

TRANSMISSION NETWORK EXPANSION PLANNING CONSIDERING THE N – 1 SECURITY CRITERIA AND REACTIVE POWER FLOWS

Dam Minh Quang, Pham Nang Van*, Nguyen Tuan Anh

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

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 09/8/2023	Transmission network expansion planning (TNEP) is an essential study area in power systems. The TNEP problem is often developed using the direct current power flow (DCPF) method. However, this approach takes no account of the power loss and the effect of reactive power flows. In addition, ensuring the security of power systems for a single outage of any system element, known as the N–1 security criteria, plays a vital role in planning and operation problems. This paper presents a mixed-integer linear programming (MILP)-based method with the aim of optimizing the transmission grid topology considering power loss, reactive power flows and the N–1 criteria. The adjustment technique of branch limits is deployed with a view to the incorporation of the influence of reactive power flows. The iteration technique is proposed to consider the N–1 criteria in the network planning process. The evaluation of the proposed method is implemented on an IEEE 24-node transmission system, in which the MILP model is solved using the CPLEX tool under GAMS programming language, and the N–1 contingency analysis is performed using POWERWORLD software. The planning results show that 19 transmission lines with a total investment of 86.7 M\$ need to be built for the security operation of power systems according to N–1 criteria.
Revised: 30/10/2023	
Published: 30/10/2023	
KEYWORDS	
Transmission network expansion planning (TNEP)	
Mixed-integer linear programming (MILP)	
Power loss	
The N–1 security criteria	
Reactive power	

QUY HOẠCH MỞ RỘNG LƯỚI ĐIỆN TRUYỀN TẢI CÓ XÉT TIÊU CHUẨN AN TOÀN N–1 VÀ DÒNG CÔNG SUẤT PHẢN KHÁNG

Đàm Minh Quang, Phạm Năng Văn*, Nguyễn Tuấn Anh

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

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 09/8/2023	Quy hoạch mở rộng truyền tải (TNEP) là một lĩnh vực nghiên cứu quan trọng trong hệ thống điện. Bài toán TNEP thường được xây dựng dựa trên phương pháp trào lưu công suất một chiều (DCPF). Nhược điểm của phương pháp này là bỏ qua tổn thất công suất và ảnh hưởng của dòng công suất phản kháng. Ngoài ra, đảm bảo an toàn của hệ thống điện trong chế độ sự cố một phần tử (tiêu chuẩn an toàn N–1) có ý nghĩa quan trọng trong bài toán quy hoạch và vận hành. Bài báo này trình bày phương pháp quy hoạch tuyến tính nguyên thực hỗn hợp (MILP) để tối ưu hóa cấu trúc lưới điện truyền tải có xét tổn thất công suất, dòng công suất phản kháng và tiêu chuẩn an toàn N–1. Kỹ thuật điều chỉnh giới hạn nhánh được áp dụng để tích hợp ảnh hưởng của dòng công suất phản kháng. Phương pháp lập đề xuất được áp dụng để xem xét tiêu chuẩn an toàn trong quá trình quy hoạch lưới điện. Phương pháp đề xuất được đánh giá trên lưới điện 24 nút IEEE, trong đó mô hình tối ưu được giải sử dụng công cụ CPLEX với ngôn ngữ lập trình GAMS, và bài toán phân tích sự cố N–1 được thực hiện sử dụng phần mềm POWERWORLD. Kết quả quy hoạch cho thấy, 19 đường dây với tổng vốn đầu tư 86,7 M\$ được xây dựng để vận hành an toàn lưới điện theo tiêu chuẩn N–1.
Ngày hoàn thiện: 30/10/2023	
Ngày đăng: 30/10/2023	
TỪ KHÓA	
Quy hoạch mở rộng lưới điện truyền tải (TNEP)	
Quy hoạch tuyến tính nguyên thực hỗn hợp (MILP)	
Tổn thất công suất	
Tiêu chuẩn an toàn N–1	
Công suất phản kháng	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.8518>

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

1. Giới thiệu

Sự gia tăng nhu cầu tiêu thụ điện năng và việc tích hợp ngày càng nhiều các nguồn năng lượng tái tạo đã tác động đáng kể đến công tác vận hành và quy hoạch hệ thống điện [1]. Một mặt, do sự tăng trưởng của phụ tải nên dòng công suất trên lưới điện có thể bị thay đổi đáng kể. Điều này có khả năng dẫn đến một số vấn đề như quá tải, mất ổn định và vi phạm các tiêu chí về độ tin cậy. Mặt khác, các nguồn năng lượng tái tạo thường được xây dựng ở những khu vực xa trung tâm phụ tải và không dễ dàng liên kết với các hệ thống lớn. Do đó, khả năng tải của lưới điện truyền tải cần phải được nâng cao để tăng sự linh hoạt của hệ thống điện trong tương lai [2].

Quy hoạch mở rộng lưới truyền tải (TNEP) là chủ đề đã được nhiều nhà nghiên cứu trong hệ thống điện quan tâm. Mục đích của bài toán TNEP là xác định thời gian, địa điểm và số lượng đường dây truyền tải cần được xây dựng để đáp ứng yêu cầu trong tương lai. Do cấu trúc lưới điện ngày càng phức tạp và sự hình thành thị trường điện, TNEP là một bài toán ra quyết định phức tạp [3].

