

蓄热式电采暖可调节潜力分析

屈 博¹,卜凡鹏¹,李德智¹,方明慧²

(1. 中国电力科学研究院有限公司,北京 100192;2. 中国农业大学 信息与电气工程学院,北京 100083)

Adjustable potential analysis of regenerative electric heating

QU Bo¹, BU Fanpeng¹, LI Dezhi¹, FANG Minghui²

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

摘要:蓄热式电采暖作为一种电能替代技术,在应用的过程中会给配电网的安全运行带来影响,随着人们对分布式能源的重视和电采暖相关技术的发展,电采暖的研究愈发重要。为了充分挖掘蓄热式电采暖在配电网中的可调节潜力,从蓄热式电采暖单体和集群两个层面进行分析。首先提出可调节潜力量化指标,包括容量、充放电功率、储能状态、上调容量和下调容量;接着分析蓄热式电采暖单体可调节潜力指标的数学模型;然后利用模糊聚类算法基于用户的用能特性,对电采暖用户进行聚类,分析蓄热式电采暖集群的上调容量和下调容量;最后通过具体算例对数学模型进行验证。

关键词:电能替代;蓄热式电采暖;可调节潜力;聚类

Abstract: As an electric energy alternative technology, regenerative electric heating will affect the safe operation of the distribution network in the process of application, with people's attention to distributed energy resources and the development of electric heating related technologies, the research of electric heating is becoming more and more important. In order to fully exploit the adjustable potential of regenerative electric heating in the distribution network, the analysis is carried out from the two levels of regenerative electric heating unit and cluster. Firstly, the quantitative indicator of adjustable potential is proposed, including capacity, charge and discharge power, energy storage status, up-regulation capacity and down-adjustment capacity. Then the mathematical model of the adjustable potential indicators of regenerative electric heating units is analyzed. And then fuzzy clustering algorithm is used to cluster electric heating users based on the energy consumption characteristics of users, and the upward adjustment capacity and downward adjustment capacity of electric heating clusters are analyzed. Finally, the mathematical model is verified by specific examples.

Key words: electric energy replacement; regenerative electric heating; adjustable potential; clustering

0 引言

为缓解我国煤炭消耗的问题,政府开始推进新能源的使用。例如在居民生活领域,推进多种电采暖技术,如蓄热式电采暖。与常规电力负荷相比,电采暖负荷的用能行为往往具有明显的气候与行为驱动性特征,会给配电网安全运行带来较大影响。

随着“双碳”目标的提出,以风、光为主体的新能源大量接入电网,为提高新能源消纳率,将蓄热式电采暖与风电进行结合,提出电网优化运行模型,既提高了系统的风电消纳能力,又提升了系统

的调峰能力^[1]。

在配电网的安全运行方面,通过对蓄热式电采暖和配电网进行优化配置,有利于充分发挥蓄热技术的优势^[2-4]。文献[5]将蓄热式电采暖的柔性负荷作为研究对象,对其进行潜力分析,根据蓄热式电采暖负荷特性进行建模,仿真分析电采暖负荷的可调控容量和调控响应持续时间。

综上,随着人们对分布式能源的重视和电采暖相关技术的发展,蓄热式电采暖负荷的控制优化研究也越来越深入和完善。但是针对蓄热式电采暖可调节潜力的分析方面还存在不足。本文根据制热设备系统将蓄热式电采暖分为热泵型和电锅炉型,分析蓄热式电采暖单体和集群的可调节潜力并进行量化,研究不同场景、不同时间尺度下蓄热式电采暖的可调节潜力。

收稿日期:2023-01-10;修回日期:2023-06-22

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5108-20221828 0A-2-375-XG)

