

风电场电气设备中风力发电机运行故障及维护研究

弓 锐

内蒙古华电辉腾锡勒风力发电有限公司 内蒙古 呼和浩特 010011

摘 要：随着风电产业快速发展，风力发电机作为风电场核心电气设备，其稳定运行直接决定风电供电可靠性。本文结合风力发电机核心电气部件及运行原理，分析发电机本体、变流器、控制系统等常见电气故障及成因，探讨常规与智能故障诊断方法，提出针对性维护策略、实施流程及成本优化方案，为减少故障停机、延长设备使用寿命、提升风电场运维效率提供理论支撑与实践参考，助力风电产业高质量、可持续发展。

关键词：风电场；电气设备；风力发电机；运行故障；维护

引言：当前，风电作为清洁能源的重要组成部分，在能源结构转型中发挥关键作用，我国风电装机容量持续增长。但风力发电机长期处于户外复杂环境，受强风、雷击、沙尘等因素影响，易出现各类电气故障，导致停机损失增加、运维成本上升。基于此，本文聚焦风力发电机运行故障及维护展开研究，明确故障类型与成因，优化维护方案，对保障风电场安全稳定运行、推动风电产业规模化发展具有重要现实意义。

1 风电场风力发电机核心电气部件及运行原理

1.1 风力发电机的基本构成

(1) 核心电气部件：发电机本体是能量转换核心，定子固定不动，绕组切割磁感线产生感应电动势；转子与风轮相连，通过电磁感应实现机械能向电能的转化。变流器负责调节电能参数，将发电机输出的不稳定交流电转化为频率、电压恒定的电能，满足并网要求。主控系统是“大脑”，实时采集运行数据，发出控制指令。集电环保障转子与定子的电气连接，实现电能传输。冷却系统通过风冷或液冷，控制核心部件温度，避免过热损坏。(2) 辅助电气部件：传感器实时监测转速、电压、温度等参数，为主控系统提供决策依据；并网开关控制发电机与电网的连接，确保并网过程安全平稳；预充电回路可避免并网瞬间电流冲击，保护变流器等核心部件，辅助部件与核心部件协同工作，保障机组稳定运行。

1.2 风力发电机的运行原理

(1) 能量转换过程：风轮在风力作用下旋转，将风能转化为机械能，通过主轴传递至发电机转子，带动转子旋转产生交变磁场；磁场切割定子绕组，将机械能转化为电能，电气部分中，电能经集电环传输至变流器，经整流模块转化为直流电，再通过逆变模块转化为交流电，调整至电网适配参数后，输送至集电系统，完成电能传递与转换的全过程。(2) 运行控制逻辑：主控系统

根据传感器反馈的转速、功率等数据，调节桨距角控制风轮转速，确保发电机运行在最佳功率区间；实时监测并网状态，精准控制并网时机与电能参数。变流器承担电压、频率调节核心作用，通过控制功率器件的导通与关断，实时修正电能参数，避免电压波动、频率偏差等问题，保障电能质量，确保机组高效、稳定并网运行^[1]。

1.3 风力发电机的运行环境与运行要求

(1) 运行环境特点：机组长期处于户外复杂环境，强风易导致电气部件振动疲劳、连接松动；雷击可能击穿电气绝缘层，损坏电子元件；高温会降低元件散热效率，低温会影响润滑油流动性和电子元件性能；沙尘、盐雾会腐蚀电气触点和外壳，加速部件老化，均会影响电气设备的运行可靠性和使用寿命。(2) 核心运行要求：电能质量需满足电网标准，电压、频率波动控制在允许范围；运行稳定性要求机组可长期连续运行，减少故障停机次数；需具备防雷、防过载、防短路等安全防护功能。直驱式发电机无齿轮箱，结构简单、运行平稳，维护量小，但启动风速要求较高；双馈式发电机通过齿轮箱调节转速，发电效率高，适配风速范围广，二者在运行控制逻辑和维护要求上存在明显差异。

2 风电场风力发电机常见运行故障及成因分析

2.1 发电机本体电气故障及成因

(1) 定子故障：常见故障现象有定子绕组短路、断路及绝缘老化破损，短路时会出现机组跳闸、绕组过热冒烟，断路则导致发电机无输出电能，绝缘老化破损易引发漏电隐患。其成因主要包括机组长期过载运行使绕组温度过高，电网电压波动冲击绕组绝缘，绝缘材料长期受环境影响老化变质，以及户外盐雾、沙尘等腐蚀作用，破坏绝缘层完整性。(2) 转子故障：主要表现为转子线圈断裂、集电环拉弧、永磁同步发电机永磁体消磁，线圈断裂会导致发电效率下降，集电环拉弧会磨损部件

