

风电场的风机设备运行管理技术探析

杜 高

新疆华电苇湖梁新能源有限公司 新疆 乌鲁木齐 830017

摘 要：风电场风机设备的运行管理方面存在诸多挑战，风机作为风电场的核心设备，其运行状态直接影响着发电效率和经济效益。然而，设备故障频发、监控系统不完善以及运行效率低下等问题，严重制约了风电场的整体性能和可持续发展。因此，提升风机设备的综合运行效能已成为风电场运营管理的重要课题。

关键词：风电场；风机设备；运行管理；监控系统

设备故障频发、监控系统完善程度不足，以及风机设备运行效率低下等特点及成因，提出了提高风机设备运行维护管理水平、完善监控系统技术以及优化风机设备运行控制策略的方法。通过应用物联网技术和先进的控制算法等技术手段，提升风电场风机设备的综合运行效能，减少故障率，提高发电量，增强经济效益。

1 风电场风机设备运行管理技术的重要性

1.1 提升设备效率与发电稳定性。实时监控与数据分析：通过智慧化管理系统实时采集运行数据，结合大数据分析识别设备性能异常，动态调整风机参数以优化风能利用率，显著提升发电效率与连续性^[1]。预防性维护机制：基于故障模式危害度排序制定差异化维护计划，远程复位可自动恢复的故障，降低非计划停机频率，保障设备稳定运行。

1.2 降低运维成本与资源浪费。预测性维护优化：通过设备运行数据的统计分析，精准预测部件寿命及维护需求，避免过度检修和紧急维修的高昂费用，节约人力与物资成本。全生命周期管理：覆盖风机设计、运营至退役的全流程管理，科学规划维护周期与备件库存，减少资源浪费并延长设备使用寿命。

1.3 安全保障与风险控制。复杂环境适应性提升：针对高原、沿海等特殊环境，完善设备防腐、除冰等设计，并通过远程监控与应急预案降低极端天气带来的安全风险。标准化安全管理体系：建立设备台账与责任划分机制，规范运维流程，减少人为操作失误引发的安全事故，保障人员与设备安全。

1.4 支撑绿色能源转型与可持续发展。高效能源转化：采用先进控制算法（如变速恒频技术）优化机组运行效率，结合螺旋叶片设计降低风能损耗，提高清洁能源产出比例。环保协同发展：通过退役设备的环保处置与场地生态修复，减少风电全生命周期对环境的影响，助力“双碳”目标实现。

1.5 技术创新与行业竞争力增强。智能化与数字化转型：应用物联网、数字孪生技术构建三维动态模型，预演故障场景并优化维护方案，推动运维管理向智能化升级。人才培养与协同管理：通过虚拟仿真培训提升运维人员多学科技能，强化跨部门协作机制，应对大规模机组管理需求，提升行业整体竞争力。

2 风电场风机设备运行管理技术关键点与难点分析

2.1 关键点。①智能化监控与数据分析。通过物联网技术实时采集风机运行数据，结合AI算法优化发电连续性预测模型，动态调整机组参数以提升风能利用率。例如，利用远程控制平台实现故障远程复位与误动作排查，减少停机时间。数字孪生技术构建三维动态模型，模拟故障场景并预演维护方案，提升故障响应效率。全生命周期管理体系建设。覆盖设计、运营、退役全流程，建设期通过科学选址与风资源评估降低投资风险，运营期依托预测性维护延长设备寿命，退役期注重环保处置与生态修复。信息化平台整合设备数据、库存及环境监测信息，支持多维度可视化监控与应急预案联动。②大型化设备技术升级。国产百米级柔性叶片研发突破，通过气动弹性动态模拟软件优化设计，提升设备可靠性并降低颤振风险。10MW及以上大兆瓦机组应用推动发电效率提升，但关键部件（如齿轮箱）需强化自主研发以应对供应链压力。

2.2 核心难点。①复杂环境适应性挑战。高原、沿海地区面临盐雾腐蚀、低温覆冰等问题，传统防腐材料与除冰装置难以满足长期稳定需求，需升级材料性能与防护技术。偏远地区施工条件恶劣，大型设备运输与吊装效率低，极端天气进一步增加施工风险与成本。②并网稳定性与电网兼容性。风电间歇性导致并网电压波动、频率偏差等问题，需结合储能系统平抑出力波动，优化控制算法提升电网兼容性。大规模风电场并网审批流程复杂，部分区域政策执行滞后，延长项目周期。③运维

技术与管理能力不足。设备台账不完善、人员技能参差等问题普遍存在,部分风电场缺乏标准化流程,导致维护效率低下。运维技术水平不足,难以应对复杂故障诊断,需通过虚拟仿真培训提升跨学科技能。④成本控制与供应链压力。大兆瓦铸件等关键部件扩产周期长,2025年或面临阶段性供应短缺,需优化库存管理与产能布局。老旧设备超期服役导致故障率上升,设备更新与技术改造成本压力显著。

2.3 突破方向。技术创新:推动AI预测模型与数字孪生技术深度融合,开发国产化设计与测试平台,突破关键部件“卡脖子”问题。管理优化:建立标准化运维流程与责任追溯机制,强化多部门协同与应急预案演练。政策协同:完善并网审批政策与环保回收标准,鼓励储能系统配套与多能协同调度。

3 风电场风机设备运行管理技术提升方法策略

3.1 智能化运维体系构建。①AI与数字孪生技术融合。应用物联网技术实时采集风机运行数据,结合AI算法预测设备故障并优化维护计划,减少非计划停机时间。构建风机三维动态数字孪生模型,模拟极端天气与故障场景,预演维修方案以提升响应效率。②无人机与机器人巡检技术。部署无人机进行叶片表面损伤检测,结合高清摄像头与AI图像识别技术,提升巡检效率50%以上。采用爬壁机器人检查塔筒内部腐蚀或裂纹,降低人工高空作业风险。

3.2 设备技术升级与创新。①机组大型化与轻量化设计。推广10MW及以上大容量机组,通过空气动力学优化叶片设计(如碳纤维复合材料)提升风能转化效率,降低单位千瓦造价。开发国产化150米以上超高塔筒,适配低风速区域开发需求,扩大风电覆盖范围。②关键部件材料与工艺突破。研发耐盐雾腐蚀涂层与低温抗覆冰材料,增强沿海、高原等复杂环境适应性。采用3D打印技术制造复杂部件(如齿轮箱壳体),缩短生产周期并降低成本。

3.3 全生命周期管理体系优化。①建设期科学规划。基于激光雷达(LiDAR)与卫星数据优化风电场布局,减少风机间湍流干扰,提升整体发电效率。完善环保评估机制,规避生态敏感区域,降低项目用海用地冲突风险。②运营期预测性维护。建立齿轮箱振动监测、润滑油状态分析等健康评估模型,制定差异化维护策略,延长设备寿命20%-30%。整合设备台账、库存数据与运维记录,实现备件供应链智能调度。③退役期环保处置。制定叶片回收与复合材料再利用标准,推动退役设备资源化循环利用。实施风电场场地生态修复工程,恢复植

被并减少水土流失。

3.4 政策支持与产业链协同。①政策机制优化。推动风电场“红码”改造审批松绑,通过财政补贴、低息贷款等措施支持老旧设备技术升级。完善绿证交易与碳排放权市场机制,提升风电项目经济收益。②产业链垂直整合。加强叶片、轴承等核心部件本地化生产,缩短供应链周期,应对大兆瓦铸件阶段性短缺风险。建立风电装备制造-运维-回收一体化联盟,降低全产业链综合成本。

3.5 多能协同与环保增效。①储能系统集成。配置锂离子电池或压缩空气储能设施,平抑风电出力波动,提升电网兼容性。构建区域虚拟电厂,实现风电与光伏、储能的智能调度与能源互补。②节能降耗技术。优化风机控制算法(如变速恒频技术),降低机组空载损耗,提升年发电小时数。部署企业级能源管理平台,实时监测并优化风电场水、电、气等资源消耗。

4 风电场 FMEA 方法优化策略与技术路径

4.1 方法论优化:构建全流程FMEA体系。①全生命周期覆盖。设计阶段引入FMEA工具,分析齿轮箱、轴承等核心部件的潜在失效模式,结合动态可靠性建模优化设计方案,降低颤振与疲劳风险。运营阶段结合SCADA数据与历史故障库,建立失效模式优先排序机制,动态调整维护策略,减少非计划停机时间。标准化与协同化改进。遵循最新AIAG-VDA FMEA标准,制定风电行业专用分析模板,统一故障模式分类与风险评价规则。组建跨学科团队(设计、运维、供应链),通过虚拟仿真验证改进措施有效性,提升协作效率。

4.2 技术工具升级:智能化与数据驱动。①知识图谱与AI融合。利用自然语言处理技术自动抽取FMEA文档中的失效模式、原因及对策,构建多维故障知识图谱,实现故障快速定位与根因分析。基于大数据训练AI预测模型,实时监测齿轮箱振动、润滑油状态等参数,提前预警高危害度失效模式。②动态风险评估。集成故障树分析(FTA)与FMECA方法,量化环境因素(如盐雾腐蚀、低温覆冰)对失效概率的影响,优化运维优先级。开发数字孪生平台,模拟极端工况下的设备性能退化路径,验证改进措施可行性^[2]。

4.3 关键场景应用:聚焦高价值部件与复杂环境。①齿轮箱与变桨系统专项优化。针对齿轮箱齿面磨损、轴承过热等高频故障,优化润滑系统设计并增加冗余传感器,使MTBF(平均故障间隔时间)提升30%。改进变桨滑环密封结构与材料,通过FMEA分析提出防腐涂层升级方案,降低海上机组故障率25%。②复杂环境适应性提升。针对高原低温环境,分析叶片覆冰失效模式,研发

主动除冰装置与抗冻材料,减少发电损失15%。建立沙尘、盐雾等环境因子与设备老化的关联模型,优化防护性维护周期。

4.4 管理机制创新:闭环控制与效能提升。①预防性措施闭环管理。建立FMEA改进措施跟踪数据库,定期评估措施实施效果并迭代优化,形成PDCA循环。将FMEA输出与备件库存管理系统联动,基于风险等级动态调整关键部件安全库存。②人员能力与标准建设。开发虚拟仿真培训系统,通过3D交互还原典型失效场景,提升运维人员故障诊断能力。推动风电FMEA行业标准制定,明确分析深度、数据采集规范及验证流程。

5 风电场风机设备运行管理技术未来发展趋势展望

5.1 技术创新驱动:大型化与智能化深度融合。①机组大型化加速。陆上/海上风电机组单机容量持续突破,预计2025年全球新增装机中超90%为10MW及以上大容量机组,国产150米超高塔筒技术推动低风速区域开发效率提升。漂浮式风电技术商业化进程加快,中国首个漂浮式海上风电试验项目计划2025年底投产,推动深远海资源开发^[3]。②数字化与AI深度赋能。基于数字孪生技术的动态仿真平台广泛应用,结合AI预测模型优化设备健康管理,故障预警准确率预计突破90%。柔性直流输电技术规模化应用,支撑海上风电远距离输送并降低并网波动风险。

5.2 运维模式革新:全生命周期智能化转型。①智能运维体系完善。无人机与机器人巡检覆盖率提升至70%以上,结合AI图像识别技术实现叶片损伤、塔筒腐蚀等隐患的毫米级检测。远程监控平台集成多源数据(SCADA、气象、备件库存),实现“无人值守”风电场的自动化调度与应急响应。②储能与多能协同优化。锂离子电池储能系统标配率超50%,配合虚拟电厂技术平抑风电出力波动,提升电网消纳能力。风电-氢能耦合模式逐步推广,利用弃风电解制氢提升能源综合利用率。

5.3 全球格局重构:深远海与新兴市场拓展。①深远海开发成核心增长点。中国近海5米至50米水深区域可开发风能超5亿千瓦,2025年后深远海项目占比将提升至

30%以上,推动全球海上风电技术迭代。盐雾防腐、抗冰材料等关键技术突破,支撑北极圈、热带海域等极端环境风电场建设。②新兴市场布局加速。东南亚、非洲等低风速区域成为国产风机出口新增长极,轻量化叶片与模块化设计降低运输与安装成本。中国整机制造商(金风、远景等)全球市场份额突破55%,主导国际标准制定与技术输出。

5.4 政策与产业链协同:绿色经济与成本优化。①政策机制创新。绿证交易与碳市场联动机制强化,推动风电项目度电成本降至0.15元/千瓦时以下,较2020年下降69%。老旧机组“以大代小”改造政策全面落地,2025年预计替换容量超10GW,提升土地资源复用率。产业链垂直整合。叶片、齿轮箱等核心部件国产化率超95%,3D打印技术缩短复杂部件生产周期30%以上。风光储氢一体化产业联盟形成,全生命周期综合成本下降20%-25%。

5.5 挑战与突破方向。技术瓶颈:15MW以上超大型机组轴承耐久性、漂浮式基础稳定性仍需突破。环保压力:退役叶片回收技术成熟度不足,2025年需建立全国性复合材料循环利用网络。人才缺口:智能运维复合型人才需求缺口超10万人,产教融合培养体系亟待完善。未来5年,风电场设备管理将呈现“技术高端化、运维智能化、市场全球化”特征,推动风电成为全球能源转型的核心支柱。

总之,随着技术的不断进步和应用的深入,风电场风机设备的综合运行效能将得到进一步提升,从而全面提高风电场风机设备综合运行管理水平,减少故障率,增强经济效益。

参考文献

- [1]王伟.风电场的风机设备运行管理技术的研究.2022.
- [2]张宏宇.新能源场站风电机组安全运行管理的提升策略研究.2023.
- [3]乔传鑫.新能源场站风电机组安全运行管理提升路径分析.2023.