

高压直流断路器动作特性测试与现场运维规程完善研究

许增川

国网西藏电力有限公司超高压分公司 西藏 拉萨 850000

【摘要】：高压直流断路器是柔性直流电网、高压直流输电工程的主要保护设备，它的动作特性直接影响到直流系统的故障隔离速度和运行安全。目前国家电网已经投运的±500kV张北柔性直流输电工程，给高压直流断路器测试和运维积累了大量的实际操作经验；根据西藏地区2026年下半年±800kV柔性直流换流站建设规划，从西藏高海拔、空气稀薄、换热量低的特殊工况出发，以换流阀冷却系统和直流断路器协同运维为视角，现有动作特性测试方法针对性不足、现场运维规程滞后于设备迭代速度、特殊工况适配性差等问题逐渐暴露出来，影响了设备可靠投运和系统稳定运行。本文根据张北±500kV柔直工程的实际操作经验，结合高压直流断路器的工作原理以及高海拔柔直工程前期预研的需求，整理出动作特性主要测试项目、测试方法和判定标准，分析常规工况和高海拔特殊工况下现场运维环节的常见不足和规程漏洞，重点加入换流阀冷却适配性运维、高海拔散热防护等专项内容，提出运维规程优化完善方案，形成常规工程、高海拔特殊工况相结合、测试标准化、运维规范化、管理精细化的完整体系，为高压直流断路器全生命周期管理及西藏后续柔直工程建设运维提供技术支持，保证直流输电工程的安全稳定运行。

【关键词】：高压直流断路器；动作特性；现场测试；运维规程；故障隔离

DOI:10.12417/2811-0722.26.07.041

1 引言

高压直流断路器是直流系统唯一的主动故障隔离装置，在毫秒级时间之内完成故障电流开断、过电压抑制等功能，它动作速度、同期性、开断能力等特性都会直接影响到直流系统故障范围控制、设备绝缘安全和连续供电能力。相比常规的海拔地区而言，高海拔柔直工程当中，由于空气对流换热效率降低，因此需要对冷却运维策略加以优化，并且高压直流断路器的电力电子模块、操作机构同样会遭遇散热不足、绝缘耐受标准提升等新情况出现，目前普遍存在的通用运维规程并未涵盖此类特殊场景，设备测试以及运维方面的技术空缺更加明显。因此，本文以±500kV张北柔直换流站工程实操经验为基础，结合西藏高海拔±800kV柔直工程前期建设探索和换流阀冷却运维需求，对高压直流断路器动作特性测试要点进行梳理，分析常规工况和高海拔特殊工况下现场运维存在的问题，有针对性地地完善适配特殊环境的运维规程，填补高海拔柔直工程配套设备测试和运维管理技术空白，提高高压直流断路器全场景运维管理水平，保证西藏直流输电系统安全稳定运行。

2 高压直流断路器动作特性核心测试内容

2.1 测试基本原则与前期准备

高压直流断路器动作特性测试坚持安全第一、准确量化、适应工况、符合环境的准则，常规海拔工程测试同高海拔工程预研测试要分开进行。测试前要完成设备断电、验电接地、安全隔离等标准化的操作，核对设备型号、额定参数和出厂测试报告，对张北工程应用的混合式高压直流断路器重点核对与柔直换流阀、冷却系统联动的参数；校准高速数据采集仪、电流电压传感器、行程测试仪等检测设备，保证测试数据精度符合要求。为适应西藏高海拔预研测试环境，在原有基础上增加环境参数监测设备，实时采集海拔、气压、环境温度等环境参数，

排除低气压、低换热量对测试设备信号传输的影响。测试过程中要完整地保存动作波形、时间参数、电流电压的变化情况，防止外界的电磁干扰或者操作失误造成数据的不准确，针对高海拔散热差的特点，在测试过程中还要同步监测断路器核心部件的温升情况，防止过热导致测试结果受到影响；测试结束后及时恢复设备到正常的运行状态，对高海拔工况和常规工况的测试数据进行分类整理并存档。

2.2 核心测试项目与方法

目前主流高压直流断路器分为机械式、固态式和混合式三种，其中混合式高压直流断路器具有通流损耗小、开断速度快的特点，在张北±500kV柔直工程中实现了规模化应用，也是西藏±800kV柔直工程的备用主要设备，本文主要研究均基于张北工程该类设备的实操测试经验。不同于交流断路器，直流系统没有自然过零点，故障电流上升速度很快，抑制难度大，对直流断路器动作特性的精确度和可靠性要求比交流设备高得多；叠加西藏高海拔空气稀薄、换热量低的特点，设备核心部件散热效率明显降低，电力电子模块温升控制难度增大，动作特性受环境影响更加明显，测试标准需要进一步细化。目前，国内高压直流断路器测试体系还没有完全统一，现场运维大多参照交流断路器或者早期直流设备的规程，对于高海拔特殊工况的测试项目缺乏、与换流阀冷却运维联动不足等问题比较明显，部分工程由于设备动作异常、运维不到位导致故障扩大，造成经济损失和供电中断。根据张北工程设备结构、运行需求和西藏高海拔工况预研需求，高压直流断路器动作特性测试分为机械动作特性、电气动作特性、故障开断特性、高海拔环境适配性四类主要项目，具体测试内容和技术要求如下表所示。

