

水利发电机组故障诊断与维修策略分析

敖成市

贵州西源发电有限责任公司 贵州 六盘水 553000

摘要:水利发电机组稳定运行对发电系统至关重要。本文剖析其常见故障,涵盖机械系统转子不平衡、轴承损坏,电气系统定子绕组故障等,以及水力系统空化空蚀等,并分析故障诱因。介绍传统与智能诊断技术,对比二者优劣与适用场景。同时,分析传统维修模式局限,提出状态维修、预测性维修策略,构建维修策略选择框架,旨在为水利发电机组故障诊断与维修提供科学指导。

关键词:水利发电机组;故障诊断;维修策略

引言:水利发电机组作为将水能转化为电能的关键设备,其运行稳定性直接影响电力供应质量与安全。然而,受多种因素影响,机组运行过程中易出现各类故障,导致发电效率下降,甚至引发安全事故。传统故障诊断与维修模式难以满足大型现代化机组精准运维需求。深入研究水利发电机组故障类型、诊断技术及维修策略,构建科学合理的运维体系,对保障机组可靠运行、提升发电效益具有重要意义。

1 水利发电机组常见故障类型与机理分析

1.1 机械系统故障

水利发电机组机械系统故障是运行过程中最常见的故障类型之一,其产生与机组长期高负荷运转、部件磨损、装配精度不足等因素密切相关。核心故障机理主要包括金属疲劳、摩擦磨损、振动超标等,具体表现为转子不平衡、轴承损坏、主轴弯曲、联轴器偏差等故障形式。转子不平衡会导致机组运行时产生周期性振动,长期作用下会加剧轴承磨损,甚至引发主轴变形;轴承作为支撑转动部件的关键构件,受润滑不良、负载波动影响,易出现滚珠磨损、滚道剥落等问题,导致运行温度升高、异响等故障征兆。导水机构机械卡阻也是常见机械故障,多由连杆锈蚀、传动机构磨损间隙过大导致,会影响机组水量调节功能,降低发电效率^[1]。此类故障具有渐进性特征,初期故障信号较微弱,若未及时发现,易引发连锁故障,导致机组停机甚至部件报废,对发电系统稳定运行造成严重影响。

1.2 电气系统故障

水利发电机组电气系统是能量转换与传输的核心,其故障直接关系到机组发电质量与安全运行,故障机理主要涉及电路短路、绝缘老化、元件性能衰减等。常见故障类型包括定子绕组故障、转子励磁系统故障、配电装置故障等。定子绕组故障多由绝缘层老化破损、绕组接

头松动发热导致,易引发相间短路或匝间短路,表现为绕组温度骤升、三相电流不平衡,严重时烧毁绕组;转子励磁系统故障主要包括励磁绕组短路、励磁调节器失效等,会导致发电机输出电压不稳定,甚至失去励磁能力,影响电能输出质量。配电装置中的断路器、隔离开关等元件,受长期电应力、环境湿度影响,易出现接触不良、绝缘降低等问题,引发供电中断故障。电气系统故障具有突发性强、传播速度快的特点,若故障扩散至控制系统,还会导致机组自动控制失效,不仅影响发电效率,还可能引发电气火灾等安全事故,因此需重点做好电气元件的绝缘检测与性能监测。

1.3 水力系统故障

水利发电机组水力系统故障源于水流运动状态异常及过流部件损伤,其故障机理与水流冲击、空化空蚀、泥沙磨损等因素密切相关,直接影响机组的能量转换效率。常见故障类型包括空化空蚀故障、泥沙磨损故障、水力振动故障、引水系统堵塞等。空化空蚀是由于水流在过流部件表面形成低压空泡,空泡破裂时产生强烈冲击,导致部件表面出现麻点、蚀坑,严重时穿透部件壁面,影响过流性能;泥沙磨损多发生在多泥沙河流的水电站,高速水流携带的泥沙颗粒对转轮、导叶等过流部件产生冲刷磨损,导致部件形状改变,降低水力效率。水力振动故障则由水流脉动、尾水涡带等因素引发,表现为机组振动频率与水流脉动频率共振,加剧机组部件疲劳损伤。引水系统堵塞多由漂浮物堆积、泥沙淤积导致,会降低进水量,影响机组出力,甚至引发引水管道压力异常升高,对机组安全运行构成威胁。

