

# 异构温控负荷群模型优化及 联合调控策略

许 鹏<sup>1,2</sup>, 孙 毅<sup>1</sup>, 谢祥颖<sup>3</sup>, 卢毓东<sup>4</sup>, 李 彬<sup>1</sup>, 祁 兵<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 国网成都供电公司, 四川 成都 610041;  
3. 国网电子商务有限公司, 北京 100053; 4. 浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:**针对需求侧负荷资源调控中存在的异构特性影响问题,提出一种基于泛化指标的异构温控负荷群联合调控策略。该策略首先通过考虑偏差修正及行为分析,在温控负荷等效热电模型基础上进一步提升其精细化程度及适用性;然后综合考虑可调控能量空间及可转移时间,建立泛化评价指标,实现对异构温控负荷态势的标准化评估分析,进而指导异构负荷群组合优化调控;最后通过实验仿真验证所述方法能够良好适用于异构温控负荷调控需求,并保证异构负荷协同下的调控精度,同时亦提升温度分布合理性。

**关键词:**需求侧管理;异构温控负荷;泛化指标;联合调控

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.05.015 中图分类号:TM73 文章编号:1673-9140(2021)05-0120-09

## Model optimization and joint control strategy for heterogeneous thermostatically controlled loads

XU Peng<sup>1,2</sup>, SUN Yi<sup>1</sup>, XIE Xiangying<sup>3</sup>, LU Yudong<sup>4</sup>, LI Bin<sup>1</sup>, QI Bing<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, China; 3. State Grid Electronic Commerce Co., Ltd., Beijing 100053, China;  
4. Electric Power Research Institute, Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Considering the influence of heterogeneous characteristics on the demand side load resource regulation, a joint control strategy based on generalization index is proposed for heterogeneous thermostatically controlled loads (TCLs). The error correction and the behavior analysis is taken into account firstly, and the degree of refinement and applicability of the equivalent thermoelectric model for TCLs is further improved. Consequently, a generalization index is proposed with the consideration of the controllable energy space and the transferable time, which realizes the standard evaluation of the operating state of heterogeneous TCLs, and can be further utilized to guide the combinatorial optimization of heterogeneous load groups. Finally, the experimental simulation indicates that the proposed method can perfectly match the demand for the control of heterogeneous TCLs, and can maintain the control accuracy and improve the temperature distribution at the same time.

**Key words:** demand side management; heterogeneous TCLs; generalization index; joint control strategy

收稿日期:2019-03-01;修回日期:2019-05-27

基金项目:国家自然科学基金(51777068);国家电网公司科技项目(52110418001C)

通信作者:孙 毅(1972-),男,博士,教授,主要从事电力系统通信与信息处理、智能用电与需求响应研究;E-mail:sy@ncepu.edu.cn

随着能源互联网技术的迅速发展,电力系统的调度运行呈现出更加智能化和多元化的技术需求。在可再生能源大量接入、电力市场化机制日趋完善、终端设备智能化水平逐步提升等多方面发展的趋势下,使得需求侧负荷资源的重要性得到越来越广泛的重视,负荷资源的灵活调度已成为应对可再生能源接入波动性、削峰填谷、电力辅助服务等需求的有效手段<sup>[1]</sup>。

目前对于负荷资源的调用方面,在价格或激励的引导下,响应行为从控制形式的差异性可以分为自主执行<sup>[2]</sup>、约定执行<sup>[3]</sup>和直接控制<sup>[4]</sup>。对于前2种形式下,是以用户级层面进行参与,由用户根据收益参考或合约内容进行操作和实现。其中,自动式的响应则是预设了动作行为库,取代了用户执行过程,本质上依然是用户选择的约定执行行为,因此其负荷异构性的影响相对较小。对于直接负荷控制而言,由于大量的负荷分布零散,且通常是由负荷聚合商与用户协定后,获得负荷群控制权限,从而通过信息物理融合系统直接执行控制操作。在此过程中,聚合商需基于负荷状态,对负荷对象的综合可调节能力进行评估,确定负荷对象调节的优先级,即文献<sup>[5]</sup>中所述的负荷态势。目前的相关工作中,负荷集群控制的研究对象中一个重要部分即为空调<sup>[6]</sup>、热水器<sup>[7]</sup>、电热泵<sup>[8]</sup>等典型温控负荷,其具体控制实现的研究则在模型建立<sup>[9]</sup>、控制逻辑<sup>[10]</sup>及优化策略<sup>[11]</sup>等方面各有侧重。

