

A THREE-STAGE APPROACH FOR DAY-AHEAD UNIT COMMITMENT CONSIDERING ALTERNATING CURRENT POWER FLOW EQUATIONS

Dao Long Vu, Pham Nang Van*, Nguyen Thi Hoai Thu

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

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	13/3/2025	The day-ahead unit commitment is often solved using methods that do not consider the power grid or the power grid model using the direct current power flow formulation. These methods are becoming increasingly ineffective as the load's power consumption and the penetration level of renewable energy sources continue to rise. This paper proposes a three-stage method to effectively solve the problem of unit commitment with the integration of the alternating current power flow model. These three stages include solving the optimization problem using linear programming with integer variables, solving the optimization formulation using second-order cone programming with integer variables, and solving the optimization model using nonlinear programming. The proposed solution approach is evaluated using the IEEE 6-bus and 24-bus transmission networks. The calculation results show that the proposed procedure has the ability to find the optimal solution and requires a lower computation time compared to the solution method based on nonlinear programming with integer variables.
Revised:	26/6/2025	
Published:	27/6/2025	
KEYWORDS		
Day-ahead unit commitment		
Three-stage method		
Linear programming with integer variables		
Second-order cone programming with integer variables		
Nonlinear programming		

ÁP DỤNG PHƯƠNG PHÁP BA GIAI ĐOẠN ĐỂ GIẢI BÀI TOÁN LẬP LỊCH VẬN HÀNH NGÀY TỚI CÓ XÉT RÀNG BUỘC TRÀO LƯU CÔNG SUẤT XOAY CHIỀU

Đào Long Vũ, Phạm Năng Văn*, Nguyễn Thị Hoài Thu

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

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	13/3/2025	Hiện nay, lập kế hoạch vận hành của hệ thống điện thường được giải dựa trên các phương pháp không xét lưới điện hoặc lưới điện được mô hình sử dụng phương pháp dòng điện một chiều. Các phương pháp này thường kém hiệu quả khi nhu cầu điện năng của phụ tải và mức độ thâm nhập của các nguồn điện tái tạo ngày càng tăng. Nghiên cứu này đề xuất phương pháp ba giai đoạn để giải một cách hiệu quả bài toán lập lịch vận hành của hệ thống điện có tích hợp mô hình trào lưu công suất xoay chiều. Ba giai đoạn bao gồm giải bài toán tối ưu sử dụng mô hình tối ưu tuyến tính với số nguyên, giải bài toán tối ưu sử dụng quy hoạch hình nón bậc hai với biến nguyên và giải mô hình tối ưu sử dụng quy hoạch phi tuyến. Phương pháp giải đề xuất được đánh giá sử dụng lưới điện truyền tải 6 nút IEEE và 24 nút IEEE. Các kết quả tính toán cho thấy, phương pháp đề xuất có khả năng tìm nghiệm tối ưu và có thời gian tính toán nhỏ hơn so với phương pháp giải trực tiếp mô hình tối ưu sử dụng quy hoạch phi tuyến với biến nguyên.
Ngày hoàn thiện:	26/6/2025	
Ngày đăng:	27/6/2025	
TỪ KHÓA		
Lập kế hoạch vận hành ngày tới		
Phương pháp ba giai đoạn		
Quy hoạch tuyến tính với biến nguyên		
Quy hoạch hình nón bậc hai với biến nguyên		
Quy hoạch phi tuyến		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.12302>

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

1. Giới thiệu

Hiện nay, phương pháp lập kế hoạch vận hành phổ biến là giải bài toán xác định thành phần tổ máy làm việc sử dụng trào lưu công suất một chiều (DC–NCUC). Mô hình DC–NCUC được phát triển sử dụng các giả thiết gần đúng [1]: (1) tất cả các nút có mô-đun điện áp bằng 1 pu, (2) phần thực của tổng trở dọc đường dây được bỏ qua, (3) hai nút liền kề có chênh lệch góc pha điện áp được coi là nhỏ và (4) dòng công suất phản kháng được bỏ qua. Các giả thiết trên chỉ phù hợp với mạng điện có điện áp định mức từ 220 kV trở lên và không làm việc ở chế độ tải nặng. Tuy nhiên, trong thời gian gần đây, nhu cầu điện năng của phụ tải và mức độ thâm nhập các nguồn điện tái tạo vào hệ thống điện ngày càng tăng. Do đó, lời giải của mô hình DC–NCUC trở nên kém chính xác. Vậy nên, việc áp dụng các phương pháp lập kế hoạch vận hành có tích hợp trào lưu công suất xoay chiều (AC–NCUC) có vai trò quan trọng để vận hành hệ thống điện hiệu quả và tin cậy.

