

考虑响应特性分组的空调聚合商博弈分层优化策略

倪琳娜¹, 孙 钢¹, 严华江², 黄荣国¹, 陈昱豪¹, 邱 剑³

(1. 国网浙江省电力有限公司 营销服务中心, 杭州 310030; 2. 国网浙江省电力有限公司, 杭州 310007; 3. 浙江大学 电气工程学院, 杭州 310027)

摘要:空调负荷作为柔性负荷资源,可由聚合商聚合并参与电力需求响应市场,从而有效缓解夏季高峰期的供电紧张问题。为此,提出一种考虑响应特性分组的空调聚合商博弈分层优化调度策略。首先,研究空调设备特性,推导建立空调在长时间断面内的平均用电功率与温差区间之间的关系方程,挖掘最小平均功率与温差之间的内在关联规律;然后,针对单体参数差异化特征,采用邻近传播聚类(affinity propagation, AP)算法对空调负荷群进行精细化聚类分组;在此基础上,提出空调聚合商博弈优化模型,在求解过程中引入连续性的中间变量,通过分层优化保证博弈的唯一均衡解。仿真结果表明,所提空调运行方程有效挖掘了单体小时级最小运行功率与温差区间的内在关联,降低了变量维度。在聚类基础上,提出的博弈分层优化策略有效利用了空调负荷的响应潜力,降低了仿真系统在调度周期内的运行峰谷差至27.22%。

关键词:空调负荷;聚类;非合作博弈;分层优化调度方法

Hierarchical game optimization strategy for air conditioning load aggregators considering response characteristic grouping

NI Linna¹, SUN Gang¹, YAN Huajiang², HUANG Rongguo¹, CHEN Yuhao², QIU Jian³

(1. Marketing Service Center, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310030, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310027, China; 3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: As a typical flexible load resource, air conditioning (AC) loads can be aggregated by load aggregator to participate in demand response (DR) markets, effectively alleviating electricity supply pressure during summer peak periods. A hierarchical game-based optimal dispatch strategy for AC aggregators considering response characteristic-based grouping is proposed. First, the characteristics of AC devices are analyzed, and a relationship equation is derived to capture the correlation between average power consumption and temperature difference over long time intervals, thereby revealing the intrinsic relationship between minimum average power and the temperature difference range. Then, considering the heterogeneity of unit-level parameters, an affinity propagation (AP) clustering algorithm is employed to perform fine-grained grouping of AC loads. On this basis, a game-theoretic optimization model is established for AC aggregators. To address solution tractability, continuous intermediate variables are introduced during the solving process, and hierarchical optimization is adopted to ensure the uniqueness of the equilibrium solution. The simulation results demonstrate that the proposed air-conditioning operation equation effectively captures the deep relationship between the minimum hourly operating power of individual units and the temperature-difference interval, thereby reducing the dimensionality of decision variables. Based on the clustering results, the proposed game-theoretic hierarchical optimization strategy exploits the response potential of air-conditioning loads, reducing the peak-to-valley difference of system operation within the scheduling period to 27.22%.

Key words: air conditioning load; clustering; non-cooperative game; hierarchical optimal dispatch method

0 引言

为实现“双碳”目标,国家正加快促进能源体系清洁化转化,新能源发电比例大幅增加,而其波动性为电网安全带来了挑战^[1-2]。此外,需求侧负荷

逐年升高,且存在体量小、分散分布、难以调控等问题,导致电网峰谷差现象愈加严重^[3]。在需求侧负荷中,空调负荷所占比重居高不下,作为一类灵活性资源,挖掘其调节潜力具有重要意义^[4-5]。

空调设备按照自身压缩机运行方式可分为定频空调和变频空调两种类型。当前,已有大量学者基于负荷工作原理,对定频空调动态模型建立了成熟的数学模型^[6-9],使用最为广泛的是分钟级等效

收稿日期:2026-01-26;修回日期:2026-03-08

基金项目:国网浙江省电力有限公司科技项目(5211YF24000D);国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U22B2098)

热参数(equivalent thermal parameter, ETP)模型。不少学者在此基础上,对分散式定频空调负荷的控制展开了研究。现有文献中,定频空调负荷参与调度的控制方法主要有启停控制^[6]、周期性暂停控制^[7-8]和温度控制^[9]。文献[6]以空调开关状态为主要变量,构建了空调单体的精细化调度模型。该模型能够实现单体空调的精准控制,但由于聚焦短时间尺度,难以适应大规模分散式空调群体在电网小时级需求响应种的调度需求。文献[7-8]通过优化空调运行温度的区间,实现空调负荷周期性控制,但其模型建立基于空调个体的动态特性,虽有较高精度,却忽略了空调用户的负荷特性提取,难以挖掘海量群体层面的聚合潜力。文献[9]基于负荷温度对负荷群进行聚类分组,并根据温度设定值的响应状态建立集群控制策略,但其调度仍集中于分钟级的短时尺度,难以满足电网日内长时间尺度下的调度需求。综上所述,文献[6-9]所采用的ETP模型及控制策略虽有较高建模精度,但由于聚焦于分钟级时间尺度,导致模型变量维度高、计算复杂度大,难以直接应用于电力系统小时级需求响应业务的优化调度。

另一方面,需求响应(demand response, DR)通过价格信号或激励机制引导用户改变用电习惯,实现负荷削峰,能在一定程度上缓解电网的供需压力。不少学者对空调负荷参与需求响应市场展开了研究。文献[10]通过市场方式激励负荷参与需求响应市场,建立了双层调度模型。文献[11]基于分时电价政策,建立了空调需求响应策略,有效削减了需求响应期间的峰值负荷。文献[12]建立了上层考虑负荷调节能力,下层考虑调节成本的空调双层调度模型,有效抑制了电网交换功率波动。然而,文献[10-12]虽然实现了空调负荷的需求响应,但大多从电网侧的削峰填谷或成本最小化的角度出发,将用户舒适度作为约束,难以实现海量空调用户参与需求响应的市场需求。

