

# 配电线路故障定位与快速抢修技术研究

王云光 张兴哲

国网浙江青田县供电公司 浙江 丽水 323900

**摘要:** 本文系统探讨了配电线路故障的成因与特征,并深入剖析了当前主流的故障定位技术体系,包括基于馈线自动化(FA)的主站集中式与智能分布式定位、行波测距法、以及融合多源信息的综合研判方法。在此基础上,文章详细阐述了支撑快速抢修的关键技术,如智能配电网态势感知、抢修资源优化调度、移动作业终端应用及标准化抢修流程。最后,针对现有技术在复杂网架、高阻接地故障及通信依赖等方面的局限性,提出了未来融合人工智能、数字孪生与边缘计算等前沿技术的发展方向。研究表明,构建一个集精准感知、智能诊断、高效协同于一体的配电故障快速处置体系,是提升配电网供电可靠性和用户满意度的核心路径。

**关键词:** 配电线路;故障定位;快速抢修;馈线自动化;行波测距

## 引言

在现代能源体系里,配电环节至关重要,是电力输送最终通道,也是衡量地区供电服务与营商环境的关键指标。新型城镇化加速、生活水平提高,社会对电力供应的连续性等提出更高要求,世界银行“获得电力”指标核心是考量配电网故障恢复时间。所以,配电线路故障后快速精准定位、隔离并恢复供电,是电网企业核心课题。长期以来,配电线路故障处理采用“被动响应”模式,依赖人工经验定位,对复杂线路耗时久;依赖用户报修,故障可能长时间未察觉;抢修资源调度不合理,延长停电时间。这种粗放模式严重制约供电可靠性提升。如今,智能配电网建设为故障快速处置提供新手段,通过部署智能终端等构建智能化故障处理体系,有望将故障平均修复时间大幅缩短。本文将系统梳理与研究配电线路故障定位与快速抢修关键技术,分析其原理等并展望趋势,为构建现代配电网提供理论支撑。

## 1 配电线路故障特征与定位难点分析

### 1.1 配电线路故障的主要类型与成因

配电线路故障按性质可分为瞬时性故障和永久性故障。瞬时性故障(如雷击闪络)通常能在线路重合闸后自行恢复;而永久性故障(如导线断线、绝缘子击穿、变压器烧毁)则需要人工干预才能修复。按故障相数可分为单相接地故障、相间短路故障和三相短路故障。其中,单相接地故障占比最高,可超过70%,尤其是在中性点不接地或经消弧线圈接地的系统中。其成因主要包括:(1)外部因素:树木接触导线(树障)、异物短接(如风筝、塑料布)、施工机械外力破坏、动物触碰等。(2)内部因素:绝缘子污秽闪络、避雷器或变压器等设备老化劣化、导线接头过热烧断、金具锈蚀断裂等。(3)自然因素:雷

电过电压、大风导致导线舞动或断线、覆冰造成绝缘子串冰闪或杆塔倾倒等。

### 1.2 故障定位面临的核心难点

正是由于上述故障的多样性和复杂性,给精准定位带来了巨大困难。(1)网络拓扑结构复杂:配电网呈辐射状或环网开环运行,分支线、分段开关、联络开关数量庞大,且常有用户专线T接。一旦发生故障,故障电流的路径并非唯一,给基于电气量特征的定位算法带来干扰。(2)高阻接地故障(HIF)的检测难题:当故障点经过渡电阻(如干燥的树枝、水泥杆)接地时,故障电流非常微弱(可能仅几安培),远低于线路的负荷电流,常规的过流保护和零序电流保护难以可靠动作,使得此类故障极具隐蔽性,成为定位的“盲区”<sup>[1]</sup>。(3)分布式电源(DG)接入的影响:随着光伏、风电等分布式电源的大量接入,配电网由传统的单电源辐射状网络转变为多电源、双向潮流的有源网络。故障时,DG会向故障点注入反向电流,改变了原有的故障电流分布规律,使得基于传统单端量测的定位方法失效。(4)运行方式灵活多变:配电网为提高供电可靠性,常通过操作分段开关和联络开关改变运行方式。这种灵活性虽然有益,但也意味着同一物理线路在不同时间可能处于不同的电气拓扑下,增加了故障定位模型的复杂性。

## 2 配电线路故障定位关键技术

### 2.1 基于馈线自动化(FA)的故障定位

馈线自动化是智能配电网的核心功能之一,通过在馈线上安装具备“三遥”(遥测、遥信、遥控)功能的配电终端(如FTU、DTU),并与配电主站系统协同工作,实现故障的快速定位、隔离与恢复。(1)主站集中式FA:所有配电终端将实时采集的电气量(电压、电流)和开关