Trong vài thập kỷ gần đây, quy hoạch toán học và kỹ thuật Heuristic là hai phương pháp quan trọng để giải bài toán TNEP [4]. Các phương pháp quy hoạch toán học thường đảm bảo lời giải tối ưu trong hầu hết các tình huống. Tuy nhiên, các phương pháp này yêu cầu mô hình tối ưu phải chặt chẽ về mặt toán học [5]. Ví dụ, để đạt được lời giải tối ưu toàn cục một cách hiệu quả bằng cách sử dụng các quy hoạch toán học, mô hình tối ưu phải có dạng lồi. Phương pháp Heuristic có ưu điểm là có thể áp dụng với đa dạng các mô hình tối ưu (bao gồm cả mô hình không lồi). Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp Heuristic là không đảm bảo nghiệm tối ưu toàn cục của lời giải đạt được và cung cấp ít các thông tin về chất lượng của lời giải.

Do bài toán TNEP rất phức tạp nên phương pháp dòng điện một chiều (DCPF) đã được áp dụng hiệu quả để xây dựng các mô hình quy hoạch lưới điện (DCTNEP) [6]. Phương pháp dựa trên mô hình quy hoạch tuyến tính nguyên thực hỗn hợp (MILP) bằng cách loại bỏ các biến nhị phân trong mô hình phi tuyến đã được phát triển trong [7]. Trong [8], mô hình MILP của bài toán TNEP trong hoạt động thị trường điện cạnh tranh được đề xuất, trong đó bản chào bán điện của đơn vị sản xuất và bản chào mua điện của đơn vị tiêu thụ được xem xét. Bài báo [9] cũng đã phát triển một phương pháp dựa trên MILP để giải bài toán TNEP nhiều giai đoạn có xét ràng buộc tiêu chuẩn an toàn N-1. Nghiên cứu [10] trình bày mô hình quy hoạch phi tuyến nguyên thực hỗn hợp (MINLP) để tối ưu hóa cấu trúc lưới điện truyền tải có xét dòng công suất phản kháng và tiêu chuẩn an toàn N-1. Mô hình tối ưu được giải sử dụng phương pháp metaheuristic IDE-PBILc. Mô hình tối ưu MILP được đề xuất trong bài báo [11] để quy hoạch tối ưu đồng thời lưới điện và hệ thống tích trữ năng lượng có xét tiêu chuẩn an toàn N-1. Trong nghiên cứu [11], phân tích sự cố N-1 được thực hiện sử dụng hai nhóm ma trận dựa trên phương pháp DCPF. Bài toán TNEP có xét ràng buộc giới hạn của dòng điện ngắn mạch sử dụng kỹ thuật xấp xỉ tuyến tính được trình bày trong bài báo [12]. Các tác giả [13] đã xem xét đồng thời bài toán TNEP và vị trí tối ưu của thiết bị bù dọc có điều khiển (TCSC).

Bài toán TNEP sử dụng DCPF không tính đến tổn thất công suất tác dụng có thể làm thay đổi sản lượng điện năng của các nhà máy và ảnh hưởng đến chiến lược đầu tư cho lưới điện. Nghiên cứu tuyến tính hóa tổn thất công suất có dạng hàm bậc hai để tích hợp vào mô hình TNEP được đề xuất trong [14].

Bài toán TNEP dựa trên mô hình dòng điện xoay chiều (ACPF) hiếm khi được nghiên cứu trong các công bố trước đây. Điều này là do tính phi tuyến và không lồi của bài toán TNEP dựa trên ACPF (ACTNEP). Trong [15], mô hình ACTNEP được giải bằng cách sử dụng kết hợp phương pháp nhánh cận (Branch-and-Bound) và sử dụng một số bộ giải phi tuyến được hỗ trợ bởi phần mềm GAMS. Gần đây, phương pháp sử dụng quy hoạch phi tuyến nguyên thực hỗn hợp (MINLP) đã được phát triển để lập kế hoạch mở rộng lưới điện truyền tải có xét thiết bị bù dọc có điều khiển (TCSC) và thiết bị hạn chế dòng điện ngắn mạch (SFCL) [16].

Mục đích của bài báo này là xây dựng mô hình TNEP dựa trên DCPF có xét đến tổn thất công suất tác dụng và tiêu chuẩn an toàn N-1 để tìm ra phương án đầu tư lưới điện truyền tải tối ưu.

Nghiên cứu này đã có những đóng góp đáng kể như sau:

- Đề xuất phương pháp lập để tích hợp ràng buộc tiêu chuẩn an toàn N-1 vào bài toán quy hoạch lưới điện;

- Áp dụng kỹ thuật điều chỉnh giới hạn nhánh để tích hợp ảnh hưởng của dòng công suất phản kháng vào mô hình TNEP dựa trên DCPF (mô hình DCTNEP).

Bài báo này được viết với bố cục gồm bốn phần. Phần 1 giới thiệu tổng quan về nội dung nghiên cứu. Phần 2 trình bày mô hình DCTNEP có xét tổn thất công suất của lưới điện, kỹ thuật hiệu chỉnh giới hạn nhánh khi có xét dòng công suất phản kháng và phương pháp lập để tích hợp ràng buộc an toàn N-1 vào bài toán quy hoạch lưới điện. Phần 3 trình bày kết quả nghiên cứu và sử dụng lưới điện mẫu IEEE 24 nút để mô phỏng và đánh giá. Phần 4 kết luận các kết quả đạt được trong nghiên cứu.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Mô hình DCTNEP có xét tổn thất công suất và dòng công suất phản kháng

Bài toán TNEP dựa trên mô hình DCPF có xét đến tổn thất công suất được trình bày trong [14]. Hàm mục tiêu và các ràng buộc của mô hình được mô tả như dưới đây.

