

基于模糊融合的多元温控负荷群调控及风电消纳策略

龚逊东,薛溟枫,毛晓波,潘湧涛

(国网江苏省电力有限公司 无锡供电分公司,江苏 无锡 214000)

Strategy for multivariate thermostatically controlled load group regulation and wind power absorption based on fuzzy theory

GONG Xundong, XUE Mingfeng, MAO Xiaobo, PAN Yongtao

(Wuxi Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Wuxi 214000, China)

摘要:需求侧资源在电网的供需平衡调节中起到了越来越重要的作用,以温控负荷为例,研究了多元负荷的联合调控方法。首先,针对电热水器和空调负荷的用户用电差异化约束,提出了基于模糊隶属模型的归一化约束评价方法;其次,基于模糊隶属评价方法,构建了多元温控负荷集群调控潜力模型,并提出电热水器与空调负荷联合调控的协同方法;最后,将所提协同控制方法用于风电消纳场景,实现了负荷精准控制。算例表明,所提方法能够在照顾到用户满意度的基础上,实现调控的均衡化与公平化,并达到良好的消纳效果。

关键词:电网平衡调节;温控负荷;联合调控;模糊隶属

Abstract: Demand side resources have been increasingly important in the regulation of supply-demand balance of power grid. Taking thermostatically controlled load (TCL) as an example, combination control methods of several kinds of load are researched. Firstly, according to the user's electricity differential constraints of electric water heaters (EWHs) and air conditioners (ACs), a normalized constraints evaluation method based on fuzzy membership model is proposed. Then, a potential model of multi-TCLs cluster regulation is constructed, and a collaborative regulation method combining EWHs and ACs is proposed. Lastly, the proposed collaborative control method is applied to wind power absorption scenarios to achieve accurate load control. The simulation results verified that the proposed method can get the balance and fairness of control, and also achieve good absorption effect on the basis of taking account of users' power-using satisfaction.

Key words: balance regulation of power grid; thermostatically controlled load; collaborative control; fuzzy membership

0 引言

需求侧管理是促进电网供需互动调节的有效手段。通过对需求侧资源的合理有序调控,可以实现用户能耗管理、节能优化等,也可为电网侧多调控业务提供功率支撑。

随着需求侧温控负荷、电动汽车等具备调节能力的可控负荷的逐渐普及,用户在一定激励措施的引导下能参与到电网调控中来。温控负荷因其周期性启停特点和灵活调节特性,已被广泛应用于电网削峰^[1]、调频^[2]、新能源消纳^[3]等场景。目前,针对温控负荷的建模、调控、优化策略等已有较多研究,如:文献[4]针对热水器负荷的动态运行特征建立

了基于偏微分方程的物理模型,实现了较好的精度;文献[5]基于中央空调负荷的调节特性、用户使用舒适度和经济性,对中央空调进行集群建模和聚合策略设计,用于平抑风电出力波动;文献[6]基于混合逻辑动态模型,对热水器负荷进行动态状态感知,能够较精确地完成风电消纳任务;文献[7]基于蒙特卡洛方法对温控负荷群的状态进行建模,获取了聚合状态下的温控负荷潜力,并利用温控负荷实现了电网紧急状态下的甩负荷。这些研究结果显示温控负荷聚合后具备较大调节潜力,能够有效地参与电网调控。

在温控负荷集群控制过程中,较多研究对温控负荷参与调控的顺序进行了方案设计,典型的方案为状态序列和分组轮控,如:文献[8]将空调负荷分组,基于空调的温度状态对单组内的空调进行轮控,并计算分组轮控策略下空调群的可控容量,用于参与电力公司优化调度计划;文献[9]基于改进的coloredpower算法,综合考虑温度状态与被控次数,对温控负荷实施序列控制;文献[10]综合考虑储能、电动汽车和温控负荷,根据负荷类型将其分为3类

收稿日期:2019-11-12;修回日期:2020-04-07

基金项目:江苏省电力有限公司综合能源服务重点示范工程“分布式电源预装式标准并网设备研制”

This work is supported by Key Demonstration Project for Comprehensive Energy Services of Jiangsu Power Co., Ltd., “Development of Standard Grid Connection Equipment Preinstalled in Distributed Power Supply”

