

A MILP-BASED FORMULATION FOR THERMAL-WIND-BESS UNIT COMMITMENT PROBLEM CONSIDERING NETWORK POWER LOSS

Pham Nang Van*, Nguyen Thi Hoai Thu, Trinh Van Hoang, Vu Quoc Cuong

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

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	11/9/2022	Unit commitment is one of the most critical problems in power system operation. The objective of the unit commitment problem is to determine the start-up and shut-down schedule of generating units for a given planning horizon with the aim of maximizing social welfare while satisfying the load demand and meeting the technical and security constraints. This paper proposes a model based on Mixed-Integer Linear Programming (MILP) as a way of dealing with the unit commitment problem of thermal-wind-BESS integrated systems considering network power loss. This MILP based-formulation is developed from the Mixed-Integer Nonlinear Programming (MINLP) model by linearizing the power loss. The proposed model is validated using the power transmission system of the IEEE RTS 24-bus. The calculation results reveal that the power loss makes a considerable impact on the commitment of production units, the actual power output of the committed generating units and scheduled storage power.
Revised:	19/10/2022	
Published:	20/10/2022	
KEYWORDS		
Unit Commitment (UC)		
Battery Energy Storage System (BESS)		
Power Loss		
Linear Approximation		
Mixed-Integer Linear Programming (MILP)		

GIẢI BÀI TOÁN UC SỬ DỤNG MÔ HÌNH MILP CHO HỆ THỐNG HỖN HỢP NHIỆT ĐIỆN, ĐIỆN GIÓ VÀ TÍCH TRỮ NĂNG LƯỢNG DẠNG PIN CÓ XÉT TỶ SỐ TỶ THẤT CÔNG SUẤT LƯỚI ĐIỆN

Phạm Năng Văn*, Nguyễn Thị Hoài Thu, Trịnh Văn Hoàng, Vũ Quốc Cường

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

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	11/9/2022	Lựa chọn tổ máy vận hành là một trong các bài toán quan trọng nhất của vận hành hệ thống điện. Mục đích của bài toán lựa chọn tổ máy vận hành là xác định trạng thái vận hành của các tổ máy trong một khoảng thời gian để đáp ứng nhu cầu của phụ tải, thỏa mãn các ràng buộc kỹ thuật và ràng buộc an toàn của hệ thống, đồng thời cực đại tổng lợi ích xã hội trong khoảng thời gian xét. Bài báo này đề xuất mô hình quy hoạch tuyến tính nguyên thực hỗn hợp (MILP) để giải bài toán lựa chọn tổ máy vận hành cho hệ thống hỗn hợp nhiệt điện, điện gió và tích trữ năng lượng dạng pin có xét tổn thất công suất của lưới điện. Mô hình MILP được phát triển từ mô hình quy hoạch phi tuyến nguyên thực hỗn hợp (MINLP) bằng cách sử dụng kỹ thuật tuyến tính hóa tổn thất công suất của lưới điện. Lưới điện truyền tải 24 nút IEEE được áp dụng để đánh giá mô hình đề xuất. Kết quả tính toán cho thấy rằng tổn thất công suất của lưới điện có ảnh hưởng đáng kể đến trạng thái vận hành, công suất phát của các tổ máy và sự hoạt động của tích trữ năng lượng dạng pin.
Ngày hoàn thiện:	19/10/2022	
Ngày đăng:	20/10/2022	
TỪ KHÓA		
Lựa chọn tổ máy vận hành (UC)		
Tích trữ năng lượng dạng pin (BESS)		
Tổn thất công suất		
Xấp xỉ tuyến tính		
Quy hoạch tuyến tính nguyên thực hỗn hợp (MILP)		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.6485>

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

1. Giới thiệu

Bài toán lựa chọn thành phần tổ máy vận hành (UC) có mục đích là xác định trạng thái vận hành của các tổ máy trong một khoảng thời gian nhất định (thường là một ngày) và công suất phát của các tổ máy vận hành để tối đa hóa tổng lợi ích xã hội trong hoạt động thị trường điện, đồng thời thỏa mãn nhu cầu công suất của phụ tải, các ràng buộc kỹ thuật của tổ máy, các ràng buộc kỹ thuật của lưới điện và ràng buộc an toàn của hệ thống [1].

Trong bài toán UC truyền thống, đối tượng nghiên cứu thường chỉ là các tổ máy nhiệt điện. Đặc điểm của các tổ máy nhiệt điện là độ linh hoạt tương đối thấp, thời gian làm việc/ngủ tối thiểu lớn, công suất phát tối thiểu lớn, chi phí khởi động và giá thành sản xuất điện năng cao [2],[3]. Tuy nhiên, mức độ thâm nhập ngày càng cao của các nguồn năng lượng tái tạo và sự lắp đặt các hệ thống tích trữ năng lượng (BESS) đòi hỏi các nghiên cứu mới về bài toán UC [4], [5]. Ngoài ra, tổn thất công suất tác dụng của lưới điện thường bằng $(1 \div 5)\%$ tổng công suất phụ tải toàn hệ thống và có ảnh hưởng đến lời giải của bài toán UC. Các nghiên cứu hiện tại về bài toán UC được mô tả như dưới đây.