2.2.1. Hàm mục tiêu

Bài toán TNEP được biểu diễn dưới dạng MILP như sau [14]:

$$\underset{x_{nk}, P_{nk}^{\text{loss}}, P_{nk}, \delta_n, P_{Gi}}{\text{minimize}} \sum_{\forall (n,k) \in \Omega^{L+}} c_{nk} x_{nk} + 0.02 \sum_{\forall (n,k) \in \Omega^{L+}} c_{nk} x_{nk} + c_{\tau} \sum_{\forall (n,k) \in \Omega^L} P_{nk}^{\text{loss}} \tau + 8760 \sum_{i \in \Omega^G} \lambda_{Gi} P_{Gi} \quad (1)$$

trong đó, c_{nk} là chi phí đầu tư đường dây nk ; x_{nk} là biến nhị phân biểu diễn quyết định xây dựng đường dây nk (đường dây nk được xây dựng thì $x_{nk} = 1$ và bằng 0 nếu ngược lại); c_{τ} là chi phí biên của tổn thất điện năng; P_{nk}^{loss} là tổn thất công suất trên nhánh nk ; τ là thời gian tổn thất công suất lớn nhất; λ_{Gi} là chi phí sản xuất biên của tổ máy thứ i ; P_{Gi} là công suất phát của tổ máy thứ i . Ω^{L+} là tập hợp các đường dây được đề xuất xây dựng; Ω^L là tập tất cả các đường dây của lưới điện, bao gồm các đường dây đã được xây dựng và các đường dây được đề xuất xây dựng.

2.2.2. Các ràng buộc

Bài toán lập kế hoạch mở rộng lưới điện truyền tải thỏa mãn các ràng buộc sau [14]:

$$\sum_{\forall (n,k) \in \Omega^{L+}} c_{nk} x_{nk} \leq T \quad (2)$$

$$\sum_{i \in \Omega_n^G} P_{Gi} - \sum_{j \in \Omega_n^D} P_{Dj} = \sum_{k \in \Omega_n^L} P_{nk}; \quad \forall n \in N \quad (3)$$

$$-x_{nk} P_{nk}^{\text{max}} \leq P_{nk} \leq x_{nk} P_{nk}^{\text{max}} \quad (4)$$

$$P_{nk} - \left[\frac{1}{2} g_{nk} \sum_{\ell=1}^L \alpha_{nk}(\ell) \delta_{nk}(\ell) - b_{nk} (\delta_n - \delta_k) \right] \geq -(1 - x_{nk}) M_{nk} \quad (5)$$

$$P_{nk} - \left[\frac{1}{2} g_{nk} \sum_{\ell=1}^L \alpha_{nk}(\ell) \delta_{nk}(\ell) - b_{nk} (\delta_n - \delta_k) \right] \leq (1 - x_{nk}) M_{nk} \quad (6)$$

$$0 \leq P_{nk}^{\text{loss}} \leq x_{nk} P_{nk}^{\text{max}} \quad (7)$$

$$P_{nk}^{\text{loss}} - g_{nk} \sum_{\ell=1}^L \alpha_{nk}(\ell) \delta_{nk}(\ell) \geq -(1 - x_{nk}) M_{nk} \quad (8)$$

$$P_{nk}^{\text{loss}} - g_{nk} \sum_{\ell=1}^L \alpha_{nk}(\ell) \delta_{nk}(\ell) \leq (1 - x_{nk}) M_{nk} \quad (9)$$

$$\alpha_{nk}(\ell) = (2\ell - 1)\Delta\delta_{nk}^{\max} \quad (10)$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}; \quad \forall i \in \Omega^G \quad (11)$$

$$x_{nk} = 1; \quad \forall (n, k) \in \Omega^L \setminus \Omega^{L+} \quad (12)$$

$$x_{nk} = \{0, 1\}; \quad \forall (n, k) \in \Omega^{L+} \quad (13)$$

$$\delta_{nk}^+ + \delta_{nk}^- = \sum_{\ell=1}^L \delta_{nk}(\ell); \quad \forall (n, k) \in \Omega^L \quad (14)$$

$$\delta_n = 0 \quad n: \text{reference bus} \quad (15)$$

$$\delta_n - \delta_k = \delta_{nk}^+ - \delta_{nk}^-; \quad \forall (n, k) \in \Omega^L \quad (16)$$

$$\delta_{nk}^- \geq 0; \delta_{nk}^+ \geq 0; \quad \forall (n, k) \in \Omega^L \quad (17)$$

$$\delta_{nk}(\ell) \geq 0 \quad \forall (n, k) \in \Omega^L; \ell = 1, \dots, L \quad (18)$$

$$\delta_{nk}(\ell) \leq \Delta\delta_{nk}^{\max} + (1 - x_{nk})M_{nk}; \quad \forall (n, k) \in \Omega^L; \ell = 1, \dots, L \quad (19)$$

$$w_{nk}(\ell)\Delta\delta_{nk}^{\max} \leq \delta_{nk}(\ell); \quad \forall (n, k) \in \Omega^L; \ell = 1, \dots, L-1 \quad (20)$$

$$\delta_{nk}(\ell) \leq w_{nk}(\ell-1)\Delta\delta_{nk}^{\max}; \quad \forall (n, k) \in \Omega^L; \ell = 2, \dots, L \quad (21)$$

$$w_{nk}(\ell-1) \geq w_{nk}(\ell); \quad \forall (n, k) \in \Omega^L; \ell = 2, \dots, L-1 \quad (22)$$

$$\delta_{nk}(\ell) \leq \Delta\delta_{nk}^{\max} + (1 - x_{nk})M_{nk}; \quad \forall (n, k) \in \Omega^L; \ell = 1, \dots, L \quad (23)$$

