

220 kV 高压电力电缆故障检测及原因探讨

罗诗铭

(广州南方电力技术工程有限公司, 广东 广州 510250)

摘 要 220 kV 高压电力电缆作为城市主网的重要输电通道, 其运行安全性直接关系到区域供电系统的稳定水平。由于敷设环境复杂、运行负荷高、结构层级多, 电缆在长期运行过程中易受到机械损伤、绝缘受潮、绝缘老化及设计与制造质量缺陷等多重因素影响, 逐步形成隐蔽性强、演化周期长的结构性故障。本文围绕 220 kV 高压电力电缆常见故障类型, 对其形成机理进行系统分析, 提出处理与防范措施, 旨在对提升电网运行可靠性有所裨益。

关键词 220 kV; 高压电力电缆; 故障检测

中图分类号: TM8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.018

0 引言

随着城市化进程不断加快, 用电负荷持续攀升, 220 kV 高压电力电缆在主网中的应用规模不断扩大, 其安全运行已成为保障城市电力系统稳定的重要基础。然而, 受地下敷设空间复杂、施工扰动频繁及运行环境湿热等因素影响, 高压电缆在服役周期内易逐步积累各类隐蔽性缺陷, 一旦发生击穿事故, 不仅检修难度大、停电范围广, 而且会对电网安全带来连锁性冲击。因此, 系统梳理 220 kV 高压电力电缆的故障类型、成因机理及检测方法, 并构建针对性的处理与防范路径, 对于提高运维精准性、降低运行风险具有重要的工程实践价值。

1 220 kV 高压电力电缆故障检测方法

1.1 电桥法

电桥法属于一种典型的定量型定位检测手段, 对隐蔽性较强、反射波形不明显的故障具有较高的识别精度^[1]。电力运维单位在开展电桥检测时, 通常由技术人员将同回路的一相故障电缆与一相非故障电缆进行短接, 并在电缆起始端接入单臂电桥装置, 通过连续调节桥臂电阻, 使电桥达到电气平衡状态。在此基础上, 依据两侧电阻比例关系, 结合线路原始长度参数, 即可反推出故障点到测量端之间的实际距离。该方法在 220 kV 电缆运行年限较长、局部老化现象明显的线路中的应用价值尤为突出。由于部分老化型故障在初期并不会形成明显的反射特征, 常规脉冲检测难以准确识别, 而电桥法可以通过电阻参数变化敏感捕捉线路内部异常区域, 提前锁定隐患位置, 避免绝缘缺陷进一步扩展。同时, 该方法操作流程相对规范, 对检

测人员的仪器配置要求较低, 适合在变电站日常巡视、定期状态检测以及突发停电事故初判中作为首选定量定位技术之一。

1.2 低压脉冲反射法

低压脉冲反射法是通过向故障相注入低压短脉冲信号, 借助电缆阻抗突变点产生的反射波特征来推算故障位置。运维人员在现场检测时, 通过专用脉冲发生器向线路发送低压脉冲, 当脉冲在传播过程中遇到开路、短路或低阻故障点时, 会形成明显的回波信号, 仪器系统根据发射与反射之间的时间差, 并结合电缆传播速度参数, 即可计算出故障点距离。该方法在 220 kV 电缆开路故障、低阻击穿故障中的适应性极强, 能够在无需完全掌握线路全长信息的情况下完成定位计算, 适用于城市地下复杂敷设环境^[2]。由于大量 220 kV 电缆线路穿越管廊、隧道和多层地下空间, 线路图纸不完善或路径变更频繁的情况较为普遍, 低压脉冲反射法的无路径依赖特性, 使其成为运维单位进行应急抢修定位时的重要技术支撑。

1.3 脉冲电流法

脉冲电流法主要针对高阻击穿类和闪络性故障, 通常由高压发生器对故障点进行受控击穿, 击穿瞬间会在电缆中形成明显的行波电流信号。检测系统通过高速采集设备记录电流波形在电缆两端的往返时间, 并依据传播速度模型推算故障点具体位置。由于击穿瞬间的电流行波具有强烈的时间特征, 因此该方法对高阻、间歇性闪络故障的识别能力明显优于常规低压检测手段^[3]。在 220 kV 电缆长期运行环境中, 绝缘受潮、老化变质等问题容易诱发闪络类故障, 若仅依赖传统

作者简介: 罗诗铭 (1989-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 电力工程电气领域。

反射检测, 很难准确捕捉。脉冲电流法通过主动制造可控击穿条件, 使原本不稳定的隐患故障转化为可测量的电气信号, 从而大幅提升定位成功率, 运维单位可在不完全开挖的前提下快速锁定故障区段, 为后续精准检修提供关键数据支持。

1.4 万用表与直闪法联合检测

万用表法是通过对比缆芯与金属屏蔽层之间电阻参数的测量, 快速区分开路故障、断线故障等基础性问题, 当测得阻值为无穷大时, 可初步判断为开路故障, 而当阻值呈现为原缆芯电阻的两倍左右时, 则可判定为断线类故障。直闪法主要用于高阻闪络性故障的进一步定位, 通过高压闪络使故障点产生电流行波, 并利用测试端捕获到的反射电磁波波形, 计算电波传播时间差, 从而推算故障点距离^[4]。二者联合应用, 一方面可快速筛选故障类型, 另一方面可通过闪络信号对复杂隐患点进行精确定位, 缩短停电排查时间, 减少大面积盲目开挖带来的经济损失。