表1 具体测试内容与技术要求

测试类别	核心测试项目	测试方法	合格判定标准
机械动作特性	分合闸时间、同期性、触头行程与速度、机构弹跳次数	采用高压开关动作特性测试仪，连接位移传感器与触点信号采集模块，施加额定控制电压，记录分合闸全程动作参数，重复测试3次取平均值	分闸时间 $\leq 3ms$ ，合闸时间 $\leq 8ms$ ，三相/模块同期性偏差 $\leq 0.2ms$ ，触头行程符合厂家设计值，弹跳次数 ≤ 2 次
机械动作特性	操作机构储能性能、闭锁可靠性	检测储能电机工作电流、储能时间，模拟故障工况测试闭锁功能，核查机构无卡涩、渗漏异常	储能时间符合厂家要求，储能完成后自动停机，闭锁动作灵敏可靠，机构运转无异常声响
电气动作特性	主回路接触电阻、绝缘性能	采用直流压降法测量接触电阻，2500V绝缘电阻表测量断口与对地绝缘电阻	接触电阻 \leq 厂家规定值，绝缘电阻 $\geq 5000M\Omega$ ，无明显衰减现象
电气动作特性	控制回路动作电压、辅助触点切换时间	调节控制电压，测试最低动作电压与最高耐受电压，记录辅助触点与主触头动作时差	最低动作电压为额定电压的30%-65%，辅助触点切换时差 $\leq 0.1ms$ ，无触点粘连、拒动问题
故障开断特性	短路电流开断时间、过电压抑制能力、安秒特性匹配度	搭建模拟故障测试回路，施加不同等级故障电流，记录开断全程波形与过电压数值，对比设计安秒特性曲线	故障电流开断全程 $\leq 5ms$ ，过电压不超过额定电压的1.5倍，实测安秒特性与设计曲线偏差 $\leq 5\%$

2.3 测试常见问题与处置

现场测试中常见的有分合闸时间超差、同期性超差、接触电阻异常、机构卡涩等，高海拔预研测试中又增加了核心部件温升超标、散热效率不达标等新的问题。分合闸时间超差大多由控制回路电压不稳定、机构润滑不良造成，需要检查电源质量、清理机构并添加专用润滑脂；同期性偏差过大要调节触头行程、连杆间隙，保证各个模块动作一致；接触电阻异常多是由于触头氧化、连接螺栓松动造成的，需要打磨触头接触面、紧固螺栓并复测。根据西藏高海拔空气稀薄、换热量小导致的温升超标情况，要按照换流阀冷却系统运维逻辑来改善断路器强制散热方案，重新布置散热风道，防止与换流阀冷却系统换热发生冲突，对测试中出现的设备拒动、异响、过热等异常情况，应立即停止测试，查找故障原因并排除故障后再重新启动测试，严禁带故障强行测试。

3 高压直流断路器现场运维现状与问题分析

3.1 现场运维核心内容与现有规程依据

目前高压直流断路器现场运维主要依据 DL/T 352-2010《直流断路器检修导则》、厂家技术手册和交流断路器运维规程，主要的运维内容是根据张北 $\pm 500kV$ 柔直工程实操经验，包括日常巡检、定期维护、故障检修、状态评估。日常巡检以

外观检查、参数监测为主，定期维护包含机构润滑、接触电阻复测、绝缘检测等项目，故障检修多为事后抢修，缺少预防性运维体系；高海拔地区柔直工程没有专门的运维细则，换流阀冷却和直流断路器协同运维没有规程可以遵循，现有的标准完全不能适应西藏高海拔、低换热量的特殊工况。

3.2 现存主要问题

3.2.1 运维规程针对性不足，高海拔与换流阀冷却适配性缺失

现有的规程大多针对早期的机械式直流断路器，对于张北工程所用的混合式高压直流断路器的电力电子模块、缓冲回路、智能控制单元等新型部件的运维要求没有明确规定，运维人员缺乏统一的标准可以遵循，只能靠经验来操作，容易造成维护不到位或者过度维护的情况发生。更重要的是规程没有覆盖高海拔特殊工况，没有结合西藏空气稀薄、换热量低的特点制定散热、绝缘专项运维要求，也没有关联换流阀冷却系统运维逻辑，两种核心设备运维相互独立，容易出现换热冲突、运维节奏不匹配等问题；规程中运维周期划分过于笼统，没有根据设备运行年限、负荷水平、工况环境差异来制定周期，不能适应以后西藏高海拔重载、低散热工况的特殊运维需求。