Xét về đối tượng nghiên cứu, bài báo [2] trình bày bài toán UC cho hệ thống chỉ có các nhà máy nhiệt điện và không xét lưới điện. Các tác giả trong nghiên cứu [6] đã đề xuất mô hình bài toán UC cho hệ thống chỉ có nhiệt điện và có xét ràng buộc lưới điện. Bài báo [7] phát triển mô hình bài toán UC có xét ràng buộc sự cố N-1 cho hệ thống hỗn hợp nhiệt điện và điện gió. Bài toán UC cho hệ thống hỗn hợp nhiệt điện và điện gió có xét tính bất định được mô tả trong nghiên cứu [8]. Tuy nhiên, các nghiên cứu [5], [6] chưa xét ảnh hưởng của tổn thất công suất trong lưới điện đến lời giải của bài toán UC.

Xét về phương pháp giải, một số kỹ thuật giải đã được đề xuất để giải bài toán UC như nói lỏng Lagrangian (LR) [9], thuật toán di truyền (GA) [10] và quy hoạch tuyến tính nguyên thực hỗn hợp (MILP) [11] - [13]. Đặc điểm của một số phương pháp giải như sau:

- Phương pháp nói lỏng Lagrangian (LR) sử dụng lý thuyết đối ngẫu trong quy hoạch phi tuyến, giải được bài toán UC có kích cỡ lớn và có độ linh hoạt cao. Tuy nhiên, phương pháp này không tìm được lời giải tối ưu toàn cục và khối lượng tính toán lớn. Trước đây, phương pháp LR là kỹ thuật giải quan trọng nhất và được áp dụng phổ biến từ những năm 1970.

- Phương pháp dựa trên thuật toán di truyền đã được áp dụng thành công để giải các bài toán tối ưu hóa phức tạp. Tuy nhiên, nhược điểm chính của phương pháp này là hiệu suất tính toán tương đối thấp khi áp dụng cho các hệ thống điện có kích cỡ lớn và đòi hỏi sự hiểu biết rất chuyên sâu về mặt toán học.

- Phương pháp dựa trên quy hoạch tuyến tính nguyên thực hỗn hợp (MILP) ngày càng phổ biến, được tích hợp trong nhiều bộ giải và dễ tiếp cận với người dùng. MILP cung cấp nghiệm tối ưu toàn cục và hội tụ sau số bước lặp hữu hạn. Các bộ giải thương mại cho phương pháp MILP dựa trên thuật toán nhánh cắt như CPLEX, LINDO, OSL và XPRESS-MP và các bộ giải nguồn mở như MINTO, ABACUS, MIPO và BC-OPT với khả năng giải hiệu quả các bài toán có quy mô lớn đã được áp dụng thành công để giải bài toán UC. Do đó, hiện nay, phương pháp MILP được áp dụng rộng rãi nhất để giải bài toán UC.

Mục đích của bài báo này là xây dựng mô hình MILP cho bài toán UC của hệ thống hỗn hợp nhiệt điện, điện gió và BESS có xét tổn thất công suất của lưới điện. Các đóng góp chính của nghiên cứu bao gồm: (1) Phát triển kỹ thuật tuyến tính hóa tổn thất công suất lưới điện; (2) Đề xuất mô hình MILP cho bài toán UC trong hệ thống hỗn hợp nhiệt điện, điện gió và BESS có xét tổn thất công suất và (3) Phân tích ảnh hưởng của tổn thất công suất lưới điện đến lời giải của bài toán UC.

Bài báo gồm bốn phần. Phần 2 trình bày mô hình quy hoạch phi tuyến nguyên thực hỗn hợp (MINLP) của bài toán UC. Kỹ thuật tuyến tính hóa các ràng buộc lưới điện và mô hình MILP của bài toán cũng được mô tả trong phần này. Phần 3 trình bày sự áp dụng của mô hình MILP đề xuất cho lưới điện truyền tải 24 nút IEEE. Những kết luận và hướng nghiên cứu trong tương lai được trình bày trong Phần 4.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Mô hình MINLP của bài toán UC xét ràng buộc lưới điện

Mô hình UC trong bài báo này xem xét sự tham gia chào giá của cả đơn vị phát điện và đơn vị mua điện. Khi đó, hàm mục tiêu của bài toán UC là tối đa hóa tổng lợi ích xã hội (SW), trong đó có xét đến thành phần chi phí cố định, chi phí khởi động và chi phí dừng của các tổ máy nhiệt điện. Đồng thời, bài toán UC bao gồm các ràng buộc liên quan đến nhà máy nhiệt điện, điện gió, BESS, lưới điện và ràng buộc an toàn.

2.1.1. Hàm mục tiêu

Hàm mục tiêu của bài toán UC được mô tả như sau:

$$\max SW = \sum_{t=1}^T \sum_{j \in \Omega_D} \sum_{n=1}^{N_{Dj}} \lambda_{Dj}(n, t) P_{Dj}(n, t) - \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega_G} \left[C_i^0 u_i(t) + C_i^{SU} y_i(t) + C_i^{SD} z_i(t) + \sum_{m=1}^{N_{Gi}} \lambda_{Gi}(m, t) P_{Gi}(m, t) \right] \quad (1)$$

Trong đó:

- T là tổng số giai đoạn của chu kỳ lập kế hoạch vận hành (ở đây $T = 24$);
- j và i lần lượt là chỉ số của các phụ tải và tổ máy phát;
- t là chỉ số của các khoảng thời gian;
- n và m lần lượt là chỉ số của các block công suất tiêu thụ và công suất phát;
- $\lambda_{Dj}(n, t)$ là giá chào mua của phụ tải j ứng với block n trong khoảng thời gian t (\$/MWh);
- $P_{Dj}(n, t)$ là công suất tiêu thụ của phụ tải j ứng với block n trong khoảng thời gian t (MW);
- Ω_D là tập các phụ tải tham gia thị trường;
- Ω_G là tập các tổ máy tham gia thị trường;
- N_{Dj} là số block chào giá của phụ tải j ;
- N_{Gi} là số block chào giá của tổ máy i ;
- $\lambda_{Gi}(m, t)$ là giá chào bán của tổ máy i ứng với block m trong khoảng thời gian t (\$/MWh);
- $P_{Gi}(m, t)$ là công suất phát của tổ máy i ứng với block m trong khoảng thời gian t (MW);
- C_i^0 , C_i^{SU} và C_i^{SD} lần lượt là chi phí cố định, chi phí khởi động và chi phí dừng tổ máy (\$);
- $u_i(t)$ là biến nhị phân 0/1, bằng 1 khi tổ máy i vận hành trong khoảng thời gian t và bằng 0 khi tổ máy nghỉ;
- $y_i(t)$ là biến nhị phân 0/1, bằng 1 khi tổ máy i khởi động ở đầu khoảng thời gian t và bằng 0 khi tổ máy không khởi động;
- $z_i(t)$ là biến nhị phân 0/1, bằng 1 khi tổ máy i dừng ở đầu khoảng thời gian t và bằng 0 khi tổ máy không dừng.

2.1.2. Các ràng buộc

2.1.2.1. Giới hạn công suất phát

Công suất phát của các tổ máy không thể nhỏ hơn trị số công suất tối thiểu ($P_{Gi}^{\min}$) và lớn hơn trị số công suất phát tối đa ($P_{Gi}^{\max}$). Ràng buộc kỹ thuật này được mô tả như sau:

$$P_{Gi}^{\min} u_i(t) \leq P_{Gi}(t) = \sum_{m=1}^{N_{Gi}} P_{Gi}(m, t) \leq P_{Gi}^{\max} u_i(t); \quad \forall i, t \quad (2)$$

$$P_{Gi}(m, t) \leq P_{Gi}^{\max}(m, t); \quad \forall i, t, m \quad (3)$$

2.1.2.2. Giới hạn tăng/giảm công suất phát

Quá trình tăng công suất phát trong giai đoạn khởi động tổ máy được quyết định bởi giới hạn tăng công suất phát khi khởi động:

$$P_{Gi}(t) - P_{Gi}(t-1) \leq R_i^U u_i(t-1) + R_i^{SU} y_i(t); \quad \forall i, t \quad (4)$$

trong đó, R_i^U và R_i^{SU} lần lượt là giới hạn tăng công suất phát (MW/h) và giới hạn tăng công suất phát khi khởi động của tổ máy i (MW/h).

Trong khoảng thời gian đầu tiên của chu kỳ lập kế hoạch vận hành, ràng buộc (4) trở thành:

$$P_{Gi}(1) - P_{Gi}(0) \leq R_i^U u_i(0) + R_i^{SU} y_i(1); \quad \forall i \quad (5)$$

trong đó, $P_{Gi}(0)$ và $u_i(0)$ lần lượt là công suất phát và trạng thái của tổ máy i trong khoảng thời gian cuối cùng của ngày vận hành trước.

Tương tự, quá trình giảm công suất phát được giới hạn như sau:

$$P_{Gi}(t-1) - P_{Gi}(t) \leq R_i^D u_i(t) + R_i^{SD} z_i(t); \quad \forall i, t \quad (6)$$

$$P_{Gi}(0) - P_{Gi}(1) \leq R_i^D u_i(1) + R_i^{SD} z_i(1); \quad \forall i \quad (7)$$

trong đó, R_i^D và R_i^{SD} lần lượt là giới hạn giảm công suất phát (MW/h) và giới hạn giảm công suất phát khi dừng của tổ máy i (MW/h).

2.1.2.3. Ràng buộc thời gian làm việc/nghi tối thiểu

Ràng buộc thời gian làm việc tối thiểu (T_i^U) được mô tả như sau :

$$\sum_{t=1}^{G_i} [1 - u_i(t)] = 0; \quad G_i = \min \{T, [T_i^U - T_i^U(0)] u_i(0)\}; \quad \forall i \quad (8)$$

$$\sum_{n=t}^{t+T_i^U-1} u_i(n) \geq T_i^U y_i(t); \quad \forall i, \forall t = G_i + 1 \dots T - T_i^U + 1 \quad (9)$$

$$\sum_{n=t}^T [u_i(n) - y_i(t)] \geq 0; \quad \forall i, \forall t = T - T_i^U + 2 \dots T \quad (10)$$

trong đó, G_i và $T_i^U(0)$ lần lượt là số giờ mà tổ máy i phải làm việc và số giờ mà tổ máy i đã làm việc, xét tại thời điểm đầu của chu kỳ lập kế hoạch mới.

