

光伏建筑一体化的电气配套设计研究

董旭

河北省石家庄市新华区西三庄乡西三庄村文东街, 河北 石家庄 050000

[摘要]随着“双碳”战略的深入推进,光伏建筑一体化(BIPV)技术实现了光伏组件与建筑围护结构的一体化集成。电气配套设计直接决定系统发电效率、电能质量。文章系统分析光伏组件选型与布置的电气适配性、并网系统设计、储能系统优化配置、防雷接地与电气安全设计等,提出针对性的设计优化策略,为BIPV电气配套设计的标准化、规范化实施提供理论支撑与技术参考,助力BIPV技术在绿色建筑领域的规模化推广应用。

[关键词]光伏建筑一体化;电气配套设计;并网系统;储能优化;防雷接地;电能质量

DOI: 10.33142/sca.v9i1.18955

中图分类号: TU18

文献标识码: A

Research on Electrical Supporting Design of Photovoltaic Building Integration

DONG Xu

Wendong Street, Xisanzhuang Village, Xisanzhuang Township, Xinhua District, Shijiazhuang City, Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: With the deepening of the "dual carbon" strategy, Building Integrated Photovoltaics (BIPV) technology has achieved the integrated integration of photovoltaic modules and building envelope structures. The electrical supporting design directly determines the system's power generation efficiency and power quality. The article systematically analyzes the electrical compatibility of photovoltaic module selection and layout, grid connected system design, energy storage system optimization configuration, lightning protection and grounding, and electrical safety design. Targeted design optimization strategies are proposed to provide theoretical support and technical reference for the standardization and implementation of BIPV electrical supporting design, and to assist in the large-scale promotion and application of BIPV technology in the field of green buildings.

Keywords: integrated photovoltaic building; electrical supporting design; grid connected system; energy storage optimization; lightning protection grounding; power quality

引言

随着全球能源结构转型加速,光伏建筑一体化(Building Integrated Photovoltaics, BIPV)通过将光伏组件与建筑屋顶、采光顶等围护结构一体化设计,使光伏组件既是发电装置,也是建筑功能构件,提高空间利用率的同时,有效解决了传统光伏系统与建筑美观之间的矛盾。电气配套设计涵盖光伏组件的电气适配、并网接入、储能调控、电气保护等多个环节,其设计水平对BIPV系统的发电效率以及使用安全性有着直接性的影响。目前,国内BIPV技术的应用已逐步规模化,但电气配套设计中存在组件选型与建筑围护功能适配性合理、储能系统配置失衡、缺乏完善的防雷接地设计等问题。基于此,本文聚焦BIPV电气配套设计的核心技术,构建科学的电气配套设计体系,推动BIPV系统的高效、安全运行。

1 光伏建筑一体化电气配套设计的核心原则与技术基础

1.1 核心设计原则

BIPV的核心在于将光伏组件融入建筑结构之中,在设计的过程中需要充分考虑建筑的遮阳、采光、朝向等相关因素对光伏系统的影响,实现多目标协同优化,同时充

分结合建筑的功能需求以及外观,合理选择光伏组件的类型,确保光伏与建筑适配融合。优先选择可靠高效的光伏电池片,根据建筑的预算以及实际需求,对关键组件的功率与数量进行明确,通过科学的设计,在提升发电效率的同时,尽可能的降低损耗。遵循相关规范,完善电气保护、防雷接地等措施,优化设备选型与布局,控制成本。此外,严格遵循国家及地方规范,适配电网接入要求,保障电能质量达标。

1.2 技术基础

光伏组件电气特性直接影响电气设计参数,开路电压、短路电流、最大功率点电流等参数随光照强度、环境温度的变化而波动,在设计的过程中要充分结合以上参数的波动范围,确保电气系统适配组件的工作特性。电能转换技术主要通过逆变器实现直流电能向交流电能的转换,逆变器的转换效率,直接影响系统发电效率,组串式逆变器更适合BIPV系统的分散式组件布置模式。储能技术可以提升能源消纳率,设计时充分考虑建筑的用电负荷特性以及光伏发电总量,对储能容量进行合理优化,并完善充放电控制策略。电气保护技术通过合理配置保护装置,实现对电气设备及人员的全方位保护,在逆变器内布设防孤岛保护模块,可以有效确保在电网断电时系统依旧可以快速的切断并网连接。