针对上述问题,本文在现有研究基础上,进一步研究定频空调的运行特性及其参与需求响应的机制,并提出了一种考虑响应特性分组的空调聚合商博弈分层优化策略。首先,基于ETP模型,推导建立空调在长时间断面内的平均用电功率与温差区间之间的关系方程,挖掘最小平均功率与温差之间的内在关联规律。其次,根据契合用户心理舒适度的温差可调节阈值和空调设备参数,基于邻近传播聚类算法实现空调响应特性差异化分组聚合。在此基础上,建立聚合商收益模型,在模型中对用户用电响应行为采用基于电量的补偿策略。为保证求解收敛性,基于聚合商收益模型,采用分层迭

代优化方法,得到博弈均衡解。最后,通过仿真验证了所提模型和求解策略的有效性。

1 空调单体建模

1.1 离散化一阶等效热参数模型

本文采用室内温度一阶微分方程^[13]对空调特性进行建模,如下所示

$$C_a \frac{d\theta^{\text{in}}}{dt} + \frac{\theta^{\text{in}}}{R_s + R_m} = \begin{cases} -Q + \frac{\theta^{\text{out}}}{R_s + R_m} & \mathcal{B} = 1 \\ \frac{\theta^{\text{out}}}{R_s + R_m} & \mathcal{B} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: C_a 为室内空气的热容; R_s 为建筑室外表面热阻; R_m 为建筑外墙材料自身热阻; Q 为空调的额定制冷量; θ^{out} 为室外温度。

式(1)为微分方程,所含约束关系难以用常见求解器处理,因此将连续域时间尺度划分为若干个离散时间断面,可化简得到如下所示的差分方程

$$\begin{cases} \theta_{\tau+1}^{\text{in}} = \psi \theta_{\tau}^{\text{in}} + (1 - \psi) \theta_{\tau+1}^{\text{out}} - (1 - \psi) H \mathcal{B}_{\tau} \\ \psi = 1 - \frac{1}{C_a (R_s + R_m)} \\ H = Q (R_s + R_m) \end{cases} \quad (2)$$

式中:下标 τ 为时间断面; ψ 和 H 为辅助变量; $\theta_{\tau+1}^{\text{in}}$ 和 $\theta_{\tau}^{\text{in}}$ 分别为时间断面 $\tau+1$ 和 τ 的室内温度; $\theta_{\tau+1}^{\text{out}}$ 为时间断面 $\tau+1$ 的室外温度。

1.2 平均功率-温差区间关系方程

在式(2)的基础上,求解式(3)所示的优化问题,能够得到小时级时间断面下的最小平均功率-温差区间的内在关联规律。

$$\begin{cases} \min P_{\text{av}} = \frac{P_0 \sum_{\tau=1}^{60} \mathcal{B}_{\tau}}{60} \\ \text{s.t. } \theta_{\tau+1}^{\text{in}} = \psi \theta_{\tau}^{\text{in}} + (1 - \psi) \theta_{\tau+1}^{\text{out}} - (1 - \psi) H \mathcal{B}_{\tau} \\ \theta_1^{\text{in}} = \theta_s^{\text{in}}, \quad \theta_{60}^{\text{in}} = \theta_e^{\text{in}} \\ \theta^{\text{in}} \leq \theta_{\tau}^{\text{in}} \leq \theta^{\text{max}} \quad 1 \leq \tau \leq 60 \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_{av} 为每小时调度期内的平均功率; P_0 为空调启动瞬时功率; θ_s^{in} 和 θ_e^{in} 分别为每小时调度期始、末时刻的室温设定值; θ^{min} 和 θ^{max} 分别为契合用户心理舒适度的室温上、下限; $\mathcal{B}_{\tau}$ 为时间断面 τ 空调运行状态的二元离散变量,其值为1,表示空调正在运行,反之则为关闭。

引入二元离散辅助变量,可将式(3)优化问题的所得解转变为线性化约束,表示如下

$$\begin{cases} P_{i,t} = \sum_{k=1}^K \vartheta_{i,k,t} P_{i,k,t} \\ \sum_{k=1}^K \vartheta_{i,k,t} \underline{\varphi}_{i,k,t} \leq \theta_{i,t+1}^{\text{in}} - \theta_{i,t}^{\text{in}} \leq \sum_{k=1}^K \vartheta_{i,k,t} \bar{\varphi}_{i,k,t} \\ \sum_{k=1}^K \vartheta_{i,k,t} = 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{i,t}$ 为空调单体 i 在时刻 t 的平均用电功率; K 为温差区间数量; $\vartheta_{i,k,t}$ 为二元离散变量; $P_{i,k,t}$ 为温差区间 k 对应的最小平均用电功率; $\underline{\varphi}_{i,k,t}$ 和 $\bar{\varphi}_{i,k,t}$ 分别为温差区间 k 的下边界和上边界; $\theta_{i,t+1}^{\text{in}}$ 和 $\theta_{i,t}^{\text{in}}$ 分别为时刻 $t+1$ 和 t 的室内温度。

