

光伏电站运维故障诊断技术研究

刘兆颀

内蒙古华电新能源分公司

DOI:10.32629/btr.v8i12.5146

[摘要] 针对光伏电站传统运维效率低、故障诊断滞后的问题,本文深入研究了智能故障诊断技术。文章分析了光伏系统架构与故障机理,对比了传统离线检测与智能化在线诊断技术。重点探讨了基于数据分析、无人机巡检、AI识别及智能机器人的应用,并构建了分层化智能运维管理平台。结果表明,通过融合多维感知与AI算法,可实现故障精准定位与预测性维护,显著提升电站运维自动化水平与发电效益。

[关键词] 光伏电站; 故障诊断; 智能运维

中图分类号: TM615 **文献标识码:** A

Research on Fault Diagnosis Technologies for Photovoltaic Power Plant Operation and Maintenance

Zhaojie Liu

Inner Mongolia Huadian New Energy Branch

[Abstract] To address the problems of low operation and maintenance efficiency and delayed fault diagnosis in traditional photovoltaic power plants, this paper conducts an in-depth study of intelligent fault diagnosis technologies. The paper analyzes the architecture and fault mechanisms of photovoltaic systems and compares traditional offline detection with intelligent online diagnostic technologies. It focuses on the application of data analysis, unmanned aerial vehicle inspection, AI-based identification, and intelligent robots, and establishes a hierarchical intelligent operation and maintenance management platform. The results show that the integration of multidimensional sensing and AI algorithms can achieve accurate fault localization and predictive maintenance, significantly improving the automation level of photovoltaic power plant operation and maintenance and enhancing power generation benefits.

[Key words] photovoltaic power plants; fault diagnosis; intelligent operation and maintenance

引言

光伏电站运维面临环境复杂、故障隐蔽及人工排查效率低等挑战,直接影响发电效率与系统安全。传统外观检查与离线测试难以满足大规模电站的精细化需求,智能化转型迫在眉睫。本文旨在研究光伏电站运维故障诊断技术,通过分析系统故障机理,对比传统与智能诊断手段,重点探讨无人机、AI算法及智能管理平台的应用。通过构建全生命周期智能运维体系,解决故障识别滞后难题,提升电站运行稳定性与经济效益。

1 光伏电站系统构成与故障机理分析

1.1 光伏电站系统架构

光伏电站是一套集光电转换、电能传输、调控储能于一体的综合性发电系统,整体架构层级清晰、协同运行,主要分为光伏阵列、电气设备、控制系统及辅助系统四大核心部分。光伏阵列作为核心发电单元,由大量光伏组件通过串并联方式组成,

负责将太阳能直接转化为直流电,是电能生产的基础载体。电气设备包含逆变器、变压器、高低压配电柜、线缆等装置,主要完成直流电转交流电、电压等级变换与电能输送工作,保障电能稳定并网。控制系统以监控主机、传感器、数据采集模块为核心,实时采集电站运行数据、设备状态参数,实现全站运行调控与异常监测^[1]。辅助系统涵盖防雷接地、散热通风、安防监测等配套设施,为电站全天候、安全化、稳定化运行提供基础保障,各系统相互配合,构成完整的光伏发电运行体系。

1.2 光伏组件常见故障及机理

光伏组件长期暴露在户外复杂环境中,受气候、环境、老化及外力影响,易出现各类故障,直接制约光电转换效率与使用寿命。常见故障主要包括组件隐裂、热斑、玻璃破损、封装老化、电池片衰减及接线故障等。组件隐裂多由运输安装磕碰、极端温差应力、大风积雪挤压导致,细微裂纹会割裂电池片导电通路,

造成局部发电失效。热斑故障是组件最频发问题,因组件遮挡、电池片性能不一致、局部老化失衡,导致部分电池片反向偏置发热,长期高温会烧毁封装材料、加速组件衰减。

2 传统与离线故障诊断技术

2.1 外观与目视检查

外观与目视检查是光伏电站最基础、最通用的离线故障诊断技术,无需专业检测设备,依靠人工巡检直观排查设备表面显性故障,适用于电站日常常态化巡检作业。该技术主要通过巡检人员现场观测光伏组件、电气设备、线缆接头的外观状态,识别明显故障问题,包括组件玻璃碎裂、边框变形、胶膜发黄脱层、表面大面积遮挡,电气设备外壳破损、端子烧黑、线缆外皮开裂、设备异响异味等显性缺陷。目视检查操作简单、成本低廉、适用性广,可快速筛查宏观故障,及时规避重大安全隐患。但该技术局限性较为突出,仅能识别表面可视故障,无法检测组件隐裂、内部老化、线路虚接等隐性故障,检测精度依赖人员经验,主观性强、效率较低,难以适配大规模光伏电站精细化故障诊断需求。

