

计及用户行为差异性和配电网潮流的电采暖负荷群优化调度策略研究

马涛¹, 李津¹, 曹晓波¹, 马雨薇², 蔡瑶², 卢志刚²

(1. 国网河北省电力有限公司雄安供电公司, 河北保定 071600; 2. 燕山大学电力电子节能与传动控制
河北省重点实验室, 河北秦皇岛 066004)

摘要:电采暖负荷作为一种优质的需求响应资源, 可通过集群优化调度改善配网运行。为了实现合理调度电采暖负荷, 提出一种计及用户行为差异性和配电网潮流的电采暖负荷群优化调度策略。首先对电采暖负荷可控容量预测机理进行分析。其次根据用户需求响应行为影响因素, 将用户整合为多个电采暖负荷聚合体, 并对各群体进行了热舒适度设计及可控容量求解。然后考虑配电网潮流约束, 建立以负荷波动最小为目标的电采暖负荷群优化调度模型。最后算例分析表明, 该优化调度模型可以提高电采暖负荷响应预测的准确度, 改善配电网的削峰填谷效果, 有利于系统经济安全运行。

关键词:电采暖负荷; 优化调度; 用户行为差异性; 配网潮流

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.01.009 中图分类号: TM614 文章编号: 1673-9140(2023)01-0077-11

Research on optimal dispatch strategy of electric heating load groups considering user behavior difference and distribution network power flow

MA Tao¹, LI Jin¹, CAO Xiaobo¹, MA Yuwei², CAI Yao², LU Zhigang²

(1. Xiongan Power Supply Company, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Baoding 071600, China; 2. Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation & Motor Drive of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: As a high-quality demand response resource, electric heating load groups can improve the operation of distribution network through optimization dispatch. In order to achieve reasonable dispatching of electric heating loads, an optimal strategy for electric heating load groups that takes into account user behavior difference and distribution network flow is proposed. At first, the prediction mechanism of the controllable capacity of electric heating load is analyzed. Secondly, according to the influencing factors of user demand response behavior, the users are integrated into multiple electric heating load aggregates, and the thermal comfort design and controllable capacity solution of each group are carried out. Considering the power flow constraints of the distribution network, an optimal dispatch model for electric heating load groups with the goal of minimizing load fluctuations is established. The example analysis shows that the optimal scheduling model can improve the accuracy of electric heating load response prediction, improve the effect of peak-cutting and valley filling in the distribution network, and is conducive to the economic and safe operation of the system.

Key words: electric heating load; optimal dispatch; user behavior difference; distribution network flow

收稿日期: 2021-08-13; 修回日期: 2021-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(61873225); 河北省自然科学基金(E2020203205); 河北省电力有限公司科技项目(5204XQ20008R)

通信作者: 卢志刚(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统经济运行与控制研究; E-mail: zhglu@ysu.edu.cn

为了应对全球气候变化,中国于2020年提出“碳达峰、碳中和”目标,确定绿色低碳的发展方向,积极推动能源转型,加大可再生能源供电比例,提高能源需求侧电气化水平。针对建筑供暖,大力推进电采暖清洁供暖方式,可促进用能低碳化,助力“双碳”目标的实现^[1-2]。当前中国冬季电采暖负荷比例逐渐加重,又考虑到电采暖负荷是一种具有时移性的柔性负荷,故而其势必会成为电力系统安全运行中非常可观的需求响应资源^[3-4]。但是,电采暖负荷具有较强的随机性与动态性,大规模无序接入配电网极易造成尖峰负荷、线路运行不经济等问题,不利于电力系统的安全稳定运行^[5-6]。因此,有必要针对电采暖负荷的集群优化调度策略展开研究。

针对电采暖负荷的优化调度问题,目前已有相关研究。文献[7]建立了电采暖负荷聚合模型,并通过优化调度该聚合体实现了电网的削峰填谷;文献[8]建立了基于建筑参数的电采暖负荷模型及调峰能力评估模型,并从时移电量和调峰成本两方面对严寒地区典型居民楼电采暖负荷调峰能力进行了研究;文献[9]提出了一种基于热电联合调度的电采暖集群控制策略,在一定程度上可以削减煤耗,实现了可再生能源发电的就地消纳。然而用户具有行为差异性,电采暖负荷的需求响应行为受家庭结构、经济状况、房屋建筑影响,但以上文献均未提及。文献[10]提出了考虑用户个人特性,差异化用户热舒适温度模型,提高了电采暖负荷响应特性曲线的准确性,但并未基于该模型展开以实现电网负荷调节为目标的优化调度研究。

大量电采暖负荷的接入会给电力系统潮流、运行调控等方面带来较大影响,可能造成系统潮流分配不合理、网络损耗增大等问题^[11]。因此在对电采暖负荷进行优化调度研究时,有必要考虑线路的潮流问题。目前已有较多文献针对配电网中潮流优化问题展开研究,文献[12]建立了主动配电网有功损耗最小的最优潮流模型,提高了配电网的供电可靠性和电能质量。但是,在有关配电网中电采暖负荷优化调度的研究中,尚未涉及线路潮流优化问题。

综上,本文对计及用户行为差异性和配网潮流的电采暖负荷群的优化调度进行了研究。首先建立电采暖负荷集群调度机制,并基于房间等效热参数模型和电采暖设备轮控策略分析电采暖负荷可控容量的预测机理;其次考虑用户行为差异性,实现负荷聚合商的可控容量预测;然后考虑到电采暖负荷群对配网潮流影响,建立了一种计及用户行为差异性和配网潮流的电采暖负荷群优化调度模型。最终利用某地区一条10 kV线路进行算例仿真分析,验证所提模型的有效性。

1 电采暖负荷可控容量预测机理

1.1 电采暖负荷集群调度机制

电采暖负荷较为分散,因此参与需求响应调控时,需要通过一定的方法对大规模分散型电采暖负荷进行集群处理,从而降低电力调度中心对大量电采暖负荷进行调度时的操作复杂性和不易操控性,进而提高电采暖负荷参与需求响应的可行性及合理性。

