

风电电气工程设备故障溯源与安全预警技术实践研究

侯杰 贺越霞 刘洋 李子昂
内蒙古智慧运维新能源有限公司
DOI:10.32629/hwr.v10i5.7011

[摘要] 本文以显著提升风电场运行可靠性为目的,积极研究风电电气工程设备故障溯源与安全预警技术:先分析风电电气工程设备典型故障特征与溯源难点,之后在此基础上,从数据感知、特征提取、模型构建和决策支持四个方面,构建风电电气工程设备故障溯源与安全预警技术体系。工程实践证明:本文所构建的技术体系具备有效性,可以精准定位故障点,减少非计划停机事件发生。

[关键词] 风电电气工程;设备故障;故障溯源;安全预警

中图分类号: R730.42 **文献标识码:** A

Practical Research on Fault Tracing and Safety Early Warning Technology for Wind Power Electrical Engineering Equipment

Jie Hou Yuexia He Yang Liu Ziang Li

Inner Mongola Intelligent Operation & Maintenance New Energy Co.,Ltd

[Abstract] This paper aims to significantly improve the operational reliability of wind farms by actively researching fault tracing and safety early warning technologies for wind power electrical engineering equipment. It first analyzes the typical fault characteristics and tracing difficulties of wind power electrical engineering equipment. Based on this analysis, a technical system for fault tracing and safety early warning of wind power electrical engineering equipment is constructed from four aspects: data perception, feature extraction, model building, and decision support. Engineering practice has proven that the technical system constructed in this paper is effective, capable of accurately locating fault points and reducing the occurrence of unplanned outage events.

[Key words] wind power electrical engineering; equipment fault; fault tracing; safety early warning

前言

在风电装机容量持续增长的背景下,因电气设备故障引发的停机损失、安全隐患等问题愈发突出。传统阈值报警方法存在漏报率高、溯源困难等问题,难以实现对大规模风电集群运维需求的充分满足。基于此,本文积极研究风电电气工程设备故障溯源与安全预警技术,旨在提升故障定位精度与预警时效性,保障风电场安全经济运行。

1 风电电气工程设备典型故障特征与溯源难点分析

1.1 典型故障特征

风电电气工程设备典型故障特征包括机械故障特征、电气故障特征和控制系统故障特征。其中,机械故障特征表现为轴承故障、齿轮箱故障和叶片损伤,包括轴承内圈、外圈故障特征频率分量突增,齿轮啮合边频带幅值异常,声发射信号幅值骤增等;电气故障特征表现为发电机绕组故障、变流器故障和绝缘劣化,包括介质损耗因数($\tan \delta$)上升,瞬态电流波形畸变等;控制系统故障特征表现为传感器失效和变桨系统异常,包括测量值偏离实际值、桨叶角度调整滞后等。

1.2 溯源难点分析

针对风电电气工程设备故障,存在多源数据融合挑战、早期故障特征识别瓶颈、复杂工况干扰和故障传播复杂性四大溯源难点。其中,多源数据融合挑战体现为数据异步性、异构数据冲突:SCADA系统和振动传感器存在时间戳偏差,知识特征关联存在困难;油液分析数据和实时温度监测,难以实现同步建模;早期故障特征识别瓶颈体现为信噪比极低、弱特征耦合:轴承微点蚀初期振动信号信噪比较低,十分容易被风载噪声淹没;绕组绝缘早期劣化和温度波动的有机耦合,需要对环境干扰因子进行分离;复杂工况干扰体现为随机载荷影响、环境耦合效应:风速波动会令齿轮箱出现扭矩突变的情况,这种情况会对疲劳裂纹扩展特征进行掩盖;海上盐雾环境会加速电气触点氧化,容易与电气故障特征产生混淆的情况;故障传播复杂性体现为跨系统耦合、多级演化路径:齿轮箱磨损会导致发电机轴承过载,从而使得机械-电气故障链难以实现有效分割;动态传播路径存在非线性的特点^[1]。

