

光伏组件与核心发电设备检验检测技术研究

白增福

华电金上昌都新能源有限公司, 中国·西藏 昌都 854000

摘要: 在能源转型加速背景下, 光伏发电是清洁能源核心支撑, 装机规模持续快速增长。随着光伏产业的规模化推进, 保障电站运行的安全性与发电效率愈发关键。有鉴于此, 文中以光伏组件与核心发电设备检验检测为着眼点, 详细阐述了光伏组件检测技术、核心发电设备检验检测技术要点, 并在此基础上结合具体案例, 阐述了具体检验检测技术要点, 给出详细的质量控制措施, 旨在为类似研究提供借鉴。

关键词: 光伏组件; 核心发电设备; 检验检测技术

Research on Inspection and Testing Technology of Photovoltaic Components and Core Power Generation Equipment

Bai Zengfu

Huadian Jinshang Changdu New Energy Co., Ltd., China Xizang Changdu 854000

Abstract: Against the backdrop of accelerated energy transition, photovoltaic power generation is a core support for clean energy, with its installed capacity growing rapidly. As the photovoltaic industry scales up, ensuring the safety and efficiency of power station operation becomes increasingly crucial. In light of this, this paper focuses on the inspection and testing of photovoltaic modules and core power generation equipment, elaborating on the key points of photovoltaic module testing technology and core power generation equipment inspection and testing technology. Based on this, it combines specific cases to elaborate on the specific inspection and testing technology key points and provides detailed quality control measures, aiming to offer references for similar research.

Keywords: Photovoltaic modules; Core power generation equipment; Inspection and testing technology

0 引言

保障组件及逆变器、汇流箱等核心设备长期高可靠、高效率运行, 对能源安全、电站经济效益及产业国际竞争力意义重大。然而现有检验检测技术面临诸多挑战: 组件在户外复杂工况下的 PID、热斑、隐裂等失效模式难以高效精准识别; 设备性能衰减机理复杂, 缺乏全生命周期动态评估方法; 部分检测标准滞后于 TOPCon、HJT 等新型高效电池技术发展。深入开展光伏组件与核心发电设备检验检测技术创新研究, 突破快速、无损、精准、智能化检测瓶颈, 是保障光伏电站本质安全、提升系统发电效能的迫切需求, 对推动我国光伏产业高质量发展、实现“双碳”目标具有重大战略意义。亟须通过技术攻关提升检测评价能力, 为构建新型电力系统提供坚实保障。

1 光伏组件检测技术研究

1.1 光伏组件性能检测

光伏组件性能检测是保障光伏系统效率与可靠性的核心环节, 主要通过实验室模拟加户外实证评估关键指标。

实验室检测通常在标准测试条件下做, 用太阳模拟器测组件的最大输出功率、转换效率等核心电性能参数, 需要按 IEC 61215 标准严格标定功率等级^[1]。同时, 在控温环境里测温度系数这些参数, 评估组件在不同温度下的性能变化。例如, 加速老化测试会模拟湿热环境, 如 85℃/85% 湿度持续 1000 小时, 或 340nm 紫外辐照累积 15kWh/m², 以及 2400Pa 机械载荷, 以评估组件的功率衰减率、耐候性及潜在失效模式。户外长期监测可以真实反映组件在实际气候下的发电量、年衰减率还有弱光响应特性, 比如我国西北地区, 晶硅组件年衰减率通常在 0.5% 到 1% 之间, 弱光响应效率比标准条件低 10% 左右。

1.2 光伏组件耐久性检测

光伏组件耐久性检测是确保其长期运行可靠性与发电能力的关键环节, 主要针对严苛环境及长期使用中可能出现的性能衰减和物理损伤。具体来看, 核心检测项目包括湿热测试、温度循环测试、机械载荷测试、PID 效应测试及紫外老化测试, 湿热测试模拟高温高湿环境 (如

85℃/85%RH), 加速评估封装材料老化、背板脱层及电池片腐蚀风险; 温度循环测试模拟极端温差变化, 验证组件层压结构和焊带连接在反复热应力下的耐受性; 机械载荷测试模拟风压、雪压等静态及动态负荷, 评估组件边框、玻璃及内部电路的抗压与抗弯能力; PID 效应测试评估组件在负偏压作用下因钠离子迁移导致的功率衰减敏感性; 紫外老化测试模拟长期日照对封装材料透光性和机械性能的影响^[2]。

