

OPTIMAL SIZE AND LOCATION OF SVC DEVICES CONSIDERING VOLTAGE STABILITY CONSTRAINTS: A MIXED-INTEGER NONLINEAR PROGRAMMING APPROACH

Nguyen Tien Thanh, Pham Nang Van*, Nguyen Quoc Minh, Nguyen Thi Hoai Thu

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

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	03/7/2023	Due to the rapid growth of load, the deregulation of the electricity sector as well as the increasing penetration of renewable energy sources, the power system's operating point is likely to be close to the stability limit, especially the voltage stability limit. Therefore, guaranteeing an appropriate distance from the current operating point to the voltage collapse plays an important role in the planning and operation problem. This paper presents a Mixed-Integer Nonlinear Programming (MINLP) model to optimize the location and capacity of Static Var Compensator (SVC) devices with the purpose of enhancing the system voltage stability. The objective function of this optimization problem is to minimize the total cost, including the investment cost of SVC and the cost of network energy loss. The optimization problem's constraints are represented for both current and critical loading conditions. The proposed MINLP formulation is evaluated on a modified IEEE 30-bus system with different scenarios of minimum security level and demand power value using XPRESS commercial solver under the GAMS programming language. The calculation results reveal that the minimum security level pertaining to the system voltage stability and load demand level significantly affect the optimal location and size of SVC devices.
Revised:	28/9/2023	
Published:	28/9/2023	
KEYWORDS		
Mixed-integer nonlinear programming (MINLP)		
Voltage stability		
SVC devices		
Optimal size		
Optimal location		

TỐI ƯU HÓA VỊ TRÍ VÀ CÔNG SUẤT CỦA THIẾT BỊ SVC SỬ DỤNG QUY HOẠCH PHI TUYẾN NGUYÊN THỰC HỖN HỢP CÓ XÉT RÀNG BUỘC ỔN ĐỊNH ĐIỆN ÁP

Nguyễn Tiến Thành, Phạm Năng Văn*, Nguyễn Quốc Minh, Nguyễn Thị Hoài Thu

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

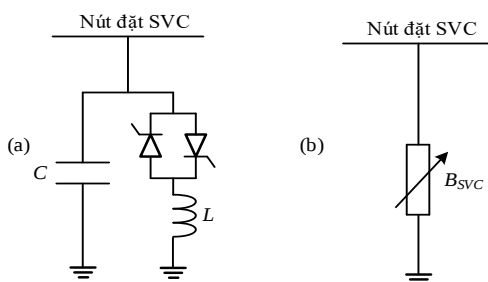
THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	03/7/2023	Do sự tăng trưởng nhanh của phụ tải, sự phát triển của thị trường điện và sự thâm nhập ngày càng tăng của các nguồn năng lượng tái tạo, điểm làm việc của hệ thống điện có xu hướng gần điểm giới hạn ổn định, đặc biệt là giới hạn ổn định điện áp. Vì vậy, đảm bảo khoảng cách thích hợp giữa điểm làm việc hiện tại và điểm sụp đổ điện áp có ý nghĩa quan trọng trong bài toán quy hoạch và vận hành. Bài báo này trình bày mô hình quy hoạch phi tuyến nguyên thực hỗn hợp (MINLP) để tối ưu hóa vị trí và công suất của thiết bị SVC với mục đích nâng cao ổn định điện áp của hệ thống điện. Hàm mục tiêu của mô hình tối ưu đề xuất là tối thiểu hóa tổng chi phí, bao gồm vốn đầu tư của SVC và chi phí cho tổn thất điện năng của lưới điện. Bài toán tối ưu xem xét các ràng buộc ở trạng thái phụ tải cơ sở và phụ tải tới hạn. Mô hình tối ưu đề xuất được đánh giá trên lưới điện 30 nút IEEE cải biên sử dụng bộ giải thương mại XPRESS và ngôn ngữ lập trình GAMS. Các kịch bản khác nhau về mức độ an toàn tối thiểu và công suất phụ tải được xem xét. Kết quả tính toán cho thấy rằng, mức độ an toàn tối thiểu và công suất phụ tải có ảnh hưởng quan trọng đến vị trí và công suất tối ưu của thiết bị bù SVC.
Ngày hoàn thiện:	28/9/2023	
Ngày đăng:	28/9/2023	
TỪ KHÓA		
Quy hoạch phi tuyến nguyên thực hỗn hợp (MINLP)		
Ổn định điện áp		
Thiết bị SVC		
Công suất tối ưu		
Vị trí tối ưu		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.8264>

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

1. Giới thiệu

Ổn định điện áp là khả năng duy trì giá trị điện áp trong giới hạn cho phép ở tất cả các nút của hệ thống điện sau khi trải qua các kích động [1]. Ổn định điện áp đóng một vai trò quan trọng trong ổn định của hệ thống điện. Nguyên nhân của mất ổn định điện áp là hệ thống điện thiếu dự trữ công suất phản kháng. Sự mất ổn định điện áp có thể gây mất điện trên diện rộng, ảnh hưởng xấu đến hệ thống và các thiết bị. Theo truyền thống, tụ bù ngang là thiết bị được sử dụng phổ biến trong hệ thống điện để nâng cao dự trữ công suất phản kháng, giảm tổn thất điện năng, cải thiện chất lượng điện áp và tăng công suất truyền tải [2]. Gần đây, với sự phát triển vượt bậc của các thiết bị điện tử công suất, thiết bị bù tĩnh có điều khiển SVC (Static Var Compensator) đã dần thay thế các bộ tụ bù ngang truyền thống và được xem là thiết bị bù công suất phản kháng tiên tiến nhất trong lưới điện truyền tải [3]. Thiết bị bù SVC điển hình gồm tụ bù cố định và kháng điện được điều chỉnh bằng thyristor (xem Hình 1). Điện dẫn tương đương (B_{SVC}) và công suất phản kháng của thiết bị SVC được điều chỉnh nhanh và liên tục dựa trên sự thay đổi góc mở của thyristor. Nếu hệ thống thừa công suất phản kháng hoặc điện áp nút được điều khiển lớn hơn giá trị cho phép, SVC sẽ đóng vai trò là các kháng bù ngang, khi đó SVC tiêu thụ công suất phản kháng từ hệ thống và hạ thấp điện áp tại nút được điều chỉnh. Ngược lại, nếu hệ thống thiếu công suất phản kháng hoặc điện áp nút được điều khiển nhỏ hơn giá trị cho phép thì SVC cung cấp công suất phản kháng vào lưới điện và làm tăng điện áp nút được điều chỉnh.



