

Research on optimization and field application of accurate fault detection technology for 10kV distribution lines

Zhihui Zhang¹ Yunfei Li²

1. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. Zhangjiakou Wanquan District Power Supply Branch, Zhangjiakou, Hebei, 076250, China

2. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. Zhangjiakou Huai'an County Power Supply Branch, Zhangjiakou, Hebei, 076150, China

Abstract

With the accelerated development of new-type power systems, 10-kilovolt distribution lines serve as the “last mile” connecting the main grid and end-users, where operational reliability directly impacts power supply quality. However, traditional fault detection methods (e.g., traveling wave method and impedance method) suffer from low accuracy and time-consuming processes due to complex line structures, diverse fault types, and strong environmental interference. These issues result in annual outage durations exceeding 30% of total service hours, causing direct economic losses amounting to tens of billions of yuan. While existing studies have attempted to integrate big data and artificial intelligence technologies, most focus on single-technology optimizations without comprehensive multi-source data integration or field adaptability verification. This paper first analyzes the fault characteristics and detection techniques for 10-kilovolt distribution lines, then details optimized solutions for precise fault identification, and finally presents practical field applications and validation results. The findings aim to provide valuable references for related research and practical implementation.

Keywords

10kV distribution line; line fault; accurate location technology; field application

10 千伏配电线路故障精准查找技术优化与现场应用研究

张志辉¹ 李云飞²

1. 国网冀北电力有限公司张家口市万全区供电分公司, 中国·河北 张家口 076250

2. 国网冀北电力有限公司张家口市怀安县供电分公司, 中国·河北 张家口 076150

摘要

随着新型电力系统建设加速, 10千伏配电线路作为连接主网与用户的“最后一公里”, 其运行可靠性直接影响供电服务质量。然而, 受线路结构复杂、故障类型多样、环境干扰强等因素影响, 传统故障定位方法(如行波法、阻抗法)存在精度低、耗时长等问题, 导致年均停电时间占比超30%, 直接经济损失达数百亿元。现有研究虽尝试引入大数据、人工智能等技术, 但多停留于单一技术优化, 缺乏多源数据融合与现场适应性验证。本文先是具体分析了10千伏配电线路故障特征与定位技术, 随后详细阐述了故障精准查找技术优化方案, 最后具体阐述了现场应用与验证, 以为相关研究提供有益参考与借鉴。

关键词

10千伏配电线路; 线路故障; 精准查找技术; 现场应用

1 引言

10 千伏配电线路是电网末端的关键环节, 其故障率占配网总故障的 70% 以上。传统故障定位方法依赖单一电气量测量, 易受线路分支、过渡电阻及噪声干扰影响, 导致误判率高达 25%。例如, 行波法在长线路分支点处定位偏差可达 1 公里以上, 而阻抗法在非对称故障下的误差超过

50%。近年来, 随着配电自动化覆盖率提升至 90%, 海量多源数据(如 DTU 实时监测、用户侧电表反馈)为故障精准诊断提供了新机遇。然而, 现有研究多聚焦于算法改进, 忽视现场设备兼容性与通信时延问题, 导致技术落地困难。本研究以“提升定位精度、缩短抢修时间、降低运维成本”为目标, 通过多源数据融合、智能化算法优化与硬件升级, 构建适应复杂配电场景的故障精准查找体系, 并开展现场应用验证, 为智能配电网建设提供技术保障。

【作者简介】张志辉(1989-), 男, 中国河北张家口人, 硕士, 工程师, 从事电力系统自动化研究。

2 10 千伏配电线路故障特征与定位技术分析

2.1 常见故障类型与特征

10 千伏配电线路故障类型多样，其特征与成因直接影响定位技术的选择与精度。短路故障中，相间短路多因线路绝缘子击穿、树障接触或动物触碰引发，表现为两相或三相导体直接导通，故障时电流突增、电压骤降，故障点电阻低且伴随强烈电弧与高温；接地短路则由单相导体与大地或接地物体接触导致，常见于绝缘子破损、雷击等场景，故障电流随接地电阻变化，中性点不接地系统中线路可短时运行，增加了定位难度^[1]。断线故障方面，单相断线多由雷击、机械外力或导线老化引起，故障相电压升高，可能伴随电弧重燃；多相断线则因严重外力破坏或施工误操作导致，线路完全失电且可能引发其他线路过载。此外，绝缘老化表现为材料性能退化引发的局部放电或击穿，故障特征隐蔽；外力破坏则具有突发性强、破坏范围大的特点，需结合现场勘查与历史数据关联分析。

2.2 传统故障定位技术原理

针对 10 千伏配电线路不同故障类型，传统定位技术通过分析电气量变化溯源故障点，核心方法包括行波法、阻抗法与信号注入法。行波法基于故障行波传播与反射特性，通过测量初始波与反射波时间差 (Δt) 计算故障距离 ($L=v \cdot \Delta t/2$, v 为波速)，适用于高阻接地与短路故障，但需高精度时间同步支持；阻抗法通过测量故障线路电压、电流计算阻抗 ($Z_f=U_f/I_f=Z_l \cdot L_f+R_f$)，结合线路参数推算故障距离，适用于结构简单的辐射状线路，但依赖精确参数；信号注入法则向线路注入特定频率信号，通过追踪信号衰减或反射点定位故障，无需断电但需设备协同，且对高阻故障灵敏度较低。

2.3 现有技术局限性

传统定位技术在复杂配电场景中面临诸多局限，制约了其精度与实用性。行波法虽能定位故障，但线路分支会导致行波折射反射，使时间差测量混乱，且波速受温度等因素影响存在偏差，高阻故障产生的行波幅值低还易被噪声淹没；阻抗法在接地故障中，过渡电阻会使测量阻抗偏离真实值，负荷波动也会让阻抗计算值不稳定，双侧供电系统更是增加了同步测量两端数据的难度；信号注入法适用范围受限，需线路具备注入接口，老旧线路改造难度大，同时抗干扰能力弱，工频干扰或谐波可能掩盖信号，而且定位时需人工巡检，耗时长且依赖经验，难以满足快速抢修的需求。

