

电力系统中风电机组的可靠性评估与提升

吕海付

内蒙古龙源蒙东新能源有限公司 内蒙古赤峰 024000

摘要: 在全球能源结构向清洁能源转型的进程中, 风力发电成为重要力量, 风电机组可靠性研究愈发关键。本文首先阐述了风电机组可靠性的理论基础, 涵盖其工作原理以及呈现出的独特特点。其次, 介绍了故障树分析、马尔可夫状态转移模型、基于数据驱动等多种可靠性评估模型, 为量化可靠性提供方法支撑。剖析了设计制造、运行环境、运维管理、电力系统适配关联等影响风电机组可靠性的多方面因素。最后提出优化设计制造流程、强化环境适应性、提升运维管理效能以及增强电力系统适配性等相应的可靠性提升策略。旨在为提升风电机组可靠性、推动风电产业高质量发展提供全面且具参考价值的思路与方法。

关键词: 风电机组; 可靠性; 评估模型

引言

随着全球对清洁能源的需求日益增长, 风力发电作为一种重要的可再生能源利用形式得到了迅猛发展。风电机组的可靠性研究背景深厚, 在能源转型进程中, 其大规模应用需要稳定高效运行以保障电力供应。然而, 风电机组面临复杂多变的运行环境、设计制造差异以及运维管理挑战等诸多因素, 这些都会导致故障频发, 影响发电效率与电网稳定性。从经济层面看, 提升可靠性可降低运维成本、减少故障停机损失, 提高风电场投资回报率。在环境方面, 稳定运行能持续输出清洁电力, 助力减排目标实现。于技术进步而言, 可靠性研究推动风电机组设计、制造、运维等多环节技术创新与优化, 促进整个风电产业的可持续发展与竞争力提升, 为全球能源结构调整贡献关键力量。

一、风电机组可靠性理论基础

1. 风电机组的工作原理

风电机组主要由风力机、发电机、变速器、控制系统等关键部分构成。风电机组工作原理基于风能到电能的转换。风力机叶片在风的推动下旋转, 将风能转化为机械能, 随后经增速齿轮箱提升转速, 带动发电机运转产生电能。其控制系统起着关键作用, 实时监测风速、风向等参数, 依据这些数据灵活调整叶片桨距角, 以实现风能捕获效率的最大化, 同时精准控制发电机的功率输出, 确保机组在不同风速条件下均能稳定运行, 使产生的电能可顺利接入电力系统, 满足电力供应需求, 维持电力网络的稳定与平衡^[1]。

2. 风电机组可靠性的特点

风电机组可靠性呈现多方面特点。其运行受自然条件制约明显, 风能的间歇性与不稳定性致使机组运行状态波动大, 故障发生具随机性与不确定性。结构上各部件紧密相连, 一处故障易引发连锁反应, 且维修难度较高, 大型部件更换复杂。可靠性与运维紧密相关, 合理的运维策略可缓解自然与结构因素带来的影响。此外, 风电机组可靠性评估需综合多方面因素, 且随着技术发展及运维经验积累处于动态变化中, 具有复杂性与综合性的特征。

二、风电机组可靠性评估模型

1. 基于故障树分析 (FTA)

基于故障树分析 (FTA) 的评估模型是风电机组可靠性评估的重要手段。首先确定关键故障作为顶事件, 例如风机叶片断裂。接着分析引发顶事件的中间事件, 像材料疲劳、强风冲击等, 再挖掘导致中间事件的底事件, 如叶片制造缺陷、风速监测误差等。运用逻辑门连接各事件, 构建故障树。通过定性分析, 确定最小割集, 找出导致顶事件发生的最少事件组合, 明确关键故障路径。定量分析则借助各底事件的故障率数据, 计算顶事件的发生概率, 从而精确评估风电机组在特定故障方面的可靠性程度, 为优化维护方案、合理分配资源提供有力支撑, 保障风电机组安全稳定运行。

2. 马尔可夫状态转移模型

马尔可夫状态转移模型在风电机组可靠性评估中具有独特优势。该模型将风电机组的运行状态划分为多个类别, 如正常运行、故障预警、故障停机、维修中等。

基于大量历史运行数据，确定各状态之间相互转移的概率，构建起转移概率矩阵。在正常运行状态下，由于部件老化或突发异常，有一定概率转移至故障预警状态。借助此矩阵，能够预测风电机组在未来任意时刻处于不同状态的概率分布情况^[2]。它能够有效处理风电机组运行过程中的随机变化和不确定性，准确地评估出机组的可用度、故障频率等关键可靠性指标，为科学合理地制定运维计划、高效地安排人力和物力资源提供了关键依据，有力地保障了风电机组的高效可靠运行。