然而,实际的调控过程中负荷间通常存在着不同程度的异构特性,一方面负荷类型通常呈现多样化的构成特性,而不同负荷间存在显著的特性差异,在考虑多类负荷联合调控的过程中,其异构特性直接影响了评估公平性的问题;另一方面,即使同类负荷,由于其参数的差异性,也可能导致评估结果不合理,影响最终调控实现。因此,对于参数甚至类别异构的调控对象群,如何确定其负荷态势,进而实现去异质化的优化调控,成为亟待解决的问题。文献<sup>[12]</sup>基于耦合 Fokker-Planck 方程(CFPEs)建立了温控负荷群的聚合模型,并提出采用数值拉普拉斯反变换方法实现求解,取得了良好的调控效果,但是

其应用场景受到温度梯度函数为常量的假定条件约束,即需要保证温控负荷特性参数的同构性;其异构性问题在 CFPEs 的溯源文献<sup>[13]</sup>中也有所讨论,当负荷群为非同构群体时,负荷群开启负荷的比例函数更加复杂,且可能存在不理想的近似情况,则需要进一步分组讨论,因而 CFPEs 在异构负荷群调控中的复杂度和适用性有待讨论。

总体而言,针对异构负荷分析及调控实现的研究目前开展还相对较为有限,文献<sup>[14]</sup>基于二阶模型,采用集中式的模型预测控制方法,实现了异构温控负荷的集群控制,然而其控制输入仅考虑开关状态,而未考虑用户温度的舒适性;文献<sup>[15-16]</sup>基于双线性方程等方法对异构温控负荷聚合模型的建立开展了研究,其控制实现则主要依据温度或功率的单输入实现;文献<sup>[17]</sup>针对参数异构的制冷负荷,对同构对象进行聚类,分别计算温度设定点的方式,考虑多输入的情况下实现了负荷追踪,但聚类方式的应用场景受限,且实际应用中聚类边界如何获悉亦是需要考虑的问题。

鉴于此,该文针对异构温控负荷群在电力供需互动过程中的协同架构进行分析探讨,并提出了基于泛化指标的异构温控负荷群联合调控策略,实现了在综合考虑温度、任务量、使用时间等需求下的异构负荷群协同调控。

## 1 总体架构描述

随着需求侧负荷资源的智能化水平提升,且电力系统调控需求和市场化激励机制更加多元,以负荷聚合商及综合能源服务平台为主体的负荷集群管理形式已经广泛开展,典型的负荷聚合总体控制架构如图1所示。根据交互方式的差异性,可以将调控架构分为如下2类。

1) 独立式。通过不同的聚合商管控实现对于需求侧大量异构负荷对象的处理,即在不同的聚合商平台上分别进行单一类别对象的分析管理。该方式下,异构负荷通过分群的方式进行独立管控,便于实现,也符合目前各设备信息数据库的垂直交互架构。

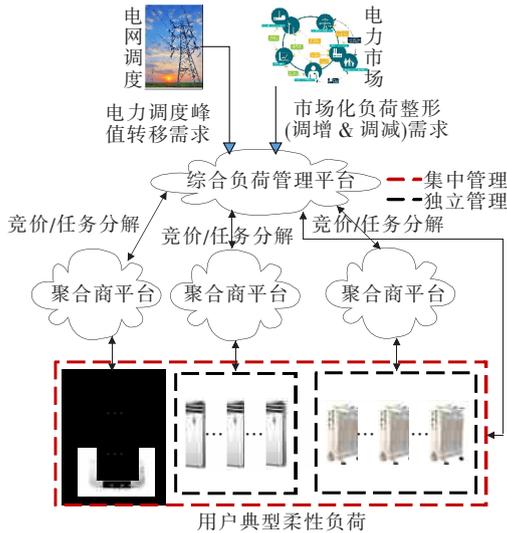


图1 异构负荷调控总体实现架构

Figure 1 Overall architecture of heterogeneous TCLs

2)集中式。基于统一综合负荷管理平台实现对于多种负荷交叉协同的决策和调控,其特征在于各类负荷可以在具有横向之间的可比性。在优化组合过程中,是作为统一的资源池来进行统筹,而不是按照同构负荷类别划分资源池,然后通过任务分解,在同类负荷之间进行优化选择。

