

缓解季节性台区重过载问题的农村电采暖 负荷尖峰时移策略

宋大彬, 严干贵, 吕帅帅

(现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012)

摘要: 随着煤改电供暖政策的推广, 由于冬季对供暖的高需求以及峰谷电价交接时段用电较高的同时率, 近年来, 台区变压器出现季节性重过载甚至烧毁的情况愈加频繁。提出了一种适用于缓解农村台区季节性重过载的电采暖负荷尖峰时移策略。该策略将住户舒适度、用电量和用电费用保持不变三个住户电采暖需求等效为峰移峰-谷移谷、调节前后电量不变和移峰接力-调节时长限制的数学模型约束, 基于电采暖房间热惯性温度变化模型分析其保温时长, 通过 0-1 规划制定了负荷限时平移和轮值削峰策略。严重过载情况下改变保温等级分析降低功率情况。算例验证结果表明, 该策略可以高效缓解台区季节性重过载问题。

关键词: 电采暖负荷; 季节性台区重过载; 负荷限时可平移; 0-1 规划

Peak time shift strategy of rural electric heating load to alleviate the problem of heavy overload in seasonal stations

SONG Dabin, YAN Gangui, LV Shuaishuai

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation Control & Renewable Energy Technology Ministry of Education(Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China)

Abstract: Due to the promotion of the coal-to-electricity heating policy, the high demand for heating in winter, and the high simultaneous rate of electricity consumption during the peak-valley electricity price handover period, in recent years, the seasonal heavy overload or even burning of transformers in the station area has become more frequent. In this paper, a peak time shift strategy of electric heating load suitable for alleviating seasonal heavy overload in rural areas is proposed. In this strategy, the three household electric heating needs of 'household comfort, electricity consumption and electricity cost remain unchanged' are equivalent to the mathematical model constraints of 'peak shift peak-valley shift valley, constant electricity before and after adjustment, peak shift relay-adjustment time limit'. Based on the thermal inertia temperature change model of the electric heating room, the duration of its thermal insulation is analyzed, and the load time limit translation and rotation peak clipping strategies are formulated through 0-1 planning. The simulation results show that the strategy can effectively alleviate the seasonal heavy overload problem in the station area.

Keywords: electric heating load; seasonal station area heavy overload; limited time load translated; 0-1 programming

0 引言

为实现“双碳”重大战略目标，深入推进能源革命，加快规划建设新型能源体系，推动能源清洁低碳安全高效利用，实施电能替代是建设新型能源体系的重大战略途径之一。电采暖设备作为可调节负荷参与电网调度，可缓解高比例可再生能源电力系统的新能源并网问题^[1-3]。相比于传统的采暖设备，电采暖可受峰谷电价激励用电，因其调节、运行灵活等优势在我国北方地区得到广泛应用^[4-5]。然而，集群电采暖负荷的大量接入和无序调控，容易造成峰谷功率差值过大并引起电压波动问题，从而影响配电网的正常运行与电能质量^[6-7]。研究集群电采暖负荷调控方法，对于降低用户侧电采暖负荷对电力系统的冲击和实现能源转型具有重要意义。

近年来，国内外学者针对电采暖负荷已经开展了一些研究。在电采暖负荷模型的建立以及可调节能力分析方面，文献[8]建立电采暖负荷模型，挖掘电采暖设备调节能力，满足电网的调度需求，平抑功率波动；文献[9]考虑配电网新能源承载能力，利用电采暖负荷的调节潜力，提高配电网清洁能源的应用比例；文献[10]提出基于改进粒子群算法的模型参数辨识方法，提高所建立的电采暖负荷二阶等效热参数模型准确度；文献[11]考虑家用电器运行特性并对其行为模式进行预测，计算运行产生的热量并对电采暖进行补充，构建电采暖运行优化模型；文献[12]建立基于建筑参数的电采暖负荷，拟合严寒地区模型参数，分析电采暖负荷的调峰能力。在电采暖设备优化运行方面，文献[13]通过对含电采暖的综合能源系统进行日前优化调度，降低了综合能源系统对电网的负荷冲击，减小了电网的峰谷差；文献[14]提出考虑配电网传输功率约束并保证供暖的蓄热式电采暖双层优化配置方法，降低了配电网负荷峰谷差和用电同时率；文献[15]提出蓄热式电锅炉在不同工作模式下的优化调度方法和一种分散式的电采暖设备协同优化运行策略；文献[16-17]构建了电采暖与负荷聚合商的交互系

统，优化负荷的调节潜力并对其进行合理控制。在电采暖的经济运行方面，文献[18-19]利用清洁能源供给电采暖负荷，建立经济运行模型，降低了电采暖的运行成本；文献[20]通过神经网络及聚类算法对北京地区电采暖负荷和日照敏感负荷等短期负荷进行预测，并与历史数据进行对比。