调控组,并分别设计了消纳场景和削减场景下的协同调控顺序。以上研究表明分组排序策略已被广泛应用于面向多种类、多属性负荷调控,但随着智能负荷越来越多,可控容量越来越大,在调控需求较小的情况下,分组调控难免会出现只有单一组别负荷参与的情况,难以保证用户参与调控的公平性。

本文针对分组调控可能出现的调控不均衡问题,提出了基于模糊融合的多元温控负荷调控策略。该策略以模糊理论为基础,通过设计模糊规则、量化模糊隶属函数、制定负荷调控方案,实现热水器负荷与空调负荷的交叉式混合排序,并参与风电消纳场景调控。

1 调控架构及技术分析

1.1 调控架构

需求侧负荷资源数量众多,且分布广泛,聚合商借助于互联网云平台实现对地域分散的温控负荷整体运行状态的感知,并根据负荷运行信息的感知结果形成对负荷群的可调潜力估计,与电网调度中心进行实时信息交互。随着智能电表、能量管理系统等先进的量测和通信设备的普及应用,可通过边缘计算技术实现对需求侧电热泵、热水器、空调等温控负荷运行状态的状态感知。进一步地,根据用户对不同种类温控负荷的用电特点,形成差异化用电分析并进行模糊统一评价,最终形成温控负荷群的最优调控序列。基于聚合商实现的负荷调控整体架构如图1所示。

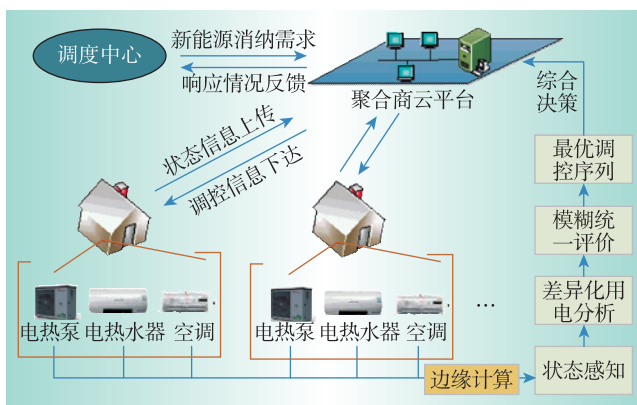


图1 温控负荷分布式调控架构

Fig. 1 Distributed control architecture of TCLs

1.2 技术分析

需求侧温控负荷数量庞大、种类繁多,为了实现双向互动,必须要照顾到用户负荷的多元约束和使用特点。

就单类负荷而言,由于用户的温度设定偏好不同,单位温度变化引起的用户体验感存在较大差

异,故具体调控时需要考虑不同用户的使用特点;就多类负荷而言,制热型和制冷型负荷运行机理不同,导致其温度约束区间不同,且用户对不同负荷的温度预期不同,在调控时需要考虑不同用户和负荷之间的多元使用约束。目前,常规分组调控将温度高低作为其调控序列的决策原则,但如何确定调控组的优先级还未形成统一的标准。

因此,针对不同用户对不同负荷的约束的差异性,聚合商在对所辖范围内的温控负荷实施调控时,需要对不同负荷的状态量和用户满意度进行横向比较,使多类负荷能以交叉式的序列参与调控,避免单一负荷数量充足的情况下,其他负荷难以参与调控的情况,保证调控的公平性与合理性。

模糊隶属度函数^[11]通过综合考虑温控负荷的状态量和多元差异化约束,将其映射成 $[0,1]$ 区间内的一维隶属度(值),实现不同用户对不同负荷的多元约束的横向对比与量化,进一步实现多类温控负荷之间的协同有序调控。基于模糊隶属度函数的负荷调控步骤如图2所示。