1.4 故障诱因分析

水利发电机组故障诱因复杂多样,可分为内在因素与外在因素两大类,各类诱因相互作用易引发多类型故障。内在诱因主要包括设计缺陷、制造精度不足、材料

性能不达标等,如设计阶段未充分考虑水流脉动影响,易导致水力振动故障;制造过程中部件加工精度偏差,会加剧运行时的摩擦磨损。外在诱因涵盖环境因素、运行工况、维护不当等,环境因素中,高温高湿易导致电气元件绝缘老化,严寒天气可能引发管道冻裂,多泥沙、强腐蚀环境会加速过流部件与金属结构损伤;运行工况方面,机组长期超负荷运转、启停频繁、负荷波动过大,会加剧部件疲劳损伤,偏离设计工况运行则易引发水力系统故障。维护不当是关键诱因之一,包括润滑油脂更换不及时、检测监测不到位、备件更换不规范等,会导致初期故障无法及时发现,逐步发展为严重故障^[2]。另外,电网波动、自然灾害等突发因素,也可能直接诱发机组故障,影响运行稳定性。

2 水利发电机组故障诊断技术

2.1 传统诊断方法

水利发电机组传统故障诊断方法以人工检测与常规仪器测量为核心,依托工作人员的经验判断与基础检测数据实现故障识别,具有操作简便、成本较低的特点,在早期机组故障诊断中得到广泛应用。主要包括外观巡检法、参数测量法、油液分析法、振动测量法等。外观巡检法通过工作人员现场观察机组部件状态,识别明显故障征兆,如部件变形、渗漏、异响等,但受主观经验影响较大,对隐性故障识别能力不足;参数测量法通过万用表、温度计、压力表等常规仪器,测量电压、电流、温度、压力等关键参数,与标准值对比判断是否存在故障,可实现电气系统与液压系统基础故障诊断。油液分析法通过检测润滑油的水分、杂质含量、金属磨粒浓度等指标,判断机械部件磨损状态,适用于轴承、齿轮等转动部件的故障诊断;振动测量法借助振动传感器采集机组振动信号,通过简单的频谱分析判断故障类型。传统诊断方法存在诊断精度低、响应速度慢、对隐性故障识别能力有限等不足,难以满足大型现代化水利发电机组的精准诊断需求。

2.2 智能诊断技术

随着信息技术与人工智能的发展,智能诊断技术逐步应用于水利发电机组故障诊断,依托大数据分析、机器学习、信号处理等技术,实现故障的精准识别、定位与趋势预测,大幅提升诊断效率与精度。主要包括神经网络诊断技术、模糊逻辑诊断技术、专家系统、大数据驱动诊断技术等。神经网络诊断技术通过构建模拟人脑神经元结构的网络模型,对振动、温度、电流等多源故障信号进行深度学习,可实现复杂故障的精准分类,具有较强的非线性映射能力与容错性;模糊逻辑诊断技术

针对故障信号的模糊性与不确定性,通过模糊推理规则将模糊信息转化为明确的诊断结果,适用于多因素叠加的复杂故障诊断。专家系统整合领域专家的知识与经验,构建故障诊断规则库,通过推理机实现故障的自动化诊断,可快速输出诊断结果与处理建议;大数据驱动诊断技术依托机组全生命周期运行数据,通过数据挖掘与分析,识别故障演变规律,实现故障的提前预警。智能诊断技术具有自动化、精准化、智能化的优势,是当前故障诊断技术的发展主流。

2.3 诊断技术对比与选择

水利发电机组不同故障诊断技术在诊断精度、响应速度、适用场景、成本投入等方面存在显著差异,需结合机组类型、运行工况、故障特征等因素科学选择。传统诊断技术操作简便、成本较低,适用于小型机组的基础故障诊断,或作为大型机组的日常巡检辅助手段,但诊断精度较低,对隐性故障与复杂故障识别能力不足,难以满足现代化大型机组的精准诊断需求。智能诊断技术诊断精度高、响应速度快,可实现故障提前预警与精准定位,适用于大型、超大型水利发电机组的复杂故障诊断,尤其适用于隐性故障与多类型复合故障的识别,但存在设备投入大、技术门槛高、需要专业技术人员运维等问题^[3]。选择诊断技术时,需构建“基础检测+精准诊断”的多层诊断体系,小型机组可优先采用传统诊断方法,控制成本;大型现代化机组应搭配智能诊断技术,提升诊断精准度。同时,需考虑诊断技术的兼容性与扩展性,确保能够适应机组运行工况的变化,实现全生命周期故障诊断覆盖。

3 水利发电机组维修策略优化

3.1 传统维修模式分析

水利发电机组传统维修模式主要包括事后维修与定期维修两种,在机组运维历史中发挥了重要作用,但随着机组容量增大、结构复杂化,其局限性逐渐凸显。事后维修属于“故障后修复”模式,即机组发生故障后再开展维修作业,具有维修成本可控、无需提前规划的特点,适用于非关键部件或故障影响较小的场景。但该模式存在明显弊端,故障发生后会导致机组停机,影响发电效益,若故障扩散还会加剧部件损伤,增加维修难度与成本,甚至引发安全事故。定期维修以固定的时间周期为依据开展预防性维修,通过提前更换易损部件、检修关键系统,降低故障发生概率,适用于故障规律明确的常规部件。但定期维修存在盲目性,未充分考虑机组实际运行状态,可能导致过度维修,增加运维成本,或因维修周期设置不合理,无法及时发现潜在故障。传统

