

风电场电气设备中风力发电机的运行维护分析

赵海琦

海南金盘智能科技股份有限公司, 海南 海口 570100

DOI:10.61369/EPTSM.2025050013

摘 要： 长期暴露在复杂气象环境下的风电场电气设备，承受着交变载荷与电磁应力的双重作用。作为能量转换中枢的风力发电机，其内部的齿轮箱、发电机以及变流系统呈现出高动态的运行特征。设备维护领域正面临传统人工巡检效率不足、故障预警滞后等技术瓶颈，亟待构建全生命周期管理体系。本文聚焦风力发电机组的运行维护机理，通过分析设备退化规律与维护策略协同效应，对提升风电设备可用率的技术路径进行探索，从而为新能源场站运维模式的优化提供理论支撑。

关 键 词： 风电场；电气设备；风力发电机；运行维护

Analysis of Operation and Maintenance of Wind Turbines in Electrical Equipment of Wind Farms

Zhao Haiqi

Hainan Jinpan Smart Technology Co., Ltd., Haikou, Hainan 570100

Abstract： The electrical equipment of wind farms, which are exposed to complex meteorological environments for a long time, bears the dual effects of alternating loads and electromagnetic stress. As the hub of energy conversion, the wind turbine exhibits highly dynamic operating characteristics in its internal gearbox, generator, and converter system. The field of equipment maintenance is facing technical bottlenecks such as insufficient efficiency of traditional manual inspections and lagging fault warnings, and there is an urgent need to build a full life cycle management system. This article focuses on the operation and maintenance mechanism of wind turbines. By analyzing the synergy between equipment degradation laws and maintenance strategies, it explores the technical path to improve the availability of wind power equipment, thus providing theoretical support for optimizing the operation and maintenance mode of new energy stations.

Keywords： wind farm; electrical equipment; wind turbine; operation and maintenance

引言

当前行业普遍采用的是基于固定周期的预防性维护模式，然而在实际的应用环节里常常会出现维护方面既冗余又不足的双重矛盾。随着机组单机容量突破至10MW 量级，叶片扫风面积的扩大以及塔筒高度的增加显著改变了设备的受力模式，如此一来，传统的维护策略便难以与新型机组的动态特性相适应。本文以电气设备失效机理作为切入点，对变桨系统轴承微动磨损、发电机绝缘热老化等典型故障的形成机制展开系统的解析工作，进而揭示出环境风速突变以及电网谐波扰动对于设备寿命产生的耦合影响。通过将状态监测数据和故障树分析工具相结合的方式，提出了基于设备健康度评估的自适应维护决策模型，目的在于突破现有维护体系过度依赖人工经验的局限，为构建智能化的风电运维体系提供具有创新性的思路。

一、风电场电气设备与风力发电机概述

（一）风电场电气设备的组成与功能

升压变压器承担着将风机产生的低电压提升至符合远距离输送标准的关键角色，依托电磁感应原理完成能量形态转换，为后续电力调度奠定基础。集电线路如同覆盖整片风电场的神经网络，通过多分支拓扑结构汇集各机群电能，其绝缘性能与载流量

设计需精准匹配区域气候特征与设备负载波动。断路器与隔离开关组成的安全防护体系，在故障发生时迅速切断异常电流通路，配合继电保护装置的多级整定策略，有效隔离设备损伤风险。无功补偿装置针对线路感性负荷特性动态调整容性电流输出，平衡系统功率因数，避免电网电压失稳引发的连锁反应。环境监测模块实时采集气象参数与设备温度数据，为运维决策提供前置预警信息。全站监控系统集成 SCADA 平台与通讯协议转换单元，实

现设备状态可视化监测与远程指令传输，形成覆盖物理层到控制层的立体化运维架构。防雷接地网络通过低阻导体将雷电流导入大地，其网格密度与埋设深度需综合考虑土壤电阻率与雷暴活动频率，电缆沟道则采用防水密封结构防止潮气侵蚀，这些细节设计共同构筑起电气设备全天候运行的防护屏障^[1]。

（二）风力发电机在风电场中的重要性

风力发电机是将风能转换为机械功，机械功带动转子旋转，最终输出交流电的电力设备，一般有风轮、发电机（包括装置）、调向器（尾翼）、塔架、限速安全机构和储能装置等构件组成。风力发电机的工作原理比较简单，风轮在风力的作用下旋转，它把风的动能转变为风轮轴的机械能，发电机在风轮轴的带动下旋转发电。作为能量流传递的关键节点，风力发电机内部集成齿轮传动机构、电磁发电模块及功率调节单元，通过多级机械耦合与电气控制实现风能捕获、转速匹配与电流输出的动态平衡。机组叶片捕获的风速变化经主轴传递至齿轮箱，经增速处理后驱动发电机转子切割磁感线产生交流电，随后由变流系统调整电压频率以适配电网需求。运行过程中，设备需持续应对湍流冲击、温度波动及电磁干扰等多重应力，任何环节的异常都将引发电能质量下降或设备连锁故障。叶片气动效率、轴承润滑状态与绝缘材料老化程度等参数共同构成机组健康状态的基础评价维度，其可靠运转不仅维系着单台设备的出力水平，更影响着整个风电场并网稳定性与运维成本控制。