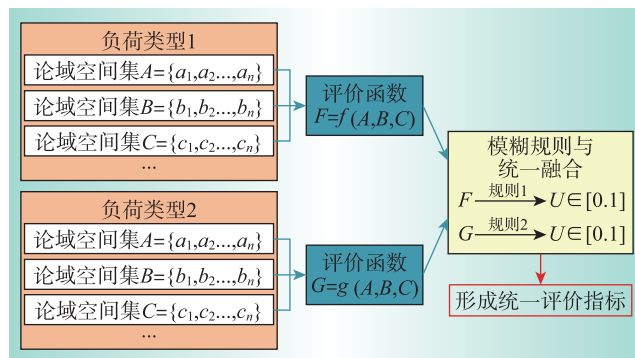


图2 模糊隶属度函数应用示意

Fig. 2 Application of fuzzy membership function

2 基于模糊融合的负荷调控

2.1 负荷运行模型

由于不同温控负荷的用途和使用特性不同,面向用户的调控需要根据负荷自身的使用特性和约束需求,进行差异化分析。本文以制热型电热水器和制冷型空调为例,探讨2者间运行模型和约束的差异。

空调和热水器都属于温控负荷,其物理运行模型形式具有相似性^[12],仅在模型参数上存在差异。典型温控负荷模型为

$$T_{in}^{t+1} = T_o^{t+1} + sQR - (T_o^{t+1} + sQR - T_{in}^t)e^{-\Delta t/RC} \quad (1)$$

式中: T_o^{t+1} 为 $t+1$ 时刻的外部温度; T_{in}^t 和 T_{in}^{t+1} 分别为 t 时刻和 $t+1$ 时刻的负荷温度状态值; Q 为负荷的等值热功率; C 为等效热容; R 为等效热阻; $s=\{0,1\}$ 为启停状态变量,1表示运行状态,0表示关闭状态。

由于用户对热水器和空调的使用需求不同,2者的温度死区范围差异较大,单纯以温度值这一指标难以衡量某一温度状态下的可控程度。温度死区范围的不同会导致单位温度偏差对用户用电满意度的影响不同。对空调负荷而言,室温直接影响用户体感,一般用户仅能忍受1~2℃的温度偏差;而对于热水器而言,因其具备可调特性,在满足用户最低出水温度的基础上,单位温差带来的影响较小,可通过灵活调节出水来满足使用需求。因此,如何针对用户用电满意度需求,量化不同温控负荷的单位温差引起的影响程度,是多类温控负荷联合调控需要考虑的问题。

因此,本文以负荷运行状态量为基础,考虑负荷的差异化运行约束和满意度约束,利用线性模糊隶属度函数对空调和电热水器的调控指标进行统一量化,以确定联合调控顺序。

2.2 用电满意度模型

利用模糊理论融合调控指标实现多元负荷调控,关键在于模糊规则与模糊隶属函数的选取。本文主要针对新能源消纳场景,考虑用电功率的调增需求,对空调负荷和热水器定义如下模糊规则。

规则1: $\forall L \in L_{AC}$, 选取状态指标 $(x_{upline} - x_{AC,i})$ 和容忍度指标 $S_{AC,i}$ 较小的进行优先调节。

规则2: $\forall L \in L_{EWH}$, 当 $x < x_{set}$ 时, 选取状态指标 $(x_{EWH,i} - x_{downline})$ 和容忍度指标 $S_{EWH,i}$ 较小的进行优先调节; 当 $x > x_{set}$ 时, 非优先调节。

其中, L_{AC} 、 L_{EWH} 分别为空调和热水器的集合; x 、 x_{upline} 、 $x_{downline}$ 、 x_{set} 分别为负荷的当前状态值、状态上限值、状态下限值和用户设定期望值; S 为用户对该负荷状态偏移的容忍度, 反映了用户的满意度情况, 容忍度越大的用户, 单位温差引起的满意度损失越小, 该值由用户自主设定或经验获取。

为进一步将不同负荷调控的用户满意度量化, 本文根据上述模糊规则的划分, 选取线性隶属度模型, 具体计算公式如下

$$f_{AC,i}(x) = \begin{cases} \frac{1}{S_{AC,i}}x + 1 - \frac{x_{set,i}}{S_{AC,i}} & x_{set} - S < x < x_{set} \\ -\frac{1}{S_{AC,i}}x + 1 - \frac{x_{set,i}}{S_{AC,i}} & x_{set} < x < x_{set} + S \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$f_{EWH,i}(x) = \begin{cases} 1 & x > x_{set} \\ -\frac{1}{S_{EWH,i}}x + 1 - \frac{x_{set,i}}{S_{EWH,i}} & x_{set} - S < x < x_{set} \\ 0 & x < x_{set} - S \end{cases} \quad (3)$$

