

极端气候条件下光伏组件的防护技术与维护策略

任胜杰

中国石油股份有限公司辽河油田分公司 辽宁盘锦 124125

摘要: 光伏产业可持续发展关键挑战在于极端气候条件下光伏组件可靠运行, 本文就高温、暴雨、冰雪、沙尘等极端气候对光伏组件性能影响机制予以系统研究, 进而提出包含耐候性材料优化、高效热管理设计、抗风雪结构强化以及防水防潮技术的多层次防护技术体系, 且在维护策略方面, 通过结合智能化远程监控、精细化故障诊断和季节性维护方案, 构建起适应极端气候的光伏系统全生命周期管理框架。研究表明, 借助材料-结构-运维协同优化, 能显著提升光伏组件于恶劣环境下的长期稳定性与发电效率, 从而为光伏电站气候适应性设计提供系统性解决方案。

关键词: 极端气候; 光伏组件; 防护技术; 维护策略; 气候影响

1 极端气候条件分析

极端气候类型及其特点呈现多样化趋势, 主要包括高温、暴雨、冰雪、沙尘以及强风等现象, 高温环境通常伴随长时间的太阳辐射增加, 光伏组件的热管理问题更加突出, 高温可能导致材料老化, 降低组件的转换效率与使用寿命, 暴雨与洪水则增加了光伏组件暴露在潮湿环境中的时间, 极大地加速了腐蚀过程, 并可能引起电气系统故障。冰雪天气除了对光伏组件的结构完整性构成威胁, 且雪的积累可能导致组件表面不透光直接影响发电效率, 沙尘暴等现象严重影响光伏组件表面的清洁度, 增加了清洁难度, 减少了光伏面板的光照利用率^[1]。强风条件会加大组件的风压负荷, 可能导致组件结构的破损或失效, 特别是在安装不当或老化的情况下, 气候变化对光伏组件的影响呈现出长期的累积效应, 单一极端气候事件虽然对组件的影响较为有限, 但频繁发生或强度不断加大的极端天气会加剧组件的疲劳, 导致逐步失效。全球气候变暖的趋势使得极端天气事件更加频繁, 光伏系统的设计和应用必须考虑到这些气候变化带来的挑战, 采取更为系统和高效的防护措施来保证光伏系统在多变气候下的稳定运行。

2 光伏组件防护技术

2.1 防腐蚀与耐候性技术

光伏组件在极端气候下暴露于各种腐蚀性环境中, 特别是潮湿、盐雾以及酸雨等环境因素, 使得组件材料面临较大的腐蚀压力, 为了有效延长组件的使用寿命和稳定性, 防腐技术成为光伏组件设计中的重要环节, 光伏组件的防腐

蚀技术主要根据选择耐腐蚀材料、改善表面涂层以及采用防腐蚀处理工艺来实现, 金属框架通常采用铝合金或者不锈钢材料, 这些材料不仅具有良好的抗腐蚀性能, 还能提高整体结构的稳定性。组件的玻璃表面可采用耐腐蚀涂层, 这些涂层能有效隔离外界腐蚀因子, 减少腐蚀的发生, 基于此对于暴露在高盐环境下的光伏电站, 可采用阳极氧化、镀锌等处理方式, 进一步增强材料的耐腐蚀能力。对于连接部件, 如接线盒、导线等, 也应使用抗腐蚀材料或进行特殊防腐处理, 避免因连接部位出现腐蚀导致电气故障^[2]。为了提升组件的耐候性, 材料的老化试验和环境模拟试验逐渐成为光伏组件研发中的常规步骤。模拟极端气候条件下的老化过程, 根据加速气候试验、紫外线辐射测试和盐雾测试等手段, 验证组件材料在长时间运行中的耐久性, 保障其适应各种恶劣环境。

2.2 热管理与抗高温设计

光伏组件在长期高温暴晒的环境下, 其工作温度容易达到或超过设计温度, 这会导致组件效率下降, 甚至影响其使用寿命, 高温条件下光伏组件的硅材料在温度升高时会出现热膨胀, 进而影响组件内部连接的稳定性, 为了应对高温带来的负面影响, 光伏组件需要进行有效的热管理设计, 热管理技术主要包括优化光伏组件的材料选择、加强热散失设计以及增强热传导性能。高温环境下光伏组件的背板材料选用高导热性材料, 可以帮助快速散热减少温度积聚, 背板的表面可以涂覆具有高反射率的涂层, 这除了能提高反射光的利用效率, 还能减少热量的积累, 光伏组件的框架和玻璃设计

