

分布式光伏电站故障诊断与维护技术研究

宓晨豪 金湘瑜 王宇能

浙江芯能光伏科技股份有限公司，浙江省海宁市，314400；

摘要：分布式光伏电站的故障诊断与维护技术通过实现先进的监测和响应策略，极大提高了系统的运行效率和可靠性。文中详细探讨了故障诊断中的信号分析、电气参数监测以及故障定位方法，这些技术能够精确快速地识别和定位系统故障，减少停机时间。优化的维护策略，包括预防性维护和快速响应机制，进一步提升了系统的稳定性和经济效益。系统性能的持续监测与优化措施保证了光伏电站在各种环境下的最佳运行状态。

关键词：故障诊断技术；维护策略优化；性能监测与优化

DOI：10.69979/3041-0673.24.10.003

引言

随着分布式光伏电站的广泛应用，故障诊断与维护的需求日益增长。光伏电站的高效运行直接影响着能源利用效率及经济效益。本文聚焦于分布式光伏电站的故障诊断和维护技术，通过对常见问题的分析，研究针对性技术手段，优化维护策略，从而提升系统稳定性，减少停机损失。

1 故障诊断技术

1.1 信号分析技术

在分布式光伏电站的故障诊断中，信号分析技术是一种基础且关键的方法，用于识别和分析电站中的异常信号，从而快速定位故障源。该技术主要通过收集光伏系统的电压、电流和频率等信号，利用数据分析对这些信号进行详细的谱分析和时序分析。通过对信号的持续监测，可以实时探测到系统性能的微小变化，这些变化往往是故障预警的重要指标。信号的频谱分析可以揭示系统内部的谐波和噪声水平，这些谐波和噪声可能是由逆变器故障、接线问题或组件损坏引起的。频谱分析帮助技术人员区分正常运行状态与故障状态的信号特征，进而判断故障类型。其次，时序分析关注信号随时间变化的趋势，它能够显示设备在不同运行条件下的表现，通过这些信息，维护团队可以预测设备的寿命和维护周期。高级的信号处理方法如小波变换等也被广泛应用于故障信号的分析中^[1]。小波变换特别适用于非稳态信号的分析，它能够在时间-频率域内提供更加精确的局部信号特征，从而使得故障诊断更加准确和及时。

信号分析技术为光伏电站的故障检测和诊断提供

了一种有效的工具，不仅可以提高故障诊断的速度和准确性，还能够在故障发生前进行预警，极大地降低了维护成本和系统停机时间。通过持续的技术发展和应用，信号分析技术在未来光伏电站运维中将发挥更大的作用。

1.2 电气参数监测

电气参数监测在分布式光伏电站的故障诊断中扮演着核心角色。这一技术通过精确测量如电流、电压、功率因数、频率及温度等关键电气参数，对光伏系统的运行状况进行全面评估。通过部署高精度传感器和数据采集系统，可以实时收集和分析这些参数，从而有效监控电站的健康状态。电压不平衡度和电流的谐波畸变率是电气健康的重要指标。正常情况下，电压不平衡度应控制在 3% 以内，而谐波畸变率则不应超过 5%。若参数超出这些标准阈值，可能预示着逆变器或其他电力组件存在性能降低或损坏的风险。功率因数的监测也至关重要，它反映了电站能量转换的效率和质量。在优化运行策略中，保持功率因数接近 1 是提高能源利用率和减少能量损耗的关键。

为了进一步提升故障预测的准确性和响应速度，高级监测系统还会利用机器学习技术对收集到的数据进行深度分析，从而识别出微小的异常模式，这些模式可能在传统监测方法中不易被发现^[2]。通过这种方式，电气参数监测不仅可以实时反映电站的即时状态，还能提前警示潜在的系统故障，大大减少非计划性维护的需求和相关成本。

1.3 故障定位方法

故障定位是分布式光伏电站故障诊断中的一个关

键技术环节，涉及使用高精度的测量和分析工具来精确定位系统故障的具体位置。这一技术通常包括阻抗测量、电气签名分析以及热像技术等多种方法。阻抗测量利用故障回路的特定阻抗特征来识别故障点。通过测量光伏阵列和逆变器之间的阻抗变化，可以有效地定位到故障电缆或连接器。在典型应用中，正常运行的光伏系统阻抗应保持在一定范围内，一旦检测到异常阻抗值，就可以判断为故障存在。

