

空调负荷集群参与辅助服务的运行调控与评价技术综述

汤卓凡^{1,2}, 赵建立^{1,2}, 何宇俊³, 向佳霓^{1,2}, 陈小毅^{1,2}, 温立超^{1,2}

(1. 国网上海市电力公司, 上海 200030; 2. 上海市智能电网需求响应重点实验室, 上海 200030; 3. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要: 空调负荷具有总量大、易调节、对用户影响较小的特点, 是理想的需求侧可调节资源, 有必要从不同角度梳理空调负荷参与辅助服务技术的研究进展和方向。首先, 介绍不同类型空调资源的单体和聚合建模技术。其次, 分析了空调参与一次调频、二次调频、备用容量等不同辅助服务的主要难题和技术方法, 介绍考虑信息安全可靠的空调调控技术, 并从电网互动和用户舒适度等方面归纳空调负荷的评价技术。最后, 提出进一步挖掘空调负荷调节潜力的建议, 以期促进空调负荷调控技术从理论研究向实际应用的转化。

关键词: 空调; 辅助服务; 调控技术; 信息安全; 性能评价

A review of operation regulation and evaluation techniques for air conditioning clusters participating in ancillary services

TANG Zhuofan^{1,2}, ZHAO Jianli^{1,2}, HE Yujun³, XIANG Jiani^{1,2}, CHEN Xiaoyi^{1,2}, WEN Lichao^{1,2}

(1. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200030, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Smart Grid Demand Response, Shanghai 200030, China; 3. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Air conditioning loads, characterized by their large amount, ease of adjustment, and minimal impact on users, are ideal demand-side flexible resources. It's necessary to research progress and directions of air conditioning load participation in ancillary service technologies from various perspectives. Firstly, the modeling techniques for individual and aggregated air conditioning resources are introduced. Then, the main challenges and technical methods for air conditioning participation in various ancillary services such as primary frequency regulation, secondary frequency regulation, and reserve capacity are analyzed. Air conditioning control technologies considering information security and reliability are discussed, and evaluation techniques for air conditioning load from the perspectives of grid interaction and user comfort are summarized. Finally, suggestions for further exploring the regulation potential of air conditioning load are proposed to promote the transformation of air conditioning load control technologies from theoretical research to practical applications.

Key words: air conditioning; ancillary services; regulation techniques; cyber security; performance evaluation

0 引言

近年来风电、光伏等新能源的装机占比快速提升, 给电力系统运行带来巨大挑战^[1]。随着电力物联网以及智能用电技术的发展, 电网逐步具备对负荷侧资源的远程感知和调控能力, 为后者参与电网辅助服务提供了必备条件^[2]。空调负荷整体用电量、易调节, 是参与辅助服务的理想资源。在用电高峰时段, 部分地区空调负荷可达到系统总负荷的50%^[3]。因此, 空调负荷参与电网调节将能够有效缓解电网对灵活性的需求。

目前, 空调调节已在国内外开展了应用实践。美国太平洋天然气和电力公司从2007年就开始推动自动需求响应(automated demand response, ADR)的商业化, 并在建筑空调中部署 ADR 控制设备^[4]。据统计, 美国居民空调在峰荷时段平均可下调0.3~1.5 kW的功率^[5]。近年来江苏、浙江、广东等地也开展了大量依托虚拟电厂平台的负荷侧响应。然而, 现有的应用案例主要以削峰填谷的需求响应为主, 缺乏对空调负荷的精细化调控, 对空调负荷调节能力以及对用户舒适度影响也缺乏准确评估手段, 难以适应空调参与辅助服务的要求。

为了解决空调负荷精准参与辅助服务的问题, 本文将对空调负荷参与辅助服务的技术研究进行综述, 分析现有研究的局限性, 提出空调负荷参与

收稿日期: 2024-01-30; 修回日期: 2024-03-06

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目资助(5400-202340383A-2-3-XG)

辅助服务的关键技术难点和研究思路,以期为空调负荷规模化参与辅助服务提供参考。

1 空调负荷单体和聚合建模技术

1.1 单体空调模型

(1) 定频空调模型

定频空调制冷机组按照固定频率运行。对于单台空调,通常采用等效热力学模型(equivalent thermal parameter, ETP)模拟空调制冷量与室内温度变化的动态过程^[6]。为了简化计算,绝大多数文献采用ETP的一阶近似模型^[7],如式(1)所示

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{RC_a}(T_o - T_i) - \frac{Qs}{C_a} \quad (1)$$

式中: C_a 为等效比热容; R 为等效阻抗; T_i 为室内气温; T_o 为室外气温; Q 为制冷量; s 为空调启停状态的0-1变量。当制冷机处于开机时,室内温度不断降低直到温度下限,此时关停制冷机组;然后温度不断上升直到温度上限,此时制冷机组重新开启,如此循环往复,如式(2)所示

