

Operation, Maintenance and Fault Diagnosis Technology of Photovoltaic Power Station

Dengmin Yu

China Electric Construction Group Guizhou Engineering Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550003, China

Abstract

In this paper, around the photovoltaic power plant, the first analysis of common failures, such as PV module thermal spot, PID effect, as well as inverter, bracket fault. Then the fault diagnosis technology is introduced, including sensor and data acquisition technology, fault judgment by deploying sensor and planning data acquisition and processing, diagnosis technology based on knowledge and model, association physical law and so on. Finally, operation and maintenance strategies such as refinement of daily patrol inspection, improvement of fault detection rate by standardized process, spare parts backup, classification of backup level and construction of inventory dynamic management mechanism are described to ensure operation and maintenance needs.

Keywords

photovoltaic power station; operation and maintenance; fault diagnosis technology

光伏电站运维与故障诊断技术

余登敏

中国电建集团贵州工程有限公司, 中国·贵州 贵阳 550003

摘 要

本文围绕光伏电站展开, 先分析常见故障, 如光伏组件的热斑、PID效应等, 以及逆变器、支架等的故障。接着介绍故障诊断技术, 包括传感器与数据采集技术, 通过部署传感器、规划数据采集与处理来实现故障评判; 基于知识与模型的诊断技术, 关联物理规律等构建诊断体系。最后阐述运维策略, 如日常巡检精细化, 通过标准化流程提升故障发现率; 零部件备份, 划分备份级别、构建库存动态管理机制, 以保障运维需求。

关键词

光伏电站; 运维; 故障诊断技术

1 引言

在能源领域, 光伏电站作为重要的清洁能源供应形式, 其稳定运行至关重要。然而, 光伏电站在运行过程中会受到多种因素影响, 出现故障在所难免。了解常见故障、掌握有效的故障诊断技术以及合理的运维策略, 对于保障光伏电站的高效运行、提高发电效率、降低运维成本具有重要意义。本文将深入探讨光伏电站的故障情况、诊断技术及运维策略。

2 光伏电站常见的故障分析

光伏电站在运行过程中会受到诸多因素影响, 在实践环节, 光伏组件故障较为常见, 其中的热斑效应主要是由于组件局部被遮挡, 导致该区域温度升高形成热斑, 若出现这一现象, 会加速主线老化、降低发电效率, 严重时甚至会烧

毁电池片; 其次, 光伏组件故障中还包含 PID 效应, 该效应主要是由于内部电场导致电池表面钝化层破坏, 进而使电池电压降低, 据分析显示, PID 效应可导致组件功率衰减达 20% 以上。此外, 光伏组件在长期使用过程中受强烈紫外线照射及机械振动影响, 会出现一系列故障隐患, 如裂缝等, 致使设备发电效率降低。

除光伏组件故障外, 光伏电站运行中也常出现逆变器故障, 逆变器故障主要体现在三个部分: 第 1 部分是直流侧故障, 因组件接线松动、绝缘层破坏导致短路或接地, 从而触发逆变器直流过压、绝缘阻抗低的故障信息; 交流侧故障主要由电网电压异常引发, 例如电压欠压会导致逆变器内部元器件损坏; 而逆变器散热情况也会影响设备整体使用性能, 若散热风扇故障或散热片积灰, 会导致逆变器过温保护甚至停机。

除此之外, 光伏电站运行中还会出现支架与基础故障、汇流箱与电缆故障以及监控系统故障, 工程师需做好故障问题的精准诊断定位, 并实施常态化运维管控^[1]。

【作者简介】余登敏 (1984-) 女, 中国贵州清镇人, 硕士, 高级工程师, 从事风力发电等研究。

3 光伏电站故障诊断技术

3.1 传感器与数据采集技术

光伏电站运行中会产生大量数据信息，工程师需引进传感器与数据采集技术以实现故障问题的精确评判分析。在故障诊断环节，工程师需针对光伏组件的热斑效应、逆变器散热异常、电缆接头过热等故障问题部署合适的温度传感器，可借助高精度的数字温度传感器、热电偶或红外测温传感器，利用其高分辨率、测量范围广的特性提高监测效率。选取传感器组件后，工程师需将其合理部署到合适位置，每串组件中部署 1~2 个温度传感器，重点监测组件背面中心区域；同时在设备监测环节，针对逆变器散热片、电缆接头、汇流箱内部等关键节点进行重点监测，可在相关区域安装传感器实时监测温度异常。针对环境监测，主要在电站周边部署温湿度传感器，用于区分环境因素与设备故障导致的升温。

完成传感器选型和部署后，工作人员需做好数据采集规划，优先强化硬件架构搭建，采用分布式采集节点，通过低功耗无线传输模块将传感器数据汇总至本地采集器，再引入微处理器实现对数据的预处理，包括滤波、阈值判断，随后将数据信息传输至云端监控中心。以上过程需保证每 5 分钟采集一次数据信息，当温度超过阈值设定时，将采集频率提升至每秒一次。之后，工程师需对采集数据进行处理和分析，包括特征提取与模式识别，要求技术人员基于大数据系统提取整合与温度数据相关的信息，建立温度数据与功率、电流等参数的一一对应关联以区分故障类型，再结合空间定位算法，依据传感器拓扑结构，通过温度分布热力图精确定位故障组件或接头。