Tương tự, ràng buộc thời gian nghỉ tối thiểu (T_i^D) được mô tả như sau:

$$\sum_{t=1}^{F_i} u_i(t) = 0; \quad F_i = \min \{T, [T_i^D - T_i^S(0)] [1 - u_i(0)]\}; \quad \forall i \quad (11)$$

$$\sum_{n=t}^{t+T_i^D-1} [1 - u_i(n)] \geq T_i^D z_i(t); \quad \forall i, \forall t = F_i + 1 \dots T - T_i^D + 1 \quad (12)$$

$$\sum_{n=t}^T [1 - u_i(n) - z_i(t)] \geq 0; \quad \forall i, \forall t = T - T_i^D + 2 \dots T \quad (13)$$

trong đó, F_i và $T_i^S(0)$ lần lượt là số giờ mà tổ máy i phải nghỉ và số giờ mà tổ máy i đã nghỉ, xét tại thời điểm đầu của chu kỳ lập kế hoạch mới.

2.1.2.4. Ràng buộc các biến nhị phân

Để đảm bảo tính logic trong vận hành thực tế, các ràng buộc dưới đây cần được thỏa mãn:

$$y_i(t) - z_i(t) = u_i(t) - u_i(t-1); \quad y_i(t) + z_i(t) \leq 1; \quad u_i(t), y_i(t), z_i(t) \in \{0, 1\}; \quad \forall i, t \quad (14)$$

2.1.2.5. Ràng buộc của BESS

Ràng buộc hoạt động của BESS thứ k được mô tả như sau:

$$0 \leq P_{Bk \text{ ch}}(t) \leq P_{Bk \text{ ch}}^{\max}; \quad 0 \leq P_{Bk \text{ dis}}(t) \leq P_{Bk \text{ dis}}^{\max}; \quad \forall k, t \quad (15)$$

$$P_{Bk \text{ ch}}(t) - v_k(t) P_{Bk \text{ ch}}^{\max} \leq 0; \quad P_{Bk \text{ dis}}(t) + v_k(t) P_{Bk \text{ dis}}^{\max} \leq P_{Bk \text{ dis}}^{\max}; \quad \forall k, t \quad (16)$$

$$E_{Bk}(t) = E_{Bk}(t-1) + \left[\eta_{Bk}^{\text{ch}} P_{Bk \text{ ch}}(t-1) - \frac{1}{\eta_{Bk}^{\text{dis}}} P_{Bk \text{ dis}}(t-1) \right]; \quad \forall k, t \quad (17)$$

$$E_{Bk}^{\min} \leq E_{Bk}(t) \leq E_{Bk}^{\max}; \quad \forall k, t; \quad E_{Bk}(0) = E_{Bk}(24); \quad \forall k \quad (18)$$

trong đó:

- $P_{Bk \text{ ch}}(t)$ và $P_{Bk \text{ dis}}(t)$ lần lượt là công suất sạc và xả của BESS thứ k tại thời điểm t ;
- $P_{Bk \text{ ch}}^{\max}$ và $P_{Bk \text{ dis}}^{\max}$ lần lượt là công suất sạc và xả tối đa của BESS thứ k tại thời điểm t ;
- $v_k(t)$ là biến nhị phân 0/1, nếu BESS sạc ở thời điểm t thì $v_k(t) = 1$ và nếu xả thì $v_k(t) = 0$;
- $E_{Bk}(t)$ là mức năng lượng của BESS thứ k tại thời điểm t ;
- $E_{Bk}^{\min}$ và $E_{Bk}^{\max}$ lần lượt là mức năng lượng tối thiểu và tối đa của BESS thứ k ;
- η_{Bk}^{ch} và η_{Bk}^{dis} lần lượt là hiệu suất sạc và xả của BESS thứ k ;
- $E_{Bk}(0)$ và $E_{Bk}(24)$ lần lượt là mức năng lượng của BESS thứ k tại đầu và cuối của chu kỳ lập kế hoạch.

lập kế hoạch.

2.1.2.6. Ràng buộc dự trữ công suất

Ràng buộc dự trữ công suất được mô tả như sau:

$$\sum_{i \in \Omega_G} u_i(t) P_{Gi}^{\max} \geq \sum_{j \in \Omega_D} P_{Dj}(t) + P_R(t); \quad \forall t \quad (19)$$

trong đó $P_R(t)$ là dự trữ công suất yêu cầu của hệ thống tại thời điểm t và được lấy bằng 10% tổng công suất phụ tải của toàn hệ thống.

2.1.2.7. Ràng buộc lưới điện

Với giả thiết mô-đun điện áp tại các nút của lưới điện bằng 1 pu, dòng công suất tác dụng trên đường dây (s, r) tại nút s và r lần lượt được mô tả như sau [4]:

$$P_{sr} = g_{sr} - (g_{sr} \cos \delta_{sr} + b_{sr} \sin \delta_{sr}); \quad P_{rs} = g_{sr} - (g_{sr} \cos \delta_{sr} - b_{sr} \sin \delta_{sr}) \quad (20)$$

trong đó, $\delta_{sr} = \delta_s - \delta_r$ và $\dot{y}_{sr} = g_{sr} + jb_{sr}$, $\dot{y}_{sr}$ là tổng dẫn dọc của đường dây (s, r) .