目前基于独立式架构的相关研究工作开展的已经较为成熟;而对于集中式架构下的控制模式则相对较少,主要是由于异构负荷间缺乏横向对比的量化评价,目前面临同平台下大量异构负荷的主要处理方式是将其按照同类负荷分群控制,本质上是将其问题等效为了独立式控制决策问题。而随着需求侧资源的交叉融合,集中式架构下的灵活性和丰富性需要挖掘,如文献[18]中提出了以互联网思维,通过跨界经营和逆向长尾效应对负荷资源进行更加灵活综合的利用,在此能源管理更加综合多元的发展趋势下,实现异构负荷的模型统一、泛化评估、策略优化是亟待解决的问题之一。

因此,该文主要针对在集中式调控架构下的异构负荷调控需求,提出一种基于泛化指标的异构温控负荷群联合调控策略,旨在解决异构负荷交叉融合下的统筹处理方式,避免目前较为常规轮询机制中频繁的交互、判定、调控过程,而通过对负荷泛化指标的综合排序,进行批量化的指令下发,缩减计算

量和交互开销,提升调控效率;而其中泛化指标的获取可以充分利用终端的边缘计算能力,在用户侧完成,将结果上发到上级平台即可。

## 2 建立异构温控负荷等效模型

负荷模型是负荷状态评估及策略制定的理论基础,该文基于文献[19]中所提出的温控负荷热力学等效模型进行改进,其原始模型为

$$T(t+1) = T(t) \cdot (1 - \lambda) + \lambda \cdot (T_o(t) + s(t) \cdot PR) \quad (1)$$

$$\lambda = 1 - e^{-\Delta t / RC} \quad (2)$$

式(1)、(2)中  $T(t)$  为  $t$  时刻的负荷温度;  $\lambda$  为等效系数;  $P$  为功率(对于制冷型负荷其值取负);  $R$  为等效热阻;  $C$  为等效热容;  $T_o(t)$  为环境温度;  $s(t)$  为开关状态;  $\Delta t$  为时间间隔。

在此基础上,考虑到温控负荷对象实际运行过程中存在的若干特殊情况,引入如下2项修正项。

1)流态改变的附加项<sup>[20]</sup>。除常规的负荷状态变化外,对于部分负荷可能会存在其基本模型变化之外的行为影响,该文引入附加项  $k \times t_u$  以对这一现象进行描述。即该项主要体现为外部机制导致的负荷模型基础上的附加变化,典型如热水器用水行为,以及蓄能式温控负荷(蓄冰空调、蓄热式电采暖等)的储释能行为等。对于用水行为,系数  $k$  表征了用户用水能量损耗系数,  $t_u$  为用水时长,其证明过程可参考文献[21];而对于蓄能式负荷,  $k$  则表征了其储(释)能效率,其具体取值取决于负荷本身特性,  $t_u$  则为对应的储(释)能时长,显然其对于负荷状态变化影响也呈现出线性的比例关系。对于无流态改变的常态负荷对象,其行为主要体现为设备的直接开断或温度设定行为,不影响模型本身的属性参数,可直接通过  $s(t)$  体现,与附加项无关,此时  $k$  值可直接取 0,即可等效为式(1)、(2)的通用模型。

2)临界温度状态修正系数。温控负荷的控制原理通常为基于模型判定的开关控制,而且开关优先级则受到多方面的因素影响,但当负荷温度处于临

界状态时,会出现由于温度空间不足而导致实际加热时长不足一个调控间隔的现象,进而造成对于实际消纳量误判问题。文献[21]分析了其发生原理,并在调控中进行了校正,该文则在模型内引入等效系数进行修正,实现模型级的优化,即

$$\begin{cases} \theta = \frac{T_{\text{set}} - T(t)}{T_{\text{ex}} - T(t)}, T_{\text{ex}} \cdot P > T_{\text{set}} \cdot P \\ \theta = 1, T_{\text{ex}} \cdot P \leq T_{\text{set}} \cdot P \end{cases} \quad (3)$$

式中  $T_{\text{set}}$  为用户设定温度上限;  $T_{\text{ex}}$  为基于式(1)、(2)计算所得的预期温度。综合上述过程,该文最终异构温控负荷热电等效模型为

$$T(t+1) = T(t) \cdot (1 - \lambda) + \lambda \cdot (T_o(t) + s(t) \cdot \theta PR) - t_u \cdot k \quad (4)$$

### 3 基于泛化指标的异构负荷群调控策略

#### 3.1 泛化指标定义

负荷群参与调控过程中,其调控优先级指标十分多样化,可以从温度、舒适度、经济性、可靠性等多个方面进行分析,但溯源其表达的根本内容,可以归结为可调节量和可调节时间,文献[22]中将这一概念描述为需求块(demand block, DB)。该文亦由此入手,对异构负荷调控的泛化评估指标进行定义。

