

电力技术

分布式光伏发电系统的状态监测及故障诊断分析

汪帆

国华（陕西）新能源有限公司

【摘要】分布式光伏发电系统以其灵活部署、就地消纳的优势成为新型电力系统的重要组成部分，但其点多面广、运行环境复杂的特点也带来了状态感知困难、故障隐蔽性强等挑战。本文从系统结构与工作机理出发，系统梳理状态监测的关键参数体系与技术路径；深入剖析光伏组件、逆变器及电气系统的主要故障类型与成因；重点探讨基于电气信号特征提取、数据驱动智能算法融合以及多源信息综合决策的故障诊断策略。文章认为，构建面向全生命周期的主动式、自适应诊断体系，是提升分布式光伏系统可靠性与运维效能的核心路径。

【关键词】分布式光伏；状态监测；故障诊断；数据驱动；多源信息融合

State Monitoring and Fault Diagnosis Analysis of Distributed Photovoltaic Power Systems

Wang Fan

Guohua (Shaanxi) New Energy Co., Ltd.

【Abstract】 Distributed photovoltaic power systems have become a vital component of modern power grids due to their flexible deployment and local energy integration capabilities. However, their widespread distribution and complex operational environments pose challenges such as difficulties in condition monitoring and highly concealed fault manifestations. This paper systematically outlines the key parameter framework and technical approaches for state monitoring based on system architecture and operational principles; conducts an in-depth analysis of major fault types and their root causes in photovoltaic modules, inverters, and electrical systems; and focuses on fault diagnosis strategies integrating electrical signal feature extraction, data-driven intelligent algorithms, and multi-source information synthesis. The study concludes that establishing an active, adaptive diagnostic system spanning the entire lifecycle is the cornerstone for enhancing the reliability and operational efficiency of distributed photovoltaic systems.

【Key words】 Distributed photovoltaics; Condition monitoring; Fault diagnosis; Data-driven; Multi-source information fusion

引言：

在“双碳”目标引领下，分布式光伏发电凭借建设周期短、投资门槛低、清洁高效等优势，在工商业屋顶、农业大棚及居民建筑等场景中实现了规模化推广。然而，随着装机容量持续攀升，系统运行的可靠性管理问题愈发凸显：分散化的物理布局使传统人工巡检难以为继，复杂多变的工况则加速了组件的隐性退化进程，局部阴影、热斑效应、绝缘老化等故障往往在系统性能大幅下滑之前便已悄然滋生。面对这一现实挑战，构建高效的状态监测体系与精准的故障诊断机制，已从可选的运维手段演变为保障系统安全经济运行的必要支撑。

一、分布式光伏发电系统状态监测的理论基础

(一) 分布式光伏系统的组成结构与工作原理

分布式光伏发电系统是由光伏组件阵列、汇流设备、逆变器、升压变压器和并网接入装置等几个主要部分组成，各

环节紧密衔接，实现高效的能量转换。光伏组件利用光生伏特效应把太阳辐射能转换成初始直流电，按照需要改变光伏组件的排列方式来满足电压、电流的要求；汇流装置汇集各路支路的电流，同时具有基本保护的功能；逆变器是关键节点，它完成直流到交流的电力变换任务，还要完成最大功率点跟踪、并网相位同步等复杂的控制操作。该系统的工作情况会受到光照强度，环境温度，负载情况，电网状况等诸多要素的影响，其具有明显的非线性，动态发展和与外界环境的相互作用性质。详细剖析能量传递的过程机理，给创建完备的状态监测体系赋予了关键的理论支撑。

(二) 状态监测的关键参数与指标体系

创建高效的设备状态监测体系，关键之处就在于准确挑选系统能量转换的重要节点，塑造起多层次的参数指标体系。从支路来看，主要针对各个支路的开路电压、短路电流以及最大功率点等电气参数的变化情况，异常波动一般和组件内部发生退化或者外部环境造成的影响存在着较强的相关性。从系统层面来讲就要持续观察逆变器两端功率差值、总体运行效率和性能评价指标等，利用横向比较以及历史数

