

Research on Common Fault Diagnosis and Maintenance Strategies for High Voltage Circuit Breakers

Lingqin Meng

Xilin Gol Ultra-High Voltage Power Supply Company, Xilin Gol, Inner Mongolia, 026000, China

Abstract

As core switching equipment in power systems, high-voltage circuit breakers play a critical role in controlling circuit operations and fault clearance. Their operational reliability directly determines the safety, stability, and power supply quality of electrical systems. This study focuses on common fault diagnosis and maintenance strategies for high-voltage circuit breakers, integrating practical equipment operation experience with fault theory. We systematically analyze typical fault types and causes affecting breaker mechanical structures, operating mechanisms, insulation systems, and arc extinguishing systems. A comprehensive process framework encompassing “fault identification, diagnostic localization, maintenance optimization, and preventive maintenance” has been established. Scientific fault diagnosis techniques and standardized maintenance protocols can significantly reduce breaker failure rates, extend equipment lifespan, and enhance power system operational stability. The research findings provide technical references for power operation personnel, contributing to improved maintenance management standards in electrical systems.

Keywords

high-voltage circuit breaker; fault diagnosis; maintenance strategy; power system; operation and maintenance management

高压断路器常见故障诊断与维修策略研究

孟令钦

锡林郭勒超高压供电公司, 中国 · 内蒙古 锡林郭勒 026000

摘 要

高压断路器作为电力系统中的核心开关设备, 承担着控制电路通断与故障切除的关键职能, 其运行可靠性直接决定电力系统的安全稳定与供电质量。本文以高压断路器常见故障诊断与维修策略为研究对象, 结合电力设备运维实践与故障理论, 系统分析断路器机械结构、操动机构、绝缘系统及灭弧系统的常见故障类型与成因, 构建“故障识别-诊断定位-维修优化-预防维护”的全流程处理体系, 科学的故障诊断技术与规范化维修策略可显著降低断路器故障发生率, 延长设备使用寿命, 提升电力系统运行稳定性。本文研究成果可为电力运维人员提供技术参考, 助力电力系统运维管理水平的提升。

关键词

高压断路器; 故障诊断; 维修策略; 电力系统; 运维管理

1 引言

当前, 电力系统对供电可靠性的要求不断提升, 传统的“事后维修”模式已难以满足现代电网运维需求, 亟需建立科学高效的故障诊断体系与预防性维修策略。然而, 高压断路器结构复杂, 涉及机械、电气、液压等多个系统, 故障成因具有隐蔽性、多样性与关联性特点, 给故障诊断与维修带来较大挑战。部分运维单位因诊断技术落后、维修流程不规范, 导致故障定位不准确、维修效果不佳, 甚至引发二次故障。因此, 开展高压断路器常见故障诊断与维修策略研究, 对提升设备运维水平、保障电力系统安全稳定运行具有重要现实意义。

2 高压断路器结构组成与故障分类

2.1 基本结构组成

高压断路器主要由导电回路、灭弧系统、操动机构、绝缘系统及机械传动系统五部分组成。导电回路负责承载额定电流, 包括触头、导电杆、接线端子等部件; 灭弧系统用于故障时快速熄灭电弧, 根据灭弧介质可分为油断路器、SF6 断路器、真空断路器等类型; 操动机构是断路器动作的动力来源, 常见类型有弹簧操动机构、液压操动机构、电磁操动机构; 绝缘系统分为内绝缘与外绝缘, 保障设备对地及相间绝缘; 机械传动系统负责传递操动机构的动力, 实现触头的分合闸动作。各系统协同工作, 确保断路器在正常与故障状态下均能可靠运行。

【作者简介】孟令钦(1996-), 男, 中国内蒙古赤峰人,

本科, 工程师, 从事变电检修研究。

2.2 故障分类与成因分析

2.2.1 机械故障

机械故障主要发生在操动机构与机械传动系统,成因包括零部件磨损、变形、卡滞、润滑不良等。例如,弹簧操动机构常出现弹簧疲劳断裂、合闸电磁铁卡滞故障,多由长期动作导致弹簧弹性下降、电磁铁铁芯积污引起;液压操动机构易出现油压异常、泄漏故障,主要因密封件老化、液压油劣化、油泵故障造成。

2.2.2 电气故障

电气故障主要涉及导电回路与控制回路,常见类型有触头过热、接触电阻增大、控制回路断线等。触头过热故障多由触头表面氧化、接触压力不足、触头磨损严重导致,长期通过大电流时易引发温度异常升高;控制回路断线故障则可能因导线老化、接线端子松动、继电器故障造成,导致断路器无法正常分合闸。

2.2.3 绝缘故障

绝缘故障主要表现为绝缘水平下降、局部放电等,成因包括绝缘件老化、受潮、污秽、过电压作用等。户外断路器外绝缘易因大气污秽积累出现闪络故障,尤其在潮湿环境下,污秽层导电导致绝缘强度降低;内绝缘故障多由绝缘油劣化、SF₆气体泄漏或水分超标引起,如SF₆断路器气体泄漏会导致绝缘性能下降,严重时引发内部放电。

