

光伏发电组件性能衰减机理及维护策略研究

王宏立

中电(沈阳)能源投资有限公司, 辽宁沈阳, 110170;

摘要: 光伏发电组件性能衰减是影响电站长期发电效率与投资回报的关键因素。主要机理包括电致衰减热斑效应封装材料老化阴影遮挡积灰及PID效应等。这些衰减过程受环境条件、材料特性与运行工况共同作用, 导致功率输出逐年下降。科学识别衰减类型并制定针对性维护策略, 可有效延缓性能退化, 保障系统稳定运行。系统梳理常见衰减机制及其物理本质, 为光伏电站运维提供理论依据与实践指导。基于此, 本篇文章对光伏发电组件性能衰减机理及维护策略进行研究, 以供参考。

关键词: 光伏发电组件; 性能衰减机理; 维护策略

DOI: 10.64216/3080-1508.25.06.021

引言

随着光伏装机规模持续扩大, 组件性能衰减问题日益凸显, 已成为制约电站经济性与可靠性的核心挑战。不同衰减类型在空间分布和时间演化上具有差异性, 如初始LID发生在安装后数小时内, 而封装老化则随年限累积。准确掌握其发生位置与演变规律, 对实现精细化运维至关重要。当前行业普遍缺乏统一的衰减评估标准与动态管理机制, 亟需从机理分析出发, 构建科学、可量化、可操作的维护体系, 以提升电站全生命周期效益。

1 光伏发电在能源转型中的战略地位

光伏发电在能源转型中占据核心战略地位, 是实现碳中和目标的关键技术路径。作为最具规模化应用潜力的可再生能源, 光伏发电具有资源分布广、环境友好和运维成本低等显著优势。其模块化特性便于分布式部署, 能够有效提升能源系统的灵活性和韧性。光伏技术的持续创新推动发电效率不断提升, 成本持续下降, 使其逐步成为最具经济性的发电方式之一。在构建新型电力系统过程中, 光伏发电将与储能技术深度融合, 成为清洁能源替代传统化石能源的主力军, 对优化能源结构和保障能源安全具有深远意义。光伏发电组件主要由晶体硅电池片、乙烯-醋酸乙烯酯共聚物封装材料、低铁钢化玻璃盖板和背板复合膜层构成。单晶硅电池片转换效率可达22%以上, 采用选择性发射极和钝化接触技术降低载流子复合。封装材料选用透光率超过91%的EVA胶膜, 紫外老化耐受性达25年。3.2mm厚度的钢化玻璃表面镀有减反射膜, 透光率提升至94%。背板采用TPT三层结构, 水汽透过率小于 $0.1\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 。组件边框为阳极氧化铝合金, 抗风压性能达5400Pa。接线盒内置肖特基二极管, 可承受15A反向电流。这些部件通过层压工艺在

150℃下交联成型, 最终构成具有IP68防护等级的标准光伏组件。

2 光伏组件性能衰减的主要类型与机理

2.1 电致衰减

电致衰减是指光伏组件在初始光照条件下因材料内部缺陷态被激发而引起的功率下降现象, 其核心机制为光致诱导衰减。该效应主要发生在采用硼掺杂的P型硅片中, 光照下硼氧复合中心形成, 导致少子寿命降低, 从而引起电池效率下降。初始阶段衰减最为显著, 通常在安装后数小时内发生, 最大衰减幅度可达2%至5%, 且随光照强度与时间逐渐趋于稳定。因此, 这一过程不可逆, 但对组件长期运行影响有限, 是衡量新组件性能稳定性的重要指标之一。

2.2 热斑效应

热斑效应是指光伏组件因局部遮挡如树叶、灰尘、鸟粪或阴影导致部分电池片无法正常发电, 形成“热点”区域。该区域因电流通过而产生额外焦耳热, 温度可升高至80℃以上, 远超正常工作温度。高温引发电池片内部材料老化、焊点熔化、封装层脱层甚至烧毁, 造成不可逆的电性能损失。功率损失可达10%以上, 严重时可引发火灾风险。因此, 通过该现象在串并联结构中尤为突出, 易导致整串输出下降, 影响系统发电效率与安全运行。

2.3 封装材料老化

封装材料老化是光伏组件长期运行中常见的性能退化问题, 主要表现为EVA如乙烯-醋酸乙烯酯共聚物因紫外线照射和湿热环境发生黄变, 导致透光率下降, 影响电池片对太阳光的吸收效率。同时, delamination

如脱层现象使玻璃与背板之间界面分离,削弱机械强度并加速水分侵入,引发腐蚀与电性能衰减。玻璃微裂纹则源于运输、安装或热应力作用,破坏组件密封性,降低结构稳定性,并可能引发电弧放电或漏电风险。因此,通过上述老化过程共同导致组件功率输出持续下降,影响系统寿命与发电可靠性。

