

风电机组变桨系统故障模式与影响分析及预防措施研究

牛 帅

大唐（内蒙古）能源开发有限公司赤峰新能源事业部 内蒙古 赤峰 024000

摘 要：变桨系统作为风电机组实现功率调节、气动制动与载荷控制的核心执行机构，其运行可靠性与整机安全等级直接关联。本文系统梳理变桨系统在电驱与液压两种主流构型下的功能定位，从机械传动、电气控制、液压回路、通信交互四个维度归纳典型故障模式，并基于故障模式与影响分析（FMEA）方法，建立风险优先数评估框架，量化各类故障的发生频度、严重度与可检测度。分析表明，变桨轴承磨损、伺服驱动器过流、液压泵站泄漏及编码器信号漂移构成当前运行中占比最高的四类失效诱因。针对上述故障模式，本文提出涵盖设计选型优化、状态监测参数体系构建、维护策略分层规划以及备件管理智能化的综合预防措施体系，旨在为风电场运维决策提供理论依据，降低非计划停机时长与全生命周期运维成本。

关键词：风电机组；变桨系统；故障模式与影响分析；预防措施；状态监测

引言

风力发电在全球能源结构转型中承担着日益重要的角色，机组单机容量持续攀升，叶片长度与柔性显著增加，这使得变桨系统的工作负荷与动态响应要求同步提高。变桨系统通过独立调节三支叶片的桨距角，在额定风速以下追踪最优风能利用系数，在额定风速以上限制功率输出，同时在紧急事故中实现快速顺桨以提供空气动力制动。实际运行数据显示，变桨系统引发的故障停机时长占机组总故障停机的比例在多数风电场中达到百分之二十至百分之三十，部分老旧机组甚至超过四成。更为严峻的是，变桨故障往往伴随冲击载荷突变，对主轴轴承、齿轮箱及塔底基础产生连锁损害，因此其故障机理与防控策略长期以来是风电机组可靠性研究的热点议题。

1 变桨系统概述与功能定位

商用变桨系统分电驱与液压两类。电驱由伺服电机经减速箱驱动，采用闭环控制，响应快、无泄漏，但低温适应性差且电池维护量大；液压由泵站阀控油缸驱动，推力大且平稳，适装于超大叶片，但存在密封泄漏、油液污染及低温响应滞后等问题。两类故障模式均可归为机械、电气、液压及信号四大类。变桨核心功能有三：功率调节（据偏差变桨，抑制湍流）、载荷抑制（独立变桨/前馈，减弯矩及倾覆，延疲劳寿命）、安全保护（紧急下顺桨至限位）。失效影响呈层级化：功率失效致电量损失，载荷失效加剧疲劳累积，安全失效直接威胁整机生存。

2 变桨系统典型故障模式分类

2.1 机械传动类故障

机械传动类故障集中体现在变桨轴承、减速齿轮箱及连接螺栓副。变桨轴承运行在低速重载且摆动角度有限的工况下，滚动体与滚道之间易发生微动磨损，磨损产物若不能及时排出则进一步加剧磨粒磨损，导致游隙增大、旋转扭矩异常升高。轴承润滑脂老化或填充量不当会加速这一过程，尤其在低温环境下，润滑脂稠化使轴承启动阻力增大，可能触发扭矩超限报警。减速齿轮箱常见故障为齿面点蚀与断齿，根源在于频繁启停和变向冲击产生的交变应力，以及润滑失效引起的齿面胶合。连接螺栓在交变弯矩作用下可能发生预紧力松弛，若未及时发现并复紧，将发展为疲劳断裂，造成桨叶连接失效的重大事故。

2.2 电气驱动与功率变换类故障

电驱变桨的电气子系统包括伺服驱动器、制动电阻、滤波电容及供电接触器等。伺服驱动器内部绝缘栅双极型晶体管模块因频繁开关动作产生功率损耗，若散热条件不良或过流保护设定不当，结温超限将引发模块击穿或短路。直流母线电容在纹波电流长期作用下电解液逐渐干涸，等效串联电阻增大，导致母线电压纹波超标，影响控制精度并可能触发欠压报警^[1]。制动电阻用于消耗回馈能量，在反复变桨过程中温升累积，若热保护失效则存在电阻烧断隐患。此外，滑环或集电环作为旋转部分与静止部分的电气接口，其碳刷磨损与接触电阻增大是信号传输中断的常见诱因。

