

考虑温控负荷响应能力差异的建筑群两阶段协调优化调度

王楠¹, 胡厚鹏¹, 陈泽瑞¹, 张振威², 惠红勋²

(1. 贵州电网有限责任公司, 贵阳 550000; 2. 澳门大学 智慧城市物联网全国重点实验室, 澳门 999078)

摘要: 建筑温控负荷可有效提升新能源消纳能力并降低运行成本, 但建筑个体的结构与负荷特征的差异性导致现有响应容量分配机制难以直接应用于大规模建筑群。为充分挖掘城市建筑群响应潜力并兼顾用户的舒适性需求, 构建了考虑建筑温控负荷响应能力差异的两阶段协调优化框架。首先, 考虑建筑围护结构、内热特征与用户舒适性需求, 建立基于等效热模型的个体建筑虚拟储能模型, 进而表征建筑群可响应容量。其次, 考虑建筑地理位置与所属运行商, 建立两阶段协调优化调度框架。在第一阶段, 管理不同建筑群的运营商间进行报量报价, 在电网总响应约束下构成非合作博弈竞争响应容量。在第二阶段, 考虑个体建筑间可响应能力与温度敏感性的差异, 运营商将第一阶段容量分配给所有建筑个体并追求最小支付成本。最后, 算例验证选取中国某城市部分建筑群, 验证所提方法的有效性。

关键词: 需求响应; 城市建筑群; 温控负荷; 两阶段优化; 博弈理论

中图分类号:

文献标志码: A

DOI:

0 引言

随着全球能源结构的转型, 尤其是可再生能源比例的逐步提高, 传统的电力系统面临着越来越大的挑战^[1-2]。可再生能源, 如太阳能和风能, 虽然在降低碳排放和能源消耗方面具有显著优势, 但其间歇性和不稳定性特点使得电网的负荷波动加剧, 尤其是在电力需求高峰时段, 电网的运行面临严重压力^[3]。为应对这一挑战, 需求响应技术作为一种灵活的负荷调节手段, 已经成为现代电力系统优化调度中的重要工具^[4]。

建筑温控负荷作为需求响应中的关键组成部分, 因其具有显著的调节潜力, 越来越受到研究者和行业专家的关注。根据国际能源署(IEA)的报告, 建筑物在全球能源消耗中占比约 40%, 其中温控负荷(空调、采暖等)占比超过 50%^[5]。在需求响应框架下, 建筑温控负荷能够在短时间内灵活调整, 对电网负荷进行削峰填谷, 从而提升电力系统的经济性和稳定性^[6]。特别是在夏季高峰负荷时段, 建筑物的温控负荷响应对于缓解电网负荷、优化电力供应至关重要。例如, 通过合理调节建筑内温度设

定、优化空调系统的运行策略和利用建筑围护结构的热储存能力, 建筑可以高效地参与到电网负荷响应中^[7-8]。此外, 智能建筑管理系统为建筑温控负荷的响应提供了技术支持, 使得建筑能够根据实时电价和电网需求智能地调整能源消耗^[9-10]。

建筑温控负荷的建模和优化是需求响应实施的基础。为了准确描述建筑的热行为和负荷特征, 研究者们提出了多种建模方法, 其中以等效热模型和基于物理过程的动态模型最为常见。等效热模型通过对建筑物围护结构和热源的简化, 提供了基于一阶微分方程的数值计算方法^[11]。同时, 基于热动态特性的建筑温控负荷模型, 能够考虑建筑物的热惯性、内外热流的传递及气候变化的影响, 从而提高建筑负荷响应模型的精确度^[12]。在控制方法方面, 基于模型的控制算法是优化建筑温控负荷调度的常见技术之一。模型预测控制能够根据预测的环境变化和电网负荷情况, 提前计算并调节建筑内温度设定, 从而实现能源消耗的最优化^[13-14]。

在面对大规模建筑群的调度问题时, 如何实现建筑间的协调优化成为了一个难点。不同建筑物在结构、功能和能效上存在差异, 这使得建筑群调度优化具有较高的复杂性^[15]。建筑群的协调优化方法主要集中在如何合理分配响应负荷并在多个运营商之间达成平衡^[16]。博弈理论能够为建筑群内多个建筑间的协调提供一种有效的分析框架。通过博弈模型, 可以分析建筑间在负荷响应过程中的竞争与合作关系, 并制定最优的负荷调度策略^[17-18]。在合作博弈模型中, 建筑物之间可以通过谈判、协议或其他方式联合行动, 从而达成整体负荷响应的最优化目标^[19]。合作博弈的核心在于建筑群内部

收稿日期: yyyy-mm-dd; 修回日期: yyyy-mm-dd

在线出版日期:

基金项目: 贵州电网有限责任公司科技项目资助(GZKJXM20240010); 国家自然科学基金项目资助(52407075); 澳门特别行政区科学发展基金资助(001/2024/SKL).

Project supported by the Science and Technology Project of Guizhou Power Grid Co., Ltd. (GZKJXM20240010); Supported by the National Natural Science Foundation of China (52407075); Supported by the Science and Technology Development Fund, Macau SAR (001/2024/SKL).

的成员通过联合行动共同实现一个集体的最优结果,而不是单纯地追求个体的最优,强调建筑群内各建筑之间的合作和协同效应^[20-21]。然而,由于各社区运营商独立管理建筑群,其成本函数与建筑参数均为私有信息,难以在系统层面共享。同时,各社区运行商隶属于不同利益主体,各主体间存在利益竞争行为,使得集中式或合作博弈调度在实际中难以实施^[22-23]。相比之下,非合作博弈模型能够在信息不完全和竞争存在的前提下实现分布式均衡决策,使各运营商在保持信息独立的前提下,通过市场价格信号实现资源协调与收益平衡^[24]。每个建筑物根据其自身的负荷响应能力、电价波动和电网负荷需求来选择一个最佳的负荷响应策略,实现最大化自身的效用或利益^[25]。

然而,建筑群中个体建筑的结构、绝热性能以及用户需求的差异,使得传统的需求响应容量分配机制无法有效应用于大规模建筑群的调度^[26]。现有研究主要集中在单一建筑或小规模建筑群的温控负荷调度上,且多忽略了建筑间差异性和建筑群中运营商之间的协调问题^[27]。因此,如何在保证用户舒适性的前提下,充分挖掘建筑群温控负荷的响应潜力,并实现电网的优化调度,成为了亟待解决的难题。为了解决建筑群调度中存在的个体差异和运营商协调问题,本文提出了一种考虑个体建筑温控负荷响应能力差异的两阶段协调优化调度方法。本文主要贡献与创新点总结如下:

1) 提出多运营商一多建筑的两阶段协调优化框架。针对建筑群温控负荷响应能力差异,构建了上层“多运营商非合作博弈”与下层“建筑层 KKT 分配优化”相结合的两阶段模型,实现了市场层与建筑层的协同调度。

2) 建立兼顾建筑热物理特性与配网可行性的用电负荷调度模型。显式考虑围护结构传热、窗体透光、内源热与制冷能效等因素,构建异质温控负荷的动态热平衡模型,并采用面积加权的二次温差惩罚刻画舒适度成本。

3) 本文方法在城市热浪高负荷场景下验证有效性。在包含 6 个社区运营商、1727 栋建筑的仿真系统中,所提方法在保证建筑舒适度与配网安全的前提下,显著提升了建筑间响应分配的公平性。

1 城市建筑群两阶段响应优化调度框架

城市建筑群温控负荷两阶段需求响应协调优化调度框架如图 1 所示。建筑个体由于内部热惯性与用户的可调节舒适温度而具有一定的可调节空

间。不同的个体建筑由于物理特征(如结构、材料、形状等)与运行特征(如人流、舒适性需求)的差异,而具备差异化的可响应容量。在需求响应执行过程中,首先由城市电力系統下发总响应需求。然后,各社区运营商参与报量报价,并经过非合作博弈达到市场的均衡解。最后,运营商将竞价得到的响应量分配给所管理的建筑个体。本文提出的两阶段协调优化框架主要解决以下两个问题:

1) 第一阶段,各社区运营商根据管理建筑的状态计算温控负荷的总可调节容量,并参与市场报量报价。在这个过程中,响应量的增加导致用户偏移舒适的惩罚成本增加,社区运营商的收益将随着报量的增加而减少。同时,各运营商之间构成竞争关系,通过非合作博弈达到市场的纳什均衡解。

2) 在第二阶段,个体建筑间温控负荷的差异化响应特征使得社区运营商在分配容量时易导致超调或者欠调。本框架考虑建筑个体的结构差异性、用户舒适度敏感性,从而计算最优响应容量分配方案保证个体间的响应公平性和提高运营商响应净收益。

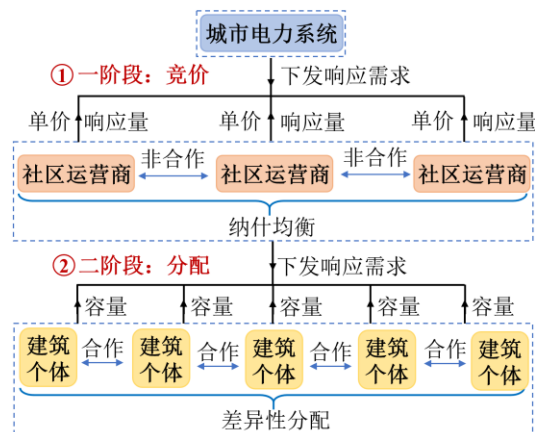


图 1 城市建筑群两阶段协调优化调度框架

Fig.1 Two-stage coordinated optimal scheduling framework of urban building clusters

本文研究的市场场景定位于配电侧本地需求响应市场。该市场由区域配电系统运营商组织,面向辖区内的社区运营商开放,通过价格—报量机制实现分布式灵活负荷的经济协调与局部峰谷调节。社区运营商在此市场中作为虚拟参与主体,代表辖区建筑群集中报量与报价,其行为体现建筑侧灵活负荷的边际响应能力与激励成本。本文假设参与者均已满足市场准入所需的测控与计量条件,研究重点集中于市场内部的博弈协调与两阶段优化机制,而不涉及市场准入、金融结算或跨区交易规则。因此,本文所探讨的“市场报量—报价”过程属于需求响

应调度层面的内部协调机制,研究边界限定在配电网运行优化与建筑群能量管理交互之间。

2 物理模型

2.1 个体建筑响应约束

本文研究的对象为城市建筑群的电力用能侧响应调度问题,重点关注温控类负荷的可调节能力。建筑的热特性、舒适区限制及运行成本均以其用电负荷为基础量化。建筑热惯性以及用户的可调节舒适度区间使其具有一定的可调节能力,个体建筑的响应能力与外部环境条件、以及建筑的几何形状、墙壁材料、用户特征均相关,在任意时刻其内部温度可通过一阶热模型来描述:

$$\rho c V_b \frac{dT_{in,b,t}}{dt} = H_{w,b} A_{w,b} (T_{a,t} - T_{in,b,t}) + H_{r,b} A_{r,b} (T_{a,t} - T_{in,b,t}) + \alpha_b A_{win,b} Q_{sun,t} + N_{fl,b} A_b Q_{in,b,t} - Q_{ac,b,t} \quad (1)$$

$$Q_{ac,b,t} = \eta_{COP,b} \cdot P_{ac,b,t} \quad (2)$$

其中: ρ 与 c 分别为空气的密度与比热容; V_b 与 A_b 分别为个体建筑 b 的体积与底面积; $H_{w,b}$ 与 $H_{r,b}$ 分别为墙壁与屋顶的传热系数; $A_{w,b}$ 与 $A_{r,b}$ 分别为墙壁与屋顶的面积; $A_{win,b}$ 为窗户面积; $T_{in,b,t}$ 与 $T_{a,t}$ 分别为建筑室内温度与室外温度; α_b 为窗户的透光系数; $Q_{sun,t}$ 与 $Q_{in,b,t}$ 分别为太阳辐射强度与室内人为热强度; $Q_{ac,b,t}$ 与 $P_{ac,b,t}$ 分别为空调制冷量与消耗的电功率; $\eta_{COP,b}$ 为空调的制冷效率, $N_{fl,b}$ 为建筑楼层数。

为了更清晰表述影响建筑温控负荷的因素,此处基于差分法,将建筑室内一阶热模型进一步整理为更一般形式:

$$T_{in,b,t+\Delta t} = T_{in,b,t} + \frac{1}{C_b} \left[\frac{T_{a,t} - T_{in,b,t}}{R_{a,b}} + \frac{Q_{sun,t}}{R_{sun,b}} + \frac{Q_{in,b,t}}{R_{in,b}} - \eta_{COP,b} \cdot P_{ac,b,t} \right] \Delta t \quad (3)$$

其中: C_b 为建筑 b 的等效热容; $R_{a,b}$ 为建筑内外空气的对流换热热阻; $R_{sun,b}$ 为太阳辐射作用下建筑围护结构的等效热阻; $R_{in,b}$ 为内源热作用下建筑室内的等效热阻。上述参数均与建筑个体自身的几何结构、建设材料、空间设计等本体物性参数相关,因此对不同的建筑个体即使执行相同的空调调节功率,也会在建筑个体间产生不同的温度偏差。

当建筑温控负荷不参与调节时,设其空调运行基线功率定义为 $P_{ac,b,t}^{base}$, 在此功率下建筑内部保持温度不变。当参与调节执行调节量 $\Delta P_{ac,b,t}$ 时,空调运行功率及建筑内产生的温度偏差为 $\Delta T_{in,b,t+\Delta t}$:

$$P_{ac,b,t} = P_{ac,b,t}^{base} + \Delta P_{ac,b,t} \quad (4)$$

$$\Delta T_{in,b,t+\Delta t} = \frac{1}{C_b} [\Delta P_{ac,b,t} \eta_{COP,b}] \Delta t \quad (5)$$

进一步,空调功率调整过程还需保证室内温度满足用户的舒适度要求,同时空调的运行不能超过机组设计极限:

$$T_b^{\min} \leq T_{in,b,t} + \Delta T_{in,b,t+\Delta t} \leq T_b^{\max} \quad (6)$$

$$P_{ac,b}^{\min} \leq P_{ac,b,t}^{base} + \Delta P_{ac,b,t} \leq P_{ac,b}^{\max} \quad (7)$$

其中: $T_b^{\max}$ 与 $T_b^{\min}$ 为用户可接受舒适温度的上限与下限; $P_{ac,b}^{\min}$ 与 $P_{ac,b}^{\max}$ 为空调机组功率的下限与上限。

式(5)-(7)构成建筑 b 的可调节边界,同时可以看出,不同建筑在围护结构、内部热源及空调能效等方面的差异导致温控负荷响应能力存在显著差异。本文通过四类参数进一步明确刻画影响建筑个体响应差异的因素: 1) 建筑结构参数与材料特性: 包括建筑体积、围护结构面积、屋顶面积、窗户面积、以及墙体传热系数、屋顶传热系数、窗户透光率等; 2) 几何综合参数 A/V : 定义为建筑总围护面积与体积之比; 3) 舒适度敏感系数: 表示单位温度偏差导致的舒适成本惩罚权重,取决于建筑用途及用户类型; 4) 制冷性能系数: 为空调系统制冷能效比,反映单位制冷量对应的电功率消耗。上述参数共同决定个体建筑的可调节容量与响应成本结构,是本文群体层面形成温控响应能力差异性的关键因素。

