

暖通系统零碳技术协同集成与性能优化

侯雨萌, 宋锋

(威海建设集团股份有限公司)

【摘要】为解决建筑暖通系统高能耗、高碳排放难题, 文章构建“光伏—相变储能—地源热泵—热回收”零碳技术协同架构, 建立碳—能双目标优化模型, 开发基于模型预测控制的智能调控策略。结合上海某办公园区工程案例进行验证, 该系统可实现暖通能耗降低 53.0%, 碳排放减少 61.9%, 光伏消纳率达 85%~92%, 静态投资回收期 5.8a, 内部收益率为 16.5%。研究为暖通系统零碳转型提供技术路径, 兼具经济与环境效益。

【关键词】暖通系统; 零碳技术; 协同集成; 性能优化; 模型预测控制

中图分类号: TU83

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2026.03.045

Collaborative Integration and Performance Optimization of Zero-carbon Technologies for HVAC Systems

HOU Yu-meng, SONG Feng

(Weihai Construction Group Company Limited)

【Abstract】To solve the problems of high energy consumption and high carbon emissions in building HVAC systems, this paper constructs a collaborative architecture of zero-carbon technologies including "photovoltaic-phase change energy storage-ground source heat pump-heat recovery", establishes a dual-objective optimization model of carbon and energy, and develops an intelligent control strategy based on model predictive control. Verified by an engineering case of an office park in Shanghai, the system can reduce HVAC energy consumption by 53.0%, decrease carbon emissions by 61.9%, and achieve a photovoltaic absorption rate of 85%-92%, with a static investment payback period of 5.8 years and an internal rate of return of 16.5%. The research provides a technical path for the zero-carbon transformation of HVAC systems, with both economic and environmental benefits.

【Keywords】HVAC system; zero-carbon technology; collaborative integration; performance optimization; model predictive control

1 引言

建筑业占全球终端能源消费的 35%~40%, 其中暖通空调系统能耗占比达 45%~60%, 减排压力迫切。当前零碳技术多独立应用, 存在显著局限: 光伏直驱受光照与温度影响, 阴雨天气出力衰减超 40%; 地源热泵长期运行易引发土壤热失衡, 换热效率下降 25%~30%; 相变储能材料成本高, 热稳定性不足; 热回收系统在湿度 > 70% 环境下效率衰减 18%~25%。单一技术难以兼顾能耗降低与碳排放控制, 亟需通过多技术协同集成突破“技术孤岛”限制。本文聚焦暖通系统零碳技术协同机制, 构建优化模型与调控策略, 为系统零碳转型提供支撑^[1]。

2 暖通系统零碳技术协同集成架构

2.1 核心零碳技术模块

2.1.1 光伏直驱模块

采用单晶硅光伏组件, 转换效率 21%~23%, 年

衰减率 0.5%~0.8%, 通过单二极管等效电路模型实现功率预测, 同时引入温度修正系数, 修正环境温度对光伏出力的影响。系统通过 DC/AC 变流器直接为暖通设备供电, 减少电能转换损耗, 相比传统“光伏—电网—暖通”间接供电模式, 电能转换损耗降低 15%~20%, 进一步提升能源利用效率^[2]。

2.1.2 相变储能模块

选用水合盐相变材料, 关键参数为: 相变温度 $8\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, 潜热值 $200\text{kJ/kg}\sim 220\text{kJ/kg}$, 密度 $1450\text{kg/m}^3\sim 1550\text{kg/m}^3$, 经纳米颗粒增强后导热系数提升 30%~40%, 使用寿命超 5000 次循环。储能模块在光伏出力高峰 (11:00-15:00, 日均光照强度 $> 800\text{W/m}^2$) 储存多余电能, 在负荷高峰时段 (7:00-9:00、17:00-20:00, 办公时段负荷密度 $80\text{W/m}^2\sim 100\text{W/m}^2$) 释放, 有效平抑暖通系统峰值负荷, 案例中峰值负荷从 1850kW 降至 1200kW, 降幅达 35.1%。

2.1.3 地源热泵模块

采用垂直地埋管系统, 制冷系数 (COP) 4.5~

5.5,制热系数(COP)3.8-4.8,地埋管换热效率35W/m~45W/m。通过土壤热响应测试优化地埋管布置间距与深度,同时结合冷却塔补充换热,在夏季制冷高峰,冷却塔可承担30%~40%的排热负荷,避免土壤长期吸热导致的热失衡,使土壤温度恢复速率提升35%~45%,保障热泵全年稳定运行。