##### 1) 可调能量空间。

根据式(4)进行推导,可得温控负荷群对象的完全可消纳能量由3部分构成,即

$$E = \frac{1}{\lambda R} (E_1 + E_2 + E_3) \quad (5)$$

$$E_1 = T_{\text{set}} - T(t) \quad (6)$$

$$E_2 = \lambda \sum_t (T(t) - T_o) \quad (7)$$

$$E_3 = t_u \cdot k \quad (8)$$

式中  $E_1$  为负荷群从当前温度加热到设定温度可消纳的能量;  $E_2$  为调控时间内环境热损耗等效的可消纳能量空间;  $E_3$  为外在因素导致流态变化(用水、储能等行为)造成的能量损失等效的可消纳能量

空间。

同理,可调减量为上式取负,因而取绝对值为可调量,而调增调减类型分别分群。

2) 连续可控时间。负荷的连续可控时间一方面取决于用户预计要使用的时间,其值依据用户历史使用行为的回归预测结果或用户自主设定的使用时间  $t_f$  进行计算;另一方面则取决于负荷本身可用能量空间转化时长。综合二者进行分析,取其较小值作为连续可控时间依据,即

$$t_s = \min\{t_f - t, E/(P - P_o)\} \quad (9)$$

式中  $P_o$  为外部环境影响导致的热损失等效功率。

3) 综合泛化指标。根据用户需求和调控需求,考虑泛化指标的定义原则,从可调控量的角度而言,为了以尽可能少的负荷参与下实现调控,那么可调控量越大,则越优先;同时,可调控量越大,代表距离目标温度的差异越大,舒适性就越差,因而从用户角度而言,也应该优先保障此类对象的用能需求。从可控时间而言,连续可控时间直接影响了剩余可转移时间,剩余可转移时间越长,那么代表距离用电需求时间的紧迫性越低,则可以暂缓用能,因而其值与优先级呈反增长特性。

值得注意的是,可调能量空间的构成中,  $E_1$  和  $E_3$  是受时间约束较弱,可以等效视为在不会使温度超出设定范围的情况下提前储能;但  $E_2$  的散热等效能量是直接受到时间约束的,且不同负荷的散热速率特性相差非常大,在  $E_1$  的基础上考虑长周期的  $E_2$  影响的话,可能会导致温度远超合理区间,且如果时间提前量太大,也很容易造成散热损耗太大的负面现象。典型如空调或电热泵类负荷,其散热速率很快,因此在预计使用时段前后的可平移时间十分受限,而若对于不同负荷单独制定限定性条件,对于云端决策而言,泛化模型的优势便大大弱化,且在无法直接获知设备类别的情况下,单独的限定性明确更是十分困难。鉴于此,考虑负荷个体的特性差异,将热交换速率以反比关系引入优先级指标,从而避免大量的用能浪费或温度越界问题。

综上,将指标定义为  $\phi = E/(\lambda \times t_s)$  以综合表达

负荷调控优先级指标。

### 3.2 调控实现

在泛化指标基础上,负荷群调控的优化目标及约束条件为

$$\begin{cases} \max \sum_i \psi_i(t) \cdot s_i(t) \\ \text{s. t. } |P_{\text{tgt}}(t) - \sum P_i(t)| \leq P_e \\ |T_i(t_u) - T_{\text{comf}}| < \delta_i \end{cases} \quad (10)$$

式中  $P_{\text{tgt}}(t)$  为  $t$  时刻的目标功率;  $P_i$  为第  $i$  个负荷  $t$  时刻实际调控后功率;  $P_e$  为可接受调控偏功率,其值根据负荷数量及负荷最大功率决定;  $T$  为温控负荷温度;  $T_{\text{comf}}$  为舒适温度;  $\delta$  为负荷温度允许的调控死区范围;  $T_i(t_u)$  为负荷  $i$  在用能时段的温度。

总体的调控策略以最大化消纳任务曲线为目标,即调控后曲线与任务的偏差量最小,此外,负荷温度区间存在模型隐性约束,即不同负荷对象其本身的模型参数限定在其舒适温度分布的临近区间内,亦是对于用户温度需求的保障;就泛化指标而言,由于其表征了负荷对于能量需求的大小,其值越大,距离目标需求越远,因此在满足总体目标和约束的前提下,求取其最小值的优化方向,尽可能使负荷总体的需求贴近目标。

基于上述限定条件,负荷群调控决策问题可以等效为一个组合最优化的线性规划求解问题,即求取满足目标和约束条件下最优化的调控对象,该文中针对这一问题,根据所提出的泛化指标,基于贪婪算法实现求解,具体原理及过程可参见文献[23]。

