

A STUDY ON THE INFLUENCE OF ENERGY PRICE ELASTICITY OF DEMAND ON OPTIMAL OPERATION OF ENERGY HUB

Ha Thanh Tung^{1*}, Pham Thi Hong Anh²

¹TNU - University of Technology, ²TNU - University of Information and Communication Technology

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	18/3/2023	The energy market plays an important role in the optimal operation of an energy hub (EH) model. Using energy prices as a controllable resource is expected to further encourage optimization of the integration among various forms of energy, such as electricity and natural gas, within the energy center. This paper proposes a generalized linear modeling method for the energy balance equation of EH considering the price elasticity of demand. With the goal of maximizing EH revenue, the optimal operation problem is established based on energy price control and solved using the GAMS (CPLEX) programming language. To determine the effectiveness of the proposed modeling method and analyze the impact of energy prices on regulation (considering different price elasticities on adjusted results), the model is tested through calculations applied within the scope of a very small energy network. The results show that maximizing the profit of EH by fully utilizing the price flexibility of the load is beneficial for reducing the variance and peak-to-valley difference of the load and can lead to further optimization potential of this model.
Revised:	23/5/2023	
Published:	23/5/2023	
KEYWORDS		
Integrated energy system		
Price elasticity of demand		
Energy hub		
GAMS		
Optimal operation		

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA ĐỘ CO GIÃN NHU CẦU TẢI THEO GIÁ NĂNG LƯỢNG ĐẾN VẬN HÀNH TỐI ƯU TRUNG TÂM NĂNG LƯỢNG

Hà Thanh Tùng^{1*}, Phạm Thị Hồng Anh²

¹Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp – ĐH Thái Nguyên

²Trường Đại học Công nghệ Thông tin và Truyền thông – ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	18/3/2023	Thị trường năng lượng đóng vai trò quan trọng trong việc vận hành tối ưu mô hình trung tâm năng lượng (Energy hub – EH). Sử dụng giá năng lượng như một tài nguyên có thể kiểm soát được kỳ vọng sẽ thúc đẩy tối ưu hóa quá trình tích hợp các dạng năng lượng như điện, khí tự nhiên,... trong EH. Bài báo này đề xuất phương pháp mô hình hóa tuyến tính tổng quát cho phương trình cân bằng năng lượng của EH có xét đến độ co giãn nhu cầu tải theo giá năng lượng. Với mục tiêu tối đa hóa doanh thu của EH, bài toán vận hành tối ưu được thiết lập trên cơ sở kiểm soát giá năng lượng và giải quyết thông qua ngôn ngữ lập trình GAMS (CPLEX). Để xác minh tính hiệu quả của phương pháp mô hình hóa được đề xuất và phân tích tác động của giá năng lượng đến việc điều tiết (xem xét độ co giãn giá khác nhau đến kết quả điều chỉnh), mô hình được kiểm chứng thông qua tính toán áp dụng trong phạm vi mạng lưới năng lượng siêu nhỏ. Kết quả cho thấy, tối đa hóa lợi nhuận của EH tận dụng đầy đủ tính linh hoạt giá của tải có lợi cho việc giảm phương sai và chênh lệch đỉnh thấp của tải, đồng thời có thể khai thác sâu hơn tiềm năng tối ưu của mô hình này.
Ngày hoàn thiện:	23/5/2023	
Ngày đăng:	23/5/2023	
TỪ KHÓA		
Hệ thống năng lượng tích hợp		
Co giãn theo giá		
Trung tâm năng lượng		
GAMS		
Vận hành tối ưu		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.7548>

* Corresponding author. Email: tunganh@tnut.edu.vn

1. Giới thiệu

Ngày nay, mô hình hệ thống năng lượng (NL) được quan tâm đặc biệt thông qua việc phát triển các giải pháp nhằm tăng cường khả năng khai thác và ứng dụng các dạng nguồn phân tán, tăng cường quản lý dựa trên nhu cầu phụ tải [1], [2]. Trong bối cảnh đó, việc thay đổi phương thức vận hành, thiết kế các hệ thống quản trị NL độc lập, thực hiện thị trường hóa và xây dựng mô hình hệ thống NL tích hợp (Integrated Energy System, IES) đã trở thành xu thế và thu hút được sự quan tâm của các nhà nghiên cứu [3], [4].

IES có thể được coi là sự kết nối của các mạng lưới NL (điện, nhiệt, khí tự nhiên...) thông qua các trung tâm NL (Energy hub – EH). Trong đó, EH thực hiện các liên kết giữa sản xuất, truyền tải, phân phối và sử dụng NL bởi các bộ chuyển đổi khác nhau [5]. EH có khả năng ứng dụng trong nhiều lĩnh vực, bao gồm hệ thống phân phối điện, mạng lưới NL siêu nhỏ, khu công nghiệp và tòa nhà thông minh... [6], trở thành điểm nóng nghiên cứu trong thời gian gần đây.