上述文献从不同的角度实现了对电采暖设备的建模与控制，然而电采暖负荷群日内需求高峰时刻会出现尖峰功率，且未考虑集群电采暖设备对台区变压器的影响。本文提出了一种适用于缓解农村台区季节性重过载的电采暖负荷尖峰时移策略。该策略将住户舒适度、用电量和用电费用保持不变这三个住户电采暖需求等效为峰移峰-谷移谷、调节前后电量不变和移峰接力-调节时长限制的数学模型约束，基于电采暖房间热惯性温变模型分析其可维持温度的时长，并通过0-1规划制定了负荷限时平移和轮值削峰策略，在严重过载情况下，改变房屋保温等级以提高保温效果，减少供热。通过算例验证所提电采暖系统优化调控方法的可行性和实用性。

1 严寒冬季农村电采暖台区变压器过载现象分析

随着人们对安全与舒适需求的提高，农村地区的煤炉供热逐步被电采暖所取代。继而，变压器下辖的主要负荷类别演变为包括电采暖负荷、农业设备负荷、单位用电负荷、居民日常负荷及其他负荷的新架构，如图1所示。

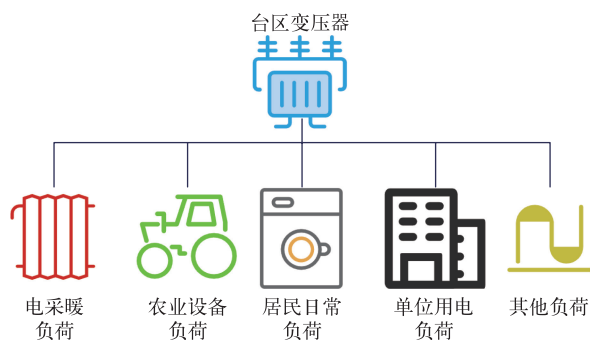


Fig. 1 The main load of transformer in rural areas

作为一种季节性负荷设备，变压器在冬季等

特定时节面临较大压力,为追求用电的经济性,电采暖设备常被设置在峰谷电价交接的时刻前后集中投运,在晚间谷时电价时段集中投运以使用户第一时间享受室内舒适温度,在早晨谷价时段投运以最大限度利用谷时段低电价制热蓄热,较长时间维持室内舒适温度,造成日负荷双尖峰,进而导致台区变压器易于过容而受损害,如图2所示。

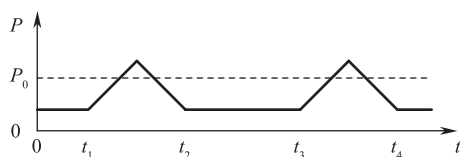


图2 日负荷双尖峰的变压器过容

Fig. 2 Overcapacity of transformer with double peak daily load

图2中, $t_1 \sim t_2$ 、 $t_3 \sim t_4$ 为电采暖设备集中投运时段, P_0 为重载功率限值。电采暖设备同时使用的高峰期,可能会出现负荷集中导致的过载烧毁问题,亟需研究针对季节性台区重过载问题的农村电采暖负荷尖峰时移策略。

2 电采暖房间热惯性模型及保温时长分析

在对电采暖负荷进行调节时,必须保障电采暖用户的舒适温度。因此,本节从电采暖房间热惯性二阶微分模型出发,分析刻画电采暖负荷温变切换的触发条件、温变周期及最大可持续关闭/制热时长。

农村直热式电采暖设备的传热特性如图3所示。图3中, C_{in} 、 C_w 分别为室内空气热容、墙体热容; R_1 为室内-墙体中心空气热阻; R_2 为墙体中心-室外的等效热阻; P 为电采暖设备的制热功率。

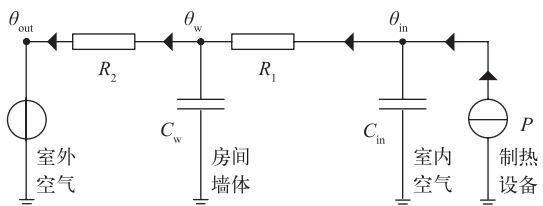


图3 电采暖建筑传热特性的等效模型

Fig. 3 Room temperature change process equivalent model diagram

使用直热式电采暖设备维持室内温度,主要包含脉冲式电功率制热室内空气、室内空气的蓄热量传递给墙体和墙体的蓄热量传递给室外等过程。电采暖建筑的传热特性可用二阶热力学等效(Equivalent Thermal Parameter, ETP)模型来表征,公式为

$$\begin{cases} C_{in} \frac{d\theta_{in}(t)}{dt} = S(t) P_N - \frac{\theta_{in}(t) - \theta_w(t)}{R_1} \\ C_w \frac{d\theta_w(t)}{dt} = \frac{\theta_{in}(t) - \theta_w(t)}{R_1} - \frac{\theta_w(t) - \theta_{out}(t)}{R_2} \end{cases} \quad (1)$$

$$S(t) = \begin{cases} 0, \theta_{in}(t - \Delta t) > \theta_{in}^{\max} \\ 1, \theta_{in}(t - \Delta t) < \theta_{in}^{\min} \\ S(t - \Delta t), \theta_{in}^{\min} \leq \theta_{in}(t - \Delta t) \leq \theta_{in}^{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中, θ_{in} 、 θ_w 、 θ_{out} 分别为室内、墙体和室外温度; $S(t)P_N = P(t)$, P_N 为电采暖设备额定功率, $S(t)$ 为电采暖设备运行状态, $S(t)=1$ 表示设备 t 时刻处于投运状态, $S(t)=0$ 表示设备 t 时刻处于停运状态,其取值由室内温控区间与开关控制规则式(2)决定。