2.2 社区运营商响应约束

各社区运营商的响应约束包含本地建筑的响应容量约束、报价约束、连接配网节点的电压约束与线路容量约束、以及响应总量约束描述如下:

$$\Delta P_{i,t} = \sum_{b \in \phi_{i,b}} \Delta P_{ac,b,t} \quad (8)$$

$$\sum_{i \in N_i} \Delta P_{i,t} = \Delta P_t \quad (9)$$

$$\lambda_i^{\min} \leq \lambda_{i,t} \leq \lambda_i^{\max} \quad (10)$$

$$V_n^{\min} \leq V_{i \rightarrow n,t} \leq V_n^{\max} \quad (11)$$

$$|P_{i \rightarrow mn,t}| \leq P_{mn}^{\max} \quad (12)$$

其中: $\Delta P_{i,t}$ 社区运营商 i 执行的总响应调节量; $\Delta P_{ac,b,t}$ 为建筑 b 在 t 时刻空调执行的空调功率调整量; $\phi_{i,b}$ 为社区运营商 i 管理的所有建筑个体集合; ΔP_t 为配网下发的在 t 时刻总响应调节需求; N_i 为配网内所有运营商的集合; λ_i 为运营商的响应报价; $\lambda_i^{\min}$ 与 $\lambda_i^{\max}$ 分别为报价的下限与上限; $V_{i \rightarrow n,t}$ 为社区运营商 i 所连接配网节点 n 的电压幅值; $P_{i \rightarrow mn,t}$ 为社区运营商 i 所连接线路 mn 的传输功率值; $V_n^{\min}$ 与 $V_n^{\max}$ 为配网节点电压下限与上限; $P_{mn}^{\max}$ 为线路 mn 的功率传输极限。其中,社区运营商与

配电网节点之间的连接关系通过建筑地理位置与配电网拓扑的空间映射确定。每个社区运营商映射到一个配电网节点，汇聚所管理建筑群的需求响应功率，并与配电网运行约束进行耦合。

2.3 城市配网运行约束

对于城市辐射型配网，可采用 Distflow 模型描述其潮流分布^[28]：

$$P_{n,t} = \sum_{k \in K} P_{nk,t} - \sum_{m \in M} (P_{mn,t} - I_{mn,t}^2 r_{mn}) \quad (13)$$

$$Q_{n,t} = \sum_{k \in K} Q_{nk,t} - \sum_{m \in M} (Q_{mn,t} - I_{mn,t}^2 x_{mn}) \quad (14)$$

$$V_{n,t}^2 = V_{m,t}^2 - 2(P_{mn,t} r_{mn} + Q_{mn,t} x_{mn}) + z_{mn}^2 I_{mn,t}^2 \quad (15)$$

$$I_{mn,t}^2 = \frac{P_{mn,t}^2 + Q_{mn,t}^2}{V_{m,t}^2} \quad (16)$$

其中： $P_{n,t}$ 与 $Q_{n,t}$ 分别为节点 n 的净注入有功、无功功率； $P_{nk,t}$ 与 $Q_{nk,t}$ 分别为之路 nk 在时段 t 的有功与无功潮流； $P_{mn,t}$ 与 $Q_{mn,t}$ 分别为支路 mn 上流过的有功、无功功率； $I_{mn,t}$ 为支路 mn 上流过的电流； r_{mn} 与 x_{mn} 分别为支路 mn 的电抗与阻抗； K 与 M 分别为节点 n 的下游与上游节点集合； $V_{n,t}$ 为节点 n 的电压幅值； z_{mn} 为支路 mn 的阻抗。

进一步，引入松弛变量 $L_{mn,t} = I_{mn,t}^2$ ， $U_{n,t} = V_{n,t}^2$ 将上述潮流模型转为二阶锥模型，描述如下：

$$L_{mn,t} \geq \frac{P_{mn,t}^2 + Q_{mn,t}^2}{U_{m,t}} \Leftrightarrow \begin{cases} 2P_{mn,t} \\ 2Q_{mn,t} \\ L_{mn,t} - U_{m,t} \end{cases} \leq L_{mn,t} + U_{m,t} \quad (17)$$

此外，配网还需满足功率平衡约束、节点电压约束、线路容量约束、机组处理约束，描述如下：

$$P_{n,t} = P_{\text{Grid},n,t} - P_{\text{Load},n,t} - P_{i \rightarrow n,t}^{\text{base}} + \Delta P_{i \rightarrow n,t} \quad (18)$$

$$Q_{n,t} = Q_{\text{Grid},n,t} + Q_{\text{SVC},n,t} - Q_{\text{Load},n,t} \quad (19)$$

$$(V_n^{\min})^2 \leq U_{n,t} \leq (V_n^{\max})^2 \quad (20)$$

$$0 \leq L_{mn,t} \leq (I_{mn}^{\max})^2 \quad (21)$$

$$P_{\text{grid}}^{\min} \leq P_{\text{grid},n,t} \leq P_{\text{grid}}^{\max} \quad (22)$$

$$Q_{\text{grid}}^{\min} \leq Q_{\text{grid},n,t} \leq Q_{\text{grid}}^{\max} \quad (23)$$

$$Q_{\text{SVC},n}^{\min} \leq Q_{\text{SVC},n,t} \leq Q_{\text{SVC},n}^{\max} \quad (24)$$

其中： $P_{\text{Grid},n,t}$ 与 $P_{\text{Load},n,t}$ 分别为主网与负荷的有功功率； $P_{i \rightarrow n,t}^{\text{base}}$ 与 $\Delta P_{i \rightarrow n,t}$ 分别为电网节点 n 处的运营商 i 的基线负荷以及需求响应量； $Q_{\text{Grid},n,t}$ ， $Q_{\text{SVC},n,t}$ 与 $Q_{\text{Load},n,t}$ 分别为主网、无功补偿器和负荷的无功功率； $I_{mn}^{\max}$ 为线路传输电流极限； $P_{\text{grid}}^{\min}$ 与 $P_{\text{grid}}^{\max}$ 分别为主网有功功率的下限与上限； $Q_{\text{grid}}^{\min}$ 与 $Q_{\text{grid}}^{\max}$ 分别为主网无功功率的下限与上限； $Q_{\text{SVC},n}^{\min}$ 与 $Q_{\text{SVC},n}^{\max}$ 分别为无功补偿器的输出无功功率的下限与上限。本框架中需求响应决策为建筑侧有功功率调节，无功功率

未作为需求响应的独立决策变量，而是通过基线负荷、主网支撑及无功补偿装置建模。

3 优化模型

3.1 目标函数

如图1所示，本优化模型包含两阶段，在第一阶段，各运营商目标为最大化效用函数：

$$\max_{\lambda_i, \Delta P_i} F_i = \sum_{t \in N_t} [z_{i,t} \cdot \lambda_{i,t} \cdot \Delta P_{i,t} - C_{i,t}^*(\Delta P_{i,t})] \quad (25)$$

其中： F_i 为社区运营商 i 的效用函数，即响应净收益； λ_i 为社区运营商 i 的单位响应量报价； $\Delta P_{i,t}$ 为社区运营商 i 的总报量； $C_{i,t}^*(\Delta P_{i,t})$ 为第二阶段最优激励成本，即第二阶段执行响应后产生的用户支付成本返回给第一阶段； N_t 为总调度周期。 $z_{i,t}$ 为中标指示变量，在本文模型中按报价排序进行响应中标，即从最低报价者开始执行直到满足总响应需求，其数学约束描述如下：

$$\lambda_i \leq \lambda_j \Rightarrow z_i \geq z_j \quad (26)$$

$$\sum_{i \in N_i} z_{i,t} \cdot \Delta P_{i,t} \geq \Delta P_t, z_i \in \{0,1\} \quad (27)$$

在第一阶段的报量报价后，社区运营商在第二阶段将中标响应任务下发给建筑并支付激励。本文考虑不同建筑类型对舒适度的敏感性不同，提出基于温度偏差的激励支付成本 $C_{i,t}^*(\Delta P_{i,t})$ 描述如下：

$$C_{i,t}^*(\Delta P_{i,t}) = \min_{\Delta P_{i,b}} \sum_{b \in \Phi_{i,b}} \alpha_b \cdot A_b \cdot |T_{b,t+1} - T_b^{\text{set}}|^2 \quad (28)$$