式中: x 为负荷的温度状态值; $f(x)$ 为负荷调控的满意度, $f(x)=1$ 表示最满意, $f(x)=0$ 表示最不满意。

与式(2)和式(3)对应的隶属度函数如图3所示。

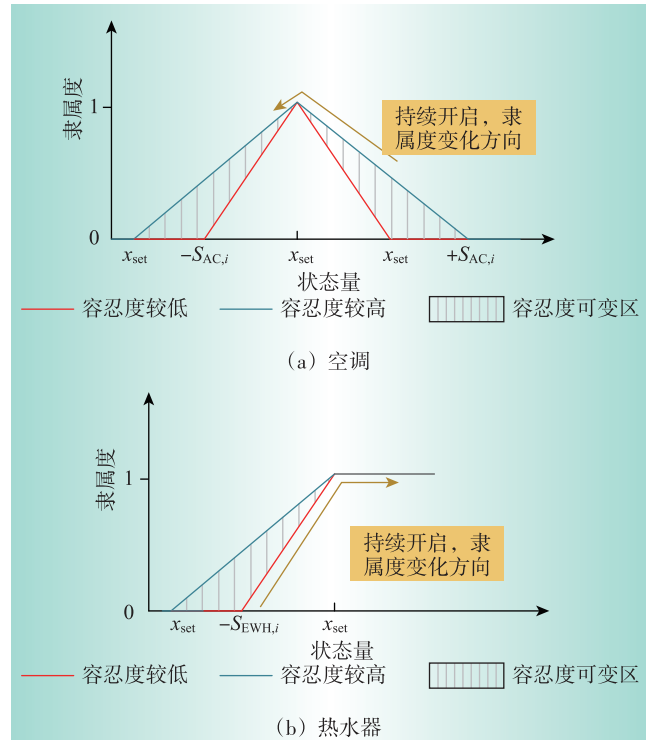


图3 多元负荷满意度线性模糊隶属度函数

Fig. 3 Linear fuzzy membership function for multivariate loads' satisfaction

由图3可知, 无论空调还是热水器, 其调控满意度值可以映射于模糊集合 $U \in [0, 1]$, 对处于同一模糊集的负荷, 可以利用模糊隶属度值作为调控顺序的决策指标, 实现多元用户的联合调控。

2.3 调控潜力模型

对处于温度上限的空调负荷而言, 当空调处于开启状态时, 室内温度逐渐降低, 状态值由大变小, 对应图3(a)的隶属度变换方向可知, 客户满意度会先增再降。而如图3(b)所示, 对处于温度下限的热水器负荷而言, 其满意度会呈现先增再保持稳定的趋势。

为了在调控过程中, 尽可能减少用户满意度损失, 本文根据上述2类负荷的满意度变化趋势, 将其分为3个区间: 满意度递增区间、满意度维持区间和满意度递减区间。在调控实施过程中, 优先选择处于1、2阶段区间的温控负荷进行调控。对此, 聚合商以公式(4)—公式(9)所示的潜力模型对所辖范围内的温控负荷进行多级调控能力评估。

根据满意度区间划分, 3阶段区间的具体描述如下

$$\begin{cases} U_{AC}^I = [x_{set}, x_{set} + S_{AC}] \\ U_{EWH}^I = [x_{set} - S_{EWH}, x_{set}] \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} U_{AC}^{II} = U_{AC}^I \\ U_{EWH}^{II} = [x_{set} - S_{EWH}, x_{max}] \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} U_{AC}^{\text{III}} = [x_{\text{set}} - S_{AC}, x_{\text{set}}] \\ U_{EWH}^{\text{III}} = U_{EWH}^{\text{II}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: U_{AC}^{I} 、 U_{EWH}^{I} 、 U_{AC}^{II} 、 U_{EWH}^{II} 、 U_{AC}^{III} 、 U_{EWH}^{III} 分别为空调和热水器负荷的3个区间界定,其界定标准为状态量取值; x_{max} 为热水器负荷可以达到的最高加热温度。