2.4 阴影遮挡与积灰

阴影遮挡与积灰是影响光伏组件发电性能的常见外部因素,主要表现为局部遮挡如建筑、树木或设备投射阴影导致电池片电流不均,形成功率瓶颈;同时,灰尘、沙尘、鸟粪等污染物附着在玻璃表面,降低透光率,减少入射光照强度。此类污染随时间累积,尤其在干旱多尘地区更为显著,造成组件表面反射率升高、吸收效率下降。年衰减率可达1%至3%,严重时局部热点加剧热斑效应,加速材料老化,破坏组件电气连接稳定性,进而引发输出功率波动与长期性能衰退,影响电站整体发电收益。

2.5 PID效应如电势诱导衰减

PID效应即电势诱导衰减,是指光伏组件与接地支架之间存在较高电压差时,导致电池片与封装材料间产生漏电流,引发电荷迁移和界面电荷积累。该现象常见于高湿、高盐雾或高海拔地区,尤其在系统负极接地的配置下更为显著。漏电流使电池表面形成反向偏压,降低载流子收集效率,造成组件功率输出下降。严重时可导致局部电场畸变、隐裂扩展甚至热斑失效,年衰减率可达2% - 10%,且具有不可逆性,严重影响组件长期发电性能与系统稳定性。

3 光伏发电组件性能的关键衰减参数与检测方法

3.1 功率衰减率

光伏组件性能衰减的核心参数包括功率衰减率、填充因子下降和绝缘电阻劣化。标准检测采用IEC61215测试流程,通过太阳模拟器如AM1.5G光谱测量初始功率与老化后功率差值,行业要求首年衰减不超过2%,线性衰减率控制在0.5%每年以内。电致发光检测仪可识别微裂纹导致的效率损失,缺陷检出精度达 $100\mu\text{m}$ 。湿热老化测试如 $85^\circ\text{C}/85\%\text{RH}$ 评估封装材料耐候性,要求1000小时后功率保持率 $\geq 95\%$ 。绝缘电阻测试施加1000V直流电压,标准规定湿漏电流小于50mA。紫外预处理测试累计辐照量达 $15\text{kWh}/\text{m}^2$,用以验证抗PID性能,确保

系统电压下功率衰减不超过5%。

3.2 IV曲线测试、EL成像、红外热成像

光伏组件性能评估采用IV曲线测试仪如精度 $\pm 1\%$,通过扫描 $0-V_{oc}$ 区间获取最大功率点如MPP偏移情况,分析串联电阻增大和并联电阻降低导致的填充因子下降。电致发光如EL成像系统使用 980nm 红外CCD相机如分辨率 2048×2048 ,可检测微裂纹、断栅等缺陷,最小识别尺寸 $50\mu\text{m}$ 。红外热像仪如热灵敏度 0.03°C 定位热斑故障,温度异常区温差超过 5°C 即判定为失效单元。紫外荧光检测识别EVA黄变度,色差 ΔE 超过3.0表明封装材料老化。因此,结合环境光致发光如PL光谱分析,可量化评估电池片寿命衰减程度,全面诊断组件性能劣化机理。

3.3 环境因素影响

光伏组件性能衰减与环境因素存在显著相关性。高温环境会加速封装材料老化,当工作温度超过 75°C 时,EVA胶膜交联度每降低10%将导致透光率衰减0.8%。湿度影响主要体现在湿热耦合作用如 $85^\circ\text{C}/85\%\text{RH}$ 条件下,水分渗透会使背板水解,水汽透过率超过 $0.5\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ 时将引发PID效应。紫外辐照强度累计达 $200\text{kWh}/\text{m}^2$ 时,盖板玻璃透光率会下降1.5%。沙尘磨损使玻璃表面粗糙度 $R_a > 0.2\mu\text{m}$ 时,光散射损失增加2%。盐雾腐蚀导致边框电位差超过0.6V时,将引发电化学腐蚀。因此,通过加速老化试验如UV+湿热+冻融循环可建立环境应力与衰减速率的定量关系模型。

4 光伏发电组件性能衰减的维护策略

4.1 定期清洁与巡检

定期清洁与巡检是保障光伏组件高效运行的关键环节,尤其在灰尘沉积严重的地区如西北荒漠、工业园区或沙尘频发区域,组件表面积灰可导致透光率下降10%以上。通常在光伏阵列的固定支架或跟踪系统上部进行清洁作业,建议每季度开展一次例行巡检,重点关注组件正面玻璃表面的粉尘覆盖密度如一般以 mg/cm^2 计,当累积厚度超过0.5mm时即需干预。采用自动清洗机器人可实现精准喷淋与刮拭,单日清洁面积可达 2000m^2 ,效率高于人工清洁3倍;同时结合红外热成像仪检测局部温升异常,识别潜在热斑隐患,确保组件发电性能稳定,维持年衰减率低于1%。

