

市电、光伏互补相变蓄能电供暖系统 柔性负荷调节能力分析

张群力^{1,2}, 张金亮¹, 刘一墨³, 张秋月², 程焯锐¹

(1.北京建筑大学 供热供燃气通风及空调工程北京市重点实验室, 北京 100044; 2.北京建筑大学 环境与能源工程学院, 北京 100044; 3.航天中心医院, 北京 100049)

摘要: 随着我国可再生能源的跨越式发展, 新能源电力消纳问题日益突出。文章构建了市电与光伏互补型相变蓄能电供暖系统, 搭建了该系统动态热性能的数学模型, 设计了系统的热电负荷柔性调节控制策略。针对北京市某低碳建筑进行情景分析, 模拟研究了该系统的光伏消纳能力和柔性负荷转移能力。结果表明: 在室内温度维持在 18 °C 的情况下, 采用屋顶光伏的系统能够降低案例建筑 93.9% 的峰电消耗量及 23.9% 的一次能源消耗量; 与无光伏系统相比, 使用不同安装形式及面积的系统, 峰电消耗量能够降低 75.1%~97.4%, 且蓄电容量的提升对系统的柔性负荷转移能力提升有着显著作用, 当蓄电池容量大于 15 kW·h 时, 提升效果逐渐减小。

关键词: 光伏; 供暖; 多能互补; 柔性负荷; 建筑热性能

中图分类号: TK51; TU854 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)09-1179-10

0 引言

随着国家“双碳”战略目标的部署, 中国正在大力推进能源清洁低碳转型, 以风、光为主体的清洁能源大规模接入电网^[1-2]。我国“三北”地区供暖季长, 风电并网空间差, 依托“可再生能源发电+电转热+蓄能”技术^[3], 可以降低纯电采暖的电网压力, 起到电力调峰作用。

作为灵活的可调节资源, 蓄热式电采暖末端可有效解决新能源与负荷时空不匹配导致的弃光、弃风等问题^[4-6]。目前, 已有大量学者对蓄热式清洁供暖技术及系统进行了研究。文献[7]分析了当前蓄热式电锅炉的电热转换及储热特性, 探索了其在能源互联网中的应用模式。文献[8]采用蓄热式电锅炉消纳风电模式, 建立了日热负荷需求优化调度模型。文献[9]提出蓄热式电锅炉与燃煤锅炉联合供暖的多级运行模式, 有效地提高了风电消纳。文献[10]提出将蓄热式电锅炉与分布式光伏发电相结合的新型供暖方式, 建立经济性模型, 证明了该系统的经济性。文献[11]设计了太阳能相变蓄热蒸发型空气源热泵复合供暖系统, 采用合理的控制策略有效提升机组能效比。文献[12]建立低温热泵系统数学模型, 分析了其运行

的可行性与经济性。文献[13]用建筑供暖热泵系统做了间歇运行试验, 结果表明机组换热效率与供暖效果优于连续运行模式。

从电力系统发展形态来看, 源、荷互动已经成为新型电网的发展趋势^[14-16]。相变蓄热式电采暖末端具有可迁移性、调节性高的特点, 成为清洁供暖系统中重要组成部分。目前以热泵、电锅炉为代表的供暖设备优化研究较多, 针对更加轻量化、电气化的蓄热电供暖的研究较少。因此本文搭建了市电与光伏互补型相变蓄能电供暖系统试验台, 研究了该系统的热性能模型与动态控制策略, 并以北京市某低碳科研楼为例, 验证了数学模型与控制策略的有效性。

1 市电、光伏互补相变蓄能电供暖系统

1.1 试验系统原理

市电、光伏互补相变蓄能电供暖系统主要由光伏板、控制器、蓄电池、逆变器及蓄热式电供暖装置组成, 系统原理见图 1。系统中利用蓄电池对光伏电与低谷市电进行储存, 当蓄热单元中的蓄热量较低或有光伏电消纳需求时, 将蓄电池中的电能转化为热能储存到相变蓄热电供暖装置中, 再通过对流换热与辐射换热的方式将热量传递到室内。

收稿日期: 2023-09-22。

基金项目: 北京建筑大学博士研究生科研能力提升项目资助(DG2023010);北京建筑大学研究生创新项目资助(PG2022070)。

作者简介: 张群力(1977-),男,博士,教授,研究方向为余热回收与建筑节能。E-mail:zhangqunli@bucea.edu.com

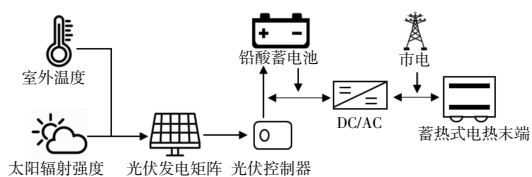
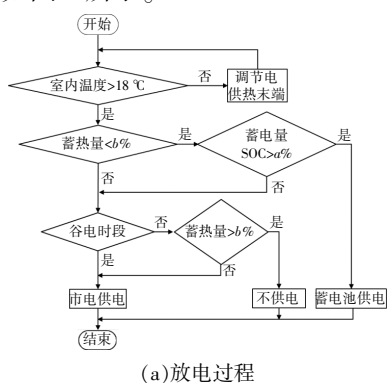