2 风电电气工程设备故障溯源与安全预警技术体系构建

2.1 数据感知：多源异构数据协同采集与治理

为实现对传统单源SCADA数据覆盖不足问题的有效解决，并显著提升故障定位准确性，则需要积极打造全域感知环境。

具体而言，要积极部署全域传感网络。在机械状态监测方面，要将高频振动传感器安装在齿轮箱、轴承等关键部位，以此实现对微点蚀冲击信号的有效捕捉。同时，也要依托光纤光栅测温仪对传动链温度梯度进行实时跟踪，以此实现对轴承异常温升的及时识别^[2]。在电气参数捕获方面，则要通过高频电流互感器，对变频器谐波畸变率进行量化；通过局部放电传感器，对发电机绕组绝缘劣化进行监测，并据此生成PRPD谱图。需要注意的是，风速仪、温湿度传感器等应当与随机风载有机关联在一起，以此达到有效消除工况干扰的目的。在获得数据之后，要实现智能数据治理，即利用滑动窗口动态对齐技术，切实解决SCADA和振动数据时间戳偏差问题，并达到插值精度达毫秒级的目的^[3]。同时，要基于Storm引擎识别传感器漂移，利用卡尔曼滤波修复异常值，达到缺失值GAN填补准确率>98%的目的。此外，也需要在网关端积极布置小波降噪、FFT变换算法，有效压缩数据量，并实现传输延迟降低。

2.2 特征提取：多维度故障特征增强与融合

为实现对弱特征信噪比瓶颈的有效突破，加强对信号处理技术、深度特征挖掘技术等的应用，积极打造关联矩阵，切实降低特征提取误差。

在振动信号解析方面，针对轴承微点蚀引发的高频共振调制信号，可以利用希尔伯特变换提取包络，以此将低频故障特征分量解调出来，实现对背景噪声的有效分离；利用尺度空间方法，自动分割振动信号傅里叶谱，生成自适应滤波频带，以此实现对齿轮箱边频带特征的有效提取。同时，将度因子最大的经验模式作为故障敏感模式，避免人工参数预设，并进一步提升特征鲁棒性。在电气信号分析方面，则依托快速傅里叶变换（FFT），对电流谐波畸变率进行计算，基于计算结果，对变频器IGBT开路故障特征精准定位^[4]。同时，有效捕捉IGBT开关瞬间的电流突变，并协同小波系数能量分布，对瞬态故障进行有效识别。在深度特征挖掘方面，则积极落实自适应加权和多源特征融合。其中，自适应加权是指利用压缩激励网络，提高微点蚀等弱特征信噪比；多源特征融合是指在振动能量熵和温度梯度变化率之间打造关联矩阵，进而对齿轮磨损诱发轴承过载的耦合效应进行及时识别。

2.3 模型构建：物理机理与数据驱动的混合建模

风电设备故障诊断面临多物理场耦合、工况随机性强，以及早期故障特征微弱等挑战，故而，要突破传统单一建模方法，通过“物理机理约束+数据驱动增强”的方式，混合建模，最终达到精准定位故障，提前预警时间，提高诊断准确率的目的。

2.3.1 混合诊断模型架构

在物理机制约束方面，嵌入齿轮箱动力学方程，以此实现对正常、故障工况下振动响应频谱的准确计算：

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) + F_{\text{fault}}(t)$$

其中， $F_{\text{fault}}(t)$ 为故障激励力。

同时，需要将模型预测的边频带特征，作为GAN生成器的正则化项，以此达到数据驱动模型过拟合有效抑制的目的。

此外，还需要利用轴承故障频率公式进行约束。通过将理论频率和实测频谱的匹配度有机纳入到损失函数中，可以显著提升故障类型识别鲁棒性。

$$\text{内圈故障特征频率: } f_{\text{inner}} = \frac{N}{2}f_r(1 + \frac{d}{D}\cos\alpha)$$

$$\text{外圈故障特征频率: } f_{\text{outer}} = \frac{N}{2}f_r(1 - \frac{d}{D}\cos\alpha)$$

在数据驱动增强方面，则以切实提升模型泛化能力为目的，落实LSTM时序预测技术、ResNet图像识别技术。其中，LSTM时序预测技术应用是指在输入层，融合温度、振动和功率等多维时间序列；在隐藏层，构建双向LSTM捕捉长时依赖关系，实现对未来48小时趋势的有效预测；在输出层，推行齿轮箱磨损程度评分，实现>80分触发预警。ResNet图像识别应用是指利用50层残差网络处理叶片红外热成像数据，并通过跳跃连接的方式，实现对深层网络梯度消失问题的有效解决^[5]。与此同时，还应在ImageNet预训练模型做微调处理，显著提升裂纹识别准确率，并降低误报率。