trong đó, T là ngân sách đầu tư; P_{Dj} là công suất tiêu thụ phụ tải thứ j ; Ω_n^G, Ω_n^D lần lượt là tập hợp tổ máy và phụ tải tại nút n ; Ω_n^L là tập hợp các nút liên kết với nút n ; P_{nk} là dòng công suất tác dụng truyền tải trên nhánh nk ; P_{nk}^{\max} là giới hạn công suất truyền tải trên nhánh nk ; g_{nk}, b_{nk} lần lượt là phần thực và phần ảo của tổng dẫn nhánh nk ; $\alpha_{nk}(\ell)$ là độ dốc của phân đoạn tuyến tính ℓ ; $\delta_{nk}(\ell)$ là độ dài phân đoạn tuyến tính ℓ ; M_{nk} là số dương rất lớn; $\Delta\delta_{nk}^{\max}$ là độ dài lớn nhất của một phân đoạn tuyến tính; $P_{Gi}^{\min}, P_{Gi}^{\max}$ lần lượt là giới hạn dưới và giới hạn trên của công suất phát tổ máy thứ i ; $\delta_{nk}^+, \delta_{nk}^-$ là các biến phụ; δ_n là góc pha điện áp nút; $w_{nk}(\ell)$ là biến nhị phân biểu diễn trạng thái của phân đoạn tuyến tính ℓ .

2.2.3. Điều chỉnh giới hạn truyền tải

Một trong những hạn chế của phương pháp dòng điện một chiều là bỏ qua dòng công suất phản kháng. Sự tích hợp dòng công suất phản trong mô hình DCPF được đề xuất trong [17]. Do đó, bài báo này áp dụng kỹ thuật điều chỉnh giới hạn nhánh [17] với mục đích cải thiện độ chính xác cho mô hình DCTNEP.

Giới hạn dòng công suất tác dụng nhánh sau điều chỉnh xác định bởi các biểu thức (24) – (27).

$$P_{nk}^{\max*} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (24)$$

$$a = (P_{nk}^{\ominus})^2 + (Q_{nk}^{\ominus})^2; \quad b = -P_{nk}^{\ominus} \left[(S_{nk}^{\max})^2 - M^2 \right]; \quad c = \frac{1}{4} \left[(S_{nk}^{\max})^2 - M^2 \right] - (Q_{nk}^{\ominus} \cdot S_{nk}^{\max})^2 \quad (25)$$

$$M^2 = (S_{nk}^{\ominus})^2 - (P_{nk}^{\ominus})^2 - (Q_{nk}^{\ominus})^2 \quad (26)$$

$$P_{nk}^{\ominus} = |\dot{U}_n|^2 g_{nk}; \quad Q_{nk}^{\ominus} = -|\dot{U}_n|^2 \left(b_{nk} + \frac{B_{nk}}{2} \right); \quad S_{nk}^{\ominus} = |\dot{U}_n| |\dot{U}_k| |\dot{y}_{nk}| \quad (27)$$

trong đó:

- $P_{nk}^{\max*}$ là giới hạn công suất tác dụng truyền tải trên nhánh nk sau khi điều chỉnh;

- a, b, c và M lần lượt là các hệ số;
- $(P_{nk}^{\ominus}, Q_{nk}^{\ominus})$ là tọa độ của tâm đường tròn trên mặt phẳng $P_{nk} - Q_{nk}$;
- S_{nk}^{\max} là giới hạn truyền tải công suất biểu kiến (MVA) của đường dây;
- $|\dot{U}_n|$ và $|\dot{U}_k|$ lần lượt là mô-đun điện áp tại nút n và k ;
- $\dot{y}_{nk} = g_{nk} + jb_{nk}$ là tổng dẫn dọc của đường dây nk ;
- $|\dot{y}_{nk}|$ là mô-đun tổng dẫn dọc của đường dây nk ;
- B_{nk} là điện dẫn phản kháng của đường dây nk .

2.2. Quy hoạch mở rộng lưới điện truyền tải có xét tiêu chuẩn an toàn N-1

Phần này trình bày phương pháp lựa chọn sự cố nặng nề nhất khi phân tích N-1 sử dụng chỉ số PI. Ngoài ra, phương pháp lập có lưu đồ thuật toán như Hình 1 được đề xuất để tích hợp ràng buộc tiêu chuẩn an toàn N-1 vào bài toán TNEP.

2.2.1. Xác định sự cố N-1 nặng nề nhất

Trong phần này, để xác định sự cố nặng nề nhất của hệ thống điện khi trong chế độ sau sự cố, hệ số PI (Performance Index flow) được định nghĩa như sau:

$$PI_{nk'} = \sum_{\substack{nk \in \Omega_L \\ nk' \neq nk}} \left(\frac{P_{nk}^{nk'}}{P_{nk}^{\max}} \right)^2 \quad (28)$$

trong đó, $P_{nk}^{nk'}$ là công suất truyền tải trên nhánh nk khi có sự cố nhánh nk' .

Hệ số PI rất nhỏ nếu công suất trên các nhánh nằm trong giới hạn cho phép, ngược lại hệ số này có giá trị rất lớn nếu có một hoặc nhiều đường dây bị quá tải. Do đó, trường hợp có giá trị PI lớn nhất sẽ tương ứng với sự cố đường dây nặng nề nhất trong hệ thống.

