

水电站高压电气设备运行缺陷分析及预防性维护

陶平虎

国网甘肃省电力公司刘家峡水电厂 甘肃 永靖 731600

摘要：水电站作为清洁能源供给与电网调峰调频的核心枢纽，高压电气设备是保障其安全稳定运行的核心载体，其运行状态直接关系到水电站发电效率、电网安全及防洪减灾效能。本文以水电站高压电气设备为研究对象，深入剖析缺陷产生的核心成因，结合设备运行实际，构建涵盖针对性、经济性、系统性、前瞻性的预防性维护体系，提出分设备维护、技术优化、人员与管理提升的全方位优化策略。

关键词：水电站；高压电气设备；运行缺陷分析；预防性维护

引言

随着水电站运行年限的延长，各类高压电气设备运行缺陷频发，诸如绝缘老化、部件磨损、操作失灵等问题，不仅增加运维成本，还可能引发设备故障、停机停电等安全事故，严重制约水电站的安全稳定运行与发电效益发挥。现有运维工作中，多以故障后维修为主，预防性维护体系不完善、维护策略缺乏针对性、人员专业水平不足等问题突出，难以实现缺陷的提前防控与高效处置。

1 水电站高压电气设备运行缺陷成因分析

1.1 设备自身因素

设备自身因素是水电站高压电气设备运行缺陷产生的内在根源，直接决定了设备的运行基础与服役寿命。

(1) 设备制造质量缺陷是引发运行缺陷的先天诱因，直接决定了设备的初始运行质量。部分设备在制造过程中，因材料选用不合格，未严格遵循高压电气设备的材质标准，导致核心部件的绝缘性能、机械强度不达标，在长期高压、高负荷运行环境下，易出现绝缘破损、部件断裂等问题。(2) 设备老化损耗是设备长期运行过程中不可避免的自然现象，也是引发运行缺陷的主要自身因素。水电站高压电气设备长期处于高压、高负荷的运行状态，同时受水电站特殊环境影响，核心部件会逐步发生老化损耗^[1]。绝缘部件长期承受高压电场作用，会出现绝缘性能下降、老化脆化等问题，易引发绝缘击穿、闪络等缺陷；机械部件则会因长期摩擦、振动，出现磨损、锈蚀、变形等情况，导致设备操作卡涩、动作失灵。(3) 设备选型不合理则会导致设备与水电站运行工况不匹配，从根源上增加缺陷发生的概率。部分水电站在设备选型过程中，未充分结合自身的运行环境与负荷特性，盲目选用通用型设备，忽视了水电站湿度高、温差大、负荷波动频繁的特点。例如，选用的设备绝缘等级未适配高湿度环境，易出

现绝缘受潮缺陷；设备额定负荷、抗冲击能力未匹配水电站的负荷波动需求，长期运行中会加剧设备损耗，导致性能下降。不合理的选型不仅无法充分发挥设备的运行效能，还会缩短设备使用寿命，增加缺陷发生率，给后续运维工作带来诸多不便。

1.2 运行环境因素

(1) 湿度与温度的双重影响，是水电站高压电气设备面临的最基础、最持久的环境挑战。水电站周边紧邻水体，库区水汽蒸发量大，再加上地下渗水、设备冷却排水等因素，使得厂房内及户外设备区域的湿度长期处于较高水平。高湿度环境会逐步渗透到设备内部，附着在绝缘部件表面，降低绝缘性能，导致绝缘电阻下降，长期下来易引发绝缘受潮、闪络等缺陷，严重时还会造成设备短路。(2) 粉尘、水汽与腐蚀性气体的侵蚀，会持续破坏设备表面结构与核心性能，逐步引发各类缺陷。水电站运行过程中，库区周边的粉尘、泥沙会随风飘散，附着在设备表面，长期堆积会堵塞设备散热通道，导致设备散热不良、温度升高，同时粉尘还会磨损设备触头、绝缘子等部件，降低设备运行可靠性。水汽的长期浸润则会加剧设备金属部件的锈蚀，破坏绝缘层的完整性，尤其对于户外布置的高压设备，水汽与粉尘结合后，侵蚀作用会进一步增强。(3) 雷电与过电压的冲击，是引发设备瞬时缺陷或永久性损坏的突发性环境因素，危害程度极高。水电站多地处山区，雷雨天气频繁，雷电击中设备或线路时，会产生强大的瞬时过电压，瞬间冲击设备绝缘层，若设备防雷保护措施不到位，会直接导致绝缘击穿、部件烧毁等永久性损坏。并且，电网系统的操作过电压、谐振过电压等，也会对高压电气设备造成冲击，引发瞬时缺陷，若未及时处理，会逐步发展为严重缺陷，影响设备正常运行，甚至导致水电站停机，造成重大经济损失。