并产生电火花,永磁体消磁则直接影响发电能力。成因多为机组运行中的振动冲击导致线圈疲劳断裂,集电环润滑不良、接触不良引发电蚀和拉弧,长期高频振动及高温环境则会造成永磁体消磁^[2]。(3)轴承故障:属于机械与电气关联故障,常见表现为轴承磨损、疲劳剥落、温度异常升高,严重时会导致转子卡滞,影响机组正常运转。成因主要是润滑冷却不良导致部件摩擦加剧,安装时存在偏差使轴承受力不均,转子动平衡不足引发振动,加速轴承磨损和疲劳损坏。

2.2 变流器运行故障及成因

(1) IGBT故障:核心故障为IGBT温度过高、烧毁损坏,故障发生时变流器停止工作,机组无法正常并网。成因主要是热敏电阻异常,无法准确监测温度并触发保护;变流器散热系统工作异常,散热不良导致热量积聚;电网电压波动过大,超出IGBT承受范围,造成器件损坏。(2)并网相关故障:包括并网接触器拉弧、预充电故障、通讯故障,接触器拉弧会损坏触点,预充电故障导致无法正常并网,通讯故障则使变流器与主控系统失去联动。成因涉及风速不稳定,导致发电机输出电能参数波动,增加并网难度;接触器频繁动作,造成触点磨损引发拉弧;灰尘堆积影响接触器接触性能和通讯接口传输。(3)冷却系统故障:主要表现为变流器温度过高、散热失效,严重时烧毁内部器件。成因包括散热片被沙尘、杂物堵塞,散热效率下降;冷却风扇损坏或转速异常,无法有效散热;冷却液不足或变质,无法正常带走热量^[3]。

2.3 控制系统运行故障及成因

(1)传感器故障:常见风速、转速、温度传感器信号丢失、数据漂移,导致主控系统无法获取准确运行参数,进而引发控制偏差。成因包括户外电磁干扰、粉尘侵蚀,影响信号传输;传感器接线松动、接触不良;长期使用导致传感器元件老化,精度下降。(2)控制器与通讯故障:表现为控制器失灵、通讯中断、安全链故障,控制器失灵会导致机组无法接收控制指令,通讯中断使各部件联动失效,安全链故障会触发紧急停机。成因涉及强电磁干扰影响控制器正常工作;软件程序故障或升级异常;控制器内部模块损坏、接线错误。(3)变桨系统关联故障:主要有变桨指令与执行不同步、变桨轴承失效,指令与执行不同步会导致机组功率控制异常,轴承失效则影响变桨动作。成因包括机械零点偏差,导致位置定位不准;变桨轴承润滑不足,磨损加剧;位置传感器故障,无法反馈准确位置信号。

2.4 其他常见电气故障及成因

(1)雷击故障:表现为叶片、电气部件被雷击损坏,

叶片破损、电气元件烧毁,导致机组停机。成因主要是避雷系统设计存在缺陷,防护范围不足;引雷线断裂、接地不良,无法有效将雷电导入地下,导致雷电击中机组部件。(2)线路故障:常见电缆绝缘破损、接线端子松动、氧化过热,绝缘破损易引发短路,端子松动、氧化会导致接触不良、发热,甚至引发火灾隐患。成因包括户外盐雾、沙尘等环境腐蚀电缆和端子;机组运行振动冲击导致接线松动;安装时接线不规范、电缆拉扯过度,造成绝缘破损。

3 风电场风力发电机运行故障维护策略与实施

3.1 故障诊断技术与方法

(1)常规诊断方法:主要包括目视检查、红外热成像检测、超声波检测、振动监测四种核心方式,适用于常见故障的快速排查。目视检查可直观发现部件破损、接线松动、灰尘堆积等表面故障;红外热成像检测能精准识别电气部件过热、绝缘老化等隐患,避免故障扩大;超声波检测可排查轴承磨损、电缆绝缘破损等隐蔽缺陷;振动监测通过分析机组振动频率,判断转子、轴承等部件的运行状态,及时发现异常振动引发的故障,四种方法结合使用,可提升常见故障排查效率。(2)智能诊断技术:依托数据采集与分析的实时监测系统(CMS系统),实时采集机组运行参数,通过数据传输与后台分析,实现故障的早期预警;结合故障诊断算法,对采集到的转速、电压、温度等数据进行深度分析,精准识别隐蔽性、复杂性故障,如定子绕组绝缘老化、IGBT模块隐性损坏等,弥补常规诊断方法的不足,大幅提升故障诊断精度和及时性,为维护工作提供科学依据^[4]。(3)故障分级与定位:根据故障严重程度分为紧急故障、一般故障、轻微故障三级,紧急故障(如转子卡滞、短路)需立即停机处理,一般故障(如传感器漂移)可在机组运行中针对性排查,轻微故障(如表面灰尘堆积)可结合定期维护处理。同时制定标准化定位流程,结合诊断数据和现场检查,快速锁定故障部位,明确故障类型,减少故障排查时间,降低停机损失。

