

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

张嘉睿¹, 陈晚晴¹, 张雅青¹, 穆云飞^{1*}, 李树鹏², 于建成²
(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市 南开区 300072;
2. 国网天津市电力公司, 天津市 河北区 300010)

Bi-level Optimal Planning Method for Park Regenerative Electric Heating Considering Capacity of Distribution Network and Reliable Heating

ZHANG Jiarui¹, CHEN Wanqing¹, ZHANG Yaqing¹, MU Yunfei^{1*}, LI Shupeng², YU Jiancheng²
(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Nankai District, Tianjin 300072, China;
2. State Grid Tianjin Electric Power Company, Hebei District, Tianjin 300010, China)

Abstract: A bi-level optimal planning method for park regenerative electric heating considering distribution network capacity and reliable heating is proposed. First, based on the heat characteristics of different buildings in the park, a three-level heat load prediction model of single room-single building-building group based on the RC network is established, and the regenerative electric heating system equipment is modeled. At the same time, a heating load model that considers the distribution network transmission power constraint model and the power outage period is established. Finally, with economy as the goal, with the distribution network transmission power limit and the maintenance of heating supply under power outage as constraints, a bi-level optimal planning model of regenerative electric heating is constructed, the first level of which is to minimize the annual total cost, and the second level takes the annual operation and maintenance cost as the goal. The case results demonstrate that the proposed method can not only reduce the peak-valley load difference and load coincidence factor of the distribution network but also achieve the goal of maintaining the heating supply under a power outage, based on the heat storage capacity of regenerative electric heating.

Keywords: regenerative electric heating; distribution network capacity; maintenance heating supply under power outage; load coincidence factor; optimal planning

摘要: 提出一种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。首先, 基于园区内不同楼宇用热特性, 建立基于RC网络的单体房间-单体楼宇-楼宇群的三级热负荷预测模型, 并对蓄热式电采暖系统设备建模; 同时, 建立考虑配电网传输功率约束模型及停电时段的供暖负荷模型; 最后, 以经济性为目标, 以配电网传输功率限制、故障态下“停电不停暖”为约束, 构建一种考虑配电网传输功率约束及可靠供暖的蓄热式电采暖双层优化配置方法, 上层以蓄热式电采暖年总成本最小为目标, 求解电采暖系统设备容量, 下层以用户年运行成本最小为目标, 求解电采暖系统运行方案。算例结果表明, 所提方法可在考虑配电网功率约束的情况下, 降低配电网负荷峰谷差及用电同时率, 同时能够基于蓄热式电采暖的蓄热量, 实现“停电不停暖”, 有效提升配电网运行安全性及用户供暖可靠性。

关键词: 蓄热式电采暖; 配电网承载能力; 停电不停暖; 用电同时率; 优化配置

0 引言

冬季供暖是中国北方居民的基本民生需求, 长久以来大多采用燃煤的集中式供暖, 然而大量燃煤供暖带来巨大的环境影响^[1-2]。在众多清洁取暖方式中, 电采暖因其清洁环保、可控性强、能源供给压力小等优点, 受到了各级政府和企业的的大力支持和推广^[3-4]。

然而, 在京津冀等地区实施大规模“煤改电”后, 大量电采暖设备接入使得电力负荷增长明显, 严重影响配电网安全运行。并且随着电采暖设备占比持续升高, 居民供暖对电网依赖程度逐步提高, 如何在

基金项目: 国家电网公司科技项目(蓄热式电采暖优化配置及互动关键技术研究与应用, SGTJDK00DWJS1900101)。

Science and Technology Foundation of SGCC (SGTJDK00DWJS1900101).

停电时段避免供暖中断，面临巨大压力，数次“停电又停暖”事件带来巨大民生问题^[5]。同时，在运行过程中，传统电采暖存在用户采暖费用过高、制热过多造成能源浪费等情况^[6]。

相较于传统电采暖，蓄热式电采暖因其特有的蓄热能力，可利用分时电价（TOU）政策降低用户采暖费用，对电网则可实现一定程度的“削峰填谷”，减轻电网运行压力，降低电网改造费用^[7]，有效缓解用户采暖需求与采暖费用高昂之间的矛盾。然而，蓄热式电采暖仍无法规避电采暖负荷接入对电网安全运行带来的影响，如在分时电价引导下，甚至可能出现新的峰谷差，进一步增加台区负载率，威胁电网安全稳定运行^[8]。

各国学者在蓄热式电采暖优化配置方面已有诸多研究：文献[9]利用房屋热平衡的RC模型测算供热负荷需求，进而对蓄热水箱的容量进行优化配置，降低运行成本；文献[10]以社区综合能源系统为研究对象，优化蓄热水箱和制热设备的容量配置；文献[11]提出了考虑分布式可再生能源的动态优化配置方法，提高可再生能源利用率；文献[12]基于能源集线器（energy hub, EH）模型，上层考虑年成本最小，下层以联络关系最优为目标，建立家庭能源系统双层优化配置模型；文献[13]考虑建筑热动态和用户舒适度，构建社区微网蓄热和蓄电优化配置模型。

然而，上述优化配置方法，侧重关注配置对用户经济性、舒适性、新能源消纳等方面的影响，在老旧小区进行蓄热式电采暖改造的工程实际中，往往不具备对配电网线路扩容的现实条件，因此需进一步考虑配电网功率约束。

当规划主体为电网时，文献[14]在考虑运行成本的基础上，同时考虑电热需求响应成本、功率损失成本及电压降惩罚等，运用次序配置策略，有效提高能源利用效率；文献[15]在微网储能优化配置中考虑微网可靠性约束，降低储能系统投资成本和微网运行成本；文献[16]结合本地变压器约束，优化可再生能源发电单元及储能容量。上述研究虽考虑配电网传输功率对储能容量的约束，但未充分利用蓄热水箱在供电中断期间实现“停电不停暖”。从各地供电公司针对“煤改电”用户进行的停电应急演练、配备应急发电车等措施^[17]可以看出，在蓄热式电采暖系统的优化配置和运行优化中，实现“停电不停暖”应作为必须考虑的重大民生因素。国家电网有限公司于2018年出台了《关于落实停电不停暖技术措施保障持续供暖的通

知》，对“停电不停暖”提出了具体要求^[18]。

基于上述问题，本文以配电网传输功率限制、故障态下“停电不停暖”供热需求等为约束，建立了上层以蓄热式电采暖系统的年总成本最小、下层以用户运行成本最小为目标的蓄热式电采暖系统双层优化配置模型。算例结果表明，该方法在满足配电网传输功率约束前提下，充分利用蓄热设备，在实现“停电不停暖”的同时，能够降低用能成本。

