

AN OPTIMAL HIERARCHICAL LOAD DISPATCH METHOD BASED ON THERMAL-POWER CHARACTERISTICS

Nghiêm Thị Hưng*, Phạm Thị Hoa, Nguyễn Thị Duyên, Đào Thị Hằng

Nam Dinh University of Technology Education

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	24/01/2024	This paper introduces an optimal hierarchical load dispatch method based on thermal-power characteristics. Firstly, the thermal transmission model is applied to optimize the average load of air conditioning units. This characteristic is linearized to suit hourly planning. Next, leveraging the features of the air conditioning temperature difference-power model, a grouping method for air conditioning units is proposed based on auxiliary load aggregates. The optimal hierarchical model is constructed using intermediate variables, demonstrating that the Nash equilibrium solution is the unique strategy to optimize the hierarchical structure in the non-cooperative game. In the field of electrical engineering: The calculation results and simulations indicate that the optimized method of load distribution for air conditioning based on thermal-power characteristics can minimize the adverse impact of peak auxiliary loads on the power grid.
Revised:	23/02/2024	
Published:	23/02/2024	
KEYWORDS		
Air conditioning		
Hierarchical optimization		
Load Aggregation		
Nash equilibrium		
GAMS		

MỘT PHƯƠNG PHÁP TỐI ƯU PHÂN CẤP TẢI ĐIỀU HÒA DỰA TRÊN ĐẶC TÍNH NHIỆT – CÔNG SUẤT

Nghiêm Thị Hưng*, Phạm Thị Hoa, Nguyễn Thị Duyên, Đào Thị Hằng

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Nam Định

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 24/01/2024	Bài báo này giới thiệu phương pháp tối ưu phân cấp tải điều hòa dựa trên đặc tính nhiệt – công suất. Đầu tiên, áp dụng mô hình đặc tính truyền nhiệt để tối ưu hóa tải trung bình của máy điều hòa. Đặc tính này được tuyến tính hóa phù hợp với việc lập kế hoạch theo giờ. Tiếp theo, dựa trên đặc điểm của mô hình chênh lệch nhiệt độ-công suất điều hòa không khí, đề xuất phương pháp phân nhóm điều hòa không khí theo các bộ tổng hợp phụ tải. Mô hình tối ưu phân cấp được xây dựng thông qua các biên trung gian chứng minh rằng giải pháp cân bằng Nash là chiến lược duy nhất để tối ưu hóa phân cấp của lý thuyết trò chơi (Non-Cooperative Game). Kết quả tính toán, mô phỏng cho thấy phương pháp tối ưu phân cấp tải điều hòa dựa trên đặc tính nhiệt – công suất có thể giảm thiểu tác động bất lợi của đỉnh phụ tải lên lưới điện.
Ngày hoàn thiện: 23/02/2024	
Ngày đăng: 23/02/2024	
TỪ KHÓA	
Điều hòa nhiệt độ	
Tối ưu hóa phân cấp	
Bộ tổng hợp tải	
Cân bằng Nash	
GAMS	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.9636>

* Corresponding author. Email: nghiemhung.nute@gmail.com

1. Giới thiệu

Đáp ứng nhu cầu (Demand Response, DR) là thuật ngữ miêu tả hành vi trong đó người sử dụng điện thay đổi thói quen tiêu thụ điện của họ để đáp ứng với sự thay đổi của giá điện và các chính sách khuyến khích đến từ các công ty điện lực giúp cắt giảm đỉnh phụ tải, cải thiện hiệu suất sử dụng của thiết bị điện [1]. Hơn nữa, DR có thể cung cấp công suất dự phòng cho hệ thống điện từ phía người tiêu dùng. So với công suất dự phòng từ hệ thống điện, dự phòng từ phía người sử dụng không yêu cầu chi phí vận hành mà còn giúp tiết kiệm năng lượng và giảm phát thải nhà kính [2].

Điều hòa không khí (Air Conditioning Load, ACL) là thiết bị chiếm tỷ trọng lớn trong nhóm tải khu vực dân cư với khả năng cho phép điều chỉnh linh hoạt [3].

Tuy nhiên, do đặc điểm số lượng lớn, phân tán và thiếu sự tương tác thông tin với công ty điện lực dẫn đến nhiều khó khăn để khai thác tận dụng nguồn lực của loại hình này nhằm giải quyết bài toán đáp ứng theo nhu cầu tải. Một giải pháp được đưa ra trong những năm gần đây là sử dụng các bộ tổng hợp tải (Load Aggregator, LA). LA đơn giản được xem như một “tổ chức bên thứ ba độc lập”, có thể tích hợp và điều tiết thống nhất giữa phụ tải và nhà cung cấp là các công ty điện lực [4].

Dưới sự hỗ trợ của hạ tầng đo lường tiên tiến (Advanced Metering Infrastructure, AMI) và hệ thống quản lý năng lượng thông minh, LA có khả năng nhận biết và điều khiển trạng thái hoạt động, kiểm soát hiệu quả đối với tải ACL. Một số nghiên cứu đã chỉ rõ: mô hình vật lý của điều hòa thường được xây dựng dựa trên phương pháp mô hình hóa thống nhất về các thông số nhiệt độ (Equivalent Thermal Parameter, ETP) [5]. Các phương pháp kiểm soát cho điều hòa thường được chia thành ba loại chính: kiểm soát nhiệt độ [6], kiểm soát khởi động/tắt [7] và kiểm soát tạm dừng định kỳ [8]. Tuy nhiên, các nghiên cứu này chủ yếu tập trung vào thời gian kiểm soát ở cấp độ phút. Khi cần thiết kế lịch trình điều chỉnh trong khoảng thời gian dài hơn, có thể dễ dàng gặp vấn đề về số liệu có kích thước lớn. Mặc dù giải pháp kiểm soát tạm dừng định kỳ và kiểm soát nhiệt độ cung cấp các phương pháp khả thi cho việc kiểm soát trong thời gian dài, nhưng chúng thiếu linh hoạt trong việc lập kế hoạch sử dụng và khó khăn trong việc khai thác đặc điểm của tải ACL di động.