据相加的方法找出隐藏的问题。组件的工作温度分布特点、绝缘电阻随时间变化的规律以及与电网质量有关的技术指标也应该被纳入监测中。单个参数独立评估很难全面反映系统实际健康状况,只有引入多参数间相互作用的机制,才能对复杂系统状态做出准确判断并加以有效控制。

(三) 现有状态监测技术方法综述

目前分布式光伏系统的状态监测技术已经由原来的单个物理量检测转变为现在的多模态融合感知。传统在线电气量监测采用高精度传感器连续采集电压、电流等主要参数的方式,由于部署简便、成本低,因此被广泛使用,但是它的信息维度较小,很难发现早期的故障信号。红外热成像技术利用非接触式成像原理,可以对组件表面温度分布进行全方位的检测,在发现热斑效应等方面比可见光检测要灵敏得多、高效得多。但因为需要专门的仪器,并且必须人工操作,所以不能满足连续性和即时性的要求。以通信网络为依托的远程监控平台已经渐渐成为主要方案,依靠物联网感知层、网络传输层以及数据分析层共同工作来完成分布式节点的状态集中管理和远程可视化操控。目前该领域的挑战有大量数据的处理能力差、监测结果和故障预测之间缺乏联系等问题。

二、分布式光伏发电系统常见故障类型与成因分析

(一) 光伏组件层面的常见故障类型

光伏组件是光伏发电系统的核心发电元件,它的故障特征具有多种属性以及繁杂的特性。热斑效应属于典型的组件级典型故障,是热斑效应。当某一部分电池单元因为遮挡、隐裂或者局部电气失配而承受反向电压的时候,局部区域的能量耗散就会造成过热问题的发生,不但会导致发电效率的急剧下降,还会给封装材料带来不可逆的损害。隐裂是制造、运输、使用过程中慢慢产生的一个隐性的损伤。虽然初始阶段对于组件的外在形象影响不大,但是在长久的压力作用之下,微小的裂缝慢慢蔓延,并且最终发展成内部的电路失效,从而引发功率下降。EVA 胶膜老化的现象有黄变、剥离等,焊带的连接失效,接线盒内电子元器件功能失灵等等。这些故障都具有早期不易察觉,后期却会对系统性能造成较大影响的特点,给监测设备灵敏度及诊断算法的准确度带来更高要求。

(二) 逆变器及电气系统故障成因分析

逆变器属于分布式光伏系统的主器件,它具有很强的集成度以及广泛的影响范围,因此对它的研究十分重要。它的运行机理包含电力电子设备基本特点。功率开关器件退化、失效是造成逆变器故障的主要因素。长时间受到高频切换载荷以及极端温度变化的影响,器件内部的热循环作用越发明显,容易引发焊点的疲劳损害或者短路状况。储能元件——电解电容的性能衰减也不能被忽略,它的内阻增大和容量变小会减弱直流母线电压的稳定程度,从而造成最大功率点跟

踪精度降低和输出信号失真的问题。就电气安全来说,直流侧绝缘性能变差会带来人身触电危险和设备可靠性降低,电缆接头处老化松脱又容易造成局部电阻增大、能耗上升、高温引发电弧燃烧等重大不良影响。对这样的隐患要采取全生命周期内的状态监测和保养措施来保证系统正常运行^[1]。

