

极端天气条件下风力发电机组紧急运维响应机制构建

黄植金

国家电投集团广西电力有限公司 广西南宁 530000

摘要: 在全球变暖背景下, 极端天气事件频发, 给各行各业带来严峻挑战。风力发电作为新能源的重要组成部分, 对我国能源转型具有重要意义。然而, 强风、暴雨、冰冻、高温等极端天气对风电机组的安全运行造成严重威胁。风电机组在恶劣环境下运行, 其失效风险会显著增加, 可能造成设备损坏、停机, 甚至造成安全事故。因此, 建立高效的风电机组应急响应机制是保证极端天气下风电机组安全稳定运行的关键。

关键词: 极端天气; 风力发; 电机组; 紧急运维; 响应机制

在风力发电领域, 极端气象条件下的运行管理问题一直备受业界关注。传统的运行管理模式很难应对突发气候事件, 造成设备失效、停机时间延长等问题。为提升风电机组的抗灾能力与应急响应能力, 需构建一体化的应急运行与运行响应机制。这一机制应当包括能够对极端天气事件进行预警的实时监控系統, 而高效率的故障诊断技术, 能够迅速判断出设备的失效原因, 灵活的应急维护策略, 保证设备在最短的时间内恢复正常运转。因此, 探究极端天气条件下风力发电机组紧急运维响应机制构建, 为当前相关行业热议课题。

一、极端天气条件对风力发电机组的运行影响

(一) 强风天气影响机组结构安全

大风天气(如台风、大风等)严重影响风电机组的结构稳定和安全运行。一方面, 当风速超过设计风速时, 风轮将承受过大的气动载荷, 从而引起叶片剧烈振动。另一方面, 长时间的高频振动, 可能导致叶片出现裂纹、涂层脱落等疲劳损伤, 严重的甚至会导致叶片断裂。同时, 强风也会对机组塔架产生横向推力, 当风荷超过塔架的抗风承载力时, 可能造成塔架倾斜和地基沉降, 从而影响机组整体结构的稳定^[1]。且强风也会将沙子、碎石等碎片带到机组机舱壳体和叶片上, 引起外部损坏和内部部件的堵塞, 如阻塞冷却系统的进风口, 降低机组的散热效率, 引起发电机、换流器等核心部件的温升, 从而触发保护机构停机, 导致发电中断, 停机后需要对结构进行全面检修, 大大增加运营成本和停机时间。

(二) 极端低温影响机组部件性能

极端低温天气(如严寒、霜冻等)会改变材料物理特性和部件服役环境, 对风电机组运行性能产生不利影响。温度过低时, 发动机的润滑油粘度会大大增加, 流

动性能也会降低, 从而造成变速箱和轴承等传动部件的润滑不充分, 摩擦阻力增加, 这不仅会降低传动效率, 还会引起零件的过度磨损, 从而缩短其使用寿命。若温度过低, 则机油会凝结, 造成传动系卡死, 造成机组紧急停机^[2]。同时, 低温对电力系统也有一定的影响, 如在低温环境下, 电缆的绝缘层容易发生脆化, 从而增加了短路的风险, 低温环境下, 传感器、控制器等电子元器件的精度降低, 会导致数据获取偏差和控制指令延迟, 造成机组不能根据风速和风向及时调整操作参数, 降低发电效率。此外, 在低温环境中, 结冰会导致叶片表面结冰, 改变叶片气动外形, 降低风能利用效率, 同时, 覆冰会增加叶片负载, 加剧叶片振动, 增大结构破坏的风险。

(三) 暴雨洪涝影响机组基础与供电

暴雨洪涝灾害严重威胁风电机组基础稳定和供电系统安全, 持续强降雨将导致机组基础周围土体含水量急剧增加, 土体承载能力降低, 若排水不畅, 雨水渗入地基, 将导致地基混凝土开裂, 钢筋锈蚀, 地基对机组的支撑力减弱, 长期可能造成塔架倾斜, 影响机组稳定运行。同时, 积水还可能淹没过机组底部的电缆沟, 使其与变桨距系统的传动装置相连接, 造成电缆绝缘性能降低, 接地电阻增加, 电气故障发生的风险增大。如果积水渗入机舱, 也会损坏发电机和控制箱等重要的电器元件, 导致机器短路而停止工作。此外, 暴雨和洪水还可能对风电场内的道路和输电线路造成破坏, 造成运维人员不能及时到达现场进行检修, 同时造成机组发电出力中断, 影响风电场的整体发电效益。

