

A MIQP FORMULATION FOR OPTIMAL OPERATION OF SWITCHABLE CAPACITORS IN POWER DISTRIBUTION GRIDS WITH DISTRIBUTED GENERATION

Ngo Thuy Nhung, Nguyen Huu Cam, Pham Nang Van*

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

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 28/12/2023	The growing penetration of on-site generating units and the rapid growth of electricity demand could result in increased power loss. This research describes a mixed-integer quadratic programming (MIQP) based formulation to determine the optimal operation of switchable capacitors with the aim of minimizing the total power losses in power distribution systems. The proposed formulation encompasses constraints such as power flow equations, thermal limits of branches, and nodal voltage magnitude bounds. The developed MIQP formulation is converted from a mixed-integer nonlinear programming (MINLP) model by a piecewise linearization approach. The globally optimal outcome of the proposed MIQP model is calculated by utilizing the CPLEX commercial solver within the GAMS programming language. The evaluation of this MIQP formulation is implemented using an IEEE 33-node distribution network with different scenarios of load consumption power. The calculation results reveal that optimal control of switchable capacitors makes a significant contribution to the reduction of the overall power losses and enhancement of voltage profile in distribution systems. Moreover, the calculation time of the proposed MIQP model is significantly lower than that of the MINLP formulation.
Revised: 09/7/2024	
Published: 10/7/2024	
KEYWORDS	
Power distribution systems	
Switchable capacitors	
On-site generating units	
Power loss	
Mixed-integer quadratic programming (MIQP)	

ÁP DỤNG MÔ HÌNH MIQP ĐỂ VẬN HÀNH TỐI ƯU TỤ BÙ CÓ ĐÓNG CẮT TRONG LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI CÓ SỰ THÂM NHẬP CỦA NGUỒN ĐIỆN PHÂN TÁN

Ngô Thùy Nhung, Nguyễn Hữu Cẩm, Phạm Năng Văn*

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

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 28/12/2023	Sự thâm nhập ngày càng nhiều của nguồn điện phân tán và sự tăng trưởng công suất tiêu thụ của phụ tải có thể làm tăng tổn thất công suất tác dụng của mạng điện. Bài báo này trình bày mô hình tối ưu toàn phương nguyên thực hỗn hợp (MIQP) để xác định trạng thái vận hành tối ưu của tụ bù ngang có đóng cắt nhằm tối thiểu hóa tổn thất công suất hữu công trên lưới điện. Các ràng buộc của mô hình tối ưu MIQP gồm các phương trình đảm bảo sự cân bằng công suất nút, giới hạn dòng điện trên các nhánh và giới hạn điện áp các nút. Mô hình tối ưu MIQP này được biến đổi từ mô hình tối ưu phi tuyến số nguyên (MINLP) trên cơ sở áp dụng phương pháp tuyến tính hóa từng đoạn. Sự đánh giá của mô hình tối ưu MIQP được thực hiện trên lưới phân phối mẫu IEEE có 33 nút với bộ giải tối ưu CPLEX và được lập trình với ngôn ngữ GAMS. Các kịch bản khác nhau của công suất phụ tải được so sánh. Lời giải của mô hình tối ưu cho thấy, tối ưu hóa trạng thái vận hành của tụ bù ngang có đóng cắt giúp giảm đáng kể tổn thất công suất hữu công và cải thiện chất lượng điện áp của lưới phân phối. Đồng thời, thời gian tính toán của mô hình tối ưu đề xuất nhỏ hơn nhiều so với mô hình MINLP.
Ngày hoàn thiện: 09/7/2024	
Ngày đăng: 10/7/2024	
TỪ KHÓA	
Lưới điện phân phối	
Tụ đóng cắt	
Nguồn điện phân tán	
Tổn thất công suất	
Quy hoạch toàn phương nguyên thực hỗn hợp (MIQP)	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.9492>

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

1. Giới thiệu

Hiện nay, vì các nguồn điện phân tán (DG) thâm nhập ngày càng nhiều và công suất tiêu thụ của phụ tải điện ngày càng tăng nên chất lượng điện năng của lưới điện phân phối có thể bị suy giảm [1]. Các vấn đề thường gặp như điện áp vượt quá giới hạn cho phép tại một số vị trí kết nối của DG, hay điện áp giảm thấp trong chế độ phụ tải cực đại... Một trong các giải pháp để giải quyết các vấn đề trên và tăng cường hiệu quả vận hành của hệ thống phân phối điện là lắp đặt và tối ưu hóa vận hành các tụ bù ngang.