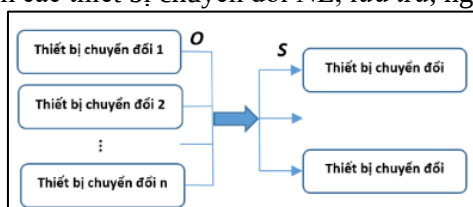
Dưới góc độ vận hành tối ưu, Bahrami và Safe [7] đã xây dựng mô hình EH giải quyết vấn đề cung cấp tối ưu NL điện, nhiệt cho bệnh viện, khách sạn và khu dân cư; Gils và cộng sự [8] đã thiết lập một mô hình với các biến nhị phân 0-1 để xác định cấu trúc tối ưu của thiết bị trong EH; Li và Nahaei [9] thiết lập mô hình EH bổ sung hệ thống cấp lạnh để giảm thiểu chi phí tiêu thụ NL; Mancarella và Chicco [10] tiến hành phân tích về tính linh hoạt của thiết bị trong EH để đáp ứng nhu cầu và tính đa dạng của phụ tải; Pazouki và cộng sự [11] xem xét sự tham gia của các dạng NL mới, xe điện và các yếu tố khác trong mô hình EH có tính đến yếu tố ngẫu nhiên trong bài toán vận hành tối ưu NL. Mặc dù có nhiều nghiên cứu về mô hình này, tuy nhiên vẫn còn tồn tại một số vấn đề sau: 1/ Phương pháp mô hình hóa EH chủ yếu được sử dụng để mô tả phương trình cân bằng công suất của các dạng NL. Tuy nhiên, hầu hết các tài liệu đều tiến hành phân tích và mô hình hóa theo cấu trúc riêng, chưa đưa ra được phương pháp mô hình hóa tổng quát. 2/ Về phương diện vận hành tối ưu mô hình EH, mặc dù đã có một số tài liệu xem xét khả năng đáp ứng nhu cầu phụ tải, tuy nhiên chủ yếu xét cho tải tĩnh tiến, tải điều khiển và các yếu tố khác [10], [12]. Bên cạnh đó, các đặc điểm về giá NL vẫn chưa được phản ánh rõ ràng trong những nghiên cứu này. Trong tình hình mới về thị trường NL [13], giá NL được chia sẻ theo thời gian thực và đang trở thành một nguồn lực kiểm soát trong quá trình ra quyết định vận hành của hệ thống.

Tên cơ sở đó, dựa trên ma trận mô tả quan hệ kết nối của từng thiết bị trong EH, bài báo này đề xuất phương pháp mô hình hóa tổng quát cho phương trình cân bằng công suất EH dưới dạng biểu thức tuyến tính của các biến được thu được. Sau đó, xem xét độ co giãn theo giá của nhu cầu đối với tải NL để đề xuất một mô hình tuyến tính hóa từng phần. Bài toán vận hành tối ưu EH được thiết lập trên cơ sở kiểm soát bởi giá NL. Cuối cùng, mô hình được kiểm chứng thông qua tính toán áp dụng trong phạm vi mô hình mạng lưới NL siêu nhỏ.

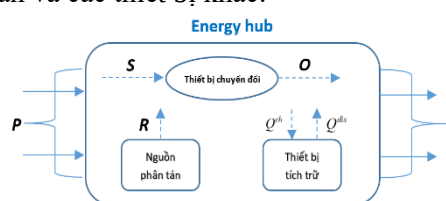
2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Mô hình và phương trình cân bằng công suất EH

Cấu trúc EH được mô tả như một điểm node kết nối NL đầu vào P và NL đầu ra L (Hình 1) [8]. Trong đó, NL đầu vào $P = [P_1, P_2, \dots, P_m]$; NL đầu ra (tải của EH) $L = [L_1, L_2, \dots, L_n]$. EH bao gồm các thiết bị chuyển đổi NL, lưu trữ, nguồn phân tán và các thiết bị khác.



Hình 1. Cấu trúc EH



Hình 2. Kết cấu các thiết bị chuyển đổi

Thông số các thiết bị chuyển đổi gồm công suất đầu ra $\mathbf{O} = [O_1, O_2, \dots, O_i, \dots, O_I]$ và đầu vào $\mathbf{S} = [S_1, S_2, \dots, S_j, \dots, S_J]$. I và J lần lượt là tổng số thiết bị chuyển đổi. Q_{ch} , và Q_{dis} lần lượt là NL nạp và xả của các thiết bị tích trữ. Mối quan hệ giữa $\mathbf{O}$ và $\mathbf{S}$ được thể hiện qua công thức (1):

$$\mathbf{O} = \boldsymbol{\eta} \mathbf{S} \quad (1) \quad \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{L} \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} \mathbf{O} \\ \mathbf{S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{PO} & \mathbf{C}_{PS} \\ \mathbf{C}_{LO} & \mathbf{C}_{LS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{O} \\ \mathbf{S} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Trong (1), $\boldsymbol{\eta} = (\eta_{ij})_{I \times J}$ là ma trận có I hàng và J cột, η_{ij} là hiệu suất chuyển đổi [7], [9]. Do có sự tham gia của nguồn phân tán, thiết bị lưu trữ NL $\mathbf{R}$, Q_{ch} , Q_{dis} có thể coi như thông số điều chỉnh cho $\mathbf{P}$, $\mathbf{L}$, $\mathbf{O}$, $\mathbf{S}$. Trên cơ sở đó, mô hình toán học của EH được xây dựng như sau:

1/ Ma trận liên kết $\mathbf{C}$ (2): Ma trận liên kết $\mathbf{C}$ có $M+N$ hàng và $I+J$ cột, miêu tả mối liên hệ giữa NL vào/ra của EH với NL vào/ra của thiết bị chuyển đổi. Trong đó, $\mathbf{C}$ được phân hoạch thành các ma trận con: $\mathbf{C}_{PO} = (c_{mi})_{M \times I}$, $\mathbf{C}_{PS} = (c_{mj})_{M \times J}$, $\mathbf{C}_{LO} = (c_{ni})_{N \times I}$, $\mathbf{C}_{LS} = (c_{nj})_{N \times J}$, các biến số $c_{mi}, c_{mj}, c_{ni}, c_{nj}$ nhận giá trị $[0, 1]$ tùy trạng thái kết nối của thiết bị

2/ Ma trận của thiết bị chuyển đổi NL dạng "chuỗi" $\mathbf{D}$: Thiết bị chuyển đổi NL dạng "chuỗi" được mô tả như Hình 2. Giả sử trong EH có G thiết bị chuyển mạch chuỗi, g là biến đếm của nó ($g=1, 2, \dots, G$), định nghĩa ma trận $\mathbf{D}$ kích thước $G \times (I+J)$ là ma trận của thiết bị chuyển mạch chuỗi với:

$$\mathbf{D} = [\mathbf{D}_O \mid \mathbf{D}_S] \quad (3) \quad \mathbf{D}_O \mathbf{O} = \mathbf{D}_S \mathbf{S} \quad (4)$$

