

ANALYSIS OF WIND POWER EFFICIENCY ON THE OPTIMAL OPERATION OF AN INTEGRATED ELECTRIC-THERMAL SYSTEM CONSIDERING HEAT NETWORK CONSTRAINTS

Pham Thi Hong Anh

TNU - University of Information and Communication Technology

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	06/3/2025	Wind power faces significant challenges in grid integration, particularly during the heating season when thermal power plants must prioritize heat supply. This reduces the ability to adjust power output and leads to wasted renewable energy. This paper proposes an optimization approach for the coordinated operation of power and heat systems to enhance wind power utilization. The developed model considers factors such as transmission limits, delays, and thermal losses, ensuring effective coordination between the two systems. The optimization method improves flexibility in power adjustment and enhances overall operational efficiency. Results show that applying the coordinated model significantly increases wind power utilization, minimizes energy waste, and improves operational performance. This research provides an important scientific basis for developing technical solutions and policies to promote sustainable wind power development.
Revised:	08/6/2025	
Published:	12/6/2025	
KEYWORDS		
Integrated energy systems		
Operation optimization		
Heating network constraints		
Wind power accommodation		
Coordination of electricity and heat		

PHÂN TÍCH HIỆU QUẢ ĐIỆN GIÓ ĐẾN VẬN HÀNH TỐI ƯU HỆ THỐNG ĐIỆN – NHIỆT TÍCH HỢP CÓ XÉT ĐẾN RÀNG BUỘC LƯỚI NHIỆT

Phạm Thị Hồng Anh

Trường Đại học Công nghệ thông tin và Truyền thông – ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	06/3/2025	Điện gió đang gặp nhiều thách thức trong việc tích hợp vào lưới điện, đặc biệt trong mùa sưởi ấm khi các nhà máy nhiệt điện phải ưu tiên cấp nhiệt, làm giảm khả năng điều chỉnh công suất phát điện và gây lãng phí năng lượng tái tạo. Bài báo đề xuất một phương pháp tối ưu hóa vận hành hệ thống điện và nhiệt, hướng đến tăng cường khả năng khai thác điện gió. Mô hình được xây dựng có tính đến các yếu tố như giới hạn truyền tải, độ trễ và tổn thất nhiệt, giúp đảm bảo sự phối hợp hiệu quả giữa hai hệ thống. Phương pháp tối ưu hóa giúp nâng cao tính linh hoạt trong điều chỉnh công suất, cải thiện hiệu suất vận hành tổng thể. Kết quả cho thấy khi áp dụng mô hình phối hợp, khả năng sử dụng điện gió tăng đáng kể, giảm thiểu lãng phí năng lượng và nâng cao hiệu quả vận hành, cung cấp cơ sở khoa học quan trọng để phát triển các giải pháp kỹ thuật và chính sách thúc đẩy điện gió bền vững.
Ngày hoàn thiện:	08/6/2025	
Ngày đăng:	12/6/2025	
TỪ KHÓA		
Hệ thống năng lượng tích hợp		
Vận hành tối ưu		
Ràng buộc lưới nhiệt		
Tiêu thụ điện gió		
Phối hợp giữa điện và nhiệt		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.12228>

Email: pthanh@ictu.edu.vn

<http://jst.tnu.edu.vn>

166

Email: jst@tnu.edu.vn

1. Giới thiệu

Tính đến cuối năm 2024, tổng công suất lắp đặt điện gió toàn cầu đã đạt khoảng 1.200 (GW), với Trung Quốc, Hoa Kỳ và Đức đóng góp khoảng 64% công suất này. Trung Quốc dẫn đầu với 43% thị phần, tương đương khoảng 520.000.000 kW, tăng 18% so với năm trước đó [1]. Mặc dù đạt được những tiến bộ đáng kể, việc tích hợp quy mô lớn điện gió vào lưới điện vẫn đối mặt với những thách thức như đặc tính phân điều chỉnh của điện gió và sự thiếu phối hợp trong quy hoạch nguồn và lưới điện, dẫn đến hiện tượng hạn chế công suất và lãng phí điện gió [2], [3].

Trong mùa đông, các nhà máy nhiệt điện ở nhiều khu vực trên thế giới thường vận hành theo mô hình "điện phụ thuộc vào nhiệt" (*heat-led operation*), tức là sản xuất điện dựa trên nhu cầu sưởi ấm [4], [5]. Điều này hạn chế khả năng điều chỉnh công suất của các tổ máy nhiệt điện (*CHP - Combined Heat and Power*), ảnh hưởng đến việc tiêu thụ điện gió và dẫn đến lãng phí nguồn năng lượng này. Để giải quyết vấn đề này, cần tối ưu hóa sự phối hợp giữa hệ thống điện và hệ thống nhiệt, nhằm tăng cường khả năng tiêu thụ điện gió và giảm thiểu lãng phí.

Các nghiên cứu gần đây đã đề xuất việc sử dụng các thiết bị như nồi hơi điện (*electric boilers*), bơm nhiệt (*heat pumps*) và bể trữ nhiệt (*thermal storage tanks*) để tách biệt sản xuất điện và nhiệt, từ đó tăng cường khả năng điều chỉnh của các nhà máy nhiệt điện và thúc đẩy tiêu thụ điện gió [6] – [9]. Tuy nhiên, các mô hình này chủ yếu tập trung vào các ràng buộc của hệ thống điện, trong khi chưa xem xét đầy đủ các yếu tố như độ trễ truyền tải, tổn thất nhiệt và giới hạn công suất của mạng lưới nhiệt. Việc xem xét các yếu tố này là cần thiết để tối ưu hóa vận hành hệ thống năng lượng tích hợp điện-nhiệt và tăng cường hiệu quả tiêu thụ điện gió.