二、风力发电机的维护需求

（一）风力发电机的常见故障类型

风电场中旋转机械部件的长期交变应力容易引发齿轮箱内部行星轮系与轴承的异常磨损，润滑介质性能衰减会加剧金属接触面的微观裂纹扩展。发电机绕组绝缘层在潮湿与温升双重作用下逐步老化，端部绑扎松动可能导致匝间短路故障，转子磁极冲片位移将引发气隙磁场畸变。复合材料叶片前缘在强风沙侵蚀与雨滴冲击下形成表面缺损，腹板粘接界面受材料热膨胀系数差异影响产生分层隐患，叶根螺栓预紧力松弛会造成法兰连接结构失稳。变桨系统编码器信号漂移引发桨距角控制偏差，滑环触点氧化导致动力传输中断，备用电源容量不足使得紧急顺桨功能存在滞后风险，液压驱动单元密封件龟裂引发的内漏会削弱变桨执行机构的动态响应能力。

（二）维护需求

风力发电机长期暴露于风沙侵蚀、湿度波动及盐雾腐蚀等复合环境应力，其内部齿轮啮合面易形成点蚀与剥落，绕组绝缘材料受潮气渗透导致介电强度衰减，旋转部件在交变载荷作用下产生疲劳裂纹扩展风险。机组叶片气动外形受沙粒撞击发生微观形变，降低捕风效率的同时加剧塔筒摆动幅度，而变桨轴承润滑脂在高低温交替环境中易发生氧化变质，引发传动系统卡滞现象。海上机组面临更为严峻的氯离子侵蚀问题，螺栓连接部位易产生应力腐蚀开裂，发电机散热通道受盐分结晶堵塞将引起温升异常。振动监测信号中常隐含着轴承滚道划痕或齿轮断齿的早期特

征频率，若不及时识别可能演变为灾难性故障。叶片雷击防护系统老化会使雷电流泄放路径受阻，危及变流器功率模块安全^[2]。设备运行状态与风速湍流强度存在强相关性，极端工况下偏航系统频繁动作加速制动器摩擦片磨损，而塔筒法兰连接处螺栓预紧力松弛可能引发结构共振。维护活动的必要性源于设备退化机理与外部环境扰动的非线性耦合作用，既要防范突发性故障造成的非计划停机，也要抑制渐进性性能衰退导致的发电量隐性损失。

三、风力发电机的运行维护策略

（一）定期维护计划的制定

维护人员需要每月打开齿轮箱观察窗查看油液颜色是否发黑或含有金属屑屑，用棉布擦拭注油口防止杂质混入，按照设备手册规定的周期补充合成润滑油。技术人员使用热成像仪扫描发电机接线盒与轴承座温度分布，对比历史数据识别局部过热区域，清理散热通道堆积的絮状物与盐雾结晶。操作员在风速低于切入值时攀爬塔筒，用手电筒照射方式检查轮毂法兰结合面渗油痕迹，用扭矩扳手复紧偏航齿圈固定螺栓，清理滑轨表面板结的润滑脂。电气班组每季度拆解变桨控制柜检查接触器触点烧蚀情况，用酒精棉片清理滑环表面碳粉堆积，测试备用蓄电池的电压保持能力。叶片巡检员借助无人机高清摄像头捕捉前缘腐蚀与后缘开裂图像，标记需要修补的砂眼与分层区域，清除排水孔堵塞的昆虫巢穴与植被种子。液压站维护需重点观察蓄能器压力表指针波动范围，及时更换龟裂的蓄能器皮囊，补充抗磨液压油至视窗中线位置^[3]。数据管理员每日导出 SCADA 系统记录的振动频谱与功率曲线，建立设备健康状态基线模型，筛选偏离阈值的异常工况生成工单。塔基排水泵需在雨季前测试自动启停功能，疏通集水井滤网缠绕的枯草，检查电缆套管密封胶圈弹性是否丧失。

（二）故障诊断与预警机制

值班员每日调取 SCADA 系统记录的发电机轴承振动频谱与齿轮箱噪声特征值，将三轴加速度传感器采集的时域信号导入故障模式识别软件，比对历史数据库中的劣化趋势图谱。维护人员要在季风季节前携带红外热像仪对变流器 IGBT 模块进行全功率段扫描，捕捉散热片温差超过阈值的发热点，排查水管路堵塞或风扇转速异常问题。叶片巡检人员操控多旋翼无人机搭载激光雷达扫描仪，沿叶尖到叶根路径检测表面曲率偏差，对比三维点云模型识别前缘腐蚀深度与后缘结构开裂长度。电气班组使用局放检测仪在夜间低负荷时段监听发电机绕组放电信号，通过特高频传感器定位绝缘层内部气隙放电的精确坐标，记录放电脉冲幅值与相位分布特征。数据工程师将变桨系统编码器反馈角度与理论值进行时域对齐，计算桨距角调节滞后时间，建立不同风速段下的动态响应基准曲线。液压维护人员定期截取蓄能器压力衰减曲线，绘制压力保持率随时间变化的散点图，结合比例阀电流波形判断密封件老化程度。结构监测团队在台风过境后调取塔架倾斜传感器历史数据，运用有限元分析软件模拟不同工况下的应力分布，标记法兰连接处可能出现塑性变形的风险区域^[4]。