Trong đó, $\mathbf{D}_O = (D_{gi})_{G \times I}$, $\mathbf{D}_S = (D_{gj})_{G \times J}$ là các ma trận phân khối (ma trận con) của $\mathbf{D}$. Đối với một thiết bị chuyển mạch chuỗi g nào đó, nếu nó có kết nối đến cổng đầu ra i và cổng đầu vào j của thiết bị chuyển đổi NL thì giá trị tương ứng của D_{gi} và D_{gj} là 1, ngược lại là 0. Do đó, nếu không tính đến các nguồn NL mới và lưu trữ NL trong EH, bằng cách liên kết các công thức (1), (2) và (4) và loại bỏ ma trận $\mathbf{O}$, chúng ta có thể xây dựng phương trình cân bằng công suất của EH như sau:

$$\mathbf{Z}_A \begin{bmatrix} \mathbf{S} \\ \mathbf{P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{L} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (5) \quad \mathbf{Z}_A = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{PO}\boldsymbol{\eta} + \mathbf{C}_{PS} & -\mathbf{I} \\ \mathbf{C}_{LO}\boldsymbol{\eta} + \mathbf{C}_{LS} & \mathbf{0} \\ \mathbf{D}_O\boldsymbol{\eta} - \mathbf{D}_S & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Trong công thức (5), $\mathbf{Z}_A$ là ma trận hệ số khi không xét đến sự tham gia của NL mới và các thiết bị lưu trữ NL. Trong công thức (6), $\mathbf{I}$ là ma trận đơn vị bậc M .

3/ Cân bằng NL EH xét đến nguồn NL mới và thiết bị tích trữ: Xây dựng ma trận $\mathbf{A}$ (có K cột và $I+J+M+N$ hàng) đối với NL mới, ma trận $\mathbf{B}$ cho các thiết bị lưu trữ là một ma trận có H cột và $I+J+M+N$ hàng. Chia hai ma trận này các khối theo kích thước của I, J, M, N như sau:

$$\begin{cases} \mathbf{A} = [\mathbf{A}_O^T : \mathbf{A}_S^T : \mathbf{A}_P^T : \mathbf{A}_L^T]^T \\ \mathbf{B} = [\mathbf{B}_O^T : \mathbf{B}_S^T : \mathbf{B}_P^T : \mathbf{B}_L^T]^T \end{cases} \quad (7)$$

Trong đó, $\mathbf{A}_O = (A_{ik})_{I \times K}$, $\mathbf{B}_O = (B_{ih})_{I \times H}$ biểu thị mối quan hệ NL đầu ra của các thiết bị chuyển đổi. Trường hợp thiết bị NL mới thứ k hoặc lưu trữ NL h bổ sung/lưu trữ NL từ cổng đầu ra i của thiết bị chuyển đổi thì các phần tử tương ứng A_{ik} , B_{ih} sẽ nhận giá trị 1, ngược lại nhận giá trị 0. $\mathbf{A}_S = (A_{jk})_{J \times K}$, $\mathbf{A}_P = (A_{mk})_{M \times K}$, $\mathbf{A}_L = (A_{nk})_{N \times K}$ lần lượt biểu thị quan hệ tiếp nhận NL đầu vào của thiết bị NL mới và các thiết bị chuyển đổi NL; $\mathbf{B}_S = (B_{jh})_{J \times H}$, $\mathbf{B}_P = (B_{mh})_{M \times H}$, $\mathbf{B}_L = (B_{nh})_{N \times H}$ lần lượt biểu thị quan hệ tiếp nhận NL đầu vào của thiết bị tích trữ và các thiết bị chuyển đổi NL đầu vào/ra của EH. Các phần tử trong ma trận $\mathbf{A}_S, \mathbf{A}_P, \mathbf{A}_L, \mathbf{B}_S, \mathbf{B}_P, \mathbf{B}_L$ được lấy giá trị tương tự như $\mathbf{A}_O, \mathbf{B}_O$.

Khi xét đến sự tham gia của NL mới và thiết bị tích trữ, cần điều chỉnh $\mathbf{P}, \mathbf{L}, \mathbf{O}$ và $\mathbf{S}$ trong các công thức (2) và (4), như trong Bảng 1. Dựa trên sự điều chỉnh của Bảng 1, phương trình cân bằng công suất cho EH có thể được thu được bằng cách kết hợp các công thức (1), (2) và (4) theo cùng một cách (8).

$$[Z_A \mid Z_B] \begin{bmatrix} S \\ P \\ Q^{\text{ch}} - Q^{\text{dis}} \\ R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Trong phương trình (8), Z_B là khối ma trận được thêm vào khi xét đến NL mới và thiết bị tích trữ. Nó được định nghĩa là ma trận hệ số B:

$$Z_B = \begin{bmatrix} -(C_{PO}B_O - C_{PS}B_S - B_P) & C_{PO}A_O - C_{PS}A_S - A_P \\ -(C_{LO}B_O - C_{LS}B_S + B_L) & C_{LO}A_O - C_{LS}A_S + A_L \\ -(D_OB_O + D_SB_S) & D_OA_O + D_SA_S \end{bmatrix} \quad (9)$$

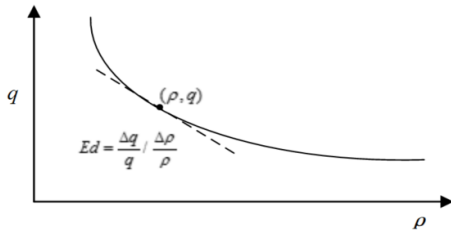
Tóm lại, dựa trên mô tả của ma trận kết nối thiết bị trong EH, tức ma trận A, B, C, D , phương trình cân bằng NL tổng quát có thể viết dựa trên (8). Phương pháp này đơn giản, rõ ràng và có tính tổng quát chung. Khi thêm hoặc giảm bớt đi các thiết bị trong mô hình, chỉ cần sửa đổi lại các ma trận A, B, C, D , chúng ta có thể có được phương trình cân bằng công suất mới.

