

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241563

考虑用户多次响应的空调负荷集群控制与调度策略

刘林, 李成鑫, 赵林昕

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 空调负荷是重要的需求侧资源, 但现有基于温度控制方式的空调可调节能力研究多着眼于温度设定值调整期间的系统性能研究, 不涉及温度设定值回调, 只考虑了空调一次性参与需求响应, 这不利于充分利用空调的可调节能力。为了系统描述空调集群在温度设定值调整和恢复全过程中的聚合功率特性, 针对温度设定值恢复阶段扩充了在温度控制方式中被广泛应用的安全协议(safe protocol, SP), 建立了完整描述同质空调参与需求响应全过程的聚合功率模型。在此基础上, 考虑空调用户舒适度的一致性, 提出了以舒适度因子为排序指标的用户选择模型, 用以确定空调用户分时分批、多次轮换参与需求响应的调控策略。仿真结果表明, 所提调控策略能保证空调用户多次参与调控, 在减小用户间舒适度差异的同时, 具有更高的功率控制精度和更小的功率反弹波动。

关键词: 需求响应; 空调负荷; 聚合功率模型; 负荷调度; 反弹平抑

Cluster control method and scheduling strategy of air-conditioning loads considering multi-round participation of users in demand response

LIU Lin, LI Chengxin, ZHAO Linxin

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Air conditioning loads (ACLs) are important demand-side resources. However, existing researches on the adjustable capability of ACLs based on temperature control mainly focus on system performance during the adjustment of temperature setpoints, without addressing the recovery of setpoints. These approaches typically assume one-time participation of ACLs in demand response, which limits the full utilization of the flexibility. To systematically describe the aggregated power characteristics of air conditioner clusters throughout the entire process of temperature setpoint adjustment and recovery, the widely used safe protocol (SP) in temperature control is expanded to the recovery phase. Based on this, an aggregated power model that fully describes the process of homogeneous ACLs participation in demand response is established. Furthermore, considering the consistency of air conditioning users' comfort, a user selection model based on a comfort factor ranking index is proposed to determine the regulation strategy of air conditioning users participating in demand response in batches and multiple rotations. Simulation results show that the proposed control strategy enables multiple rounds of user participation, reduces differences in comfort levels among users, and achieves higher power control accuracy with smaller power rebound fluctuations.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Sichuan Province (No. 2022NSFSC0206).

Key words: demand response; air conditioning loads; aggregated power model; load scheduling; rebound flatten

0 引言

随着间歇性可再生能源(如风能、太阳能)和新型电网负荷(如电动汽车)的大规模并网, 电力系统供需矛盾愈加突出, 其安全、稳定运行面临巨大挑战^[1-3]。在传统电网运行模式下, 依靠调整供给侧发

电机组出力往往需要付出较高成本^[4], 因此引导用户参与需求响应, 挖掘负荷侧的可调节潜力以缓解电网供电压力, 具有更高的应用价值^[5-6]。空调负荷具备热储能特性, 调度方式灵活^[7], 用户规模庞大, 且具有响应速度快、可控性强^[8]等优点, 能在不影响或少影响用户的使用体验下提供较大的调节潜力。近年来智能电网的双向通信技术和高级量测体系的快速发展为监测和控制用户端负荷提供了技术

基金项目: 四川省自然科学基金项目资助(2022NSFSC0206)

支撑^[9],也是实施需求响应操作的技术基础。

针对空调负荷参与需求响应的研究主要包括控制方法和调度策略两个方面^[10],前者侧重聚合空调或单台空调的精细化控制方法研究,致力于抑制负荷波动和负荷反弹;后者集中于在空调负荷聚合建模的基础上评估响应潜力,并选择合适的调度策略实现不同的优化目标。直接负荷控制(direct load control, DLC)是一种电力市场下基于激励的需求响应调控手段^[11],也是空调负荷参与需求响应最主要的控制方式。实施 DLC 时可通过开关控制、温度控制等策略对用户进行远程调控。开关控制响应速度快,短时调控潜力大,但其控制过程中容易出现较大功率波动,而温度控制能够更好地保障用户体验,在长时间尺度上满足调控需求,因此应用于大量研究中。文献[12]利用状态队列模型(state_queueing model, SQ model)^[13]分析了空调负荷聚合功率产生振荡的原因,并提出温度设定值上、下限分离控制的方法平复响应期间的功率波动。文献[14]分析了负荷多样性破坏的机理,并结合开关控制和温度控制,通过独立设置每台空调的温度设定值有效平复了负荷波动。但上述文献并未考虑空调用户舒适度需求的差异。文献[15]针对性地对空调负荷集体调控时出现的功率跌落现象进行建模,并提出聚合功率下降速率的修正系数减小模型误差,但忽略了不同温度设定值下空调负荷启停周期的变化,在大规模空调负荷的集中控制中,其聚合模型误差很大程度上会影响调度优化结果。考虑到上述不足,文献[16]较为全面地分析了聚合功率在温度控制初期的动态响应过程,但未谈及功率平稳阶段和功率恢复阶段聚合功率的变化情况。

在响应潜力评估方面,文献[17]分析了空调参数、温度设定值和环境温度对聚合功率的影响,并提出一种计及用户参与响应不确定性的响应潜力评估方法。为避免空调频繁启停,文献[18]引入了空调开、关状态切换时的锁定时间约束,提高了可调节容量评估的准确性。在调度优化方面,文献[7]将调控过程分为响应调控和负荷恢复两个阶段,分别以用户舒适度最高、温度恢复时间最短为目标进行调度优化,但决策模型需要逐台模拟空调的受控状态,计算量较大,且响应期间空调一经调控不能调回,导致不同用户接受调控的时长差异较大。综合考虑用户侧多重因素和电网运行成本,文献[19]在日前制定最优调度计划指导次日聚合小组的调度策略选取,并引入准备时间降低响应初期负荷大幅跌落的影响,但该调度策略牺牲了聚合功率跌落阶段的调控潜力,且未考虑功率恢复过程。

综上所述,现有研究在对空调负荷聚合建模时既忽略了启停周期变化的影响,又缺乏温度设定值恢复阶段的分析与讨论。此外,需求响应期间只考虑空调一次性参与调控,限制了负荷可调节能力的同时未充分考虑用户舒适度的一致性。基于此,本文首先在考虑启停周期可能发生变化的基础上,扩充了适用于温度设定值恢复阶段的安全协议(safe protocol, SP)控制策略,建立了完整描述同质空调负荷参与需求响应全过程的聚合功率模型。其次,考虑到空调物理特征和用户舒适度需求的差异,将异质空调集群聚类为同质聚合小组参与调度优化。最后,为了平衡用户舒适度体验并减轻反弹负荷对电网的冲击,提出了一种在需求响应期间允许聚合小组分时分批、多次轮换地参与温度控制过程的调度策略。算例仿真结果验证了所提控制方法与调度策略的有效性。

1 负荷聚合商参与的空调负荷调控框架

借助智能电网的双向通信技术和高级量测体系,负荷聚合商(load aggregator, LA)能够较为便捷地获取空调负荷的用户参数与状态,并实时对空调进行远程控制。在此基础上,本文构建的包含调度规划阶段与用户响应阶段的空调负荷调控框架如图 1 所示。

在调度规划阶段,负荷聚合商根据温控负荷的特征属性将异质空调负荷群划分为若干同质聚合小

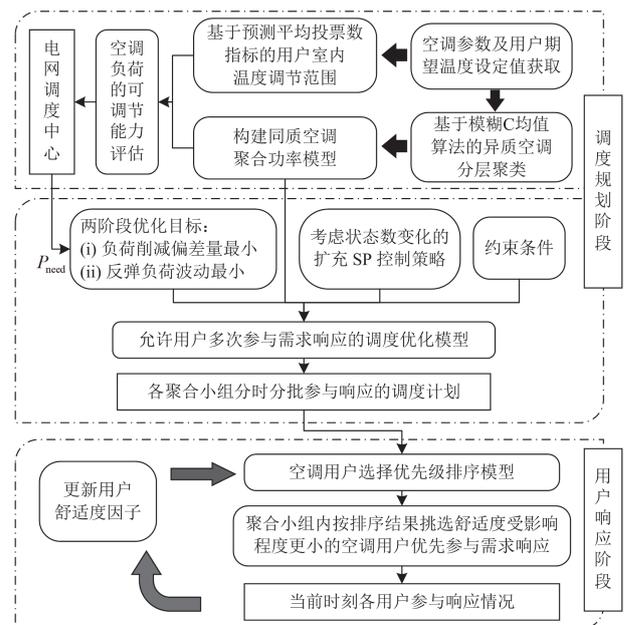


图 1 负荷聚合商参与的空调负荷控制结构图

Fig. 1 Diagram of ACLs regulation with LA participation

组, 构建聚合功率模型。再结合室外温度预测、空调参数及各用户温度设定初值等评估负荷削减潜力并上报给电网公司。电网公司依据负荷预测结果分配调控任务, 要求负荷聚合商通过需求响应提供一定的调控容量 P_{need} , 负荷聚合商据此通过两阶段优化模型制定各聚合小组的详细调度计划。

