

# 风力发电机组设备的预防性维护策略

范士杰

河北龙源风力发电有限公司, 河北 张家口 075000

DOI:10.61369/WCEST.2024090007

**摘要：** 全球能源需求不断增长, 风力发电作为一种新能源发电形式, 逐渐得到了大范围的普及应用。风力发电机组运行中, 由于作业环境特殊, 长期运行中可能出现设备磨损、老化, 或是受环境因素影响出现安全隐患, 因此加强风力发电机组设备的预防性维护显得尤为重要。文章聚焦风力发电机组设备预防性维护内容, 明确其重要性基础上, 总结切实可行的预防性维护策略, 以期提高风力发电机运行稳定性。

**关键词：** 预防性维护; 风力发电; 机组设备; 设备故障; 可靠性

## Preventive Maintenance Strategy for Wind Turbine Generator Equipment

Fan Shijie

Hebei Longyuan Wind Power Generation Co., Ltd., Zhangjiakou, Hebei 075000

**Abstract：** With the continuous growth of global energy demand, wind power generation, as a new form of energy generation, has gradually gained widespread popularity and application. During the operation of wind turbine generators, due to the special operating environment, equipment wear and aging may occur during long-term operation, or potential safety hazards may arise due to environmental factors. Therefore, strengthening the preventive maintenance of wind turbine generator equipment is particularly important. This article focuses on the preventive maintenance of wind turbine generator equipment, clarifies its importance, and summarizes practical preventive maintenance strategies to improve the operational stability of wind turbines.

**Keywords：** preventive maintenance; wind power generation; unit equipment; equipment failure; reliability

目前我国风力发电规模持续扩大, 风力发电机组作为和新设备, 运行是否稳定, 关系到风力发电效率与质量。但由于风力发电机组设备多处于恶劣野外环境中运行, 长期高负荷运行, 加之复杂多变的气候条件影响, 使得设备容易出现故障几率。而传统的设备故障维修方式已经无法满足新时期工作需求, 实行预防性维护策略, 致力于全面掌握风力发电机组设备运行状况, 通过故障诊断和预防性维护, 及早发现潜在的隐患, 从而降低威胁设备正常运转的故障发生几率, 提高风力发电机组整体发电效率和效益。

### 一、风力发电机组设备预防性维护的效益目标

#### (一) 提高风力发电效率

预防性维护风力发电机组设备, 能够有效提高风力发电效率, 创造更大的效益。风力发电机组内部结构复杂, 加强齿轮箱、叶片、发电机等核心部件检查和维修, 有助于减少外部因素干扰, 使这些部件始终处于最佳运行状态。例如, 清洁叶片表面的杂物、油污, 一定程度上减少了叶片空气流动阻力, 提高风能捕捉效率<sup>[1]</sup>。结合相关研究表明, 发电叶片经过清洁后发电效率提升3%~5%左右。齿轮箱同样是重点维护部件, 提高齿轮箱润滑性能, 可以大幅度降低机械传动中的能耗, 使得机组整体功率输出得到有效优化。及时更换受损零部件, 还可以降低故障导致的设备停机时间, 使得风力发电机组始终处于最佳运行状态。

#### (二) 提高设备运行稳定性

风力发电机组设备运行过程中, 面临低温、强风以及沙尘等恶劣条件, 加强机组设备预防性维护, 能够有效发现和解决潜在设备故障问题。通过红外热成像技术精准监测电气连接部位的发热情况, 在故障发生前及时更换或修复部件, 以预防电气故障并保障设备运行的稳定性。而且设备稳定运行, 还可以减少设备故障停机维修带来的发电量损失, 为发电系统稳定运行提供坚实保障<sup>[2]</sup>。

#### (三) 降低维护成本

预防性维护强调故障发生前对机组设备检修和维护, 尽管需要一定的资源和资金投入, 但长远角度来看, 却可以大幅度降低设备总体维护成本。机组设备一旦出现故障, 往往需要紧急抢修, 所消耗的成本费用较高<sup>[3]</sup>。与之相比, 预防性维护可以及早

发现磨损严重的零部件，及早修复或更换，其成本远远小于设备故障维修成本，延长设备使用寿命，使得维护成本进一步缩减。

## 二、风力发电机组设备故障类型和原因

### （一）发电机故障

发电机长时间运行中，绕组绝缘材料由于温度过高、潮湿等因素侵蚀，出现不同程度磨损、老化，绕组绝缘性能下降到一定程度后，电流无法正常流通，诱发短路故障<sup>[4]</sup>。对于温湿度较高的沿海地区，空气中盐分含量高，绕组绝缘材料腐蚀问题严重，大幅度增加了绕组故障几率。部分有刷发电机的电刷和滑环接触紧密，滑动摩擦传输电能，随着时间推移，电刷磨损程度随之增加，与滑环的接触面积反向减小，接触电阻变大导致发热问题严重，威胁发电机输出电流和电压。发电机组的轴承由于污染颗粒入侵，润滑性能下降或轴向载荷分布失衡等因素影响下产生振动，温度升高到80℃，最终轴承失效。另外，转子偏心故障，由于安装公差超出标准，联轴器对重失效或是磁拉力失衡等因素存在，使得电磁转矩脉动幅值显著增加，诱发转子偏心故障<sup>[5]</sup>。

