

文章编号: 1006-3080(2025)03-0400-11

DOI: 10.14135/j.cnki.1006-3080.20240828001

基于光伏建筑一体化的电池-热泵储能系统性能及运行策略优化研究

代兰花^{1,2}, 李桢伟¹, 东明², 霍嘉靖¹, 顾偲雯^{1,3}, 蒋晓燕¹, 杨赫³(1. 常州工学院光电工程学院, 江苏常州 213032; 2. 大连理工大学能源与动力学院, 辽宁大连 116024;
3. 大连理工大学化工学院, 辽宁大连 116024)

摘要:设计了一套基于光伏建筑一体化(Building Integrated Photovoltaics, BIPV)的电池-热泵储能系统, 通过蓄电池和热泵系统对房间进行预热或预冷, 从而实现电储能和冷/热储能。该系统通过结合光伏建筑一体化、蓄电池和空气源热泵, 实现了能源的综合利用, 它可以通过电能和热能的相互转化, 改善太阳能发电与负荷的匹配度从而减少系统运行成本。根据储能方式不同, 模拟了4种系统的全年运行性能, 对比分析发现: 同时配置电储能和冷/热储能最具经济性, 每年可节省 EUR 379 的运行费用。为了获取系统的最优控制参数, 本文结合分时电价并使用多种算法对系统进行控制策略优化, 以年运行费用最小为目标函数, 选取包括预热时间、预热温度、预冷时间、预冷温度、制热季电池谷价充电剩余电量(States of Charge, SOC)、制冷季电池谷价充电 SOC 等6个参数进行优化, 优化后运行费用可降低 14.6%~27.6%。

关键词: BIPV; 电储能; 冷/热储能; TRNSYS 仿真; 优化

中图分类号: TK9

文献标志码: A

根据国际能源机构(International Energy Agency, IEA)发布的《世界能源展望》报告^[1]显示: 建筑部门在最终能源消耗总量中占近 1/3 的比例, 约占终端使用部门直接二氧化碳排放量的 15%。因此, 促进建筑行业节能发展, 有利于尽快实现双碳目标, 促进经济社会可持续发展^[2]。而光伏建筑一体化(Building Integrated Photovoltaics, BIPV)随着技术的不断发展逐渐得到了广泛的关注和应用。

Gholami 等^[3]研究发现, BIPV 系统作为建筑表皮的围护结构在经济上是可行的, 能够在无贴现率条件下回收投资, 并在一定条件下为社会和环境带来显著效益。相比传统光伏(Photovoltaic, PV), BIPV 更需要储能系统来实现削峰填谷。Zhang 等^[4]开发了一种储能系统, 分析了不同光伏和电池容量的影响, 结果表明, 当配置合理光伏和电池容量的系统

时, 可以实现显著的热负荷和电负荷转移, 从而使峰值电价用电量保持在 10% 以下。Forrousso 等^[5]针对摩洛哥的 6 个不同气候的净零能耗住宅小区, 采用粒子群优化算法设计了一个包含光伏、建筑集成光伏和电池储能的离网微电网系统。该系统以年化总成本最低为目标, 通过优化 BIPV 和蓄电池容量, 实现负荷覆盖系数提高了 0.68%~2.58%, 平准化能源成本降低了 8.7%~20.72%。在建筑围护结构改进和可再生能源系统集成方面, Bingham 等^[6]采用非支配排序遗传算法(Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II, NSGA-II), 找到建筑围护结构和可再生能源集成的最佳设计方案。将最佳设计方案与标准建筑模型进行比较, 净现值降低了 40%, 并且每年的建筑能耗降低了 30%。Xin 等^[7]研究了晴天条件下, 不同建筑负荷的 BIPV-蓄电池混合系统的优化调度问题, 建立

收稿日期: 2024-08-28

作者简介: 代兰花(1984—), 女, 重庆涪陵人, 博士生, 讲师, 主要研究方向为以热泵为载体的多源互补系统设计与优化。E-mail: dailh@czu.cn

通信联系人: 杨赫, E-mail: yanghe@dlut.edu.cn

引用本文: 代兰花, 李桢伟, 东明, 等. 基于光伏建筑一体化的电池-热泵储能系统性能及运行策略优化研究[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2025, 51(3): 400-410.

Citation: DAI Lanhua, LI Zhenwei, DONG Ming, et al. Performance and Operation Strategy Optimization of Battery-Heat Pump Energy Storage System Based on Building Integrated Photovoltaic[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2025, 51(3): 400-410.

了一个多约束条件非线性优化模型,并通过 MATLAB 的 `fmincon` 函数求解。研究发现,在办公建筑中,高负荷时系统更依赖电网,而在低负荷和住宅满负荷情况下,系统依赖度降低,可以实现自给自足。Čurpek 等^[8]评估了集成潜热储能技术的通风系统对气候的响应性,通过实验测量发现,在太阳能板背面安装相变材料有效降低了太阳能板的工作温度,尤其在正午太阳辐射强烈时最为显著。何绪权等^[9]研发了一种石蜡基核壳结构相变储能复合材料,其简单的制备工艺和优异的综合性能使得此相变复合材料在热能储存和热管理领域具有潜在的应用前景。

以经济实惠的方式在 BIPV 建筑供暖系统中安装可再生能源正成为一个日益增长的热点。Huang 等^[10]研究发现,使用太阳能驱动空气源热泵(Air Source Heat Pump, ASHP),并将热量储存在相变材料中进行地暖的优化组合时,可以通过调节温度提高光伏的利用效率。田录林等^[11]提出了基于实时电价的储能系统变功率优化策略,以商业园区作为研究对象,以优化电池储能系统削峰填谷效果为目标,发现优化后商业园区具有良好的削峰填谷效果,且投资主体收益每天提升了 1534.8 CNY。Xu 等^[12]将太阳能光伏冷库与冷热能存储技术相结合,研究表明,当冷热储能与 PV 相结合时,每年节省了 30.20% 的电力成本。

考虑到电网稳定性和经济性,BIPV 系统的可再生能源并网面临挑战,导致其潜力未充分利用。Bravo 等^[13]提出通过关闭供热通风与空气调节系统(Heating, Ventilation and Air Conditioning, HVAC)来应对 BIPV 输出减少的有效性,通过控制 HVAC,可以在保持舒适的同时,减少制冷季节电网能量需求高达 60%。Wang 等^[14]采用人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)控制建筑中的太阳能光伏光热建筑一体化(Building-Integrated Photovoltaic-Thermal, BIPV/T)混合空调系统,结果表明,该方法能够准确预测室内温度(误差小于 1%),有效解决过冷/过热问题,并显著降低高原地区空调负荷及总能耗。Zhao 等^[15]分析了英国一座主动式建筑的经济性能,结合了 BIPV 和锂电池,并考虑了建筑的实际运行和能源负荷情况,研究包括了 BIPV 和电池的资本成本、电网电费以及潜在的碳成本,并设计了 4 种电池运行策略。结果显示,在不使用锂电池的情况下,BIPV 投资可以盈利,但锂电池存储的成本无法通过当前电力市场条件下的经济价值来补偿。