(三) 外部环境因素对系统运行状态的影响

分布式光伏系统在自然环境中长时间工作的时候,会受到诸多外部环境要素的影响,从而产生繁杂的动态变化特点。光照强度属于重要的影响因素,它直接影响到系统的发电效率;云层遮挡造成的大范围的辐照度迅速波动,会对逆变器的功率调节系统造成干扰,进而降低最大功率点跟踪算法的可靠性。温度会明显影响到光伏组件的电气参数,比如开路电压和短路电流都会因此受到影响,另外还会加快电子元件的老化速度,极端低温还会造成材料出现冷脆性损伤。积尘现象属于光伏板光吸收效率下降的外在干扰之一,非均匀分布的灰尘覆盖会造成局部遮挡,加大失配损耗,并增大热斑故障的发生概率。湿度较高容易造成绝缘材料的老化或者腐蚀,强风、冰雹等极端气象灾害也会对光伏模块的结构完整性造成直接伤害。剖析这些外部因素对系统故障发展过程的影响机理,有利于创建准确的状态监测和预估模型,为光伏系统可靠运行提供科学依据^[2]。

三、分布式光伏发电系统故障诊断方法与策略

在分布式光伏发电系统故障诊断中,不同方法具有各自适用场景。基于电气信号分析的方法依托物理机理,适用于特征明显的故障;数据驱动方法擅长处理复杂非线性问题,但依赖数据质量;多源信息融合方法通过信息互补提升诊断鲁棒性。三者在实际应用中相互配合,形成由特征提取、模式识别到综合决策的协同诊断体系。

(一) 基于电气信号分析的故障特征提取方法

光伏系统故障诊断的核心是分析电气信号特性,主要是对元件的电流电压(I-V)特性进行研究。反映组件全生命周期电气性能的主要指标是I-V曲线,在和理想模型对比分析之后,可以发现由于电阻损耗增大、并联或者串联阻抗改变等引起的变化,进而对故障类型进行准确的判定。当串联电阻增大时,I-V曲线在高电流区的斜率会变得非常陡峭,说明组件在最大功率点附近的实际输出能力大大下降,伴随着功率衰减;并联电阻减小时,低电压区的斜率变平缓,说明漏电流效应增大,电流分流损失增大。两种相反趋势给故障诊断赋予了直观、清楚的视觉证据,有益于技术员凭借曲线特征及时察觉不同失效机理及其发展趋向。以上分析既给理论推导打下了基础,又突出了实验验证的价值,在实践中有着十分重要的意义。对于交流端逆变器输出波形进行谐波分析,有着十分重要的研究意义。某一频率谐波幅值有明显改变,一般和某个部件损坏存在联系。开关器件老化一般造成奇次谐波含量逐渐变大。因此,通过监测谐波成分随时间

变化的趋势,在元件的功能完全失效之前就能发出预警信号,给运维人员提供足够的时间窗口来采取相应的措施。阻抗谱技术采用非接触式激发方法,把小幅度、多频率的扰动信号加入光伏组件里,经由观察系统响应性质来评判光伏组件内部界面稳定情况、电气连接可靠程度等重要参数的优劣。以上的方法都依靠物理机理来建立模型,具有很强的科学性以及可解析性。由于它的测试条件十分严格并且操作麻烦,所以实际应用时要对检测的准确性和执行的方便性进行权衡,根据具体的环境来选择合适的方法与手段^[3]。

(二) 数据驱动与智能算法融合的诊断策略

边缘计算和人工智能技术不断发展的大环境下,数据驱动型的方法已经成为分布式光伏故障诊断领域的主要研究方法。利用以机器学习为代表的新技术手段可以从中抽取大量的历史运行数据,从中找到非线性的联系,构建起一个输入特征和输出标签之间的映射模型,进而找到正常工况与各种故障模式之间存在的内在规律。该方法大幅度减轻了对传统物理概念的使用,进而大大提高了故障识别能力。基于深度学习的神经网络有很强的特征提取能力,卷积神经网络(CNN)采用局部感受野和参数共享的方法,在处理时间序列数据的时候比传统的算法要更好一些。由于它的图像空间结构特征敏感,所以它对于热斑检测和异常电流波形分类任务有着出色的表现。由于RNN具有长短期依赖建模能力,因此它适合于处理设备状态随时间变化的趋势问题,给健康管理提供技术支持。引入注意力机制以后,模型可以动态地集中到重要的故障区段上,在时间范围内对故障区域做更加细致、准确地分析,从而大幅度地提高核心故障信息识别的准确率,使整个诊断效果不断上升。为了克服由于分布式光伏系统故障样例分布不均匀所造成的制约,目前的研究大多使用迁移学习、生成对抗网络等先进的方法。迁移学习依靠源域知识的有效迁移来大大降低目标任务所要花费的数据标注次数,生成对抗网络利用虚拟数据扩充手段使训练集变大,多样化,进而让模型具备了小样本条件下快速学习的能力。技术更新时要注意领域专业知识有机地融合到算法架构的设计中,从而使模型既有新意又有实际的应用价值,实现理论研究同实践操作的共同发展^[4]。

