

激励条件下的大规模空调负荷聚合集群优化策略

汤卓凡^{1,2}, 赵建立^{1,2}, 郑庆荣^{1,2}, 赵希超³, 石杰³

(1. 国网上海市电力公司, 上海 200030; 2. 上海市智能电网需求响应重点实验室, 上海 200030; 3. 国网电力科学研究院有限公司, 南京 211106)

摘要:为提高大规模空调负荷聚合精度、提升空调集群可调节潜力,提出了激励条件下的大规模空调负荷聚合集群优化策略。首先建立了大规模空调负荷聚合架构,然后建立单体的二阶空调等值热力参数模型,同时基于蒙特卡洛方法对不同区域的空调负荷进行二次聚合,建立用户满意度与激励水平之间的关系。在此基础上,以实际空调聚合功率与缺口负荷之间的标准差最小、空调负荷聚合商补偿费用最少为优化目标,采用粒子群算法进行求解,最后通过算例说明了本文所提策略的有效性。

关键词:大规模空调;空调负荷集群;负荷聚合商;用户激励

Optimization strategies for large scale air conditioning load aggregation clusters under incentive conditions

TANG Zhuofan^{1,2}, ZHAO Jianli^{1,2}, ZHENG Qingrong^{1,2}, ZHAO Xichao³, SHI Jie³

(1. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200030, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Smart Grid Demand Response, Shanghai 200030, China; 3. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of large-scale air conditioning load aggregation and enhance the adjustable potential of air conditioning clusters, an optimization strategy for large-scale air conditioning load aggregation clusters under incentive conditions is proposed. Firstly, a large-scale air conditioning load aggregation architecture is established. Secondly, a second-order equivalent thermal parameter model for individual air conditioners is established, and the air conditioning loads in different regions are secondary aggregated based on the Monte Carlo method. Meanwhile, the relationship between user satisfaction and incentive levels is established. On this basis, optimization objective is to minimize the standard deviation between actual air conditioning aggregated power and the gap load, and to minimize the compensation cost for the air conditioning load aggregator. Particle swarm optimization algorithm is used to solve the problem. Finally, effectiveness of the proposed strategy is demonstrated through numerical examples.

Key words: large scale air conditioning; air conditioning load cluster; load aggregator; user incentives

0 引言

在沿海经济发达省份,空调负荷在用户侧的占比高达35%^[1],并呈现逐年上升趋势。空调负荷因其可控性强、调度潜力大等特点,被国内外很多学者作为需求侧响应资源来研究,用于辅助参与电网调节峰谷差,平滑负荷曲线^[2-3]。目前对大规模空调负荷辅助电网削峰的研究主要是从聚合方法、优化策略两方面开展。在空调负荷聚合方法方面,文献[4-5]基于一阶等效热力学模型建立同质空调的温度控制聚合模型。文献[6]在文献[5]的基础上考虑了空调之间的异质性,提出了一种改进的聚合建模方法,将空调按额定制冷量分

组,并通过模糊C-均值聚类算法进行聚类,提高了受控群电功率的模拟精度。文献[7-8]考虑了不同空间下参数分布的差异性,提出了分区负荷聚合方法,建立了多类型区域的空调负荷的均值聚合模型;在优化策略方面,文献[9]将负荷聚合商作为中介,建立了成本最小化的负荷聚合模型;文献[10]重点考虑人体舒适度,建立了人体舒适度最大及负荷缺口与空调压降最小的模型;文献[11]在文献[10]的基础上优化了空调负荷压降方式,通过多频次的对多组物理参数相近的空调进行温度控制,更加精确地填补负荷缺口。

综合已有研究,本文发现:一是现有聚合方法主要是将不同区域的影响因素平均化,进一步扩大了空调负荷聚合误差;二是现有优化策略缺少对空调用户满意度和负荷聚合商激励手段之间的关联性考虑。

为此,本文考虑不同物理条件对空调负荷的影响,

收稿日期:2023-12-16;修回日期:2024-01-29

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5400-202340383A-2-3-XG)

