

基于建筑光伏一体化的武汉绿色低碳建筑能源系统创新研究

李晓萌

文华学院，武汉市，430074；

摘要：“双碳”目标引领下建筑行业绿色转型是城市可持续发展的关键抓手。武汉是长江经济带核心城市，夏热冬冷的气候特征与高密度建筑格局，给建筑能源系统带来了严峻挑战。建筑光伏一体化作为将太阳能利用与建筑本体进行深度融合的创新技术，为构建绿色低碳建筑能源系统提供了有效方案。本文以武汉地区建筑能源需求为导向，从技术适配，系统集成，模式创新三个层面，探讨建筑光伏一体化在绿色低碳建筑能源系统中的应用路径。通过分析武汉新能源研究院大楼等典型案例的实践经验，剖析当前技术应用中的适配性问题与系统协同瓶颈，提出结合地域气候特征的组件优化策略、“光储直柔”的系统集成方案以及多元主体参与的推广机制，为武汉乃至同类气候区城市的绿色建筑发展提供理论支撑与实践参考。

关键词：建筑光伏一体化；绿色低碳；建筑能源系统；武汉；系统创新

DOI：10.69979/3029-2727.26.01.044

引言

全球可持续发展浪潮下，传统能源危机与环境污染问题日益凸显，建筑行业作为能耗与碳排放的重点领域，其绿色转型已成为实现“双碳”目标的关键环节。建筑行业能耗在全球终端能耗中占比超过三分之一，碳排放占比接近四成，而武汉作为中部地区的核心城市，近年来城市化进程加速，高密度建筑集群不断涌现，加之夏热冬冷的气候特点导致建筑空调与采暖能耗居高不下，进一步加剧了能源供需矛盾与生态环境压力。在此背景下，寻找能够兼顾建筑功能与能源供给的创新技术，成为武汉绿色建筑发展的迫切需求^[1]。建筑光伏一体化将太阳能光伏发电系统与建筑外围护结构有机融合，使建筑从传统的“能源消耗体”转变为“能源供给体”，为解决建筑能源问题提供了全新思路。武汉拥有丰富的太阳能资源，且在绿色建筑领域已积累一定实践经验，具备推广建筑光伏一体化技术的良好基础。

1 建筑光伏一体化的技术内涵与核心价值

1.1 从附着到融合的本质跨越

建筑光伏一体化并非光伏组件简单附着于建筑表面，而是将光伏发电系统与建筑物同步设计、施工和安装的先进技术形式。其核心特征是“一体化”，即光伏组件深度集成到建筑外围护结构中，成为建筑结构的有机组成部分，屋顶、幕墙、遮阳连廊等都可以作为光伏组件载体。这种集成模式要求光伏组件既要具有高效的太阳能转换能力，还要满足隔热，绝缘，抗风，防雨等建筑材料的基本性能要求，同时还要符合建筑美学，能

根据建筑的风格和色彩进行定制化设计，实现技术功能和建筑艺术的统一^[2]。从技术原理看，建筑光伏一体化基于光伏效应，将太阳能直接通过组件中的半导体材料转化为电能，通过光伏阵列组合提高发电功率后，由逆变器将直流电转化为交流电，满足建筑内部设备用电需要或并入电网。与传统光伏系统相比，建筑光伏一体化实现了光伏技术与建筑技术的深度融合，打破了技术应用的场景局限，使能源生产与建筑使用形成有机整体。

1.2 绿色建筑发展的多元支撑

建筑光伏一体化在绿色低碳建筑能源系统中的核心价值体现在能源、经济、生态与建筑四个维度。在能源维度，其能够为建筑提供清洁稳定的分布式能源，有效替代传统化石能源消耗，减少建筑对集中供电系统的依赖，缓解城市电网压力；在经济维度，一体化设计避免了传统光伏系统后期安装的额外成本，且光伏组件替代部分建筑材料，降低了建筑外围护结构的总体造价，长期运行中产生的电能还能减少建筑用电支出，形成显著的经济收益；在生态维度，太阳能作为可再生能源，其利用过程无污染物排放，可直接降低建筑碳排放，助力实现建筑零碳目标，同时光伏组件还能发挥遮阳、隔热作用，减少建筑室内热负荷，进一步降低空调能耗；在建筑维度，定制化的光伏组件能够适配不同建筑风格，丰富建筑立面设计元素，提升建筑美学价值，实现建筑功能与能源功能的双赢。对于武汉而言，这种多元价值能够精准匹配城市绿色建筑发展需求，既解决能源消耗问题，又符合城市建筑品质提升的要求。