其中： α_b 为建筑 b 的舒适度敏感系数； T_b^{set} 为建筑的最佳设定舒适温度。本文将平方型舒适度成本作为第二阶段优化目标，并通过KKT条件将其嵌入第一阶段效用函数中^[29-30]，形成封闭的双层协调优化框架，关联流程图如图2所示。首先，电网发布总响应需求和价格信号，运营商层根据市场需求和价格信号进行决策，确定分配的容量和价格。接着，建筑层根据运营商分配的容量进行响应优化，计算出最佳的响应功率与舒适度成本。在第一阶段中，多个社区运营商通过最优响应迭代参与非合作博弈：各运营商在给定其他运营商报量与报价策略的条件下，独立优化自身效用函数。系统采用基于报价排序的容量清算机制，按照报价由低到高依次接受运营商的响应容量直至满足总响应需求。当多个运营商报价相同时，采用基于可用响应容量的确定性排序规则进行清算，未中标运营商不承担响应执行任务，因此不产生激励支付成本，本文不考虑未中标补偿机制。两阶段之间通过反馈机制进行信息传递，运营商层的决策依据建筑层的反馈结果进行调整，直到达到收敛条件。

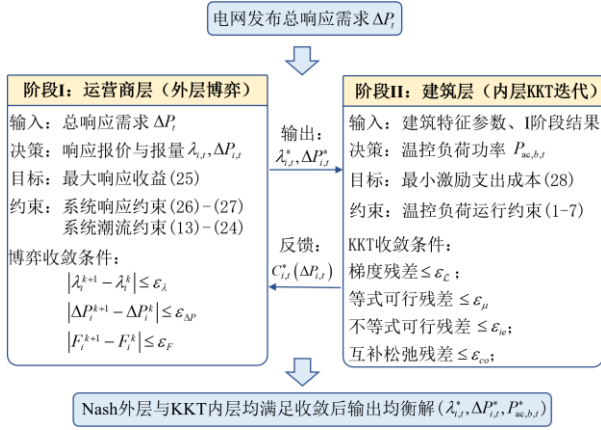


图2 两阶段协调优化关联流程图

Fig.2 Flowchart of the two-stage coordinated optimization

3.2 基于 KKT 的两阶段协调

在本文模型中,第一阶段决策需要同时考虑第二阶段分配方案的影响。基于 KKT 条件重构第二阶段分配优化,并结合第一阶段运营商的报量报价决策过程,整合为单层优化目标函数及约束如下:

$$\max_{\lambda_i, \Delta P_i, \Delta P_{i,b}} \sum_{t \in N_t} \left[z_{i,t} \cdot \lambda_{i,t} \cdot \Delta P_{i,t} - \sum_{b \in \Phi_{i,b}} \alpha_b \cdot A_b \cdot |T_{b,t+1} - T_b^{\text{set}}|^2 \right] \quad (29)$$

引入对偶变量 μ_i , $\eta_{i,b}^-$, $\eta_{i,b}^+$, $v_{i,b}^-$, $v_{i,b}^+$, 结合原问题中的等式约束与不等式约束,构造第二阶段拉格朗日函数 $\mathcal{L}_i$ 及约束如附录 A 中式 A1–A9 所示。

3.3 非合作博弈迭代

在第一阶段中,多个运营商构成非合作博弈,迭代思路如下:

- (1) 初始化各运营商的报量 $\Delta P_i^{(0)}$ 与报价 $\lambda_i^{(0)}$; 初始化收敛阈值 $\varepsilon > 0$ 与迭代次数 $k = 1$; 设置最大迭代次数 $k_{\max}$;
- (2) 对于每一个运营商,固定其他运营商的策略,计算本地的最佳响应策略;
- (3) 依据当前运营商的报价与其他运营商的报价进行排序,预测是否中标;
- (4) 基于 KKT 条件响应量分配问题;
- (5) 求解第一阶段运营商的效用函数最大化问题;
- (6) 更新报价与报量,获得新的策略 $\Delta P_i^{(k+1)}, \lambda_i^{(k+1)}$;
- (7) 检查收敛条件,按下式计算迭代变化量是否小于收敛阈值:

$$\max_{i,j} \left(\left| \lambda_i^{(k+1)} - \lambda_i^{(k)} \right|, \left| \Delta P_i^{(k+1)} - \Delta P_i^{(k)} \right| \right) \quad (30)$$

- (8) 若小于设定收敛阈值或超过最大迭代次数则迭代停止,否则返回(2)并增加迭代次数。

3.4 纳什均衡性分析

在本模型提出的非合作博弈框架下,需要验证此报量报价的博弈过程需要至少有一个纯策略纳什均衡解,我们应用 Glicksberg-Fan-Debreu 定理,分别分析每个条件的成立性:

(1) 由第二部分的物理模型可知,每个运营商的报价与报量需要满足实数区间约束,每个参与响应的建筑个体其响应量也同时满足实数区间约束,因此每个运营商的策略空间满足非空、紧致和凸集合的要求。

(2) 由第一阶段每个运营商的目标函数可知,其第一项的收益项为双线性项。第二项的激励支付成本为凸函数,则整体的目标函数为凹函数,满足每个博弈参与者的效用函数关于自身变量是连续且准凹的要求。

(3) 在本模型的中标机制下,运营商是否能够中标与所有运营商的报价排序有关,当未出现精确评价者的情况下,中标边界为分段连续函数,因此满足效用函数关于他人行为是连续的要求。

基于上述分析可知,该博弈至少存在一个纯策略纳什均衡解。进一步地,当共享约束具有线性结构且二阶段反馈函数为凸连续形式时,该均衡解在效用空间上可视为集中优化问题的近似解,其数值偏差可描述为:

$$|J_{\text{central}}^* - J_{\text{game}}^*| \leq \varepsilon(\lambda) \quad (31)$$

其中: J_{central}^* 为集中最优成本, J_{game}^* 为非合作博弈解成本, $\varepsilon(\lambda)$ 为非合作博弈均衡解与集中全局最优解之间的偏差,当偏差足够小,即可说明纳什均衡解为集中优化的有效近似解。

4 算例分析

4.1 算例描述

本文选取中国南方某城市部分建筑与城市电网作为测试场景,并依据建筑的地理位置分布以及与城市 110kV 电网节点的物理映射关联将建筑分群,每一个建筑群由独立的运营商进行管理并参与电网需求响应。本文算例中的建筑群需求响应过程通过建筑—运营商—配电网节点的地理映射关系,与城市配电网运行约束进行耦合。各建筑在执行响应调节后,其负荷变化将汇聚至对应配电网节点,作为节点净负荷的一部分参与 DistFlow 潮流计算。运营商的报量决策及建筑层响应分配均需满足节点电压上下限与线路容量约束。其中,基于开源建筑地理信息数据源获取建筑地理位置信息、建筑高度信息、建筑几何形状信息以及建筑的使用类型信息^[21]。同时,按照本地区不同功能类型(工业、

商业、居民)建筑个体的用能特征、空调设备规格、用户组成类型等历史数据,设定不同建筑个体的差异化参数,如附录B图B1所示。

进一步,本文设置三个对比算例场景来说明模型的有效性。场景1:忽略运营商之间的博弈关系,电网总响应需求按负荷比例分配给所有运营商,同时忽略个体建筑间的差异性;场景2:忽略运营商之间的博弈关系,电网总响应需求按负荷比例分配给所有运营商,考虑运营商管理的建筑个体响应能力的差异性;场景3:本文提出的优化模型,考虑运营商之间博弈以及建筑个体响应能力的差异性。

4.2 算例结果分析

本算例共包含建筑个体1727栋,按地理位置划分为6个街区,各街区建筑类型分布情况如附录B表B2所示。在响应调节前,建筑内部保持最佳舒适温度24摄氏度,此时计算建筑总供冷能耗为基线负荷,如附录B图B1中红色曲线所示,可以看出建筑基线负荷随一天内温度的变化呈现显著的峰谷差异,并在下午14:00-16:00时段到达顶峰。建筑自身的热惯性及用户的可调节区间使其具备一定的可调节空间,附录B图B1中红色阴影与绿色阴影分别为电网下发的上调与下调响应需求。

