

光伏阵列故障诊断技术综述

王 艳

新疆兵安电力建设有限责任公司 新疆 图木舒克 844000

摘 要: 光伏阵列故障诊断技术对于保障光伏系统稳定运行至关重要。当前, 该技术主要涵盖视觉与成像诊断、电气特征参数诊断及智能诊断等方法。多技术融合、智能化与自动化以及面向复杂工况的诊断成为发展趋势。通过整合多种技术, 实现优势互补, 提高诊断准确性; 借助人工智能等提升自动化水平; 针对复杂环境研发适用技术。未来, 该技术将不断创新, 为光伏产业高效、安全发展保驾护航。

关键词: 光伏阵列; 故障诊断技术; 发展趋势

1 光伏阵列常见故障类型及影响

1.1 故障类型

光伏阵列作为太阳能发电系统的核心组成部分, 其稳定运行对于整个系统的效能至关重要。在实际运行过程中, 光伏阵列常会遇到多种故障类型, 这些故障大致可分为组件故障、电气连接故障以及环境因素导致的故障等几大类。组件故障是光伏阵列中最常见的故障之一, 主要包括电池片破裂、老化、热斑效应等。电池片破裂可能是由于运输、安装过程中的不当操作或外界物体的撞击造成的, 这会导致电池片的电气性能下降, 甚至完全失效。老化则是由于长期暴露在自然环境中, 材料逐渐退化, 影响组件的发电效率。热斑效应则是由于组件内部电池片之间的不匹配或局部遮挡, 导致部分电池片温度过高, 长期以往会加速组件的老化, 甚至引发火灾^[1]。电气连接故障也是光伏阵列中不可忽视的问题, 包括接线盒故障、电缆老化、连接松动等。接线盒作为组件与电缆之间的连接枢纽, 其内部元件的损坏或接触不良会直接影响电流的传输, 导致发电效率降低。电缆老化则可能引发短路或断路, 严重威胁系统的安全运行。连接松动则可能由于风振、温度变化等因素导致, 长期以往会造成接触电阻增大, 发热严重, 甚至引发火灾。环境因素导致的故障同样不容忽视, 如沙尘、污垢覆盖组件表面, 会显著降低组件的透光率, 从而影响发电效率。极端天气条件如暴雨、冰雹、雷电等也可能对光伏阵列造成物理损坏, 如组件破裂、支架变形等。

1.2 故障影响

光伏阵列的故障不仅会影响其自身的发电效率, 还可能对整个太阳能发电系统造成连锁反应, 带来一系列不良影响。故障会直接导致发电效率下降, 减少系统的发电量, 从而影响用户的用电需求或电网的供电稳定性。对于依赖太阳能发电的偏远地区或离网系统来说,

这种影响尤为显著。故障可能引发安全隐患, 如电气火灾、触电事故等。特别是当故障导致电缆短路、组件过热时, 极易引发火灾, 对人员和设备造成威胁。故障还会增加系统的维护成本。无论是组件的更换、电气连接的修复还是环境因素的应对, 都需要投入大量的人力、物力和财力。长期以往, 会显著增加系统的运行成本, 降低其经济性。

2 光伏阵列故障诊断技术现存问题

2.1 多故障类型并存诊断困难

光伏阵列在实际运行过程中, 常常面临多种故障类型并存的复杂局面, 这给故障诊断带来了极大的挑战。光伏阵列的故障类型繁多, 包括但不限于组件老化、线路短路、开路、热斑效应、隐裂、PID (电势诱导衰减) 现象等。这些故障可能单独出现, 也可能同时或相继发生, 形成复杂的故障模式。当多种故障并存时, 故障特征相互交织, 难以准确区分和定位。例如, 组件老化和热斑效应都可能导致输出功率下降, 但两者的成因和解决方法截然不同。若不能准确诊断出具体故障类型, 就无法采取针对性的维修措施, 导致故障持续存在甚至恶化。多故障并存还可能引发连锁反应, 使得原本单一的故障演变为更严重的系统问题, 进一步增加了诊断的难度和复杂性。目前, 现有的故障诊断技术大多针对单一故障类型进行设计, 对于多故障并存的复杂情况缺乏有效的诊断策略。如何开发能够准确识别并区分多种故障类型的诊断技术, 成为当前光伏阵列故障诊断领域亟待解决的问题之一。

2.2 诊断技术可靠性待提高

尽管近年来光伏阵列故障诊断技术取得了一定的进展, 但整体而言, 其可靠性仍有待提高。诊断技术的可靠性主要体现在诊断结果的准确性和稳定性上。然而在实际应用中, 由于光伏阵列运行环境复杂多变, 以及诊