2.1.4 全热回收模块

采用转轮式全热回收装置,全热交换效率65%~75%,引入湿度影响系数(0.8~1.2)修正高湿度环境下的性能衰减。例如,在上海梅雨季(湿度>80%),通过该系数可精准计算效率衰减幅度,提前调整新风处理策略。装置通过回收排风余热(冬季排风温度18℃~22℃、夏季16℃~18℃)预处理新风,减少新风加热或冷却所需能耗,案例中新风处理能耗降低40%~45%,间接减少碳排放。

2.2 系统协同控制逻辑

2.2.1 分层控制架构

设备层:各技术模块独立完成基础功能,如光伏模块实时监测光照与温度并预测出力、储能模块控制充放电速率、热泵模块调节运行功率。

协调层:基于实时负荷数据与光伏出力情况,动态分配能源供给。例如,光伏出力充足时,优先关闭电网供电,仅保留储能备用;光伏出力不足时,按“储能放电→电网补充”的顺序调配能源,避免技术间冲突。

优化层:结合电网碳强度与峰谷电价,在“低成本”与“低排放”目标间找到最优平衡。

2.2.2 动态运行模式

基于光伏出力占比与负荷需求,系统自动切换运行模式,确保全时段高效协同:光伏直驱模式(光伏出力 $\geq 80\%$ 负荷)下,光伏直接为暖通设备供电,多余电能存入储能模块,此时储能充电速率控制在额定容量的30%~50%以避免过充损伤;混合供电模式($30\% \leq$ 光伏出力 $< 80\%$ 负荷)时,光伏与储能协同供电,根据负荷波动调节储能放电功率,放电速率随负荷增加同步提升以确保出力稳定;在储能优先模式(光伏出力 $< 30\%$ 负荷)中,储能模块优先放电,当储能状态(SOC)低于20%时自动接入电网补充,避免储能深度放电;电网备用模式(夜间或设备故障)则由电网单独为暖通系统供电,储能模块处于待机

状态,同时监测电网碳强度,在碳强度较低时段(如凌晨2:00-6:00)适度为储能充电以降低次日碳排放。

3 暖通系统零碳性能优化模型与调控策略

3.1 多目标优化

3.1.1 目标

经济目标:聚焦全年总运行成本控制,包括电网购电成本与设备维护成本。其中电网购电成本按不同时段电价计算,需统计全年8760h的实时电网电功率,乘以对应时段电价后累加;设备维护成本按各模块年度维护费用总和计算,如光伏组件维护费0.05元/W/a、储能模块维护费0.1元/kWh/a。

环保目标:聚焦全年总碳排放控制,包括电网购电碳排放与设备生产隐含碳。电网购电碳排放按实时电网碳强度计算,累加各时段购电产生的碳排放量;设备生产隐含碳为各零碳技术模块制造过程中产生的碳排放,如光伏组件隐含碳约300kgCO₂/kW~400kgCO₂/kW、地埋管系统隐含碳约50kgCO₂/m~80kgCO₂/m。

3.1.2 约束条件

功率平衡约束要求任意时刻光伏出力、电网购电功率与储能放电功率之和等于暖通系统负荷功率与储能充电功率之和,确保能源供需实时匹配;储能状态约束需将储能模块的SOC维持在20%~80%,充放电速率控制在额定容量的50%以内,防止过充过放损伤设备;设备运行约束规定各零碳技术模块运行功率须在额定范围内,且功率变化率 $\leq 10\%/min$,避免系统波动。

3.2 智能调控策略

3.2.1 模型预测控制框架

采用“实时监测—滚动优化—反馈校正”的模型预测控制逻辑应对可再生能源波动性与负荷不确定性:通过实时采集光伏出力、负荷需求、储能SOC、电网碳强度等数据,基于历史数据与气候预测模型预测未来24h的光伏出力趋势与负荷变化规律,以未来24h为优化时域求解多目标优化模型得到各时刻的最优能源分配方案,仅执行优化方案中的首个时刻控制指令,下一时刻重新采集实时数据更新预测