上述研究虽然通过储存设备的合理配置,提高了电网的经济性,但是,传统的储能设备存在单位体

积或质量储能密度低、运行维护成本高等问题。近年来,国内外学者将目光转向基于建筑蓄热特性的围护结构储能^[16],通过主动调节建筑冷/热负荷,改善太阳能发电与负荷的匹配程度,有效减少光伏建筑一体化储能系统的运行成本。电能和热能可以相互转化,当光伏或其他可再生能源产生的电能超出负荷时,可利用电储能和冷/热储能的协同效应将多余的电能转化为热能进行储存。这种转换和协同应用进一步提高了能源利用效率^[17]。将建筑蓄热蓄冷应用于调度策略,与电储能协同优化运行,能够更有效地实现能源的可持续利用,提高建筑能源系统的能效与经济性。

目前关注的主要是单个技术的应用,如光伏发电和储能系统的集成,但如何将这些技术与建筑能耗需求和热泵技术相结合,实现更高效的能源利用和成本节约,还需深入研究和实践。因此,本文设计了一套基于光伏建筑一体化的电池-热泵储能系统,通过蓄电池和热泵系统对房间进行预热、预冷,从而实现电储能和冷/热储能。本系统在光伏建筑一体化的基础上,结合空气源热泵和蓄电池,考虑建筑蓄热蓄冷特性,充分利用热泵提前预热(预冷)建筑的方式提高系统现场光伏发电量的消纳能力,在光伏发电不足时,热泵消耗的电为蓄电池中的存储的谷价电;同时将建筑蓄热蓄冷应用于调度策略、系统规划和新能源消纳等方面,对系统优化配置和提高系统整体经济性和充分挖掘能源系统节能潜力起着重要作用。电储能与冷/热储能协同优化运行,配以合理的控制策略,可以更有效地实现能源的可持续利用和提高建筑能源系统的能效与经济性。本文根据储能方式不同,模拟了无储能、单独电储能、单独冷/热储能和同时配置电储能和冷/热储能 4 种系统的全年运行性能,并结合分时电价,在同时配置电储能和冷/热储能的系统中增加谷价买电策略。最后,以年运行费用最小为目标函数,同时优化预热、预冷时间等参数,进一步降低系统的运行成本。

1 系统设计

1.1 综合能源系统供能框架

综合能源系统(Integrated Energy System, IES)主要由综合能源系统设备与冷、热、电负荷构成,并且设备类型和容量的规划决定了 IES 的实际运行效果是否具有更高的综合效益。本文所确定的基于光伏建筑一体化的电池-热储能系统的 IES 规划的基本思路是以建筑的多种负荷需求、IES 供能设备种类和能

源形势等元素为基础,确定 IES 的基本架构和设备工作方式,然后将建筑储能系统纳入到 IES 供能框架中,最后针对设计目标进行运行模拟计算,通过反复迭代寻优,选出使目标函数最优的控制策略^[18]。基于光伏建筑一体化的电池-热泵储能系统供能框架如图 1 所示。

1.2 系统原理

基于光伏建筑一体化的电池-热泵储能系统结合了光伏发电、热泵冷暖调节和电池储能技术,用于优

化可再生能源利用和降低建筑能耗。光伏系统产生的电能供建筑使用,并在发电不足时由蓄电池补充,如需更多电量则从电网获取。多余电能存储于蓄电池中,或在谷价电时段由电网给电池充电。此系统考虑了光伏发电和建筑负荷的峰值时间,通过电能和冷/热能的储存,高效利用能源,减少浪费,提高建筑能效,并在分时电价政策下通过策略优化,提升建筑运行的经济性。基于光伏建筑一体化的电池-热泵储能系统原理图如图 2 所示。

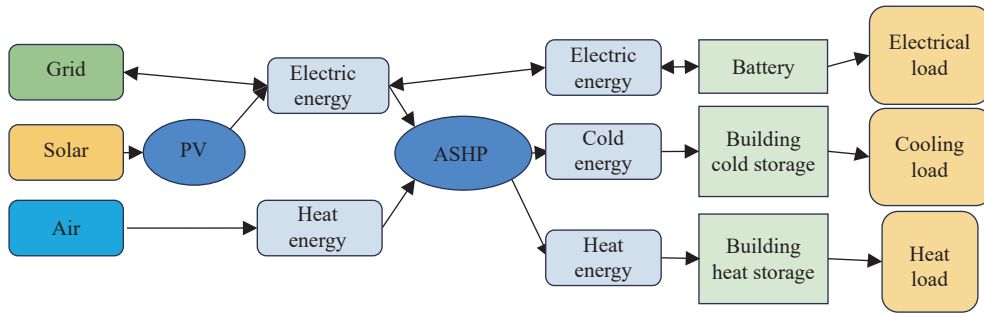


图 1 基于光伏建筑一体化的电池-热泵储能系统供能框架

Fig. 1 Energy supply framework of battery-heat pump energy storage system based on BIPV

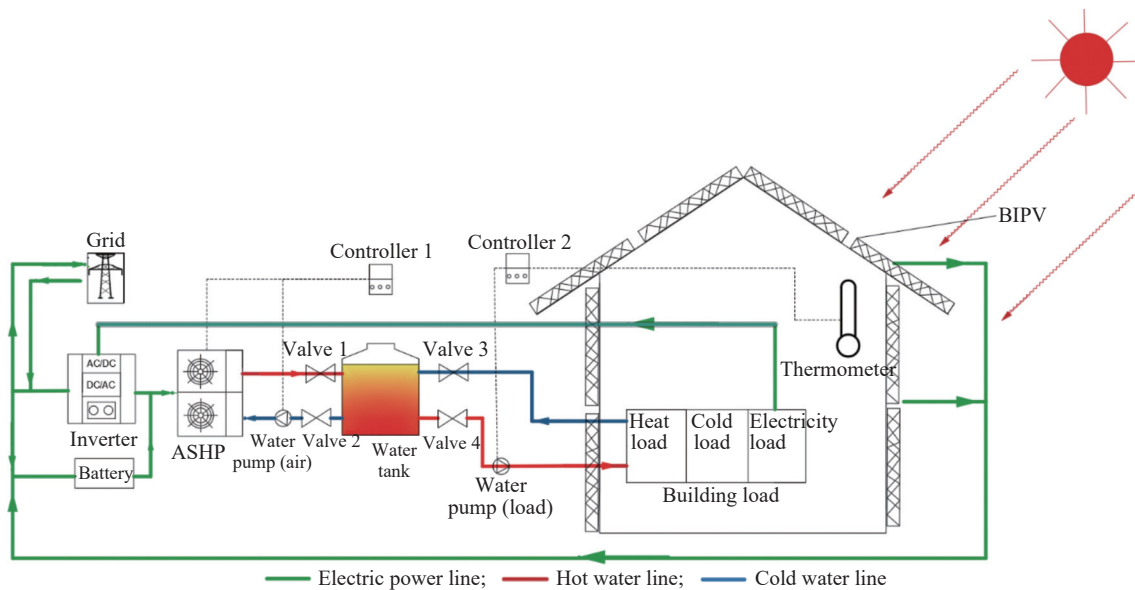


图 2 基于光伏建筑一体化的电池-热泵储能系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of a battery-heat pump energy storage system based on BIPV

