

面向规模化空调负荷的聚合调控过程研究

岳萌萌^{1,2}, 邱泽晶^{1,2}, 吴凯彬^{1,2}, 王曦^{1,2}, 王宇^{1,2}

(1. 国网电力科学研究院 武汉能效测评有限公司, 武汉 430074; 2. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 南京 210003)

摘要:近年来,我国电力需求持续增长。为进一步深化电力负荷管理,切实做好迎峰度夏(冬)能源电力保供工作,对深挖空调负荷的调控潜力、完善空调负荷聚合调控机制提出了更高的要求。首先,从物理建模、数据建模两个角度综述空调负荷预测模型和聚合模型,分析不同模型的适用性,并提出适合面向大规模空调负荷的多级聚合模型。然后,围绕调控模型和调控策略讨论现有优化调控进展。最后,结合国内发展现状从算法融合、双碳战略要求、负荷聚合系统高效运行等方面提出发展建议。

关键词:大规模空调负荷;负荷预测;负荷聚合;负荷调控

Research on aggregation regulation process for large-scale air conditioning load

YUE Mengmeng^{1,2}, QIU Zejing^{1,2}, WU Kaibin^{1,2}, WANG Xi^{1,2}, WANG Yu^{1,2}

(1. Wuhan Efficiency Evaluation Corporation, State Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430074, China; 2. NARI Group Corporation(State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 210003, China)

Abstract: In recent years, the demand for electricity continues to grow in China. In order to further deepen the management of electricity load and effectively ensure the supply of energy and electricity during peak summer(winter), higher requirements have been put forward to deeply tap the potential of air conditioning load regulation and improve the mechanism of air conditioning load aggregation regulation. Firstly, the air conditioning load forecasting model and aggregation model from the perspectives of physical modeling and data modeling are summarized, the applicability of different models is analyzed, and a multi-level aggregation model suitable for large-scale air conditioning load is proposed. Then, the current progress in optimizing regulation around regulatory models and strategies is discussed. Finally, based on the current development situation in China, development suggestions are proposed from the aspects of algorithm fusion, dual carbon strategy requirements, and efficient operation of load aggregation systems.

Key words: large-scale air conditioning load; load prediction; load aggregation; load regulation

0 引言

近年来,在“双碳”背景下,我国积极推进能源清洁低碳转型,持续优化电力资源配置,构建新型电力系统。在传统电力系统向新型电力系统转型升级的过程中,供需形势、平衡模式、负荷特性等都在发生复杂变化^[1]。

在迎峰度夏、迎峰度冬最大用电负荷时刻,空调负荷占比较高,且与电网峰值高度重合。各个地区空调负荷峰荷占比普遍在20%以上,北京、上海、江苏、浙江等发达地区占比甚至超过50%,这一比例还在逐年上升。空调负荷已成为影响电力供需平衡的重要因素之一^[2]。

目前,专家学者在空调负荷的预测、聚合和调

控方面进行了深入研究。在空调负荷预测方面,文献[3—8]阐述了基于ETP的物理模型。在空调负荷聚合方面,主要采用基于物理原理的数值解析法^[9—10]、基于历史数据的回归建模法^[11]和基于数学模型的仿真模拟法方法^[12—14]。在调控策略方面,主要以经济性和用户体验类为目标^[19],对能效水平和碳排放水平考虑较少。

本文从空调负荷预测、聚合及调控3个方面的研究进行分析总结。首先从物理建模、数据建模两个角度研究空调负荷预测模型。对比分析通过数值解析法、回归建模法和仿真模拟法3种方法构建的聚合模型,分析不同方法的特点及适用场景,研究聚合原则并提出多级聚合模型,对大规模空调负荷进行分类、分层聚合。围绕调控模型和调控策略讨论空调负荷优化调控的进展。最后在现有研究基础上,对算法融合、“双碳”战略要求、负荷聚合系统高效运行等方面提出进一步的研究建议。