电采暖负荷的集群调度机制如图1所示。当电力调度中心与负荷聚合商进行双边交易时,负荷聚合商首先利用传感器获取各个电采暖聚合体的历史用能数据、初始室内温度等运行状态;其次,根据用户行为特性信息及电采暖设备的运行参数对其所管辖的电采暖负荷进行集群处理,最终将组成 k 个电采暖负荷聚合体;然后,对已有的运行信息及数据进行处理,对聚合体的可控容量进行预测,最终得到各聚合商所有电采暖负荷的可控容量。同时,利用信息传输通道将所管辖台区的可控容量传递给电力调度中心,调度中心考虑其自身的利益,其中包括峰谷差损失、潮流分布等,根据各负荷聚合商提供的投标数据确定整体调度量安排。此处,可控容量指在满足用户舒适度的要求下,负荷聚合商可以调度的负荷量。在电网需要对负荷进行调控时,负荷聚合商通过智能电网设备对用户室内温度进行检测并对其电采暖设备实行开断控制。

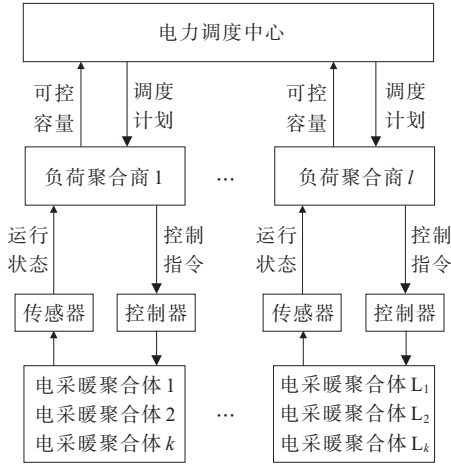


图1 电采暖负荷集群调度机制

Figure 1 Electric heating load groups dispatch mechanism

1.2 房间等效热参数模型

电采暖负荷建模是研究电采暖负荷参与需求响应的基础,可以利用建筑围护结构的蓄热性能优化电采暖设备的运行策略。建筑物包含墙体、门窗等围护结构,对热量具有一定的存储作用,因此在构建热模型时要考虑建筑物的蓄热能力。而且围护结构的蓄热能力越强,建筑物的热惯性越大,室内温度越不易受到外界环境温度的影响^[13]。因此,本文计及墙体、空气、门窗等各媒质间温度的差异性及储热能力,建立了室内温度与电采暖设备的工作状态、相关热参数间的状态方程。其公式推导如下。

设第 t 时刻电采暖设备的制热量为

$$Q_{z,t} = \eta_{\text{cop}} p \quad (1)$$

式中, p 为电采暖设备的电功率; η_{cop} 为电采暖设备的热转换效率。

第 t 时刻房间散热量为

$$Q_{s,t} = \sum_{i=1}^n K_i F_i (T_{\text{in}}^t - T_{\text{out}}^t) \quad (2)$$

式中, K_i 为围护结构的散热系数; F_i 为围护结构的散热面积; T_{in}^t 为 t 时刻的室内温度值; T_{out}^t 为 t 时刻的室外温度值; n 为围护结构的个数。

第 t 时刻房间储热量为

$$Q_{c,t} = C \frac{dT}{dt} = Q_{z,t} - Q_{s,t} \quad (3)$$

式中, dT/dt 为室内温度变化量; C 为房间等值热容。

房间的最终热动态模型为

$$C \frac{dT}{dt} = \eta_{\text{cop}} p - (T_{\text{in}}^t - T_{\text{out}}^t)/R \quad (4)$$

式中, R 为房间等值热阻。

在该模型的基础上进行简化,默认同一时间内室内气体与固体的温度相同,当电采暖设备开机运行时,室内温度变化为

$$T_{\text{in}}^{t+1} = T_{\text{out}}^{t+1} + \eta_{\text{cop}} p R - [T_{\text{out}}^{t+1} + \eta_{\text{cop}} p R - T_{\text{in}}^t] \epsilon \quad (5)$$

其中, $\epsilon = e^{-\Delta t/RC}$, Δt 为时间间隔。

当电采暖设备关机时,室内温度变化为

$$T_{\text{in}}^{t+1} = T_{\text{out}}^{t+1} - (T_{\text{out}}^{t+1} - T_{\text{in}}^t) \epsilon \quad (6)$$

此外,房屋的等效热参数模型也可采用如图2所示模型表示建筑物的热传递过程。针对该模型进行简化,即为式(5)、(6)所示的电采暖设备功率与室温关系^[14-15]。

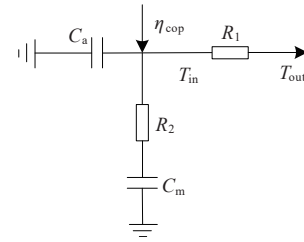


图2 等效热参数模型

Figure 2 Equivalent thermal parameter model

图2中, R_1 、 C_a 分别为室内空气的热阻和热容; R_2 、 C_m 分别为室内固体的热阻和热容; T_{in} 为室内温度; T_{out} 为室外温度。

1.3 轮控策略

负荷聚合商在调度电采暖负荷群时,采用轮控策略实现对所有电采暖设备进行控制,如图3所示,其室温控制区间为 $[T_{\text{min}}, T_{\text{max}}]$,且控制周期内室外温度设为恒定值^[14]。在该策略下,电采暖设备平均分为 τ_c 组,每组电采暖设备在一个控制周期 τ_c 内处于开启状态(白色)的时间为 τ_{on} ,处于关停状态(灰色)的时间为 τ_{off} 。当温度达到 T_{min} 时,电采暖设备开启;当温度达到 T_{max} 时,电采暖设备关停。若控制周期为 τ_c 分钟,则可分为 τ_c 个状态,每组电采暖负荷在同一时刻处于图3中不同的状态,且每个状态的时间间隔为 1 min,进入下一分钟的状态时总有一组