电气签名分析技术则是通过分析电气设备在正常与异常工作状态下的电气特性（如电压、电流波形）差异进行故障诊断。这种方法能够通过捕捉微小的电气特性变化来预测并定位故障，常用于检测和诊断逆变器故障、开路和短路等问题。热像技术，又称为红外热成像，是通过检测光伏组件的温度分布来识别故障区域。正常情况下，光伏板的热图应均匀一致；若某区域温度异常升高，可能指示该部分存在电气故障或物理损伤。这些高级故障定位技术，不仅提高了故障诊断的精确性和效率，也大大减少了维护成本和系统停机时间，确保了光伏系统的持续高效运行。

2 维护策略优化

2.1 预防性维护技术

预防性维护技术是光伏电站维护策略中的一项核心技术，旨在通过定期检查和维护操作预防系统故障的发生，从而降低维护成本并延长设备使用寿命。该技术依赖于对光伏系统关键组件的持续监测，如逆变器、电缆、连接器及光伏板等。关键电气参数如电压、电流和温度的连续监测，能够提前揭示组件性能下降的迹象。光伏板的功率输出如果低于其标称值的 80%，即可能预示着潜在的效率问题或损伤。逆变器的效率分析也是预防性维护中不可或缺的一环，逆变器效率应保持在 95% 以上，效率下降可能指示硬件故障或环境因素影响。

此技术的实施通常包括对硬件的物理检查、系统软件的更新和调整、以及对维护日志的详细记录和分析。通过数据驱动的维护决策，可以优化维护计划和周期，实现故障的早期检测和处理。通过分析历史维护数据和当前系统表现，可以制定更有效的清洁和检查周期，确保系统在最佳状态下运行^[3]。预防性维护不仅提高了系统的可靠性和安全性，还有助于显著减少意外停机和维修时间，确保光伏电站的持续高效运作。

2.2 故障快速响应机制

故障快速响应机制是光伏电站维护策略中的关键组成部分，目的是最小化系统故障后的响应时间和恢复时间，从而保证电站的持续运行和电力输出的稳定性。此机制依赖于高效的故障检测系统和迅速的维修团队动员。自动故障检测系统通过实时监控电站的关键性能参数，如输出功率异常下降、电流不稳定、或电压波动超过正常范围（通常为 $\pm 5\%$ ），即可触发警报。一旦监测到光伏板的输出功率突然下降 10% 以上，系统会立即通知维护中心。

维护团队则配备了移动维护管理系统，能够在接收到故障通知的瞬间，快速评估故障情况并调派最近的服务技术人员。这种动员机制通常通过 GPS 定位和移动通信技术实现，确保维修人员能在最短时间内到达故障现场。维护团队会根据历史故障数据和现场情况，携带必要的备件和工具，以便快速解决常见故障。此快速响应机制的有效实施大幅减少了光伏电站因故障导致的停机时间，从而显著提高了系统的整体运行效率和经济性。实践表明，快速响应机制可以将故障修复时间从几小时减少到一小时以内，极大地提升了系统的可靠性和客户满意度。

2.3 组件运行状态评估

组件运行状态评估是光伏电站维护策略中关键的一环，旨在通过系统的分析和监测确保光伏组件的最优运行状态。这一过程涉及对光伏电站各关键组件，如光伏板、逆变器、电缆系统等，进行定期的性能评估和寿命预测。性能参数如光伏板的填充因子（FF）和最大功率点（MPP）是评估光伏板性能的关键指标。典型的填充因子应在 76% 以上，以保证光电转换效率。逆变器的效率通常应保持在 95% 以上，其运行效率的下降通常预示着内部故障或配置问题。电气特性的监测，包括短路电流（ I_{sc} ）和开路电压（ V_{oc} ），这些参数的变化可以反映光伏板的老化或损伤程度。开路电压的持续下降可能指示硅片劣化或接触不良。短路电流的减少则可能由遮挡、污染或连接器腐蚀引起。