2 空调特性差异化聚合方法

2.1 空调单体特性向量

由式(4)可知,空调单体的可调能力与各时刻可调温差区间和各温差区间对应的最小平均用电功率有关,将有关的参数组成向量,可得到空调单体特性向量,如下所示

$$\begin{cases} \xi_i = [\mathbf{x}_i, \bar{\mathbf{y}}_i, \mathbf{p}_i]^T \\ \mathbf{x}_i = [\underline{\varphi}_{i,1,1}, \dots, \underline{\varphi}_{i,K,1}, \dots, \underline{\varphi}_{i,1,T}, \dots, \underline{\varphi}_{i,K,T}] \\ \bar{\mathbf{y}}_i = [\bar{\varphi}_{i,1,1}, \dots, \bar{\varphi}_{i,K,1}, \dots, \bar{\varphi}_{i,1,T}, \dots, \bar{\varphi}_{i,K,T}] \\ \mathbf{p}_i = [P_{i,1,1}, \dots, P_{i,K,1}, \dots, P_{i,1,T}, \dots, P_{i,K,T}] \end{cases} \quad (5)$$

式中: ξ_i 为空调单体 i 的特性向量; $\mathbf{p}_i$ 、 $\mathbf{x}_i$ 和 $\bar{\mathbf{y}}_i$ 分别为功率参数、温差区间下边界参数和温差区间上边界参数; $\underline{\varphi}_{i,k,T}$ 和 $\bar{\varphi}_{i,k,T}$ 分别为单体 i 在时刻 T 第 K 个温差区间的下边界和上边界; $P_{i,k,T}$ 为单体 i 在时刻 T 第 K 个温差区间对应的最小平均功率。

2.2 基于AP算法的空调差异化聚类方法

本节采用邻近传播聚类(affinity propagation, AP)算法^[14],根据空调单体特性向量的不同参数对分散式空调用户进行差异化聚类。

首先,根据温差区间初步聚类得到 $C_o = \{C_1, \dots, C_j, \dots, C_M\}$,然后根据功率向量对每个聚类簇 j 精细化聚类得到 $C_j = \{C_{j,1}, \dots, C_{j,\tau}, \dots, C_{j,l_j}\}$,并将每个精细化聚类结果 $C_{j,\tau}$ 作为一个空调组。

3 空调负荷群博弈分层优化策略

3.1 需求响应博弈市场架构

图1所示为电网公司、空调用户以及LA形成的需求响应博弈市场架构。该架构中有3类主体。第一类是电力公司,其职责在于与满足需求响应市场准入门槛的负荷聚合商(load aggregator, LA)签订合同,在LA调度前根据式(6)发布电价信息并传递给LA;第二类主体是LA,其身份是作为分散式空调用户接入需求响应市场的代表;第三类主体是分散式空调用户,作为具有大量可调潜力的需求侧资源,各用户需将自身设备信息上传给LA,根据LA下发

的调控指令控制空调设备的温度设定。

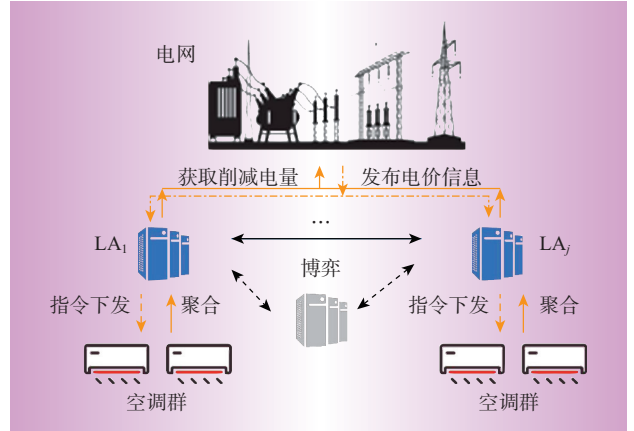


图1 需求响应博弈市场架构

Fig. 1 Demand response game market architecture

3.2 聚合商收益模型

参与博弈的为需求响应市场中的多方空调聚合商,各LA的收益由电网给予的响应激励和向用户支付的补偿成本两个方面组成。在需求响应市场中,电力公司发布的电价信息是关于需求侧负荷总量的线性函数^[15],如式(6)所示。

$$\xi_t^{\text{DR}} = aP_t^L + b \quad (6)$$

式中: ξ_t^{DR} 为时段 t 电力公司发布的实时电价信息; P_t^L 为时段 t 的空调负荷总量; a 和 b 为常数系数,可由不同负荷下的电价历史数据通过利用最小二乘法等方法拟合而得^[15]。

基于式(6),建立 LA_j 的收益函数如式(7)所示。

$$\begin{cases} \Theta_{LA_j} = F^{\text{ave}} - F^{\text{pay}} \\ F^{\text{ave}} = \sum_{t=t_s}^{t_e} [a \sum_{n=1}^N (P_{n,t}^{\text{cl}} + P_{n,t}^{\text{ucl}}) + b] (P_{j,t}^{\text{cl,o}} - P_{j,t}^{\text{cl}}) \\ F^{\text{pay}} = \sum_{t=1}^T \Xi_j^{\text{com}} (P_{j,t}^{\text{cl,o}} - P_{j,t}^{\text{cl}})^2 \end{cases} \quad (7)$$

式中: Θ_{LA_j} 为 LA_j 的收益; F^{ave} 为电网给予 LA_j 的响应激励; F^{pay} 为 LA_j 向用户支付的补偿; t_s 和 t_e 分别是削峰开始时段和停止时段; N 和 T 分别是LA总数和调度总时段数; $P_{n,t}^{\text{cl}}$ 和 $P_{n,t}^{\text{ucl}}$ 分别为 LA_n 的可控负荷(空调)和不可控负荷; $P_{j,t}^{\text{cl,o}}$ 为 LA_j 可控负荷未经过优化的原始用电功率; Ξ_j^{com} 为 LA_j 对用户的补偿费用。

3.3 聚合商博弈分层优化策略

博弈存在唯一纳什均衡解的必要条件是博弈方的收益函数为连续可微的凸函数^[16],式(7)中的 $P_{j,t}^{\text{cl}}$ 含有二元离散变量,无法保证博弈存在唯一纳什均衡解。因此,本文采用分层优化策略,将原问题分解为上、下两层,具体求解过程见附录A。