Bài báo này, dựa trên các mô hình phân tích vận hành phối hợp điện-nhiệt hiện có, mở rộng thêm việc xem xét các ràng buộc của mạng lưới nhiệt và sự phức tạp trong cấu trúc nguồn điện và nhiệt. Về ràng buộc mạng lưới nhiệt, nghiên cứu tập trung vào ảnh hưởng của độ trễ truyền tải, tổn thất nhiệt và giới hạn công suất, từ đó xây dựng mô hình mạng lưới nhiệt chi tiết hơn. Về cấu trúc nguồn điện và nhiệt, nghiên cứu xem xét nhiều loại nguồn năng lượng, bao gồm nhiệt điện than, nhiệt điện kết hợp, điện gió, thủy điện, điện hạt nhân, cũng như các thiết bị như nồi hơi điện và nồi hơi than. Trên cơ sở đó, một mô hình tối ưu hóa vận hành hệ thống năng lượng tích hợp điện-nhiệt được thiết lập, có tính đến các ràng buộc mạng lưới nhiệt và quá trình đóng/mở tổ máy nhiệt điện than. Thông qua các phân tích tình huống thực nghiệm, nghiên cứu đã xác minh tác động tích cực của vận hành phối hợp điện-nhiệt trong việc thúc đẩy tiêu thụ điện gió, đồng thời đánh giá ảnh hưởng của các ràng buộc như giới hạn công suất truyền tải, độ trễ truyền tải và tổn thất nhiệt đối với kết quả vận hành của hệ thống.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Hệ thống tích hợp năng lượng điện – nhiệt

Thông thường, sản xuất điện và nhiệt là hai quá trình độc lập, chỉ liên kết qua tổ máy nhiệt điện [7], [8]. Nguyên tắc "nhiệt quyết định điện" khiến hệ thống điện kém linh hoạt, hạn chế khả năng tiếp nhận điện gió. Việc tách biệt ra quyết định giữa hai hệ thống làm giảm tiềm năng tiêu thụ điện gió. Hệ thống tích hợp năng lượng điện - nhiệt (IEHES) kết hợp cả hai hệ thống vào một mô hình ra quyết định chung, giúp tối ưu hóa đồng thời sản xuất điện và nhiệt, mở rộng phạm vi điều chỉnh của tổ máy nhiệt điện, nâng cao khả năng tiêu thụ điện gió và tối ưu hóa hiệu quả kinh tế.

Để khắc phục hạn chế của nguyên tắc "nhiệt quyết định điện", có hai giải pháp chính: (1) Điều chỉnh công suất nhiệt của tổ máy nhiệt điện để giảm phát điện trong các giai đoạn dư thừa điện gió [9]; (2) Tích hợp nguồn nhiệt linh hoạt (nồi hơi điện, bơm nhiệt, bể tích trữ nhiệt) nhằm mở rộng khả năng điều chỉnh công suất [10]. Ngoài ra, cần tối ưu hóa vận hành hệ thống tích hợp, đồng bộ hóa hoạt động của nhiệt điện, thủy điện, điện hạt nhân, bơm tích năng và năng lượng tái tạo. Điều chỉnh linh hoạt chế độ vận hành nhiệt điện, khai thác hiệu quả thủy điện và bơm tích năng sẽ giúp gia tăng khả năng tiêu thụ điện gió, tối ưu hóa hiệu suất hệ thống.

2.2. Mô hình mạng lưới nhiệt

2.2.1. Mô tả

Hệ thống nhiệt gồm ba thành phần chính: nguồn nhiệt, mạng lưới nhiệt và hộ tiêu thụ nhiệt. Mạng lưới nhiệt kết nối các nguồn với hộ tiêu thụ, vận chuyển nhiệt thông qua môi chất (thường là nước nóng hoặc hơi nước), trong đó mạng nước nóng phổ biến trên thế giới. Hệ thống gồm hai cấp: cấp một và cấp hai, liên kết qua trạm trao đổi nhiệt. Mạng cấp một nhận nhiệt từ nguồn qua trạm trao đổi cấp một, phân phối đến trạm trao đổi cấp hai, sau đó cấp nhiệt cho hộ tiêu thụ, môi chất làm lạnh quay về đường hồi lưu.

Mạng nhiệt có thể được mô hình hóa như một mạng dòng chất lỏng [11], với các đường ống là nhánh, nguồn nhiệt, trạm trao đổi và điểm kết nối là nút, tạo thành đồ thị có hướng. Nghiên cứu này tập trung vào mô hình mạng cấp một, áp dụng phương pháp mô tả mạng lưới từ phân tích hệ thống điện, kết hợp cân bằng thủy lực và nhiệt. Mô hình đề xuất phù hợp cho phân tích hệ thống tích hợp điện - nhiệt.

2.2.2. Phương pháp mô tả cấu trúc mạng lưới nhiệt

Như đã đề cập ở phần trước, cấu trúc mạng lưới nhiệt có thể được biểu diễn dưới dạng một đồ thị có hướng. Đồ thị có hướng $G(V,E)$ gồm n nút (node) và m đường ống (branch). Trong đó: V là tập hợp các nút của mạng lưới nhiệt; E là tập hợp các đường ống trong mạng lưới nhiệt. Mỗi phần tử trong tập E được biểu diễn bằng một cặp có thứ tự gồm hai phần tử thuộc tập V . Ví dụ, một đường ống $E_k = (e_1, e_2)$ có nghĩa là đường ống k nối từ nút e_1 đến nút e_2 , thể hiện hướng dòng chảy nhiệt trong mạng lưới.