综上,该文算法的调控实现流程如图2所示。首先建立负荷对象的基本模型,并通过历史数据计算其基本模型参数,在此基础上,结合实际采集的负荷状态数据进行动态的泛化指标计算评估;当具有调控需求时,根据获知的任务曲线,进行差量计算,将调控问题转化为组合优化的线性规划问题,并进行求解;以求解结果作为指导,进行负荷的调控动作执行,从而反馈式地影响了负荷状态和差量需求,实现动态平衡,直至调控任务结束。

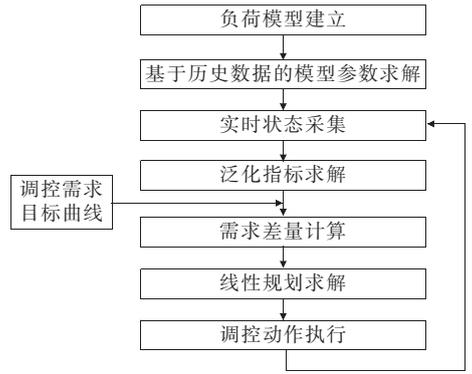


图2 基于泛化指标的异构负荷调控实现流程

Figure 2 The flowchart of heterogeneous TCLs regulation based on generalization index

## 4 实验仿真

为进一步验证该文方法的有效性,选取典型用户负荷及其用电场景,采集拟合热水器、空调、电热泵3种典型设备对象模型,以消纳可再生能源为例,根据某风电厂典型日出力曲线进行等比例调整,模拟面向可再生能源消纳的电力市场交易行为下,负荷群消纳的目标曲线。在此基础上进行调控效果分析,并基于文献[19]负荷模型和文献[24]分群区别优先控制的策略思路,构建了分群平均分配控制、有无模型优化(model optimization, MO)下基于泛化指标的控制(general index based control, GIBC)、有无MO下的轮询控制等对比场景,进行进一步地对比分析。

1) 负荷典型运行曲线模拟。热水器、空调、电热泵3类异构负荷的典型日运行曲线如图3~5所示。其热水器对象在早晚阶段会存在集中用水现象,导致连续开启时间增长;而空调和电热泵对象的开启时段则集中在午间和夜间时段,同时,相对而言,热水器对象的温度保持特性明显优于电热泵和空调,综合而言,仿真曲线能够较为良好地体现实际的负荷状态变化和负荷特性。

2) 调控效果。为进一步验证该文方法的调控效果,基于模拟的需求目标曲线,对负荷的调控执行结果进行仿真。取总负荷数为900,具体构成为3类负

荷分别以 300 为中心的高斯随机数量,其总体调控效果如图 6 所示,平均误差率统计结果如表 1 所示。

表 1 各调控策略匹配结果对比

Table 1 Comparison of the tracking results of different strategies

调控策略	平均误差率
平均分配	14.0
GIBC Without MO	4.5
有 MO 轮询控制	1.0
无 MO 轮询控制	59.0
MO-GIBC(该文算法)	2.5

