

建筑光储直柔系统多能耦合与协同优化研究 ——以上海同舟大厦为例

王千星¹, 苏勇², 尹晓东¹, 梁骁², 唐鹏武², 孙倩¹

(1. 中建港航局集团有限公司; 2. 中国建筑上海设计研究院有限公司)

【摘要】在“双碳”目标引领下, 建筑能源系统正朝着清洁化、直流化、柔性化演进。光储直柔系统作为新一代建筑能源系统的核心形态, 通过光伏、储能、直流配电与柔性负荷的深度耦合, 推动建筑实现高效、低碳与智慧运行。文章以上海同舟大厦为对象, 开展了光伏系统选型设计、储能系统配置与协同策略、直流配电架构优化以及柔性控制系统集成等关键技术研究, 实现了可再生能源与高效设备的协同联动。通过技术经济分析与多目标优化方法, 提出了面向实际工程的多能耦合解决方案与协同运行策略, 为同类建筑提供了可复制、可推广的技术集成示范与决策支持框架。

【关键词】光储直柔; 多能耦合; 协同优化; 直流配电; 柔性控制

【基金项目】中建股份科技研发计划资助, 项目编号: CSCEC-2025-Z-37

中图分类号: TU201.5

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2026.03.006

Research on Multi-energy Coupling and Collaborative Optimization of Building Photovoltaic-Energy Storage-Direct Current-Flexibility System ——Taking Shanghai Tongzhou Building as an Example

WANG Qian-xing¹, SU Yong², YIN Xiao-dong¹, LIANG Xiao², TANG Peng-wu², SUN Qian¹

(1.China State Construction Harbour and Channel Engineering Group Co., Ltd.; 2.China Shanghai Architectural Design
& Research Institute Co., Ltd.)

【Abstract】Guided by the "dual carbon" goals, building energy systems are evolving towards cleanliness, direct current (DC), and flexibility. As the core form of the new generation of building energy systems, photovoltaic-energy storage-direct current-flexibility system promotes efficient, low-carbon, and intelligent operation of buildings through the deep coupling of photovoltaics, energy storage, DC distribution, and flexibility loads. This paper focuses on the Tongzhou Building in Shanghai, conducting research on key technologies such as photovoltaic system selection and design, energy storage system configuration and coordination strategy, DC distribution architecture optimization, and flexible control system integration. It achieves the coordinated linkage between renewable energy and efficient equipment. Through techno-economic analysis and multi-objective optimization methods, a multi-energy coupling solution and coordinated operation strategy tailored for practical engineering are proposed, providing a replicable and scalable technology integration demonstration and decision-making support framework for similar buildings.

【Keywords】photovoltaic, energy storage, direct current and flexibility; multi-energy coupling; collaborative optimization; DC distribution; flexible control

1 引言

建筑领域是全球能源消耗与碳排放的关键领域, 推动其能源系统绿色低碳转型已成为实现可持续发展的关键举措^[1]。传统建筑能源系统存在来源单一、供需错配、调节能力不足等问题。光储直柔系统通过将分布式光伏、电化学储能、直流配电与可调节负荷有机融合, 能够有效平抑可再生能源波动、提高就地消纳率、降低交直流转换损耗、增强建筑与电网的互动能力, 代表了未来建筑能源系统的重要发展方向^[2]。

本文以上海同舟大厦为对象, 结合夏热冬冷地区气候特性与建筑用能特点, 围绕光储直柔系统多能耦合与协同优化展开研究。该项目位于上海宝山区, 总建筑面积 5.2 万 m², 旨在为夏热冬冷地区同类全玻璃幕墙办公建筑提供技术集成示范, 打造符合建设企业发展定位的低碳数智化标杆项目。论文围绕该项目的具体需求, 从光伏、储能、直流配电及柔性控制四个子系统入手, 开展逐项分析与集成优化, 形成从技术选型、系统设计到运行策略的完整解决方案, 为光储直柔技术的规模化应用提供理论依据与实践参考。

建筑光储直柔系统以能量管理系统为智能控制核心,集成光伏发电、电化学储能、低压直流配电及柔性负荷四大环节,并通过储能变流器等设备实现交直流变换与功率双向调节,体现了“源—储—荷”一体化协同理念。该整体架构为后续各子系统的分析与优化提供了总体框架(见图1)。