1 空调负荷预测

空调负荷预测是负荷聚合调控的基础工作。目前现有空调负荷预测模型的构建主要有两大方

法:基于等值热参数(equivalent thermal parameter, ETP)的物理方法和基于数据驱动的人工智能方法。

1.1 基于等值热参数的物理方法

常见ETP模型如表1所示。通过建立电热转换模型,分析能效比、额定制冷功率与制冷量之间的

表1 常见空调负荷ETP模型

Table 1 Common air conditioning load ETP model

空调类型	空调负荷模型	模型特点
定频空调	一阶ETP模型 ^[3] $C \frac{dT_i(t)}{dt} = \frac{T_o(t) - T_i(t)}{R} - s(t)Q$ $s(t) = \begin{cases} 0 & T_i(t) < T_{set}^{min} \\ 1 & T_i(t) > T_{set}^{max} \\ s(t - \Delta t) & T_{set}^{min} \leq T_i(t) \leq T_{set}^{max} \end{cases}$	式中: $T_i(t)$ 为室内温度; $T_o(t)$ 为室外温度; R 为房间等效热阻; C 为室内等效热容; $s(t)$ 为空调启停状态变量; Q 为空调制冷量; $s(t)$ 为空调启停状态函数; T_{set}^{min} 为空调启停温度下限值; T_{set}^{max} 为空调启停温度上限值; $t - \Delta t$ 为前一时刻。 忽略室内环境空气温度与建筑温度之间的差异; 建立定频空调启停状态与设置温度之间的函数。
变频空调	一阶ETP模型 ^[4] $T_{in}^{t+1} = T_{out}^{t+1} - Q' R - (T_{out}^t - Q' R - T_{in}^t) e^{-\frac{\Delta t}{RC}}$ $P_{AC} = mf + n$ $Q_{AC} = af^2 + bf + c$ $f' = \begin{cases} f_{max} & \Delta T > n_+ \\ f^{t-1} + K\Delta T & n_- < \Delta T \leq n_+ \\ f_{min} & \Delta T < n_- \end{cases}$	式中: T_{in}^t 为 t 时刻室内温度; T_{out}^t 为 t 时刻室外温度; Q' 为 t 时刻空调制冷量; Δt 为 t 与 $t+1$ 时刻的时间间隔; C 和 R 分别为空调房间的等效热容和热阻; P_{AC} 为空调功率; Q_{AC} 为制冷量; f 为压缩机频率; m, n, a, b 为系数; f_t 和 f_{t-1} 分别为 $t-1$ 时刻的运行频率; f_{max} 和 f_{min} 分别为空调运行频率上、下限; n_+ 和 n_- 为某固定值。正常运行工况下满足 $f_{min} \leq f_t \leq f_{max}$ 。 忽略室内环境空气温度与固体温度之间的差异; 建立变频空调压缩机频率与室温变化的函数关系。
变频空调	一阶ETP模型 ^[5] 稳态阶段 $w_{in}^{t+1} = w_{in}^t = w_{set}$ $P_{BP} = (w_a - w_{set})A/\eta_2$ 动态阶段 $\begin{cases} P_{trans} = (k+1)P_{BP} \\ w_{in}^{t+1} = w_a - \eta_2 P_{trans}/A - (w_a - \eta_2 P_{trans}/A - w_{in}^t) e^{-\frac{\Delta t}{RC}} \end{cases}$	式中: w_{in}^t 为 t 时刻室内温度; w_a 为室外温度; w_{set} 为空调温度设定值; P_{BP} 为变频空调温度设定值; A 为导热系数; η_2 为变频空调能效比; P_{trans} 为变频空调动态功率; k 为变化系数; R 为等效热阻; C 为等效热容。 忽略室内环境空气温度与固体温度之间的差异; 建立了变频空调稳态阶段和动态阶段的模型。
空调	二阶ETP模型 ^[6] $x(t+1) = (I + A\Delta T)x(t) + Bu$ $x(t) = \begin{bmatrix} T_a(t) \\ T_m(t) \end{bmatrix} \quad u = 1$ $A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_a}(\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_m}) & \frac{1}{C_a R_m} \\ \frac{1}{C_m R_m} & -\frac{1}{C_m R_m} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_a}(\frac{T_o(t)}{R_a} - Q_a(t)) \\ 0 \end{bmatrix}$	式中: T_a 为室内空气温度; T_m 为固体温度; R_a 为空气热导; T_o 为室外温度; R_m 为室内空气和固体温度的热导; C_a 为空气的热容; C_m 为建筑材料和家具的热容; Q_m 为固体热功率; I 为单位矩阵; ΔT 为时间步长, 是一个相对较小的正数。 考虑了室内温度和固体温度变化情况。
空调	三阶ETP模型 ^[7] $\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x_{ew} \\ x_{in} \\ x_{iw} \end{pmatrix} = [A] \begin{pmatrix} x_{ew} \\ x_{in} \\ x_{iw} \end{pmatrix} + [B] \begin{pmatrix} X_{ext} \\ I_{ew} \\ I_{eq} \\ I_{dev} s(t) \\ X_{adj-r} \end{pmatrix}$ $[A] = \begin{bmatrix} C_{ew} \left[\frac{R_{cew}}{R'_{ew}(R_{ew} + R_{cew})} - \frac{2}{R'_{ew}} \right] & \frac{1}{C_{ew} R'_{ew}} & 0 \\ \frac{1}{C_{ew} R'_{ew}} & \frac{1}{C_{in}} \left[\frac{1}{R'_{ew}} + \frac{1}{R'_{iw}} + \frac{1}{R'_{gs}} \right] & \frac{1}{C_{in} R'_{ew}} \\ 0 & \frac{1}{C_{iw} R'_{iw}} & \frac{2}{C_{iw} R'_{iw}} \end{bmatrix}$ $[B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_{ew} R'_{ew} + R_{cew}} & \frac{R_{cew}}{C_{ew}(R'_{ew} + R_{cew})} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{in} R'_{gs}} & 0 & \frac{1}{C_{in}} & \frac{1}{C_{in}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{in} R'_{iw}} \end{bmatrix}$	式中: x_{ew} 为外墙平均温度; x_{in} 为室内区域空气温度; x_{iw} 为内墙平均温度; X_{ext} 为外界温度; X_{adj-r} 为相邻房间温度; I_{ew} 为外墙面的太阳辐射量; I_{eq} 为玻璃表面及室内家具的太阳辐射量; I_{dev} 为空调设备和室内环境间的热交换量; $s(t)$ 为空调工作状态: $m=0$ 关闭, $m=1$ 开启; C_{ew} 为外墙热容量; C_{in} 为室内热容量(室内环境空气与家具间的等效热容之和); C_{iw} 为内墙热容量; R_{ew} 为外墙等效热阻的一半; R'_{ew} 为外界环境和外墙间的热阻; R'_{iw} 为内墙等效热阻的一半; R_{gs} 为外玻璃表面的等效热阻。 考虑了内外墙间的温度差。