(三) 多源信息融合的综合诊断决策机制

单一模态监测数据由于信息维度的限制,不能全面地体

现光伏系统所有的健康情况。创建起多源异构信息融合的综合诊断决策体系,就成了加强诊断精确性的主要途径。该框架会把电气量、气象环境参数、热红外成像以及设备台账这些各方面的信息集合起来,依靠各个信息源之间的互补效应来加强诊断结果的覆盖面以及准确程度。从技术实现角度来说,融合方式大体上可分为两大类,即特征级融合和决策级融合。第一种是用标准化特征映射来分析同一特征空间中的数据,适用于同步性好的情况;第二种则是各个模态分别做初步判断之后,再用专家经验或者统计学方法(贝叶斯推理等)来对各种结论加以综合,具有更强的鲁棒性和可扩展性。对于特征级融合的应用来说,要着重考虑数据采集时候的时间一致性问题,任何时间上的微小差别都会影响到后面分析的有效性,因此一般使用高精度时钟同步手段来保证数据采集过程中的时间一致性;而决策级融合则更看重实时性,对每一个输入状态的信任度评价也更加严格,需要通过科学合理的权重分配来防止低质量判定导致的全局结论偏差。目前被普遍应用于不确定性量化处理的证据理论、贝叶斯网络模型,给复杂的场景提供智能诊断的有力工具支持。从未来发展角度出发,虚拟和现实之间互相嵌套的闭环系统就会产生更多的数据来源,从而让智能运维达到更高级的状态^[5]。

结语

分布式光伏发电系统状态监测和故障诊断属于综合性很强的研究问题,牵涉电力系统运行原理、信号处理技术以及机器学习等诸多学科领域。本研究从基本理论框架和指标体系构建两个方面对状态监测进行阐述,并详细论述了光伏组件、逆变器和电气连接等主要部分出现的故障模式以及原因。在以上基础之上,本文从电气参量分析、数据驱动建模、多源信息融合这三个方面来探究故障识别的方法。经由研究得知,传统单一的检测手段很难适应复杂的工况,需要依靠整合各种感知设备,并辅以智能化的算法来达成准确的预警以及快速的响应。在未来边缘计算同虚拟仿真的结合将会带来预测性维护和自主优化的走向,从而给可再生能源利用率的提高提供重要的支撑。

参考文献

- [1]杨瑛哲,周通.多任务深度学习下的分布式光伏功率异常推理[J].电子设计工程,2026,34(06):157-161.
- [2]尹紫微,李凡.屋顶分布式光伏固定式支架结构参数优化研究[J].红水河,2026,(01):1-9.
- [3]全璐瑶,董少峒,李杨曼.分布式光伏与电动汽车接入电网协同控制[J].微电机,2026,59(02):71-76.
- [4]熊伟鹏,周圣,万佳,陈罡,陶婧.一种基于分布式光伏容量配置策略的研究[J].江西电力,2026,50(01):17-21.
- [5]章宇,张彦虎,谢正刚,杨金婉,江友华.含分布式光伏和储能参与的电压协调控制策略[J].上海电力大学学报,2026,42(01):39-46.

作者简介:汪帆(1998.4-)男,陕西汉中,本科,助理工程师,研究方向:电力。