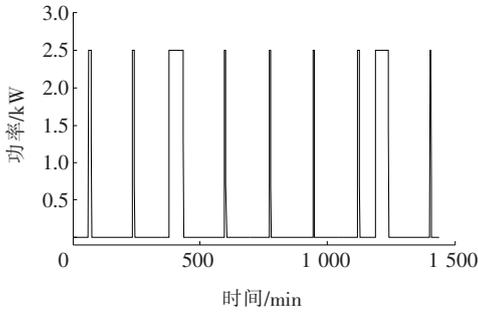


图 3 热水器典型日运行曲线

Figure 3 Typical daily operation curve of water heater

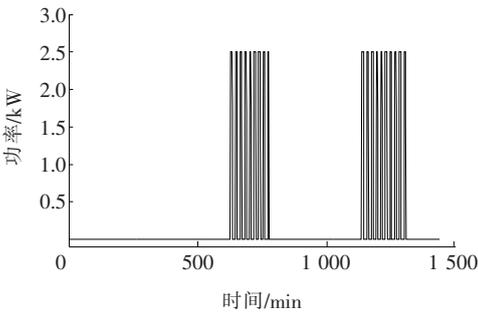


图 4 空调典型日运行曲线

Figure 4 Typical daily operation curve of air conditioner

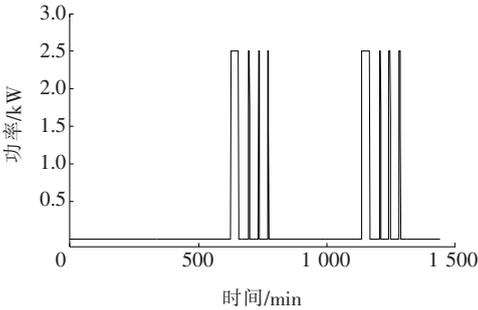


图 5 电热泵典型日运行曲线

Figure 5 Typical daily operation curve of electric heater

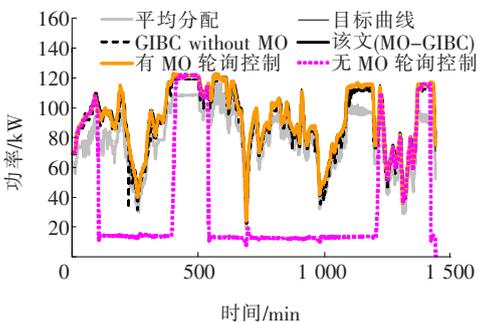


图 6 负荷群调控效果

Figure 6 Comparison of load control results

在无模型优化的轮询控制模式下,平均误差达到了 59%,其原因在于由于临界温度状态的影响,大量的负荷处于了近饱和状态,即温度空间不足以支撑一个调控周期的加热过程,但是由于没有模型修正,导致出现了严重的误差累积现象,而在引入 MO 之后,这一现象得到了大幅的改善,且轮询的拟合效果略好于所有其他方法场景,这是由于轮询控制下,完全是线性的叠加控制,不存在协同过程,但其劣势也十分明显,即负荷参与度不高,温度分布不合理,在后续的实验会进一步说明;而在平均分配模式下,由于群体间的差异性明显,所以会存在任务过量的情况,出现约 14% 的误差;而在基于泛化指标的调控方法下,若没有引入模型优化,其调控的平均误差也控制在了 4.5% 左右,但是在早上 6 点左右出现了局部的尖刺误差,其原因也是由于有部分负荷达到了临界状态而未得到修正,从而造成误判偏差;在引入 MO 之后,基于泛化指标的平均调控偏差则降低到了 2.5%,且局部的累积偏差也得到了修正。

此外,对各负荷群在参与调控过程中的具体运行温度状态进行对比分析,如图 7 所示,热水器群在早晚 2 个集中用水时段前,平均分配控制模式由于分配量限制,导致能量不足,所以达不到 60 °C 的用水需求;而在无 MO 的轮询控制中,由于临界状态的误判,导致实际运行的功率与预期的功率存在明显的偏差,所以实际的加热效果十分不理想,温度远达不到目标;其他的方法下,均能保证温度的需求,其中有 MO 轮询控制温度上升最早,总体的温度积分区域(能量面积)最大,这是由于该方法下热水器的调控优先级较高,因此获得了足够的功率支持;而

基于泛化指标的控制下,有 MO 比无 MO 的情况温度上升更早,能量面积更大,主要是由于部分临界状态偏差导致。

如图 8 所示,在空调负荷群的对比中,较为明显的是有 MO 轮询控制模式下,在高温时段提供了有效的温度调节,但是由于在早晚用水时段热水器群可控能力不足,而顺序到空调负荷后,出现了不符合用户需求的温度显著变化,严重影响用能舒适度且造成了能量的浪费;平均任务分配模式下,则是总体上均降低了约 1 °C,缺乏用户需求的针对性,在无 MO 轮询控制下,由于空调并未有效参与到调控过程,因此其温度完全与室外温度一致,相当于无调节状态,高温状态并未得到调节,无 MO 的泛化指标控制亦是如此;而该文算法中,虽然总体功率有限,但仍在高温时段将温度逐步降低到了 26 °C 的舒适温度区间,而在其他时段也并无不符合需求的能量损耗。