1 蓄热式电采暖可调节潜力

1.1 蓄热式电采暖可调节潜力量化指标

蓄热式电采暖系统模型包括上下两层,如图1所示。图1中上层是基于某种优化技术的电力系统管理方式,吸纳了传统火电厂、水电站、可再生能源等多种资源形式,通过综合各种资源存在的约束条件(如电热泵的运行约束、用户舒适约束等)进行资源的优化分配,以达到系统优化运行的目标。下层是需求侧,主要针对分散在不同负荷社区(load community, LC)中的参与激励响应的用户,在通信理想的前提下,采集响应设备的状态信息,根据上层优化分配的子目标考虑实施集中式的响应措施。

图1中的能效电厂(蓄热式电采暖集群)由多个能效电机(energy generator, EG)聚合而成,每个能效电机由某区域用户的可控蓄热式电热泵群进行等值。将多个能效电机集成为能效电厂,是对于不同地区受控用户综合资源利用的更合理形式,类似于常规电厂中多台机组联合发电的概念。能效电厂中的多个能效电机可以互相支持,按照自身的出力能力来响应系统总目标,这样聚合而成的能效电厂可以有效参与系统上层的调度和优化管理,对传统电厂和可再生能源提供良性的补充作用。

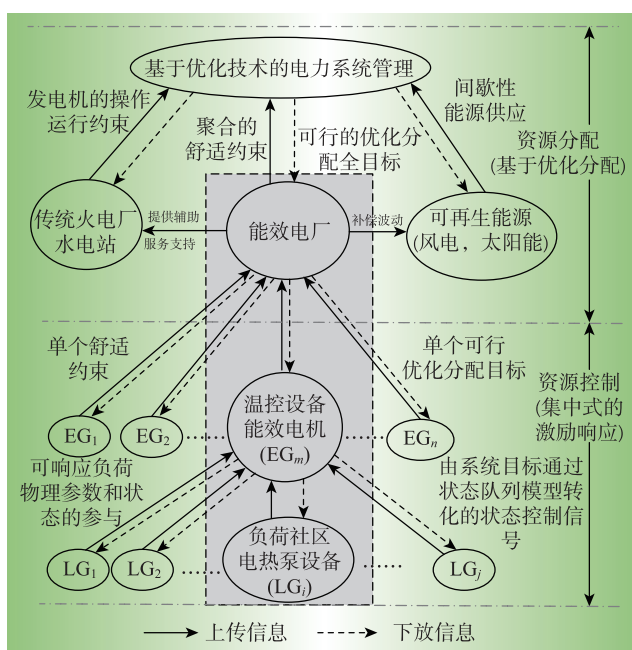


图1 蓄热式电采暖负荷能效电厂(集群)模型

Fig. 1 Model of an energy efficiency power plant(cluster) for regenerative electric heating loads

为了方便后续研究分析,主要考虑设备的通用指标量化可调节潜力。其中影响蓄热式电采暖单体可调节潜力的通用指标有:容量、充放电功率和储能状态。蓄热式电采暖集群可调节潜力的通用指标包括:蓄热式电采暖集群上调容量和下调容量。

1.2 蓄热式电采暖单体可调节潜力

蓄热式电采暖单体可调节潜力分为两部分:蓄热设备的实际蓄热量和考虑房屋热惰性的虚拟蓄热量,这里将后者等效为等效电池储电量。

1.2.1 容量

建筑室内舒适度范围为 $[T_{\min}, T_{\max}]$, k 时段室温初始值为 $T_{\text{in}}(k)$,则建筑 k 时段等效电池的初始储电量表示如下

$$E(k) = C(T_{\text{in}}(k) - T_{\min}) \quad (1)$$

式中: $E(k)$ 为建筑 k 时段等效电池初始储电量, kJ; C 为建筑等效热容, kJ/°C。

当 $T_{\text{in}}(k) = T_{\min}$ 时,等效电池储电量为0;当 $T_{\text{in}}(k) = T_{\max}$ 时,等效电池储电量最大,为等效电池容量表示如下

$$C_{\text{ca}} = C(T_{\max}(k) - T_{\min}) \quad (2)$$

式中: C_{ca} 为建筑等效电池容量, kJ。

1.2.2 充放电功率

定义维持实际室温等于用户设定室温 T_{set} 时的热负荷为基准制热功率, k 时段基准制热功率 $Q_{\text{basic}}(k)$ 如下所示

$$Q_{\text{basic}}(k) = \frac{1}{R}(T_{\text{set}} - T_{\text{out}}(k)) \quad (3)$$