4.2 温控与通风设计

温控与通风设计主要针对光伏阵列安装于屋顶或

地面支架系统中的组件背部区域,通过优化结构布局与空气流动路径来降低工作温度。在组件与支撑结构之间预留 5 - 10cm 间隙,形成自然对流通道的,可有效减少热积聚,使组件表面温度比环境温度高出 20 - 30℃ 的典型工况降至 15 - 25℃ 以内。此外,在高功率密度区域如单个串组末端或阴影易发区增设导风板或微型风扇强制通风,提升散热效率,避免局部热点超过 85℃,从而抑制热斑效应的发生。因此,该设计不仅改善组件热管理性能,还延长封装材料寿命,保障系统长期稳定运行。

4.3 PID 防护

PID 防护主要针对光伏电站中组件与支架间存在电位差的部位,常见于系统负极接地配置下的直流侧,尤其在高湿、高盐雾或高海拔地区易诱发电势诱导衰减。抗 PID 组件采用特殊掺杂硅片 and 低电阻率封装材料,可将电池片表面电场分布均匀化,降低漏电流密度至 0.1 mA/cm² 以下,有效抑制电荷迁移。同时,在逆变器直流侧负极安装专用接地保护装置如 PID 修复模块,通过施加反向偏压如通常为 -500V 至 -1000V 抵消组件与地之间的电位差,使漏电流控制在安全阈值内如 <1% 额定电流。该措施在组件串并连接入点及配电柜处实施,可显著减少因 PID 效应导致的功率衰减,保障系统长期发电稳定性。

4.4 智能监控系统

智能监控系统部署于光伏电站的中央控制室与各阵列逆变器柜内,基于 SCADA 如数据采集与监视控制系统平台实现对组件级、串级及汇流箱级的实时数据采集与远程管理。系统通过安装在每串组件输出端的功率优化器或微型电流传感器,获取 I-V 曲线、电压、电流、温度等关键参数,采样频率可达 1 - 5 分钟/次,实现发电性能的精细化监测。当检测到异常如功率骤降如降幅 ≥5%、温度突升如 >80℃、电流不平衡如偏差 >10% 或 PID 信号异常时,自动触发预警并推送至运维人员终端,定位故障位置误差小于 10 米。该系统支持历史趋势分析与预测性维护,显著提升电站运行可靠性与运维效率,保障年发电量损失控制在 1% 以内。

4.5 更换与退役管理

更换与退役管理主要在光伏电站运维中心及组件安装现场实施,依托组件寿命评估模型对发电性能、材

料老化状态和环境应力进行综合诊断。通过长期运行数据如年衰减率、EL 图像缺陷密度、I-V 曲线参数漂移建立多变量预测模型,结合温度循环次数、辐照累计量如通常以 kWh/m² 计和湿度指数等环境因子,量化组件剩余寿命。当衰减率超过 0.8%/年或功率输出低于初始值的 80% 时,判定为接近退役阈值。该评估模型部署于电站级能源管理系统如 EMS 中,可实现对每块组件的编号追踪与健康评分如 HealthIndex,支持分批次、分区域制定更换计划,避免盲目整场替换。因此,该策略确保资产价值最大化,同时保障系统整体效率稳定,符合电站全生命周期管理要求。

5 结束语

总而言之,光伏组件性能衰减是一个多因素耦合的复杂过程,涉及材料、环境与电气行为的相互作用。通过深入解析各类衰减机理并建立量化模型,能够为运维决策提供精准支撑。合理的清洁巡检温控设计与智能监控手段可显著降低衰减速率,延长组件寿命。未来,应强化数据驱动的预测性维护能力,推动光伏运维向数字化智能化转型,从而实现高效安全可持续发展的清洁能源发展。

参考文献

- [1] 高铁珊. 光伏发电在油田清洁能源替代中的应用[J]. 石油石化节能与计量, 2024, 14(08): 115-119.
- [2] 石孟可, 范靖, 张军. 低温氟膜背板及光伏组件老化性能研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(07): 525-531.
- [3] 林志鸿, 曾飞, 梁健锋, 林荣超, 叶凯华, 欧阳宇佳, 王哲. 高效光伏组件的光致衰减与发电量实证研究[J]. 顺德职业技术学院学报, 2024, 22(03): 64-68.
- [4] 王小宇, 刘波, 孙凯, 赵健, 陈雷. 光伏阵列故障诊断技术综述[J]. 电工技术学报, 2024, 39(20): 6526-6543.
- [5] 陈如意, 孔蕊, 周扬, 钱兵. 光伏组件封装胶膜的种类及交联度的研究[J]. 太阳能, 2023, (03): 5-11.
- [6] 叶添翼, 柳翠, 许佳辉, 袁晓, 周国民, 胡津诚. 光伏组件综合序列加速老化测试方法综述[J]. 太阳能, 2022, (11): 34-43.
- [7] 钟浩. 双面光伏组件的发电特性研究[J]. 光源与照明, 2022, (02): 77-79.