Cùng với sự mở cửa của thị trường điện, không chỉ có một tổ chức LA duy nhất trong một khu vực cụ thể, mà thay vào đó là sự xuất hiện của nhiều tổ chức LA cạnh tranh với nhau, tạo ra một mô hình lý thuyết trò chơi “Non-Cooperative Game, NCG” giữa nhiều đối tác [9]. Hiện nay, đã có nhiều nghiên cứu tập trung vào ứng dụng NCG xem xét phản ứng theo nhu cầu trên thị trường điện. Cụ thể như tài liệu [10]: dựa trên phản ứng của người dùng, tác giả xem xét người dùng năng lượng mặt trời (PV users) làm chủ thể và đề xuất một mô hình NCG dành cho nhóm này. Nghiên cứu [11], tác giả tạo ra một mô hình NCG theo tầng cho các loại tải khác nhau của khu vực cư dân, tuy nhiên, nghiên cứu này chưa xây dựng mô hình chi tiết cho tải di động.

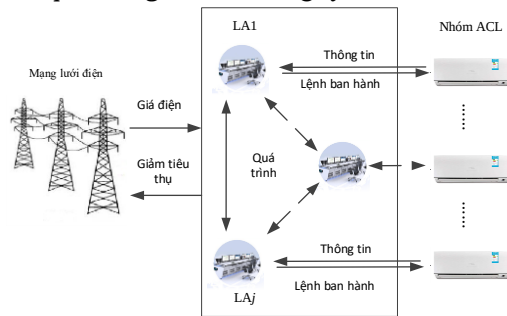
Trên cơ sở đó, nghiên cứu này trình bày phương pháp giải quyết một số vấn đề cụ thể như sau: 1/ Tối ưu hóa tải trung bình của ACL: trước tiên sử dụng mô hình đường truyền nhiệt tương đương của ACL để tối ưu hóa việc điều chỉnh theo phút với chu kỳ lên đến một giờ. Qua quá trình này, thu được mối quan hệ giữa giá trị trung bình của ACL trong một giờ và sự chênh lệch nhiệt độ ở đầu giờ và cuối giờ. 2/ Xây dựng Mô hình: Tuyến tính hóa mối quan hệ nêu trên và xây dựng một mô hình đặc trưng cho ACL - tương thích với việc lập kế hoạch theo giờ. 3/ Phân loại và xây dựng mô hình NCG của ACL: Dựa trên tham số của mô hình nhiệt độ - công suất, đề xuất một phương pháp phân loại cho các ACL, sau đó xây dựng mô hình NCG của chúng. 4/ Đề xuất mô hình tối ưu hóa phân tầng: Để đảm bảo sự tồn tại và duy nhất của giải pháp cân bằng, sử dụng một biến liên tục để chuyển đổi NCG thành mô hình tối ưu hóa phân tầng. Quá trình tối ưu hóa tầng trên và tầng dưới, giải pháp cân bằng thỏa mãn các ràng buộc liên quan được tìm ra. Cuối cùng, thực hiện mô phỏng để kiểm chứng tính khả thi và hiệu quả của phương pháp được đề xuất trong nghiên cứu này.

2. Phương pháp nghiên cứu

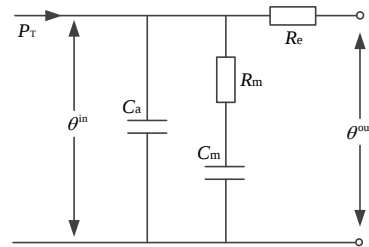
2.1. Bộ tổng hợp tải

Là một mắt xích quan trọng, LA phải duy trì liên lạc đầy đủ giữa công ty điện lực (cung cấp điện) và người sử dụng điện để có được thông số tải thay đổi theo thời gian thực, thông tin giá điện và trạng thái kiểm soát tải linh hoạt trong điều kiện thị trường điện nhằm lên kế hoạch vận hành cho chiến lược kiểm soát tiếp theo [4].

Khi có nhiều LA tồn tại trong một khu vực cụ thể, sẽ có mối quan hệ cạnh tranh giữa chúng, mỗi LA sẽ liên tục điều chỉnh chiến lược của mình để cuối cùng đạt đến trạng thái cân bằng. Do đó, trong phân tích của bài viết này, có thể coi đây như là một luật chơi tĩnh với thông tin đầy đủ. Mối quan hệ giữa LA, công ty điện lưới và người sử dụng được mô tả như hình 1 dưới đây:



Hình 1. Cách tổ chức và quản lý của LA



Hình 2. Mô hình tải điều hòa không khí

Trong bối cảnh phát triển của Internet of Things (IoT), hệ thống hạ tầng AMI cùng với công nghệ truyền thông 5G sẽ phát triển và ứng dụng mạnh mẽ trong ngành điện. LA sẽ có khả năng thực hiện giao tiếp hai chiều hiệu quả với từng người sử dụng điện. Trong đó, trạng thái sử dụng của các thiết bị điện và tín hiệu điều khiển từ LA được truyền tải theo thời gian thực. Khi tín hiệu điều khiển của LA được chuyển đến phía người dùng, có thể sử dụng hệ thống quản lý năng lượng tại người dùng để kiểm soát các thiết bị sử dụng điện.