2 基于光伏建筑一体化的电池-热泵储能系统模拟仿真

2.1 系统建模

本文基于瞬态系统模拟程序 (Transient System Simulation Program, TRNSYS) 仿真平台建立仿真模型,使用了 METEONORM 气象数据库中法兰克福区域的典型气象年数据作为模拟的气象输入文件。法兰克福地区室外全年的温度变化及太阳辐射量分别

如图 3 和图 4 所示。对于法兰克福地区,制热季时间为 10 月至 12 月以及次年 1 月至 4 月,分别对应 6500~8760 h 以及 0~2880 h;制冷季时间为 6 月至 8 月,即 4000~5760 h。本文的建筑类型为 BIPV 住宅建筑,工作日制热(冷)时间为 0:00~8:00 及 17:00~24:00,假期时间则全天制冷或制热。制热制冷设计温度分别为 18 ℃ 和 26 ℃。冬天预热 2 h,将房间预热至 18 ℃,夏天预冷 2 h,将房间预冷至 26 ℃。

2.1.1 建筑模型及负荷 本文针对法兰克福地区的

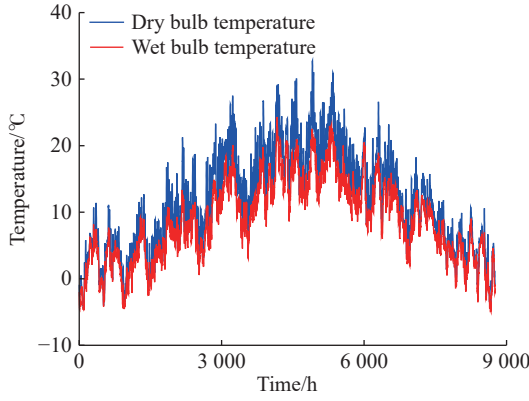


图3 法兰克福逐时室外温度曲线图

Fig. 3 Hourly outdoor temperature curves in Frankfurt

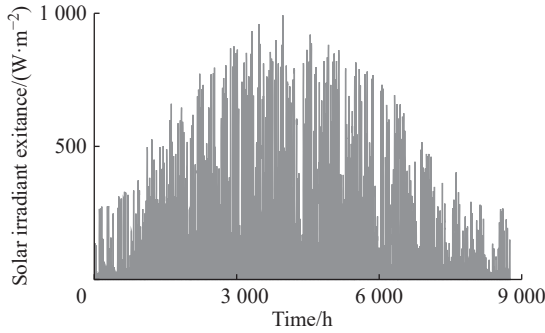


图4 法兰克福逐时太阳辐射量曲线图

Fig. 4 Hourly solar radiant exitance curves in Frankfurt

某独栋建筑进行建模和模拟仿真, 为了简化模型并减少计算复杂度, 将功能相同且无户间传热的房间进行合并, 使用了 SketchUP 软件内的 OpenStudio 插件来搭建建筑模型。通过 TRNBuild 进行建筑模拟和负荷分析。建筑模型如图 5 所示, 建筑分为两层, 3 个房间, 房间高度分别为 3、4 m 和 4 m, 总建筑面积为 144 m², 总容积为 480 m³。建筑全年逐时冷/热负荷如图 6 所示, 最大冷负荷出现在 4939 h, 为 3674 W, 最大热负荷出现在 91 h, 为 6450 W。空气源热泵需要提供较大的供暖能力来维持室内温度。相比冷负荷, 热负荷需求量大, 峰值也较大, 空气源热泵机组的选型根据热负荷峰值选择。

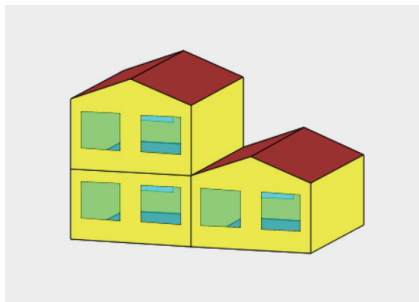


图5 光伏一体化建筑模型图

Fig. 5 Model diagram of BIPV

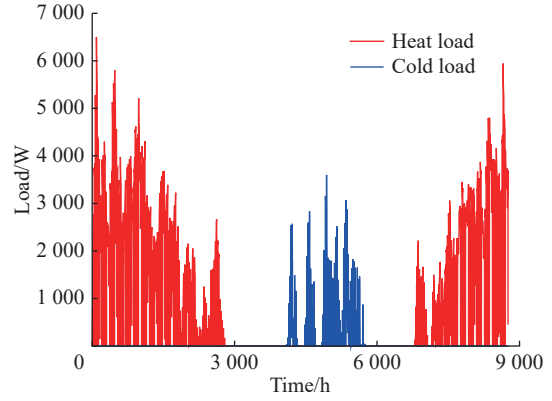


图6 法兰克福地区全年动态冷热负荷曲线

Fig. 6 Annual dynamic heating and cooling load in Frankfurt

2.2 数学定义

空气源热泵以及各水泵的启停应满足以下定义:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{pump}_{\text{load-side}} = 1, \text{ if } \text{load}_{\text{heat}} > 0, T_{\text{tank}} \geq T_{\text{set-low}} \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{pump}_{\text{load-side}} = 1 \\ \text{pump}_{\text{air-side}} = 1 \\ \text{ASHP}_{\text{heat}} = 1 \end{array} \right. \text{ else if } \text{load}_{\text{heat}} > 0, T_{\text{tank}} < T_{\text{set-low}} \\ \text{else } \left\{ \begin{array}{l} \text{pump}_{\text{load-side}} = 0 \\ \text{pump}_{\text{air-side}} = 0 \\ \text{ASHP}_{\text{heat}} = 0 \end{array} \right. \text{ if } \text{load}_{\text{heat}} \leq 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{pump}_{\text{load-side}} = 1, \text{ if } \text{load}_{\text{cool}} > 0, T_{\text{tank}} \leq T_{\text{set-high}} \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{pump}_{\text{load-side}} = 1 \\ \text{pump}_{\text{air-side}} = 1 \\ \text{ASHP}_{\text{cool}} = 1 \end{array} \right. \text{ else if } \text{load}_{\text{cool}} > 0, T_{\text{tank}} > T_{\text{set-high}} \\ \text{else } \left\{ \begin{array}{l} \text{pump}_{\text{load-side}} = 0 \\ \text{pump}_{\text{air-side}} = 0 \\ \text{ASHP}_{\text{cool}} = 0 \end{array} \right. \text{ if } \text{load}_{\text{cool}} \leq 0 \end{array} \right. \quad (2)$$

其中, $\text{load}_{\text{cool}}$ 、 $\text{load}_{\text{heat}}$ 分别为冷、热负荷, kW; $T_{\text{set-low}}$ 、 $T_{\text{set-high}}$ 分别表示制热时设定的水箱最低温度和制冷时设定的水箱最高温度, °C; T_{tank} 为水箱温度, °C; $\text{pump}_{\text{load-side}} = 1$ 、 $\text{pump}_{\text{air-side}} = 1$ 分别表示负荷侧水泵开启、空气侧水泵开启; $\text{ASHP}_{\text{heat}} = 1$ 、 $\text{ASHP}_{\text{cool}} = 1$ 分别表示热泵制热开启、热泵制冷开启, $\text{pump}_{\text{load-side}} = 0$ 、 $\text{pump}_{\text{air-side}} = 0$ 分别表示负荷侧水泵关闭、空气侧水泵关闭; $\text{ASHP}_{\text{heat}} = 0$ 、 $\text{ASHP}_{\text{cool}} = 0$ 分别表示热泵制热关闭、热泵制冷关闭。