1.3 人为操作与管理因素

(1) 操作不规范是引发设备运行缺陷的直接人为因素,多源于人员操作时的疏忽、侥幸心理或流程意识淡薄。水电站高压电气设备的启停、倒闸等操作,有着严格的操作规范和流程要求,每一个步骤都直接关系到设备的运行状态。若操作过程中未严格遵循规范,出现操作失误,比如启停设备时未按规定顺序操作、倒闸操作时误动、误碰设备部件,不仅会直接损伤设备的核心部件,还可能导致设备运行参数异常,引发接触不良、机构卡涩等缺陷。(2) 维护不到位是导致设备隐患累积、缺陷恶化的重要管理漏洞,核心在于维护工作的主动性、规范性不足^[2]。高压电气设备的预防性维护是及时发现隐患、避免缺陷发展的关键,需要定期开展巡检、检测、检修等工作。若维护工作流于形式,定期巡检不及时,就无法及时发现设备表面的轻微缺陷和内部隐患,导致隐患逐步累积,从轻微缺陷发展为严重缺陷,最终引发设备故障。(3) 人员专业水平不足则是制约操作规范和维护质量的根本因素,直接影响缺陷识别与防控的效果。高压电气设备结构复杂、技术含量高,对运维人员的专业素养有着较高要求,既需要掌握设备的工作原理、运行特性,也需要具备熟练的操作技能和精准的缺陷识别能力。若人员专业水平不足,对设备的运行规律和缺陷特征不了解,就无法及时识别设备运行中的异常信号,难以发现潜在隐患;在开展维护操作时,也会因操作不熟练、方法不当,无法彻底解决缺陷问题,甚至可能造成二次损伤。

2 水电站高压电气设备预防性维护策略

2.1 预防性维护体系构建原则

(1) 针对性原则是预防性维护体系的核心导向,水电站高压电气设备类型多样,不同设备的缺陷类型、产生原因存在显著差异,且不同区域的设备所处运行环境也各不相同,湿度、粉尘、雷电影响程度存在区别。因此,构建维护体系时,需结合各类设备的常见缺陷类型、缺陷发展规律,并充分考量设备所处的运行环境,针对不同设备、不同工况制定差异化的维护方案,聚焦缺陷高发部位和关键环节,精准排查隐患、落实维护措施,让维护工作直击核心,避免盲目维护,提升维护的精准度和有效性。(2) 经济性原则是维护体系可持续运行的重要保障,核心是在保障维护效果的前提下,实现维护成本的合理管控,避免过度维护或维护不足^[3]。预防性维护的目的是降低缺陷发生率、减少故障损失,但若过度追求维护效果,投入过多的人力、物力、财力,会增加水电站的运维成本,反而违背维护的初衷;反之,

若为控制成本而缩减维护投入,会导致维护不到位,无法有效防控缺陷,最终引发设备故障,造成更大的经济损失。(3) 系统性原则要求维护体系实现全方位、全流程、全生命周期的覆盖,避免出现维护盲区。水电站高压电气设备是一个有机整体,各设备之间相互关联、协同运行,某一设备的缺陷若未及时处理,可能会影响其他设备的正常运行。所以,维护体系需覆盖所有高压电气设备,无论是主变压器、高压开关,还是互感器、避雷器等辅助设备,都要纳入维护范围。

2.2 分设备预防性维护策略

(1) 主变压器作为水电站高压电气系统的核心枢纽,其维护重点围绕油质、绝缘、温度三大核心维度展开,同时配合定期检修实现全方位防控。油质检测是主变压器维护的关键,要定期监测油的介损、水分、击穿电压等指标,及时发现油质劣化问题,通过过滤、换油等方式保障油的绝缘和冷却性能;绝缘测试则聚焦绕组、铁芯等核心部件,定期检测绝缘电阻、介损因数,排查绝缘老化、破损隐患;温度监测需实时跟踪绕组、油温变化,及时发现过热问题,避免因过热加剧设备损耗。(2) 高压开关设备的维护核心是保障操作可靠性和绝缘性能,重点围绕触头、操作机构和绝缘部件开展。触头清洁需定期清除表面氧化层、粉尘等杂质,避免接触不良导致过热、打火等缺陷;操作机构润滑需定期添加适配的润滑剂,减少部件摩擦,防止操作卡涩、拒动等问题;绝缘检测需定期排查绝缘破损、老化情况,及时更换损坏的绝缘部件。(3) 互感器的维护重点聚焦计量准确性和运行稳定性,兼顾绝缘安全和接线可靠性^[4]。误差校准需定期开展,确保电流、电压计量精准,避免因误差超标影响电网计量和保护系统正常运行;绝缘检查重点排查绕组、外壳的绝缘状况,防止绝缘击穿引发缺陷;接线紧固需定期检查接线端子,避免松动导致接触不良、信号异常。(4) 避雷器、绝缘子的维护核心是强化绝缘防护和防雷性能,适配水电站高湿度、多粉尘的环境特点。定期清洁可清除表面粉尘、污垢,避免因污闪引发绝缘失效;绝缘测试需定期检测绝缘性能,排查受潮、破损隐患。