2.2. Mô hình Nhiệt độ - Công suất của ACL

2.2.1. Mô hình tương đương dòng nhiệt của ACL

ACL hoạt động bằng cách tiêu thụ công suất điện, đưa máy nén làm việc để làm lạnh không gian bên trong khi điều kiện nhiệt độ ngoài trời cao. Thông thường, mô hình dòng nhiệt bậc hai của điều hòa nhiệt độ với tần số cố định, được sử dụng phổ biến, được mô tả như trong Hình 2 [4]. Trong hình 2, P_T biểu thị công suất làm lạnh của điều hòa (kW); θ^{in} và θ^{out} lần lượt biểu thị nhiệt độ không khí ở trong và ngoài ($^{\circ}\text{C}$); R_e và R_m tương ứng là trở nhiệt giữa trong và ngoài ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$); C_a và C_m tương ứng là dung lượng nhiệt độ của không khí ($\text{J}/^{\circ}\text{C}$). Mối quan hệ thay đổi tuyến tính của nhiệt độ trong nhà theo thời gian có sự tham gia của ACL như biểu thức toán (1):

$$\theta_{\tau+1}^{\text{in}} = \begin{cases} \xi \theta_{\tau}^{\text{in}} + (1-\xi) \theta_{\tau+1}^{\text{out}}, & S_{\tau} = 0 \\ \xi \theta_{\tau}^{\text{in}} + (1-\xi) \theta_{\tau+1}^{\text{out}} - (1-\xi) \theta_c, & S_{\tau} = 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\theta_{\tau+1}^{\text{in}} = \xi \theta_{\tau}^{\text{in}} - S_{\tau} (1-\xi) \theta_c + (1-\xi) \theta_{\tau+1}^{\text{out}} \quad (2)$$

Trong công thức (1), τ là thời gian lập kế hoạch (phút); $\theta_{\tau}^{\text{in}}$ và $\theta_{\tau+1}^{\text{in}}$ là nhiệt độ trong nhà tại thời điểm τ và $\tau+1$; $\theta_{\tau+1}^{\text{out}}$ là nhiệt độ ngoài trời tại thời điểm $\tau+1$ phút ($^{\circ}\text{C}$); ξ là hệ số tản nhiệt; θ_c biểu thị sự đóng góp của công suất làm mát của ACL vào việc giảm nhiệt độ trong nhà khi bật điều hòa ($^{\circ}\text{C}$); S_{τ} biểu thị trạng thái mở và đóng của ACL tại phút τ (trạng thái [1, 0] cho biết điều hòa đang bật hoặc tắt). Do S_{τ} là biến nhị phân, nên công thức (1) có thể viết thành (2) và cho thấy khi xác định nhiệt độ ngoài trời và các thông số vật lý khác nhau của căn phòng, sự thay đổi của nhiệt độ trong nhà chỉ liên quan đến trạng thái của đóng (mở) của ACL. LA có thể sử

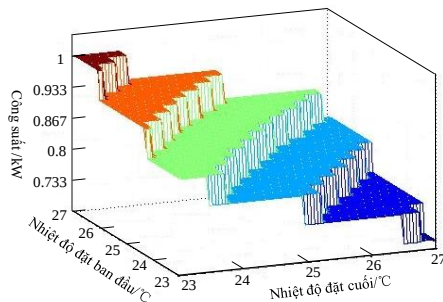
dụng chức năng cảm biến để thực hiện phân tích hồi quy về đặc điểm tiêu thụ điện trước đây của người dùng nhằm thu được các thông số vật lý về đặc điểm phòng của từng người sử dụng.

2.2.2. Mô hình đặc tính chênh lệch nhiệt độ-công suất của ACL

Dựa trên mô hình thay đổi nhiệt độ tải ACL được trình bày trong công thức (2), công suất trung bình tối thiểu của tải ACL theo khoảng thời gian xác định theo các ràng buộc nhiệt độ được cho ở công thức toán (3). Trong đó, P_{av} là công suất trung bình trong kỳ điều độ; P_0 là công suất tức thời khi bật điều hòa; H là tổng số lần trong kỳ điều độ; $\theta^{\min}$, $\theta^{\max}$ lần lượt là giới hạn dưới và trên của nhiệt độ trong nhà; θ_{start}^{in} và θ_{end}^{in} lần lượt là thời điểm bắt đầu và kết thúc điều độ.

$$\min P_{av} = \frac{P_0 \sum_{\tau=1}^H S_{\tau}}{H} \quad (3) \quad \begin{cases} \theta_{\tau+1}^{in} = \xi \theta_{\tau}^{in} - S_{\tau} (1-\xi) \theta_c + (1-\xi) \theta_{\tau+1}^{out} \\ \theta^{\min} \leq \theta_{\tau}^{in} \leq \theta^{\max} \\ \theta_1^{in} = \theta_{start}^{in}, \theta_H^{in} = \theta_{end}^{in} \\ 1 \leq \tau \leq H \end{cases} \quad P_i(t) = \begin{cases} P_{i,t,1} & \Delta \theta_{i,t,1}^{lo} \leq \theta_i(t+1) - \theta_i(t) < \Delta \theta_{i,t,1}^{up} \\ P_{i,t,2} & \Delta \theta_{i,t,2}^{lo} \leq \theta_i(t+1) - \theta_i(t) < \Delta \theta_{i,t,2}^{up} \\ \vdots \\ P_{i,t,N} & \Delta \theta_{i,t,N}^{lo} \leq \theta_i(t+1) - \theta_i(t) < \Delta \theta_{i,t,N}^{up} \end{cases} \quad (4)$$

