

山区风电场景中偏航系统的适应性改进与测试

姚邵杰

国华（赤城）风电有限公司 河北张家口 075500

【摘要】本文针对山区复杂地形下风电场偏航系统故障频发问题，以恒泰风电场明阳5.0MW机组为研究对象，系统分析2023年偏航系统故障数据。统计显示，偏航系统故障占总故障37.43%，其中偏航电机供电空开分闸占比高达92.86%，主因包括湍流强度超标（实测0.18vs设计值0.128）、润滑不良及驱动能力不足。通过实施双路径优化策略：为19台高湍流机组加装偏航驱动装置，为30台机组全覆盖部署自动润滑系统，并结合上海电气1.25MW机组继电器改造经验，成功将偏航故障率由37.43%降至0%。测试验证表明，优化后年减少停机906.75小时，增发电量453.4万千瓦时，经济效益显著。本研究为山区风电偏航系统适应性设计提供了可复用的技术路径与实证参考。

【关键词】山区风电；偏航系统；湍流强度；自动润滑；驱动能力

Adaptive Improvement and Testing of Yaw Systems in Mountainous Wind Farm Scenarios

Yao Shaojie

Guohua (Chicheng) Wind Power Co., Ltd. Zhangjiakou, Hebei 075500

【Abstract】This study addresses the frequent yaw system failures in mountainous wind farms with complex terrain. Using Mingyang 5.0MW units at Hengtai Wind Farm as case study, we systematically analyzed 2023 yaw system failure data. Statistics revealed that yaw system failures accounted for 37.43% of total failures, with 92.86% attributed to open-circuit disconnection of yaw motor power supply. Primary causes included excessive turbulence intensity (measured 0.18 vs. design value 0.128), inadequate lubrication, and insufficient driving capacity. Through dual-path optimization strategies—installing yaw drive devices for 19 high-turbulence units and deploying automatic lubrication systems for all 30 units—combined with Shanghai Electric's relay retrofitting experience for 1.25MW units, we successfully reduced yaw failure rates from 37.43% to 0%. Test verification demonstrated that the optimized system reduced annual downtime by 906.75 hours and increased power generation by 4.534 million kWh, yielding significant economic benefits. This research provides a reusable technical pathway and empirical reference for adaptive design of yaw systems in mountainous wind farms.

【Key words】mountain wind power; yaw system; turbulence intensity; automatic lubrication; driving capability

引言：

山区风电场因复杂地形引发的强湍流、风向突变等环境特性，对风电机组偏航系统的动态响应能力提出严峻挑战。偏航系统作为机组对风姿态调节的核心执行单元，其可靠性直接关系到发电效率与设备安全^[1]。恒泰风电场运行数据表明，2023年明阳5.0MW机组偏航系统故障占比高达37.43%，成为制约机组可利用率的关键瓶颈。当前行业先进水平已将该故障率控制在6.80%以内，而本场站目标设定为10%，亟需通过针对性技术改进突破环境适应性局限。本文基于故障根因分析，提出适应山区场景的偏航系统改进方案，并通过实证测试验证其有效性，为同类风电场提供技术借鉴。

1.故障特征与优化目标设定

1.1 偏航系统故障统计特征

2023年明阳5.0MW机型在恒泰风电场共产生故障187

起，其中偏航系统的故障有70起，占比高达37.43%，位居所有子系统首位^[2]。进一步分析偏航系统的具体故障发现，偏航电机供电空开分闸共计65起（占比达34.76%），远超其他种类故障合计数，是偏航系统故障的主要形式；除此之外还有偏航速度低保护以及偏航直驱柜空开分闸分别产生了3起和2起故障。从故障统计结果来看，空开脱扣故障占比最大，在变化负荷下容易发生，也是改进的重点方向之一。

1.2 故障诱因的多维度关联分析

结合现场运行数据分析，在风速9~14m/s和湍流强度0.1~0.2的范围内出现较多空开脱扣情况；同时根据载荷分析结果可知，由于实际湍流强度 $I_{ref}=0.18$ 大于设计输入值0.128，使得部分风机（共19台）在较高风速下偏航Mz载荷大于设定的安全范围（15500kNm）。综上所述，从因果图中可以得到引发此次事件的主要原因是：湍流大、缺油、驱动力不够、空开设定不正确四个原因造成电机过流导致空开跳闸，并且由湍流状况以及是否缺油为主要起因事件。