Mô hình tối ưu AC–NCUC là mô hình phi tuyến với biến nguyên (MINLP). Mô hình MINLP này rất khó giải do tương tác phức tạp giữa các biến nhị phân và các ràng buộc phi tuyến không lồi. Để loại bỏ sự tương tác này, phân tách Bender là một trong các kỹ thuật được áp dụng phổ biến [2]. Phương pháp này phân tách bài toán tối ưu ban đầu thành bài toán chính (master problem) và các bài toán phụ (subproblems) [3]. Bài toán tối ưu chính được giải sử dụng quy hoạch tuyến tính với số nguyên (MILP) và bài toán tối ưu phụ được tìm nghiệm sử dụng quy hoạch phi tuyến (NLP) [4]. Các nghiên cứu [5], [6] đã đề xuất các phương pháp giải mô hình AC–NCUC sử dụng phân tách Bender. Tương tự phương pháp phân tách Bender, một số phương pháp như nói lỏng Lagrange hoặc xấp xỉ ngoài (Outer Approximation – OA) cũng được đề xuất nhằm tìm nghiệm tối ưu của mô hình AC–NCUC. Nghiên cứu [7] đề xuất phương pháp áp dụng nói lỏng Lagrange để giải mô hình AC–NCUC bằng cách phân tách mô hình gốc thành các mô hình với kích cỡ nhỏ hơn. Ngoài ra, phương pháp xấp xỉ ngoài đề xuất trong [8], [9] tách mô hình gốc AC–NCUC thành một mô hình quy hoạch tuyến tính (LP) và một mô hình MILP để giải bài toán lập lịch vận hành (UC). Các phương pháp phân tách Bender, nói lỏng Lagrange hoặc xấp xỉ ngoài giúp giảm đáng kể thời gian giải mô hình AC–NCUC. Ngoài ra, để tìm nghiệm tối ưu toàn cục, các mô hình quy hoạch hình nón bậc hai với số nguyên (MISOCP) cho bài toán UC được áp dụng ngày càng rộng rãi [10]. Trong mô hình MISOCP, hệ phương trình cân bằng công suất nút được lồi hóa bằng nói lỏng hình nón bậc hai [11]. Các mô hình MISOCP được đề xuất trong [12]–[13] nói lỏng các ràng buộc trào lưu công suất nhằm tìm lời giải tối ưu toàn cục của bài toán AC–NCUC. Tuy nhiên, sự nói lỏng của hệ phương trình cân bằng công suất nút không chính xác đối với các lưới điện có mạch vòng kín.

Do đó, mục đích của nghiên cứu này là áp dụng nói lỏng hình nón bậc hai của các ràng buộc trào lưu công suất xoay chiều để xây dựng phương pháp giải mô hình AC–NCUC thỏa mãn ràng buộc lưới điện. Các đóng góp chính của bài báo gồm:

- Xây dựng mô hình toán học của bài toán tối ưu AC–NCUC để lập lịch vận hành hệ thống điện, trong đó hàm mục tiêu là cực tiểu tổng chi phí của hệ thống điện;
- Đề xuất phương pháp ba giai đoạn để giải mô hình tối ưu AC–NCUC;
- Áp dụng phương pháp giải đề xuất cho hệ thống điện truyền tải 6 nút và 24 nút IEEE;
- So sánh phương pháp giải đề xuất với phương pháp giải trực tiếp mô hình tối ưu AC–NCUC sử dụng mô hình MINLP.

Phần còn lại của bài báo gồm ba phần. Mô hình MINLP cho bài toán AC–NCUC và phương pháp giải đề xuất được trình bày trong phần 2. Phần 3 mô tả kết quả tính toán mô hình AC–NCUC sử dụng kỹ thuật giải đề xuất với lưới điện 6 nút và lưới điện 24 nút IEEE. Kết luận và hướng nghiên cứu trong tương lai được mô tả trong phần 4.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Mô hình MINLP cho bài toán AC–NCUC

Hiện nay, hệ thống điện bao gồm nhiều kiểu nguồn điện như điện gió, điện mặt trời, thủy điện và nhiệt điện than. Với mục đích đánh giá hiệu quả của phương pháp giải đề xuất, nghiên cứu này

chỉ xét hệ thống điện có các nhà máy nhiệt điện than. Tuy nhiên, mô hình tối ưu AC-NCUC trong mục này có thể được mở rộng để tích hợp các kiểu nhà máy điện khác mà có xét đến nhiều nhà máy thủy điện trên cùng lưu vực sông.

2.1.1. Hàm mục tiêu

Bài toán AC-NCUC có hàm mục tiêu của là cực tiểu tổng chi phí của hệ thống điện, bao gồm chi phí không tải, chi phí biến đổi, chi phí khởi động và chi phí dừng:

$$\sum_{t=1}^T \left(\sum_{i \in \Omega_C} (c_{Ci}^0 u_{Ci,t} + c_{Ci} P_{Ci,t} + c_{Ci}^U y_{Ci,t} + c_{Ci}^D z_{Ci,t}) \right) \quad (1)$$

Trong đó, c_{Ci}^U , c_{Ci}^D lần lượt là chi phí của tổ máy i khi khởi động và dừng (\$/MWh); c_{Ci}^0 , c_{Ci} lần lượt là chi phí không tải và chi phí biến đổi của tổ máy i (\$/MWh); $u_{Ci,t}$ là biến nguyên, có trị số bằng 1 khi máy phát i làm việc tại thời điểm t và bằng 0 khi máy phát nghỉ; $y_{Ci,t}$ là biến nguyên, có trị số bằng 1 khi máy phát i khởi động ở đầu thời điểm t và bằng 0 khi máy phát không khởi động; $z_{Ci,t}$ là biến nguyên, có giá trị bằng 1 khi máy phát i dừng ở đầu thời điểm t và bằng 0 khi máy phát không dừng; $P_{Ci,t}$ biểu thị công suất hữu công của máy phát i tại thời điểm t (MW); T là tổng số khoảng thời gian của chu kỳ lập lịch vận hành (ở đây $T = 24$); Ω_C là tập các máy phát.

2.1.2. Ràng buộc mối quan hệ của các biến nguyên

Các ràng buộc (2)–(3) đảm bảo tính logic của các biến nguyên. Cụ thể, máy phát đang làm việc chỉ có thể dừng, không thể khởi động. Tương tự, máy phát đang nghỉ chỉ có thể khởi động, không thể dừng.

$$u_{Ci,t-1} - u_{Ci,t} + y_{Ci,t} - z_{Ci,t} = 0; \quad \forall i \in \Omega_C, \quad t = 2, \dots, T \quad (2)$$

$$u_{Ci,0} - u_{Ci,1} + y_{Ci,1} - z_{Ci,1} = 0; \quad \forall i \in \Omega_C \quad (3)$$

$$u_{Ci,t}, y_{Ci,t}, z_{Ci,t} \in \{0, 1\}; \quad \forall i \in \Omega_C, \quad t = 1, \dots, T \quad (4)$$

Trong đó, $u_{Ci,0}$ mô tả trạng thái hoạt động của máy phát i trước thời điểm đầu tiên của chu kỳ lập lịch.

2.1.3. Ràng buộc mức tăng giảm lớn nhất của công suất phát

Công suất phát của các máy phát từ thời điểm này tới thời điểm tiếp theo được quyết định bởi mức tăng/giảm lớn nhất của công suất phát, mức tăng công suất lớn nhất của máy phát khi khởi động và mức giảm công suất lớn nhất của máy phát khi dừng. Các ràng buộc này được biểu diễn như sau:

$$P_{Ci,t} - P_{Ci,t-1} \leq R_{Ci}^U u_{Ci,t-1} + S_{Ci}^U y_{Ci,t}; \quad \forall i \in \Omega_C, \quad t = 2, \dots, T \quad (5)$$

$$P_{Ci,t-1} - P_{Ci,t} \leq R_{Ci}^D u_{Ci,t} + S_{Ci}^D z_{Ci,t}; \quad \forall i \in \Omega_C, \quad t = 2, \dots, T \quad (6)$$

Trong đó:

- R_{Ci}^U và R_{Ci}^D lần lượt là mức tăng và giảm lớn nhất của công suất phát máy phát i (MW/h);
- S_{Ci}^U là mức tăng công suất lớn nhất của máy phát i khi khởi động (MW/h);
- S_{Ci}^D là mức giảm công suất lớn nhất của máy phát i khi dừng (MW/h).

Tại thời điểm đầu tiên của chu kỳ lập lịch, các bất đẳng thức (5)–(6) trở thành:

$$P_{Ci,1} - P_{Ci,0} \leq R_{Ci}^U u_{Ci,0} + S_{Ci}^U y_{Ci,1}; \quad \forall i \in \Omega_C \quad (7)$$

$$P_{Ci,0} - P_{Ci,1} \leq R_{Ci}^D u_{Ci,1} + S_{Ci}^D z_{Ci,1}; \quad \forall i \in \Omega_C \quad (8)$$

Trong đó, $P_{Ci,0}$ là công suất hữu công của máy phát i trước thời điểm đầu tiên của chu kỳ lập lịch (MW).

2.1.4. Ràng buộc giới hạn công suất tác dụng và phản kháng của tổ máy

Giới hạn công suất tác dụng và công suất phản kháng của các tổ máy trong các khoảng thời gian lập kế hoạch vận hành được mô tả trong (9) và (10).

$$P_{Ci}^{\min} u_{Ci,t} \leq P_{Ci,t} \leq \overline{P_{Ci,t}} \leq P_{Ci}^{\max} u_{Ci,t}; \quad \forall i \in \Omega_C, t = 1, \dots, T \quad (9)$$

$$Q_{Ci}^{\min} u_{Ci,t} \leq Q_{Ci,t} \leq Q_{Ci}^{\max} u_{Ci,t}; \quad \forall i \in \Omega_C, t = 1, \dots, T \quad (10)$$

Trong đó, $\overline{P_{Ci,t}}$ mô tả công suất tác dụng khả phát của máy phát i trong khoảng thời gian t (MW); $P_{Ci}^{\max}$ và $P_{Ci}^{\min}$ theo thứ tự là công suất phát tác dụng cực đại và cực tiểu của máy phát i (MW); $Q_{Ci}^{\max}$ và $Q_{Ci}^{\min}$ theo thứ tự là công suất phát phản kháng cực đại và cực tiểu của máy phát i (MVar).

2.1.5. Ràng buộc thời gian hoạt động/ngỉ tối thiểu

$$\sum_{t=1}^{L_{Ci}} (1 - u_{Ci,t}) = 0; \quad \forall i \in \Omega_C \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^{t+T_{Ci}^U-1} u_{Ci,t} \geq T_{Ci}^U y_{Ci,t}; \quad \forall i \in \Omega_C; \quad \forall t \in [L_{Ci} + 1, \dots, T - T_{Ci}^U + 1] \quad (12)$$

$$\sum_{k=t}^T [u_{Ci,k} - y_{Ci,k}] \geq 0; \quad \forall i \in \Omega_C, \quad \forall t \in [T - T_{Ci}^U + 2, \dots, T] \quad (13)$$

$$L_{Ci} = \min \left\{ T, (T_{Ci}^U - T_{Ci,0}^U) u_{Ci,0} \right\} \quad (14)$$