Tổn thất công suất trên nhánh (s, r) được xác định như sau:

$$\Delta P_{sr} = P_{sr} + P_{rs} = 2g_{sr}(1 - \cos \delta_{sr}) \quad (21)$$

Ràng buộc cân bằng công suất nút được viết cho nút s tại thời điểm t như (22).

$$\sum_{i \in \Omega_{Gs}} P_{Gi}(t) + \sum_{w \in \Omega_{Ws}} P_{Gw}(t) + \sum_{k \in \Omega_{Bs}} P_{Bk \text{ dis}}(t) - \sum_{j \in \Omega_{Ds}} P_{Dj}(t) - \sum_{k \in \Omega_{Bs}} P_{Bk \text{ ch}}(t) = \sum_{r \in \Omega_s} P_{sr}(t); \quad \forall t, s \quad (22)$$

trong đó, Ω_{Gs} là tập các nhà máy nhiệt điện nối với nút s ; Ω_{Ws} là tập các nhà máy điện gió nối với nút s ; Ω_{Bs} là tập các BESS nối với nút s ; Ω_{Ds} là tập các phụ tải nối với nút s ; Ω_s là tập các nút kết nối trực tiếp với nút s .

Ràng buộc giới hạn công suất truyền tải trên đường dây (s, r) được mô tả như sau:

$$\max \{P_{sr}(t); P_{rs}(t)\} \leq P_{sr}^{\max}; \quad \forall (s, r), t \quad (23)$$

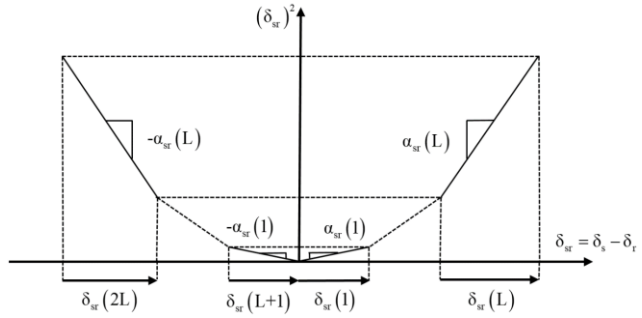
2.2. Tuyến tính hóa các ràng buộc lưới điện và mô hình MILP của bài toán UC

Bài toán UC (1)-(23) có dạng MINLP do các ràng buộc phi tuyến (22)-(23). Trong phần này, các ràng buộc này được tuyến tính hóa để xây dựng mô hình MILP của bài toán UC.

Trong chế độ xác lập, chênh lệch góc pha điện áp giữa hai nút liền kề nhau là rất nhỏ. Áp dụng khai triển chuỗi Taylor và bỏ qua thành phần bậc cao, biểu thức (20) và (21) trở thành:

$$P_{sr} = g_{sr} \frac{(\delta_{sr})^2}{2} - b_{sr} \delta_{sr}; \quad P_{rs} = g_{sr} \frac{(\delta_{sr})^2}{2} + b_{sr} \delta_{sr}; \quad \Delta P_{sr} = g_{sr} (\delta_{sr})^2 \quad (24)$$

Phương pháp tuyến tính hóa từng đoạn cho hàm bình phương độ lệch góc pha điện áp $(\delta_{sr})^2$ sử dụng $2L$ khối tuyến tính như trong Hình 1 [4]. Do $(\delta_{sr})^2$ là hàm đối xứng nên để giảm khối lượng tính toán, ta chỉ cần sử dụng L phân đoạn tuyến tính. Các giá trị dương của δ_{sr} được thể hiện qua biến mới δ'_{sr} và được xác định bởi phương trình (25).



Hình 1. Kỹ thuật tuyến tính hóa từng đoạn

Như vậy, hàm $(\delta_{sr})^2$ đã được tuyến tính hóa bằng L phân đoạn với độ dài lần lượt $\delta'_{sr}(1)$, $\delta'_{sr}(2)$, ..., $\delta'_{sr}(L)$, mỗi phân đoạn có độ dốc tương ứng là $\alpha_{sr}(1)$, $\alpha_{sr}(2)$, ..., $\alpha_{sr}(L)$.

$$\delta'_{sr} = |\delta_s - \delta_r|; \quad \delta'_{sr} = \sum_{l=1}^L \delta'_{sr}(l); \quad (\delta_{sr})^2 = \sum_{l=1}^L \alpha_{sr}(l) \delta'_{sr}(l) \quad (25)$$

Biểu thức (25) có dấu trị tuyệt đối và được tuyến tính hóa sử dụng hai biến δ_{sr}^+ và δ_{sr}^- như sau:

$$\delta'_{sr} = \delta_{sr}^+ + \delta_{sr}^-; \quad \delta_{sr} = \delta_s - \delta_r = \delta_{sr}^+ - \delta_{sr}^-; \quad \delta_{sr}^+ \geq 0; \quad \delta_{sr}^- \geq 0 \quad (26)$$

Các ràng buộc dưới đây đảm bảo sự liên kết của các phân đoạn tuyến tính:

$$w_{sr}(l) \Delta \delta \leq \delta'_{sr}(l), \quad l = 1, \dots, L-1 \quad (27)$$

$$\delta'_{sr}(l) \leq w_{sr}(l-1) \Delta \delta, \quad l = 2, \dots, L \quad (28)$$

$$w_{sr}(l-1) \geq w_{sr}(l); \quad l = 2, \dots, L-1 \quad (29)$$

$$0 \leq \delta'_{sr}(l) \leq \Delta \delta; \quad l = 1, \dots, L \quad (30)$$

$$w_{sr}(l) \in \{0, 1\}; \quad l = 1, \dots, L-1 \quad (31)$$

trong đó:

- $\Delta \delta$ là độ dài lớn nhất của mỗi phân đoạn tuyến tính (radian).
- $w_{sr}(l)$ là biến nhị phân 0/1, bằng 1 khi độ lớn block tuyến tính thứ l ứng với độ lệch góc pha giữa hai nút (s,r) đạt giá trị bằng $\Delta \delta$, và ngược lại.

