10kv 配电线路电缆故障查找方法与处理研究

刘广胜　于忆珩　李国红

国网乌鲁木齐供电公司　新疆　乌鲁木齐　830000

摘　要：随着我国城市化进程的加速和电网建设的不断升级，10kV 配电线路作为连接变电站与终端用户的关键环节，其运行的可靠性与稳定性直接关系到社会经济活动的正常运转和居民生活的质量。在配电网中，电力电缆因其占地少、安全性高、受环境影响小等优势，应用比例日益提高。然而，电缆一旦发生故障，由于其多敷设于地下或管道内，故障点隐蔽性强，给快速、精准定位带来了巨大挑战。本文旨在系统性地研究 10kV 配电线路电缆故障的成因、类型，并深入剖析当前主流的故障查找与定位技术，包括传统的电桥法、低压脉冲反射法以及适用于高阻故障的高压闪络法（冲闪法）和声磁同步法。同时，结合典型故障案例，详细阐述了从故障初步判断到精确定位的完整处理流程。最后，本文探讨了故障预防措施及智能化、数字化技术在未来故障定位领域的发展趋势，为提升配电网运维效率、缩短停电时间、保障供电可靠性提供理论参考与实践指导。

关键词：10kV 配电线路；电力电缆；故障查找；故障定位；电桥法

引言

电力是现代社会基石，10kV 电压等级在中压配电网中占主导。近年来，为满足城市美观、土地集约及供电可靠性要求，架空线路渐被地下电缆取代，10kV 电缆线路规模大增。但电缆故障隐蔽性强，多发生在绝缘层内部或接头处，难直接观察，若不能及时准确定位修复，将引发大面积、长时间停电，造成经济损失和公共安全问题。因此，高效准确查找处理 10kV 电缆故障是电力企业核心技术课题。传统故障查找方法效率低、准确性差，随着技术发展，先进定位仪器和方法出现，但单一方法难以应对不同性质和环境的故障。运维人员需理解故障机理，掌握多种定位技术。本文将梳理 10kV 电缆常见故障类型及成因，论述核心查找定位方法，通过案例展示处理流程，并展望智能化故障定位技术发展方向。

1 10 kV 配电线路电缆常见故障类型与原因分析

1.1 按故障表现形式分类

短路故障是常见严重故障，指电缆相与相或相与地间绝缘被击穿形成低阻抗通路，有两相、三相短路等，伴随巨大短路电流，会触发继电保护装置动作致线路跳闸。接地故障是单相导体对地（或金属屏蔽层）绝缘损坏，小电流接地系统中，单相接地不立即跳闸，但会产生持续接地电流和过电压，易发展为相间短路。断线故障是电缆导体因外力拉断、腐蚀断裂或接头松脱等开路，导致下游用户失电。闪络性故障是高阻特殊故障，故障点绝缘未完全击穿，施加电压时瞬间放电，电压降低后绝缘恢复，具有间歇性和隐蔽性，对测试要求高。

1.2 故障成因深度剖析

（1）外力破坏：这是导致电缆故障的首要原因。城市建设中的机械施工（如挖掘机、打桩机作业）、道路开挖、车辆碾压等都可能对地下电缆造成直接损伤，导致护套破损、绝缘击穿甚至导体断裂。（2）绝缘老化与劣化：电缆在长期运行中，受到电场、热场、湿度等因素的综合作用，其绝缘材料会逐渐老化，电气性能和机械性能下降，最终丧失绝缘能力。电缆端头密封不良、中间接头制作工艺缺陷或外护套破损，都可能导致水分侵入。水分在电场作用下会加速绝缘老化，并可能在局部形成水树枝，最终发展为电树枝，引发击穿。长期过负荷运行会使电缆温度过高，加速绝缘老化。雷电过电压或操作过电压则可能直接击穿绝缘薄弱点[1]。（3）附件（接头与终端）故障：电缆附件是整个电缆线路中最薄弱的环节。据统计，超过半数的电缆故障发生在接头或终端处。主要原因包括：一是安装工艺不良：如应力锥处理不当、半导电层剥离不干净、绝缘填充不充分、密封不严等。二是材料质量问题：使用了劣质的附件材料。三是设计缺陷：附件的电场分布设计不合理，存在局部场强集中。（4）制造缺陷：电缆本体在生产过程中可能存在绝缘杂质、气泡、偏心等缺陷，这些隐患在运行一段时间后可能成为故障的发源地。