关系。ETP模型的等效建模可通过模拟空调启停状态的切换、温度值的设定和室外温度的变化改变耗电量。文献[7]在使用一阶ETP模型对空调负荷进行预测时,考虑了用户实际响应情况。文献[8]考虑了空调室内温度和固体温度的变化情况,建立了二阶ETP模型离散化状态方程。文献[9]使用三阶ETP模型,根据随机抽样理论设计了负荷群跟踪有功控制指令算法,并提出了负荷聚合层的优化调度策略。三阶ETP模型充分考虑了太阳能辐射量、房屋走向、墙壁热容、热阻,能够准确模拟空调负荷状态,但计算量较大、计算时间较长,难以广泛应用于实际场景中。

研究发现,二阶ETP模型具有参数少、计算量少、容易实现、易于编程等优势,应用较多。但ETP模型本质上是等效建模,无法准确计算每个房间的温度,不适用于大型建筑。此外,近年来,智能电能表和其他传感器越来越普及,测量的准确度越来越高,但大多数ETP模型缺乏对实时量测数据的利用,无法及时反映环境变化对模型参数的影响,未来如何利用量测数据,实现动态参数辨识是需要重点关注的方向。

1.2 基于数据驱动的人工智能方法

近年来,越来越多的研究采用基于数据驱动的人工智能方法进行空调负荷预测。基于数据驱动的人工智能方法是根据历史运行数据通过回归分析^[15]、支持向量机^[16-17]、决策树^[18]、机器学习^[19-21]、深度强化学习^[22]、混合算法^[23-24]等算法分析负荷特性的影响因素,提高负荷预测的准确性。

空调负荷预测的影响因素较多,部分学者在预测前先使用灰色关联分析、随机森林(random forest, RF)回归分析、频谱分析等方法^[25]进行特征选择。文献[26]利用频谱分析提取循环特征,并利用深度信任网络(deep belief network, DBN)和极限学习机(extreme learning machine, ELM)方法对随机分量进行近似,使预测性能提高了约20%。文献[27]先采用主成分分析法筛选出空调负荷的主要影响因素,再使用遗传算法对灰色神经网络模型进行优化。