确认热斑故障后，运维人员首先使用无尘擦拭布配合中性清洁剂清除组件表面的鸟粪污渍，同步用便携式 EL 检测仪对该组件进行内部缺陷扫描，确认电池片仅出现轻微热斑损伤未形成永久性破坏；清洁完成 30 分钟后，传感器数据显示组件温度逐步回落至 45℃，与周边组件温差缩小至 3℃，电流和功率参数恢复至正常范围的 98%。针对此次故障暴露的问题，技术团队展开系统性优化：一是在每串组件的中心及易遮挡区域增加 1 个红外测温传感器，将传感器部署密度从每串 1~2 个提升至 3 个，确保对发热点的立体监测；二是升级数据处理算法，建立湿度、光照强度与温度异常的多参数关联模型，当湿度超过 70% 且单个组件温度高于周边 10℃ 时自动触发三级预警，同时联动相邻 5 米内的传感器进行网格状扫描；三是优化硬件架构，在分布式采集节点中增加边缘计算模块，实时完成数据滤波与阈值判断，将异常数据的上传延迟从 20 秒缩短至 5 秒，确保云端监控中心第一时间获取精准信息。

3.2 基于知识与模型的诊断技术

在光伏电站故障诊断环节，工程师需引进基于知识与模型的诊断技术以提高故障诊断水平，需将物理规律、经验

规则、机理模型、数据驱动模型相关联，通过互动实现光伏电站故障的精确识别和定位。在实践中，工程师需从物理机理分析层面，结合光伏组件的等效电路模型，明确光生电流、串联电阻、并联电阻等关键参数与故障模式之间的映射关系，基于此将组件故障划分为短路、开路、老化、热斑等类型，并关联对应的特征，如功率下降、填充因子降低等。基于上述故障分类，结合运维人员经验形成规则库，并同步建立相关数学模型^[2]。

完成知识库与模型建构后，便需进行故障特征提取和关联。工程师需做好关联参数识别，常见关联参数包括电气参数、环境参数和动态特征，不同参数对应不同故障模式，如短路故障、开路故障、老化故障和热斑故障。具体而言，短路故障表现为电阻急剧下降、电流异常增大且电压降低等。基于上述故障，引进诊断算法，包括结合规则推理引擎，通过设定参数阈值、结合规则库进行初步诊断，再采用逻辑推理、结合产生式规则（如对电流、电阻等参数进行分析）实现故障定位。此外，工程师还需引进模型驱动诊断，包括参数辨识，主要基于最小二乘法或粒子群算法拟合实测 I-V 曲线、估计参数信息，同时配合残差分析，通过计算模型预测值与实际值的残差，当残差超过阈值时判定故障存在。总体而言，工程师需结合知识与模型，构建一套完善的诊断体系，以实现故障问题的高效研判分析。

4 光伏电站运维策略

4.1 日常巡检精细化

在光伏电站运维过程中，常态化巡检不可或缺，日常巡检作为运维核心环节，需通过系统化、标准化的流程设计提升故障发现率、增强设备可靠性。在巡检环节，工程师需做好巡检标准与工具的标准化处置整合，其中的量化指标定义了组件表面灰尘覆盖率，如小于 5% 为清洁、5%~15% 为轻度污染、大于 15% 为重度污染，可同步配合透光率测试仪评估表面清洁程度，辅助以无人机巡检生成组件表面热力图，标记组件污染区域，实现对灰尘覆盖率更精准高效的识别。在工具设备配置模块，需根据清洁需求合理应用专用设备与工具，专用设备包括无尘擦拭布、中性清洁剂、便携式吸尘器等，清洁过程中需合理应用工具并灵活选型，避免划伤组件表面；同时利用 APP 记录清洁度数据，支持拍照上传、GPS 定位及报告自动生成。

工程师需做好巡检流程的精细化设计，实行分区巡检，按光伏电站阵列朝向划分差异巡检单元，优先巡检高风险区域，巡检过程中采用 S 型或 Z 型路径以减少重复路线、提升效率，同步配合多层级检查机制：初级检查环节要求运维人员每日目视组件表面并标记明显污染物；二级检查环节主要是每周使用透光率测试仪对目标区域进行量化检测以确认清洁度等级；三级检查作为抽检环节，主要是每月抽查 5% 的组件进行实验室分析，评估颗粒物成分并校准现场检测

