

水轮发电机组长期运行磨损机理及运维优化

陈园宝

国网甘肃刘家峡水电厂 甘肃 临夏 731600

摘要: 水轮发电机组长期运行易受泥沙、空蚀、机械摩擦及耦合作用产生磨损,严重影响机组发电效率与运行安全。本文阐述机组核心结构、运行原理及各类磨损基础理论,剖析关键部件磨损机理、内外影响因素与性能退化规律。针对传统运维模式滞后、监测单一、防护针对性弱等问题,从检修机制、防护修复、智能监测多维度提出优化策略,为机组减损增效、长效稳定运行提供技术参考。

关键词: 水轮发电机组;长期运行磨损机理;运维优化

引言:水轮发电机组是水电能源转换的核心设备,具备长期连续运行的特点,是水电站稳定供电的关键保障。机组实际运行受水体泥沙、工况波动、设备运维等多重因素影响,各类磨损问题频发,造成部件损伤、效率下降、振动超标等故障,大幅缩短设备使用寿命。当前传统运维模式难以适配机组动态磨损特性,基于此开展磨损机理研究,优化运维体系,对提升机组运行稳定性、降低运维成本、保障水电高效安全生产具有重要现实意义。

1 水轮发电机组结构及长期运行磨损基础理论

1.1 水轮发电机组核心结构与运行原理

(1) 水轮机过流部件主要包含蜗壳、导水机构、转轮、尾水管等,是水流能量传递的核心通道;发电机核心构件由转子、定子、轴承系统及励磁装置组成,承担机械能与电能的转换工作,各构件协同保障机组稳定运转。(2) 机组核心能量转换原理为水能-机械能-电能的逐级转化,水流冲击转轮驱动主轴旋转,将水能转化为机械能,再通过发电机电磁感应效应生成电能。机组具备长期连续运行特性,可适配水电站不间断发电需求,稳态运行下参数波动小、运行稳定性强。(3) 机组实际运行多处于变工况、多负荷状态,受来水流量、水位落差及电网负荷调控影响。负荷增减过程中,机组转速、水流流场、部件受力状态持续变化,工况波动频繁,易加剧部件损耗。

1.2 机组长期运行典型磨损类型

(1) 泥沙磨损:江河水流携带的固体泥沙颗粒,高速冲击、摩擦过流部件壁面,长期累积造成材料剥离、厚度损耗,是河道型水电站最普遍的磨损形式。(2) 空蚀磨损:机组变工况运行时,流场局部压力骤降产生真空气泡,气泡随水流迁移至高压区域快速溃灭,产生瞬时冲击压力,反复冲击部件表面,引发蜂窝状破损伤

伤。(3) 机械摩擦磨损:机组主轴、轴承、联轴器等转动与配合部件,长期高速相对运动产生接触摩擦,造成接触面材料磨损,易引发间隙增大、振动加剧等问题。

(4) 耦合磨损:实际运行中泥沙磨损、空蚀磨损与机械摩擦磨损相互叠加、协同作用,单一磨损会加剧其他损伤进程,形成复合型、加速性构件损伤^[1]。

1.3 磨损评价基础指标与理论模型

(1) 核心评价指标包含磨损量、磨损速率、表面粗糙度,其中磨损量反映总损耗程度,磨损速率体现磨损快慢,表面粗糙度表征部件表面破损状态,是评估设备损耗的核心依据。(2) 固体颗粒磨损动力学理论模型,基于泥沙颗粒运动速度、粒径、冲击角度等参数,量化颗粒冲击与材料损耗的关联规律,可精准预测泥沙磨损发展趋势。(3) 空蚀损伤累积与疲劳磨损理论,以气泡溃灭的循环冲击载荷为核心,阐释部件表面疲劳裂纹萌生、扩展及剥落机制,揭示空蚀损伤的累积性、疲劳性破坏规律。

2 水轮发电机组长期运行磨损机理及影响因素分析

2.1 关键部件磨损微观与宏观机理

(1) 转轮叶片作为核心过流部件,长期承受高速含沙水流持续冲击,水流正面冲击造成叶片表面宏观材料切削损耗。同时机组运行过程中叶片边缘、背面易形成涡流扰动,产生局部紊乱流场,反复撕扯叶片表层金属,微观上引发材料疲劳剥离,长期累积形成片状、点状磨损损伤,逐步破坏叶片线型结构。(2) 导水机构需根据电网负荷和来水条件频繁调节开度,导叶之间、导叶与流道壁面长期产生流体摩擦。变工况调节时流场压力极不稳定,易滋生空化气泡,气泡溃灭产生冲击载荷,形成摩擦与空蚀叠加的耦合磨损机理,造成导叶端面、立面复合型破损,损伤速率远高于单一磨损形式^[2]。