$$\sum_{t=1}^{F_{Ci}} u_{Ci,t} = 0; \quad \forall i \in \Omega_C \quad (15)$$

$$\sum_{k=1}^{t+T_{Ci}^D-1} (1 - u_{Ci,t}) \geq T_{Ci}^D z_{Ci,t}; \quad \forall i \in \Omega_C; \quad \forall t \in [F_{Ci} + 1, \dots, T - T_{Ci}^D + 1] \quad (16)$$

$$\sum_{k=t}^T [1 - u_{Ci,k} - z_{Ci,k}] \geq 0; \quad \forall i \in \Omega_C, \quad \forall t \in [T - T_{Ci}^D + 2, \dots, T] \quad (17)$$

$$F_{Ci} = \min \left\{ T, (T_{Ci}^D - T_{Ci,0}^S) (1 - u_{Ci,0}) \right\} \quad (18)$$

Trong đó:

- L_{Ci} là số giờ còn lại mà máy phát i phải hoạt động, xét tại khoảng thời gian đầu chu kỳ lập lịch mới, do yêu cầu thời gian hoạt động tối thiểu của máy phát đó (h);
- $u_{Ci,k}$ là trạng thái hoạt động của máy phát i tại thời điểm k ;
- T_{Ci}^U là thời gian hoạt động tối thiểu của máy phát i (h);
- $T_{Ci,0}^U$ là số giờ máy phát i đã hoạt động, xét tại khoảng thời gian đầu chu kỳ lập lịch mới (h);
- F_{Ci} là số giờ còn lại mà máy phát i phải nghỉ, xét tại khoảng thời gian đầu chu kỳ lập lịch mới, do yêu cầu thời gian nghỉ tối thiểu của máy phát đó (h);
- T_{Ci}^D là thời gian nghỉ tối thiểu của máy phát i (h);
- $T_{Ci,0}^S$ là số giờ máy phát i đã nghỉ, xét tại khoảng thời gian đầu chu kỳ lập lịch mới (h).

Quy trình vận hành yêu cầu các máy phát không thể dừng một cách ngẫu nhiên. Nếu máy phát i khởi động ở thời điểm t thì máy phát này bắt buộc phải làm việc ít nhất T_{Ci}^U trước khi dừng

lại. Các ràng buộc thời gian hoạt động tối thiểu được trình bày trong (11)–(14). Tương tự, các máy phát không thể khởi động một cách ngẫu nhiên. Nếu một máy phát được dừng ở thời điểm t thì máy phát này bắt buộc phải nghỉ ít nhất T_{Ci}^D trước khi khởi động lại. Ràng buộc về số giờ tối thiểu mà tổ máy phải nghỉ được biểu thị trong (15)–(18).

2.1.6. Ràng buộc dự trữ công suất

$$\overline{P_{Ci,t}} \leq P_{Ci,t} + R_{Ci}^U u_{Ci,t-1} + S_{Ci}^U y_{Ci,t}; \quad \forall i \in \Omega_C, t = 2, \dots, T \quad (19)$$

$$\overline{P_{Ci,1}} \leq P_{Ci,0} + R_{Ci}^U u_{Ci,0} + S_{Ci}^U y_{Ci,1}; \quad \forall i \in \Omega_C \quad (20)$$

$$\overline{P_{Ci,t}} \leq P_{Ci}^{\max} (u_{Ci,t} - z_{Ci,t+1}) + S_{Ci}^D z_{Ci,t+1}; \quad \forall i \in \Omega_C, t = 1, \dots, T \quad (21)$$

$$\sum_{i \in \Omega_C} (\overline{P_{Ci,t}} - P_{Ci,t}) \geq R_{r,t}; \quad \forall r \in R; \quad t = 1, \dots, T \quad (22)$$

Trong đó, $R_{r,t}$ là yêu cầu công suất dự trữ của khu vực r trong giai đoạn t (MW), R là tập các khu vực trong hệ thống điện.

Trong mô hình này, công suất lớn nhất các máy phát có thể phát trong mỗi giờ được xét đến. Đại lượng này được phối hợp với công suất phát mỗi giờ của các máy phát nhằm đảm bảo dự trữ của hệ thống. Các ràng buộc dự trữ công suất của các nguồn điện được trình bày trong (19)–(22).

2.1.7. Ràng buộc lưới điện

Hệ phương trình (23)–(24) đảm bảo cân bằng công suất nút. Ràng buộc (25)–(26) lần lượt là giới hạn dòng công suất trên đường dây truyền tải và giới hạn điện áp nút.

$$\sum_{k \in \Omega_n} [g_{nm} v_{n,t} - g_{nm} c_{nm,t} - b_{nm} s_{nm,t}] = \sum_{i \in \Lambda_n^C} P_{Ci,t} - \sum_{i \in \Lambda_n^D} P_{Di,t}; \quad \forall m \in \Lambda_n; \quad n = 1, \dots, N; \quad t = 1, \dots, T \quad (23)$$

$$\sum_{k \in \Omega_n} \left[- \left(b_{nm} + \frac{b_{nm}^{shunt}}{2} \right) v_{n,t} - g_{nm} s_{nm,t} + b_{nm} c_{nm,t} \right] = \sum_{i \in \Lambda_n^C} Q_{Ci,t} - \sum_{i \in \Lambda_n^D} Q_{Di,t}; \quad \forall m \in \Lambda_n; \quad n = 1, \dots, N; \quad t = 1, \dots, T \quad (24)$$