采用蒙特卡洛方法对不同区域负荷进行二次聚合。考虑用户满意度与激励水平之间的关系,建立实际空调聚合功率与缺口负荷之间的标准差最小以及负荷聚合商补偿费用最小为优化目标,采用粒子群算法进行求解。

1 大规模空调负荷聚合优化架构

本文建立的大规模空调负荷聚合优化架构如图1所示,该架构主要由3个部分构成:电力调度中控、空调负荷聚合商以及空调用户。电力调度中控根据负荷聚合商上报的空调负荷可调控潜力制定调控计划并下发给负荷聚合商;空调负荷聚合商负责汇集空调用户上报的用电信息并聚合不同区域的空调负荷,将可调控潜力上报给电力调度中心,同时将调度计划进行分解形成不同激励等级的调控温度并下发给空调用户;空调用户根据下发的调温要求以及电价选择是否响应。

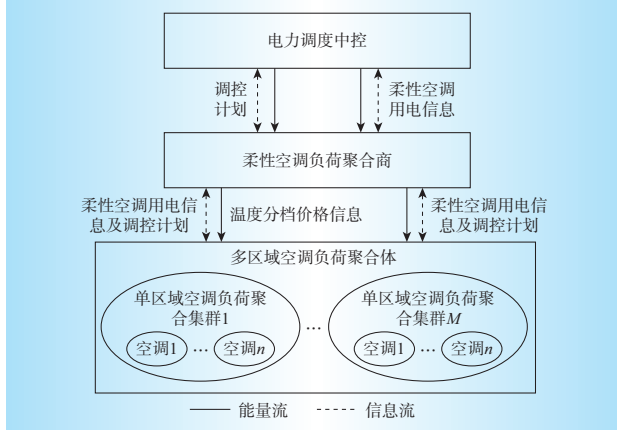


图1 柔性空调负荷调控架构

Fig. 1 Flexible air conditioning load control architecture

2 单体空调负荷等效模型

空调负荷二阶等值热力学参数模型如图2所示。

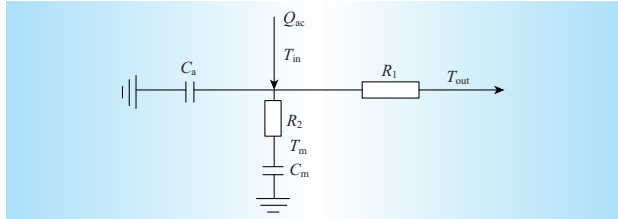


图2 空调负荷二阶等效模型

Fig. 2 Second-order equivalent model of air conditioning load

本文基于图2所示模型构建单体空调负荷二阶等效模型的状态空间方程,如下所示^[12]

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}u \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \dot{T}_{in} \\ \dot{T}_m \end{bmatrix}, \mathbf{x} = \begin{bmatrix} T_{in} \\ T_m \end{bmatrix} \\ u = 1, \mathbf{y} = [T_{in}] \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_a}(\frac{R_1+R_2}{R_1R_2}) & \frac{1}{R_2C_a} \\ \frac{1}{R_2C_m} & -\frac{1}{R_2C_m} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{T_{out} \pm R_1Q_{ac}S(t)}{R_1C_a} \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

$$s(t) = \begin{cases} 0 & T_{in}(t) \leq T_{min} \\ 1 & T_{in}(t) \geq T_{max} \\ s(t-1) & T_{min} < T_{in}(t) < T_{max} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} T_{min} = T_{set} - \frac{\theta}{2} \\ T_{max} = T_{set} + \frac{\theta}{2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: T_{in} 为室内温度, $^{\circ}\text{C}$; T_m 为室内固体温度; R_1 为空气热阻; R_2 为室内固体热阻; C_a 为室内气体比热容, $\text{J}/^{\circ}\text{C}$; C_m 为固体比热容, $\text{J}/^{\circ}\text{C}$; T_{out} 为室外温度, $^{\circ}\text{C}$; Q_{ac} 为空调的制冷/制热量; $S(t)$ 为开关变量; T_{min} 、 T_{max} 分别为室内温度的最小和最大值, $^{\circ}\text{C}$; T_{set} 为用户设定的温度, $^{\circ}\text{C}$; θ 为空调的温度死区。