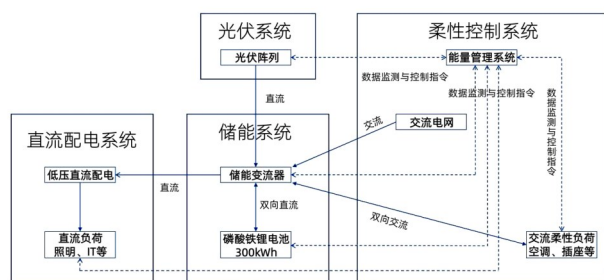


图1 建筑光储直柔系统集成架构图

2 光伏系统选型设计研究

光伏系统作为光储直柔系统中的发电端,其选型与设计需统筹考虑建筑约束条件、发电性能、经济成本及美学要求,实现技术可行、经济合理与美观协调的统一。本项目结合屋顶荷载条件、建筑形态特征及实际用电需求,开展光伏组件选型与系统集成设计,提出与建筑高度融合的BIPV(光伏建筑一体化)技术解决方案,并形成具备可复制的产品适配标准。

2.1 光伏组件选型

在光伏组件选型中,重点对晶体硅电池与薄膜电池进行了综合比选。晶体硅电池,如P型PERC单晶硅,转换效率高(约22%)、技术成熟、成本较低。薄膜电池如碲化镉CdTe,弱光性能好、外观均匀、可柔性弯曲,但转换效率(约18%~20%)与成本仍高于晶体硅组件。

结合本项目以屋顶安装为主、追求高发电量的目标,最终选用210系550W P型PERC单晶硅组件。该组件功率温度系数为-0.34%/°C至-0.36%/°C,适应上海夏季高温气候,发电性能稳定。

2.2 安装位置确定

本项目屋顶为上人屋面,设备布置集中。经综合评估建筑屋顶形态、遮挡与荷载条件,最终采用屋面光伏系统,光伏组件安装面积约467.57m²,总装机容量约106.14kW。光伏板下方保留合理的架空空

间,兼作人员通行或休憩区域,便于屋面设备维护,提升空间功能复合性,提高了系统实施的经济性与实用性。

2.3 串并联方案与散热设计

根据屋面布局与逆变器输入电压范围,系统采用每18块组件为一串的配置方案。针对上海夏季高温高湿的气候特点,散热性能是确保系统发电效率与可靠运行的关键因素。本项目对比了主动式(强制通风)与被动式(自然通风)两种散热方案,最终采用经风道优化的被动式自然通风方案,通过流体动力学(CFD)模拟验证,确保组件背部空气流通顺畅,组件工作温度降低约8°C~15°C,预计提升系统年发电量3%~5%。

3 储能系统选型与设计研究

储能系统是实现峰谷电价套利、提升供电可靠性的重要支撑。基于光伏波动性与分时电价特点,本研究重点开展储能系统选型配置,与光储协同运行策略制定,在确保安全可靠的前提下,实现全生命周期经济性最优。

3.1 蓄电池种类选型

在蓄电池种类选型中,对比了目前主流的磷酸铁锂电池、三元锂电池与钛酸锂电池。磷酸铁锂电池在安全性、循环寿命与综合成本方面表现突出;三元锂电池能量密度高,但对热管理要求严格;钛酸锂电池循环寿命长,快充性能好,但成本高。

本项目以安全性、全生命周期成本与可靠性为核心原则,最终选用磷酸铁锂电池作。该电池标称电压3.2V,能量密度达160Wh/kg~180Wh/kg,在热稳定性、循环寿命及经济性方面均衡性优异,符合工商业储能需求。

3.2 蓄电池容量配置策略

蓄电池容量配置需统筹投资成本、运行收益与系统安全性^[3]。其核心约束包括:土建条件、负荷需求、光伏消纳能力、电价政策。依托上海市约0.693元/kWh的峰谷电价差,构建以全生命周期净现值最大化为目标的容量优化模型^[4]。