自然温变控制规则下的电采暖房间的稳态温变曲线如图4所示。图4中, T_{on} 时段电采暖设备制热功率使室内温度上升, T_{off} 时段设备关闭后室内空气对墙体、室外放热使室内温度下降。

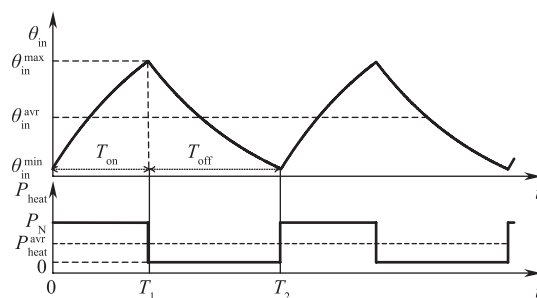


图4 电采暖房间温变曲线

Fig. 4 Electric heating room temperature change process

当房间温变过程达到稳态时,室内、墙体温度的特征值(平均温度、最高最低温度、温变周期等)不变,对式(1)进行一个温变周期的积分,可得

$$\begin{cases} \theta_{in}^{avr} = \theta_{out} + (R_1 + R_2) P_{heat}^{avr} \\ \theta_{wall}^{stable} = \theta_{out} + R_2 P_{heat}^{avr} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_{\text{heat}}^{\text{avr}} = \frac{\theta_{\text{in}}^{\text{avr}} - \theta_{\text{out}}}{R_1 + R_2} \\ D = \frac{P_{\text{heat}}^{\text{avr}}}{P_N} = \frac{\theta_{\text{in}}^{\text{avr}} - \theta_{\text{out}}}{(R_1 + R_2) P_N} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $P_{\text{heat}}^{\text{avr}}$ 为平均制热功率; $\theta_{\text{wall}}^{\text{stable}}$ 为稳态墙体温度; $\theta_{\text{in}}^{\text{avr}}$ 为室内平均温度; D 为单个房间的电采暖投运占空比, 也等于聚合基准功率与系统总装机容量的比值。

将式 (1) 第一个微分方程上升阶段的墙体温度 θ_w 用其均值 $\theta_{\text{wall}}^{\text{stable}}$ 替代, 上升过程中 $S(t)=1$, 因此 $S(t)P_N=P_N$, 有

$$\theta_{\text{in}}(t) = -A_1 e^{-\frac{t}{R_1 C_{\text{in}}}} + R_1 P_N + \theta_{\text{wall}}^{\text{stable}}, 0 \leq t \leq T_{\text{on}} \quad (5)$$

式中, $A_1 = R_1 P_N + \theta_{\text{wall}}^{\text{stable}} - \theta_{\text{in}}^{\text{min}}$; $\theta_{\text{in}}(0) = \theta_{\text{in}}^{\text{min}}$; $\theta_{\text{in}}(T_{\text{on}}) = \theta_{\text{in}}^{\text{max}}$ 。

$$\begin{aligned} T_{\text{on}} &= R_1 C_{\text{in}} \ln \left(1 + \frac{\theta_{\text{in}}^{\text{max}} - \theta_{\text{in}}^{\text{min}}}{R_1 P_N + \theta_{\text{wall}}^{\text{stable}} - \theta_{\text{in}}^{\text{min}}} \right) \\ &\approx \frac{R_1 C_{\text{in}} (\theta_{\text{in}}^{\text{max}} - \theta_{\text{in}}^{\text{min}})}{R_1 P_N - \theta_{\text{in}}^{\text{max}} + \theta_{\text{out}} + R_2 \frac{\theta_{\text{in}}^{\text{avr}} - \theta_{\text{out}}}{R_1 + R_2}} \end{aligned} \quad (6)$$

同理, 可得室内温降变化规律为

$$\theta_{\text{in}}(t) = A_2 e^{-\frac{t-T_{\text{on}}}{R_1 C_{\text{in}}}} + \theta_{\text{wall}}^{\text{stable}}, T_{\text{on}} \leq t \leq T_{\text{on}} + T_{\text{off}} \quad (7)$$

式中, $A_2 = \theta_{\text{in}}^{\text{max}} - \theta_{\text{wall}}^{\text{stable}}$; $\theta_{\text{in}}(T_{\text{on}}) = \theta_{\text{in}}^{\text{max}}$; $\theta_{\text{in}}(T_{\text{on}} + T_{\text{off}}) = \theta_{\text{in}}^{\text{min}}$ 。

$$T_{\text{off}} = R_1 C_{\text{in}} \ln \left(1 + \frac{\theta_{\text{in}}^{\text{max}} - \theta_{\text{in}}^{\text{min}}}{\theta_{\text{in}}^{\text{min}} - \theta_{\text{out}} - R_2 \frac{\theta_{\text{in}}^{\text{avr}} - \theta_{\text{out}}}{R_1 + R_2}} \right) \quad (8)$$

由式 (6)、式 (8) 可知, 电用户的最大可持续关闭/制热时长与室外温度强相关, 为保障用户舒适性, 需要根据室外温度合理设定负荷平移调节时的提前/延迟时间。