### （二）叶片故障

长期处于交变载荷作用下，叶根部位承受弯曲应力较大，一旦叶片承受应力超出材料疲劳极限值，叶根可能产生裂纹，随着时间推移逐渐延伸扩展。叶片制造环节由于工艺、材料缺陷等因素影响，树脂固化不完全，叶片纤维铺设不规范等，同样会降低叶片结构强度<sup>[6]</sup>。叶片裂纹如果发现不及时在风里持续作用下，叶片裂纹随之扩展，超出可承受载荷后断裂。风力发电机组遭受雷击、强风等恶劣条件影响，可能导致叶片断裂，造成更为严重的安全事故，如图1。除此之外，风力发电机组设备位于沙尘较大区域，叶片表面受到沙尘颗粒磨损冲击，表面涂层磨损逐步加剧，年均质量损失超过200g/m<sup>2</sup>，进而侵蚀本体材料；昆虫附着层厚度超过3mm，破坏叶片的层流边界层。由于叶片表面磨损使得粗糙度增加，空气动力学性能下降，风能捕捉效率受影响下，机组整体发电功率大幅度下降。



图1 风力发电机组叶片断裂

### （三）控制系统故障

风力发电机组控制系统故障，表现在硬件故障和软件故障两

方面。

（1）硬件故障。控制系统需要根据各类传感器监测设备运行状态，包括温度传感器、风向传感器和风速传感器等，反馈各项数据参数到控制系统。控制系统在户外环境下运作，传感器容易受到电磁干扰、机械振动以及温湿度因素影响，导致传感器精度下降<sup>[7]</sup>。例如，长期处于沙尘较大的区域，风速传感器被沙尘磨损可能变形，监测的风速数据精度下降；温度传感器受水分侵蚀，测量精度下降，传输错误信号。由于传感器采集数据存在偏差，影响控制系统正确决策，威胁风力发电机组运行安全。控制系统中包含多个部件，控制器作为核心部件，主要用于收集传感器各项数据，并发送控制指令。长期处于高符合运行状态，受静电、热量等因素影响，控制器内部芯片、集成电路等电子元件可能损坏，影响控制系统稳定运行。

（2）软件故障。控制系统运作离不开软件程序支持，前期软件程序开发时，不可避免存在程序漏洞，后期风力发电机组运作中可能在多种因素联合作用下触发漏洞，一旦系统出现异常问题，则会影响机组稳定运行。例如，若软件算法中边界条件处理不合理，当机组运行参数接近边界值时，可能触发软件故障<sup>[8]</sup>。

### （四）电缆故障

电缆在安装和维护环节，由于工作人员操作不当可能挤压电缆，导致电缆导体和绝缘层变形损害。施工现场基础挖掘时由于电缆保护不到位，同样可能受机械压力作用下导致电缆破损。风力发电机组运行期间，由于摆动和振动等因素影响，使得各部位连接电缆发生弯曲，长期处于动态应力作用下，电缆绝缘层和导体会疲劳加剧，内部应力集中，超出可承受限度后就会断裂，诱发电缆故障<sup>[9]</sup>。

## 三、风力发电机组设备的预防性维护策略

### （一）加强设备状态监测

风力发电机组长期处于盐雾腐蚀、高低温以及动态载荷冲击等复杂环境，传统定期维护模式无法全面覆盖发电机组设备关键部件，存在很多隐蔽部件漏检。加之固定周期维护与部件老化速度不匹配，可能存在维护不足或是维护过剩等问题。鉴于此，应加强设备状态监测，建立多维度传感网络，具体监测项目如表1所示。

表1 预防性维护状态监测指标

| 监测项目 | 监测内容           | 监测方法  |
|------|----------------|-------|
| 温度监测 | 齿轮箱和发电机等温度     | 温度传感器 |
| 振动监测 | 齿轮箱、叶片、轴承、发电机等 | 振动传感器 |
| 油液监测 | 油液质量以及磨损颗粒     | 油液分析  |

（1）温度监测。温度监测，在发电机组绕组、轴承、齿轮箱等容易发热区域安装温度传感器，实时监测部件温度变化。如，发电机绕组温度过高，其原因可能是绕组短路、散热性能差以及过载运行等因素导致。因此，可以设定温度报警阈值，超出标准后系统即可自动发出预警信息，运维人员应立足实际情况，检查电气故障、通风系统等，通过有效措施解决温度异常问题，避

