

激光滑环信号传输特性对变桨系统可靠性的影响分析

万晨辉

国华（河北）新能源有限公司 河北张家口

【摘要】风电机组变桨系统是实现功率调节和超速保护的关键子系统，其可靠性直接影响整机安全和发电效率。作为变桨系统中连接固定机舱与旋转轮毂的关键接口部件，滑环的信号传输性能至关重要。传统电接触滑环因机械磨损、环境敏感性和信号干扰等问题，已成为变桨系统故障的主要源头之一，尤其在恶劣气象条件下表现更为突出。本文聚焦于采用非接触激光传输技术的新型滑环（激光滑环）的信号传输特性，深入分析其对变桨系统可靠性的积极影响。通过对比传统滑环的技术局限，从信号完整性保障、抗干扰能力、环境适应性及维护需求等维度，系统阐述激光滑环如何显著降低通信故障率、延长无故障运行周期、减少维护成本和停机时间。

【关键词】激光滑环；变桨控制系统；可靠性；信号传输；非接触技术

【收稿日期】2025年11月16日 **【出刊日期】**2025年12月16日 **【DOI】**10.12208/j.ispm.20250009

Analysis of the impact of laser slip ring signal transmission characteristics on the reliability of pitch systems

Chenhui Wan

Guohua (Hebei) New Energy Co., LTD. Zhangjiakou, Hebei

【Abstract】 The pitch system of a wind turbine is a critical subsystem for power regulation and overspeed protection, and its reliability directly affects the overall safety and energy generation efficiency of the turbine. As a key interface component connecting the stationary nacelle and the rotating hub, the signal transmission performance of the slip ring is crucial. Traditional electrical-contact slip rings have become one of the main sources of pitch system failures due to mechanical wear, environmental sensitivity, and signal interference, with these issues being particularly pronounced under harsh weather conditions. This paper focuses on the signal transmission characteristics of a novel slip ring using non-contact laser transmission technology (laser slip ring) and analyzes its positive impact on pitch system reliability. By comparing the technical limitations of traditional slip rings, the study systematically explains how laser slip rings significantly reduce communication failure rates, extend fault-free operating periods, and decrease maintenance costs and downtime, considering aspects such as signal integrity, anti-interference capability, environmental adaptability, and maintenance requirements.

【Keywords】 Laser slip ring; Pitch control system; Reliability; Signal transmission; Non-contact technology

引言

风力发电作为可再生能源的主力军，其设备可靠性直接影响着能源供应的稳定性和经济效益。变桨系统是风电机组实现精准气动调节、确保额定功率输出以及极端工况下安全停机（紧急收桨）的核心执行机构，其运行的稳定与可靠是风电机组安全高效运行的关键。然而，长期实践表明，采用电刷-滑环接触技术的传统滑环由于固有的机械磨损、接

触电阻不稳定、环境敏感性高（如温度、湿度、盐雾）以及信号串扰等因素，易导致信号传输质量劣化甚至中断，进而引发变桨通信故障，此故障在变桨系统总故障中占比极高。因此，寻求更高可靠性的滑环信号传输方案是提升变桨系统及整机可靠性的重要技术途径。

1 风电机组变桨滑环技术基础

1.1 变桨系统与滑环的功能定位

风电机组变桨系统通过精准调节叶片的桨距角，实现对叶轮气动捕获功率的主动控制，确保在不同风速条件下维持额定功率输出或在超速、电网故障等危急情况下实现安全停机。滑环作为连接旋转轮毂与静止塔筒的唯一物理接口，其核心功能是为轮毂内的变桨驱动电机提供必需的动力电源如400VAC的大电流输送，传递至关重要的安全链信号确保基础安全逻辑如24VDC的紧急停机指令，以及承载高速总线通信协议如Profibus DP、CANBUS或Ethernet实现机组主控制器与变桨控制器之间的实时数据交互与控制指令传输；其性能直接影响着变桨动作的准确性、响应速度与系统安全保护的可靠性。

1.2 传统电接触滑环的技术瓶颈

传统变桨滑环依赖电刷导电部件在导电环道上的物理滑动接触来实现电能和信号的传输，其性能与可靠性严重受限于接触界面的物理状态；这种机械接触机制不可避免地会产生摩擦损耗，在环道与电刷接触面持续产生金属或碳基磨削颗粒，这些颗粒堆积形成磨粉浆会显著恶化接触电阻稳定性和信号传输质量，导致通信闪断或失效；同时电刷材料如碳基复合体对运行环境湿度异常敏感，湿度过高或过低均会加速磨损或导致接触不稳定；对于高速数字或高精度模拟信号传输，电刷抖动微小位移、接触电阻波动以及环道间的电磁串扰更是难以克服的技术障碍，这些因素共同导致传统滑环成为变桨系统尤其是其通信链路上的薄弱环节和故障高发点。