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

式中: $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 分别为室内温度设定上、下界。

定频空调可采用直接控制^[8-10]或间接控制^[11-15]的方式。直接控制是直接改变空调开关启停状态;间接控制是通过调整温度设定值^[11]、电价信号^[14]、占空比^[15]等方式去间接影响空调启停状态。文献[14]提出了一种基于温度设定调节概率的控制策略,以实现空调负荷功率的连续调节。文献[15]提出一种基于单一间断运行方式的中央空调直接负荷控制(direct load control, DLC)模型考虑用户响应意愿、电网调度需求等因素对空调负荷进行调控。

(2) 变频空调模型

变频空调同样采用电热转换模型描述制冷量 Q 和电功率 P 的关系。变频空调的能效比不是常数,而是压缩机频率 f 的函数,如式(3)所示

$$\begin{cases} P = h_1(f) \\ Q = h_2(f) \end{cases} \quad (3)$$

变频空调模型通常表征为压缩机频率与电功率/制冷量的线性模型^[16]或二次函数模型^[17],并实现空调制冷量和电功率的连续控制^[17-19]。文献[17]对空调负荷按照运行频率进行分组轮控,从而充分挖掘变频空调的调控潜力。文献[20]提出一种数据驱动的变频空调模型参数在线辨识方法,可以满足

模型在线应用快速计算的需要。

(3) 中央空调模型

中央空调是通过集中式的制冷机、循环水泵、冷却塔、风扇等多个用能设备实现对建筑供冷,一般应用在商业楼宇等场景。部分研究对中央暖通空调进行详细的物理建模^[20-22]。中央空调的调控方式更加多样化,文献[21]建立了供热通风与空气调节(heating, ventilation and air conditioning, HVAC)系统模型,并通过调整风扇速率的策略来响应调频功率指令。文献[22]则对中央空调的风扇、制冷机、水泵进行联合调控。

1.2 空调集群的聚合模型

空调负荷体量小、数量众多、位置分散,对空调负荷单独建模将会面临海量的计算负担。因此需要将空调负荷进行聚合,并刻画其外部特性表征形式。对空调聚合模型的研究可分为概率分布模型和资源可行域聚合模型两种技术路线。

(1) 概率分布模型

概率分布模型描述空调集群的总体运行状态分布。典型的概率分布模型包括福克-普朗克模型^[23-24]、马尔可夫状态模型^[25-26]、双线性偏微分方程模型^[27]以及状态队列模型^[28]等。文献[24]提出一种数字拉普拉斯反变换方法用于求解空调集群的福克-普朗克方程聚合模型。文献[14]提出了一种基于半马尔科夫过程的空调负荷聚合控制方法,利用混杂系统模型实现空调的自治控制。

(2) 资源可行域聚合模型

资源可行域聚合模型是将空调运行状态变量的可行域进行欧几里得空间的加法运算,即闵可夫斯基求和。目前主要研究方向是对单个资源可行域近似线性求和方法,包括凸多胞体、全对称多胞体和超椭球体等^[29]。近年来,多数研究将空调负荷集群建模为虚拟发电机^[8,10]或虚拟电池(virtual battery, VB)模型^[30-31]。文献[30]将单个空调的灵活性表征为VB模型,提出一种外逼近闵可夫斯基聚合方法对空调负荷建模。文献[31]提出一种双层聚合模型,其中上层模型通过分布式交替方向因子算法对各个聚合器进行调度,下层模型以一致的虚拟荷电状态(state of charge, SOC)指令对各空调的VB模型进行调控。

不同空调建模技术的横向对比如表1所示。总体上相对于定频空调,变频空调和中央空调具有更加良好的调控性能和更高的市场占有率,值得深入研究。另一方面采用机理模型与数据驱动结合方法能够有效提升模型参数辨识能力,从而优化模型调控能力。

表1 典型空调建模技术对比

Table 1 Comparison of typical AC modeling techniques

典型模型	模型性能对比
定频空调模型 ^[6]	对启停、温度设定控制,控制逻辑简单,但灵活性较弱
变频空调模型 ^[17]	可实现功率连续控制,调控灵活
中央空调模型 ^[20]	对水温、送风量连续控制,需要考虑水量约束等边界条件
空调集群概率分布模型 ^[23-28]	基于空调状态概率分布进行连续控制,主要适用在定频空调场景
空调集群可行域聚合模型 ^[8,30]	可表征空调集群整体调控空间,但可调控空间建模存在近似损失