式中: $T_{\text{out}}(k)$ 为 k 时段室外温度, °C。需要注意的是, k 时段内室外温度变化较小,因此假设 k 时段内室外温度为恒值。

当系统的耗电功率偏离基准耗电功率时,说明建筑等效电池处于充电或放电状态。当耗电功率大于基准耗电功率,说明等效电池处于充电状态,等效充放电功率可表示如下

$$P_{\text{c,dis}}(k) = P(k) - P_{\text{basic}}(k) \quad (4)$$

式中: $P(k)$ 为 k 时段内热泵实耗电功率, kW; $P_{\text{c,dis}}(k)$ 为等效充放电功率, kW; $P_{\text{basic}}(k)$ 为 k 时段基准耗电功率, kW。

充放电功率受变频空调系统可调频率范围影响,需满足以下条件

$$-P_{\text{dis,max}}(k) \leq P_{\text{c,dis}}(k) \leq P_{\text{c,max}}(k) \quad (5)$$

$$P_{\text{dis,max}}(k) = P_{\text{basic}}(k) - P_{\min} \quad (6)$$

$$P_{\text{c,max}}(k) = P_{\max} - P_{\text{basic}}(k) \quad (7)$$

式中: $P_{\text{dis,max}}(k)$ 为最大放电功率, kW; $P_{\text{c,max}}(k)$ 为最大

充电功率, kW; $P_{\min}$ 为变频空调系统最小输入功率, kW; $P_{\max}$ 为变频空调系统最大输入功率, kW。

1.2.3 储能状态

储能状态描述等效电池的储电量状态, 定义为等效电池储电量与等效电池容量之比。利用储能状态这一等效参数可以实现两个相邻时段间(k 和 $k+1$)等效电池基本情况的快速传递, 具体储能状态可表示如下

$$S_{oc}(k) = \frac{E(k)}{C_{ca}} \quad (8)$$

式中: $S_{oc}(k)$ 为建筑 k 时段等效电池初始储能状态。

根据式(8)可得, 建筑等效电池储能状态更新可实现如下

$$\begin{cases} S_{oc}(k+1) = \frac{E(k+1)}{C_{ca}} = \frac{E(k) + \Delta E(k)}{C_{ca}} \\ S_{oc}(k+1) = S_{oc}(k) + \frac{\Delta E(k)}{C_{ca}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\Delta E(k)$ 为 k 时段内等效电池储电增加量, kJ, 表示如下

$$\Delta E(k) = \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} (Q(t) - Q_{diss}(t)) dt \quad (10)$$

式中: $Q(t)$ 为变频空调系统 t 时刻制热功率, kW; $Q_{diss}(t)$ 为建筑 t 时刻自放电功率(热耗散速度), kW。

建筑 t 时刻自放电功率可表示如下

$$Q_{diss}(t) = \frac{T_{in}(t) - T_{out}(t)}{R} \quad k\Delta t \leq t \leq (k+1)\Delta t \quad (11)$$

式中: $T_{out}(t)$ 为 t 时刻室外温度, °C; $T_{in}(t)$ 为 t 时刻室内温度, °C。

假设 k 时段内室外温度为恒值, 则可得下式

$$T_{out}(t) = T_{out}(k) \quad k\Delta t \leq t \leq (k+1)\Delta t \quad (12)$$

$$\begin{aligned} T_{in}(t) &= (T_{in}(0) - T_{out}(k) - R_Q(t)) e^{-\frac{t}{RC}} + \\ &T_{out}(k) + R_Q(t) \quad k\Delta t \leq t \leq (k+1)\Delta t \end{aligned} \quad (13)$$