基于数据驱动的预测方法高度依赖提取的负荷特征和模型参数。建议一方面在数据预处理的基础上,将传统的遗传算法、神经网络等算法与回归分析、聚类分析等方法进行结合,实现复杂参数的特征提取。另一方面,将传统的遗传算法、神经网络等算法与粒子群算法、强化学习算法等新兴人工智能算法相结合,进行模型结构及参数的优化,克服求解复杂问题时单一算法表现出的精度不高、易陷入局部最优等一系列不足,提高算法全局搜索效率。

2 空调负荷聚合

负荷聚合是将多个具有相似特点的负荷用户看作一个整体,组成负荷群,便于大规模负荷的统一调控。目前空调负荷聚合响应建模方法主要包括基于物理原理的数值解析法、基于历史数据的回归建模法和基于数学模型的仿真模拟法。

2.1 基于物理原理的数值解析法

该方法基于能量守恒定理,根据负荷运行中的热量变化和电功率变化分析空调负荷群的运行特性。比较典型的做法有基于仿真分析工具建立聚合模型和基于福克普朗克定理的聚合方法^[9-10]。文献[9]基于仿真工具分析空调负荷群的运行特性,通过实测参数校正物理模型参数提高仿真模型精度。基于仿真分析工具建立聚合模型的方法无法适用于负荷群较多的场景下,负荷群较多时会出现计算量过大的问题。文献[10]提出了一种温控负荷群Fokker-Planck方程聚合模型,通过调整设定温度、改变功率需求,实现将负荷聚合模型有效应用于电力系统频率控制中。Fokker-Planck方程可以描述随机分布的空调负荷的功率特性,但基于福克普朗克定理的聚合方法在求解两阶及以上的偏微分方程时难度较大、精度较低,无法适用于大规模空调负荷聚合的场景。此外,对空调运行过程的离散化处理可能会导致信息丢失。

2.2 基于历史数据的回归建模法

该方法是在对用户用电特性分析和需求响应历史情况分析的基础上,建立回归模型预测负荷群的响应控制能力。文献[11]首先通过建筑能源管理平台 and 传感器获得大量建筑设备运行数据,建立并验证能耗模型,再利用预测的建筑未来负荷更新设备能耗模型。这种方式不需要建立设备的仿真模型,模型的生成依赖历史数据,当历史数据有限时此模型精度较低。

2.3 基于数学模型的仿真模拟法

该方法使用数学模型描述负荷群的负荷特性及相关响应控制行为。常用的仿真模拟法有k-means算法^[12]、蒙特卡洛仿真模拟法^[13]、马尔可夫链^[14]。文献[12]以空调热参数相近为原则,以可关断时间为分组指标,建立了基于k-means算法的空调负荷聚合方法。文献[28]考虑了空调、电热水器的时域特性建立负荷聚合可调功率模型;文献[2]提出基于半马尔可夫过程的空调负荷聚合方法,聚合大规模空调负荷实现虚拟调峰。不同聚合方法

表2 人工智能负荷预测方法对比分析
Table 2 Comparative analysis of artificial intelligence load forecasting methods