Hình 1. Thiết bị bù tĩnh SVC: (a) Cấu trúc và (b) Sơ đồ thay thế

Lợi ích và hiệu quả đem lại của các thiết bị bù nói chung và SVC nói riêng phụ thuộc rất nhiều vào vị trí lắp đặt và dung lượng của thiết bị. Vì lý do kinh tế nên các thiết bị bù thường không được lắp đặt tại tất cả các nút của lưới điện. Bài toán xác định vị trí tối ưu cho các thiết bị bù thỏa mãn điều kiện ổn định của hệ thống điện và tính phi tuyến của hệ phương trình cân bằng công suất nút là rất phức tạp. Có nhiều kỹ thuật đã được phát triển và sử dụng để tối ưu hóa vị trí và dung lượng của các thiết bị bù này trong lưới điện [4]. Một số thuật toán khác nhau của phương pháp Heuristic để xác định vị trí tối ưu của SVC trong hệ thống điện như thuật toán di truyền (GA), tối ưu hóa bầy đàn (PSO), simulated annealing (SA), artificial immune system (AIS) đã được sử dụng [5]. Thuật toán dựa trên phương pháp SA để xác định vị trí, loại và công suất của SVC có xét các điều kiện tải khác nhau trong [6]. Trong nghiên cứu này, tác giả đã sử dụng kỹ thuật tách biến nhanh kết hợp cùng với thuật toán SA để tăng tốc độ giải. Tuy nhiên, hạn chế của phương pháp trong nghiên cứu [6] là đặc tính hội tụ kém (không hội tụ hoặc hội tụ chậm) trong các điều kiện nặng tải hay điều kiện điện áp thấp. Ngoài ra, nghiên cứu [6] áp dụng các giả sử không đúng với thực tế như (1) tỷ lệ X/R không đổi cho tất cả các đường dây; (2) các ma trận B' và B'' không đổi. Trong [7], thuật toán di truyền (GA) được đề xuất để xác định vị trí và dung lượng tối ưu của thiết bị bù SVC trong lưới điện truyền tải. Bài toán tối ưu đa mục tiêu được phát triển trong nghiên cứu này, bao gồm cực tiểu tổng tổn thất công suất của lưới điện và cực tiểu tổng chi phí đầu tư của thiết bị bù. Tuy nhiên, nghiên cứu [7] không xét các ràng buộc ổn định điện áp, ổn định hệ thống, hoặc các ràng buộc khác về quy hoạch và vận hành hệ thống điện. Thuật toán AIS [8] được sử dụng để cực tiểu tổn thất công suất và cải thiện điện áp trong hệ thống điện bằng cách xác định vị trí chính xác của SVC. Tuy nhiên, hạn chế của thuật toán AIS

này là sử dụng một kỹ thuật giải đơn giản, không xem xét các yếu tố ngẫu nhiên xảy ra trong hệ thống điện như sự thay đổi của phụ tải hay sự biến đổi của điện áp. Bên cạnh các phương pháp Heuristic, bài toán tối ưu hóa vị trí và dung lượng của các thiết bị SVC cũng được giải bằng cách sử dụng phương pháp Newton-Raphson [9]. Mục đích của nghiên cứu này là cải thiện chất lượng điện áp bằng cách giảm thiểu tổn thất công suất tác dụng và tổn thất công suất phản kháng trong lưới điện. Tác giả đã so sánh điện áp của lưới điện khi không/có thiết bị SVC kết nối. Tuy nhiên, nghiên cứu [9] chưa xét đến tính kinh tế của thiết bị SVC đối với hệ thống. Gần đây, với sự phát triển mạnh mẽ của khoa học máy tính, một số phương pháp sử dụng trí tuệ nhân tạo cũng được đề xuất. Bài báo [10] sử dụng thuật toán mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) để điều khiển tối ưu các tụ bù nhằm mục đích giảm tổn thất điện năng. Tuy nhiên, việc sử dụng ANN cho các lưới điện phức tạp đòi hỏi thời gian huấn luyện cần thiết cho mạng nơ-ron là rất lớn, và phương pháp này có thể không xem xét đến các yếu tố như điều chỉnh điện áp và chất lượng điện năng đối với việc đóng cắt tụ. Ngoài ra, bài báo [11] cũng trình bày về vấn đề ổn định điện áp. Tuy nhiên, bài báo [11] trình bày chỉ số mới NewVSI để giám sát đánh giá ổn định điện áp trong thời gian thực mà không giải quyết bài toán tìm vị trí và công suất tối ưu của thiết bị bù SVC. Bài báo [12] đề xuất phương pháp tính toán vị trí và dung lượng của tụ bù ngang tối ưu trong lưới điện trung áp xét đến tính ngẫu nhiên của phụ tải. Tuy nhiên, nghiên cứu [12] không xem xét vốn đầu tư của thiết bị bù và ràng buộc ổn định điện áp trong mô hình tối ưu.

Trong bài báo này, các tác giả đề xuất phương pháp tối ưu hóa vị trí và dung lượng của thiết bị bù SVC sử dụng quy hoạch phi tuyến nguyên thực hỗn hợp (MINLP) có xét ràng buộc ổn định điện áp. Các đóng góp của nghiên cứu bao gồm:

- Xây dựng mô hình MINLP để tối ưu hóa vị trí và công suất của thiết bị bù SVC. Hàm mục tiêu của mô hình MINLP là tối thiểu tổng chi phí cho tổn thất điện năng và vốn đầu tư của thiết bị bù SVC.
- Phân tích ảnh hưởng của hệ số tăng tải tối thiểu và công suất phụ tải đến vị trí và dung lượng của thiết bị bù SVC.

Bài báo được cấu trúc thành 4 phần. Phần 1 giới thiệu về nội dung nghiên cứu. Phần 2 trình bày mô hình MINLP của bài toán tối ưu hóa vị trí và dung lượng của thiết bị bù SVC, bao gồm hàm mục tiêu và các ràng buộc. Phần 3 áp dụng mô hình MINLP để tính toán cho lưới điện 30 nút IEEE. Những kết luận và hướng phát triển trong tương lai được trình bày ở Phần 4.

2. Phương pháp nghiên cứu

Mô hình toán học MINLP đề xuất của bài toán tối ưu hóa vị trí và dung lượng của thiết bị bù SVC có hàm mục tiêu và các ràng buộc được trình bày như dưới đây.

2.1. Hàm mục tiêu

Hàm mục tiêu của bài toán là tối thiểu hóa tổng chi phí của lưới điện, bao gồm chi phí cho tổn thất điện năng và vốn đầu tư của các thiết bị bù SVC.

$$\min f_1 + \sum_{i \in N} y_i f_2 \quad (1)$$

trong đó, N là tập các nút trong lưới điện; f_1 là chi phí cho tổn thất điện năng; f_2 là vốn đầu tư của các thiết bị bù SVC; y_i là biến nhị phân, $y_i = 1$ khi thiết bị bù SVC được lắp đặt tại nút i và $y_i = 0$ khi thiết bị bù SVC không được lắp đặt tại nút i .

2.1.1. Chi phí cho tổn thất điện năng

Chi phí tổn thất điện năng được biểu diễn như sau:

$$f_1 = 8760.LF.K_e \cdot \left(\sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi} - \sum_{j=1}^{N_D} P_{Dj} \right) \quad (\$/\text{năm}) \quad (2)$$

trong đó, LF là hệ số tổn thất; K_e là chi phí biên cho tổn thất điện năng (\$/MWh); N_G và N_D lần lượt là tập các nút nguồn điện và phụ tải; P_{Gi} là công suất phát của tổ máy tại nút i (MW); P_{Dj} là công suất của phụ tải tại nút j (MW).

2.1.2. Vốn đầu tư của thiết bị bù

Chi phí vốn đầu tư của thiết bị bù SVC được xác định như sau [13]:

$$f_2 = 8760.0,013.C_{SVC}.Q_{Ci} \quad (\$/\text{năm}) \quad (3)$$

trong đó, C_{SVC} là suất vốn đầu tư của thiết bị bù SVC (\$/kVar); Q_{Ci} là dung lượng của thiết bị bù SVC (MVar).