2 10 kV 电缆故障查找与定位的核心方法

针对上述不同类型的故障，业界发展出了多种行之

有效的查找与定位方法。一个完整的故障定位过程通常分为两个阶段：粗测（预定位）和精测（定点）。

2.1 粗测（预定位）方法

粗测的目标是确定故障点距离测试端的大致距离，将故障范围缩小到几十米甚至几米之内。

2.1.1 电桥法

基于惠斯通电桥平衡原理。通过调节电桥臂电阻，使检流计指示为零，此时可根据已知电阻值和电缆长度计算出故障点距离。优点是原理简单，对于低阻（通常小于 100kΩ）的相间短路或金属性接地故障，测量精度非常高。缺点是仅适用于低阻故障；需要一个完好的、绝缘良好的非故障相作为回路；无法测量三相短路或断线故障；对高阻和闪络性故障无效。主要用于处理明确的低阻短路故障。

2.1.2 低压脉冲反射法

向电缆发送一个窄幅、高频的低压脉冲信号。当脉冲沿电缆传播遇到阻抗不匹配点（如开路、短路、接头、故障点）时，会产生反射波。通过测量发射脉冲与反射脉冲之间的时间差，并结合电缆的波速度，即可计算出故障点的距离。优点是操作简便、安全（使用低压）；可同时用于测量电缆全长、识别中间接头位置；对低阻、开路、短路故障定位效果好。缺点是对高阻故障（阻抗远大于电缆特性阻抗）和闪络性故障产生的反射信号非常微弱，难以捕捉和识别。是日常电缆普查、低阻故障定位的首选方法。

2.1.3 高压闪络法

这是专门用于处理高阻和闪络性故障的方法。通过高压发生器（如直流高压或冲击高压）向故障电缆施加足够高的电压，强制故障点击穿并产生瞬间的闪络放电。放电瞬间会产生一个陡峭的电压行波，该行波沿电缆传播并在两端反射。通过高速示波器或专用闪测仪记录下行波的波形，分析其往返时间即可计算出故障距离。根据所加高压的类型，可分为直流高压闪络法和冲击高压闪络法。二次脉冲法是其一种改进型，通过叠加低压脉冲来简化波形判读[2]。优点是能够有效定位高阻和闪络性故障，这是其他方法难以做到的。缺点是设备复杂、笨重；操作危险性高，需严格的安全措施；波形解读需要一定的经验。是处理疑难高阻故障的“终极武器”。

2.2 精测（定点）方法

在粗测确定了大致范围后，需要精测方法在现场精确找到故障点的具体位置（通常精确到厘米级）。

2.2.1 声测法/声磁同步法

在对故障电缆施加高压使其反复闪络放电时，故障点会因电弧的剧烈能量释放而产生明显的机械振动和声响（“啪、啪”声）。声测法使用高灵敏度的拾音器（探头）在地面上方探测此声音，声音最大的地方即为故障点正上方。声磁同步法则更进一步，它同时接收放电产生的电磁信号和声波信号。由于电磁波传播速度远快于声波，仪器可以精确计算出声波传播的时间，从而排除环境噪声干扰，实现更精准的定位。优点是定位精度高，是目前最主流的精确定点方法。缺点是需要电缆能够被高压击穿并稳定放电；在嘈杂环境中（如交通干道旁）效果会受影响；对于埋深过大的电缆，声音衰减严重，难以探测。几乎所有能通过高压闪络法激发出放电的故障。

2.2.2 音频感应法

向故障电缆（通常是短路或接地故障相）通入一个特定频率（通常为几百到几千赫兹）的音频电流信号。在地面上使用带有滤波功能的感应探头，沿着电缆路径探测此音频信号。在故障点处，由于电流流入大地，音频信号强度会发生突变（通常表现为信号消失或显著减弱），据此可确定故障点位置[3]。优点是对低阻故障定位效果好，且不受周围环境噪声影响。缺点是仅适用于低阻故障；对于高阻故障，信号泄漏微弱，难以检测。作为声测法的补充，尤其适用于低阻故障的精确定点。

3 故障处理流程与典型案例分析

3.1 标准化故障处理流程

一个高效的故障处理流程通常遵循以下步骤：（1）故障确认与隔离：调度中心根据保护动作信息确认故障线路，并遥控或指令现场人员拉开相关开关，将故障段隔离，恢复非故障区域供电。（2）故障性质初步判断：使用兆欧表（摇表）或绝缘电阻测试仪测量各相间及对地的绝缘电阻，初步判断故障类型（低阻、高阻、开路等）。（3）选择并执行粗测方法：若为低阻故障，优先选用低压脉冲法或电桥法。若为高阻或疑似闪络故障，则采用高压闪络法。（4）现场精确定点：根据粗测结果，在预估范围内，使用声磁同步法或音频感应法进行精确定位。（5）开挖与修复：在精确定位点开挖，暴露故障电缆，切除故障部分，重新制作中间接头或更换受损电缆段。（6）试验与投运：修复完成后，必须对整段电缆进行耐压试验和绝缘电阻测试，确保修复质量合格后，方可恢复送电。