2.3.2 实时诊断优化

实时诊断优化需要从部署边缘计算以及增量学习机制构建两个方面入手。其中，部署边缘计算是指实现模型轻量化，即利用量化技术和通道剪枝技术，压缩ResNet-50参数量，提升推理速度；科学部署NVIDIA Jetson AGX Xavier边缘设备，有效缩短单帧图像处理时间。与此同时，也需要对流式数据进行处理，即利用Apache Kafka打造实时数据管道，实现10万+测点数据并发处理。同时，利用滑动窗口机制达到动态诊断的目的。增量学习机制构建是指每24小时采集新数据，并利用弹性权重巩固（EWC）算法，将旧任务知识保留下来，有效防止灾难性遗忘情况发生。

2.4 决策支持：多级预警与闭环处置

风电场运维工作的开展，需要以早预警、快处置和降成本为目标。因此，要积极构建智能分级预警机制，以及数字孪生驱动机制，切实降低非计划停机概率以及维修成本。如表1所示为智能预警机制。

表1 智能预警机制

等级	判定条件	处置措施	响应时效
注意	特征偏移<10%基线(如温度上升2℃)	系统自动记录,持续监控	实时
警告	偏移10%-30%(温度上升5℃)	推送远程巡检工单,检查润滑状态	<30分钟
严重	偏移>30%(温度上升10℃)	触发紧急停机,启动备件更换流程	<5分钟

数字孪生驱动机制的构建，则需要从数字孪生平台构建、工单自动生成系统建立两个维度入手。其中，数字孪生平台应具备故障演化仿真功能，可以对裂纹剩余寿命进行预测。如，基于有

限元分析(FEA)打造叶片裂纹扩展模型,准确输入风速、载荷等参数,便可以对裂纹剩余寿命精准预测。

基于有限元分析(FEA)打造叶片裂纹扩展模型:

$$\frac{da}{dN}=C(\Delta K)^m$$

其中,a为裂纹长度,N为循环次数,ΔK为应力强度因子范围。

工单自生成系统则是依托智能决策流程实现快速响应。比如,一旦发生根因诊断,自动匹配映射库,并快速确定故障部件;查询备件库存。如果库存充足,则立即自动生成工单;推送工单至运维人员APP,保证响应时间<5分钟。

3 实践应用

3.1 案例分析

某大型风电场有多台大型风力发电机组,近年来,在设备老化以及运行环境持续变化的情况下,电气设备故障频发,致使非计划停机次数增加,对风电场的运行可靠性以及经济效益产生了严重的负面影响。为实现对这一问题的有效解决,该风电场引入了设备故障溯源与安全预警技术体系。

3.2 应用效果

通过对多元异构数据进行采集和治理,并增强多维度故障特征,该体系可以对故障点进行精准定位,切实减少误报和漏报现象发生;通过强化对混合诊断模型以及实时诊断优化技术的应用,该体系可以及时发现潜在故障,并立即向相关管理人员发出预警信号,切实减少了非计划停机事件的发生;智能分级预警

机制的构建,令风电场可以结合实际情况,对维修计划进行合理制定,避免过度维修行为出现;工单自动生成系统,支持了故障快速响应,切实降低了运维成本。

4 结语

本文对风电电气设施设备故障溯源与安全预警技术进行了系统性研究,表明多维度数据驱动和智能算法融合是提升风电电气设备可靠性、主动防护能力的关键手段。未来,在数字孪生、边缘计算等技术持续迭代的背景下,要强化融合研究,推动风电高质量发展。

【参考文献】

[1]郑宗远,王辰禧,王文.风电场设备故障预测与管理方法[J].工程建设与设计,2026,(08):207-209.

[2]李佳钊.基于机器学习的风力发电机故障识别与维护系统研究[J].电气技术与经济,2026,(04):44-47.

[3]张军.基于全域时空图卷积的风电设备故障在线诊断系统[J].自动化与仪器仪表,2026,(04):208-211+216.

[4]范敬毅.基于大数据分析的变电设备故障预测与运维策略研究[J].流体测量与控制,2026,7(02):66-68.

[5]张志鹏,韩潇.基于多源数据融合的变电设备故障溯源技术优化与应用[J].光源与照明,2025,(11):93-95.

作者简介:

侯杰(1986—),男,汉族,内蒙古卓资县人,大学本科(硕士学位),单位:内蒙古智慧运维新能源有限公司,职称:工程师,研究方向:电力安全管理、建设工程安全管理。