电采暖设备关停,另一组开启,这样即可保证每个时刻开启的电采暖负荷数目相同,且比例为 $\tau_{\text{on}}/\tau_{\text{c}}$ 。

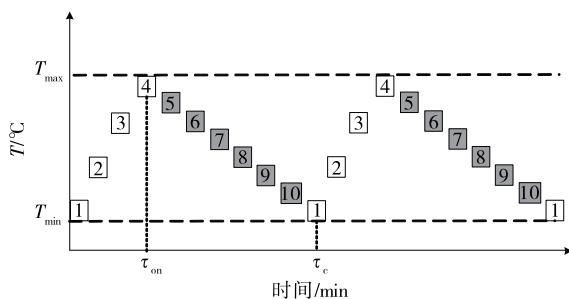


图3 电采暖设备轮控策略

Figure 3 Electric heating equipment rotation control strategy

为了更清晰地对电采暖负荷集群轮控策略进行解释,在此举例说明:设电采暖设备的控制周期为10 min,开启时间为4 min,关停时间为6 min,则可以得到10组电采暖负荷在2个控制周期内的状态分布,如表1所示,灰色部分为关停的电采暖负荷组。

表1 电采暖负荷的状态分布情况

Table 1 State distribution of electric heating load

时间间隔/min	不同组数下的电采暖负荷状态									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	10	9	8	7	6	5	4	3	2
2	2	1	10	9	8	7	6	5	4	3
3	3	2	1	10	9	8	7	6	5	4
4	4	3	2	1	10	9	8	7	6	5
5	5	4	3	2	1	10	9	8	7	6
6	6	5	4	3	2	1	10	9	8	7
7	7	6	5	4	3	2	1	10	9	8
8	8	7	6	5	4	3	2	1	10	9
9	9	8	7	6	5	4	3	2	1	10
10	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
11	1	10	9	8	7	6	5	4	3	2
12	2	1	10	9	8	7	6	5	4	3
13	3	2	1	10	9	8	7	6	5	4
14	4	3	2	1	10	9	8	7	6	5
15	5	4	3	2	1	10	9	8	7	6
16	6	5	4	3	2	1	10	9	8	7
17	7	6	5	4	3	2	1	10	9	8
18	8	7	6	5	4	3	2	1	10	9
19	9	8	7	6	5	4	3	2	1	10
20	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

则第 x 时段参与负荷控制的电采暖负荷的可控容量 C_x 计算公式为

$$C_x = \frac{\tau_{\text{off}}}{\tau_{\text{c}}} \cdot np \quad (7)$$

负荷聚合商根据电采暖负荷可控容量预测结果,即可制定日前市场的需求响应资源供应量投标方案。

2 计及用户行为差异性的可控容量预测

未考虑用户行为差异性时,电采暖负荷可控容量预测与实际结果偏差较大,会使得需求响应曲线不够准确^[16]。因此本文主要建立了计及用户行为差异性的可控容量预测模型,首先根据用户的家庭结构、经济状况、房屋建筑对用户进行分类,针对不同用户进行热舒适度设计,然后计算各台区对各类用户电采暖设备实施轮控策略时的可控容量大小,最终求得各台区的可控容量。

2.1 电采暖负荷热舒适度设计

对式(7)分析可知,可控容量的计算受到热参数的影响。其中,相同户型的房间由于具有相近的墙体面积及房间面积,因此,具有相近的热阻参数和热容参数。为了使得电采暖负荷可控容量的预测更加准确,在此根据热参数对房间进行分类,从而可以将具有相同热参数的房间分为一类。

同时,电采暖设备的启停受用户所设置的采暖温度范围的影响,而用户具有行为差异性,不同群体的年龄、健康状况、经济水平不同,故其所感受的最佳热舒适度不同,采暖温度范围设置不同。在此,首先依据用户的年龄及身体健康状况分为两类群体:青年群体和老年群体,然后采用预测平均投票(predicted mean vote, PMV)的热舒适评价指标计算不同群体的最佳热舒适度,即

$$I_{\text{PMV}} = aT_a + bP_v - c \quad (8)$$

式中, I_{PMV} 为PMV指标值; a 、 b 、 c 均为已知参数。假设人体新陈代谢率为1.2,风速 $v_a < 0.2$ m/s,暴露时间分别为1、2、3 h,代入式(8)进行计算,得到不同用户群体PMV评价指标中模型参数及最佳热舒适度^[10],如表2所示。

表 2 不同用户热舒适度模型参数
Table 2 Thermal comfort model parameters for different users

用户类别	衣着热/ CLO	a	b	c	最佳热舒 适度/ $^{\circ}\text{C}$
青年群体	0.5	0.272	0.248	7.245	24
	1.0	0.242	0.614	5.587	24
老年群体	1.0	0.149	-0.107	2.640	26
	1.5	0.148	-0.137	2.524	24

由于青年群体与老年群体的经济状况不同,会影响其取暖温度范围设置,因此在此基础上,根据各个群体的收入状况再次进行划分:由于青年群体多为上班族,故将其按照经济状况分为高收入人群、中等收入人群及低收入人群;考虑到老年群体多为退休人群且大部分无劳动能力,将老年群体分为中等收入人群与低收入人群。最终共分为 5 类:高收入青年群体、中收入青年群体、低收入青年群体、中收入老年群体、低收入老年群体。用户的热舒适度对电采暖负荷的响应能力大小具有重要影响,但目前文献为考虑用户行为差异性,多采用相同的热舒适度范围^[17-18]。但是,不同收入群体会受到分时电价的影响,对热舒适度要求不同。经济条件良好的群体,受其从事工作、环境的影响,大多数晚上有社交活动,在家的时间段多为夜晚,且受分时电价影响不大,因此在该时间段内,室内温度设置较高,整个房间处于热舒适状态;工薪阶层受工作时间、性质的限制,生活较有规律,在家的时间段多为 19:00—07:00,且分时电价对其采暖温度设置存在一定影响;低收入群体受经济条件限制,仅在室内环境恶劣时,即 19:00—22:00 时间段内对房间热舒适度要求高;对于老年群体,在家时间与室外气温有关,当室外气温舒适时,一般在户外活动;供暖季节时,一般室外气象条件较差,受年龄及身体健康状况的影响,该群体基本在室内活动。