2.3 预防性维护技术优化

(1) 智能化监测技术的应用重点解决传统人工监测效率低、缺陷识别不及时痛点,实现维护工作的主动化、智能化。传统维护多依赖人工巡检,不仅耗时耗力,还易因人为疏忽遗漏潜在隐患,尤其对于隐蔽性较强的缺陷,难以提前发现。在线监测技术可实时采集设备运行参数,全程跟踪设备状态,及时捕捉参数异常信

号,实现缺陷的早期预警;远程诊断技术则可打破空间限制,通过数据分析精准判断缺陷类型与严重程度,无需现场拆解设备。(2)维护流程标准化是规范维护行为、提升维护质量的核心保障,避免因操作不规范导致的维护不到位或二次损伤。要根据各类高压设备的特性,制定专属维护手册,明确巡检、检测、检修的具体流程、操作标准和质量要求,细化每一个维护环节的操作步骤、时间间隔和责任分工。让运维人员有章可循,避免维护工作流于形式,确保巡检不遗漏、检测不精准、检修不彻底的问题,实现维护流程的规范化、标准化。(3)隐患分级管控则是实现资源合理配置、提升维护针对性的重要举措,避免“眉毛胡子一把抓”。根据设备缺陷的严重程度,划分不同等级,针对不同等级的隐患制定差异化维护计划,明确维护优先级。对于危急、严重隐患,优先调配人力、物力资源,及时开展处置工作,防止隐患快速恶化引发设备故障;对于轻微、一般隐患,合理安排维护时间,定期跟踪监测,避免过度维护造成资源浪费,实现隐患管控的精准化、高效化,最大化发挥维护工作的效能。

2.4 人为与管理层面优化

(1)人员培训是提升运维队伍专业素养的核心举措,重点围绕缺陷识别、维护操作、应急处置三大核心能力展开。培训需兼顾理论与实操,不仅要讲解各类设备的工作原理、缺陷特征和维护技术,还要通过实操演练,提升运维人员的动手能力,让其熟练掌握各类维护操作流程,精准识别设备运行中的异常信号和潜在隐患。(2)管理制度完善是规范运维行为、明确责任分工的关键,避免维护工作流于形式、责任不清。建立完善的维护台账,详细记录每台设备的维护时间、维护内容、检测数据、缺陷情况等信息,实现设备维护全流程

可追溯,为后续维护优化和缺陷分析提供依据^[5]。并且,建立缺陷追溯机制,对发现的设备缺陷,追溯其产生原因、发展过程和维护情况,明确相关责任,避免同类缺陷重复发生。(3)定期评估与优化是确保预防性维护策略适配性、提升维护效果的重要环节,核心是打破“一成不变”的维护模式,实现维护策略的动态调整。要定期对预防性维护工作的效果进行全面评估,结合设备缺陷发生率、故障频次、维护成本等数据,分析现有维护策略的优势与不足,查找维护工作中存在的问题。

结语

综上所述,针对性的预防性维护策略能够有效防控高压电气设备运行缺陷,降低故障发生率,延长设备服役寿命,提升水电站运行稳定性与经济性,切实解决传统运维模式中存在的短板。但研究目前仍存在一定局限,未来可进一步结合智能化、数字化技术,推动预防性维护向智能预警、精准管控升级,优化隐患识别与处置效率,同时探索适配不同类型水电站的个性化维护模式,完善行业标准化运维体系。

参考文献

- [1]杨海.高压电气设备预防性维护的精准检修策略[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025,(4):146-149.
- [2]张庆航.高压电气设备的绝缘故障分析与预防措施[J].现代职业安全,2025,(1):94-97.
- [3]刘为,王佳慧.变电站运维管理中的危险点及预控措施探讨[J].新潮电子,2025,(21):223-225.
- [4]官麒麟.变电站高压电气试验设备故障运行状态检测分析[J].电力设备管理,2025,(3):215-217.
- [5]段立俊.高压电气设备安装调试与运行维护技术[J].科学与信息化,2024,(16):38-40.