2 空调负荷参与辅助服务的调控方法

空调负荷可参与到多元化辅助服务中,电网通过调控空调的负荷曲线以满足系统运行需求。本节将讨论空调参与不同类型辅助服务的及调控方法。

2.1 空调负荷参与一次调频

近年来随着负荷侧资源被纳入辅助服务的相关政策发布,空调负荷参与一次调频服务^[8,10,11,18,32]愈发引起关注。空调负荷可通过模拟发电机组的下垂控制来实现调频。空调负荷的虚拟下垂控制如图1所示。空调聚合商接收到电力系统频率偏差 Δf 后,计算出空调集群的总功率调节需求 ΔP_{ac} ,并调整空调功率。空调参与一次调频的主要难点在于设计能够快速响应的调频控制器。文献[8]提出一种动态下垂控制机制,利用用户的平均温度状态对空调的下垂系数进行动态调整,从而兼顾空调调频对用户舒适度的影响。文献[18]针对控制器参数难以获取且抗干扰能力差的问题,提出无模型自适应控制方法,提高了对外部扰动的鲁棒性。文献[33]设计了基于模糊数学理论的变论域模糊PI控制器,可灵活控制调节参数,从而改善空调的调节精度。

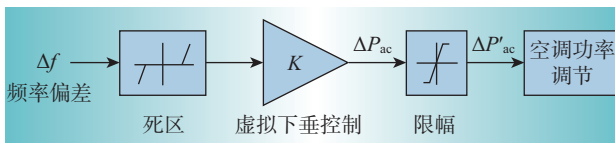


图1 空调负荷的下垂控制

Fig. 1 Droop control of air conditioning load

2.2 空调负荷参与二次调频/自动发电控制

二次调频通常通过自动发电控制(automatic generation control, AGC)系统实现。空调负荷参与AGC的主要技术难点在于对空调集群的设备选择和功率分配算法。文献[34]提出基于风险规避多臂机理论选择调频意愿更高的空调用户,直至达到系统的调频功率要求。文献[13]将空调负荷的功

率调节需求通调制成全局广播信号并发送给各设备,实现对空调负荷聚合功率的连续调节。针对空调计量信号的不确定性,文献[35]提出一种鲁棒性的模型预测控制方法,以实现多时段的滚动控制。

空调负荷参与AGC调频还需要考虑在电力市场中的投标决策。文献[19]基于负荷不确定性和AGC调频信号的不确定性,建立了一种基于机会约束规划的日前优化调度模型,实现对空调参与AGC调频和电量交易的优化投标。

2.3 空调负荷提供备用容量支撑

空调负荷可通过增加或削减负荷的方式为电网提供备用容量支撑。备用服务不仅需要考虑需求侧资源的瞬时功率边界,也需要考虑一段时间内的电量储备^[36]。文献[37]建立HVAC的备用优化与实时调度联合优化模型,基于电量空间对空调进行功率分配,以满足备用需求。文献[38]则将暖通空调的调节潜力与用户舒适度模型结合,提出一种空调电能与备用容量联合竞价模型。

不同空调参与辅助服务技术的横向对比如表2所示。总体而言,现有研究大多偏理想化,对空调参与辅助服务的外部扰动和安全性考虑不足。后续还需要研究如何在复杂随机扰动因素影响下提供辅助服务的调控技术。

表2 典型空调参与辅助服务技术对比

Table 2 Comparison of typical AC techniques in participating in ancillary services

辅助服务模型类别	模型性能对比
一次调频下垂控制模型 ^[8,10,18]	模拟发电机组、PI控制等方式,响应快速,无需数据传输
二次调频AGC调控模型 ^[13,34]	通过广播控制、分组轮控等方式减少数据通信负担
备用服务模型 ^[36-37]	需要考虑调控能力持续时间和对用户舒适度的影响

3 考虑信息安全可靠的空调负荷调控技术

空调参与辅助服务调节的调控方法可分为集中式控制和分散式控制等不同类型。集中式的控制结构需要一个空调调控平台向用户发送控制指令,并实时接收设备状态信号如图2所示。

然而,集中式控制结构承受着较大的通信负担,且易受到通信故障的影响。为了降低通信成本并满足空调用户关于设备安全和数据隐私性的要求,需要设计能够实现最小化用能数据传递的分散自治型控制方式。相对于集中式控制方法,分布式控制具有需要较少的计算量、容错度高和系统架构