光伏并网运行模式应满足以下数学定义:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{BIPV}} = P_{\text{ASHP}} + P_{\text{BIPV-grid}}, \text{ if } \left\{ \begin{array}{l} P_{\text{BIPV}} > 0, P_{\text{ASHP}} \geq 0, \\ P_{\text{building}} \geq 0 \\ P_{\text{BIPV}} > P_{\text{ASHP}} + P_{\text{building}} \\ S(t) < 0.9 \end{array} \right. \\ P_{\text{BIPV}} = P_{\text{ASHP}} + P_{\text{BIPV-B}} + P_{\text{BIPV-grid}}, \text{ else if } S(t) \geq 0.9 \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{BIPV}} = P_{\text{ASHP}} + P_{\text{B}}, \text{ if } \begin{cases} P_{\text{BIPV}} \geq 0, P_{\text{ASHP}} \geq 0, \\ P_{\text{building}} \geq 0, \\ P_{\text{BIPV}} \leq P_{\text{ASHP}} + P_{\text{building}} \\ S(t) > 0.1 \end{cases} \\ P_{\text{BIPV}} = P_{\text{ASHP}} + P_{\text{grid}}, \text{ else if } S(t) \leq 0.1 \end{array} \right. \quad (4)$$

其中, P_{BIPV} 为光伏发电功率, kW; P_{ASHP} 为空气源热泵运行功率, kW; P_{building} 为建筑电负荷运行功率, kW; $S(t)$ 为 t 时刻蓄电池电荷状态, kW·h; $P_{\text{BIPV-B}}$ 为光伏给蓄电池充电功率, kW; $P_{\text{BIPV-grid}}$ 为光伏上网功率, kW; P_{B} 为蓄电池供电功率, kW; P_{grid} 为电网供电功率, kW。

2.2.1 系统主要部件参数 为了更好地满足建筑的

表 1 BIPV 组件参数

Table 1 BIPV component parameters

Absorptance of PV surface/%	Emissivity of PV surface/%	Channel emissivity-top/%	Channel emissivity-bottom/%	Back resistance/ ($\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{kJ}^{-1}$)	Reference PV efficiency/%	Reference temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Reference radiation/ ($\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)
0.8	0.9	0.9	0.9	1	0.12	25	3 600

表 2 空气源热泵参数

Table 2 Air source heat pump parameters

Rated heating capacity/kW	Rated heating power/kW	Rated cooling capacity/kW	Rated cooling power/kW
7.40	3.35	6.66	2.25

2.2.2 仿真模型 TRNSYS 软件统仿真模型如图 7 所示, 仿真计算时长为 8 760 h, 仿真时间步长为 0.125 h。系统关键部件数学模型见 TRNSYS 操作手册。

2.3 模拟仿真

为充分说明电储能与冷/热储能协同应用的潜力, 本文首先针对无储能、单独冷/热储能、单独电储能、同时配置冷/热储能和电储能 4 种情况进行模拟, 下文简称为工况 1、工况 2、工况 3 和工况 4, 通过能耗以及费用年值的对比, 分析基于光伏建筑一体化的电池-热泵储能系统的性能。

年费用计算公式为:

$$C_t = C_j \frac{j(1+j)^Y}{(1+j)^Y - 1} + C_0 \quad (5)$$

$$C_j = S_{\text{bipv}} C_{\text{pv}} + E_{\text{b}} C_{\text{b}} + R_{\text{hp}} C_{\text{hp}} \quad (6)$$

其中, C_t 为系统的年费用, EUR; C_j 为系统设备的初投资费用, 可由式(6)确定, EUR; j 为利率或部门内部的标准收益率系数, 取 0.08; Y 为供暖系统的使用寿命, 本文取 10; C_0 为系统年运行费用, EUR; S_{bipv}

全年冷/热电需求, 本文设计系统的主要部件包括 BIPV 组件、空气源热泵机组以及蓄电池。本文 BIPV 组件设计在建筑的东、西墙面和东、西侧屋顶, 总面积为 197.2 m^2 , BIPV 组件参数如表 1 所示。空气源热泵机组的选型, 不仅需要考虑建筑物最大热负荷的要求, 还要考虑到冬季结霜和融霜的损失, 选取的热泵机组额定制热量为 7.40 kW, 额定制冷量为 6.6 kW, 热泵机组参数如表 2 所示。在设计蓄电池的容量时, 应满足可独立向建筑可靠供电 2 h 的目标, 设定蓄电池充满为 90% 总容量, 放电剩余 10% 的电量。根据热泵机组制热功率 7.4 kW, 蓄电池容量选择为 10 kW·h。

为 BIPV 组件面积, m^2 ; E_{b} 为蓄电池容量, kW·h; R_{hp} 为热泵机组额定制热量, kW; C_{pv} 为 BIPV 组件单位面积价格, EUR/ m^2 ; C_{b} 为蓄电池单位容量价格, EUR/(kW·h); C_{hp} 为热泵单位制热量价格, EUR/kW; 主要设备单位容量价格及补贴前后初投资费用如表 3 所示。

本文所选建筑为家用 BIPV 建筑, 因 PV 组件发电量采用自发自用余电上网的方式, 使得建筑全年市政补电量较少, 低于 6 000 kW·h, 按当地政策使用基础电价 0.3055 EUR/(kW·h)。根据 4 种工况下系统全年能耗的仿真模拟, 获得系统在 4 种工况下运行的全年能耗, 经过分析确定各工况的年买电量、上网电量及运行成本, 如表 4 所示。通过对比工况 1 与工况 3 的情况, 由于工况 3 配置电储能后, 蓄电池可以用来存储光伏发电量, 并在负荷有电量需求且光伏发电不足时由蓄电池补充, 因此年运行费用大幅降低, 降低了 EUR 375。然而, 由于电储能设备的高成本, 费用年值下降率并不明显, 仅降低了 EUR 77。对比工况 1 与工况 2 的情况, 配置冷/热储能后, 更多的光伏发电量被消纳, 因此年运行费用略有下降。同时, 由于本系统利用建筑本身的储能能力来实现冷/热储能, 建筑物自身具有一定的热容量, 可以作为储能介质。通过提前开启热泵制热或制冷将能量存储在建筑中, 无需额外投资增设储能设备, 所以本系统冷/热储能并未增加初投资, 因此, 年费用值也略有下