进一步,根据公式(4)—公式(6)确定每个区间对应的负荷数量和可调功率情况为

$$P_{\text{I}} = \sum_{x_{AC} \in U_{AC}^{\text{I}}, x_{EWH} \in U_{EWH}^{\text{I}}} (1 - s_{EWH,i}) P_{EWH,i} + (1 - s_{AC,i}) P_{AC,i} \quad (7)$$

$$P_{\text{II}} = \sum_{x_{EWH} \in U_{EWH}^{\text{II}}} (1 - s_{EWH,i}) P_{EWH,i} \quad (8)$$

$$P_{\text{III}} = \sum_{x_{AC} \in U_{AC}^{\text{III}}} (1 - s_{AC,i}) P_{AC,i} \quad (9)$$

式中: P_{I} 、 P_{II} 、 P_{III} 分别为每个区间对应的所有负荷可调容量; $P_{AC,i}$ 、 $P_{EWH,i}$ 分别为第 i 个空调、第 i 个电热水器的运行功率; $s_{AC,i}$ 、 $s_{EWH,i}$ 分别为第 i 个空调、第 i 个电热水器的运行状态,值为1时表示开启状态,值为0时表示关闭状态。由于本文主要面向风电消纳,温控负荷需要提供的是调增功率,因此实际可调容量量化时取 $s=0$ 。

基于满意度区间划分形成了多级可调容量,由于 P_{I} 、 P_{II} 不造成用户的满意度损失,定义最优可调潜力模型和临界可调潜力模型为

$$P_{\text{opti}} = P_{\text{I}} + P_{\text{II}} \quad (10)$$

$$P_{\text{crit}} = P_{\text{I}} + P_{\text{II}} + P_{\text{III}} \quad (11)$$

式中: P_{opti} 为最优可调潜力,是最大化用户满意度情况下可调容量,此时调控结果趋近于用户最易接受的状态值; P_{crit} 为临界可调潜力,是最高容忍度情况下的可调容量,此时调控结果趋近于状态值的上限或下限。

2.4 面向风电消纳的温控负荷调控

负荷聚合商根据满意度的模糊集合安排负荷调控顺序,总体调控策略以最大化消纳风电曲线为目标,其优化目标和约束条件如下

$$\min J = \|P_{\text{act}} - P_{\text{target}}\|_2^2 \quad (12)$$

$$\begin{cases} (x_{\text{set},i} - S_{AC,i}) \leq x_{AC,i} \leq (x_{\text{set},i} + S_{AC,i}) \\ (x_{\text{set},i} - S_{EWH,i}) \leq x_{EWH,i} \end{cases} \quad (13)$$

$$\max F = \sum_i f_{AC,i} + \sum_j f_{EWH,j} \quad (14)$$

式中: P_{act} 为负荷聚合商实际调控后的负荷整体用电功率; P_{target} 为调控的目标功率; $x_{AC,i}$ 、 $x_{EWH,i}$ 分别为第 i 个空调、第 i 个热水器调控过程中的温度。

上述优化目标和约束条件一般基于常规的粒子群(PSO)等算法^[13]即可求解,其整体的调控过程

如图4所示。

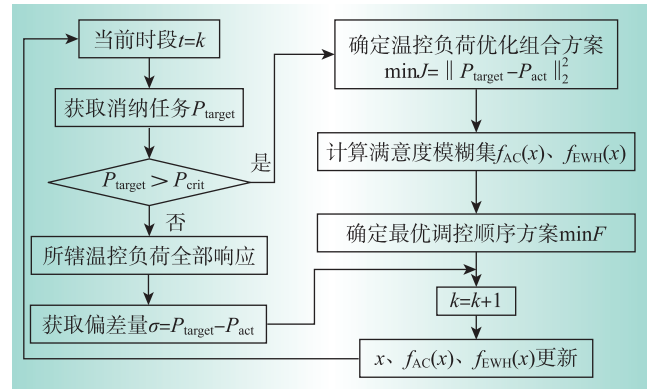


图4 聚合商参与风电消纳的优化调控流程

Fig. 4 Optimal regulation process of wind power absorption with aggregators' participation

3 仿真算例

3.1 参数设置

为验证本文模型及调控策略的有效性,本节选取以空调和电热水器为代表的温控负荷群,以消纳可再生风能为场景,进行温控负荷群消纳风电的模拟仿真。所需空调和热水器模型参数分别取自文献[6]和文献[12],初始量设置如表1所示,仿真环境下负荷群的参数值和初始值利用蒙特卡洛模拟生成。

