

电力电气工程中的电气设备检修策略研究

李 勇

会泽华电道成清洁能源开发有限公司 云南 曲靖 654200

摘要：针对光伏电站电气设备检修实践中的适配性不足、资源配置滞后等问题，本文围绕光伏电站电气设备核心构成与故障特性展开研究。通过构建全维度状态监测体系、分级式状态评估模型，提出全生命周期视角下的差异化检修策略及多维度实施保障机制，形成完整的检修策略优化体系。研究旨在提升光伏电站电气设备检修精准性与效率，降低运维成本，保障电站安全稳定运行，为电力电气工程中光伏领域的检修工作提供技术参考与实践支撑。

关键词：电力电气工程；光伏电站；电气设备；检修策略；体系构建

引言：随着光伏产业的快速发展，光伏电站在电力系统中的占比持续提升，其电气设备的稳定运行直接关系到能源供应安全性与经济性。当前光伏电站电气设备检修多采用传统模式，难以适配户外分散性、环境关联性等设备特性，导致故障排查不及时、运维效率低下等问题频发。基于此，本文以光伏电站电气设备为研究对象，系统分析其故障类型与成因，探索检修策略优化路径，对推动光伏电站运维技术升级、助力新能源产业高质量发展具有重要现实意义。

1 光伏电站电气设备核心构成与检修特性

1.1 光伏电站电气系统整体架构

光伏电站电气系统是实现太阳能光电转换、电能传输与并网的核心载体，整体遵循“能量采集-汇流-逆变-升压-并网”的核心逻辑架构。该系统主要分为直流侧与交流侧两大模块，直流侧负责光伏组件电能的采集与汇流，涵盖光伏阵列、汇流箱等核心环节；交流侧承担电能的逆变、升压及并网功能，包含逆变器、箱变、开关柜、主变压器及并网装置等关键部分。各环节通过电缆线路、控制线缆实现电气连接与信号传输，形成闭环运行系统，确保太阳能稳定转化为可用电能并安全并入电网，其架构设计直接影响电站运行效率与检修便捷性。

1.2 核心电气设备分类及功能

光伏电站核心电气设备按功能可分为以下三类。（1）光伏组件作为能量转换核心，通过光生伏特效应将太阳能转化为直流电能，是电站电能产生的源头；（2）汇流箱承担直流电能汇流功能，将多组光伏组件输出的直流电汇总后传输至逆变器，同时具备过流保护、防雷等辅助功能；逆变器是交直流转换关键设备，将汇流后的直流电逆变为符合电网标准的交流电；（3）箱变与主变压器负责将逆变器输出的低压交流电升压至电网接入电压，保障电能远距离高效传输；开关柜则实现电路的

通断、保护与监测，保障系统运行安全。

1.3 光伏电站电气设备检修核心特性与难点

光伏电站电气设备检修具有户外分散性、环境关联性及技术综合性等核心特性。设备多布置于户外开阔区域，分布范围广，增加了检修巡检的工作量与难度；其运行状态易受光照强度、温度、风沙等自然环境影响，故障诱因复杂。检修难点主要体现在三方面：（1）光伏组件故障（如隐裂、热斑）具有隐蔽性，需专业检测设备识别；（2）逆变器等电力电子设备内部结构复杂，对检修人员的专业技术水平要求高；（3）电站运行与电网深度耦合，检修作业需兼顾电网安全与电站供电连续性，停机检修窗口受限，协调难度大^[1]。

2 光伏电站电气设备常见故障类型与成因

2.1 光伏组件故障类型与成因

光伏组件核心故障类型包括功率衰减、性能劣化、电学参数异常等。功率衰减的核心成因分为不可逆衰减与可逆衰减，不可逆衰减源于组件材料自身老化，如半导体材料长期受光辐照出现晶格缺陷，封装材料老化导致密封性下降；可逆衰减则与环境应力相关，长期高温环境会加剧组件内部载流子复合，影响光电转换效率。性能劣化主要由环境侵蚀引发，潮湿环境导致组件内部出现电化学腐蚀，酸碱粉尘附着表面破坏减反射膜，进而影响光吸收能力。电学参数异常多与组件内部电路故障相关，引线焊接工艺缺陷导致接触电阻增大，内部旁路二极管失效引发电路通断异常，均会造成组件输出参数偏离正常范围。

2.2 电力电子设备故障类型与成因

电力电子设备（逆变器、汇流箱等）主要故障类型涵盖功率模块损坏、控制电路故障、直流侧过电压故障等。功率模块损坏的核心成因是过流与过温应力，逆变器运行中负载突变或电网波动导致电流冲击，散热系

统故障使模块长期处于高温环境，引发半导体器件击穿或烧毁。控制电路故障源于信号传输异常与元件老化，线路绝缘破损导致信号干扰，电容、电阻等无源元件长期工作后参数漂移，造成控制信号失真，影响设备运行逻辑。直流侧过电压故障多与电能汇集环节异常相关，汇流箱内熔断器选型不当或失效，无法及时切断故障支路，导致多路组件输出电能叠加形成过电压，进而损坏后续电子元件；防雷装置失效也会使雷电过电压侵入直流侧，引发设备故障。

2.3 输变电设备故障类型与成因

输变电设备（变压器、开关柜、电缆等）主要故障类型包括绝缘损坏、导电回路异常、过热故障等。绝缘损坏的成因主要是环境老化与电晕腐蚀，变压器油长期使用后氧化变质，绝缘纸受潮或老化导致绝缘强度下降；开关柜内绝缘件受环境湿度影响出现凝露，长期电晕放电会侵蚀绝缘表面，引发绝缘击穿。导电回路异常源于接触不良与导体损伤，电缆敷设过程中机械损伤导致导体截面减小，开关柜内母线接头松动引发接触电阻增大，均会造成回路电流分布不均。过热故障与损耗异常及散热不良相关，变压器铁芯叠片松动增大铁损，电缆接头接触不良产生接触损耗，同时散热通道堵塞、冷却系统故障导致热量积聚，进一步加剧设备性能劣化，诱发故障^[2]。

3 光伏电站电气设备检修核心存在问题

光伏电站电气设备检修实践中存在以下问题：（1）检修模式适配性不足，传统定期检修与事后检修为主的模式难以匹配光伏设备运行特性。定期检修存在“过度检修”或“检修不足”的弊端，部分设备未达故障周期却被迫停机检修，增加运维成本与发电损失，而部分隐蔽性故障（如光伏组件隐裂、电缆绝缘老化）则因未到检修周期被遗漏，诱发后续连锁故障；事后检修则因故障突发导致停电时间延长，进一步扩大经济损失。（2）检修资源配置与信息化水平滞后。光伏电站多分布于户外开阔区域，设备分散性强，但现有检修资源（人员、设备、物资）配置集中，导致巡检与抢修响应效率低，偏远区域设备故障处置延误；检修信息化程度不足，缺乏完善的状态监测与数据管理系统，检修数据多依赖人工记录，难以实现故障溯源、趋势预判，导致检修决策缺乏科学数据支撑，整体运维效率低下。

4 光伏电站电气设备检修策略优化体系构建

4.1 基于状态监测的光伏电站电气设备检修基础构建

基于状态监测的检修基础构建是实现精准检修的前提，核心在于搭建全维度监测体系与数据支撑框架，具

体包括以下方面：（1）优化状态监测指标体系，结合不同电气设备的运行特性与故障规律，补充差异化监测指标，针对光伏组件增加光致衰减速率、表面污秽度等指标，针对逆变器强化IGBT模块温度、直流母线电压波动等核心参数监测，针对变压器完善油中溶解气体、绕组热点温度等指标，确保监测覆盖设备运行全生命周期关键节点。（2）升级监测数据采集与传输机制，采用高精度传感设备替代传统监测装置，提升数据采集精度与实时性；构建无线与有线结合的混合传输网络，解决户外分散设备数据传输不稳定问题，同时增设数据加密模块，保障监测数据安全；建立数据采集校准机制，定期对传感设备进行校验，避免因设备误差导致监测数据失真。（3）搭建检修数据管理平台，整合状态监测数据、设备台账信息、历史检修记录等多维度数据，实现数据集中存储与统一管理；开发数据分类与检索功能，按设备类型、运行年限、故障类型等维度对数据进行归类，便于检修人员快速调取所需信息，为检修决策提供数据支撑。

4.2 光伏电站电气设备状态评估模型构建

状态评估模型构建需立足光伏电站设备运行实际，实现对设备健康状态的精准研判，为检修策略制定提供科学依据，具体构建思路包括：（1）确定多维度评估指标权重，采用层次分析法与熵权法相结合的组合赋权法，兼顾主观经验与客观数据的影响，通过层次分析法梳理不同指标对设备状态的影响程度，结合熵权法基于历史监测数据计算指标客观权重，最终整合得到综合权重，避免单一赋权法导致的评估偏差。（2）构建分级式状态评估模型，按设备类型构建差异化评估子模型，针对光伏组件、逆变器、变压器等核心设备分别建立专属评估逻辑；采用模糊综合评价法处理评估指标中的模糊性问题，将监测数据转化为直观的健康状态等级，分为优良、合格、预警、故障四个等级，明确不同等级对应的指标阈值范围；增设模型动态修正机制，定期纳入新增监测数据与实际检修结果，优化模型参数，提升评估精度。（3）完善评估结果输出与应用机制，明确评估结果的输出内容，包括设备健康等级、关键异常指标、潜在故障风险、故障发展趋势等信息；建立评估结果与检修流程的联动机制，当设备评估等级达到预警及以下时，自动触发检修预警流程，推送相关信息至检修管理平台，确保及时响应设备异常状态^[3]。