3 集群电采暖负荷尖峰限时后移与轮转接力策略

为抑制集群电采暖负荷尖峰功率并缓解台区变压器过载问题, 本文采用的方法是清洗电采暖功率数据中的小扰动分量, 识别各住户电采暖设备用电时段-设备额定功率信息, 对有重过载问题的台区, 设置调控电采暖负荷后的台区表功率尖峰最小化目标, 并设置运行约束, 基于0-1整

数线性规划进行求解。输出目标调节的个体用户、启停时段优化方案、群体聚合调节功率和尖峰负荷抑制效果, 并统计优化调控后依旧存在重过载的台区编号与重过载率。具体内容如下:

(1) 读取数据监管平台的相关用户信息

读取重过载台区编号 Num_{tf} 、台区容量 S_{tf} 、台区表96点功率数据 P_{tf} 、电采暖设备数量 N_{e2h} 、电采暖用户名 Num_{e2h} 和电采暖负荷群96点功率数据 P_{e2h} 。

(2) 预处理数据

以台区变压器容量的80%为重过载功率限值。当台区表功率小于电采暖负荷群聚合功率时, 选取两者较大值赋给台区表功率。居民用户功率为台区表功率减电采暖负荷群聚合功率。

$$P_{\text{tf}}^{\text{lim}} = 0.8 S_{\text{tf}} \quad (9)$$

$$\begin{cases} P_{\text{tf}}^t = P_{\text{tf}}^t, & P_{\text{tf}}^t > \sum_{i=1}^{N_{\text{e2h}}} P_{\text{e2h}}^{i,t} \\ P_{\text{tf}}^t = \sum_{i=1}^{N_{\text{e2h}}} P_{\text{e2h}}^{i,t}, & P_{\text{tf}}^t \leq \sum_{i=1}^{N_{\text{e2h}}} P_{\text{e2h}}^{i,t} \end{cases} \quad (10)$$

$$P_{\text{res}}^t = P_{\text{tf}}^t - \sum_{i=1}^{N_{\text{e2h}}} P_{\text{e2h}}^{i,t} \quad (11)$$

式中, $P_{\text{tf}}^{\text{lim}}$ 为台区变压器重载功率限值; P_{res} 为居民用户功率; i 为电采暖用户编号; t 为运行时刻。

(3) 识别各电采暖住户用电时段与设备容量 P_e

在个体电采暖功率小于扰动限值时, 标记电采暖设备为停运状态; 在个体电采暖功率大于扰动限值时, 标记采暖设备处于投运状态。将投运状态为1的各时点负荷均值定义为该用户电采暖设备额定功率, 公式为

$$\begin{cases} K_{\text{e2h}}^{i,t} = 0, & P_{\text{e2h}}^{i,t} < P_{\text{error}} \\ K_{\text{e2h}}^{i,t} = 1, & P_{\text{e2h}}^{i,t} > P_{\text{error}} \end{cases} \quad (12)$$

$$S_{\text{e2h}}^i = \left(\sum_{t=1}^T P_{\text{e2h}}^{i,t} \right) / \left(\sum_{t=1}^T K_{\text{e2h}}^{i,t} \right) \quad (13)$$

式中, P_{error} 为电采暖功率扰动限值; $K_{\text{e2h}}^{i,t}$ 为电采暖设备运行状态标识, 0表示停运, 1表示投运; S_{e2h}^i 为电采暖设备 i 的额定功率。

(4) 基于0-1整数线性规划的群体电采暖负荷尖峰时移策略

为便于分析优化调控前的台区重过载严重程

度,需计算各个时点的重过载率,最大重过载率低于80%时,台区运行安全;最大重过载率处于80%~100%之间时,台区运行重过载;最大重过载率处于100%以上时,台区运行严重重过载。

调节后的台区总功率等于调节后的电采暖负荷群聚合功率加参与调节的居民负荷功率,公式为

$$\begin{cases} P_{\text{tfd}}^t = \sum_{i=1}^{N_{\text{e2h}}} B_{\text{e2h}}^{i,t} S_{\text{e2h}}^i + P_{\text{res}}^t \\ P_{\text{tfd}}^{\max} = \max(P_{\text{tfd}}^t) \end{cases} \quad (14)$$

式中, $B_{\text{e2h}}^{i,t}$ 为电采暖负荷群调节后的用电标识变量; P_{tfd}^t 、 $P_{\text{tfd}}^{\max}$ 为电采暖负荷调节后的台区表各时点功率与日最大功率。

在识别出台区存在重过载、严重重过载问题时,需要启动优化策略,提前或滞后尖峰负荷时段部分电采暖负荷的用电时序,为满足住户舒适度、用电量与用电费用相同三个住户的电采暖用电需求,可用峰移峰-谷移谷、调节前后电量不变和移峰接力-调节时长限制,等效为调控优化模型的运行约束。以电采暖负荷调节后的台区表一天的功率最小值为目标,基于0-1整数线性规划的缓解台区过容的直热式电采暖负荷群移峰调控模型公式为

$$\begin{aligned} & \min P_{\text{tfd}}^{\max} \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{t=T_s}^{T_{\text{end}}} B_{\text{e2h}}^{i,t} = \sum_{t=T_s}^{T_{\text{end}}} K_{\text{e2h}}^{i,t} \\ \left| \sum_{t=T_s}^{T_{\text{end}}} t(B_{\text{e2h}}^{i,t} - K_{\text{e2h}}^{i,t}) \right| \leq N_t \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