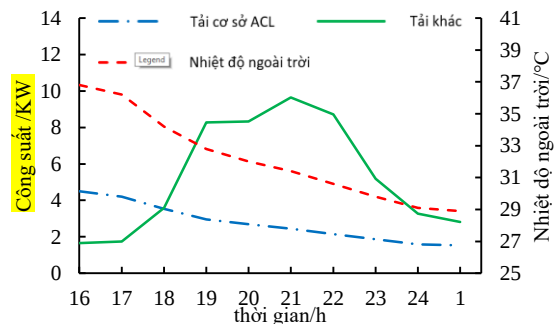
Giả sử công suất tức thời khi bật điều hòa là 4 kW, hệ số tản nhiệt ξ là 0,96, giới hạn nhiệt độ trên và dưới trong thời gian điều phối lần lượt là 27°C và 23°C, hệ số θ_c đóng góp của việc làm mát ACL công suất giảm nhiệt độ trong nhà là 39°C, và thời gian điều phối là 60 phút, nhiệt độ ngoài trời là 34°C. Bằng cách thay đổi liên tục nhiệt độ cài đặt tại thời điểm ban đầu và thời điểm kết thúc của chu kỳ lập kế hoạch để mô phỏng, giá trị công suất tối thiểu trong chu kỳ lập lịch sẽ thu được như trong hình 3.



Hình 3. Mối liên hệ giữa công suất trung bình của điều hòa và nhiệt độ đầu và cuối thời gian điều chỉnh hình tải điều hòa không khí

Từ hình 3, công suất trung bình là như nhau khi chênh lệch nhiệt độ giữa thời điểm đầu và thời điểm kết thúc trong kỳ lập kế hoạch là như nhau. Giả sử các điểm có nhiệt độ bằng nhau ở thời điểm đầu và thời điểm cuối thời gian trong sơ đồ tọa độ được nối với nhau tạo thành một đường đồng mức nhiệt độ, sau đó nhìn từ hướng vuông góc với các đường đồng mức nhiệt độ, công suất trung bình của điều hòa thể hiện tính chất của hàm bậc thang.

Trên thực tế, bằng cách mô phỏng tải điều hòa không khí theo các thông số khác nhau, chúng ta có thể thu được các đặc tính công suất giống như hình thang tương tự như Hình 3. Điểm khác biệt là giá trị mức công suất và phạm vi chênh lệch nhiệt độ của từng thang có thể thay đổi khi các thông số đặc tính ACL thay đổi. Cụ thể, mỗi bước trong đặc tính công suất dạng thang tương ứng với một giá trị mức công suất nhất định và phạm vi giới hạn trên và dưới của chênh lệch nhiệt độ. Giá trị mức công suất tương ứng với chênh lệch nhiệt độ nhỏ nhất là giá trị mức công suất đầu tiên thỏa mãn vì giới hạn chênh lệch nhiệt độ trên và dưới của giá trị mức công suất là ngưỡng giới hạn trên và dưới chênh lệch nhiệt độ đầu tiên. Khi chênh lệch nhiệt độ tăng lên, số



Hình 4. Nhiệt độ ngoài trời và thông số tải

thứ tự của giá trị mức công suất và ngưỡng chênh lệch nhiệt độ trên và dưới tăng dần. Đặc tính này được biểu diễn bằng mô hình toán học như công thức (4). Trong đó, t là số thứ tự thời gian tính bằng giờ; $P_i(t)$ là phụ tải trung bình của ACL thứ i trong giờ t ; $P_{i,t,N}$ là giá trị mức công suất thứ N của ACL thứ i trong giờ t ; $\Delta\theta_{i,t,N}^{\text{lo}}$ và $\Delta\theta_{i,t,N}^{\text{up}}$ là độ chênh lệch nhiệt độ thứ N của ACL i trong giờ t (ngưỡng giới hạn trên và dưới); $\theta_i(t)$ biểu thị giá trị cài đặt nhiệt độ trong nhà tại thời điểm ban đầu của giờ thứ t của ACL, đồng thời cũng là giá trị cài đặt nhiệt độ trong nhà vào cuối tại thời điểm $t-1$ giờ; $\theta_i(t+1)-\theta_i(t)$ phản ánh chênh lệch giữa điểm đặt nhiệt độ ở đầu và cuối giờ thứ t .

Trong bài toán tối ưu hóa, mô hình chênh lệch nhiệt độ - công suất ACL ở công thức (4) không dễ sử dụng, bài viết này tuyến tính hóa mô hình và mô hình toán học cụ thể như (5):

$$\begin{cases} P_i(t) = \sum_{n=1}^N P_{i,t,n} x_{i,t,n} \\ \sum_{n=1}^N x_{i,t,n} \Delta\theta_{i,t,n}^{\text{lo}} \leq \theta_i(t+1) - \theta_i(t) \leq \sum_{n=1}^N x_{i,t,n} \Delta\theta_{i,t,n}^{\text{up}} \\ \sum_{n=1}^N x_{i,t,n} = 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$D_i = [X_i, Y_i, Z_i]^T \quad (6)$$

$$X_i = [\Delta\theta_{i,1,1}^{\text{lo}}, \Delta\theta_{i,1,2}^{\text{lo}}, \dots, \Delta\theta_{i,T,N}^{\text{lo}}] \quad (7)$$