图1 相变蓄热式电供暖流程图

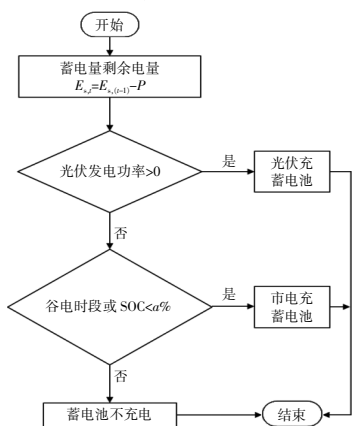
Fig.1 Illustration of heating system

1.2 运行策略

在满足室内房间热舒适性的基础上,为提高系统对光伏电量的消纳能力、削减峰价市电的使用,设计了市电、光伏互补相变蓄热电供暖系统控制策略,如图2所示。



(a)放电过程



(b)充电过程

图2 系统控制策略流程图

Fig.2 System control strategy flow chart

鉴于夜间蓄电池须保留一定容量以消纳光伏电量,因此根据前一日的弃光量计算蓄电池的荷电状态(SOC),设定蓄电池夜间的动态控制模型:

$$SOC_{max}(t) = \begin{cases} SOC_{st} - \sum_{i=t-23}^t E_{PV,1}(i) / E_{PV,1,st}, & \sum_{i=t-23}^t E_{PV,1}(i) / E_{PV,1,st} < SOC_{st} \\ 0, & \sum_{i=t-23}^t E_{PV,1}(i) / E_{PV,1,st} \geq SOC_{st} \end{cases} \quad (1)$$

式中: SOC_{max} 为蓄电池夜间最大荷电状态上限; t 为时刻; SOC_{st} 为蓄电池荷电状态的基准控制值; $E_{PV,1}$ 为系统的逐时弃光量, $kW \cdot h$; $E_{PV,1,st}$ 为系统的单日累积弃光限度, $kW \cdot h$ 。

2 市电、光伏互补相变蓄能电供暖系统热性能模型及验证

2.1 建筑热过程数学模型

在建立建筑热过程基本方程的过程中,将墙体传热简化为一维问题可有效降低求解难度;将室内空气温度集总为单一节点处理,同时假定墙体物性不随时间变化。在此基础上利用状态空间法,构建建筑动态热平衡数学模型并求解,围护结构的离散温度节点如图3所示。

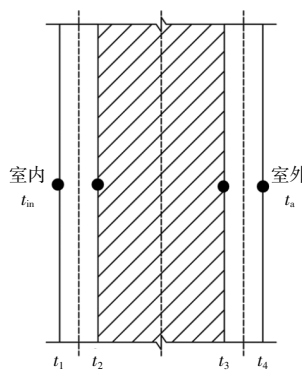


图3 墙体简化模型

Fig.3 Simplified model of the wall

①外围护结构动态热平衡模型

外围护结构温度节点的动态热平衡方程^[17]为

$$\frac{1}{2} \rho_1 c_1 \Delta x_1 F_j \frac{dT_1}{d\tau} = h_{in} F_j (T_{in} - T_1) + \frac{\lambda_1}{\Delta x_1} F_j (T_2 - T_1) + q_{in} \quad (2)$$

$$\left(\frac{1}{2} \rho_1 c_1 \Delta x_1 + \frac{1}{2} \rho_2 c_2 \Delta x_2 \right) F_j \frac{dT_2}{d\tau} = \frac{\lambda_1}{\Delta x_1} F_j (T_1 - T_2) + \frac{\lambda_2}{\Delta x_2} F_j (T_3 - T_2) \quad (3)$$

$$\left(\frac{1}{2} \rho_2 c_2 \Delta x_2 + \frac{1}{2} \rho_3 c_3 \Delta x_3 \right) F_j \frac{dT_3}{d\tau} = \frac{\lambda_2}{\Delta x_2} F_j (T_2 - T_3) + \frac{\lambda_3}{\Delta x_3} F_j (T_4 - T_3) \quad (4)$$

$$\frac{1}{2} \rho_3 c_3 \Delta x_3 F_j \frac{dT_4}{d\tau} = h_a F_j (T_a - T_4) + \frac{\lambda_3}{\Delta x_3} F_j (T_3 - T_4) + q_{out} \quad (5)$$

式中: ρ_j 为第 j 个差分层的密度, kg/m^3 ; c_j 为第 j 个差分层的比热容, $J/(kg \cdot K)$; x_j 为第 j 个差分层的厚度, m ; F_j 为第 j 个差分层的面积, m^2 ; T_j 为围护

结构 j 的表面温度, $^{\circ}\text{C}$; τ 为时间, s ; h_{in} 为墙体内部面对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; t_{in} 为墙体内部表面温度, $^{\circ}\text{C}$; λ_j 为第 j 个差分层的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; q_{in} 为墙体内部表面吸收的辐射热量, W ; h_a 为墙体外表面对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_a 为空气温度, $^{\circ}\text{C}$; q_{out} 为墙体外表面吸收的辐射热量, W 。

q_{in} 主要由室内辐射热源 q_r 及外窗入射辐射 q_{si} 组成:

$$q_{\text{in}} = q_r + q_{\text{si}} \quad (6)$$

$$q_r = \sum_{i=1}^n \left[\sigma_b (T_{\text{sh}}^4 - T_{\text{gi}}^4) X_{\text{sh}-i} A_{\text{sh}} \right] \quad (7)$$

式中: σ_b 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_{sh} 为相变蓄热电供暖装置外壳温度, K ; T_{gi} 为墙体 i 表面温度, K ; $X_{\text{sh}-i}$ 为相变蓄热电供暖装置与墙体 i 之间的角系数; A_{sh} 为相变蓄热电供暖装置的外壳计算面积, m^2 。

$$q_{\text{si}} = q_{\text{so}} \cdot s_i = (I_D \tau_D + I_d \tau_d) \cdot S \cdot \chi \cdot F_w \cdot s_i \quad (8)$$