Trong lưới điện phân phối, tụ bù ngang thường được sử dụng để làm tăng hệ số công suất, giảm tổn thất công suất tác dụng và nâng cao chất lượng điện áp. Do đó, việc nghiên cứu các bài toán vận hành và quy hoạch tụ bù ngang trên lưới điện phân phối ngày càng trở nên phổ biến. Thuật toán SHO được đề xuất trong [2] để tìm vị trí đặt và công suất đặt tối ưu của tụ bù ngang trong lưới điện phân phối hình tia có xét các mô hình phụ tải khác nhau. Hàm mục tiêu trong [2] là cực tiểu tổng các chi phí, bao gồm chi phí đầu tư tụ và chi phí do tổn thất điện năng. Mô hình tải phụ thuộc điện áp kết hợp với thuật toán Bat (BA) cũng được đề xuất trong [3]. Với việc tiếp cận nhiều mô hình phụ tải khác nhau, bài báo [3] đã đề xuất phương án tính toán vị trí đặt và công suất đặt tối ưu của tụ bù trong lưới phân phối có tích hợp nguồn điện phân tán. Nghiên cứu [4] trình bày thuật toán tìm kiếm CucKoo để tìm kiếm vị trí đặt tối ưu của tụ bù trong lưới phân phối hình tia. Phương pháp [4] xem xét các mức phụ tải khác nhau để xác định vị trí đặt và công suất tối ưu của các tụ điện cố định và tụ điện có đóng cắt với kết quả được chứng minh là tốt hơn các thuật toán Heuristics. Thuật toán hybrid PPSOGSA được áp dụng trong [5] để tính toán tối ưu vị trí đặt và công suất phản kháng của tụ bù nhằm tối thiểu hóa tổng tổn thất công suất tác dụng của lưới điện phân phối có tích hợp DG. Tương tự, nghiên cứu [6] đề xuất thuật toán BFOA cho bài toán xác định vị trí đặt tối ưu của tụ bù trong hệ thống phân phối điện. Thuật toán GA được trình bày trong [7] để tính toán tối ưu đồng thời vị trí đặt và công suất đặt của tụ bù và nguồn điện phân tán. Bài báo [8] sử dụng mô hình tối ưu có dạng nón bậc hai số nguyên (MISOCP) để lựa chọn vị trí đặt và dung lượng của tụ bù trong hệ thống phân phối điện có xét sự thay đổi công suất tiêu thụ của phụ tải theo điện áp. Hàm mục tiêu trong [8] là cực tiểu hóa tổng chi phí, bao gồm chi phí đầu tư tụ bù, chi phí do tổn thất công suất và tổn thất điện năng. Tuy nhiên, các nghiên cứu [2]-[8] thuộc kiểu bài toán quy hoạch. Một số ít nghiên cứu trước đây đã đề xuất các phương pháp cho bài toán vận hành tối ưu tụ bù. Với mô hình PSO, bài báo [9] xét đồng thời trạng thái vận hành tối ưu của tụ bù ngang có đóng cắt và vị trí nấc điều chỉnh điện áp của máy biến áp trên hệ thống phân phối hình tia có tích hợp nguồn điện phân tán. Nghiên cứu [10] áp dụng thuật toán Heuristic để tìm trạng thái vận hành tối ưu của tụ bù ngang có đóng cắt. Bảng 1 trình bày tổng quan các nghiên cứu về tối ưu hóa tụ bù ngang trong mạng lưới điện phân phối.

Các đóng góp chính của bài báo này bao gồm:

- Xây dựng mô hình tối ưu phi tuyến số nguyên (MINLP) cho bài toán tối ưu hóa trạng thái vận hành của tụ bù ngang có đóng cắt trên phân phối hình tia có tích hợp nguồn điện phân tán;
- Xây dựng mô hình tối ưu quy hoạch toàn phương nguyên thực hỗn hợp (MIQP) từ mô hình MINLP thông qua phương pháp tuyến tính hóa từng đoạn dòng công suất nhánh;
- Áp dụng mô hình MIQP để xác định trạng thái vận hành tối ưu của tụ bù ngang có đóng cắt cho lưới điện mẫu 33 nút IEEE.

Bài báo có cấu trúc gồm 4 phần. Phần 1 trình bày tổng quan về bài toán áp dụng tụ bù ngang trong lưới điện phân phối. Phần 2 mô tả mô hình tối ưu MINLP và MIQP của bài toán xác định trạng thái vận hành tụ bù ngang có đóng cắt. Phần 3 ứng dụng mô hình tối ưu MIQP để xuất đề tính toán cho hệ thống điện 33 nút IEEE có tích hợp các nguồn điện phân tán. Kết luận và chủ đề nghiên cứu trong tương lai được trình bày trong Phần 4.

Bảng 1. Tổng quan các nghiên cứu về áp dụng tụ bù ngang trong lưới điện phân phối

Bài báo	Kiểu bài toán	Phương pháp giải	Hàm mục tiêu
[2]	Quy hoạch	Thuật toán SHO	Cực tiểu tổng chi phí đầu tư tụ và chi phí tổn thất điện năng
[3]	Quy hoạch	Thuật toán Bat	Cực tiểu tỷ số tổn thất công suất tác dụng và chỉ số ổn định điện áp
[4]	Quy hoạch	Thuật toán CSA	Cực tiểu tổng tổn thất điện năng
[5]	Quy hoạch	Thuật toán PSSOGSA	Cực tiểu tổng tổn thất công suất tác dụng
[6]	Quy hoạch	Thuật toán BFOA	Cực đại độ giảm tổng tổn thất công suất tác dụng
[7]	Quy hoạch	Thuật toán GA	Cực tiểu tổng tổn thất công suất tác dụng, chi phí lắp đặt tụ và chi phí lắp đặt DG
[8]	Quy hoạch	MISOCP	Cực tiểu tổng chi phí, bao gồm vốn đầu tư tụ, chi phí cho tổn thất công suất hữu công và tổn thất điện năng
[9]	Vận hành	Mô hình PSO	Cực tiểu tổng tổn thất công suất tác dụng, độ lệch điện áp và chi phí vận hành tụ
[10]	Quy hoạch	Thuật toán Heuristic	Cực tiểu tổng chi phí cho tổn thất công suất tác dụng và chi phí lắp đặt tụ
Nghiên cứu này	Vận hành	MIQP	Cực tiểu tổng tổn thất công suất tác dụng

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Mô hình tối ưu phi tuyến số nguyên (MINLP)