1 园区热负荷及蓄热式电采暖系统建模

1.1 园区热负荷建模

一个园区中建筑结构各异，热需求存在明显差异，为此本节将楼宇抽象化，按单体房间-单体楼宇-园区楼宇群的顺序进行建模。

单体房间RC模型如图1所示，模型由3部分组成：室外、围护结构、室内^[19]。其中为细化围护结构不同部分的热变化，将围护结构进一步分解为屋顶、窗体、墙壁和地板。

房间热平衡模型如式（1）所示：

$$\Delta Q = C_a \frac{dT_{in}}{dt} \quad (1)$$

$$C_a = c_a \cdot \rho_a \cdot A \cdot h \quad (2)$$

式中： ΔQ 为房间热交换量，kW； C_a 为空气热容，kJ/K； c_a 为空气比热容， $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ； ρ_a 为空气密度， kg/m^3 ； A 为房间占地面积， m^2 ； h 为房间高度，m。

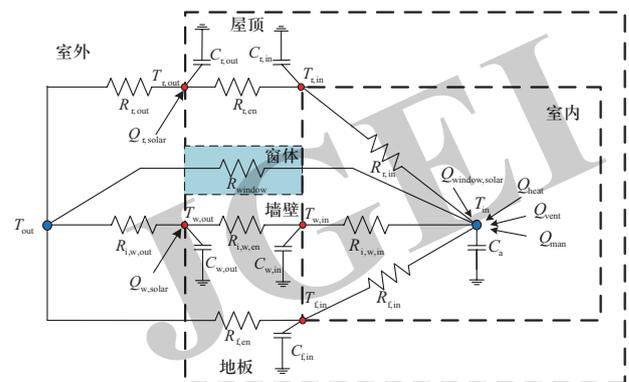


图1 单体房间RC模型

Fig. 1 RC model of single room

单体房间RC模型可以表达为如式（3）所示的状态方程：

$$\begin{cases} \dot{x}_{t+1} = Ax_t + u_t + d_t \\ y_t = Bx_t \end{cases} \quad (3)$$

式中： x 为系统状态变量，表示各计算节点温度； u 为

系统控制变量； \mathbf{d} 为系统扰动量； \mathbf{y} 为输出量；下标 t 为时刻。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{S}{C_a} & 0 & \frac{1}{C_a R_{r,in}} & 0 & \frac{1}{C_a R_{w,in}} & \frac{1}{C_a R_{f,in}} \\ 0 & -\left(\frac{1}{C_{r,out} R_{r,out}} + \frac{1}{C_{r,out} R_{r,en}}\right) & \frac{1}{C_{r,out} R_{r,en}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{r,in} R_{r,in}} & \frac{1}{C_{r,in} R_{r,en}} & -\left(\frac{1}{C_{r,in} R_{r,in}} + \frac{1}{C_{r,in} R_{r,en}}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\left(\frac{1}{C_{w,out} R_{w,out}} + \frac{1}{C_{w,out} R_{w,en}}\right) & \frac{1}{C_{w,out} R_{w,en}} & 0 \\ \frac{1}{C_{w,in} R_{w,in}} & 0 & 0 & \frac{1}{C_{w,in} R_{w,en}} & -\left(\frac{1}{C_{w,in} R_{w,in}} + \frac{1}{C_{w,in} R_{w,en}}\right) & 0 \\ \frac{1}{C_{f,in} R_{f,in}} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\left(\frac{1}{C_{f,in} R_{f,in}} + \frac{1}{C_{f,in} R_{f,en}}\right) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{S} = \frac{1}{R_{r,in}} + \frac{1}{R_{window}} + \frac{1}{R_{w,in}} + \frac{1}{R_{f,in}} \quad (6)$$

$$\mathbf{B} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (7)$$

$$\mathbf{u}_t = [H_{load} / C_a \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{d}_t = \begin{bmatrix} \frac{T_{out}}{C_a R_{win}} + \frac{H_{win,solar} + H_{vent} + H_{man}}{C_a} \\ \frac{T_{out}}{C_{r,out} R_{r,out}} + \frac{H_{r,solar}}{C_{r,out}} \\ 0 \\ \frac{T_{out}}{C_{w,out} R_{w,out}} + \frac{H_{w,solar}}{C_{w,out}} \\ 0 \\ \frac{T_{out}}{C_{f,in} R_{f,en}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中： C 为热容，J/K； T 为温度，K； R 为热阻， $(m^2 \cdot K)/W$ ；角标r、w、f分别表示屋顶、墙体、地板，in、out分别表示结构内、外面； $H_{w,solar}$ 为太阳辐射对墙体贡献的热功率，kW； $H_{r,solar}$ 为太阳辐射对屋顶贡献的热功率，kW； $H_{window,solar}$ 为太阳辐射透过窗体对室内贡献的热功率，kW； H_{heat} 为采暖系统提供的热功率，kW； H_{vent} 为空气渗透耗热量，kW； H_{man} 为用户行为产生的热功率，kW。

考虑到式(3)构建的单体房间的热动态RC方程为一阶非线性微分方程，在大规模求解时存在计算时间过长等问题^[20]，为此在聚合单体楼宇的热动态模型时将单体房间的热动态RC方程差分化，将其转化为一阶线性方程，提高计算速度，具体如式(10)所示：

式(3)中各变量表达式如式(4)~(9)所示：

$$\mathbf{x} = [T_{in} \ T_{r,out} \ T_{r,in} \ T_{w,out} \ T_{w,in} \ T_{f,in}]^T \quad (4)$$

$$H_{building}(t) = \sum_{a \in N_a} H_{load}(t) \quad (10)$$

其中 t 时刻单体楼宇热负荷 $H_{building}(t)$ 等效为 N_a 个包含不同用户特性的单体房间的集合。

与之类似，在单体楼宇热负荷模型基础上可以得到 N_b 个楼宇组成的园区楼宇群热动态方程，如式(11)所示：

$$H_{community}(t) = \sum_{b \in N_b} H_{building,b}(t) \quad (11)$$

式中： $H_{community}(t)$ 表示 t 时刻该园区的热负荷，kW。

1.2 蓄热式电采暖系统建模

1.2.1 蓄热式电采暖系统结构

图2给出一种典型的蓄热电采暖系统结构示意图^[21]，系统由热泵、蓄热水箱、散热设备、热泵循环水泵、热网循环水泵、动力用蓄电池和暖气管道组成，其中热泵为制热设备，蓄热水箱为蓄热设备，蓄电池用于故障停电时驱动热网循环水泵使蓄热水箱继续供热。

