

新能源光伏发电系统中的故障诊断与故障处理研究

陆衍振

441283*****2115

摘要: 在目前的发展阶段中,受光伏组件特性、外部环境变化及系统复杂性等因素影响,光伏发电系统在运行中易出现各类故障,不仅影响发电效率与系统可靠性,还可能引发安全隐患。本文围绕光伏发电系统的故障诊断与处理这一核心问题,系统分析了光伏组件、逆变器、直流汇流箱、交流配电柜及电网连接等关键环节的典型故障类型及其产生机理;从电学参数监测、红外热成像检测、智能算法应用等维度研究了故障诊断技术;并针对不同故障类型提出了针对性的处理策略与维护措施。研究表明,通过“实时监测-精准诊断-科学处理”的全流程技术体系,可有效提升光伏发电系统的故障应对能力,保障系统稳定高效运行,为新能源电力系统的安全可靠发展提供理论与实践支撑。

关键词: 光伏发电系统;故障诊断;故障处理;电学参数;智能算法;维护策略

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 11. 035

引言

随着全球气候变化加剧与化石能源储量锐减,发展可再生能源已成为国际社会的共识。光伏发电作为新能源领域的核心分支,其利用半导体材料的光生伏特效应将太阳能直接转化为电能,具有无碳排放、资源无限、建设周期短等优势。然而,光伏发电系统的运行环境复杂(如高温、高湿、沙尘、昼夜温差大),且系统组成包含光伏组件、逆变器、汇流箱、电缆、配电柜等多类设备,各环节的协同可靠性直接影响整体发电性能。因此,深入研究光伏发电系统的故障诊断与处理技术,不仅是保障系统经济性的需求,更是提升新能源电力供给稳定性的关键环节。

1 光伏发电系统的主要故障类型

1.1 光伏组件故障

光伏组件是系统的能量转换核心,其故障直接影响光能到电能的转化效率。典型故障可分为物理损伤类与性能衰减类两类。物理损伤类故障主要由外力破坏或环境侵蚀引发:一是组件玻璃面板破裂,多因安装时固定不牢、冰雹冲击或运维人员误操作导致,破裂后不仅会降低透光率,还可能使内部封装材料暴露于潮湿空气,加速老化;二是背板开裂或脱层,背板材料(如聚氟乙烯)在长期紫外线照射与温度循环作用下,易出现脆化开裂,导致水汽侵入并腐蚀内部电极;三是边框变形或松动,铝合金边框在运输或安装过程中受力不均,或因基础沉降导致固定螺栓松动,可能引发组件倾斜甚至脱

落。性能衰减类故障则与材料老化或内部缺陷相关:一是电池片热斑效应,当组件局部被遮挡(如树叶、鸟粪、灰尘堆积)时,被遮区域电阻增大,电流通过旁路二极管分流,未被遮挡区域持续发电产生热量,导致局部温度异常升高(可达 80℃ 以上),加速电池片与封装材料的劣化;二是功率衰减,包括初始光致衰减(组件投运初期因硅材料晶格缺陷释放载流子导致的短期效率下降)、老化衰减(封装材料黄变、电极氧化引起的长期性能损失)及 PID 效应(电势诱导衰减,因组件与接地边框间的高电压差导致封装材料与电极界面离子迁移,造成漏电流增大与功率损失)^[2]。

1.2 逆变器故障

逆变器是光伏发电系统的“心脏”,负责将组件产生的直流电转换为符合电网要求的交流电,其故障会导致系统停机或输出电能质量下降。常见故障类型包括:电路元件故障:功率模块(如 IGBT、MOSFET)因长期工作在高电压、大电流环境下,易因过温(超过 125℃)、过压(超过额定电压 1.2 倍)或短路冲击而损坏,表现为模块炸裂、引脚烧蚀;电容(如电解电容、薄膜电容)因纹波电流大、环境温度高,会出现电解液干涸、介质老化等问题,导致容量下降、等效串联电阻增大,影响逆变器的滤波与稳压性能;电路板上的焊点因热胀冷缩循环或振动冲击可能产生虚焊或断裂,引发信号传输中断或控制失效。控制逻辑故障:逆变器的核心控制芯片(如 DSP、FPGA)通过采集电压、电流、频率等参数,