3. 基于数据驱动的可靠性评估方法

基于数据驱动的可靠性评估方法依靠风电机组运行数据。先对数据预处理，包括清洗异常、补充缺失值。以确保数据质量，随后提取多维度特征，构建特征数据集。运用先进的机器学习算法，如深度神经网络或支持向量机等进行模型训练，使模型学习到数据中的内在规律以及与故障的潜在关联。该方法的优势在于可依据实时监测数据快速预测故障发生概率，具有良好的自适应性与实时性。它能够及时察觉潜在故障隐患，克服传统评估方法对精确物理模型的依赖，从而更为精准地评估风电机组可靠性，为预防性维护策略的制定提供有力支持，有效提升机组运行的稳定性与安全性。

三、风电机组可靠性的影响因素剖析

1. 设计制造环节的考量

在风电机组的设计制造环节，众多因素对其可靠性有着深远影响。在设计上，整体架构若缺乏合理性，如布局紧凑致散热不佳或应力集中，会加速部件损坏。零部件设计时，安全系数若偏离合理范围，不是增加成本就是难以承受复杂工况。且若未充分考虑冗余设计，关键部位一旦故障易引发连锁反应致整机停转。制造过程中，工艺精度不足，像齿轮加工误差大、轴的形位公差超差等，会加剧磨损与疲劳。此外，原材料品质把控不严，采用劣质金属或不合规绝缘材料，会使部件性能大打折扣，无法保障长期稳定运行。这些设计制造的瑕疵在后续运行中逐渐凸显，成为故障频发、可靠性降低的隐患。

2. 运行环境的多变性

风电机组的运行环境复杂多变，对其可靠性构成了严峻挑战。气象条件中，风速的大幅波动危害极大，强风可使叶片承受巨大机械力致变形甚至断裂，而低风速下机组长期低效运转，疲劳积累加快。温度方面，无论是高温导致的散热难题、绝缘与润滑油老化，还是低温引起的部件脆性增加、液压油黏度上升，都会干扰系统

正常运作。湿度与降水易引发设备受潮生锈、短路故障^[3]。地理环境因素同样不容小觑，高海拔地区的低气压、稀薄空气影响散热与电气性能；沿海地区的盐雾侵蚀金属与电气部件；沙尘区域的沙尘会磨损机械结构、堵塞散热和过滤通道。这些复杂多变的环境因素持续考验风电机组的耐受性，削弱其可靠性。

3. 运维管理的效能发挥

运维管理的效能对于风电机组可靠性起着极为关键的作用。其一维护计划方面，缺乏科学规划，未依据机组运行状况与部件寿命制定合理预防性维护间隔，会使潜在故障发展成大问题。其二人员素质上，运维人员专业知识欠缺、技能生疏，诊断故障易误判，维修操作不规范还会造成二次伤害，如零部件安装不当。其三运维工具与设备配备也有影响，先进检测仪器能精准定位故障，专用维修工具可保障维修顺利，若缺失或落后则延误维修。其四备品备件管理同样关键，库存不足在部件故障时无法及时更换致长时间停机，库存过多增加成本，且管理不善，如存储环境不佳致备件损坏过期，也会影响机组维修与可靠运行。

4. 电力系统的适配关联

电力系统与风电机组之间的适配关联深刻影响着风电机组的可靠性。其一电网电压稳定性方面，电压波动时，若风电机组电压调节能力弱，机组内电力电子设备易受损，影响发电稳定。其二频率波动上，偏离额定频率会使发电机转速不稳，电能质量下降，长期如此加速部件磨损老化。电力系统短路故障时，冲击电流大，风电机组低电压穿越能力不足会触发保护装置脱网，冲击自身逆变器等设备^[4]。其三，风电机组与电网间的谐波相互干扰，电网谐波高或机组自身谐波多，都会扰乱机组控制系统运行，降低控制精度，进而影响其在电力系统中的可靠运行与协调配合，威胁整体电力供应的稳定性与安全性。

四、风电机组可靠性提升策略

1. 优化设计制造流程

优化设计制造流程是提升风电机组可靠性的基石。其一在设计时，充分利用数字化建模与仿真技术，对风电机组整体架构进行应力、流体、电磁等多方面模拟分析，以优化布局，减少潜在故障点。设计合理的叶片形状与结构，提高风能捕获效率与抗风能力。其二在零部件设计上，依据实际工况精准确定安全系数，并采用模块化设计理念，增强通用性与可维护性。制造环节，引入高精度数控机床、自动化装配线等先进设备，严格遵