1.2.2 蓄热式电采暖设备模型

1) 热泵。

本文中选取热泵(heat pump, HP)作为制热设备，热泵以热源类型区分，包括水(地)源热泵、空气源热泵等^[22]，其制热功率如式(12)所示^[21]：

$$H_{HP}(t) = P_{HP}(t) \cdot c \quad (12)$$

式中： $H_{HP}(t)$ 为 t 时刻热泵制热功率，kW； c 为热泵全年综合效能比(ACOP)； $P_{HP}(t)$ 为 t 时刻热泵消耗电功率，kW。

热泵输出功率应小于热泵额定功率：

$$0 \leq H_{HP}(t) \leq Q_{HP} \quad (13)$$

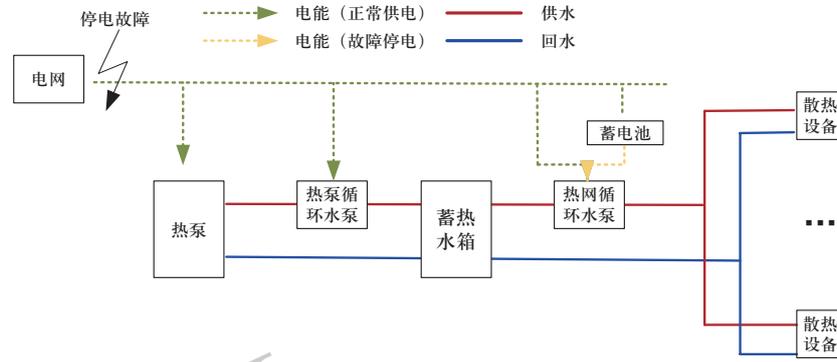


图2 蓄热式电采暖系统示意图

Fig. 2 Structure diagram of regenerative electric heating system

式中： Q_{HP} 为热泵额定功率，kW。

2) 蓄热水箱。

蓄热水箱 (hot water tank, HWT) 用于在电价较低时段蓄热，电价较高时段及供电中断时放热，并保留原有缓冲作用。为体现本文所提方法适用性，本文将蓄热水箱水温变化换算为热量变化，对应具体室内温度调节方式为质调节^[23]。蓄热水箱特性可表示为蓄热量、蓄/放热功率及热损耗之间的关系：

$$W_{HWT}(t+1) = [H_{HWT}^c(t)\eta_{HWT}^c - H_{HWT}^d(t)/\eta_{HWT}^d] \cdot \Delta t + W_{HWT}(t)(1 - \eta_{HWT}^{loss}) \quad (14)$$

式中： $W_{HWT}(t)$ 为蓄热水箱在 t 时刻的蓄热量，kWh； $H_{HWT}^c(t)$ 为 t 时刻蓄热水箱蓄热功率，kW； $H_{HWT}^d(t)$ 为 t 时刻蓄热水箱放热功率，kW； η_{HWT}^c 和 η_{HWT}^d 分别为蓄热水箱充放电效率； η_{HWT}^{loss} 为自放热损失率； Δt 为仿真时间步长，文中取1 h。

蓄热水箱充放能及储能量约束如下：

$$0 \leq H_{HWT}^c(t) \leq \mu_{HWT,max}^c Q_{HWT} \quad (15)$$

$$0 \leq H_{HWT}^d(t) \leq \mu_{HWT,max}^d Q_{HWT} \quad (16)$$

$$0 \leq W_{HWT}(t) \leq Q_{HWT} \quad (17)$$

式中： $\mu_{HWT,max}^c$ 、 $\mu_{HWT,max}^d$ 为蓄热水箱最大充放能率； Q_{HWT} 为蓄热水箱容量，kWh。

对于蓄热水箱，调度周期始末蓄热量需保持一致：

$$W_{HWT}(1) = W_{HWT}(T) \quad (18)$$

式中： $W_{HWT}(1)$ 、 $W_{HWT}(T)$ 分别为调度周期始末蓄热量，kWh。

1.2.3 蓄热式电采暖系统建模

蓄热式电采暖系统从电网购电，通过热泵转化为热能，通过蓄热水箱合理调度共同满足热负荷。为灵活描述蓄热式电采暖的运行方式和各环节的耦合

关系，采用统一母线式结构对其建模^[24]。如图3所示，蓄热式电采暖系统包括电母线和热母线。需满足的功率平衡约束如式(19)–(20)所示。

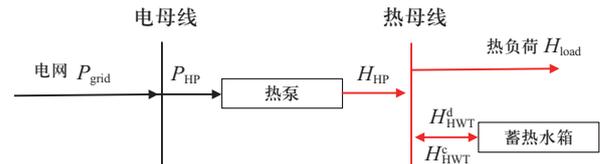


图3 蓄热式电采暖系统母线模型

Fig. 3 Energy hub model of the regenerative electric heating system

1) 电母线功率平衡约束：

$$P_{grid}(t) = P_{HP}(t) \quad (19)$$

式中： $P_{grid}(t)$ 表示 t 时刻从电网购电的功率，kW。

2) 热母线功率平衡约束：

$$H_{HP}(t) + H_{HWT}^d(t) = H_{community}(t) + H_{HWT}^c(t) \quad (20)$$

1.3 配电网最大传输功率建模

一方面，电采暖大规模的普及应用将会极大地增加配电网的用电负荷，增加了电网的压力^[25]；另一方面，在采用电采暖模式后，园区对电采暖的依赖性增加，如果电网无法适应电采暖负荷增长导致停电，将会给园区生产生活带来重大影响。为保障电网运行安全，需要结合电负荷的时空分布特性研究配电网最大传输功率。

对于电采暖负荷接入地区，其配电网功率时空特性可通过典型日负荷曲线加以描述。为保证配电网供电能力及灵活性，按配电网有功传输功率上限的70%考虑各时刻配电网最大传输功率^[26]。

$$P_{mar}(t) = 0.7P_N - P_{bas}(t) \quad (21)$$

式中： $P_{mar}(t)$ 为 t 时刻配电网最大传输功率，kW； P_N 为配电网额定传输功率，kW； $P_{bas}(t)$ 为 t 时刻配电网

基础负荷, kW。

考虑配电网最大传输功率, 系统输入功率应小于配电网承载能力下限:

$$P_{\text{grid,max}} = \min P_{\text{mar}}(t) \quad (22)$$

式中: $P_{\text{grid,max}}$ 为考虑配电网承载能力下的电采暖系统功率上限, kW。

1.4 停电时段维持供暖负荷建模

为在蓄热式电采暖应用的大环境下保障用户供暖可靠, 本文考虑在蓄热水箱中留存一部分热量作为备用, 满足停电时段用户热需求, 实现“停电不停暖”^[27]。

根据《关于落实停电不停暖技术措施保障持续供暖的通知》^[18]中用户停电时长不得超过5 h的要求, 本文认为在5 h内, 可通过电力企业的抢修恢复供电, 为此设定停电时段可维持 t_{cut} h供暖, 则停电时段维持供暖负荷计算如下:

$$H_{\text{outage}} = \sum_{i=t}^{t+t_{\text{cut}}} H_{\text{community}}(i) \quad t_{\text{cut}} \in [0, 5] \quad (23)$$

式中: H_{outage} 为停电时段维持供暖负荷, kWh。

2 优化配置模型

本文构建的考虑配电网时空特性与承载能力的蓄热式电采暖双层优化配置方法, 上层模型以系统年总成本最小为优化目标, 结合下层运行优化模型所得的最优调度方案求解蓄热式电采暖热泵和蓄热水箱容量, 输出规划方案即各设备容量; 根据上层规划模型所定设备容量, 下层模型以年运维成本最小为目标, 求解园区最优调度方案包括各设备出力。双层模型的整体框架如图4所示。

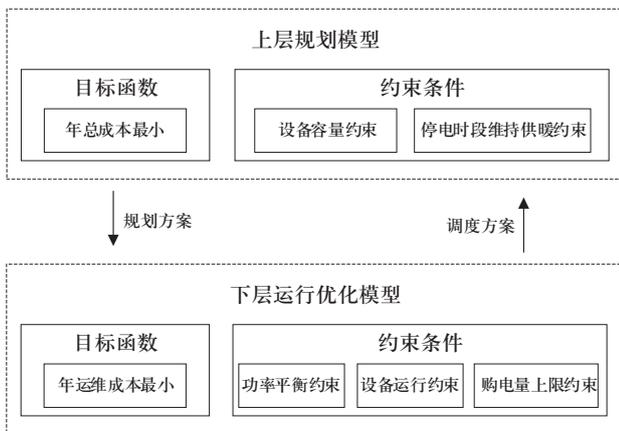


图4 双层优化配置模型

Fig. 4 Framework of bi-level optimal planning model

2.1 上层规划模型

2.1.1 控制变量

上层规划模型控制变量为系统各设备的额定容量。

2.1.2 目标函数

上层规划模型的目标函数为蓄热式电采暖系统年总成本最小化, 包括初始投资费用等年值、运行成本和维护成本:

$$\min F = C_1^{\text{ann}} + C_0^{\text{ann}} + C_M^{\text{ann}} \quad (24)$$

式中: C_1^{ann} 、 C_0^{ann} 、 C_M^{ann} 分别表示蓄热式电采暖设备初始投资成本等年值、设备年运行成本以及设备年维护成本, 元。

投资成本等年值为热泵及蓄热水箱的投资成本等年值之和:

$$C_1^{\text{ann}} = C_{\text{I,HP}}^{\text{ann}} + C_{\text{I,HWT}}^{\text{ann}} \quad (25)$$

式中: $C_{\text{I,HP}}^{\text{ann}}$ 、 $C_{\text{I,HWT}}^{\text{ann}}$ 分别表示热泵和蓄热水箱投资成本等年值, 元。各设备投资成本等年值计算可采用如下公式:

$$C_{\text{I,HP}}^{\text{ann}} = c_{\text{I,HP}} Q_{\text{HP}} r / (1 - 1 / (1 + r)^{l_{\text{HP}}}) \quad (26)$$

$$C_{\text{I,HWT}}^{\text{ann}} = c_{\text{I,HWT}} Q_{\text{HWT}} r / (1 - 1 / (1 + r)^{l_{\text{HWT}}}) \quad (27)$$

式中: $c_{\text{I,HP}}$ 、 $c_{\text{I,HWT}}$ 分别为热泵及蓄热水箱单位投资成本, 元; r 为贴现率; l_{HP} 、 l_{HWT} 分别为热泵及蓄热水箱的预计运行寿命年限, a。

蓄热式电采暖系统年运行成本主要为购电费用, 与热泵消耗电功率有关:

$$C_0^{\text{ann}} = \sum_t c_{\text{grid}}(t) P_{\text{HP}}(t) \quad (28)$$

式中: $c_{\text{grid}}(t)$ 为 t 时段电价, 元/kWh。

设备年维护成本与各个设备的类型及运行情况有关。热泵维护费表示为单位功率维护成本与输出功率之积, 蓄热水箱维护成本则与容量有关:

$$C_M^{\text{ann}} = \sum_t c_{\text{M,HP}} H_{\text{HP}}(t) + c_{\text{M,HWT}} Q_{\text{HWT}} \quad (29)$$

式中: $c_{\text{M,HP}}$ 为热泵单位功率维护成本, 元/kW; $c_{\text{M,HWT}}$ 为蓄热水箱单位容量维护成本, 元/kWh。

2.1.3 约束

1) 蓄热式电采暖设备约束。

由于投资、空间及其他限制, 蓄热式电采暖系统设备可装设容量存在上、下限。

$$Q_{\text{HP,min}} \leq Q_{\text{HP}} \leq Q_{\text{HP,max}} \quad (30)$$

$$Q_{\text{HWT,min}} \leq Q_{\text{HWT}} \leq Q_{\text{HWT,max}} \quad (31)$$

式中： $Q_{HP,max}$ 、 $Q_{HP,min}$ 为热泵可装设额定输出功率上、下限，kW； $Q_{HWT,max}$ 、 $Q_{HWT,min}$ 为蓄热水箱可装设容量上、下限，kWh。

2) “停电不停暖”约束。

本文将满足停电时段用户热需求作为蓄热式电采暖规划模型的约束条件之一。为实现“停电不停暖”，蓄热水箱容量应大于停电时段维持供暖负荷，停电时段维持供暖约束为

$$H_{outage} \leq Q_{HWT,min} \quad (32)$$

2.2 下层运行优化模型

2.2.1 控制变量

下层运行优化模型控制变量为系统各设备的输入/输出和能源购销量。

2.2.2 目标函数

下层运行优化模型的目标函数为蓄热式电采暖系统年运行维护成本最小化，如式(33)所示，运行维护成本可由式(28)–(29)求得。

$$\min f = C_O^{ann} + C_M^{ann} \quad (33)$$

2.2.3 约束

1) 功率平衡约束。

蓄热式电采暖系统各时刻需要满足电、热母线的功率平衡约束，如式(19)–(20)所示。

2) 设备运行约束。

热泵及蓄热水箱运行约束如式(12)–(18)所示。

3) 考虑配电网网架约束的电功率上限约束。

电采暖负荷的接入使地区电负荷激增，在避免配电网负荷“峰上加峰”的情况下，尽量保障热负荷需求。本文考虑配电网最大传输功率约束，通过限制用电高峰时刻的电采暖系统传输功率，缓解配电网负荷压力，保障电力有序可靠供应和电网安全稳定运行。