通过高级数据分析技术，比如故障模式和影响分析（FMEA），可以对组件的潜在故障模式进行系统性的评估。这种分析帮助维护团队识别出可能影响性能和寿命的关键因素，从而实施针对性的维护措施。通过这些综合性能和电气特性的评估，维护团队能够实现预见性维

护,即在组件发生故障之前预测并解决问题,这大大提高了光伏系统的可靠性和经济效益减少了意外停机的风险^[4]。实施有效的组件运行状态评估,是确保光伏电站长期稳定运行的关键步骤。

3 系统性能监测与优化

3.1 系统性能指标评估

系统性能指标评估是关键的过程,用于确保分布式光伏电站的高效和稳定运行。这一评估通常涵盖光伏系统的多个性能参数,包括能量产出效率、系统损耗率、及各项性能比(Performance Ratio, PR)等。能量产出效率是评估光伏电站效率的直接指标,通常以千瓦时每千瓦峰值(kWh/kWp)计量。理想情况下,高效的光伏电站应在年均能量产出超过 1200 kWh/kWp。系统损耗率则涵盖了从逆变器效率损失、温度影响到阵列匹配损失的各类性能下降因素,精确评估这些损耗对于优化运行策略至关重要。

性能比是评估光伏电站输出相对于理论最大输出的比例,是衡量系统整体性能的关键指标。在无遮挡和理想天气条件下,性能比应接近 85%以上。通过实时监控性能比,可以有效识别系统中存在的潜在问题,如组件老化或配置错误。系统性能指标的评估还包括对电站运行的环境因素的监控,如光照强度、温度和风速等。环境监控有助于分析环境变化对电站性能的实际影响,并调整操作以适应这些变化。

通过集成先进的监测设备和数据分析平台,这些性能指标可以持续跟踪并优化,以确保光伏电站在不同环境和运行条件下都能达到最优性能。实施这一全面的性能指标评估,是提升光伏电站经济效益和可持续性的关键步骤。

3.2 功率损耗分析

功率损耗分析是光伏电站系统性能监测的重要组成部分,它涉及对系统内部和外部因素导致的能量损失进行详细分析。这包括逆变器损耗、线路损耗、温度效应以及阴影和污染等造成的影响。逆变器效率是功率损耗分析中的核心参数。在理想条件下,现代逆变器的转换效率应达到 98%以上。实际操作中,逆变器损耗可能因设备老化或环境因素而增加。逆变器的热损耗在总损耗中可占比 5%至 10%,这一损耗随环境温度的升高而增

加。

线路损耗包括由于电阻引起的能量损耗,这在电缆长距离传输电能时尤为明显。光伏系统设计时应考虑最大限度地减少线路长度,以减少这种类型的损耗,通常线路损耗应控制在 3%以内。光伏板的温度升高会显著影响其性能,每增加 1°C,光伏板的效率将下降约 0.4%至 0.5%。监测环境温度并采取散热措施是减少温度损耗的有效策略。

通过高级数据分析技术,可以实时监控这些损耗参数,并通过算法优化系统配置和维护计划,以最大化能量输出。通过动态调整逆变器的工作点,可以优化其效率,降低热损耗。定期清洁光伏板以减少阴影和污染带来的损失也是提高系统整体性能的有效方法。综合利用这些策略和技术,功率损耗分析不仅帮助提高光伏电站的能效,还能显著提升经济回报和系统可靠性。

3.3 运行状态优化措施

运行状态优化措施是确保分布式光伏电站持续高效运行的关键环节。这些措施包括实时调整系统设置、定期维护、以及使用先进的配置管理技术,以最大化电站的能量产出和运行效率。实时系统监控是优化操作的基础。通过部署高精度传感器和智能监控系统,可以实时获得光伏板的输出功率、逆变器的转换效率和电网的负载需求等数据。通过监测和分析逆变器的工作点,可以动态调整其参数,以适应不同的环境条件和负载需求,保持最佳的转换效率^[5]。预测性维护策略通过分析历史运行数据和当前系统性能,可以预测潜在故障并提前介入,从而避免系统停机。通过对逆变器的温度和电流异常模式的长期监测,可以预见到潜在的硬件故障,及时进行维修或更换,以防系统性能下降。

