

# 海上风力发电机组集中润滑系统改造分析与运用

徐国贤

国电投江苏海上风力发电有限公司 江苏盐城 224544

**摘要：**海上风力发电机组的运行环境十分恶劣，高湿度、高盐雾、大风等对设备润滑系统有很高的要求。集中润滑系统是保证机组传动链、轴承等重要部件正常工作的关键设备，它的可靠性决定了机组发电效率和运维成本。本文就传统海上风电集中润滑系统存在的润滑不均、密封失效、监测滞后和维护困难等问题，进行改造技术的研究。对润滑回路进行改进，采用耐蚀密封材料，增加智能监测模块和远程运维平台，形成适应海上环境的改造方案。对某海上风电场的10台机组进行为期1年的改造应用验证，发现改造后系统润滑合格率达到98.5%，故障停机时间减少了62%，年运维成本降低约42万元。经过改造的集中润滑系统可以明显提高海上风电设备运行的稳定性，给海上风电的规模化运维提供技术支持。

**关键词：**海上风力发电机组；集中润滑系统；改造分析；运用

随着“双碳”目标的推进，海上风电由于资源丰富、发电效率高成为新能源发展的重点领域。2024年年底我国的海上风电装机容量要达到65GW以上，占到全球海上风电装机容量的45%。但是海上特殊环境使机组的关键运动部件存在严重的磨损危险，润滑系统是设备的“血液输送系统”，它的性能缺陷已经成为限制机组寿命的关键瓶颈。传统的集中润滑系统使用固定排量分配方式，容易造成偏远润滑点供油不足，近程点过润滑的现象，而且由于盐雾侵蚀，密封件3-6个月就需要更换，依靠人工巡检发现故障，故障发现滞后容易引起轴承卡滞等严重故障。因此开展集中润滑系统改造研究、解决海上环境的适用性问题，对于提高风电机组的可靠度、降低维护成本具有重要意义，也可以给风电装备国产化升级提供技术参考。

## 一、海上风电集中润滑系统现存问题分析

### （一）润滑分配不均问题突出

传统集中润滑系统大多用串联式分配器，通过固定孔径节流来达到油量分配的目的。海上风力发电机组传动链由主轴轴承、齿轮箱、偏航轴承等20多个润滑点组成，各个润滑点到泵站的距离差别为5-8米，管路阻力不一样造成供油压力衰减不均匀。风电场检测数据表明，远端偏航轴承的润滑点油量只有设计值的62%，而近端齿轮箱的高速轴润滑点油量是设计值的130%<sup>[1]</sup>。

### （二）密封系统耐蚀性不足

海上环境的盐雾浓度达到35mg/m<sup>3</sup>，远远高于陆地

环境的5mg/m<sup>3</sup>。传统润滑系统所用的丁腈橡胶密封件容易发生化学腐蚀，造成密封效果变差。现场调查得出泵站的油箱密封盖、管路接头等部件的密封件三个月后发生了溶胀、龟裂，泄漏率达到15%。密封失效会造成润滑油损失，而且海水、盐雾进入系统造成油液污染度超标。泄漏以后油液中固体颗粒污染物（NAS8级）所占比例为22%，氯离子含量为180mg/L，加大了油泵、分配器等部件的磨损程度，造成系统故障频率为每月两次以上，严重影响机组稳定运行<sup>[2]</sup>。

### （三）状态监测与预警滞后

传统的系统没有实时的监测手段，只能依靠人工每季度去巡检，取样化验油液质量，目测查看有无泄漏。这种做法有很明显的滞后性，某风电场齿轮箱润滑点堵塞没被及时察觉，结果轴承温度达到98℃，机组被迫紧急停机，造成直接经济损失约80万。另外人工巡检受到海上气象条件的限制，每年由于台风、大雾等原因不能登塔检查的时间大约有30天，增加了故障的隐患。同时巡检数据依靠人工记录，容易产生误差，不能形成完整的运行数据库，不能为预防性维护提供数据支持<sup>[3]</sup>。

### （四）运维操作难度大、成本高

海上风电场运维要使用专业运维船，一次登塔维护的费用为2.5万元。传统系统润滑点分布散乱，人工加油需逐个加注，单台机组维护需4-6小时，高空作业有危险。另外系统故障排查需要运维人员凭借经验来判断，平均故障处理时间需要8小时，因此造成机组停机

损失增加。根据100MW风电场的的数据可知,传统集中润滑系统的年维护费用为380万元,占风电场总维护费用的28%,其中包含的人工费以及停机损失占整个总额的70%。