在二阶等效热参数模型中,参数 R_1 、 C_a 、 R_2 、 C_m 是描述空调负荷热力学特性的重要参数,其满足均匀分布或正态分布,将其离散化计算如下

$$X(t_{in+1}) = X(t_{in}) + \Delta t [AX(t_{in}) + BX(t_{in})] \quad (6)$$

式中: X 为状态向量。

从而得到 $T_{in}(t)$ 的离散化的计算公式如下

$$T_{in}(t_{n+1}) = \left(1 - \frac{\Delta t_n}{C_a} \left(\frac{R_1+R_2}{R_1R_2}\right)\right) T_{in}(t_n) + \frac{\Delta t_n}{C_a R_2} T_m(t_k) + \frac{\Delta t_n}{C_a} \left(\frac{T_0(t_n)}{R_1} - S(t_n)Q_{ac}\right) \quad (7)$$

$$T_m(t_{n+1}) = \frac{\Delta t_k}{C_m R_2} T_{in}(t_n) + \left(1 - \frac{\Delta t_k}{C_m R_2}\right) T_m(t_n) \quad (8)$$

根据式(7)一式(8)可得 t 时刻的 T_{in} 变化以及空调开关变化。

3 大规模空调负荷聚合集群及可调节潜力评估

3.1 模型建立

3.1.1 单区域的一次聚合模型

根据式(7)一式(8),利用蒙特卡洛法求出单区域内各个空调的工作状态。假设某一区域内有 N 台空调,每台空调的运行状态为 $K_{on,i}(t)$,每台空调的额定功率为 $P_{ac,i}$ 。根据大数定律,单区域聚合负荷任意时刻 t 的平均运行状态及功率可表示为

$$P_{all}(t) = \sum_{i=1}^N P_{ac,i} K_{on,i}(t) \quad (9)$$

$$K_{on}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N p_{on,i}(t)}{N} \quad (10)$$

$$p_{on,i}(t) = \frac{t_{on,i}}{t_{on,i} + t_{off,i}} \quad (11)$$

式中: $K_{on}(t)$ 为 t 周期内空调开机时长; $P_{ac,i}$ 为第 i 台空调的额定功率; $p_{on,i}(t)$ 为第 i 个空调在 t 周期内的开机时长; $t_{on,i}$ 为第 i 台空调开机的时间; $t_{off,i}$ 为第 i 台空调关闭时间。

3.1.2 多区域的二次聚合模型

为准确反映不同环境参数分布特性差异,采用了分区空调负荷聚合方法。先将参数分布特性相似的空调负荷聚合在同一区域,然后在各区域聚合结果的基础上进行二次聚合,以获得更精确的聚合模型。

根据式(9)聚合任一区域的空调,再由公式(12)进行二次聚合,得到 M 个区域的空调运行状态及总的空调功率,表示如下

$$P_{all-M} = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} P_{ij} K_{all-on-M}(t) \quad (12)$$

$$K_{all-on-M} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left(\frac{\sum_{i=1}^{N_j} K_{on-ij}(t)}{N_j} \right) \quad (13)$$

式中: M 为总区域个数; N_j 为第 j 个区域空调台数; P_{ij} 为在 j 区域第 i 台空调的额定功率; $K_{all-on-M}(t)$ 为 j 区域空调在 t 时刻的工作状态。

3.2 可调节潜力评估

对于大规模空调集群来说,其温度设定值的调整量是空调可调度潜力大小的直接影响因素,在同一室外温度下,设定温度 T_{set} 调整越高,聚合功率的值减小越多,则调度潜力越大。定义大规模空调集群温度设定值为 23°C 时的平均聚合功率为参考功率^[7],其值为 P_{ref} ,调整设定温度后平均聚合功率大小为 P_{all-M} ,调控潜力 $P_{ac,t}^{all}$ 为两者之差

$$P_{ac,t}^{all} = P_{t,ref} - P_{t,all-M} \quad (14)$$

4 考虑用户满意度的空调负荷聚合商激励模型

为了提高用户参与空调负荷削减的积极性,并确保舒适度要求,本文改进了传统的温度控制方式,引入了温度分档调控激励模型。空调负荷聚合商需要考虑不同温度档位下用户的满意情况,并设置相应的激励价格。

