

Cause analysis and maintenance measures of power system substation switchgear failure

JianGuo Han

Baotou Power Supply Company, Inner Mongolia, Baotou, 014000, China

Abstract

With the expansion of power systems and voltage upgrades, substation switchgear—serving as core control and protection devices in grid operations—directly impacts power supply safety and economic efficiency. However, frequent equipment failures caused by mechanical wear, insulation degradation, environmental erosion, and improper maintenance have led to unplanned outages and large-scale blackouts. Statistics indicate that over 30% of China's substation equipment failures involve switchgear, with mechanical and insulation issues being predominant. Traditional periodic maintenance models suffer from over-maintenance or missed inspections, failing to meet smart grid requirements for precise condition monitoring. This paper first outlines substation switchgear fundamentals, then analyzes fault causes through multiple perspectives, followed by detailed diagnostic methodologies, and concludes with comprehensive maintenance strategies. The findings aim to provide valuable references for related research.

Keywords

Power system; Substation switchgear; Fault analysis; Maintenance measures

电力系统变电开关设备的故障成因分析与检修措施

韩建国

包头供电公司, 中国·内蒙古 包头 014000

摘要

随着电力系统规模扩大与电压等级提升, 变电开关设备作为电网运行的核心控制与保护装置, 其可靠性直接影响供电安全与经济性。然而, 受机械磨损、绝缘老化、环境侵蚀及运维不当等因素影响, 开关设备故障频发, 导致非计划停运与大面积停电事故。据统计, 我国变电设备故障中, 开关类设备占比超过30%, 其中机械故障与绝缘故障为主要类型。传统定期检修模式存在过度检修或漏检问题, 难以适应智能电网对设备状态精准感知的需求。本文先是简要阐述了变电开关设备的相关内容, 随后从多方面详细分析了变电开关设备故障成因, 紧接着具体阐述了故障诊断方法, 最后从多角度具体提出了常见故障检修措施, 以期为相关研究提供有益参考与借鉴。

关键词

电力系统; 变电开关设备; 故障成因分析; 检修措施

1 引言

变电开关设备(如断路器、隔离开关)作为电力系统“控制-保护”链的核心环节, 其可靠性直接关系到电网抗风险能力。然而, 随着设备老龄化加剧与运行环境复杂化, 开关故障呈现高频化、多样化特征, 如2021年某省电网因断路器操作机构卡涩引发3起220kV变电站全停事故, 造成超千万元直接经济损失。传统检修模式依赖定期试验与人工巡检, 存在“过度修”与“漏修”的矛盾, 难以满足智能电网对设备状态实时感知的需求。本文聚焦变电开关设备故障机理, 通过案例统计与实验数据分析成因, 提出基于多源信息融合的故障诊断方法, 构建“预防-监测-修复”一体化

检修体系, 旨在延长设备寿命、降低运维成本, 为构建“韧性电网”提供理论支撑。

2 变电开关设备概述

变电开关设备是电力系统实现电路通断、隔离及保护的核心装置, 主要有高压断路器、隔离开关、GIS等类型。高压断路器是电网“控制与保护枢纽”, 能切断正常与故障电流; 隔离开关用于无负荷电路隔离, 为检修提供安全环境; GIS将元件密封, 有占地小等优势, 三类设备协同保障电网稳定。以真空断路器为例, 其由导电回路等四部分组成, 工作原理是“储能-释放-灭弧”闭环过程。该设备故障主要分机械、电气、过热三类, 机械故障占比高, 电气故障以绝缘故障为主, 过热故障多由接触不良等引发, 这些故障若未及时处理会引发严重事故, 需通过状态监测与精准检修实现风险预控。

【作者简介】韩建国(1993-), 男, 中国内蒙古包头人, 本科, 工程师, 从事土木工程研究。

3 变电开关设备故障成因分析

3.1 机械故障成因

机械故障作为变电开关设备最普遍的失效形式，其根源在于操作机构磨损、弹簧疲劳、润滑缺失及外部环境侵蚀的共同作用。以断路器为例，其操作机构中的齿轮、连杆等部件在长期频繁的分合闸动作中，会因金属间的持续摩擦逐渐磨损，导致传动精度降低，严重时甚至引发卡涩或拒动等故障；弹簧作为储能与释放能量的核心元件，其弹性系数会随使用次数增加而衰减，若未及时更换，会导致分闸速度不足，无法在电流过零时有效熄灭电弧，危及设备安全。此外，润滑不足会加剧机械部件的干摩擦，产生金属碎屑并进一步恶化磨损；而外部振动（如邻近设备运行或外力冲击）可能造成螺栓松动、触头位移，盐雾、潮湿等腐蚀性环境则会破坏金属表面防护涂层，引发锈蚀并降低结构强度^[1]。例如，某沿海变电站的隔离开关因长期受盐雾侵蚀，操作机构连杆断裂，最终导致设备拒动，引发区域性停电事故。

