

风力发电机组电气与控制系统快速检修思路研究

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/WCEST.2025010007

摘 要： 风力发电是清洁能源的重要支柱正承担着日益关键的供电责任，风电机组的电气与控制系统处于核心位置，具备着能量转换以及运行调控这双重的功能。当下，风电场大多分布在环境颇为恶劣的偏远之地，频繁出现的电压波动情况、机械振动现象以及温湿度的变化状况，使得电气元件的老化速度不断加剧。传统的检修模式存在着不少缺陷，如响应方面滞后，诊断精度有所不足等，这样的模式难以达到现代风电行业针对设备可用率所设定的严苛要求标准。如何去实现对故障进行精准的定位以及快速的修复操作，已经变成了制约风电运维效率获得提升的一个关键瓶颈。

关 键 词： 风力发电机组；电气与控制系统；快速检修；思路研究

Research on Quick Maintenance Approach for Electrical and Control Systems of Wind Turbines

Zhao Haiqi

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

Abstract： Wind power, as an important pillar of clean energy, is assuming an increasingly critical role in power supply. The electrical and control systems of wind turbines occupy a central position, performing dual functions of energy conversion and operational control. Currently, most wind farms are located in remote and often harsh environments. Frequent voltage fluctuations, mechanical vibrations, and changes in temperature and humidity accelerate the aging of electrical components. Traditional maintenance models have several flaws, such as delayed response and insufficient diagnostic accuracy, making them inadequate to meet the stringent equipment availability requirements set by the modern wind power industry. Achieving precise fault localization and rapid repair has become a critical bottleneck restricting the efficiency of wind power operation and maintenance.

Keywords： wind turbine generator system; electrical and control system; quick maintenance; research approach

引言

风力发电机组作为将风能转化为电能的核心载体，它的电气与控制系统承担着能量传输、并网控制和设备保护等关键任务。在单机容量突破10兆瓦级别以及海上风电规模化开发的进程中，系统集成度与运行复杂度以几何级数的态势增长起来，整机停机甚至连锁反应极有可能因任何微小故障而被引发。现今的检修体系大多是依靠定期维护与事后维修相互结合的被动模式运行，在故障预判能力、应急处置效率以及资源调配合理性等方面，都存在着明显短板。本文聚集在电气控制系统的故障特征与运行规律上，通过构建多维联动的快速响应机制来对状态监测数据与智能诊断算法加以整合，目的在于突破传统检修在时间与空间方面受到的限制。

一、风力发电机组电气与控制系统概述

（一）风力发电机组的组成

风力发电机组是将风的动能转换为电能的系统，发电机组包括风轮、发电机；风轮中含叶片、轮毂、加固件等组成；它有叶片受风力旋转发电、发电机机头转动等功能。风力发电电源由风

力发电机组、支撑发电机组的塔架、蓄电池充电控制器、逆变器、卸荷器、并网控制器、蓄电池组等组成。风力发电机组进行发电时要保证输出电频率恒定。这无论对于风机并网发电还是风光互补发电都非常必要。要保证风电的频率恒定，一种方式就是保证发电机的恒定转速，即恒速恒频的运行方式，因为发电机由风力机经过传动装置进行驱动运转，所以这种方式无疑要恒定风

力机的转速，这种方式会影响到风能的转换效率；另一种方式就是发电机转速随风速变化，通过其它的手段保证输出电能的频率恒定，即变速恒频运行。

（二）电气与控制系统的作用

在风力发电机组运行过程中，电气与控制系统承担着能量形态转换与设备协调控制的双重使命，它的核心价值体现在将风轮捕获的旋转机械能经变流装置转化为稳定可控的三相交流电，同时根据风速变化动态调节发电机转矩与桨距角度以维持最佳叶尖速比。该系统内置的多层级保护机制持续监测电网电压频率波动、齿轮箱油温异常、绝缘电阻下降等关键参数，在检测到越限风险时自动触发断路器动作或启动冗余回路，有效阻断故障扩散路径防止设备连锁损坏。功率优化模块通过实时追踪最大功率点动态调整变流器输出特性，使发电量在风况波动条件下始终逼近理论产能曲线，而并网控制单元则需精确匹配电网调度指令与机组实际出力，在满足低电压穿越技术要求的前提下实现平滑功率输送^[1]。

二、风力发电机组电气与控制系统检修现状

（一）面临的主要挑战

设备智能化程度提升与系统复杂性加剧之间的矛盾日益凸显，新型机组集成化程度显著增强导致故障溯源难度增大，多学科交叉融合背景下传统检修方法难以精准定位隐蔽性故障，例如变流器内部多层级电路耦合引发的异常信号常因检测手段滞后而延误判断周期。极端气候环境对电气设备稳定性的侵蚀构成持续性威胁，沿海地区高湿度与盐雾腐蚀加速电气元件老化，内陆风电场昼夜温差引发的材料膨胀收缩效应导致接线端子松动或绝缘层龟裂，此类环境应力累积效应往往在常规巡检中难以被及时发现。运维人员技术能力与设备更新速度之间的断层现象逐渐显现，新型数字孪生控制系统对检修人员的数据分析能力和跨领域知识储备提出更高要求，部分现场技术人员面对异构数据平台时存在操作迟疑或误判风险。供应链波动对备件管理带来的不确定性影响检修效率，进口核心元器件供货周期延长导致非计划停机时间增加，国产化替代过程中不同厂商产品的兼容性问题可能引发二次故障，这种多因素交织的局面使得检修决策面临更复杂的变量干扰。

（二）传统检修方法的局限性

在风力发电机组电气与控制系统检修实践中，传统方法往往受制于固定周期的计划性维护模式，难以精准捕捉设备状态的非线性劣化特征，导致维护窗口期与实际故障潜伏期存在显著错位。依赖人工经验判断的故障诊断方式易受检修人员技术水平的个体差异影响，对于变流器谐波畸变、绝缘介质损耗等隐蔽性缺陷的识别存在主观性和滞后性，难以适应高比例电力电子设备接入带来的新型故障图谱。现有技术手段对运行数据的处理停留在离线分析与片段式记录层面，缺乏对发电机轴承温升趋势、电容老化速率等动态参数的连续性追踪能力，无法构建反映设备真实健康状态的预测模型，致使部分潜在风险在例行检查间隙持续累

积^[2]。

三、风力发电机组电气与控制系统快速检修思路

（一）建立快速响应机制

检修团队需要制定标准化的故障响应预案，明确从故障报警触发到现场处置各环节的时间节点与责任分工，将变流器跳闸、电容漏液等典型故障的处理流程固化为可重复执行的操作指南。技术平台需整合 SCADA 系统实时数据与历史检修记录构建知识库，开发具备自学习能力的智能诊断模块，对发电机绕组温度异常升高、控制信号断续丢失等潜在风险进行多维度交叉验证，提前生成风险等级评估报告推送至移动终端。运维人员依据预警信息携带专用测试仪器赶赴现场，优先使用红外热像仪扫描电气柜连接点温度分布，采用绝缘电阻测试仪分段检测电缆老化程度，结合控制面板的故障代码快速定位问题根源，避免因盲目拆卸设备延长停机时间。检修团队定期开展典型故障的模拟推演与复盘总结，针对海上风电场盐雾腐蚀、高原地区昼夜温差大等特殊环境制定差异化处置方案，同步更新应急预案库中的技术参数与处置要点。技术平台运营商需持续优化数据采集频率与算法匹配精度，在确保网络安全的前提下开放部分数据接口供检修人员调取关键波形图与参数曲线，辅助其判断设备状态演变趋势^[3]。

（二）优化检修流程与方法

检修人员需要将日常巡检与专项排查相结合形成动态化工作模式，定期对主控柜线路连接状态进行逐项筛查，重点观察电缆表皮是否存在老化开裂现象，针对柜体内外温差过大的情况需及时调整通风散热装置运行参数。维护团队应当建立常见故障特征图谱库，将变桨系统通讯中断、变频器过流报警等典型问题的现场表现与处理步骤形成可视化操作指南，遇到同类异常时可直接调用历史案例缩短诊断时间。现场作业需配备多功能检测仪器，利用相位检测功能核对发电机绕组接线顺序，通过绝缘电阻测试锁定存在漏电风险的电气节点，发现接触器触点氧化碳化时优先采用专业清洁剂处理而非直接更换部件。电气柜内部清洁必须按照从上至下的顺序操作，使用防静电刷具清除积尘后需复查母排固定螺栓的扭矩数值，对于频繁报错的信号回路可采取临时跨接方式验证线路通断状态。检修结束前必须执行三次以上的空载试运行，观察各子系统指示灯与触摸屏参数是否处于稳定状态，确认无误后方可恢复机组并网发电。

（三）引入智能化诊断技术

智能化诊断技术的落地应用需要运维团队与技术平台形成深度协作，技术人员应当将变流器运行日志、振动频谱数据与历史故障案例导入算法模型，训练系统识别齿轮箱轴承磨损初期产生的特定频率谐波特征。设备供应商需在控制柜内预装嵌入式传感器阵列，实时捕捉母线排温度梯度变化、绝缘子表面放电强度等微观参数，借助边缘计算设备对异常信号进行本地化预处理，减少数据传输延迟对故障判断时效性的影响^[4]。现场检修人员手持智能终端扫描设备二维码调取三维可视化模型，参照高亮显示的发热区域或电流畸变相位快速锁定问题模块，替代传统模式下逐