在用户响应阶段, 负荷聚合商将空调用户的舒适度因子作为排序依据, 以平衡用户间舒适度受影响程度为目标, 基于前一阶段的调度计划分时分批选择参与响应的空调用户, 并实施远程温度设定值调控, 完成负荷削减任务。

2 基于扩充 SP 控制策略的同质空调聚合功率模型

温度控制方式的负荷削减原理是通过改变空调温度设定值, 降低空调周期性运行时的开机占比, 该控制方式可调负荷容量相对较小但能够在长时间尺度上满足调控要求。传统温度调节方式会使聚合功率出现巨大的功率波动^[12], 原因在于统一对同质空调负荷群更改温度设定值时会严重破坏状态队列的连续性和多样性。为了保持聚合功率相对稳定, 本文参考文献[20]提出的 SP 控制策略即对处于开、关机状态的空调分别设定温度设定值, 让状态队列在初始温度下限和升温后的温度上限之间有序转移, 并针对适用于温度设定值恢复阶段的 SP 控制策略进行了研究, 建立了完整描述同质空调参与需求响应全过程的聚合功率模型。其中, 本研究根据空调负荷启停周期变化情况, 对扩充 SP 策略的具体控制过程及效果进行了分类讨论。

2.1 单台空调的等效热参数模型

基于电路模拟的等效热参数模型(equivalent thermal parameters, ETP)是目前最常见的空调负荷模型。本文采用一阶 ETP 模型^[12]表征室内温度变化与空调开关状态的关系, 如式(1)所示。

$$C \frac{dT_a(t)}{dt} = \frac{T_o(t) - T_a(t)}{R} - s(t)Q \quad (1)$$

$$s(t) = \begin{cases} 0 & T_a(t) \leq T_{min} \\ 1 & T_a(t) \geq T_{max} \\ s(t-1) & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} T_{min} = T_{set} - 0.5\delta \\ T_{max} = T_{set} + 0.5\delta \end{cases} \quad (3)$$

式中: C 为等效气体比热容; T_a 为室内气体温度; T_o 为室外温度; R 为等效热阻; $s(t)$ 表示 t 时刻空调的开关状态; $Q = \eta P_{rated}$ 为空调的制冷/制热量, 其中 η 为空调能效比, P_{rated} 为空调额定功率; T_{max} 与

T_{min} 分别表示空调运行温度的上下限值, 由温度设定值 T_{set} 和温度死区 δ 决定。

本文针对定频空调的制冷工作模式展开研究, 空调压缩机在一定环境中周期性启停, 用户室内温度在一定范围内周期性变化。结合式(1)一式(3), 可得到描述室内温度变化的离散化计算公式为

$$T_a(t+1) = T_o(t+1) - s(t)QR - (T_o(t+1) - s(t)QR - T_a(t))e^{-\frac{\Delta t}{RC}} \quad (4)$$

式中: Δt 表示仿真时间间隔。

2.2 同质空调负荷的状态队列模型

对于参数一致或相似的空调负荷集群, 当空调数目 N 足够大且各负荷处于稳态(温度设定值保持不变)时, 认为该空调集群具有很高的负荷多样性, 即各用户的室内温度均匀分布在 $[T_{min}, T_{max}]$ 的温度区间。此时可引入状态队列模型描述空调负荷的聚合功率变化过程, 如附录 A 图 A1 所示。其中, τ_{off} 表示空调压缩机的关断时长, τ_{on} 表示空调压缩机的开启时长。若将空调的启停周期按时间间隔 Δt 等分, 每经过一个 Δt , 各状态单元内的空调(称为一个状态组)统一向下一状态单元转移, 各状态组的空调数目相近。因此, 空调负荷的聚合功率变化特性仅由当前参数条件下处于开机状态的状态组数决定, 而与负荷数目无关, 如式(5)所示。

$$P_{agg}(t) = P_{rated} N_{on}(t) = P_{rated} N \frac{S_{on}(t)}{S_{off}(t) + S_{on}(t)} \quad (5)$$

式中: $P_{agg}(t)$ 表示聚合功率瞬时值; $N_{on}(t)$ 、 $S_{off}(t)$ 和 $S_{on}(t)$ 分别表示 t 时刻开机空调总数以及处于关机、开机状态的状态组数。

2.3 基于扩充 SP 控制策略的聚合功率响应建模

空调在不同温度设定值运行时的启停周期(状态总数)、开关机时长(状态分布)均有所不同, 因此在对聚合功率动态响应过程进行模型构建前, 须计算空调负荷在升温前后的下列数据。

$$S_{off,m} = \tau_{off,m} = \frac{RC}{\Delta t} \ln \left(\frac{T_{min,m} - T_o}{T_{max,m} - T_o} \right) \quad (6)$$

$$S_{on,m} = \tau_{on,m} = \frac{RC}{\Delta t} \ln \left(\frac{QR + T_{max,m} - T_o}{QR + T_{min,m} - T_o} \right) \quad (7)$$

$$\Delta F_{1,2} = \frac{RC}{\Delta t} \ln \left(\frac{T_{max,1} - T_o}{T_{max,2} - T_o} \right) \quad (8)$$

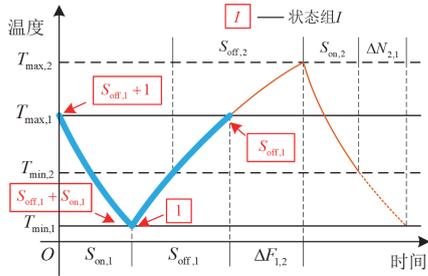
$$\Delta N_{2,1} = \frac{RC}{\Delta t} \ln \left(\frac{QR + T_{min,2} - T_o}{QR + T_{min,1} - T_o} \right) \quad (9)$$

式中: $S_{off,m}$ 、 $S_{on,m}$ 分别表示温度设定值为 $T_{set,m}$ ($m = 1, 2$) 时, 单个启停周期内空调负荷的关机、开机状

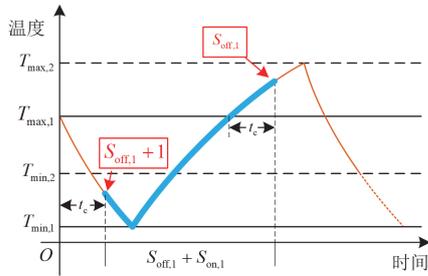
态单元数, $T_{set,1}$ 和 $T_{set,2}$ 分别表示升温前后的温度设定值; 相应的室内温度范围 $[T_{min,m}, T_{max,m}]$ 与 $T_{set,m}$ 满足关系式(3); $\Delta F_{1,2}$ 表示空调从 $T_{max,1}$ 升温到 $T_{max,2}$ 所需的时间间隔数; $\Delta N_{2,1}$ 表示空调从 $T_{min,2}$ 降温到 $T_{min,1}$ 所需的时间间隔数。

2.3.1 考虑状态数变化的负荷削减过程

为了更直观地展示采用 SP 控制策略的空调负荷在升温过程中状态随时间转移的过程, 用连续曲线表示保持连续的状态队列, 如图 2(a)所示, 其中蓝色曲线由当前时刻存在空调状态组的状态单元连接而成。按照附录 A 图 A1 的编号顺序, 在保持状态连续时, 可以认为状态队列的首尾两端分别为第 $S_{off,1}$ 和第 $S_{off,1} + 1$ 组空调。状态单元的编号方式与状态组相同, 在初始温度范围运行时的状态单元编号为 $1 \sim (S_{off,1} + S_{on,1})$, 在新温度范围编号则用 $1' \sim (S_{off,2} + S_{on,2})$ 表示加以区分。



(a) t_0 时刻空调负荷的状态分布



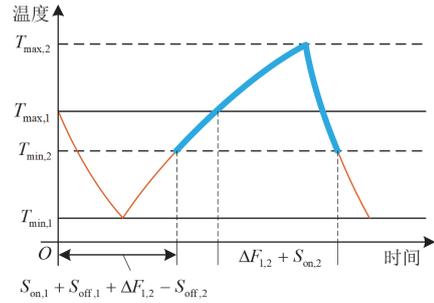
(b) $t_0 + t_c$ 时刻空调负荷的状态分布

图 2 空调负荷的状态转移过程

Fig. 2 State transition process of air conditioning load

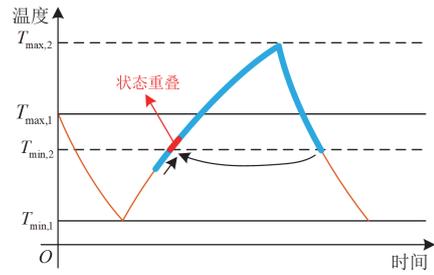
图 2(a)表示调控指令下达的 t_0 时刻空调负荷的状态分布, 在图 2(b)中, 用 t_c 表示空调集群已接受温度控制的持续时间。可以看到状态队列在向温度更高的范围转移时, 开机组减少, 关机组增多, 此时聚合功率处于下降阶段。记聚合功率(或开机状态组数)达到最小值的时刻为 t_1 , 聚合功率开始回升的时刻为 t_2 。当第 $S_{off,1}$ 组空调降温至新温度下限 $T_{min,2}$ 时, 聚合功率回升阶段结束, 记该时刻为 t_3 。

