

# 电力设备故障诊断技术在风电运维中的应用探索

赵文耀<sup>1</sup> 冯学军<sup>1</sup> 刘源<sup>1</sup> 苏捧刚<sup>1</sup> 张佳<sup>2</sup>

1 宁夏龙源新能源有限公司 2 宁夏绝缘电力设备运检中心有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i2.12950

**[摘要]** 风电设备长期处于恶劣自然环境中运行,受交变载荷、温湿度波动、盐雾腐蚀等多因素耦合作用影响,其传动系统、发电机、变桨系统等核心部件出现故障频发情况。对于风电设备的维护,传统定期检修模式存在着维护滞后以及资源浪费等诸多问题,难以适应机组大型化以及场站分布分散化的发展趋势。基于状态监测的智能诊断技术通过融合多维物理量感知与数据分析,实现了故障早期预警以及根源定位,成为提升风电运维经济性与安全性的关键技术路径所在。当前的技术体系对数据融合深度、诊断模型泛化能力等层面依旧存在瓶颈问题,因此建立适应风电运行特性的全生命周期故障演化分析框架成为必要之举。

**[关键词]** 电力设备; 故障诊断技术; 风电运维; 应用探索

**中图分类号:** V351.31 **文献标识码:** A

## Exploration of Application of Power Equipment Fault Diagnosis Technology in Wind Power Operation and Maintenance

Wenyao Zhao<sup>1</sup> Xuejun Feng<sup>1</sup> Yuan Liu<sup>1</sup> Penggang Su<sup>1</sup> Jia Zhang<sup>2</sup>

1 Ningxia Longyuan New Energy Co., Ltd

2 Ningxia Insulation Power Equipment Operation and Inspection Center Co., Ltd

**[Abstract]** Wind power equipment operates in harsh natural environments for a long time, and is affected by the coupling effects of multiple factors such as alternating loads, temperature and humidity fluctuations, salt spray corrosion, etc., resulting in frequent failures of core components such as transmission systems, generators, and pitch systems. For the maintenance of wind power equipment, the traditional regular maintenance mode has many problems such as lagging maintenance and resource waste, making it difficult to adapt to the development trend of large-scale units and scattered distribution of stations. The intelligent diagnosis technology based on state monitoring integrates multidimensional physical quantity perception and data analysis to achieve early warning and root cause localization of faults, becoming a key technological path to improve the economic and safety of wind power operation and maintenance. The current technological system still faces bottlenecks in terms of data fusion depth and diagnostic model generalization ability. Therefore, it is necessary to establish a full lifecycle fault evolution analysis framework that adapts to the characteristics of wind power operation.

**[Key words]** power equipment; Fault diagnosis technology; Wind power operation and maintenance; Application exploration

### 引言

风电设备运维面临着运行环境复杂性以及系统耦合性这两重挑战。故障诊断的技术难点在于诸多方面,比如机械传动系统在随机风载作用下的动态响应特征,电气部件在电网波动状况里的绝缘劣化机制,还有控制系统于极端气候下的参数漂移现象,这些共同因素构成了故障诊断的难点所在。现有研究多将关注点放在单一检测手段的应用优化上,对于多源异构数据协同分析缺乏系统性的架构设计。本文依据设备失

效机理和运行状态之间的映射关系,着手去构建能对振动频谱、油液磨粒、温度场分布等进行多维度特征提取的模型,对深度特征融合以及设备健康状态评估方法展开探索。文章着重解析的是人工智能算法在弱信号识别以及非平衡数据处理方面所具备的应用潜力,进而提出专门面向风电场景的故障诊断技术优化路径。