表1 温控负荷模型参数设置

Table 1 Model parameter settings of TCLs

模型参数	空调	电热水器
R 均值/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$)	0.002 0	0.220 8
C 均值/($\text{J} \cdot \text{W}^{-1}$)	1.8×10^6	6 336.3
Q 均值/W	1×10^4	0.3×10^4
P 均值/W	0.6×10^4	0.3×10^4
T_o / $^{\circ}\text{C}$	30	30
x_{set} / $^{\circ}\text{C}$	26	55
S / $^{\circ}\text{C}$	1.0, 1.5, 2.0, 2.5	3.0, 4.0, 5.0
$x(0)$ / $^{\circ}\text{C}$	[20, 30]	[40, 70]

本文仿真所需风电消纳任务曲线取自某风电场典型的日出力曲线,将其等比例压缩,以便与温控负荷群的聚合调节潜力相匹配。

3.2 风电消纳情况

本文利用1 000台热水器负荷和1 000台空调负荷进行消纳,仿真的控制间隔为15 min。

基于本文策略的温控负荷的消纳效果如图5所示,调节后的温控负荷用电曲线与风电消纳任务曲线基本匹配,且具有较高的精确性。

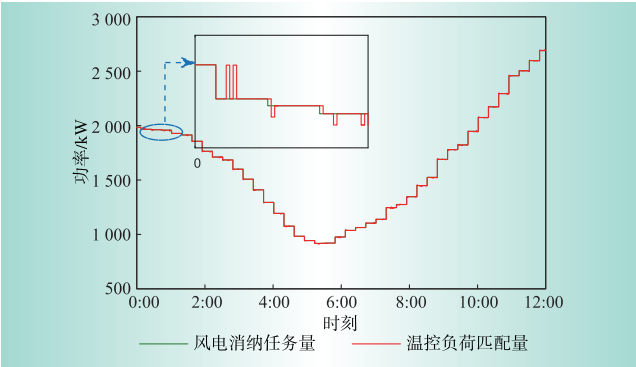


图5 风电消纳效果

Fig. 5 Wind power absorption effect

本文调控策略首先面向隶属度随调控上升的用户,该类用户满足状态区间如下

$$\begin{cases} x_{\text{set},AC} \leq x_{AC} \leq (x_{\text{set},AC} + S_{AC}) \\ (x_{\text{set},EWH} - S_{EWH}) \leq x_{EWH} \leq x_{\text{set},EWH} \end{cases} \quad (15)$$

在上述典型的状态区间内,对参与调控的温控负荷随机抽取空调和热水器负荷各1个,其调控前后的状态对比情况如图6所示,其中空调负荷全调节时段的状态变化对比见图6(a)。可以看出,本文所提调控策略能满足用户对负荷的容忍度要求,并且在考虑容忍度的基础上,优先面向满意隶属度随调控上升的用户。因此能够在提高全局用户满意度的基础上,实现较高精确性的风电消纳。