2 武汉绿色低碳建筑能源系统的现状与 BIPV 应用瓶颈

2.1 武汉绿色建筑能源系统发展基础

武汉作为国家绿色建筑发展试点城市之一,近几年来,多项政策出台推动建筑行业绿色转型,在绿色建筑标准制定,示范项目建设等方面取得积极进展。目前,武汉已建成多个绿色建筑示范工程,包括公共建筑,商业设施,住宅项目,部分项目已经试用光伏技术,为建筑光伏一体化推广积累了经验。武汉新能源研究院大楼就是典型的代表,该建筑是一个集成风,光,水,储多能互补系统,光伏幕墙与屋顶发电模式,实现了建筑能耗的巨大降低,并荣获中国绿色建筑三星认证的建筑。从自然条件看,武汉属亚热带季风气候,年日照时数充足,太阳能资源具有一定的开发潜力,为建筑光伏一体化应用提供了自然条件^[3]。另外,武汉作为中部地区的工业与科技中心,拥有一批光伏技术研发与建筑设计的企业和科研机构,具备技术研发与产业支撑能力,为建筑光伏一体化的创新应用提供保障。

2.2 BIPV 应用的地域瓶颈与系统障碍

虽然具有较好的基础,但是在武汉绿色低碳建筑能源系统中建筑光伏一体化的应用还存在许多瓶颈,这既有地域气候特征方面的,又有技术集成与系统协同问题。在地域适配层面,武汉夏热冬冷的气候特点对光伏组件性能提出了特殊要求,夏季高温环境容易导致光伏组件发电效率下降,冬季低温与降雨天气则可能影响组件使用寿命与发电稳定性;同时武汉部分老旧建筑屋顶结构承载能力不足,立面设计复杂,难以直接适配标准化光伏组件,增加技术应用难度。在系统集成层面,目前多数项目光伏系统与建筑能源系统处于“各自为战”的状态,缺乏有效的协同控制机制,光伏电力的波动性与建筑用电的间歇性难以匹配,部分绿色电能无法得到高效利用,产生了“发用错配”问题;光伏系统与电网的互动性不足,难以适应电网对分布式能源的接入要求^[4]。在产业生态层面,建筑光伏一体化涉及光伏组件生产,建筑设计,施工安装等多个领域,目前武汉相关企业间的协作机制尚不完善,设计单位对光伏技术认识不足,施工企业缺乏一体化安装经验,导致项目落地过程中容易出现技术衔接不畅,工程质量不达标的问题。这些瓶颈性因素共同制约了建筑光伏一体化在武汉的规模化推广应用。

3 基于武汉地域特征的 BIPV 技术创新与适配优化

3.1 组件性能优化

针对武汉夏热冬冷,高温高湿的气候特征,光伏组件的性能优化应该突出耐高温,高适配性和长寿命三大核心目标。在耐高温性能提升方面,应采用低温度系数的光伏电池材料,通过优化组件封装工艺,增强散热能力,减少高温环境下的发电效率损耗;同时,可在组件背部增设散热层,利用空气流通原理降低组件工作温度,确保夏季高温时段系统稳定运行。在建筑适配性方面,针对武汉老旧建筑改造需求,开发轻质化、柔性化的光伏组件,降低组件对建筑结构的承载压力;对于新建建筑,推出多样化的光伏组件产品,如彩色光伏幕墙、透光光伏采光顶等,满足不同建筑立面与功能区域的设计需求,例如在建筑中庭采用高透光率光伏组件,既保证室内自然采光,又实现太阳能利用。在使用寿命保障方面,选用耐湿热、抗老化的组件封装材料,提升组件对武汉梅雨季节高湿度环境的适应性,同时加强组件表面的防污涂层处理,减少雨水与灰尘对组件发电效率的影响,延长组件使用寿命^[5]。

3.2 应用场景创新

结合武汉建筑类型特点,建筑光伏一体化可形成多元化的创新应用场景,实现建筑空间的高效利用。在公共建筑领域,行政办公大楼、交通枢纽等建筑占地面积大、立面规整,适合大规模应用光伏幕墙与屋顶光伏系统,例如在武汉火车站等交通枢纽的屋顶与立面集成光伏组件,为建筑内照明、空调等设备提供电力支持,同时降低建筑能耗;在商业建筑领域,购物中心、酒店等建筑的采光顶与遮阳设施是光伏组件的理想载体,光伏采光顶可在保障室内采光的同时发电,光伏遮阳连廊则能在遮蔽阳光、降低空调负荷的同时产生电能,实现“遮阳发电双重效益”。在住宅建筑领域,针对武汉密集型住宅特点,推广光伏瓦与光伏栏杆等小型化组件,光伏瓦可直接替代传统瓦片,满足屋顶防水、隔热需求,光伏栏杆则集成于阳台与楼梯扶手,在提供安全防护的同时利用立面空间发电。此外,在武汉的公园、广场等公共空间,还可尝试应用光伏地砖等创新组件,将公共空间转化为分布式能源点,拓展建筑光伏一体化的应用边界。

4 武汉绿色低碳建筑能源系统的集成创新路径

4.1 系统架构创新,构建“光储直柔”一体化体系

为解决光伏电力波动性与建筑用电间歇性的匹配问题,武汉绿色低碳建筑能源系统应构建“光储直柔”一体化架构,实现能源的高效利用与协同调控。“光”

即建筑光伏一体化系统,作为能源生产核心,通过多元化组件布局最大化太阳能收集效率;“储”即储能系统,结合武汉建筑用电特点,采用电化学储能与相变储能相结合的方式,在光伏发电高峰时段储存多余电能,在发电低谷或用电高峰时段释放,平抑光伏出力波动;“直”即直流配电系统,建筑内多数用电设备如照明、空调等本质为直流负载,采用直流配电可减少交直流转换过程中的能源损耗,提升能源利用效率;“柔”即柔性调控系统,通过智能控制系统实时监测光伏发电状态、储能设备容量与建筑用电需求,动态调整能源分配策略,实现光伏、储能与用电设备的柔性协同。这种系统架构能够实现建筑能源的自给自足与高效优化,同时通过柔性接入电网,为城市电网提供调峰支持,提升能源系统的整体稳定性。

4.2 智能控制技术,实现系统全流程精准调控

智能控制技术是建筑光伏一体化能源系统高效运行的核心支撑,通过物联网、大数据与人工智能技术的融合应用,实现系统全流程的精准调控。在数据采集层面,构建覆盖光伏组件、储能设备、用电终端与环境参数的全方位监测网络,实时收集组件发电功率、储能荷电状态、室内温湿度、光照强度等数据,为系统调控提供基础依据;在数据分析层面,利用大数据技术挖掘光伏发电规律与建筑用电特征,结合武汉季节气候变化,建立发电与用电预测模型,提前预判能源供需变化趋势;在控制执行层面,通过人工智能算法动态优化能源分配策略,当光伏发电量充足时,优先满足建筑自身用电需求,将多余电能存入储能系统或并入电网;当光伏发电量不足时,优先调用储能系统电能,不足部分由电网补充,确保建筑能源供应稳定。此外,智能控制系统还可与建筑智能化系统深度融合,实现光伏能源与室内环境调节的协同控制,例如根据光伏发电量自动调整空调运行模式与照明亮度,进一步提升建筑能源利用效率。

4.3 多能互补融合,提升系统能源供给稳定性

考虑到武汉太阳能资源存在间歇性波动,建筑光伏一体化能源系统应结合地域能源特点,构建多能互补融合体系,提升能源供给的稳定性与可靠性。武汉水资源丰富,部分区域可结合地热能资源,将光伏与地源热泵、水源热泵系统相结合,光伏系统为热泵系统提供电力支持,热泵系统为建筑提供采暖与制冷服务,实现“光热

互补”;工业园区等能源需求较大的地区,可将光伏与天然气分布式能源系统结合,形成“光气互补”模式,天然气系统作为备用能源,在阴雨天或夜间光伏发电量不足时启动,保障能源持续供应。此外,还可利用武汉丰富的江风资源,在部分高层建筑试点“风光互补”系统,利用风力发电补足光伏发电的不足,形成多元化的能源供给结构。多能互补体系的构建可以有效规避单一能源形式的局限性,提升建筑能源系统的抗风险能力,保证武汉不同气候条件下建筑能源的稳定供给。

5 结论

建筑光伏一体化作为建筑绿色低碳转型的核心技术,为武汉构建绿色低碳建筑能源系统提供了有效路径。本文对建筑光伏一体化技术内涵与核心价值的分析,结合武汉地域气候特征与建筑能源系统现状,指出技术应用中的地域瓶颈与系统障碍,并从技术适配,系统集成,推广机制三个层面提出创新方案。技术层面,组件性能优化与应用场景创新,提升技术对武汉气候与建筑类型的适配性;系统层面,“光储直柔”一体化架构,智能控制技术与多能互补模式相结合,实现能源系统的高效协同运行。展望未来,随着光伏技术的不断进步与成本的持续下降,建筑光伏一体化在武汉的应用前景更加广阔。

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]赖行健.“双碳”目标下的绿色建筑技术创新与发展[J].资源节约与环保,2025,(02):113-117.
- [3]武朋.绿色建筑群与区域能源系统间能源供需动态协同机制研究[D].北京交通大学,2024.
- [4]温子明,段永涛.光伏发电技术在绿色建筑中的创新应用[J].工程与建设,2024,38(02):446-447+472.
- [5]肖正华,汪红蕾.钟宝申大力推进光伏与建筑一体化让绿色建筑与绿色能源完美结合[J].建筑,2024,(03):26.

作者简介:李晓萌,女,1988年出生,汉族,硕士毕业于华中科技大学。现任职于文华学院副教授。现主要研究方向:建筑设计,绿色建筑。