Giá trị độ dốc của các phân đoạn tuyến tính được xác định như sau:

$$\alpha_{sr}(l) = \frac{(l \Delta \delta)^2 - [(l \Delta \delta) - \Delta \delta]^2}{\Delta \delta} = (2l-1) \Delta \delta \quad (32)$$

Từ kết quả trên, ta có:

$$(\delta_{sr})^2 = \sum_{l=1}^L \alpha_{sr}(l) \delta'_{sr}(l) = \sum_{l=1}^L (2l-1) (\Delta \delta) [\delta_{sr}^+(l) + \delta_{sr}^-(l)] \quad (33)$$

Sử dụng (33), phương trình cân bằng công suất nút (22) được tuyến tính hóa như sau:

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in \Omega_{Gs}} P_{Gi}(t) + \sum_{w \in \Omega_{WGs}} P_{Gw}(t) + \sum_{k \in \Omega_{Bgs}} P_{Bk \text{ dis}}(t) - \sum_{j \in \Omega_{Dgs}} P_{Dj}(t) - \sum_{k \in \Omega_{Bgs}} P_{Bk \text{ ch}}(t) \\ &= \sum_{r \in \Omega_s} \left\{ \frac{1}{2} g_{sr} \sum_{l=1}^L (2l-1) (\Delta \delta) [\delta_{sr}^+(l) + \delta_{sr}^-(l)] - b_{sr} \left[\sum_{l=1}^L \delta_{sr}^+(l) - \sum_{l=1}^L \delta_{sr}^-(l) \right] \right\}; \quad \forall t, s \end{aligned} \quad (34)$$

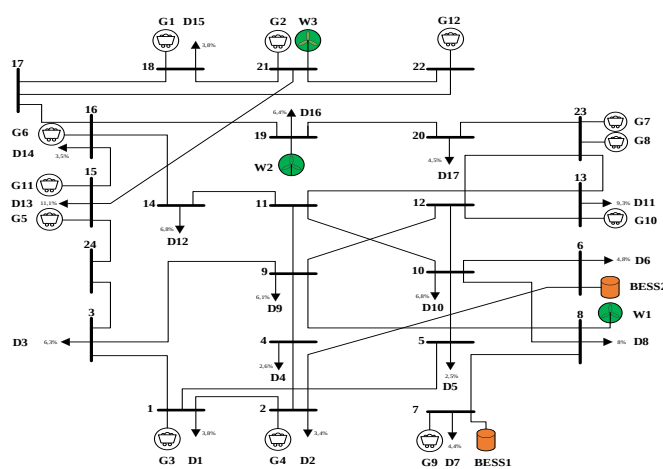
Ràng buộc giới hạn công suất truyền tải (23) được tuyến tính hóa thành biểu thức (35).

$$\sum_{l=1}^L \left[\frac{1}{2} g_{sr} (2l-1) (\Delta \delta) - b_{sr} \right] [\delta_{sr}^+(l, t) + \delta_{sr}^-(l, t)] \leq P_{sr}^{\max}; \quad \forall t, (s, r) \quad (35)$$

Khi đó, mô hình MILP của bài toán UC có xét ràng buộc lưới điện bao gồm hàm mục tiêu (1), các ràng buộc (2)-(19), (27)-(31) và (34)-(35).

3. Kết quả tính toán và thảo luận

Mô hình MILP của bài toán UC trình bày trong mục 2.2 được áp dụng cho lưới điện 24 nút IEEE (Hình 2). Lưới điện này có 12 nhà máy nhiệt điện (G1÷G12), 3 nhà máy điện gió (W1, W2, W3) và 2 hệ thống tích trữ năng lượng dạng pin (BESS1, BESS2). Dữ liệu của lưới điện 24 nút IEEE được cung cấp chi tiết trong tài liệu [14]. Các kết quả tính toán đạt được sử dụng phần mềm GAMS/CPLEX [15] trên máy tính cá nhân Intel i5 CPU 1,6 GHz và RAM 8 GB. Số phân đoạn tuyến tính hóa tổn thất được sử dụng là 20.



Hình 2. Sơ đồ lưới điện IEEE 24 nút

Trạng thái vận hành của các tổ máy nhiệt điện (G1 ÷ G12) khi có/không xét tổn thất công suất của lưới điện lần lượt được trình bày trong Bảng 1. Từ Bảng 1, ta thấy rằng:

- Các tổ máy vận hành trong toàn bộ chu kỳ: G1, G2, G4, G6, G7, G8 và G12;
- Các tổ máy không vận hành trong toàn bộ chu kỳ: G10;
- Các tổ máy có khoảng thời gian vận hành và thời gian nghỉ: G3, G5, G9 và G11.