2.3 液压回路与密封类故障

液压变桨系统的故障以泄漏、压力不稳和响应迟滞为主要表现形式。内泄漏发生于油缸活塞密封与阀芯配合间隙，会降低系统容积效率，使得相同阀口开度下

油缸速度下降，造成桨距角跟踪滞后。外泄漏多见于管接头、油封及阀体结合面，不仅导致油液损失和环境污染，还可能因吸空而产生气蚀，进一步损伤元件表面。油液污染是液压故障的根本性诱因，固体颗粒物磨损运动副表面，水分和空气降低油液弹性模量并加速氧化，油泥沉积堵塞比例阀节流边，使控制特性漂移。液压泵站的压力建立能力下降往往与泵的容积效率衰退或蓄能器充气压力不足有关，直接影响紧急顺桨的可靠性。

2.4 传感检测与通信类故障

变桨系统依赖桨距角位置传感器、转速传感器、温度传感器及压力传感器提供反馈信号。旋转编码器或旋转变压器的信号漂移与零位偏移会直接歪曲位置闭环精度，导致三支叶片桨距角不一致，产生附加的不平衡载荷。传感器线路破损、接插件氧化腐蚀或屏蔽层损坏均会引起信号干扰或断线故障^[2]。在通信层面，现场总线或工业以太网的丢包、延迟抖动及同步误差可能导致主控制器下发的指令与驱动器实际接收值存在偏差，在快速变桨过程中尤其危险。另外，后备电源（超级电容或蓄

电池）的健康状态监测信号若不可靠，则会掩盖紧急供电能力不足的真实风险。

3 故障模式影响分析

3.1 FMEA评估框架构建

故障模式与影响分析为系统性识别潜在失效及其后果提供了结构化工具。本文采用风险优先数（RPN）作为定量评估指标，其定义为严重度（S）、发生频度（O）与可检测度（D）三者乘积。严重度依据功能失效对发电性能、结构安全及人员环境的影响划分为1至10级，其中功率调节失效对应中等严重度，安全保护失效对应最高严重度。发生频度基于现场统计数据与故障率数据库进行等级划分，可检测度则反映了现有监测手段能否在故障引发二次损害之前有效识别。

3.2 典型故障风险排序与量化评估

基于对大量运行数据的归纳分析，各类故障模式的RPN均值呈现明显梯度。表1汇总了八类典型故障模式的评估结果，涵盖严重度、发生频度、可检测度及综合风险优先数，并标明了主要影响后果。

表1：变桨系统典型故障模式FMEA评估结果

故障模式	主要影响后果	严重度(S)	发生频度(O)	可检测度(D)	RPN
变桨轴承磨损	扭矩增大、驱动过载，振动加剧	8	6	7	336
减速齿轮箱点蚀/断齿	传动卡滞、变桨速度下降	7	5	6	210
伺服驱动器过流/过热	变桨中断，触发安全链停机	8	7	5	280
直流母线电容老化	电压纹波超标，控制失稳	6	6	6	216
液压泵站内泄漏	变桨速率不足，响应滞后	7	6	7	294
比例阀堵塞/卡滞	桨距角控制非线性，振荡	8	5	6	240
编码器信号漂移	三轴角度偏差，不平衡载荷	9	4	8	288
滑环接触电阻增大	信号断续，通信误码率升高	6	5	5	150

由表1可知，变桨轴承磨损（RPN = 336）与液压泵站泄漏（294）的风险优先数最高，主要原因是其严重度与可检测度均处于不利区间——早期磨损和缓慢内泄漏难以通过常规监测及时发现。伺服驱动器过流（280）和编码器漂移（288）紧随其后，前者发生频度最高，后者严重度最大（9级，因直接影响安全）。滑环故障的RPN相对较低，但仍是导致通信异常的重要诱因。

3.3 影响传递路径分析

变桨系统故障的影响并非局限于子系统内部，而是沿能量流与信号流向外传递。机械摩擦增大首先表现为扭矩消耗上升，进而影响驱动器的电流环输出，可能诱发过流报警并连锁触发安全链动作。位置反馈信号偏差直接导致桨距角闭环失稳，产生的周期性力矩扰动会通过轮毂传递至主轴，加剧齿轮箱的齿面载荷波动。液压

压力不足不仅降低变桨速率，还可能使紧急顺桨时间超出设计要求，使得超速保护冗余度下降。通信延时引起的三轴不同步，会产生偏航方向上的交变气动弯矩，长期作用可能引起偏航轴承的异常磨损。因此，在影响评估中必须穿透单点失效的直接后果，将二次与三次影响纳入整体风险认知。

4 预防措施策略

4.1 设计选型与冗余配置优化

从源头降低故障概率的关键在于合理的系统设计与元件选型。机械方面，变桨轴承应采用高承载额定动载荷的设计，并选用宽温域、高压性能的专用润滑脂，同时设置自动加脂装置以避免人工补脂的过量或不足。减速齿轮箱宜采用行星传动结构以均化载荷，并在输入级设置转矩限制器，防止极端冲击造成断齿。电气方