Hàm mục tiêu của bài toán vận hành tối ưu tụ bù ngang có đóng cắt trong lưới điện phân phối là cực tiểu hóa tổng tổn thất công suất hữu công của lưới phân phối:

$$\min \sum_{ij \in \Phi_L} R_{ij} \times \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} \quad (1)$$

thỏa mãn các ràng buộc:

$$P_{hi} - R_{hi} \times \frac{P_{hi}^2 + Q_{hi}^2}{U_h^2} - \sum P_{ij} = -P_{Gi} + P_{Di}; \quad \forall i \in \Phi_N, \forall h, j \in \Phi_i \quad (2)$$

$$Q_{hi} - X_{hi} \times \frac{P_{hi}^2 + Q_{hi}^2}{U_h^2} - \sum Q_{ij} = -Q_{Gi} + Q_{Di} - Q_{Ci}; \quad \forall i \in \Phi_N, \forall h, j \in \Phi_i \quad (3)$$

$$(U_i)^2 - (U_j)^2 = 2(R_{ij}P_{ij} + X_{ij}Q_{ij}) - \frac{Z_{ij}^2}{U_i^2}(P_{ij}^2 + Q_{ij}^2); \quad \forall ij \in \Phi_L \quad (4)$$

$$Q_{Ci} = Q_{C0i} \times Z_{Ci}; \quad \forall i \in \Phi_C \quad (5)$$

$$I_{ij}^2 = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} \leq (I_{ij}^{\max})^2; \quad \forall ij \in \Phi_L \quad (6)$$

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max}; \quad \forall i \in \Phi_N \quad (7)$$

trong đó:

- P_{ij} và Q_{ij} tương ứng là công suất hữu công và vô công đầu nhánh đường dây ij ;
- P_{Di} và Q_{Di} tương ứng là công suất hữu công và vô công của phụ tải tại nút i ;
- P_{Gi} và Q_{Gi} tương ứng là công suất hữu công và vô công của nguồn điện tại nút i ;
- Q_{Ci} là công suất phát của tụ bù tại nút i trong vận hành;
- Q_{C0i} là dung lượng của tụ bù tại nút i (hằng số);

- U_i là điện áp tại nút i ;
- $U_i^{\max}$ và $U_i^{\min}$ tương ứng là điện áp lớn nhất và nhỏ nhất cho phép trong vận hành tại nút i ;
- I_{ij} là dòng điện nhánh ij ;
- $I_{ij}^{\max}$ là dòng điện lớn nhất cho phép của nhánh ij ;
- R_{ij} và X_{ij} tương ứng là điện trở dọc và điện kháng dọc trên nhánh ij ;
- Φ_N là tập các nút của lưới điện;
- Φ_i là tập các nút nối với nút i ;
- Φ_C là tập các nút đặt tụ;
- Φ_L là tập các đường dây;
- Φ_{DG} là tập các nút đặt DG;
- z_{Ci} là biến nhị phân biểu diễn trạng thái đóng/mở của tụ, nếu $z_{Ci}=1$ thì tụ bù ngang làm việc, và ngược lại, tụ bù ngang không làm việc.

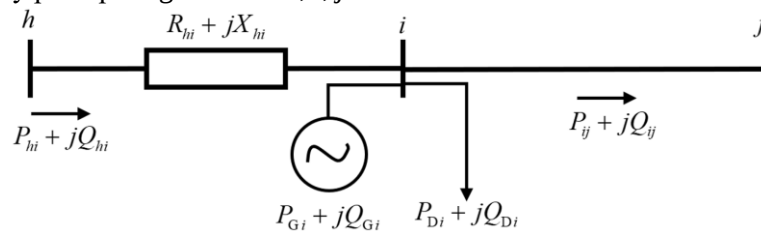
Hàm mục tiêu (1) là tối thiểu tổng tổn thất công suất của lưới phân phối. Biểu thức (2), (3) và (4) biểu diễn hệ phương trình cân bằng công suất. Biểu thức (5) tính toán công suất phản kháng của tụ bù ngang có đóng cắt trong vận hành. Ràng buộc (6) mô tả giới hạn nhiệt của đường dây. Giới hạn mô-đun điện áp được mô tả bởi ràng buộc (7).

Về mặt toán học, mô hình tối ưu trên là phi tuyến do hàm mục tiêu (1), các phương trình đảm bảo sự cân bằng công suất nút (2) – (4) và ràng buộc giới hạn nhiệt của đường dây (6) có dạng bậc hai. Nhược điểm của mô hình phi tuyến này là phức tạp về mặt tính toán, thời gian tính toán lớn và không đảm bảo tìm được lời giải tối ưu toàn cục. Vì vậy, mô hình tối ưu MINLP chuyển thành mô hình tối ưu MIQP. Mô hình MIQP này đảm bảo tìm được nghiệm tối ưu toàn cục và có thể được giải hiệu quả trên các phần mềm tối ưu như CPLEX sử dụng ngôn ngữ lập trình GAMS. Phần tiếp theo của bài báo này trình bày phương pháp tuyến tính hóa từng đoạn để đưa mô hình tối ưu MINLP về mô hình tối ưu MIQP.

2.2. Mô hình tối ưu toàn phương nguyên thực hỗn hợp (MIQP)

2.2.1. Phương pháp tuyến tính hóa từng đoạn

Xét đường dây phân phối gồm 3 nút h, i, j như Hình 1.



Hình 1. Mô hình lưới hình tia có 3 nút

Sự cân bằng công suất nút được đảm bảo bởi các phương trình dưới đây:

$$P_{hi} - R_{hi} \times \frac{P_{hi}^2 + Q_{hi}^2}{U_h^2} - \sum P_{ij} = -P_{Gi} + P_{Di}; \quad \forall i \in \Phi_N, \forall h, j \in \Phi_i \quad (8)$$

$$Q_{hi} - X_{hi} \times \frac{P_{hi}^2 + Q_{hi}^2}{U_h^2} - \sum Q_{ij} = -Q_{Gi} + Q_{Di} - Q_{Ci}; \quad \forall i \in \Phi_N, \forall h, j \in \Phi_i \quad (9)$$

Hệ phương trình cân bằng công suất nút trên có dạng phi tuyến do có thành phần bậc hai của điện áp nút, công suất hữu công và công suất vô công tại đầu nhánh đường dây. Do đó, bài báo này

đề xuất phương pháp tuyến tính hóa từng đoạn để đưa bình phương công suất hữu công và vô công đầu nhánh đường dây về dạng bậc nhất. Kỹ thuật tuyến tính hóa được xây dựng như dưới đây.