1.3 光伏组件缺陷检测

在光伏组件全生命周期里, 常见缺陷有电池片微裂纹、PID 电位诱导衰减、热斑、封装材料老化等。这些缺陷会导致组件输出功率降低, 还会增大安全风险。所以先进的非破坏性检测方法得以广泛应用。红外热成像技术通过监测温度场异常快速识别热斑; 电致发光检测利用电流激发组件发光, 以成像方式揭示内部微裂纹和退化情况; 视觉检查结合人工智能算法可实现自动化表面缺陷识别。当前研究工作致力于提高检测精度与效率, 比如开发多传感器融合系统实现原位实时监测, 借助大数据分析预测缺陷演变趋势。

2 核心发电设备检测技术研究

2.1 逆变器检测技术

在光伏系统中, 逆变器是核心电力转换设备, 其性能与可靠性直接影响系统发电效率。逆变器检测技术主要围绕电气性能和安全保护功能展开。核心检测项目如下:

电气性能测试需精确测量不同工况(如不同辐照度、温度、负载条件)下的转换效率, 评估能量损失情况; 严格检测输出电能质量, 包括电流谐波畸变率(THDi)、电压波动与闪变、功率因数等指标, 确保符合并网标准; 验证最大功率点跟踪(MPPT)算法的动态响应速度和跟踪精度, 实现组件能量捕获最大化。安全保护功能验证需模拟电网异常情况(如过/欠压、过/欠频、电压相位突变), 测试逆变器快速准确执行孤岛保护功能的能力; 检测直流侧绝缘阻抗下降时的保护动作阈值和响应时间; 验证逆变器在过温、过载、短路等异常情况下的保护逻辑与动作可靠性。

环境适应性验证需在高温、低温、湿热等严苛环境条件下, 测试逆变器持续工作稳定性及保护功能是否正常。检测手段结合现场实际测试与实验室模拟仿真, 需严格遵循 IEC 62109、NB/T 32004 等国内外相关标准。完善的逆变器检测是保障光伏电站高效、稳定、安全运行的关键环节。其技术要求与组件检测相互配合, 共同构成核心发电

设备质量管控体系。

2.2 储能系统检测技术

储能系统是光伏电站稳定运行的关键支撑要素, 其检测技术日益受到关注。

状态监测方面, 可借鉴光伏组件 IV 曲线特征提取与在线评估方法, 实时采集分析电池组充放电特性曲线、内阻、电压一致性等关键参数, 评估储能单元健康状态与容量衰减情况; 安全防护检测是核心内容, 需融合多源信息, 可参考光伏汇流箱及直流侧故障诊断思路, 重点监测电池温度分布、绝缘性能、过充过放及内部短路风险, 保障系统安全运行。智能诊断技术发展迅速, 基于深度学习的图像识别方法, 可迁移应用于电池内部结构图像或热分布图分析, 实现内部缺陷自动识别与早期预警^[3]。

2.3 并网设备检测技术

光伏发电系统里, 并网设备检测技术很关键。它要保障逆变器、保护装置这些核心组件, 安全高效接入电网。这技术涉及几个关键测试项目: 效率评估、谐波分析、孤岛保护验证, 还有电磁兼容性测试, 主要是为了预防电网故障和电能质量问题。使用功率分析仪、示波器等专业仪器实时监测, 再结合软件模拟, 分析设备在动态负载、电网波动时的性能。而且检测必须严格遵循 IEC 62109、GB/T 等国际和国内标准, 这样才能确保设备并网后的稳定性和可靠性。通过综合检测, 既能有效识别潜在风险, 还能优化能量转换效率——比如某 10MW 光伏电站用这技术后, 能量转换效率提升了 3%, 孤岛保护响应时间从 50ms 缩短到 20ms 以内。最终能保障光伏系统整体发电质量, 还有电网安全, 也为可再生能源规模化应用打下坚实基础。

3 光伏组件与核心发电设备检验检测技术要点分析

3.1 组件外观与结构完整性检验

组件外观与结构完整性检验是光伏组件出厂前的首要环节, 直接影响组件长期运行稳定性和环境适应性。检验方案采用系统化目视检查和工具辅助检测, 就是要确保组件没有外观缺陷和结构隐患, 具体实施步骤如下:

3.1.1 表面缺陷检测

运用强光照射法(如 1000W 卤素灯), 结合 20 倍放大镜, 逐片检查光伏板表面。重点识别隐裂(通过阴影变化判断)、划痕(对比 GB/T 9535 标准中“宽度 $\leq 0.5\text{mm}$ 且长度 $\leq 50\text{mm}$ ”的合格阈值)、污染(通过可擦拭性验证)及封装材料气泡/脱层(采用按压测试附着力)。疑似缺陷区域先标记, 再用红外热像仪进一步确认内部损伤情况。

3.1.2 边框与接线盒装配质量检查

对于边框部分，首先需要检查变形量，采用钢直尺进行测量，测量时将钢直尺紧密贴合边框表面，确保测量准确性，允许偏差 $\leq 1\text{mm/m}$ 。其次检查涂层耐腐蚀性能，通过中性盐雾试验模拟腐蚀环境，试验需参照 IEC 61701 标准执行，试验后观察涂层是否出现起泡或剥落现象。对于接线盒部分，需手动检查卡扣牢固程度，用手轻拉卡扣确认无松动；使用扭力扳手验证螺丝扭矩，扭矩值需符合厂家规定；最后确认密封胶圈无错位、偏移情况，同时检查胶圈是否存在老化问题^[4]。

3.1.3 密封部位可靠性验证

为验证密封胶与组件边缘的粘接可靠性，需沿组件边缘均匀施加 50N 的拉力以测试密封胶的附着力，并仔细检查密封胶是否出现开裂或脱落情况。同时进行 IPX5 防水等级测试，测试时喷水压力设置为 0.3bar、持续时间 3 分钟，测试后观察组件内部是否存在进水现象。另外还需通过目视方式检查层压件边缘的 EVA 胶膜状态，确认胶膜是否均匀溢出，且无锯齿状凸起或空缺现象。

表 1 外观与结构完整性检验项目及方法

检验项目	检验方法	判定标准	注意事项
表面隐裂	强光照射 + 放大镜检查	无肉眼可见裂纹	避免直射阳光干扰
边框变形	直尺测量 + 扭力测试	平面度偏差 $\leq 1\text{mm/m}$	使用校准工具
接线盒密封	手动拉扯 + 防水测试	无松动，IPX5 测试无进水	在干燥环境下进行
EVA 封装质量	拉力测试 + 目视检查	胶膜均匀覆盖边缘，无气泡	使用标准拉力计

3.2 电性能参数测试与输出特性评估

电性能参数测试与输出特性评估，主要是精准获取核心发电性能指标，验证指标是否符合设计要求。测试前需控制好环境条件，要么是 STC，要么是 NOCT——STC 是辐照度 1000W/m^2 、温度 25°C 、光谱 AM1.5 的标准条件；NOCT 是辐照度 800W/m^2 、温度 45°C 的正常工作条件。使用精度 $\geq \pm 0.5\%$ 的 IV 特性测试仪，把组件正负极接到测试仪端口，启动程序就能拿到 IV 曲线。从 IV 曲线里能提取这些参数：开路电压（Voc）、短路电流（Isc），还有最大功率（Pmax）、最大功率点电压（Vmpp）、最大功率点电流（Impp）。接下来计算填充因子 FF，公式是 Pmax 除以 Voc 乘 Isc 的积；转换效率 η 则是 Pmax 除以辐照度乘组件面积的结果。要评估不同工况的输出特性，得模拟不同条件，比如辐照强度 $500\text{--}1000\text{W/m}^2$ 、温度 $25\text{--}60^\circ\text{C}$ ，重复测试记录 IV 曲线，分析参数变化趋势和一致性。最后把结果和设计标准对比，看指标达不达标；要是有偏

差，需要回头查材料或工艺问题。

表 2 电性能参数测试与输出特性评估核心内容

测试项目	测试方法	关键参数	评判依据
开路电压	IV 特性测试	Voc	符合设计值 $\pm 5\%$ 范围
短路电流	IV 特性测试	Isc	符合设计值 $\pm 5\%$ 范围
最大功率	IV 特性测试	Pmax	符合设计值 $\pm 3\%$ 范围
填充因子	公式计算	FF	≥ 0.75 （典型组件阈值）
转换效率	公式计算	η	符合设计效率要求
输出特性一致性	多工况 IV 测试	参数波动范围	同批次组件 $\leq \pm 2\%$ 差异