(四) 雷电天气威胁机组电气安全

雷电天气下, 风电机组的电气系统主要有直闪和感

应闪击。如果直接闪电击中风轮叶片、塔架或机舱，强烈的雷电电流会烧毁叶片表面的雷电防护膜，破坏叶片内部结构，导致叶片失效（风力发电机叶片着火如图1所示）。当雷电通过塔架传递到地面时，会对机组内部造成强烈的电磁干扰，从而触发过电压和过电流，导致发电机、变流器和变频器等重要电子元件被烧毁，导致机组停机。虽然感应雷击并不直接作用于机组，但其产生的电磁脉冲可经空间辐射或导线传导，对机组控制系统信号造成干扰，造成传感器数据失真、控制器错误指令，造成机组突然变桨、急停等误动作，影响机组稳定运行。同时，感应雷过压还可能击穿电缆绝缘层和设备绝缘，引起电气短路，损坏低压配电系统和通信设备，造成机组和监测中心的通讯中断，无法对运行状态进行实时监控，增加故障诊断的难度。



图1 风力发电机叶片起火

二、极端天气条件下风力发电机组紧急运维响应机制构建

（一）预警分级响应：筑牢风险前置防控防线

构建科学的分级预警系统，实现风险的准确预测和提前防控，是极端天气下风电机组应急管理工作的第一步^[3]。应以多源监测数据为基础，将气象部门对极端天气（如台风、暴雪、寒潮等）、风电场实时监测数据（风速、风向、温度、湿度）和机组运行参数（齿轮箱温度、主轴转速、发电量）进行集成，利用大数据分析和人工智能算法，实现风险分级。预警等级一般分为四个等级：蓝色预警（48小时后影响，机组运行参数正常），黄色预警（24小时后影响，部分参数略有波动），橙色预警（12小时后影响，参数异常频率增加），红色预警（影响时间6小时内，机组受到直接威胁）。

根据不同的预警级别，制定不同的应对措施，在蓝色预警阶段，运维小组要对设备进行巡视，主要对叶片、塔架、底座等关键部位进行检查，清除机组周围的障碍，并准备好应急物资；警告黄色时，启动机组降负荷操作程序，使发电量低于额定功率的50%，并安排操作人员24小时值班，对参数进行实时监测。橙色预警时，果断关闭机组，关闭不必要的电源，操作人员疏散到安全区域，利用远程监测系统监视机组状态。红色预警时，启动应急指挥中心，并与当地应急机构建立联动机制，随时应对突发事件。通过分层响应，可以有效防止极端天气对机组造成不可逆转的破坏，为后续的运行维护赢得足够的时间。

（二）应急资源调配：保障运维高效开展

针对极端天气条件下风电机组应急调度问题，建立高效的应急资源调配机制是保障风电机组应急运维顺利开展的重要保障。在人员配置上，要建立一支专业的应急维修队伍，成员必须具有风电设备维修资质、极端天气工作经验和应急处理能力，并根据风电场的规模将其分成小组（50台机组1个小组，每组8-10人），明确组长、技术负责人、安全监督员等岗位职责^[4]。同时，建立跨区域人员支援机制，与周边风电场签署互助协议，当某个风电场出现人员短缺时，能够迅速调动支援力量，保证人员配备能够满足需要。

设备配置要实现“按需配置，动态补充”，核心设备包括：应急发电车（保证停电情况下设备供电），高空作业平台（叶片、机舱维修），便携式监控设备（超声波探伤仪、红外热成像仪），除冰装置（暴雪冻雨天气用电热除冰器，机械除冰器）等。要建立设备的台账，对设备的型号、数量、存放地点、维修周期等进行详细的记录，定期对设备进行检修和调试，以保证在极端天气条件下，设备仍能正常工作。

物资调配方面，风电场建立应急物资储备库，储备防滑鞋、防寒服、安全帽等防护用品，以及维修备件如电缆、传感器、轴承等，生活必需品如食品、饮水、急救药品等，并与供应商签订应急供货协议，确保物资短缺时可在4小时内补充到位。通过对资源进行科学配置，可以避免因人员、设备和材料等资源不足而造成的运行延迟，提高应急处理效率。

（三）现场运维规范：严守安全与质量底线

极端天气条件下的风电机组现场运维需要严格规范流程，保证运行质量和人员安全。在运营前，需要对工作环境进行全面的安全评估，由安全监督员检查工作环

境, 确保风速低于安全标准(一般不超过10米/s), 现场没有坍塌、触电等危险, 并对操作人员进行安全交底, 对作业步骤、危险点和防护措施进行详细的说明, 所有的工作人员都要穿好防护装备, 并带上应急通讯设备(如对讲机、卫星电话)^[5]。