2.2 可控容量预测

设在第 t 时段,室外温度为 $T_{t,\text{out}}$,不同类型用户所采用的电采暖设备的功率及所设置的热舒适度范围不同。设第 i 类户型的电采暖设备功率为 p_i ,第 j 类用户的热舒适度范围为 $[T_{i,j,t,\text{min}}, T_{i,j,t,\text{max}}]$,结合电采暖设备制热情况下的动态热模型及轮控策略,

对可控容量的求解,可得第 i 类户型的第 j 类用户在第 t 个时间段其电采暖设备的控制周期、开启时间及关停时间为

$$\begin{cases} T_{i,j,t,\text{min}} = T_{t,\text{out}}(1 - \epsilon_i^{\tau_{i,j,t,\text{off}}}) + T_{i,j,t,\text{max}}\epsilon_i^{\tau_{i,j,t,\text{off}}} \\ T_{i,j,t,\text{max}} = \\ (T_{t,\text{out}} + \eta_i p_i R_i)(1 - \epsilon_i^{\tau_{i,j,t,\text{on}}}) + T_{i,j,t,\text{min}}\epsilon_i^{\tau_{i,j,t,\text{on}}} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\epsilon_i = e^{-1/R_i C_i}$; R_i 、 C_i 分别为第 i 类户型建筑物的热阻、热容参数; η_i 为第 i 类户型电采暖设备的效率; p_i 为第 i 类户型电采暖设备的电功率; $\tau_{i,j,t,c}$ 、 $\tau_{i,j,t,\text{on}}$ 、 $\tau_{i,j,t,\text{off}}$ 分别为第 i 类户型的第 j 类用户的电采暖设备在第 t 个时间段的控制周期、开启时间、关停时间; $T_{i,j,t,\text{min}}$ 、 $T_{i,j,t,\text{max}}$ 分别为第 i 类户型的第 j 类用户在第 t 个时间段的热舒适度范围下限、上限。

整理可得,关停时间、开启时间及控制周期为

$$\begin{cases} \tau_{i,j,t,\text{off}} = R_i C_i \ln \frac{T_{\text{out},t} - T_{i,j,t,\text{max}}}{T_{\text{out},t} - T_{i,j,t,\text{min}}} \\ \tau_{i,j,t,\text{on}} = -R_i C_i \ln \frac{T_{\text{out},t} + \eta_i p_i R_i - T_{i,j,t,\text{max}}}{T_{\text{out},t} + \eta_i p_i R_i - T_{i,j,t,\text{min}}} \\ \tau_{i,j,t,c} = \tau_{i,j,t,\text{on}} + \tau_{i,j,t,\text{off}} \end{cases} \quad (10)$$

则第 i 类用户的电采暖设备 t 时段负荷可控容量:

$$g_{i,t} = \sum_{j=1}^5 \frac{\tau_{i,j,t,\text{off}}}{\tau_{i,j,t,c}} \cdot n_{i,j} \cdot p_i \quad (11)$$

图 1 中第 l 个负荷聚合商 t 时段负荷可控容量:

$$C_{l,t} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^5 \frac{\tau_{i,j,t,\text{off}}}{\tau_{i,j,t,c}} \cdot n_{l,i} \cdot p_i \quad (12)$$

式中, $n_{l,i}$ 为第 l 个负荷聚合商中第 i 类电采暖设备的台数。计及用户行为差异性的电采暖负荷的可控容量预测流程如图 4 所示。

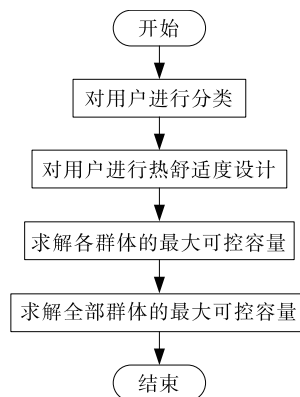


图 4 最大可控容量预测流程

Figure 4 Flow chart of maximum controllable capacity prediction

3 模型建立

本文主要考虑了用户的行为差异性对电采暖负荷响应能力造成的影响,然后在计及用户行为差异性的基础上对用户的热舒适度进行设计,并考虑系统的线路潮流约束,建立了以负荷波动最小为目标的电采暖负荷群优化调度模型。

3.1 目标函数

为了系统的安全稳定运行,电网对峰谷差进行调整,在计及用户行为差异性的基础上,建立以负荷波动最小为目标的电采暖负荷集群调度模型为

$$F = \min \left(\frac{\max \left(\sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^N (P_{l,t}) \right) - \min \left(\sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^N (P_{l,t}) \right)}{\max \left(\sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^N (P_{l,t}) \right)} \right) \quad (13)$$

式中, $P_{l,t}$ 为第 l 个负荷聚合商在第 t 时刻的电量大小; T 为调度时段,在此取为24时刻; n 为参与电网调峰的负荷聚合商的个数。

3.2 约束条件

1) 电采暖负荷可控容量约束。

$$P_{l,t,\min} \leq P_{l,t} \leq P_{l,t,\max} \quad (14)$$

其中

$$P_{l,t,\max} = P_{l,e,t} + C_{l,t} \quad (15)$$

式(15)、(16)中, $P_{l,t,\min}$ 为最小功率,求取时设置电采暖低温运行,温度范围设为14~15℃; $P_{l,e,t}$ 为负荷聚合商 l 在 t 时刻的基础负荷值; $P_{l,t,\max}$ 、 $P_{l,t,\min}$ 分别为负荷聚合商 l 第 t 时刻的负荷取值上限及下限。