$$Y_i = [\Delta\theta_{i,1,1}^{\text{up}}, \Delta\theta_{i,1,2}^{\text{up}}, \dots, \Delta\theta_{i,T,N}^{\text{up}}] \quad (8)$$

$$Z_i = [P_{i,1,1}, P_{i,1,2}, \dots, P_{i,T,N}] \quad (9)$$

$$D = [D_1, D_2, \dots, D_M] \quad (10)$$

Các biến logic nhị phân được đưa vào công thức $x_{i,t,n}$, nếu $x_{i,t,n}=1$ tức là giá trị cài đặt chênh lệch nhiệt độ $\theta_i(t+1)-\theta_i(t)$ của máy điều hòa i lúc đầu và cuối giờ t nằm giữa $\Delta\theta_{i,t,n}^{\text{lo}}$ và $\Delta\theta_{i,t,n}^{\text{up}}$, ngược lại khi $x_{i,t,n}=0$ thì nhiệt độ giá trị cài đặt chênh lệch $\theta_i(t+1)-\theta_i(t)$ của điều hòa i ở đầu và cuối giờ t . Giá trị cài đặt chênh lệch nhiệt độ $\Delta\theta_{i,t,n}^{\text{lo}}$ nhỏ hơn $\Delta\theta_{i,t,n}^{\text{lo}}$ hoặc lớn hơn $\Delta\theta_{i,t,n}^{\text{up}}$. Khi đó, ràng buộc (3) về hạn chế chênh lệch nhiệt độ ở đầu và cuối không khí chu kỳ điều phối điều hòa phải nằm trong khoảng ngưỡng nhiệt độ.

2.2.3. Phân nhóm ACL

Hiện nay, máy điều hòa không khí chủ yếu có ba phương pháp phân nhóm theo công suất điều khiển, trạng thái nhiệt độ phòng hoặc các thông số đặc tính nhiệt của ACL [12], bài viết này sẽ phân cụm dựa trên các thông số đặc tính chênh lệch nhiệt độ-công suất của ACL.

Từ công thức (4), có thể thấy rằng các thông số đặc tính chênh lệch nhiệt độ-công suất của ACL chủ yếu thuộc hai loại: Một là ngưỡng chênh lệch nhiệt độ trên và dưới, hai là mức công suất trung bình của ACL trong phạm vi mỗi khoảng ngưỡng chênh lệch nhiệt độ. Dữ liệu của hai loại tham số này được kết hợp thành một vector, có thể dùng làm vector đặc tính để phân cụm theo công thức toán (6), (7), (8), (9). Các vector đặc tính của tất cả các ACL thuộc thẩm quyền của một LA nhất định tạo thành ma trận đặc tính D theo công thức (10).

Dựa trên ma trận đặc tính trên, việc phân cụm điều hòa có thể được thực hiện để thu được số sê-ri của ACL trong từng nhóm. Trong lịch trình tối ưu hóa sau khi phân nhóm, mỗi nhóm máy sẽ được xử lý tổng thể. Số lượng nhóm phân cụm ACL có liên quan chặt chẽ đến độ phức tạp của tính toán tối ưu hóa và sự khác biệt về đặc tính trong mỗi nhóm. Nói chung, càng có nhiều nhóm máy được phân cụm thì sai số đặc tính chênh lệch nhiệt độ-công suất của cùng một nhóm máy sẽ càng nhỏ, nhưng độ phức tạp tính toán sẽ cao hơn. Trong lập kế hoạch thực tế, hai yếu tố này cần được xem xét để xác định số lượng nhóm phân loại hợp lý.

2.3. Mô hình tối ưu hóa phân cấp

Công ty điện lực thường sử dụng giá điện theo thời gian thực của thị trường đáp ứng nhu cầu để mua điện cắt giảm tải ở LA, giữa giá điện và tổng phụ tải có mối quan hệ tuyến tính [13] như công thức (11):

$$p^{\text{DR}} = aL + b \quad (11)$$

Trong công thức (11), p^{DR} là giá điện theo thời gian thực trên thị trường; L là tổng phụ tải trong khoảng thời gian xét; a và b là các hệ số giá điện.

Theo (11), doanh thu được xác định:

$$R_j = \sum_{t=T1}^{T2} \left[a \left(\sum_{k=1}^K L_k(t) + L^{\text{other}}(t) \right) + b \right] \left(L_j^{\text{base}}(t) - L_j(t) \right) - \sum_{t=T1}^{T2} k_j^{\text{com}} \left(L_j^{\text{base}}(t) - L_j(t) \right)^2 \quad (12)$$

Với $L_j(t) = \sum_{i=1}^{U_j} P_i(t)$, $L_j(t)$ và $L_k(t)$ là tải của tập j và k trong t (giờ); $L^{\text{other}}(t)$ là tổng của tất cả các tải không thể kiểm soát khác thời gian t (giờ); $L_j^{\text{base}}(t)$ là tải được lập kế hoạch trước của tập hợp j trong thời gian t (giờ); k_j^{com} thể hiện tác động của tập hợp j đối với người sử dụng; $t1$ và $t2$ biểu thị thời gian bắt đầu và kết thúc của việc bù (cắt giảm đỉnh tải) của LA; $T1$ và $T2$ tương ứng là thời gian bắt đầu và kết thúc của toàn bộ chu trình lập kế hoạch; K là tổng số bộ LA; U_j là số lượng nhóm ACL có trong tập hợp j . $P_i(t)$ là công suất của nhóm phụ tải thứ i tại thời điểm t (giờ).