Đường đặc tính phi tuyến của hàm biểu diễn dòng công suất tác dụng trên các nhánh được chia thành L phân đoạn. Khi đó, bình phương dòng công suất tác dụng nhánh P_{ij}^2 và giá trị của biến $|P_{ij}|$ được biểu diễn như sau:

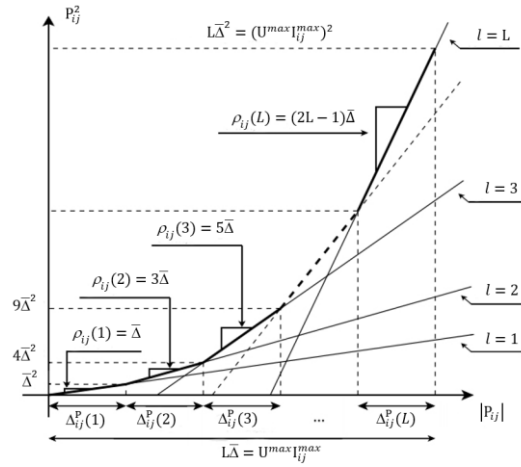
$$P_{ij}^2 = \sum_{l=1}^L \rho_{ij}(l) \times \Delta_{ij}^P(l) \quad ; \forall ij \in \Phi_L \quad (10)$$

$$|P_{ij}| = \sum_{l=1}^L \Delta_{ij}^P(l) \quad ; \forall ij \in \Phi_L \quad (11)$$

$$\rho_{ij,l} = (2l-1)\bar{\Delta}_{ij}; \quad \forall ij \in \Phi_L, l \in \{1, \dots, L\} \quad (12)$$

$$\bar{\Delta}_{ij} = \frac{U_i^{\max} \times I_{ij}^{\max}}{L} \quad ; \forall ij \in \Phi_L \quad (13)$$

$$0 \leq \Delta_{ij}^P(l) \leq \bar{\Delta}_{ij} \quad ; \forall ij \in \Phi_L, l \in \{1, \dots, L\} \quad (14)$$



Hình 2. Tuyến tính hóa từng đoạn $(P_{ij})^2$

trong đó:

- $\Delta_{ij}^P(l)$ là biến cần tìm, biểu diễn công suất tác dụng của nhánh ij ứng với phân đoạn tuyến tính thứ l (pu);

- $\rho_{ij}(l)$ là số thực, biểu diễn độ dốc của phân đoạn tuyến tính l ;

- L là tổng số phân đoạn tuyến tính hóa;

- $\bar{\Delta}_{ij}$ là độ dài lớn nhất đặt cho mỗi phân đoạn tuyến tính (pu).

Để tuyến tính hóa trị tuyệt đối dòng công suất tác dụng nhánh (11), ta sử dụng các ràng buộc:

$$P_{ij}^+ + P_{ij}^- = \sum_{l=1}^L \Delta_{ij}^P(l) \quad ; \forall ij \in \Phi_L, l \in \{1, 2, \dots, L\} \quad (15)$$

$$P_{ij}^+ - P_{ij}^- = P_{ij} \quad ; \forall ij \in \Phi_L, l \in \{1, 2, \dots, L\} \quad (16)$$

$$P_{ij}^+ \geq 0, P_{ij}^- \geq 0 \quad ; \forall ij \in \Phi_L, l \in \{1, 2, \dots, L\} \quad (17)$$

trong đó, P_{ij}^+ và P_{ij}^- là các biến phụ.

Khi áp dụng kỹ thuật tuyến tính hóa từng đoạn, sự liên kết của mỗi phân đoạn tuyến tính được đảm bảo với các ràng buộc sau:

$$z_{ij}^P(l) \bar{\Delta}_{ij} \leq \Delta_{ij}^P(l); \quad \forall ij \in \Phi_L, l \in \{1, 2, \dots, L-1\} \quad (18)$$

$$\Delta_{ij}^P(l) \leq z_{ij}^P(l-1) \bar{\Delta}_{ij}; \quad \forall ij \in \Phi_L, l \in \{2, \dots, L\} \quad (19)$$

$$z_{ij}^P(l-1) \geq z_{ij}^P(l); \quad \forall ij \in \Phi_L, l \in \{2, \dots, L-1\} \quad (20)$$

$$z_{ij}^P(l) \in \{0, 1\}; \quad \forall ij \in \Phi_L, l \in \{1, 2, \dots, L-1\} \quad (21)$$

trong đó, $z_{ij}^P(l)$ là biến nhị phân, có giá trị bằng 1 nếu độ dài phân đoạn tuyến tính thứ l tương ứng với công suất tác dụng đầu nhánh đường dây ij có giá trị bằng $\bar{\Delta}_{ij}$, và ngược lại.