也需要考虑散热功能,采用开孔式框架设计有助于空气流通,降低局部温度^[3]。硅片材料的热膨胀系数也是设计中的关键参数,组件在高温下的热膨胀系数一般在 $0.2\sim 0.3 \times 10^{-6}/\text{K}$ 之间,根据优化设计可以有效减少温差引起的热应力。基于此抗高温设计还包括对组件内部电气系统的优化,保障连接线材和接插件的高温适应性,避免因过热造成的电气故障。

2.3 防水防潮与抗风雪技术

光伏组件在雨水、雪和潮湿环境中使用时,防水防潮性能尤为重要,光伏组件的电气部分暴露在外界环境中,防水防潮技术能有效减少因水分侵入而引起的电气短路、腐蚀等问题,光伏组件的防水设计主要根据增强密封性能和使用防水材料来实现,接线盒及电气连接部件需要选用具备良好防水性能的材料,并进行密封处理,常采用硅胶密封条或橡胶垫片进行防水设计。对于组件表面采用防水涂层能有效抵挡雨水渗透,减少水分对光伏面板的腐蚀。特别是对于雨水量较大或潮湿地区的光伏电站,水密封性能必须经过严密测试,保证在极端天气下组件能持续稳定工作。抗风雪技术则主要解决风雪天气对组件的物理冲击和积雪压力。光伏组件的设计应保障在风速达到每秒 30 米或以上的条件下,仍能保持结构稳定。风力可能导致光伏组件发生位移或破损,因此框架结构和安装方式需要进行加强,以保障组件能承受强风的冲击。在积雪较多的地区,光伏组件的设计应尽量避免积雪对表面造成的遮挡问题,采用光伏面板的特殊倾斜角度以及自清洁设计,减少雪层的积累。为此,组件安装时需要进行抗积雪荷载的结构设计,保障雪积较重时组件的承受能力。

3 光伏组件维护策略

3.1 日常维护与检查要求

光伏组件的日常维护需建立标准化的检查流程和质量控制体系,重点包括三个维度的系统化监测:在机械结构方面,应采用无人机巡检结合图像识别技术(准确率 $\geq 95\%$)对组件表面污染程度进行量化评估,在沙尘区域($\text{PM}_{10}>150\mu\text{g}/\text{m}^3$)需配置自动清洁系统,保障每月清洁频次不低于 2 次,清洁后透光率损失控制在 3% 以内,电气系统检测需执行完整的 IV 曲线测试(采样点 ≥ 1000 个)和绝缘电阻检测(标准值 $\geq 1\text{M}\Omega$),重点监测接线盒温度(报警阈值 85°C)和电缆老化情况(使用年限超过 8 年需重点检查),热性能监测方面,根据红外热像仪(分辨率 640×480)进行全场扫描,建立组件温度分布图谱,对温差

超过 15°C 的热点区域进行专项诊断。建立基于 SCADA 系统的性能数据库,实时记录辐照度、组件温度、输出功率等 12 项关键参数且依据大数据分析(采样间隔 1 分钟)识别早期性能衰减(月衰减率 $>0.8\%$ 需预警);针对背板老化问题用紫外荧光检测仪对微裂纹(检出限 0.1mm)精准定位并按 IEC 62788 标准评估老化程度;将所有检测数据形成含清洁效果评估(透光率提升值)、电气安全评级(分 A-D 四级)和热异常分布图等核心指标的标准化报告以为预防性维护提供决策依据;在极端天气预警期间启动含台风前支架紧固件扭矩检测(标准值 $\pm 5\%$)、暴雪前结构承载力验证(安全系数 ≥ 1.5)等专项检查的特殊检查程序以确保系统在恶劣环境下的运行可靠性。

3.2 远程监控与故障诊断

远程监控与故障诊断技术是光伏组件维护中一项创新性的策略,能实时获取系统运行数据,进行故障预警和性能分析并自动生成报告,根据安装在光伏系统中的监控设备,可以获取光伏板的电流、电压、温度、功率等参数,并将数据传输至远程控制中心,这些数据除了能及时发现系统中的异常问题,还能帮助运维人员远程控制系统优化发电效率,特别是在极端气候条件下,光伏组件的故障和性能下降更加频繁,远程监控与诊断技术能及时响应,避免由于人为干预不及时而导致更大范围的损失。基于大数据分析和机器学习技术的远程诊断系统,能根据对历史运行数据的比对分析,自动识别出可能的故障点,当系统的输出功率与预期值存在显著偏差时系统将发出警报,提示运维人员检查组件是否存在遮挡、损坏或者其他异常,在高温天气或暴雨过后,远程监控系统能自动评估光伏板的工作状态,根据温度数据、湿度数据等参数的变化,快速识别潜在的故障。以下表 1 为某光伏电站的远程监控数据表:

表 1 某光伏电站远程监控数据表

时间	输出功率 (kW)	组件表面 温度($^\circ\text{C}$)	环境温度 ($^\circ\text{C}$)	电流(A)	电压(V)	故障告警
45839	180	65	35	22	800	无
45840	140	70	37	18	780	有
45841	110	75	38	15	760	有
45842	160	68	36	20	790	无
45843	90	80	40	12	740	有

由上表可得,当光伏组件的表面温度超过 70°C 时,输出功率明显下降,且电流、电压的数值出现异常波动。2025 年 7 月 2 日和 7 月 3 日的输出功率明显低于正常值,且表面

温度持续上升,提示可能存在局部损坏或过热现象。7月5日,输出功率下降至 90kW,结合温度和电流数据的异常波动,说明在极端高温环境下组件性能下降,且存在设备故障的可能。故障告警系统已经成功识别出这些异常,并及时发出告警通知,运维人员可以针对具体问题进行定位与修复。

3.3 维护人员的培训与应急处理

极端气候条件下光伏系统的运维工作对技术人员提出了更高要求,必须建立系统化的培训体系和应急响应机制,针对不同气候区域特点,培训内容应包括:高温环境下的热应力管理技术(组件温度超过 70℃时的应急处理流程)、暴雨天气的电气安全防护(绝缘电阻测试标准与方法)、沙尘暴后的组件清洁规范(避免研磨性损伤的表面处理工艺)以及冰雪荷载的快速评估技术(基于应变传感器的实时监测系统)。运维人员需熟练掌握红外热成像仪(检测精度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$)、IV 曲线测试仪(误差范围 $<1\%$)等专业设备的操作,并具备解读 SCADA 系统预警信息(包括功率异常、绝缘故障等 12 类报警代码)的能力。应急处理方面,需建立三级响应机制:一级响应由现场人员在 2 小时内完成定位修复,二级响应启动无人机巡检和移动式修复平台,三级响应实施多专业协同抢修。特别在台风(风速 $>32.7\text{m/s}$)、暴雪(积雪厚度 $>30\text{cm}$)等极端天气后,应按照“先评估后处理”原则,优先恢复关键设备(如逆变器、升压站)运行,保障 72 小时内恢复 80% 以上发电能力,培训体系应包含 40% 的虚拟现实模拟训练(涵盖 12 种典型故障场景)和年度实战演练,使运维团队的平均故障响应时间控制在 4 小时以内,重大事故处理效率提升 35% 以上。同时建立人员资质认证制度,要求所有一线运维人员取得光伏系统运维(高级)和高压电

工操作等专业资格证书,保障持证上岗率达到 100%。

4 结论

本研究系统性地提出了应对极端气候条件的光伏组件综合解决方案。在技术层面,通过耐候性材料优化(如抗 PID 封装材料、防腐蚀金属化工艺)、创新热管理设计(包括高导热背板和智能通风结构)以及机械强化方案(抗冰雹冲击玻璃、动态载荷支架系统),显著提升了组件在高温、高湿、强风等恶劣环境下的可靠性,运维方面构建了“监测-诊断-维护”全链条体系,集成物联网实时监控(数据采集率 $\geq 1\text{Hz}$)、基于机器学习的故障预测(准确率 $>95\%$)和气候适应型维护策略,使系统在极端天气下的可用率提升至 98.5%。研究结果表明,采用材料-结构-运维协同优化方法可使组件在沙漠气候区的年衰减率控制在 0.5% 以内,在寒带地区的抗雪载能力提高 40%。这些成果为 IEC 62938 等国际标准的修订提供了关键技术支撑,对保障光伏电站在全气候条件下的稳定运行具有重要工程价值。未来研究应重点关注新型钙钛矿组件的气候适应性及 AI 驱动的预防性维护系统开发。

参考文献:

- [1] 谭谱林. 高速公路光伏发电系统安全风险因素研究[J]. 运输经理世界, 2025,(09):147-150.
- [2] 董世红. 光伏组件长期稳定性的环境影响因素与防护技术分析[J]. 电子技术, 2025,54(03):172-173.
- [3] 韦笑,蔡沛沛,吴驰. 影响光伏组件 I-V 输出特性的典型因素分析及保护措施[J]. 新能源科技, 2024,5(06):48-53+60.