维修模式缺乏对机组运行状态的动态感知,维修决策主观性强,难以适应大型现代化水利发电机组的精准运维需求,亟需优化升级。

3.2 状态维修

状态维修是基于机组实际运行状态开展的动态维修模式,通过实时采集机组振动、温度、电压、电流等关键运行参数,分析判断部件状态与故障趋势,当参数超出预警阈值或出现明显故障征兆时,及时开展维修作业,实现“按需维修”。该维修模式以故障诊断技术为核心,依托传感器、数据传输设备与分析系统,构建全流程状态监测体系,可精准把握维修时机,避免过度维修与维修不足。状态维修的核心优势在于针对性强,能够根据机组实际运行状态制定维修计划,减少不必要的停机时间,提升机组可用率;通过提前识别故障征兆,可避免故障扩大化,降低维修成本与安全风险。实施状态维修需具备完善的状态监测系统与专业的数据分析能力,确保能够精准采集、分析运行数据,准确判断故障状态。该模式适用于大型水利发电机组的关键部件与核心系统,如转子、定子、轴承、励磁系统等,是实现精准运维的重要基础。

3.3 预测性维修

预测性维修是在状态维修基础上发展的高级维修模式,依托智能诊断技术与大数据分析,实现故障的提前预测与精准预判,在故障发生前主动开展维修作业,最大限度降低故障对机组运行的影响。该模式通过采集机组全生命周期运行数据,结合故障演变规律与机器学习算法,构建故障预测模型,精准预测故障发生时间、位置与严重程度,为维修计划制定提供科学依据。与状态维修相比,预测性维修更具前瞻性,能够提前规避故障风险,减少非计划停机时间,进一步提升机组运行稳定性与发电效益。实施预测性维修需构建完善的多源数据采集系统,整合运行数据、维修记录、环境数据等多类信息,依托强大的数据分析平台实现故障预测模型的持续优化^[4]。该模式适用于大型、超大型水利发电机组,尤其适用于故障后果严重、维修周期长、维修成本高的关键部件,如转轮、主轴、大型轴承等。预测性维修是未来水利发电机组运维的发展方向,可实现运维从“被动响应”向“主动预防”的转变。

3.4 维修策略选择框架

水利发电机组维修策略选择框架需结合机组部件重要性、故障特征、运行工况、运维资源等多维度因素,构建分层分类的策略选择体系,实现维修资源的优化配置与维修效益最大化。首先,开展部件重要性分级,依据部件对机组运行的影响程度,将其分为关键核心部件、重要部件与一般部件,关键核心部件如转子、定子、主轴等,优先采用预测性维修;重要部件如励磁装置、导水机构等,采用状态维修;一般部件如辅助管路、普通阀门等,可采用事后维修或定期维修。其次,结合故障特征分析,对故障发生频率高、维修成本低的部件,采用定期维修;对故障突发性强、后果严重的部件,采用预测性维修;对故障影响较小、维修简便的部件,采用事后维修。同时需考虑运维资源配置,包括技术人员能力、检测设备水平、备件储备等,确保所选维修策略具备可实施性。最后,建立维修策略动态优化机制,定期评估维修效果,结合机组运行工况变化、技术升级等因素,及时调整维修策略,实现全生命周期运维的精准化与高效化。

结束语

水利发电机组故障诊断与维修策略研究是保障电力稳定供应的关键环节。通过深入分析故障类型与机理,精准选用诊断技术,合理优化维修策略,可有效提升机组运行稳定性与发电效率。未来,随着智能技术与大数据的不断发展,故障诊断与维修将更加精准、高效。持续探索创新,完善运维体系,对推动水利发电行业高质量发展具有深远意义。

参考文献

- [1]章天际.基于振动分析的水利发电机组机械状态检测方法[J].实验室检测,2025,3(21):129-131.
- [2]谢谊.莫莫克水利枢纽发电机组水轮机导叶漏水量测试探讨[J].黑龙江水利科技,2022,50(4):90-93.
- [3]张可新,彭军,刘剑,等.BIM技术在黄石盘水利工程水轮发电机组安装中的应用[J].广东水利水电,2024(5):90-94,99.
- [4]郭熔,杨赓祺,帅涛.水利工程中水轮发电机组常见故障及维修技术[J].今日制造与升级,2023(11):14-16.