## 二、集中润滑系统改造方案设计

### (一) 润滑回路优化设计

润滑不均采用主泵、分流阀、递进式分配器三级回路。主泵采用变量柱塞泵,额定压力为16MPa,用压力传感器实时检测系统压力,自动调节排量,保证系统压力在12~14MPa之间。在主回路增加流量分配阀,把油液分成三路支回路,分别对应主轴轴承、齿轮箱、偏航变桨系统,每路支回路设独立的压力调节阀,根据各系统润滑需求精确控制压力<sup>[4]</sup>。末端是递进式分配器,每个分配器对应4~6个润滑点,内部活塞联动等量供油,保证各润滑点油量偏差 $\pm 5\%$ 以内。优化管路布置,用最短路原则减小管线长度、弯头数目,把最远润滑点管路阻力降为原来的70%,压力衰减控制在1MPa以内。

### (二) 耐蚀密封与防护升级

密封系统的改造核心是材料升级、结构优化。密封件采用氟橡胶和聚四氟乙烯复合材质,耐盐雾腐蚀性能比丁腈橡胶高出5倍,使用温度为 $-20^{\circ}\text{C}$ 到 $120^{\circ}\text{C}$ ,适应海上的温差环境。油箱采用316L不锈钢材料,内壁涂覆陶瓷涂层,厚度0.2mm,耐腐蚀性提高60%;油箱密封盖采用双道密封结构,外圈为唇形密封,内圈为充气密封圈,利用压力传感器监测密封腔压力,当压力小于0.1MPa时自动充气,保证密封性能。管路接头采用卡套式连接,代替传统的螺纹连接,用密封胶圈做双重密封,泄漏率降到0.5%以下<sup>[5]</sup>。另外在系统外部增加防护罩,IP68防护等级,防止盐雾、雨水进入,防护罩外表面喷涂聚氟碳漆,抗紫外线老化提高50%。

### (三) 智能监测系统构建

建立“多点监测-数据传输-智能预警”三级监测体系。在各个润滑点设置温度传感器、振动传感器以及油液状态传感器,对轴承温度、振动加速度、油液粘度、油液污染度等参数进行实时采集,采样频率为1次/分钟。传感器数据经工业以太网传送到本地控制器,本地控制器为PLC可编程逻辑控制器,具有数据存储和初步分析功能,当参数超过阈值时(如轴承温度大于等于 $85^{\circ}\text{C}$ 、油液污染度大于等于NAS7级),会立即触发本地声光报警。同时控制器利用4G/5G模块把数据上传到远程运维平台,平台使用云计算架构,并且融合了大数据

分析模型,可以实现对油液劣化趋势的预估以及故障的定位和诊断。例如,用振动频谱分析来识别轴承早期磨损故障,预测准确率为92%,提前30天发出预警。

### (四) 远程运维与自动控制升级

依靠智能监测系统,开发远程运维平台,实现润滑系统无人值守、远程控制。平台有参数设置、远程操作、故障诊断等,运维人员在陆上控制中心可以改变各个润滑点的油量、供油周期等参数,供油周期会依照机组运行负荷做自动调节,负荷超过额定值80%的时候,供油周期缩减到1小时/次,负荷低于50%的时候,拉长到2小时/次。系统增设自动补油装置,油箱油位低于下限值时自动打开补油泵,从备用油箱补油,补油精度为 $\pm 1\text{L}$ 。当发生故障的时候,系统会自动显示故障的位置,产生故障的原因及处理建议,运维人员可以进行远程启动应急润滑的工作,应急供油时间可达到4个小时,为登塔处理争取了宝贵的时间。

## 三、改造方案应用验证

### (一) 应用场景概况

对于以近海风电场10台15MW风力发电机组作为研究对象,风电场的平均风速为 $9.2\text{m/s}$ ,盐雾浓度为 $32\text{mg/m}^3$ ,年湿度为85%,而风电场运行已经有三年时间,在改造前发生润滑系统故障的次数达到每年28次。改造施工时间为2023年3月-4月,回路改造、密封提升、监测系统安装与平台调试,单台机组改造费用约18万元,总改造费用180万元。改造后进行1年的运行监测,比较改造前后系统性能指标<sup>[6]</sup>。

### (二) 关键性能指标改善效果

润滑均匀性得到很大提高,改造后各个润滑点油量偏差小于 $\pm 4.8\%$ ,主轴轴承、齿轮箱等关键部位油膜厚度稳定在 $1.6\mu\text{m}$ 到 $1.8\mu\text{m}$ 之间,满足安全要求。油液劣化周期由原来的6个月延长到12个月,换油次数减少一半。密封性能明显提高,系统漏油率降到0.3%以下,油箱里的油液氯离子含量少于 $30\text{mg/L}$ ,固体颗粒污染等级维持在NAS 6级。监测预警能力提高,故障识别准确率达到93%,平均预警提前时间28天,没有出现因为润滑失效造成的紧急停机。