3.2 电气故障成因

电气故障是变电开关设备安全运行的重大威胁，其核心成因在于绝缘系统劣化与电弧能量的双重冲击。绝缘老化是首要诱因，在长期运行中，环氧树脂、SF₆气体等绝缘材料受电场、高温及机械应力持续作用，分子链逐渐断裂并产生局部放电等微观损伤，导致绝缘性能显著衰减。例如，GIS设备中若SF₆气体含水量超标（>150 μL/L），电弧产生的高温会促使其分解生成HF、SO₂等强腐蚀性物质，这些物质会侵蚀绝缘子表面，形成导电通道并引发树状放电，最终导致绝缘击穿。同时，雷击或操作过电压等突发冲击可能直接击穿绝缘薄弱点，造成设备短路^[2]。此外，触头接触不良会引发局部电流密度骤增，产生电弧烧蚀，烧毁触头表面镀层并形成凹凸不平的接触面，进一步增大接触电阻，形成“接触不良-电弧烧蚀-接触恶化”的恶性循环。某变电站断路器即因触头弹簧压力不足导致接触电阻增大，电弧反复烧蚀触头，最终引发绝缘子炸裂，设备彻底报废。

3.3 过热故障成因

过热故障是变电开关设备失效的重要诱因，其本质在于设备内部能量失衡—产生的热量无法有效散失，致使局部温度突破材料耐受极限。触头接触电阻增大是引发过热的核心因素，当接触面因氧化、污染或机械变形导致实际接触面积缩小时，接触电阻会呈指数级上升（例如铜触头氧化后接触电阻可激增10倍以上），依据焦耳定律（ $Q=I^2Rt$ ），大电流通过时将产生大量焦耳热，形成局部高温区。与此同时，散热不良会进一步加剧温度攀升，如GIS设备内部SF₆气体循环受阻，或断路器散热片因积尘堵塞而降低热传导效率，均会导致热量积聚。此外，过载运行会直接增加电流负荷，使PR损耗成倍增长，某变电站曾因负荷突增，导致断路器触头温度飙升至300℃，绝缘材料在高温下碳化，最终引发相间短路，造成设备损毁。

3.4 其他因素

设计缺陷与制造工艺问题常为变电开关设备埋下先天隐患。比如，某型号断路器因触头结构设计不合理，电场分布失衡，局部场强远超绝缘材料耐受极限，引发频繁闪络；制造环节若焊接质量不达标，出现虚焊、气孔等缺陷，会大幅降低结构强度，在设备运行振动下易产生裂纹，威胁安全。此外，安装调试不当也不容忽视，隔离开关触头未精准对齐、螺栓紧固力矩不足，均会导致运行中接触电阻增大，加剧发热。而运行维护缺失，如未定期清扫绝缘子、检测SF₆气体压力等，会加速设备老化。某变电站GIS设备便因长期未检测微水含量，绝缘子内部放电，最终引发爆炸，造成严重损失。

3.5 案例分析

2022年，某220kV变电站一台SF₆断路器在分闸操作时突发爆炸，不仅自身损毁，还导致相邻间隔绝缘子击穿。经调查，事故是多重因素耦合的结果：机械方面，操作机构弹簧疲劳使分闸速度仅1.2m/s（远低于2.5m/s标准值），电弧未能及时熄灭而重燃；电气层面，SF₆气体微水含量高达300 μL/L，电弧分解产生的HF腐蚀绝缘子，形成导电通道；同时，触头因氧化导致接触电阻增至500 μΩ（正常<50 μΩ），大电流通过时产生高温，加速SF₆分解与绝缘子碳化；加之设备运行15年未大修，机构润滑油干涸、螺栓松动等问题积重难返。此事故警示，需通过全生命周期管理实现风险预控。

4 变电开关设备故障诊断方法

4.1 传统诊断方法

传统诊断方法因操作简便、成本低廉，在变电开关设备故障排查中起着基础性作用。外观检查是第一步，运维人员通过目视或借助简单工具，仔细查看设备外壳有无变形、是否渗漏油、部件有无松动脱落等情况，能迅速锁定一些明显的机械损伤或外部故障，为后续深入排查提供方向。机械特性试验聚焦于断路器等设备的操作机构，通过专业仪器检测分合闸时间、速度、同期性等关键参数，以此判断操作机构性能，像弹簧疲劳引发的分闸速度不足等问题就能被及时发现^[3]。绝缘电阻测试则利用兆欧表测量设备绝缘部分电阻值，若数值过低，往往意味着绝缘受潮、老化或存在局部缺陷，需进一步检修。

4.2 现代诊断技术

现代诊断技术凭借先进检测仪器与手段，可更精准地揪出变电开关设备潜在故障。红外热成像检测依托红外辐射原理，用红外热像仪捕捉设备表面温度分布，把不可见的红外辐射变成可见热图像。因触头接触不良、过载运行等故障常伴局部过热，此技术能迅速定位过热区域，提前察觉过热故障隐患。超声波局部放电检测借助超声波传感器，接收设备内部局部放电产生的超声波信号并转为电信号分析，局部