本文建立用户不满意度(U)与分档温度激励价格之间的关系,计算公式如式(15)一式(16)所示。不同温度档位的激励价格是根据它们各自 U 之间的相对关系来确定的。本文将激励档位划分为4个,起始温度为 23°C ,每升高 1°C 对应1个档位,根据式(16)可以计算出相应控制档位的激励费用

$$U = \frac{T_{unsat}}{T_{ac-control}} \quad (15)$$

$$C_p = C_q \left(1 + \frac{u_p - u_q}{u_q} \right) \quad (16)$$

式中: U 为用户的满意度; T_{unsat} 为用户被控的不满意时间; $T_{ac-control}$ 为空调受控的总时间; C_q 为 q 档的激励电价; C_p 为 p 档的激励电价; u_p 为第 p 档位空调用户不满意度; u_q 第 q 档位空调用户不满意度。

5 基于激励条件下的大规模空调负荷集群实时优化策略

5.1 优化目标

为了快速影响电网的调控目标,同时考虑负荷聚合商的运行效益,本文建立了大规模空调负荷实际空调聚合功率与缺口负荷之间的标准差最小以及负荷聚合商补偿费用最小两个目标函数,具体如下:

(1) 大规模空调负荷实际聚合功率与缺口负荷之间标准差最小

$$F_{1,min} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n \left((P_{demand,t} - P_{ac,t}^{all}) - (\bar{P}_{demand} - \bar{P}_{ac}^{all}) \right)^2}{n-1}} \quad (17)$$

$$P_{demand,t} = P_{ac,before,t}^{all} (1 - \alpha) \quad (18)$$

式中: $P_{demand,t}$ 为 t 时刻空调负荷削减量; $\bar{P}_{demand}$ 为平均空调负荷削减量; $P_{ac,before,t}^{all}$ 为 t 时刻未受控前空调负荷的聚合功率; $P_{ac,t}^{all}$ 为 t 时刻受控后空调负荷的聚合功率; $\bar{P}_{ac}^{all}$ 为受控后空调负荷的平均聚合功率; α 为削减比例。

(2) 空调负荷聚合商激励费用最低

$$F_{2,min} = \sum_{k=1}^4 \sum_{t=t_1}^{T_{ac-control}} C_{p,t}^k P_{ac,t}^{all} \quad (19)$$

式中: $C_{p,t}^k$ 为空调负荷聚合商给用户的不同激励价格。

为了提高求解效率,本文采用线性加权的方法,将多目标求解转为单目标进行求解,表示如下

$$F_{min}^{all} = \lambda_1 F_{1,min} + \lambda_2 F_{2,min} \quad (20)$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1 \quad (21)$$

式中: λ_1 、 λ_2 分别为 $F_{1,min}$ 、 $F_{2,min}$ 目标对应的权重,根据熵权法可求取对应的权重。

5.2 约束条件

(1) 人体舒适度约束

为保证用户舒适度,对于聚合空调负荷之中的各个单机空调而言,应使得其温度调整量不能超过最大调整范围,即

$$T_t^{\text{dr}} - T_t^{\text{set}} \leq \Delta T_{\text{max}} \quad (22)$$

式中: T_t^{dr} 为 t 时刻负荷聚合商对空调的调控温度; T_t^{set} 为 t 时刻空调用户设定温度; ΔT_{max} 为最大调整量。

(2) 空调负荷群聚合可调节潜力约束

空调负荷群聚合可调节潜力不超过理论上空调负荷群聚合功率,约束如下

$$0 < P_{\text{ac}}^{\text{all}} \leq P_{\text{ac,actual}}^{\text{all}} \quad (23)$$

式中: $P_{\text{ac}}^{\text{all}}$ 为实际空调负荷群聚合可调节潜力; $P_{\text{ac,actual}}^{\text{all}}$ 为理论上空调负荷群聚合功率。