2.故障机理的深度解析

2.1 湍流环境对偏航载荷的放大效应

湍流过大也是山区风电场的主要特点。根据恒泰风电场地形条件下的实测情况,在选取的10台风电机组中,大部分机组湍流强度都在0.14-0.22范围内,最大者为26#机位风机,其湍流强度达到了0.22,明显超过了原设计的0.128。由于湍流强度大,会导致阵风变化频繁,使得偏航频率增加,为了能够及时跟踪阵风的变化而频繁地进行偏转,因此会大大增大偏航所需的力矩,并且不是线性的增加关系。仿真表明:当 $I_{ref}=0.18$ 时,有部分机组偏航 M_z 载荷最大达到16200kNm,超过设计限制4.5%,导致电机长期超负荷运转。

2.2 润滑系统缺陷引发的阻尼连锁反应

缺少自动给油脂装置是造成偏航系统缺脂的根本原因。从8#机组偏航扭矩分析仪上读取的数据来看,在手动给油脂之前,偏航电机的启动扭矩为850kNm;给油脂之后,偏航电机的启动扭矩下降到520kNm,下降了38.8%,由于润滑不良造成的齿圈和驱动小齿轮之间的摩擦阻力增大,其静止时受到的阻尼力矩增加了40%以上。当风电机组在湍流载荷下发生偏航运动的时候,超调量增加是由于附加阻尼作用使得电机做功增加了25%,电机电流一直大于1.2倍额定电流而跳闸。润滑油失效的后果是加剧了部件之间的摩擦损耗。通过对损坏机组进行解体检查发现,偏航轴承内外圈表面有不同程度拉伤痕迹,油脂变黑成团比例达到三分之二以上。不仅增加了摩擦力矩,而且在偏航过程中造成机舱转动不流畅,在转动轨迹中会出现跳跃式抖动,即所谓的“溜坡”。增大电流峰值。当风向变化较快时,未润滑偏航电机动作延时为2.5s~4.0s,而设计值是1.5s,在追风过程中会明显影响发电量,并引起电机较大的冲击电流。

2.3 驱动能力与电气保护的匹配失衡

低驱动能力主要体现在高湍流环境下的工作状态。在湍流强度 >0.15 的情况下,19台超标机组的偏航电机平均电流达到165A(额定为132A),最大电流一直超过180A达到8-12秒,并且没有足够的驱动扭矩储备来应对山区的湍流载荷是原来的设计缺陷所在。实际测量发现,在风速16m/s、湍流0.17工况下,单个驱动电机提供的输出扭矩仅为18.5kNm,仅满足需求的78%,即工作在过载状态。空气开关保护整定参数不合理。原本使用的是630A的空气开关,其过流速断整定值是1200A。由于风力扰动导致过流速断动作电流经常超过1350~1500A(持续时间为50ms~100ms),而没有考虑瞬时负载过大与长时间负载过大的区别,直接触发了过流保护功能,致使65次无效跳闸。更为严重的是驱动能力不足+空开设定僵化形成了一个死锁:驱动不足→电流增加→空开跳闸→失去机组对风控制→风轮扫掠面上受力不平衡→湍流载荷进一步加大。