式中: $R_Q(t)$ 为 t 时刻变频空调的制热温度, °C; $T_{in}(0)$ 为 k 时段初始室内温度, °C, 表示如下

$$T_{in}(0) = T_{in}(k) = T_{\min} + S_{oc}(k)(T_{\max} - T_{\min}) \quad (14)$$

1.3 蓄热式电采暖集群可调节潜力

不同用户的用电习惯各不相同, 因此接入的蓄热式电采暖负荷变化情况也存在差异, 对于数量庞大的用户负荷, 对其逐一测量并逐一分析显然是不合实际的, 为实现调度中心对负荷群的统一控制, 应根据蓄热式电采暖负荷本身的特点进行分类与综合。

首先将具有相似用能特性的用户进行聚类, 将用户分为 n 组。接着, 对各类用户进行负荷特性求解, 得到每一类用户的负荷特性曲线, 表示为 $K_j(j=1, 2, \dots, n)$ 。依据模糊 C 均值聚类算法对所有用

户的负荷特性进行聚类分析, 并得到最优聚类中心数 c , 最后再选出每类用户中的典型用户, 依据式(15)计算每类用户中的重心, 从而将与重心距离最近的用户作为典型用户, 并将这些典型用户的负荷曲线表示为 $K_i (1 \leq i \leq c)$ 。

$$\begin{cases} W_i = \frac{\sum_{j \in K_i} Q_j K_j}{\sum_j Q_j} \\ \min f = \|K_j - W_i\| \\ s.t. \quad Q_j > \frac{1}{n_i} \sum_j Q_j \end{cases} \quad (15)$$

式中: W_i 为第 i 类用户的重心; Q_j 为第 j 个用户在第 i 类用户中所占的比重。

根据选取的典型用户的负荷曲线 K_i 和它们所对应的占比, 得到聚合的负荷曲线 K , 表示如下

$$K = \sum_{s=1}^c K_i \lambda_s \quad (16)$$

式中: λ_s 为第 s 个典型用户在所有典型用户中所占比重。

其中, 模糊 C 均值聚类算法将样本划分成 n 类, 描述的是每个样本属于各个分类的程度, 而这种程度被称为隶属度。计算出使目标函数 J 最小的聚类中心数 c 即找到了隶属度的最优分布, 计算如下

$$J = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^c [(u_{ij})^m d_{ij}^2] \quad (17)$$

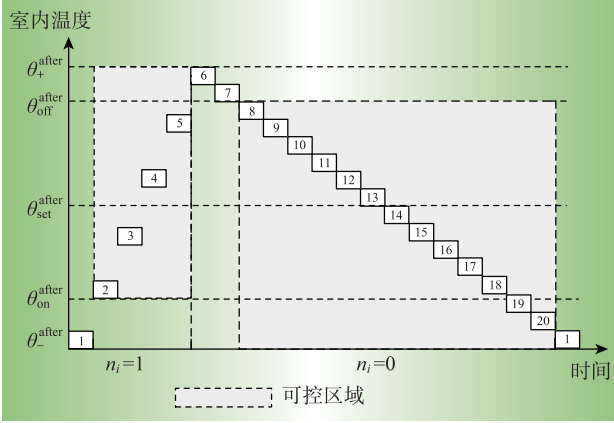
式中: 模糊加权系数 $m \in [1, \infty)$; c 为聚类中心数; c_i 为第 i 类的聚类中心, $i=1, 2, \dots, c$; $d_{ij} = \|x_j - c_i\|$ 为 x_j 到 c_i 的欧拉距离, $j=1, 2, \dots, n$; J 为各类样本到其相对应的聚类中心的加权距离平方和; u_{ij} 为隶属度, 表示样本 x_j 隶属于第 i 类的程度。

隶属矩阵 $U=[u_{ij}] \times n$, 该矩阵内的各个元素具有的约束条件如下所示

$$\begin{cases} 0 \leq u_{ij} \leq 1 \\ \sum_{i=1}^c u_{ij} = 1 \\ 0 < \sum_{j=1}^n u_{ij} < n \end{cases} \quad (18)$$