2 变桨系统滑环面临的信号传输困境与挑战

2.1 复杂严苛环境下信号传输的不稳定性

风电机组运行环境往往极其严苛，如我国北方坝上高原区域冬季极寒温度可达零下数十度，夏季高温炎热潮湿，甚至伴随沙尘、盐雾腐蚀以及高频机械振动；在此类环境下，传统电接触滑环面临严峻挑战；低温易导致接触材料收缩加剧接触不良，高温高湿则加速电刷磨损或诱发电化学腐蚀，盐雾沙尘加剧导电环道污染和绝缘劣化；持续存在的振动则直接导致电刷在导电环上的接触压力瞬间波动甚至跳离，使通信链路在振动瞬间的接触电阻变化远超过信号电平容忍范围如TTL电平要求的0.2V压降波动阈值；这些环境因素耦合作用，成为传统滑环信号传输质量波动乃至中断的固有技术难题。

2.2 机械磨损诱发信号完整性问题

传统滑环内部因刷环持续相对运动产生的磨削颗粒是信号失真的关键物理根源；这些磨削颗粒在滑环腔内逐渐累积，形成具有导电性的污染介质；一方面这些导电颗粒可能在环道间或环对地之间形成瞬态或永久性短路桥接，直接引发信号跳变或逻辑错误，另一方面磨粉浆的存在改变了接触点数量分布及接触电阻特性，导致信号传输路径上的阻抗不一致性加剧；对于高速数字信号如Profibus DP或Ethernet，这直接表现为眼图的眼高眼宽塌陷、上升下降时间劣化、时延增加和抖动恶化，甚至引起严重的振铃现象导致信号电平多次穿越逻辑门限引发误码；对于模拟信号，磨削污染则显著降低环道间隔离度，导致串扰指标严重偏离常规设计要求的45db甚至高要求的60db目标值^[1]。

2.3 通信故障对变桨系统可靠性的连锁冲击

由滑环问题引发的变桨通信故障对整机可靠性的冲击是系统性和多层面的；统计数据显示滑环相关故障占据了变桨系统通信故障的一半左右；通信中断首先直接导致主控系统失去对桨叶角度的闭环控制能力，轻则造成发电功率波动损失如大风天机组被迫停机，重则在需要变桨系统执行超速保护的紧急关头无法发出有效收桨指令，若此时备用变桨电池系统也发生故障，将存在叶片无法回收导致风轮超速甚至机械解体的毁灭性安全风险；故障发生后，现场往往只能通过临时复位报警尝试恢复，问题根源难以快速定位导致故障耗时较长和频繁发生，难以根本解决该问题；而滑环的维修或更换需要风机停机甚至进入轮毂作业，耗时较长成本高昂每台次平均处理时间超过13小时^[2]。这种“故障运维”模式带来巨大的发电量损失高达每兆瓦每年数万千瓦时的电量损失，并显著增加运维人员的作业强度和安全风险。

3 提升可靠性的激光滑环信号传输优化策略

3.1 非接触光传输机制根除磨损与干扰源

激光滑环的核心突破在于摒弃了传统的机械电接触模式，采用了完全非接触的激光调制与接收技术进行信号传输；发送端将需要传输的电信号总线协议如Profibus DP或Canbus通过高速光电转换器调制到特定波长的激光束上；该激光束通过特殊设计的自由空间光路或低损耗导光介质跨越旋转与静止界面；在接收端，高灵敏度光电探测器接收光信

号并精确还原出原始电信号；这一机制从物理原理上彻底消除了电刷摩擦产生的磨损碎屑和磨粉浆污染源，从而根治了由此引发的接触电阻不稳定、信号干扰、环道污染短路及绝缘劣化问题；同时光信号本质上不受电磁场的感性或容性耦合干扰影响，其信号传输通道不存在传统金属环道间难以避免的互容互感效应，从而在源头上杜绝了串扰噪声的产生，为高保真信号传输提供了本质安全的物理基础^[3]。

3.2 高速数字处理与协议容差控制

为满足变桨控制对总线信号实时性、可靠性与大带宽的需求，激光滑环深度集成了高速数字信号处理技术；核心采用现场可编程门阵列作为数据处理中心，具备强大的并行计算能力和灵活的可重构性；针对总线协议传输中的关键挑战，FPGA 内部实现了精密的容差控制算法；对于异步串行总线如 Profibus DP，算法精确管理其位时间窗口及采样点的偏移容忍度，能够自适应补偿因环境温度变化或激光路径微小扰动引起的时序细微波动；对于具有位填充规则的 CANBUS 总线，算法增强了帧识别与错误帧恢复机制，有效屏蔽偶尔出现的信号畸变；FPGA 还集成数据帧校验、冗余传输通道管理和自动切换策略，当监测到当前光路因极端情况如严重沙尘出现信号劣化时，能在微秒级别内无缝切换至备用光通道或通讯路径，确保控制指令的连续可靠送达从而保障变桨系统对控制器指令的毫秒级响应要求^[4]。