2) 变压器容量约束。

$$P_{m,t} \leq S_{m,\max} \cos \varphi \quad (16)$$

式中, $P_{m,t}$ 为在 t 时刻变压器 m 的负荷值; $S_{m,\max}$ 为变压器 m 最大容量; $\cos \varphi$ 为变压器功率因数。

3) 线路传输功率约束。

$$\begin{cases} \max(|P_{ij}^t|) \leq P_{ij,\max}(i,j) \\ \max(|Q_{ij}^t|) \leq Q_{ij,\max}(i,j) \end{cases} \quad (17)$$

式中, $P_{ij,\max}$ 、 $Q_{ij,\max}$ 分别为节点 i,j 之间线路可传输的最大有功功率、最大无功功率。

4) 线路传输最大电流约束。

$$\max(|I_{ij}^t|) \leq I_{ij,\max}(i,j) \quad (18)$$

式中, $I_{ij,\max}$ 为节点 i,j 之间线路可传输的最大电流。

5) 节点电压约束。

$$0.95U \leq U_{i,t} \leq 1.05U \quad (19)$$

式中, $U_{i,t}$ 为节点 i 的电压; U 为标准电压。

6) 配网潮流约束。

$$P_{b,t}^D + \sum_{l \in b} P_{l,b,t}^C = \sum_{g \in b} P_{g,t}^P \quad (20)$$

$$Q_{b,t}^D + \sum_{l \in b} Q_{l,b,t}^C = \sum_{g \in b} Q_{g,t}^P \quad (21)$$

$$V_{j,t}^2 =$$

$$V_{i,t}^2 + 2(r_l P_{l,i,t} + x_l Q_{l,i,t}) + (r_l^2 + x_l^2) \cdot i_{ij}^2 \quad (22)$$

$$i_{ij,t}^2 = \frac{P_{l,i,t}^2 + Q_{l,i,t}^2}{V_{i,t}^2} \quad (23)$$

$$P_{ij,t} = i_{ij,t}^2 r \quad (24)$$

$$Q_{ij,t} = i_{ij,t}^2 x_l \quad (25)$$

式(20)~(26)中, $P_{b,t}^D$ 为 t 时刻任一节点注入的有功功率; $P_{Di,t}$ 为 t 时刻节点 i 的有功负荷; $P_{g,t}^P$ 、 $Q_{g,t}^P$ 为 t 时刻发电机组的有功、无功出力; $l \in b$ 、 $g \in b$ 为所有与节点相连的输电线路与发电机组的集合; $V_{j,t}$ 为节点 j 在 t 时刻的电压; i_{ij} 为节点 i,j 之间的电流; $P_{l,i,t}$ 、 $Q_{l,i,t}$ 分别为流过节点 i 与 j 之间的有功电流与无功电流; $P_{ij,t}$ 、 $Q_{ij,t}$ 分别为流过节点 i 与 j 的有功损耗与无功损耗。

对式(23)进行SOC松弛约束,可得:

$$i_{ij,t}^2 \geq \frac{P_{l,i,t}^2 + Q_{l,i,t}^2}{V_{i,t}^2} \quad (26)$$

4 算例分析

4.1 仿真参数设置

仿真算例选择某地区一条包含37个台区的10 kV配电网线路作为算例进行仿真。由于冬季持续低温,使得电采暖负荷急剧增加,电网峰谷差增大,因此电网需向负荷聚合商购买电量,以此保证电力系统的安全稳定运行。其中该线路中共9个台

区含有电采暖负荷,将电采暖负荷根据地理位置进行集中管理,共分为 3 个负荷聚合商,分别为负荷聚合商 1、负荷聚合商 2 及负荷聚合商 3,各台区所含电采暖户数及所属负荷聚合商信息如表 3 所示。每个台区都设置一个控制器,完成相应的电采暖负荷可控容量的预测和电采暖设备的控制。

表 3 电采暖户数设置

Table 3 Electric heating household number setting

负荷聚合商	包含节点位置	电采暖户数
1	2,4,6	190
2	15,21,24	200
3	28,33,36	220

对热参数进行 K-Means 聚类后,设置聚类类别为 3 类,分别对应小户型、中户型与大户型,根据 K-Means 聚类法的计算方法,即可将所有房间聚为 3 类,并可求出各类型房间的平均热参数,其相对的空气源热泵的功率分别为 p_1 、 p_2 与 p_3 ,其中 $p_1 < p_2 < p_3$,得各户型对应的热参数如表 4 所示。

表 4 房间热参数设置

Table 4 Room thermal parameter setting

户型	热阻 R ($^{\circ}\text{C}/\text{kW}$)	热容 C ($\text{kW}\cdot\text{h}/^{\circ}\text{C}$)	功率 P /kW
小	5.47	0.12	5.0
中	5.86	0.16	6.0
大	6.12	0.20	7.2

4.2 用户热舒适度设计方案

根据用户行为差异性对不同用户群体进行热舒适度设计,其设计方案如表 5 所示,进行分析可知,对用户进行热舒适度设计后其采暖温度范围设计更加合理。纵向对比可以看出在白天家中无人、室外温度高且高峰时期电价较贵时段设置较低的温度区间,在夜间聚居、室外温度较低且低谷时期电价较低时设置较高的温度区间;横向对比可以看出,经济水平或健康水平较好的群体可设置较高的温度区间,经济水平或健康水平较差的群体设置较低的温度区间。根据用户自身行为差异性对热舒

适度进行设计,避免了全天 24 h 所有群体均设置相同的取暖温度带来的不合理性,保证为电网的调度提供更加精准的容量。

表 5 基于用户行为差异性的热舒适度设计方案

Table 5 Thermal comfort design scheme based on user behavior differences $^{\circ}\text{C}$

时段	热舒适度				
	高收入青年	中收入青年	低收入青年	中收入老年	低收入老年
00:00—07:00	[16,25]	[15,23]	[14,22]	[18,26]	[16,24]
07:00—12:00	[14,22]	[14,20]	[14,18]	[15,23]	[15,22]
12:00—16:00	[14,22]	[14,20]	[14,18]	[15,24]	[14,23]
16:00—19:00	[14,22]	[14,20]	[14,18]	[15,23]	[15,22]
19:00—22:00	[14,23]	[14,21]	[14,20]	[15,24]	[15,23]
22:00—24:00	[16,25]	[15,23]	[14,22]	[18,26]	[16,24]