3.适应性改进与验证测试

3.1 偏航驱动能力强化工程实施

对于部分出现湍流超限较多的机组(包括4#、6#、7#、8#、10#、11#、12#、13#、14#、15#、16#、17#、18#、19#),进行增加偏航电机改造,在每组现有的单电机旁再增加一台明阳MY150-4偏航电机,功率为15kW,两台电机共同提供45kNm的偏航驱动力矩(之前为22.5kNm)。同时提高电机上电斜率从1.0s到1.8s以降低电机启停电流。除此之外,在S7-1200PLC中重构控制策略,增加根据湍流强度来判断是否加一个约15%的前馈增益(若湍流 >0.15)^[9];注意考虑动态平衡进行安装操作,用新的Q345E材料垫片固定在新设计的机柜上,通过仿真验证找到合适的紧固件位置,减少了偏航力矩偏差超5%的风险;最后考虑到传动齿轮组磨损及润滑条件良好,设置齿隙大小为0.25~0.35mm。采用激光对中仪对齐,防止施加弯矩;6#机在风速为17.39m/s湍流为0.14的情况下进行测试,在两个偏航电机同时运行的情况下,偏航电流由原来的178A下降到142A,并将最大偏航电流限制在160A以下。最后在实际测试过程中,为了验证效果采用了逐步增大湍流的方法来进行测试。当湍流强度为0.22(26#机现场测量结果)进行偏航动作,偏航速率约为 $10^\circ/s$ 时,一个偏航电机运行方式下的偏航电流变化范围约为 $\pm 35A$,而双电机机构波动收窄到 $\pm 18A$ 。主要性能参数表明,在增速的情况下,偏航滞后时间由原来的3.8s降低为2.1s;减少由于湍流造成的过流尖峰事件数量约82%;有效解决由于转矩不够而导致空开脱扣的问题。

3.2 全自动润滑系统集成应用

对所有30台机组安装Groz-BeckertECO-LUBE2.0自动润滑系统。包括一个中央泵站、若干分配器及12个注油点(每台机组8个齿圈注油点和4个轴承注油点),使用的润滑脂型号为锂基EP2润滑脂NLGI2,滴点 $>160^\circ C$ 。其中重要的控制参数就是注油的时间间隔,其取决于涡轮机内湍流强度 I_{ref} 大小,当 $I_{ref}<0.15$ 时, $I_{ref}<0.15$ 时,每120h加油1次; $0.15 \leq I_{ref}<0.18$ 时,每72h加油1次; $I_{ref} \geq 0.18$ 时,每48h加油1次,每次加油量为0.8mL/点。系统集成考虑环境因素。润滑泵选型为低温型($-40^\circ C$ 可启动),管路增加保温层厚度,防止山区低温造成油脂冻堵,在7#机组实际应用过程中,使用自动润滑后,偏航启动力矩由820kNm下降至510kNm,下降了37.8%;运行扭矩波动标准差从125kNm降低至68kNm,运行平顺性有了明显提高。主要创新是增加力矩回馈功能——利用偏航位控编码器对当前力矩进行检测,若力矩突然增大 $>15\%$,则强制执行一次加脂操作;最终试验结果为通过同一条件下运行状态的观察来判断改造前后效果差异。以风速15.17m/s湍流强度0.17的工况为例,在人工补脂情况下,8#变桨电机偏航回路电流值约为125~165A;而在变桨力矩回馈模式开启的情况下,偏航回

路电流值约为 110~135A。经一段时间观察,采用新油脂后偏航电机能耗降低了约三分之一,偏航轴承温度下降了 10 度左右,并解决了以前由于缺油而导致的卡涩问题,在很大程度上保障了偏航电机的安全运行。

3.3 液压控制继电器可靠性改造

借鉴上海电气 1.25MW 机组经验,对明阳机组液压控制回路实施继电器升级。将原 16K4.1 型 230V 继电器(触点容量 10A)替换为施耐德 LC1D12M7C 接触器(触点容量 12A,带灭弧栅)。改造中保留 PLC 控制逻辑不变,仅将 230VAC 控制回路接入接触器线圈,24VDC 电源回路接入触点回路,确保液压建压、偏航功能无缝切换^[4]。重要整定值方面,在原基础上将接触器吸合电压范围调宽到 187~253VAC,抗电网波动能力强 40%;工艺上考虑防积碳措施。接触器灭弧室采用陶瓷隔离片,分断能力强,为 1500A,有效降低对触点的烧蚀程度。某厂 39 台上海电气机组进行改造后,触点表面碳化的比例由 100%降为 0%,液压系统建压时间由原来的 8.5s 缩短至现在的 6.2s。在实际的明阳机组上进行试验验证,发现新的设计方式将原本偏航收到指令后到执行动作的时间由 0.8s 缩短至 0.3s,使得机组在遭遇突变风况时不再出现由于液压力传递延时过长而引发的大载荷波动情况;同时对改造后的系统进行了为期一年的运行跟踪,未再发生任何涉及该部分系统的报错信息,累计节省的非计划停运时间超过 240h/年,预计每年可为每台机组降低约 1200 元的成本投入(更换继电器),30 台机组共计每年可节省费用约 14.9 万。由于操作简单(单套更换时间<2 小时),本方法作为风电场运维常规工作开展。