1/ *Ma trận liên kết*: Ma trận liên kết A của đồ thị có hướng $G(V,E)$ được định nghĩa theo phương pháp tham khảo từ tài liệu [12]. Trong đó: Mỗi hàng của A đại diện cho một nút (node) trong mạng lưới nhiệt; Mỗi cột của A đại diện cho một đường ống (branch) trong mạng lưới nhiệt.

Phần tử a_{ik} trong A mô tả mối quan hệ giữa nút i và đường ống k : $a_{ik} = 1$ nếu nút i là điểm xuất phát của đường ống k ; $a_{ik} = -1$ nếu nút i là điểm kết thúc của đường ống k .

Dựa trên định nghĩa của ma trận liên kết A , có thể tách A thành hai ma trận con: Ma trận liên kết điểm đầu A_1 , biểu thị nút có phải là điểm đầu của đường ống hay không; Ma trận liên kết điểm cuối A_2 , biểu thị nút có phải là điểm cuối của đường ống hay không. Ma trận A_1, A_2 được định nghĩa như sau:

$$A_1 = (a_{zk})_{n \times m} \in \{0, 1\}^{n \times m} \quad (1) \quad a_{zk} = \begin{cases} 1, & (z, c) = E_k \\ 0 & \# \end{cases} \quad (2)$$

$$A_2 = (a_{zk})_{n \times m} \in \{0, -1\}^{n \times m} \quad (3) \quad a_{zk} = \begin{cases} -1, & (c, z) = E_k \\ 0 & \# \end{cases} \quad (4)$$

2/ *Ma trận vòng cơ bản*: Gọi L là tập hợp các vòng đơn giản của đồ thị có hướng $G(V,E)$ với tổng số p vòng. Khi đó, ma trận vòng cơ bản B của đồ thị $G(V,E)$ được định nghĩa theo phương pháp tham khảo từ tài liệu [12]. Trong ma trận vòng cơ bản B , mỗi phần tử b_{hk} mô tả mối quan hệ giữa vòng L_h ($L_h \in L, h = 1, 2, \dots, p$) và đường ống k , cụ thể $b_{hk} = 1$ nếu hướng của vòng L_h trùng với hướng của đường ống k ; $b_{hk} = -1$ nếu ngược lại.

2.3. Phương pháp mô tả cấu trúc mạng lưới nhiệt

2.3.1. Phương pháp mô hình hóa mạng lưới hệ thống nhiệt

Mô hình hóa mạng nhiệt dựa trên đặc tính của các nhánh (đường ống) và các định luật cơ bản của mạng lưới [13]. Đặc tính nhánh phản ánh sự thay đổi thủy lực, nhiệt động theo tính chất đường ống, nhiệt độ môi chất và môi trường. Trong khi đó, định luật mạng lưới phụ thuộc vào cấu trúc liên kết, không bị ảnh hưởng bởi đặc tính nhánh. Mô tả mạng nhiệt cần xem xét cả thủy lực và nhiệt động để thiết lập các phương trình đặc tính và cân bằng hệ thống.

2.3.2. Phương trình thủy lực

(1) *Phương trình đặc tính thủy lực của nhánh*: Dựa trên phương pháp tính toán truyền thống của hệ thống nhiệt, nếu bỏ qua ảnh hưởng của sự rò rỉ trong đường ống cấp nhiệt, tổn thất áp suất nước trong đường ống nhiệt ΔL có thể được tính bằng công thức (5) [14]:

$$\begin{cases} \Delta h = R(l + l_d) = sG^2 \\ s = 6.88 \times 10^{-9} \frac{f^{0.25}}{d^{5.25}} (l + l_d) \rho \end{cases} \quad (5) \quad \begin{cases} AG = G_0 \\ B \cdot \Delta H = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Trong đó: R – Tổn thất dọc theo đường ống (hệ số ma sát riêng), đơn vị: Pa/m; l – Chiều dài đoạn ống, đơn vị: m; l_d – Chiều dài tương đương của tổn thất cục bộ, đơn vị: m; G – Lưu lượng dòng chảy trong đường ống, đơn vị: m³/h; s – Hệ số đặc trưng của tổn thất đường ống; f – Độ nhám tuyệt đối của thành ống, đơn vị: mm; d – Đường kính trong của ống, đơn vị: m; ρ – Khối lượng riêng của môi chất, đơn vị: kg/m³.

(2) *Phương trình cân bằng thủy lực*: Cân bằng thủy lực trong hệ thống nhiệt tuân theo định luật Kirchhoff [15] theo công thức (6). Trong đó: A và B lần lượt là ma trận liên kết và ma trận chu trình cơ bản của mạng lưới nhiệt; G là vector lưu lượng dòng chảy trong các đường ống; G_0 là vector lưu lượng dòng chảy đi vào các nút của mạng lưới; ΔH là vector tổn thất áp suất nước trong các đường ống.

2.3.3. Phương trình nhiệt lực học

(1) *Phương trình đặc tính của nhánh nhiệt lực*

Đối với đường ống k , định nghĩa lưu lượng nhiệt đầu vào và đầu ra tại thời điểm t như sau [16]:

$$q_{k,t}^{in} = G_{k,t} CT_{k,t}^{in} \quad (7) \quad q_{k,t}^{out} = G_{k,t} CT_{k,t}^{out} \quad (8)$$

Xét đến độ trễ truyền tải $\tau_{k,t}$ của đường ống k tại thời điểm t , ta có mối quan hệ (9), trong đó, độ trễ được xác định bởi phương trình (10):

$$q_{k,t}^{in} - q_{k,t}^{out} = q_{k,t+\tau_{k,t}}^{in} + \varepsilon \quad (9) \quad \tau_{k,t} = \frac{F_k}{G_{k,t}} \quad (10)$$

Các tham số: $G_{k,t}$: Lưu lượng chất môi trung tại thời điểm t qua đường ống k ; C : Nhiệt dung riêng theo thể tích của môi chất; $T_{k,t}^{in}$, $T_{k,t}^{out}$: Nhiệt độ đầu vào và đầu ra tại thời điểm t của đường ống; k ; ε_k : Hệ số tổn thất nhiệt của đường ống k ; F_k : Thông số đặc trưng của đường ống k (phụ thuộc vào chiều dài, diện tích tiết diện, v.v.).