(3) 室温变化上下限约束

$$T_{\text{min}}(t) \leq T_{\text{in}}(t) \leq T_{\text{max}}(t) \quad (24)$$

式中: $T_{\text{min}}(t)$ 、 $T_{\text{max}}(t)$ 分别为 t 时刻室内最小、最大温度; $T_{\text{in}}(t)$ 为 t 时刻室内温度。

(4) 空调最小停机时间约束

$$\begin{cases} t_{\text{on},i} \geq t_{\text{on}}^{\text{min}} \\ t_{\text{off},i} \geq t_{\text{off}}^{\text{min}} \end{cases} \quad (25)$$

式中: $t_{\text{on},i}$ 为第 i 台空调开的时间; $t_{\text{off},i}$ 为第 i 台空调关闭的时间。 $t_{\text{on}}^{\text{min}}$ 、 $t_{\text{off}}^{\text{min}}$ 分别为空调最小开机时长和最小的停机时长,一般取 3 min 和 5 min。

(5) 用户不满意约束

$$0 \leq U \leq 100\% \quad (26)$$

式中: U 为用户不满意度。

6 算例分析

6.1 参数设置

本文以某市不同区夏季小商业和居民的分体式空调为研究对象,选择 A、B、C 3 个不同区的夏季典型日,其温度曲线如图 3 所示,以调控时段内各个区域的平均温度作为该时段的实际室外温度。A 区域空调 800 台, B 区域空调 1 200 台, C 区域空调 5 000 台,假设各个区域内不同匹级的空调重要参数满足均匀分布或正态分布,利用蒙特卡洛模拟对各参数根据其概率分布进行抽样,其参数由国网公司和第 3 方企业联发的家电云平台提供,具体参数如表 1 所示。

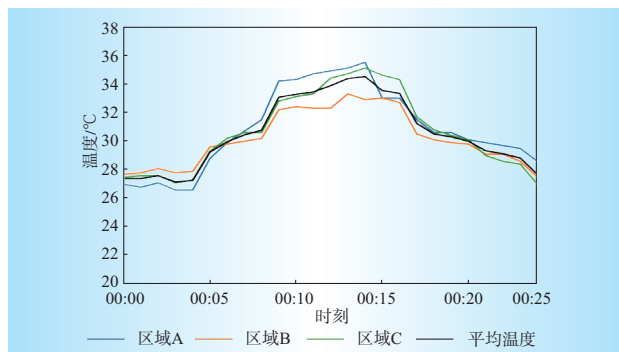


图 3 不同区域温度曲线

Fig. 3 Temperature curves in different regions

表 1 不同区域空调参数设置

Table 1 Setting of air conditioning parameters in different regions

空调参数	A 区域	B 区域	C 区域
N / 台	800	1 200	5 000
R_1 / ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{kW}^{-1}$)	[3,8]	[8,23]	[23,48]
C_a / ($\text{kWh} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)	[0.25,0.30]	[1.50,2.00]	[1.75,2.50]
R_2 / ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{kW}^{-1}$)	[1.2,2.0]	[1.7,2.5]	[2.2,3.0]
C_m / ($\text{kWh} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)	[70,100]	[100,130]	[130,160]
T_{out} / $^{\circ}\text{C}$	[26.7,35.4]	[27.6,33.2]	[27.2,35.0]
T_{in} / $^{\circ}\text{C}$	[25,27]	[25,27]	[25,27]
θ / $^{\circ}\text{C}$	[0.5,0.8]	[0.6,0.9]	[0.9,1.0]
Q_{AC} / kW	[6.0,7.5]	[6.5,8.0]	[7.0,8.5]

6.2 不同参数聚合与采用均值参数聚合效果分析

本文设定 05:00—21:00 属于空调运行阶段,分别采用本文提出的考虑不同参数的二次聚合方法和文献[9]提出的采用参数均值的聚合方法对 A、B、C 区域的空调负荷进行聚合,如图 4 所示。