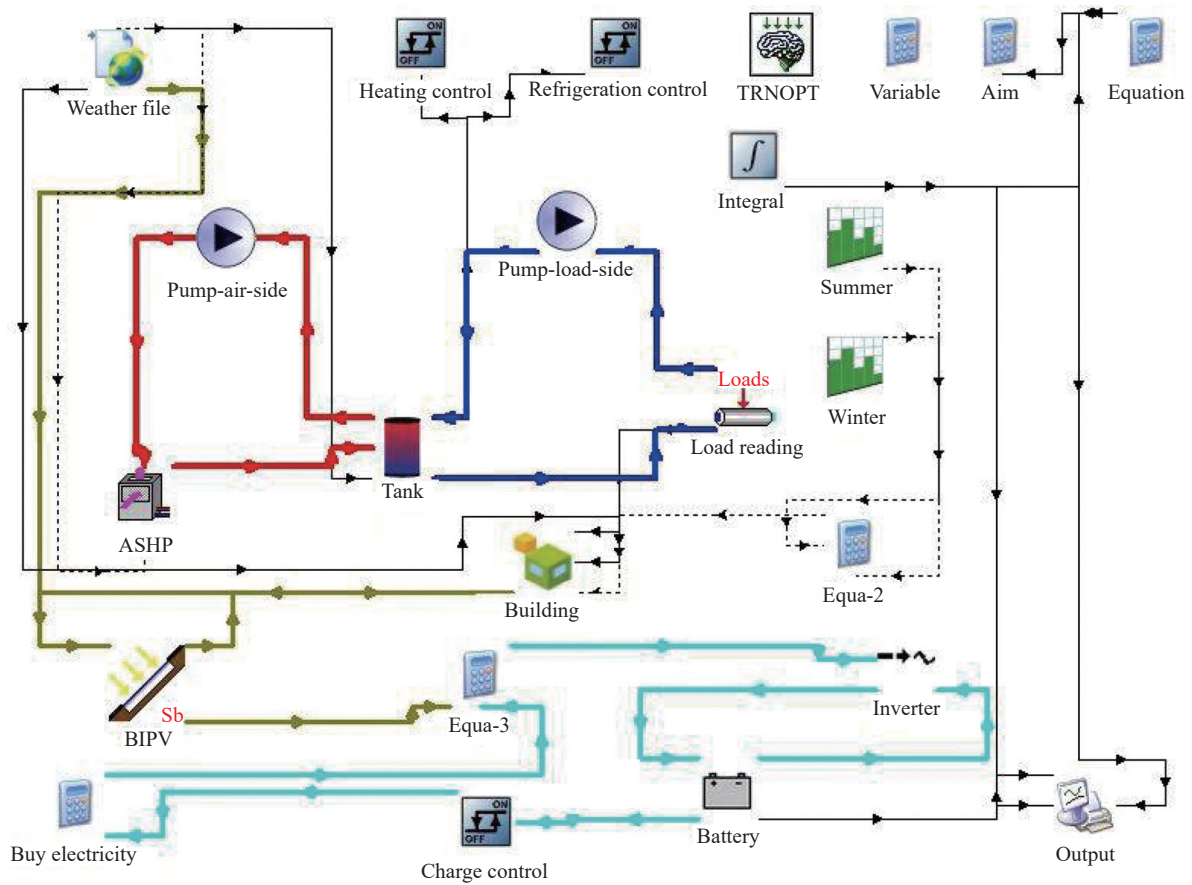


图 7 基于光伏建筑一体化的电池-热泵储能系统仿真模型图

Fig. 7 Schematic diagram of a battery-heat pump energy storage system based on BIPV

表 3 主要设备初投资

Table 3 Initial investment in major equipment

Equipment	Fluctuating cost/ (EUR·kW ⁻¹)	Fluctuating cost/ (EUR·m ⁻²)	Fluctuating cost/ (EUR·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	Capacity/ kW	Capacity/m ²	Capacity/ (kW·h)	Pre-subsidy cost/EUR	Post-subsidy cost/EUR
ASHP	500			7.40			3700	1850
BIPV		204			197.2		40446	24202
Battery			200			10	2000	2000

表 4 不同储能系统运行结果对比

Table 4 Comparison of operating results of different energy storage systems

Case	Initial investment/ EUR	Annual electricity purchase/ (kW·h)	Annual on-grid power/ (kW·h)	Annual operating cost/ EUR	Annual value of the expense/ EUR
1	28052	4642	12937	306	4487
2	28052	4564	12723	300	4481
3	30052	2914	11152	-69	4410
4	30052	2864	11023	-73	4405

降, 均下降了 EUR 6。通过对比工况 2、工况 3 和工况 4, 在同时配置冷、热、电储能的情况下, 由于冷、热、电储能的结合使用, 更多的光伏发电量可以及时

消纳, 这使得运行成本比单一储能方式更低。因此, 在建筑能源系统中同时配置冷、热、电混合储能方式比单独电储能或冷/热储能可以更好地提高建筑的能效和能源系统的经济性。

3 优化计算

3.1 控制策略优化

在系统中增加谷价买电策略, 其控制逻辑如下:

$$\begin{cases} P_{\text{charge}} = 10 \text{ kW, if } \text{SOC} < \text{SOC}_{\text{set}}, \text{Time} = \text{Time}_{\text{off-peak}} \\ P_{\text{charge}} = 0, \text{ else} \end{cases} \quad (7)$$

其中, SOC 表示电池实时剩余电量; SOC_{set} 表示设

定充电剩余电量; Time 表示时间, h; $\text{Time}_{\text{off-peak}}$ 表示谷价电时段, h; P_{charge} 表示谷价买电功率, kW。

3.2 优化模块介绍

Genopt 软件是基于 Java 编辑语言的优化软件, 在 Genopt 软件中可以选择不同的优化算法, 本节在 Genopt 优化软件中选择 Hook-Jeeves 算法、Coordinate Search 算法和 Hybrid Global 算法, 并完成自变量的设置和目标函数的确定, 通过 TRNOPT 模块完成结果分析, 输出最优结果。

3.3 目标函数

本文选取的目标函数为最小的运行费用, 系统运行费用公式如下:

$$C_y = \sum_{i=1}^{8760} (C_i \times E_{\text{grid-}i} - P_i \times E_{\text{sell-}i}) \quad (8)$$

其中, C_y 为系统运行费用, EUR; C_i 为实时电价, EUR/(kW·h); $E_{\text{grid-}i}$ 为电网实时供电量, kW·h; P_i 为实时上网电价, 本文为 0.086 EUR/(kW·h); $E_{\text{sell-}i}$ 为系统实时卖电量, kW·h。

考虑到未来政策可能变化以及为了分析分时电价对系统的影响, 本节直接采用分时电价, 分时电价表如表 5 所示。

表 5 分时电价表
Table 5 Time-sharing tariff

Time period	Time	Real-time electricity price/(EUR·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	Feed-in tariff/(EUR·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)
Peak period I	6:00—16:00	0.5265	0.086
Peak period II	16:00—21:00	0.5392	0.086
Off-peak period	21:00—Next 6:00	0.4173	0.086

3.4 优化参数的选取

本文针对系统的 6 个参数进行优化, 包括预热时间、预热温度、预冷时间、预冷温度、制热季电池谷价充电剩余电量和制冷季电池谷价充电剩余电量, 分别选用 Hook-Jeeves 算法、Coordinate Search 算法和 Hybrid Global 算法对其进行寻优。各个参数