根据图 9 结果所示,在电热泵负荷群中,由于总体任务有限,轮询式的控制下该负荷群并未有效参

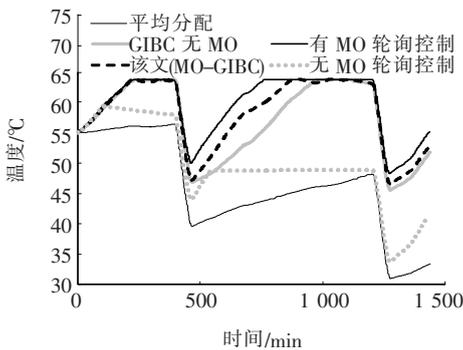


图 7 热水器群温度变化对比

Figure 7 Comparison of the temperature of EWHs

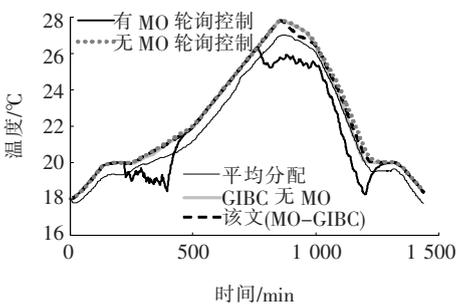


图 8 空调负荷群温度变化对比

Figure 8 Comparison of the temperature of air conditioners

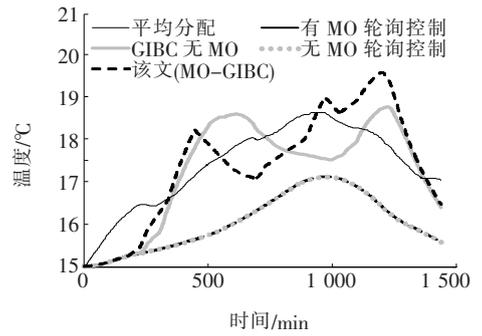


图 9 电热泵负荷群温度变化对比

Figure 9 Comparison of the temperature of heaters

与,因此有无 MO 的轮询控制下温度曲线均为未调控的环境温度曲线;而平均分配模式下,则仍是不考虑时段需求地在未调控曲线基础上较为平稳地总体提升;而考虑泛化指标的调控下,总体上两个场景均能够体现出两个电热泵温度需求的集中时段,较为符合用户的用能需求,其具体的差异一方面来源于两种方法下其他负荷群的影响,另一方面则主要体现为在 14:00—16:00 左右的区间,存在部分负荷达到临界状态而造成实际功率偏差影响。

综上所述,该文算法下,对于异构负荷群参与的联合调控下,在保证了调控精度的前提下,参与负荷的温度状态综合而言更加贴近于用户的使用需求,且能够避免在常规时段由于资源选取不合理而导致的能量浪费,有利于更加合理的实现负荷资源的综合利用。

## 5 结语

该文提出一种基于泛化指标的异构温控负荷态势感知及联合调控策略,有效地应对了集中式管理模式下异构负荷群合理调控的标准化问题,通过引入偏差修正项与流态附加项对温控负荷模型进行优化,扩展了负荷模型兼容性;基于负荷模型的计算可控能量空间与可转移时间,考虑热交换速率影响,综合定义了负荷态势泛化评估指标,使得异构温控负荷调控标准差异化的问题得以改善,为其集群调控实现提供了依据;最后明确了调控实现流程。仿真结果表明,该文方法可有效保证负荷追踪目标的精度,且能够更好地满足异构负荷群各自的用户用能

需求,提升了能源利用率,为需求侧异构负荷资源的调用提供了参考。

在该文工作基础上,考虑如何实现温控负荷外更加多元化的负荷对象联合调控策略的标准化和兼容性是需要进一步研究的问题,此外,在能源互联网环境下,需要协同的能量形式可能更加多元,如何考虑包含能源形式异构的负荷集群调控亦是后续研究的重点。