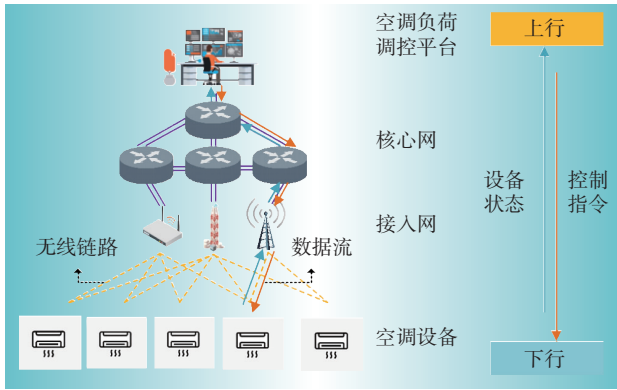


图2 集中式控制的空调系统通信架构

Fig. 2 Telecommunication framework of air conditioning system under centralized control

灵活等优点,受到了广泛关注^[39—43]。文献[39]建立分布式的模型预测控制器进行并行的优化决策,文献[41]提出一种空调调频的分散自律控制策略以减少通信要求。文献[42]提出一种基于混合逻辑动态建模的空调控制方法,能够在保护用户隐私的情况下聚合大量具有自治性的空调负荷。文献[43]提出基于元宇宙的数字孪生模型框架,来仿真模拟空调运行状态和调控效果,从而减少的通信负担。针对空调负荷调节的通信故障场景,文献[44]则提出了一种基于分布异质簇的分层控制策略,并在通信中断和通信延迟两种故障情况下分析空调的可调度容量,仿真结果显示该方法的可调度容量要优于传统方法。

不同空调调控架构的横向对比如表3所示。总体而言,采用分布式控制架构相对集中式架构能够有效减少通信负担,提高调控效果的鲁棒性,并且更能够保障用户的隐私性和信息安全。

表3 典型空调调控架构对比

Table 3 Comparison of regulation architectures for typical AC

调控架构类别	架构性能对比
集中式控制架构 ^[7,11]	集中式控制不需要单个设备决策,控制环境比较理想,可靠性较低
分布式协调架构 ^[39]	不同对象分别决策再通过控制中心协调,系统架构灵活,适应性强
分散自治式架构 ^[41]	对象本身具有自治控制能力,不需要依赖控制中心,通信需求少
分层控制架构 ^[44]	不同层级独立调控,对通信故障的容错度高

4 空调负荷调节性能综合评价方法

空调负荷调节的综合评价主要涉及空调与电网互动效果和对用户的舒适度影响等方面,以下分别讨论。

4.1 空调负荷与电网互动效果评价

空调负荷与电网互动效果的评价指标体系可分为负荷调控的安全可靠性指标、电网公司经济效益指标和用户经济效益指标等方面^[44]。针对空调调节性能,典型指标包括削峰填谷能力、最大可中断时间、负荷跟随能力、节电能力以及调频能力等^[15]。空调性能的评价方法可分为事前与事后评价。文献[45]提出一种基于历史数据集的EnergyPlus白盒模型来模拟空调的热力学动态,并实现大规模空调集群可调度容量的评估。文献[46]提出兼顾物理状态和用户行为多重约束的空调紧急功率调节能力评估方法。

近年来,基于数据驱动方法对空调负荷调节能力量化评价的模型愈发受到关注。文献[47]提出一种基于函数型数据分析的特征信息提取方法对空调用电行为进行分类。文献[48]提出一种基于智能仪表和温度数据的评价方法。文献[49]基于数据驱动和深度置信网络的空调负荷集群参与分布式光伏就地消纳的可调节潜力评估方法。文献[9]提出一种基于seq2seq神经网络用来预测单体空调的调频备用容量,仅通过学习空调功率曲线即可输出空调的未来运行状态。

4.2 用户舒适度评价

空调系统的调节会影响室内温度 and 用户舒适度,从而引起用户对空调调节的不满,因此有必要对用户舒适度准确评价。

与电气指标不同,用户对体感温度的感受只有模糊的定义。预测平均指标(predicted mean vote, PMV)模型是基于人在不同环境下对冷暖感觉做出的主观反应数据进行曲线回归^[50],PMV值表达式如式(4)所示

$$\delta_{PMV} = (0.303e^{-0.036M} + 0.038)L \quad (4)$$

式中: M 为新陈代谢量; L 为人体的热平衡状态。PMV值仅代表对温度的感受等级,缺乏用户满意度的评估。文献[51]将PMV模型与预测不满意程度(predicted percentage of dissatisfied, PPD)模型结合,得到PMV-PPD模型,用来代表同一环境中人的舒适度评价平均满意度。文献[52]通过一段时间的PMV平均值来表示平均舒适度,并将其作为空调设备调控的排序指标。现有研究还缺乏将用户舒适度的评价与如何挖掘空调调节潜力结合的方法,这方面值得进一步研究。