2 220 kV 高压电力电缆常见故障及原因

2.1 机械损伤类故障

在电缆敷设、回填、道路改造及综合管线施工过程中, 电缆极易受到牵引、挤压、撞击及误挖等外力影响, 当外护套或金属屏蔽层发生变形或裂纹后, 原有的密封体系被破坏, 湿气与杂质便会沿微裂缝逐步侵入绝缘层内部, 使电缆的介电性能发生根本性变化^[5]。机械损伤会直接导致电缆外护套应力分布失衡, 使局部区域形成电场畸变区, 在高电压长期作用下, 这些区域会成为局部放电的高风险点。电缆弯曲半径不足或过度牵引还会造成导体绞合松弛及绝缘层微裂纹扩展, 使热循环过程中的热胀冷缩进一步加剧裂纹扩散速度。局部放电产生的热量会使绝缘材料发生碳化, 形成导电通道, 引发不可逆的击穿事故。

2.2 绝缘受潮类故障

绝缘受潮是指水分侵入改变绝缘介质的电气参数分布, 进而引发电场畸变与局部放电增强效应。水分一旦进入绝缘层内部, 会使原本均匀的电场分布产生集中现象, 局部区域电场强度显著升高, 极易形成放电通道。受潮状态下, 绝缘材料的体积电阻率与击穿强度同步下降, 电缆对暂态过电压和运行负荷波动的耐受能力显著减弱, 使系统稳定性明显下降。从形成机制上看, 绝缘受潮多与电缆端部密封处理不规范、护套完整性不足以及长期处于高湿地下环境密切相关。当水分通过端部、接头或护套缺陷逐步渗入后, 在热电耦合作用下会形成“水树化”结构, 使绝缘层内部产生大量微通道, 并在高电压激励下成为持续性的局

部放电源。局部放电释放的热量会加速绝缘材料分子链断裂, 使老化进程呈指数级增长, 最终形成贯穿性击穿路径。

2.3 绝缘老化变质类故障

绝缘老化变质是 220 kV 高压电力电缆不可逆的内生退化过程, 是因为高分子绝缘材料在长期电场、热场及环境应力耦合作用下发生的分子结构失稳导致性能退化。当电缆长期处于大电流运行状态时, 导体产生的热量会使绝缘层内部形成持续的热应力场, 促使分子链断裂与交联度下降, 材料结构逐步疏松, 击穿强度和介电常数发生明显变化^[6]。过负荷运行、瞬态过电压会加剧绝缘材料的电应力集中, 使内部局部放电活动更加频繁。放电产生的等离子体和热效应不仅会烧蚀绝缘材料表面, 还会形成导电碳化路径。随着老化程度不断加深, 电缆对系统扰动的容错能力迅速下降, 一旦发生电压波动或负荷冲击下, 便会引发击穿事故。

2.4 设计缺陷及制造质量故障

若在设计阶段电场分布模型不合理、绝缘结构冗余不足或应力控制参数设置不当, 会使电缆在额定运行状态下仍存在潜在电应力集中区。该类结构缺陷会在长期运行过程中逐步演化为局部放电源, 使绝缘系统始终处于慢性损耗状态。制造环节中的绝缘层厚度偏差、同心度不足、材料杂质残留及护套致密度不达标等问题, 会进一步放大电场畸变效应, 导致电缆在投运初期即处于隐性亚稳态运行。此类缺陷虽不易通过外观检查发现, 但在长期电应力与热循环作用下, 会快速演变为放电通道或击穿通路, 使电缆提前进入失效阶段。由设计与制造质量引发的故障往往呈现出重复性高、事故影响范围大、维修成本高等特点。

3 220 kV 高压电力电缆故障处理措施

3.1 机械损伤类故障处理措施

运维单位在完成故障定位后, 应首先对损伤区段进行物理完整性评估, 通过护套电阻测量、红外热成像及局部放电检测等手段, 判定裂纹扩展范围和绝缘碳化程度, 并据此确定必须切除的最小安全长度。对已经出现护套开裂、金属屏蔽变形或绝缘层微裂纹扩展的电缆段, 应实施切除重建处理, 防止残余缺陷在后续热循环中继续扩展。在修复过程中, 应同步重建金属屏蔽连续性、应力控制结构及防水密封系统, 使修复区的电场分布、热膨胀性能与原线路保持一致, 避免形成新的电应力集中点^[7]。同时, 隧道及管廊敷设线路还需对托架间距、弯曲半径及固定夹具进行重新校核, 通过机械支撑再平衡降低运行中的二次拉伸

与挤压风险。修复完成后,应对修复线路进行耐压试验、局部放电检测,并建立该线路的后续重点监测档案,在运行初期实施高频次温升、泄漏电流监控,防止机械损伤类隐患转化为重复性击穿事故。