### 1 风电运维中的电力设备故障分析

#### 1.1 风电设备的运行环境与特点

风电设备长期暴露于沿海高湿度与内陆昼夜温差剧烈的复合环境中,金属部件表面频繁凝露加速了电化学腐蚀进程,而齿轮箱密封件在极端温度交变下逐渐丧失弹性导致润滑介质泄漏风险上升。旋转机械的持续振动使得螺栓预紧力呈现动态衰减趋势,偏航系统轴承滚道在非均匀载荷作用下产生微裂纹扩展现象,塔筒法兰连接处因交变风载引发的低频疲劳累积效应显著。叶片前缘覆膜在沙尘颗粒持续撞击下发生剥离,暴露出内部玻璃钢基体后引发气动性能劣化,变流器功率模块散热翅片表面尘埃沉积形成隔热层,造成半导体器件结温异常波动。盐雾环境导致发电机定子绕组端部爬电距离逐步缩减,塔基混凝土结构毛细孔隙内氯离子渗透引发钢筋钝化膜破坏,机舱顶部雷电防护装置接闪器在多次放电后烧蚀面扩大。多支路集电线路在强风场扰动下产生的谐波谐振现象,使得箱变绕组绝缘承受额外的介质损耗,而变频器IGBT模块在低风速工况下的频繁投切操作加剧了焊点层热机械应力。叶片覆冰引起的质量不平衡会激发塔架高阶模态振动,这种非线性动力学特征对螺栓连接结构的松动监测提出了新的挑战,齿轮箱油液在线传感器则需克服高粘度润滑脂对磨粒沉降速度的影响。

### 1.2 风电设备常见故障类型与成因

风力发电机组运行故障主要分成电气故障和机械故障两方面,其中电气故障主要有电网故障、叶轮超速故障、发电机超速故障、变桨系统故障、变流器故障等。机械故障包括轴承故障、齿轮箱故障、转子不平衡故障,叶片故障、机械制动故障、液压故障等。机械传动系统中齿轮箱作为核心部件,长期承受随机风载引发的交变应力作用,齿面微点蚀在润滑条件劣化时逐步演变为宏观剥落,轴承滚道在轴向载荷偏移情况下易发生塑性变形与疲劳裂纹扩展。发电机定子绕组受盐雾渗透与温湿度循环影响,绝缘材料孔隙率增加导致局部放电现象加剧,转子磁极在离心力与热应力协同作用下可能引发永磁体失磁或绕组匝间短路。变桨系统密封失效致使沙尘侵入滑环接触面,电刷异常磨损造成角度反馈信号失真,偏航制动器液压管路在低温环境下油液黏度突变诱发压力波动与阀门卡涩。这些故障本质上是材料性能退化、动态载荷激励与环境侵蚀因素共同作用的结果,其演化过程往往伴随多物理场耦合效应<sup>[1]</sup>。

### 1.3 风电设备故障对运维的影响

齿轮箱轴承失效需调用重型吊装设备进行高空拆解,特殊工况下的维修窗口期受限于气象条件,人力调度与备件运输成本呈指数级增长。叶片结构损伤引发的非计划停机破坏电网调度平衡,补偿机制触发使度电成本核算偏离预期收益模型。变桨系统通讯中断导致机组切入保护性停机状态,功率曲线异常波动迫使运维人员反复进行参数校准,现场调试周期延长加剧发电量损失。电气柜内部电弧放电可能引燃绝缘材料,未及时处置的局部过热现象逐步蔓延至相邻回路,潜在火灾风险对场站安全运行构成持续性威胁。液压系统泄漏污染塔筒内部环境,油液渗透加速金属结构件腐蚀进程,清洁治理作业挤占预防性维护资源。控制系统误动作造成偏航角度偏移,叶片与塔筒动态间隙

不足诱发碰撞风险,紧急制动产生的机械冲击加速传动链部件磨损。塔筒螺栓预紧力衰减改变结构固有频率,共振效应引发的次生损伤难以通过常规检测手段及时识别,后期修复工程涉及基础加固与载荷重新分配。