5 空调参与辅助服务的未来展望与建议

总体来看,目前对空调负荷参与辅助服务的技术研究仍难以完全满足实际应用需求,结合本文研

究,建议进一步开展空调调控技术研究,完善空调负荷调控的评价体系和标准规范,培育空调负荷参与辅助服务的新业态,从而深入挖掘空调负荷的调节潜力。

(1) 开展面向新型空调的聚合调控技术研究

建议加强对主流和新兴空调技术的研究。研究多场景、多工况、多类型新型空调负荷的精细化建模方法,研究机理和数据相融合的居民及商业楼宇空调集群调控方法。

(2) 开展信息安全可靠的空调调控技术研究

建议开展考虑通信可靠性和信息安全的空调集群调控技术研究,构建综合信息物理系统模型,提出空调系统调控的信息流建模和分析方法,研究有限信息和非完美通信环境下的空调集群分布式调控算法,提升空调系统调控的准确性和容错性。

(3) 完善空调参与辅助服务的综合评价体系和技术标准

建议通过调研空调参与辅助服务的实际场景需求,提出包括电力供需平衡度、负荷调整响应速度、电能质量、成本效益等多种评价指标的空调集群负荷调控评价体系。开展空调设备接入和参与调控的技术标准研究,并提出标准的实施和推广方案,以促进标准体系的有效应用。

(4) 培育空调参与辅助服务新业态的机制建议

对空调参与辅助服务的研究需要与辅助服务市场机制深入结合,建议开展空调负荷参与辅助服务的交易机制、商业模式与实施路径研究,针对空调负荷参与辅助服务提出灵活的价格机制,培育空调参与辅助服务的新业态,引导空调负荷资源积极参与辅助服务,与电网实现互利共赢。

6 结束语

以空调负荷为代表的需求侧资源参与辅助服务对于新型电力系统的建设具有重要意义。本文从空调单体与聚合建模技术、空调负荷参与辅助服务的调控方法、考虑信息安全可靠的调控技术以及空调负荷性能评价方法等不同角度,总结了空调负荷参与辅助服务前沿技术的研究进展,并提出促进储能参与辅助服务的未来展望与建议。

总体而言,后续空调调控技术研究应充分考虑新兴空调技术应用和信息安全对调控技术的影响,完善空调参与辅助服务的综合评价体系和技术标准,发展和培育空调参与辅助服务新业态,为进一步释放空调负荷的调控潜力提供支撑。□

参考文献:

- [1] 吴争,甘海庆. 电力市场环境下需求侧资源评估与调控综述[J]. 电力需求侧管理,2024,26(1):1-8.
WU Zheng, GAN Haiqing. Review of research on the assessment and regulation of the demand side resources under electricity market circumstances [J]. Power Demand Side Management, 2024, 26(1):1-8.
- [2] 丁继为,王磊,刘顺桂,等. 美国商务楼宇参与需求响应综述[J]. 电力需求侧管理,2015,17(5):61-64.
DING Jiwei, WANG Lei, LIU Guishun, et al. Review of the business building to participate in demand response [J]. Power Demand Side Management, 2015, 17(5):61-64.
- [3] 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):3 638-3 648.
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):3 638-3 648.
- [4] 张天伟,谢畅,王蓓蓓,等. 美国商业建筑空调负荷控制策略及其在自动需求响应系统中的整合应用[J]. 电力需求侧管理,2016,18(6):60-64.
ZHANG Tianwei, XIE Chang, WANG Beibei, et al. The commercial building air conditioning load control strategies and its comprehensive application in automated demand response system in U.S. [J]. Power Demand Side Management, 2016, 18(6):60-64.
- [5] 唐楠,李艺丰,王蓓蓓,等. 美国需求响应技术和思考(上)[J]. 电力需求侧管理,2015,17(6):55-61.
TANG Nan, LI Yifeng, WANG Beibei, et al. Technology and thinking for U.S. demand response(Part 1)[J]. Power Demand Side Management, 2015, 17(6):55-61.
- [6] MOLINA A, GABALDON A, FUENTES J A, et al. Implementation and assessment of physically based electrical load models: application to direct load control residential programmes [J]. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(1):61-66.
- [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 control of air conditioning load for demand response applications [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14):158-167.
- [8] 刘辉,吴晓鸣,苏懿. 基于动态下垂控制的温控负荷一次调频控制策略[J]. 电力工程技术,2023,42(2):48-57.