2.2. Độ co giãn của nhu cầu tải theo giá

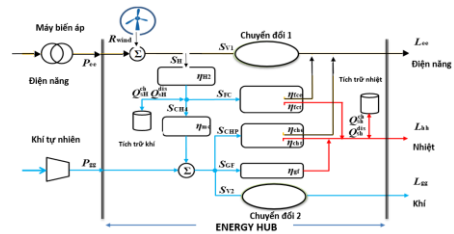
Độ co giãn của cầu theo giá (Price Elasticity of Demand - EDP), Ed dùng để chỉ sự biến động của lượng cầu khi có sự thay đổi của giá cả. NL được giao dịch như một loại hàng hóa với độ co giãn cầu theo giá nhất định. Hệ số co giãn cầu theo giá là đại lượng vật chất chủ yếu để đo lường tác động của sự thay đổi giá cả hàng hóa đối với nhu cầu sử dụng NL [14]. Trong kinh tế học, nó được biểu diễn như sau:

$$Ed = \frac{\Delta q}{q} / \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (10)$$

Trong đó, Δq và q , $\Delta \rho$ và ρ lần lượt là độ biến thiên và lượng tuyệt đối của nhu cầu tải và giá. Đối với đường cầu tải NL chung (Hình 3).



Hình 3. Đường cong nhu cầu NL



Hình 4. Cấu trúc EH đề xuất

Đường đặc tính nhu cầu tải NL thường được xây dựng dựa trên việc thu thập dữ liệu nghiên cứu chuyên sâu, từ đó thực hiện ước tính các tham số để xây dựng nhu cầu tải cho người dùng [15] - [17]. Nghiên cứu này sử dụng phương pháp tuyến tính hóa từng phần thay vì đi sâu vào đo lường tính chất nhu cầu của người sử dụng. Đối với tải NL thứ n , mô hình tuyến tính hóa từng phần nhu cầu tải của nó là:

$$L_{n,t} = \sum_{w=1}^{W_n} \delta_{n,w,t} (\alpha_{n,w,t} \rho_{n,w,t} + \beta_{n,w,t}) \quad (11)$$

Trong đó, t là biến biểu thị thời gian, w là số lượng hàm tuyến tính: $w = 1, 2, \dots, W_n$, W_n là tổng số đoạn chia. α, β là các tham số tuyến tính hóa. δ là biến logic [0 1]. Các biến δ, ρ thỏa mãn (công thức toán 12) giới hạn trên và giới hạn dưới của giá NL ($\rho_{n,t,w}$, $\rho_{n,t,w}$). Để cân bằng công suất có thể là một biểu thức tuyến tính, từ (11) và (12) có thể viết thành (13).

$$\begin{cases} \delta_{n,w,t} \overline{\rho_{n,t,w}} \leq \rho_{n,t,w} \leq \delta_{n,w,t} \underline{\rho_{n,t,w}} \\ \sum_{w=1}^W \delta_{n,w,t} = 1 \end{cases} \quad (12) \quad L_{n,t} = \sum_{w=1}^{W_n} (\alpha_{n,w,t} \rho_{n,w,t} + \beta_{n,w,t} \delta_{n,w,t}) \quad (13)$$

Mặt khác, từ quy luật cung cầu, nhu cầu tải NL thường thay đổi tỷ lệ nghịch với giá nên E_d thường âm. Người ta thường nghiên cứu giá trị tuyệt đối của nó và cho rằng $|Ed|$ càng nhỏ thì độ co giãn theo giá của nhu cầu tải NL càng thấp và ngược lại.

2.3. Thiết lập mô hình tối ưu

Mô hình của mạng lưới NL có thể được kết nối bởi nhiều EH khác nhau [5]. Trên cơ sở đáp ứng nhu cầu tải, mỗi EH sử dụng cấu trúc riêng phù hợp để đạt được khả năng vận hành tối ưu. EH có thể điều chỉnh giá NL và sử dụng độ co giãn theo giá của tải để mở rộng không gian tối ưu hóa. Với mục tiêu tối đa hóa doanh thu, mô hình toán học được thiết lập như sau:

2.3.1. Hàm mục tiêu

$$\max \sum_{t=1}^T \left[\sum_{n=1}^N \sum_{w=1}^{W_n} (\alpha_{n,w,t} \rho_{n,w,t}^2 + \beta_{n,w,t} \rho_{n,w,t}) - \sum_{m=1}^M \theta_{m,t} P_{m,t} - \Omega_t \right] \quad (14)$$

Trong đó, T là tổng số khoảng thời gian trong chu kỳ lập lịch. $\rho_{n,t}$ và $\theta_{m,t}$ lần lượt là giá trị NL đầu ra/vào của loại NL thứ n tại thời điểm t . Biến Ω là chi phí vận hành của EH:

$$\Omega_t = \sum_{j=1}^J (\lambda_{Sj} S_{j,t} + \mu_{Sj}) + \sum_{k=1}^K (\lambda_{Rk} R_{k,t} + \mu_{Rk}) + \sum_{h=1}^H [\lambda_{Qh} (Q_{h,t}^{\text{dis}} + Q_{h,t}^{\text{ch}}) + \mu_{Qh}] \quad (15)$$

Trong công thức (15), $\lambda_S, \mu_S, \lambda_R, \mu_R$ lần lượt là hệ số chi phí vận hành của thiết bị chuyển đổi và NL mới, tuy nhiên trong bài báo này, chi phí vận hành của NL mới được coi là 0, (λ_R và $\mu_R = 0$); λ_Q và μ_Q là hệ số chi phí vận hành của thiết bị lưu trữ.