通过聚类得到的蓄热式电采暖集群可调节潜力量化指标包括: 蓄热式电采暖集群上调容量和下调容量。

考虑用户舒适约束的状态队列(SQ)控制模型如图2所示。

图2 在 t 时刻的状态队列模型示意Fig. 2 Schematic of the state queue model at time t

假设同一区域共有20个家庭的电热泵参与激励响应控制,若以状态变量 n_i 描述第 i 个电热泵的“开启”或者“关闭”状态,则每一时刻存在20个状态变量。根据当前时刻室内温度 θ_{room} 量测值的高低,这些状态值分布于队列不同位置。图中有5个电热泵处于“打开”状态($n_i=1$),15个处于“关断”状态($n_i=0$)。根据室内温度在变化范围 $[\theta_{on}^{after}, \theta_{off}^{after}]$ 之内(“after”代表电热泵受控后状态),定义了电热泵的可控范围 $[\theta_{on}^{after}, \theta_{off}^{after}]$ 和 $[\theta_{on}^{after}, \theta_{off}^{after}]$,如图1中灰色区域所示。在可控温度范围内的电热泵可参与响应控制,在可控温度范围外的电热泵设备,认为其开启或者关停的时间没有达到设备操作约束限制要求,会影响用户的正常使用,因此不能参与响应控制。

该20个电热泵可以视为一个能效电机模型,该能效电机在 $t + \Delta t$ 时刻出力调节的上下边界 P_{max} 、 P_{min} 可以表示如下

$$\begin{cases} P_{min}(t + \Delta t) \leq P_{HP}(t + \Delta t) \leq P_{max}(t + \Delta t) \\ P_{max}(t + \Delta t) = P_{HP}(t) + \sum_{\substack{\theta_{a,i}[t + \Delta t] \in (\theta_{on}^{after}, \theta_{off}^{after}) \\ n_i[t + \Delta t] = 1}} P_{rated,i} \\ P_{min}(t + \Delta t) = P_{HP}(t) - \sum_{\substack{\theta_{a,i}[t + \Delta t] \in (\theta_{on}^{after}, \theta_{off}^{after}) \\ n_i[t + \Delta t] = 0}} P_{rated,i} \end{cases} \quad (19)$$

式中: P_{HP} 为蓄热式电热泵实际响应值; $\theta_{a,i}$ 为第 i 个电热泵的室内温度; $[P_{max}, P_{min}]$ 为电热泵的响应调节上下边界,定义为能效电机的出力边界; $P_{rated,i}$ 为第 i 个电热泵的额定功率。按照上述定义,两个相邻时刻 t 、 $t + \Delta t$ 能效电场的主要运行参数如图3所示。

其中,能效电机模型包括4个主要参数,分别是:由用户舒适约束边界等价的能效电机出力的上下边界 P_{max} 、 P_{min} ;不受控条件下电热泵群的自然功率消耗 P_{HP}^0 ,即能效电机不受控运行点出力;受控条件下电热泵群功率消耗 P_{HP} ,即能效电机受控运行

点出力。由这4个参数可以进一步定义能效电机的其他主要技术参数,具体见式(20)一式(22)。

(1) 受控调节量及时长表达式为

$$\Delta P_{HP}(t + \Delta t) = \Delta P_{HP}(t + \Delta t) - P_{HP}^0(t + \Delta t) \quad (20)$$

$$t_{DR} = \frac{c_{TS} \cdot \rho \cdot V \cdot |T_{TS}^{max/min} - T_{TS}|}{P_{HP}(t + \Delta t) \cdot \eta}$$

(2) 上调容量

$$\Delta P_{HP}^{up}(t + \Delta t) = P_{max}(t + \Delta t) - P_{HP}^0(t + \Delta t) \quad (21)$$