- LIU Hui, WU Xiaoming, SU Yi. Primary frequency control strategy for thermal load based on dynamic droop control [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(2):48-57.
- [9] 聂世豪, 陈磊, 郝玲, 等. 基于非侵入式负荷分解的空调集群 AGC 调频备用容量评估方法[J/OL]. *上海交通大学学报*: 1-14 [2024-02-24]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.099>.
- NIE Shihao, CHEN Lei, HAO Ling, et al. An assessment method of AGC frequency reserve capacity for air-conditioning clusters based on non-intrusive load decomposition[J/OL]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*: 1-14 [2024-02-24]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.099>.
- [10] 张海滨. 基于虚拟调频机组的空调负荷参与电网调频控制策略研究[J]. *吉林电力*, 2023, 51(1):10-14.
- ZHANG Haibin. Research on frequency regulation control strategy of air conditioning load participating in grid frequency regulation based on virtual frequency modulation units[J]. *Jilin Electric Power*, 2023, 51(1):10-14.
- [11] 屠聪为, 曹军, 于东立, 等. 基于空调负荷的虚拟储能参与调频的控制策略[J]. *电力需求侧管理*, 2019, 21(1):16-21.
- TU Congwei, CAO Jun, YU Dongli, et al. Control strategy for frequency regulation participation based on virtual energy storage considering air conditioning load [J]. *Power Demand Side Management*, 2019, 21(1):16-21.
- [12] 刘志伟, 苗世洪, 杨炜晨, 等. 计及电气特性的空调负荷建模及集群控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(1):178-184, 192.
- LIU Zhiwei, MIAO Shihong, YANG Weichen, et al. Air conditioning load modeling and cluster control strategy considering electrical characteristic [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(1):178-184, 192.
- [13] 包宇庆, 姚兹丽. 空调负荷参与电力系统调频的温度设定值概率控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(2):69-78.
- BAO Yuqing, YAO Zili. Probability control strategy of temperature setpoint for air conditioning load participating in frequency regulation of power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(2):69-78.
- [14] 王永权, 张沛超, 姚垚. 聚合大规模空调负荷的信息物理建模与控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(22):6 509-6 521.
- WANG Yongquan, ZHANG Peichao, YAO Yao. Information-physical modeling and control methods for aggregating large-scale air conditioning loads[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(22):6 509-6 521.
- [15] 朱宇超, 王建学, 曹晓宇. 中央空调负荷直接控制策略及其可调度潜力评估[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(5):227-234.
- ZHU Yuchao, WANG Jianxue, CAO Xiaoyu. Direct control strategy of central air conditioning load and its scheduling potential evaluation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(5):227-234.
- [16] 姚垚, 张沛超. 大规模变频空调参与电力系统辅助服务的协调控制方法[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(22):127-134.
- YAO Yao, ZHANG Peichao. Coordinated control method of large-scale variable frequency air conditioning participating in power system ancillary services [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(22):127-134.
- [17] 杨梓俊, 丁小叶, 陆晓, 等. 面向需求响应的变频空调负荷建模与运行控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(15):132-140.
- YANG Zijun, DING Xiaoye, LU Xiao, et al. Load modeling and operation control of variable frequency air conditioning systems responsive to demand [J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(15):132-140.
- [18] 左强, 李波, 杨世海. 大规模空调负荷参与新能源电力系统调频的无模型自适应控制方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(2):224-231.
- ZUO Qiang, LI Bo, YANG Shihai. A model-free adaptive control method for large-scale air conditioning load participating in frequency regulation of new energy power system [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(2):224-231.
- [19] 湛归, 殷爽睿, 艾芊, 等. 智能楼宇型虚拟电厂参与电力系统调频辅助服务策略[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(6):13-20, 57.
- ZHAN Gui, YIN Shuangrui, AI Qian, et al. Intelligent building-type virtual power plant participating in power system frequency regulation ancillary service strategy [J]. *Electric Engineering Technology*, 2022, 41(6):13-20, 57.
- [20] 吴承鑫, 沈海军, 王治华, 等. 数据驱动的变频空调负荷模型参数在线辨识方法[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(1):120-129.
- WU Chengxin, SHEN Haijun, WANG Zhihua, et al. Data-driven online identification method for parameters of inverter air-conditioning load model [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(1):120-129.
- [21] WANG W, TIAN G, SUN Q Z, et al. A control framework to enable a commercial building HVAC system for energy and regulation market signal tracking [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 1(38):290-301.
- [22] HAO H, KOWLI A, LIN Y, et al. Ancillary service to the grid through control of fans in commercial building HVAC systems [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 4(5):2 066-2 074.
- [23] ZHENG J, LAPARRA G, ZHU G, et al. Aggregate power control of heterogeneous TCL populations governed by Fokker-Planck equations [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2020, 28(5):1 915-1 927.