$$\left[\begin{aligned} & \left(g_{nm} v_{n,t} - g_{nm} c_{nm,t} - b_{nm} s_{nm,t} \right)^2 \\ & + \left(- \left(b_{nm} + \frac{b_{nm}^{shunt}}{2} \right) v_{n,t} - g_{nm} s_{nm,t} + b_{nm} c_{nm,t} \right)^2 \end{aligned} \right] \leq \left(S_{nm}^{\max} \right)^2; \quad \forall m \in \Lambda_n; \quad n = 1, \dots, N; \quad t = 1, \dots, T \quad (25)$$

$$U_{\min}^2 \leq v_{n,t} \leq U_{\max}^2; \quad n = 1, \dots, N, \quad t = 1, \dots, T \quad (26)$$

Trong đó:

- $v_{n,t}$, $c_{nm,t}$ và $s_{nm,t}$ là các biến phụ, được xác định từ các phương trình (27)–(29):

$$v_{n,t} = \left(U_{n,t}^{\text{re}} \right)^2 + \left(U_{n,t}^{\text{im}} \right)^2; \quad n = 1, \dots, N; \quad t = 1, \dots, T \quad (27)$$

$$c_{nm,t} = U_{n,t}^{\text{re}} U_{m,t}^{\text{re}} + U_{n,t}^{\text{im}} U_{m,t}^{\text{im}}; \quad \forall m \in \Lambda_n; \quad n = 1, \dots, N; \quad t = 1, \dots, T \quad (28)$$

$$s_{nm,t} = U_{n,t}^{\text{im}} U_{m,t}^{\text{re}} - U_{n,t}^{\text{re}} U_{m,t}^{\text{im}}; \quad \forall m \in \Lambda_n; \quad n = 1, \dots, N; \quad t = 1, \dots, T \quad (29)$$

- $U_{n,t}^{\text{re}}$ và $U_{n,t}^{\text{im}}$ theo thứ tự là phần thực và phần ảo của điện áp nút n tại thời điểm t ;
- g_{nm} và b_{nm} được xác định bởi:

$$g_{nm} = r_{nm} / \left[\left(r_{nm} \right)^2 + \left(x_{nm} \right)^2 \right]; \quad b_{nm} = -x_{nm} / \left[\left(r_{nm} \right)^2 + \left(x_{nm} \right)^2 \right] \quad (30)$$

- r_{nm} và x_{nm} theo thứ tự là phần thực và phần ảo của tổng trở dọc của đường dây nm (pu);
- b_{nm}^{shunt} là điện dẫn phản kháng đường dây nm ;

- $P_{Di,t}$ và $Q_{Di,t}$ theo thứ tự là công suất hữu công và vô công của phụ tải i tại thời điểm t (MW);
- Λ_n^C và Λ_n^D theo thứ tự là tập các máy phát và phụ tải đầu nối với nút n ;
- $S_{nm}^{\max}$ là công suất biểu kiến lớn nhất có thể truyền tải trên đường dây nm ;
- $U_{\min}$ và $U_{\max}$ lần lượt là trị số nhỏ nhất và lớn nhất của mô-đun điện áp nút;
- N mô tả tổng số nút của lưới điện.

2.2. Quy trình giải mô hình AC-NCUC

Trong phần này, một phương pháp giải ba giai đoạn được đề xuất để giải mô hình AC-NCUC. Các giai đoạn bao gồm:

2.2.1. Giai đoạn 1: Giải mô hình tối ưu DC-NCUC và xác định tập các đường dây nghẽn mạch Ω_s

Giai đoạn này giải mô hình DC-NCUC với hàm mục tiêu (1) và các ràng buộc (2)–(9), (11)–(22) và các ràng buộc trào lưu công suất một chiều được mô tả trong [14]. Các giá trị công suất phát và trạng thái vận hành của máy phát tìm được sẽ được sử dụng làm giá trị khởi đầu của các biến trong mô hình Giai đoạn 2. Ngoài ra, các đường dây bị nghẽn mạch sẽ được thêm vào tập Ω_s . Nếu không có đường dây nghẽn mạch thì tập Ω_s là một tập rỗng.

2.2.2. Giai đoạn 2: Xác định trạng thái làm việc tối ưu của máy phát

Giai đoạn 2 là giải mô hình MISOCP, trong đó, mô hình MISOCP có hàm mục tiêu (1) thỏa mãn các ràng buộc (2)–(26), (31)–(33)

$$c_{nm,t} = c_{mn,t}; \quad \forall m \in \Lambda_n; \quad n=1,...,N; \quad t=1,...,T \quad (31)$$

$$s_{nm,t} = -s_{mn,t}; \quad \forall m \in \Lambda_n; \quad n=1,...,N; \quad t=1,...,T \quad (32)$$

$$(c_{nm,t})^2 + (s_{nm,t})^2 \leq v_{n,t} v_{m,t}; \quad \forall m \in \Lambda_n; \quad n=1,...,N; \quad t=1,...,T \quad (33)$$

Thuật toán giải trong Giai đoạn 2 được trình bày cụ thể như sau:

Bước 0: Khởi tạo bộ đếm bước lặp $s = 0$. Đặt các giá trị công suất phát, trạng thái vận hành tìm được từ Giai đoạn 1 làm giá trị khởi đầu của các biến tương ứng trong mô hình MISOCP.