## 2 电力设备故障诊断技术在风电运维中的应用

### 2.1 振动分析技术

现场技术人员在齿轮箱、发电机轴承等关键部件布置振动传感器,这些传感器按照设备结构特点选择不同安装位置,比如齿轮箱外壁适合捕捉啮合频率,主轴轴承座则侧重采集滚动物体通过振动信号。传感器采集的原始振动信号经过抗干扰处理后,通过有线或无线传输方式进入数据分析系统,这时候就需要用到数字滤波和降噪算法,像傅里叶变换和小波分析这类常规处理方法能把混杂着环境噪声的振动波形拆解成可识别的频谱成分。针对风电设备特有的非平稳振动特征,技术人员还会采用阶次分析配合转速跟踪技术,把时域信号转换成与转速相关的阶次谱,这样就能在变转速工况下准确捕捉叶片不平衡或齿轮断齿这类故障特征。设备状态评估阶段需要建立故障特征数据库,把正常运行的振动频谱、时域指标作为基准模板,当在线监测系统检测到高频段出现异常共振峰或者低频振动能量突增时,系统会自动调取历史案例进行模式匹配。现场人员拿到诊断报告后,通常会结合设备运行日志核对故障类型,像齿轮箱齿面磨损这类渐进式故障需要安排定期油液检测作为辅助验证,而叶片裂纹这类突发性缺陷则要立即停机进行目视检查<sup>[2]</sup>。

### 2.2 油液分析技术

齿轮箱润滑油的理化指标变化记录着传动系统的健康轨迹,光谱检测解析铁、铜等金属元素浓度曲线,能够捕捉轴承保持架磨损释放的特征性磨粒。颗粒计数器对油液中 $5\mu\text{m}$ 以上悬浮物进行粒径分布统计,结合形状分类算法区分切削磨屑产生的条状颗粒与疲劳剥落形成的球状微粒。傅里叶变换红外光谱技术追踪基础油氧化产物与添加剂消耗速率,粘度指数异常波动暗示着油膜承载能力下降趋势。针对风电齿轮箱特有的行星轮系结构,采用铁谱分析技术对磁性沉积物进行链状排列观察,通过双色显微镜辨别不同磨损阶段产生的层状氧化物与游离金属碎片。旋转盘式电极法检测油液含水量突破传统卡尔费休法的精度限制,微量水分侵入引发的油液乳化现象得以在早期预警。基于油温-压力耦合关系的多参数建模技术,将油液状态参数与齿轮箱振动信号进行时空对齐,建立润滑油性能衰减与齿面点蚀发展的量化关联模型。

### 2.3 红外热成像技术

红外热成像技术通过捕捉设备表面辐射能分布构建温度场图谱,揭示电气连接异常与绝缘劣化的热力学特征。高分辨率红外探测器接收 $7.5\sim 14\mu\text{m}$ 波段辐射能量,将发电机碳刷接触电阻增大引发的局部温升转化为伪彩色图像,温度梯度超过阈值区域自动标记为潜在故障点。针对箱式变压器套管密封失效导致的内部油路堵塞,热像仪在非接触状态下识别出油枕与散热片之间的温差异常,结合环境风速补偿算法消除气流散热对温度

测量的干扰。变流器IGBT模块的结温分布监测采用时间序列分析法,功率器件老化引发的热阻增大现象通过相邻芯片温差异常扩展模式得以辨识。叶片内部结构胶脱粘缺陷的热激励检测方法中,脉冲加热源引发缺陷区域热量积聚,红外相机记录热流扩散速率差异形成脱粘面积量化判据。螺栓连接松动的诊断依托法兰面温度场对称性分析,预紧力不足导致接触电阻增大的区域呈现环形高温特征<sup>[3]</sup>。