Tài liệu [11] đã chỉ ra rằng một điều kiện để tồn tại trạng thái cân bằng Nash duy nhất là hàm lợi nhuận phải là một hàm liên tục và có thể được đạo hàm tại mọi điểm trong miền giá trị. Trong công thức (12), $L_j(t)$ là một biến rời rạc xác định theo ràng buộc ở công thức toán học (5). Bài báo này đề xuất áp dụng phương pháp tối ưu hóa phân cấp sử dụng các biến trung gian liên tục $Q_j(t)$. Trong mô hình tối ưu hóa cấp trên, tối ưu hóa được thực hiện để đạt được nghiệm cân bằng Nash, trong khi ở mô hình tối ưu hóa cấp độ thấp hơn, biến rời rạc thực tế $L_j(t)$ được tối ưu hóa để làm cho nó càng gần với biến liên tục $Q_j(t)$.

Đối với mỗi LA, hàm mục tiêu cấp trên của nó được xác định theo công thức toán (14). Các ràng buộc được giới thiệu trong công thức toán (15), (16) và (17).

$$\min F_j = \sum_{t=T1}^{T2} \left[k_j^{\text{com}} \left(L_j^{\text{base}}(t) - Q_j(t) \right)^2 \right] - \sum_{t=T1}^{T2} \left[a \left(\sum_{k=1}^K Q_k(t) + L^{\text{other}}(t) \right) + b \right] \left(L_j^{\text{base}}(t) - Q_j(t) \right) \quad (14)$$

$$Q_j^{\min}(t) \leq Q_j(t) \leq Q_j^{\max}(t) \quad (15)$$

$$W_j^{\min} \leq \sum_{t=T1}^{T2} Q_j(t) \leq W_j^{\max} \quad (17)$$

$$G^{\min}(t) \leq L_j^{\text{base}}(t) - Q_j(t) \leq G^{\max}(t) \quad (16)$$

$$\min G_j = \left(L_j(t) - Q_j(t) \right)^2 \quad (18)$$

Trong đó, $Q_j^{\min}(t)$ và $Q_j^{\max}(t)$ lần lượt biểu thị giới hạn dưới và giới hạn trên của công suất ACL ở LA thứ j tại giờ t . $G^{\min}(t)$ và $G^{\max}(t)$ lần lượt biểu thị giới hạn công suất trên và giới hạn dưới của lượng giảm phụ tải trên khu vực được điều độ tại t giờ. $W_j^{\min}$ và $W_j^{\max}$ thể hiện giới hạn dưới và giới hạn trên của tổng mức tiêu thụ điện năng ACL ở LA thứ j trong thời gian điều động.

Hàm mục tiêu cấp dưới được giới thiệu ở công thức toán (18) với các ràng buộc từ công thức (5) đến (13). Tối ưu hóa cấp trên lấy $Q_j(t)$ làm biến tối ưu hóa, tối ưu hóa cấp thấp hơn lấy $L_j(t)$ làm biến tối ưu hóa và kết quả thu được từ tối ưu hóa cấp cao hơn được sử dụng làm tham số đã biết trong tối ưu hóa cấp thấp hơn.

Tương tự như phương pháp giải rời giải cân bằng của trò chơi đã nêu trong tài liệu [14], bài báo này sử dụng phương pháp lặp vòng lặp để giải với phương pháp như sau: 1/ Đặt số vòng lặp $v=1$, cho trước vectơ giá trị ban đầu $Q^{(v)}$ của tải có thể giảm ở các mức khác nhau của tất cả các LA và đặt tiêu chuẩn hội tụ lặp ε , số tập hợp tải được tối ưu hóa $i = 1$, đặt $v = v+1$. 2/ Giải quyết giải pháp tối ưu cho LA thứ i và giả sử rằng chiến lược đặt giá thầu của các công cụ tổng hợp tải khác không thay đổi khi tìm giải pháp tối ưu. Cập nhật giải pháp tối ưu của trình tổng hợp tải

tương ứng vào $Q^{(k)}$. 3/ Đặt $i=i+1$. Nếu $i > K$, chuyển sang bước 4. Nếu $i \leq K$, quay lại ngay bước 2. 4/ Lưu tất cả các chiến lược đặt giá thầu LA hiện tại làm giá trị cuối cùng của lần lặp thứ v và sử dụng $\Delta^{(v-1)} = \|Q^{(v)} - Q^{(v-1)}\|_2$ làm chỉ số độ chính xác của lần lặp. Xác định xem $\Delta^{(k-1)} \leq \varepsilon$ có thỏa mãn hay không, nếu thỏa mãn thì trực tiếp đưa ra $Q^{(k)}$ là nghiệm cân bằng của trò chơi. Ngược lại đặt $i=1$, $v=v+1$ và quay lại bước 2.

3. Kết quả nghiên cứu

3.1. Tham số tính toán

Bài báo này chọn ACL ở khu vực cấp điện trong kỳ nghỉ hè làm ví dụ phân tích. Giả định rằng hầu hết người dùng tạm thời ở nhà trong kỳ nghỉ, tức là hầu hết máy điều hòa đều đang được sử dụng. Giả sử rằng trong khu vực đều có tổng cộng có 4325 ACL. Tỷ lệ tham gia đáp ứng nhu cầu trong ngày là 83%, có 03 LA trong khu vực và số lượng máy điều hòa mà mỗi LA có thể điều phối lần lượt là 1453, 1019 và 1118, thông số ξ và θc của tất cả các ACL đều thỏa mãn phân bố $N(0,96, 0,0016)$, $N(39, 0,7)$, giả sử rằng công suất điện của tất cả ACL tại thời điểm chúng được bật là 4 kW.