3.2 针对性维护策略制定

(1)发电机本体维护:制定定期检查计划,每月对定子、转子进行清洁,清除表面灰尘和杂物,每季度检测定子绕组绝缘性能,采用绝缘电阻测试等方法,对老化绝缘层进行修复或更换;定期为转子集电环涂抹润滑脂,检查线圈完整性,及时修复断裂线圈;对轴承进行定期润滑和温度监测,更换老化润滑油,发现磨损、疲劳剥落等问题及时更换轴承,强化绝缘防护,延长发电机使用寿命。(2)变流器维护:定期检查IGBT模块运行

状态,检测模块温度和电气参数,发现过热、损坏等问题及时更换;每半年对散热系统进行全面清理,清除散热片上的灰尘和杂物,检查冷却风扇运行状况,及时更换损坏部件,定期更换冷却液,确保散热效果;紧固变频器连接电缆,防止松动引发接触不良,定期检测并网接触器、预充电回路等并网部件,排查触点磨损、线路老化等隐患。(3) 控制系统维护:每季度对风速、转速、温度等传感器进行校准,确保信号传输准确,及时更换老化、失灵的传感器;定期更新控制器软件,修复软件漏洞,优化控制逻辑;检查通讯链路连接情况,排除电磁干扰,确保控制器与各部件通讯顺畅;对变桨系统进行定期校准,调整机械零点,检查变桨轴承润滑情况,及时补充润滑油,检查后备电源性能,确保突发情况下控制系统正常运行。

3.3 维护实施流程与安全规范

(1) 维护前期准备:严格执行安全停机流程,切断机组电源,悬挂安全警示标识,防止误操作;确认现场环境安全,避开强风、雷雨等恶劣天气,检查维护工具、检测设备的完好性和安全性,确保工具精度符合要求;严格遵循《风力发电场安全规程》,对维护人员进行安全培训,明确操作规范和安全注意事项,做好安全防护措施。(2) 现场维护实施:按照预设维护流程,有序开展部件检查、故障修复和参数校准工作,对排查出的故障,采用针对性修复措施,如更换损坏部件、紧固松动接线、清洁散热系统等;维护过程中做好详细记录,包括故障部位、修复方法、更换部件型号、维护时间等,确保维护过程可追溯,便于后续故障分析和维护优化。(3) 维护后验收:维护完成后,对设备进行试运行,监测机组运行参数,检查故障是否彻底消除;通过专业检测设备,检测电能质量、转速、温度等关键参数,确认符合运行要求;对照维护记录,逐项验收维护内容,确保维护工作规范、到位,设备恢复正常运行后,方可解除安全警示,恢复机组并网运行^[5]。

3.4 维护成本控制与优化

(1) 维护成本构成:主要包括人力成本、备件成本、停机损失三大类,人力成本涵盖维护人员薪酬、培训费用等;备件成本包括各类损坏部件的采购、储存费用;停机损失指维护期间机组无法发电造成的电量损失,其中停机损失和备件储备成本是成本控制的关键环节,需重点管控。(2) 优化措施:推行预防性维护模式,结合故障诊断数据,提前排查潜在隐患,减少故障停机次数,降低停机损失;合理储备备件,根据部件故障率和采购周期,制定备件储备计划,避免备件积压和短缺,降低备件储存成本;优化维护周期,根据机组运行环境、部件使用寿命,调整维护频次,避免过度维护和维护不足,减少不必要的人力和物资投入,实现运维成本的合理控制与优化。

结束语

本文系统研究了风电场风力发电机运行故障及维护相关内容,梳理了核心电气部件运行特性,剖析了各类常见故障的表现与成因,构建了涵盖诊断、维护、安全、成本控制的完整运维体系。后续可结合智能运维技术的发展,进一步优化故障诊断算法与维护模式,提升运维的智能化、精细化水平,切实降低故障发生率与运维成本,为风电产业的绿色可持续发展提供更有力的保障。

参考文献

- [1] 兰文西.风电场电气设备中风力发电机的运行维护的措施解析[J].电气技术与经济.2023,9(2):69-72.
- [2] 赵宝.分析风电场电气设备中风力发电机运行故障及维护[J].电气技术与经济.2022,25(4):151-153.
- [3] 唐书良.风电场电气设备中风力发电机的运行维护[J].通信电源技术.2023,7(4):52-54.
- [4] 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(4):201-204.
- [5] 李琰.风电机组发电机故障率高原因探讨及解决方案[J].机电信息.2022,11(7):149-152.