类型	算法	方法优势	方法不足
回归分析	多元线性回归 MLR ^[15]	模型直观容易理解,计算过程简单。	无法处理非线性问题,对异常值敏感;是否可用于短期预测有待研究。
支持向量机 SVM	支持向量机 SVM ^[17]	相同问题复杂度下,所需样本数量相对较少,对异常值不敏感;擅长处理样本数据线性不可分的情况。	模型对参数与核函数选择敏感,参数与核函数的建立依赖数据特性和研究人员经验。
决策树	极端梯度提升(XGBoost) ^[18]	在处理大规模数据集和复杂模型时更高效,同时在防止过拟合和提高泛化能力方面表现出色;长期预测表现较好。	模型的超参数需要模型设计者确定,超参数的选择对模型的性能和泛化能力有着重要的影响。
机器学习	长短时记忆网络 LSTM ^[21]	在处理时序问题上具有优势;短期预测表现较好。	计算复杂度较高;需要大量数据训练深层 LSTM 网络。
	极限学习机 ELM ^[16]	训练速度快,复杂度低,泛化性能好。	随机分配的值矩阵和偏差会影响预测精度的高低,同时会影响模型的泛化能力和稳定性。
	BP 神经网络 ^[19]	可解决非线性问题,具有良好的自学习能力及泛化能力。	对初始值敏感,易导致每次训练结果可能相差较大;模型中建立函数与节点选择依赖人员经验。
	灰色神经网络 GNN ^[20]	所需数据量少。	易陷入局部最优,每次预测结果差异较大。
深度强化学习	深度确定性策略梯度 (DDPG) ^[22]	擅长处理决策问题。	存在过估计现象,与真实值误差交大。
混合算法	基于粒子群-遗传算法的混合优化算法 ^[23]	增强搜索能力,提高收敛速度。	计算较为复杂。
	基于注意力机制的 LSTM 混合优化算法 ^[24]	实现各输入特征对空调负荷影响程度不稳定性的定量分析,降低预测误差。	找到最优参数组合需要大量实验或经验,对输入数据质量或预处理非常敏感。

的对比分析如表 3 所示。

目前,国内外对负荷聚合控制技术已有初步研究,在电网调峰、调频、调压等应用场景中起到了有效缓解电网压力的作用。但是,当前的负荷聚合模型较为粗糙,无法满足实际需求响应的需要,暂未充分气候环境因素、设备使用情况、用户响应行为等不确定性因素的影响。未来需进一步考虑不确定性因素的影响、考虑不同时间尺度、聚合过程变化、负荷聚合规模、负荷聚合难度等因素,建立精细化模型。

2.4 聚类原则

不同空调负荷群的运行状态不同,负荷调控潜力不同,因此可将大量的空调负荷划分为多组负荷群。按照不同的聚类原则将特征相近的用户分为同一类别,统一进行管理调控。常见的聚类原则有制冷量、

表3 不同聚合方法对比分析
Table 3 Comparative analysis of different aggregation methods

聚合方法	适用场景	方法特点	方法优势	方法不足
k-means 聚类 ^[12]	用电行为分析、可调潜力量化评估模型	通过迭代寻优找到聚类中心,直至达到收敛状态。	原理简单、容易实现、运行效率高;适用于大规模数据集,计算速度较快。	受初始值的影响大,聚类结果对噪声点敏感。
蒙特卡洛模拟 ^[13]	功率平衡、有功备用等	根据所需参数的概率分布构造一个实际问题的概率模型,主要应用于负荷物理模型参数的抽样。	适用于负荷数量多的场景下,负荷越多,聚合模型越准确;对具有相似参数特性的空调负荷可以建立更为准确的聚合模型。	只能得到聚合负荷的温度、工作状态的概率分布,无法获得聚合负荷参与系统运行可提供的总调节潜力;对于异质特性明显的空调负荷参数,聚合模型精度较低;聚合模型不能准确描述空调负荷的动态过程。
马尔可夫链 ^[14]	负荷跟踪	根据当前信息预测未来的发展过程。	计算精度高;适用于描述负荷动态变化的过程,能够准确预测负荷聚合模型的状态。	随着状态的增加计算可能不收敛;仅适用于具有相同参数、相同类型的空调负荷;仅能描述负荷当前工作状态对下一时刻的工作状态的影响。

用户响应意愿、温升/温降速率、室温、可关断时间等。文献[5]依据额定制冷量和用户响应意愿等级进行分组,再根据特征参数 R_c 和 Q_{AC}/C 进行组内聚类。文献[12]根据不同的室温范围进行空调群分类,在空调群中根据可关断时间大小差异进行分组。现有的聚合模型大多是基于常见聚类原则的单次聚合或两次聚合,随空调负荷数量的增加,空调负荷特性差异性增大,聚合准确度有限。建议采用多级聚合模型,对空调负荷群进行分类、分层、分级聚合。