式中: q_{so} 为外窗入射的总辐射量, W ; s_i 为围护结构占外窗入射总辐射量的份额; I_D 为外窗表面受到的太阳直射辐射强度, W/m^2 ; I_d 为外窗表面受到的太阳散射辐射强度, W/m^2 ; D 为太阳直射辐射的透过率; d 为太阳散射辐射的透过率; S 为遮阳系数; χ 为玻璃面积系数, 等于玻璃面积/整窗面积; F_w 为整窗面积, m^2 。

②内围护结构动态热平衡模型

在计算内围护结构热量传递方程时, 将式(4)修改为

$$\frac{1}{2} \rho_3 c_3 \Delta x_3 F_j \frac{dT_4}{d\tau} = h_{\text{in}} F_j (T_{\text{near}} - T_4) + \frac{\lambda_3}{\Delta x_3} F_j (T_3 - T_4) + q_{\text{near}} \quad (9)$$

式中: T_{near} 为临室墙面的温度, $^{\circ}\text{C}$; q_{near} 为临室墙面受到的辐射量, W 。

③室外空气综合温度模型

围护结构外侧所受辐射复杂, 需将这些外扰对外表面的影响统一用室外空气综合温度^[18]来表示, 即:

$$T_z = T_d + \frac{q_s + q_R - q_e}{h_a} \quad (10)$$

式中: T_z 为室外空气综合温度, $^{\circ}\text{C}$; T_d 为室外空气干球温度, $^{\circ}\text{C}$; q_s 为围护结构外表面吸收的太阳辐射, W/m^2 ; q_R 为围护结构外表面吸收的地面反射辐射, W/m^2 ; q_e 为夜间辐射, W/m^2 。

根据室外空气综合温度模型, 墙体外围护结构的热量传递方程可以简化为

$$\frac{1}{2} \rho_3 c_3 \Delta x_3 \frac{dT_4}{d\tau} = h_a (T_z - T_4) + \frac{\lambda_3}{\Delta x_3} (T_3 - T_4) \quad (11)$$

④室内空气动态热平衡模型

利用集总参数法对室内空气进行假设, 室内空气的动态热传递方程^[17]为

$$(C_f + 1) \rho_a c_a V_{\text{in}} \frac{dt_{\text{in}}}{d\tau} = \sum_{j=1}^n F_j h_{\text{in}} (t_{i4} - t_{\text{in}}) + F_w K_w (t_a - t_{\text{in}}) + q_c + q_{\text{vent}} \quad (12)$$

式中: C_f 为家具计算系数, 代表将家具比热容是空气比热容的 C_f 倍; ρ_a 为空气密度, kg/m^3 ; c_a 为空气比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; V_{in} 为计算房间体积, m^3 ; K_w 为窗户复合传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; q_c 为对流换热功率, W ; q_{vent} 为通风换气的换热量, W 。

q_{vent} 计算方法为

$$q_{\text{vent}} = n_{\text{in}} \rho_a c_a V_{\text{in}} (t_a - t_{\text{in}}) \quad (13)$$

式中: n_{in} 为计算房间的通风换气次数。

2.2 设备性能数学模型

①光伏发电输出功率率数学模型^[9]为

$$P_{\text{PV}} = P_{\text{STC}} \frac{G_c}{G_{\text{STC}}} [1 + k(T_c - T_{\text{STC}})] \quad (14)$$

$$T_c = T_e + (c_1 + c_2 e^{c_3 v}) G_c \quad (15)$$

式中: P_{STC} 为光伏试验工况下输出功率, W ; G_c 为光伏实际工作时的光照强度, W/m^2 ; G_{STC} 为试验工况的光照强度, W/m^2 ; k 为功率温度系数; T_c 为光伏实际工作时的温度, K ; T_{STC} 为试验工况下的环境温度, K ; T_e 为光伏实际工作时的环境温度, K ; c_1, c_2, c_3 为常数; v 为光伏实际工作时的风速, m/s 。

②蓄电池实际充、放电功率率数学模型^[20]为

$$P_{\text{ES},t}^{\text{act}} = \begin{cases} P_{\text{ES},t} \eta_{\text{ES},c} & P_{\text{ES},t} \geq 0 \\ \frac{P_{\text{ES},t}}{\eta_{\text{ES},d}} & P_{\text{ES},t} < 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $P_{\text{ES},t}^{\text{act}}$ 为 t 时刻蓄电池的实际功率, W ; $P_{\text{ES},t}$ 为 t 时刻蓄电池的理想功率, W ; $\eta_{\text{ES},c}, \eta_{\text{ES},d}$ 分别为蓄电池的充电、放电效率。

蓄电池任意时刻的电量表达式为

$$E_{\text{ES},t} = (1-g) E_{\text{ES},t-1} + P_{\text{ES},t}^{\text{act}} \Delta T \quad (17)$$

式中: $E_{\text{ES},t}$ 为蓄电池 t 时刻的电量; g 为蓄电池的自损耗系数; T 为求解时间步长, 1h 。

蓄电池的荷电状态^[21]表达式为

$$SOC_t = \frac{E_{ES,t}^{rat}}{E_{ES}^{rat}} \quad (18)$$

式中: SOC_t 为蓄电池 t 时刻的荷电状态; E_{ES}^{rat} 为蓄电池的额定容量, $kW \cdot h$ 。

③相变蓄热电供暖设备数学模型^[22]为

$$Q_{s,t} = \begin{cases} c_s m (\bar{T}_m - T_0) + hm + c_l m (T - T_m^+) & T > T_m^+ \\ c_s m (\bar{T}_m - T_0) + hm \cdot \beta_t & T_m^- < T < T_m^+ \\ c_s m (T - T_0) & T < T_m^- \end{cases} \quad (19)$$