- [24] 刘萌, 梁雯, 张晔, 等. 温控负荷群 Fokker-Planck 方程聚合模型的数值拉普拉斯反变换求解方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 17-23.
LIU Meng, LIANG Wen, ZHANG Ye, et al. Numerical inverse Laplace transform solving method of thermostatically controlled load group's Fokker-Planck equation aggregation model[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 17-23.
- [25] ZHAO H, WU Q W, HUANG S J, et al. Hierarchical control of thermostatically controlled loads for primary frequency support[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 2 986-2 998.
- [26] JENDOUBI I, SHESHYEKANI K, DAGDOUGUI H. Aggregation and optimal management of TCLs for frequency and voltage control of a microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(4): 2 085-2 096.
- [27] HU J Q, CAO J D, ABDEL ATY M. Distributed aggregate tracking of heterogeneous thermostatically controlled load clusters[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2020, 38(3): 2 529-2 537.
- [28] BAO Y Q, CHEN P P, HU M Q, et al. Control parameter optimization of thermostatically controlled loads using a modified state-queueing model[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(2): 394-401.
- [29] 陈会来, 张海波, 王兆霖. 不同类型虚拟电厂市场及调度特性参数聚合算法研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 15-27.
CHEN Huilai, ZHANG Haibo, WANG Zhaolin. A review of market and scheduling characteristic parameter aggregation algorithm of different types of virtual power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 15-27.
- [30] 童宇轩, 胡俊杰, 杜昊明, 等. 基于虚拟电池模型的外逼近闵可夫斯基热泵负荷调节可行域聚合方法[J/OL]. 电网技术: 1-17 [2024-02-24]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1580>.
TONG Yuxuan, HU Junjie, DU Haoming, et al. Aggregation method of feasible region for load regulation of minkowski heat pump based on virtual battery model[J/OL]. Power System Technology: 1-17 [2024-02-24]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1580>.
- [31] 李力, 董密, 宋冬然, 等. 分布式的温控负荷集群负荷跟随控制[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21): 8 270-8 282.
LI Li, DONG Mi, SONG Dongran, et al. Distributed temperature control load clustering load following control[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21): 8 270-8 282.
- [32] 刘美妍, 王娟娟. 考虑用户行为的变频空调参与一次调频控制策略[J]. 电器与能效管理技术, 2023(10): 21-27.
LIU Meiyan, WANG Juanjuan. A frequency conversion air conditioning system considering user behavior participating in frequency control strategy[J]. Electrical and Energy Management Technology, 2023(10): 21-27.
- [33] 张杰, 撒奥洋, 于立涛, 等. 聚合变频空调参与微网调频的变论域模糊 PI 控制策略[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(9): 20-27.
ZHANG Jie, HAN Aoyang, YU Litao, et al. Fuzzy PI control strategy in the variable domain of frequency-aggregated inverter air conditioners participating in microgrid frequency regulation[J]. New Technology of Electric Power and Energy, 2020, 39(9): 20-27.
- [34] 胡江溢, 郑涛, 金龙, 等. 计及用户决策不确定性与调频备用需求的空调负荷聚合策略[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3 534-3 542.
HU Jiangyi, ZHENG Tao, JIN Yulong, et al. Aggregation strategy of air conditioning load considering user decision uncertainty and frequency regulation reserve requirement[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3 534-3 542.
- [35] LANKESHWARA G, SHARMA R, YAN R, et al. Control of residential air-conditioning loads to provide regulation services under uncertainties[J]. 2021 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Washington, DC, USA, 2021: 1-5.
- [36] 吴巨爱, 薛禹胜, 谢东亮, 等. 电动汽车参与运行备用的能力评估及其仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 101-107, 168.
WU Juai, XUE Yusheng, XIE Dongliang, et al. Assessment and simulation analysis of electric vehicle participation in ancillary services[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 101-107, 168.
- [37] 吴洲洋, 艾欣, 胡俊杰. 需求侧灵活性资源参与调频辅助服务的备用优化与实时调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(6): 148-157.
WU Zhouyang, AI Xin, HU Junjie. Optimization and real-time scheduling of reserve for demand-side flexible resources participating in frequency regulation ancillary services[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(6): 148-157.
- [38] 吴心弘, 潘玲玲, 王泽荣, 等. 能量-备用多品种电力交易下空调负荷聚合商竞价策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(2): 203-211.
WU Xinhong, PAN Lingling, WANG Zerong, et al. Energy-multiple-variety electricity trading under air-conditioning load aggregation merchant competitive bidding strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(2): 203-211.
- [39] 姜爱华, 韦化. 基于通信的大规模空调与电网互动的分布式合作模型及优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(21): 6 276-6 283.
JIANG Aihua, WEI Hua. Distributed cooperation model and optimal control strategy for interaction between