3.4 求解流程

针对本文所提的聚合商博弈分层优化策略,采用循环迭代的方式进行求解,求解步骤如下。

(1) 初始化参数:令迭代次数 $\tau=1$,待优化聚合商编号 $j=1$,设定空调负荷初始值向量为 $\tilde{\mathbf{P}}^{\text{cl},(\tau=1)}=[\tilde{P}_{1,1}^{\text{cl},*(1)}, \dots, \tilde{P}_{N,1}^{\text{cl},*(1)}, \dots, \tilde{P}_{1,T}^{\text{cl},*(1)}, \dots, \tilde{P}_{N,T}^{\text{cl},*(1)}]$ 、收敛标准为 G 、聚合商总数为 N 。

(2) 求解 LA_j 上层优化模型:假设其余 LA 的用电器策略不变,根据附录 A 式(A2)一式(A4)得到 LA_j 的最优解,并更新到 $\tilde{\mathbf{P}}^{\text{cl},(\tau+1)}$ 中。

(3) 更新参数:令 $j=j+1$ 。若 $j>N$,进行步骤(4);反之回到步骤(2)。

(4) 判断收敛性:将 $\tilde{\mathbf{P}}^{\text{cl},(\tau+1)}$ 作为当次迭代结束后各聚合商的最终用电策略,并判断收敛判据是否成立,若 $\Delta^{(\tau)}=\left\|\tilde{\mathbf{P}}^{\text{cl},(\tau+1)}-\tilde{\mathbf{P}}^{\text{cl},(\tau)}\right\|_2 \leq G$ 成立,则迭代结束,得到各 LA 的上层最优解 $\tilde{P}_{j,t}^{\text{cl},*}$,并进行步骤(5);反之返回步骤(2),并令 $j=1, \tau=\tau+1$ 。

(5) 输出调度策略:每个 LA 基于中间变量最优解 $\tilde{P}_{j,t}^{\text{cl},*}$ 求解附录 A 式(A5)所示的下层优化模型,得到满足空调实际运行约束的调控策略。

4 算例分析

4.1 系统参数

本节假设某供电区域内的分散式空调用户共有 1 000 台空调,假设各空调单体的温度初始值满足均匀分布 $U(24,26)$,参数 ψ 和 H 均满足正态分布。在夏季典型日内该区域室外温度曲线如图 2 所示。各参数数值见附录 B 表 B1。其中电力公司电价系数和补偿系数参考文献[14],分层优化算法收敛判据设置容许误差为 0.1%。

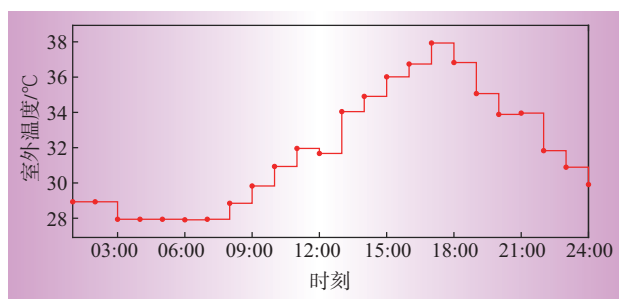


图2 室外温度变化曲线

Fig. 2 Curve of outdoor temperature

4.2 调度策略有效性分析

设定该地区共有 3 家 LA ,根据 2.2 小节的精细化聚类方法,将 1 000 台用户聚类为 15 组,各家 LA 分别调度其中 5 组,各组的等效用户参数如附录 B 图 B1 所示。为了验证本文所提调度策略有效性,本节内容设定了两组场景。场景 1 为空调负荷不参与

调峰的对比场景,即各空调用户按照固有习惯运行所产生的原始负荷曲线,本文算例设定用户期望的室温为 26 °C,满足用户舒适度的室温上限和下限分别为 23 °C 和 27 °C;场景 2 为空调负荷群参与调峰的场景。两组场景调度结果如图 3 所示。

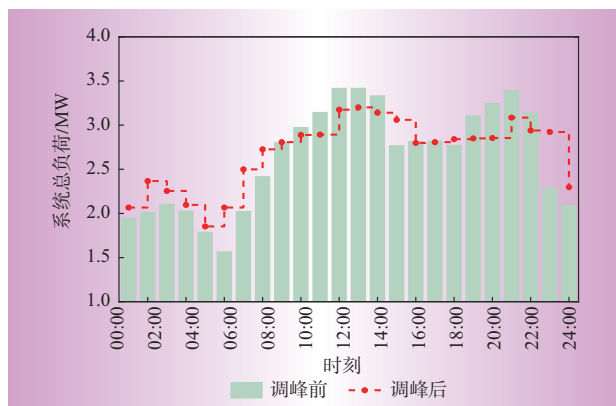


图3 调峰前后调度结果

Fig. 3 Dispatching results before and after peak shaving

由图 3 可以看出,负荷用电高峰时段在 10:00—22:00。空调参与调峰辅助服务后,电网峰谷差降低了 0.50 MW,达到了 27.22%。这是因为,本文所提模型在满足用户舒适度的前提下,挖掘了可调度空调单体每小时内最小平均用电功率,相较于优化调度前,充分利用了空调的削峰潜力,对降低电网峰谷差提供了有效帮助。

电力公司对削峰时间尺度的不同会影响 LA 的调度策略。为了进一步研究不同削峰周期对调度结果的影响,图 4 给出了不同削峰周期下的调度收益结果。

从图 4 可以看出, LA 的净收益随着削峰周期的减少呈现先增加后减少的趋势。这是因为,若电力公司和 LA 间的削峰结算时间过长, LA 需要在没有明显削峰收益的时刻对空调用户进行补偿,降低了自身收益;而若电力公司和 LA 间的削峰结算时间过短, LA 又不具备充足的时间对用户用电行为进行时间上的转移,从而也降低了 LA 的收益。