不同的应用场景下,用户的响应意愿不同,负荷的可调节比例不同。首先根据典型应用场景,将用户分为5大类型:商业用户(包括商超、综合体)、酒店用户、写字楼用户、政府机关及企事业单位用户、其他用户(包括医院、冷链物流用户、其他用户等)。结合空调负荷摸排现场工作,统计发现商业用户可调比例较高、响应意愿较强,建议优先调控;其次是政府机关及企事业单位用户,然后是写字楼用户,再次是酒店用户,最后是其用户。其他用户多是对环境有恒温恒湿要求,不易纳入调控范围。再根据空调的设定温度划分优先级。以夏季温度设定为例,优先调控设置温度低于26℃的用户,每1℃设置一个等级。最后根据空调负荷温度变化速率快慢进行分组,优先调控相同负荷下温度变化小的用户,减小对用户舒适度的影响。根据ETP模型可知,空调温度的变化速率与建筑物的等效热阻、等效热容和空调制冷量有关。

3 空调负荷调控

3.1 调控模型

目前关于空调优化调控的研究主要集中在调压调频、降低负荷侧峰谷差、柔性负荷的协同优化等方面,且主要以经济性指标和用户体验类指标为目标函数。

经济性指标主要包括空调负荷响应补偿成本、负荷聚合商经济效益、用户经济收益等指标。经济性指标与参与响应的用户数、用户的负荷响应量、电价、响应时长等因素有关。文献[3]量化分析了负荷聚合商参与调峰服务市场时,申报单价、被聚合用户的报价、用户数量、调节时段数与竞价成功的可能性等因素对负荷聚合商收益的影响。文献[29]以负荷聚合商经济效益最大化为目标,提出了一种考虑激励补偿措施的变频空调机组综合调度优化策略,并对温升补偿因子进行了灵敏度分析。

用户体验类指标包括用户舒适度、用户满意度

等指标。用户舒适度主要描述用户对室温的满意程度,此参数受空调设定温度、期望温度、外界温度变化等参数的影响。用户满意度受用户舒适度、电费、室内温度、外界环境温度、调控时长等因素的影响。文献[30]将热舒适性作为惩罚因子,对冷水机组最优负荷模型进行修正,并采用粒子群算法对冷水机组及空调末端能耗进行求解。

现有研究中,调控过程对经济性和用户体验关注较多,对能效提升、碳排放水平等因素的关注较少。需要注意的是,空调负荷的调控应在保障供电稳定性、设备安全性的基础上,综合考虑用户意愿及经济性、能效、碳排放等因素。在提升调控的经济性水平的同时,建议可能提高调控的质量,优先选择能效较低、碳排放水平较高的用户参与调控,主动削减负荷,促进空调负荷调控的高质量发展。此外,未来还应考虑建立不同时间尺度下空调负荷调控响应评估模型,动态跟进响应过程,及时调整响应偏差。

3.2 调控策略

现有空调负荷参与优化调控策略方面,大多是单独针对用户或电网企业或考虑用户-负荷聚合商、用户-电网企业、负荷聚合商-电网企业的双层优化,对于同时考虑多市场主体的负荷聚合响应调控策略研究相对较少。文献[6]提出考虑空调负荷聚合响应潜力多类型资源协同调度和精准控制相结合的双层调控框架,调控过程中对空调集群进行分组控制,从而削弱空调群组功率跌落的影响。文献[3]构建了以负荷聚合商为纽带的柔性负荷聚合3层调控架构,并对日前电力调峰辅助服务市场前景下的效果进行了验证。当前基于多市场主体的空调优化调控研究多集中在日前、日内调峰辅助服务市场的场景下,对于快速调峰、实时调控的理解研究不足。在快速调峰、实时调控中,需充分考虑用户响应退出行为导致的负荷波动,提出满足快上快下需求的空调负荷分层分区调控策略,并建立负荷调度策略,以尽可能减小负荷削减的影响。

4 未来展望

目前,国内外学者对空调负荷预测、聚合、调控技术进行了大量研究,但仍有一些方向值得关注:

(1) 建立多类型、多场景下的空调负荷预测模型。目前的研究大多集中在定频空调和变频空调,对中央空调、VRV空调的研究较少,围绕居民、商业、酒店、政府机关等典型场景、典型工况进行研究,建立涵盖多类型、多场景下的空调负荷预测模型,深入挖掘空调节能潜力。

(2) 研究混合优化算法,提高空调负荷预测精度。将传统的遗传算法、神经网络等算法与回归分析、聚类分析等方法进行结合进行复杂参数的特征提取。将传统的遗传算法、神经网络等算法与粒子群算法、强化学习算法等新兴人工智能算法相结合进行模型结构及参数的优化,实现动态寻优。