式中, N_t 为负荷平移调节时的提前/延迟时间。

(5) 数据覆盖没有变压器超容问题的用电信息

对台区没有过载的时段进行数据覆盖,输出调节前后的台区表与电采暖用户群体总功率曲线,观察移峰效果。输出需要调控的各个电采暖用户用电前后的时点。

(6) 输出电采暖用户调控方案并提示调控后仍过载的台区及时对变压器进行扩容

集群电采暖负荷调控需计算各电采暖用户需要调节的用户功率公式为

$$P_{\text{e2hDR}}^{i,t} = (B_{\text{e2h}}^{i,t} - K_{\text{e2h}}^{i,t}) S_{\text{e2h}}^i \quad (16)$$

集群电采暖负荷聚合调节功率公式为

$$P_{\text{e2hDR}}^t = \sum_{i=1}^{N_{\text{e2h}}} (B_{\text{e2h}}^{i,t} - K_{\text{e2h}}^{i,t}) S_{\text{e2h}}^i \quad (17)$$

为准确评估电采暖负荷调节后的台区重过载状态,需要求解电采暖负荷调节后的台区负荷的最大负载率,公式为

$$\xi = P_{\text{tfd}}^{\max} / S_{\text{tf}} \quad (18)$$

式中, $P_{\text{e2hDR}}^{i,t}$ 、 P_{e2hDR}^t 分别为个体与群体聚合的电采暖住户用电功率调节量; ξ 为负荷调节后台区负载率最大值。

最后,输出调节的电采暖住户用户名、启停时段优化方案、群体聚合调节功率和尖峰负荷抑制效果图,并统计优化调控后依旧存在重过载的台区编号与重过载率,80%~100%表示待扩容,100%以上则急需扩容,为台区变压器精准有序扩容提供理论支撑。

4 算例分析

为验证直热式集群电采暖系统的性能,设计直热式农村电采暖台区算例系统,用于验证电采暖房间可维持温度时间的有效性。房间相关参数见表1,峰谷时段参数见表2。

表1 典型房间热阻热容参数

Tab. 1 Typical room thermal resistance and heat capacity parameters

参数	室内热阻 / ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	墙体热阻 / ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	室内热容 / ($\text{J}/^{\circ}\text{C}$)	墙体热容 / ($\text{J}/^{\circ}\text{C}$)
数值	1.2×10^{-3}	9.2×10^{-3}	1.1×10^6	1.86×10^8

表2 峰谷时段及电价

Tab. 2 Peak and valley period and electricity price

时段	峰谷电价类别	峰谷电价 / 元
00:00—08:00	谷时电价	0.329
08:00—21:00	峰时电价	0.562
21:00—24:00	谷时电价	0.329

4.1 电采暖房间热惯性温变过程分析

当室外温度为 -25°C 时,室内空气与墙体稳态温变曲线如图5所示。

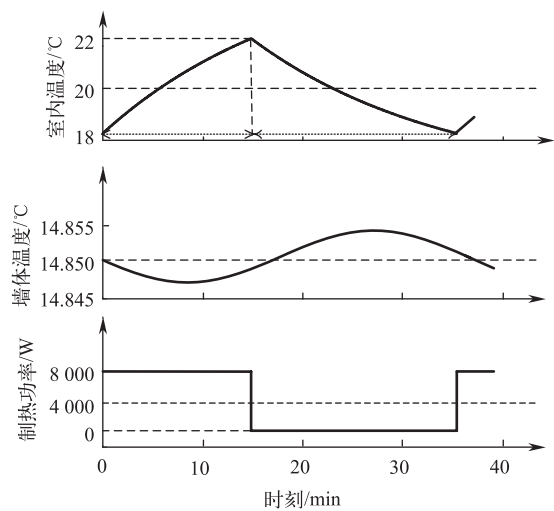


图 5 室内空气与墙体稳态温变曲线
Fig. 5 Temperature change curves for indoor air and walls

由图5可知，当室内平均温度是20℃时，墙体平均温度是14.85℃；当室内达到稳态时，电采暖制热功率等于散热功率；墙体温升范围是0.006℃，室内空气温度高于其达到稳态时平均温度的平均值大约为1℃。室内设备开启时长是21.3 min（理论值为21.5 min），设备关闭时长是18 min（理论值为17.9 min），温升温降时长对应的设备投运占空比是0.542。以上数据验证了文中电采暖房间可维持温度时间的有效性，为调控电采暖设备提供了支撑。

4.2 不同室外温度下电采暖负荷最大可持续关闭/制热时长分析

为验证电采暖房间可维持温度时长在不同室外温度场景下的普遍适用性，可对不同室外温度下的用户历史数据进行统计和分析，见表3。

表 3 典型住户电采暖负荷用电行为特征量统计结果
Tab. 3 Statistical results of electricity consumption behavior characteristics of typical household electric heating load