式中: $Q_{s,t}$ 为相变蓄热电供暖装置在 t 时刻蓄热单元中储存的热量, kJ ; c_s 为相变材料的固态比热容, $J/(kg \cdot K)$; m 为相变蓄热电供暖设备中相变材料的质量, kg ; \bar{T}_m 为相变材料的终止相变温度, K ; T_0 为最低有效蓄热温度, K ; h 为相变材料的相变潜热, kJ/kg ; c_l 为相变材料的液态比热容, $J/(kg \cdot K)$; T_m^+ 为相变材料的起始相变温度, K ; β_t 为 t 时刻相变材料的液相率。

相变蓄热电供暖装置在任意时刻 t 的蓄热量计算数学模型为

$$Q_{s,t} = Q_{s,t-1} + \frac{(\eta P - \dot{q}) \cdot \Delta \tau}{1000} \quad (20)$$

式中: η 为热电转化效率; P 为电能输入功率, W ; \dot{q} 为相变蓄热电供暖装置的热量输出功率, W ; $\Delta \tau$ 为时间步长, s 。

$$\dot{q} = \dot{q}_c + \dot{q}_r \quad (21)$$

式中: \dot{q}_r 为辐射换热功率, W 。

$$\dot{q}_c = \rho_a c_a \dot{V}_a (T_{out} - T_{in}) \quad (22)$$

式中: \dot{V}_a 为相变蓄热电供暖装置进风口处的空气体积流量, m^3/s ; T_{out} , T_{in} 分别为相变蓄热电供暖装置的出风、进风温度, K 。

④静态投资回收期

$$Y_t = A / C_{save} \quad (23)$$

式中: Y_t 为多能互补相变蓄能电供暖系统静态回收期, a ; A 为系统初投资的提升费用, 元; C_{save} 为与普通电供暖装置相比年节省运行费用, 元。

2.3 试验系统及测试方案

为研究蓄电与蓄热的混合蓄能方式对负荷转移能力及光伏消纳能力的影响, 搭建了相变蓄能

电供暖系统试验台, 如图 4 所示。其设备型号及参数见表 1。

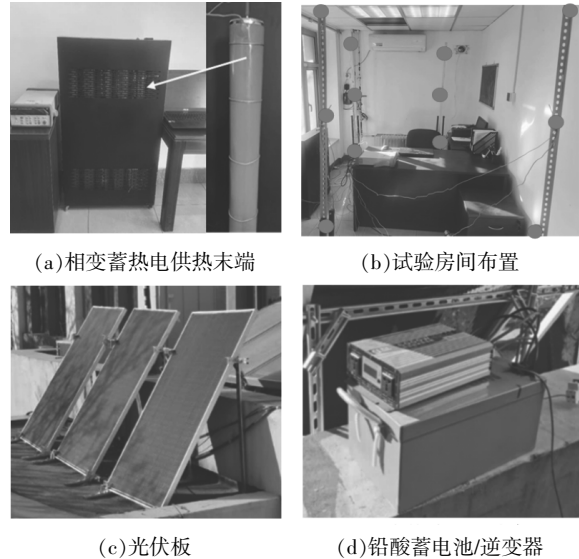


图 4 市电、光伏互补相变蓄能电供暖系统试验台

Fig.4 Latent heat storage heating system experimental platform

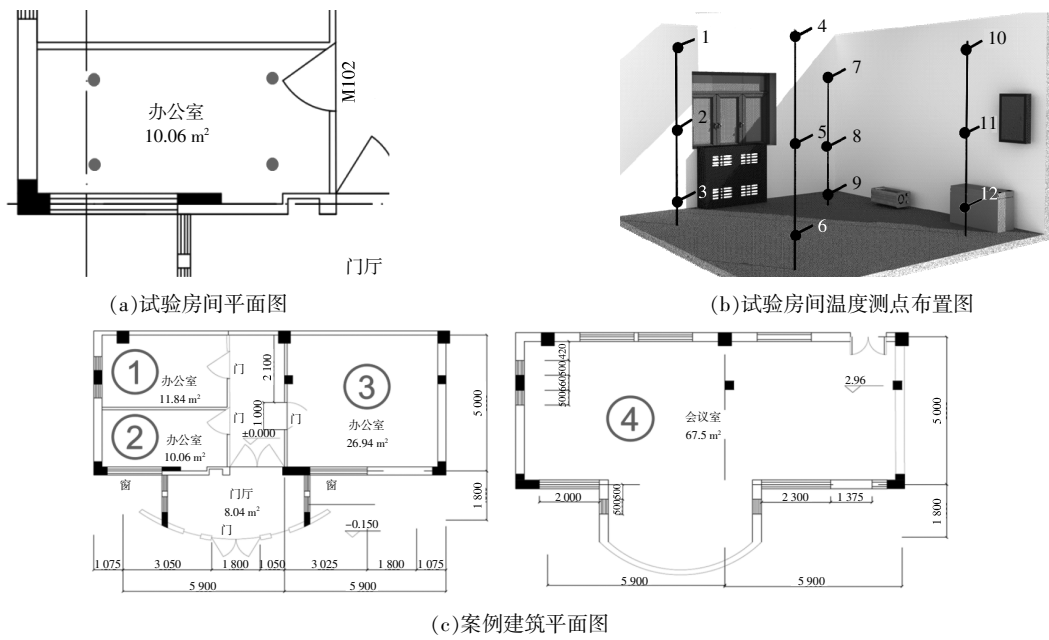
表 1 设备参数

Table 1 Parameters of each equipment

设备名称	型号规格	数量
相变蓄热式电供暖装置	六水氯化镁蓄热单柱×6	1
单晶硅光伏电池板	300 W/18 V	3
铅酸蓄电池	12 V250 Ah	1
逆变器	6 000 W	1
光伏控制器	60 A	1
数据记录仪	Agilent34972A	1
热电偶	K 型热电偶	12