免设备严重受损。采用红外热像仪，可以精准检测发动机绕组热点情况，如果温度异常升高达到15℃以上，则要及时干预处置<sup>[10]</sup>。

(2) 振动监测。风力发电机组状态监测中，振动监测是一项核心监测指标，将振动传感器安装在主轴、齿轮箱以及发电机等位置，实时收集设备异常振动感信号，频率响应范围0.5Hz~20kHz范围，发现异常情况及时反馈给工作人员。使用专业振动分析软件对振动信号处理，即可精准定位故障位置，了解故障严重程度，为后续故障维护提供支持。

(3) 油液监测。油液监测是面向液压系统、齿轮箱等使用润滑油的设备，采集油样，经过铁谱分析或光谱分析后，精准监测油液中的金属磨粒成分、含量，以及油液酸碱度、黏度以及含水量等。使用光谱分析技术，精准检测油液中各类金属元素含量，一旦齿轮箱齿轮磨损，将导致油液中的铜、铁等元素含量增加；铁谱分析能可视化展现磨粒大小、形状以及分布情况等，借此反馈使用润滑油设备的磨损程度。油液监测能够帮助维护人员掌握设备内部零部件磨损程度，及时修复或更换，从而避免润滑不良导致设备故障。

## (二) 定期检修与维护

风力发电机组设备运行中，为降低设备故障概率，延长其性能和使用寿命，定期检修与维护工作至关重要。每月每季度检查风力发电机叶片内外部情况，发现叶片裂缝、腐蚀等损伤缺陷，组织人员及时维修缺陷。调节机组叶片平衡，提高风机运转稳定性，避免叶片不平衡诱发噪声、振动，延长设备使用寿命。齿轮箱定期检修中，重点检查齿轮箱的润滑性能，使用内窥镜检查设备内部齿轮磨损或其他油污等问题，便于技术人员及时补充、修复、更换，紧固松动的电器接头，提高齿轮运行稳定性。年度检修，重点检查机械设备性能，包括主轴扭矩大小、叶片动平衡、电气系统调试等，保证各项指标合乎标准，及时发现和解决

潜在安全隐患。

## (三) 建立故障预测模型

为了实现风力发电机组设备故障隐患提前预测、提前解决，需要运用机器学习技术、大数据技术，建立故障预测模型，从而实现故障问题的预防性维护。因此，工作人员要手机设备状态监测数据、机组设备运行环境数据以及历史故障数据等，采用数据挖掘算法，摸索数据潜在联系，完善故障预测模型。

故障预测模型主要包括数据层、算法层。数据层包括SCADA数据、气象数据、CMS振动数据；算法层包括随机森林（分析叶片的损伤类型、程度）、LSTM网络（预测齿轮箱使用寿命）。模型采用交叉验证方式，K-fold (K=5)，提高故障预测模型的泛化能力。

## (四) 加强技术人员专业培训

定期组织技术人员参加专业培训活动，掌握风力发电机组运行原理、结构、性能，并掌握设备的维护维修工艺以及故障诊断等技术。条件允许下，邀请专家和技术人员组织讲座活动，分享前沿技术动态以及运维经验，组织技术人员前往厂家实地学习，了解设备制造工艺、内部结构，提高维修技能水平。内部定期组织技术交流和案例分享活动，全面提升团队整体技术水平，为风力发电机组设备运行安全保驾护航。

## 四、结论

综上所述，风力发电机组运行环节恶劣，设备容易受到外部环境干扰影响，出现不同程度的磨损和老化，如果忽视这些问题可能诱发严重的安全问题。故此，实行预防性维护，根据设备性能组织人员及早检修和保养，能够大幅度降低设备故障几率，为风力发电机组设备安全稳定运行提供坚实保障。

## 参考文献

- [1] 杨秋利. 风力发电机组变桨系统的分析与研究 [J]. 科学中国人, 2014, (20): 47.
- [2] 石港, 王伟, 雷志鹏, 等. 风力发电机组状态监测与故障诊断研究综述 [J]. 山西电力, 2023, (01): 43-46.
- [3] 李锦基. 海上风电场风力发电机运行维护策略研究 [J]. 光源与照明, 2022, (12).
- [4] 王双林. 海上风电场风力发电机状态监测与运行维护策略 [J]. 海峡科学, 2024, (08): 48-51.
- [5] 倪铭, 王玮玮. 风力发电机组火灾事故分析与消防处置对策研究 [J]. 消防界 (电子版), 2024, 10 (13): 104-106.
- [6] 张轶东. 风电场中风力发电机组运行故障与维护 [J]. 电气技术与经济, 2024, (06): 328-329+337.
- [7] 李沿君. 风力发电机组状态监测和故障诊断技术研究 [J]. 光源与照明, 2024, (02): 100-102.
- [8] 李刚, 齐莹, 李银强, 等. 风力发电机组故障诊断与状态预测的研究进展 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45 (04): 180-191.
- [9] 范贵华, 黄文君, 赵红飞. 风力发电机组液压系统常见问题与维护策略 [J]. 河南科技, 2023, 42 (20): 49-52.
- [10] 胡超波. 风电场中风力发电机组运行故障及维护 [J]. 仪器仪表用户, 2023, 30 (09): 110-112+31.