（三）紧急故障处理流程

当 SCADA 系统发出三级以上振动报警时，值班员需立即调取故障机组的功率曲线与偏航角度记录，结合气象站实时风速数据判断是否触发紧急停机指令。维修组抵达现场后开启塔筒底部急停开关并悬挂检修标牌，使用激光对中仪检测齿轮箱与发电机联轴器的同轴度偏移量，拆除弹性支撑螺栓查看缓冲垫片是否存在永久变形。电气工程师携带绝缘电阻测试仪攀爬至机舱控制柜，断开变流器直流母线连接端子，用万用表逐相测量定子绕组对地绝缘阻值，排查电缆铠装层破损导致的漏电隐患。液压系统突发失压故障时，操作人员应优先释放蓄能器残余压力，拆卸比例阀滤芯观察金属碎屑沉积情况，更换 O 型密封圈前需用绸布擦拭阀体安装面防止颗粒物嵌入^[9]。叶片异常震颤报警触发后，叶片维修队需在地面用长焦镜头拍摄全叶展动态视频，分析摆振频率与挥舞幅度数据，锁定疑似内部梁帽脱粘或腹板开裂的损伤区域。塔架基础沉降监测数据超限时，结构工程师应使用全站仪复测锚栓法兰的水平度偏差，开挖基础环外侧覆土检查防腐涂层剥落状况与混凝土碳化深度。所有故障处理后必须执行空载试运行测试，维修班长监督机组并网前完成各子系统功能自检，将处理过程与备件更换记录同步录入设备全生命周期管理系统。

（四）维护人员的培训与管理

运维主管需依据机组型号与技术迭代周期定制差异化的培训课程，组织维护人员系统学习齿轮箱内窥镜检测规程与发电机绕组绝缘测试方法，安排模拟故障场景的实操考核以巩固轴承游隙测量、联轴器对中调整等核心技能。培训专员应结合海上与陆上环境的运维差异，增设盐雾腐蚀防护涂层修补、塔筒攀爬安全绳

系留技术等专项训练模块，利用虚拟现实设备构建叶片内部腔体检查、变桨电机拆装等高风险作业的沉浸式演练环境。维护班组需每月开展案例复盘会，由资深技师解析历史故障中齿轮断齿的频谱特征规律与变流器 IGBT 模块烧毁的诱因链，培养团队成员系统性故障溯源能力。人力资源部门应建立技能矩阵数据库，跟踪记录每位维护人员对激光对中仪、振动分析仪等精密仪器的操作熟练度，针对薄弱环节定向安排厂家工程师驻场指导。安全督导员须定期更新高空作业车操作认证与高压电工资质审查，组织雷暴天气应急避险演练以强化极端条件下的风险处置意识。班组内部应推行师徒结对机制，由经验丰富的技师带领新员工熟悉塔筒螺栓预紧力检测、滑环碳刷磨损评估等细节操作，逐步构建覆盖机械、电气与控制系统的复合型技能体系。管理部门还需关注维护人员长期户外作业的心理健康状况，引入人机交互安全性评估工具优化高空密闭空间作业流程，通过团队文化建设降低人为操作失误概率。

四、结语

提升风力发电机组的维护效能离不开机械动力学、材料科学以及智能算法等多学科知识体系的融合，本文论证了基于设备状态监测的预测性维护，相较于传统周期维护体现出了优越性，在高风速区域以及海上风电场景中更展现出显著的技术经济价值。未来维护技术的发展应着重对叶片应力分布式感知、齿轮箱油液在线分析等监测技术的工程适用性加以强化，并且要建立一个能够覆盖设计参数、运行数据以及维护记录的全维度数据库。

参考文献

- [1] 吴生炎. 风电场电气设备中风力发电机的运行维护分析 [J]. 通讯世界, 2024, 31(11): 106-108.
- [2] 李智福. 风电场风力发电机的运行维护分析 [J]. 集成电路应用, 2022, 39(04): 300-301.
- [3] 李绵基. 海上风电场风力发电机运行维护策略研究 [J]. 光源与照明, 2022, (12): 222-224.
- [4] 李莉. 探究风电场电气设备中风力发电机的运行维护的措施 [J]. 电气技术与经济, 2024, (01): 307-309.
- [5] 朱江. 浅论风电场电气设备中风力发电机的运行与维护 [J]. 科技风, 2020, (26): 145-146.