$$P_{grid}(t) \leq P_{grid,max} \quad (34)$$

4) 停电时段维持供暖负荷约束。

蓄热水箱容量在调度各时刻内应大于停电时段维持供暖负荷，保障任意时刻发生停电故障时，蓄热水箱中的蓄热量均满足用户热负荷，根据式(17)蓄热水箱容量约束及式(32)停电不停暖约束，可得：

$$Q_{HWT,min} \leq Q_{HWT} \leq Q_{HWT,max} \quad (35)$$

序列二次规划法是用于求解非线性规划问题的有效方法，本文使用基于该算法的SNOPT求解器对上述双层规划模型进行求解^[28]。

2.3 规划方案影响指标

本文利用负荷峰谷差与用电同时率2个指标描述电采暖负荷对配电网基础负荷的影响。

1) 负荷峰谷差。

负荷峰谷差 ΔP 反映了电采暖负荷对配电网负荷特性的影响，在配电网基础负荷不变前提下，负荷峰谷差为热泵电负荷的峰谷差：

$$\Delta P = P_{HP,max} - P_{HP,min} \quad (36)$$

式中： $P_{HP,max}$ 、 $P_{HP,min}$ 分别为热泵电负荷峰谷值。

2) 用电同时率。

配电网基础负荷与电采暖负荷用电同时率定义为

$$\xi = P_{total,max} / (P_{bas,max} + P_{grid,max}) \quad (37)$$

式中： $P_{total,max}$ 为配电网总用电负荷最大值，kW； $P_{bas,max}$ 为配电网基础电负荷最大值，kW； $P_{grid,max}$ 为一天内电采暖负荷最大值，kW。

3 算例分析

3.1 算例系统及参数

本文采用结构如图3所示的蓄热式电采暖系统验证所提方法的正确性及有效性。

图5为根据第2章计算出的该园区楼宇群供暖区域供暖季典型日热负荷，假设该园区楼宇组成一致，类型及参数选取自文献[27]，该典型日室外温度和光照强度如附录A图A1及A2所示。热泵及蓄热水箱的主要参数如表1所示。分时电价及用电高峰购电量限额如表2所示。配电网各时刻基础电负荷及最大传输功率如附录A图A3及A4所示。

表1 热泵及蓄热水箱主要参数

Table 1 Parameters of HP and HWT

设备	参数	取值
热泵	投资成本	15 890元/kW
	维护成本	0.7元/kWh
	ACOP	3.2
	设备寿命	20 a
	贴现率	8%
蓄热水箱	投资成本	280元/kWh
	维护成本	0.77元/kWh
	最大充放能率	0.25
	自放能率	0.001
	设备寿命	20 a
	贴现率	8%

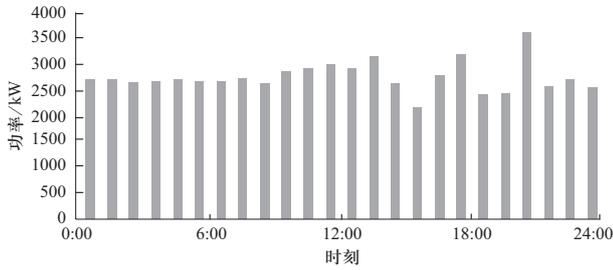


图5 供暖季典型日热负荷水平
Fig. 5 Heating load in a typical day

表2 分时电价及购电量约束
Table 2 TOU and electricity purchasing constraints

项目	时段	电价/ (元·(kWh) ⁻¹)	购电量上限 /kWh
峰段	10:00—15:00	1.289 3	500
	18:00—21:00		
平段	07:00—10:00	0.873 1	—
	15:00—18:00		
	21:00—23:00		
谷段	23:00—07:00	0.457 0	—

为更清晰验证本文方法有效性，构建如表3所示4种典型场景进行对比。

1) 正常供电下电采暖优化配置方案分析。

场景1：园区仅配置热泵，不配置蓄热水箱；

场景2：园区同时投资配置热泵和蓄热水箱；

场景3：园区同时投资配置热泵和蓄热水箱，并考虑约束(22)影响；

2) 考虑“停电不停暖”配置方案分析。

场景4：在场景3的基础上，进一步考虑约束(23)影响，考虑停电时段维持供暖，实现“停电不停暖”。

表3 算例场景
Table 3 Scenarios of case study

场景	热泵	蓄热水箱	购电上限	停电不停暖
1	✓			
2	✓	✓		
3	✓	✓	✓	
4	✓	✓	✓	✓

3.2 算例结果及分析

各场景下蓄热式电采暖系统配置方案及年成本如表4所示，正常供电下，场景1—3的峰谷差与用电同时率如表5所示。

表4 系统配置方案及成本

Table 4 System planning schemes and annual costs

场景	热泵 /kW	蓄热水箱 /kWh	投资成本 /(万元·a ⁻¹)	运维成本 /(万元·a ⁻¹)	总成本 /(万元·a ⁻¹)
1	3 686.45	0	596.63	610.06	1 206.69
2	2 841.31	3 380.54	469.49	613.47	1 082.96
3	3 643.40	9 689.75	617.29	615.12	1 232.41
4	4 779.16	19 974.68	830.44	625.99	1 456.43

表5 峰谷差与用电同时率

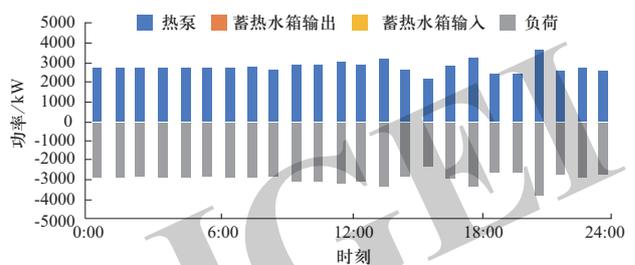
Table 5 Peak-valley difference and load coincidence factor

场景	电采暖负荷峰谷差 /kW	配电网总负荷峰谷差 /kW	用电同时率
1	459.17	3 750.98	0.99
2	20.91	3 518.40	1
3	638.56	3 096.00	0.89