(3) 下调容量

$$\Delta P_{HP}^{down}(t + \Delta t) = P_{HP}^0(t + \Delta t) - P_{min}(t + \Delta t) \quad (22)$$

式中: ΔP_{HP} 为能效电机的储能或释能作用,即在受控状态下,电热泵群可以吸纳或削减的额外热储能; ΔP_{HP}^{up} 、 ΔP_{HP}^{down} 为能效电机的出力调节可行域,即当前时刻储能或释能的可调节范围。特别值得指出的是,下调容量 ΔP_{HP}^{down} 为了能效电厂的最大节电能力。

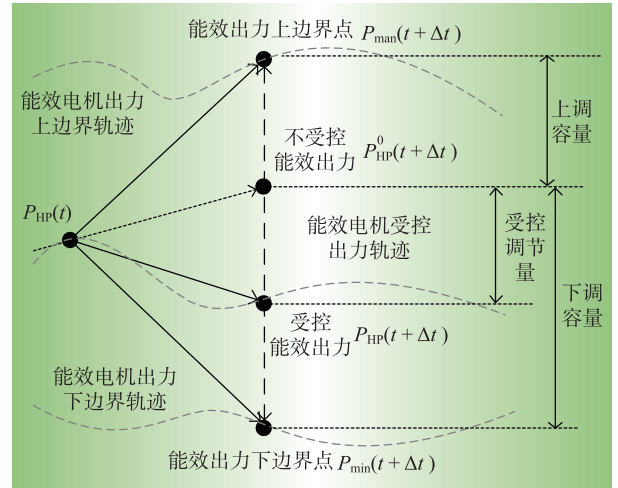


图3 能效电机模型

Fig. 3 Energy-efficient motor model

2 可调节潜力算例分析

利用定义的蓄热式电采暖潜力量化指标,设置不同使用场景,研究不同场景下的蓄热式电采暖装置的可调节潜力。

2.1 场景I

设单一用户蓄热式电采暖电热泵额定功率参考目前市销售常见规格,选为5 kW,其全天负荷能效电机响应控制见图4,设定每隔30 min重新进行一次调度。当负荷为正时表示蓄热式电采暖设备处于耗电状态(如图中横坐标12处),此时蓄热式电采暖相当于负荷;当负荷为负时表示蓄热式电采暖设备处于放电状态(如图中横坐标16处),此时蓄热式电采暖可等效为能效电机出力状态。

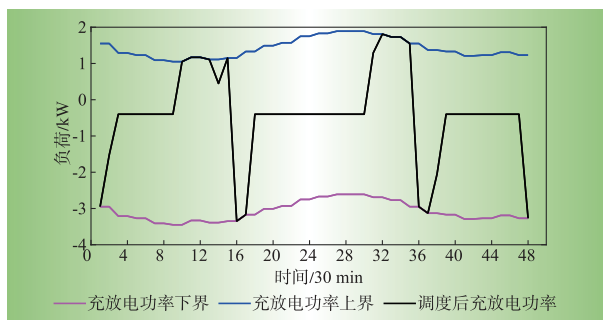


图4 单台蓄热式电采暖负荷可调节潜力示意

Fig. 4 Schematic of adjustable potential of a single regenerative electric heating load

2.2 场景II

选取天津西青区某农村100户具备集中式和分布式蓄热式电采暖改造条件的民居冬季采暖场景,总采暖面积10 000 m²,年采暖天数150 d。分析该地区居民使用集中式蓄热电锅炉的可调节潜力,基础数据如表1所示。

表1 设备参数

Table 1 Device parameters

设备	参数	取值
集中式电锅炉	P_{HP}/MW	1.8
	$\lambda_{cor}/\%$	99
蓄热水箱	V_s/m^3	462
钢铝复合散热器	N/m^2	4 700

调度结果如图5和图6所示,含蓄热设备的电锅炉最大可上调负荷217.228 kW,持续23.69 h。最大下调负荷988.898 kW,持续5.20 h。因此可利用蓄热水箱参与电网有功调度。