之间相互耦合, 因此, 仅优化单一参数无法保证系统处于最佳运行状态, 只有各种参数相互匹配协调才能达到最具经济性的系统参数设置。

3.5 约束条件

3.5.1 预热(冷)温度的设定 为平衡系统经济性和室内舒适度, 预热最高温度设为 24 °C, 预冷最低温度设为 20 °C。过低的预热温度和过高的预冷温度都会影响经济性, 因此最低预热温度定为 16 °C, 最高预冷温度定为 28 °C。

3.5.2 预热(冷)时间的设定 为提高光伏利用率和降低费用, 预热(冷)时间应选在光伏发电高峰期, 本文设定最早预热(冷)时间为 12:00, 且不晚 17:00 开始的正式制热(冷)时间。

3.5.3 电池谷价充电剩余电量的设定 合理地设置电池谷价充电剩余电量可以提高购买谷价电的比例, 谷价充电剩余电量最高为 0.9, 最低为 0.1。

3.6 寻优结果及分析

预热(冷)时间和温度以及电池容量的优化结果如表 6 所示, Hook-Jeeves 算法、Coordinate Search 算法的计算结果十分相近, 当预热时间为 17:00, 预冷时间为 14:30, 预热温度为 17.06 °C 和 18.00 °C, 预冷温度为 20 °C, 制热季谷价充电 SOC 为 0.1, 制冷季谷价充电 SOC 为 0.3 左右时, 运行费用达到最低值为 333.5 EUR, 对比优化前, 运行费用降低了 14.7%。而使用 Hybrid Global 算法, 运行费用降低可达到 27.6%。为了进一步分析优化前后储能系统的性能, 选取 Hook-Jeeves 算法下冬季和夏季典型日进行对比分析。

3.6.1 冬季典型日优化前后系统性能分析 图 8 给出了优化前后冬季典型日负荷耗电量与买电量随时间的变化规律。从图 8(a)可以看出, 因为优化前热泵会提前 1 h 开机将房间预热至 20 °C, 而优化后热泵不再预热, 所以在 16:00-17:00 时段, 优化前负荷侧耗电比优化后的负荷侧耗电低, 17:00 后开始正式制热, 房间需加热至 18 °C, 由于优化前此时刻热泵已将房间加热至 20 °C, 而优化后此时刻热泵才刚开始制热, 所以 17:00 之后, 优化前负荷侧耗电迅速降低, 优

表 6 不同算法下各参数及运行费用优化前后对比

Table 6 Comparison of parameters and operating costs before and after optimization under different algorithms

Algorithm	Preheating time	Preheating temperature/°C	Precooling time	Precooling temperature/°C	Battery valley charging SOC in the heating season	Bartery valley charging SOC in the cooling season	Operating cost /EUR	Reduction ratio/%
Before optimization	16: 00	20.00	16: 00	24.00	—	—	390.8	—
Hook-Jeeves	17: 00	18.00	14: 30	20.00	0.32	0.1	333.8	14.6
Coordinate Search	17: 00	17.06	14: 30	20.00	0.28	0.1	333.5	14.7
Hybrid Global	12: 00	24.00	15: 04	20.06	0.34	0.1	282.8	27.6

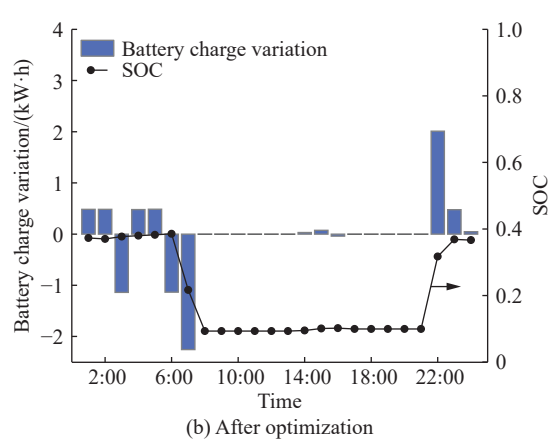
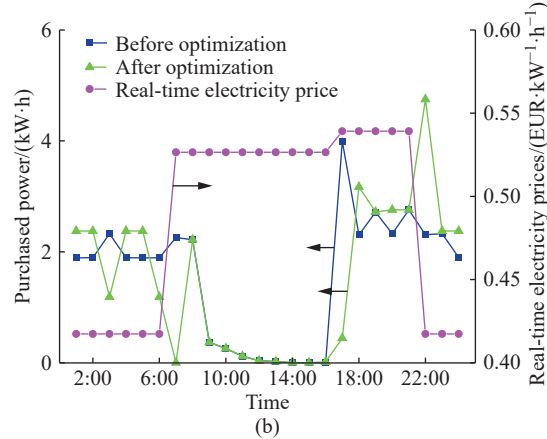
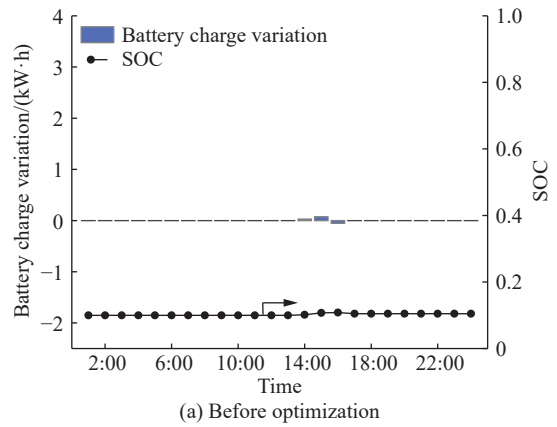
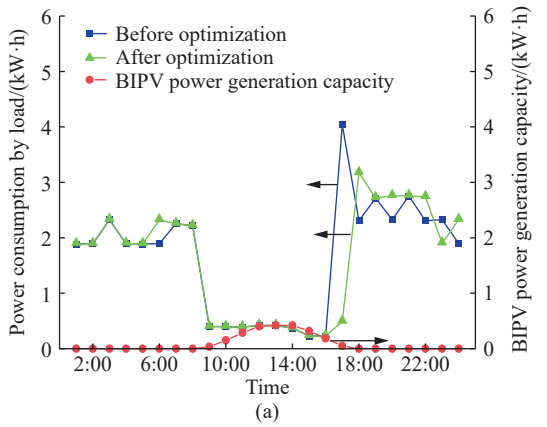


图8 优化前后负荷耗电量(a)与买电量(b)随时间变化

图9 优化前后电池状态随时间变化

Fig. 8 Changes of power consumption by load (a) and purchased power (b) with time before and after optimization