3.3 增强型环境适应性与分体冗余设计

为应对风电场所处的高原、严寒、酷暑、沙尘等极端环境对设备可靠性的挑战，激光滑环在物理结构与环境适应算法上进行了针对性的强化设计；物理结构采用高防护等级分体式设计，光学发生器和接收器分别独立封装，二者之间仅存在非接触的光信号耦合，而不存在电气连接或机械传动，这样既极大地降低了振动对传输的物理影响，又显著提升了单体设备的抗冲击和密封性^[5]。关键光电模块均选用宽温工作范围、高达-40° C 至+85° C 的工业级器件，确保严寒酷暑下的性能稳定；内部集成温度传感器实时监控单元工作温度，当检测到低温风险，如低于-10° C 时，驱动高效能且无电气火花的半导体加热元件启动，防止光学窗口凝露或结霜影响光通量；其光耦合界面经过特殊防雾、防尘处理，并设计有微正压空气帘结构或净化气路，持续

吹扫光学窗口，最大程度抵御沙尘、盐雾侵袭；动力腔室设计采用多重隔离，防止电弧传导风险；这些综合措施确保其在如坝上高原等苛刻环境中的零故障运行记录^[6]。

3.4 模块化设计简化维护并延长免维护周期

激光滑环通过高度模块化结构设计和优化的热管理设计，显著降低了生命周期内的维护需求；其核心的光电收发、电源供给、通信处理及环境监控等关键功能，均设计为独立可插拔的热插拔模块封装；单一模块的故障，只需更换该模块，无需整体拆卸滑环本体；结构设计避免了传统滑环复杂、易损的刷架弹簧压力调整系统等机械调校点，从而不存在因结构磨损导致的周期性性能劣化；内部无活动摩擦副，使其工作状态几乎不随时间改变，从而免除了因磨损积累所需的定期清洁维护^[7]。整体系统在理想使用条件下，可实现超过五年，甚至接近设计寿命八年的免维护运行期；即使需要在设计寿命中后期进行维护，也仅需对其状态监测系统显示性能开始衰减的特定模块进行更换，这种维护简单快捷，耗时远低于传统滑环的整体拆卸、清洗或更换过程；这种少维护、甚至免维护的特性，极大减轻了风电场维护人员工作负担，减少了在恶劣天气登机或轮毂作业的频率和安全风险^[8]。

4 结束语

本文深入剖析了激光滑环基于非接触光传输的技术特性及其对风电机组变桨系统可靠性带来的革命性提升。通过根除机械磨损污染源，激光滑环从本质上解决了传统电接触滑环长期存在的信号完整性差、环境敏感度高、维护频繁等核心弊端，尤其在高可靠要求的变桨通信链路上成效显著。其集成的高速 FPGA 处理、精密的容差控制算法、模块化抗极端环境设计和冗余保障机制，不仅确保了信号的稳定高速传输，更提供了长达数年的免维护运行能力。实证数据充分证明了其在大幅降低变桨通信故障率、减少停机时间和运维成本、提升整机安全性与发电效率方面的卓越效果。

参考文献

- [1] 许新华,陈丰.风电机组滑环 V 型槽环道搭配簇状合金刷丝结构设计与应用[J].中国设备工程,2024(13):137-139.
- [2] 杨家兴,齐春祥,王志勇.风力发电机组变桨滑环常见故障机理与研究[J].电力设备管理,2023(1):262-264.

- [3] 许新华,李力.浅析风电机组非固态金属滑环设计与应用[J].中国设备工程,2024(12):118-120.
- [4] 冯红岩,朱海娜,邱美艳,等.基于DBN的风电机组变桨系统可靠性动态评估[J].可再生能源,2024, 42(4):486-492.
- [5] 张仁河,田月葆,刘志,等.一种变桨系统的后备电源[J].中国设备工程,2023(6):1-3.
- [6] 赵俊博.基于 5G 通信的风电机组变桨系统可靠性动态评估方法[J].通信电源技术,2024, 41(21):246-248.
- [7] 高磊 王小虎 张林中.基于历阶变桨控制系统的风力发电机组性能提升探究[J].科技资讯,2025(10):6-7.
- [8] 覃波,李广宁,王振,等.无源多通道星载光纤滑环可靠性设计与试验[J].光通信技术,2024, 48(6):46-51.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS