

风电机组全生命周期可靠性评估与维护策略

余 飞 陈富亮

华能(甘肃)新能源有限公司 甘肃 酒泉 735000

摘要: 随着全球能源结构向清洁低碳转型,风电作为可再生能源的重要组成部分,其装机容量持续快速增长。然而,风电机组运行环境复杂、工况多变,设备故障频发,严重影响发电效率与经济效益。本文围绕风电机组全生命周期的可靠性问题,系统阐述了从设计制造、安装调试、运行维护到退役回收各阶段的可靠性影响因素,并构建了基于多源数据融合的全生命周期可靠性评估体系。在此基础上,提出了以状态监测为基础、风险评估为导向、以成本效益为目标的智能维护策略框架。通过引入数字孪生、人工智能与大数据分析技术,实现了对关键部件(如齿轮箱、发电机、叶片)的故障预测与健康管理的(PHM)。研究成果可为风电企业优化运维决策、延长设备寿命、提升资产价值提供理论支撑与实践指导。

关键词: 风电机组;全生命周期;可靠性评估;维护策略;状态监测;故障预测

引言

在全球应对气候变化、追求“双碳”目标下,风能因技术成熟、经济性提升,成为各国能源战略核心。截至2024年底,全球风电累计装机超1000GW,中国以超400GW居首。但风电机组多部署在恶劣环境,长期受多重应力,关键部件易失效,平均年故障率高,非计划停机占比大。传统风电运维有定期检修和事后维修模式,存在“过度维护”或“维护不足”风险,难以兼顾安全与经济。近年来,基于状态的维护和预测性维护成为研究热点,但现有研究多聚焦单一部件或阶段,缺乏全生命周期考量。全生命周期理念涵盖产品各阶段,引入风电领域可识别阶段对可靠性的累积影响,实现早期干预与全局优化。构建风电机组全生命周期可靠性评估与维护策略体系,对提升运营效率、降低成本、保障电网安全意义重大。本文将梳理各阶段可靠性特征,建立评估模型,提出维护策略框架,支撑风电高质量发展。

1 风电机组全生命周期阶段划分与可靠性影响因素

风电机组的全生命周期可划分为五个主要阶段:设计与制造、运输与安装、运行与维护、延寿评估、退役与回收。各阶段对机组最终可靠性的影响机制如下:

1.1 设计与制造阶段

此阶段决定风电机组具有可靠性。设计疏漏或制造偏差会放大后续运行故障风险。如叶片气动外形未考虑当地湍流特性,运行中可能颤振甚至断裂;齿轮箱润滑回路布局不合理,易诱发点蚀或胶合失效;材料选型不当,会削弱部件极端环境耐久性,如高湿高盐地区用普通碳钢会加速塔筒和基础腐蚀。制造工艺控制水平,如焊接质量、轴承装配精度等,也影响设备初始健康状态。

1.2 运输与安装阶段

虽为过渡环节,但影响不容小觑。现代风电机组超大部件在运输安装中易受机械冲击、振动和环境侵蚀。海上风电项目因船运颠簸、海况复杂等,安装风险加剧。塔筒垂直度偏差会使偏航系统受力不均,加速齿轮磨损;螺栓预紧力问题可能导致连接部位松动断裂^[1]。运输产生的微裂纹或涂层损伤,会在长期交变载荷下扩展为结构性失效。因此,精细化物流规划、严格安装工艺控制及安装后空载测试是关键。

1.3 运行与维护阶段

此阶段最长且不确定性高,是可靠性退化最明显时期。机组持续暴露于复杂外部环境,环境应力与内部运行载荷耦合,驱动关键部件性能衰退。主轴承、齿轮箱等核心子系统故障高发,齿轮箱因承受高频交变应力,故障率占整机20%以上。运维策略质量也影响设备寿命,频繁非计划停机降低发电收益,还可能引入新隐患。准确感知设备状态、科学预判退化趋势、制定高效维护计划,是提升此阶段可靠性的核心挑战。

1.4 延寿评估阶段

首批商业化风电项目进入设计寿命末期,延寿评估受关注。延寿并非简单延长时间,而是基于机组当前健康状态诊断,判断其能否安全、经济运行。需综合考虑结构疲劳累积损伤、材料老化程度等多重因素,如塔筒焊缝疲劳裂纹需定量评估,叶片复合材料树脂降解导致刚度下降。盲目延寿埋隐患,过早退役浪费资源,延寿决策需精准预测剩余寿命与量化风险,检验全生命周期可靠性管理能力。

1.5 退役与回收阶段

虽不影响运行期间可靠性,但关乎全生命周期闭环管理。风电产业规模扩大,退役潮将至,环保高效处理报废设备,尤其是复合材料叶片,成全球难题。当前主流填埋不符合绿色发展理念,未来趋势是“可回收设计”理念前移,设计时考虑材料可拆解性、部件可再利用性。部分状态良好的电气部件可进入二级市场或用于其他项目,实现资源循环。退役阶段规划关乎环境责任,也反向激励前期提升可持续性设计水平。

2 全生命周期可靠性评估方法

为科学化风电机组在不同阶段的可靠性水平及其演化规律,需构建一套融合多源信息、动态更新的评估体系。

2.1 可靠性指标体系

传统的可靠性评价多依赖单一指标,如平均无故障工作时间(MTBF),但难以全面反映风电系统的复杂性。为此,有必要建立多维度指标体系。固有可靠性主要由设计与制造决定,可通过失效率 λ 或威布尔分布参数表征;使用可靠性则更贴近实际运行表现,常用可用率、平均故障间隔时间(MTTF)和平均修复时间(MTTR)来衡量;任务可靠性关注特定调度指令下的履约能力,适用于参与电网调频的场景;而经济可靠性则将技术指标与成本挂钩,引入度电成本(LCOE)中运维占比、单位千瓦维护费用等,实现技术-经济协同评估。这种分层指标体系有助于从不同视角审视可靠性,并为差异化维护策略提供依据。

2.2 多源数据融合建模

现代风电机组普遍配备SCADA系统、状态监测系统(CMS)、气象站乃至无人机巡检平台,产生了海量异构数据。这些数据蕴含着设备健康状态的丰富信息,但彼此孤立、格式不一,需通过数据融合技术进行整合。具体而言,运行数据(如功率、转速、温度、振动)反映了实时工况;环境数据(风速、湿度、盐雾浓度)揭示了外部应力来源;维护记录则提供了历史干预痕迹;而设计参数(材料属性、结构模型)则构成物理约束边界^[2]。通过数据清洗、时间对齐、特征提取与降维等预处理步骤,可构建统一的数据湖,为后续建模奠定基础。值得注意的是,数据质量本身也是可靠性的一部分——传感器漂移、通信中断等问题需纳入评估框架予以校正。

2.3 动态可靠性建模方法

在数据融合的基础上,需采用动态建模方法捕捉可靠性随时间演化的特性。基于物理的退化模型从第一性原理出发,如利用Miner线性累积损伤理论计算轴承在变幅载荷下的疲劳寿命,具有明确的物理解释性,但对

复杂系统建模难度大。相比之下,数据驱动方法更具灵活性:统计模型(如威布尔回归)适用于故障时间数据分析;机器学习模型(如随机森林、XGBoost)擅长处理高维特征与非线性关系,可用于故障分类;而深度学习模型(如LSTM、Transformer)则在时序退化轨迹预测方面表现出色。近年来,混合建模范式日益受到重视,即将物理方程作为先验知识嵌入神经网络(Physics-Informed Machine Learning),既保留数据驱动的适应性,又增强小样本下的泛化能力。例如,在预测齿轮箱剩余寿命时,可将齿轮动力学微分方程作为损失函数的正则项,引导模型学习符合物理规律的退化路径。

2.4 数字孪生赋能的可靠性仿真

数字孪生技术为全生命周期可靠性评估提供了全新范式。通过构建与物理机组一一对应的虚拟模型,并实时同步运行数据,可实现“虚实映射、以虚控实”。在该框架下,工程师可在数字空间中模拟极端台风工况下的塔筒应力分布,评估结构安全性;也可基于当前退化状态,推演不同维护方案对未来三年可用率的影响;还可结合天气预报与船舶调度信息,优化海上运维窗口。更重要的是,数字孪生支持“假设分析”(What-if Analysis),使运维决策从被动响应转向主动规划。随着边缘计算与5G技术的发展,数字孪生正逐步从离线仿真走向在线闭环控制,成为智能风电场的核心基础设施。

3 全生命周期智能维护策略

基于上述可靠性评估结果,维护策略应贯穿全生命周期,实现从“被动修”到“主动管”的转变。

3.1 设计阶段:以可靠性为中心的设计

维护的起点其实早在设备投运之前就已确定。推行“可靠性为中心的设计”(Reliability-Centered Design, RCD)理念,意味着在概念设计阶段即系统识别潜在失效模式。通过开展故障模式与影响分析(FMEA),可提前发现高风险环节并加以改进。例如,针对直驱机组省去齿轮箱但增大发电机体积的特点,需重点优化磁路设计与散热结构;对于双馈机型,则应强化滑环与电刷的耐磨性^[3]。此外,适度引入冗余设计(如双变桨电机、双电源模块)可提升系统容错能力。材料选择上,优先采用耐腐蚀合金、自润滑轴承等高可靠性组件,虽短期成本略高,但可显著降低全生命周期运维支出。

3.2 制造与安装阶段:质量监控与过程监控

制造与安装是将设计意图转化为物理实体的关键过程,必须实施全过程质量管控。在工厂端,建立零部件唯一身份编码与全流程追溯系统,确保每一道工序可查可控;出厂前进行整机动平衡测试与空载试运行,验证

装配质量。在现场安装阶段,采用激光对中仪、扭矩扳手等精密工具保证安装精度,并在吊装完成后开展72小时试运行,监测振动、温升等关键参数是否异常。这些措施虽增加初期投入,却能有效避免“带病投运”,为后续长期稳定运行奠定坚实基础。

3.3 运行阶段:智能预测性维护

运行阶段的维护策略应以智能预测性维护(PdM)为核心,构建“监测—诊断—预测—决策”闭环。首先,通过CMS系统持续采集振动、油液、声发射等信号,形成设备健康画像;其次,利用深度学习模型对异常模式进行自动识别与定位,如通过卷积神经网络(CNN)分析振动频谱图像,区分轴承内圈与外圈故障;进而,基于退化轨迹与环境应力,预测关键部件的剩余使用寿命(RUL),输出概率分布而非单一数值;最后,以最小化总成本(包括维护成本、停机损失与风险成本)为目标,求解最优维护时机^[4]。该优化问题可表述为一个随机规划模型,综合考虑故障概率、备件库存、天气窗口等约束条件,实现维护决策的科学化与精细化。

3.4 延寿阶段:基于风险的延寿决策

面对服役期满的机组,延寿决策必须摒弃经验主义,转向基于风险的量化评估。首先开展全面体检,包括无人机红外热成像检测叶片、超声波探伤检查焊缝、油液光谱分析评估齿轮磨损等;然后将检测数据输入更新后的数字孪生模型,重新校准剩余寿命预测;最后,结合电价政策、备件价格、融资成本等因素,进行全生命周期成本-效益分析。只有当延寿后的预期净现值(NPV)为正且风险可控时,才建议实施延寿,并同步加强监测频次与维护等级。

3.5 维护资源协同优化

高效的维护不仅依赖精准的故障预测,还需要资源

的协同调度。在备件管理方面,可基于故障预测动态调整安全库存,避免“囤积浪费”与“缺件停机”并存;在人员调度上,尤其对于海上风电场,需综合考虑船舶可用性、海况预报、技术人员技能矩阵,生成最优出海计划;在更大尺度上,可对整个风电场群实施集中运维调度,通过“一船多场”“一次出海多台检修”等方式,显著降低边际成本。这种从单机到集群、从技术到资源的系统优化,是实现全生命周期运维效益最大化的必由之路。

4 结语

本文围绕风电机组全生命周期可靠性评估与维护策略展开探讨。研究发现,风电机组可靠性是各环节共同作用的结果,需全生命周期统筹管理。融合多源异构数据、采用混合评估方法,能提升可靠性预测的准确与及时性。以数字孪生为支撑、成本效益为目标的智能预测性维护策略,可实现从“被动响应”到“主动预防”的转变,降低运维成本、提高发电效率。未来,随着边缘智能等技术发展,全生命周期可靠性管理将向分布式等方向演进。后续研究可深化数字孪生与边缘计算融合,探索基于强化学习的自适应维护策略优化,构建跨风电场群协同管理平台,推动全生命周期碳足迹评估与绿色运维标准制定。全生命周期可靠性管理将成为风电行业高质量发展的核心竞争力。

参考文献

- [1]张秀琦,胡学超,李勇.风电机组设备可靠性分析及提升方法研究[J].内蒙古电力技术,2024,42(03):8-12.
- [2]于润泽.考虑共因失效的风电机组可靠性分析[D].华北电力大学(北京),2024.
- [3]王青天,童彤,张新丽,等.风电机组预测性维护关键技术及应用[J].风能,2024,(08):72-79.
- [4]王玉毛.风电机组运行管理与维护研究[J].石河子科技,2022,(05):28-29.