实时调节输出电能的相位、幅值与频率。若控制程序存在漏洞（如未考虑极端工况下的保护逻辑）、传感器信号异常（如电压互感器零漂、电流传感器偏置）或通信中断（如 CAN 总线受干扰、光纤连接松动），可能导致逆变器误判运行状态，出现输出电压畸变（谐波含量超标）、频率偏移（超出 $50\text{Hz} \pm 0.5\text{Hz}$ 范围）或孤岛保护误动作（正常并网时误判为电网失电而停机）。环境适应性故障：逆变器通常安装在室外或通风舱内，高温环境（超过 50°C ）会加速电子元件老化，湿度过高（相对湿度超过 90%）可能导致电路板结露短路，粉尘堆积（如工业厂房屋顶）会堵塞散热风道，降低散热效率，进而引发过热保护频繁触发。

1.3 直流汇流箱与交流配电柜故障

直流汇流箱用于将多个组串的直流电汇集后输入逆变器，其故障主要表现为熔断器熔断、防反二极管损坏及监控模块失效。熔断器因长期通过大电流或组件短路冲击，可能出现熔体熔断（表现为对应组串无电流输出）；防反二极管在反向电压过高（如组件极性接反）或散热不良时，会发生击穿短路（导致汇流箱内部冒烟或烧焦）；监控模块若电源模块故障或通信线路断开，将无法上传各组串的电、电压数据，影响运维人员对组件运行状态的判断。交流配电柜负责将逆变器输出的交流电分配至电网或负载，其故障包括断路器跳闸（因过载、短路或欠电压保护动作）、接触器触点氧化（导致接触电阻增大，发热烧蚀）、铜排连接松动（因振动或热胀冷缩引起接触不良，产生电弧）。此外，配电柜的接地系统若失效（如接地电阻超过 4 欧姆），可能在设备漏电时无法及时导走故障电流，引发触电或火灾风险^[2]。

2 光伏发电系统的故障诊断技术

2.1 电学参数监测诊断

电学参数是反映系统运行状态的基础信息，通过对关键节点的电压、电流、功率等参数实时采集与分析，可快速定位明显故障。例如，组件级监测可通过在每个组串正负极安装智能传感器，采集组串的开路电压（具体取决于组件型号、组件数量）、短路电流（与光照强度正相关，晴天中午约为 8-15A）及工作电压/电流（正常运行时电压应接近组件标称电压的 80%-90%，电流与光照成正比）。若某组串的电、电压接近 0V 或远低于其他

组串，可能为断路故障（如接线松动、熔断器熔断）；若电流为 0A 但电压正常，则可能为组件被完全遮挡或内部短路；若组串电流显著低于同条件下其他组串（偏差超过 15%），可能存在热斑或部分遮挡问题。逆变器级的电学参数监测重点关注直流侧输入电压/电流（应与组串参数匹配）、交流侧输出电压/频率（需符合电网标准，如三相电压平衡度 $\leq 2\%$ ）、功率因数（应接近 1.0）及效率（正常范围为 95%-99%）。通过对比历史数据（如同一时段的日均发电量）与理论计算值（根据光照强度、组件容量估算），可判断是否存在逆变器效率下降或输出异常。

2.2 红外热成像检测技术

红外热成像技术通过非接触方式检测设备表面的温度分布，可直观发现因接触不良、内部损耗或短路引发的局部过热故障。例如，光伏组件的玻璃表面若存在热斑，红外图像中会显示温度异常升高的区域（与周围正常电池片温差超过 20°C ）；直流汇流箱内的熔断器若熔断前因接触电阻增大，其连接点温度会显著高于其他部位（超过 80°C ）；逆变器的功率模块若因过流或散热不良，其散热器表面温度可能超过 100°C （正常工作温度为 $60\text{--}80^\circ\text{C}$ ）；电缆接头若因氧化或松动，其连接处的温度会比相邻电缆高 $15\text{--}30^\circ\text{C}$ 。红外检测需在系统满负荷运行（光照充足、发电功率稳定）时进行，重点扫描组件电池片、组件接线盒、MC4 连接插头、汇流箱内电气连接点、逆变器散热风道进出口及电缆接头等易发热部位，通过温度阈值预警（如设定超过 70°C 为异常）快速定位潜在故障点^[3]。

2.3 智能算法辅助诊断

随着系统规模扩大与故障模式复杂化，传统基于阈值的诊断方法难以满足精准性需求，智能算法的应用成为研究热点。常见的智能诊断技术包括：（1）机器学习算法：通过采集大量历史故障数据（包括电学参数、环境温度、光照强度及对应的故障类型标签），训练分类模型（如支持向量机 SVM、随机森林 RF 或神经网络 BP）。例如，利用 SVM 算法对组串电流数据进行特征提取（如均值、方差、峰值），可区分正常运行、部分遮挡、热斑及断路等故障模式；随机森林算法通过构建多棵决策树，综合多个参数（如电压、电流、温度）的关联关系，提高故障识别的准确率（实验表明可达 90% 以上）。（2）大数据分析技术：基于物联网平台实时采