Giả sử nhiệt độ cài đặt của ACL trước khi tham gia điều độ là $25 \pm 0,5^\circ\text{C}$, LA có thể tính toán tải nền của ACL trước khi điều động dựa trên các thông số đặc tính thu thập được của từng máy. Tải cơ sở của ACL trước khi điều động, các tải cơ sở không thể kiểm soát khác và đường cong thay đổi nhiệt độ ngoài trời được thể hiện trên Hình 4. Từ hình vẽ có thể thấy rằng trước khi điều động, tải ACL có mối tương quan dương với nhiệt độ ngoài trời, tức là nhiệt độ ngoài trời càng cao thì công suất của tải ACL. Tổng công suất phụ tải cao hơn trong khoảng thời gian từ 19h đến 23h đêm nên khoảng thời gian này được chỉ định là thời gian cắt đỉnh, tức là công ty điện lực sẽ đền bù dựa trên số lượng cắt đỉnh trong giai đoạn này. Các tham số giá a và b cho việc cắt đỉnh lưới điện lần lượt là $8,25 \times 10^{-5}$ và 0,2, trong khi các tham số giá bồi thường mà LA đưa ra cho người dùng đều được giả định là 1,57 (đồng)/(kW). Để đảm bảo thời gian điều độ bao trùm thời gian cao điểm của phụ tải ACL và thời gian cao điểm của tổng phụ tải điện sinh hoạt, thời gian điều độ ban đầu được ấn định từ 16 giờ chiều đến 2 giờ sáng.

3.2. Phân tích hiệu quả

Theo phương pháp phân loại được đưa ra, người sử dụng ACL do mỗi LA điều khiển được nhóm thành 10 nhóm. Sau đó, các thông số đặc tính tổng thể của từng nhóm máy sau khi phân nhóm được thay thế vào mô hình tối ưu hóa phân cấp để giải quyết. Trong quá trình lặp đi lặp lại việc tìm nghiệm cân bằng của hàm mục tiêu cấp trên, chỉ số độ chính xác lặp của nó giảm xuống 0 trong vòng 6 lần lặp, điều này cho thấy phương pháp giải lặp của trò chơi cân bằng Nash được sử dụng trong bài viết này có tốc độ tính toán nhanh và hiệu quả cao. Ngôn ngữ lập trình bậc cao GAMS [15] được sử dụng để giải quyết bài toán tối ưu.

Phần này sẽ mô phỏng mô hình không hợp tác của các bộ LA trong các khoảng thời gian lập lịch khác nhau để phân tích tác động của độ dài thời gian lập lịch. Lấy thời gian cắt giảm cao điểm làm trung tâm của chu kỳ điều độ, thu nhập ròng của mỗi LA trong các khoảng thời gian điều độ khác nhau được thể hiện trong bảng 1.

Từ bảng 1, ta nhận thấy rằng khi chu kỳ lập kế hoạch giảm, thu nhập ròng của tất cả các (LA) ban đầu tăng rồi giảm. Nguyên nhân là do thời gian điều phối quá dài, LA bù đắp cho việc sử dụng tải điều hòa không khí trong những khoảng thời gian không cần thiết, làm tăng chi phí bồi thường; ngược lại, thời gian điều phối ngắn sẽ không đủ để bù đắp cho việc sử dụng tải điều hòa không khí trong thời gian cắt giảm cao điểm. Tải điều hòa không khí được chuyển sang giai đoạn cắt giảm đỉnh, giảm lợi ích này của LA. Trong ví dụ tính toán, tối ưu hóa lịch trình cho khoảng thời gian lập kế hoạch từ 17:00 đến 1:00 mang lại tổng thu nhập ròng lớn nhất.

Bảng 1. So sánh thu nhập ròng của các đơn vị tổng hợp phụ tải trong các giai đoạn lập kế hoạch khác nhau

Chu kỳ		Thu nhập ròng/đồng			Tổng thu nhập ròng/đồng
Thời gian bắt đầu	Thời gian kết thúc	Tập hợp tải 1	Tập hợp tải 2	Tập hợp tải 3	
16:00	2:00	3.476.585	2.555.595	2.743.055	8.775.235
17:00	1:00	3.532.130	2.584.330	2.793.700	8.910.160
18:00	0:00	3.524.465	2.576.735	2.779.945	8.881.145
19:00	23:00	2.507.820	1.816.360	1.861.755	6.185.935

Bảng 2. So sánh chi phí và lợi nhuận của bộ tổng hợp tải trong hai kịch bản (KB)

		Tập hợp tải 1	Tập hợp tải 2	Tập hợp tải 3
Lợi nhuận/đồng	KB 1	1134,49	802,44	874,54
	KB 2	885,02	601,63	642,79
Bồi thường người dùng/đồng	KB 1	125,31	64,06	76,34
	KB 2	104,66	53,32	64,33
Thu nhập ròng/đồng	KB 1	1009,18	738,38	798,20
	KB 2	780,37	548,30	578,46

Về chỉ số kinh tế sau khi tối ưu hóa, bài viết so sánh ba kịch bản. Kịch bản 1 tối ưu hóa dựa trên mô hình chênh lệch nhiệt độ-công suất, Kịch bản 2 tối ưu hóa LA theo công thức toán (3), và Kịch bản 3 tất cả các máy điều hòa không tham gia vào quá trình cắt giảm đỉnh. Chi phí và lợi ích ròng đều là 0 trong Kịch bản 3. Bảng 2 thể hiện tình hình chi phí-lợi ích của LA trong Kịch bản 1 và Kịch bản 2. Đối với Công ty điện lực, rõ ràng chiến lược điều độ trong kịch bản 1 có thể giảm thiểu tác động bất lợi của đỉnh phụ tải lên lưới điện.