本文称 $t_0 \sim t_3$ 时段为需求响应的功率跌落阶段, t_3 时刻后空调负荷在新温度范围内运行时的聚合功率变化规律取决于状态队列首、尾两端分别到达新温度下限 $T_{min,2}$ 所需的时间。第 $S_{off,1}$ 组(状态队列首端)所需时间为 $\Delta F_{1,2} + S_{on,2}$, 第 $S_{off,1} + 1$ 组(状态队列尾端)耗时 $S_{on,1} + S_{off,1} + \Delta F_{1,2} - S_{off,2}$ 。将上述时长的大小关系反映到状态队列示意图上, 如图 3 所示。



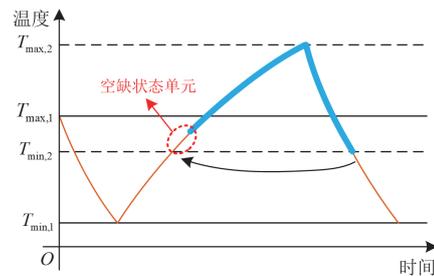
(a) 未出现状态重叠/空缺现象的状态分布示意图

$$(\Delta F_{1,2} + S_{on,2} = S_{on,1} + S_{off,1} + \Delta F_{1,2} - S_{off,2})$$



(b) 存在状态重叠现象的状态分布示意图

$$(\Delta F_{1,2} + S_{on,2} < S_{on,1} + S_{off,1} + \Delta F_{1,2} - S_{off,2})$$



(c) 存在状态空缺现象的状态分布示意图

$$(\Delta F_{1,2} + S_{on,2} > S_{on,1} + S_{off,1} + \Delta F_{1,2} - S_{off,2})$$

图 3 t_3 时刻的 3 种空调状态分布可能

Fig. 3 Three possibilities of air conditioning state distribution at time t_3

图 3(a)所示的空调负荷聚合功率在 t_3 时刻后将保持恒定, 而余下两种情况会导致聚合功率在后续循环中出现周期性的小幅波动。为方便后续推导, 用 ΔS 表示空调升温前后的启停周期变化量, 如式(10)所示。

$$\Delta S = |S_{off,1} + S_{on,1} - (S_{off,2} + S_{on,2})| \quad (10)$$

对于图 3(b), 自 t_3 时刻起第 $S_{\text{off},1}$ 组空调将切换至关机并转移到状态单元 $1'$, 第 $S_{\text{on},1} + \Delta S$ 组空调也将升温至 $T_{\text{min},2}$ 进入状态单元 $1'$, 因此会出现空调状态组的重叠现象(一个状态单元包含两组空调)。 $t_3 + \Delta S$ 时刻所有空调均进入 $[T_{\text{min},2}, T_{\text{max},2}]$ 温度范围, 此时存在 ΔS 个重叠状态单元。对于图 3(c), 在 $t_3 - \Delta S$ 时刻所有空调均进入 $[T_{\text{min},2}, T_{\text{max},2}]$ 温度范围, 自 t_3 时刻起 $S_{\text{off},1} + S_{\text{on},1}$ 个状态组将在周期更长的 $S_{\text{off},2} + S_{\text{on},2}$ 个状态单元中循环转移, 其中存在 ΔS 个状态单元不含有空调组, 称其为空缺状态单元。重叠/空缺状态单元经过新温度上下限时会使开机状态组数在 $[S_{\text{on},2}, S_{\text{on},2} + \Delta S]$ 或 $[S_{\text{on},2} - \Delta S, S_{\text{on},2}]$ 范围内变化, 导致聚合功率出现周期性波动。

基于上述分析, 可对空调负荷削减过程中开机状态组数的变化过程进行完整的建模。首先, 按照附录 B 式(B1)对一些关键时刻进行计算, 其中 t_4 表示重叠/空缺状态单元由关机组逐渐向开机组转移的起始时刻; t_5 表示所有重叠/空缺状态单元均切换为开机的时刻; t_6 和 t_7 则分别表示重叠/空缺状态单元由开机组逐渐向关机组转移的起始时刻和完成时刻。再用变量 J 来表征新旧启停周期的比较结果, 3 种情况下的开机空调组数可合并表示为

$$J = \text{sign}(S_{\text{off},1} + S_{\text{on},1} - S_{\text{off},2} - S_{\text{on},2}) \quad (11)$$

$$S_{\text{on}}(t) = \begin{cases} S_{\text{on},1}, & t \leq t_0 \\ S_{\text{on},1} - (t - t_0), & t_0 < t \leq t_1 \\ S_{\text{on},1} - \min\{S_{\text{on},1}, \Delta F_{1,2}\}, & t_1 < t \leq t_2 \\ (t - t_0) - \Delta F_{1,2}, & t_2 < t \leq t_3 \\ S_{\text{on},2}, & t_3 < t \leq t_4 \\ S_{\text{on},2} + J(t - t_4), & t_4 < t \leq t_5 \\ S_{\text{on},1} + S_{\text{off},1} - S_{\text{off},2}, & t_5 < t \leq t_6 \\ S_{\text{on},2} + J(t_7 - t), & t_6 < t \leq t_7 \\ S_{\text{on}}(t - S_{\text{on},2} - S_{\text{off},2}), & t > t_7 \end{cases} \quad (12)$$

式中: 空调开机状态组数自 $t_7 + 1$ 时刻起循环变化, 循环周期为 $S_{\text{off},2} + S_{\text{on},2}$ 。值得注意的是, 对于启停周期变长的情况, 聚合功率在 $t_3 - \Delta S$ 时刻即开始首轮循环, t_6 时刻结束首轮循环; 对于启停周期缩短的情况, 聚合功率在 $t_3 + \Delta S$ 时刻开始首轮循环, t_7 时刻结束首轮循环。为了便于后续分析, 本文统一将 t_3 作为聚合空调在新温度范围内循环运行的起点, t_3 到温度调回操作开始前的这一时段称为功率平稳阶段。

2.3.2 基于扩充 SP 控制策略的温度恢复过程

为保持状态队列连续, 使温度设定值调回后的

空调负荷聚合功率回到调控前的幅值水平, 需对升温控制过程采用的 SP 控制策略进行扩充改进。具体而言, 对于关机状态的空调, 温度设定值设为 $T_{\text{set},2}$, 保持升温; 而对于开机状态的空调, 调控方式须根据是否存在状态重叠现象做出调整, 即:

$S_{\text{off},1} + S_{\text{on},1} \leq S_{\text{off},2} + S_{\text{on},2}$ 时, 回调温度设定值至 $T_{\text{set},1}$, 让各空调状态组有序向原温度下限转移。

$S_{\text{off},1} + S_{\text{on},1} > S_{\text{off},2} + S_{\text{on},2}$ 时, 直接采用温度控制的方式无法有效地使已经合并的重叠状态组拆分为原本状态。由图 3(b)可知, 状态队列的重叠是指首端和尾端的重叠, 若统一回调温度设定值, 处于队列尾端的 ΔS 个状态组将在少运行一个循环的情况下, 跟随首端对应重叠的状态组一起向 $T_{\text{min},1}$ 转移, 导致在温度回调后空调的温度多样性被破坏。解决方法是在需求响应起始时刻 t_0 就将第 $S_{\text{off},1} + 1 \sim S_{\text{off},1} + \Delta S$ 组的空调标记为 keep 组, 其余空调则归类为 normal 组。在回调操作开始后, 让 normal 组的空调按照不存在状态重叠的方式进行回调操作, 而 keep 组空调继续在新的温度范围循环运行满最后一个周期, 再按照 normal 组的方式回调温度, 从而达到分离重叠状态组的效果。

在对上述的温度恢复过程进行聚合功率建模前, 需确定空调负荷的实际回调起始时刻。设空调接收到回调信号的时刻为 t_d , 则空调负荷的最早回调时刻 t_{recv} 满足式(13)。

$$t_{\text{recv}} = t_3 + l_{\text{min}} \times (S_{\text{on},2} + S_{\text{off},2}) \quad (13)$$

$$l_{\text{min}} = \left\lceil \frac{t_d - t_3}{S_{\text{on},2} + S_{\text{off},2}} \right\rceil \quad (14)$$