Trên đây là kỹ thuật tuyến tính hóa từng đoạn dòng công suất tác dụng đầu nhánh đường dây, áp dụng kỹ thuật trên tính toán tương tự với dòng công suất phản kháng. Khi đó, hệ phương trình trào lưu công suất (4), (8) và (9) vẫn còn dạng phi tuyến do có thành phần bậc hai của mô-đun điện áp nút. Thành phần bậc hai của mô-đun điện áp nút được tuyến tính hóa như sau:

$$U_i \times \tilde{U}_i - U_j \times \tilde{U}_j = 2(R_{ij}P_{ij} + X_{ij}Q_{ij}) - \frac{Z_{ij}^2}{\tilde{U}_i^2} \left(\sum_{l=1}^L \rho_{ij,l} (\Delta_{ij,l}^P + \Delta_{ij,l}^Q) \right) ; \forall ij \in \Phi_L \quad (22)$$

$$P_{hi} - R_{hi} \times \frac{\sum_{l=1}^L \rho_{hi,l} (\Delta_{hi,l}^P + \Delta_{hi,l}^Q)}{\tilde{U}_h^2} - \sum P_{ij} = -P_{Gi} + P_{Di}; \quad \forall i \in \Phi_N, \forall h, j \in \Phi_i \quad (23)$$

$$Q_{hi} - X_{hi} \times \frac{\sum_{l=1}^L \rho_{hi,l} (\Delta_{hi,l}^P + \Delta_{hi,l}^Q)}{\tilde{U}_h^2} - \sum Q_{ij} = -Q_{Gi} + Q_{Di} - Q_{Ci} ; \forall i \in \Phi_N, \forall h, j \in \Phi_i \quad (24)$$

trong đó, $\tilde{U}_i$ là giá trị xấp xỉ của mô-đun điện áp nút i .

Đồng thời, ràng buộc giới hạn nhiệt (6) cũng được biến đổi thành:

$$\sum_{l=1}^L \rho_{ij,l} (\Delta_{ij,l}^P + \Delta_{ij,l}^Q) \leq (I_{ij}^{\max})^2 \times \tilde{U}_i^2 ; \forall ij \in \Phi_L \quad (25)$$

2.2.2. Mô hình MIQP trong bài toán vận hành tối ưu tụ đóng cắt

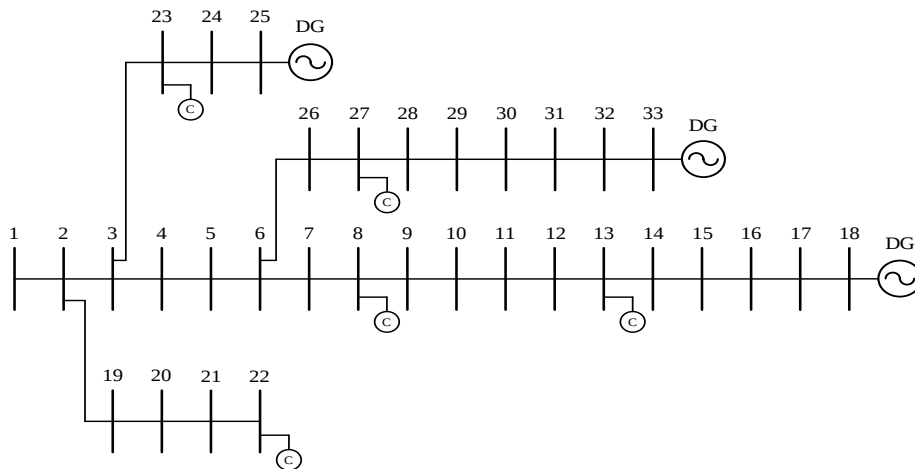
Với kỹ thuật tuyến tính hóa ở mục 2.2.1, mô hình tối ưu MIQP đề xuất gồm hàm mục tiêu (1) và các ràng buộc hệ phương trình cân bằng công suất (22) – (24); ràng buộc công suất phản kháng của tụ (5); ràng buộc giới hạn nhiệt của đường dây (25); ràng buộc giới hạn mô-đun điện áp nút (7) và các ràng buộc mô tả phương pháp tuyến tính hóa từng đoạn (12)– (21).

3. Kết quả tính toán và thảo luận

Trong mục này, mô hình tối ưu MIQP được áp dụng để tính toán trạng thái vận hành tối ưu của tụ bù ngang có đóng cắt trên lưới phân phối 33 nút IEEE có tích hợp nguồn điện phân tán. Nghiệm tối ưu được xác định sử dụng phần mềm thương mại CPLEX và được lập trình với ngôn ngữ GAMS [11]. Máy tính cá nhân với bộ vi xử lý AMD Ryzen 5 4500U, 6 CPUs, 2.4GHz và RAM 32GB được sử dụng để đạt được các kết quả tính toán tối ưu trong bài báo này.

3.1. Dữ liệu lưới điện

Hình 3 mô tả lưới điện phân phối IEEE 33 nút [12]. Lưới điện này bao gồm 5 tụ bù ngang có cùng công suất định mức và 3 nguồn DG với công suất phát giống nhau, trong đó vị trí của các tụ bù ngang và các nguồn điện phân tán được tham khảo từ nghiên cứu [13]. Các dữ liệu tính toán cơ bản của lưới điện phân phối trung áp được mô tả trong Bảng 2.



