

光伏储能一体化在智能建筑电气系统中的集成设计

邬成辉

中外建华诚工程技术集团有限公司南昌分公司, 江西 南昌 330000

DOI:10.61369/EPTSM.2025120015

摘要 : 在“双碳”目标引领下, 建筑行业的低碳转型成为能源革命的关键环节。光伏储能一体化技术凭借“发电—储能—用能”的闭环优势, 与智能建筑电气系统的深度集成, 能够破解传统建筑能源利用效率低、供电可靠性不足、碳排放强度高难题。本文基于智能建筑电气系统的结构特性与运行需求, 系统阐述光伏储能一体化的集成原理、核心设计要点及关键支撑技术, 并对光伏储能一体化集成设计未来发展趋势进行了展望。研究表明, 科学的集成设计可提升智能建筑清洁能源消纳率, 降低综合能源成本, 为智能建筑实现能源自给、高效运行与低碳发展提供全方位技术支撑, 对推动建筑领域可再生能源规模化应用具有重要意义。

关键词 : 光伏储能一体化; 智能建筑; 电气系统; 集成设计; 低碳能源

Integrated Design of Photovoltaic Energy Storage Integration in Electrical Systems of Intelligent Buildings

Wu Chenghui

Nanchang Branch of HCCI Urban Architectural Planning and Design Co.,Ltd. Nanchang, Jiangxi 330000

Abstract : Guided by the "dual carbon" goals, the low-carbon transformation of the construction industry has become a pivotal aspect of the energy revolution. Leveraging the closed-loop advantage of "power generation-energy storage-energy utilization," the integration of photovoltaic energy storage integration technology with the electrical systems of intelligent buildings can address challenges such as low energy efficiency, insufficient power supply reliability, and high carbon emissions in traditional buildings. Based on the structural characteristics and operational requirements of electrical systems in intelligent buildings, this paper systematically expounds on the integration principles, core design considerations, and key supporting technologies of photovoltaic energy storage integration. It also provides an outlook on the future development trends of integrated design for photovoltaic energy storage integration. Research indicates that scientific integrated design can enhance the consumption rate of clean energy in intelligent buildings, reduce comprehensive energy costs, and provide comprehensive technical support for achieving energy self-sufficiency, efficient operation, and low-carbon development in intelligent buildings. This holds significant importance for promoting the large-scale application of renewable energy in the construction sector.

Keywords : photovoltaic energy storage integration; intelligent buildings; electrical systems; integrated design; low-carbon energy

引言

全球能源结构转型与生态环境保护的双重压力, 推动建筑行业从传统高能耗模式向绿色智能方向升级^[1]。智能建筑作为融合自动化控制、物联网、大数据等技术的现代化建筑形态, 其电气系统已发展为涵盖供电、终端用能、监控调度等多环节的复杂网络, 但长期依赖电网供电的模式仍面临能源浪费、峰谷负荷失衡、应急保障薄弱等突出问题。光伏储能一体化 (PV-ESS) 技术通过光伏组件将太阳能转化为电能, 借助储能单元平抑发电波动性, 形成独立的分布式能源系统, 为智能建筑提供了清洁、稳定、自主的能源解决方案。近年来, 光伏储能与建筑的融合应用成为行业研究热点。国内在政策驱动下, 光伏建筑一体化 (BIPV) 与储能技术的结合取得阶段性进展, 但在集成方案的通用性、控制策略的适应性、安全防护的系统性等方面仍需完善。因此, 开展光伏储能一体化在智能建筑电气系统中的集成设计研究, 明确技术路径与设计规范, 对推动智能建筑向低碳化、高效化、自主化发展具有重要的工程价值与现实意义。

一、光伏储能一体化与智能建筑电气系统的集成原理

智能建筑电气系统以“智能化协同”为核心特征，涵盖主电源、分布式能源、储能设备、用电负荷及监控调度五大核心模块，各模块通过电气接口与通信网络实现能量流与数据流的双向交互。从能源运行逻辑来看，系统存在电网供电、分布式发电、储能充放电、负荷用电四条核心路径，光伏储能一体化的集成本质是通过技术手段对四条路径进行优化整合，实现能源资源的最优配置。智能建筑的用电负荷具有多样性与波动性特征，常规负荷（照明、插座）功率稳定，动态负荷（空调、电梯）功率波动大，关键负荷（消防、数据中心）对供电可靠性要求极高，这些特性直接决定光伏储能系统的设计方向与技术参数。

光伏储能一体化系统由光伏组件、储能单元、逆变器（逆变器+PCS）、能量管理系统（EMS）四大核心部分组成，其工作机制形成完整闭环：光伏组件将太阳能转化为直流电，经汇流箱汇集后输送至逆变器，转化为交流电满足建筑即时用电需求^[2]；当光伏发电量超出负荷需求时，多余电能通过PCS逆变器为储能单元充电；当光伏发电量不足或电网故障时，储能单元释放电能，经逆变器转化后供给负荷；能量管理系统实时采集光伏出力、储能状态、负荷需求、电网参数等数据，通过优化算法制定充放电

策略，实现与智能建筑电气系统的协同运行。

两者集成的核心目标包括：最大化能源自给率，通过太阳能资源的高效利用降低电网依赖；最小化运行成本，借助峰谷电价差与弃光损失减少实现经济收益；提升供电可靠性，以储能单元作为应急电源保障关键负荷运行；降低碳排放强度，替代化石能源发电减少环境影响。集成过程中需应对多重约束：空间约束源于建筑可用安装面积有限，限制光伏组件装机容量；容量约束来自储能单元的占地面积、重量与成本限制，需平衡储能效果与经济性；技术约束体现在光伏出力的间歇性与储能单元的效率、寿命限制，对控制策略提出更高要求；政策约束则要求符合电网接入标准、补贴政策与储能配比等相关规定。

二、光伏储能一体化在智能建筑电气系统中的集成设计要点

（一）系统拓扑结构选型

光伏储能一体化与智能建筑电气系统的集成拓扑结构主要分为三种类型，不同结构在连接方式、性能特点与适用场景上存在显著差异，具体适配性如下表1所示：

表1 光伏储能一体化与智能建筑电气系统集成拓扑结构适配性对比

拓扑结构类型	核心连接方式	核心优势	主要局限	适配场景
交流耦合型	光伏系统与储能系统分别通过独立逆变器接入建筑交流母线	结构灵活，可独立扩容，光伏与储能可单独运行，改造难度低	能量转换效率较低（多一次逆变过程），设备成本较高	既有建筑节能改造、光伏与储能分期建设项目
直流耦合型	光伏组件与储能单元直接连接直流母线，通过同一逆变器接入交流系统	转换效率高（减少一次逆变损耗），结构紧凑，设备成本较低	扩容灵活性不足，光伏与储能需同步运行	新建智能建筑、光伏与储能一次性建设项目
混合耦合型	部分光伏组件与储能直流耦合，部分光伏组件独立交流接入	兼顾能量转换效率与系统灵活性，可适配复杂负荷特性	控制逻辑复杂，系统集成难度较高	大型智能建筑、负荷波动幅度大的场景

结构的选择需综合考虑建筑类型（新建/既有）、建设模式（同步/分期）、负荷特性（稳定/波动）等因素，核心目标是在效率、成本、灵活性之间达成平衡。

（二）组件选型与容量匹配

组件选型是集成设计的基础，需结合智能建筑的空间条件、性能需求与经济成本综合决策。光伏组件方面，晶硅组件因转换效率高、寿命长、成本合理，成为多数智能建筑的首选，适用于屋顶、墙面等平整区域；薄膜组件具有柔性优势，可适配曲面建筑或异形结构，但转换效率较低，成本相对较高；BIPV组件兼具发电功能与建筑围护属性，可替代幕墙、屋面瓦等传统材料，兼顾美观性与实用性，适用于对建筑外观有较高要求的项目，但需满足节能、防水、承重等建筑标准。

储能单元的选型需聚焦充放电效率、循环寿命、安全性与成本四大核心指标。磷酸铁锂电池凭借充放电效率高、循环寿命长、能量密度大、安全性可靠等优势，成为智能建筑的主流选择^[3]；钒液流电池循环寿命极长，充放电深度可达100%，无热失控风险，但能量密度低、成本较高，适用于大型智能建筑或对寿命要求极高的场景；铅酸电池技术成熟、成本低廉，但循环寿命

短、能量密度低，且存在环境污染风险，仅适用于低成本、低要求的小型项目。

容量匹配是集成设计的核心环节，需基于建筑负荷特性、光伏资源条件与政策要求，通过科学方法确定光伏装机容量与储能容量的最优配比。负荷侧需求分析法以建筑历史用电数据为基础，结合光伏年有效发电小时数，确定光伏装机容量满足日均用电量的60%—80%，储能容量按高峰负荷的30%—50%配置，同时保障关键负荷2—4小时应急供电；经济性优化法以全生命周期成本最小化为目标，整合光伏与储能设备成本、电费、补贴等因素建立经济模型，通过优化算法求解最优配比，峰谷电价差较大地区可适当增大储能容量；可靠性约束法针对关键负荷占比较高的建筑，按关键负荷100%容量配置储能，确保应急状态下的供电保障。三种方法需结合项目实际灵活应用，实现技术可行性与经济合理性的统一。

（三）控制策略优化

光伏储能一体化系统的控制策略需实现与智能建筑电气系统的深度协同，按控制层级可分为系统级、设备级与负荷侧三个维度，形成全方位的调度体系。系统级控制以能量管理系统

(EMS)为核心,负责全局优化决策,通过实时采集光伏出力、储能SOC状态、负荷功率、电网参数、电价等数据,自动切换运行模式,包括“自发自用+余电上网”“自发自用+储能充电”“储能放电+电网补充”“应急供电”四种核心模式;同时基于短期负荷预测与光伏出力预测,制定24小时充放电计划,实现能源利用效率最大化与运行成本最小化。

设备级控制聚焦光伏逆变器与PCS储能变流器的精准运行,光伏逆变器采用MPPT(最大功率点跟踪)控制技术,最大限度提升光伏出力,同时具备电网异常响应能力,在电压、频率超标时自动调整输出或断开连接;PCS变流器根据EMS指令采用恒功率、恒压或下垂控制模式,精准调节充放电功率,同时设置SOC上下限,避免过度充放电影响储能寿命。负荷侧控制通过对终端用能设备的智能化管控配合能源系统运行,对空调、水泵等柔性负荷实施错峰运行,在光伏出力高峰时段增加运行功率,低谷时段减少功率消耗;为关键负荷设置独立供电回路,在电网故障时自动切换至储能供电模式,保障运行连续性。三级控制策略相互协同,实现能源生产、存储、消费的全流程优化。

(四)安全防护体系构建

光伏储能一体化系统的集成需建立全方位安全防护体系,覆盖电气安全、消防安全、通信安全与机械安全四大维度。电气安全方面,系统需配置过压、过流、短路、接地等保护装置,光伏组件与建筑结构保持合理安全间距,避免阴影遮挡引发热斑效应,同时优化电路设计防止孤岛效应^[4];消防安全要求储能单元采用防火防爆设计,配备温度、烟雾监测与自动灭火装置,电池舱设置强制通风系统,控制环境温度在安全范围,避免热积聚引发风险;通信安全需采用加密协议保障EMS与建筑监控平台、电网调度系统的数据传输安全,防止数据泄露与恶意攻击;机械安全要求光伏组件与储能设备的安装满足建筑承重标准,抗风、抗震性能符合当地规范,确保设备长期稳定运行。安全防护体系需贯穿设计、施工、运行全生命周期,为系统集成提供可靠保障。

三、集成设计的关键支撑技术

光伏储能一体化与智能建筑电气系统的高效集成,需依托先进技术手段突破核心瓶颈,关键支撑技术主要包括预测技术、协同控制技术与电池管理技术。

负荷预测与光伏出力预测技术是优化控制的前提,通过整合历史用电数据、气象数据、建筑运行数据,采用LSTM、随机森林等机器学习算法,实现1—24小时短期预测,预测误差控制在10%以内,为EMS调度决策提供精准数据支撑;预测技术的核心价值在于提前预判能源供需变化,避免盲目充放电导致的能源浪费或供电不足。

分布式协同控制技术针对大型智能建筑多区域、多负荷的特点,采用分布式控制架构,将光伏储能系统划分为多个子单元,

每个子单元负责特定区域的能源供应,通过边缘计算与云端协同实现全局优化与局部自主控制的有机结合;该技术可提升系统响应速度,避免集中式控制的延迟问题,同时增强系统容错性,某一子单元故障时不影响整体运行,显著提升系统可靠性。

电池管理系统(BMS)技术是保障储能单元安全高效运行的核心,通过实时监测电池单体的电压、电流、温度、SOC等参数,采用主动均衡或被动均衡技术调节单体一致性,避免因单体差异影响电池组寿命;同时具备故障诊断与预警功能,及时识别电池过热、过充、过放等异常状态,触发保护机制防止安全事故,延长电池循环寿命,降低运行维护成本。三大关键技术相互支撑,为集成设计的优化实施提供技术保障。

四、光伏储能一体化集成设计的发展趋势

随着“双碳”目标的深入推进与技术的持续创新,光伏储能一体化在智能建筑电气系统中的集成设计呈现四大发展趋势。技术融合深度化方面,光伏储能技术将与物联网、人工智能、数字孪生等技术实现更深度的融合,形成“感知—分析—决策—执行”的全闭环智能系统,能源调度的精准性与智能化水平将显著提升;人工智能算法的广泛应用将实现负荷与光伏出力的超短期精准预测,数字孪生技术将支撑系统全生命周期的智能化管理。

系统集成模块化方面,标准化、模块化的集成方案将成为主流,光伏组件、储能单元、变流器等核心设备将实现模块化设计与生产,降低系统集成难度与成本,提升安装效率与兼容性。模块化设计可根据建筑需求灵活组合配置,适配不同规模、不同类型的智能建筑,同时便于后期扩容与维护,推动光伏储能一体化系统的规模化应用。

能源利用多元化方面,集成系统将从单一太阳能利用向多能源互补方向发展,与地热能、风能、生物质能等其他可再生能源结合,形成多能互补的分布式能源系统,进一步提升能源自给率与系统稳定性^[5]。同时,系统将微电网、虚拟电厂技术深度融合,智能建筑作为分布式能源节点参与电网调度,实现能源的双向互动与优化配置,提升能源利用的综合效益。

政策标准完善化方面,随着技术应用的规模化推进,相关政策与标准将逐步完善。国家层面将出台更具针对性的补贴政策与激励措施,降低项目投资成本;电网接入标准将进一步优化,为分布式能源系统的并网运行提供更为便利的条件;技术标准与设计规范将不断健全,明确集成设计的技术要求、安全指标与验收标准,规范行业发展,为光伏储能一体化在智能建筑中的广泛应用提供政策保障与技术支撑。

五、结语

光伏储能一体化与智能建筑电气系统的深度集成,是建筑行

业实现低碳转型的关键路径，其核心价值在于通过清洁能源生产、存储与消费的闭环优化，破解传统建筑能源利用效率低、碳排放强度高、供电可靠性不足等难题。本文通过分析发现，科学的集成设计可显著提升智能建筑的能源自给率与清洁能源消纳率，降低运行成本与碳排放强度，同时增强供电保障能力。未来，随着光伏组件转换效率的提升、储能技术成本的下降与智能

控制算法的优化，光伏储能一体化在智能建筑中的应用将更加广泛，集成方案将向标准化、模块化、智能化方向发展。展望未来，光伏储能一体化与智能建筑电气系统的集成将成为绿色建筑发展的核心趋势，为实现“双碳”目标与能源可持续发展提供重要支撑。

参考文献

- [1] 余利丰. 碳中和背景下武汉市产业结构转型升级研究 [J]. 武汉社会科学, 2025, (03): 58-64.
- [2] 马碧霞. 光伏—储能一体化系统在道路照明中的应用与节能效益分析 [J]. 中国照明电器, 2025, (07): 146-148.
- [3] 张福生. 磷酸铁锂电池工业应用领域浅析 [J]. 化工管理, 2018, (34): 90-91.
- [4] 张兵. 光伏发电系统消防安全检查方法与防护措施 [J]. 今日消防, 2025, 10(04): 98-100.
- [5] 刘东阳, 何福鹏, 邱伟, 等. 低碳智慧化转型: 能源化工领域的未来发展与挑战 [J]. 化工进展, 2025, 44(06): 3305-3323.