优化阵列布局和组件配置也是提升系统效率的关键措施。通过调整光伏板的倾角和方向,可以使光照接收最大化,尤其在季节变换明显的地区。确保所有光伏板的配置和连接正确无误,可以减少能量传输过程中的损失。通过这些综合措施,光伏电站可以实现更高的能量转换效率和更低的运维成本。适当的逆变器参数调整和阵列配置优化可以提升整体系统效率约 5%至 10%,显著增加电站的年度电力产出。这些优化不仅提升了经济效益,同时也增强了系统的环境适应性和可靠性。

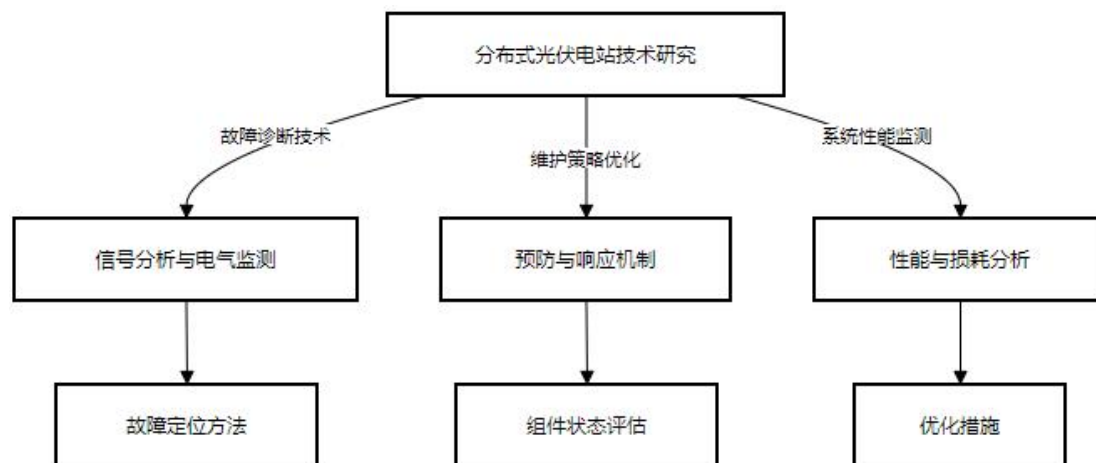


图 1 分布式光伏电站故障诊断与维护技术概览

4 结论

在本研究中我们深入探讨了分布式光伏电站的故障诊断与维护技术。通过实施先进的故障诊断技术、优化维护策略以及系统性能监测与优化，不仅可以显著提高系统的可靠性和效率，还能有效降低运维成本。特别是通过电气参数监测和故障快速响应机制，确保了电站能够在面临故障时迅速恢复功能，最大限度地减少停机时间。综上所述，持续优化技术和策略是提升分布式光伏电站性能和经济效益的关键。

参考文献

[1] 毛源军. 基于计量数据的分布式光伏系统故障诊断研究[D]. 长沙理工大学, 2022.

[2] 姚渊, 王欢, 孙婷, 等. 基于居民用户分布式光伏运行诊断的探索与研究[C]//全国第四届“智能电网”会议论文集. 2019.

[3] 高斌. 基于信息化的分布式光伏电站智慧运维模式研究[J]. 通信电源技术, 2024, 41(6): 243-245.

[4] 朱俊杰, 吕亮, 吴昊, 等. 分布式光伏发电设备的能效诊断方法, 系统及介质: CN202111153747. 7[P]. CN202111153747. 7[2025-01-03].

[5] 曹俊, 王珂, 林军, 等. 基于广义大数据技术的光伏项目典型故障诊断[J]. 中国设备工程, 2023(S02): 237-240.

作者简介: 宓晨豪, 男, 1999 年 12 月出生, 大专学历 (2020 年 1 月海宁技师学院), 浙江芯能光伏科技股份有限公司员工, 主要从事电站设计工作。