4.3 全生命周期视角下检修策略优化设计

全生命周期视角下的检修策略优化需兼顾设备运行阶段特性与经济性，实现检修资源的合理配置与检修效

果的最大化,具体优化方向包括:(1)制定差异化检修策略,根据设备全生命周期不同阶段的运行特性调整检修重点,在设备磨合期以基础巡检为主,重点监测设备安装质量与运行稳定性;在稳定运行期采用预测性检修为主、定期检修为辅的模式,基于状态评估结果精准开展检修作业;在老化期强化故障排查与隐患治理,增加检修频次,必要时提前制定设备更换方案。针对不同类型设备制定专属检修策略,光伏组件侧重表面清洁与隐裂排查,逆变器重点开展功率模块维护与冷却系统检修,变压器强化油质处理与绝缘检测。(2)优化检修周期与内容配置,摒弃传统固定周期检修模式,基于设备状态评估结果、运行环境、设备厂家技术要求等多因素动态调整检修周期,对评估等级为预警的设备缩短检修周期,对优良等级设备适当延长检修周期;细化检修内容,按设备健康状态等级明确不同检修深度,基础巡检仅开展外观检查与参数监测,深度检修则涵盖核心部件拆解、性能测试、故障修复等全流程作业,避免过度检修或检修不足。(3)构建检修资源优化配置机制,基于电站设备分布情况与检修需求,合理划分检修区域,优化检修人员与设备的配置方案,提升检修响应效率;建立检修物资动态管理体系,实时监控备品备件库存,结合设备故障概率与检修频次制定采购与储备计划,避免物资积压或短缺;引入专业化检修技术与设备,针对光伏组件隐裂检测采用红外热成像技术,针对变压器油质分析采用高精度色谱仪,提升检修作业的精准性与效率。

4.4 光伏电站电气设备检修策略实施保障

为确保优化后的检修策略有效落地,需从技术、人员、管理等多维度构建保障体系,具体措施包括:(1)强化技术保障,建立检修技术更新机制,及时引入行业先进检修技术与设备,组织技术攻关解决检修实践中的难点问题;搭建技术交流平台,鼓励检修人员分享检修经验与技术心得,提升整体检修技术水平;建立检修质量追溯体系,对检修作业全流程进行记录,确保检修质

量可追溯、可管控。(2)加强人员队伍建设,制定针对性的人员培训计划,定期开展设备专业知识、检修技能、安全规范等方面的培训,提升检修人员的专业素养与实操能力;建立人员考核与激励机制,将检修质量、响应效率、故障处理效果等纳入考核指标,对表现优异的人员给予奖励,激发人员工作积极性;引入专业技术人才,补充检修队伍的技术短板,提升队伍整体专业化水平。(3)完善管理保障机制,建立检修策略实施领导小组,明确各部门与人员的职责分工,确保各项检修工作有序推进;制定完善的检修管理制度,规范检修作业流程、安全规范、质量标准等内容,为检修工作提供制度遵循;建立检修效果评估机制,定期对检修策略的实施效果进行评估,分析检修成本、设备故障率、发电效率等指标的变化情况,根据评估结果及时调整优化检修策略,确保检修工作持续适配电站运行需求^[4]。

结束语:本文完成了光伏电站电气设备检修策略的系统性优化研究,明确了设备核心构成与故障成因,构建了涵盖监测基础、评估模型、优化策略及实施保障的完整体系。该体系可有效弥补传统检修模式的不足,提升检修工作的科学性与精准性。未来可进一步结合智能传感与大数据技术,深化状态评估模型的动态优化,推动检修策略向智能化、无人化方向升级,持续提升光伏电站的运维水平与综合效益。

参考文献

- [1]于航,周晟洋,林善明.电力电气工程中的电气设备检修策略与措施[J].光源与照明,2025(3):209-211.
- [2]张子庄.电力系统电气设备检修策略研究[J].科技资讯,2023,21(23):92-94.
- [3]潘正东.电力电气工程中的电气设备检修探讨[J].光源与照明,2025(8):113-115.
- [4]任磊.电力电气工程中的电气设备检修策略研究[J].自动化应用,2024,65(S02):44-46.