Suất vốn đầu tư của thiết bị bù SVC được biểu diễn như sau [14]:

$$C_{SVC} = 0,0003Q_{Ci}^2 - 0,3051Q_{Ci} + 127,38 \quad (\$/\text{kVar}) \quad (4)$$

2.2. Ràng buộc tổng số vị trí lắp đặt thiết bị SVC

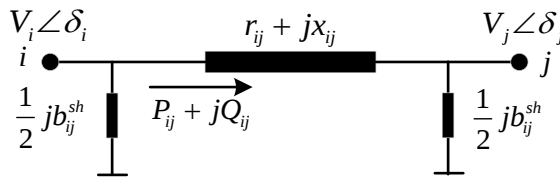
Tổng số nút lắp đặt thiết bị bù SVC được giới hạn như sau:

$$\sum_{i=1}^N y_i \leq k \quad (5)$$

trong đó, k là tổng số vị trí lắp đặt thiết bị bù trong lưới điện (hằng số).

2.3. Ràng buộc hệ phương trình trào lưu công suất

Xét đường dây nối giữa hai nút i và j như Hình 2.



Hình 2. Mô hình đường dây giữa hai nút i và j

trong đó:

$$g_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2}; \quad b_{ij} = -\frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \quad (6)$$

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

$$P_{ij} = g_{ij}V_i^2 - V_iV_j(g_{ij}\cos\delta_{ij} + b_{ij}\sin\delta_{ij}) \quad (7)$$

$$Q_{ij} = -\left(b_{ij} + \frac{b_{ij}^{sh}}{2}\right)V_i^2 - V_iV_j(g_{ij}\sin\delta_{ij} - b_{ij}\cos\delta_{ij}) \quad (8)$$

trong đó, P_{ij} , Q_{ij} lần lượt là công suất tác dụng và công suất phản kháng truyền tải từ nút i đến nút j ; V_i , V_j lần lượt là điện áp tại nút i và j ; $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ là độ lệch góc pha điện áp giữa nút i và nút j .

Ràng buộc hệ phương trình trào lưu công suất phải thỏa mãn trong hai trường hợp tương ứng phụ tải cơ sở (phụ tải hiện tại) và phụ tải giới hạn. Công suất của phụ tải giới hạn lớn hơn phụ tải cơ sở λ lần và được xác định như sau:

$$\hat{P}_{Li} = (1 + \lambda)P_{Li}, \quad \forall i \in N_D \quad (9)$$

$$\hat{Q}_{Li} = (1 + \lambda)Q_{Li}, \quad \forall i \in N_D \quad (10)$$

trong đó, λ được gọi là hệ số tăng tải.

Công suất của nguồn điện tương ứng với phụ tải giới hạn:

$$\hat{P}_{Gi} = (1 + \lambda + \hat{k}_G) P_{Gi}, \forall i \in N_G \quad (11)$$

trong đó, $\hat{k}_G$ là hệ số phân bổ tổn thất công suất.

2.3.1. Trường hợp phụ tải cơ sở

Hệ phương trình trào lưu công suất ứng với phụ tải cơ sở:

$$P_{Gi} - P_{Li} = \sum_{j=1, j \neq i}^N g_{ij} V_i^2 - V_i V_j (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}), \quad \forall i \in N \quad (12)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} + y_i Q_{Ci} = \sum_{j=1, j \neq i}^N - \left(b_{ij} + \frac{b_{ij}^{sh}}{2} \right) V_i^2 - V_i V_j (g_{ik} \sin \delta_{ij} - b_{ij} \cos \delta_{ij}), \quad \forall i \in N \quad (13)$$

trong đó, P_{Gi}, Q_{Gi} lần lượt là công suất tác dụng và công suất phản kháng của nguồn điện tại nút i trong trường hợp phụ tải cơ sở; P_{Li}, Q_{Li} lần lượt là công suất tác dụng và công suất phản kháng của phụ tải tại nút i ứng với phụ tải cơ sở.

2.3.2. Trường hợp phụ tải giới hạn

$$\hat{P}_{Gi} - \hat{P}_{Li} = \sum_{j=1, j \neq i}^N g_{ij} \hat{V}_i^2 - \hat{V}_i \hat{V}_j (g_{ij} \cos \hat{\delta}_{ij} + b_{ij} \sin \hat{\delta}_{ij}), \quad \forall i \in N \quad (14)$$

$$\hat{Q}_{Gi} - \hat{Q}_{Li} + y_i Q_{Ci} = \sum_{j=1, j \neq i}^N - \left(b_{ij} + \frac{b_{ij}^{sh}}{2} \right) \hat{V}_i^2 - \hat{V}_i \hat{V}_j (g_{ik} \sin \hat{\delta}_{ij} - b_{ij} \cos \hat{\delta}_{ij}), \quad \forall i \in N \quad (15)$$

trong đó, $\hat{P}_{Gi}, \hat{Q}_{Gi}$ lần lượt là công suất tác dụng và công suất phản kháng của nguồn điện tại nút i trong trường hợp phụ tải giới hạn; $\hat{P}_{Li}, \hat{Q}_{Li}$ lần lượt là công suất tác dụng và công suất phản kháng phụ tải tại nút i ứng với phụ tải giới hạn; $\hat{V}_i, \hat{V}_j$ lần lượt là điện áp tại nút i và j trong trường hợp phụ tải giới hạn; $\hat{\delta}_{ij} = \hat{\delta}_i - \hat{\delta}_j$ là độ lệch góc pha điện áp giữa nút i và nút j trong trường hợp phụ tải giới hạn.

2.4. Ràng buộc giới hạn truyền tải công suất trên đường dây

2.4.1. Trường hợp phụ tải cơ sở

Giới hạn công suất nhánh trong trường hợp phụ tải cơ sở được biểu diễn như sau:

$$\sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2} \leq S_{ij}^{\max}, \quad \forall ij \quad (16)$$

trong đó, P_{ij}, Q_{ij} lần lượt là công suất tác dụng và công suất phản kháng trên đường dây ij trong trường hợp phụ tải cơ sở; $S_{ij}^{\max}$ là công suất truyền tải tối đa trên đường dây ij .

2.4.2. Trường hợp phụ tải giới hạn

Giới hạn công suất nhánh trong trường hợp phụ tải giới hạn được biểu diễn như sau:

$$\sqrt{\hat{P}_{ij}^2 + \hat{Q}_{ij}^2} \leq S_{ij}^{\max}, \quad \forall ij \quad (17)$$

trong đó, $\hat{P}_{ij}, \hat{Q}_{ij}$ lần lượt là công suất tác dụng và công suất phản kháng trên đường dây ij trong trường hợp phụ tải giới hạn.

2.5. Ràng buộc giới hạn công suất phát của các tổ máy

2.5.1. Trường hợp tải cơ sở

Giới hạn công suất phát của các tổ máy được mô tả như sau:

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, \quad \forall i \in N_G \quad (18)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max}, \quad \forall i \in N_G \quad (19)$$

trong đó:

- $P_{Gi}^{\min}, P_{Gi}^{\max}$ lần lượt là công suất tác dụng phát tối đa và tối thiểu của tổ máy i ;
- $Q_{Gi}^{\min}, Q_{Gi}^{\max}$ lần lượt là công suất phản kháng phát tối đa và tối thiểu của tổ máy i .