标准。

例如,某光伏电站运维工程师在执行月度巡检任务时,首先通过无人机对全站组件进行热力图扫描,无人机搭载的红外成像设备实时回传数据,在监测到3号阵列区域时,屏幕上显示该区域多块组件表面温度较周边高出 $3^{\circ}\text{C}\sim 5^{\circ}\text{C}$,异常的温度分布立即引起工程师的注意。为精准定位问题,工程师携带透光率测试仪赶赴现场,按照巡检流程对热力图标记的重点区域展开二级检查,当测试仪对准其中一块组件表面时,屏幕显示透光率数值仅为72%,低于正常清洁状态下85%以上的标准值;随后使用量尺对组件表面灰尘覆盖面积进行测量,计算得出灰尘覆盖率达到18%,超过了15%的重度污染阈值,至此确认该区域存在组件表面重度污染故障。

确认故障后,运维团队立即启动专项清洁方案:首先调配便携式吸尘器清除组件表面浮尘,使用蘸有中性清洁剂的无尘擦拭布对顽固污渍进行局部软化处理,再用去离子水冲洗并配合软质毛刷轻柔刷洗,整个过程严格按照工具使用规范操作,避免因压力过大或工具不当划伤组件表面;清洁完成后,再次使用透光率测试仪检测,数值提升至88%,通过无人机复检热力图显示组件表面温度恢复正常,与周边组件温差控制在 1°C 以内。

4.2 零部件备份

在运维过程中,除常态化清洁和巡检外,还需针对光伏电站故障问题做好常态化检修,为此需准备相应零部件以便更换时快速应对。工程师需针对光伏电站运行的KPI指标,以减少停机运行时间、降低运维成本为目标做好零部件备份。首先识别关键零部件,基于历史故障数据确定故障率最高且影响最大的零部件,如逆变器风扇、直流熔断器等,并评估零部件的采购周期、供应商可靠性及可替代性,以此划分零部件备份级别:一级备份储存于电站仓库,用于高频故障件更换,库存量需满足72小时内紧急更换需求;二级备份集中存储于区域运维中心,覆盖中频故障部件,库存量需支持3~5个电站一周的更换需求;三级备份为战略级,通过与供应商签订协议确保长期稳定可靠的零部件供应。为有效管控库存成本,相关单位需构建库存动态管理机制,该机制包括需求预测模型,利用威布尔分布模型预测零部件故障率,结合电子表格计算需求量并进行动态调控;同时引入经济订货量模型,平衡采购成本与库存成本以确定最佳订货量。

例如,针对逆变器,其属于历史故障率最高的一级备

份零部件,根据库存记录显示电站仓库应储备5件以满足72小时紧急更换需求,但现场盘点时仅剩余2件,且最新一次采购订单因供应商生产线故障导致到货延迟3天,这使得库存数量在故障发生时低于安全阈值;其次威布尔分布模型预测该批次风扇年故障率为8%,但实际运行中因春季沙尘天气频发,风扇轴承磨损速度加快,实测故障率升至12%,而需求预测模型未及时结合环境因素调整参数,导致零部件储备量计算出现偏差;再者经济订货量模型在计算时未充分考虑供应商的运输周期波动,当库存降至再订货点时未能触发紧急采购流程,最终造成关键备件供应脱节。

故障发生后运维团队立即启动应急预案:一方面安排人员从临时备用设备上拆卸同型号风扇进行紧急更换,30分钟内恢复逆变器正常运行并同步监测温度数据,2小时后散热系统温度稳定在 55°C ,较故障前下降 30°C ,发电单元重新投入运行;另一方面联系区域运维中心调运二级备份库存,4小时内补充5件风扇至电站仓库,同时向供应商发出三级备份预警,要求启动战略储备供应协议。针对暴露的问题运维部门展开系统性改进:首先升级需求预测模型,将环境因素(如沙尘天数、空气湿度)纳入威布尔分布计算参数,针对多尘区域的逆变器风扇故障率预测精度提升至92%;其次优化库存动态管理机制,在电子表格中增加实时库存预警功能,当一级备份零部件数量低于安全阈值的80%时自动触发采购流程,并与供应商建立优先级配送通道,将采购周期从原来的15天缩短至7天;再者修订巡检作业指导书,要求对一级备份零部件相关设备增加振动监测和电流波动检测,将风扇异响纳入强制更换指标,避免因主观判断导致的维护延误。

5 结语

总体来说,本文全面研究了光伏电站的故障、诊断技术与运维策略。通过对常见故障的分析,明确了光伏电站运行中的关键问题;传感器与数据采集技术、基于知识与模型的诊断技术为故障精准定位提供了有效手段;日常巡检精细化与零部件备份的运维策略,保障了光伏电站的稳定运行。但光伏电站运行环境复杂,未来还需进一步探索更先进的故障诊断方法,优化运维策略,以推动光伏产业持续健康发展。

参考文献

- [1] 孙宇,郭晓东. 基于交通设施的光伏电站运维与管理系统设计[J]. 信息与电脑(理论版), 2023, 35 (10): 91-93.
- [2] 叶进,卢泉,王钰淞,等. 基于级联随机森林的光伏故障诊断模型研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42 (03): 358-362.