集全系统各设备的运行数据（采样频率可达 1 秒/次），通过数据挖掘技术（如聚类分析、关联规则挖掘）发现隐藏的故障规律。例如，分析不同季节、不同时段发电效率与光照强度的关系曲线，可识别出因组件老化导致的长期功率衰减趋势；对比同一区域多个电站的故障数据，可统计出高发故障类型（如某地区的逆变器电容故障率较高）并针对性优化设备选型^[4]。（3）数字孪生技术：构建光伏发电系统的虚拟仿真模型（包括组件、逆变器、汇流箱等设备的数学模型），实时映射物理系统的运行状态。通过对比虚拟模型与实际系统的电学参数差异（如模型预测的发电量与实际发电量的偏差超过 5%），可快速定位异常环节；在虚拟环境中模拟不同故障场景（如组件短路、逆变器过压），验证诊断策略的有效性并优化处理方案。

3 光伏发电系统的故障处理策略与维护措施

3.1 光伏组件故障处理

针对物理损伤类故障，玻璃面板破裂或边框变形的组件需立即更换（避免碎片飞溅或结构脱落风险）；背板开裂的组件若破损面积较小，可通过密封胶修补并加强防护，若开裂严重则需整体更换。对于性能衰减类故障，热斑效应的处理需清理组件表面的遮挡物（如灰尘、鸟粪），检查并修复旁路二极管（若二极管失效需更换对应组串）；功率衰减问题需根据衰减程度分类处理——初始光致衰减可通过系统自适应调节补偿，老化衰减超过 20% 的组件建议更换，PID 效应则需通过增加负极接地装置或优化组件封装工艺（如采用抗 PID 材料）进行抑制。

3.2 逆变器故障处理

电路元件故障需根据损坏类型针对性维修：功率模块损坏需更换同型号器件（并检查驱动电路是否正常），电容失效需更换相同规格的电容（注意耐压值与容量参数），焊点虚焊需重新焊接并加强散热风道清洁（确保温度不超过 70℃）。控制逻辑故障需升级控制程序（修复已知漏洞）、校准传感器（如电压互感器的零点调整）或检查通信线路（如 CAN 总线的终端电阻是否匹配）；若因环境温度过高导致频繁保护，需加装空调或通风设

备（将柜内温度控制在 40℃ 以下）^[5]。

3.3 直流汇流箱与交流配电柜故障处理

直流汇流箱的熔断器熔断需更换同规格熔体（并检查对应组串是否存在短路或接地故障），防反二极管损坏需更换同型号器件（确保反向耐压 $\geq 1000\text{V}$ ），监控模块故障需重启设备或更换通信模块（恢复数据上传功能）。交流配电柜的断路器跳闸需排查过载原因（如逆变器输出功率超过额定值）或短路点（如电缆绝缘破损），接触器触点氧化需打磨触点或更换接触器，铜排连接松动需紧固螺栓并涂抹导电膏（降低接触电阻）。接地系统故障需检测接地电阻（使用接地电阻测试仪），若超过 4 欧姆需增设接地极或延长接地导线（确保电阻 ≤ 4 欧姆）。

4 结论

本文围绕新能源光伏发电系统的故障诊断与处理问题，系统分析了光伏组件、逆变器、汇流箱等关键环节的典型故障类型及产生机理，从电学参数监测、红外热成像检测及智能算法应用等维度研究了故障诊断技术，并提出了针对性的处理策略与维护措施。研究表明，通过多技术融合的故障诊断体系与科学的维护管理，可显著提升光伏发电系统的可靠性与经济性，为新能源电力系统的规模化应用提供保障。

参考文献

- [1] 胡春雷. 光伏发电系统中逆变器故障诊断与故障排查研究[J]. 光源与照明, 2024(3): 69-71.
- [2] 韩素敏, 余悦伟, 郭宇. 基于改进 GAF-SE-ResNet 的光伏逆变器开路故障诊断[J]. 太阳能学报, 2024, 45(10): 336-344.
- [3] 唐小琳. 新能源光伏发电系统中的故障诊断与故障处理策略研究[J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2025(2): 140-143.
- [4] 曾瑞江, 黄缙华, 李志勇. 基于小波包能量谱和 ELM 的光伏逆变器多故障在线诊断[J]. 电工材料, 2024(4): 71-74.
- [5] 张书婷, 朱珠. 基于 SOM-BP 神经网络的光伏逆变器软故障诊断研究[J]. 中国新技术新产品, 2024(13): 22-24.