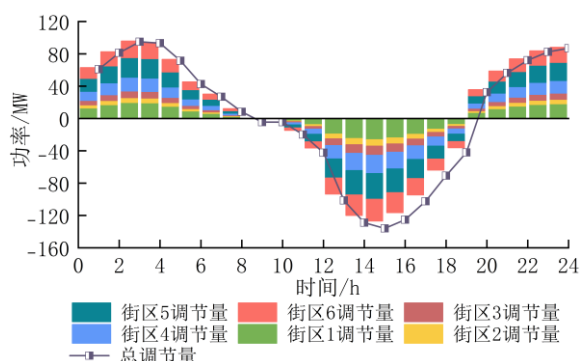


图3 场景1中各街区响应调节量

Fig.3 Response capacity for each neighborhood in Case 1

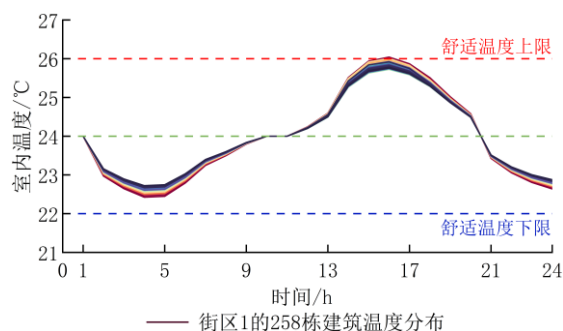


图4 场景1中街区1建筑室内温度曲线

Fig.4 Indoor temperature profile of neighborhood 1 building

在本文的场景1中,忽略街区之间与建筑个体之间的差异性,电网依据总调节需求,按照负荷比

例将调节量分配给6个街区,如图3所示。同时,街区运营商进一步按照个体建筑的负荷比例分配给每一个建筑个体。然而,个体建筑几何形状的差异性导致相同调节量下建筑内将产生不同的温度偏差,以街区1的258栋建筑为例,从图4可以看出在上调和下调阶段,建筑之间皆存在温度调节偏差,并且随着调节量的增加,这种偏差会累积增加,例如时段2:00-6:00与时段14:00-18:00。这主要是由于建筑形状导致其对周围环境的敏感性与可调节能力有差异。从方程(1)可以看出,建筑的体积决定了内部的储热能力,体积越大表示建筑可储能能力越大,而墙壁面积决定了建筑散热的速率,面积越大,建筑内的冷量耗散越快。为了更好的量化与分析建筑参数对响应调节过程的影响,本部分采用 A/V 参数来作为衡量建筑响应能力的指标,其表示个体建筑墙壁面积与建筑体积之间的比值。以街区1建筑为例,取16:00处所有建筑的温度偏差值与 A/V 参数进行相关性分析,如图5。

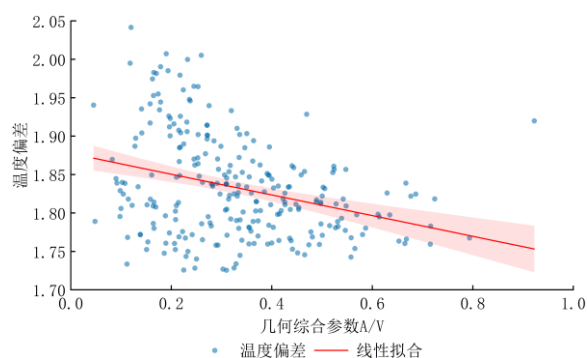


图5 建筑个体 A/V 参数与响应温度偏差间的相关性

Fig.5 Correlation between building individual A/V parameters and response temperature deviation

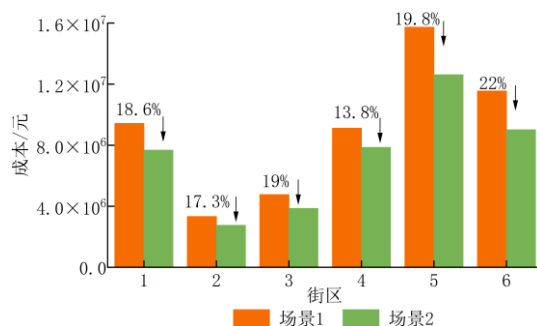


图6 区域内6个建筑街区在场景1-2中的响应成本

Fig.6 Response costs of six building blocks in Case 1-2

从图5可以看出,建筑 A/V 参与与温度偏差一直存在显著的负相关(皮尔逊相关系数 $r = -0.47$, $p < 0.0001$)。这表明, A/V 值较低的建筑(体积大、热容大)更能缓冲外界温度变化,表现出更小的温度波动。相反, A/V 值较高(墙壁面积大、热传递

快)的建筑则对环境变化响应更敏感,温度波动更明显。因此,在需求响应的容量分配过程中应该考虑建筑结构参数对调节能力的影响。

此外,在场景1的按负荷比例分配过程中,忽略了建筑个体的使用类型带来的响应成本差异。例如相对于居民型与工业型建筑,商业型建筑表现对温度更加敏感,相同的温度偏差下将产生更高的响应成本。因此,在场景2中,考虑个体建筑的结构参数的差异性、考虑建筑使用类型及其对温度的敏感性,将各街区运营商的响应容量进行优化分配,对比场景1与场景2,街区1-6的响应成本如图6所示,同时依旧以街区1为例,所有个体建筑的响应支付成本变化如图7所示。

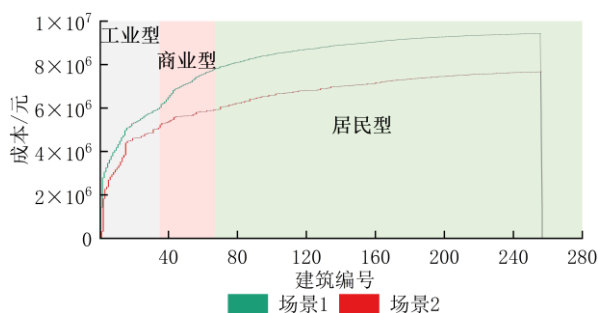


图7 街区1中建筑个体在场景1与场景2中的响应成本

Fig.7 Response cost of buildings in block 1 in Case 1-2

从图7中可以看出,相比于场景1,在场景2中考虑个体建筑结构差异性与使用类型进行响应容量的优化分配可以有效的减少响应支付成本。从6个街区的成本下降分布来看,平均成本下降可以超过50%,其中商业型建筑比例较高的街区5与街区6的成本下降比例到达20%。结合图6中街区1在不同场景中个体建筑的成本分布,在场景2中,明显的是,商业型建筑的响应成本明显减少,其响应容量转移至其他类型建筑。同时,也可以发现,对比两个场景中的工业型与居民型的成本变化,发现特别是在工业型建筑中,个体的成本变化明显,整体的成本仍有明显下降,这主要是通过考虑个体建筑的形状参数差异,避免个别建筑出现温度偏差较大的情况,因此整体的成本得到有效的下降。

进一步,在场景3中,在考虑建筑个体差异的情况下,考虑多个街区运营商之间的互动过程,各街区互动优化后的执行响应调节量如附录C图C1所示。相比于场景1(图3),在考虑个体之间以及街区之间的差异性后,街区1最终获得的响应容量有较多的增加,街区5最终获得的响应容量有较多的减少,这主要与前文分析的两类成本变化有关。相比于其他街区,街区1具有较少的商业型,但具

有较多的居民型,其温度敏感性较弱。同时,街区1中的建筑平均A/V参数值较小,这意味着街区1内的建筑在参与响应调节过程中产生的温度偏差较小,这也导致街区1具有较小平均响应支付成本。

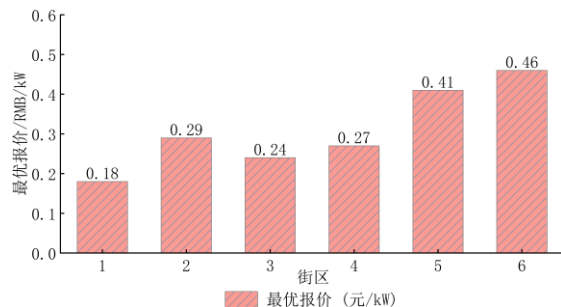


图8 各社区运营商在纳什均衡下的最优报价结果

Fig.8 The optimal bidding results of various community operators under Nash equilibrium