Hình 3. Lưới điện mẫu 33 nút IEEE (C – tụ bù ngang; DG – nguồn điện phân tán)

Bảng 2. Thông số cơ bản của lưới điện 33 nút IEEE

Thông số	Giá trị
Điện áp định mức (kV)	12,66
Tổng công suất phụ tải cơ sở (kVA)	3715 + j2300
Giới hạn điện áp nút (pu)	$0,95 \leq U \leq 1,05$
Công suất định mức của tụ bù (kVAr)	500
Công suất phát của DG (kW)	500
Hệ số công suất vận hành DG	0,95 (chậm sau)

3.2. Kết quả tính toán

3.2.1. Đánh giá độ chính xác của mô hình MIQP

Để đánh giá độ chính xác của phương pháp tối ưu đề xuất, trạng thái vận hành tối ưu của tụ bù ngang được xác định sử dụng hai mô hình tối ưu MIQP và MINLP. Phương pháp MINLP được thực hiện trên bộ giải KNITRO và được lập trình với ngôn ngữ GAMS. Kết quả tính toán trạng thái vận hành tối ưu của tụ bù ngang giữa hai phương pháp được biểu diễn trong Bảng 3, trong đó, “1” là trạng thái tụ làm việc, “0” là trạng thái tụ nghỉ. Từ kết quả tính toán cho thấy, trạng thái vận hành tối ưu của tụ bù ngang với hai phương pháp là giống nhau. Ngoài ra, kết quả tính toán hàm mục tiêu (tổn thất công suất tác dụng) và thời gian tính toán được mô tả trong Bảng 4.

Bảng 3. Kết quả trạng thái vận hành tụ của hai phương pháp

Phương pháp	Nút 8	Nút 13	Nút 22	Nút 23	Nút 27
MIQP	1	0	0	1	1
MINLP	1	0	0	1	1

Bảng 4. Giá trị hàm mục tiêu và thời gian tính toán của hai phương pháp

Thông số	Phương pháp MIQP	Phương pháp MINLP
Tổn thất công suất tác dụng (kW)	39,949	39,937
Thời gian tính toán (giây)	0,103	1,043

Bảng 5. Kết quả phân bố điện áp nút giữa hai mô hình

Nút	U (pu)		Sai số (%)	Nút	U (pu)		Sai số (%)
	MIQP	MINLP			MIQP	MINLP	
1	1,0500	1,0500	0,00000	17	1,0329	1,0336	0,06676
2	1,0486	1,0487	0,00572	18	1,0352	1,0358	0,05793
3	1,0430	1,0433	0,03067	19	1,0481	1,0482	0,00859
4	1,0398	1,0402	0,04326	20	1,0445	1,0448	0,02393
5	1,0368	1,0374	0,05302	21	1,0438	1,0441	0,02682
6	1,0306	1,0314	0,07272	22	1,0432	1,0435	0,02971
7	1,0305	1,0313	0,07370	23	1,0422	1,0425	0,03357
8	1,0292	1,0300	0,07767	24	1,0392	1,0397	0,04424
9	1,0274	1,0282	0,08267	25	1,0395	1,0400	0,04327
10	1,0260	1,0269	0,08667	26	1,0299	1,0307	0,07568
11	1,0259	1,0268	0,08668	27	1,0290	1,0298	0,07769
12	1,0258	1,0267	0,08669	28	1,0226	1,0236	0,09476
13	1,0259	1,0268	0,08668	29	1,0183	1,0193	0,10399
14	1,0263	1,0271	0,08567	30	1,0168	1,0179	0,10708
15	1,0273	1,0282	0,08267	31	1,0171	1,0181	0,10608
16	1,0290	1,0298	0,07769	32	1,0175	1,0186	0,10603
				33	1,0189	1,0199	0,10295

Bảng 4 cho thấy, sai số tổn thất công suất của mô hình MIQP so với mô hình MINLP là 0,03% (0,012 kW). Trong thực tế, sai số này rất nhỏ và có thể bỏ qua. Đồng thời, thời gian tính toán của mô hình MIQP nhỏ hơn nhiều so với mô hình MINLP. Điều này đặc biệt có ý nghĩa quan trọng khi tính toán cho các lưới điện có kích cỡ lớn và xét mô hình tối ưu với nhiều khoảng thời gian. Ngoài ra, sai số về điện áp nút cũng được biểu diễn trong Bảng 5. Kết quả điện áp nút giữa hai mô hình có sai số lớn nhất là 0,107%, và sai số này có thể bỏ qua trong các áp dụng thực tế.

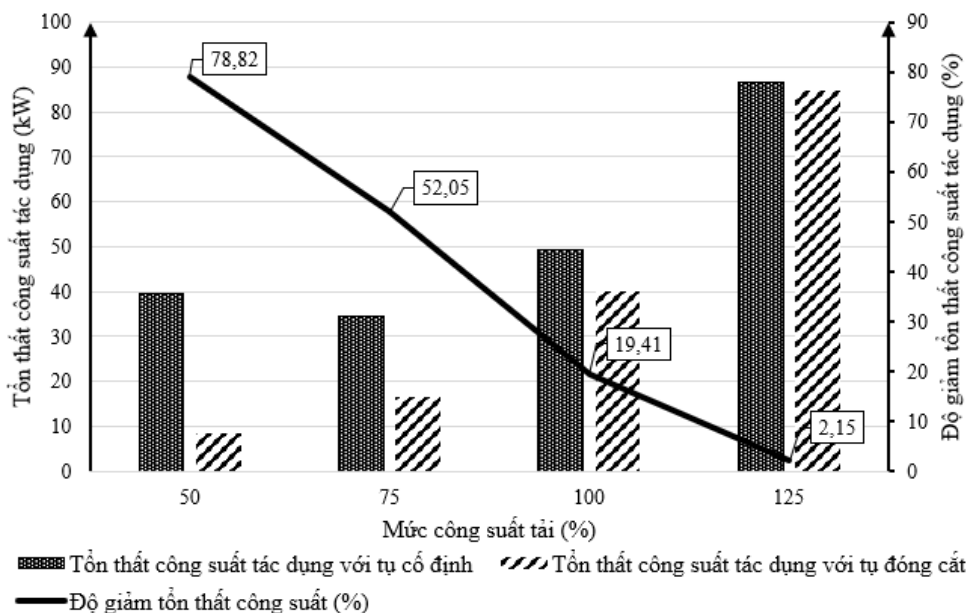
3.2.2. Đánh giá hiệu quả của vận hành tối ưu tụ bù ngang

Để đánh giá hiệu quả của mô hình tối ưu đề xuất, kết quả tính toán khi tụ vận hành với trạng thái tối ưu theo mô hình đề xuất (gọi tắt là “mô hình vận hành tối ưu tụ đóng cắt”) và khi tụ vận hành với trạng thái cố định (gọi tắt là “mô hình vận hành tụ cố định”) được tính toán và so sánh. Lời giải trào lưu công suất với trạng thái tụ cố định được thực hiện bằng phương pháp Newton-Raphson trên phần mềm mô phỏng POWERWORLD [14].