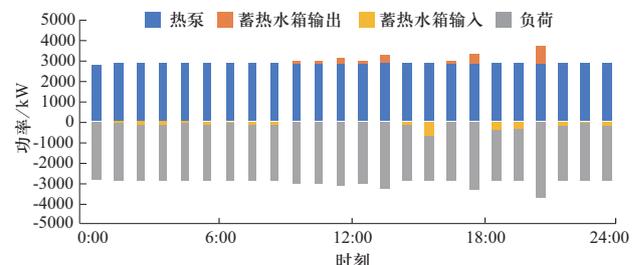
3.2.1 正常供电下配置方案经济性分析

由表4可见，场景2的年总成本相较于场景1降低了10.25%。由于蓄热水箱价格较低，蓄热式电采暖通过装设蓄热设备可有效减少热泵功率，降低投资成本。但由于蓄热水箱的热损失及维护成本，系统运行维护成本将增加。

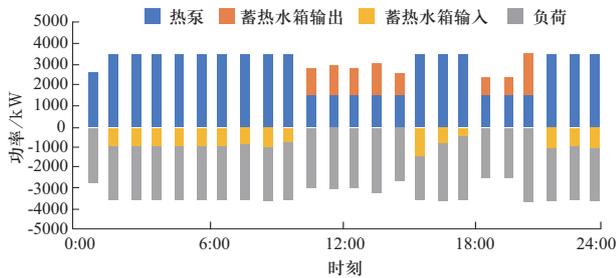
场景1—3系统典型日热负荷优化调度方案如图6所示，电负荷优化调度方案如图7所示。



(a) 场景1热负荷优化调度结果



(b) 场景2热负荷优化调度结果

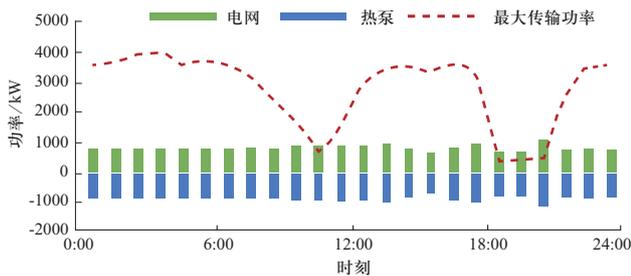


(c) 场景3热负荷优化调度结果

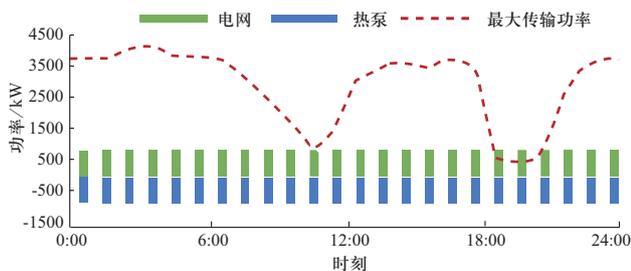
图6 系统热负荷优化调度结果

Fig. 6 Optimal operation schemes of system heating load

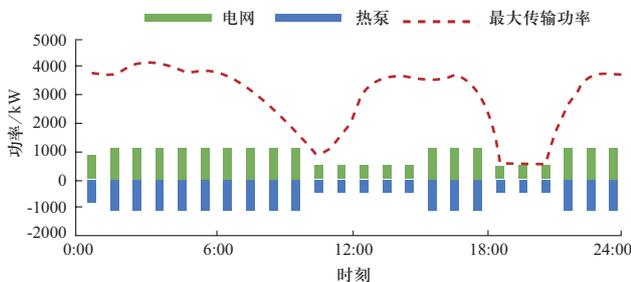
场景1下，由热泵满足所有热负荷，电采暖接入，需在每个时刻按热负荷需求相应从电网购电以满足所有增加电负荷，因此购电量随热负荷变化存在较大的波动性。而场景2通过装设蓄热设备，可通过储热降低在电价峰值的购电量，实现削峰填谷。由表5可见，场景2相较于场景1，接入电采暖负荷的峰谷差降低了95.45%。在考虑配电网基础负荷的情况下也使得配电网峰谷差有明显下降。



(a) 场景1电负荷优化调度结果



(b) 场景2电负荷优化调度结果



(c) 场景3电负荷优化调度结果

图7 系统电负荷优化调度结果

Fig. 7 Optimal operation schemes of system electrical load

考虑配电网最大传输功率，在场景1中由于热泵供热量需与热负荷实时平衡，电采暖负荷随热负荷波动，在考虑配电网基础负荷的情况下，部分时刻电采暖负荷将超过配电网最大传输功率，需要对电网进行扩容，以增加供电量，使成本大幅增加。场景2中蓄热设备的增加虽然使得电采暖系统有一定的削峰填谷能力，但仍在部分时刻超过配电网承载能力，不过越限幅度小于场景1，需要在电网微增容情况下才能保障配电网安全运行。且以上2种场景下用电同时率都处于较高水平，因此电采暖的加入使得配电网容易出现在基础用电高峰叠加电采暖负荷高峰的情况，对配电网安全运行带来极大挑战。

因此，为保障配电网安全运行，且兼顾用户热负荷需求，场景3考虑在用电高峰时刻限制蓄热式电采暖负荷以保障电网运行安全，在用电平谷时刻不考虑购电约束。

由表4可见，由于在用电高峰时刻存在购电量限制，需要蓄热水箱储存能量应对负荷高峰，场景3增加了热泵及蓄热水箱设备容量，投资成本有所增加。但却因此有效减少了配电网总负荷峰谷差及用电同时率，不但保障了配电网安全可靠供电，而且可有效实现配电网无增容情况下的电采暖负荷接入。

3.2.2 考虑“停电不停暖”的配置方案分析

场景4进一步考虑故障停电情况下，保障用户“停电不停暖”。

由表4可见，相较于场景3，场景4进一步增加了热泵及蓄热水箱设备容量，投资费用增加较为明显。停电时刻电负荷仅能由蓄热水箱保障，因此需要大幅增加蓄热水箱容量，并相应合理增加热泵容量，以实现在保障平谷时刻热负荷需求的情况下，通过蓄热水箱存储足够热量应对停电时刻的热负荷。相较于场景3，热泵及蓄热水箱容量分别增加了28.23%及106.14%，总成本增加18.18%。而考虑到为保障用户“停电不停暖”，运维成本的大幅增加也说明考虑配电网最大传输功率，避免造成配电网故障的巨大经济效益。