室外温度 /℃	升温时长 /min	降温时长 /min	周期 /min	占空比 (%)	墙体稳态温度 /℃
0	13.1	42.5	55.6	23.5	17.323
-5	14.0	33.2	47.3	29.7	16.869
-10	15.3	27.4	42.6	35.8	16.382
-15	16.8	23.3	40.1	41.9	15.878
-20	18.8	20.3	39.1	48.0	15.366
-25	21.3	18.0	39.3	54.1	14.850

典型电采暖住户在室外温度范围为-25~0℃条件下，数据拟合如图6、图7所示。室外温度越低时，升温越慢，降温越快。墙体稳态温度越低，稳态墙体温度函数拟合结果是 $1\ 902.4-98.4\theta_{out}$ （理论值为 $1\ 923.1-96.2\theta_{out}$ ），与工程项目中统计所得数值匹配。

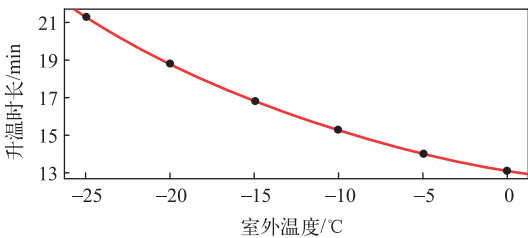


图 6 升温时长与室外温度拟合示意图
Fig. 6 The fitting diagram of heating time and outdoor temperature

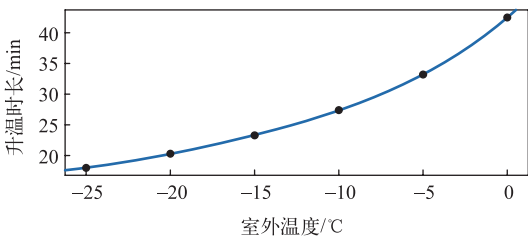


图 7 降温时长与室外温度拟合示意图
Fig. 7 Fitting diagram of cooling time and outdoor temperature

4.3 农村电采暖负荷尖峰时移策略算例分析

设计三个不同过载程度的直热式农村电采暖台区算例系统，全面验证本文所提出的适用于缓解台区过载问题的群体电采暖负荷尖峰时移策略有效性与通用性。算例参数为根据所求电采暖房间温升温降时间而设置的电采暖负荷提前/滞后时段限值。

由图8可知，在晚间谷时电价时段，电采暖设备大规模开启，造成的尖峰功率越过台区变压器重过载线，经过调节后集群电采暖负荷功率降低到变压器重过载线以下。

由图9可知，在早间和晚间谷时电价时段，电采暖设备大规模开启，造成的尖峰功率越过台区变压器重过载线，经过调节后集群电采暖负荷尖峰功率得到削减，越过变压器重过载线的情况得到缓解，可暂缓对台区变压器的扩容。