3.2.2 状态监测与预防性运维缺失，高海拔工况监测空白

张北工程等现有的柔直项目只设置了基本的压力、温度监测装置，没有动作特性在线监测、触头磨损监测、电力电子模块温度监测等功能，不能实时掌握设备的健康状况；对于高海拔环境，主要部件的温升、散热效率、绝缘性能衰减等关键指标没有专门的监测手段。运维模式以定期检修为主，缺少状态评价体系，不能提前预知可能的故障，一般到设备拒动、开断异常等故障出现之后才会进行检修，故障处置的及时性较差；高海拔环境下设备故障隐患更隐蔽，现有的运维模式不能满足提前预警的要求，影响系统的供电可靠性。

3.2.3 故障处置流程不规范，特殊工况处置无标准

高压直流断路器故障种类繁多，包括机械故障、电气故障、控制回路故障、电力电子器件故障等，现有的规程没有对各类故障进行分类制定标准化的处理流程，运维人员在遇到突发故障的时候容易出现操作失误、故障定位慢、处置不彻底等问题。对于高海拔散热不畅、换流阀冷却联动故障等特殊场合没有专项的应急处置方案，故障处置随意性大；部分工程缺少故障复盘机制，同类故障反复发生，不能从根源上解决问题，也没有将高海拔预研所需的经验积累起来。

4 高压直流断路器现场运维规程完善方案

4.1 优化规程框架，适配高海拔工况与换流阀协同运维

打破原有规程笼统化的框架，以张北 $\pm 500kV$ 柔直工程运维经验为依托，按照设备类型（机械式、固态式、混合式）分章节制定专项运维要求，明确新型部件运维标准，补充电力电子模块、缓冲吸收回路、智能控制单元的巡检、维护、检修细

则。增加西藏高海拔特殊工况专项运维章节,根据空气稀薄、换热率低的特点,提出直流断路器散热维护、绝缘防护、温升控制专项条款,同步衔接换流阀冷却系统运维逻辑,确定两类设备的运维联动要求和冷却资源协同方案,防止冷却资源冲突。根据设备运行工况、负荷等级、环境条件,实行差异化的运维周期,把运维分为日常巡检、定期维护、专项测试、状态检修四种类型,西藏高海拔、重载、低散热工况设备缩短运维周期,常规海拔轻载室内设备适当延长周期,提高运维效率和经济性。

4.2 建立全维度状态监测与预防性运维体系

新增在线监测功能要求,在线监测装置配置动作特性在线监测装置、触头磨损监测传感器、电力电子模块温度监测模块、SF6 气体泄漏及微水检测装置,对高海拔工况另外添加核心部件温升、散热效率、大气压力监测模块,实时采集设备运行参数,创建结合常规工况和高海拔工况的状态评价模型,达成设备健康状况量化评判。将预防性试验列入规程的主要内容,规定每年做一次全面的动作特性测试,每季度做一次接触电阻、绝缘性能的复测,每月对控制回路和机构进行检查;高海拔工况还要做月度温升监测、散热系统巡检,提前发现可能存在的

故障隐患,变事后抢修为事前预防。同步建立并联监测系统和换流阀冷却系统,对两者换热需求进行实时匹配,从而提高整个冷却的运维效率。

5 结论

高压直流断路器是直流输电系统的核心保护设备,动作特性测试精准度与现场运维规范性,直接影响系统运行安全。本文通过梳理高压直流断路器动作特性核心测试项目与技术标准,剖析现有运维规程的短板与现场实操问题,从规程框架优化、预防性运维构建、故障处置规范、人员培训、备件管理、安全管控六个维度,完善了高压直流断路器现场运维规程,形成了测试标准化、运维精细化、管理规范化的完整体系。该体系贴合工程实操需求,解决了现有规程针对性不足、运维模式滞后、故障处置不规范等问题,有效提升设备运行可靠性与运维效率,具备较强的推广应用价值。随着高压直流断路器技术持续迭代,更高电压等级、更大开断容量的设备将逐步投入应用,后续需进一步优化超高速动作特性测试方法,完善智能化运维、远程故障诊断相关规程内容,适配新型直流电网的发展需求,推动高压直流输电运维技术持续升级。

参考文献:

- [1] 王加明,许壮,张科乾,等.基于相模变换的高压直流断路器动作电压行波分析[J].河南科技,2025,52(15):9-13.
- [2] 曹夏雨.高压直流断路器的多端口化系列构造技术研究[D].华北电力大学(北京),2025.
- [3] 吴伯祥.具有重合闸功能的超导限流式高压直流断路器拓扑研究[D].兰州交通大学,2023.
- [4] 焦越敏.具有重合闸功能的限流型高压直流断路器[D].兰州交通大学,2023.
- [5] 孙瑞.基于限流型多端口混合式高压直流断路器拓扑设计与研究[D].兰州交通大学,2022.