表 1 BIPV 系统常用光伏组件的电气参数与适配场景对比

| 组件类型 | 转换效率 | 开路电压 (V) | 短路电流 (A) | 温度系数 (%/°C) | 适配场景 | 核心优势 |
|---------|---------|----------|----------|-------------|---------------|-----------------------|
| 单晶硅组件 | 19%~23% | 32~40 | 8~12 | -0.30~-0.40 | 建筑屋顶、无采光要求的立面 | 转换效率高, 使用寿命长 (25 年以上) |
| 多晶硅组件 | 18%~21% | 30~36 | 7~10 | -0.35~-0.45 | 建筑屋顶、大面积屋面 | 性价比高, 稳定性好 |
| 碲化镉薄膜组件 | 14%~17% | 28~34 | 6~9 | -0.20~-0.25 | 建筑幕墙、采光顶 | 透光性好, 弱光性能优, 适配建筑美学 |
| 钙钛矿薄膜组件 | 16%~20% | 30~38 | 7~11 | -0.25~-0.30 | 建筑立面、装饰性部位 | 柔性好, 可定制尺寸, 装饰性强 |

2 光伏建筑一体化电气配套系统的核心设计环节

2.1 光伏组件的电气适配选型与布置设计

光伏组件同时承担建筑围护与发电功能, 其选型与布置作为 BIPV 电气配套设计的基础, 需兼顾建筑功能与电气特性。组件的开路电压、短路电流、最大功率点参数需与电气设备的参数相匹配。对于屋顶等受光充足区域选用转换效率高的晶体硅组件, 对于受光条件较差的区域, 优先选用弱光性能优良的组件。组件的尺寸、重量需与建筑围护结构相适配, 提高建筑美学效果, 组件的防护等级需满足建筑使用环境要求, 幕墙组件需具备良好的防水、隔热、抗风压性能。

以建筑所在地的气候条件为依据, 合理选择选用耐高低温、抗紫外线、抗风沙的组件, 提升系统使用寿命。清晰呈现不同类型组件的电气特性与适用范围, 为组件选型提供参考, 见表 1。

2.2 组件布置的电气优化设计

组件布置需结合建筑受光条件、结构形式, 从电气性能角度优化布局, 优先选择建筑年日照时间长、遮挡少的受光面布置组件, 南向是 BIPV 系统的核心受光面, 根据建筑所在地的纬度优化设计组件倾角, 规避周边建筑、树木等遮挡物。组件串联数量需根据逆变器的最大输入电压、最小启动电压确定, 组件并联数量需根据汇流箱的额定电流、逆变器的输入电流确定, 同一并联支路的组件需选用同一型号、同一批次, 确保电气参数一致性。组件布置需避开建筑自身遮挡与外部遮挡, 对于无法避免的局部遮挡, 每串组件配置 1~2 个旁路二极管。

2.3 直流汇流与逆变系统设计

直流汇流与逆变系统负责将光伏组件输出的直流电汇流、升压后, 转换为符合建筑用电与电网接入标准的交流电, 同时实现对直流线路的保护与监测。汇流箱分为集中式汇流箱与分布式汇流箱, BIPV 系统中, 由于组件布置分散优先选用分布式汇流箱, 降低线路损耗。汇流箱的额定电流需根据并联组件的总短路电流确定, 汇流箱的常用输入路数为 4 路、8 路、12 路, 同时需具备防雷、过流、过压保护功能。直流线路采用铜芯电缆, 导线截面选择需满足载流量要求与电压降要求, 电压降控制在 2% 以内。线路敷设优先采用暗敷方式, 屋顶线路可沿屋面支架敷设。直流电缆需选用耐紫外线、耐高低温的专用光伏电缆, 同时设置防火封堵。直流汇流箱内需配置熔断器、防雷器等保护装置, 实现对直流线路与设备的全方位保护。

逆变系统直接影响 BIPV 系统的发电效率与电能质量, 优先选用组串式逆变器, 对于大容量 BIPV 系统选用集中式逆变器与组串式逆变器结合的模式, 屋顶集中布置区域采用集中式逆变器, 立面分散布置区域采用组串式逆变器。通常逆变器额定功率为光伏系统容量的 0.8~1.0 倍, 逆变器优先布置在建筑底层机房、屋顶设备间等通风良好、便于维护的区域, 逆变器与汇流箱的距离需尽量缩短, 预留足够的维护空间。逆变器输出电压需符合建筑用电电压等级, 输出频率为 50Hz, 频率偏差控制在 $\pm 0.5\text{Hz}$ 以内, 输出电流谐波畸变率不超过 5%, 功率因数控制在 0.9~1.0 之间。