Mô hình vận hành tối ưu tụ đóng cắt và mô hình vận hành tụ cố định được tính toán trên lưới điện 33 nút IEEE tại 4 mức công suất tải khác nhau, bao gồm: (1) 50% tải cơ sở; (2) 75% tải cơ sở; (3) 100% tải cơ sở; (4) 125% tải cơ sở.

Kết quả tính toán hàm mục tiêu của mô hình vận hành tụ tại 4 mức công suất tải được trình bày trong Hình 4. Kết quả tối ưu từ hình vẽ này thể hiện rằng tổn thất công suất tác dụng của lưới điện khi áp dụng mô hình vận hành tối ưu tụ đóng cắt nhỏ hơn so với khi áp dụng mô hình vận hành tụ cố định. Độ giảm tổn thất công suất tác dụng lần lượt là 78,82% và 2,15% khi mức tải bằng 50% và 125% trị số tải cơ sở.

Trạng thái vận hành của tụ đóng cắt khi tính toán bằng mô hình tối ưu đề xuất được biểu diễn trong Hình 4. Dựa trên lời giải tối ưu ở bảng này, ta thấy rằng, trạng thái vận hành của tụ bù ngang bị ảnh hưởng bởi công suất của phụ tải. Số lượng tụ bù ngang ở trạng thái làm việc tăng khi công suất phụ tải tăng (từ 1 tụ làm việc tại mức 50% công suất tải đến 4 tụ làm việc tại mức 125% công suất tải cơ sở).



Hình 4. Kết quả tính toán hàm mục tiêu

Kết quả so sánh điện áp nút của hai mô hình vận hành tụ tại các mức công suất tải khác nhau được trình bày trong Hình 5. Kết quả tối ưu từ hình vẽ này cho thấy, mô hình vận hành tối ưu tụ đóng cắt có chất lượng điện áp tại các nút tốt hơn nhiều so với mô hình vận hành tụ cố định.

• Với mức tải 50% công suất cơ sở, mô hình tụ đóng cắt có một số nút nằm ngoài giới hạn điện áp nút cho phép. Cụ thể, các nút 10 đến nút 18 và các nút 25, 32, 33 có giá trị điện áp nút nằm trong khoảng từ 1,051 pu đến 1,068 pu. Trong khi đó điện áp nút ứng với mô hình tụ cố định luôn nằm ngoài giới hạn cho phép. Đồng thời, điện áp lớn nhất khi tính theo mô hình tụ cố định là 1,088 pu (tại nút 18) được giảm xuống 1,068 pu (tại nút 18) khi tính theo mô hình tụ đóng cắt.

• Với mức tải 75% công suất cơ sở, mô hình tụ đóng cắt có hầu hết điện áp nút (trừ hai nút 17, nút 18) nằm trong giới hạn cho phép, trong khi đó mô hình tụ cố định có nhiều nút có điện áp nằm ngoài giới hạn cho phép. Cụ thể, điện áp các nút 9 đến nút 18 và các nút 20 đến nút 22 nằm trong khoảng từ 1,051 pu đến 1,07 pu.

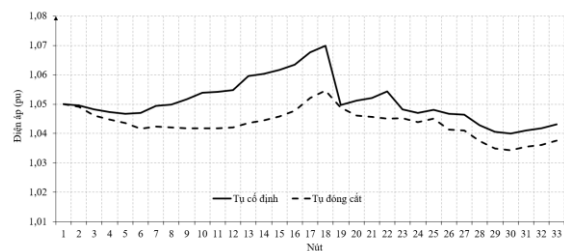
Với mức công suất tải cơ sở và mức tải 125% công suất cơ sở, mô hình tụ đóng cắt luôn giữ được điện áp nút nằm trong giới hạn cho phép, trong khi đó mô hình tụ cố định vẫn có một số nút nằm ngoài giới hạn điện áp nút cho phép. Cụ thể, tại mức công suất tải cơ sở, điện áp các nút 18, 21, 22 nằm trong khoảng từ 1,051 pu đến 1,052 pu. Tại mức tải 125% công suất cơ sở, nút 22 với giá trị điện áp nút bằng 1,051 pu.