(2) *Phương trình cân bằng mạng nhiệt lực*

Phương trình cân bằng nhiệt lực của mạng được biểu diễn như sau:

$$A_1 Q_t^{in} + A_2 Q_t^{out} = Q_t \quad (11)$$

trong đó, A_1 , A_2 : lần lượt là ma trận liên kết điểm đầu và điểm cuối của mạng nhiệt lực (xác định mối liên hệ giữa các nút đầu vào và các đường ống); Q_t^{in} , Q_t^{out} : lần lượt là Vector lưu lượng nhiệt đầu vào và đầu ra của các đường ống tại thời điểm t ; Q_t : Vector lưu lượng nhiệt tại các nút thời điểm t tuân theo quy ước: lưu lượng đầu vào tại nút nguồn nhiệt là dương (nhiệt cung cấp vào mạng) và tại nút tải nhiệt là âm (nhiệt tiêu thụ khỏi mạng).

2.4. Mô hình tối ưu hóa vận hành hệ thống tích hợp năng lượng điện - nhiệt dưới ràng buộc của mạng nhiệt

Mô hình tối ưu hóa vận hành hệ thống điện - nhiệt sử dụng các biến quyết định gồm: công suất phát từng giờ của các nguồn năng lượng và trạng thái khởi động/tắt máy của tổ máy nhiệt điện. Mục tiêu là giảm tổng chi phí vận hành và lượng điện gió bị cắt giảm, đồng thời đảm bảo tuân thủ các ràng buộc về cân bằng công suất, cân bằng nhiệt, ràng buộc mạng điện - nhiệt và đặc tính vận hành của các nguồn phát.

2.4.1. Hàm mục tiêu

Mô hình tối ưu hóa nhằm tối thiểu hóa tổng chi phí vận hành của hệ thống tích hợp năng lượng điện - nhiệt, đồng thời xem xét lượng điện gió bị cắt giảm dưới dạng hệ số phạt trong hàm mục tiêu. Hàm mục tiêu được biểu diễn như sau:

$$\min \left(\sum_{t=1}^N \sum_{i=1}^{N_{tp}} f_i^{tp}(P_{i,t}^{tp}) + \sum_{t=1}^N \sum_{i=1}^{N_{chp}} f_i^{chp}(P_{i,t}^{chp}, +Q_{i,t}^{chp}) + \sum_{t=1}^N \sum_{i=1}^{N_{hp}} f_i^{hp}(Q_{i,t}^{hp}) + \sum_{t=1}^N \sum_{i=1}^{N_{tp}} (S_{i,t}^U + S_{i,t}^D) + C_W \right) \quad (12)$$

Trong đó: N : Tổng số khoảng thời gian trong chu kỳ tối ưu hóa; N_{tp} , N_{chp} , N_{hp} : lần lượt là số lượng tổ máy nhiệt điện, nhiệt - điện kết hợp (CHP) và lò hơi than tương ứng. Các thành phần chi phí vận hành bao gồm: $f_i^{tp}(P_{i,t}^{tp})$ của tổ máy nhiệt điện thứ i tại thời điểm t (hàm bậc hai theo công suất phát); $f_i^{chp}(P_{i,t}^{chp}, +Q_{i,t}^{chp})$ của tổ máy CHP thứ i phụ thuộc vào công suất phát điện và nhiệt; $f_i^{hp}(Q_{i,t}^{hp})$ của lò hơi than thứ i theo lượng nhiệt cung cấp. Chi phí khởi động/tắt máy: $S_{i,t}^U$, $S_{i,t}^D$ lần lượt là chi phí khởi động và tắt máy của tổ máy nhiệt điện thứ i tại thời điểm t . Chi phí phạt điện gió bị cắt giảm:

$$C_W = \sum_{t=1}^N \sum_{i=1}^{N_w} \phi \cdot (P_{i,t}^{\omega, \max} - P_{i,t}^{\omega}) \quad (13)$$

Trong đó, N_w : Số lượng trang trại điện gió; $P_{i,t}^{\omega, \max}$: Công suất phát tối đa của trang trại gió thứ i tại thời điểm t ; $P_{i,t}^{\omega}$: Công suất phát thực tế tại thời điểm t ; ϕ : Hệ số phạt cho mỗi đơn vị điện gió bị cắt giảm.

2.4.2. Các ràng buộc

Ngoài các ràng buộc của mạng nhiệt, còn có các ràng buộc giữa hệ thống điện và nhiệt như ràng buộc tổ máy, công suất nguồn nhiệt, cân bằng công suất tác dụng và dòng công suất.

(1) *Ràng buộc tổ máy nhiệt điện*: Các tổ máy nhiệt điện kết hợp gồm loại hơi đối áp và hơi trích. Vùng vận hành của tổ máy thứ i được mô tả bằng N_i bất đẳng thức tuyến tính theo công thức toán (14). Trong đó, các hệ số $\alpha_1 \sim \alpha_{Ni}$, $\beta_1 \sim \beta_{Ni}$, $\gamma_1 \sim \gamma_{Ni}$ lần lượt là các hệ số của các bất đẳng thức ràng buộc vùng vận hành của tổ máy nhiệt điện thứ i .

$$\begin{cases} \alpha_1 P_{i,t}^{chp} + \beta_1 Q_{i,t}^{chp} \leq \gamma_1 \\ \alpha_2 P_{i,t}^{chp} + \beta_2 Q_{i,t}^{chp} \leq \gamma_2 \\ \dots \\ \alpha_{Ni} P_{i,t}^{chp} + \beta_{Ni} Q_{i,t}^{chp} \leq \gamma_{Ni} \end{cases} \quad (14) \quad \begin{cases} 0 \leq P_{i,t}^{eb} \leq \bar{P}_i^{eb} \\ Q_{i,t}^{eb} = \eta_i P_{i,t}^{eb} \end{cases} \quad (15)$$

(2) *Ràng buộc điện trở nhiệt (điện boiler)*: Điện boiler thường sử dụng bộ gia nhiệt điện trở hiệu suất cao với hiệu suất chuyển đổi điện-nhiệt gần bằng 1. Do đó, công suất đầu ra của điện boiler được ràng buộc như công thức toán (15). Trong đó, $P_{i,t}^{eb}$, $Q_{i,t}^{eb}$ lần lượt là công suất tiêu thụ điện và công suất nhiệt cung cấp của điện boiler thứ i tại thời điểm t ; $\bar{P}_i^{eb}$ là công suất điện định mức của điện boiler thứ i ; η_i là hiệu suất sinh nhiệt của điện boiler thứ i .

(3) *Ràng buộc của lò hơi đốt than*: Lò hơi đốt than chỉ cần thỏa mãn ràng buộc về công suất cung cấp nhiệt, tức là:

$$0 \leq Q_{i,t}^{hb} \leq \bar{Q}_{i,t}^{hb} \quad (16)$$

Trong đó $Q_{i,t}^{hb}$ là công suất nhiệt cung cấp của lò hơi đốt than thứ i tại thời điểm t ; $\bar{Q}_{i,t}^{hb}$ là công suất nhiệt định mức của lò hơi đốt than thứ i .

(4) *Ràng buộc mạng lưới điện bao gồm*:

$$\sum_{i=1}^{N_{tp}} P_{i,t}^{tp} + \sum_{i=1}^{N_{chp}} P_{i,t}^{chp} + \sum_{i=1}^{N_w} P_{i,t}^W + \sum_{i=1}^{N_{np}} P_{i,t}^{np} + \sum_{i=1}^{N_{hp}} P_{i,t}^{hp} - \sum_{i=1}^{N_{eb}} P_{i,t}^{eb} = P_t \quad (17) \quad P_{-j}^{line} \leq P_{j,t}^{line} \leq \bar{P}_j^{line} \quad (18)$$

Ràng buộc cân bằng công suất tác dụng được giới thiệu ở phương trình toán (17), trong đó: $P_{i,t}$ là tổng phụ tải của hệ thống tại thời điểm t ; N_{np} , N_{hp} , N_{eb} lần lượt là số lượng tổ máy điện hạt nhân, thủy điện và nồi hơi điện. Ràng buộc dòng công suất theo phương trình (18), trong đó P_{-j}^{line} , $\bar{P}_j^{line}$ lần lượt là giới hạn dưới và giới hạn trên của dòng công suất trên nhánh j . $P_{j,t}^{line}$ là dòng công suất trên nhánh j tại thời điểm t . Trong bài báo này, mô hình dòng công suất được sử dụng là mô hình dòng công suất DC.

(5) *Ràng buộc mạng lưới nhiệt*: Mạng lưới nhiệt sử dụng phương pháp điều chỉnh chất lượng để điều tiết, và các ràng buộc của nó phải thỏa mãn các điều kiện từ phương trình (7) đến (11).

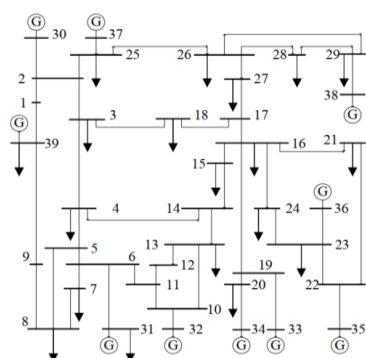
Sau khi thực hiện phân đoạn tuyến tính hàm chi phí của các tổ máy nhiệt điện, tổ máy nhiệt – điện kết hợp và lò hơi đốt than, bài toán tối ưu hóa được chuyển đổi thành một bài toán quy hoạch nguyên nhị phân (0-1). Với dạng bài toán này, có thể sử dụng bộ giải CPLEX trong môi trường MATLAB để tìm ra nghiệm tối ưu một cách hiệu quả.

3. Kết quả tính toán

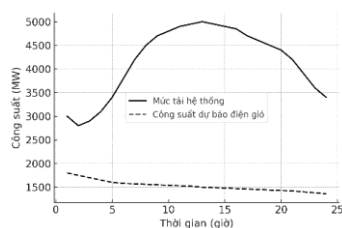
3.1. Mô hình hệ thống

3.1.1. Hệ thống điện

Hệ thống IEEE-39 nút được giới thiệu như Hình 1, với các nút 30~39 là nút nguồn. Loại nguồn và công suất tại các nút này được điều chỉnh theo Bảng 1. Hệ thống gồm ba trạm trại điện gió sử dụng đường cong công suất điện hình theo ngày, và các nhà máy nhiệt điện đều là tổ máy trích hơi. Mức tải và dự báo công suất điện gió được thể hiện trong Hình 2.