## 参考文献:

- [1] 杨青润,丁涛,文亚,等. 计及碳排约束的跨国电力互联网新能源消纳分析[J]. 智慧电力,2019,47(10):1-6+30.  
YANG Qingrun, DING Tao, WEN Ya, et al. Analysis of renewable energy integration in transnational power interconnection considering carbon emission constraints [J]. Smart Power, 2019, 47(10): 1-6+30.
- [2] 陈志杰,李凤婷,黄蓉. 计及需求响应的含风电电力系统旋转备用优化配置策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 117-122.  
CHEN Zhijie, LI Fengting, HUANG Rong. Spinning reserve optimal configuration strategy of a wind power system with demand response [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 117-122.
- [3] 张晶,张松涛,陈宋宋,等. 智能电网需求响应互动业务信息建模[J]. 供用电,2019,36(3):68-75.  
ZHANG Jing, ZHANG Songtao, CHEN Songsong, et al. Information modelling of demand response interactive business for smart grid [J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(3): 68-75.
- [4] Cui Q, Wang XL, Wang XF, et al. Residential appliances direct load control in real-time using cooperative game [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 226-233.
- [5] 许鹏,孙毅,石墨,等. 负荷态势感知:概念、架构及关键技术[J]. 中国电机工程学报,2018,38(10):2918-2926+3142.  
XU Peng, SUN Yi, SHI Mo, et al. Load situation awareness: concept, framework and key technologies [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2918-2926+3142.
- [6] 王丹,兰宇,贾宏杰,等. 基于弹性温度可调裕度的中央空调集群需求响应双层优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 118-127.  
WANG Dan, LAN Yu, JIA Hongjie, et al. Double-layer optimization strategy of cluster central air-conditioner demand response based on elastic temperature adjustable margin [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 118-127.
- [7] Zeng L K, Sun Y, Ye Q Z, et al. A centralized demand response control strategy for domestic electric water heater group based on appliance cloud platform [J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2017, 12(S2): 16-22.
- [8] 卫文婷,王丹,贾宏杰,等. 一种基于模型预测的城市园区分层分布式温控负荷需求响应控制策略[J]. 中国电机工程学报,2016,36(8):2049-2056.  
WEI Wenting, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. A hierarchical and distributed control strategy of thermostatically controlled appliances for city park based on load model prediction [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2049-2056.
- [9] 余洋,谢仁杰,卢健斌,等. 平抑新能源功率波动的集群温控负荷建模及控制[J]. 智慧电力,2020,48(3):69-75.  
YU Yang, XIE Renjie, LU Jianbin, et al. Modeling and control of aggregated thermostatically controlled loads for smoothing power fluctuation of renewable energy sources [J]. Smart Power, 2020, 48(3): 69-75.
- [10] 李丹. 集中热水系统参与电网负荷调节的控制方法研究[J]. 电网与清洁能源,2020,36(8):50-54.  
LI Dan. Research on the control method of centralized hot water system participating in power grid load regulation [J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(8): 50-54.
- [11] 杨玉龙,王彤,赵磊洋,等. 分布式电采暖负荷群建模及备用优化[J]. 电测与仪表,2020,57(2):81-87.  
YANG Yulong, WANG Tong, ZHAO Leiyang, et al. Distributed electric heating load group modeling and standby optimization [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(2): 81-87.
- [12] 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.
- [13] Malhame R, Chong C Y. Electric load model synthesis by diffusion approximation of a high-order hybrid-state stochastic system[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1985, 30(9):854-860.
- [14] Liu M, Shi Y. Model predictive control of aggregated heterogeneous second-order thermostatically controlled loads for ancillary services[J]. IEEE Transactions Power System, 2016, 31(3):1963-1971.
- [15] Mathieu J L, Koch S, Callaway D S. State estimation and control of electric loads to manage real-time energy imbalance[J]. IEEE Transactions Power System, 2013, 28(1):430-440.
- [16] Iacovella S, Ruelens F, Vingerhoets P, et al. Cluster control of heterogeneous thermostatically controlled loads using tracer devices[J]. IEEE Transactions Smart Grid, 2015, 8(2):528-536.
- [17] Hu J Q, Cao J D, Michael Z, et al. Load following of multiple heterogeneous TCL aggregators by centralized control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4):3157-3167.
- [18] 孙毅, 许鹏, 单葆国, 等. 售电侧改革背景下互联网+电能替代发展路线研究[J]. 电网技术, 2016, 40(12):3648-3654.
- SUN Yi, XU Peng, SHAN Baoguo, et al. Road map for "internet plus" energy substitution in electricity retail market reform in china[J]. Power System Technology, 2016, 40(12):3648-3654.
- [19] BAO Yuqing, HU Minqiang, HONG Yingyi, et al. Accuracy analysis and improvement of the state-queueing model for the thermostatically controlled loads[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(5):1303-1310.
- [20] Mei H, Eisner J. The neural Hawkes process: a neurally self-modulating multivariate point process[C]//Neural Information Processing Systems (NIPS), Long Beach, USA, 2017.
- [21] 许鹏, 孙毅, 杨万清, 等. 计及离散控制偏差的典型温控负荷态势感知及调控策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(21):6205-6213+6482.
- XU Peng, SUN Yi, YANG Wanqing, et al. Awareness and control strategy for TCLs considering discrete control deviation[J]. Proceedings of CSEE, 2018, 38(21):6205-6213+6482.
- [22] Elghitani F, Zhuang W. Aggregating a large number of residential appliances for demand response applications[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5):5092-5100.
- [23] Pirkul H. A heuristic solution procedure for the multi-constraint zero-one knapsack problem[J]. Naval Research Logistics, 1987, 34(2):161-172.
- [24] Chen C, Wang J H, Kishore S. A distributed direct load control approach for large-scale residential demand response[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5):2219-2228.