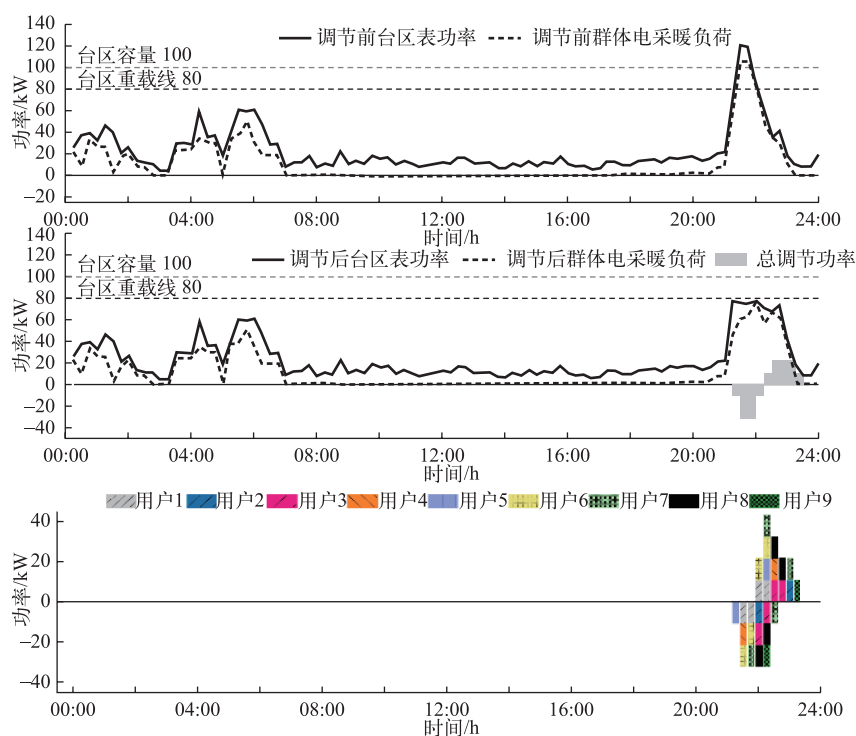


图8 无需扩容场景

Fig. 8 The scene of no need to expand

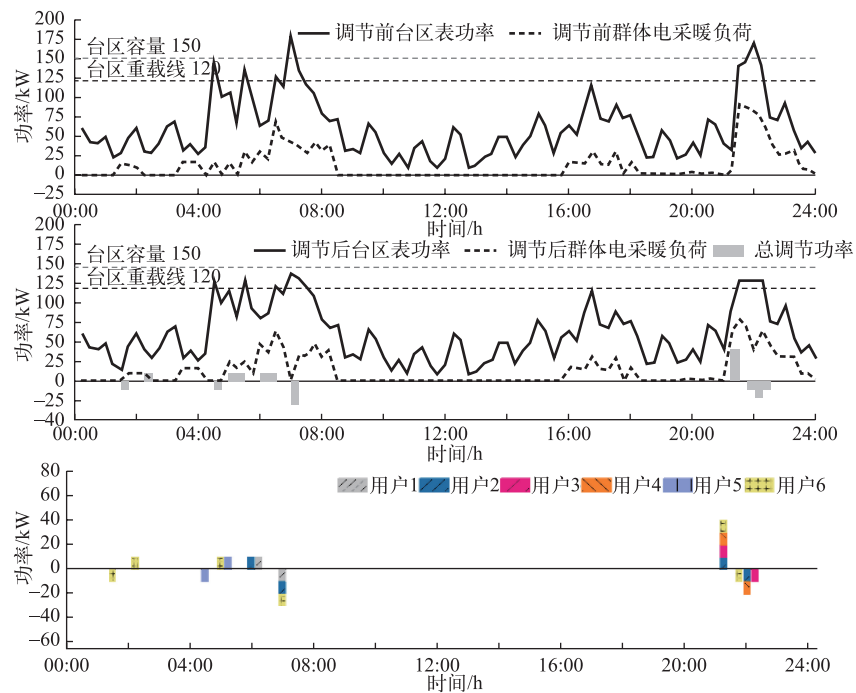


图9 可暂缓扩容场景

Fig. 9 The scene of temporarily postponed for expansion after adjustment

由图10可知,在早间和晚间谷时电价时段,电采暖设备大规模开启,造成的尖峰功率超过台

区变压器的最大容量,经过调节后集群电采暖负荷尖峰功率虽得到削减,但越过变压器重过载线

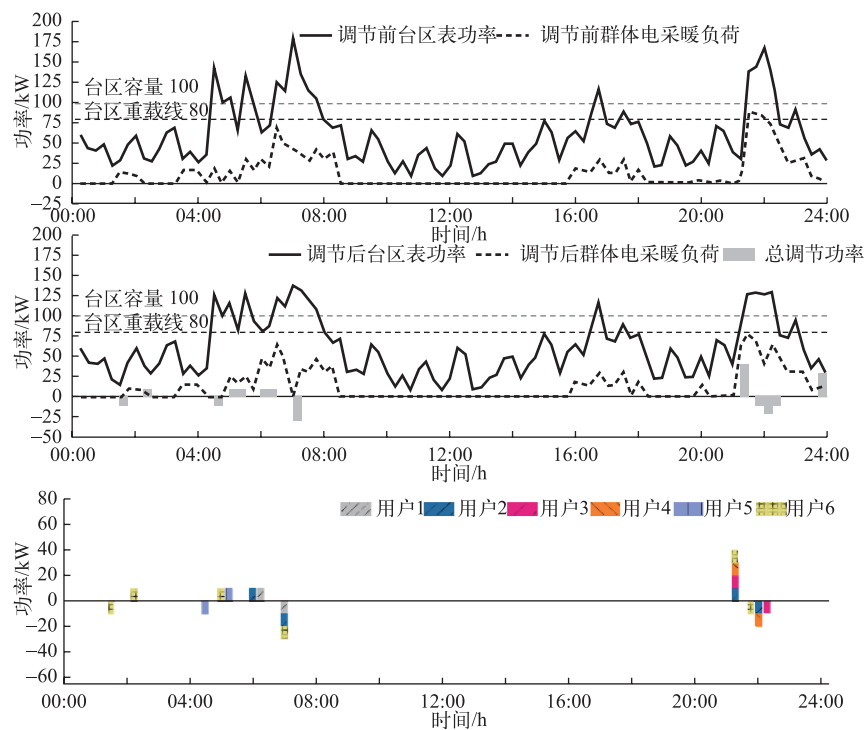


图 10 急需扩容场景
Fig. 10 The scene of urgent need for expansion after adjustment

的情况未得到缓解，且仍然超过变压器的最大容量，急需对台区变压器进行扩容。

综上可知，图8调节后尖峰负荷0%~80%，无需扩容；图9调节后尖峰负荷80%~100%，可暂缓扩容；图10调节后尖峰负荷超过100%，仍急需扩容，可考虑增加墙体保温等级，降低电采暖负荷用电功率。不同保温等级下的节能效果如图11所示。

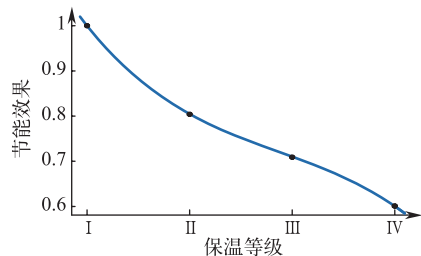


图 11 不同保温等级下的节能效果
Fig. 11 Energy saving effect under different insulation levels

选取晚间集群电采暖尖峰功率时刻，不同保温等级下的尖峰功率见表4。

由表4可知，随着保温等级的提升，集群电采暖设备峰值功率降低，可进一步缓解台区下集群电采暖负荷造成的过载问题。

表 4 不同保温等级下的尖峰功率	
Tab. 4 Peak power under different insulation levels	
保温等级	峰值功率 /kW
I	128.6
II	112.514
III	104.93
IV	96.37