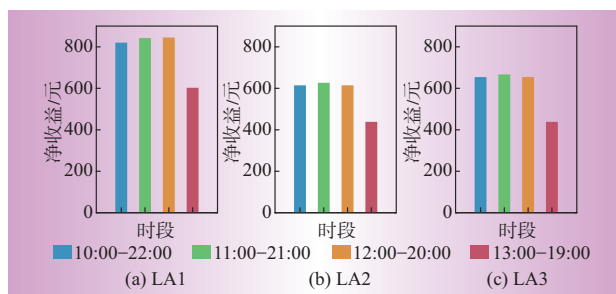


图4 各调度周期下不同聚合商净收益对比

Fig. 4 Comparison of net revenues of different aggregators in each scheduling period

图5所示为各时刻LA1对分组1用户设定的温度值。在10:00用电高峰期到来前,聚合商逐渐下调温度设定值。从11:00起,聚合商逐步上调温度设定值,但由于前面时刻对室温进行降温为室内温度爬升留有一定裕度,因此高峰时刻温度设定值上升在不会对用户舒适度造成明显负担的情况下有效降低了用电功率,从而实现了削峰填谷。

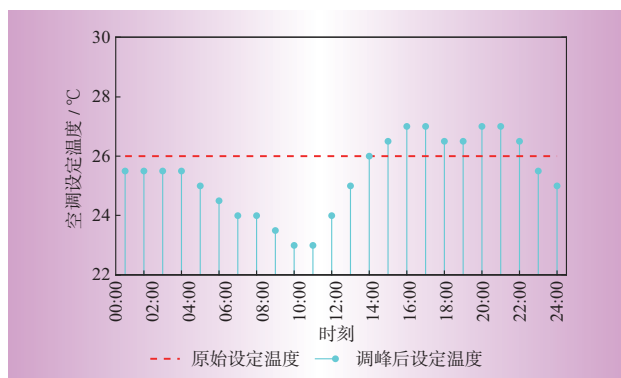


图5 各时刻设定温度平均值

Fig. 5 Temperature setpoints at different scheduling periods

4.3 平均功率-温差区间关系方程有效性分析

以参数 $[\psi, H]=[0.95, 39]$ 、启动瞬时功率为3 kW的空调为例说明式(3)建立的模型的应用优势,设定室外温度为34℃。观察图6可以发现,空调在该时间断面内的最小用电功率基本取决于始末时刻室温设定值的温差。由此,针对任意参数确定的空调单体,根据式(3)均可得到类似的阶梯状功率特性,该特性能有效辅助LA进行满足电力公司调度需求的需求响应业务。

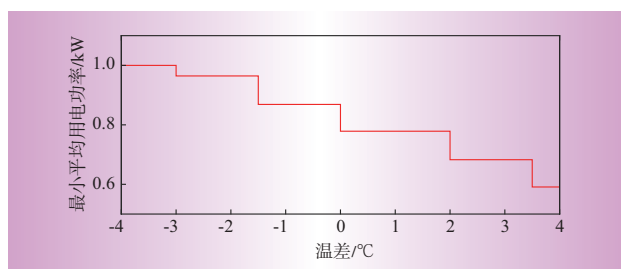


图6 平均功率随温差变化曲线

Fig. 6 Average power variation with temperature difference

为进一步验证所提功率-温差模型在调度策略中的有效性,本节对比分析基于本文所提模型与传统ETP模型的调度结果,如图7所示。

由于两个场景都是基于聚合后的等效参数进行调度,为更准确地分析调度可靠性,本节将各场景求得的室温设定值应用于每台空调单体,计算其实际用电功率。由图7可得,基于传统ETP模型误差峰值达到了5.49%;而采用本文所提模型的场景

下,得到的功率误差较小,最大误差仅占系统负荷2.72%,显著优于传统模型。这种误差的原因是由于两种场景的聚合等效方式的差异。由于传统的ETP模型刻画的是空调在短时间尺度上的动态特性,其运行功率对单体参数差异与聚类误差较为敏感,导致短时误差在小时级积累后表现出显著差异。而本文所提的“平均功率-温差区间”模型则基于小时尺度构建特性向量,侧重刻画空调群体的平均响应功率,从而有效平滑由单体差异引起的短时偏差积累而成的小时级功率误差。由此可得,本文所提模型具有更可靠的求解策略。

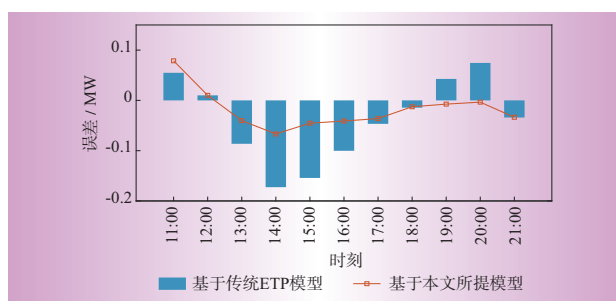


图7 不同模型调度结果与实际误差

Fig. 7 Scheduling results and actual values under different models

4.4 算法有效性和收敛性分析

为分析本文所提分层博弈求解算法的有效性,本节内容将所提模型和算法与未考虑LA间的博弈模型进行对比。两种场景下的各LA成本收益情况表1如所示。仿真结果表明,在各聚合商参与集中优化情况下,电网峰谷差的降低率可达29.16%,略优于本文所提博弈策略的27.22%。这是因为集中式求解得到的是全局最优解,而本文所提方法是多主体博弈下的纳什均衡解。集中优化通过统一决策,能够最大化整体系统效益,但未能充分考虑各聚合商之间的利益博弈与信息不对称。相比之下,由表1可得,虽然本文所提模型求得的电网峰谷差的降低率为次优解,但采用的博弈理论模拟了市场的实际运行机制,使得各LA和负荷均获得了更合理的收益,具有较高的应用价值和实际可行性。