场景4系统典型日故障停电情况下调度方案如图8所示。可见，在该配置方案下可有效保障停电时的热负荷供应。

3.3 灵敏度分析

电采暖系统优化配置模型的主要变化参数包含电价、蓄热水箱成本、负荷、用电高峰时刻购电量上

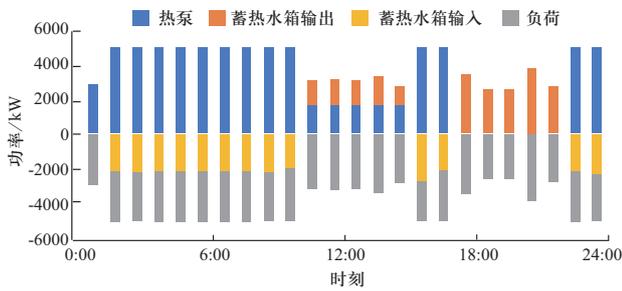


图8 场景4系统热负荷优化调度结果

Fig. 8 Optimal operation schemes of system heating load in Scenario 4

限、停电维持供暖时长。为分析电采暖系统受各参数影响情况,本文进行了一组灵敏度仿真分析。

以场景4作为其他参数改变仿真实验的对照组,记录单一因素增加10%及减少10%条件下的电采暖系统设备容量及年成本,包括:热泵容量、蓄热水箱容量及年投资、运行、维护成本,并与场景4进行对比分析。

进一步,为更清晰反映电采暖系统配置方案对模型单一参数的敏感性,本文定义改变参数后仿真结果的偏移量 δ :

$$\delta = (\phi - \phi_0) / \phi_0 \quad (38)$$

式中: ϕ 为单一因素增加或减少10%条件下,电采暖系统设备容量及年成本; ϕ_0 为场景4下电采暖系统配置方案及年成本。

各参数变化引起的蓄热式电采暖设备容量及年成本偏移量如图9所示。

由标准化灵敏度分析结果可知,蓄热式电采暖设备容量受多种参数影响,但对各参数变化的敏感程度不同。电采暖系统设备容量对电价及设备投资成本等

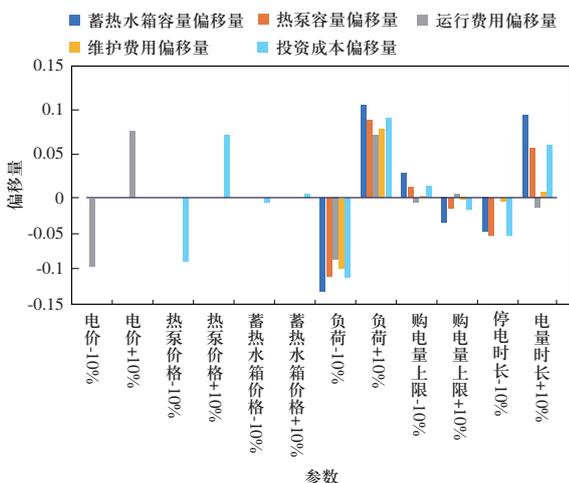


图9 标准化灵敏度仿真分析结果

Fig. 9 Standardized sensitivity analysis

价格参数变化的敏感程度较低。在非价格参数中,电采暖系统设备容量及各成本均对负荷变化最为敏感,停电时长次之,对购电量上限的敏感程度在三者中最低。

4 结论

本文提出一种考虑配电网时空特性与承载能力的蓄热式电采暖双层优化配置方法,通过算例仿真分析得到如下结论。

1) 蓄热式电采暖可以通过蓄热水箱起到一定削峰填谷作用,缩小配电网负荷峰谷差,降低用能费用。

2) 以配电网传输功率约束为限制时,可避免在用电高峰时刻叠加大量电采暖负荷,降低用电同时率,有效缓解负荷高峰时刻配电网运行压力,保障配电网运行安全性。

3) 以故障态下“停电不停暖”作为约束,虽然增加了蓄热设备投资成本,但可通过充分利用蓄热设备,在停电时段维持供暖,保障用户热负荷需求。

4) 由灵敏度分析可知,负荷是影响电采暖系统优化配置方案的关键因素,负荷预测精度对优化配置方案实用性有重要影响。

下一步工作将考虑系统热负荷需求不确定性,细化蓄热式电采暖系统规划方案。

参考文献

- [1] MA Zhiyuan, ZHANG Shining, HOU Fangxin, et al. Exploring the driving factors and their mitigation potential in global energy-related CO₂ emission[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(5): 413-422.
- [2] 周卫青, 吴华成, 李睿, 等. “大气污染防治行动计划”特高压工程大气环境效益评估[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(增刊1): 283-289. ZHOU Weiqing, WU Huacheng, LI Rui, et al. Environment benefit evaluation on UHV transmission in China's air pollution prevention and control action plan[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(Supplement 1): 283-289(in Chinese).
- [3] 朱佩娟. 用上新能源 日子很温暖[N]. 人民日报. 2021-02-05(14).
- [4] 董凌, 李延和, 刘锋, 等. 区域全清洁能源供电的发展路径与实践——以青海省为例[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(4): 385-392. DONG Ling, LI Yanhe, LIU Feng, et al. Development path and practice of regional fully clean power supply: a case study of