4.3 电网负荷曲线及潮流优化结果

当居民电采暖负荷持续升高、负荷波动较大时,为保证电力系统安全稳定运行,电力公司向负荷聚合商购买需求响应资源。

通过天气预测数据获取次日室外温度曲线,如图 5 所示。然后,根据文 2.2 中有关可控容量的预测方法,得到各个台区控制器 24 h 的可控容量。其中,负荷聚合商 1 所管辖台区的可控容量预测结果如图 6 所示。该结果会受到室外温度及用户热舒适范围的影响,午间室外温度较高时可控电量较大,夜间室外温度较低时可控电量较小,该曲线与室外温度曲线趋势相似。

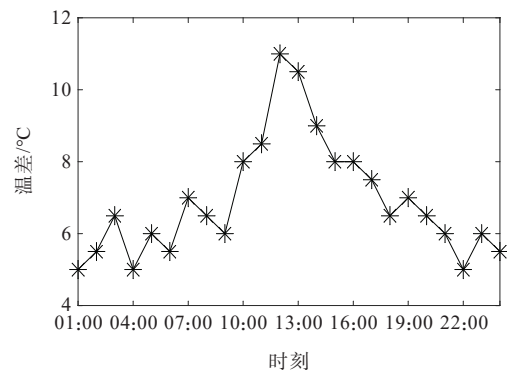


图 5 室外温度曲线

Figure 5 Outdoor temperature curve

当电网需要对负荷进行调整时,向聚合商购买电量,并考虑配电网潮流及台区控制器的可控容量等约束条件,进行实时响应,利用台区控制器进行控制,得到24 h负荷聚合商及线路负荷曲线优化结果如图7、8所示。

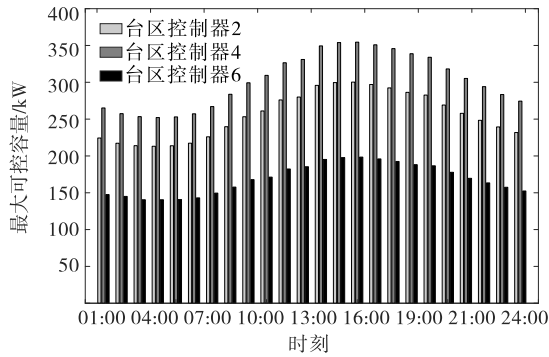


图6 负荷聚合商1各台区控制器可控容量求解

Figure 6 Solution of the controllable capacity of each station controller of load aggregator 1

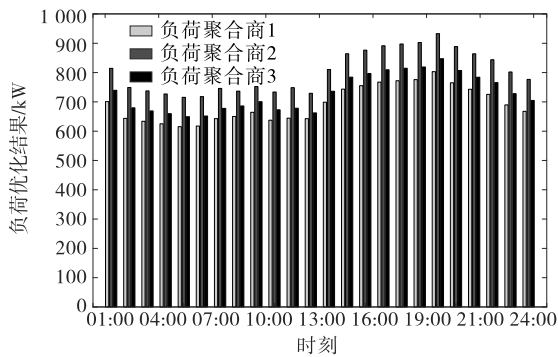


图7 负荷聚合商优化结果

Figure 7 Load aggregator optimization results

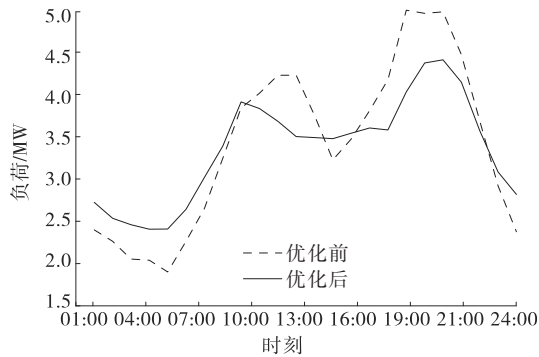


图8 负荷曲线优化结果

Figure 8 Load curve optimization results

由图8可知,优化后在一定程度上起到了削峰填谷的效果,由于夜间天气较为寒冷,因此电采暖负荷水平可以适当提高,而白天尤其是12:00—

15:00,室外温度较高,且上班族一般不在家中,因此负荷电采暖负荷水平可以适当调低。

将各台区优化后的负荷进行求和相加,考虑线路损失,得该线路24 h的负荷调度结果如图9所示。

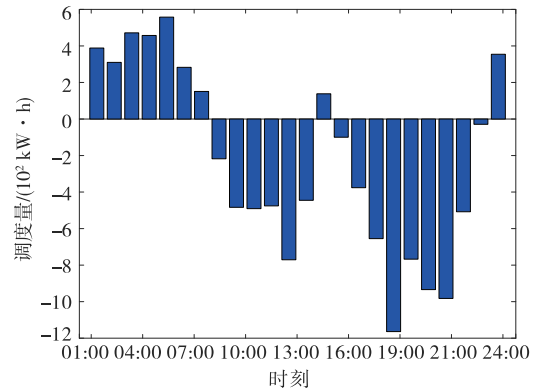


图9 电网24时刻负荷调度结果

Figure 9 24-hour load dispatch results of power grid

该线路在典型日优化前后的峰谷差如表6所示,优化前,该线路典型日中最大负荷为5.03 MW,最小负荷为1.9 MW,峰谷差为3.06 MW,优化后最大负荷为4.41 MW,最小负荷为2.42 MW,峰谷差为1.99 MW,下降了1.07 MW。

表6 优化前、后峰谷差对比

Table 6 Comparison of peak-valley difference before and after optimization

类别	峰谷差	最大负荷	最小负荷
优化前	3.06	5.03	1.97
优化后	1.99	4.41	2.42

该线路在典型日优化前后的网损如表7所示,根据线损率等于线路损耗除以供电量计算可得,优化前线损率为3.51%,优化后线损率为3.29%,优化后线路损耗下降了0.29 MW·h,线损率下降了0.22%,线路潮流更加合理。