2.3.2. Các ràng buộc toán học

Các ràng buộc bao gồm: ràng buộc cân bằng NL (8); ràng buộc về giá và các biến logic (12); ràng buộc hoạt động của thiết bị chuyển đổi, thiết bị tích trữ và NL mới; các ràng buộc về trao đổi công suất với hệ thống NL, gồm:

a/ *Giới hạn của các thiết bị chuyển đổi*: Thiết bị chuyển đổi chủ yếu thực hiện chuyển đổi và kết nối giữa các dạng NL khác nhau. Công suất S_j của thiết bị chuyển đổi thỏa mãn:

$$S_j^{\min} \leq S_{j,t} \leq S_j^{\max} \quad (16) \quad -S_j^{\text{down}} \leq S_{j,t} - S_{j,t-1} \leq S_j^{\text{up}} \quad (17)$$

Trong đó, $\min$ và $\max$ biểu thị giới hạn trên và dưới của biến tương ứng, S_{up} và S_{dow} là giới hạn tăng giảm công suất của thiết bị thứ j theo thời gian t .

b/ *Ràng buộc vận hành của thiết bị tích trữ*: Các thiết bị lưu trữ NL bao gồm pin, thiết bị lưu trữ nhiệt, v.v. Thiết bị tích trữ không thể cùng lúc ở trạng thái sạc và xả (Q_h^{dis} và Q_h^{ch} được mô tả thông qua các biến nhị phân (0, 1) như công thức toán (18).

$$\begin{cases} E_h(t+1) = E_h(t) + Q_h^{\text{ch}}(t) - Q_h^{\text{dis}}(t) - e \\ E_h(t)^{\min} \leq E_h(t) \leq E_h(t)^{\max} \\ E_h(0) = E_h(T) \\ 0 \leq Q_h^{\text{ch}}(t) \leq \varsigma_h^{\text{ch}}(t) Q_h^{\text{ch,max}}(t) \\ 0 \leq Q_h^{\text{dis}}(t) \leq \varsigma_h^{\text{dis}}(t) Q_h^{\text{dis,max}}(t) \\ \varsigma_h^{\text{ch}}(t) + \varsigma_h^{\text{dis}}(t) \leq 1 \end{cases} \quad (18) \quad \begin{cases} 0 \leq R_{k,t} \leq R_{k,t}^* \\ 0 \leq R_{k,t} \leq [R_{k,t}^* \min, R_{k,t}^* \max] \\ 0 \leq R_{k,t} \leq \chi R_{k,t}^* \min + (1-\chi) R_{k,t}^* \max \\ 0 \leq P_m \leq P_m^{\max} \end{cases} \quad \begin{matrix} (19) \\ (20) \\ (21) \\ (22) \end{matrix}$$

Trong (18), E là NL được lưu trữ, $E(0)$ là giá trị NL ban đầu (giả thiết = 0), e là NL tiêu tán của thiết bị tích trữ. $\varsigma_h^{\text{ch}}(t)$, $\varsigma_h^{\text{dis}}(t)$ là các biến nhị phân thể hiện trạng thái nạp/xả của thiết bị tích trữ thứ h tại thời điểm t .

c/ *Ràng buộc công suất phát của các dạng NL mới*: Đối với NL mới, chẳng hạn như NL gió, quang điện..., công suất phát của nó mang tính chất dự báo và đáp ứng các ràng buộc (19). Trong đó, $R_{k,t}^*$ là sản lượng dự báo của NL mới k trong khoảng thời gian t . Trong bài báo này, chi phí vận hành của NL mới không xét đến, điều này sẽ giúp thúc đẩy công suất tiêu thụ và tối đa hóa hàm mục tiêu của bài toán vận hành tối ưu EH. Đồng thời, sản lượng dự báo cũng được xem xét đến giới hạn trên và giới hạn dưới $[R_{k,t}^{*min}, R_{k,t}^{*max}]$, $R_{k,t}^{*min}$, $R_{k,t}^{*max}$ (20). Bổ sung độ tin cậy $\chi = [0, 1]$ vào (20) để chuyển đổi thành điều kiện ràng buộc số thực, ta có công thức toán (21).

d/ *Ràng buộc trao đổi NL với hệ thống được giới thiệu ở công thức toán (22)*.

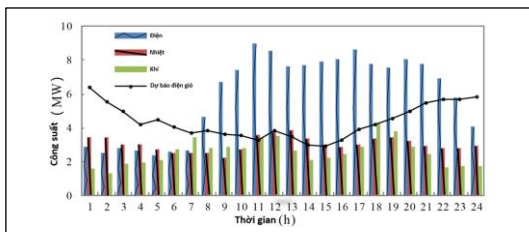
Tóm lại, mô hình tối ưu hóa EH được xây dựng một cách tổng quát có xét đến độ co giãn nhu cầu tải theo giá NL được mô tả thông qua mô hình tối ưu hóa bậc hai nguyên hỗn hợp (Mixed Integer Quadratic Programming - MIQP). Để giải quyết vấn đề này, bài báo sử dụng ngôn ngữ lập trình GAMS (CPLEX) [18] làm công cụ để tính toán.