2.2 电性能测试技术

电性能测试技术是通过专业电气检测设备,采集光伏电站各类电气参数,判定设备运行状态与故障隐患的离线诊断技术,是量化评估电站发电性能的核心手段。该技术主要测试内容包括光伏组串开路电压、短路电流、工作功率、绝缘电阻及设备并网电能质量等参数,通过对比标准参数与实测数据的偏差,定位故障点位与故障类型。例如组串电压、功率大幅偏低,可判定存在组件失效、线路断连或遮挡故障;绝缘电阻不达标,说明设备或线缆存在漏电隐患^[2]。电性能测试数据精准、可靠性高,可精准排查隐性电气故障,为故障维修提供量化依据。但该技术需停机离线检测,会造成电站发电量损失,且测试流程繁琐、耗时较长,仅适用于定期检修与故障专项排查,无法实现实时监测与动态诊断。

2.3 红外热成像检测

红外热成像检测是基于物体红外辐射原理,通过热成像设备捕捉光伏设备温度分布差异,识别异常发热故障的离线检测技术,广泛应用于光伏组件与电气设备故障排查。正常运行的光伏组件、电气设备温度分布均匀,而存在热斑、隐裂、虚接、短路故障的部位会出现局部温度异常升高,形成明显高温热点。检测人员通过手持红外热成像仪扫描设备表面,生成温度热力图,可直观定位高温故障区域,精准识别组件热斑、电池片失效、接头过热、设备过载发热等故障。该技术非接触式检测、安全性高、检测速度快,可批量筛查组件故障。但传统红外检测多为人工离线操作,受环境光照、温度、风速干扰较大,易出现检测误差,且无法实现全天候动态监测,难以及时发现瞬时性、间歇性故障。

2.4 电致发光(EL)检测

电致发光(EL)检测是光伏组件专属的高精度离线故障诊断技术,依托电致发光成像原理,可精准检测组件内部隐性缺陷,

是组件质量检测与故障溯源的核心手段。检测时通过向光伏组件通入正向直流电,使电池片发光,利用专业成像设备捕捉组件发光图像,完好电池片发光均匀透亮,而存在隐裂、断栅、虚焊、低效片、遮挡衰减的区域会出现暗斑、黑线、明暗不均等异常特征。该技术可精准识别目视检测、红外检测无法发现的内部细微故障,精准判定组件损伤程度与失效范围,为组件维修、更换提供精准依据,是电站精细化运维的重要技术支撑。但EL检测需在夜间或弱光环境下离线开展,检测流程复杂、效率偏低,设备与人工成本较高,不适用于大规模电站的常态化快速巡检,多应用于故障复核与组件质量抽检。

3 智能化与在线故障诊断技术

3.1 基于数据分析的远程诊断

基于数据分析的远程诊断是依托大数据、物联网技术,实现光伏电站故障在线、实时、远程诊断的智能化技术,彻底突破传统离线检测的时空限制。该技术通过电站数据采集终端,全天候实时采集各组串发电功率、电压、电流、设备温度、并网数据、环境气象等多维度运行参数,将数据实时上传至云端平台。平台通过构建标准化数据模型,对比分析实时运行数据、历史正常数据与行业标准数据,挖掘数据异常波动规律,精准识别组件衰减、设备异常、线路故障、遮挡干扰等各类问题。同时可通过数据趋势预判设备老化、性能衰减隐患,实现从“故障后维修”向“故障前预警”转变。该技术无需现场操作、监测全覆盖、响应速度快,适配规模化光伏电站运维需求,但数据精准度依赖采集设备精度与数据模型完善度^[3]。

3.2 无人机智能巡检技术

无人机智能巡检技术是集成航拍成像、卫星定位、智能传感的新型在线巡检技术,有效解决大型光伏电站人工巡检效率低、覆盖不全、高危区域难排查的痛点。通过搭载高清摄像头、红外热成像仪的无人机,按照预设航线自动巡航,全面采集光伏阵列、电气设备的可视化图像与温度数据,实现全站设备无死角巡检。巡检过程中,无人机可实时回传影像数据,后台系统同步分析图像异常与温度热点,快速定位组件热斑、破损、遮挡,设备过热、外观损毁等故障。相较于传统人工巡检,无人机巡检速度快、覆盖范围广、安全性高,可大幅降低人工运维成本,提升巡检频次与覆盖度。同时可适配山地、水面、荒漠等复杂电站场景,实现常态化在线巡检,但易受大风、雨雪、大雾等恶劣天气影响,巡检精度会有所下降。

3.3 基于人工智能的故障识别算法

基于人工智能的故障识别算法是光伏电站智能故障诊断的核心核心技术,依托深度学习、机器视觉、数据挖掘算法,实现故障自动化、精准化、智能化识别。该算法通过海量光伏设备故障图像、运行异常数据完成模型训练,可自主学习不同故障的特征规律,针对红外热力图、EL图像、设备运行数据进行智能分析,精准区分组件热斑、隐裂、断栅,电气设备过载、短路、老化等不同类型故障,同时可判定故障等级与影响范围。相较于传统人工判别,AI算法识别速度快、准确率高,可规避人工判别主