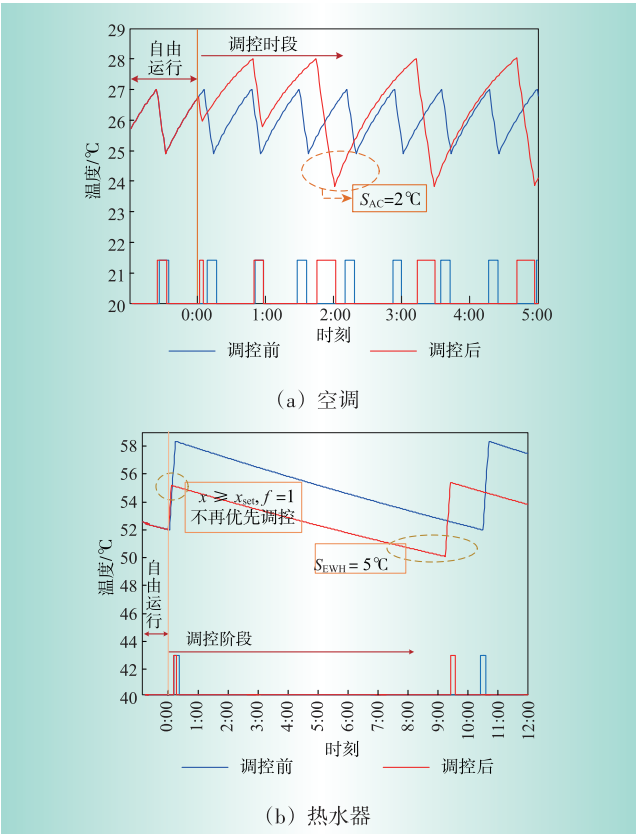


图6 调节前后温控负荷状态对比

Fig. 6 Statement comparison of TCLs before and after regulation

3.3 调控均衡性

为了验证本文所提策略对用户满意度的提升效果,本节以传统分组调控的方式作对比,设置了以下3个场景,如表2所示。其中,分组调控规则为常规的按温度状态序列依次进行。

表2 场景设置

Table 2 Scenario settings

场景	策略	特征
1	分组调控	先空调,后热水器
2	分组调控	先热水器,后空调
3	本文策略	交叉式调控

本文随机选取了某次控制实施后,受控用户的满意度变化情况,如图7所示,旨在分析3种方法在一个控制周期内的用户满意度的变化情况。我们统计了一个控制周期内所控温控负荷的平均满意度的隶属集,可以明显看出本文策略能够有效提高参与调控用户的满意度水平。

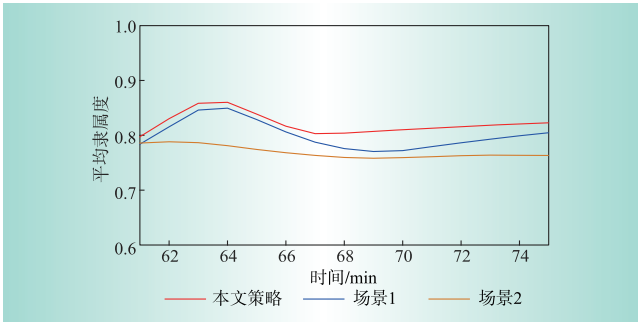


图7 调控指令对用户的满意度影响情况

Fig. 7 The influence of regulation instructions on users' satisfaction

本文策略面向多种负荷类型并存的调控场景,旨在以交叉式的调控代替传统的分组式调控,使得多元负荷调控趋于均衡。以上文3个场景为例,在最大调控量的情况下,空调与热水器参与调控的数量对比如图8所示。由于温控负荷参数初始化具备

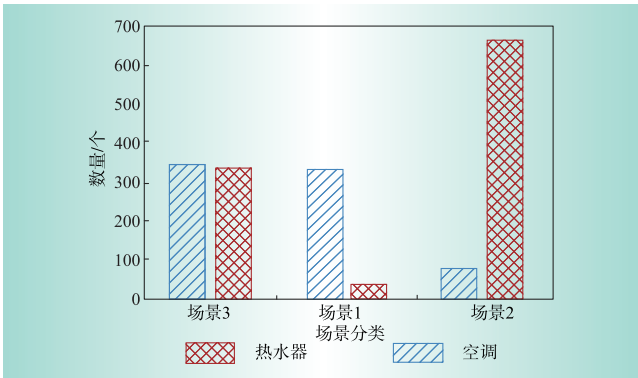


图8 多场景调控均衡性对比

Fig. 8 Equilibrium comparison of multi-scenarios regulate and control

随机性,每次调控参与数量略有差异,图8为每个场景均运行10次后的均值取整结果。可以看出本文策略相比于分组调控更具备控制的均衡性。

综上分析,本文所提策略能够有效地实现多元负荷交叉式调控,保证了调控的均衡性及用户参与的公平性。在未来可控负荷高度渗透的配电网环境下,能够为综合型负荷聚合商与售电商提供面向多元负荷协同调控的策略参考。

4 结束语

本文提出了一种基于模糊融合的多元温控负荷群调控及风电消纳策略,有效实现了多元温控负荷联合调控。通过引入模糊隶属函数,综合考虑负荷类型、运行约束、用户满意度等因素,构建了统一的满意度隶属函数与模糊集合;基于此,提出了多元温控负荷调控顺序,并构建了温控负荷集群调控模型,提出了温控负荷参与风电消纳的协同控制策略,实现了不同类型温控负荷的交叉式调控,提升了用户参与响应的公平性与调控的均衡性。