Bước 1: Giải mô hình MISOCP với (25) chỉ áp dụng với các đường dây trong tập Ω_s .

Bước 2: Kiểm tra giới hạn dòng công suất biểu kiến truyền tải trên các nhánh của lưới điện. Nếu không có vi phạm thì thuật toán dừng. Nếu có vi phạm giới hạn truyền tải thì thuật toán tăng $s = s + 1$ và chuyển tới bước 3.

Bước 3: Cập nhật tập Ω_s với các đường dây có vi phạm giới hạn truyền tải ở bước 2. Ngoài ra, nghiệm tối ưu tìm được của mô hình MISOCP tại bước lặp $s - 1$ được đặt là giá trị đầu của các biến của mô hình này tại bước lặp s . Sau đó, thuật toán quay lại bước 1.

Tại giai đoạn này, do giảm đáng kể các ràng buộc giới hạn dòng công suất biểu kiến truyền tải trên các đường dây nên mô hình MISOCP trở nên dễ giải và đơn giản hơn. Vì mô hình MISOCP sử dụng xấp xỉ gần chính xác của các ràng buộc trào lưu công suất nên trạng thái hoạt động của các tổ máy xác định tại giai đoạn là trạng thái hoạt động tối ưu.

2.2.3. Giai đoạn 3: Tìm công suất phát tối ưu và điện áp nút

Trong giai đoạn này, bài báo cố định giá trị của các biến nhị phân thu được từ giai đoạn 2 và giải mô hình MINLP trình bày trong mục 2.1 với hàm mục tiêu (1) thỏa mãn các ràng buộc (2)–(29). Trong đó, do giá trị của các biến nhị phân đã được xác định nên mô hình AC-NCUC ban đầu trở thành mô hình NLP. Sau khi giải mô hình NLP này, công suất phát tối ưu và điện áp các nút được xác định.

3. Kết quả và bàn luận

Trong mục này, phương pháp giải đề xuất được đánh giá sử dụng lưới điện IEEE 6 nút và 24 nút. Máy tính cá nhân AMD Ryzen 5 7535HS 3.30 GHz và RAM 16GB được sử dụng để thực hiện tất cả các tính toán. Mô hình AC-NCUC được lập trình bằng ngôn ngữ GAMS [15] và được giải bằng các bộ giải thương mại GUROBI và KNITRO.

3.1. Lưới điện IEEE 6 nút

Mục này trình bày kết quả tối ưu của bài toán AC-NCUC cho lưới điện 6 nút [16] sử dụng hai phương pháp: (1) Phương pháp giải trực tiếp mô hình tối ưu MINLP và (2) Phương pháp ba giai đoạn. Lưới điện này bao gồm 3 tổ máy nhiệt điện than (G1, G2, G3) và 7 đường dây truyền tải. Hệ số công suất của các phụ tải đều bằng 0,9.

Trạng thái hoạt động của các máy phát sử dụng hai phương pháp là giống nhau và được trình bày trong Bảng 1. Trong đó, tổ máy G1 và G2 làm việc liên tục 24 giờ, trong khi tổ máy G3 chỉ làm việc từ giờ thứ 9 đến giờ thứ 22 và nghỉ trong các khoảng thời gian còn lại.

Bảng 1. Trạng thái hoạt động các máy phát trong lưới điện 6 nút

Giờ	G1	G2	G3	Giờ	G1	G2	G3
1	1	1	0	13	1	1	1
2	1	1	0	14	1	1	1
3	1	1	0	15	1	1	1
4	1	1	0	16	1	1	1
5	1	1	0	17	1	1	1
6	1	1	0	18	1	1	1
7	1	1	0	19	1	1	1
8	1	1	0	20	1	1	1
9	1	1	1	21	1	1	1
10	1	1	1	22	1	1	1
11	1	1	1	23	1	1	0
12	1	1	1	24	1	1	0

Bên cạnh đó, kết quả tính toán của hai phương pháp được trình bày trong Bảng 2. Trong đó, thời gian giải của hai phương pháp lần lượt là 80,2 giây và 64,6 giây. Sai số về hàm mục tiêu và tổng công suất nguồn của phương pháp đề xuất so với phương pháp giải trực tiếp lần lượt là 0,67% và 0,03%. Các sai số này cho thấy sự chính xác của phương pháp giải đề xuất.

Ngoài ra, kết quả tính toán phân bố điện áp các nút tại giờ thứ 6 được biểu thị trong Bảng 3. Trong đó, mô-đun và góc pha của điện áp nút tại giờ thứ 6 có sự khác nhau lớn nhất lần lượt là 0,0078% và 0,002273 rad.

