

探究风电场的风机设备运行维护的优化策略

王奋汝

国华(河北)新能源有限公司 河北 张家口 076791

摘要: 随着风电行业快速发展,风机设备运行维护的效率与成本成为制约风电场经济效益的关键因素。本文针对风电场设备运行特点与现有维护策略的不足,提出基于全生命周期理念的多层级优化策略框架,并从技术升级、试点应用、风险管控等维度构建实施路径。通过状态监测、故障预测、协同优化等手段,可有效提升设备可靠性,降低维护成本,缩短停机时间,为风电场高效运营提供技术支持。

关键词: 风电场; 风机设备; 运行维护; 全生命周期; 预测性维护

引言: 风电场风机设备作为清洁能源的核心载体,其运行维护水平直接影响发电效率与经济效益。传统维护策略以定期检修与故障后修复为主,存在“过度维护”或“维护不足”的矛盾,且数据利用率低、备件管理粗放。本文从设备运行特点出发,构建全生命周期维护体系,提出多层级优化策略,并制定阶段化实施路径,为风电场运维管理提供理论指导与实践参考。

1 风电场风机设备运行维护现状分析

1.1 设备运行特点与故障模式

风电场风机作为核心发电设备,其运行环境复杂且部件承受高负荷,导致故障模式呈现多样性。齿轮箱作为传动系统的关键部件,长期承受交变载荷与冲击应力,易引发齿面点蚀、胶合及轴承磨损。此类故障通常源于润滑不足或润滑油污染,润滑油中金属颗粒的累积会加速齿轮副的磨损,最终导致传动效率下降甚至停机。发电机则因电磁与机械耦合作用,面临绝缘老化、绕组短路及轴承电蚀等问题。绝缘材料在高温、高湿环境下易发生热击穿,而轴承电蚀则由轴电压与润滑膜共同作用引发,表现为轴承滚道表面出现鱼鳞状蚀坑。叶片作为捕获风能的直接部件,长期承受气动载荷与交变应力,易产生前缘腐蚀、后缘开裂及雷击损伤。前缘腐蚀主要由沙尘、盐雾等环境介质侵蚀复合材料表面防护层导致,后缘开裂则源于层间应力集中与疲劳裂纹扩展。常见故障类型可归纳为机械磨损、电气故障与环境影响三类。机械磨损以齿轮箱与轴承故障为主,表现为振动加剧、温度异常及噪声升高;电气故障涵盖发电机绝缘失效、变频器元件损坏及电缆老化,常导致功率波动或停机;环境影响则以叶片损伤、塔筒腐蚀及基础沉降为代表,直接威胁风机结构安全。

1.2 现有维护策略的不足

传统维护策略以定期维护与故障后维护为主,存在

显著局限性。定期维护依赖固定周期计划,未考虑设备实际运行状态,易导致“过度维护”或“维护不足”。例如,齿轮箱润滑油更换周期若按时间固定,可能因运行工况差异造成润滑油性能未达标即被更换,或已失效仍继续使用,造成资源浪费与故障风险^[1]。故障后维护虽能定位具体问题,但故障发生后需停机检修,导致发电量损失与维修成本激增。例如,发电机绕组短路若未通过状态监测提前预警,可能引发火灾等二次事故,增加维修难度与时间成本。数据利用不足是当前维护策略的核心短板。风机运行数据(如振动、温度、功率等)虽通过SCADA系统实时采集,但多数风电场仅用于故障报警,缺乏深度分析与价值挖掘。维护决策仍依赖经验判断,如通过人工巡检发现齿轮箱温度异常后安排检修,而非基于历史数据预测故障趋势。备件库存管理缺乏精准需求预测,导致关键备件短缺或积压,进一步加剧维护成本。

1.3 优化需求与目标

针对现有问题,风电场风机运行维护需聚焦三大优化方向。提升设备可靠性是首要目标。通过引入状态监测与故障预测技术,实现从“被动响应”到“主动预防”的转变。例如,利用振动传感器与油液分析技术,实时监测齿轮箱运行状态,结合机器学习算法预测齿面点蚀趋势,提前制定维护计划,避免突发故障。降低维护成本需从全生命周期视角优化资源分配。通过备件需求预测模型,结合历史故障数据与设备运行工况,动态调整备件库存水平,减少资金占用。采用远程诊断与专家支持系统,降低现场维护人力需求,缩短故障定位时间。缩短停机时间需依赖维护流程的精益化改造。通过优化检修计划与资源调度,实现多任务并行作业。例如,在叶片更换过程中,同步开展齿轮箱与发电机检修,减少停机频次。建立快速响应机制,利用无人机与

