高压断路器机械故障原因分析与检修对策探讨

高雪峰　王存虎　张兆斌

国网新疆电力有限公司哈密供电公司　新疆　哈密　839000

摘　要：高压断路器是电力系统中承担控制与保护职能的关键设备，其机械系统的可靠性直接决定着开断与关合操作的成败。本文以高压断路器机械故障为研究对象，从操作机构、传动系统、缓冲装置及辅助部件等维度系统分析常见机械故障的表现形式与深层诱因，揭示机械磨损、材料疲劳、环境侵蚀及维护失当等因素对机构可靠性的影响机制。在此基础上，从状态监测与诊断、预防性维护策略、检修工艺规范和部件寿命管理等方面提出针对性的检修对策。研究指出，机械故障的防治应当从被动的事后修理转向主动的状态预判，建立以可靠性为中心的检修管理体系。

关键词：高压断路器；机械故障；操作机构；故障诊断；检修对策

引言

高压断路器是电力系统中唯一兼具正常投切和故障切除双重功能的开关设备，其运行可靠性直接关系到电网的安全稳定。统计资料表明，高压断路器的大部分非计划停运事件源于机械系统的故障，而非电气绝缘问题。操作机构拒动、误动、动作时间超差、速度不足、缓冲器失效等机械类缺陷，不仅可能造成断路器本体损坏，更可能引发越级跳闸、系统失稳等连锁事故。因此，深入认识高压断路器机械故障的发生规律与内在机理，对于制定科学的检修策略、提升设备运行可靠性具有重要的现实意义。高压断路器的机械系统由操作机构、传动连杆、绝缘拉杆、缓冲装置及辅助触点等多部件构成，其动作过程涉及能量转换、机械传动、运动缓冲等多个环节，任何一个环节出现问题都可能导致整体操作失败。近年来，随着断路器运行年限的增长和操作次数的累积，机械系统的老化与劣化问题日益突出。同时，新材料、新机构在新型断路器中的应用也对检修工作提出了新的技术要求。在此背景下，本文将从故障原因的系统分析入手，结合当前检修技术的发展，探讨切实可行的预防与治理对策。

1 高压断路器机械系统的构成与工作原理

1.1 操作机构的类型与动力传递路径

高压断路器的操作机构是驱动触头分合的核心动力源。结合现有设备情况，断路器操作机构主要有弹簧操作机构和液压操作机构两类。弹簧机构利用弹簧储能后瞬时释放驱动主轴转动，结构简单且不受电源波动影响，在中压和部分高压断路器中广泛应用。液压机构依靠高压油推动活塞做功，输出功率大、动作平稳，适用于超高压等级断路器[1]。不论何种机构，其动力传递路径均可概括为“储能—触发—运动传递—触头动作”四个环节。每个环节的机械配合精度与零部件状态都直接影响最终的动作效果。

1.2 机械传动与缓冲系统的作用

传动系统将操作机构输出的力矩或推力传递至灭弧室动触头，通常由拐臂、连杆、轴销、绝缘拉杆等部件组成。传动系统不仅承担力的传递功能，还需保证运动的方向、行程和速度满足灭弧要求。缓冲系统则安装在运动行程的末端，其作用是吸收剩余动能，避免运动部件在终点发生剧烈撞击。缓冲器的性能直接影响断路器的分合闸过冲和反弹幅值，对灭弧性能和使用寿命均有重要影响。传动与缓冲系统的设计参数一旦因磨损或松动发生变化，将直接改变断路器的机械特性。

2 高压断路器机械故障的主要类型与成因分析

2.1 操作机构的典型故障及诱因

操作机构是机械故障的高发区域。弹簧机构常见的故障包括储能弹簧疲劳断裂、合闸弹簧拉伸量变化导致输出能量不足、凸轮和滚子磨损引起扣接深度变化等。储能电机及其减速齿轮的故障（如电机烧毁、齿轮断齿）也是导致弹簧无法正常储能的常见原因。液压机构的故障多集中在高压油路密封件老化渗漏、控制阀卡涩、油泵建压异常以及油质劣化导致的粘度变化和杂质堵塞。气动机构的故障则包括空压机故障、管路漏气、压力开关失灵等。这些诱因的共性在于：机械零部件在长期交变应力作用下发生材料疲劳、磨损或变形，同时环境中的水分、粉尘和温度变化加速了这一过程。

2.2 传动部件的磨损与变形故障

传动连杆、拐臂、轴销等部件在长期操作中承受反复的冲击载荷，容易产生轴销磨损、关节间隙增大、连杆弯曲变形等问题。轴销与轴套之间的配合间隙增大会导致运动传递的行程损失，使动触头最终位移不足，影响开断时触头的压紧力和分离速度。绝缘拉杆作为连接机构侧与灭弧室侧的绝缘传动件，在长期拉伸和压缩循环中可能产生疲劳裂纹，严重时发生运行中断裂事故[2]。传动部件故障的隐蔽性较强，在例行检修中若不对关键配合尺寸进行逐一测量，很容易被遗漏。