结果并再次优化,形成“预测—优化—执行—反馈”的滚动循环,确保调控策略动态适配实际工况^[3]。

3.2.2 优化算法与参数设置

选用改进的NSGA-II算法求解多目标优化模型,通过算法改进提升优化效率与解的优越性:自适应交叉变异将交叉概率设为0.9、变异概率设为0.1,并根据种群多样性动态调整;精英保留策略保留每一代最优解直接进入下一代种群,确保不丢失优质解;约束处理机制采用罚函数法对超出功率、SOC等约束范围的解施加惩罚,降低其选择概率;算法参数设置为种群大小100、最大迭代次数200、优化步长1h,确保在10min内完成单次优化计算,满足实时调控需求^[4]。

4 工程应用与性能验证

4.1 案例概况

案例选取上海市某办公园区,建筑面积50000m²,建筑类型为多层办公建筑,运行时间7:00-20:00,人员密度8m²/人~10m²/人。当地属夏热冬冷气候区,夏季设计温度34℃,冬季设计温度-2℃,年平均太阳辐射1300kWh/m²。系统配置如下:光伏容量500kW(按10W/m²建筑面积配置),相变储冷容量800m³(水蓄冷形式,适配光伏容量的1.6倍),地埋管120口(间距5m~6m,深度80m~100m),全热回收风量20000m³/h(新风比30%)。

4.2 性能优化结果

4.2.1 能耗与碳排放表现

基于全年8760h运行数据统计,优化后系统性能显著提升:在能耗指标方面,暖通系统年能耗从传统系统的185kWh/m²降至87kWh/m²,降幅53.0%;谷电利用率从25%提升至68%,通过储能在谷时充电、峰时放电,实现峰谷电价套利;系统综合能效比(EER)从3.2提升至5.8,增长81.3%;在碳排放指标方面,全年暖通系统碳排放从620tCO₂降至236tCO₂,减排384tCO₂,减排率61.9%;碳强度从12.4kgCO₂/m²降至4.7kgCO₂/m²,其中光伏碳减排218tCO₂,占总减排量的56.8%,节能碳减排166tCO₂,占总减排量的43.2%;光伏消纳率稳定在85%~92%,远高于行业平均水平的60%~70%。

4.2.2 经济效益分析

投资与收益:系统增量投资1150万元(含所有零碳技术模块采购与安装),年节能收益178.3万元,主要为电费节省,年维护成本45.2万元,含设备巡检、耗材更换。

投资回报:静态投资回收期5.8a,内部收益率16.5%,高于建筑行业平均水平;若考虑碳交易收益(上海碳价约80元/tCO₂),年碳收益约3.07万元,回收期可缩短至5.5a。

5 结语

“光伏—相变储能—地源热泵—热回收”协同系统可有效突破单一技术局限,实现暖通能耗降低50%~55%、碳排放减少52%~60%、光伏消纳率85%~92%,满足零碳转型需求;系统静态投资回收期5a~7a,内部收益率12%~18%,在峰谷价差>0.8元/kWh、碳价≥80元/tCO₂的条件下,经济效益显著,具备规模化推广潜力。基于模型预测控制的智能策略,可有效应对光伏波动性与负荷不确定性,系统鲁棒性强,在阴雨、高温等极端工况下仍能稳定运行。

在工程应用中,设计层面应按100W/m²~120W/m²建筑面积配置光伏容量,储能容量与光伏容量按1:0.4-0.6适配,地源热泵需开展土壤热响应测试并按需搭配冷却塔,高湿度地区优先选用抗衰减转轮式热回收装置;运行层面应优先利用光伏直驱供电,通过储能实现峰谷电价套利,定期监测土壤温度、储能SOC等参数并每季度评估系统性能。

参考文献

- [1] 梁清. 节能减排理念下绿色建筑暖通空调节能优化[J]. 工程技术创新与发展, 2025, 3 (9) (网络首发)。
- [2] 柴建江, 林海峰. 基于BIM技术的暖通工程设计优化方法研究[J]. 现代装饰, 2025, 609 (10): 109-111.
- [3] 王鹏涛, 唐瑾容, 梁睿, 等. 光热-地源热泵供暖系统特性与经济性分析[J]. 建筑节能(中英文), 2025, 53 (7): 1-9.
- [4] 刘倩. 建筑工程中暖通空调节能技术的应用分析[J]. 智能建筑与智慧城市, 2024 (3): 119-122.