循标准化工艺流程，严控加工精度与装配质量。建立原材料追溯体系，确保使用符合标准且质量稳定的材料。其三，应加强设计与制造部门间的沟通协作，形成闭环反馈机制，以便及时修正设计与制造缺陷，从而保障风电机组的可靠性与耐久性。

2. 强化环境适应性设计

强化环境适应性设计可有效提升风电机组可靠性。其一针对气象环境，采用高强度、轻量化且耐候性强的复合材料制造叶片，增强其抗风、抗腐蚀及抗疲劳性能，同时优化机组控制系统，使其能根据风速变化智能调整运行参数，减少极端风速冲击。其二在温度适应性方面，为机组配备高效散热与温控系统，如液冷或风冷装置，确保设备在高温时不过热，低温时关键部件正常运转，选用宽温域的润滑油与液压油。其三对于湿度和降水，加强机舱、电气柜等的密封设计，提高防水等级，采用防潮绝缘材料。考虑地理环境差异，在高海拔地区，改进电气设备绝缘性能与散热设计；沿海地区，采用特殊防腐涂层与合金材料抵御盐雾侵蚀；沙尘地区，优化进气与过滤系统，防止沙尘进入设备内部，以此保障风电机组在各类复杂环境下稳定可靠运行。

3. 提升运维管理效能

提升运维管理效能对于风电机组可靠性提升意义重大。其一，构建科学合理的运维计划体系，借助大数据分析 & 预测性维护技术，依据机组实时运行数据、历史故障数据以及部件老化规律，精准确定预防性维护的时间节点与维护内容，提前发现并处理潜在故障。其二，强化运维人员的专业素养培育，定期组织涵盖机械、电气、自动化等多领域知识的培训课程与技能实操演练，提高其故障诊断的准确性与维修操作的规范性。其三，配备先进完备的运维工具与设备，如高精度的故障诊断仪、无人机巡检设备等，提升运维效率与质量。其四，建立完善的备品备件管理机制，利用库存管理软件优化备件库存水平，同时确保备件存储环境适宜，保障备件随时可用，减少因备件问题导致的停机时间，全方位提升运维管理对风电机组可靠性的保障作用^[5]。

4. 增强电力系统适配性

增强电力系统适配性可显著提升风电机组可靠性。其一在电压适配方面，为风电机组配备智能电压调节装置，能实时监测电网电压变化并精准调整机组输出电压，

有效应对电压波动、跌落与升高情况，保障机组电力电子元件安全稳定运行。其二对于频率适配，优化机组频率控制策略，使其能快速响应电网频率变化，维持发电机转速稳定，避免因频率异常导致的部件共振与磨损，确保电能质量达标。其三在短路故障应对上，强化风电机组低电压穿越能力，通过改进控制算法与硬件设计，使其在电网短路引发电压骤降时仍能持续并网运行，减少脱网对电力系统冲击并降低自身故障风险。其四，采用谐波抑制技术，安装谐波滤波器，降低机组与电网间谐波相互影响，保障控制系统精确运行，从而全面提升风电机组在电力系统中的适配性与可靠性。

结论

风电机组可靠性研究对风电行业发展至关重要。其工作原理决定了各部件协同运行的复杂性。可靠性特点受自然与结构因素制约，故障预测与维修难度较大。通过故障树分析、马尔可夫模型和数据驱动方法可有效评估可靠性，为运维提供依据。设计制造环节的合理性、运行环境的适应性、运维管理的高效性以及电力系统的适配性均深刻影响机组可靠性。相应地，优化设计制造流程可从根源保障质量，强化环境适应性可应对恶劣条件，提升运维管理效能可及时处理故障，增强电力系统适配性可稳定并网运行。综合实施这些提升策略，将有力促进风电机组可靠性提升，推动风电产业在全球能源格局中发挥更重要作用，实现可持续发展目标。

参考文献

- [1] 赵洪山, 林诗雨, 曲岳晗, 等. 考虑极端天气冲击过程的风电机组竞争失效可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(04): 40-47.
- [2] 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.
- [3] 齐磊, 李志川, 孙兆恒, 等. 海上风电低频输电并网技术研究现状及展望[J]. 中国海上油气, 2024, 36(02): 195-204.
- [4] 赵龙. 大数据处理技术在风电机组故障诊断预警中的应用[J]. 电子技术, 2024, 53(09): 112-113.
- [5] 吴胜峰. 大数据技术在风电机组状态监测中的应用[J]. 电子技术, 2023, 52(05): 358-359.