2.3 缓冲装置失效及其连锁影响

缓冲器故障是极易被忽视却又后果严重的机械问题。液压缓冲器密封圈老化导致缓冲油泄漏，活塞运动时无法建立足够的阻尼力，动触头在运动末端将直接撞击壳体，造成巨大冲击和反弹。冲击能量不仅可能损坏灭弧室内部的触头支撑结构，还会通过传动链反传至机构，加速其他部件的磨损。缓冲失效的直接表现是分合闸速度曲线尾部出现剧烈振荡，整定时间缩短或延长。实际运行中，缓冲器的劣化往往是渐进性的，初期仅表现为轻微渗油或缓冲效果下降，若不及时处理，将逐步演变为严重故障。

2.4 辅助部件及环境因素的诱发作用

除核心机械部件外，辅助部件和环境因素也在机械故障的发生中扮演重要角色。分合闸线圈作为触发操作机构的电气指令元件，其铁芯卡涩、线圈烧毁或绝缘不良将直接导致断路器拒动。行程开关、辅助触点等信号元件的接触不良或位置偏移，可能向控制系统传递错误的状态信号，引发误动或信号异常。环境方面，凝露引起的金属部件锈蚀、低温导致的润滑油粘度剧增、粉尘侵入造成的滑动面研磨，都是机械故障的常见外部诱因。这些因素的复杂交互使得机械故障的原因往往不是单一的，而是一果多因或互为因果。

3 机械故障的诊断与检测方法

3.1 机械特性参数测试与分析

机械特性参数是判断断路器机械状态最直接的定量依据，主要包括分闸时间、合闸时间、分合闸不同期性、刚分速度、刚合速度、行程、超程以及弹跳时间等。这些参数的精确测量依赖于在断路器操作过程中同步采集动触头或传动杆的位移—时间曲线。将实测特性参数与出厂值、交接值和历次检修记录进行纵向对比，能够有效识别机构的异常变化趋势。例如，分闸时间的持续延长可能提示脱扣机构磨损或操作电压偏低，超程的逐渐缩小则表明触头电磨损已达到相当程度。机械特性测试应当作为检修中的必做项目，其数据是状态评价的核心依据。

3.2 分合闸线圈电流波形诊断

分合闸线圈的电流波形中蕴含丰富的机构状态信息。线圈电流从通电到铁芯动作直至行程结束，其波形可分为铁芯吸合启动、运动过程和保持阶段，电流曲线上的拐点时刻与铁芯运动的关键节点精确对应。通过对线圈电流波形特征参数的分析——如触动时间、运动时间和峰值电流——可以间接判断铁芯是否卡涩、线圈电阻是否正常、脱扣机构的解锁阻力是否变化。这种诊断方法不需额外安装传感器，利用现有操作回路即可实现，是一种经济有效的辅助诊断手段。

3.3 振动信号分析与机械状态评估

断路器操作过程中，各机械部件在不同时刻的撞击和摩擦会产生一系列的振动事件，这些事件在时域波形上呈现为具有特定时间间隔和幅值分布的脉冲序列。通过加速度传感器获取操作过程中的振动信号，经过滤波、包络分析等处理，可以提取与各动作环节对应的特征指纹[3]。当某一部件状态发生变化（如缓冲器阻尼减弱、轴销磨损间隙增大），其对应的振动事件波形会发生可辨识的改变。振动分析法具有非侵入式、可现场带电检测的优点，尤其适合作为在线监测和巡检手段，但对于信号的准确解读需要建立充分的基准数据库。

4 检修对策与预防措施

4.1 建立分级检修与状态评估结合的维护体系

传统的定期大修将断路器完全解体、更换易损件后重新装配，虽然彻底但对设备本身也是一种人为扰动，操作不当反而可能引入新的隐患。基于运行经验和状态检测数据的分级检修策略更为科学：根据设备投运年限、操作次数、开断电流累积值以及最近的检测数据，将断路器划分为不同检修等级，分别执行不同深度和范围的检修工作。对于状态良好的设备，以检查调整为主；对于参数偏离但仍在可接受范围内的设备，进行专项处理；对于状态劣化明显的设备，安排彻底解体检修。分级检修的基础是对状态信息的准确掌握，因此必须将状态评估嵌入日常运维流程。