Bảng 1. Trạng thái vận hành tối ưu của các tổ máy nhiệt điện khi có/không xét tổn thất

Giờ	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12
1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1
2	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1
3	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1
4	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1
5	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1
6	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1
7	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1
8	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
19	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0 (1)	1
22	1	1	0 (1)	1	0 (1)	1	1	1	1 (0)	0	0 (1)	1
23	1	1	0 (1)	1	0	1	1	1	1 (0)	0	0	1
24	1	1	0	1	0	1	1	1	1 (0)	0	0	1

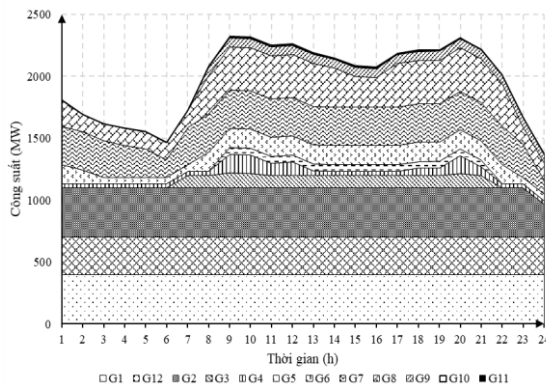
So sánh kết quả tính toán ở Bảng 1 (trị số trong dấu ngoặc đơn là trạng thái vận hành thay đổi khi không xét tổn thất), ta thấy rằng tổn thất công suất của lưới có ảnh hưởng đến trạng thái vận hành của tổ máy. Trong các giờ 22 và 23, nếu không xét tổn thất công suất thì tổ máy G3 làm

việc; tuy nhiên, tổ máy này nghỉ khi có xét tồn thất. Tương tự, trong các giờ 22, 23 và 24, tổ máy G9 nghỉ khi không xét tồn thất và làm việc khi có xét tồn thất.

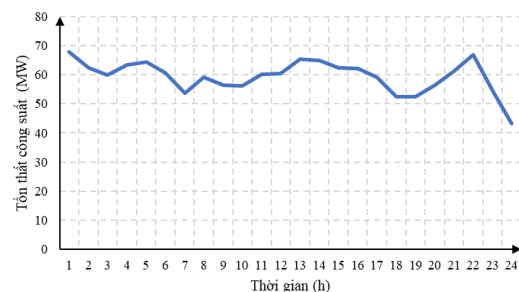
Trạng thái hoạt động của các hệ thống tích trữ năng lượng (BESS) khi có/không xét tồn thất công suất của lưới điện, bao gồm công suất sạc, công suất xả và mức năng lượng được trình bày trong Bảng 2. Từ Bảng 2, ta thấy rằng, BESS có xu hướng sạc vào giờ công suất phụ tải thấp và xả khi công suất phụ tải tăng cao. Vì dung lượng của BESS1 lớn hơn BESS2 nên công suất sạc/xả của BESS1 lớn hơn của BESS2. Đồng thời, tồn thất công suất cũng có ảnh hưởng đáng kể đến hoạt động của BESS. Trong giờ 10 và xét BESS1, công suất xả lần lượt bằng 13,9 MW và 60 MW khi có/không xét tồn thất.

Bảng 2. Sự hoạt động của BESS khi xét tồn thất (TT) và không xét tồn thất (KTT)

Giờ	BESS1						BESS2					
	Công suất xả (MW)		Công suất sạc (MW)		Năng lượng (MWh)		Công suất xả (MW)		Công suất sạc (MW)		Năng lượng (MWh)	
	TT	KTT	TT	KTT	TT	KTT	TT	KTT	TT	KTT	TT	KTT
1	0	0	0	0	40	40	0	0	0	0	20	20
2	0	0	0	0	40	40	0	0	0	0	20	20
3	0	0	-5,3	0	44,8	40	0	0	-7,7	0	26,9	20
4	0	0	-36,9	-57,8	77,9	92,0	0	0	-30	-30	53,9	47
5	0	0	-53,4	-37,7	126	126	0	0	-30	-17,8	80,9	63
6	0	0	-60	-60	180	180	0	0	-10,1	-30	90	90
7	0	0	0	0	180	180	0	0	0	0	90	90
8	0	0	0	0	180	180	0	0	0	0	90	90
9	23,7	49,9	0	0	153,7	124,6	0	16,8	0	0	90	71,3
10	13,9	60	0	0	138,2	57,9	6,7	30	0	0	82,5	37,9
11	0	6,8	0	0	138,2	50,4	0	0	0	0	82,5	37,9
12	0	12,9	0	0	138,2	35,9	0	1,8	0	0	82,5	36
13	0	0	0	0	138,2	35,9	0	0	0	0	82,5	36
14	0	0	0	0	138,2	35,9	0	0	0	0	82,5	36
15	0	0	0	-60	138,2	89,9	0	0	0	-30	82,5	63
16	0	0	0	-60	138,2	143,9	0	0	0	-30	82,5	90
17	3,9	0	0	0	133,9	143,9	5,3	0	0	0	76,7	90
18	42,9	15,7	0	0	86,1	126,6	30	30	0	0	43,3	56,7
19	44,7	38,2	0	0	36,5	84,2	30	12	0	0	10	43,3
20	14,9	57,8	0	0	20	20	0	30	0	0	10	10
21	0	0	0	0	20	20	0	0	0	0	10	10
22	0	0	0	0	20	20	0	0	0	0	10	10
23	0	0	0	0	20	20	0	0	0	0	10	10
24	0	0	-22,2	-22,2	40	40	0	0	-11,1	-11,1	20	20



Hình 3. Công suất phát tối ưu của các tổ máy nhiệt điện khi có xét tồn thất



Hình 4. Tồn thất công suất của lưới điện

Công suất phát tối ưu của các nhà máy nhiệt điện khi có xét tổn thất ($G1+G12$) và tổn thất công suất của lưới điện lần lượt được mô tả trên Hình 3 và Hình 4. Hình 3 thể hiện rằng tổ máy G1, G12 luôn phát với công suất tối đa, tổ máy G10 không vận hành, các tổ máy còn lại thay đổi công suất phát trong chu kỳ tính toán. Kết quả tính toán trên Hình 4 cho thấy rằng, tổn thất công suất của lưới điện 24 nút IEEE bằng từ ($1\% \div 1,5\%$) tổng công suất phụ tải toàn hệ thống.