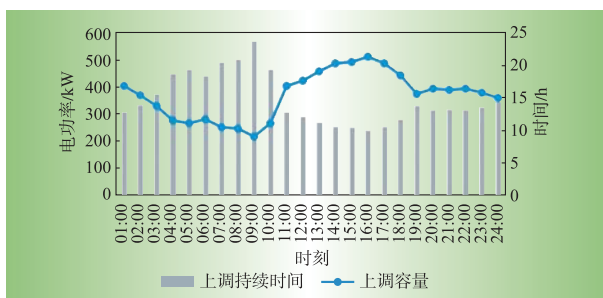


图5 上调容量及持续时间

Fig. 5 Increase capacity and duration

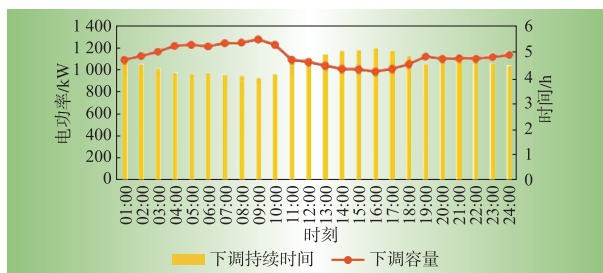


图6 蓄热式电采暖负荷可调节潜力示意

Fig. 6 Schematic of adjustable potential of regenerative electric heating load

3 结束语

本文分别考虑单体和集群蓄热式电采暖,并量化蓄热式电采暖的可调节潜力指标,研究不同场景不同时间尺度下的可调节潜力。

场景I得到单体蓄热式电采暖充放电功率的上下界,对其进行优化调度;场景II根据集群蓄热式电采暖的上调容量和下调容量,得到可调节潜力。通过潜力分析结果可采用灵活的优化控制实现系统停电不停暖、减小电网运行压力的目标,为后续蓄热式电采暖的经济效益研究奠定基础。D

参考文献:

- [1] 宋杰,张卫国,李树鹏,等.蓄热式电采暖负荷参与风电消纳运行策略研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(3):80-87.
SONG Jie, ZHANG Weiguo, LI Shupeng, et al. Research on operation strategy of regenerative electric heating load participating in wind power consumption[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3):80-87.
- [2] 石亮波,周云海,宋德璟,等.考虑配电网安全稳定运行的蓄热式电采暖多目标优化配置[J].科学技术与工程,2022,22(29):12 883-12 891.
SHI Liangbo, ZHOU Yunhai, SONG Dejing, et al. Multi-objective optimal configuration of regenerative electric heating considering the safe and stable operation of distribution network[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(29):12 883-12 891.
- [3] 董晓颖,李拓,苏娟,等.配电网与蓄热式电采暖负荷的优化匹配策略[J].电力需求侧管理,2021,23(5):24-28.
DONG Xiaoying, LI Tuo, SU Juan, et al. Optimal matching strategy between distribution network and regenerative electric heating load[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(5):24-28.
- [4] 崔屹峰,李珍国,杨金庆,等.考虑需求差异的户用蓄热式电采暖优化运行策略[J].电力系统自动化,2021,45(7):116-122.
CUI Yifeng, LI Zhenguo, YANG Jinqing, et al. Optimal operation strategy of household regenerative electric heating considering demand difference[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(7):116-122.
- [5] 张华鲁,严干贵,石杰,等.蓄热式电采暖柔性负荷特性建模及可调节潜力研究[J].高电压技术,2022,48(6):2 108-2 116.
ZHANG Hualu, YAN Gangui, SHI Jie, et al. Modeling of flexible load characteristics of regenerative electric heating and study on adjustable potential[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6):2 108-2 116.

作者简介:

屈博(1985),男,辽宁铁岭人,高级工程师,研究方向为能源互联网、电能替代、综合能源等;

方明慧(1998),女,通信作者,陕西安康人,硕士研究生,研究方向为电能替代。

(责任编辑 水 鸽)