断技术本身的局限性,导致诊断结果往往存在一定的误差和不确定性。一方面,光伏阵列的运行环境受到光照强度、温度、湿度等多种因素的影响,这些因素的变化会直接影响故障特征的提取和识别^[2]。另一方面,现有的诊断技术大多基于特定的算法和模型,这些算法和模型在训练过程中可能受到数据质量、样本数量等因素的限制,导致其在面对复杂多变的故障情况时表现不佳。另外,诊断技术的可靠性还受到设备老化、传感器精度等因素的影响。随着光伏阵列运行时间的增长,设备逐渐老化,其性能也会发生变化,这可能导致诊断结果出现偏差。传感器的精度和稳定性也会直接影响故障特征的采集和传输,进而影响诊断结果的准确性。

2.3 缺乏统一标准与平台

目前,光伏阵列故障诊断领域缺乏统一的标准和平台,这也是制约该领域发展的重要因素之一。由于缺乏统一的标准,不同厂家生产的诊断设备和软件在数据格式、接口协议、诊断方法等方面存在差异,导致这些设备和软件之间难以实现互联互通和协同工作。这不仅增加用户的使用成本和维护难度,也限制诊断技术的推广和应用。缺乏统一的平台也导致诊断数据的共享和分析变得困难,在实际应用中,不同用户、不同厂家可能积累大量的诊断数据,但由于缺乏统一的平台和数据格式标准,这些数据难以实现有效的整合和利用。这不仅浪费宝贵的诊断资源,也限制诊断技术的创新和发展。

3 光伏阵列故障诊断方法

3.1 视觉与成像诊断方法

视觉与成像诊断方法是一种直观、有效的光伏阵列故障诊断手段。它主要依赖于人工巡检或利用无人机、机器人等搭载的高清摄像头对光伏阵列进行外观检查,通过捕捉组件表面的图像信息,识别出如裂纹、破损、热斑、阴影遮挡等可见故障。人工巡检是最基础也是最常用的视觉诊断方法,巡检人员通过肉眼或借助望远镜、热成像仪等工具,对光伏组件进行逐一检查,记录并报告发现的异常情况。这种方法虽然简单直接,但效率较低,且受巡检人员经验和主观判断的影响较大。无人机巡检则大大提高了巡检效率和覆盖范围,无人机可以搭载高清摄像头和热成像仪,对光伏阵列进行全方位、无死角的拍摄,快速识别出组件表面的故障。无人机还可以根据预设的航线自动飞行,减少人为因素的干扰,提高巡检的准确性和一致性。红外热成像技术是视觉与成像诊断方法中的重要补充。它利用红外辐射原理,检测光伏组件表面的温度分布,从而发现因接触不良、短路等引起的局部过热现象。热斑效应是光伏组件

中常见的故障之一,它会导致组件局部温度过高,加速材料老化,甚至引发火灾。红外热成像技术能够准确识别出热斑的位置和范围,为后续的维修工作提供有力支持。

3.2 电气特征参数诊断方法

电气特征参数诊断方法是通过监测光伏阵列的电气参数,如电压、电流、功率等,来分析其运行状态,判断是否存在故障。这种方法基于电路理论和电磁场理论,通过对比正常运行和故障状态下的电气参数差异,来识别故障类型和位置。I-V特性曲线分析是电气特征参数诊断方法中的常用手段,光伏组件的I-V特性曲线反映了其输出电流与电压之间的关系,是评估组件性能的重要指标。当组件出现故障时,其I-V特性曲线会发生明显变化。通过对比正常曲线和故障曲线,可以判断出故障的类型和严重程度。时域反射法(TDR)则是一种用于检测光伏阵列中线路故障的方法。它利用电磁波在传输线中的传播特性,通过测量反射波的时间和幅度,来确定故障点的位置^[3]。TDR方法具有定位准确、操作简便等优点,在光伏阵列的线路故障诊断中得到了广泛应用。功率损失分析也是电气特征参数诊断方法中的重要环节,通过监测光伏阵列的输出功率,并与理论值进行对比,可以计算出功率损失的大小。功率损失过大可能意味着组件老化、遮挡、故障等问题。进一步分析功率损失的原因,可以定位到具体的故障组件或线路。

3.3 智能诊断方法

智能诊断方法是利用人工智能、机器学习等技术,对光伏阵列的故障进行自动识别和分类。基于机器学习的故障诊断是智能诊断方法中的核心。通过收集大量的光伏阵列运行数据,包括电气参数、环境参数、图像信息等,利用机器学习算法对这些数据进行训练和学习,建立故障诊断模型。当新的数据输入时,模型可以自动判断其是否属于故障状态,并给出故障类型和位置。深度学习技术在光伏阵列故障诊断中也得到了广泛应用,深度学习算法能够自动提取数据中的特征,无需人工干预,从而提高了故障诊断的准确性和鲁棒性。例如,卷积神经网络(CNN)可以用于处理图像数据,识别出组件表面的故障;循环神经网络(RNN)则可以用于处理时间序列数据,预测组件的性能变化趋势。专家系统也是智能诊断方法中的重要组成部分。它结合了领域专家的知识 and 经验,通过推理机制来模拟专家的决策过程。当光伏阵列出现故障时,专家系统可以根据输入的信息和预设的规则,给出故障诊断结果和维修建议。