面,伺服驱动器的功率模块应降额使用,并配置强制风冷或液冷散热回路,功率薄膜电容选型时应考虑纹波电流耐受裕量。对于液压系统,密封件材料需与抗磨液压油兼容,并在泵出口设置高压过滤器与污染度在线监测接口^[3]。冗余配置策略应覆盖位置传感器(双通道编码器或磁栅与编码器异构冗余)、后备电源(超级电容与蓄电池并联)以及通信链路(光纤与无线备份),使单一元件失效不至于丧失基本安全功能。

4.2 多参量状态监测与智能预警

预防措施的核心载体是状态监测系统,其监测参量应覆盖机械振动、电流特征、温度分布、压力波动和油液颗粒度等维度。对于轴承与齿轮箱,可采用加速度传感器采集高频振动信号,通过包络解调提取磨损特征频率;针对扭矩异常,可监测驱动器输出电流的有效值与峰值,设定基于工况自适应阈值的超限报警。温度监测不应仅局限于驱动器的模块温度,还应包括制动电阻表面温度、滑环腔体温度以及液压油箱油温,构成温度场综合评估。对于液压系统,连续在线监测回油管路的颗粒计数器与水分传感器,结合压力脉动分析,可以提前判断泵的容积效率衰退。信号层面,周期性记录编码器零点偏移值并对比三轴桨距角偏差,若偏差超出门限则及时触发重新标定。智能预警算法应采用多变量相关分析方法,避免单一参数波动引起的误报,同时利用机器学习对历史故障波形进行模式匹配,提升早期微弱故障的识别灵敏度。

4.3 分层维护策略与周期动态调整

基于RPN评估结果,维护策略应划分为日常巡检、定期检修与状态检修三个层级。日常巡检重点关注可见的泄漏、异响、接插件松动及润滑脂颜色变化,并下载驱动器故障记录与事件日志。定期检修按半年或年度周期进行,内容包括轴承游隙测量、液压油取样化验、滤波电容容量测试以及后备电源充放电容量校核。状态检修则以在线监测数据为依据,当特征参数趋势逼近预警线时,安排专项检查或部件更换,避免未到期解体造成额外损伤^[4]。维护周期的动态调整需考虑机组投运年限、历史故障频次及季节环境因素,例如在风沙较大或温差剧烈的场站,适当缩短滤芯更换与密封件检查间隔。同时,建立维护效果反馈闭环,将每次检修后的运行数据回馈至RPN数据库,用于重新评估故障发生频度,实现维护计划的螺旋式优化。

4.4 备件管理与应急替换预案

备件管理的科学化是缩短故障修复时间的重要保障。针对高RPN且供应周期长的关键件(如伺服驱动器、变桨轴承、液压泵),应建立安全库存,并根据消耗速率与采购周期设定动态再订货点。备件存储环境应严格控制温湿度,防止电容器老化或密封件硬化。应急替换预案需明确故障发生后的人员组织、工具配备、吊装方案及安全隔离步骤,并针对不同故障模式预设多种替换路径,例如驱动器故障时可启用旁路应急变桨模式,编码器故障时切换至备用传感器。此外,应定期开展紧急顺桨功能测试,验证在模拟故障条件下后备电源、液压蓄能器及安全链的执行响应,确保替换作业前后系统的安全完整性等级维持不变。

5 结语

变桨系统的可靠运行直接关系到风电机组的发电效率、结构安全与运维经济性。本文从系统构型与功能要求出发,全面梳理了机械、电气、液压及信号四类故障模式,运用FMEA方法对各模式进行了风险优先数排序与影响传递路径剖析,并通过量化表格直观展示了八类典型故障的评估结果。分析表明,变桨轴承磨损、伺服驱动器过热、液压泄漏及编码器信号漂移是当前需重点防范的高风险模式。针对上述风险,本文提出的预防措施体系强调设计阶段的裕度储备与冗余配置、运行阶段的多参量状态监测与智能预警、维护阶段的分层策略与动态调整,以及管理层面的备件优化与应急预案,四者相互支撑形成闭环。在后续工作中,可进一步探讨极端环境条件下故障模式的演化规律,以及数字孪生技术在预防措施验证中的应用前景,但本文所构建的分析框架在当前工程实践中已具备较强的指导价值。

参考文献

- [1]王华,张明辉.大型风电机组变桨系统故障诊断技术综述[J].可再生能源,2022,40(5):678-684.
- [2]李志刚,陈晓东,刘洋.基于FMEA的风力机液压变桨系统可靠性分析[J].太阳能学报,2023,44(2):312-319.
- [3]赵立新,周海波,吴凯.电驱变桨伺服系统典型失效模式及健康管理方法[J].电力系统自动化,2021,45(18):156-163.
- [4]孙玉萍,郑建国,林峰.风电机组变桨轴承磨损机理与在线监测技术研究进展[J].机械工程学报,2024,60(1):88-97.