表7 优化前、后网损对比

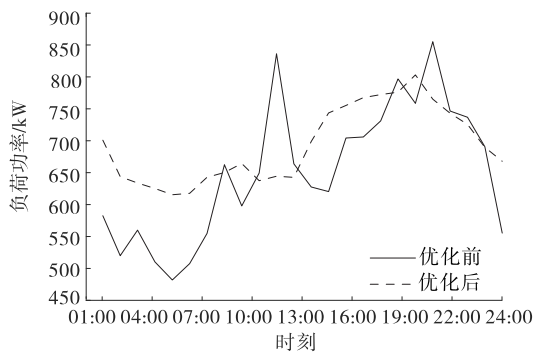
Table 7 Comparison of network loss before and after optimization

类别	线路损耗/(MW·h)	总用电量/(MW·h)	线损率/%
优化前	2.88	81.94	3.51
优化后	2.59	78.67	3.29

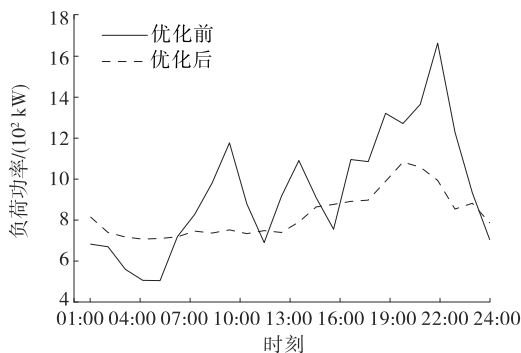
3个负荷聚合商的优化前后负荷曲线对比结果如图10所示。由图10可知,在早高峰时段08:00—10:00及晚高峰时段19:00—21:00时,通过对电采暖设备进行关停,牺牲部分用户舒适度可以达到削峰效果。但是由于傍晚温度较上午低,用户对采暖舒适度要求较高,因此在晚高峰时段用电量依旧比早高峰时段高。在谷段01:00—06:00及夜间22:00—24:00时,考虑夜间温度较低,在电网、负荷聚合商和用户的协调合作下,负荷聚合商通过远程控制,对部分停止运行的电采暖设备投入运行,使得负荷水平提高从而达到填谷的效果,且削减量与电网的高峰时段负荷曲线趋势一致,电量增量与

电网的谷段负荷曲线趋势一致。电网负荷水平越高,聚合商削减量越多,关停的电采暖设备越多;电网负荷水平越低,聚合商向用户购买的电量增量越多,开启的电采暖设备越多。且在电网削峰时段,大多为上下班高峰期,用户不在家中,对热舒适性要求较低;在填谷时段,大多为深夜及凌晨,对热舒适性要求较高。因此,可以在兼顾用户的热舒适需求下对系统进行削峰填谷,使得系统安全稳定运行。

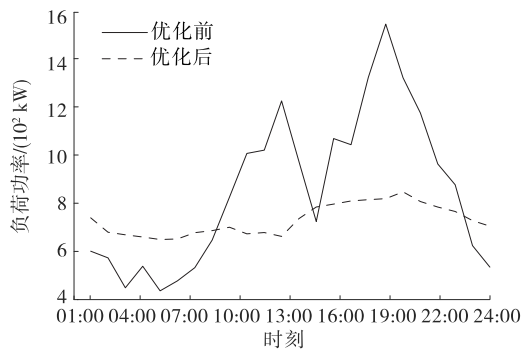
不同优化方式下电网峰谷差优化结果如表8所示。其中,不考虑用户行为差异性时(优化方式1),所有用户群体热舒适度范围全天24时刻均设置为14~22℃,优化后,该线路全天最大负荷为4.63 MW,最小负荷为2.51 MW,峰谷差为2.12 MW。考虑用户行为差异性时(优化方式2),对用户热舒适度进行设计。优化后,该线路全天最大负荷为4.41 MW,最小负荷为2.42 MW,峰谷差为1.99 MW。显然,考虑用户行为差异性后,峰谷差较不考虑用户行为差异性减小0.13 MW,削峰效果更好。



(a) 负荷聚合商1



(b) 负荷聚合商2



(c) 负荷聚合商3

图10 各负荷聚合商优化前后负荷曲线对比
Figure 10 Load curve comparison chart before and after optimization for aggregators

表8 不同优化方式峰谷差优化结果

Table 8 Different optimization methods peak-valley difference optimization results			
优化方式	峰谷差	最大负荷	最小负荷
1	2.12	4.63	2.51
2	1.99	4.41	2.42

不考虑用户行为差异性的优化负荷曲线、考虑用户行为差异性的负荷优化曲线与优化前负荷曲线对比如图11所示。

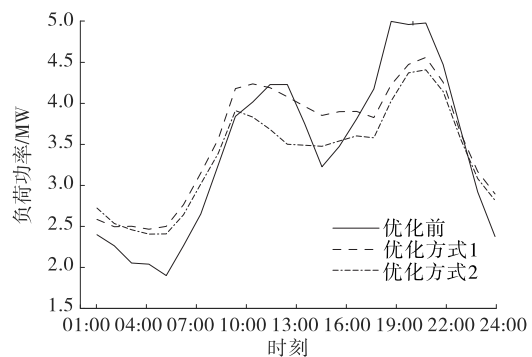


图11 负荷曲线优化结果
Figure 11 Load curve optimization results

由图11可知,当不考虑用户行为差异性时,对电采暖负荷群进行负荷控制后,也在一定程度上起到了削峰填谷的效果。但是对比考虑用户行为差异性的优化结果,效果较差,主要原因是未考虑到白天家中无人、室外温度高且高峰时期电价较贵等几种因素,因此使得在高峰时段08:00—11:00时刻优化效果较不理想。