图 4 中空调负荷 a_1 表示考虑不同参数的二次聚合方法;空调负荷 a_2 表示采用参数均值的聚合方法;总负荷 a_1 表示由空调负荷 a_1 叠加基础负荷形成的总负荷;总负荷 a_1 表示由空调负荷 a_2 叠加基础负荷形成的总负荷。

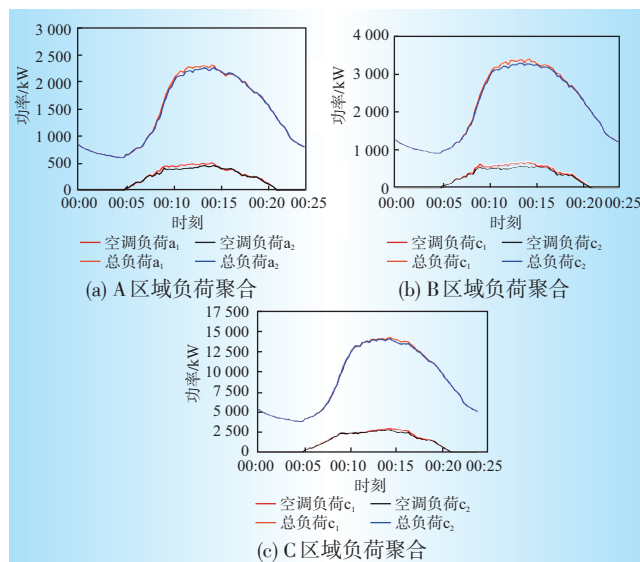


图 4 考虑不同参数和采用均值参数的空调集群聚合对比

Fig. 4 Comparison of air conditioning cluster aggregation considering different parameters and using mean parameters

由图 4 可以看出,考虑不同参数的二次聚合方法要比采用参数均值的聚合方法聚合的功率更多。A 区域采用本文提出的聚合方法可聚合 5.364 MW;采用参数均值的聚合方法可聚合 5.013 MW;B 区域采用本文提出的聚合方法可聚合 7.224 MW;采用参数均值的聚合方法可聚合 6.414 MW;C 区域采用本文

提出的聚合方法可聚合 30.932 MW;采用参数均值的聚合方法可聚合 29.695 MW。采用本文提出的聚合方法总聚合 43.52 MW,采用参数均值的聚合方法共可聚合 41.122,提升率为 5.83%。

6.3 激励条件下的空调负荷集群削峰效果分析

为进一步提高空调负荷聚合潜力,本文通过激励手段调动空调用户的积极性,通过式(15)一式(16)将设置不同的温度划分为不同的激励档。假设在早峰时段 13:00—15:00,电力调度中控向空调负荷聚合商发出削减峰值负荷的 5%作为调控指令,负荷聚合商接收调度指令后,计算出适合的温度调控区间并根据其制定出激励价格,如表 2 所示。同时将调温指令下发给空调用户,有/无激励条件下的不同区域削减负荷如图 5 所示。有/无激励条件下的空调集群削峰图如图 6 所示。

表 2 不同档位的激励价格

Table 2 Incentive prices for different gears		
温度档位	设置温度区间	激励价格/元
一档	[24,25]	0.25
二档	[25,26]	0.30
三档	[26,27]	0.49
四档	[27,28]	0.65

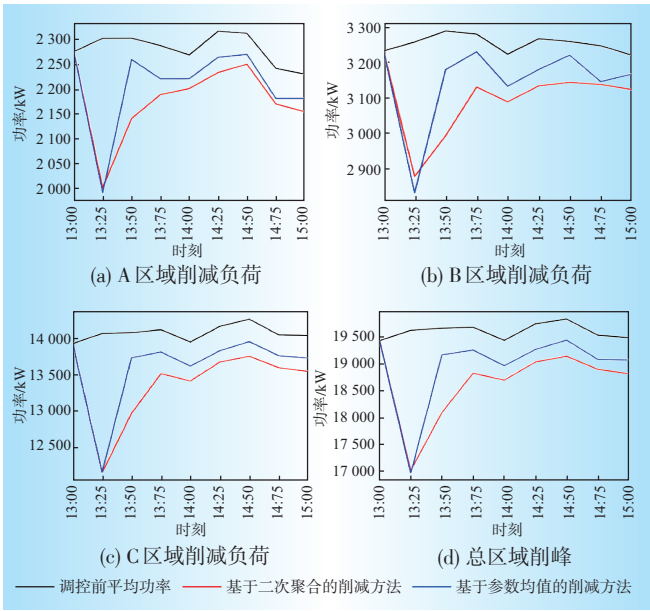


图 5 有/无激励条件下的不同区域削减负荷

Fig. 5 Load reduction diagrams for different regions with/without incentives

由图 5 可以看出各个区域在无激励条件下空调负荷的削减量较低,并且采用本文提出的方法要比采用参数均值的聚合方法削减量高。

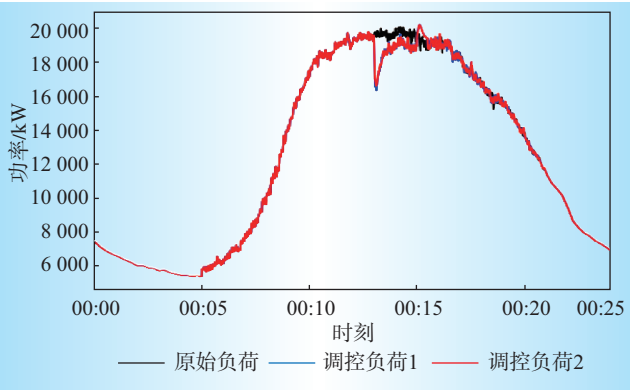


图 6 有/无激励条件下的空调集群削峰

Fig. 6 Peak shaving of air conditioning cluster with/without excitation conditions

图 6 中调控负荷 1 表示有激励调控,调控负荷 2 表示无激励调控。结合图 5 和图 6 可以看出,空调负荷集群可以快速响应,有激励调控的削减率为 95.25%,无激励调控的削减率为 89.25%。

表 3 不同区域聚合空调台数百分比

Table 3 Percentage of aggregated air conditioning units in different regions				
激励条件	温度设置/℃	聚合空调台数百分比/%		
		A 区域	B 区域	C 区域
无激励	24	2.9	4.3	16.8
	25	2.8	5.1	16.8
	26	3.0	3.6	18.7
	27	2.7	4.1	19.1
	28	0	0	0
有激励	24	0.5	0.1	1.1
	25	2.8	1.3	3.0
	26	0.3	3.8	13.2
	27	2.7	6.2	26.5
	28	3.9	5.7	27.6

不同区域在有/无激励情况下的空调台数占比如表 3 所示。从表 3 可以看出在无激励情况下,A、B、C 区域用户为了保证自己的舒适度,将温度调的较低,其中空调温度设置在 24~26 ℃ 的占比为 74%;在激励情况下,A、B、C 区域用户积极响应,其中空调温度设置在 24~26 ℃ 的占比为 27.4%,72.6%的用户将空调温度设置在 27~28 ℃。负荷聚合商的运行成本如表 4 所示,在无激励情况下,负荷聚合商的运行成本为 686.155 元,在激励情况下,负荷聚合商的运行成本为 412.950 元。基于文献[13]的空调聚合模型进行优化求解得出:在无激励情况下,负荷聚合商的运行成本为 701.121 元,在激励情况下负荷聚合商的运行成本为 451.248 元,在激励条件下的负荷聚合商运行成本可降低 8.48%。

表4 不同方式下的负荷聚合商运行成本对比

Table 4 Comparison of operating costs of load aggregators under different methods

方法	激励条件	负荷聚合商运行成本/元
本文方法	无激励	686.155
	有激励	412.950
采用参数均值的聚合方法	无激励	701.121
	有激励	451.248

综上所述,本文提出的大规模空调集群优化策略通过需求侧管理手段,一方面可以积极调动空调用户参与性,另一方面可以降低负荷聚合商的运行成本,为实际的工程应用提供理论指导。

7 结束语

为充分发挥大规模空调负荷集群辅助电网削峰,提高大规模空调负荷集群可调节潜力,本文提出了激励条件下的大规模空调负荷聚合集群优化策略,并通过算例验证了本文的大规模空调负荷集群聚合方法比基于参数均值的聚合方法聚合的精度更高、可调节潜力更大,并且负荷聚合商的运行成本最少。D

参考文献:

- [1] 赵建立,赵本源,顾兆雄,等. 基于全局温度调整的中央空调需求响应策略与评价方法[J]. 电力需求侧管理, 2022, 24(3): 35-40.
ZHAO Jianli, ZHAO Benyuan, GU Zhaoxiong, et al. A central air conditioning demand response strategy and evaluation method based on global temperature adjustment [J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(3): 35-40.
- [2] 朱肖晶,朱兵,王科,等. 中央空调节能控制系统的技术应用分析[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(2): 25-28.
ZHU Xiaojing, ZHU Bing, WANG Ke, et al. Technical application analysis of central air conditioning energy saving control system [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(2): 25-28.
- [3] LU J, HU J, YU J, CAO J. Two-stage robust scheduling and real-time load control of community microgrid with multiple uncertainties [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 155: 109 684.
- [4] 杨悦,宋良泰. 考虑用户需求响应的空调负荷日前-实时聚合调控[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(5): 529-537.
YANG Yue, SONG Liangtai. Real time aggregation regulation of air conditioning load considering user demand response [J]. Global Energy Internet, 2023, 6(5): 529-537.
- [5] 陆婷婷. 空调负荷的储能建模和控制策略研究[D].

南京:东南大学, 2016.

LU ting ting. Research on energy storage modeling and control strategies for air conditioning load [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.

- [6] 楼家辉,杨欢,王京,等. 考虑异质性的定频空调负荷聚合建模及功率跟踪策略[J]. 电力建设, 2017, 38(11): 55-63.
LOU Jiahui, YANG Huan, WANG Jing, et al. Modeling and power tracking strategy for fixed frequency air conditioning load aggregation considering heterogeneity [J]. Electric Power Construction, 2017, 38(11): 55-63.
- [7] 葛罗,冯焯,胡凯,等. 新型电力系统下空调负荷聚合建模及可控潜力评估[J]. 浙江电力, 2023, 42(4): 45-53.
GE Luo, FENG Xuan, HU Kai, et al. Modeling of air conditioning load aggregation and evaluation of controllable potential in a new power system [J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(4): 45-53.
- [8] 何俊,傅广努,黄海涛. 多重响应潜力影响因素作用下的变频空调负荷调控方案[J]. 现代电力, 2023, 40(4): 495-504.
HE Jun, FU Guangnu, HUANG Haitao. Variable frequency air conditioning load control scheme under the influence of multiple response potential influencing factors [J]. Modern Electric Power, 2023, 40(4): 495-504.
- [9] 董佳瑜,王辉,赵文会,等. 考虑空调负荷响应潜力的配电网电力弹性平衡方法[J]. 上海电力大学学报, 2023, 39(3): 219-225.
DONG Jiayu, WANG Hui, ZHAO Wenhui, et al. A power elastic balance method for distribution networks considering the potential response of air conditioning load [J]. Journal of Shanghai Electric Power University, 2023, 39(3): 219-225.
- [10] 乐零陵. 计及温控负荷聚合灵活性的电力及综合能源系统优化调度研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2022.
LE Lingling. Research on optimal dispatching of power and integrated energy systems considering the flexibility of temperature control load aggregation [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [11] 杨梓俊,丁小叶,陆晓,等. 面向需求响应的变频空调负荷建模与运行控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 132-140.
YANG Zijun, DING Xiaoye, LU Xiao, et al. Variable frequency air conditioning load modeling and operation control for demand response [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 132-140.
- [12] MOSTAFAVI S, DODDI H, KALYANAM K. Nonlinear moving horizon estimation and model predictive control for buildings with unknown HVAC dynamics [J]. IFAC Papers OnLine, 2022, 55(41): 71-76.

作者简介:

汤卓凡(1993),女,湖北襄阳人,硕士,工程师,主要从事需求侧管理工作。

(责任编辑 水 鸽)