3.2 典型案例分析

某条 10kV 双回路电缆线路（A/B 回）突然跳闸，导致大片商户停电。调度报告显示 B 回线路速断保护动作。运维人员到达变电站，使用 2500V 兆欧表测试 B 回电缆三相。结果显示：A 相对地绝缘电阻为 1MΩ，B、C 相对地及相间绝缘电阻均大于 20MΩ。初步判定为 A 相高阻接地故障。由于是高阻故障，决定采用高压冲闪法。使用闪测仪和高压发生器，在变电站侧对 A 相施加直流高压。当电压升至 8kV 时，电缆发生闪络放电。闪测仪捕获到清晰的放电波形，经分析计算，故障点距离测试端约 1250 米。运维团队携带声磁同步定点仪前往距变电站 1250 米附近的路段。该路段为繁华街道，环境噪声较大。通过声磁同步模式，成功过滤掉大部分环境噪声，在一处人行道下方探测到强烈的、与放电信号同步的声波信号。精确定位点被标记。经市政部门许可后开挖，发现故障点位于一个电缆井附近。故障原因是附近商铺装修施工时，不慎用钻头打穿了电缆外护套和主绝缘，造成了 A 相接地。工作人员切除了受损的 5 米电缆，重新制作了一个冷缩式中间接头。修复后，对 B 回电缆进行了直流耐压试验（25kV/5min）和绝缘电阻测试，结果均合格。线路恢复正常供电，全程耗时约 6 小时。本案例展示了从故障判断、方法选择到精确定位、修复的完整闭环。关键在于准确判断故障性质（高阻），并果断采用冲闪法和声磁同步法定位，避免了盲目开挖，大大缩短了抢修时间。

4 故障预防与运维管理策略

“防患于未然”远胜于“亡羊补牢”。有效的预防措施可以从源头上减少故障的发生。（1）加强规划设计与施工质量管理：在设计阶段充分考虑路径安全，避开地质不稳定和施工频繁区域。严格把控电缆及附件的采购质量，强化施工过程监督，确保接头制作工艺符合规范。（2）完善电缆路径标识与资料管理：建立精确的 GIS（地理信息系统）电缆台账，清晰标注电缆走向、埋深、接头位置等信息，并设置醒目的地面标识桩，防止外力破坏[4]。（3）实施状态监测与带电检测：推广应用红外热成像、超声波局放检测、高频电流传感器（HFCT）等带电检测技术，定期对电缆终端、接头进行巡检，及时发现潜伏性缺陷。（4）强化通道管理和外部协调：与市政、园林、施工单位建立联动机制，提前告知电缆路径，对临近电缆的施工进行现场监护。（5）推进智能化运维：利用在线监测装置（如分布式光纤测温 DTS、在线局放监测系统）实现对电缆温度、局放等关键状态量的实时监控，变被动抢修为主动预警。

5 结语

10kV 配电线路电缆故障的查找与处理是一项综合性、技术性极强的工作，本文系统梳理故障成因与类型，深入分析电桥法、低压脉冲法等核心定位技术原理与应用，并通过典型案例验证了标准化处理流程的有效性。展望未来，随着“云大物移智链”等新一代信息技术与能源技术深度融合，10kV 电缆故障定位技术将迈向更智能、自动、精准的新阶段。一方面，多源信息融合将成为趋势，通过融合故障录波、在线监测等多源异构数据，借助人工智能算法实现故障类型自动识别与区间智能研判；另一方面，基于广域同步测量的行波定位技术有望普及，实现远程、快速、高精度故障定位；此外，数字孪生技术也将得到应用，构建电缆线路数字孪生体，为故障模拟、预案推演和智能决策提供有力支撑。

参考文献

[1] 李源泽, 李钊逸. 配网自动化技术在 10kV 线路故障处理中的应用研究 [J]. 仪器仪表用户,2025,32(11):28-29+32.

[2] 梁天纬, 刘杨, 涂怀远, 等. 一起 10kV 线路连续故障分析及可靠性提升方案研究 [J]. 青海电力,2025,44(03):88-93.

[3] 周晶, 刘文川, 柯辉. 配网数据在 10kV 线路接地故障精确定位中的应用 [J]. 电子元器件与信息技术,2025,9(04):92-94.

[4] 韩昱.10kV 线路故障处理中应用配网自动化技术探讨 [J]. 电力设备管理,2024,(19):37-39.