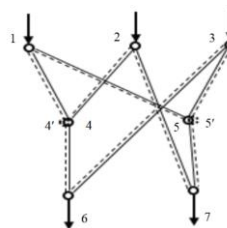
Hình 1. Hệ thống 39 node - IEEE



Hình 2. Mức tải và dự báo công suất điện gió

Bảng 1. Thông số hệ thống điện

Node	Loại hình	Công suất/ MW
30	Thủy điện	125x2
31	Hạt nhân	1000
32	Điện gió 1	800
33	Nhiệt điện 1	500x2
34	Nhiệt – điện 1	250x4
35	Điện gió 2	800
36	Nhiệt – điện 2	250x4
37	Điện gió 3	800
38	Thủy điện 2	125x2
39	Nhiệt điện 2	500x2

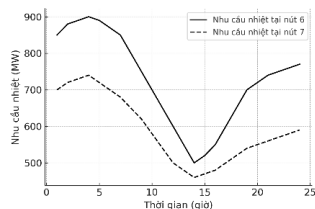


Hình 3. Cấu trúc liên kết của hệ thống cung cấp nhiệt

3.1.2. Hệ thống nhiệt

Hệ thống nhiệt có cấu trúc như Hình 3, gồm: Nút nhiệt 1, 2: Nhà máy nhiệt điện (tương ứng nút điện 34, 36); Nút nhiệt 3: Lò hơi đốt than; Nút nhiệt 6, 7: Nút tải nhiệt. Đường liên nét là ống cấp nước nóng, đường nét đứt là ống hồi nước. Hệ thống sử dụng phương pháp điều chỉnh chất lượng. Thông số được giới thiệu trong Hình 4 và Bảng 2. Trong bài toán này, nhiệt độ chất công

tác trong đường ống cấp nước dao động từ 90 °C đến 140 °C, còn trong đường ống hồi nước dao động từ 60 °C đến 80 °C. Lưu lượng chất công tác trong đường ống cấp và hồi nước nằm trong khoảng 3000 t/h đến 8000 t/h.



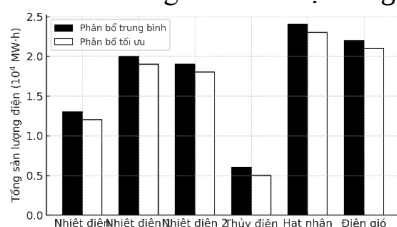
Hình 4. Nhu cầu nhiệt tại node 6, 7

Bảng 2. Công suất nhiệt định mức của các nguồn nhiệt

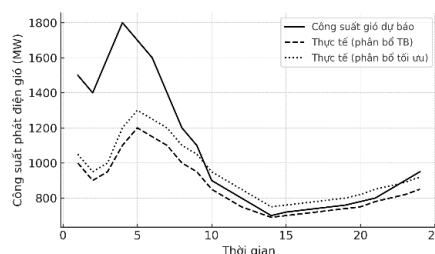
Node	Loại hình	Công suất/ MW
30	Nhà máy điện – nhiệt 1	125x2
31	Nhà máy điện – nhiệt 1	1000
32	Lò hơi đốt than	800

3.2. Ảnh hưởng của vận hành điện - nhiệt đến tiêu thụ điện gió

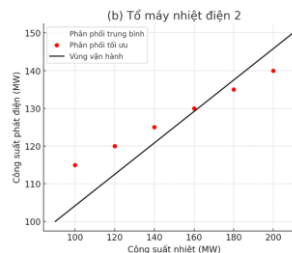
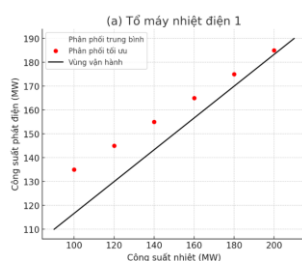
So sánh hai kịch bản: Kịch bản 1: Phân bổ tải nhiệt đều cho tổ máy nhiệt điện; Kịch bản 2: Phối hợp vận hành điện - nhiệt, tối ưu phân bổ tải nhiệt. Sản lượng điện phát ra của các nguồn điện trong hai kịch bản được thể hiện trong Hình 5, đơn vị là 10^4 (MW·h). Các loại nguồn điện gồm: nhiệt điện truyền thống, tổ máy nhiệt điện 1, tổ máy nhiệt điện 2, thủy điện, điện hạt nhân, điện gió. Đường cong công suất điện được thể hiện trong Hình 6. So sánh giữa kịch bản 1 và kịch bản 2 cho thấy: khi hệ thống điện và hệ thống nhiệt vận hành phối hợp, tức là khi tải nhiệt được phân phối tối ưu, thì lượng điện gió bị loại bỏ (bị thừa, không sử dụng được) thấp hơn so với khi phân phối tải nhiệt trung bình. Điều này cho thấy việc áp dụng phương thức vận hành phối hợp đã giúp tối ưu hóa hoạt động của hệ thống điện, nâng cao mức độ tiêu thụ điện gió, giảm tỷ lệ loại bỏ điện gió. Có thể thấy rằng, không gian tiêu thụ điện gió này có thể được khai thác thông qua việc thay đổi phương thức vận hành của hệ thống tích hợp điện – nhiệt mà không cần tăng chi phí đầu tư bổ sung cho toàn hệ thống.



Hình 5. Sản lượng điện phát từ các nguồn trong hai kịch bản



Hình 6. Công suất điện gió

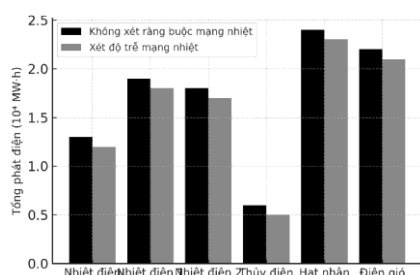


Hình 7. Phân tích điểm vận hành của tổ máy nhiệt điện trong giai đoạn bỏ điện gió dưới hai kịch bản