表1 不同场景下聚合商成本收益情况

Table 1 Cost and revenue situation of aggregators in different scenarios

场景	本文所提方法			未考虑博弈		
	削峰 收益	补偿 成本	净收益	削峰 收益	补偿 成本	净收益
LA1	1 131.16	121.88	1 009.18	1 051.92	87.58	964.34
LA2	803.36	64.98	738.38	707.41	44.36	663.05
LA3	883.69	85.49	798.20	818.12	56.04	762.08

元

进一步地,为充分验证第2章所提的AP聚类算法效果的有效性和优势,本节内容将该聚类结果与传统K-means聚类算法的聚类结果进行对比分析。两种算法的距离平方和如表2所示,可以看到显然采用本文所提AP算法聚类后,聚类中心更接近各类内样本点。

表2 AP算法与K-means算法聚类效果对比分析
Table 2 Comparison of clustering effect between AP and K-means method

算法	距离平方和
AP聚类算法	29.346 1
K-means聚类算法	37.433 8

此外,为分析本文所提模型和算法对收敛效果的改进,本节内容增设了采用传统ETP模型的场景。两种场景的收敛曲线如图8所示,采用本文所提温差区间-平均功率模型,迭代在第21次实现收敛,用时63.13 s,而采用传统ETP模型,求解在第92次才得到均衡解,用时347.61 s,求解效率大大降低。

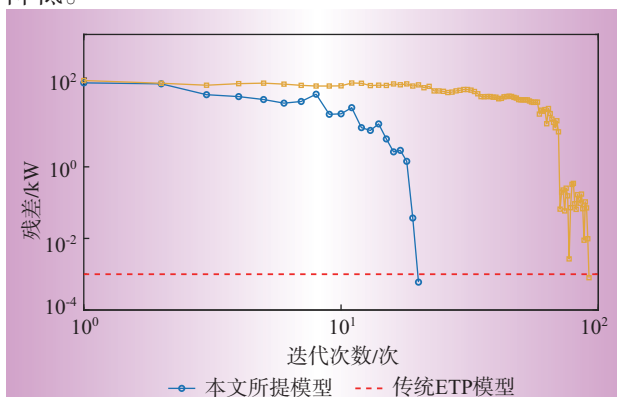


图8 不同模型收敛曲线

Fig. 8 Deviation between scheduling results and actual values under different models

4.5 实际区域仿真算例分析

为进一步说明本文所提模型和调度策略的有效性和实用性,本节采用浙江省某市的实际居民负荷数据进行算例分析。该区域共有1 155户居民,夏季典型日室外温度如附录C图C1所示,每户居民的室内初始温度如附录C图C2所示。根据式(4)求得每一户居民的平均功率-温差区间关系方程参数。

根据电网事前发布的电价信息,采用第3章中博弈分层优化策略,得到该市在空调参与调度前后的总体负荷值,如图9所示。由图9可以看出,在浙江某地的实际负荷场景下,空调群在高峰时段的用电得到有效削减,同时部分低谷时段的负荷得到适度提升,使得整体负荷曲线更加平滑。与未调度情

形相比,电网峰谷差明显收窄,系统运行的平衡性与稳定性得到了提升。该结果表明,所提博弈分层优化调度模型能够在真实算例中的有效性,有效挖掘了分散式空调的灵活调节能力。

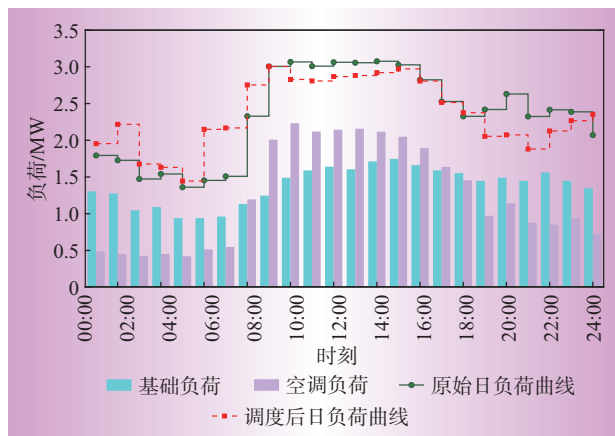


图9 该市调度前后总体负荷值

Fig. 9 Overall residential load before and after peak shaving

5 结束语

本文针对分散式空调负荷,提出了一种考虑响应特性分组的空调聚合商博弈分层优化调度策略。首先,针对空调负荷体量小、分布分散,难以灵活参与电力需求响应市场的问题,基于ETP模型构建了小时级最小平均用电功率与温差区间之间的关系方程,该方程能灵活应用于各类空调单体,为适应电力公司削峰需求提供了有效的建模与调度基础模型。在此基础上,依据温差区间与功率间的关联规律,选取关键空调设备参数并采用AP算法对空调负荷群进行精细化聚类分组,得到有效的聚类结果。进一步地,本文提出了空调聚合商博弈分层优化调度方法。仿真结果表明,相较于未优化调度方法,所提调度能充分挖掘空调负荷的削峰潜力,为降低电网峰谷差提供了有效帮助。此外,通过设定不同调度周期的对比分析可得,调度周期过长或过短均可能影响聚合商的经济收益,因此在实际应用中需合理选择调度周期,以兼顾运行效果与经济性。

本文研究了分散式空调单体参与电网需求响应的方式,但主要研究对象是分散式定频空调。目前变频空调由于节能、舒适性上的优势,在市场中的保有量逐渐升高,未来可以探索变频空调在需求响应中的控制策略,进一步挖掘负荷侧灵活性资源。

附录见本刊网络版(<http://dsm.ijournals.cn>)。

参考文献:

- [1] 曾庆彬,梁伟强,张勇军,等.考虑多重轮换调控的空调负荷调控潜力评估与控制策略[J].电力系统自动化,2024,48(4):123-131.
ZENG Qingbin, LIANG Weiqiang, ZHANG Yongjun, et al. Regulation potential evaluation and control strategy of air conditioning load considering multiple rotation regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(4):123-131.
- [2] 刘泽洪,孟婧,张瑾轩,等.电-氢-碳耦合促进新能源基地开发模式研究[J].全球能源互联网,2024,7(5):473-491.
LIU Zehong, MENG Jing, ZHANG Jinxuan, et al. Research on the development model of new energy bases based on the electricity-hydrogen-carbon synergy[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7(5):473-491(in Chinese).
- [3] 章三华,胡业.考虑用电行为偏好的空调负荷代理商市场报价策略研究[J].电力需求侧管理,2018,20(5):16-19,24.
ZHANG Sanhua, HU Ye. Bidding strategy for air-conditioning load aggregator considering consumers' behaviour preference[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(5):16-19, 24.
- [4] 张文彦.负荷聚合商模式下的冰蓄冷空调弃风消纳研究[J].电力需求侧管理,2018,20(3):28-33,39.
ZHANG Wenyan. Curtailed wind consumption considering ice storage air conditioning in load aggregator mode[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(3):28-33, 39.
- [5] 赵玉强.空调负荷参与需求响应的调控策略研究[D].南京:南京师范大学,2021.
ZHAO Yuqiang. Research on control strategy of air conditioning load participating in demand response[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2021.
- [6] LEE T F, CHO M Y, HSIAO Y C, et al. Optimization and implementation of a load control scheduler using relaxed dynamic programming for large air conditioner loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2):691-702.
- [7] 宋梦,高赐威,苏卫华.面向需求响应应用的空调负荷建模及控制[J].电力系统自动化,2016,40(14):158-167.
SONG Meng, GAO Ciwei, SU Weihua. Modeling and controlling of air-conditioning load for demand response applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14):158-167.
- [8] 田爱娜,李卫星,刘道伟,等.基于改进状态空间模型的空调负荷控制策略[J].电力系统自动化,2019,43(8):124-130.
TIAN Aina, LI Weixing, LIU Daowei, et al. Control strategy of air conditioning load based on improved state-space model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8):124-130.
- [9] 孙毅,陈一童,李彬,等.基于温度密度聚类的热泵负荷集群控制策略[J].电力系统自动化,2020,44(7):46-52.
SUN Yi, CHEN Yitong, LI Bin, et al. Control strategy of heat pump load cluster based on temperature density clustering[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7):46-52.
- [10] SONG M, SUN W, WANG Y, et al. Hierarchical scheduling of aggregated TCL flexibility for transactive energy in power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3):2452-2463.
- [11] 奚源,孟庆龙,李泽阳,等.考虑温度再设的暖通空调电力需求响应策略研究[J].电力需求侧管理,2024,26(2):55-61.
XI Yuan, MENG Qinglong, LI Zeyang, et al. Research on HVAC demand response strategy based on temperature resetting[J]. Power Demand Side Management, 2024, 26(2):55-61.
- [12] WEI C Y, XU J, LIAO S Y, et al. Coordination optimization of multiple thermostatically controlled load groups in distribution network with renewable energy[J]. Applied Energy, 2018, 231:456-467.
- [13] 包宇庆,成丽珉.空调负荷二阶等效热参数模型参数辨识方法[J].电力系统自动化,2021,45(11):37-43.
BAO Yuqing, CHENG Limin. Parameter identification method of second-order equivalent thermal parameter model for air conditioning loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11):37-43.
- [14] LEE J Y. A clustering technique for ultrawideband channel using modified affinity propagation[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(8):1818-1822.
- [15] 刘晓峰,高丙团,罗京,等.基于非合作博弈的居民负荷分层调度模型[J].电力系统自动化,2017,41(14):54-60.
LIU Xiaofeng, GAO Bingtuan, LUO Jing, et al. Non-cooperative game based hierarchical dispatch model of residential loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14):54-60.
- [16] ROSEN J B. Existence and uniqueness of equilibrium points for concave n-person games[J]. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1965, 33(3):520-534.

作者简介:

倪琳娜(1985),女,浙江杭州人,博士,主要从事电力供需互动技术研究工作。

(责任编辑 水 鹤 崔素媛)

附录 A

上层通过引入连续型的中间变量 $\tilde{P}_{n,t}^{\text{cl}}$ 替代原式 (A1) 中的离散变量 $P_{j,t}^{\text{cl}}$, 将原效益函数凸化, 由此将式 (A1) 转换为式 (A2) 所示的凸化函数。上层优化的目标是求解凸化后的博弈模型得到纳什均衡解以及中间变量的决策值 $\tilde{P}_{n,t}^{\text{cl},*}$, 即每个 LA 在各时刻理论上的最优负荷需求。

$$\min C_{\text{LA}_j} = \sum_{t=1}^T \Xi^{\text{com}} (P_{j,t}^{\text{cl},o} - \tilde{P}_{j,t}^{\text{cl}})^2 - \sum_{t=t_e}^{t_e} \left[a \left(\tilde{P}_{j,t}^{\text{cl}} + \sum_{n=1}^N (\tilde{P}_{n,t}^{\text{cl},*} + P_{n,t}^{\text{ucl}}) \right) + b \right] (P_{j,t}^{\text{cl},o} - \tilde{P}_{j,t}^{\text{cl}}) \quad (\text{A1})$$