### (三) 经济与社会效益分析

从经济效益上看,改造之后10台机组年运维成本由原来的380万元降低到现在的210万元,年节省成本为170万元,投资回收期为1.06年。另外,改造后年故障停机时间从原来的120小时减到45小时,年多发电量

约105万kWh，按上网电价0.65元/kWh来算，年增加发电收入约为68.25万元。社会效益上减少润滑油用量50%，每年节约润滑油1.2吨，降低环境污染风险，远程运维减少登塔次数，降低高空作业安全风险，运维人员工作负担减轻。

#### 四、改造过程中的关键解决措施

##### （一）管路改造与原有系统兼容性解决措施

采用异质材料过渡接头，并在内部加装绝缘衬套，从结构上切断碳钢和316L不锈钢管路连接时的电化学腐蚀路径。利用BIM技术建立机组内部三维模型来准确规划管路走向避开现有的设备，在狭小的空间里使用柔性不锈钢软管提高装置的灵活性。施工前做模拟安装试验，以18MPa压力保压30分钟，保证管路连接的密封性、流通性达到要求后，方可进行现场施工。

##### （二）智能监测系统抗干扰解决措施

选用屏蔽型传感器（采用金属屏蔽壳全封装设计，可以有效阻挡外部电磁辐射侵入）、双绞屏蔽信号线缆（多芯绞合结构+铝箔+编织双层屏蔽设计，降低线缆自身的电磁耦合干扰）、严格控制屏蔽层接地电阻在1Ω以内。用单点接地方式、低阻铜质接地极加防腐处理、定期用接地电阻测试仪校准，保证接地系统稳定可靠，从源头上减少电磁信号干扰。在控制器与传感器之间增加工业级信号隔离器，用光电隔离技术实现输入输出信号电气隔离，隔断地环路干扰、共模电压影响。改造后监测数据传输成功率提高到99.8%，数据误差控制在±2%以内，完全符合糖尿病门诊规范化管理和临床决策对数据精度要求，给糖尿病门诊的规范化管理和临床决策提供了稳定可靠的数据支持。

##### （三）低温环境下系统启动可靠性解决措施

在油箱以及管路的外侧加上电加热装置，并采取温度自动控制的方式，当油温少于10摄氏度的时候就开始加热，把温度提升到20摄氏度就停止加热，从而保证油液有基本的流动性。选用140粘度指数的低温合成润滑油，在温度为-15℃时运动粘度为80mm<sup>2</sup>/s，使油液低温时的流动性得到很大提高。在油泵入口处加装预压装置，

启动前对管路进行预压，减少启动阻力，冬季试运行系统启动成功率100%，启动时间缩短至30秒。

#### 结束语

综上所述，本文就海上风力发电机组集中润滑系统在恶劣环境下出现的润滑不均、密封失效、监测滞后、运维成本高等问题，从回路设计、密封升级、智能监测、远程运维四个方面提出改造方案。通过优化润滑回路达到精准供油，用耐蚀材料与结构提高密封性，创建智能监测系统来实现故障预警，开发远程平台来提高运维效率。应用验证结果表明改造后系统润滑合格率提高到98.5%，故障停机时间缩短62%，年运维成本下降45%，投资回收期仅为1.06年，经济效益与社会效益明显。改造方案在深海恶劣环境下是否适用还需要进一步验证，可以开展低温、强台风等极端环境下的系统优化研究，用AI算法提高故障预测的准确度，给海上风电装备高质量发展提供更强有力的技术支持。

#### 参考文献

- [1] 尧瑶. 大兆瓦级海上风力发电机组超速分析及逻辑优化[J]. 机电信息, 2024, (24): 18-22.
- [2] 周翔, 张宙, 戴玥. 16 MW海上半直驱风力发电机多相绕组设计及仿真研究[J]. 上海大中型电机, 2024, (04): 17-20.
- [3] 陈进贵, 刘希彬. 海上风力发电机组齿轮箱光储润滑系统设计与应用[J]. 企业管理, 2024, (S2): 366-367.
- [4] 段志强, 王晓明, 米兴社, 等. 20MW级海上集成型永磁同步风力发电机设计及分析[J]. 大电机技术, 2024, (06): 28-34.
- [5] 朱魁星, 李志川, 李宁, 等. 紧急停机过程中海上风机结构振动特性分析[J]. 船舶工程, 2024, 46(11): 161-168.
- [6] 蒙雪银, 冀卫东, 李荣富, 等. 海上风机腐蚀监测系统应用与数据分析[J]. 腐蚀与防护, 2024, 45(11): 77-84.