Fig. 9 Changes of battery state with time before and after optimization

化后负荷侧耗电迅速升高, 优化前负荷侧耗电刚开始低于优化后负荷侧耗电, 1 h 之后(19:00 开始), 随着预热存储在建筑中的热能耗尽, 优化前后负荷侧耗电量差距减小。结合优化前后买电量随时间的变化(图8(b))可知, 由于 0:00~6:00 以及 21:00~24:00 处于谷价电时段, 优化后电网不仅要给负荷侧供电还需给蓄电池存储电量, 使蓄电池 SOC 维持在 0.31875 左右, 所以优化后此时段买电量大于优化前买电量。图9 示出了优化前后电池状态随时间的变化, 结合图9 可知, 在 6:00~8:00 时段, 因为优化后蓄电池在夜间(0:00~5:00)电价处于谷电时进行了电量存储, 所以无需再向电网购买峰值的高价电量, 而优化前此时刻蓄电池未存储电量, 系统只能向电网购买峰电价电。在 16:00~17:00 时段, 优化前系统因预热耗电增多, 所以优化前买电量大于优化后买电量; 在 17:00~21:00 时段, 由于优化前预热使得正式制热时负荷侧所需热量减少, 因此, 此时段优化前买电量低于优化后买电量。

为了对储能系统优化前后的整体性能进行对比分析, 表7 给出了冬季典型日优化前后系统各输出参数对比结果。从表7 可知, 由于优化后的系统增加了

谷价买量, 降低了峰价买电量, 使得系统整体运行费用降低了 6%。

综上所述, 预热温度提高, 瞬时热负荷升高, 且建筑自身具有热惯性, 使得房间内温度维持在较高水平, 下一时刻的热负荷会持续降低。然而, 冬季光伏发电较少, 预热会增加峰价买电量, 导致运行费用增加, 此外谷价充电 SOC 的升高会增加谷价买电量占总买电量的比重, 减少运行费用。因此优化后, 冬季系统通过利用谷价低电费充电代替提前预热房间, 实现更经济的运行。

3.6.2 夏季典型日优化前后系统性能分析 法兰克福地区夏季太阳辐射量较大, 使得夏季 PV 发电量增多, 储能系统表现出与冬季不同的性能。图10 示出了优化前后夏季典型日负荷耗电量与上网电量随时间的变化规律。从图10(a)可以看出, 因为优化后热泵提前 2.5 h 开机, 将房间预冷至 20 °C, 而优化前热泵仅提前 1.0 h 开机将房间预冷至 24 °C, 所以在 14:30~16:00 时段, 优化后负荷侧耗电高于优化前的负荷侧耗电; 17:00 后开始正式制热, 房间需制冷至 26 °C, 由于优化前此时刻热泵仅将房间制冷至 24 °C, 高于优化后的 20 °C, 所以 17:00 之后, 优化前后负荷

表 7 优化前后冬季典型日各输出参数对比

Table 7 Comparison of output parameters on typical winter days before and after optimization

Situation	Off-peak electricity purchase quantity/(kW·h)	Peak electricity purchase quantity/(kW·h)	Electricity purchase cost/EUR	Income from electricity sales/EUR	Operating cost/EUR	Initial available battery power/(kW·h)	Remaining available power of the battery/(kW·h)
Before optimization	18.321	19.372	18.024	0	18.024	0	0
After optimization	21.375	14.880	16.904	0	16.904	2.729	2.667

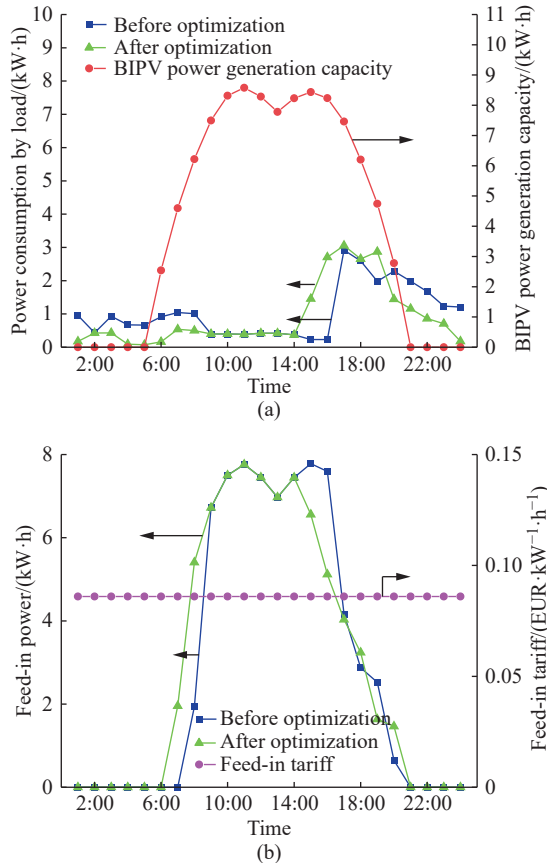


图 10 优化前后负荷耗电量(a)与上网电量(b)随时间变化
Fig. 10 Changes of Power consumption by load (a) and feed-in power (b) with time before and after optimization

侧耗电都开始降低,优化后降低得更多,19:00 之后优化后负荷侧耗电低于优化前负荷侧耗电。

结合优化前后上网电量随时间变化(图 10(b)),由于夏季光伏发电较多,因此有大量电量上网,在 14:00~17:00 时段,由于优化后负荷耗电增加,因此消耗了更多的光伏发电,导致上网电量减少。再结合

表 8 优化前后夏季典型日各输出参数对比

Table 8 Comparisons of output parameters on typical summer days before and after optimization

Situation	Off-peak electricity purchase quantity/(kW·h)	Peak electricity purchase quantity/(kW·h)	Electricity purchase cost/EUR	Income from electricity sale/EUR	Operating cost/EUR	Initial available battery power/(kW·h)	Remaining available power of the battery/(kW·h)
Before optimization	1.857	0	0.775	6.139	-5.364	1.379	2.420
After optimization	0	0	0	6.301	-6.301	5.060	4.960

优化前后电池充放电状态随时间变化(图 11),由于夏季光伏发电较多,白天优化前后电池一直处于高 SOC 状态,优化后预冷温度的上升和预冷时间的提前,夜间所需负荷耗电量减少,所以优化后夜间电池 SOC 状态高于优化前夜间电池 SOC 状态。

优化前后夏季典型日各输出参数对比如表 8 所

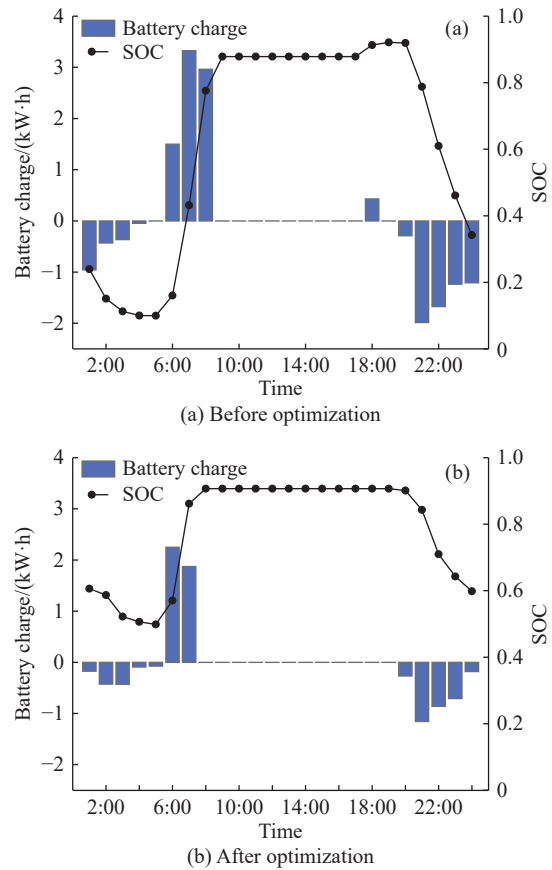


图 11 优化前后电池充放电状态随时间变化
Fig. 11 Changes of battery state with time before and after optimization