3.4 多维度测试验证体系构建

开展“仿真-台架-实机”验证工作:采用 GHBlade 软件对上述工况做载荷校核,给定实测湍流谱 $I_{ref}=0.18$,此时偏航 M_z 的载荷为 14800kNm (小于 15500kNm);然后在试验室按比例 1:10 做偏航台架实验,在湍流强度为 0.22 下,对双电机驱动方式下的电流进行测试,100 个偏航周期内没有发生过电流现象。为了验证效果,对 10#机组加装 HBM 扭矩传感器及 Fluke 电能质量分析仪进行现场实测,结果显示 2024 年 7 月份一次偏航动作期间,风速约 14.16m/s 湍流强度为 0.13 的情况下,经过优化处理后,一次偏航过程中电流偏差值平均为 8.2A,相比改造前降低约 61.9%,未出现拒动、误动情况;其中风况复杂(湍流强度大于 0.18)下偏

航动作成功率达到 99.2% (改造前为 76%)。空开分闸故障清零。建立大数据监测机制。利用 SCADA 建立偏航健康度指标,考虑湍流强度、注油周期、电流谐波共 12 个指标,设置预警线。根据 2024 年 8-11 月份的数据统计分析可知,此指标可以有效预测空开分闸故障并提前检修。

3.5 经济效益与技术推广价值

从以上测算中可以看出,在整个偏航系统改造完成后,可以每年节省 906.75 个小时的非计划性停机时间;以明阳 5.0MW 机型为例,其年等效运行时间为 2200 小时,则年可多发电约 453.4 万度电;以现行电价标准为 0.33 元每度电计,则每年可增加收入 $453.4 \times 0.33 \approx 149.6$ 万元。此外,还可以每年节省因空开损坏产生的维修成本约 8.7 万元及每年节省偏航轴承润滑工作量产生的工时费约 12.3 万元。因此,项目整体的投资回报周期预计仅为 11.2 个月左右,较行业预期水平高很多。同时,改造完成后系统的故障发生概率为 0 次/年,也远小于行业预期水平(≥ 10 次/年)。且达到了国内先进水平(6.80%)^[5]。推广价值体现在三方面:一是驱动强化方案适用于所有高湍流场站,已在 3 个同类项目复制,故障率平均下降 28 个百分点;二是自动润滑系统参数模型(注油周期-湍流强度函数)被纳入《山区风电运维导则》;三是继电器改造的“继电器-接触器”替换模式,已在 5 种机型推广,年减少全厂故障 150 次以上。

4. 结束语

本文对恒泰风电场偏航系统的故障情况进行分析,得出湍流风速过高、轴承缺油以及电机扭矩不够是造成偏航故障的主要原因,在提高电机扭矩及加装油脂自动润滑装置的基础上结合更换可靠继电器的经验,最终使该风场偏航故障率由原来的 37.43%降低为零,达到了预期效果。综上所述,在山地环境中,偏航系统的选型及控制策略的设计应摆脱传统的平原地区理念,考虑“风场环境-偏航阻尼特性-偏航电机保护”的关联性,并综合考量;本文的研究成果可为其他类似项目提供借鉴作用,同时也为以后的山地风电机组运行维护工作提供了新的思路:即依靠数据分析来指导设备实际工作状态,真正做到因机而异。

参考文献

- [1]王建国.山地湍流对风力发电机组偏航误差的影响机制及补偿策略研究[J].电子通信与计算机科学, 2025(11).
- [2]谢君.风电产业链中风机偏航系统控制策略研究综述[J].产业创新研究, 2024(12): 108-110.
- [3]范可.半潜式风电系统运动特性物理模型试验[J].船舶工程, 2024, 46(S01): 108-112.
- [4]马孙祺, 宋海良, 廖元文, 等.风力发电机组偏航系统可靠性分析与安全管理研究[J].进展, 2024(1): 129-131.
- [5]阎洁, 杨佳琳, 王航宇, 等.基于风况预测误差自适应的海上风电场尾流偏转控制方法[J].中国电力, 2024, 57(3): 190-196.