(3) 轴承与轴系承担机组全部转动载荷,主轴长期高

速运转使轴瓦、轴颈持续接触摩擦。若出现润滑油脂老化、油路堵塞、油液污染等润滑失效问题,会破坏摩擦副油膜保护层,引发干摩擦、边界摩擦等问题,微观加剧接触面磨粒磨损和粘着磨损,长期运行造成轴系间隙超标、摩擦损耗加剧。

2.2 外部环境工况影响因素分析

(1) 水体含沙量与颗粒粒径是决定泥沙磨损强度的核心因素。水体含沙量越高,单位时间内冲击过流部件的颗粒数量越多,磨损累积速度越快;大粒径泥沙冲击动能更大,易造成部件表面结构性损伤,小粒径颗粒则持续打磨壁面,加剧均匀性磨损,共同加速设备损耗。

(2) 运行水头与流量的频繁波动,会彻底改变机组内部流场压力分布。水头骤降、流量紊乱会导致局部压力低于汽化压力,诱发空化现象,持续产生气泡并溃灭,反复冲击部件表面,大幅提升空蚀磨损概率与损伤程度,是变工况空蚀损伤的主要诱因。(3) 机组频繁启停、负荷大幅波动会打破稳定运行状态,使过流部件流场、轴系受力持续突变。每次工况切换都会产生瞬时冲击载荷,加剧磨损耦合作用,破坏部件稳定运行状态,对各类磨损均有显著的加速效果,缩短设备使用寿命。

2.3 设备自身与运维因素影响分析

(1) 部件基材硬度、韧性、耐蚀性及表面喷涂、硬化处理工艺,直接决定设备抗磨性能。优质耐磨材料与精细的表面处理工艺,可有效抵御颗粒冲击和疲劳损伤;材料缺陷、表面工艺粗糙会大幅降低部件耐磨性,让磨损损伤更快扩散蔓延。(2) 润滑系统供油压力、油液品质及密封系统密封性能,直接影响轴系、转动部件磨损状态。润滑系统故障会导致油膜失效,加剧机械摩擦磨损;密封不严会使泥沙、杂质进入摩擦副,引发磨粒磨损,形成持续性设备损耗。(3) 传统运维模式存在明显滞后性,多采用定期检修、故障后维修模式,无法及时发现轻微磨损隐患。同时检修流程不规范、部件装配精度不足、维护不到位等问题,会增大运行间隙、加剧振动,形成磨损持续加剧的恶性循环^[3]。

2.4 磨损演化规律与机组性能退化关联机制

(1) 机组磨损呈现典型的渐进演化、累积损伤特征,初期仅为表面轻微划痕、微损伤,无明显性能影响。随着运行时长增加,微小损伤持续累积、扩展,逐步形成大面积磨损、剥落、凹陷损伤,损伤程度随运行时间呈持续性加剧趋势。(2) 磨损量持续增大会破坏转轮、导叶的水力线型,降低水能转换效率,导致机组出力下降、能耗升高。同时部件磨损引发转动不平衡、间隙不均,直接加剧机组振动、摆度超标,大幅削弱机组

运行稳定性与平顺性。(3) 当磨损发展至重度阶段,会出现叶片穿孔、导叶失效、轴系磨损超标等问题,引发水力效率骤降、剧烈振动、轴承过热等故障,严重时导致部件开裂、设备卡滞,最终造成机组停机失效,引发重大运行事故。

3 水轮发电机组运维现状及磨损防控运维优化策略

3.1 现有运维体系与磨损防控现存问题

(1) 当前多数水电站沿用传统定期检修模式,以固定周期开展停机检修、部件巡检与维护工作,存在明显的运维局限性。该模式忽略机组实际运行工况、磨损差异化特征,状态良好的机组面临过度检修,存在隐性磨损的部件却无法及时排查。同时定期检修多为事后补救式维护,无法适配机组变工况、高负荷运行下的动态磨损问题,运维资源浪费、检修针对性差的短板较为突出。(2) 现阶段机组磨损监测手段较为单一,整体监测体系不完善。多数电站仅依靠人工巡检、常规仪表监测机组振动、温度等基础参数,缺乏针对过流部件磨损、空蚀、轴系微磨损的专项监测设备。传统监测数据采集频次低、精度差,无法实时捕捉磨损细微变化,难以精准判断磨损发展速率与损伤程度,导致运维预判能力不足,微小磨损隐患易持续累积为重度设备损伤^[4]。

(3) 现有抗磨防护运维措施通用性较强,针对性与专业性不足,防控效果有限。多数水电站采用统一的涂层防护、清淤维护模式,未结合不同部件磨损机理、不同季节水体含沙工况差异化施策。对于泥沙磨损、空蚀耦合磨损、机械摩擦磨损等不同损伤类型,缺乏专属防护方案,常规运维手段难以有效抑制复合型磨损,设备抗磨防护整体成效不佳。