4. Kết luận

Bài báo đề xuất mô hình quy hoạch tuyến tính nguyên thực hỗn hợp (MILP) để giải bài toán lựa chọn thành phần tổ máy vận hành (UC) trong hệ thống điện tích hợp nhiệt điện, điện gió và hệ thống tích trữ năng lượng dạng pin (BESS) có xét tổn thất công suất của lưới điện. Mô hình MILP này được xây dựng từ mô hình quy hoạch phi tuyến tính nguyên thực hỗn hợp (MINLP) bằng cách tuyến tính hóa các ràng buộc lưới điện. Mô hình MILP đề xuất được đánh giá sử dụng lưới điện 24 nút IEEE với 12 nhà máy nhiệt điện, 3 nhà máy điện gió và 2 hệ thống tích trữ năng lượng. Kết quả tính toán cho thấy rằng mặc dù tổn thất công suất của lưới điện chỉ chiếm ($1\% \div 1,5\%$) tổng công suất phụ tải nhưng có ảnh hưởng rõ rệt đến trạng thái vận hành và công suất phát tối ưu của các nhà máy điện trong hệ thống; công suất xả/ nạp và mức năng lượng của BESS.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] D. A. Tejada-Arango, S. Lumbreras, P. Sanchez-Martin, and A. Ramos, "Which Unit-Commitment Formulation is Best? A Comparison Framework," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 35, no. 4, pp. 2926–2936, Jul. 2020.
- [2] J. M. Arroyo and A. J. Conejo, "Multiperiod Auction for a Pool-based Electricity Market," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, no. 4, pp. 1225–1231, Nov. 2002.
- [3] N. V. Pham, D. H. Nguyen, and V. D. Nguyen, "A Tool for Unit Commitment Schedule in Day-Ahead in Pool based Electricity Markets," *UD-JST*, vol. 6, no. 103, pp. 25–29, Jun. 2016.
- [4] X. Wu, J. Zhao, and A. Conejo, "Optimal Battery Sizing for Frequency Regulation and Energy Arbitrage," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 37, no. 3, pp. 2016–2023, Jun. 2022.
- [5] E. Quarm and R. Madani, "Scalable Security-Constrained Unit Commitment Under Uncertainty via Cone Programming Relaxation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 36, no. 5, pp. 4733–4744, Sep. 2021.
- [6] A. L. Motto, F. D. Galiana, A. J. Conejo, and J. M. Arroyo, "Network-constrained multiperiod auction for a pool-based electricity market," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, no. 3, pp. 646–653, Aug. 2002.
- [7] D. A. Tejada-Arango, P. Sanchez-Martin, and A. Ramos, "Security Constrained Unit Commitment Using Line Outage Distribution Factors," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 1, pp. 329–337, Jan. 2018.
- [8] D. Chen, S. Hou, N. Gong, W. Zhang, and H. Li, "A Chance-Constrained Two-Stage Stochastic UC Considering Uncertain Renewable Energy Output And Demand Response," in *2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, Singapore, May 2018, pp. 419–424.
- [9] S. Virmani, E. C. Adrian, K. Imhof, and S. Mukherjee, "Implementation of a Lagrangian relaxation based unit commitment problem," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 4, no. 4, pp. 1373–1380, Nov. 1989.
- [10] H. S. Madraswala and A. S. Deshpande, "Genetic algorithm solution to unit commitment problem," in *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, Delhi, India, Jul. 2016, pp. 1–6.
- [11] G. Morales-España, J. M. Latorre, and A. Ramos, "Tight and Compact MILP Formulation for the Thermal Unit Commitment Problem," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 4897–4908, Oct. 2013.
- [12] C. Shang and T. Lin, "A Linear Reliability-Evaluated Unit Commitment," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 37, no. 5, pp. 4133–4136, Sep. 2022.
- [13] K. Qing, Q. Huang, Y. Du, L. Jiang, O. Bamsile, and W. Hu, "Distributionally robust unit commitment with an adjustable uncertainty set and dynamic demand response," *Energy*, vol. 262, Jan. 2023, Art. no. 125434.
- [14] C. Barrows, A. Bloom, A. Ehlen, J. Ikaheimo, J. Jergenson, D. Krishnamurthy, J. Lau, B. McBennett, M. O'Connell, E. Preston, A. Staid, G. Stephen, and J.-P. Watson "The IEEE Reliability Test System: A Proposed 2019 Update," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 35, no. 1, pp. 119–127, Jan. 2020.
- [15] GAMS, "General Algebraic Modeling System," 2022. [Online]. Available: <https://www.gams.com/> [Accessed July 05, 2022].