2.5.2. Trường hợp tải giới hạn

$$Q_{Gi}^{\min} \leq \hat{Q}_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max}, \quad \forall i \in N_G \quad (20)$$

trong đó, $\hat{Q}_{Gi}$ là công suất phản kháng của máy phát tại nút i trong trường hợp tải giới hạn.

Nhấn mạnh rằng mô hình tối ưu không có ràng buộc giới hạn công suất tác dụng phát ở trạng thái phụ tải giới hạn.

2.6. Ràng buộc giới hạn điện áp nút

Ràng buộc về điện áp nút, bao gồm giới hạn điện áp và giới hạn góc pha điện áp được biểu diễn như sau:

2.6.1. Trường hợp tải cơ sở

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}, \quad \forall i \in N \quad (21)$$

$$\delta_i^{\min} \leq \delta_i \leq \delta_i^{\max}, \quad \forall i \in N \quad (22)$$

trong đó, $V_i^{\min}, V_i^{\max}$ lần lượt là điện áp tối thiểu và tối đa tại nút i ; $\delta_i^{\min}, \delta_i^{\max}$ lần lượt là góc pha điện áp tối thiểu và tối đa tại nút i .

2.6.2. Trường hợp tải giới hạn

$$V_i^{\min} \leq \hat{V}_i \leq V_i^{\max}, \delta_i^{\min} \leq \hat{\delta}_i \leq \delta_i^{\max}, \quad \forall i \in N \quad (23)$$

trong đó, $\hat{V}_i$ là điện áp tại nút i trong trường hợp tải giới hạn; $\hat{\delta}_i$ là góc pha điện áp tại nút i trong trường hợp tải giới hạn.

2.7. Ràng buộc giới hạn dung lượng của thiết bị bù SVC

Giới hạn công suất của thiết bị bù tĩnh có điều khiển SVC được xác định như sau:

$$y_i Q_{Ci}^{\min} \leq Q_{Ci} \leq y_i Q_{Ci}^{\max}, \quad \forall i \in N \quad (24)$$

trong đó, Q_{Ci} là công suất của thiết bị bù SVC kết nối tại nút i ; $Q_{Ci}^{\min}, Q_{Ci}^{\max}$ lần lượt là công suất tối thiểu và tối đa của thiết bị bù SVC.

Trong nghiên cứu lần này, dung lượng của thiết bị bù SVC được giới hạn như sau [14]:

$$Q_{Ci}^{\min} = -100 \text{ MVar và } Q_{Ci}^{\max} = 100 \text{ MVar}, \quad \forall i \in N \quad (25)$$

2.8. Ràng buộc mức độ an toàn tối thiểu

Để đảm bảo vận hành an toàn, khoảng cách từ điểm làm việc hiện tại của hệ thống điện tới điểm ứng với phụ tải giới hạn phải thỏa mãn yêu cầu tối thiểu. Ràng buộc này được mô tả như sau:

$$\lambda \geq \lambda_{\min} \quad (26)$$

trong đó, $\lambda_{\min}$ là hệ số tăng tải tối thiểu (hằng số).

Nhấn mạnh rằng, trong nghiên cứu này mức độ an toàn tối thiểu được biểu diễn bởi hệ số $\lambda_{\min}$.

2.9. Ràng buộc góc pha điện áp tại nút cân bằng

Góc pha điện áp tại nút cân bằng trong hệ thống điện được chọn làm tham chiếu.

2.9.1. Trường hợp tải cơ sở

$$\delta_i = 0, \quad i = \text{ref} \quad (27)$$

trong đó, ref là nút tham chiếu góc pha điện áp (nút cân bằng)

2.9.2. Trường hợp tải giới hạn

$$\hat{\delta}_i = 0, \quad i = \text{ref} \quad (28)$$

3. Kết quả tính toán và thảo luận

Trong phần này, mô hình MINLP đề xuất được áp dụng tính toán cho lưới điện 30 nút IEEE cải biên. Ngoài ra, ảnh hưởng của hệ số tăng tải tối thiểu và công suất phụ tải đến lời giải tối ưu cũng được trình bày. Mô hình MINLP được lập trình sử dụng phần mềm GAMS [15] với bộ giải tối ưu XPRESS. Tất cả các tính toán được thực hiện trên máy tính cá nhân vi xử lý AMD Ryzen 5 5600G 3,9GHz và 32GB RAM. Thời gian tính toán là 135 giây với sai số của lời giải biến nguyên bằng 0.

3.1. Mô tả dữ liệu

Lưới điện 30 nút IEEE trong bài báo này được cải biên từ dữ liệu trong tài liệu tham khảo [16]. Để dữ liệu phù hợp hơn với thực tế vận hành của hệ thống điện, các tác giả đã thực hiện một số cải biên như sau:

- Công suất tác dụng tối thiểu ($P_G^{\min}$) bằng 50% công suất tác dụng tối đa ($P_G^{\max}$). Sự cải biên này phù hợp với hầu hết các nhà máy nhiệt điện trong hệ thống điện.
- Các tổ máy phát có cùng hệ số công suất định mức ($\cos \varphi_{\text{Gdm}}$) bằng 0,85. Khi đó, công suất phản kháng tối đa và công suất phản kháng tối thiểu được xác định như sau: $Q_G^{\max} = P_G^{\max} \times \tan \varphi_{\text{Gdm}}$; $Q_G^{\min} = -0,5 \times Q_G^{\max}$. Sự cải biên này phù hợp với đặc tính phát và tiêu thụ công suất phản kháng của các máy phát nhiệt điện trong hệ thống điện.
- Các phụ tải có cùng hệ số công suất ($\cos \varphi_L$) bằng 0,85.
- Công suất tác dụng của phụ tải được tăng 2 lần. Khi đó, công suất phát tối đa của nguồn điện và giới hạn truyền tải công suất cũng được thay đổi tương ứng.

Dữ liệu lưới điện 30 nút IEEE cải biên lần lượt được mô tả ở Bảng 1, Bảng 2 và Bảng 3. Các trị số điện áp định mức của lưới điện này là 132 kV và 33 kV. Sơ đồ lưới gồm 6 máy phát, 20 phụ tải với tổng công suất $\hat{S}_L = 378,4 + j234,5 \text{ MVA}$ và 41 nhánh (Hình 3). Các thông số được tính toán sử dụng hệ đơn vị tương đối với $S_{cb} = 100 \text{ MVA}$.

Bảng 1. Đặc tính kỹ thuật của các tổ máy

Tổ máy	Nút	$P_G^{\max}$ (MW)	$P_G^{\min}$ (MW)	$Q_G^{\max}$ (MVar)	$Q_G^{\min}$ (MVar)
G1	1	160	80,0	99,159	-49,580
G2	2	160	80,0	99,159	-49,580
G3	13	100	50,0	61,974	-30,987
G4	22	110	55,0	68,172	-34,086
G5	23	60	30,0	37,185	-18,592
G6	27	80	40,0	49,580	-24,790

Bảng 2. Thông số nhánh đường dây

Nhánh	Từ nút	Đến nút	r (pu)	x (pu)	b (pu)	Giới hạn (MVA)
1	1	2	0,02	0,06	0,03	325
2	1	3	0,05	0,19	0,02	325
3	2	4	0,06	0,17	0,02	162,5
4	3	4	0,01	0,04	0	325
5	2	5	0,05	0,2	0,02	325
6	2	6	0,06	0,18	0,02	162,5
7	4	6	0,01	0,04	0	225
8	5	7	0,05	0,12	0,01	175
9	6	7	0,03	0,08	0,01	325
10	6	8	0,01	0,04	0	80
11	6	9	0	0,21	0	162,5
12	6	10	0	0,56	0	80
13	9	11	0	0,21	0	162,5
14	9	10	0	0,11	0	162,5
15	4	12	0	0,26	0	162,5
16	12	13	0	0,14	0	162,5
17	12	14	0,12	0,26	0	80
18	12	15	0,07	0,13	0	80
19	12	16	0,09	0,2	0	80
20	14	15	0,22	0,2	0	40
21	16	17	0,08	0,19	0	40
22	15	18	0,11	0,22	0	40
23	18	19	0,06	0,13	0	40
24	19	20	0,03	0,07	0	80
25	10	20	0,09	0,21	0	80
26	10	17	0,03	0,08	0	80
27	10	21	0,03	0,07	0	80
28	10	22	0,07	0,15	0	80
29	21	22	0,01	0,02	0	120
30	15	23	0,1	0,2	0	40
31	22	24	0,12	0,18	0	40
32	23	24	0,13	0,27	0	40
33	24	25	0,19	0,33	0	40
34	25	26	0,25	0,38	0	40
35	25	27	0,11	0,21	0	40
36	28	27	0	0,4	0	162,5
37	27	29	0,22	0,42	0	40
38	27	30	0,32	0,6	0	40
39	29	30	0,24	0,45	0	40
40	8	28	0,06	0,2	0,02	80
41	6	28	0,02	0,06	0,01	80

Bảng 3. Thông số của phụ tải tại các nút

Phụ tải	P_L (MW)	Q_L (MVar)	Phụ tải	P_L (MW)	Q_L (MVar)
2	43,40	26,90	17	18,00	11,16
3	4,80	2,97	18	6,40	3,97
4	15,20	9,42	19	19,00	11,78

Phụ tải	P_L (MW)	Q_L (MVar)	Phụ tải	P_L (MW)	Q_L (MVar)
7	45,60	28,26	20	4,40	2,73
8	60,00	37,18	21	35,00	21,69
10	11,60	7,19	23	6,40	3,97
12	22,40	13,88	24	17,40	10,78
14	12,40	7,68	26	7,00	4,34
15	16,40	10,16	29	4,80	2,97
16	7,00	4,34	30	21,20	13,14

3.2. Ảnh hưởng của hệ số tăng tải tối thiểu

Trong phần này, ba kịch bản của hệ số tăng tải tối thiểu được trình bày.

3.2.1. Kịch bản 1: Hệ số tăng tải tối thiểu $\lambda_{\min} = 5\%$

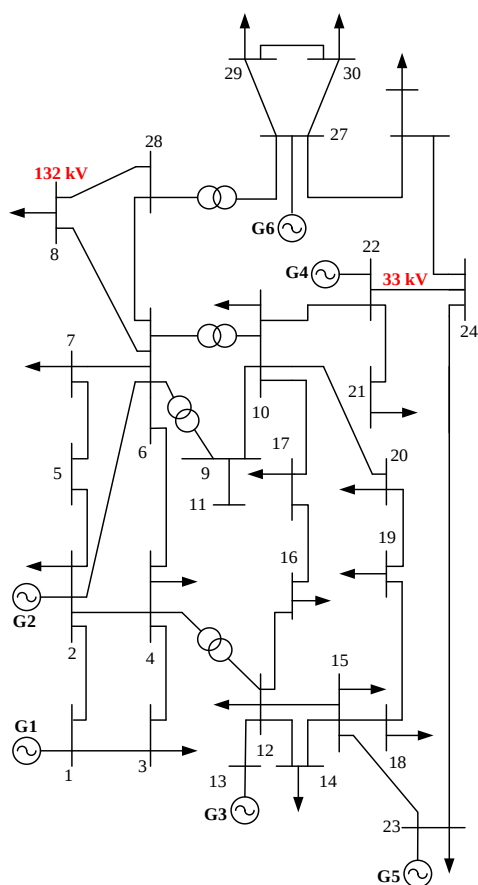
Kết quả tính toán khi hệ số tăng tải tối thiểu $\lambda_{\min} = 5\%$ được trình bày ở Bảng 4, bao gồm: công suất tác dụng và công suất phản kháng phát của các tổ máy; dung lượng, vị trí đặt của thiết bị bù SVC trong lưới điện; vốn đầu tư của SVC; chi phí tổn thất điện năng và tổng chi phí của lưới điện (giá trị hàm mục tiêu). Phân bố điện áp của lưới điện trong hai trường hợp tải cơ sở và tải giới hạn được trình bày trên Hình 4. Kết quả tính toán từ Hình 4 cho thấy rằng:

- Điện áp vận hành của các nguồn G1, G2, G3 và G6 khi tải cơ sở bằng với tải giới hạn.
- Điện áp vận hành của các nguồn G4 và G5 khi tải cơ sở nhỏ hơn so với tải giới hạn.
- Điện áp lớn nhất khi tải cơ sở là 1,05 pu tại các nút nguồn G1, G3 và G6.
- Điện áp lớn nhất khi tải giới hạn là 1,05 pu tại các nút nguồn G1, G3, G5 và G6.
- Điện áp nhỏ nhất khi tải cơ sở là 0,95 pu tại nút phụ tải 19.
- Điện áp nhỏ nhất khi tải giới hạn là 0,95 pu tại các nút phụ tải 19 và 30.

3.2.2. Kịch bản 2: Hệ số tăng tải tối thiểu $\lambda_{\min} = 10\%$

Bảng 4. Lời giải tối ưu ứng với các hệ số tăng tải tối thiểu

	$\lambda_{\min} = 5\%$		$\lambda_{\min} = 10\%$		$\lambda_{\min} = 15\%$	
P_{G1} (MW)	80		80		80	
Q_{G1} (MVar)	9,33		9,58		9,63	
P_{G2} (MW)	80		80		80	
Q_{G2} (MVar)	75,95		73,86		73,99	
P_{G3} (MW)	62,32		49,59		60,43	
Q_{G3} (MVar)	36,39		34,96		36,59	
P_{G4} (MW)	79,89		89,92		81,30	
Q_{G4} (MVar)	61,97		61,97		57,09	
P_{G5} (MW)	30,20		31,56		30,37	
Q_{G5} (MVar)	22,44		21,77		20,81	
P_{G6} (MW)	55		56,27		55	
Q_{G6} (MVar)	34,31		20,17		28,40	
Nút đặt SVC	18	29	18	29	20	29
Dung lượng SVC (MVar)	4,39	4,39	7,36	7,52	11,1	10,7
Vốn đầu tư SVC (\$/năm)	126.166		212.006		308.468	
Chi phí tổn thất điện năng (\$/năm)	1.894.458,9		1.880.333,7		1.829.432,9	
Hàm mục tiêu (\$/năm)	2.020.624,9		2.092.339,7		2.137.900,5	



Hình 3. Sơ đồ lưới điện 30 nút IEEE

Kết quả tính toán khi hệ số tăng tải tối thiểu $\lambda_{\min} = 10\%$ được trình bày ở Bảng 4. Phân bố điện áp của lưới điện trong hai trường hợp phụ tải cơ sở và phụ tải giới hạn được mô tả trên Hình 5. Kết quả tính toán từ Hình 5 cho thấy rằng:

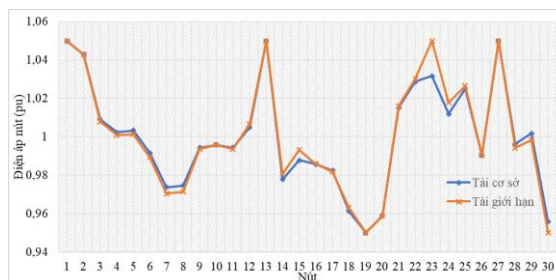
- Điện áp vận hành của các nguồn G3 và G6 khi tải cơ sở bằng với tải giới hạn.
- Điện áp vận hành của các nguồn G1, G2 và G5 khi tải cơ sở nhỏ hơn so với tải giới hạn.
- Điện áp vận hành của nguồn G4 khi tải cơ sở lớn hơn so với tải giới hạn.
- Điện áp lớn nhất khi tải cơ sở là 1,05 pu tại các nút nguồn G3 và G6.
- Điện áp lớn nhất khi tải giới hạn là 1,05 pu tại các nút nguồn G1, G3, G5 và G6.
- Điện áp nhỏ nhất khi tải cơ sở là 0,95762 pu tại nút phụ tải 19.

Điện áp nhỏ nhất khi tải giới hạn là 0,95 pu tại các nút phụ tải 19 và 30.

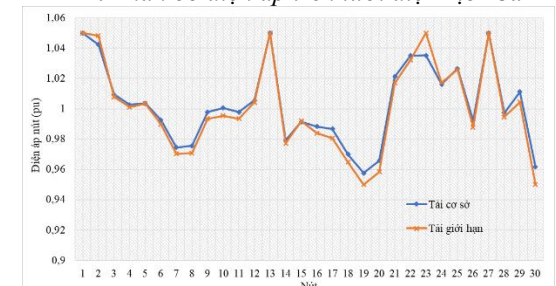
3.2.3. Kịch bản 3: Hệ số tăng tải tối thiểu $\lambda_{\min} = 15\%$

Kết quả tính toán khi hệ số tăng tải tối thiểu $\lambda_{\min} = 15\%$ được trình bày ở Bảng 4. Phân bố điện áp của lưới điện trong hai trường hợp tải cơ sở và tải giới hạn được mô tả trên Hình 6. Kết quả tính toán từ Hình 6 cho thấy rằng:

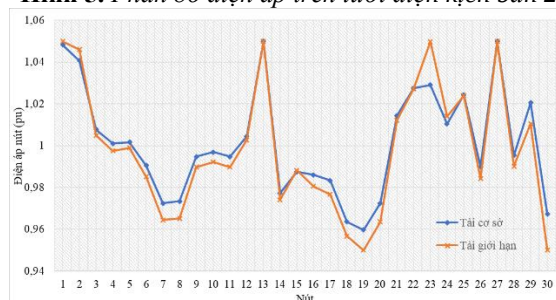
- Điện áp vận hành của các nguồn G3 và G6 khi tải cơ sở bằng với tải giới hạn.
- Điện áp vận hành của các nguồn G1, G2 và G5 khi tải cơ sở nhỏ hơn so với tải giới hạn.
- Điện áp vận hành của nguồn G4 khi tải cơ sở lớn hơn so với tải giới hạn.
- Điện áp lớn nhất khi tải cơ sở là 1,05 pu tại các nút nguồn G3 và G6.
- Điện áp lớn nhất khi tải giới hạn là 1,05 pu tại các nút nguồn G1, G3 và G6.
- Điện áp nhỏ nhất khi tải cơ sở là 0,95972 pu tại nút phụ tải 19.



Hình 4. Phân bố điện áp trên lưới điện kịch bản 1



Hình 5. Phân bố điện áp trên lưới điện kịch bản 2

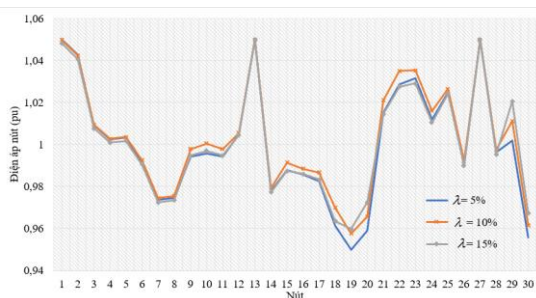


Hình 6. Phân bố điện áp trên lưới điện kịch bản 3

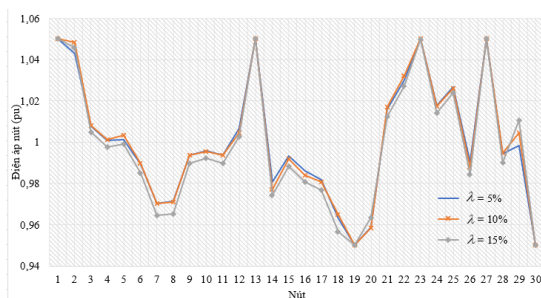
- Điện áp nhỏ nhất khi tải giới hạn là 0,95 pu tại các nút phụ tải 19 và 30.

Từ Bảng 4, ta thấy khi hệ số tăng tải tối thiểu yêu cầu $\lambda_{\min}$ tăng, tổng dung lượng của thiết bị bù SVC tăng (từ 8,78 MVar với $\lambda_{\min} = 5\%$ lên 21,80 MVar với $\lambda_{\min} = 15\%$), vốn đầu tư của thiết bị bù SVC cũng tăng (từ 126.166 \$/năm với $\lambda_{\min} = 5\%$ lên 308.468 \$/năm với $\lambda_{\min} = 15\%$). Tuy nhiên, chi phí cho tổn thất điện năng được giảm (từ 1.894.458,9 \$/năm với $\lambda_{\min} = 5\%$ xuống còn 1.829.432,9 \$/năm với $\lambda_{\min} = 15\%$). Ngoài ra, Hình 7 và Hình 8 mô tả sự phân bố điện áp của lưới điện với 3 kịch bản mức độ an toàn tối thiểu khi tải cơ sở và tải giới hạn.

Hình 7 cho thấy rằng, điện áp nhỏ nhất của lưới điện khi tải cơ sở cùng tại nút 19 tương ứng với 3 kịch bản mức độ an toàn tối thiểu. Tuy nhiên, trị số điện áp nhỏ nhất khác nhau (bằng 0,95 pu với $\lambda_{\min} = 5\%$, bằng 0,95762 pu với $\lambda_{\min} = 10\%$ và bằng 0,95972 pu với $\lambda_{\min} = 15\%$). Trong khi đó, trong trường hợp tải giới hạn (Hình 8), điện áp nhỏ nhất trong cả 3 kịch bản đều bằng 0,95 pu và cùng tại nút 19.



Hình 7. Phân bố điện áp trên lưới điện trong trường hợp tải cơ sở



Hình 8. Phân bố điện áp trên lưới điện trong trường hợp tải giới hạn

3.3. Ảnh hưởng của công suất phụ tải

Phần này trình bày ảnh hưởng của công suất phụ tải đến lời giải của bài toán tối ưu. Ba kịch bản của phụ tải được so sánh:

- Kịch bản tải cơ sở: dữ liệu phụ tải từ Bảng 1 (tổng công suất phụ tải bằng 378,4 MW).
- Kịch bản tải thấp: công suất phụ tải giảm 10% so với kịch bản cơ sở.
- Kịch bản tải cao: công suất phụ tải tăng 10% so với kịch bản cơ sở.

Kết quả tính toán ứng với 3 kịch bản phụ tải được trình bày trong Bảng 5, trong đó hệ số tăng tải tối thiểu đều được lấy bằng 15%. Kết quả tính toán từ Bảng 5 cho thấy rằng:

- Vị trí đặt thiết bị SVC thay đổi khi công suất phụ tải của lưới điện thay đổi.
- Công suất phụ tải tăng thì tổng dung lượng của thiết bị bù SVC, chi phí cho tổn thất điện năng và giá trị hàm mục tiêu tăng.

Bảng 5. Lời giải tối ưu ứng với các kịch bản phụ tải

	Kịch bản tải thấp	Kịch bản tải cơ sở	Kịch bản tải cao
P_{G1} (MW)	80	80	80
Q_{G1} (MVar)	1,42	9,63	7,84
P_{G2} (MW)	80	80	80
Q_{G2} (MVar)	71,39	73,99	88,07
P_{G3} (MW)	40,52	60,43	74,58
Q_{G3} (MVar)	25,13	36,59	39,11
P_{G4} (MW)	62,91	81,30	100
Q_{G4} (MVar)	55,15	57,09	61,97

	Kịch bản tải thấp		Kịch bản tải cơ sở		Kịch bản tải cao		
P_{G5} (MW)	30		30,37		33,55		
Q_{G5} (MVar)	18,87		20,81		22,69		
P_{G6} (MW)	55		55		58,25		
Q_{G6} (MVar)	30,83		28,40		24,08		
Tổng công suất tác dụng của nguồn điện (MW)	348,43		387,1		426,38		
Nút đặt SVC	12	30	20	29	5	19	29
Dung lượng SVC (MVar)	15,08	1,63	11,1	10,7	4,18	21,63	20,14
Vốn đầu tư SVC (\$/năm)	234.493		308.468		638.229		
Chi phí tổn thất điện năng (\$/năm)	1.653.659,9		1.829.432,9		2.130.573,2		
Hàm mục tiêu (\$/năm)	1.888.152,9		2.137.900,5		2.768.802,2		

4. Kết luận

Bài báo này đề xuất mô hình tối ưu để xác định vị trí và công suất của thiết bị bù SVC có xét ràng buộc ổn định điện áp. Mô hình đề xuất có dạng quy hoạch phi tuyến nguyên thực hỗn hợp (MINLP) với hàm mục tiêu là cực tiểu tổng chi phí, bao gồm chi phí cho tổn thất điện năng và vốn đầu tư của các thiết bị SVC. Mô hình tối ưu đề xuất được đánh giá trên lưới điện 30 nút IEEE cải biên sử dụng ngôn ngữ lập trình GAMS. Ngoài ra, bài báo cũng phân tích ảnh hưởng của ràng buộc ổn định điện áp và công suất phụ tải đến lời giải tối ưu. Kết quả tính toán cho thấy rằng, nếu mức độ an toàn tối thiểu tăng thì dung lượng và vốn đầu tư của thiết bị SVC tăng và chi phí cho tổn thất điện năng giảm. Ngoài ra, khi công suất phụ tải thay đổi thì vị trí và dung lượng của thiết bị bù SVC thay đổi. Thời gian tính toán cho thấy mô hình đề xuất phù hợp với lưới điện lớn trong thực tế. Hướng nghiên cứu trong tương lai là xây dựng mô hình tối ưu hình nón bậc hai nguyên thực hỗn hợp (MISOCP) kết hợp với chỉ số ổn định điện áp và xét ảnh hưởng của tính bất định phụ tải đến vị trí và công suất của thiết bị bù SVC.

PHỤ LỤC

Trong phần Phụ lục này, mô hình tối ưu để xác định vị trí và công suất đặt của thiết bị bù SVC có xét đồ thị phụ tải được trình bày. Mô hình này chưa được sử dụng để thực hiện tính toán mô phỏng trong bài báo. Mục đích của trình bày này là để minh họa sự tích hợp của ràng buộc tăng/giảm công suất phát của các tổ máy vào mô hình tối ưu.

$$\min f_1 + \sum_{i \in N} y_i f_2 \quad (29)$$

$$f_1 = 365 \cdot K_e \cdot \sum_{t=1}^{24} \left(\sum_{i=1}^{N_G} P_{Git} - \sum_{j=1}^{N_D} P_{Djt} \right) \quad (\$/\text{năm}) \quad (30)$$

$$f_2 = 8760 \cdot 0,013 \cdot C_{SVC} \cdot Q_{Ci} \quad (\$/\text{năm}) \quad (31)$$

$$C_{SVC} = 0,0003Q_{Ci}^2 - 0,3051Q_{Ci} + 127,38 \quad (\$/\text{kVAr}) \quad (32)$$

$$\sum_{i=1}^N y_i \leq k \quad (33)$$

$$P_{Git} - P_{Lit} = \sum_{j=1, j \neq i}^N g_{ij} V_{it}^2 - V_{it} V_{jt} (g_{ij} \cos \delta_{ij,t} + b_{ij} \sin \delta_{ij,t}), \quad \forall i \in N, \forall t = 1, \dots, T \quad (34)$$

$$Q_{Git} - Q_{Lit} + y_i Q_{Cit} = \sum_{j=1, j \neq i}^N - \left(b_{ij} + \frac{b_{ij}^{sh}}{2} \right) V_{it}^2 - V_{it} V_{jt} (g_{ik} \sin \delta_{ij,t} - b_{ij} \cos \delta_{ij,t}) \quad (35)$$

$$\forall i \in N, \forall t = 1, \dots, T$$

$$\hat{P}_{Git} - \hat{P}_{Lit} = \sum_{j=1, j \neq i}^N g_{ij} \hat{V}_{it}^2 - \hat{V}_{it} \hat{V}_{jt} \left(g_{ij} \cos \hat{\delta}_{ij,t} + b_{ij} \sin \hat{\delta}_{ij,t} \right), \quad \forall i \in N, \forall t = 1, \dots, T \quad (36)$$

$$\hat{Q}_{Git} - \hat{Q}_{Lit} + y_i Q_{Cit} = \sum_{j=1, j \neq i}^N - \left(b_{ij} + \frac{b_{ij}^{sh}}{2} \right) \hat{V}_{it}^2 - \hat{V}_{it} \hat{V}_{jt} \left(g_{ik} \sin \hat{\delta}_{ij,t} - b_{ij} \cos \hat{\delta}_{ij,t} \right) \quad (37)$$

$\forall i \in N, \forall t = 1, \dots, T$

$$\sqrt{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2} \leq S_{ij}^{\max}, \quad \forall ij, \forall t = 1, \dots, T \quad (38)$$

$$\sqrt{\hat{P}_{ij,t}^2 + \hat{Q}_{ij,t}^2} \leq S_{ij}^{\max}, \quad \forall ij, \forall t = 1, \dots, T \quad (39)$$

$$u_{it} P_{Gi}^{\min} \leq P_{Git} \leq u_{it} P_{Gi}^{\max}, \quad \forall i \in N_G, \forall t = 1, \dots, T \quad (40)$$

$$u_{it} Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Git} \leq u_{it} Q_{Gi}^{\max}, \quad \forall i \in N_G, \forall t = 1, \dots, T \quad (41)$$

$$u_{it} Q_{Gi}^{\min} \leq \hat{Q}_{Git} \leq u_{it} Q_{Gi}^{\max}, \quad \forall i \in N_G, \forall t = 1, \dots, T \quad (42)$$

$$V_i^{\min} \leq V_{it} \leq V_i^{\max}, \quad \forall i \in N, \forall t = 1, \dots, T \quad (43)$$

$$\delta_i^{\min} \leq \delta_{it} \leq \delta_i^{\max}, \quad \forall i \in N, \forall t = 1, \dots, T \quad (44)$$

$$V_i^{\min} \leq \hat{V}_{it} \leq V_i^{\max}, \quad \forall i \in N, \forall t = 1, \dots, T \quad (45)$$

$$\delta_i^{\min} \leq \hat{\delta}_{it} \leq \delta_i^{\max}, \quad \forall i \in N, \forall t = 1, \dots, T \quad (46)$$

$$y_i Q_{Ci}^{\min} \leq Q_{Ci} \leq y_i Q_{Ci}^{\max}, \quad \forall i \in N \quad (47)$$

$$0 \leq Q_{Cit} \leq Q_{Ci}, \quad \forall i \in N, \forall t = 1, \dots, T \quad (48)$$

$$\lambda_t \geq \lambda_{\min}, \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (49)$$

$$\delta_{it} = 0, i = ref \quad (50)$$

$$\hat{\delta}_{it} = 0, i = ref \quad (51)$$

$$P_{Gi,t-1} - P_{Git} \leq R_i^D, \quad \forall i \in N_G, \forall t = 1, \dots, T \quad (52)$$

$$P_{Git} - P_{Gi,t-1} \leq R_i^U, \quad \forall i \in N_G, \forall t = 1, \dots, T \quad (53)$$

trong đó, R_i^U và R_i^D lần lượt là giới hạn tăng và giới hạn giảm công suất phát của tổ máy i .

Sự khác biệt của mô hình tối ưu (29)-(53) so với mô hình (1)-(26) bao gồm:

- Tích hợp được đồ thị phụ tải (chỉ số khoảng thời gian t và tổng số khoảng thời gian T);
- Xét được trạng thái vận hành của tổ máy (biến nhị phân u_{it} bằng 1 khi tổ máy i làm việc ở khoảng thời gian t , và bằng 0 khi tổ máy i nghỉ ở khoảng thời gian t).
- Xét được động học của các máy phát điện như tốc độ tăng/giảm công suất phát (các ràng buộc (52) và (53));
- Phức tạp hơn và khó khăn hơn về mặt tính toán.
- Phù hợp với thực tế hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] P. Kundur, *Power system stability and control*. Columbia, British, 1994.
- [2] R. Sirjani, A. Mohamed, and H. Shareef, "Optimal Capacitor Placement in a Distribution Network with Nonlinear Loads Using Harmony Search Algorithm," *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol.5, no. 6, pp. 461–474, 2011.
- [3] J. Dixon, L. Moran, J. Rodriguez, and R. Domke, "Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review," *Proc. IEEE*, vol. 93, no. 12, pp. 2144–2164, Dec. 2005, doi: 10.1109/JPROC.2005.859937.
- [4] H. N. Ng, M. M. A. Salama, and A. Y. Chikhani, "Classification of capacitor allocation techniques," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 15, no. 1, pp. 387–392, Jan. 2000, doi: 10.1109/61.847278.

-
- [5] R. Minguez, F. Milano, R. Zarate-Minano, and A. J. Conejo, "Optimal Network Placement of SVC Devices," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 4, pp. 1851–1860, Nov. 2007, doi: 10.1109/TPWRS.2007.907543.
- [6] Y.-T. Hsiao, C.-C. Liu, H.-D. Chiang, and Y.-L. Chen, "A new approach for optimal VAr sources planning in large scale electric power systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 8, no. 3, pp. 988–996, Aug. 1993, doi: 10.1109/59.260902.
- [7] I. Pisica, C. Bulac, L. Toma, and M. Eremia, "Optimal SVC placement in electric power systems using a genetic algorithms based method," in *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, Bucharest, Romania: IEEE, Jun. 2009, pp. 1–6, doi: 10.1109/PTC.2009.5281841.
- [8] S. Ishak, A. F. Abidin, and T. K. A. Rahman, "Static var compensator planning using artificial immune system for loss minimization and voltage improvement," in *Proceedings of National Power and Energy Conference*, Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2004, pp. 41–45, doi: 10.1109/PECON.2004.1461613.
- [9] B. Singh and G. Agrawal, "Enhancement of voltage profile by incorporation of SVC in power system networks by using optimal load flow method in MATLAB/Simulink environments," *Energy Reports*, vol. 4, pp. 418–434, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.egy.2018.07.004.
- [10] A. Y. Abdelaziz and T. S. Abdel-Salam, "A Neural Network-Based Approach for Control of Capacitors Installed on Distribution Systems for Power Loss Reduction," *The Eighth International Middle-East Power Systems Conference MEPCON'2001*, at: Helwan University, Egypt, 2011.
- [11] N. N. Tung and P. T. Nam, "Evaluate Real Time Voltage Stability using Wide Area Monitoring System," *Journal of Science & Technology - Hanoi University of Industry*, vol. 44, pp. 17–21, Feb. 2018.
- [12] V. V. Thang, N. V. Vien, and T. D. Tung, "Optimal Allocation and Sizing of Capacitors in Distribution System Considering Stochastic Loads," *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 195, no. 02, pp. 55–60, Feb. 2019.
- [13] M. El-Azab, W. A. Omran, S. F. Mekhamer, and H. E. A. Talaat, "Allocation of FACTS Devices Using a Probabilistic Multi-Objective Approach Incorporating Various Sources of Uncertainty and Dynamic Line Rating," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 167647–167664, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3023744.
- [14] M. Nadeem, K. Imran, A. Khattak, A. Ulasyar, A. Pal, M.Z. Zeb, A. N. Khan, and M. Padhee, "Optimal Placement, Sizing and Coordination of FACTS Devices in Transmission Network Using Whale Optimization Algorithm," *Energies*, vol. 13, no. 3, Feb. 2020, Art. no. 753, doi: 10.3390/en13030753.
- [15] GAMS. [Online]. Available: <https://www.gams.com/> [Accessed Aug. 21, 2023].
- [16] R. W. Ferrero, S.M. Shahidehpour, and V.C. Ramesh, "Transaction analysis in deregulated power systems using game theory," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 3, pp. 1340–1347, Aug. 1997, doi: 10.1109/59.630479.
-