Bảng 6. Kết quả tính toán trạng thái vận hành tụ đóng cắt

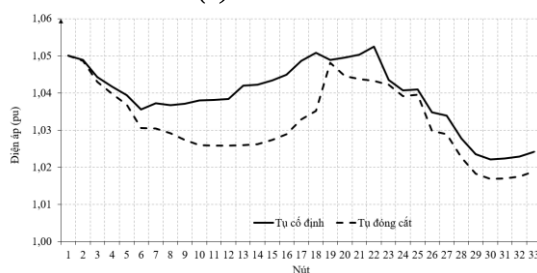
Vị trí của tụ	Mức công suất tải			
	50%	75%	100%	125%
Tại nút 8	0	1	1	1
Tại nút 13	0	0	0	1
Tại nút 22	0	0	0	0
Tại nút 23	0	0	1	1
Tại nút 27	1	1	1	1



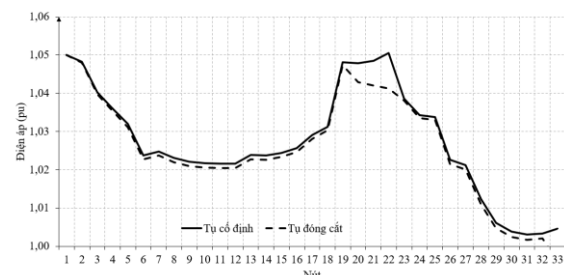
(a) 50% tải cơ sở



(b) 75% tải cơ sở



(c) 100% tải cơ sở



(d) 125% tải cơ sở

Hình 5. So sánh phân bố điện áp nút giữa hai mô hình vận hành tụ trong các kịch bản

4. Kết luận

Bài báo này trình bày mô hình tối ưu có dạng quy hoạch toàn phương số nguyên (MIQP) cho bài toán tối ưu chế độ vận hành của tụ bù ngang có đóng cắt trong lưới điện phân phối có tích hợp nguồn điện phân tán (DG). Mô hình này có hàm mục tiêu là cực tiểu hóa tổng tổn thất hữu công và các ràng buộc tuyến tính. Trong đó, phương pháp tuyến tính hóa từng đoạn được áp dụng để đưa bình phương dòng công suất đầu nhánh đường dây về dạng bậc nhất. Mô hình MIQP được

đánh giá trên lưới phân phối 33 nút IEEE với 4 mức công suất của phụ tải. Kết quả tối ưu cho thấy, mô hình đề xuất giúp giảm tổn thất công suất hữu công và cải thiện chất lượng điện áp của lưới điện phân phối. Ngoài ra, mô hình MIQP có sai số rất nhỏ và thời gian tính toán nhỏ hơn nhiều so với mô hình tối ưu MINLP. Hướng phát triển của đề tài nghiên cứu là xây dựng mô hình MIQP để xác định đồng thời trạng thái vận hành tối ưu của tụ bù có đóng cắt và công suất phát tối ưu của DG có xét sự phụ thuộc công suất tiêu thụ của tải thay đổi theo thời gian và công suất tụ bù vào điện áp vận hành.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] L. I. Dulău, M. Abrudean, and D. Bică, "Effects of Distributed Generation on Electric Power Systems," *Procedia Technol.*, vol. 12, pp. 681–686, 2014, doi: 10.1016/j.protcy.2013.12.549.
- [2] A. Naderipour *et al.*, "Spotted hyena optimizer algorithm for capacitor allocation in radial distribution system with distributed generation and microgrid operation considering different load types," *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, p. 2728, Feb. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-82440-9.
- [3] T. Yuvaraj *et al.*, "Optimal Integration of Capacitor and Distributed Generation in Distribution System Considering Load Variation Using Bat Optimization Algorithm," *Energies*, vol. 14, no. 12, Art. no. 12, Jan. 2021, doi: 10.3390/en14123548.
- [4] K. R. Devabalaji, T. Yuvaraj, and K. Ravi, "An efficient method for solving the optimal siting and sizing problem of capacitor banks based on cuckoo search algorithm," *Ain Shams. Eng. J.*, vol. 9, no. 4, pp. 589–597, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.asej.2016.04.005.
- [5] M. Milovanović, D. Tasić, J. Radosavljević, and B. Perovic, "Optimal Placement and Sizing of Inverter-Based Distributed Generation Units and Shunt Capacitors in Distorted Distribution Systems Using a Hybrid Phasor Particle Swarm Optimization and Gravitational Search Algorithm," *Electr. Power Compon. Syst.*, vol. 48, pp. 1–15, Aug. 2020, doi: 10.1080/15325008.2020.1797934.
- [6] I. A. Mohamed and M. Kowsalya, "Optimal Distributed Generation and capacitor placement in power distribution networks for power loss minimization," in *2014 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*, Jan. 2014, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICAEE.2014.6838519.
- [7] H. Pradeepa, T. Ananthapadmanabha, D. N. S. Rani, and C. Bandhavya, "Optimal Allocation of Combined DG and Capacitor Units for Voltage Stability Enhancement," *Procedia Technol.*, vol. 21, pp. 216–223, 2015, doi: 10.1016/j.protcy.2015.10.091.
- [8] D. L. Duong, T. A. Nguyen, and N. V. Pham, "MISOCBP-Based Optimal Capacitor Allocation in Power Distribution Systems Considering ZIP Load Model," *J. Sci. Technol. - HaUI*, vol. 59, no. 2A, Mar. 2023, doi: 10.57001/huih5804.2023.032.
- [9] M. Mortazi, A. Moradi, and M. Khosravi, "Simultaneous optimization of transformer tap changer and network capacitors to improve the distribution system's static security considering distributed generation sources," *International Journal of Engineering Science and Computing*, vol. 11, no. 07, pp. 28527–28536, 2021.
- [10] S. Moradian, O. Homaei, S. Jadid, and P. Siano, "Optimal placement of switched capacitors equipped with stand-alone voltage control systems in radial distribution networks," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 29, no. 3, 2019, doi: 10.1002/etep.2753.
- [11] GAMS Development Corp., "GAMS Documentation 46," Feb. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.gams.com>. [Accessed Feb. 25, 2024].
- [12] 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, May 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2020.3038030.
- [13] 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, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2767632.
- [14] POWERWORLD Corporation, "PowerWorld User's Manual," Jul. 11, 2023. [Online]. Available: <https://www.powerworld.com/> [Accessed Jan. 30, 2024].