试验房间为 $10.06 m^2$ 的办公室, 具体见图 5 (a)。该房间西、南墙为外墙, 其余为内墙, 南墙上包含 $4 m^2$ 的节能窗。外墙传热系数为 $0.47 W/(m^2 \cdot K)$, 窗体传热系数为 $1.61 W/(m^2 \cdot K)$ 。通过计算, 房间的冬季单位热负荷为 $40 W/m^2$ 。房间内布置了 12 个温度测点如图 5 (b) 所示, 用以计算均值, 确定逐时室内温度。试验时间为 2022 年 12 月—2023 年 1 月, 单个测试周期从 20:00—次日 20:00; 低谷电价时段为 20:00—8:00。

模拟中的案例建筑为北京某改造后的低碳科研楼, 见图 5 (c)。该建筑共有两层, 南墙、西墙与屋面均为外围护结构, 其余墙体为内围护结构, 建筑无地下空间, 建筑内共有 4 个主要房间。外墙传热系数为 $0.13 W/(m^2 \cdot K)$, 屋面传热系数为 $0.13 W/(m^2 \cdot K)$, 内墙传热系数为 $1.23 W/(m^2 \cdot K)$, 外窗



(a)试验房间平面图
(b)试验房间温度测点布置图
(c)案例建筑平面图
图5 试验房间
Fig.5 Test room

传热系数为 $1.23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。4个房间分别装配不同规格的相变蓄热电供暖装置,见表2。

表2 相变蓄热电供暖装置规格
Table 2 Specifications of latent heat storage heating device

房间	电供暖装置数量/台	总蓄热量/kJ
1	1	5 784
2	1	5 784
3	2	11 568
4	4	23 136

为减少市电的使用,设计了4种不同运行方案,如图6所示。方案1:仅利用低谷电为相变蓄热式电供暖装置蓄热;方案2:在方案1的基础上,在15:00利用蓄电池为电供暖装置进行蓄热补充;方案3:在方案1的基础上,9:00利用蓄电池为电供暖装置进行蓄热补充;方案4:在方案3的基础上,夜间利用低谷电为蓄电池充电,并在15:00利用蓄电池供电蓄热,以达到单日补充两次热量的目的。

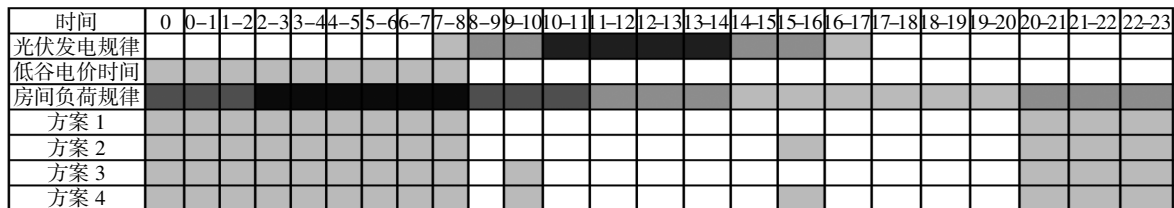


图6 系统运行方案
Fig.6 System operation scheme

2.4 模型验证

以建筑热过程中的热平衡方程为基础,将房间的温度节点方程组成矩阵形式^[20],利用MATLAB建立热过程模型,仿真验证步骤如图7所示。试验及模拟室温结果如图8所示。方案1仅依靠夜间蓄热量可以维持上午的室内温度在 18°C 以上,15:00后无法满足房间温度需求;方案2保证了全天室温均大于 18°C ;方案3中有3h无法满足室温需求;试验中方案4对应的室外温度

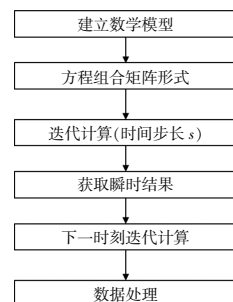


图7 仿真流程
Fig.7 Simulation process

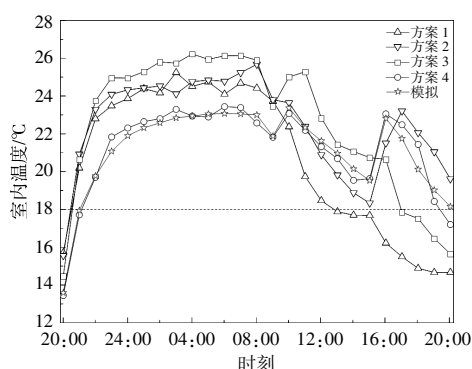


图8 数学模型验证

Fig.8 Mathematical model verification

最低,但仍基本保证了全天室温均大于18℃,且温度波动较低。因此,方案4是该试验系统中最为理想的运行方式。为验证模型的准确性,利用该模型对方案4复现,模拟结果与试验结果一致,证明该模型准确。

3 应用情景模拟分析

3.1 热电负荷柔性转移能力分析

将用户侧的电力需求时段从任意时刻转移至光伏发电的高峰时段和夜间低谷电时段,能够增强系统对光伏发电的消纳和削减对峰电消耗量,同时有效降低系统中蓄电池的容量压力。在建筑环境中,早晚时段热负荷需求较高,而光伏发电的高峰则常出现在中午和下午,因此利用相变蓄热单元的蓄热能力,将电力需求时段有效地转移至中午、下午和夜间,以实现电能与热能的有效协同调配。