经模拟测算,本项目配置300kWh储能系统可在上述约束下实现经济性最优,支持关键负荷约2h的备电需求,并可执行“两充两放”运行策略,实现电价套利与系统调节。

3.3 储能系统安装方案

储能系统安装需综合考虑安全性、经济性与后期运维便利性。针对300kWh容量的储能系统,综合比较了室内布置与室外集装箱式两种常见形式。室内布置会占用机房内部宝贵空间,且对消防设计与安全管控要求较高;室外集装箱式虽便于整体部署,但仍需考虑户外防护与环境适应性。

本项目储能系统最终选定安装于屋顶机房层外侧空余平台,采用防风、隔热及防护等级达标的户外舱体;储能配电柜则设置在十七层配电间内,与楼内配电系统就近衔接。该方案兼顾了安装便捷性、运行安全性与后期扩展需求。

4 直流配电系统选型与设计研究

直流配电系统能够减少交直流转换的能量损耗,从而提升系统整体能效。其选型与设计需统筹考虑电压等级、网络结构、设备兼容性、安全保护、能效经济性等多方面因素,以构建安全、高效且经济可行的供电方案^[5]。

4.1 系统类型选择

直流配电系统的电压等级选择需兼顾技术可行性、安全性与经济性。本项目对中压直流与低压直流两种方案进行了综合对比。中压直流适用于大型园区、远距离输电,但对绝缘保护与设备要求高;低压直流适用于单体建筑或局部供电,技术成熟,安全性好。基于本项目为单体建筑、供电距离较短、直流负荷相对集中的特点,最终选用低压直流系统,并在16层~17层展厅、接待区及立面泛光照明等直流负荷集中区域设置直流照明系统。该系统类型符合相关安全规范和标准,具备成熟的器件供应链,能够有效控制系统定制化成本与实施复杂度。

4.2 系统网络结构设计

低压直流配电网络结构主要包括单极、双极和多极结构。双极结构可提供多种电压等级,在单极性故障时仍能维持部分供电,具备更高的供电可靠性和灵活性,适用于对连续供电要求较高的场合。基于本项目的16层~17层展厅、接待区及立面泛光照明等负荷分布相对集中,且需兼顾供电可靠性与电压适配性的特点,最终选用双极辐射状网络结构。该系统从直流配电柜分别引出正、负母线,以辐射方式向各照明分区供电。各支路的供电半径严格控制

在50m以内,以有效控制线路压降与传输损耗,保证末端电压稳定性,从而实现系统效率与电能质量的统筹优化。

5 柔性控制系统选型与设计研究

柔性控制系统是光储直柔系统的协调控制中枢,负责实现源、储、荷之间的动态平衡与系统整体优化运行。基于光伏发电、储能调节与直流照明等系统特性,本项目研究不同用电场景下“光伏优先—储能调节—负荷分级”的协同控制策略,实现能源系统与建筑柔性负载之间的高效匹配与动态平衡。

5.1 柔性用电系统选型与核心策略

在柔性用电系统的选型与设计,变换器设备、运行监测与能量管理策略是实现系统高效、稳定运行的核心。本项目围绕变换器选型、运行状态监测以及并网与孤岛模式下的运行策略展开研究。

5.1.1 变压器选型

系统选用具备多模式运行能力的双向智能变换设备。光伏逆变器与储能变流器均支持并离网平滑切换,其中储能变流器具备恒功率、恒流、恒压及下垂控制等多种工作模式,可根据系统状态自动切换,满足不同运行场景下的控制需求。

5.1.2 运行状态监测

通过部署综合能源管理系统,对光伏阵列、储能电池SOC、直流母线电压、各回路负荷功率等关键参数进行实时监测与采集。监测范围覆盖AC/DC变换器、DC/DC变换器、储能电池、光伏设备及直流负荷设备等全系统关键节点,为运行策略提供数据支撑。

5.1.3 运行策略设计

系统以“光伏优先—储能调节—负荷分级”为协同控制框架,并根据并网与孤岛模式分别制定策略。

①并网模式:光伏发电优先供本地负荷,余电为储能充电;储能系统依据分时电价与负荷预测进行经济调度,实现“低储高发”;负荷按刚性、可调、可中断进行分级,通过楼宇自控系统对可调/可中断负荷进行柔性控制,优化系统整体能效与经济性。