机器人技术替代人工巡检,提升故障发现与处理效率。

2 运行维护优化策略框架

2.1 全生命周期维护理念

风电场风机设备的运行维护需打破传统阶段式管理的局限,构建贯穿设计、制造、运行、退役的全生命周期协同优化体系。这一理念强调各阶段间的无缝衔接与动态反馈,通过系统性设计减少后期维护成本,以数据驱动实现维护策略的精准适配。在设计阶段,需将可维护性作为核心指标融入风机架构。例如,齿轮箱应采用模块化设计,便于快速更换润滑系统组件;叶片内部需预留检测通道,降低无损检测难度。制造阶段则需强化工艺控制,通过仿真分析优化齿轮齿形参数,减少应力集中,同时采用自动化装配线提升发电机定子绕组的绝缘均匀性。这一阶段的前置优化可显著降低后期故障率。运行阶段是维护策略落地的关键环节。需建立基于设备健康状态的动态调整机制,通过实时监测数据修正维护周期。例如,在风速波动较小的区域,齿轮箱润滑油更换周期可延长20%;而在盐雾腐蚀严重的沿海区域,塔筒防腐维护频次需增加50%。数字孪生技术的应用可模拟不同维护策略下的设备性能演化,为决策提供量化依据。退役阶段需注重资源回收与生态修复。退役叶片可通过化学分解技术回收玻璃纤维与树脂,实现材料循环利用;塔筒钢结构可改造为通信基站或光伏支架,延长经济寿命。这一阶段的闭环管理不仅减少环境污染,还可为后续项目提供经验参考。

2.2 多层级维护策略体系

2.2.1 基础层

基础层作为保障设备维护工作高效推进的根基,标准化建设与人员培训体系构建至关重要。标准化是提升维护效率的核心要素。针对齿轮箱换油、叶片清洗、发电机绝缘检测等各项维护流程,需制定全面且细致的操作规范^[2]。以齿轮箱换油为例,要严格遵循“三级过滤”原则,从油品初始存储到最终注入,每一环节都需精准把控,以此保障油品的高清洁度,避免因杂质引发设备故障。叶片清洗时,选用中性清洗剂是关键,防止对叶片表面涂层造成损伤,确保叶片性能不受影响。人员培训是维护工作顺利开展的有力支撑。构建“理论-实操-认证”三级培训体系,理论培训涵盖设备原理、故障模式、安全规范等多方面知识,为实际操作筑牢理论根基。实操训练借助虚拟仿真平台,模拟齿轮箱拆装、叶片无损检测等高风险作业场景,让学员在安全环境下积累经验。认证考核则通过理论与实操双重评估,确保人员技能达到标准要求,为设备维护工作提供坚实的人才

保障。

2.2.2 技术层

状态监测是技术层的核心。通过振动传感器、油液分析仪、红外热像仪等设备,实时采集齿轮箱振动频谱、润滑油铁谱、发电机绕组温度等关键参数。需建立多源数据融合机制,消除单一监测手段的局限性。例如,齿轮箱振动信号的时频特征可反映齿轮啮合状态,油液中金属颗粒含量变化可预警轴承磨损。故障诊断需构建“特征提取-模式识别-故障定位”三级诊断体系。通过小波变换、经验模态分解等算法提取信号特征,采用支持向量机、神经网络等模型进行故障分类,最终定位至具体部件。例如,叶片雷击损伤可通过声发射信号的频带分布特征识别,发电机绕组短路可通过定子电流谐波分析定位。预测性维护是技术层的目标。基于状态监测数据,采用隐马尔可夫模型、长短期记忆网络等算法预测设备剩余使用寿命。例如,齿轮箱润滑油铁谱数据与振动信号的联合分析,可提前6个月预测齿面剥落风险。需建立动态预警阈值,根据设备运行工况自动调整报警灵敏度。

2.2.3 管理层

维护计划优化需构建“需求驱动-资源约束-成本最优”的决策模型。基于设备健康度评估结果,制定差异化维护策略。例如,对健康度低于60%的齿轮箱实施专项检查,对健康度高于80%的设备延长维护周期。需考虑备件库存、人员技能、运输成本等多维度约束,采用遗传算法、粒子群算法等优化技术生成最优计划^[3]。资源调度需实现人员、设备、备件的高效协同。通过地理信息系统(GIS)规划最优维护路径,减少运输时间;采用移动式维护平台,整合齿轮箱检测仪、叶片超声探伤仪等设备,提升现场作业效率。需建立技能矩阵,根据人员专长分配任务,例如,将具备齿轮箱维修经验的人员与电气调试人员组成联合小组,提升复杂故障处理能力。绩效评估需构建多维度评价体系。设备可靠性指标(如MTBF、MTTR)反映维护效果,成本指标(如单位千瓦维护费用)衡量经济性,客户满意度指标(如发电量损失)体现社会效益。需建立PDCA循环机制,通过定期审计与反馈持续改进维护策略。通过全生命周期协同优化与多层级策略体系,风电场可实现设备可靠性提升、维护成本降低、停机时间缩短的目标,为清洁能源产业可持续发展提供技术支撑。