5 结语

本文建立由负荷聚合商参与的电采暖群负荷群优化调度策略,并考虑用户行为差异性,针对不同用户的需求进行热舒适度设计,在保证系统潮流最优时对负荷进行调度,研究结论如下。

1) 本文建立不同户型下房间的等效热参数模型,在计算负荷可控容量时使得计算方法更加贴合实际,提高了需求响应的准确度。

2) 负荷聚合商考虑用户对舒适度与经济性的偏好,可以在保障用户的利益的同时提高其参与需求响应的积极性。

3) 考虑潮流约束可以保证在配网进行负荷调度时,功率分配更加合理,提高系统运行的经济性与安全性。

本文暂未考虑负荷不确定性对结果的影响,且在求解房间热参数时未考虑室内固体物与空气的热传递过程,这些内容将进一步研究。

参考文献:

- [1] 蔡绍宽. 双碳目标的挑战与电力结构调整趋势展望[J]. 南方能源建设, 2021, 8(3): 8-17.
CAI Shaokuan. Challenges and prospects for the trends of power structure adjustment under the goal of carbon peak and neutrality[J]. Southern Energy Construction, 2021, 8(3): 8-17.
- [2] 陈健勇, 李浩, 陈颖, 等. 空气源热泵空调技术应用现状及发展前景[J]. 华电技术, 2021, 43(11): 25-39.
CHEN Jianyong, LI Hao, CHEN Ying, et al. Application status and perspectives of air-source heat pump air conditioning technology [J]. Huadian Technology, 2021, 43(11): 25-39.
- [3] 卢志刚, 杨宇, 耿丽君, 等. 基于 Benders 分解法的电热综合能源系统低碳经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1922-1934+2208.
LU Zhigang, YANG Yu, GENG Lijun, et al. Low-carbon economic dispatch of the integrated electrical and heating systems based on benders decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1922-1934+2208.
- [4] 严干贵, 阚天洋, 杨玉龙, 等. 基于深度强化学习的分布式电采暖参与需求响应优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4140-4149.
YAN Qiangui, KAN Tianyang, YANG Yulong, et al. Demand response optimal scheduling for distributed electric heating based on deep reinforcement learning[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4140-4149.
- [5] WANG D, KE M, GAO X, et al. Distributed control of air-conditioning loads for voltage regulation in active distribution network[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting(PESGM), Boston, OSA, 2016.
- [6] LU N. An evaluation of the HVAC load potential for providing load balancing service[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1263-1270.
- [7] PU L, WANG X H, TAN Z F, et al. Feasible electricity price calculation and environmental benefits analysis of the regional nighttime wind power utilization in electric heating in Beijing[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 212: 1434-1445.
- [8] 赵金玲, 党伟康. 建筑围护结构蓄热性能参数体系的对比研究[J]. 暖通空调, 2018, 48(9): 72-79.
ZHAO Jinling, Dang Weikang. Comparative study on parameter system of building envelope thermal storage performance[J]. HV&AC, 2018, 48(9): 72-79.
- [9] QI Y, DU L, MU Y, et al. Optimal dispatching of household air-source heat pump heating system considering thermal comfort[J]. Energy Procedia, 2019, 159: 491-496.
- [10] 王志强, 王珊, 张馨月, 等. 计及用户响应行为差异性的区域电采暖负荷特性建模[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 67-79.
WANG Zhiqiang, WANG Shan, ZHANG Xinyue, et al. Load characteristics modeling of regional electric heating system considering difference of users response behaviors. [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 67-79.
- [11] 屈高强, 王诚良, 靳盘龙, 等. 新型负荷及分布式电源接入配网承载能力综合评估[J]. 电测与仪表, 2019, 56(19):

- 37-45+113.
- QU Gaoqiang, WANG Chengliang, JIN Panlong, et al. Comprehensive evaluation of carrying capacity in distribution network with new load and distributed generation[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019,56(19):37-45+113.
- [12] 彭月,熊炜,袁旭峰,等.基于混合整数二阶锥规划的主动配电网最优潮流研究[J/OL]. *电测与仪表*:1-7 [2020-11-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20201124.1033.015.html>.
- PENG Yue, XIONG Wei, YUAN Xufeng, et al. Research on optimal power flow of active distribution network based on mixed integer second-order cone programming[J/OL]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 1-7 [2020-11-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20201124.1033.015.html>.
- [13] 陈程,陈星莺,张健钊,等.考虑分时电价的地源热泵系统随机运行优化策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2019,47(12):57-64.
- CHEN Cheng, CHEN Xingying, ZHANG Jianzhao, et al. Stochastic operational optimal strategy for ground source heat pump system under TOU price[J]. *Power System Protection and Control*, 2019,47(12):57-64.
- [14] 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. Bi-level optimal dispatch and control strategy for air-conditioning load based on direct load control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014,34(10):1546-1555.
- [15] 王成山,刘梦璇,陆宁.采用居民温控负荷控制的微网联络线功率波动平滑方法[J]. *中国电机工程学报*, 2012,32(25):36-43.
- WANG Chengshan, LIU Mengxuan, LU Ning. A tie-line power smoothing method for microgrid using residential thermostatically-controlled loads[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012,32(25):36-43.
- [16] 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 schedulable potential evaluation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018,38(5):227-234.
- [17] 范帅,郑琨琪,郭炳庆,等.分散式电采暖负荷协同优化运行策略[J]. *电力系统自动化*, 2017,41(19):20-29.
- FAN Shuai, JIA Kunqi, GUO Bingqing, et al. Collaborative optimal operation strategy for decentralized electric heating loads[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017,41(19):20-29.
- [18] 刘萌,梁雯,张岩,等.计及空调负荷群控制的源-荷协同优化调度模型[J]. *电网技术*, 2017,41(4):1230-1238.
- LIU Meng, LIANG Wen, ZHANG Yan, et al. Cooperative generation-load optimal dispatching model considering air-conditioning load group control [J]. *Power System Technology*, 2017,41(4):1230-1238.