(3) 建立精细化空调负荷聚合模型。现有研究暂未考虑气候环境因素、设备使用情况、用户响应行为等不确定性因素的影响。未来需进一步考虑不确定性因素的影响、考虑不同时间尺度、考虑聚合过程变化、考虑负荷聚合规模、考虑负荷聚合难度等情况,建立精细化空调负荷聚合模型,为精准调控奠定基础。

(4) 建立不同时间尺度下空调负荷调控响应评估模型,从供电稳定性、设备安全性、通信稳定性、响应经济性、用户意愿、能效水平、碳排放水平等多角度对调控效果进行动态跟踪,构建空调调控实施的分层分级评价体系。

(5) 考虑用户、负荷聚合商、电网企业多市场主体的负荷聚合响应调控策略执行离不开市场化交易机制和运营机制。市场准入、结算机制、价格机制、运营方式尚不成熟,难以充分激励空调负荷参与电网互动。

(6) 实现空调负荷聚合调控的高效运行。除了前文的模型算法,海量数据的采集、数据核查、并行计算、安全监测与防护、通信架构设计、系统贯通等都需要进一步的开展深入研究。

5 结束语

在迎峰度夏(度冬)最大用电负荷时刻,空调负荷占比较高,且与电网峰值高度重合,挖掘空调负荷资源灵活调节能力对全力保障民生具有重要意义。未来我们需进一步关注不确定性因素对空调预测、聚合、调控模型的影响,建立涵盖多时间尺度、多应用场景、多类型的空调精细化模型,完善调控效果评估体系,实现动态优化。数据处理、通信架构设计、计算能力、安全防护、市场机制等方面仍需进一步深入研究,进而才能更好地推动空调负荷参与需求响应的落地实践。

参考文献:

- [1] 辛保安,单葆国,李琼慧,等. “双碳”目标下“能源三要素”再思考[J]. 中国电机工程学报,2022,42(9):3 117-3 126.
XIN Baoan, SHAN Baoguo, LI Qionghui, et al. Re-thinking of the “Three Elements of Energy” toward carbon peak and carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9):3 117-3 126.
- [2] 王永权,张沛超,姚焱. 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. Cyber-physical modeling and control method for aggregating large-scale ACLs[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22):6 509-6 521.
- [3] 张华鲁. 面向电力调峰的柔性负荷群调节能力表征及响应策略研究[D]. 吉林:东北电力大学,2022.
ZHANG Hualu. Research on adjustable capability characterization and response strategy of flexible load groups for power peak [D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2022.
- [4] 杨济如,石坤,崔秀清,等. 需求响应下的变频空调群组削峰方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(24):44-52.
YANG Jiru, SHI Kun, CUI Xiuqing, et al. Peak load reduction method of inverter air-conditioning group under demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24):44-52.
- [5] 张瑞雯. 考虑用户响应的空调负荷聚合方法及其优化控制策略研究[D]. 天津:天津大学,2020.
ZHANG Ruiwen. Thermostatically controlled load aggregation method and its optimal control strategy considering user response [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [6] 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.
- [7] 胡江溢,郑涛,金玉龙,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. An aggregation strategy of air conditioning loads considering uncertainty of customer behavior and frequency regulation demand [J]. Power System Technology, 2022, 46(9):3 534-3 542.
- [8] HUI H, DING Y, CHEN T, et al. Dynamic and stability analysis of the power system with the control loop of inverter air conditioners [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(3):2 725-2 736.
- [9] CHENG D, ZHANG W, LIU Y. Aggregate modeling and analysis of air conditioning load using coupled Fokker-Planck equations [J]. Journal of Modern Power Systems