2.2.2. Sơ đồ thuật toán

Phương pháp lập đề xuất (xem Hình 1) gồm hai giai đoạn. Trong giai đoạn thứ nhất, lời giải tối ưu của bài toán TNEP thỏa mãn tiêu chuẩn an toàn trong chế độ làm việc bình thường (tiêu chuẩn N-0). Sau khi giai đoạn 1 thỏa mãn, lưới điện được cải tạo mở rộng để đáp ứng tiêu chuẩn vận hành trong chế độ sau sự cố (tiêu chuẩn N-1). Mô tả chi tiết các giai đoạn của phương pháp lập đề xuất được trình bày như dưới đây.

a) Giai đoạn 1

Bước 1: Phân tích trào lưu công suất dựa trên mô hình ACPF với mục đích kiểm tra điều kiện phát nóng của hệ thống. Nếu không có đường dây nào vi phạm thì thực hiện giai đoạn 2, ngược lại nếu có đường dây vi phạm điều kiện thì thực hiện bước 2.

Bước 2: Tạo danh sách đường dây cần cải tạo bao gồm các đường dây mang tải trên 80% và hiệu chỉnh giới hạn truyền tải công suất nhánh (phương pháp thực hiện hiệu chỉnh giới hạn truyền tải nhánh được trình bày ở mục 2.2.3).

Bước 3: Giải bài toán TNEP sử dụng mô hình DCTNEP có xét tổn thất công suất (mục 2.1).

Bước 4: Nếu lời giải bài toán TNEP không tồn tại thì lặp lại từ bước 2 cho đến khi bài toán quy hoạch lưới điện có nghiệm tối ưu.

Bước 5: Cập nhật hệ thống với các đường dây được xây mới và công suất máy phát của các tổ máy rồi quay lại bước 1.

b) Giai đoạn 2

Bước 6: Thực hiện phân tích N-1 bằng phương pháp ACPF.

Bước 7: Kiểm tra điều kiện phát nóng của đường dây. Nếu hệ thống có ít nhất một đường dây mang tải trên 110% [18] thì thực hiện bước 8. Nếu không có đường dây vi phạm điều kiện thì thực hiện bước 12.

Bước 8: Tính toán chỉ số PI để chọn sự cố nặng nề nhất. Sau đó, tạo danh sách các đường dây được đề xuất xây dựng cho sự cố nặng nề nhất và hiệu chỉnh giới hạn truyền tải trên đường dây theo điện áp.

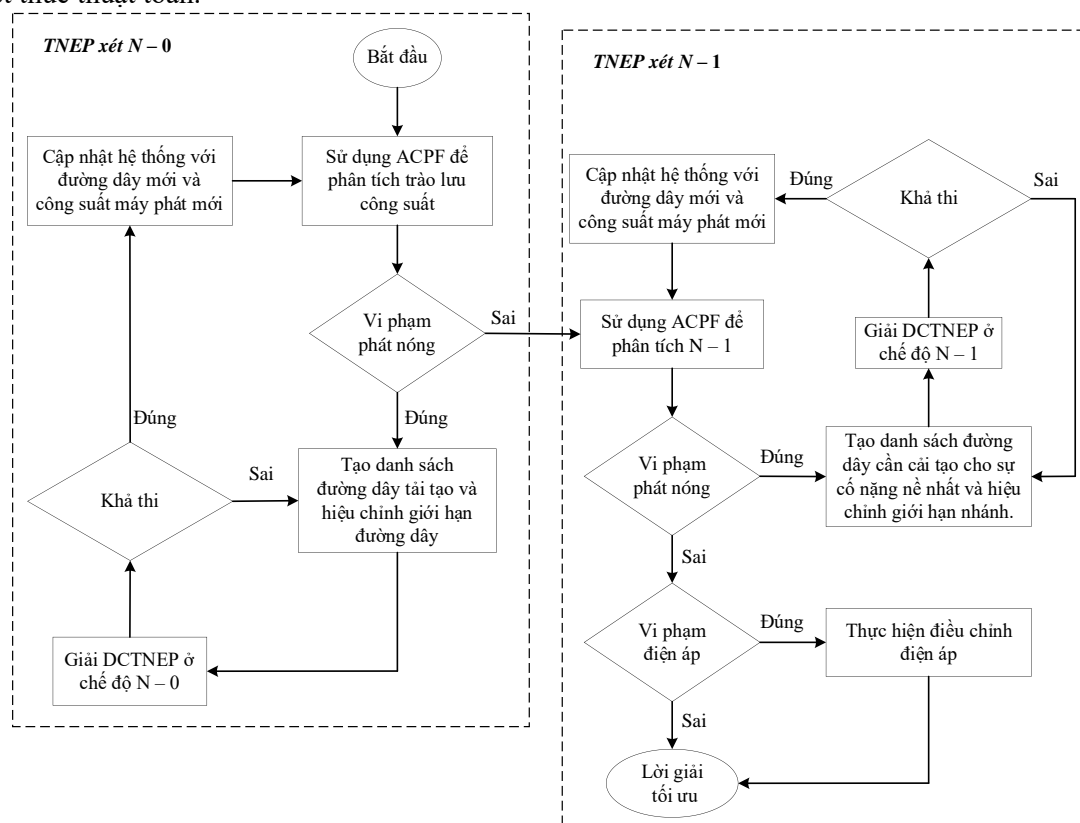
Bước 9: Giải bài toán TNEP bằng mô hình DCTNEP ở chế độ N-1.

Bước 10: Nếu lời giải bài toán TNEP không tồn tại thì thực hiện lại từ bước 8 cho đến khi bài toán TNEP có nghiệm. Sau đó, chuyển sang bước 11.

Bước 11: Cập nhật sơ đồ hệ thống và công suất máy phát mới rồi quay lại bước 6.

Bước 12: Sau khi các bước phân tích N-1 thỏa mãn điều kiện phát nóng, kiểm tra giới hạn điện áp nút của hệ thống. Nếu điện áp nút thỏa mãn yêu cầu thì kết thúc thuật toán. Nếu điện áp nút nằm ngoài miền giới hạn thì thực hiện bước 13.