4 光伏阵列故障诊断技术发展趋势

随着光伏产业的迅猛发展,光伏阵列作为太阳能发

电系统的核心组件，其稳定运行对于整个系统的效能至关重要。光伏阵列在运行过程中不可避免地会遇到各种故障，这些故障不仅影响发电效率，还可能带来安全隐患。因此光伏阵列故障诊断技术的发展成为行业关注的焦点。当前，光伏阵列故障诊断技术正呈现出多技术融合诊断、智能化与自动化诊断以及面向复杂工况的诊断技术研究等发展趋势。

4.1 多技术融合诊断

多技术融合诊断是光伏阵列故障诊断技术的一个重要发展方向。传统的故障诊断方法往往依赖于单一的检测手段，如视觉检查、电气参数测量等，这些方法虽然在一定程度上能够发现故障，但存在局限性，难以全面、准确地诊断出所有类型的故障。多技术融合诊断则通过整合多种检测技术和方法，实现优势互补，提高故障诊断的准确性和可靠性。具体来说，多技术融合诊断可以结合视觉与成像技术、电气特征参数检测技术、红外热成像技术、超声波检测技术等多种手段，对光伏阵列进行全面、细致的检测。例如，视觉与成像技术可以直观地识别出组件表面的裂纹、破损等可见故障；电气特征参数检测技术则可以监测光伏阵列的电压、电流、功率等电气参数，分析组件的性能变化；红外热成像技术可以检测组件表面的温度分布，发现热斑等潜在故障；超声波检测技术则可以检测组件内部的缺陷和损伤。通过将这些技术有机结合，可以实现对光伏阵列故障的全面、准确诊断。

4.2 智能化、自动化诊断

随着人工智能、机器学习等技术的快速发展，这些技术逐渐被应用于光伏阵列故障诊断领域，使得故障诊断过程更加智能化、自动化。智能化诊断技术可以通过对大量故障数据的学习和分析，建立故障诊断模型，实现对故障的自动识别和分类。例如，利用深度学习算法对光伏阵列的故障图像进行训练，可以构建出高效的故障识别模型，当新的故障图像输入时，模型可以自动判断故障类型和位置。自动化诊断技术则可以通过传感器、数据采集系统等设备，实现对光伏阵列运行状态的实时监测和数据采集，并将数据传输到诊断系统中进行自动分析。一旦检测到故障，系统可以自动发出警报，并提供维修建议，大大提高了故障诊断的效率和准确性^[4]。智能

化、自动化诊断技术还可以实现远程监控和诊断。通过互联网技术，可以将光伏阵列的运行数据和故障信息实时传输到远程监控中心，由专业人员进行分析和诊断。这种方式不仅提高故障诊断的及时性，还降低现场巡检的成本和风险。

4.3 面向复杂工况的诊断技术研究

随着光伏阵列应用场景的不断拓展，其运行环境也变得越来越复杂。例如，在沙漠、高原、海洋等恶劣环境下，光伏阵列面临着高温、高湿、沙尘、盐雾等多种因素的侵蚀，这些因素都会增加故障发生的概率和诊断的难度。因此面向复杂工况的诊断技术研究成为光伏阵列故障诊断技术的一个重要发展方向。面向复杂工况的诊断技术研究需要充分考虑环境因素对光伏阵列性能的影响，开发适应不同工况的故障诊断方法和算法。在高湿环境下，组件表面容易结露和积水，导致绝缘性能下降，因此需要研究能够检测湿度相关故障的技术。还需要研究能够抵抗沙尘、盐雾等侵蚀的故障诊断技术，以提高光伏阵列在恶劣环境下的可靠性和稳定性。

结束语

光伏阵列故障诊断技术作为光伏领域的关键环节，已取得显著进展。多种诊断方法并行，发展趋势明确，为应对日益复杂的光伏系统故障提供了有力支撑。随着光伏产业的持续拓展，新的挑战也会不断涌现。未来，需进一步加强技术创新，深化多技术融合，提升智能化与自动化水平，完善面向复杂工况的诊断技术，以推动光伏阵列故障诊断技术迈向新高度，助力光伏产业蓬勃发展。

参考文献

- [1]熊昌全.温贤茂.张宇宁.唐道建.光伏组件发电故障诊断方法研究[J].科技创新与应用, 2023, 13(09): 77-81+85.
- [2]孙建民.梁凌.李庚达.段震清, 胡文森.光伏组件故障诊断技术综述[J].太阳能, 2022, (02): 12-22.
- [3]尹也泽.张栋.光伏产业的变迁和现状[J].团结, 2020(2): 22-26.
- [4]李帅.光伏系统的智能故障诊断与维护技术研究[J].电力系统装备, 2024(4): 130-132.