后续研究将进一步考虑在热水器用户行为的影响下,如何改进该模糊隶属函数和本文模型,以实现更加精细化的调控;此外,由于本文主要面向温控负荷,而电动汽车、可转移负荷同样可用于风电消纳,所以如何将这类负荷与温控负荷实现统一调控,亦是本文后续的研究方向。D

参考文献:

- [1] 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 System, 2018, 42(24):44-52.
- [2] WANG J, ZHANG H, ZHOU Y. Intelligent under frequency and under voltage load shedding method based on the active participation of smart appliances[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(1):353-361.
- [3] 汤奕,鲁针针,伏祥运.居民主动负荷促进分布式电源消纳的需求响应策略[J].电力系统自动化,2015,39(24):49-55.
TANG Yi, LU Zhenzhen, FU Xiangyun. Demand response strategy for promoting consumption of distributed power generation with residential active Load[J]. Automation of Electric Power System, 2015, 39(24):49-55.
- [4] XU Z, DIAO R, LU S, et al. Modeling of electric water heaters for demand response: a baseline PDE model[J]. IEEE Transactions On Smart Grid, 2014, 5(5):2203-2210.
- [5] 高赐威,张良杰,杨晓梅.中央空调负荷聚合及平抑风电出力波动研究[J].中国电机工程学报,2017(11):130-137,319.
GAO Ciwei, ZHANG Liangjie, YANG Xiaomei. Research on load aggregation of central air conditioning and wind power output fluctuation suppression [J]. Proceedings of the CSEE, 2017(11):130-137,319.
- [6] 孙毅,石墨,许鹏,等.基于混合逻辑动态模型的热水器群态势感知及调控策略[J].中国电机工程学报,2018,38(17):5043-5051,5301.
SUN Yi, SHI Mo, XU Peng, et al. Situation awareness and control strategy of water heater group based on mixed logical dynamic model [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17):5043-5051,5301.
- [7] 苏建军,郭跃进,刘萌,等.紧急切负荷措施的温控负荷控制策略及概率模型[J].电网技术,2018,42(3):911-918.
SU Jianjun, GUO Yuejin, LIU Meng, et al. Strategy and probability model for thermostatically controlled loads in emergency load shedding system [J]. Power System Technology, 2018, 42(3):911-918.
- [8] 高赐威,李倩玉,李扬.基于DLC的空调负荷双层优化调度和控制策略[J].中国电机工程学报,2014,34(10):1546-1555.
GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Yang. Double-level optimal dispatching and control strategy of air conditioning load based on DLC [J]. Proceedings of the CSEE, 2014,34(10):1546-1555.
- [9] 王东,曾沅,穆云飞,等.基于温控负荷控制技术的新能源优化利用方法[J].电网技术,2015,39(12):3457-3462.
WANG Dong, ZENG Yuan, MU Yunfei, et al. Optimal utilization method of new energy based on temperature-controlled load control technology [J]. Power System Technology, 2015, 39(12):3457-3462.
- [10] WANG M, MU Y, JIANG T, et al. Load curve smoothing strategy based on unified state model of different demand side resources[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(3):540-554.
- [11] 刘普寅.模糊理论及其应用[M].北京:国防科技大学出版社,1998:22-25.
LIU Puyin. Fuzzy theory and application [M]. Beijing: University of Defense Science and Technology Press, 1998:22-25.
- [12] 楼家辉,杨欢,王京,等.考虑异质性的定频空调负荷聚合建模及功率跟踪策略[J].电力建设,2017,38(11):55-63.
LOU Jiahui, YANG Huan, WANG Jing, et al. Constant frequency air conditioning load aggregated modeling and its power tracking strategy considering heterogeneity [J]. Power Construction, 2017, 38(11):55-63.
- [13] ZHANG Y, GONG D W, DING Z. A bare-bones multi-objective particle swarm optimization algorithm for environmental/economic dispatch [J]. Information Sciences, 2012, 192(6):213-227.

作者简介:

龚逊东(1971),男,江苏常州人,硕士,高级工程师,研究方向为电力营销管理、人资管理;

薛滨枫(1976),男,江苏无锡人,本科,工程师,研究方向为需求侧管理、有序用电、综合能源服务。

(责任编辑 水 鸽)