3. Kết quả tính toán và thảo luận

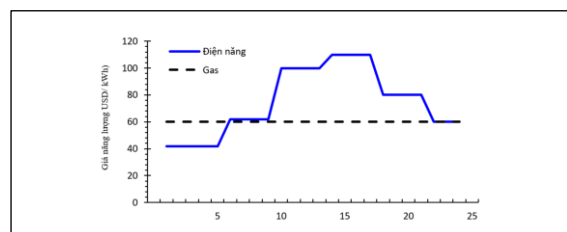
Dựa trên mô hình EH trong tài liệu [12], nghiên cứu này mở rộng EH như trong Hình 4. Các tham số và biến cần tìm gồm: $\mathbf{P} = [P_{ee}, P_{gg}]^T$, $\mathbf{L} = [L_{ee}, L_{hh}, L_{gg}]^T$, các ký hiệu “ee, gg, hh” tương ứng là điện, khí tự nhiên và nhiệt. Ma trận $\mathbf{S} = [S_{H2}, S_{CH4}, S_{FC}, S_{CHP}, S_{GF}, S_{V1}, S_{V2}]^T$, $\mathbf{O} = [O_{H2}, O_{CH4}, O_{FC1}, O_{FC2}, O_{CHP1}, O_{CHP2}, O_{GF}, O_{V1}, O_{V2}]^T$ với các chỉ số H2, CH4, FC, CHP, GF, V1, V2 lần lượt là các thông số của thiết bị chuyển đổi điện năng thành H₂, thiết bị metan hóa, pin nhiên liệu (FC1, FC2 lần lượt là đầu ra của pin sang điện và nhiệt), turbine khí (CHP1, CHP2 lần lượt là đầu ra điện và nhiệt), nồi hơi, thiết bị chuyển đổi ảo 1 và 2. $\mathbf{Q}^{ch} = [Q_{sH}^{ch}, Q_{sh}^{ch}]^T$, $\mathbf{Q}^{dis} = [Q_{sH}^{dis}, Q_{sh}^{dis}]^T$ với các ký hiệu “sH, sh” lần lượt là thiết bị lưu trữ Hydro và lưu trữ nhiệt. Thiết bị NL mới ở đây giả thiết có một máy phát điện gió $\mathbf{R} = [R_{wind}]$. Bằng cách xác định ma trận tương quan $\mathbf{C}$, ma trận vị trí $\mathbf{D}$ của thiết bị chuyển đổi theo tầng. Từ công thức toán học (8) được viết lại thành công thức (25).

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -\eta_{mc} & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \eta_{fce} & \eta_{che} & 0 & \eta_{v1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \eta_{fct} & \eta_{cht} & \eta_{gf} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \eta_{v2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \eta_{H2} & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{H2} \\ S_{CH4} \\ S_{FC} \\ S_{CHP} \\ S_{GF} \\ S_{V1} \\ S_{V2} \\ P_e \\ P_g \\ Q_{sH}^{ch} - Q_{sH}^{dis} \\ Q_{sh}^{ch} - Q_{sh}^{dis} \\ R_{wind} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L_{ee} \\ L_{hh} \\ L_{gg} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Dữ liệu tính toán gồm nhu cầu phụ tải (hình 5); Hình 6 thể hiện giá điện và khí tự nhiên được mua từ hệ thống. Hiệu suất các thiết bị được giới thiệu tại Bảng 2.



Hình 5. Nhu cầu tải và dự báo điện gió



Hình 6. Biểu giá NL

Bảng 2. Hiệu suất của các thiết bị trong mô hình

Ký hiệu	η_{H2}	η_{mc}	η_{fce}	η_{fct}	η_{che}	η_{cht}	η_{gf}
Giá trị	0,85	0,80	0,50	0,30	0,40	0,40	0,76

3.1. Phân tích kết quả vận hành tối ưu EH có xét đến độ co giãn của nhu cầu tải theo giá NL

Dựa trên mô hình đề xuất, lấy hệ số $\chi = 0,5$. Độ co giãn theo giá của nhu cầu tải dựa trên kết quả phân tích thống kê của một khu đô thị và hệ số co giãn của nó sau khi điều chỉnh tuyến tính hóa được thể hiện như bảng 3.

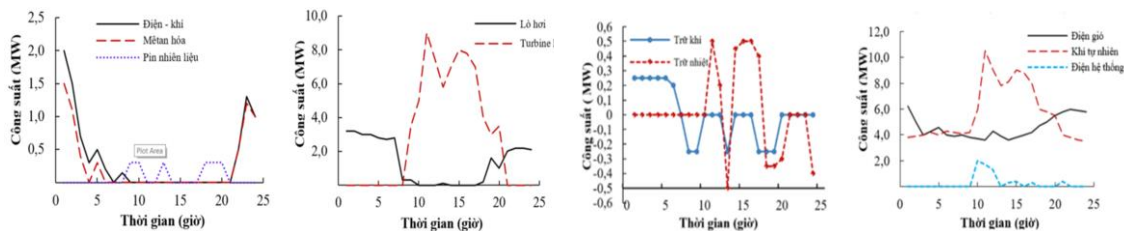
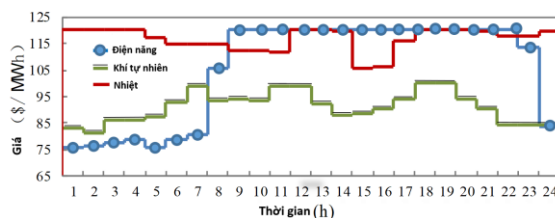
Bảng 3. Độ co giãn theo giá của nhu cầu tải NL

Loại tải	Hệ số đàn hồi (MWh ² /\$/)	Giá sàn (\$/MWh)	Giá trần (\$/MWh)
Điện	-0,11	80	90
	-0,06	90	120
Nhiệt nóng	-0,05	80	120
Khí tự nhiên	-0,06	60	100

Bảng 4. Cài đặt độ co giãn theo giá của nhu cầu đối với các tải khác nhau

Loại hình tải	Hệ số đàn hồi (MWh ² /\$/)			
	KB 1	KB 2	KB 3	KB 4
Điện	-0,11	-0,09	-0,13	0
	-0,06	-0,04	-0,08	0
Nhiệt nóng	-0,05	-0,03	-0,07	0
Khí tự nhiên	-0,06	-0,04	-0,08	0

Hình 7 và Hình 8 lần lượt hiển thị kết quả vận hành tối ưu của các thiết bị trong EH và biểu giá NL thời gian thực.