本文模拟计算了该系统与常规系统(无光伏、无蓄热)在北京单个供暖季(11月15日-3月15日)的能源使用情况,结果如图9所示。

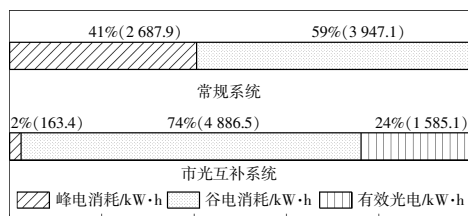


图9 能源消耗分布

Fig.9 Energy consumption distribution

由图9可知,在相同电量需求下,市电、光伏互补相变蓄能电供暖系统与常规系统相比降低了93.9%的峰电消耗量和23.9%的一次能源消耗量,具备显著的热电负荷柔性转移能力。

3.2 热电负荷柔性转移能力的多种因素影响分析

①光伏安装形式对热电负荷柔性转移能力的影响

根据模拟需要,设计3种光伏安装形式,具体参数见表3。

表3 光伏安装形式
Table 3 PV installation form

安装形式	光伏类型		倾角 (°)
	晶硅光伏/m ²	碲化镉光伏/m ²	
屋顶光伏	65		5
立面光伏		60(南向)+25(西向)	90
综合光伏	65(屋顶)	60(南向)+25(西向)	

通过模拟得出3种光伏安装形式对能源消耗的影响,详见表4。

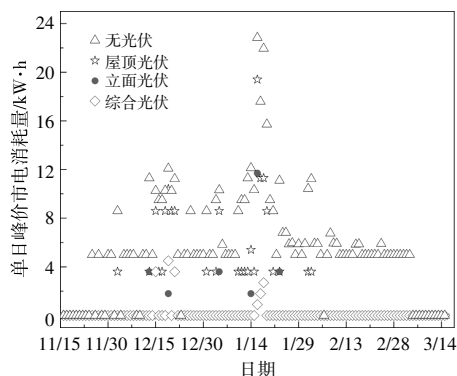
表4 不同光伏安装形式系统耗电量统计

Table 4 Power consumption statistics of different photovoltaic installation systems

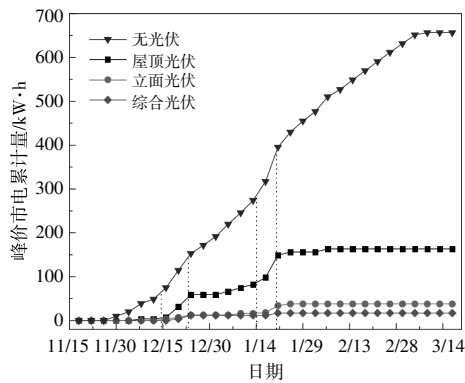
光伏安装方式	市电消耗 kW·h	有效光电 kW·h	峰电消耗 kW·h	弃光量 kW·h	弃光率 %
屋顶光伏	5 049.9	1 585.0	163.4	305.5	16.20
立面光伏	4 372.0	2 266.6	37.8	683.3	23.20
综合光伏	3 802.6	2 826.7	17.1	2 013.7	41.60
无光伏	6 643.6		656.5		

由表4可知,与无光伏系统相比,屋顶光伏、立面光伏以及综合光伏的峰电消耗量分别降低了75.1%,94.2%和97.4%。这表明系统在有效光伏电量提升的情况下,峰电消耗量呈现明显的下降趋势。

不同光伏安装形式下,峰价市电消耗量如图10所示。其中,图10(a)为不同光伏安装形式下单日峰价市电消耗量,图10(b)为不同光伏安装形式下峰价市电累计消耗量。采用光伏系统,对峰电需求主要集中在供暖需求最高的12月和1月中旬;而无光伏系统,峰电的需求则覆盖了整个供



(a)单日峰价市电消耗量



(b)峰价市电累计消耗量

图 10 不同光伏安装方式峰价市电消耗

Fig.10 Cumulative consumption of mains electricity at peak prices in different photovoltaic forms

暖季。在 12 月和 1 月中旬,由于综合光伏装机容量较大,可以维持系统在白天的能源需求;而屋顶光伏发电量较低,仅凭借光伏电和蓄电池储存的谷电难以维持白天室内的热负荷需求,须消耗峰电对蓄电池进行补充。在供暖季初末期,室外温度较高,室内热负荷需求较低,市电、光伏互补相变蓄能电供暖系统通过混合蓄能方式,配合光伏系统产生的电量能够满足室内热负荷需求。

②蓄电池容量对热负荷柔性转移能力的影响

弃光量可作为系统内可再生能源利用情况的度量标志,当系统弃光量较高时,表明系统对可再生能源消纳能力不足。不同光伏安装形式在供暖季中对光伏发电的消纳存在差异,各系统在供暖季逐日弃光量以及累计弃光量如图 11 所示。

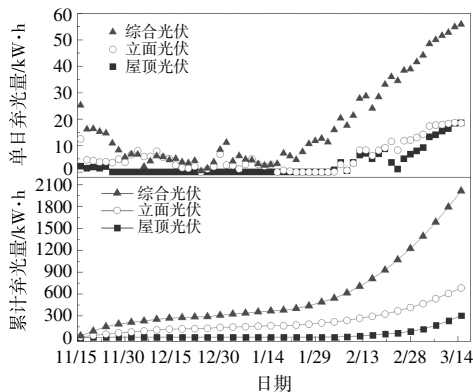


图 11 不同光伏安装形式系统弃光情况

Fig.11 Statistical chart of light curtailment in different photovoltaic systems

图中:由于屋顶光伏的装机容量较小,其弃光量最低;而综合光伏发电量超出了系统的消纳能

力,在不考虑并网的情况下,产生大量的弃光;立面光伏在 12 月与 1 月弃光量较少,但在初末寒期,由于室内热负荷需求较低,能源消耗较少,进而导致弃光现象产生,3 月尤为明显。