3.2 绝缘受潮类故障处理措施

运维单位应首先对受潮区段实施水分入侵源排查,重点检查端部密封、接头压接结构及护套完整性,锁定水汽进入路径。对于已经形成水树化结构、局部放电持续活跃的区段,应实施受潮段整体切除重建处理,并同步更换端部密封组件,避免仅通过烘干或注胶等表面手段进行临时性处理。在修复过程中,应重新构建端部防水锥、应力控制层及金属屏蔽连续系统,使修复区的电气结构达到初始设计状态。对全线还应实施耐压试验与局部放电趋势扫描,识别潜在受潮风险点,并对高湿区段增设护套防水层或套管防渗结构,抑制地下水汽继续侵入。

3.3 绝缘老化变质类故障处理措施

运维单位在确认老化区段后,应对局部放电活跃度、温升曲线及绝缘耐压裕度进行综合评估,区分可延寿区段与必须切除区段。对已经出现碳化通道或耐压能力明显下降的区段,应果断实施切除重建,而对尚处于早期老化阶段的区段,则可通过绝缘强化、运行条件优化进行延寿处理。另外,运维单位应通过耐压试验、振荡波检测建立新的健康基线,并对老化敏感区实施端部密封强化、绝缘涂层增强及防潮阻隔处理。

3.4 设计缺陷及制造质量故障处理措施

运维单位应对故障批次电缆进行参数倒查,重点核验绝缘层厚度、同心度、护套致密度及端部密封结构是否满足设计要求,并据此判定是否存在系统性制造偏差。对确认存在设计或制造缺陷的区段,应实施整段替换处理,避免缺陷结构继续在系统中运行。同时,应将倒查结果纳入设备采购与施工标准修订体系,强化后续工程中的质量准入门槛。在施工层面,应重新核验弯曲半径、牵引力控制、接头制作工艺等关键参数的执行情况,并通过施工档案化管理确保全过程可追溯,从根本上降低故障发生率。

4 220 kV 高压电力电缆故障的防范对策

4.1 强化施工源头管控

220 kV 高压电力电缆故障的预防应从施工源头入手,通过严格的过程管控减少结构性隐患的形成^[8]。在电缆敷设前,施工单位应依据线路设计参数对敷设路径、转弯半径及托架布置进行复核,避免因路径变更或空间受限而导致弯曲半径不足、牵引力超标等问

题。在敷设过程中,应采用专用牵引设备对牵引力进行实时监控,防止导体拉伸变形和绝缘层微裂纹产生。同时,对接头制作、端部封堵及护套密封工序应实施全过程旁站监督,重点检查应力锥安装、屏蔽连续性恢复及防水密封质量,杜绝砂眼、褶皱和封堵不严等工艺缺陷进入运行阶段,从源头上减少机械损伤、受潮及结构缺陷类故障的发生。

4.2 建立运行状态监测机制

在电缆投入运行后,应构建以状态监测为核心的动态防范体系,使隐患在形成初期即可被识别和处置。运维单位可通过分布式光纤测温、局部放电在线监测及接地电流监测手段,对电缆沿线关键节点实施连续数据采集,形成温升、放电强度与泄漏电流的趋势模型,一旦出现异常偏移即可提前预警。对互联箱、终端头和接头区域,应实施高频次红外测温与专项巡检,及时发现接触不良、密封老化等潜在隐患。

5 结束语

220 kV 高压电力电缆故障的形成并非单一因素作用的结果,而是多种条件长期叠加的综合体现。通过合理应用低压脉冲、脉冲电流、电桥检测等技术手段,可实现故障位置与性质的快速判定,为后续修复提供可靠依据。同时,结合针对性处理措施,可有效抑制隐患扩展并延缓绝缘系统老化进程。未来,相关单位应在加强智能化监测体系建设的基础上,进一步完善高压电缆全寿命周期管理机制,从而持续提升 220 kV 高压电力电缆系统的运行安全水平。

参考文献:

- [1] 高文江,胡国林.高压电力电缆接头的可靠性与故障诊断研究[J].内江科技,2025,46(11):11-12.
- [2] 钟云能,成奕佳.110 kV 及以上高压电缆运维方式研讨[J].冶金动力,2025(05):40-43.
- [3] 于金亮,冯俊博,齐福东,等.基于人工智能的高压电缆接地故障诊断方法研究[J].科技创新与应用,2025,15(19):44-47.
- [4] 赵世喜.高压电力电缆故障分析与探测策略优化[J].电力设备管理,2025(12):29-31.
- [5] 王锋.电力电缆故障诊断与定位方法研究及应用[D].淮南:安徽理工大学,2024.
- [6] 郑灿.高压电力电缆故障诊断与故障预警的研究[D].济南:山东大学,2024.
- [7] 莫杰锋,刘家鸿,杨智针,等.高压电缆中间接头的故障原因与对策分析[J].电子技术,2023,52(10):204-205.
- [8] 杨宝金.高压电力电缆故障分析及处理[J].中国设备工程,2023(16):142-144.