3 维护策略实施路径

3.1 阶段化实施计划

在维护策略的初期阶段,重点应放在技术升级和人

员培训上。技术升级包括引入先进的监控设备、传感器以及数据分析工具,确保能够实时监测设备状态并及时发现潜在问题。与此同时,针对现有员工进行系统化的培训,使其掌握最新的维护技术和操作规范。通过定期举办内部研讨会和技术讲座,增强员工的专业技能和应急处理能力。还可以邀请外部专家进行专题讲座或工作坊,分享行业最佳实践和最新动态。进入中期阶段后,可以在选定的部分关键设备或区域开展试点项目,尝试新的维护方法和技术手段。例如,采用预测性维护策略,利用物联网(IoT)和大数据分析技术对设备运行状况进行实时监控和故障预测。在此过程中,需要建立详细的评估体系,定期收集反馈信息,并根据实际情况调整优化方案。要注重记录每次维护活动的效果,以便为后续全面推广提供依据和支持。通过试点项目的实施,可以有效验证新策略的实际效果,发现潜在的问题并加以改进。当试点项目取得成功并积累了足够的经验后,便可以考虑将这些成功的做法和策略逐步推广到整个企业范围内。制定详细的推广计划,明确各阶段的目标和任务,确保所有相关人员都能了解并遵循新的维护流程。为了保证策略的有效性和适应性,在推广过程中还需不断进行跟踪评估和反馈收集。通过设立专门的监督小组或委员会,负责协调各部门之间的合作,并定期召开会议讨论遇到的问题及解决方案。还应鼓励全体员工积极参与到持续改进的过程中来,形成良好的企业文化氛围。

3.2 风险管理与应对措施

在维护策略实施过程中,不可避免地会遇到各种技术风险。比如,传感器可能出现失效情况,导致无法准确获取设备状态信息;算法误差也可能影响故障预测的准确性。需要建立完善的技术支持体系,确保有足够的专业技术人员随时待命解决突发问题。加强日常巡检力度,及时发现并更换老化或损坏的传感器。对于算法误差,则可以通过增加样本量、优化模型结构等方式不断提高其精度和可靠性^[4]。除了技术风险外,管理风险同样不容忽视。组织变革往往伴随着一定的阻力,部分员工可能因为习惯于旧的工作方式而对新策略持抵触态度。为克服这一障碍,需提前做好沟通工作,向员工解释新

策略的优势及其带来的好处。另外,数据安全也是必须重视的一个方面。随着信息化程度的加深,如何保护敏感信息不被泄露成为一大挑战。应建立健全的数据管理制度,采取加密传输、访问控制等措施,确保数据的安全性和完整性。

3.3 协同优化机制

实现高效维护不仅依赖于单一部门的努力,还需要各个相关部门之间密切配合。例如,生产部门应及时向维护团队通报设备运行中的异常情况;技术部门则负责提供技术支持和解决方案;采购部门要根据维护需求合理安排备品备件的采购计划。通过建立有效的沟通渠道和协作平台,促进各部门之间的信息共享和资源整合,从而提高整体工作效率和服务水平。为了进一步提升维护质量,可以考虑与设备制造商建立合作关系,共同开展维护工作。例如,借助制造商提供的远程诊断服务,及时获取设备健康状况报告,并据此制定相应的维护计划。此外,还可以邀请制造商的技术人员参与现场维护指导,传授先进维护理念和技术知识。这种合作模式不仅可以降低企业的维护成本,还能缩短故障修复时间,最大限度地减少停机损失。

结束语

风电场风机设备运行维护的优化需从全生命周期视角出发,构建多层次维护策略体系。通过技术升级、试点应用、风险管控与协同优化等路径,可有效提升设备可靠性,降低维护成本,缩短停机时间。未来,需进一步深化数据挖掘,推动智能化维护技术的创新应用,为风电场高效运营提供持续支撑。

参考文献

- [1]王天川.探究风电场的风机设备运行维护的优化策略[J].电力设备管理,2023(1):29-31.
- [2]杜辰浩.探究风电场的风机设备运行维护的优化策略[J].电脑爱好者(普及版)(电子刊),2022(6):4211-4212.
- [3]尹洪璋.风电场的风机设备运行维护的优化[J].集成电路应用,2021,38(11):212-213.
- [4]张瀛.风电场运行维护管理探索[J].新型工业化,2021,11(06):194-195.