以上模拟结果表明,屋顶光伏效果最优。基于此方案,研究蓄电池容量对系统运行效果的影响,具体模拟结果见表 5。

表 5 不同蓄电池额定容量系统耗电量统计

Table 5 Power consumption statistics of different battery rated capacities systems

蓄电池容量/kW·h	市电消耗 kW·h	有效光电 kW·h	峰电消耗 kW·h	弃光量 kW·h	弃光率 %
2	5 445.9	1 193.7	798.6	696.9	36.90
5	5 199.4	1 440.5	466.2	450.0	23.80
10	5 062.1	1 568.9	261.4	321.6	17.00
15	5 049.9	1 585.0	163.4	305.5	16.20
20	5 028.3	1 604.6	106.3	286.0	15.10
30	5 010.5	1 619.8	78.3	270.8	14.30

由表 5 可知:当蓄电池容量小于 10 kW·h 时,增加蓄电容量显著提高了系统的柔性负荷转移能力;当蓄电池额定容量超过 15 kW·h 时,蓄电池容量对系统柔性负荷转移能力提升不明显。

不同蓄电池容量的系统对峰价市电累计消耗情况如图 12 所示。

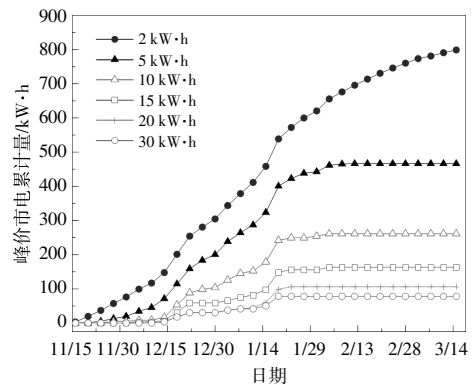


图 12 不同容量蓄电池系统峰价市电累计消耗

Fig.12 Accumulation of peak price of mains power in different battery capacity systems

由图 12 可见:小蓄电池容量(2 kW·h,5 kW·h)的系统未能在整个供暖季中实现对能源的有效储存与需求调配,导致系统柔性负荷转移能力不足,更加依赖峰电供应;大容量蓄电池系统对峰电的需求趋于一致。值得注意的是,在 12 月和 1 月,随着蓄电池容量的持续提升,峰时市电需求的降低幅度逐渐减小。

蓄电池容量在系统中对可再生能源的消纳有显著的影响,不同蓄电池容量系统的逐日弃光量和累计弃光量情况如图 13 所示。

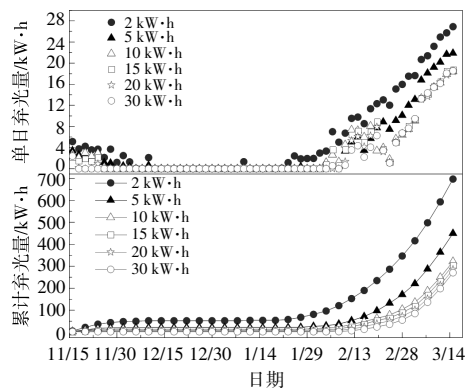


图 13 不同容量蓄电池系统弃光情况

Fig.13 Statistical chart of light curtailment in different battery capacity systems

由图 13 可见,小蓄电池容量的系统在供暖季初、末期表现出较高的弃光量,但在改变蓄电池容量时,系统的逐日弃光量变化较为有限。原因在于系统采用了蓄电与蓄热的混合蓄能模式,其中蓄热量占据了蓄能总量的相当大比例,导致不同蓄电池容量系统的实际光伏消纳水平差距较小,且随着蓄电池容量的增加,其对系统光伏消纳水平的提升效果更小。

3.3 蓄电池容量对系统经济性影响

通过计算得到不同蓄电池容量在供暖季中的市电成本,以及系统的初投资成本和投资回收期,见表 6。

表 6 不同蓄电池额定容量对系统经济性影响

Table 6 The impact of different battery rating capacity on system economy

蓄电池容量 kW·h	市电成本 (供暖季)/元	系统 初投资/元	投资 回收期/a
2	2 870	35 060	5.4
5	2 616	38 060	5.6
10	2 446	43 060	6.3
15	2 378	48 060	7.0
20	2 342	53 060	7.7
30	2 313	63 060	9.3

由表 6 可知,在不同蓄电池容量的系统中,随着蓄电池额定容量增大,系统初投资和投资回收期均增大,且供暖季中的市电成本降低幅度减小。系统在只改变蓄电池容量的情况下,30 kW·h 容量蓄电池系统的初投资是 2 kW·h 容量蓄电池系

统的 1.8 倍,蓄电池的额定容量对系统经济性影响显著。因此,合理选用蓄电池容量能使系统经济性更佳。

4 结论

本文提出了市电、光伏互补相变蓄能电供暖系统控制策略与优化模型,并搭建了试验台,测试了单个房间中的系统节能效果。于 MATLAB 中建立了利用建筑动态热过程控制室温的市电、光伏互补相变蓄能电供暖系统的计算模型。以北京某科研楼为例,分析了不同因素对系统热电负荷柔性转移能力的影响。本研究的主要结论如下。

①试验研究了 4 种不同运行方案下市电、光伏互补相变蓄能电供暖系统的运行效果。结果表明,方案 4 在不消耗峰价市电的情况下,室内供暖温度基本维持在 18℃以上,是该试验系统中较为理想的运行方式。

②通过应用情景分析,采用屋顶光伏形式的市电、光伏互补相变蓄能电供暖系统能够在维持室内温度在 18℃的情况下,显著降低案例建筑中 23.9%的一次能源消耗量及 93.9%的峰电消耗量。