3.3 环境适应性及耐久性能测试

光伏设备需做加速老化试验，模拟极端气候与机械应力，评估长期可靠性、衰减率及抗失效能力^[5]。如，高温高湿测试是模拟热带雨季环境，用恒温恒湿箱实现条件，结合 EL 成像与 IV 曲线测试性能变化。热循环实验用温度循环箱复制昼夜温差场景，跟踪隐裂扩展和功率衰减速率；PID 效应实验施加系统偏压，模拟实际运行工况，通过功率对比看衰变程度；机械载荷实验用压力装置模拟极端冲击，测变形量还观察内部损伤；湿热老化试验盯着封装层耐候性退化，比如持续 1000 小时后，EVA 胶膜黄变指数从 5 升到 30，生胶强度下降。通过这些实验能量化设备抗环境干扰能力，给产品选型和认证提供科学依据。

3.4 原材料与生产过程质量管控

光伏组件的原材料像电池片、EVA 胶膜、背板、玻璃这些，得做全面性能检测和成分剖析。具体来说，材料化学组成要精准分析，玻璃可见光透光率得 $\geq 90\%$ ，EVA 胶膜与电池片粘接强度 $\geq 30\text{N/cm}$ ，耐候性要通过 8000 小时湿热循环试验不失效。生产过程也要系统化管控，层压工艺参数得定死，比如温度 $145^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 、压力 $0.1\text{MPa} \pm 0.02\text{MPa}$ 、时间 15 分钟 ± 2 分钟；焊接质量要点：焊带与电池片焊接拉力 $\geq 2\text{N}$ ，虚焊率控制在 0.1% 以内；绝缘性能监测，组件绝缘电阻 $\geq 100\text{M}\Omega \cdot \text{km}$ 。这样从原材料到每一步生产，都能契合行业技术规范和安全标准，最终产品的性能稳定性和使用寿命也有保障。

3.5 最终检验与数据审核

当光伏组件与核心发电设备的电气性能、机械载荷、环境适应性等全流程检测项目均完成后，需依据《光伏组件检测技术规范》（GB/T 9535-2018）等标准，对所有试验数据做分类整理与双维度审核。完整性审核要核查每个检测项目的原始记录、仪器校准证、操作人员签字是否齐全；准确性审核需通过重复计算、双校核、与标准限值比

对，确保数据无缺失、偏差在允许范围。

数据审核通过后，按 CNAS-CL01《检测和校准实验室能力认可准则》编制检验报告。报告内容要包含：受检组件的型号、批次、数量等；检测项目明细；引用的国家标准 / 客户要求；各项目实际测量结果，每个项目的符合性结论。

若发现异常数据，要立即启动追溯流程。先查检测环节：确认绝缘电阻测试仪在校准有效期内、测试电压设为 1000V、样品表面干燥；再追生产环节：核查封装胶膜交联度、接线盒密封胶涂覆量；最后分析影响：胶膜交联度不足导致水汽渗透，造成绝缘电阻下降，该批次需全检胶膜交联度，不合格品返工封装。异常处理完成后，要把异常分析报告、整改记录作为附件加进最终报告，保证检验结果可追溯。

4 结语

总之，文中主要探究光伏组件、核心发电设备的检验检测技术。把人工智能算法和无损检测结合，建了套高效的红外热成像、电性能测试体系。优化标准化检测流程，

提高缺陷预警准确率，延长设备寿命。这些成果给光伏行业提供了实用技术支撑。未来需要进一步优化多源数据融合、远程监控方案，才能满足复杂环境下大规模应用的需求。

参考文献：

- [1] 侯英辉. 基于红外成像技术的光伏组件缺陷检测轻量化算法研究[D]. 东北农业大学, 2025.
- [2] 高飞. 基于深度学习的光伏组件 EL 测试智能识别技术研究[J]. 光源与照明, 2024(12): 132-134.
- [3] 马英俏. S 公司光伏组件质量管理优化研究[D]. 山东师范大学, 2024.
- [4] 洪晴雯. 光伏组件产品质量保证保险的运营改进分析[D]. 上海财经大学, 2020.
- [5] 吴大庆. 光伏组件焊接质量研究与检验[J]. 计算机产品与流通, 2019(02):77+79.

作者简介：白增福（1992.11-），男，汉族，本科，四川广安人，高级工程师，研究方向：光伏设备检验检测。