观误差,实现海量巡检数据的快速批量处理。此外,算法可通过持续迭代优化,适配不同场景电站的故障特征,不断提升故障识别精度,为智能诊断、自动预警、运维决策提供核心技术支持,是光伏运维智能化升级的关键。

3.4 智能巡检机器人应用

智能巡检机器人是适配光伏电站常态化在线巡检的自动化设备,集成自主导航、智能传感、图像采集、数据传输、AI分析等多重功能,可替代人工完成全天候不间断巡检作业。机器人搭载高清成像、红外测温、电气参数采集模块,可沿预设轨道自主行走,对光伏组件、配电柜、逆变器、线缆等设备进行全方位检测,实时采集设备外观图像、温度、运行参数等数据。同时依托内置AI算法,现场完成故障初步识别与数据研判,及时上传异常故障信息与定位点位。该设备可实现24小时不间断巡检,不受人工作息、天气轻微变化影响,巡检稳定性与连续性远超人工巡检,可有效降低漏检、误检概率。适用于地面集中式、屋顶式各类光伏电站,大幅提升运维自动化水平,降低人工运维强度与成本,助力电站故障实时防控。

4 光伏电站智能运维管理平台构建

4.1 平台架构设计

光伏电站智能运维管理平台采用分层化、模块化、云端协同的架构设计,遵循实用性、扩展性、稳定性原则,全面适配电站智能化运维与故障管理需求,整体分为感知层、传输层、平台层、应用层四大层级。感知层为数据采集终端,包含各类传感器、数据采集器、无人机、巡检机器人等,负责采集电站设备运行、环境、故障等全维度数据。传输层依托5G、物联网、光纤通信技术,实现各类数据的实时、稳定传输,保障数据双向互通。平台层为核心云端处理中心,包含数据存储、数据分析、AI算法、数据处理模块,完成数据清洗、存储、分析、故障研判等核心工作。应用层面向运维管理人员,集成监控、预警、运维、统计、管理等功能,提供可视化操作界面。分层架构分工明确、拓展性强,可适配不同规模光伏电站,支持后续功能迭代与设备接入。

4.2 核心功能模块

光伏电站智能运维管理平台搭载多类核心功能模块,全面覆盖电站运行监控、故障诊断、运维管理、数据统计全流程业务,实现运维工作数字化、智能化管控。核心模块主要包含实时监控模块、智能故障诊断预警模块、运维工单管理模块、数据统计分析模块、设备资产管理模块。实时监控模块可可视化展示全站设备运行状态、发电数据、环境参数,实现全天候动态监

测^[4]。故障诊断预警模块依托AI算法与数据分析,自动识别故障、推送预警信息、定位故障点位。运维工单模块支持故障工单自动派发、进度跟踪、闭环管理,规范运维流程。数据统计模块自动汇总发电数据、故障数据、运维数据,生成报表与趋势分析。资产管理模块统筹设备台账、检修记录、老化状态,实现设备全生命周期管理,全方位提升运维管控效率。

4.3 运维策略优化

光伏电站智能运维管理平台依托大数据与智能分析能力,打破传统人工被动运维模式,实现运维策略的智能化、精细化、高效化优化升级。传统运维多采用定期检修、故障抢修模式,存在运维盲目性、资源浪费、故障处置滞后等问题。平台通过分析设备运行数据、故障频次、老化规律、环境影响因素,精准判定设备运行状态,制定差异化运维策略,将传统定期检修优化为状态检修、预测性检修。针对高频故障点位、老化设备提前制定预维护方案,提前规避故障停机风险;依据故障等级、影响范围智能分配运维资源,优先处置重大故障,提升运维响应效率。通过数据复盘持续优化运维方案,减少无效运维作业,降低设备故障率与运维成本,最大化提升光伏电站发电效率、设备使用寿命与整体运维效益。

5 结束语

本文系统研究了光伏电站故障诊断与智能运维技术,构建从感知采集到平台决策的完整体系。通过融合无人机、智能机器人及AI算法,突破传统人工巡检的时空限制,实现故障的实时监测与精准识别。智能运维平台的应用推动了运维模式向预测性维护转变,有效降低运维成本与故障率。该研究为光伏电站数字化转型提供技术支撑,对保障电站长期高效稳定运行具有重要的工程应用价值。

[参考文献]

- [1]杨华.光伏电站智能组串式逆变器故障诊断与自愈技术研究[J].中国高新科技,2026(5):57-59.
- [2]宋建刚.光伏电站智能运维技术与发电效率优化研究[J].农村电气化,2026,466(3):30-33.
- [3]刘子祺.光伏电站设备状态监测与故障诊断技术研究[J].电力系统装备,2026(1):131-133.
- [4]张宏伟,龚优军,王洛南,等.光伏电站的智能运维技术应用研究[J].通讯世界,2024,31(2):106-108.

作者简介:

刘兆颀(2003--),男,汉族,山西人,本科,研究方向:新能源。