Bước 13: Thực hiện điều chỉnh điện áp để đưa điện áp nút về miền giới hạn cho phép sau đó kết thúc thuật toán.

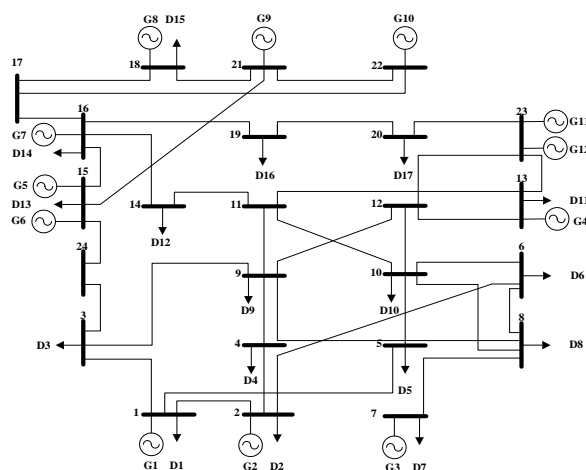


Hình 1. Sơ đồ thuật toán

3. Kết quả tính toán và thảo luận

Phần này trình bày kết quả tính toán của phương pháp đề xuất trong phần 2 cho lưới điện 24 nút IEEE [19]. Lời giải tối ưu của mô hình DCTNEP có xét tổn thất công suất đạt được sử dụng phần mềm GAMS/CPLEX [20]. Các kết quả phân tích trào lưu công suất ACPF và phân tích N-1 sử dụng phần mềm POWERWORLD [21]. Tất cả các tính toán được thực hiện trên máy tính cá nhân với vi xử lý AMD Ryzen 5 5600G 3,9 GHz và 32GB RAM.

Mô hình TNEP có xét tiêu chuẩn N-1 được áp dụng cho lưới điện 24 nút IEEE cải biên (Hình 2). Ban đầu, số mạch trên một hành lang tuyến là 1. Mỗi hành lang tuyến cho phép xây dựng tối đa 3 mạch. Tổng công suất phụ tải của hệ thống là 2850 MW. Thời gian tổn thất công suất lớn nhất là 3500 giờ. Chi phí biên của tổn thất điện năng là 25 \$/MWh. Ngoài ra, giới hạn công suất truyền tải trên các nhánh bằng 50% của giới hạn nhánh được đề cập trong [19].



Hình 2. Sơ đồ lưới điện IEEE 24 nút

3.1. Giai đoạn 1

Trong giai đoạn này, kết quả từ bài toán DCTNEP để đảm bảo tiêu chuẩn N-0 chỉ thông qua một bước lập. Kết quả tính toán ở Bước 1 cho thấy lưới điện có các đường dây quá tải và mang tải nặng (xem Bảng 1). Các đường dây này được đề xuất cải tạo. Lời giải tối ưu đảm bảo tiêu chuẩn N-0 về tuyến đường dây được xây dựng và tổng chi phí đầu tư cho lưới điện được trình bày ở Bảng 2. Giới hạn nhánh sau khi hiệu chỉnh ở Bước 2 được trình bày ở cột 2 của Bảng 3. Lời giải tối ưu đảm bảo tiêu chuẩn N-0 về dòng công suất tác dụng và tổn thất công suất trên mỗi nhánh lần lượt được trình bày ở cột 3 và 4 của Bảng 3.

Bảng 1. Danh sách tập đường dây đề xuất xây dựng

Nhánh	Mức độ mang tải (%)	Vốn đầu tư (M\$)	Nhánh	Mức độ mang tải (%)	Vốn đầu tư (M\$)
7-8	167,6	1,8	6-10	94,7	1,8
16-17	158,3	3,48	12-23	94,4	12,94
15-21	146,7	6,57	10-12	89,2	5,63
14-16	137,5	5,21	13-23	89,1	11,59
3-24	101,1	5,63	20-23	83,4	2,9
17-18	95,2	1,93	15-24	82,5	6,95

Bảng 2. Kết quả đường dây xây mới đảm bảo tiêu chuẩn N-0

Hành lang tuyến	Chi phí đầu tư (M\$)
6-10; 7-8; 14-16; 15-21; 16-17	18,86

Bảng 3. Giới hạn nhánh hiệu chỉnh, dòng công suất và tổn thất công suất

Nhánh	P_{nk}^{max*} (MW)	P_{nk} (MW)	P_{nk}^{loss} (MW)	Nhánh	P_{nk}^{max*} (MW)	P_{nk} (MW)	P_{nk}^{loss} (MW)
1-2	80,50	2,20	0,01	11-13	228,96	-106,91	0,72
1-3	64,78	-8,15	0,04	11-14	241,15	-186,59	1,95
1-5	55,69	49,95	0,59	12-13	234,49	-91,04	0,54
2-4	61,55	28,43	0,29	12-23	247,60	-220,92	6,34
2-6	63,40	28,76	0,44	13-23	241,13	-197,75	4,52
3-9	84,21	4,65	0,02	14-16	236,85	-191,27	1,90
3-24	199,72	-192,84	0,86	15-16	247,97	61,16	0,14