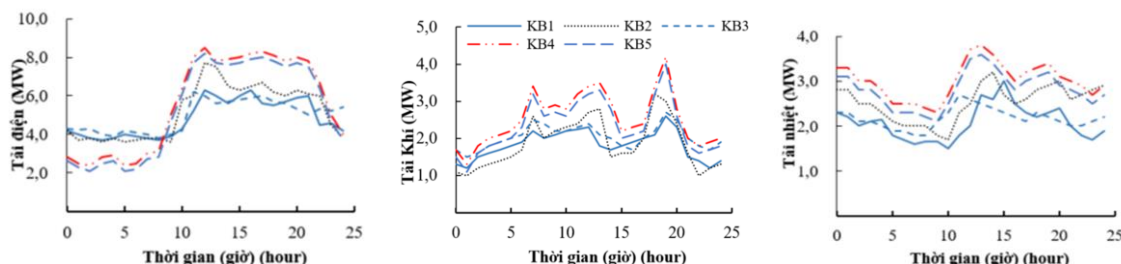
**Hình 7. Kết quả vận hành tối ưu của các thiết bị****Hình 8. Kết quả tối ưu giá NL theo thời gian thực**

Kết quả tính toán Hình 7 cho thấy trong thời gian nhu cầu tải điện thấp và dư thừa NL gió (1~8h, 21~24h), tải điện chủ yếu được đáp ứng bởi NL gió. Lúc này, các thiết bị chuyển hóa điện thành hydro, lưu trữ hydro và metan hóa hoạt động để hấp thụ NL gió dư thừa với chi phí thấp, lưu trữ để dự phòng. Trong giờ cao điểm, điện gió và hydro dự trữ dùng để phát điện bằng pin nhiên liệu vẫn chưa đáp ứng được nhu cầu phụ tải điện, lúc này do giá mua khí rẻ hơn giá mua điện nên tuabin khí hoạt động để cung cấp điện năng. Tuy nhiên, do công suất vận hành của tuabin khí còn bị hạn chế bởi phụ tải nhiệt nên vẫn phải mua điện với giá khá cao để đáp ứng nhu cầu phụ tải điện trong một số thời điểm phụ tải điện cao.

Hình 8 cho thấy biểu giá tối ưu NL theo thời gian để tối đa hóa doanh thu của EH. Bỏ qua tồn thất NL và chi phí vận hành trong EH (hai thành phần này tương đối nhỏ), khi giá mua NL bên ngoài không biến động nhiều và giá NL tối ưu không đạt đến giới hạn trên, xu hướng thay đổi của giá NL giống như xu hướng thay đổi phụ tải ở Hình 5.

3.2. Tác động của các độ co giãn nhu cầu tải theo giá khác nhau đối với việc định giá tối ưu

Việc định giá tối ưu cho phụ tải không chỉ liên quan đến phụ tải tham chiếu chuẩn và chi phí mua NL tối ưu mà còn liên quan đến độ co giãn theo giá của nhu cầu phụ tải. Ở những khu vực chủ yếu là công nghiệp và thương mại, độ co giãn theo giá của nhu cầu tải thấp, trong khi ở những khu vực chủ yếu là tải trọng dân cư, độ co giãn theo giá của nhu cầu tải cao. Ngoài ra, những thay đổi về giá NL cũng sẽ dẫn đến những thay đổi đối với đặc tính tải. Để phân tích tác động dưới các độ co giãn giá khác nhau (Bảng 3) với các kịch bản (KB) được trình bày trong Bảng 4. Các thông số phụ tải NL và giá tham chiếu là được lấy từ dữ liệu trong Hình 5.



Hình 9. Đặc tính tải theo các kịch bản vận hành khác nhau

Bảng 5. So sánh kết quả tối ưu hóa trong các kịch bản khác nhau

So sánh		KB 1	KB 2	KB 3	KB 4	KB 5
Phương sai tải	Điện	1,17	2,27	0,55	5,69	5,69
	Nhiệt	0,14	0,17	0,05	0,18	0,18
	Khí	0,17	0,39	0,14	0,56	0,56
Chênh lệch (MW)	Điện	3,44	4,31	2,84	6,59	6,59
	Nhiệt	1,38	1,47	0,95	1,62	1,62
	khí	1,81	2,41	1,47	2,94	2,94
Tổng chi phí (\$)		15260	16248	14527	18898	11917
Tỷ lệ tiêu thụ điện gió (%)		100	100	100	97,3	97,3

Hình 9 cho thấy các đường đặc tính thay đổi của phụ tải trong các kịch bản khác nhau (thể hiện sự thay đổi của giá NL). Bảng 5 thể hiện phương sai phụ tải, chênh lệch từ đỉnh đến đáy, doanh thu của EH và tỷ lệ tiêu thụ NL gió đối với các dạng NL khác. Có thể thấy rằng so với việc không xem xét điều tiết giá (KB5), nếu coi phụ tải làm nguồn tài nguyên có thể kiểm soát được (KB 1~3), chi phí của EH sẽ tăng lên, đồng thời, nó sẽ giúp giảm phương sai phụ tải, tăng chênh lệch đỉnh và tăng tỷ lệ tiêu thụ điện gió. KB 4 là trường hợp đặc biệt, hệ số co giãn theo giá của kịch bản này bằng 0. Do đó, mặc dù có tính đến việc kiểm soát giá nhưng vẫn không làm thay đổi được đặc tính phụ tải, phương sai phụ tải, chênh lệch đỉnh – đáy và tiêu thụ điện gió, tỷ lệ giống như trường hợp 5. Tại thời điểm này, giá NL do EH đặt ra buộc phải ở mức giới hạn trên để tối đa hóa doanh thu. Với sự gia tăng độ co giãn theo giá (KB 4→KB 2→KB 1→KB 3), khả năng thay đổi các đặc tính tải thông qua giá NL cũng tăng lên và đặc điểm này cũng đã được đáp ứng trong khi tối đa hóa lợi ích của EH, nghĩa là: khi độ co giãn của giá tăng lên, phương sai tải và chênh lệch từ đỉnh đến đáy giảm. Ngoài ra, do tính co giãn của giá, trong chu kỳ NL gió dư thừa và tải điện thấp, cơ chế giá cũng có thể được sử dụng để thúc đẩy tiêu thụ NL gió giá rẻ và tăng tỷ lệ tiêu thụ NL mới.