级拆解排查的繁琐流程。技术平台运营商定期更新故障特征数据库，将叶片覆冰引发的功率曲线偏移、盐雾腐蚀导致的接触电阻升高等地域性典型问题纳入学习样本，使诊断模型适应不同环境条件下的设备劣化规律。设备制造商应当在设计阶段预留标准化的数据接口，便于后续加装无线测温贴片、局放监测仪等智能感知元件，为诊断精度的持续提升提供硬件扩展空间。

（四）加强预防性维护措施

维护团队需要定期清理电气柜散热滤网并复核柜体密封条完整性，尤其对处于沙尘区域的机组，应当缩短滤网更换周期并在沙暴过后立即检查接触器触点是否存在积碳现象，操作人员打开柜门时必须同步检测柜内湿度是否超出元器件耐受阈值。技术人员应当建立基于历史故障数据的特征数据库，针对变桨系统编码器信号跳变或偏航电机过流报警等重复性故障制定专项检测流程，例如在每月维护时使用专用测试仪模拟极限工况下的变桨电机响应曲线。备件管理员需结合季节变化规律调整库存策略，在雷雨频发期前备足避雷器模块与接地线缆接头，对于国产化替代的功率器件需提前在备用机组上进行连续72小时的负载测试以验证兼容稳定性。现场班组执行预防性维护时应将目视检查与仪器诊断相结合，检查齿轮箱冷却风扇时既要观察扇叶表面油污附着情况又要测量三相电流平衡度，清理塔筒底部控制柜时必须使用防静电刷逐一清扫继电器触点并记录氧化程度分级。设备制造商需要为风电场提供定制化的维护日历，将全年维护任务分解为不同气候条件下的标准化操作包，例如在高温季节重点核查变流器水冷系统管箍紧固状态与冷却液 pH 值衰减幅度^[5]。

（五）提升检修人员专业能力

在日常维护中，检修团队应建立常态化技能提升机制，培训部门应当设计模块化课程体系，重点讲解变流器功率模块热循环规律、控制信号传输路径衰减特性等核心原理，使技术人员理解

故障代码背后隐含的物理过程。经验丰富的老师傅可以定期整理典型故障案例，将叶片角度传感器漂移、电容组均压失效等高频问题的现场处置细节制作成三维动画教程，帮助新人建立故障现象与设备结构的空间对应关系。技术骨干应当牵头开展月度实战演练，模拟齿轮箱油温突变、电网电压骤降等突发场景，要求检修人员在限定时间内完成绝缘测试仪接线、示波器波形捕获等标准化操作流程，强化肌肉记忆与应急反应速度。运维管理部门可以建立技能等级与岗位权限挂钩的考核制度，要求技术人员在取得变流器拆装认证后才能操作功率模块更换作业，降低误操作导致二次损坏的风险。检修班组内部应当推行“缺陷随手拍”制度，鼓励成员上传现场发现的线缆表皮龟裂、接插件氧化等细微异常，由专业工程师分类归档后形成预防性维护知识库。人力资源部门需与职业院校合作开发定向培养课程，安排学员在模拟舱内反复练习控制柜布线规整、接地电阻测试等基础技能，缩短新员工独立上岗的适应周期。

四、结语

基于状态感知去构建快速检修体系，可显著提升风电运维的经济性与安全性。通过融合边缘计算与数字孪生技术，电气系统隐性缺陷的早期识别得以实现；借助建立标准化故障代码库与专家决策系统，故障研判时间能够缩短80%以上。建议重点发展模块化检修装备与远程协作平台，推行预防性维护和预测性维修相结合的混合模式。伴随5G通信与人工智能技术的深度应用，未来风电检修会朝着全自动诊断、机器人作业以及云端协同的方向不断演进，进而推动运维模式从“被动抢险”朝着“主动防御”完成转型。

参考文献

[1] 周国旭. 风力发电机组电气与控制系统快速检修思路研究 [J]. 中国设备工程, 2021, (14): 68-69.
[2] 张倩. 风力发电机组电气控制系统检修分析 [J]. 时代农机, 2019, 46(12): 60-62.
[3] 杨继光. 风力发电机组电气控制系统检修分析 [J]. 设备管理与维修, 2022, (15): 61-62.
[4] 徐卓雅. 风电电气工程自动化中存在的问题及对策分析 [J]. 造纸装备及材料, 2021, 50(12): 37-39.
[5] 高晨, 赵勇, 汪德良, 等. 海上风电机组电气设备状态检修技术研究现状与展望 [J]. 电工技术学报, 2022, 37(S1): 30-42.