Nhánh	$P_{nk}^{\max*}$ (MW)	P_{nk} (MW)	P_{nk}^{loss} (MW)	Nhánh	$P_{nk}^{\max*}$ (MW)	P_{nk} (MW)	P_{nk}^{loss} (MW)
4-9	81,21	-45,86	0,61	15-21	241,74	-200,98	2,63
5-10	77,14	-21,64	0,13	16-17	225,44	196,30	2,60
6-8	67,13	0,16	0,01	16-19	236,54	-175,56	1,07
6-10	82,15	-53,92	0,43	17-18	241,88	80,80	0,21
7-8	55,94	55,94	0,54	17-22	235,08	-201,34	0,80
8-9	82,31	-40,33	0,76	18-21	244,12	-151,92	3,24
8-10	82,27	-19,71	0,18	19-20	246,44	-135,14	0,62
9-11	199,84	-124,39	0,36	20-23	245,15	-100,41	0,55
9-12	199,68	-133,55	0,41	21-22	230,48	-228,96	1,52
10-11	199,85	-168,10	0,65	21-22	246,67	-142,99	1,84
10-12	199,67	-177,26	0,73				

Kết quả tính toán cho thấy, cần xây dựng mới 5 đường dây, trong đó có một đường dây cho mỗi hành lang tuyến 6-10; 7-8; 14-16; 15-21 và 16-17. Tổng chi phí đầu tư là 18,86 M\$. Tổng tổn thất công suất trên lưới điện là 44,83 MW, tương ứng với 1,57% tổng công suất phụ tải.

3.2. Giai đoạn 2

Kết quả tối ưu bài toán DCTNEP đảm bảo tiêu chuẩn N-1 đạt được sau 4 bước lặp. Bảng 4 trình bày kết quả tính toán hệ số PI để xác định sự cố nặng nề nhất ở bước lặp đầu tiên.

Bảng 4. Hệ số PI trong bước lặp 1

Đường dây	PI	Đường dây	PI	Đường dây	PI
15-24	24,62	14-16	17,68	13-23	19,41
3-24	24,61	10-11	19,18	12-23	20,45
7-8	17,71				

Bảng 5. Tập danh sách đường dây đề xuất cải tạo khi phân tích N-1 ở bước lặp 1

Nhánh	Mức độ mang tải (%)	Nhánh	Mức độ mang tải (%)	Nhánh	Mức độ mang tải (%)
3-9	150,3	14-16	103,5	17-18	94,0
11-14	124,9	9-11	103,0	13-23	93,8
10-11	108,1	10-12	102,2	7-8	88,9
12-23	107,8	9-12	97,4	15-16	88,3

Kết quả từ Bảng 4 cho thấy, ở bước lặp đầu tiên, hệ số PI có giá trị lớn nhất khi ngừng đường dây 15-24. Do đó, ngừng đường dây 15-24 là sự cố nặng nề nhất ở bước lặp 1. Kết quả phân tích N-1 khi ngừng đường dây 15-24 cho thấy, có 12 đường dây có mức độ mang tải trên 80%. Do đó, các đường dây này nằm trong danh sách được đề xuất cải tạo (xem Bảng 5).

Bảng 6 trình bày lời giải tối ưu ở mỗi bước lặp của giai đoạn 2. Ở bước lặp 1, có 5 đường dây được xây mới, trong đó có 2 đường dây trên hành lang tuyến 3-9, 1 đường dây trên mỗi hành lang tuyến 10-11; 11-14 và 14-16. Công suất phát tối ưu và dòng công suất nhánh ở cuối bước lặp 1 được trình bày ở Bảng 7.

Tổng kết, có 19 đường dây được xây thêm trong cả hai giai đoạn. Trong đó, 5 đường dây xây dựng để đảm bảo vận hành an toàn ở tiêu chuẩn N-0 và 14 đường dây xây dựng để đảm bảo vận hành an toàn ở chế độ N-1. Tổng chi phí vốn đầu tư là 86,70 M\$.

Bảng 6. Đường dây được xây dựng ở từng bước lặp

Bước lặp 1	Bước lặp 2	Bước lặp 3	Bước lặp 4
3-9 (×2); 10-11; 11-14; 14-16	9-11; 10-11; 20-23	15-21; 17-18; 21-22	6-10; 7-8

Bảng 7. Công suất phát tối ưu các tổ máy khi phân tích N-1 ở bước lặp 1

Nút	Công suất phát (MW)	Nút	Công suất phát (MW)	Nút	Công suất phát (MW)
1	152	15	12	21	400
2	152	15	155	22	300
7	196,2	16	155	23	310
13	323,142	18	400	23	350

Bảng 8 mô tả tiêu chuẩn giới hạn điện áp nút trong chế độ làm việc bình thường và chế độ làm việc sự cố. Sau 4 bước lặp phân tích N-1, mô-đun điện áp ở tất cả các nút đều nằm trong giới hạn yêu cầu.

Bảng 8. Tiêu chuẩn điện áp của hệ thống

Chế độ bình thường (N-0)	Chế độ sự cố (N-1)
$0,95 \leq U_i \leq 1,05$ (pu)	$0,9 \leq U_i \leq 1,1$ (pu)