4. Kết luận

Dựa trên nền tảng của thị trường NL, xét đến độ co giãn theo giá của nhu cầu phụ tải, bài viết này tiến hành nghiên cứu về mô hình hóa và phương pháp vận hành tối ưu của các Trung tâm NL với quy mô nhỏ. Các kết luận chính như sau: 1/ Phương pháp mô hình hóa phương trình cân bằng công suất của EH dựa trên mô tả ma trận mối quan hệ kết nối của từng thiết bị là ngắn gọn, rõ

ràng và linh hoạt, giúp giảm khó khăn trong việc mô hình hóa các hệ thống phức tạp và tạo điều kiện thuận lợi cho việc lập trình máy tính; 2/ Quy định giá có tính đến tải NL có thể tận dụng tối đa độ co giãn theo giá của nhu cầu phụ tải nhằm tối đa lợi nhuận của EH, nó có lợi trong việc cải thiện các đặc tính của phụ tải (giảm chênh lệch phụ tải và chênh lệch từ đỉnh đến đáy). Độ co giãn theo giá càng cao thì khả năng cải thiện đặc tính tải càng tốt; ngoài ra, sau khi xem xét quy định về giá của tải NL, việc sử dụng khả năng đáp ứng co giãn của tải cũng có thể giúp cải thiện khả năng tiêu thụ NL.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] A. Q. Huang, M. L. Crow, G. T. Heydt, J. P. Zheng, and S. J. Dale, "The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 1, pp. 133-148, 2011.
- [2] S. Zheng, Y. Sun, B. Li, B. Qi, X. Zhang, and F. Li, "Incentive-based integrated demand response for multiple energy carriers under complex uncertainties and double coupling effects," *Applied Energy*, vol. 283, 2021, Art. no. 116254.
- [3] J. Wu, J. Yan, H. Jia, N. Hatziaargyriou, N. Djilali, and H. Sun, "Integrated Energy Systems," *Applied Energy*, vol. 167, pp.155-157, 2016.
- [4] H. J. Jia, D. Wang, X. D. Xu, and X. D. Yu, "Research on Some Key Problems Related to Integrated Energy Systems," *Automation of Electric Power Systems*, vol. 39, no. 7, pp. 198-207, 2015.
- [5] Y. Wang, J. Zhao, F. Wen, and Y. Xue "Market Equilibrium of Multi-energy System with Power-to-gas Functions," *Automation of Electric Power Systems*, vol. 39, no. 21, pp. 1-10, 2015.
- [6] M. Geidl, G. Koeppl, P. Favre-Perrod, B. Klockl, G. Andersson, and K. Frohlich, "Energy hubs for the future," *IEEE Power & Energy Magazine*, vol. 5, no. 1, pp. 24-30, 2006.
- [7] S. Bahrami and F. Safe, "A Financial Approach to Evaluate an Optimized Combined Cooling, Heat and Power System," *Energy & Power Engineering*, vol. 05, no. 05, pp. 352-362, 2013.
- [8] H. C. Gils, H. Gardian, and J. Schmugge, "Interaction of hydrogen infrastructures with other sector coupling options towards a zero-emission energy system in Germany," *Renewable Energy*, vol. 180, pp. 140-156, 2021.
- [9] R. Li and S. S. Nahaei, "Optimal operation of energy hubs integrated with electric vehicles, load management, combined heat and power unit and renewable energy sources," *Journal of Energy Storage*, vol. 48, 2022, Art. no. 103822.
- [10] P. Mancarella and G. Chicco, "Real-Time Demand Response from Energy Shifting in Distributed Multi-Generation," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp. 1928-1938, 2013.
- [11] S. Pazouki, M. R. Haghifam, and A. Moser, "Uncertainty modeling in optimal operation of energy hub in presence of wind, storage and demand response," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 61, pp. 335-345, 2014.
- [12] S. Bahrami and A. Sheikhi, "From Demand Response in Smart Grid toward Integrated Demand Response in Smart Energy Hub," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 650-658, 2016.
- [13] S. P. Karthikeyan, I. J. Raglend, and D. P. Kothari, "A review on market power in deregulated electricity market," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 48, no. 48, pp. 139-147, 2013.
- [14] D. S. Kirschen, G. Strbac, P. Cumperayot, and D. D. P. Mendes, "Factoring the elasticity of demand in electricity prices," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 612-617, 2000.
- [15] Y. He and B. Wang, "Analysis on Response Characteristics of Residential Energy Price in Beijing," *Modern Electric Power*, vol. 30, no. 4, pp. 88-94, 2013.
- [16] T. B. Bjørner, M. Togeby, and H. H. Jensen, "Industrial companies' demand for electricity: evidence from a micropanel," *Energy Economics*, vol. 23, no. 5, pp. 595-617, 2011.
- [17] N. Boogen, S. Datta, and M. Filippini, "Going Beyond Tradition: Estimating Residential Electricity Demand Using an Appliance Index and Energy Services," *SSRN Electronic Journal*, vol. 61, pp. 381-386, 2014.
- [18] M. R. Bussieck and A. Meeraus, "General algebraic modeling system (GAMS)," in *Modeling Languages in Mathematical Optimization*, J. Kallrath, (eds), Springer, 2004, pp.137-157.