4.2 关键零部件的寿命评估与周期性更换

对机械系统中具有有限寿命的零部件实施主动更换，是预防故障的有效手段。储能弹簧在数十万次操作后会出现应力松弛和疲劳损伤，其弹力衰减至临界值后应予以更换。液压机构中的各类密封圈在运行数年后必然出现老化变硬，应按照制造厂推荐的使用年限定期更

换。分合闸线圈中的电磁铁行程开关等电气—机械转换元件也应按操作次数寿命进行预防性更换。需要强调的是，零部件更换不应仅依据运行时间，还应结合实际操作频度和检测数据，在接近寿命极限但尚未失效时安排计划性更换，既避免过早浪费又防止过晚失效。

4.3 检修工艺质量控制与验收标准

检修质量的优劣在很大程度上取决于工艺过程控制的严格程度。在检修操作层面，应针对不同型号的断路器制定标准化的检修作业指导书，明确每个拆装工序的操作要点、使用的工器具、紧固力矩值和检测验收标准。特别需要关注的是机构调整中的微小参数——如脱扣器的扣接量、辅助开关的切换点、缓冲器的活塞初始位置等，这些参数的设置误差若超过允许范围，即使使用了全新的零部件，断路器也无法达到正常的动作特性[4]。检修完成后必须按照规程进行全面的机械特性测试和操作试验，以实测数据作为质量验收的最终依据。

4.4 运行维护中的预防性措施

在日常运行维护中，不少机械故障可以通过细致的外观检查和简单的保养工作得以避免。定期检查操作机构箱的密封性能，防止潮气和灰尘侵入；按照润滑规程对轴销、齿轮、滑动面进行适时的清洁和加注润滑剂，但需注意润滑剂的选择和用量，过量可能吸附粉尘加速磨损；定期检查各外露紧固件的防松标记是否错位，及时发现松动趋势。对于长期处于备用状态的断路器，应安排周期性的空载操作，使机构保持活动并检验其动作可靠性。这些看似基础的维护工作，对于减缓机械系统的劣化速度具有不可替代的价值。

5 检修管理模式的创新方向

5.1 以可靠性为中心的检修理念

以可靠性为中心的检修（RCM）是现代设备管理的重要理念，其核心是根据设备功能、故障模式及其后果来制定检修策略，而不是追求面面俱到的大拆大修。对于高压断路器机械系统而言，RCM 的应用意味着需要针对不同的故障模式（如弹簧疲劳、密封老化、轴销磨损）分别评估其故障率、可检测性和后果严重性，然后确定最优的检修方式——是视情检修、定期更换还是事后修理。RCM 理念的引入有助于将检修资源集中配置在对设备可靠性影响最大的环节，避免在低效检修上浪费人力物力。

5.2 数据驱动的状态预测与精准检修

随着智能传感器和数据处理技术的普及，高压断路器的机械状态信息正在从“年度抽检”向“实时在线监测”演进。在机构关键部位加装位移传感器、加速度传感器、压力传感器等，可以持续记录每次操作的特征数据，积累形成反映设备老化轨迹的大数据。基于这些数据，可以建立机械状态的趋势预测模型，在特征参数缓慢变化的过程中识别出加速劣化的拐点，实现故障的提前预警。数据驱动的精准检修模式将从根本上改变“固定周期、统一标准”的粗放管理方式，使检修决策更加贴合每台设备的个性化状态。

结束语

高压断路器机械故障的原因涉及机构设计、材料特性、运行工况、维护质量和环境条件等多方面因素。本文从操作机构、传动系统、缓冲装置及辅助部件等维度系统归纳了常见故障的表现与诱因，并就检测诊断方法、检修策略和工艺控制提出了针对性对策。机械故障防治的关键在于树立“预防重于治理”的理念，将检修工作的重心从事后修理前移至状态监测和趋势预判。在具体实践中，应充分利用机械特性参数、线圈电流波形和振动信号等多源信息进行综合诊断，并辅以零部件寿命管理和工艺质量管控，构建以可靠性为中心的检修体系。唯有如此，才能有效遏制机械故障的发生频率，保障高压断路器长期安全可靠运行。

参考文献

[1] 刘卫东, 关永刚, 黄瑜珑. 高压断路器机械状态在线监测技术研究 [J]. 高压电器,2022,58(8):1-8.

[2] 钱家骊, 张节容, 徐国政. 高压开关操作机构可靠性分析与寿命评估 [J]. 中国电机工程学报,2021,41(19):6711-6720.

[3] 王承玉, 赵志刚, 刘兆林. 断路器机械特性参数诊断方法研究 [J]. 电网技术,2022,46(11):4321-4330.

[4] 林莘, 徐建源, 董恩源. 高压断路器弹簧操作机构动力学仿真与故障诊断 [J]. 高电压技术,2021,47(6):1978-1987.