#### 2.4 人工智能与机器学习技术

运维团队将SCADA系统记录的发电机温度、齿轮箱油压、叶片桨距角等多元参数与振动传感器采集的时频域信号进行时间戳对齐,利用滑动窗口技术生成带标签的训练样本,这些样本需经过缺失值填充与异常值剔除后输入特征选择模块,例如对于发电机轴承故障识别任务,滑动均方根值、波形因子与谱峭度等时频特征会被优先提取。监督学习模型常采用随机森林与梯度提升决策树处理分类任务,在发电机绕组过热预警中,模型会结合绕组温度梯度与散热器工况建立多变量回归关系,当实时数据流中出现冷却风速下降伴随温度上升速率异常时,系统自动触发预警阈值。无监督学习则应用于未知故障模式挖掘,基于自编码器的重构误差分析能够捕捉变桨系统液压阀的渐进性泄漏,这类故障在早期往往表现为压力波动幅值微小但持续偏离正常工况簇。实际部署阶段需考虑边缘计算设备算力限制,轻量化神经网络通过知识蒸馏技术将大型卷积神经网络识别齿轮箱磨损的特征提取能力迁移至嵌入式系统,同时采用联邦学习框架保障各风电场数据隐私,各风机本地训练的模型参数在云端聚合优化后重新下发,既避免敏感数据外流又提升诊断模型泛化能力。

#### 2.5 数据驱动故障诊断技术

监督学习框架处理SCADA系统采集的转速、功率、温度时序数据,采用滑动窗口机制提取齿轮箱振动信号中调制边频带的能量熵特征,利用梯度提升树算法建立正常工况与早期磨损状态的分类边界。针对变桨轴承裂纹扩展难以捕捉的问题,无监督学习模型对声发射信号进行时频域联合分析,自编码器网络重构高频冲击成分的衰减系数,异常值得分超过阈值时触发预警机制。迁移学习策略破解新机型数据积累不足的困境,将成熟风机的发电机绕组温度分布特征映射至目标机型,基于域对抗训练消除环境差异引起的特征偏移。多模态数据融合框架整合振

动、油液、红外等多源信息,以神经网络构建传感器节点间的时空依赖关系,齿轮箱行星轮磨损程度通过节点嵌入向量的余弦相似度进行量化评估。对抗生成网络扩充叶片裂纹样本库,合成数据与真实监测数据的特征分布一致性验证采用Wasserstein距离度量,提升卷积神经网络识别图像边缘细微裂纹的鲁棒性。时序预测模型嵌入注意力机制捕捉发电机冷却系统参数的长程依赖,定子绕组绝缘劣化趋势通过残差连接结构的预测误差累积值进行表征。

### 3 结语

综上所述,振动频谱分析与油液磨粒监测的组合应用可有效识别齿轮箱早期磨损,红外热成像技术对电气接触不良具有显著诊断优势。数据驱动模型需结合设备物理特性,避免算法“黑箱化”导致的误判风险。建议行业建立覆盖设计参数、运行日志、环境数据的标准化诊断知识库,强化迁移学习在跨机型故障识别中的应用。未来技术发展应聚焦边缘计算与云平台协同架构,实现毫秒级异常检测与兆瓦级机组群的实时状态评估。

#### [参考文献]

- [1]刘岚,吴垠峰,秦小健,等.海上风电运维的技术现状及发展趋势[J].中国水运,2022,22(24):47-49.
- [2]李子航,曹柏寒,高敏,等.基于物联网技术的海上风电运维监测与故障诊断研究[J].自动化应用,2024,65(12):264-266.
- [3]李一凡.数据驱动的风电机组故障诊断方法研究[D].山东大学,2021.

#### 作者简介:

赵文耀(1991--),男,回族,山西长治人,研究生,工程师,主要研究方向:新能源场站运维技术。

冯学军(1991--),男,回族,宁夏中卫人,本科,助理工程师,研究方向:新能源场站运维技术。

刘源(1988--),男,汉族,宁夏中宁人,本科,工程师,主要研究方向:新能源场站运维技术。

苏捧刚(1992--),男,汉族,宁夏固原人,专科,助理工程师,主要研究方向:新能源场站场站输变电设备运维。

张佳(1999--),女,汉族,宁夏吴忠人,本科,主要研究方向:新能源场站运维技术。