在运行过程中, 需要严格按照规范进行操作, 针对台风后的机组, 首先要对塔架垂直度(偏差要控制在1‰以内)、叶片表面损伤(裂纹长度在50毫米以内)和机舱内的电气设备进水情况进行检查, 用干燥装置对受潮的部件进行烘干, 对绝缘电阻进行测试(需要超过0.5 MΩ)。暴雪天气过后, 主要对叶片和机舱顶部的积雪进行清理, 检查齿轮箱油位和油温, 防止积雪融化渗透到设备内部, 同时对刹车系统进行测试, 保证停机时可以有效锁住。强寒潮天气下, 需检查机组加热系统(如变速箱加热器、机舱加热器等)的工作状况, 防止低温引起部件冻裂, 同时要对液压系统排气, 防止油凝结而影响生产。

在运行过程中, 要做好记录工作, 填写《极端天气运维记录表》, 将工作时间、人员、工作内容、测试数据和发现的问题都记录下来, 每一台机组运行都要进行质量验收, 技术负责人签字确认, 通过后才能恢复正常运行, 不达标要制定整改方案, 直到问题解决为止, 坚决杜绝机组“带病运行”。

(四) 事后复盘优化: 推动机制持续完善

极端天气后的事后回顾优化是提高风电机组应急响应机制有效性的重要环节, 需要构建系统回顾流程, 实现“问题发现-原因分析-措施改进-机制升级”闭环管理^[6]。回顾工作应在极端天气结束后72小时内启动, 由风电场主管牵头, 组织维护组、技术组、安全部和第三方专家参加, 组成回顾组。

需要对极端天气下的预警记录, 运行日志, 设备检查报告, 故障处理记录, 机组受损情况统计等, 对运行过程中出现的预警等级判断偏差, 资源配置滞后, 现场作业不规范, 设备故障没有及时发现等问题进行分析。进行原因分析, 运用鱼骨图、5 Why分析等工具, 从制度、人、设备、技术四个方面对原因进行深挖。例如, 预警偏差可能是因为监测数据滞后造成的, 而资源的分配延迟则是因为跨区域的协作过程复杂, 而操作不当则是因为培训不够。

根据分析得出的原因, 提出相应的改进措施, 当监测数据出现滞后时, 需要对采集系统进行升级, 增加监测节点的密度, 缩短传输时间(每15分钟一次); 在跨地区合作失败的情况下, 需要对互助协议进行优化, 明确援助响应时间(2小时以内)和职责划分。对于操作人员不规范的, 要加强培训, 每季度至少要进行一次极端天气操作演练, 提高实际操作能力。在此基础上, 对预警分级标准、资源分配流程、现场运维规范等进行更新, 并建立长效监管机制, 每半年一次评估机制的运行效果, 并在此基础上不断优化完善, 以保证风电机组的安全稳定运行。

结束语

综上所述, 构建极端气象条件下风电机组应急响应机制具有重要意义, 这样不仅可以提高设备运行的可靠性与安全性, 而且可以有效地减少由于恶劣天气造成的设备失效, 造成的经济损失。随未来, 着技术的发展和经验的积累, 应急管理系统将向智能化、自动化、高效率方向发展。此外, 应加强运维人员专业训练及应急演练, 亦可进一步提高作业人员应对极端天气的能力。随着该技术的不断改进与应用, 风电产业将具备应对极端天气的能力, 可推动全球能源转型与可持续发展。

参考文献

- [1] 张宗博. 风力发电机组的故障处理和运维技术[J]. 电力设备管理, 2025, (04): 138-140.
- [2] 陈仕祥, 谭霖, 张欣. 风力发电机叶片的早期运维要点分析[J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60(08): 113-115.
- [3] 杨嘉龙, 王国庆, 苏东鹏, 张旭东, 覃波, 石振宇, Ebrahim Ahmed Hussein Saad. 风力发电机组运维数字孪生系统设计[J]. 工程机械, 2024, 55(05): 1-4+255.
- [4] 王新居. 风力发电机组的故障处理及运维策略研究[J]. 光源与照明, 2022, (11): 116-118.
- [5] 张雪岩. 风力发电机叶片的早期运维策略[J]. 电子技术, 2022, 51(03): 100-102.
- [6] 吴士华, 庄勇, 王洪星. 浅析风力发电机组三维虚拟解剖式检修培训系统设计与开发[J]. 中国设备工程, 2021, (21): 18-21.