4. Kết luận

1) Mô hình tối ưu phân cấp tải dựa trên đặc tính nhiệt – công suất được đề xuất trong bài viết này phù hợp cho việc lập lịch trình theo giờ của ACL, cung cấp một phương pháp linh hoạt và hiệu quả để lập lịch trình định kỳ dài hạn cho máy điều hòa không khí.

2) Dựa trên ngưỡng nhiệt độ trên, dưới và các thông số đặc tính mức công suất trong mô hình, việc phân cụm phụ tải ACL có thể đạt được hiệu ứng phân cụm tốt với các thông số đặc trưng của cùng một nhóm máy điều hòa không khí không có nhiều sai khác.

3) Trong mô hình đề xuất dựa trên các đặc tính chênh lệch công suất-nhiệt độ tải ACL được thiết lập trong bài viết này, thời gian điều phối quá dài hoặc quá ngắn đều không có lợi cho tính kinh tế của LA. Các chỉ tiêu chính bị ảnh hưởng bởi thông số giá điện là chi phí và lợi ích của LA, có tác động nhất định đến phụ tải đỉnh nhưng tác động không đáng kể.

Mô hình chênh lệch nhiệt độ-công suất của ACL được đề xuất trong bài viết này có ý nghĩa mở rộng nhất định đối với các phụ tải dân dụng khác có đặc tính lưu trữ năng lượng, chẳng hạn như xe điện, máy nước nóng,... Trong tương lai, có thể tiến hành nghiên cứu sâu hơn về việc điều phối tối ưu chung nhiều loại tải và xét đến tính ngẫu nhiên của chúng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] B. R. Zhou, T. C. Huang, and Y. J. Zhang, "Reliability Analysis on Microgrid Considering Incentive Demand Response," *Automation of Electric Power Systems*, vol. 41, no. 13, pp. 70-78, 2017.
- [2] W. Yang, Z. J. Zeng, H. Y. Chan, et al., "Research on Demand Response Trading Mechanism in Guangdong Electricity Market," *Guangdong Electric Power*, vol. 30, no. 5, pp. 25-34, 2017.

-
- [3] Y. J. Zhang and J. B. Hao, "Air Conditioning Load Optimization Dispatching Model Considering Users' Comfort Compensation," *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, vol. 47, no. 03, pp. 1-8, 2019.
 - [4] T. T. Ha, "Optimizing the usage schedule for air conditioning load based on load aggregator," *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 225, no. 06, pp. 284-291, 2020.
 - [5] Y. L. Wang, Y. B. Tong, M. Huang, *et al.*, "Research on Virtual Energy Storage Model of Air Conditioning Loads Based on Demand Response," *Power System Technology*, vol. 41, no. 02, pp. 59-66, 2017.
 - [6] Y. B. Qibai, D. Wang, H. J. Jia, *et al.*, "Demand Response Control Strategy for Central Air-conditioner Based on Temperature Adjustment of Partial Terminal Devices," *Automation of Electric Power Systems*, vol. 39, no. 17, pp. 82-88, 2015.
 - [7] T. F. Lee, M. Y. Cho, Y. C. Hsiao, *et al.*, "Optimization and Implementation of a Load Control Scheduler Using Relaxed Dynamic Programming for Large Air Conditioner Loads," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 2, pp. 691-702, 2008.
 - [8] C. W. Gao, Q. Y. Li, and Y. Li, "Bi-level Optimal Dispatch and Control Strategy for Air-conditioning Load Based on Direct Load Control," *Proceedings of the CSEE*, vol. 34, no. 10, pp. 1546-1555, 2014.
 - [9] W. Ling, Y. Mao, and G. Kun, "Fast Community Detection Based on Integration of Non-cooperative and Cooperative Game," *CCF Conference on Computer Supported Cooperative Work and Social Computing*, Singapore: Springer, 2023, pp. 276-286.
 - [10] L. Ma, N. Lui, J. H. Zhang, *et al.*, "Optimal Operation Model of User Group With Photovoltaic in the Mode of Automatic Demand Response," *Proceedings of the CSEE*, vol. 36, no. 13, pp. 3422-3432 +3361, 2016.
 - [11] X.-F. Liu, B. -T. Gao, J. Luo, *et al.*, "Non-cooperation Non-Cooperative Game Based Hierarchical Dispatch Model of Residential Loads," *Automation of Electric Power Systems*, vol. 41, no. 14, pp. 54-60, 2017.
 - [12] Y. Zhang, *et al.*, "Impact of air-conditioning usage behavior of student groups on air-conditioning load simulation in university dormitories," *Energy and Buildings*, vol. 303, 2024, Art. no. 113765.
 - [13] S. -X. Wang, Z. -Q. Sun, and Z. Liu, "Co-scheduling Strategy of Home Energy for Smart Power Utilization," *Automation of Electric Power Systems*, vol. 17, pp. 108-113, 2015.
 - [14] Y.-X. Liu, L. Guo, and C. -S. Wang, "Optimal Bidding Strategy for Microgrids in Electricity Distribution Market," *Power System Technology*, vol. 08, pp. 71-78, 2017.
 - [15] 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.