放电是绝缘故障早期信号，它可有效检测绝缘子内部气隙、沿面放电等故障，还抗电磁干扰。在线监测技术能实时获取设备运行参数，像 SF₆ 气体压力监测，安装装置持续监测压力变化，异常时报警，防止气体泄漏影响性能。

4.3 智能诊断技术

智能诊断技术融合大数据、人工智能等前沿科技，推动故障诊断向智能化、精准化迈进。基于大数据的故障预测模型，通过广泛收集设备的历史故障记录、实时运行参数以及环境因素等海量数据，运用数据挖掘与机器学习算法，深度剖析数据间的内在规律与关联，构建出精准的故障预测模型。此模型可提前预判设备可能出现的故障类型及时间，助力运维人员提前规划维护策略，实现预防性维护。而专家系统与人工智能算法的应用，将领域专家的宝贵知识与经验编码成知识库与推理机，模拟专家诊断流程，再结合神经网络、深度学习等算法，对复杂故障智能分析判断，大幅提升诊断准确性与效率，有效规避人为误判与漏判。

5 变电开关设备检修措施

5.1 预防性检修策略

预防性检修通过定期检查测试，力求提前察觉设备潜在问题，防止故障出现。定期检修是重要基石，像对断路器等设备开展机械特性试验，精准检测分合闸时间、速度、同期性等参数，以此保障操作机构性能稳定，避免弹簧疲劳、部件磨损引发分合闸异常；进行绝缘测试时，借助兆欧表测量绝缘电阻，评估绝缘状况，及时揪出绝缘受潮、老化等隐患。而带电检测与状态评估灵活且高效，运用红外热成像检测设备表面温度分布，能快速定位过热故障隐患^[4]；利用超声波局部放电检测捕捉内部放电信号，判断绝缘状态，实现对设备运行状态的实时精准评估，为科学制定检修决策提供有力依据。

5.2 故障后检修措施

当设备出现故障时，必须迅速实施针对性检修措施以恢复其正常运行。针对机械故障，检修人员要细致检查操作机构各部件的磨损状况，对弹簧、齿轮等磨损严重的部件及时更换，同时对操作机构进行精准调整，确保分合闸动作准确无误、可靠稳定。在电气故障修复中，若发现绝缘问题，需依据实际情况进行绝缘处理，如清理绝缘子表面污秽、修复绝缘损伤部位等；若触头出现烧蚀或损坏，则要立即更换，以此保证设备具备优良的电气接触性能，降低接触电阻，有效预防因过热而引发更严重的故障。

5.3 智能化检修技术

科技浪潮下，智能化检修技术在变电开关设备检修领

域愈发关键。机器人巡检与自动化检修设备的投入使用，让检修效率和安全性双双提升。巡检机器人配备多种传感器，能对设备展开全方位、高精度检查，自动识别缺陷与异常并迅速上传数据；自动化检修设备可实现部分常规检修操作的自动化，减少人工参与，降低劳动强度。与此同时，数字孪生技术大显身手，它构建起设备的虚拟模型，与实际设备运行数据实时映射交互，实现状态实时模拟预测。检修前，借助该模型模拟优化方案，提前排查潜在问题；检修时，实时监控设备状态，为检修人员精准操作提供指引，进而提高检修的质量与效率。

5.4 检修管理优化

检修管理优化对于保障检修工作高效有序开展起着至关重要的作用。一方面，建立设备全生命周期管理档案十分必要，它能够详细记录设备从设计、制造、安装，到运行、检修等各个环节的信息，如同为设备绘制了一幅完整的“成长图谱”，为后续进行设备状态评估、制定检修决策提供了全面且精准的数据支撑。另一方面，推行 RCM（以可靠性为中心的检修）模式意义重大。该模式综合考虑设备的重要性、故障模式以及故障后果等因素，制定出科学合理的检修策略，对检修周期和项目进行优化，既能确保设备可靠运行，又能有效降低检修成本，大幅提升检修资源的利用效率，实现检修效益的最大化。

6 结语

综上所述，本文聚焦变电开关设备故障问题，深入剖析机械、电气、过热等故障成因，以及设计、制造、运维等环节的隐患。通过对比传统、现代与智能诊断方法，针对性地提出预防性、故障后及智能化检修措施，并着重强调检修管理优化。研究证实，基于多源信息融合的故障诊断与“预防-监测-修复”一体化检修体系，能显著提升设备可靠性、降低运维成本，保障电网安全稳定运行。展望未来，智能电网发展下设备将更智能复杂，可融合物联网等前沿技术，深化故障机理研究，完善诊断模型，推动检修策略精准自适应，为构建“韧性电网”提供有力支撑。

参考文献

- [1] 胡海涛,刘情宏,伊力哈木·力提甫.电力系统变电开关设备的故障成因分析与检修措施[J].自动化应用,2024,65(S1):336-338.
- [2] 李宏亮.电厂变电所电气开关设备故障分析及对策探究[J].化工管理,2018,(32):209-210.
- [3] 卢贵有.变电开关设备故障成因及检修的分析[J].中国新技术新产品,2015,(23):94-95.
- [4] 周赞.变电开关设备故障成因及检修的分析[J].科技风,2012,(11):76.