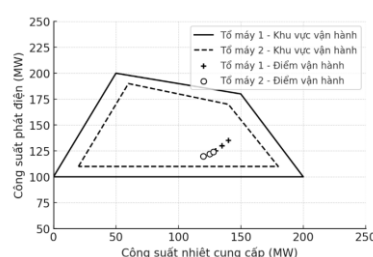
Hai phương thức phân phối nhiệt tải khác nhau làm thay đổi điểm vận hành của các tổ máy nhiệt điện, dẫn đến sự khác biệt về lượng điện gió bị cắt giảm. Hình 7 cho thấy điểm vận hành của các tổ máy trong khoảng thời gian cắt giảm điện gió (1–8 giờ). Kết quả ở Hình 8 chỉ ra rằng khi tối ưu hóa phân phối nhiệt tải, tổ máy nhiệt điện 1 đảm nhận nhiều hơn cả công suất nhiệt và điện, trong khi tổ máy nhiệt điện 2 duy trì ở mức tối thiểu. Nguyên nhân là do tổ máy 2 có đường đặc tính áp suất hơi cao hơn tổ máy 1, khiến công suất phát cao hơn ở cùng mức nhiệt tải, hạn

chế khả năng tiếp nhận điện gió. Do đó, việc tối ưu hóa giúp giảm công suất tổ máy 2 và tăng công suất tổ máy 1, tăng khả năng của hệ thống điện trong việc tiếp nhận và sử dụng điện gió mà không gây quá tải cho các tổ máy phát điện khác.

Đối với tổ máy nhiệt điện 1, khi cung cấp cùng một công suất nhiệt, công suất phát điện của nó cao hơn, hạn chế khả năng tiếp nhận điện gió trong giai đoạn bị cắt giảm. Do đó, kết quả tối ưu sẽ cố gắng giảm mức phát điện của tổ máy nhiệt điện 2, đồng thời tăng mức phát điện của tổ máy nhiệt điện 1, từ đó tạo thêm không gian tiêu thụ điện gió.



Hình 8. Sản lượng điện trong hai kịch bản



Hình 9. Phân tích điểm vận hành của tổ máy nhiệt điện trong giai đoạn cắt giảm điện gió khi có giới hạn về khả năng truyền tải

3.3. Ảnh hưởng của ràng buộc mạng nhiệt đến vận hành hệ thống và tiêu thụ điện gió

3.3.1. Thiết lập kịch bản

Nghiên cứu ảnh hưởng của ràng buộc mạng nhiệt đến hệ thống điện - nhiệt qua 4 kịch bản: (1) Không ràng buộc: Kịch bản 1: Không xét đến ràng buộc mạng nhiệt, hệ thống điện và hệ thống nhiệt vận hành phối hợp; Kịch bản 2: Xét ảnh hưởng của giới hạn công suất truyền tải trong mạng nhiệt, hệ thống điện và hệ thống nhiệt vận hành phối hợp (giới hạn công suất truyền tải của mỗi đường ống nối với nguồn nhiệt giảm 200 MW); Kịch bản 3: Xét ảnh hưởng của độ trễ trong truyền tải của mạng nhiệt, hệ thống điện và hệ thống nhiệt vận hành phối hợp (độ trễ của mỗi đường ống đặt là 1 giờ); Kịch bản 4: Xét ảnh hưởng của tổn hao trong truyền tải của mạng nhiệt, hệ thống điện và hệ thống nhiệt vận hành phối hợp (tổn hao của mỗi đường ống đặt là 5%). Phân tích so sánh các kịch bản để đánh giá tác động của từng yếu tố đến vận hành hệ thống.

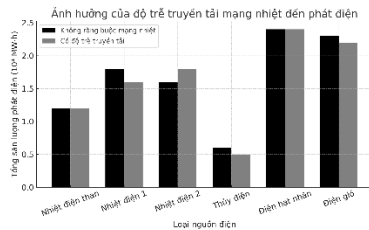
3.3.2. Ảnh hưởng của giới hạn công suất truyền tải mạng nhiệt đến kết quả vận hành

So sánh giữa Kịch bản 1 và Kịch bản 2 để phân tích tác động của giới hạn công suất truyền tải mạng nhiệt đối với hệ thống điện - nhiệt. Sản lượng phát điện của từng nguồn trong hai kịch bản được thể hiện trong Hình 8. Kết quả cho thấy, khi xét đến giới hạn công suất truyền tải, sản lượng của Tổ máy nhiệt điện 1 giảm, trong khi Tổ máy nhiệt điện 2 tăng. Tổng lượng điện gió bị cắt giảm cũng tăng lên. Trong các khoảng thời gian có điện gió bị cắt giảm, phạm vi vận hành và điểm vận hành của từng tổ máy nhiệt điện được thể hiện trong Hình 9.

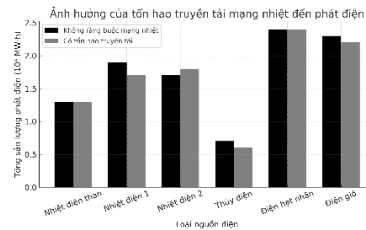
Giới hạn công suất truyền tải làm giảm khả năng cung cấp nhiệt của Tổ máy 1, buộc Tổ máy 2 tăng phát điện, dẫn đến tổng công suất nhiệt điện tăng, giảm không gian tiêu thụ điện gió và tăng lượng điện gió bị cắt giảm. Như vậy, giới hạn này ảnh hưởng đến vận hành hệ thống thông qua điều chỉnh điểm hoạt động của các tổ máy nhiệt điện.

3.3.3. Ảnh hưởng của độ trễ truyền tải mạng nhiệt đến kết quả vận hành

Hình 10 so sánh kịch bản 1 và 3 cho thấy độ trễ truyền tải mạng nhiệt giúp giảm phát điện từ nhiệt điện, tăng sản lượng điện gió và giảm lượng điện gió bị cắt giảm. Cơ chế này liên quan đến thời điểm cắt giảm điện gió và xu hướng nhu cầu nhiệt. Trong trường hợp này, cắt giảm điện gió xảy ra từ giai đoạn 1 đến 8, sau đó nhu cầu nhiệt giảm nhanh. Khi có độ trễ, nhiệt điện cung cấp nhiệt chậm hơn, làm giảm phát điện, mở rộng không gian tiêu thụ điện gió và giảm lượng điện gió bị cắt giảm.