由于上层是凸化后的优化模型, 为了让中间变量的决策值 $\tilde{P}_{n,t}^{\text{cl},*}$ 更接近真实值, 调度方案需要满足负荷可调电量相关约束, 如式 (A2)~式 (A3) 所示。式 (A2) 为 LA_j 空调功率总量上下限约束; 式 (A3) 为 LA_j 空调可削减功率总量上下限约束; 式 (A4) 为 LA_j 在调度总时段内的空调用电总量上下限约束。

$$P_{j,t}^{\text{cl},\min} \leq \tilde{P}_{j,t}^{\text{cl}} \leq P_{j,t}^{\text{cl},\max} \quad (\text{A2})$$

$$\varepsilon_{j,t}^{\min} \leq P_{j,t}^{\text{cl},o} - \tilde{P}_{j,t}^{\text{cl}} \leq \varepsilon_{j,t}^{\max} \quad (\text{A3})$$

$$Q_j^{\min} \leq \sum_{t=1}^T \tilde{P}_{j,t}^{\text{cl}} \leq Q_j^{\max} \quad (\text{A4})$$

LA_j 的下层优化模型旨在减少原变量 $P_{n,t}^{\text{cl}}$ 和中间变量 $\tilde{P}_{n,t}^{\text{cl},*}$ 的误差, 将上层得到的理论负荷需求 $\tilde{P}_{j,t}^{\text{cl},*}$ 还原为实际可行的空调群组控制策略, 如式 (A5) 所示。

$$\begin{cases} \min \vartheta_j = \sum_{t=1}^T (P_{j,t}^{\text{cl}} - \tilde{P}_{j,t}^{\text{cl},*})^2 \\ \text{s.t. } P_{j,t}^{\text{cl}} = \sum_{i=1}^{L_j} \sum_{k=1}^{L_{j,i}} \vartheta_{j,i,k,t} P_{j,i,k,t} \\ \sum_{k=1}^{L_{j,i}} \vartheta_{j,i,k,t} \varphi_{j,i,k,t} \leq \theta_{j,i,t}^{\text{in}} - \theta_{j,i,t}^{\text{in}} \leq \sum_{k=1}^{L_{j,i}} \vartheta_{j,i,k,t} \bar{\varphi}_{j,i,k,t} \\ \sum_{k=1}^{L_{j,i}} \vartheta_{j,i,k,t} = 1 \end{cases} \quad (\text{A5})$$

式中: L_j 为 LA_j 聚合得到的空调组数; $L_{j,i}$ 为 LA_j 控制的第 i 组空调的温差区间个数; $P_{j,i,k,t}$ 为 LA_j 控制的第 i 组空调在第 k 个温差区间内的最小耗电功率, 可根据式 (3) 求解得到; $\vartheta_{j,i,k,t}$ 为对应于 $P_{j,i,k,t}$ 的二元离散变量; $\varphi_{j,i,k,t}$ 和 $\bar{\varphi}_{j,i,k,t}$ 分别为温差功率区间的下限和上限; $\theta_{j,i,t}^{\text{in}}$ 为室内温度。

附录 B

表 B1 系统参数

Table B1 System parameters

参数	取值
辅助变量 1 (ψ)	均值 0.96
	标准差 0.001 6
辅助变量 2 (H)	均值 39
	标准差 0.7
电力公司电价系数	a 8.25×10^{-5}
	b 0.2
LA 对用户的补偿系数 (Ξ^{com}) / (元 $\cdot$ kW $^{-2}$)	0.000 55
收敛标准 G	10^{-3}

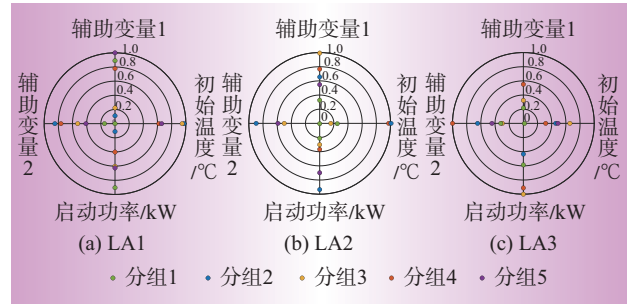


图 B1 各聚合商空调分结果

Fig. B1 Air conditioning grouping of each LA

附录 C

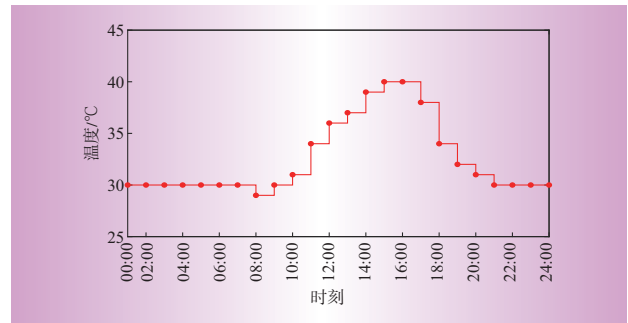


图 C1 该市室外温度变化曲线

Fig. C1 Outdoor temperature variation curve of the city

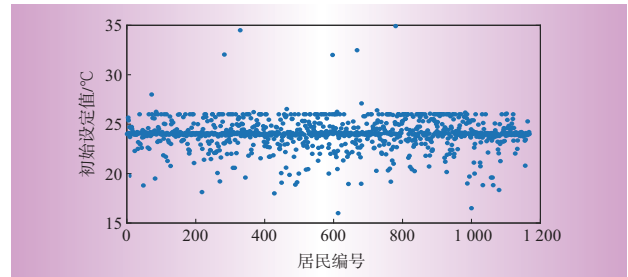


图 C2 各户居民室内温度初始值

Fig. C2 Initial indoor temperature of each household