- and Clean Energy, 2018, 6:1 277-1 290.
- [10] 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 thermo-statically controlled load group's Fokker-Planck equation aggregation model[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23):17-23.
- [11] LI C, LYU Z, GENG Y, et al. A data-driven method for the optimal control of centralized cooling station in an office park[J]. Architectural Intelligence, 2023, 2(1):1-12.
- [12] 李培培,蔺红.考虑用电满意度和经济性的空调负荷集群建模及控制策略[J].现代电子技术,2023,46(1):162-168.
LI Peipei, LIN Hong. Air conditioner load cluster modeling and control strategy considering electricity consumption satisfaction and economy [J]. Modern Electronics Technique, 2023, 46(1):162-168.
- [13] ZHOU X, SHI J, TANG Y, et al. Aggregate control strategy for thermostatically controlled loads with demand response[J]. Energies, 2019, 12(4):683.
- [14] RADAIDEH A, VAIDYA U, AJJARAPU V. Sequential set-point control for heterogeneous thermostatically controlled loads through an extended Markov chain abstraction [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 10(1):116-127.
- [15] EDWARDS R E, NEW J, PARKER L E. Predicting future hourly residential electrical consumption: a machine learning case study [J]. Energy and Buildings, 2012, 49:591-603.
- [16] ZHAO J, SHAN Y. A fuzzy control strategy using the load forecast for air conditioning system [J]. Energies 2020, 13:530.
- [17] SHAO M, WANG X, BU Z, et al. Prediction of energy consumption in hotel buildings via support vector machines [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 57:102 128.
- [18] SHAO M, WANG X, BU Z, et al. Prediction of energy consumption in hotel buildings via support vector machines [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 57:102 128.
- [19] PAN L, WANG S, WANG J, et al. Research on central air conditioning systems and an intelligent prediction model of building energy load [J]. Energies, 2022, 15(24):9 295.
- [20] 刘新宇,赵安军,程仁印,等.基于改进灰色神经网络的商场冷负荷预测模型研究[J].工业控制计算机,2021,34(8):63-66.
LIU Xinyu, ZHAO Anjun, CHEN Renyin, et al. Research on cold load forecasting model of shopping malls based on improved grey neural network [J]. Industrial Control Computer, 2021, 34(8):63-66.
- [21] 孙春艳.基于改进长短期记忆网络的空调负荷预测方法[J].制冷与空调(四川),2022,36(6):870-875.
SUN Chunyan. Air-conditioning load forecasting method based on improved long and short-term memory network[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2022, 36(6):870-875.
- [22] 贾静,高文忠.基于改进DDPG的中央空调负荷预测方法研究[J].电子测量技术,2022,45(3):85-91.
JIA Jing, GAO Wenzhong. Research on load forecasting of central air-conditioning system based on improved deep deterministic policy gradient [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(3):85-91.
- [23] 张晨晨.混合优化的长短期记忆神经网络短期空调冷负荷预测及其应用研究[D].青岛:青岛大学,2022.
ZHANG Chenchen. Short term air conditioning cooling load prediction and its application based on hybrid optimization of long short-term memory [D]. Qingdao:Qingdao University, 2022.
- [24] 赵安军,杨航杰,荆竞,等.面向功能分区的大型商场建筑冷负荷预测方法[J].重庆大学学报,2023,46(6):61-75.
ZHAO Anjun, YANG Hangjie, JING Jing, et al. A cold load prediction method of shopping malls oriented to functional zoning [J]. Journal of Chongqing University, 2023, 46(6):61-75.
- [25] HE N, LIU L, QIAN C, et al. A closed-loop data-fusion framework for air conditioning load prediction based on LBF[J]. Energy Reports, 2022, 8:7 724-7 734.
- [26] ZHANG G, TIAN C, LI C, et al. Accurate forecasting of building energy consumption via a novel ensembled deep learning method considering the cyclic feature [J]. Energy, 2020, 201:117 531.
- [27] 胡晓青.空调负荷参与电力系统需求响应的建模及控制策略研究[D].南京:东南大学,2017.
HU Xiaoqing. Research on modeling and control strategy for air conditioning loads to participate in demand response in power system [D]. Nanjing:Southeast University, 2017.
- [28] 孙玲玲,高赐威,谈健,等.负荷聚合技术及其应用[J].电力系统自动化,2017,41(6):159-167.
SUN Lingling, GAO Ciwei, TAN Jian, et al. Load aggregation technology and its applications [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6):159-167.
- [29] LI Q, ZHAO Y, YANG Y, et al. Demand-response-oriented load aggregation scheduling optimization strategy for inverter air conditioner[J]. Energies, 2022, 16(1):337.
- [30] LI W, GONG G, REN Z, et al. A method for energy consumption optimization of air conditioning systems based on load prediction and energy flexibility [J]. Energies, 2022, 243:123 111.