2.4 储能系统优化配置设计

BIPV 系统中, 选用能量密度不低于 150Wh/kg、循环寿命不低于 3000 次 (充放电深度 80%)、充放电效率不低于 90% 的锂电池。选用安全性高的锂电池 (如磷酸铁锂电池) 同时配置电池管理系统 (BMS)。根据光伏系统年发电量、建筑年用电量, 计算光伏富余发电量, 通常存储比例为富余发电量的 30%~50%。根据建筑用电负荷曲线, 计算负荷峰谷差, 储能容量需能够弥补负荷峰谷差, 在负荷高峰时释放电能, 缓解电网供电压力, 同时提升光伏电力的消纳率。负荷峰谷差计算公式为: $\Delta P = P_{\text{max}} - P_{\text{min}}$, 其中 ΔP 为负荷峰谷差, P_{max} 为最大用电负荷, P_{min} 为最小用电负荷。根据当地电网接入政策, 若电网允许光伏电力全额并网, 储能容量可适当减小, 重点用于平抑光伏功率波动; 若电网对光伏并网功率有限制, 储能容量需适当增大, 用于存储受限的光伏电力, 提升能源消纳率, 实现经济性与实用性的平衡。充电过程中, 通过 BMS 实时监测电池状态, 当电池荷电状态 (SOC) 达到 90%~95% 时, 停止充电, 或切换为浮充模式。放电过程中, 根据建筑负荷变化与电网参数, 实时调节放电功率, 当电池荷电状态 (SOC) 降至 20%~25% 时, 停止放电, 切换为电网供电模式。

2.5 防雷接地与电气安全设计

2.5.1 防雷系统设计

BIPV 系统的防雷系统采用“外部防雷+内部防雷”相结合的模式, 外部防雷系统包括接闪器、引下线、接地装置, 与建筑自身防雷系统一体化设计, 避免重复建设。接闪器可采用建筑屋顶的避雷针、避雷带, 或利用光伏组件的金属边框作为接闪器。引下线采用建筑结构中的钢筋或专用引下线, 引下线数量不少于 2 根, 导电电阻不超过 4 Ω 。接地装置利用建筑自身的接地网, 若建筑接地网接地电阻不满足要求, 可增设人工接地极。在光伏组件串两

端、汇流箱输入输出端、逆变器输入输出端，均配置相应规格的防雷器，直流侧选用直流型防雷器，交流侧选用交流型防雷器，防雷器的额定电压、通流容量需与系统参数匹配。光伏电缆采用屏蔽电缆，电缆屏蔽层两端接地，金属构件进行等电位连接，接入建筑等电位联结端子板，避免触电或火灾隐患的发生。逆变器、储能电池等电气设备的工作接地，接入建筑接地网，工作接地电阻不超过 4Ω 。所有电气设备的金属外壳、电缆屏蔽层等均进行保护接地，接入建筑接地网，保护接地电阻不超过 4Ω 。防雷系统的接闪器、引下线、接地装置，与建筑接地网可靠连接，接地体采用镀锌扁钢或镀锌圆钢，埋深不小于 0.8m ，做防腐处理。在直流侧，每路光伏组件串、汇流箱输入支路，配置熔断器或断路器，实现过流保护。在直流侧，汇流箱、逆变器输入端，配置直流漏电保护器，动作电流不超过 30mA ，动作时间不超过 0.1s 。逆变器内置防孤岛保护模块，在 0.2s 内切断逆变器与电网的连接，保障电网检修人员安全与设备安全。电气线路敷设过程中设置防火封堵，机房内配置灭火器材，光伏组件选用燃烧性能 A 级材料，防范火灾隐患。

