt vào lưới điện; với  $b = 95\$/MWh$ , 4 DG được đặt vào lưới điện) thì điện áp của lưới điện phân phối càng được nâng cao đáng kể so với không đặt DG. Khi không đặt DG, điện áp nút 13 có giá trị thấp nhất (0,9838pu). Trong trường hợp đặt DG với đặc tính chi phí sản xuất là  $80P_G + 0,5$  ( $\$/h$ ) và  $95P_G + 0,5$  ( $\$/h$ ), điện áp nút thấp nhất có giá trị lần lượt là 1,0248 (nút 14) pu và 1,0091 pu (nút 14).

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo này xây dựng mô hình để xác định vị trí và dung lượng tối ưu của DG trong lưới điện phân phối. Mô hình có dạng quy hoạch hình nón bậc hai với hàm mục tiêu là cực tiểu chi phí vận hành của lưới điện bao gồm chi phí mua điện từ lưới điện truyền tải, chi phí vận hành của DG và chi phí đầu tư DG. Ngoài ra, mô hình phụ tải ZIP và quy định nối lưới của DG cũng được xem xét trong nghiên cứu này. Mô hình được tính toán sử dụng lưới điện 15 nút IEEE. Kết quả tính toán cho thấy rằng các đặc tính chi phí sản xuất khác nhau của DG có ảnh hưởng đáng kể đến công suất trao đổi với thị trường điện bán buôn, vị trí, số lượng, công suất phát của DG được lắp đặt và điện áp các nút. Hướng nghiên cứu của bài báo trong tương lai là tối ưu hóa đồng thời DG và cấu trúc lưới điện có xét hệ thống tích trữ năng lượng.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. H. Haghghat, 2015. *Energy loss reduction by optimal distributed generation allocation in distribution systems*. *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 25, no. 9, pp. 1673–1684.

[2]. A. Ipakchi, F. Albuyeh, 2009. *Grid of the future*. *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 7, no. 2, pp. 52–62.

[3]. N. S. Rau, Y. Wan, 1994. *Optimum location of resources in distributed planning*. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 4, pp. 2014–2020.

[4]. W. El-Khattam, Y. G. Hegazy, M. M. A. Salama, 2005. *An integrated distributed generation optimization model for distribution system planning*. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 2, pp. 1158–1165.

[5]. C. Wang, M. H. Nehrir, 2004. *Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power systems*. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 4, pp. 2068–2076.

[6]. G. Celli, E. Ghiani, S. Mocci, F. Pilo, 2005. *A multiobjective evolutionary algorithm for the sizing and siting of distributed generation*. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 2, pp. 750–757.

[7]. S. N. Gopiya Naik, D. K. Khatod, M. P. Sharma, 2015. *Analytical approach for optimal siting and sizing of distributed generation in radial distribution networks*. *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 9, no. 3, pp. 209–220.

[8]. B. R. Pereira, G. R. M. da Costa, J. Contreras, J. R. S. Mantovani, 2016. *Optimal distributed generation and reactive power allocation in electrical distribution systems*. *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 975–984.

[9]. E. E. Elattar, S. K. Elsayed, 2020. *Optimal location and sizing of distributed generators based on renewable energy sources using modified moth flame optimization technique*. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 109625–109638.

[10]. A. Selim, S. Kamel, A. S. Alghamdi, F. Jurado, 2020. *Optimal placement of DGs in distribution system using an improved harris hawks optimizer based on single-and multi-objective approaches*. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 52815–52829.

[11]. A. Dwyer, R. E. Nielsen, J. Stangl, N. S. Markushevich, 1995. *Load to voltage dependency tests at BC Hydro*. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 2, pp. 709–715.

[12]. F. U. Nazir, B. C. Pal, R. A. Jabr, 2020. *Approximate load models for conic OPF solvers*. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 36, no. 1, pp. 549–552.

[13]. P. Kayal, C. K. Chanda, 2013. *Placement of wind and solar based DGs in distribution system for power loss minimization and voltage stability improvement*. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 53, pp. 795–809.

[14]. GAMS. [Online]. Available: <https://www.gams.com/>

[15]. J. R. Marti, H. Ahmadi, L. Bashualdo, 2013. *Linear Power-Flow Formulation Based on a Voltage-Dependent Load Model*. *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 3, pp. 1682–1690.

#### AUTHORS INFORMATION

**Ha Duy Giang, Le Toan, Pham Nang Van, Nguyen Thi Hoai Thu**

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