Bảng 2. So sánh lời giải sử dụng hai phương pháp với lưới điện 6 nút

	Phương pháp giải trực tiếp	Phương pháp ba giai đoạn	Sai số (%)
Hàm mục tiêu (\$)	2597,74	2615,11	0,67
Tổng công suất nguồn (MW)	5309,77	5308,29	0,03
Thời gian tính toán (giây)	80,2	64,6	

Bảng 3. So sánh điện áp các nút của mạng điện 6 nút tại giờ thứ 6

Nút	Mô-đun điện áp			Góc pha điện áp		
	Phương pháp giải trực tiếp	Phương pháp ba giai đoạn	Sai số (%)	Phương pháp giải trực tiếp	Phương pháp ba giai đoạn	Sai lệch (rad)
1	1,0500	1,0499	0,0086	0,0916	0,0916	0,000022
2	1,0500	1,0500	0,0000	0,0000	0,0000	0,000000
3	1,0294	1,0294	0,0010	-0,0221	-0,0221	0,000002
4	0,9830	0,9830	0,0020	-0,0594	-0,0594	0,000002
5	0,9787	0,9787	0,0021	-0,0710	-0,0710	0,000003
6	1,0235	1,0235	0,0010	-0,0274	-0,0274	0,000001

3.2. Lưới điện 24 nút IEEE

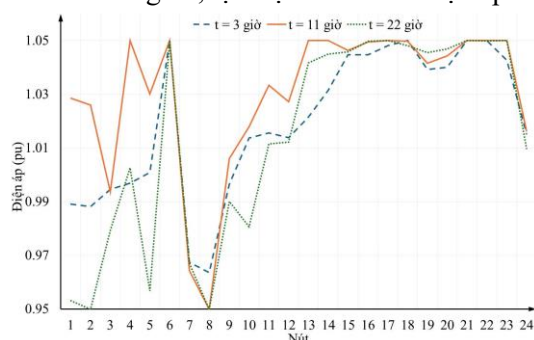
Lưới điện truyền tải IEEE 24 nút [17] có 33 tổ máy nhiệt điện than và 38 đường dây truyền tải. Mô hình AC-NCUC được giải bằng hai phương pháp đề cập trong mục 3.1. Trong đó, phương pháp giải trực tiếp với bộ giải KNITRO không tìm được nghiệm với giới hạn thời gian giải là 10 giờ. Tuy nhiên, phương pháp đề xuất tìm được nghiệm tối ưu với thời gian giải là 1894 giây. Trị số của hàm mục tiêu là 271545\$.

Bảng 4 trình bày khoảng thời gian làm việc của từng tổ máy. Tổ máy G1 làm việc từ giờ thứ 8 đến giờ thứ 24 và nghỉ trong các giờ còn lại; tổ máy G2 không làm việc trong 24 giờ ($\emptyset$ là tổ máy tương ứng không làm việc trong 24 giờ).

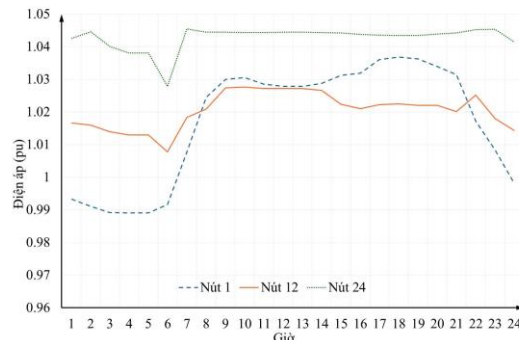
Bảng 4. Kế hoạch hoạt động các máy phát trong lưới điện IEEE 24 nút

Tổ máy	Kế hoạch vận hành	Tổ máy	Kế hoạch vận hành	Tổ máy	Kế hoạch vận hành
G1	8–24	G12	1–24	G23	1–24
G2	$\emptyset$	G13	1–24	G24	1–24
G3	1–24	G14	$\emptyset$	G25	$\emptyset$
G4	1–24	G15	1–24	G26	$\emptyset$
G5	1–24	G16	1–21	G27	1–24
G6	1–20	G17	1–21	G28	$\emptyset$
G7	1–24	G18	1–20	G29	1–24
G8	8–24	G19	16–21	G30	$\emptyset$
G9	1–21	G20	8–21	G31	1–24
G10	$\emptyset$	G21	1–24	G32	1–24
G11	16–24	G22	1–24	G33	1–24

Mặt khác, biểu đồ phân bố điện áp nút tại các thời điểm $t = 3$ giờ, $t = 11$ giờ và $t = 22$ giờ được mô tả trong Hình 1. Trong đó, tại thời điểm $t = 22$ giờ hầu hết điện áp các nút thấp hơn hai thời điểm còn lại, các nút có điện áp thấp nhất tại thời điểm này là nút 2 và nút 8 với điện áp cùng bằng 0,95 pu. Ngoài ra, Hình 2 biểu diễn phân bố điện áp trong 24 giờ của các nút 1, nút 12 và nút 24. Trong đó, tại mọi thời điểm điện áp nút 24 cao hơn hai nút 1 và nút 12.



Hình 1. Phân bố điện áp nút tại các thời điểm $t = 3$ giờ, $t = 11$ giờ và $t = 22$ giờ của lưới điện 24 nút



Hình 2. Phân bố mô-đun điện áp trong 24 giờ tại các nút 1, nút 12 và nút 24 của lưới điện 24 nút

4. Kết luận

Bài báo này đề xuất một quy trình gồm ba giai đoạn để giải mô hình AC-NCUC. Giai đoạn đầu là giải mô hình DC-NCUC. Sau đó, công suất phát và trạng thái vận hành tìm được từ giai đoạn này là giá trị khởi đầu của giai đoạn 2. Cùng với đó, các đường dây nghẽn mạch cũng được xác định. Giai đoạn 2 của phương pháp đề xuất là giải mô hình MISOCPP. Sau giai đoạn 2, trạng thái hoạt động của các máy phát được xác định. Cuối cùng, giai đoạn 3 của phương pháp đề xuất là giải mô hình AC-NCUC với biến nguyên đã biết để xác định công suất phát tối ưu và điện áp nút. Kết quả tính toán cho thấy rằng sai số của phương pháp đề xuất có giá trị rất nhỏ so với phương pháp giải trực tiếp khi áp dụng cho lưới 6 nút IEEE. Ngoài ra, phương pháp giải đề xuất có thể tìm được nghiệm tối ưu của mô hình AC-NCUC trong khoảng thời gian cho phép mà phương pháp giải trực tiếp không tìm được khi