2.5.2 电气监控系统设计

电气监控系统用于实时监测光伏系统的发电参数、设备运行参数、电能质量参数、安全参数等及时发现设备故障与异常情况，实现系统的智能化运维。监控设备的选型需适配 BIPV 系统的运行特点，选用高精度、高可靠性的传感器，确保监控数据的准确性，选用具备多接口、高兼容性的数据采集器，支持 Modbus、TCP/IP 等通信协议。BIPV 电气监控系统采用分层架构，分现场采集层、数据传输层、监控中心层协同工作。现场采集层含传感器等，装于光伏相关设备现场，实时采集参数并传输，可查看参数与简单排障。数据传输层由通信线路等组成，有线（以太网）用于集中区域，无线（4G/5G 等）用于分散区域，确保数据稳定实时传输。监控中心层在建筑监控机房，接收数据并实现显示、存储等，支持远程访问，便于智能化运维。

3 BIPV 电气配套设计优化策略

根据建筑受光条件与围护功能，精准选用组件类型，受光充足区域优先选用高效晶硅组件，受光不足或有采光要求的区域选用透光型薄膜组件。通过 BIM 技术+日照软件，测算全年辐照量与遮挡时长，优化组件倾角与布置间距，规避遮挡因素，提升组件受光效率。对于分散布置的组件，采用独立组串设计，每个组串配置独立的 MPPT 跟踪模块，减少局部遮挡导致的整体发电效率下降。同时，优化组件串并联数量，匹配逆变器参数，确保组件工作在最佳功率区间。根据系统容量与组件布置特点，优先选用高效组串式逆变器，提升 MPPT 跟踪精度与转换效率，对于大容量系统，采用逆变器并联设计，实现冗余备份，避免单个逆变器故障导致

整个系统停运。优化直流、交流线路敷设路径，缩短线路长度，选用大截面铜芯电缆，降低线路电阻，将线路损耗控制在 2% 以内；同时，采用电缆桥架与穿管敷设相结合的方式，做好电缆绝缘与防护。结合光伏富余发电量、建筑负荷峰谷差、电网接入政策，采用多目标优化算法，精准计算储能容量，避免容量冗余或不足。采用智能充放电控制策略，结合光伏发电预测与建筑负荷预测，提前制定充放电计划，优化充放电时间，提升光伏电力消纳率；同时，通过 BMS 实时监测电池状态，优化充放电电流与电压，延长电池使用寿命，降低运维成本。优化防雷系统布局，引下线与接地装置可靠连接，定期检测接地电阻。完善各类电气保护装置的配置，优化保护参数，加强防火保护设计，选用阻燃电缆与防火封堵材料，划分防火分区，扩大监控范围，细化监控参数，配置完善的灭火器材，防范火灾隐患，引入人工智能算法，提前发现潜在故障，减少故障停机时间。

4 结论

本文聚焦 BIPV 电气配套设计，提出了组件电气适配选型与布置、直流汇流与逆变系统、储能系统优化配置、防雷接地与电气安全、电气监控系统核心环节，并通过组件与阵列优化、储能系统优化、安全与监控优化等策略，解决 BIPV 电气配套设计中存在的问题，提升系统的高效性、安全性与经济性，实现光伏电力的高效利用与建筑的绿色低碳运行。

【参考文献】

- [1]吴疆.基于 PVsyst 软件对合肥地区光伏建筑一体化最优角度设计[J].兰州工业学院学报,2023(4):12-13.
- [2]瞿明,万瑞霞.虚拟储能的光伏建筑一体化微网优化控制研究[J].建设科技,2023(17):40-41.
- [3]裴智明,靳谦诚,张迪.C-SVM 动态仿真模型下的光伏建筑一体化板块投资策略研究[J].无线互联科技,2022(5):23-25.
- [4]潘帅琪,魏繁荣,林湘宁,等.光伏建筑一体化社区热电联供调度策略[J].电力系统保护与控制,2022(4):34-35.
- [5]商佳棋,杨旭,陈颖,等.基于 PVsyst 的既有建筑光伏一体化系统仿真与优化[J].能源研究与管理,2021(2):25-28.
- [6]崔明明.光伏发电系统在建筑中的应用探析[J].科技资讯,2025,23(5):208-210.
- [7]李晓硕,何思思,王沁,等.基于 BIM 与数字孪生技术的“光储直柔”能源监测系统[J].建筑节能(中英文),2025,53(8):2-6.

作者简介：董旭（1995.3—），毕业院校：河北工程大学科信学院，所学专业：电气工程及其自动化，住址：河北省石家庄市新华区西三庄乡西三庄村文东街，职称级别：中级工程师。