- large-scale air conditioning and power grid based on communication [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(21): 6 276–6 283.
- [40] 郑毅, 李少远. 网络信息模式下分布式系统协调预测控制[J]. 自动化学报, 2013, 39(11): 1 778–1 786.
- ZHENG Yi, LI Shaoyuan. Networked cooperative distributed model predictive control for dynamic coupling systems [J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(11): 1 778–1 786.
- [41] 刘萌, 张岩, 王大鹏, 等. 电力系统大功率缺额下空调负荷群集的分散自律控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 3 050–3 058.
- LIU Meng, ZHANG Yan, WANG Dapeng, et al. Decentralized autonomous control strategy for air conditioning load cluster under large power shortage in power system [J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 3 050–3 058.
- [42] 王永权, 张沛超, 姚焱. 空调负荷的混合逻辑动态建模和自治控制方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 175–181, 1.
- WANG Yongquan, ZHANG Peichao, YAO Yao. Hybrid logical dynamic modeling and autonomous control method of air conditioning load [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 175–181, 1.
- [43] 贺兴, 唐跃中, 韩焱宸, 等. 基于数字孪生与元宇宙的能源互联网认知系统论(三): 复杂系统群智调控理论及其框架[J/OL]. 中国电机工程学报: 1–12[2024-02-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20240122.1749.002.html>.
- HE Xing, TANG Yuezhong, HAN Yechen, et al. Cognitive system theory of digital twins and metaverse-based energy internet (III): theory and framework of complex system collective intelligence control [J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1–12[2024-02-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20240122.1749.002.html>.
- [44] 林慧婕, 顾琳琳, 张宇峰. 面向城市楼宇群的温控类柔性负荷优化调度控制方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2023(11): 150–153, 158.
- LIN Huijie, GU Linlin, ZHANG Yufeng. An optimized scheduling control method for flexible load in temperature control of urban building clusters [J]. Automation and Instrumentation, 2023(11): 150–153, 158.
- [45] YIN R, KARA E C, LI Y, et al. Quantifying flexibility of commercial and residential loads for demand response using setpoint changes [J]. Applied Energy, 2016, 177: 149–164.
- [46] 薛景润, 施啸寒, 王超, 等. 兼顾物理状态和用户行为的虚拟电厂紧急功率调节能力量化评估[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(8): 2 906–2 921.
- XUE Jingrun, SHI Xiaohan, WANG Chao, et al. Quantitative assessment of emergency power regulation capability of virtual power plants considering physical state and user behavior [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 2 906–2 921.
- [47] 白东壮, 田世明, 邹毅豪, 等. 基于FDA的居民用户空调用电行为分类分析方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(3): 44–49, 71.
- BAI Dongzhuang, TIAN Shiming, ZOU Yihao, et al. Classification analysis method of residential air conditioning electricity consumption behavior based on functional data analysis model [J]. Smart Power, 2022, 50(3): 44–49, 71.
- [48] QI N, CHENG L, XU H, et al. Smart meter data-driven evaluation of operational demand response potential of residential air conditioning loads [J]. Applied Energy, 2020, 279: 115, 708.
- [49] 陈臻, 杜维柱, 白恺, 等. 空调温控负荷集群参与光伏消纳的潜力评估与互动框架[J/OL]. 现代电力: 1–11 [2024-02-24]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0332>.
- CHEN Can, DU Weizhu, BAI Kai, et al. Potential assessment and interactive framework for air conditioning temperature control load cluster participating in photovoltaic consumption [J/OL]. Modern Electric Power: 1–11 [2024-02-24]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0332>.
- [50] MARTINS L A, SOEBARTO V, WILLIAMSON T. A systematic review of personal thermal comfort models [J]. Building and Environment, 2022, 207: 108 502.
- [51] 黄海涛, 王岱锋, 朱丰泽, 等. 考虑热舒适度的变频空调响应调控策略[J]. 电力建设, 2018, 39(9): 9–17.
- HUANG Haitao, WANG Daifeng, ZHU Fengze, et al. Response control strategy of inverter air conditioning considering thermal comfort [J]. Electric Power Construction, 2018, 39(9): 9–17.
- [52] 刘广生, 李成鑫, 侯治吉, 等. 计及用户舒适度的空调负荷可调节能力评估及响应策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(21): 58–66.
- LIU Guangsheng, LI Chengxin, HOU Zhiji, et al. Evaluation of adjustable capacity and response strategy for air conditioning load considering comfort of customers [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(21): 58–66.

作者简介:

汤卓凡(1993), 女, 湖北襄阳人, 硕士, 工程师, 主要从事负荷管理、需求侧管理、虚拟电厂等研究;

赵建立(1983), 男, 山东滨州人, 硕士, 高级工程师, 主要从事需求侧管理、虚拟电厂、代理购电等研究;

何宇俊(1987), 男, 通信作者, 湖北咸宁人, 博士, 助理研究员, 主要从事电力市场、智能用电、虚拟电厂等研究。

(责任编辑 王 蕊)