2.2.4 灭弧系统故障

灭弧系统故障直接影响断路器故障切除能力,常见类型有灭弧室损坏、灭弧介质泄漏、电弧熄灭延迟等。真空断路器灭弧室真空度下降会导致灭弧能力丧失,多由密封件老化、外壳破裂引起;SF₆断路器灭弧室气体压力不足会导致电弧熄灭困难,主要因气体泄漏或补气装置故障造成。

3 高压断路器常见故障诊断技术与应用

3.1 传统故障诊断技术

传统诊断技术基于电气试验与外观检查,具有操作简便、成本低的特点,适用于常规故障排查。外观检查通过肉眼观察断路器外观、零部件状态及连接部位,可快速发现明显故障,如零部件变形、泄漏、导线松动等;绝缘电阻测试通过测量绝缘件的绝缘电阻值,判断绝缘性能是否下降,若测试值低于标准值,说明存在绝缘受潮、老化等问题;直流电阻测试用于检测导电回路接触电阻,接触电阻增大时会导致导电回路发热,测试值超标可初步判断触头接触不良或导电杆松动故障^[1]。

3.2 现代化故障诊断技术

3.2.1 红外热成像检测技术

通过检测断路器各部位温度分布,识别过热故障。该技术具有非接触、实时检测的特点,可快速定位导电回路、接线端子等部位的温度异常点。例如,某220kV变电站断路器接线端子因接触不良出现过热,红外热成像检测显示该

部位温度达135℃,形成明显高温热点,运维人员及时处理避免了故障扩大。实际应用中,需结合环境温度、负荷电流等因素进行综合分析,避免误判。

3.2.2 振动分析技术

适用于机械故障诊断,通过采集断路器操动机构动作时的振动信号,分析信号频率、幅值等特征,判断机械部件的运行状态。弹簧操动机构出现弹簧疲劳、连杆松动时,振动信号的频率特征会发生显著变化;液压操动机构油压异常时,振动幅值会偏离正常范围。某35kV断路器合闸时振动异常,通过振动分析仪采集信号,发现200-300Hz频段幅值比正常状态高50%,拆解检查发现合闸缓冲器磨损,更换缓冲器后振动恢复正常。

3.2.3 油中溶解气体分析技术

主要用于油浸式断路器故障诊断,通过检测绝缘油中溶解的氢气、甲烷、乙炔等特征气体的含量与比值,判断故障类型与严重程度。不同故障类型对应特定的气体产生规律,如电弧放电故障会产生大量乙炔与氢气,过热故障会产生甲烷与乙炔。某110kV油浸式断路器油中溶解气体检测显示,乙炔含量达150μL/L,远超标准限值(≤5μL/L),判断存在电弧放电故障,经检查发现触头烧损,及时维修避免了绝缘击穿。

3.2.4 局部放电检测技术

用于识别绝缘故障,通过检测断路器内部局部放电产生的电信号、超声信号或电磁信号,判断绝缘缺陷位置与严重程度。常用方法包括超声波检测法与特高频检测法,超声波检测法可定位局部放电点,特高频检测法灵敏度高,适用于早期绝缘缺陷识别。某500kV SF₆断路器局部放电检测中,超声波传感器检测到异常信号,结合特高频检测定位缺陷位置为灭弧室绝缘拉杆,拆解发现拉杆表面存在污秽,清洁处理后局部放电信号消失。

3.3 诊断技术融合应用

单一诊断技术存在局限性,实际运维中需结合多种技术实现优势互补,提升故障诊断准确性。以某220kV SF₆断路器故障诊断为例,设备出现分合闸时间延长故障,首先通过控制回路电气试验排除控制回路故障;采用振动分析技术采集操动机构振动信号,发现液压操动机构动作时振动频率异常;结合油压监测数据,发现油压上升速度缓慢;进一步通过红外热成像检测,发现油泵电机温度过高。综合分析判断故障为油泵电机老化导致供油不足,更换电机后故障排除。多技术融合应用可避免单一技术的误判,实现故障的精准定位。

4 高压断路器针对性维修策略

4.1 机械故障维修策略

机械故障维修核心在于恢复零部件功能与配合精度,需根据故障类型采取对应措施。对于弹簧操动机构弹簧疲劳

断裂故障,需更换同型号弹簧,更换后进行弹簧预紧力测试,确保符合技术标准;电磁铁卡滞故障需拆解电磁铁,清除铁芯表面积污与锈蚀,涂抹专用润滑剂,检查线圈绝缘状态,确保动作灵活。液压操动机构密封件泄漏故障,需更换老化密封件,更换前检查密封面光洁度,避免安装杂质;油压异常故障需检查油泵、溢流阀等部件,油泵老化需及时更换,溢流阀卡滞需拆解清洗。