状态信息上传至配电主站。故障发生后,主站根据预设的网络拓扑模型和收到的故障信息(如过流信号、开关变位信号),运用矩阵算法、网络描述矩阵法或人工智能算法,进行全局分析,从而判断出故障区段。其优点是定位逻辑集中、便于管理,但高度依赖主站性能和通信网络的可靠性,一旦通信中断,功能将完全丧失<sup>[2]</sup>。(2)智能分布式FA:各配电终端之间通过高速对等通信(如光纤或5G)直接交换信息。故障发生后,相邻终端通过对比彼此的故障电流方向和大小,利用“逐级闭锁”或“逐级确认”的逻辑,无需主站参与即可在数秒内自主完成故障区段的定位与隔离。其优点是速度快、不依赖主站、可靠性高,但对终端间的通信质量和协议一致性要求极高,且投资成本相对较高。

### 2.2 行波测距法

行波测距是一种基于电磁暂态过程的高精度定位方法。当线路发生故障时,会在故障点产生向线路两端传播的高频电压和电流行波。通过在变电站母线或线路上的关键节点安装高采样率的行波检测装置,记录下行波到达的时间。利用行波在导线中的传播速度(接近光速)和双端或单端的行波到达时间差,即可精确计算出故障点距离测量点的距离。该方法的优点是定位精度高(可达百米级甚至更高),不受系统运行方式、故障类型(包括高阻接地)和过渡电阻的影响。但其缺点也十分明显:需要专用的高成本行波传感器和高速数据采集设备;对信号的提取和分析算法要求高,易受噪声干扰;在分支众多的配电网中,行波在分支点会发生复杂的折反射,给单端测距带来困难。

### 2.3 多源信息融合的综合故障研判

任何单一的故障定位技术都难以完美应对所有复杂的实际场景。因此,将来自不同渠道、不同性质的信息来源进行深度融合与交叉验证,是提升故障定位系统整体鲁棒性和准确性的必然趋势。这种综合研判方法构建了一个“群智感知”的框架。其信息来源不仅包括来自FTU/DTU等自动化终端的稳态和暂态电气量数据,还广泛吸纳了非电气量信息。例如,安装在线路上的故障指示器的动作信号可以提供故障电流流经的粗略路径;海量智能电表上报的失压和复电信号,通过分析其时间序列,可以有效地框定出故障影响的地理范围;视频监控系統捕捉到的异常画面,甚至社交媒体上用户发布的停电信息,都可以作为辅助线索。此外,配电网的GIS地理信息、详细的设备资产台账、以及历史缺陷和故障记录等静态数据,也为故障分析提供了重要的上下文背景。通过构建一个强大的统一数据平台,利用大数据分析、

知识图谱构建和人工智能技术,对这些多源异构信息进行关联、挖掘和推理,可以有效克服单一信息源的局限性和不确定性。例如,系统可以先利用智能电表的群体失电信息快速划定一个嫌疑区域,再结合该区域内故障指示器的动作组合和FTU上报的过流越限情况,进行精细化的逻辑判断,从而更可靠、更快速地锁定真正的故障区段。

## 3 支撑快速抢修的关键技术与策略

### 3.1 智能配电网态势全面感知

快速抢修的前提是对故障现场及周边环境有全面、清晰的了解。这依赖于智能配电网强大的态势感知能力。通过配电自动化系统与移动作业终端的无缝集成,抢修指挥中心的调度员和赶赴现场的一线抢修人员都能够实时、直观地查看到故障区段的详细网络拓扑图、所有相关开关的实时状态、关键设备的技术参数以及历史告警记录等信息,真正做到“运筹帷幄之中,决胜千里之外”。更为先进的是,可以利用无人机技术进行远程现场勘察。在抢修人员抵达之前,指挥中心即可派出搭载可见光和红外热成像相机的无人机飞抵故障点上空<sup>[3]</sup>。无人机传回的高清影像和热力图,能够让后方专家团队快速评估故障设备的损坏程度、判断是否存在火灾等次生风险,并全面掌握周边的交通、地形、天气等环境状况,为制定科学、安全、高效的抢修方案提供至关重要的第一手资料,从而避免了抢修队伍盲目到达现场后再进行勘查的冗余环节。