4. Kết luận

Bài báo đề xuất phương pháp để xác định cấu trúc tối ưu của lưới điện truyền tải có xét vốn đầu tư lưới điện, chi phí sản xuất của các nguồn điện, tổn thất công suất của lưới điện, dòng công suất phản kháng và tiêu chuẩn an toàn N-1. Phương pháp tối ưu đề xuất có cấu trúc lặp, trong đó mô hình tối ưu có dạng quy hoạch tuyến tính nguyên thực hỗn hợp (MILP) và phân tích sự cố N-1 được thực hiện sử dụng phương pháp trào lưu công suất xoay chiều (ACPF). Dòng công suất phản kháng được tích hợp vào mô hình tối ưu sử dụng kỹ thuật điều chỉnh giới hạn nhánh. Lưới điện 24 nút IEEE được áp dụng để đánh giá phương pháp đề xuất. Các kết quả tính toán cho thấy phương pháp đề xuất phù hợp hơn với yêu cầu thực tế và xét được nhiều ràng buộc. Công tác quy hoạch lưới điện dựa trên phương pháp đề xuất có thể đảm bảo hệ thống điện vận hành an toàn, hiệu quả và ổn định trong các tình huống khác nhau và đáp ứng nhu cầu ngày càng tăng về điện năng. Hướng nghiên cứu trong tương lai là tối ưu hóa đồng thời cấu trúc lưới điện, cấp điện áp và tiết diện dây dẫn trong bài toán quy hoạch lưới điện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] N. V. Pham, "A comparative study of PTDF based-methods to determine transmission usage allocation for bilateral transactions in power markets," *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 226, no. 06, pp. 82–89, May 2021, doi: 10.34238/tnu-jst.4019.
- [2] T. T. Nguyen, N. V. Pham, Q. M. Nguyen, and T. H. T. Nguyen, "Optimal size and location of SVC devices considering voltage stability constraints: a mixed-integer nonlinear programming approach," *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 228, no. 14, pp. 3–16, 2023, doi: 10.34238/tnu-jst.8264.
- [3] H. T. Tran, N. D. Vo, and H. A. Quyen, "Overview of transmission expansion planning," *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 225, no. 6, pp. 223–228, May 2020.
- [4] J. Quintero, H. Zhang, Y. Chakhchoukh, V. Vittal, and G. T. Heydt, "Next Generation Transmission Expansion Planning Framework: Models, Tools, and Educational Opportunities," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 4, pp. 1911–1918, Jul. 2014, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2317590.
- [5] M. Mahdavi, C. Sabillon Antunez, M. Ajalli, and R. Romero, "Transmission Expansion Planning: Literature Review and Classification," *IEEE Systems Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 3129–3140, Sep. 2019, doi: 10.1109/JSYST.2018.2871793.
- [6] M. Esmaili, M. Ghamsari-Yazdel, N. Amjady, and A. J. Conejo, "Short-Circuit Constrained Power System Expansion Planning Considering Bundling and Voltage Levels of Lines," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 35, no. 1, pp. 584–593, Jan. 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2926410.
- [7] L. Bahiense, G. C. Oliveira, M. Pereira, and S. Granville, "A Mixed Integer Disjunctive Model for Transmission Network Expansion," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, no. 3, pp. 560–565, 2001.
- [8] S. De La Torre, A. J. Conejo, and J. Contreras, "Transmission Expansion Planning in Electricity Markets," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 1, pp. 238–248, Feb. 2008, doi: 10.1109/TPWRS.2007.913717.

- [9] H. Zhang, V. Vittal, G. T. Heydt, and J. Quintero, "A Mixed-Integer Linear Programming Approach for Multi-Stage Security-Constrained Transmission Expansion Planning," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 2, pp. 1125–1133, May 2012, doi: 10.1109/TPWRS.2011.2178000.
- [10] E. G. Morquecho, S. P. Torres, F. Astudillo-Salinas, C. A. Castro, H. Ergun, and D. V. Hertem, "Security constrained AC dynamic transmission expansion planning considering reactive power requirements," *Electric Power Systems Research*, vol. 221, p. 109419, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109419.
- [11] H. Mazaheri, A. Abbaspour, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Moeini-Aghaie, H. Farzin, F. Wang, and P. Dehghanian, "An online method for MILP co-planning model of large-scale transmission expansion planning and energy storage systems considering N-1 criterion," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 15, no. 4, pp. 664–677, Dec. 2020, doi: 10.1049/gtd2.12050.
- [12] S. Teimourzadeh and F. Aminifar, "MILP Formulation for Transmission Expansion Planning With Short-Circuit Level Constraints," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 4, pp. 3109–3118, Jul. 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2473663.
- [13] O. Ziaee, O. Alizadeh-Mousavi, and F. F. Choobineh, "Co-Optimization of Transmission Expansion Planning and TCSC Placement Considering the Correlation Between Wind and Demand Scenarios," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 1, pp. 206–215, Jan. 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2690969.
- [14] N. T. Anh, D. M. Quang, and P. N. Van, "Mixed-integer linear programming-based transmission network expansion planning considering power loss," *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 228, no. 10, pp. 389–397, Jun. 2023.
- [15] A. Gó. Exposito, J. R. Santos, and P. C. Romero, "Planning and Operational Issues Arising From the Widespread Use of HTLS Conductors," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 4, pp. 1446–1455, Nov. 2007, doi: 10.1109/TPWRS.2007.907151.
- [16] M. Esmaili, M. Ghamsari-Yazdel, N. Amjady, C. Y. Chung, and A. J. Conejo, "Transmission Expansion Planning Including TCSCs and SFCLs: A MINLP Approach," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 35, no. 6, pp. 4396–4407, Nov. 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2020.2987982.
- [17] S. Grijalva, P. W. Sauer, and J. D. Weber, "Enhancement of linear ATC calculations by the incorporation of reactive power flows," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 2, pp. 619–624, May 2003, doi: 10.1109/TPWRS.2003.810902.
- [18] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, and G. B. Sheble, *Power Generation, Operation and Control*, Third Edition. Wiley-IEEE Press, 2014.
- [19] P. Subcommittee, "IEEE Reliability Test System," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Syst.*, vol. PAS-98, no. 6, pp. 2047–2054, Nov. 1979.
- [20] GAMS Development Corporation, "GAMS Documentation 42," Mar. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.gams.com>. [Accessed Jul. 30, 2023].
- [21] POWERWORLD Corporation, "PowerWorld User's Manual," Jul. 11, 2023. [Online]. Available: <https://www.powerworld.com>. [Accessed Jul. 30, 2023].