áp dụng cho lưới 24 nút IEEE. Hướng nghiên cứu trong tương lai là giải mô hình AC-NCUC trong hệ thống điện có tích hợp các tổ máy tua-bín khí chu trình hỗn hợp và hệ thống tích trữ năng lượng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] D. D. Nguyen, T. S. Vo, and N. V. Pham, "A comparison of linear load flow models for 39-bus New England transmission system," *TNU J. Sci. Technol.*, vol. 229, no. 14, pp. 117–128, Oct. 2024, doi: 10.34238/tnu-jst.10704.
- [2] W. S. Sifuentes and A. Vargas, "Hydrothermal Scheduling Using Benders Decomposition: Accelerating Techniques," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 3, pp. 1351–1359, Aug. 2007, doi: 10.1109/TPWRS.2007.901751.
- [3] Y. Fu, M. Shahidehpour, and Z. Li, "AC-Constrained Unit Commitment With AC Constraints," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 2, pp. 1001–1013, May 2005, doi: 10.1109/TPWRS.2005.846076.
- [4] Y. Fu, M. Shahidehpour, and Z. Li, "AC Contingency Dispatch Based on Security-Constrained Unit Commitment," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 2, pp. 897–908, May 2006, doi: 10.1109/TPWRS.2006.873407.
- [5] N. Amjady and M. R. Ansari, "Hydrothermal unit commitment with AC constraints by a new solution method based on benders decomposition," *Energy Convers. Manag.*, vol. 65, pp. 57–65, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.enconman.2012.07.022.
- [6] A. Nasri, S. J. Kazempour, A. J. Conejo, and M. Ghandhari, "Network-Constrained AC Unit Commitment Under Uncertainty: A Benders' Decomposition Approach," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 412–422, Jan. 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2409198.
- [7] C. E. Murillo-Sánchez and R. J. Thomas, "Thermal Unit Commitment with a Nonlinear AC Power Flow Network Model," in *The Next Generation of Electric Power Unit Commitment Models*, vol. 36, in *International Series in Operations Research & Management Science*, B. F. Hobbs, M. H. Rothkopf, R. P. O'Neill, and H. Chao, Eds., Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002, pp. 75–92, doi: 10.1007/0-306-47663-0_5.
- [8] J. P. Ruiz, J. Wang, C. Liu, and G. Sun, "Outer-approximation method for security-constrained unit commitment," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 7, no. 11, pp. 1210–1218, Nov. 2013, doi: 10.1049/iet-gtd.2012.0311.
- [9] D. Han, J. Jian, and L. Yang, "Outer Approximation and Outer-Inner Approximation Approaches for Unit Commitment Problem," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 2, pp. 505–513, Mar. 2014, doi: 10.1109/TPWRS.2013.2253136.
- [10] T. Le, N. V. Pham, and V. H. Trinh, "A SOCP-based formulation for short-term hydrothermal scheduling of an IEEE 24-bus system considering water-head effect," *TNU J. Sci. Technol.*, vol. 228, no. 10, pp. 355–365, Jul. 2023, doi: 10.34238/tnu-jst.8080.
- [11] R. Quan, J. Jian, and Y. Mu, "Tighter relaxation method for unit commitment based on second-order cone programming and valid inequalities," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 55, pp. 82–90, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2013.08.027.
- [12] Y. Bai, H. Zhong, Q. Xia, C. Kang, and L. Xie, "A decomposition method for network-constrained unit commitment with AC power flow constraints," *Energy*, vol. 88, pp. 595–603, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.05.082.
- [13] F. Zohrizadeh, M. Kheirandishfard, A. Nasir, and R. Madani, "Sequential Relaxation of Unit Commitment with AC Transmission Constraints," in *2018 IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Miami Beach, FL: IEEE, Dec. 2018, pp. 2408–2413, doi: 10.1109/CDC.2018.8619609.
- [14] N. V. Pham, T. H. T. Nguyen, V. H. Trinh, and Q. C. Vu, "A MILP-based formulation for thermal-wind-BESS unit commitment problem considering network power loss," *TNU J. Sci. Technol.*, vol. 227, no. 16, pp. 85–93, Oct. 2022, doi: 10.34238/tnu-jst.6485.
- [15] GAMS Development Corp., "GAMS Documentation 46," Feb. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.gams.com>. [Accessed Feb. 25, 2025].
- [16] M. Sheikh *et al.*, "Security-Constrained Unit Commitment Problem With Transmission Switching Reliability and Dynamic Thermal Line Rating," *IEEE Syst. J.*, vol. 13, no. 4, pp. 3933–3943, Dec. 2019, doi: 10.1109/JSYST.2019.2939210.
- [17] S. Babaeinejadsarookolae *et al.*, "The Power Grid Library for Benchmarking AC Optimal Power Flow Algorithms," *arXiv*, 2019, doi: 10.48550/ARXIV.1908.02788.