### 3.2 抢修资源智能优化调度

传统的抢修调度很大程度上依赖于调度员的个人经验和主观判断,缺乏科学性和全局最优性。基于数字化平台的智能抢修资源调度系统则能够实现资源的精细化管理和最优配置。该系统首先建立一个动态的抢修资源池,实时掌握所有抢修班组的地理位置、人员技能构成、当前任务负荷状态,以及各个仓库中备品备件的具体库存和位置。当故障定位结果生成并确认后,系统会立即启动优化算法,综合考虑故障的严重等级、受影响的用户数量和重要性、各抢修队伍的当前位置、实时交通路况、以及所需备件的可用性等多种约束条件。通过运用最短路径算法或更复杂的启发式优化算法,系统能够在瞬间计算出最优的抢修队伍派遣方案和行车路线,并将包含所有必要信息的电子化工单直接、精准地推送到被选中抢修人员的移动终端上,实现了从“人找任务”到“任务找人”的智能化转变,极大地提升了响应速度和资源利用效率。

### 3.3 移动互联与标准化作业

移动作业终端（如加固型智能手机或平板电脑）已经成为连接后台强大信息系统与一线抢修人员的不可或缺的桥梁。通过这个终端，抢修任务、详细的安全措施清单、对应的标准作业指导卡、以及相关设备的图纸和技术说明书等关键信息，都能以结构化的电子形式即时下发，确保了信息传递的准确性和完整性，杜绝了口头传达可能造成的遗漏或误解。在抢修过程中，工作人员可以通过终端实时上传现场拍摄的照片、录制的视频、填报的处理进度以及最终的完工报告，使得指挥中心能够对整个抢修过程进行全程可视化监控，既保障了作业的规范性，也强化了安全管理<sup>[4]</sup>。此外，移动终端还可以集成专家知识库或增强现实（AR）技术，为现场人员提供强大的辅助决策支持。例如，面对一个不熟悉的设备故障，工作人员可以通过AR眼镜看到叠加在真实设备上的虚拟拆装指引；或者通过语音查询，即时获取由后台专家系统提供的故障诊断建议和处理方案，这对于新入职员工或处理罕见复杂故障时尤为宝贵。

### 3.4 标准化抢修流程（SOP）

建立并严格执行一套标准化的抢修流程（Standard Operating Procedure, SOP），是保证抢修工作质量和效率的基石。一个设计完善的SOP应当覆盖从故障受理、初步信息研判、抢修队伍智能派发、现场安全勘查与隔离、故障设备修复、修复质量验收、到最终恢复送电及事后总结分析的全过程。每一个环节都有明确的操作步骤、责任人和质量控制点。通过将这套SOP固化到信息化管理系统中，可以实现流程的强制执行，有效减少因人员疏忽或习惯差异导致的操作失误和安全漏洞。同时，系统在流程执行过程中自动记录下的所有操作日志和时间节点，为后续的抢修绩效评估、责任追溯以及流程本身的持续优化迭代提供了坚实的数据基础，形成了一个良性的PDCA（计划-执行-检查-改进）管理闭环。

### 4 未来发展趋势

尽管技术持续进步，配电线路故障快速处置仍有挑

战，未来发展将聚焦多个方向。一是人工智能深度赋能，利用深度学习从海量历史故障数据中自动学习，构建强大故障预测与诊断模型，有望在高阻接地等疑难故障上通过分析微弱电气信号特征实现突破。二是数字孪生技术应用，构建配电网高保真数字孪生体，全量映射实时数据等，故障时可在虚拟空间模拟、预演和评估，为现场抢修提供最优决策。三是边缘计算与云边协同，将部分计算能力下沉至网络边缘，实现故障就地快速识别处理，云端负责全局优化等，形成云边协同智能架构。四是实现自愈配电网终极目标，通过高度自动化等系统协同，在多数故障下自动完成相关操作，让用户“无感”停电。

### 5 结语

配电线路故障定位与快速抢修关乎供电可靠性。当下配电网愈发复杂，用户对高质量供电需求迫切，传统被动式、人工化处理模式难以为继。研究表明，构建多层次、多技术融合的智能故障处置体系，可破解故障定位难、抢修效率低的问题。该体系借助馈线自动化等技术精准定位，以多源信息融合增强研判稳定性，靠智能调度等支撑高效抢修。展望未来，人工智能等前沿技术深度融合，配电系统将向具备强大自愈能力的智慧形态迈进，达成“故障无感、供电无忧”目标。电网企业唯有持续推动技术创新与管理模式变革，才能提升核心竞争力，服务经济社会高质量发展。

### 参考文献

- [1]钟燕红.配电线路故障定位与快速隔离技术分析[J].电子技术,2025,54(12):238-239.
- [2]陆卫红.配电线路中的自动化故障定位技术分析[J].电子技术,2025,54(10):306-307.
- [3]王智凯,陈竹峰.电网工程中配电线路故障定位技术的应用研究[J].科技资讯,2025,23(13):87-89.
- [4]刘世杰.架空配电线路故障抢修优化策略[J].大众用电,2024,39(01):47-48.