- Qinghai Province[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2020, 3(4): 385-392(in Chinese).
- [5] SOKOLNIKOVA P, LOMBARDI P, ARENDARSKI B, et al. Net-zero multi-energy systems for Siberian rural communities: a methodology to size thermal and electric storage units[J]. *Renewable Energy*, 2020, 155: 979-989.
- [6] HU B, WANG R Z, XIAO B, et al. Performance evaluation of different heating terminals used in air source heat pump system[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2019, 98: 274-282.
- [7] XU C, WANG C L, XU G, et al. Thermodynamic and environmental evaluation of an improved heating system using electric-driven heat pumps: a case study for Jing-Jin-Ji region in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 165: 36-47.
- [8] SHAH J J, NIELSEN M C, SHAFFER T S, et al. Cost-optimal consumption-aware electric water heating via thermal storage under time-of-use pricing[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(2): 592-599.
- [9] BAETEN B, ROGIERS F, HELSEN L. Reduction of heat pump induced peak electricity use and required generation capacity through thermal energy storage and demand response[J]. *Applied Energy*, 2017, 195: 184-195.
- [10] YU L, LEI J Y, GUO X B, et al. Planning of central energy station in community integrated energy system with electrical and heat storage devices[C]//2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia). May 21-24, 2019, Chengdu, China. IEEE, 2019: 2682-2687.
- [11] HUANG W J, ZHANG N, YANG J W, et al. Optimal configuration planning of multi-energy systems considering distributed renewable energy[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(2): 1452-1464.
- [12] SENEMAR S, RASTEGAR M, DABBAGHJAMANESH M, et al. Dynamic structural sizing of residential energy hubs[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(3): 1236-1246.
- [13] LIU G D, LI Z, STARKE M, et al. Optimal sizing of energy storage for community microgrids considering building thermal dynamics[C]//2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. July 16-20, 2017, Chicago, IL. IEEE, 2017: 1-5.
- [14] 周晓鸣, 丁一, 邵常政, 等. 计及电-热综合需求侧响应的热电联产机组优化配置研究[J]. *全球能源互联网*, 2019, 2(3): 248-254.
ZHOU Xiaoming, DING Yi, SHAO Changzheng, et al. Multi-objective sequential CHP placement based on flexible demand in heat and electricity integrated energy system[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2019, 2(3): 248-254(in Chinese).
- [15] BAHRAMIRAD S, REDER W, KHODAEI A. Reliability-constrained optimal sizing of energy storage system in a microgrid[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(4): 2056-2062.
- [16] NOVOA L, FLORES R, BROUWER J. Optimal renewable generation and battery storage sizing and siting considering local transformer limits[J]. *Applied Energy*, 2019, 256: 113926.
- [17] 天津电力. 天津电力职工斗寒潮保障“煤改电”线路安全[EB/OL]. (2021-01-09). http://www.tj.xinhuanet.com/xhvision/2021-01/09/c_1126963431.htm.
- [18] 国家电网公司关于坚持以客户为中心进一步提升优质服务水平的意见[N]. *国家电网报*, 2018-01-23(2).
- [19] HANIF S, MASSIER T, GOOI H B, et al. Cost optimal integration of flexible buildings in congested distribution grids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(3): 2254-2266.
- [20] 靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 融合需求侧虚拟储能系统的冷热电联供楼宇微网优化调度方法[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(2): 581-591.
JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Optimal scheduling method for a combined cooling, heating and power building microgrid considering virtual storage system at demand side[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(2): 581-591(in Chinese).
- [21] FERRARINI L, RASTEGARPOUR S, CASERI L. Predictive control-oriented models of a domestic air-to-water heat pump under variable conditions[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(4): 5363-5369.
- [22] FISCHER D, MADANI H. On heat pumps in smart grids: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 70: 342-357.
- [23] SHUKHOBODSKIY A A, COLANTUONO G. RED WoLF: Combining a battery and thermal energy reservoirs as a hybrid storage system[J]. *Applied Energy*, 2020, 274: 115209.
- [24] 王成山, 洪博文, 郭力, 等. 冷热电联供微网优化调度通用建模方法[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(31): 26-33.
WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li, et al. A general modeling method for optimal dispatch of combined cooling, heating and power microgrid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(31): 26-33(in Chinese).
- [25] GUELPA E, BARBERO G, SCIACOVELLI A, et al. Peak-shaving in district heating systems through optimal management of the thermal request of buildings[J]. *Energy*, 2017, 137: 706-714.
- [26] KOUTROUMPEZIS G N, SAFIGIANNI A S. Optimum allocation of the maximum possible distributed generation penetration in a distribution network[J]. *Electric Power Systems Research*, 2010, 80(12): 1421-1427.
- [27] 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.
ZHANG Jiarui, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Day-ahead optimal scheduling method for regenerative electric heating considering thermal demand of users during power outage[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(21):15-22 (in Chinese).
- [28] MU Y F, CHEN W Q, YU X D, et al. A double-layer planning method for integrated community energy systems with varying energy conversion efficiencies[J]. *Applied Energy*, 2020, 279: 115700.

附录A 部分算例参数

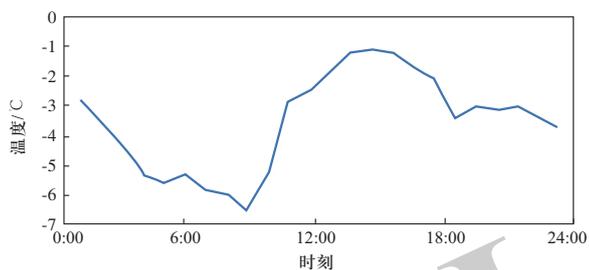


图 A1 室外温度

Fig. A1 Outdoor temperature

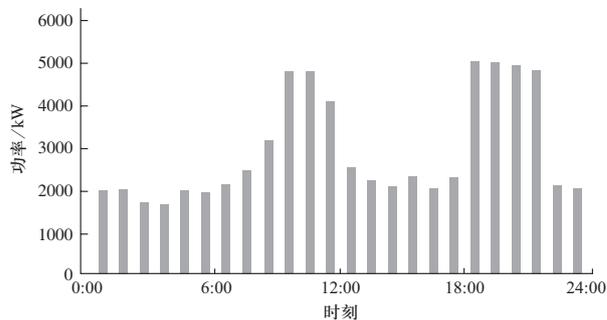


图 A3 配电网电负荷

Fig. A3 Electricity load of distribution network

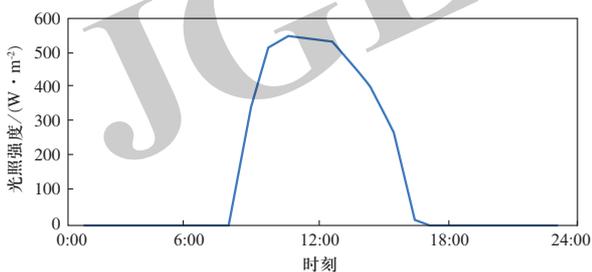


图 A2 光照强度

Fig. A2 Solar intensity

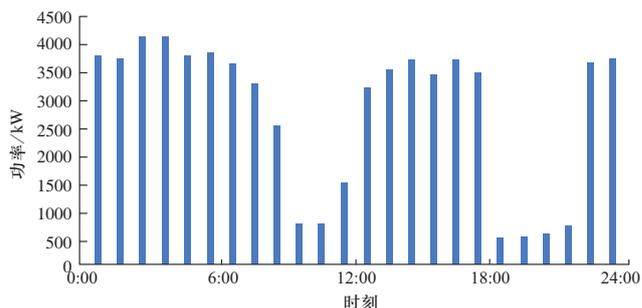


图 A4 配电网最大传输功率

Fig. A4 Capacity of distribution network

收稿日期: 2021-01-14; 修回日期: 2021-02-20。



张嘉睿

作者简介:

张嘉睿 (1995), 男, 博士研究生, 主要研究方向为综合能源集成与应用, E-mail: jerry_zhang@tju.edu.cn。

陈晚晴 (1996), 女, 硕士, 主要研究方向为综合能源集成与应用, E-mail: 675673672@qq.com。

穆云飞 (1984), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统安全性与稳定性、综合能源集成与应用。通信作者, E-mail: yunfeimu@tju.edu.cn。

(责任编辑 李锡)