上述结果表明,不同街区在优化后获得的响应容量存在显著差异。为进一步解释该容量分配结果在市场层面的形成机制,图8给出了第一阶段非合作博弈在纳什均衡下各社区运营商的最优报价结果。可以看出,不同街区运营商的报价存在显著差异。其中,街区1报价最低(0.18元/kW),而街区5与街区6报价最高(分别为0.41元/kW与0.46元/kW)。结合附录B表B2中建筑功能构成可以发现,商业型建筑占比较高的街区,其舒适度敏感系数较大,二阶段激励支付成本更高,从而在博弈均衡下形成更高的容量报价;相反,以居民型建筑为主的街区,其响应成本较低,报价水平相对较低。该结果表明,所提非合作博弈模型能够根据建筑群响应能力差异自发形成差异化报价结构,并引导响应容量向低成本区域合理配置。

附录C图C2展示了在场景3中街区1的所有建筑的室内温度分布情况。对比图3场景1中按比例分配方式下的温度分布,可以看出在优化场景下运营商可以更好的调用不同建筑个体的响应潜力,保持低响应成本的建筑个体执行更多响应任务来降低整体成本。

4.3 优化模型有效性分析

为验证所提非合作博弈框架最优解的有效性,本节进一步设置对比场景4:集中协调调度。在该场景中,假设各社区运营商的建筑信息、成本函数及舒适度参数均可由系统调度中心完全掌握,由调度中心统一优化全市建筑群响应分配,以获得理论上的集中最优结果。该场景用于评估非合作博弈模型在分布式条件下对集中最优解的逼近程度与计

算效率优势。表 1 比较了本文方法（场景 3）与集中协调场景 4 的结果。由表可见，所提非合作博弈方法的总响应成本为 63.2 万元，仅比集中协调模型高 3.6%，而求解时间减少约 40%，显示出良好的经济性与计算效率。平均建筑舒适度偏差分别为 0.45℃与 0.43℃，差异小于 5%，说明二阶段激励反馈机制能有效保证舒适性约束。综合结果表明，本文构建的非合作博弈框架在信息分散和运营主体独立的条件下，仍能逼近集中最优解，具备实际工程可行性。

表 1 非合作博弈与集中协调结果对比

Table 1 Comparison between non-cooperative game and centralized coordination

场景	总响应成本 (万元)	平均舒适 偏差(℃)	收敛时间 (s)	成本差异 率
场景 3	63.2	0.45	408	+3.6%
场景 4	61.0	0.43	672	—

为验证本文所提非合作博弈求解框架的收敛性，附录 C 图 C3 展示了 6 个运营商在博弈过程中报价与报量的迭代变化曲线。在统一初始报价条件下，各运营商因所辖建筑群热惯量、舒适度权重及响应约束不同，首回合最优响应幅度存在差异，导致初始残差分布较为分散。随着迭代推进，残差在前 5 - 10 次内快速下降，并在超过 20 次迭代后逐步满足收敛判据（报价与报量的迭代残差均小于预设阈值 10^{-3} ），即系统达到纳什均衡解。整个迭代过程中，运营商报价的收敛曲线呈指数下降趋势，表明本文迭代法在算例中具有较好的数值稳定性与收敛效率。表 2 进一步给出了不同建筑规模与运营商数量下的计算效率。为保证对比的可比性，扩展算例均由原基础线性扩展得到，从而保持建筑物理属性与负荷特性一致。结果显示，随着建筑群与运营商数量同步增加，最终收敛迭代次数由 21 次增至 32 次与 39 次，反映多主体耦合增强与清算边界非光滑性导致的收敛步数增长。同时吗，单次迭代时间随规模呈明显上升，总体收敛时间分别为 408s、1332s 与 2537s，在日前决策调度中，此计算负担的增长仍在可控范围内。

表 2 不同规模算例计算效率对比

Table 2 Comparison of computational complexity and efficiency among different cases

算例规模	建筑数	运营商 数	迭代收 敛次数	单次迭 代时间 (s)	收敛 时间 (s)
------	-----	----------	------------	-------------------	-----------------

基线算例	1727	6	21	19.43	408
扩展 1 倍	3454	12	32	41.65	1332
扩展 2 倍	5181	18	39	65.05	2537

5 结论

本文考虑城市建筑群温控负荷响应能力差异，构建了运营商—建筑两阶段协调优化框架：第一阶段以非合作博弈实现多运营商价格—报量的去中心化协调，第二阶段协调建筑个体差异化响应能力，并通过嵌套迭代实现全局一致收敛。

算例分析表明，在保证各建筑舒适区与网络可行性的前提下，所提方法相较基线策略显著降低系统综合成本并抑制峰值负荷与越限时长；两阶段协调优化框架可适应大规模建筑群场景，其收敛稳定性与计算精度满足城市配网调度要求。基于本文协调优化框架可以有效的减少响应带来的支付成本，提高建筑个体之间以及街区协作的运行经济性。

局限性与展望：当前工作未纳入储能与非温控负荷的跨时标耦合效应，建筑参数与市场行为仍以“已知/静态”假设为主。后续将扩展至多类灵活资源协同（储能、可转移负荷）与多市场机制（准入与结算规则）的联动，并开展更大规模实证与多城市对比，提升方法的普适性与工程推广价值。

参考文献：

- [1] 范帅, 危怡涵, 何光宇, 等. 面向新型电力系统的需求响应机制探讨[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(7): 1-12.
FAN Shuai, WEI Yihan, HE Guangyu, et al. Discussion on demand response mechanism for new power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 1-12.
- [2] 金坤坎, 郝丽丽, 闫新旭等. 考虑热浪或寒潮下城市电网供需安全的风-光-抽蓄协同规划[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(10): 30-39.
JIN Kunkan, HAO Lili, YAN Xinxu, et al. Collaborative planning of wind-photovoltaic-pumped storage considering supply-demand security of urban power grid under heat wave or cold wave[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(10): 30-39.
- [3] HUANG W, ZHANG N, KANG C, et al. From demand response to integrated demand response: Review and prospect of research and application[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(2): 1-13.
- [4] SIANO P. Demand response and smart grids—A survey[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2014, 30: 461-478.
- [5] IEA (2023), Tracking Clean Energy Progress 2023[R/OL], IEA, Paris. [2026-02-01]. <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023>, Licence: CC BY 4.0
- [6] REN P, CHEN L, HUI H. Power-controllable variable refrigerant flow system with flexibility value for demand response[J]. Energy, 2024, 313: 133820.