示。与冬季典型日的系统性能不同,由于夏季法兰克福的太阳辐射量较大,使得光伏发电量增多,优化后系统无须从电网买电即可满足系统运行,且上网卖电收益高于优化前,系统整体收益提高 17.5%。

综上所述,优化后预冷时间的提前和预冷温度的降低,光伏发电不仅能够满足较低的冷负荷需求,还可以将更多的电量输送到电网,使得系统从电网买电费用降低,上网收益增加,因此运行费用获得大幅降低;而且由于夏季光照充足,发电量多,蓄电池也无需在谷价电时期主动存储电量。

4 结 论

(1)建立了基于光伏建筑一体化的电池-热泵储能系统,系统通过蓄电池和预热预冷来实现电储能和热储能,模拟仿真无储能、单独电储能、单独冷/热储能以及同时冷/热储能和电储能 4 种全年运行情况,并计算其费用年值,发现冷、热、电储能系统最具经济性,证明了系统的可行性。

(2)对系统的控制策略进行优化,增加谷价买电策略,充分利用峰谷电价差,在满足建筑负荷的条件下,有效地降低了电力成本。

(3)选取 3 种算法,对 6 个参数进行优化,包括预热时间、预热温度、预冷时间、预冷温度、制热季电池谷价充电 SOC,制冷季电池谷价充电 SOC,以最小的年运行费用为目标函数进行优化计算,优化后年运行费用可降低 14.6%~27.6%。

参考文献:

- [1] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE C. Climate Change 2021: The Physical Science Basis [R]. Cambridge University: IPCC Sixth Assessment Report, 2023.
- [2] 范晶璟. “双碳”背景下上海典型老旧小区二次供水系统能耗研究 [J]. 华东理工大学学报 (自然科学版), 2023, 49(3): 335-340.
- [3] GHOLAMI H, RØSTVIK H N. Economic analysis of BIPV systems as a building envelope material for building skins in Europe [J]. Energy, 2020, 204: 117931.
- [4] ZHANG Q, ZHOU Z, LIU Y, *et al.* Design and operational strategy optimization of a hybrid electric heating system with phase change materials for energy storage in nearly zero energy buildings[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 82: 110528.
- [5] FORROUSSO S, IDRISSEI KAITOUNI S, MANA A, *et al.* Optimal sizing of off-grid microgrid building-integrated-photovoltaic system with battery for a net zero energy residential building in different climates of Morocco [J]. *Results in Engineering*, 2024, 22: 102288.
- [6] BINGHAM R D, AGELIN-CHAAB M, ROSEN M A. Whole building optimization of a residential home with PV and battery storage in the Bahamas[J]. *Renewable Energy*, 2019, 132: 1088-1103.
- [7] XIN X G, QI S, MINGFENG Z, *et al.* Operation optimization strategy of a BIPV-battery storage hybrid system [J]. *Results in Engineering*, 2023, 18(7): 101066.
- [8] ČURPEK J, ČEKON M. Climate response of a BIPV façade system enhanced with latent PCM-based thermal energy storage[J]. *Renewable Energy*, 2020, 152: 368-384.
- [9] 何绪权, 王政华, 张玲, 等. 石蜡基核壳结构相变储能复合材料的制备及性能 [J]. 华东理工大学学报 (自然科学版), 2022, 48(4): 467-474.
- [10] HUANG M J, HEWITT N. Enhancing energy utilisation in building with combining building integrated PV and air source heat pump for underfloor heating using phase change materials[J]. *Renewable Energy and Sustainable Buildings*, 2019, 67: 813-823.
- [11] 田录林, 张沛文, 周萌, 等. 基于实时电价的商业园区电池储能变功率削峰填谷策略 [J]. *西北水电*, 2019(5): 1-5.
- [12] XU B, LI M, HASSANIEN R H E, *et al.* Research on the cold storage characteristics of ice storage photovoltaic cold storage[J/OL]. *Energy and Built Environment*, (2024-07-30) [2024-08-28]. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2024.03.011>.
- [13] BRAVO DIAS J, CARRILHO DA GRAÇA G. Using building thermal mass energy storage to offset temporary BIPV output reductions due to passing clouds in an office building[J]. *Building and Environment*, 2022, 207: 108504.
- [14] WANG C, JI J, YU B, *et al.* Investigation on the operation strategy of a hybrid BIPV/T façade in plateau areas: An adaptive regulation method based on artificial neural network [J]. *Energy*, 2022, 239: 122055.
- [15] ZHAO G, CLARKE J, SEARLE J, *et al.* Economic analysis of integrating photovoltaics and battery energy storage system in an office building [J]. *Energy and Buildings*, 2023, 284: 112885.
- [16] 陈曦. 考虑楼宇虚拟储能系统的综合能源系统运行优化 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [17] 朱倩雯. 多能互补建筑能源系统电热储能容量优化配置 [D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [18] 付建民, 杨斌, 王小君, 等. 考虑建筑储能特性的高铁站综合能源系统规划方法 [J]. *电力建设*, 2020, 41(3): 13-22.

Performance and Operation Strategy Optimization of Battery-Heat Pump Energy Storage System Based on Building Integrated Photovoltaic

DAI Lanhua^{1,2}, LI Zhenwei¹, DONG Ming², HUO Jiajing¹, GU Siwen^{1,3}, JIANG Xiaoyan¹, YANG He³

(1. School of Photoelectric Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032, Jiangsu, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;

3. School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: A battery-heat pump energy storage system based on Building Integrated Photovoltaic(BIPV) is designed in this paper. A heat pump system is used to preheat or precool the room to achieve cool/heat energy storage and batteries are used to achieve electrical energy storage. The BIPV, batteries, and air source heat pump are combined in this system to achieve comprehensive energy utilization. Based on the conversion of electrical and thermal energy, the operating cost of the system can be reduced by improving the matching between solar power generation and load utilization. The annual operation performances of four systems are simulated. The results show that the system with both electric and cool/heat energy storage is the most economical, with saving EUR 379 in operating costs per year. In order to obtain the optimal control parameters of the system, the control strategy based on time-sharing tariffs is carried out using a variety of optimization algorithms. Six parameters are selected for optimization, including preheating time, preheating temperature, precooling time, precooling temperature, battery valley charging SOC in the heating season, and the battery valley charging SOC in the cooling season. The minimum annual operating cost is used as the objective function. The results show that the annual operating cost after optimization can be reduced by 14.6%—27.6% compared with the pre-optimization. The energy storage system comprehensively utilizes various clean energy sources and can achieve coordinated operation between photovoltaic power generation, batteries, and air source heat pumps, which has broad application prospects in the field of building energy conservation.

Key words: BIPV; electrical energy storage; cold/heat energy storage; TRNSYS; optimization

(责任编辑: 李娟)