式中: l_{min} 表示空调负荷在新温度范围内运行的最小循环次数。

若以 t_{recv} 作为空调温度回调的起始时刻, 再结合由式(9)计算得出的 $\Delta N_{2,1}$, 无重叠状态情况下空调开机组数可表示为

$$S_{\text{on}}(t) = \begin{cases} \begin{cases} t_8 = t_{\text{recv}} \\ t_9 = t_{\text{recv}} + \Delta N_{2,1} \\ t_{10} = t_{\text{recv}} + (S_{\text{on},1} + S_{\text{off},1} - S_{\text{on},2}) \\ t_{\text{fin}} = t_{\text{recv}} + \Delta N_{2,1} + S_{\text{off},1} \end{cases} & \\ \begin{cases} S_{\text{on}}(t_{\text{recv}}) = S_{\text{on},2}, & t = t_8 \\ S_{\text{on},2} + (t - t_{\text{recv}}), & t_8 < t \leq t_9 \\ S_{\text{on},2} + \Delta N_{2,1}, & t_9 < t \leq t_{10} \\ S_{\text{on},1} + S_{\text{off},1} + \Delta N_{2,1} - (t - t_{\text{recv}}), & t_{10} < t \leq t_{\text{fin}} \\ S_{\text{on},1}, & t > t_{\text{fin}} \end{cases} & \end{cases} \quad (15)$$

式中: t_8 表示在 t_{recv} 时刻后, 保持了一段时间恒定的

$S_{on}(t)$ 开始变化的时刻 ($\Delta N_{2,1} \neq \Delta S$ 时); t_9 表示功率反弹达到峰值的时刻; t_{10} 表示聚合功率开始回落的时刻; 将状态队列首端(第 $S_{off,1}$ 组)的空调重新回到状态单元 $S_{on,1}$ 的时刻作为功率恢复操作的完成时刻, 用 t_{fin} 表示。

对于存在重叠状态的情况, 需考虑 $\Delta N_{2,1}$ 和重叠状态数 ΔS 的大小关系, 各关键时刻和空调开机组数表达式均有变化, 如式(16)所示。

$$S_{on}(t) = \begin{cases} t_8 = t_{recv} + \min\{\Delta N_{2,1}, \Delta S\} \\ t_9 = t_{recv} + \max\{\Delta N_{2,1}, \Delta S\} \\ t_{10} = t_{recv} + (S_{on,1} + S_{off,1} - S_{on,2}) \\ t_{fin} = t_{recv} + \Delta N_{2,1} + S_{off,1} \\ \begin{cases} S_{on}(t_{recv}) = S_{on,1} + S_{off,1} - S_{off,2}, & t_{recv} \leq t \leq t_8 \\ S_{on,1} + S_{off,1} - S_{off,2} + \text{sign}(\Delta N_{2,1} - \Delta S)(t - t_8), & t_8 < t \leq t_9 \\ S_{on,2} + \Delta N_{2,1}, & t_9 < t \leq t_{10} \\ S_{on,1} + S_{off,1} + \Delta N_{2,1} - (t - t_{recv}), & t_{10} < t \leq t_{fin} \\ S_{on,1}, & t > t_{fin} \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

2.3.3 考虑变状态数的聚合功率模型验证

为印证本文所提状态空缺与重叠现象, 选取两组参数异质的同质聚合小组进行仿真分析, 仿真时间间隔取 30 s。假设两聚合小组均在第 15 min 收到温度上调 1°C 的调控指令, 响应 30 min 后下达温度回调指令, 控制终端按照扩充 SP 控制策略分别对两组内所有空调实施相应操作。

图 4(a)、图 4(b)分别展示了因启停周期缩短/变长而出现状态重叠/空缺现象的小组聚合功率曲线, 具体参数及关键时刻的计算结果见附录 A 表 A1。图 4 中, ETP 模型(单体)聚合功率用以表征实际聚合功率, 黑色虚线标注出的横轴刻度依次对应 t_0 、 t_3 和 t_{recv} 时刻。可以看到, 传统聚合功率模型默认所有空调进入新温度范围后的聚合功率保持恒定, 未考虑状态数变化对功率平稳阶段的影响, 存在较为明显的模型误差, 同时也忽略了功率平稳阶段各异质空调聚合小组间存在的相互平抑能力。本文所提模型的功率曲线能够更好地贴合实际情况。

3 考虑用户多次参与响应的调度优化模型

3.1 异质空调负荷的分层聚类分组

在实施温度控制前需对异质空调负荷进行分组聚类, 本文采用分层多次聚类方法, 步骤如下:

1) 通过参数辨识方法获取每台空调的特征属性, 包括额定功率、等效热容、等效热阻、制冷效率、温度设定初值等参数。

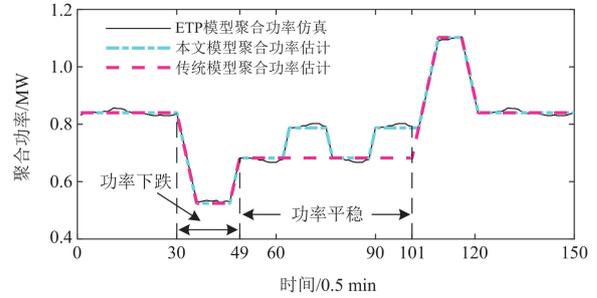
2) 根据式(5), 为保证聚合小组内的空调有着相

似的功率调控特征, 首先根据各空调运行时的额定功率进行初步聚类分组。

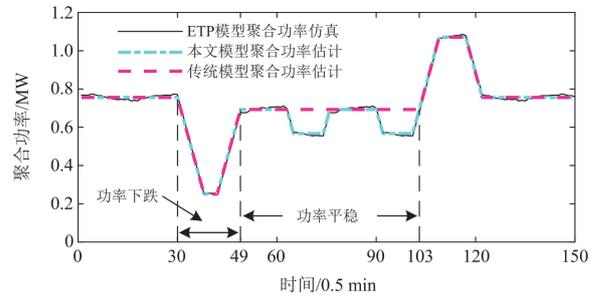
3) 根据式(6)和式(7), 空调运行周期由室内介质的温度变化速率决定, 与温变参数 RC 和特征温差 QR 等物理属性密切相关。为降低组内空调响应速度的差异, 在步骤 2)的基础上以 RC 和 QR 为特征进行二次聚类。

4) 不同温度设定初值的空调具有不同的响应潜力和动态响应特性, 为获取更为精确的聚合功率模型, 对步骤 3)中具有相似物理属性的聚合小组基于用户个体差异进行聚类分组, 从而得到响应潜力、响应特性均接近的空调负荷聚合小组。

上述步骤示意图如附录 A 图 A2 所示, 各步骤分组时均使用模糊 C 均值聚类算法^[21]。



(a) 存在状态重叠的小组聚合功率曲线



(b) 存在状态空缺的小组聚合功率曲线

图 4 存在状态重叠/空缺现象的小组聚合功率曲线

Fig. 4 Group aggregated power curve in the presence of state overlap/vacancy phenomenon

3.2 基于预测平均投票数指标的聚合小组温度调节范围

负荷聚合商在制定调度计划时需尽量保障用户舒适度体验。热舒适度是用户对室内热环境的主观评价和感受, 为量化温度对人体热舒适度的影响, 常采用预测平均投票数(predicted mean vote, PMV)指标来衡量用户的热舒适度。ISO7730 推荐 PMV 值在 $[-0.5, 0.5]$ 之间, 故在除室内温度外的各项用户参数已知时, 根据 PMV 指标的计算公式^[22]可反推出第 i 台空调的用户所能接受的最大温度范围 $[T_{set,min}^i, T_{set,max}^i]$ 。

对于大部分居民用户的空调来说, 温度设定值的调整单位为 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$, 因此本文默认 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 为温度上调量的最小单位。第 i 台空调温度上调量 ΔT_{set}^i 的可选集合及聚合小组 $I(I \in 1, 2, \dots, K)$ 的最大温度上调量 $\Delta T_{\text{set,max}}^I$ 可分别用式(17)和式(18)表示。

$$\Delta T_{\text{set}}^i = \left\{ 0.5z \mid 0 \leq z \leq \left\lfloor \frac{T_{\text{set,max}}^i - T_{\text{com}}^i}{0.5} \right\rfloor, z \in \mathbf{Z} \right\} \quad (17)$$

$$\Delta T_{\text{set,max}}^I = \min \left\{ \Delta T_{\text{set,max}}^i \mid i = 1, 2, \dots, N^I \right\} \quad (18)$$

式中: z 表示小组可调温度以 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 为最小变化单位; \mathbf{Z} 表示整数集合; $\Delta T_{\text{set,max}}^i$ 和 T_{com}^i 分别表示第 i 台空调的用户可接受的最大温度上调量和期望温度设定值, 本文认为第 i 台空调的温度设定初值 $T_{\text{set,1}}^i$ 与 T_{com}^i 相等; N^I 表示第 I 聚合小组的空调数量。