③与无光伏系统相比,不同光伏安装形式及面积的系统可以将峰电消耗量降低 75.1%~97.4%;蓄电池容量的增加显著提升了系统的柔性负荷转移能力,当蓄电池容量超过 15 kW·h 时,其提升效果逐渐减弱。蓄电池的容量对系统经济性影响较大,随着蓄电池容量增大,系统初投资和投资回收期均增大,且市电成本降低幅度减小。

参考文献:

- [1] 屈高强,郭飞,党东升,等.计及用户满意度的蓄热式电采暖与风电互动运行优化策略[J].电力科学与技术学报,2023,38(1):55-65.
- [2] 杨婧颖,王武林,张明敏,等.考虑分布式光伏和储能参与的配电网电压分层控制方法[J].电力科学与技术学报,2023,38(5):1-10.
- [3] 姜子卿,郝然,艾芊.基于冷热电多能互补的工业园区互动机制研究[J].电力自动化设备,2017,37(6):260-267.
- [4] 孙毅,李泽坤,鲍荟谕,等.清洁供热模式下多能异构负荷调控框架及关键技术剖析[J].中国电机工程学报,2021,41(20):6827-42.
- [5] 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.

- [6] 杨玉龙,王子善,杨震,等.考虑风电不确定性的蓄热式电采暖消纳弃风经济性分析 [J]. 电测与仪表, 2020,57(13):47-54.
- [7] 金国锋,邢敬舒,张林,等.考虑用户舒适度的蓄热式电采暖参与风电消纳的多目标优化 [J]. 电力建设, 2022,43(3):12-21.
- [8] 尚庆晓,孙鸣.基于风电、储(热)供暖系统的电网优化调度研究[J].太阳能学报,2021,42(7):65-70.
- [9] 葛维春,李家钰,李军徽,等.提高风电消纳的大容量储热系统优化控制策略[J].太阳能学报,2019,40(2):380-386.
- [10] Lei Z J,Wang G,Li T,et al. Strategy analysis about the active curtailed wind accommodation of heat storage electric boiler heating[J]. Energy Reports,2021,7(S1):65-71.
- [11] Zhang C Q,Gao G S. A rural household heating method that combines a regenerative electric boiler with PV power generation [J].Polish Journal of Environmental Studies,2019,28(5):4001-4007.
- [12] 闫泽滨,马素霞,李小刚.太阳能-相变蓄热蒸发型空气源热泵复合供热系统的设计 [J]. 可再生能源, 2018,36(2):209-214.
- [13] Zhang Q L,Zhang L,Nie J Z,et al. Techno-economic analysis of air source heat pump applied for space heating in northern China [J].Applied Energy,2017,207(1):533-542.
- [14] Li C,Guan Y L,Wang X. Experimental and numerical studies on heat transfer characteristics of vertical deepburied U-bend pipe in intermittent heating mode [J]. Geothermic,2019,79(5):14-25.
- [15] 董旭柱,华祝虎,尚磊,等.新型配电系统形态特征与技术展望[J].高电压技术,2021,47(9):3021-3035.
- [16] 肖伟栋,刘耀,蒋纯冰,等.面向源荷互动的建筑-电网数据共享现状与展望[J].暖通空调,2023,12:76-85.
- [17] 谢晓娜,宋芳婷,燕达,等.建筑环境设计模拟分析软件 DeST 第2讲 建筑动态热过程模型[J].暖通空调,2004(8):35-47.
- [18] 章熙民.传热学[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [19] 谭岭玲.多能互补型微电网规划配置和优化运行研究 [D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [20] Sharma P,Naidu R C. Optimization techniques for grid-connected PV with retired EV batteries in centralized charging station with challenges and future possibilities: A review [J]. Ain Shams Engineering Journal,2023,14(7):101985.
- [21] Luo Z,Peng J,Tan Y, et al. A novel forecast-based operation strategy for residential PV-battery-flexible loads systems considering the flexibility of battery and loads [J]. Energy Conversion and Management, 2023,278:116705.
- [22] Poonia S,Singh A K,Jain D. Performance evaluation of phase change material (PCM) based hybrid photovoltaic/thermal solar dryer for drying arid fruits [J]. Materials Today:Proceedings,2022,52:1302-1308.

Analysis of flexible load regulation capability in electric heating system with phase-change for energy storage using photovoltaic and grid power

Zhang Qunli^{1,2}, Zhang Jinliang¹, Liu Yimo³, Zhang Qiuyue², Cheng Xuanrui¹

(1.Beijing Key Lab of Heating, Gas Supply, Ventilating and Air Conditioning Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2.School of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3.Aerospace Central Hospital, Beijing 100049, China)

Abstract: With the leapfrog development of renewable energy in China, the problem of new energy electric power utilization has become increasingly prominent. This paper, constructs an electric and photovoltaic complementary electric heating system with phase-change thermal energy storage, and a mathematical model of the thermal performance of the system is constructed, which can reflect the dynamic thermal performance of the indoor thermal environment of the system, and the control strategy of the flexible thermoelectric load regulation of the system is designed. A case study was carried out on a low-carbon building in Beijing, and the load transfer capacity and photovoltaic absorption capacity of the system were simulated and studied. The results show that the system with this rooftop photovoltaic was able to reduce the peak electricity consumption of the case building by 93.9% and the primary energy consumption by 23.9%, with the indoor temperature being maintained at 18 °C. In this study, the peak power consumption can be reduced by 75.1% to 97.4% compared to the system without PV using different PV installed capacity installation methods and areas, and the improvement of the storage capacity has a significant effect on the improvement of the system's flexible load transfer capability, and the improvement effect gradually decreases when the storage battery capacity is larger than 15 kW·h.

Keywords: PV; heating; multi-energy complementary; flexible load; building thermal performance