3.2 基于磨损机理的预防性运维优化方案

(1) 依托机组各部件磨损机理,建立分部件、分工况差异化定期检修机制。针对转轮、导水机构等易发生水力磨损的过流部件,缩短汛期、高负荷变工况阶段的检修周期;针对轴承、轴系等机械磨损部件,依据润滑状态与运行时长制定检修计划。摒弃统一检修模式,结合部件损伤特征、工况损耗规律精准制定检修内容,提升检修工作的针对性与有效性。(2) 推行润滑、密封系统精细化运维管控优化策略。建立润滑油品定期检测、实时监测制度,及时更换老化、污染润滑油,保障轴系摩擦副油膜完整性;优化润滑供油系统,稳定供油压力与流量,杜绝干摩擦磨损。同时强化密封系统日常巡检与调试,定期检修密封件、封堵渗漏点位,防止水体泥沙、杂质进入设备内部,从源头降低机械磨损与磨粒磨损发生率。(3) 优化机组启停、变负荷运行工况运维规范,规范机组操作流

程。制定平缓启停、梯度增减负荷的运行标准,杜绝负荷骤升骤降、频繁启停等违规操作,减少工况突变带来的瞬时冲击载荷。在汛期、低水位等恶劣工况下,严控机组运行区间,规避高振动、低空化余量运行工况,降低变工况对机组磨损的加速作用。

3.3 磨损防护与设备修复运维技术优化

(1) 优化过流部件耐磨涂层喷涂、堆焊修复运维技术。根据转轮、导叶、蜗壳等部件的磨损类型,选用高硬度、抗空蚀、耐冲刷的新型耐磨材料,优化喷涂与堆焊工艺参数,提升涂层结合强度与表面平整度。建立部件修复台账,针对轻微磨损开展预防性补涂修复,重度磨损采用堆焊塑形+涂层防护复合工艺,恢复部件水力线型与抗磨性能。(2) 完善水体预处理、常态化清淤运维措施,从源头减少泥沙磨损。在取水口设置拦污、过滤装置,拦截大颗粒泥沙与杂质;汛期加大水体监测频次,根据含沙量调整机组运行方式与清淤频次。定期清理引水管道、流道内淤积泥沙,降低过流水体含沙量与颗粒冲击强度,有效缓解过流部件泥沙磨损问题。(3) 通过流场优化改造辅助运维,降低空蚀磨损损耗。结合机组运行流场数据,对易产生空化的叶片背面、导叶间隙等区域进行结构微调优化,改善内部流场压力分布,消除局部低压空化区域。同时将流场运维检查纳入日常运维体系,定期检测流场运行状态,及时处理流场紊乱问题,抑制空蚀气泡生成与溃灭损伤^[5]。

3.4 智能化运维监测体系构建优化

(1) 优化磨损状态实时监测传感器布局与数据采集体系,在转轮、导水机构、轴承、轴系等关键磨损部位布设高精度振动、压力、温度、磨损传感设备,实现全覆盖、无死角监测。优化数据采集频次与传输模式,实时采集机组运行工况、部件磨损、流场状态等核心数据,为磨损分析与运维决策提供精准数据支撑。(2) 搭

建基于运行大数据的磨损趋势预判与故障预警机制,依托历史运行数据、磨损演化规律,构建智能分析模型,实时对比分析设备运行参数变化。精准预判部件磨损发展趋势,识别早期空蚀、磨粒磨损、润滑失效等隐性故障,提前发出预警信号,实现从“事后检修”向“事前预防”的运维模式转变。(3) 构建运维数据信息化管理平台,整合设备参数、检修记录、运行数据、磨损监测数据等信息,实现运维数据统一存储、分析与调取。依托智能算法,根据机组工况、部件磨损状态自动匹配最优检修方案与防护策略,减少人工运维误差,提升运维管理的标准化、智能化与高效化水平。

结束语

本文系统探究了水轮发电机组长期运行的各类磨损机理,明确了环境工况、设备材质及运维模式对磨损演化的影响,梳理了磨损与机组性能退化的关联机制。结合现有运维体系短板,提出差异化检修、精细化防护、智能化监测的全方位优化方案。研究成果可有效解决机组复合型磨损难题,改善设备运行状态,提升运维精细化、智能化水平,为水电站机组长效安全经济运行提供可靠的运维技术支撑。

参考文献

- [1]宋金斗.探讨水力发电厂设备维护和缺陷管理[J].科技视界,2023,9(36):301-304.
- [2]沈俭,傅金.水力发电设备运行状态中的故障和诊断技术[J].科技创新导报,2024,16(25):132-135.
- [3]吴程鹏.水力发电厂电气设备安全运行及维护[J].科技经济导刊,2025,27(23):53-56.
- [4]夏正良.水力发电机组故障预测以及维护探讨[J].农村实用技术,2023,9(8):34-37.
- [5]刁俊波.水力发电厂电气设备安全运行存在的问题与解决措施[J].科技经济导刊,2024,27(13):87-90.