3.3 考虑用户多次参与需求响应的调度优化模型

3.3.1 用户一次性响应的调度优化模型

基于第 2 节对空调负荷动态响应的分类建模, 当负荷聚合商获取聚合小组 I 的热容 C^I 、热阻 R^I 、能效比 η^I 、额定功率 P_{rated}^I 等关键参数后, 即可根据该小组所分配的温度上调量 ΔT_{set}^I , 计算出升温前后的开、关机状态组数 $S_{\text{on,1}}^I$ 、 $S_{\text{off,1}}^I$ 、 $S_{\text{on,2}}^I$ 、 $S_{\text{off,2}}^I$ 以及相应的 $\Delta F_{1,2}^I$ 和 $\Delta N_{2,1}^I$ 。小组 I 参与调控的空调台数 N_{dr}^I 、调控起止时刻 t_s^I 和 t_d^I 则作为调度优化的决策变量。本文将调度优化过程分为需求响应阶段和功率恢复阶段。

第一阶段: 优化各聚合小组参与调控的起始时刻 t_s^I 、温度上调量 ΔT_{set}^I 以及参与空调数 N_{dr}^I , 使得实际负荷削减量 $P_{\text{cut}}(t)$ 与需求削减量 P_{need} 的偏差最小。目标函数表示为

$$\begin{cases} \min_{N_{\text{dr}}^I, S_{\text{on}}^I(t)} F_1 = \sum_{t=t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} (P_{\text{cut}}(t) - P_{\text{need}})^2 \\ P_{\text{cut}}(t) = \sum_{I=1}^K \left(P_{\text{rated}}^I N_{\text{dr}}^I \frac{S_{\text{on,1}}^I - S_{\text{on}}^I(t)}{S_{\text{off,1}}^I + S_{\text{on,1}}^I} \right) \end{cases} \quad (19)$$

$$S_{\text{on}}^I(t) = f(t_s^I, t_{\text{end}}^I, S_{\text{on,m}}^I, S_{\text{off,m}}^I, \Delta F_{1,2}^I, \Delta N_{2,1}^I) \quad (20)$$

式中: t_{start} 与 t_{end} 分别表示需求响应期的开始和结束时刻。在第一阶段的优化过程中, 每个聚合小组均默认在 t_{end} 时刻实施温度回调操作; 参考第 2 节中响应过程的推导, 各聚合小组的开机状态数 $S_{\text{on}}^I(t)$ 与其变量的关系用函数 f 简略表示。

约束条件为

$$N_{\text{dr}}^I \leq N^I, \quad \Delta T_{\text{set}}^I \leq \Delta T_{\text{set,max}}^I, \quad \forall I \in [1, K] \quad (21)$$

第二阶段: 优化各聚合小组在响应结束后的温

度回调时刻。需求响应后由用户自行无序下调温度设定值势必会带来较大的负荷反弹, 危害电网安全。本文参考文献[23]的方法, 在功率恢复阶段为各聚合小组增加延时单元: 使各聚合小组分别保持当前温度设定值运行若干周期再回调温度。功率恢复阶段的聚合功率应在反弹负荷限值内尽量保持功率平稳, 故目标函数设为恢复时段内 $P_{\text{agg}}(t)$ 的方差最小。

$$\min F_2 = \text{VAR}(P_{\text{agg}}(t)), \quad t_{\text{end}} \leq t \leq \max t_{\text{fin}}^I \quad (22)$$

$$P_{\text{agg}}(t) = \sum_{I=1}^K \left(P_{\text{rated}}^I \frac{N_{\text{dr}}^I S_{\text{on}}^I(t) + (N^I - N_{\text{dr}}^I) S_{\text{on,1}}^I}{S_{\text{off,1}}^I + S_{\text{on,1}}^I} \right) \quad (23)$$

$$S_{\text{on}}^I(t) = f(t_s^I, t_d^I, S_{\text{on,m}}^I, S_{\text{off,m}}^I, \Delta F_{1,2}^I, \Delta N_{2,1}^I) \quad (24)$$

约束条件为

$$\begin{cases} \max_t P_{\text{agg}}(t) \leq (P_{\text{agg,ori}} - P_{\text{need}})(1 + \beta_{\text{max}}) \\ \max t_{\text{fin}}^I \leq t_{\text{max}} \end{cases} \quad (25)$$

式中: $\text{VAR}(\cdot)$ 表示求方差; $S_{\text{on}}^I(t)$ 表示第 I 聚合小组在优化了温度回调时刻 t_d^I 后的 t 时刻开机状态数; $\max t_{\text{fin}}^I$ 表示最后一组空调恢复至原温度状态的时刻, 可根据式(15)或式(16)计算得出, 此时聚合功率将恢复至需求响应前空调负荷的初始聚合总功率 $P_{\text{agg,ori}}$; 本文采用反弹负荷波动百分比 β ^[24] 表征反弹效应的剧烈程度, 其计算公式见附录 B 式(B2), β_{max} 表示 β 的最大限值, 由电网公司设定。

3.3.2 允许用户多次响应的调度优化模型

在以往的温度控制研究中, 每台空调仅能参与至多一次响应过程, 即从进入调控到响应结束这段时间内不允许回调温度, 该模式容易导致不同时刻被选中的空调因调控持续时间不同, 用户间的舒适度体验差异较大。为解决上述问题, 本文提出一种允许用户多次参与需求响应的调度优化模型, 并基于 3.3.1 节所提调度模型做出如下改进: 首先, 该调控模式下允许温度受控后的空调提前结束响应, 因此第一阶段的控制变量应包含温度回调起始时刻 t_d^I ; 其次, 考虑到用户舒适度体验, 同时减轻负荷聚合商制定调控策略时的计算压力和实施控制时的通信压力, 限制各聚合小组调控次数不超过 n_{ctrl} 次。相应地, 其余决策变量均转化为 n_{ctrl} 维向量, 如附录 B 式(B3)所示, 目标函数 F_1 仍满足式(19)。为保证任意时刻被选中空调只能参与一种响应方案, 即 t 时刻处于受控状态的空调数不超过聚合小组总空调数, 约束条件式(21)应相应替换为附录 B 式(B4)。其中, $N_{\text{dr}}^{I,j}$ 表示该聚合小组在第 j 次调控中抽取的空调数量; $t_s^{I,j}$ 与 $t_d^{I,j}$ 则分别对应第 j 次调控的开始和结束时刻。

3.4 空调用户的选择优先级排序

负荷聚合商根据调度计划向各聚合小组一次性下发调控指令,但在日间实施控制策略时,负荷聚合商需选择各聚合小组参与调控的空调个体:首先通过式(6)和式(7)计算各聚合小组参数条件下空调温度状态的分布情况,然后将室内温度相近的空调划分为同一状态组,这些状态组与 $S_{\text{off},1}^i + S_{\text{on},1}^i$ 个状态单元一一对应。在一次调控过程中,负荷聚合商均匀地从每个状态组抽取 $N_{\text{dr}}^i / (S_{\text{off},1}^i + S_{\text{on},1}^i)$ 台空调参与响应。通常情况下,同一聚合小组内用户参与需求响应的激励成本相同,可认为各状态组内空调被挑选的概率相同。

为确保同一聚合小组中用户舒适度受影响程度相近,本文以舒适度因子^[25]作为衡量指标,指导负荷聚合商对空调用户参与响应的优先级进行排序。舒适度因子采用空调温度调整量与受控时间的乘积来表征用户舒适度受影响的程度。用式(26)计算聚合小组 I 内各用户当前时刻累计的舒适度因子 $C^i(t)$ 。

$$C^i(t) = \sum_{l=t_{\text{start}}}^{t_s^i} (T_{\text{set}}^i(t) - T_{\text{com}}^i) \quad (26)$$

$C^i(t)$ 越小,说明第 j 次调控前用户 i 的舒适度受影响程度越小,该空调被选择的优先级越高。

4 算例分析

4.1 考虑温度设定初值的空调负荷聚类分组

为验证所提聚合功率模型的有效性,首先需要利用聚类算法将异质空调集群进行分组再聚合,聚类特征通常选取受控空调的物理属性——温变参数 RC 和特征温差 QR 。但事实上,同质空调在温度设定初值不同时即使上调相同温度,其聚合功率曲线亦存在较大差异,如图5所示。

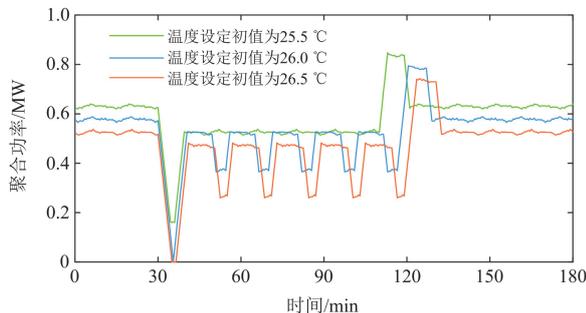


图5 上调1 °C时不同温度设定初值的空调聚合功率对比
Fig. 5 Comparison of aggregated power of ACLs at different initial temperature settings but unified increase of 1 °C

图5是通过500台同质空调采用扩充SP控制策略进行仿真调控得出,不同曲线分别代表用户

温度设定初值取25.5 °C、26 °C、26.5 °C时的聚合功率,设需求响应时段从30 min持续到110 min,温度上调量均为1 °C。结合式(5)一式(7),同质空调在不同温度设定值下的开机状态占空比不同,因此温度设定初值越高,初始聚合功率越低。此外,即使温度上调量均为1 °C,但启停周期变化量随温度设定初值升高而增大,出现愈加明显的“状态缺失”现象,加剧功率平稳阶段的负荷波动。

考虑到上述情况,对1500台上述同质空调采用两种聚类方式并进行分组调控:1)统一按照温度设定初值为26 °C进行调控;2)按温度设定初值进一步分为3组,分别按照对应温度设定初值进行调控。响应时段保持不变,聚合功率曲线如图6所示。不难看出,对温度设定初值不同的空调集群直接统一调控破坏了状态队列的连续性和温度多样性,导致红色曲线在温度调回后的聚合功率保持循环波动。若按温度设定初值进一步分组,一方面可保证聚合功率恢复平稳,另一方面,由于启停周期的不同,各组在响应结束的指令下达后温度回调操作存在时间差,一定程度减轻了负荷反弹。

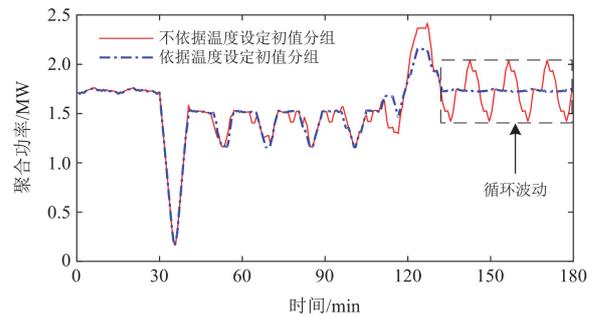


图6 基于温度设定初值分组与否的聚合功率对比

Fig. 6 Aggregated power comparison based on temperature setting initial value grouping or not

4.2 调度优化方案验证

4.2.1 算例场景

假设某区域(居民小区或办公楼宇)在调控时段共有12000余台空调可参与需求响应,根据日前采集的用户数据(包括期望温度设定值、温度可调节范围、空调参数等)共划分为45个聚合小组接受负荷聚合商调度,空调及仿真参数如附录A表A2所示。某日,电力公司需该区域在13:00—15:00时段持续提供基于初始聚合功率的需求削减比例为 α 的负荷,并要求反弹负荷波动百分比 β 不超过 2α ,负荷恢复时刻不超过16:00。为验证本文所提调度策略的优越性和有效性,对比以下几种负荷聚合商可能采用的调度策略。

方案1:采用传统温度控制方法,各聚合小组

分别在 13:00 和 15:00 同时上调、恢复温度设定值。

方案 2: 采用 SP 控制方法, 实现开机空调与关机空调的分离控制。该方案下各组空调仍然于调控任务的起止时刻同时上调和恢复温度。

方案 3: 基于方案 2, 引入控制准备时间^[19], 引导各小组在响应时段前分时进入温度调控过程。本文将准备时间设为 1 h。

方案 4: 该方案采用 3.3.1 节的调度优化模型。自 13:00 起, 以 15 min 为一个优化时间窗, 在每个时间窗内引导各小组的部分空调分时进入温度调控过程, 但 15:00 以前不允许回调温度。各时间窗的功率削减由两部分提供: 1) 当前时间窗部分空调开始响应导致的功率快速下跌; 2) 已完成温度上升过程的空调当前处于功率平稳阶段, 但因开机占空比降低仍能提供一定削减负荷。

方案 5: 本文方案, 基于只考虑用户一次性响应的方案 4 做出改进, 允许用户在 13:00—15:00 任意时刻按扩充 SP 控制策略参与调控或回调温度, 温度恢复后可再次参与响应, 各聚合小组每次调控的温度上调量、空调台数相互独立。

附录 A 图 A3 较为直观地展示了某聚合小组在实施方案 4、5 时小组聚合功率的变化情况, 需求响应时段为第 60 min 到第 180 min。方案 4 在第 1、第 3 个时间窗选择两批空调参与响应, 每次调控的负荷削减量相互叠加, 空调负荷在响应期结束后分时调回; 方案 5 则允许参与过调控的空调在温度恢复后进入二次调控, 连续参与两次调控的空调温度曲线如红色点划线所示, 其中, 两次调控的温度上调量分别为 0.5 °C 和 1 °C, 小组聚合功率相应出现了两次跌落和两次反弹。

4.2.2 不同方案调度结果对比

在对方案 4、5 进行仿真实验时, 考虑到本文为保证温度多样性采用温度控制方式, 无法让大量空调短时间内同时完成开关状态切换, 达到聚合功率瞬间大幅下降的效果, 故允许聚合小组提前 10 min 进入调温过程, 作为需求响应的准备阶段。表 1 展示了上述 5 种调度方案在需求削减比例 α 分别为 5%、10%、15% 时的削减偏差量和反弹负荷波动百分比 β 。因方案 1、2 的聚合功率波动较大, 下文主要对方案 3、4、5 的调控效果展开进一步分析。

表 1 各调度方案的负荷削减偏差量和反弹负荷波动百分比

Table 1 Power reduction deviation and rebound load percentage for each scheduling scheme

$\alpha/\%$	方案 1		方案 2		方案 3		方案 4		方案 5	
	削减偏差/ MW	$\beta/\%$								
	5	1.30	47.12	0.46	14.61	0.08	9.74	0.03	8.44	0.02
10	2.50	85.73	0.87	22.55	0.14	18.59	0.06	16.34	0.03	14.77
15	3.47	128.92	1.34	33.95	0.24	29.13	0.14	25.36	0.06	23.20

结合表 1 和图 7, 方案 4、5 在负荷削减与反弹抑制能力上更有优势, 两种方案让空调在需求响应期内的不同时刻分批参与温度控制过程, 避免了方案 1—方案 3 出现的功率波谷现象。方案 3 基于方案 2 做出改进, 实质是将各聚合小组参与温度控制

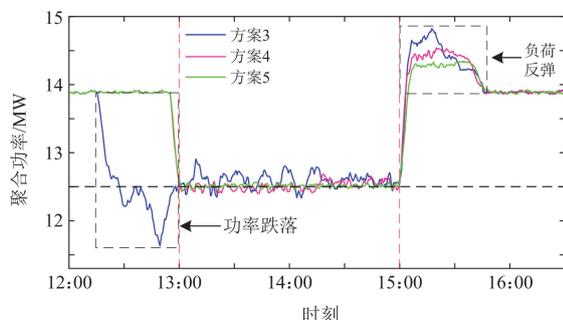


图 7 10%需求削减比例下方案 3、4、5 的调度效果
Fig. 7 Performance of schemes 3, 4 and 5 under 10% demand reduction ratios

时的功率跌落阶段集中到调控任务开始前, 确保各小组在 13:00 处于功率平稳阶段, 聚合总功率维持在调控目标附近。由于引入了 1 h 的准备时间, 该方案一定程度缓解了所有空调在同一时刻上调温度的情况, 但显然在 13:00 前聚合功率仍会出现较大幅度下跌。此外, 该方案依赖温度设定值升高继而开机占空比下降所带来的负荷削减量较为有限, 随着目标功率下调比例逐渐增加, 聚合功率将难以维持在目标功率附近, 负荷波动将愈加剧烈。

相较于方案 3, 方案 4 将单次响应过程划分为多次完成, 综合利用了各聚合小组的功率跌落与功率平稳两阶段产生的功率削减。附录 A 图 A4 展示了第 5 聚合小组在 10% 的削减比例下实施方案 3、4 时的小组聚合功率对比, 两种方案的调度结果如表 2 所示, 现定义用户平均负荷削减量指标 $\Delta \bar{P}$ 来衡量组内空调在实施不同方案时所能提供的负荷削减能力, 如式(27)所示。

$$\Delta \bar{P} = \frac{\sum_{t=t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} (P_{\text{on}}^5(t) - P_{\text{agg}}^5(t))}{(t_{\text{end}} - t_{\text{start}}) \sum_{j=1}^{n_{\text{set}}} (N_{\text{dr}}^{5,j} \Delta T_{\text{set}}^{5,j})} \quad (27)$$

式中： $\Delta \bar{P}$ 为单位时间内第5小组内的单台空调上调单位温度后所产生的功率削减量； $P_{\text{on}}^5(t)$ 表示第5小组空调在不实施任何方案时的聚合功率； $P_{\text{agg}}^5(t)$ 表示调度后的聚合功率。

表2 第5小组空调实施方案3、4时的调度结果

Table 2 Scheduling results of the 5th group implementing scheme 3 and 4

调度方案	开始时刻	回调时刻	温度上调量/℃	空调台数	用户平均负荷削减量/(W/℃)
3	12:30	15:00	1	836	127
4	13:02	15:36	1	484	143
	13:35	15:20	1	352	

由表2可知，该聚合小组在实施方案4时平均每台空调在上调1℃时所能提供的功率较方案3要高出16W，说明让空调多次、分批进入响应的控制方式更能发挥空调负荷的调控潜力。

进一步考虑到空调用户的热舒适度差异，本文提出了改进方案5。由表1可知，方案4与方案5在控制负荷削减偏差量与抑制反弹负荷的能力上总体相近，两方案的效果差异主要体现在各用户于需求响应期间的舒适度因子上。表3展示了实施方案4、5时的用户舒适度因子计算结果。

表3 不同削减比例 α 下分别实施方案4、5时空调用户的舒适度因子指标

Table 3 Comfort factor index of air conditioning users when implementing scheme 4 and 5 under different α

$\alpha/\%$	舒适度因子		舒适度因子		未响应空调数/台	
	均值/(℃·min)		方差/(℃·min) ²		数/台	
	方案4	方案5	方案4	方案5	方案4	方案5
5	66	39	1452	880	5746	2625
10	93	78	2286	1955	2945	1583
15	109	101	698	395	0	0

可以看到，随着 α 的提高，受控空调用户的舒适度受影响程度逐渐提升，为提供足够多的功率削减，负荷聚合商须挑选更多的空调参与进需求响应中。根据舒适度因子的均值和方差可知，方案5在一定程度上减小了空调集群的舒适度因子，同时还缩小了用户间的舒适度差异。原因在于方案5优先选取当前用户舒适度受影响程度最小的空调参与温度控制，将功率削减压力较为平均地分配给空调负

荷群，避免了出现只持续对部分空调进行长期的高温控制来提供负荷削减，而剩余空调完全不参与需求响应过程的极端情况。实施本文调度策略时，不同削减比例下用户参与温度控制轮次的统计结果如图8所示。

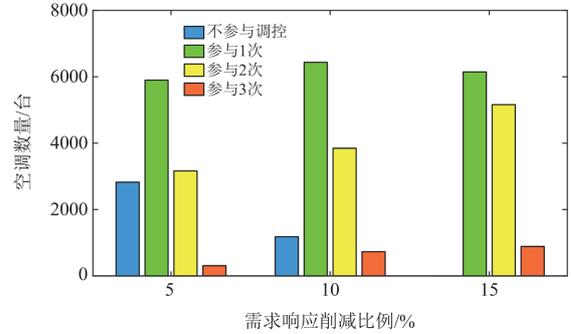


图8 不同削减比例下用户参与需求响应轮次的统计结果

Fig. 8 Statistical results of the number of users participating in demand response under different reduction ratios

5 结论

本文从提高空调负荷聚合功率的控制精度出发，综合考虑反弹负荷的平抑以及受控空调用户舒适度的一致性，提出了一种允许空调用户多次轮换参与需求响应的调度优化策略，主要结论如下。

1) 本文扩充了温度设定值恢复阶段的SP控制策略，指出保持温度多样性的温度回调时刻及具体控制过程。所提聚合功率模型完整描述了尤其是存在状态重叠/空缺现象时聚合功率在功率跌落阶段、功率平稳阶段和功率恢复阶段的变化情况。相较于传统聚合功率模型，本文模型更符合实际情况，为空调多次参与需求响应奠定基础。

2) 对温度设定初值不同的同质空调负荷直接进行统一温度调控，会破坏状态队列的连续性和温度多样性，导致温度回调后的聚合功率保持循环波动。按照温度设定初值进一步分组，不仅能保证温度回调后聚合功率保持平稳，还能一定程度减轻因空调同时下调温度而出现的负荷反弹。

3) 在需求响应期内分时段分批次选取空调进入温度控制的调度策略可避免响应初期出现功率波谷。综合利用功率跌落阶段和功率平稳阶段中聚合小组间相互平抑的功率波动，可有效减小负荷削减偏差量。在功率恢复阶段合理地各小组增加延时单元可实现反弹峰荷的有效平抑。

4) 将用户舒适度因子作为排序指标，结合空调用户多次轮换参与需求响应的调度策略，不仅在一定程度上减小了温度控制对空调用户舒适度的影响程度，还缩小了用户间的舒适度差异，这对维持空

调用户的需求响应参与意愿具有积极意义。

附录 A

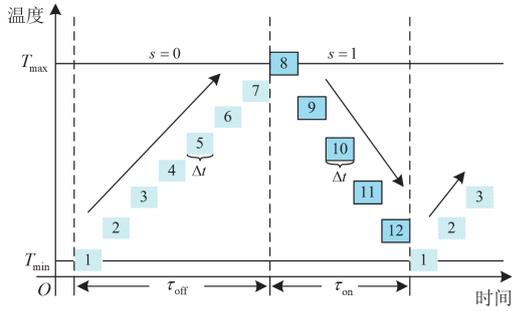


图 A1 空调的状态队列模型

Fig. A1 SQ model of air conditioner

表 A1 两空调聚合小组的状态队列模型关键参数计算结果

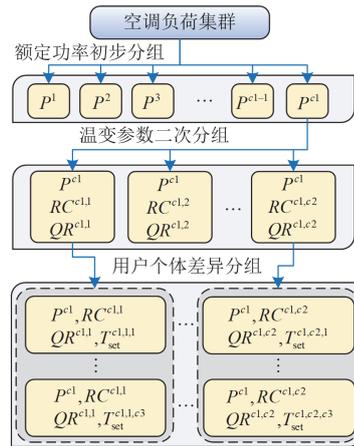
Table A1 Calculation results of the key parameters of the SQ model of the two air conditioning aggregated groups

参数	状态重叠	状态空缺
$S_{off,1}$	12	13
$S_{on,1}$	16	12
$S_{off,2}$	13	16
$S_{on,2}$	13	11
ΔS	2	2
$\Delta F_{1,2}$	6	8
$\Delta N_{2,1}$	8	6
l_{min}	2	2
t_1	36	38
t_2	46	42
t_3	49	49
t_4	62	63
t_5	64	65
t_6	75	74
t_7	77	76
t_{recv}	101	103
t_8	103	103
t_9	109	109
t_{10}	116	117
t_{fin}	121	122

表 A2 空调及仿真参数

Table A2 Air conditioning and simulation parameters

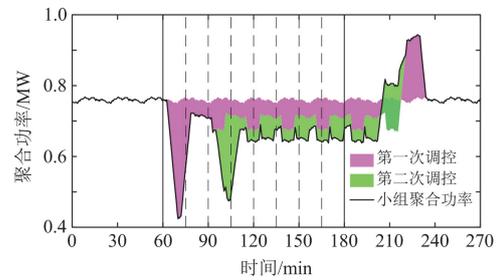
参数	取值范围
$C/(kWh/^\circ C)$	[0.15,0.25]
$R/(^\circ C/kW)$	[1.6,3.2]
η	[2.7,2.8]
P_{rated}/kW	[2.5,3.5]
$\delta/^\circ C$	2
$T_{com}/^\circ C$	[24,27]
$\Delta t/s$	30



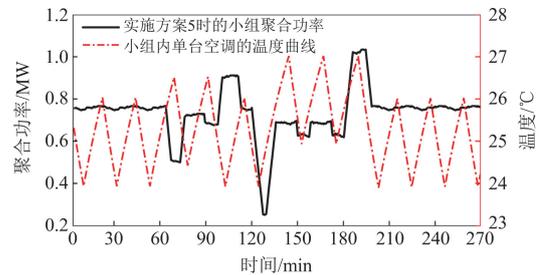
注: c1、c2、c3 分别为每次分组的最大组数

图 A2 分层聚类分组示意图

Fig. A2 Schematic diagram of hierarchical clustering grouping



(a) 实施方案4时的小组聚合功率



(b) 实施方案5时的小组聚合功率

图 A3 分别实施方案 4、5 的小组聚合功率

Fig. A3 Group aggregated power when implementing scheme 4 and 5 respectively

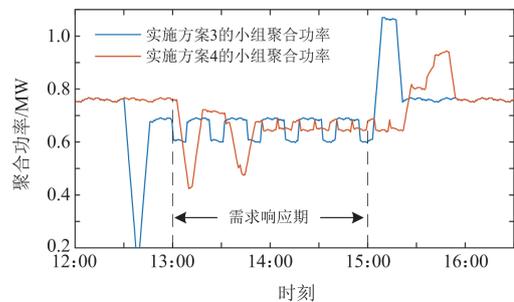


图 A4 第 5 小组实施方案 3、4 时的聚合功率对比

Fig. A4 Group aggregated power of the 5th group when implementing schemes 3 and 4

附录 B

$$\begin{cases} t_1 = t_0 + \min\{S_{on,1}, \Delta F_{1,2}\} \\ t_2 = t_0 + \max\{S_{on,1}, \Delta F_{1,2}\} \\ t_3 = t_0 + \Delta F_{1,2} + S_{on,2} \\ t_4 = t_0 + \Delta F_{1,2} + \min\{S_{on,1} + S_{off,1}, S_{on,2} + S_{off,2}\} \\ t_5 = t_0 + \Delta F_{1,2} + \max\{S_{on,1} + S_{off,1}, S_{on,2} + S_{off,2}\} \\ t_6 = t_4 + S_{on,2} \\ t_7 = t_5 + S_{on,2} \end{cases} \quad (B1)$$

$$\beta = \frac{\max_t P_{agg}(t) - (P_{agg,ori} - P_{need})}{P_{agg,ori} - P_{need}}, t_{end} \leq t \leq \max t_{fin}^I \quad (B2)$$

$$\begin{cases} t_s^I = [t_s^{I,1}, t_s^{I,2}, \dots, t_s^{I,n_{ctrl}}], t_d^I = [t_d^{I,1}, t_d^{I,2}, \dots, t_d^{I,n_{ctrl}}] \\ \Delta T_{set}^I = [\Delta T_{set}^{I,1}, \Delta T_{set}^{I,2}, \dots, \Delta T_{set}^{I,n_{ctrl}}] \\ N_{dr}^I = [N_{dr}^{I,1}, N_{dr}^{I,2}, \dots, N_{dr}^{I,n_{ctrl}}] \\ S_{on}^I(t) = [S_{on}^{I,1}(t), S_{on}^{I,2}(t), \dots, S_{on}^{I,n_{ctrl}}(t)]^T \end{cases} \quad (B3)$$

$$\begin{cases} N_{dr}^{I,j}(t) = \begin{cases} N_{dr}^{I,j}, & t_s^{I,j} \leq t \leq t_d^{I,j} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \\ \sum_{j=1}^{n_{ctrl}} N_{dr}^{I,j}(t) \leq N^I \\ \Delta T_{set}^I \leq \Delta T_{set,max}^I \\ t_{start} \leq t_s^{I,j} \leq t_d^{I,j} \leq t_{end} \\ \forall t \in [t_{start}, t_{end}], j \in [1, n_{ctrl}], I \in [1, K] \end{cases} \quad (B4)$$

参考文献

- [1] 胡志勇, 郭雪丽, 王爽, 等. 考虑响应意愿的电动汽车群-空调集群需求响应策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 109-119.
HU Zhiyong, GUO Xueli, WANG Shuang, et al. Demand response strategy for electric vehicles and air conditioners considering response willingness[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 109-119.
- [2] 金旭, 张远实, 李明, 等. 考虑热舒适度的居民空调负荷调控潜力差异化评估[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(1): 50-58.
JIN Xu, ZHANG Yuanshi, LI Ming, et al. Differentiation evaluation of regulation potential for residential air conditioning load considering thermal comfort[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(1): 50-58.
- [3] GUAN Lei, YAO Jun. Dynamic coupling and cooperative control for multi-paralleled doubly fed induction generator wind farms during symmetrical low voltage ride-through in a weak grids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(3): 112-125.
- [4] 崔杨, 张家瑞, 王铮, 等. 计及价格型需求响应的风-光-光热联合发电系统日前调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3103-3114.
CUI Yang, ZHANG Jiarui, WANG Zheng, et al. Day-ahead scheduling strategy of wind-PV-CSP hybrid power generation system by considering PDR[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3103-3114.
- [5] 颜湘武, 王庆澳, 卢俊达, 等. 计及电动汽车和柔性负荷的微电网能量调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(17): 69-79.
YAN Xiangwu, WANG Qing'ao, LU Junda, et al. Microgrid energy scheduling with electric vehicles and flexible loads[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(17): 69-79.
- [6] 侯慧, 何梓姻, 侯婷婷, 等. 大规模车网互动需求响应策略及潜力评估综述[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 177-187.
HOU Hui, HE Ziyin, HOU Tingting, et al. A review of demand response strategies and potential evaluation for large-scale vehicle to grid[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 177-187.
- [7] 陈璐, 杨永标, 徐青山. 基于时变互补特性的聚合空调调控及恢复策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(13): 39-47.
CHEN Lu, YANG Yongbiao, XU Qingshan. Coordinated control and recovery strategy for aggregated air-conditioner based on time-variant complementary characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(13): 39-47.
- [8] 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.
- [9] 孙国强, 李逸驰, 卫志农, 等. 智能用电互动体系构架探讨[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 68-74.
SUN Guoqiang, LI Yichi, WEI Zhinong, et al. Discussion on interactive architecture of smart power utilization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 68-74.
- [10] 范德金, 张姝, 王杨, 等. 考虑用户调节行为多样性的空调负荷聚合商日前调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 133-142.
FAN Dejin, ZHANG Shu, WANG Yang, et al. Day ahead scheduling strategy for air conditioning load aggregators considering user regulation behavior diversity[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 133-142.
- [11] 张勇, 李宁, 丁昊晖, 等. 基于用户差异化热舒适度的空调负荷聚合调度策略[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 133-140.
ZHANG Yong, LI Ning, DING Haohui, et al. Air-conditioning load aggregation scheduling strategy based on user differentiated thermal comfort[J]. Electric Power

- Engineering Technology, 2023, 42(4): 133-140.
- [12] 周磊, 李扬, 高赐威. 聚合空调负荷的温度调节方法改进及控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5579-5589.
ZHOU Lei, LI Yang, GAO Ciwei. Improvement of temperature adjusting method for aggregated air-conditioning loads and its control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5579-5589.
- [13] 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. Day ahead and real time aggregate regulation of air conditioning load on demand response[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(5): 529-537.
- [14] 刘萌, 褚晓东, 张文, 等. 基于多样性保持的空调负荷群调度控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3674-3682.
LIU Meng, CHU Xiaodong, ZHANG Wen, et al. Dispatch and control strategies for air-conditioning load groups based on maintenance of load diversity[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3674-3682.
- [15] 姜婷玉, 鞠平, 王冲. 考虑用户调节行为随机性的空调负荷聚合功率模型[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 105-113.
JIANG Tingyu, JU Ping, WANG Chong. Aggregated power model of air-conditioning load considering stochastic adjustment behaviors of consumers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 105-113.
- [16] DING Yi, CUI Wenqi, ZHANG Shujun, et al. Multi-state operating reserve model of aggregate thermostatically-controlled-loads for power system short-term reliability evaluation[J]. Applied Energy, 2019, 241: 46-58.
- [17] 李亚平, 姚建国, 雍太有, 等. 居民温控负荷聚合功率及响应潜力评估方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5519-5528.
LI Yaping, YAO Jianguo, YONG Taiyou, et al. Estimation approach to aggregated power and response potential of residential thermostatically controlled loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5519-5528.
- [18] COFFMAN A R, CAMMARDELLA N, BAROOAH P, et al. Aggregate flexibility capacity of TCLs with cycling constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(1): 52-62.
- [19] 杨秀, 傅广努, 刘方, 等. 考虑多重因素的空调负荷聚合响应潜力评估及控制策略研究[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 699-708.
YANG Xiu, FU Guangnu, LIU Fang, et al. Potential evaluation and control strategy of air conditioning load aggregation response considering multiple factors[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 699-708.
- [20] KUNDU S, SINITSYN N. Safe protocol for controlling power consumption by a heterogeneous population of loads[C] // 2012 American Control Conference (ACC), June 27-29, 2012, Montreal, QC, Canada: 2947-2952.
- [21] 李彦伦, 窦晓波, 卜强生, 等. 基于改进 FCM 和最小互信息算法的户变关系辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(11): 102-111.
LI Yanlun, DOU Xiaobo, BU Qiangsheng, et al. Identification method of transformer-customer relationship based on an improved FCM algorithm and minimum mutual information[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(11): 102-111.
- [22] 邹云阳, 杨莉, 冯丽, 等. 考虑热负荷二维可控性的微网热电协调调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 13-19.
ZOU Yunyang, YANG Li, FENG Li, et al. Coordinated heat and power dispatch of microgrid considering two-dimensional controllability of heat loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 13-19.
- [23] 朱兰, 黄超, 唐陇军, 等. 基于队列分析的改进空调负荷控制策略及其评估[J]. 现代电力, 2019, 36(2): 56-65.
ZHU Lan, HUANG Chao, TANG Longjun, et al. Improved air-conditioning load control strategy and evaluation based on state-queue analysis[J]. Modern Electric Power, 2019, 36(2): 56-65.
- [24] 龙寰, 赵烁, 吴志, 等. 考虑反弹效应的空调负荷可调潜力评估与控制策略研究[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3638-3647.
LONG Huan, ZHAO Shuo, WU Zhi, et al. Adjustable potential evaluation and control strategy of air conditioning loads considering rebound effect[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3638-3647.
- [25] ERDINC O, TASCIKARA OGLU A, PATERAKIS N G, et al. End-user comfort oriented day-ahead planning for responsive residential HVAC demand aggregation considering weather forecasts[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(1): 362-372.

收稿日期: 2024-11-23; 修回日期: 2025-01-13

作者简介:

刘林(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力负荷优化调度; E-mail: 1120728439@qq.com

李成鑫(1976—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为负荷弹性、配电网降损、综合能源服务; E-mail: lcx36@126.com

赵林昕(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电动汽车接入电网。E-mail: 1015474825@qq.com

(编辑 周金梅)