4.2 电气故障维修策略

电气故障维修需重点保障导电回路通畅与控制回路可靠,针对不同故障类型采取相应措施。触头过热故障维修时,需拆解触头部位,打磨触头表面氧化层,若触头磨损严重需更换触头,调整触头接触压力,确保接触电阻符合标准;接线端子松动故障需重新紧固端子,采用力矩扳手控制紧固力矩,避免过松或过紧。控制回路断线故障需排查断线位置,更换老化导线,紧固松动接线端子,检查继电器、接触器等元件触点状态,必要时进行更换。

4.3 绝缘故障维修策略

绝缘故障维修核心在于恢复设备绝缘性能,需根据绝缘缺陷类型采取针对性措施。外绝缘污秽闪络故障需对绝缘子进行清洁处理,采用高压水冲洗或机械擦拭方式去除表面污秽,必要时涂刷防污闪涂料,提升绝缘表面耐污性能;绝缘件受潮故障需进行干燥处理,油浸式断路器可通过真空滤油机干燥绝缘油,SF₆断路器需更换受潮气体并对设备内部进行干燥。内部绝缘老化故障需更换老化绝缘件,如绝缘纸、绝缘拉杆等,更换后进行绝缘试验,确保绝缘强度达标。

4.4 灭弧系统故障维修策略

灭弧系统故障维修需保障设备灭弧能力,针对不同灭弧介质类型采取对应措施。真空断路器灭弧室真空度下降故障,需直接更换灭弧室,更换后进行真空度检测与耐压试验,确保灭弧室性能可靠;SF₆断路器灭弧室气体泄漏故障,需先定位泄漏点,更换密封件或损坏部件,重新注入SF₆气体并进行密封性试验,确保气体压力稳定。灭弧室内部部件烧损故障需更换灭弧室,检查动、静触头状态,必要时同步更换触头^[2]。

5 高压断路器全生命周期维护体系构建

5.1 预防性维护策略

预防性维护是降低故障发生率的关键,需结合设备运行状态与环境条件制定定期维护计划。定期巡检方面,每周进行一次外观检查,每月进行一次运行参数检测,包括电流、电压、温度等;每半年进行一次绝缘电阻测试、控制回路通断试验等常规试验;每年进行一次全面检测,结合红外热成像、振动分析等技术进行深度诊断。环境适应性维护方面,户外设备需做好防污、防潮、防凝露措施,高温季节加强散热检查,低温季节做好防冻处理,避免环境因素导致故障。

5.2 状态检修优化

状态检修基于设备运行状态数据,通过分析诊断结果调整维护计划,实现“按需维护”。建立设备状态监测数据库,实时采集设备运行参数、检测数据与故障记录,采用大数据分析技术评估设备健康状态,划分健康等级(良好、一般、预警、故障)。针对不同健康等级制定差异化检修策略:健康状态良好的设备延长维护周期;状态一般的设备增加检测频次;状态预警的设备进行针对性预防性维修;故障状态的设备立即停机检修^[3]。

5.3 运维管理规范

建立规范化运维管理制度,明确运维人员职责与操作流程,定期开展技术培训,提升运维人员专业能力。制定故障诊断与维修操作规范,统一诊断方法、维修流程与质量标准,确保维修作业标准化;建立设备全生命周期档案,记录设备采购、安装、调试、运行、检测、维修等全过程信息,为维护计划制定提供数据支撑。加强备品备件管理,储备常用零部件如密封件、触头、线圈等,确保故障发生时能快速更换。

5.4 智能化运维技术应用

随着智能电网发展,智能化技术为高压断路器运维提供新方向。引入物联网技术,在断路器上安装温度传感器、振动传感器、气体传感器等监测设备,实现运行状态实时监测与数据远程传输;采用人工智能算法对监测数据进行分析,实现故障早期预警与智能诊断,提升故障识别效率;构建数字化运维平台,整合设备状态数据、维修记录等信息,实现维护计划自动生成与运维过程可视化管理。

6 结论

高压断路器故障类型主要包括机械故障、电气故障、绝缘故障与灭弧系统故障,其成因与设备结构、运行环境、运维管理等因素密切相关;传统诊断技术与现代化检测技术的融合应用,可实现故障的精准识别与定位,其中红外热成像、振动分析、油中溶解气体分析等技术在实操中表现出良好效果;针对不同故障类型制定的针对性维修策略,可有效恢复设备功能,保障运行可靠性;构建“预防性维护-状态检修-智能化运维”的全生命周期维护体系,能显著降低故障发生率,提升电力系统运维管理水平。

参考文献

- [1] 夏瑞泽.变电检修中高压SF₆断路器常见故障分析[C]//中国智慧工程研究会.2024工程技术与施工管理交流论文集(上).国网随州供电公司,2024:17-19.
- [2] 叶罕罕.变电检修中高压SF₆断路器常见故障分析[J].家电维修,2024,(09):89-91.
- [3] 马俊岭,何亚东,薛志刚.高压断路器的状态监测和故障诊断[J].电力设备管理,2024,(16):62-64.