- [7] Qi T, Ye C, Hui H, et al. Fast frequency regulation utilizing non-aggregate thermostatically controlled loads based on edge intelligent terminals[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 15(4): 3571-3584.
- [8] 张振威, 惠红勋, 胡厚鹏, 宋永华. 面向城市“微气候-能耗”恶性循环的建筑群梯级能效优化方法研究[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-12 [2026-03-22]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20251231.1422.007>.
ZHANG Zhenwei, HUI Hongxun, HU Houpeng, and SONG Yonghua. Hierarchical Energy Efficiency Optimization of Urban Building Clusters Under the "Microclimate-Energy Consumption" Vicious Cycle[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-12 [2026-03-22]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20251231.1422.007>.
- [9] 丁江, 孙磊, 丁明. 计及冷负荷效应时变特性的含风储联合系统负荷恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(6): 108-115.
DING Jiang, SUN Lei, DING Ming. Load restoration strategy with wind farm-battery energy storage system considering time variation characteristic of cold load pickup[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(6): 108-115.
- [10] 蒋思宇, 惠红勋, 胡厚鹏, 等. 建筑虚拟电厂可信调节能力概念与量化方法[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(20): 62-72.
JIANG Siyu, HUI Hongxun, HU Houpeng, et al. Concept and quantification method for credible regulation capability of building virtual power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(20): 62-72.
- [11] 陈昌铭, 薛禹胜, 李泽等. 计及温控负荷时变特性的电力负荷恢复分布鲁棒随机优化[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(14): 109-119.
CHEN C, XUE Y, LI Z, MA H, TAN B, LIN Z, WEN F. Distributionally Robust Stochastic Optimization for Power System Load Restoration Considering Time-varying Characteristics of Thermostatically Controlled Loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(14): 109-119.
- [12] 徐俊俊, 陈洪凯, 张腾飞, 等. 需求响应视角下有源配电网分层分区切负荷方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(7): 244-252.
XU Junjun, CHEN Hongkai, ZHANG Tengfei, et al. Hierarchical and partitioned load shedding method of active distribution network in demand response perspective[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(7): 244-252.
- [13] L. Chen and H. Hui. Model Predictive Control-Based Active/Reactive Power Regulation of Inverter Air Conditioners for Improving Voltage Quality of Distribution Systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2025, 21(1): 922-931.
- [14] 崔婧琪, 冀浩然, 李 鹏, 等. 考虑数据隐私保护的分布式电源集群自适应可信协同决策方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(24): 111-120.
CUI Jingqi, JI Haoran, LI Peng, et al. Adaptive and trustworthy collaborative decision-making for distributed generator clusters considering data privacy protection[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(24): 111-120.
- [15] 杨海柱, 李梦龙, 江昭阳, 等. 考虑需求侧电热气负荷响应的区域综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 30-37.
YANG Haizhu, LI Menglong, JIANG Zhaoyang, et al. Optimal operation of regional integrated energy system considering demand side electricity heat and natural-gas loads response [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 30-37.
- [16] 王长浩, 高红均, 周文毅, 等. 考虑准线需求响应的高比例新能源电力系统调度优化[J]. 电网技术, 2024, 48(11): 4427-4435.
WANG Changhao, GAO Hongjun, ZHOU Wenyi, et al. High proportion new energy power system scheduling optimization considering customer directrix line demand response [J]. Power System Technology 2024, 48(11): 4427-4435.
- [17] GREEN D H, LIN Y, Botterud A, et al. Pareto-Optimized Thermal Control of Multi-Zone Buildings Using Limited Sensor Measurements[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(5): 4674-4689.
- [18] 万思宇, 程 杉, 刘炜炜, 等. 基于多主体博弈的配电网-多综合能源系统分布式优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(22): 111-122.
WAN Siyu, CHENG Shan, LIU Weiwei, et al. Distributed optimal scheduling of distribution network-multi-integrated energy systems based on multi-agent game theory[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(22): 111-122.
- [19] 李鹏, 吴迪凡, 李雨薇, 等. 基于综合需求响应和主从博弈的多微网综合能源系统优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1307-1721.
LI Peng, WU Difan, LI Yuwei, et al. Optimal dispatch of multi-microgrids integrated energy system based on integrated demand response and Stackelberg game [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1307-1721.
- [20] 徐博强, 张沛超, 何光, 等. 基于主从博弈的热水器集群的负荷准线控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7785-7797.
XU Boqiang, ZHANG Peichao, HE Guangyu, et al. Stackelberg game based control method for water heater cluster using customer directrix line[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7785-7797.
- [21] 田海东, 何山, 艾纯玉, 等. 计及能源交易下基于纳什议价模型的多微网合作博弈运行优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 29-41.
TIAN Haidong, HE Shan, AI Chunyu, et al. Optimization strategy for cooperative game operation of multi-microgrids based on the Nash bargaining model considering energy trading[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 29-41.
- [22] SONG M, GAO C, YAN H, et al. Thermal battery modeling of inverter air conditioning for demand response[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 9(6): 5522-5534.
- [23] 廖奕洋, 王晓彤, 郭森. 基于博弈论组合赋权和二维可分割云模型的 VPP 运行安全风险评价研究[J]. 智慧电力, 2025, 53(10):

- 70-78.
- LIAO Yiyang, WANG Xiaotong, GUO Sen. Research on Operational Security Risk Assessment of Virtual Power Plants Based on Game Theory Combination Weighting and Two-dimensional Divisible Cloud Model[J]. Smart Power, 2025, 53(10): 70-78.
- [24] Lyu W, Cui Z, Yuan M, et al. Cooperation for trans-regional electricity trading from the perspective of carbon quota: A cooperative game approach[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 156: 109773.
- [25] N. T. Dinh et al. Modeling Irrational Behavior of Residential End Users Using Non-Stationary Gaussian Processes[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(5): 4636-4648.
- [26] 资源环境科学数据平台. 中国主要城市建筑地面轮廓和建筑高度空间分布数据[EB/OL]. [2026-02-01]. <https://www.resdc.cn/>.
- [27] 杨祺铭, 郭嘉雨, 李更丰, 季陈林, 别朝红, 李明昊, 周政. 基于多类型虚拟电厂协同及交易结算的配电网弹性提升策略[J]. 智慧电力, 2025, 53(10): 26-35.
- YANG Qiming, WU Jiayu, LI Gengfeng, JI Chenlin, BIE Zhaohong, LI Minghao, ZHOU Zheng. Resilience Enhancement Strategy for Distribution Networks Based on Coordination and Transaction Settlement of Multiple Types of Virtual Power Plants[J]. Smart Power, 2025, 53(10): 26-35.
- [28] 赵晶晶, 樊濠诚, 王涵, 等. 考虑碳减排的配电网电-氢混合储能系统优化配置[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(11): 153-160.
- ZHAO Jingjing, FAN Haocheng, WANG Han, et al. Optimal configuration of electricity-hydrogen hybrid energy storage system in distribution network considering carbon emission reduction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(11): 153-160.
- [29] 严干贵, 沙千理, 李军徽, 等. 调节性能导向的火-储联合调频混合储能双层优化配置策略[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(15): 43-53.
- YAN Gangui, SHA Qianli, LI Junhui, et al. Regulation Performance-oriented Bi-level Optimal Configuration Strategy of Hybrid Energy Storage for Thermal Power-Energy Storage Frequency Regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(15): 43-53.
- [30] 王艺博, 刘红丹, 周忠旭等. 新兴市场背景下考虑高铁配储的日前-日内两阶段优化策略[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(11): 80-87.
- WANG Yibo, LIU Hongdan, ZHOU Zhongxu, et al. Day-ahead and intra-day two-stage optimization strategy considering high-speed rail with energy storage in context of emerging markets[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(11): 80-87.

作者简介:

王楠, 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统优化调度 (E-mail: wang_nan1218@qq.com);

张振威, 男, 博士研究生, 主要研究方向为城市微气候演化下能源与建筑系统联合建模与优化管理 (E-mail: zw.zhang@connect.um.edu.mo);

惠红勋, 男, 助理教授, 博士, 通信作者, 主要研究方向为电力系统需求响应建模、优化与控制 (E-mail: hongxunhui@um.edu.mo)。

Two-Stage Coordinated Optimal Scheduling of Urban Building Clusters Considering Differences in Thermo-Controlled Load Responsiveness

WANG Nan¹, HU Hongpeng¹, CHEN Zerui¹, ZHANG Zhenwei², HUI Hongxun²

(1. Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550005, China; 2. State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City, University of Macau, Macau 999078, China)

Abstract: Building thermal loads can effectively enhance the integration capacity of renewable energy and reduce operating costs; however, differences in the structural and load characteristics of individual buildings make it difficult to directly apply existing response capacity allocation mechanisms to large-scale building clusters. To fully tap into the response potential of urban building clusters while balancing user comfort requirements, a two-stage coordinated optimization framework has been developed that accounts for variations in the response capabilities of building thermal loads. First, a virtual energy storage model for individual buildings is developed based on an equivalent thermal model, which incorporates the building envelope, internal thermal characteristics, and user comfort needs. Second, a two-stage coordinated optimization scheduling framework is introduced, considering both the geographical location of the building and the role of its operator. In the first stage, a non-cooperative game is formulated among multiple operators serving the building cluster to maximize individual benefits, while ensuring that the total response demand of the grid is met. In the second stage, the operators allocate the first-stage capacity to all buildings and seek to minimize the payment cost by taking into account the differences in responsiveness and temperature sensitivity among individual buildings. Finally, the effectiveness of the proposed method is demonstrated through numerical cases.