5 结束语

文中针对严寒冬季峰谷电价交接时段台区变压器重过载的问题，提出了一种农村电采暖负荷峰值时移策略。经算例验证，该策略的成效和结论如下：

- 1) 通过建立住户舒适度、用电量和用电费用相同三个条件的数学模型，约束住户电采暖需求，并在峰移峰-谷移谷、调节前后电量不变和移峰接力-调节时长限制的规则下，确保用户舒适度和电费不变，实现了负荷合理转移。
- 2) 基于电采暖房间的热惯性温变模型，分析了室内房间维持温度时间，利用0-1规划模型制定了电采暖负荷的限时平移和轮值接力削峰策

略,以最小的用户调控数量和最短的调控时长实现对变压器重载问题的缓解。

3) 算例验证表明,本文提出的策略能够适用于不同重载程度的台区尖峰负荷,有效平抑负荷峰值,并输出调节后台区尖峰负荷信息。严重过载情况下,改变保温等级可进一步缓解台区下集群电采暖负荷造成的过载问题。为台区变压器的精准有序扩容提供理论支持,具有较高的工程推广价值。

参考文献

- [1] 祝东,陈武晖,郭小龙,等.考虑风电消纳和热舒适度弹性的蓄热电采暖双层优化配置[J].电网技术: 1-10[2024-07-08].
- [2] 林俐,顾嘉,王铃.面向风电消纳的考虑热网特性及热舒适度弹性的电热联合优化调度[J].电网技术, 2019, 43(10): 3648-3655.
- [3] YANG Y L, YAN G G, MU G. Multi period heating storage control for distributed electric heating considering wind curtailment accommodation[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(1): 205-217.
- [4] 冯云辰,加鹤萍,闫敏,等.基于风电分时电价的虚拟电厂参与清洁供暖运营优化方法[J].中国电力, 2024, 57(1): 51-60.
- [5] 李伟,周云海,宋德璟,等.蓄热式电采暖参与消纳受阻风光的源荷协调滚动调度[J].现代电力, 2024, 41(1): 116-123.
- [6] 张嘉睿,穆云飞,贾宏杰,等.考虑停电时段用户热需求的蓄热式电采暖日前优化调度方法[J].电力系统自动化, 2020, 44(21): 15-22.
- [7] 祁兵,张露露,李彬,等.基于电压监测的分布式电采暖实时优化控制策略[J].现代电力, 2021, 38(4): 449-454.
- [8] 石富岭,祁琪,江若嘉,等.基于共享介质争用访问机制的电采暖设备自适应控制方法[J].电力系统自动化, 2023, 47(16): 76-84.
- [9] 祝东,陈武晖,郭小龙,等.蓄热电采暖与需求响应协同消纳风电的混合时间尺度调度策略[J].中国电机工程学报: 1-12[2024-07-08].
- [10] 王欢,刘盛琳,冯忠楠,等.基于新能源承载能力的配电网电采暖负荷动态优化调度策略研究[J].可再生能源, 2024, 42(1): 104-111.
- [11] 张利伟,王思言,穆钢,等.基于改进粒子群算法的分散式电采暖负荷模型参数辨识[J].吉林电力, 2024, 52(1): 14-19.
- [12] 张虹,王明晨,白洋,等.计及家用电器电热特性的分散式电采暖集群经济低碳调控策略[J].中国电机工程学报, 2022, 42(11): 4013-4027.
- [13] 杨玉龙,王彤,穆钢,等.基于实测数据的分布式电采暖负荷群调峰能力评估[J].电力建设, 2018, 39(12): 95-101.
- [14] 宋杰,李树鹏,张卫国,等.含蓄热式电采暖的综合能源系统日前优化调度策略研究[J].智慧电力, 2021, 49(4): 14-20.
- [15] 张嘉睿,陈晚晴,张雅青,等.考虑配网功率约束及可靠供暖的园区蓄热式电采暖双层优化配置方法[J].全球能源互联网, 2021, 4(2): 142-152.
- [16] PARIDARI K, NORDSTR M L. Flexibility prediction, scheduling and control of aggregated TCLs[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 178.
- [17] 张虹,王明晨,尹世诚,等.考虑用户消费偏好的分散式电采暖系统主从博弈优化方法[J].电网技术, 2023, 47(6): 2262-2273.
- [18] 孙志杰,谢枫,周辛南,等.清洁采暖背景下张家口电采暖竞争力及经济性分析[J].智慧电力, 2018, 46(5): 40-45.
- [19] 马彬,牛东晓.风火打捆跨区域供给电采暖的经济性评估[J].智慧电力, 2020, 48(3): 89-95.
- [20] 喻乐,施磊,沈茂亚,等.考虑气象因素影响的北京电网短期负荷预测研究[J].电气应用, 2019, 38(2): 75-81.

作者简介

宋大彬(1999—),男,硕士研究生,研究方向为负荷特性分析与优化调度。

(收稿日期: 2024-11-04)