②孤岛模式:在电网断电时,系统切换为离网运行。储能转为电压源模式,优先保障关键负荷供电;光伏在直流母线电压稳定范围内继续发电,与储能

协同维持系统功率平衡;非关键负荷按预设优先级进行减载或切断,确保系统持续稳定运行。

5.2 其他柔性负荷的协同与调度

针对建筑内空调、算力等具有调节潜力的负荷资源,本项目对其与光储直柔系统的协同调度策略展开研究,以进一步提升系统整体柔性调节能力与综合能效。

5.2.1 空调蓄能系统协同

将高效机房中的水蓄冷罐视为“冷量储能”单元,其蓄/放冷过程可与电化学储能能在时间尺度上协同优化^[6]。在夜间谷电时段及光伏无出力时,优先利用电网电力进行蓄冷;在日间光伏出力充足且电价处于高峰时,优先释放蓄冷满足供冷需求,从而降低电制冷主机运行负荷与储能放电需求,实现“冷—电”的协同优化,提高系统运行经济性。

图2直观展示了上述“冷—电”协同优化策略在典型日内的运行时序关系。该图以时间轴为主线,集成呈现了电网分时电价时段、光伏发电、电化学储能充放电状态、水蓄冷系统蓄/放冷过程以及电制冷主机运行负荷之间的动态匹配关系。

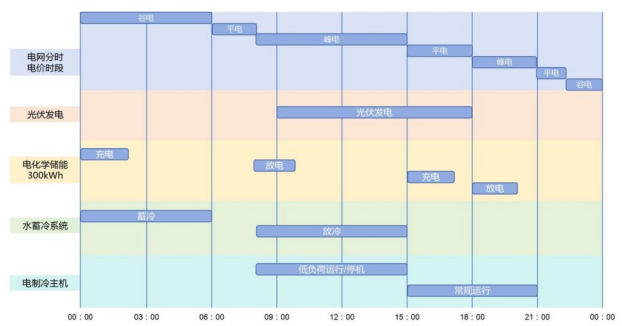


图2 空调蓄能系统协同运行示意图

5.2.2 算力负载耦合

建筑内IT设备、边缘计算服务器等算力负载日益增加,其电力消耗具备时间平移潜力。在光伏出力充裕时段,动态调度部分非实时计算任务,消纳富余光伏电力;在电价高峰或系统功率紧张时段,可适当推迟或调节算力任务。该模式旨在实现“算力—电力”的时空转移,推动建筑从“被动用电”向“主动调荷”演进。

6 结语

本文以上海同舟大厦为对象,系统性地完成了

建筑光储直柔系统的多能耦合与协同优化研究,主要结论如下。

①高层办公建筑采用“BIPV+磷酸铁锂储能+低压直流配电+柔性分级控制”技术路线在技术、经济和安全上具备高度可行性。

②多能耦合的核心在于通过智能化控制系统,实现光伏、储能、直流配电及柔性负荷在时间、功率和能量维度上的协同匹配。

③项目全生命周期经济效益与碳减排效益显著,具备良好的示范与推广价值。

参考文献

[1] 陈利富, 朱海林. 光伏发电系统与光储直柔技术在城市建设及绿色建筑中的应用与研究[J]. 智能建筑与智慧城市, 2025 (S1): 95-98.

[2] 王扩. 零碳建筑中光储直柔技术的创新应用研究[J]. 价值工程, 2025, 44 (22): 138-141.

[3] 梁凯, 吴建林, 董朝阳, 等. 基于建筑光储直柔系统柔性指标的储能系统容量计算方法[J]. 暖通空调, 2025, 55 (11): 144-148+25.

[4] 陈家杨, 郝斌, 邓志辉, 等. 光储直柔系统储能设施优化配置方法研究[J]. 供用电, 2025, 42 (4): 34-41+58.

[5] 陈志萍. “光储直柔”建筑配电技术研究与试点应用. 山西省, 山西省建筑设计研究院有限公司, 2024-12-25.

[6] 赵志刚, 姜颖异, 黄猛, 等. 光储直柔空调系统运行控制策略研究[J]. 制冷与空调, 2024, 24 (11): 29-35+46.