Key words: Demand response; urban building clusters; thermo-controlled loads; two-stage optimization; game theory

附录 A

构造拉格朗日函数 $\mathcal{L}_i$ 如下:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_i = & \sum_{b \in \Phi_{i,b}} \alpha_b A_b (T_{b,t+1} - T_b^{\text{set}})^2 + \mu_i \left(\Delta P_i - \sum_{b \in \Phi_{i,b}} \Delta P_{i,b,t} \right) + \\ & \sum_{b \in \Phi_{i,b}} \eta_{i,b}^- (P_{ac,b}^{\min} - P_{ac,b,t}) + \sum_{b \in \Phi_{i,b}} \eta_{i,b}^+ (P_{ac,b,t} - P_{ac,b}^{\max}) + \\ & \sum_{b \in \Phi_{i,b}} \nu_{i,b}^- (T_b^{\min} - T_{ac,b,t+\Delta T}) + \sum_{b \in \Phi_{i,b}} \nu_{i,b}^+ (T_{ac,b,t+\Delta T} - T_b^{\max}) \end{aligned} \quad (\text{A1})$$

(1) 一阶最优性条件:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}_i}{\partial \Delta P_{i,b}} = & -2\alpha_b A_b (T_{b,t+1} - T_b^{\text{set}}) \cdot \frac{\Delta t}{C_b} - \mu_i - \eta_{i,b}^- + \\ & \eta_{i,b}^+ - \nu_{i,b}^- \cdot \frac{\Delta t}{C_b} + \nu_{i,b}^+ \cdot \frac{\Delta t}{C_b} \\ = & 0 \end{aligned} \quad (\text{A2})$$

(2) 原始可行性:

$$T_b^{\min} \leq T_{in,b,t+\Delta t} \leq T_b^{\max} \quad (\text{A3})$$

$$P_{ac,b}^{\min} \leq P_{ac,b,t} \leq P_{ac,b}^{\max} \quad (\text{A4})$$

(3) 对偶可行性:

$$\eta_{i,b}^-, \eta_{i,b}^+, \nu_{i,b}^-, \nu_{i,b}^+ \geq 0 \quad (\text{A5})$$

(4) 互补松弛条件:

$$\eta_{i,b}^- (P_{ac,b}^{\min} - P_{ac,b,t}) = 0 \quad (\text{A6})$$

$$\eta_{i,b}^+ (P_{ac,b,t} - P_{ac,b}^{\max}) = 0 \quad (\text{A7})$$

$$\nu_{i,b}^- (T_b^{\min} - T_{ac,b,t+\Delta T}) = 0 \quad (\text{A8})$$

$$\nu_{i,b}^+ (T_{ac,b,t+\Delta T} - T_b^{\max}) = 0 \quad (\text{A9})$$

附录 B

表 B1 建筑主要响应差异性参数设置

参数类型	墙体传热系数	屋顶传热系数	窗户透射光系数	舒适度敏感系数	制冷性能系数	内源热密度
居民型	0.65	0.75	0.6	0.8	2.8	6.0
商业型	1.2	1.3	0.75	1.5	3.2	9.5
工业型	0.95	1.1	0.55	1.0	3.0	8.0

表 B2 六个街区建筑类型分布情况

Table B2 Distribution of building types in six blocks

街区	建筑总数	居民型 (%)	商业型 (%)	工业型 (%)
街区 1	258	62%	15.5%	22.5%
街区 2	250	48%	24%	28%
街区 3	487	49.3%	24.6%	26.1%
街区 4	362	47%	19.3%	33.7%
街区 5	244	28.7%	57.4%	13.9%
街区 6	126	15.9%	71.4%	12.7%

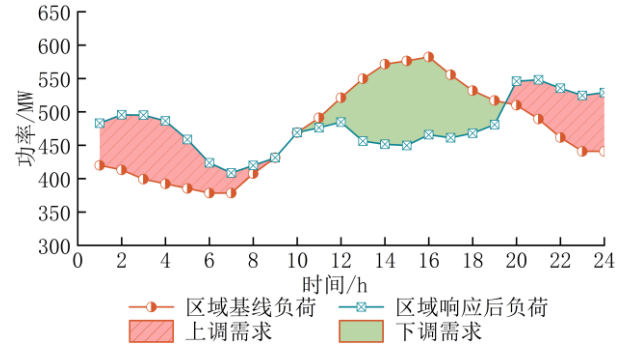


图 B1 区域建筑基线负荷及响应需求

Fig.B1 Block building baseline loads and response requirements

附录 C

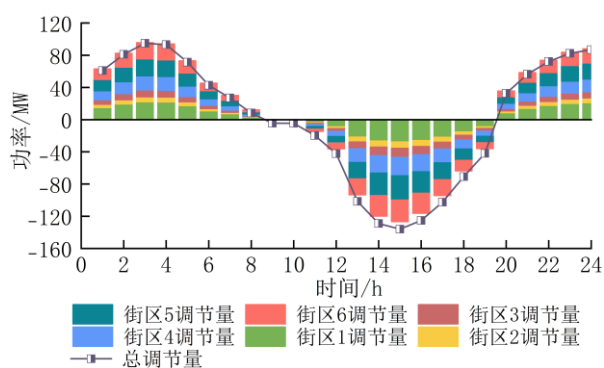


图 C1 场景 3 中各街区响应调节量

Fig.C1 Response capacity for each neighborhood in Case 3

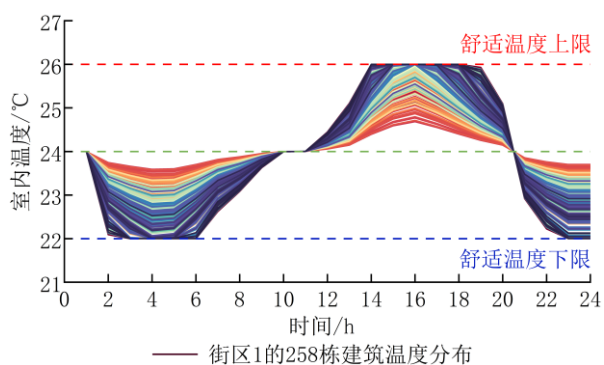


图 C2 场景 3 中街区 1 建筑室内温度曲线

Fig.C2 Indoor temperature profile of neighborhood 1 building

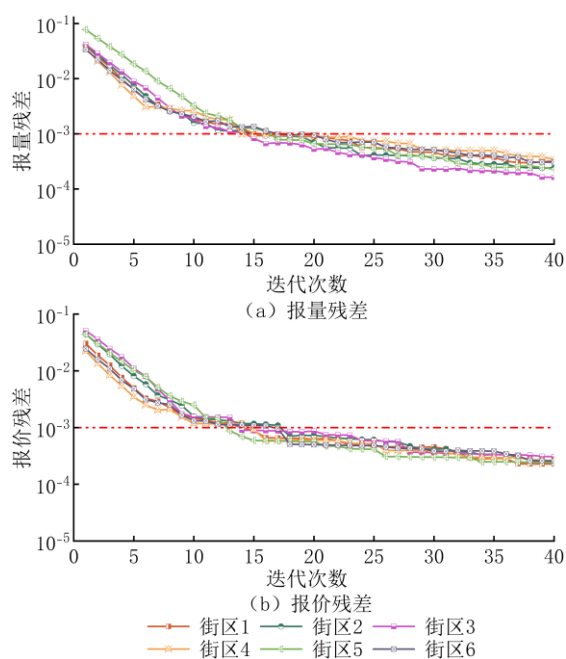


图 C3 迭代收敛曲线: (a) 报价残差; (b) 报价残差

Fig.C3 Iterative convergence: (a) bid residuals; (b) quantity residuals