Hình 10. Sản lượng phát điện trong hai kịch bản 1 và kịch bản 3



Hình 11. Sản lượng phát điện trong hai kịch bản 2 và kịch bản 4

3.3.4. Ảnh hưởng của tổn hao truyền tải mạng nhiệt đến kết quả vận hành

Hình 11 so sánh kịch bản 1 và 4 cho thấy tổn hao truyền tải mạng nhiệt làm tăng nhu cầu tải nhiệt, buộc nhiệt điện phải phát nhiều hơn, thu hẹp không gian tiêu thụ điện gió và tăng lượng điện gió bị cắt giảm. Ngoài ra, ngay cả khi không có cắt giảm điện gió ban đầu, công suất phát nhiệt điện tăng có thể gây ra tình trạng cắt giảm mới. Do đó, các ràng buộc mạng nhiệt như giới hạn công suất, độ trễ và tổn hao cần được xem xét kỹ trong tối ưu vận hành hệ thống điện - nhiệt. Kết quả mang tính đại diện cao do sử dụng dữ liệu điển hình mùa đông.

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã xây dựng và phát triển mô hình tối ưu vận hành hệ thống điện - nhiệt, hướng đến việc thúc đẩy tiêu thụ điện gió trong hệ thống năng lượng. Cụ thể, nghiên cứu đã chuyển từ mô hình "lấy nhiệt quyết định điện" sang một phương thức vận hành tối ưu kết hợp cả hệ thống điện và nhiệt, với các ràng buộc như độ trễ, tổn hao và giới hạn công suất truyền tải nhiệt. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng, việc vận hành phối hợp giữa các tổ máy nhiệt điện giúp tăng khả năng điều tiết hệ thống, mở rộng không gian tiêu thụ điện gió và giảm thiểu lượng điện gió bị cắt giảm.

Đóng góp chính của nghiên cứu là cung cấp một phương pháp tối ưu hóa vận hành hệ thống điện - nhiệt nhằm hỗ trợ việc tích hợp hiệu quả điện gió vào lưới điện, từ đó nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng tái tạo. Hướng nghiên cứu tiếp theo sẽ mở rộng mô hình này để tích hợp thêm các nguồn năng lượng tái tạo khác, cải thiện các thuật toán tối ưu hóa nhằm nâng cao tính linh hoạt của hệ thống, và đồng thời nghiên cứu tác động của giá điện và các chính sách điều tiết năng lượng trong bối cảnh thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] Reuters, "Global wind power set to grab record share of electricity market," Oct. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.reuters.com/business/energy/global-wind-power-set-grab-record-share-electricity-market-maguire-2024-10-24/>. [Accessed Mar. 6, 2025].
- [2] M. M. R. Ahmed *et al.*, "Mitigating Uncertainty Problems of Renewable Energy Resources Through Efficient Integration of Hybrid Solar PV/Wind Systems Into Power Networks," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 30311-30328, 2024.
- [3] E. A. Etukudoh *et al.*, "Electrical engineering in renewable energy systems: a review of design and integration challenges," *Engineering Science & Technology Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 231-244, 2024.
- [4] H. Ibrahim *et al.*, "Integration of wind energy into electricity systems: Technical challenges and actual solutions," *Energy Procedia*, vol. 6, pp. 815-824, 2011.
- [5] X. Li *et al.*, "Operation optimization of electrical-heating integrated energy system based on concentrating solar power plant hybridized with combined heat and power plant," *Journal of Cleaner Production*, vol. 289, 2021, Art. no. 125712.
- [6] G. Fambri *et al.*, "Power-to-heat plants in district heating and electricity distribution systems: A techno-economic analysis," *Energy Conversion and Management*, vol. 276, 2023, Art. no. 116543.
- [7] J. Chen *et al.*, "Multi-objective optimization for the operation of district heating systems considering flexibility and economy," *Applied Thermal Engineering*, vol. 263, 2025, Art. no. 125395.

-
- [8] E. Thorin, H. Brand, and C. Weber, "Long-term optimization of cogeneration systems in a competitive market environment," *Applied Energy*, vol. 81, no. 2, pp. 152-169, 2005.
- [9] L. Fu and Y. Jiang, "Optimal operation of back-pressure units for space heating," *Proceedings of the CSEE*, vol. 20, no. 3, pp. 80-83, 2000.
- [10] F. Xu, Y. Min, L. Chen, *et al.*, "Combined electricity-heat operation system containing large capacity thermal energy storage," *Proceedings of the CSEE*, vol. 34, no. 29, pp. 5063-5072, 2014.
- [11] Y. Zhang, J. Cai, and R. Liu, "Calculation and analysis of energy storage in heat supply nets of distributed energy," *Energy Conversion and Management*, vol. 229, 2021, Art. no. 113776.
- [12] J. Xie, W. Xing, and Z. Wang, *Network optimization*, Beijing: Tsinghua University Press, 2000, pp. 3-11.
- [13] T. A. N. Libin, Y. U. A. N. Yuejin, and H. U. A. N. G. Can, "Numerical simulation and optimization analysis of flow field for a generator unit," *Journal of Xihua University (Natural Science Edition)*, vol. 40, no. 1, pp. 69-74, 2021.
- [14] Z. Shi, *Operation adjustment and control of heating system*, Beijing: Tsinghua University Press, 1994, pp. 50-51.