3 故障精准查找技术优化方案

3.1 多源数据融合技术

在故障精准查找中，多源数据融合技术至关重要。一方面结合多源数据采集系统，SCADA 如同电力系统的“中枢大脑”，可实时全面采集电网宏观数据，如电压、电流等参数，提供宏观背景信息；配电自动化终端 (DTU/FTU)

似“敏锐触角”，安装在关键节点，能精准获取线路局部详细电气信息，助定位故障区段；智能电表作为用户侧“数据窗口”，可反馈用电负荷变化等数据^[2]。整合这些不同层面、位置的数据，能构建全方位、多层次电网数据体系，为故障查找提供丰富信息基础。另一方面融合暂态与稳态故障特征，电压/电流突变量作为暂态特征典型代表，能快速捕捉故障发生时刻；谐波分析可深入挖掘稳态故障特征，确定故障类型和严重程度。将二者融合，综合利用优势，能更全面准确识别故障特征，提高故障查找精准度。

3.2 智能化算法优化

在智能化算法优化方面，多种创新方法提升了故障分析的精准度。深度学习里的卷积神经网络 (CNN) 模式识别能力强，在故障特征提取上优势显著。以行波波形的识别为例，它能借大量数据训练，自动学习不同故障下行波波形的特征模式，实际应用中可快速准确识别新波形对应的故障类型，避免人工提取的误差，挖掘更关键特征信息。传统阻抗法受负荷波动和过渡电阻影响大，改进后的方法引入负荷波动补偿与过渡电阻自适应算法，前者能实时修正阻抗计算，后者可实时估计过渡电阻值并纳入计算，提高复杂故障定位精度。此外，多技术协同定位模型有机结合行波法、阻抗法和信号注入法，先利用行波法确定故障初步范围，再用阻抗法精确计算，最后用信号注入法验证修正，充分发挥各技术优势，提升故障定位的可靠性与准确性。

3.3 硬件设备升级与部署

在硬件设备升级与部署方面，多项举措助力故障精准查找。传感器作为获取电网电气数据的关键，其精度至关重要。罗氏线圈凭借测量范围宽、响应速度快、频率特性好等优点，无需与被测电路直连，就能通过电磁感应准确测量电流，尤其适用于大电流和瞬态电流测量，能快速精准捕捉故障时电流的剧烈变化，为故障分析提供精确数据^[3]。电子式互感器采用先进电子和光学技术，测量精度高、绝缘性能好、体积小，可将测量信号直接转为数字信号传输，减少误差干扰。选用这些高精度传感器，可提高数据采集精度。此外，分布式故障指示器也需优化，无线通信技术让其能实时上传故障信息至监控中心，实现快速上报和远程监控；自供电技术采用太阳能、振动能等可再生能源供电，解决了传统故障指示器供电难题，确保其在各种环境下稳定运行，无需人工维护电源，提升了可靠性与可用性。

3.4 抗干扰与容错机制设计

在抗干扰与容错机制设计上，多举措保障故障精准查找。电网数据采集和传输时，会受电磁干扰、热噪声等影响，噪声混入故障信号会干扰特征提取与定位。小波变换去噪是有效的噪声滤波算法，它有多分辨率分析特点，能依据信号和噪声在不同频率段的特性差异，将信号分解成不同尺度小波系数，噪声多在高频部分，故障信号有用成分集中在低频部分。经处理去除高频噪声系数并重构，可得到去噪信号，

保留原始特征,提高信号质量,为故障分析提供准确基础。同时,电网运行中采集的数据可能出现异常值,影响故障判断。数据异常值修正算法通过分析历史数据建立正常模型范围,对新数据对比判定异常值并修正。冗余校验技术则采集多个相同或相关数据相互校验,如多位置安装传感器采集同一参数,发现异常数据并修正,提高数据可靠性与准确性,确保系统稳定运行。

4 现场应用与验证

4.1 试点区域选择与线路建模

为开展故障精准查找技术的现场应用与验证,选取一条约15公里长、具代表性且分支结构复杂的10千伏线路作为试点区域,其有5条主要分支和8条次要分支,多分支增加了故障定位难度,利于检验技术有效性。该线路负荷类型多样,工业负荷占比约40%,用电量、功率因数低且波动大;商业负荷占比约30%,用电高峰在白天营业时段;居民负荷占比约30%,用电高峰在晚上,不同类型负荷叠加使线路潮流变化复杂,对故障特征产生综合影响。同时,为全面验证技术性能,设计了多种故障模拟场景。短路故障模拟金属性和经过渡电阻短路,后者过渡电阻设为10-100欧姆;断线故障模拟单相和多相断线;接地故障模拟高阻和低阻接地,高阻接地电阻设为500-2000欧姆,低阻接地电阻设为10-100欧姆,覆盖实际各类接地故障。

4.2 技术实施流程

在技术实施流程中,数据采集与传输采用5G与LoRa通信结合方案。关键节点及需高速传数据的高精度传感器,像电子式互感器、罗氏线圈等,用5G技术,其高速率、低时延特性可实时准确地将电压、电流等大量电气数据快速传至云端分析平台,保障数据及时完整。分布广、数据量小且实时性要求低的分布式故障指示器等设备,则采用LoRa通信,它低功耗、远距离传输的优势能降低设备功耗、延长电池寿命,实现大范围覆盖并稳定传输故障指示信息至监控中心^[4]。同时,构建基于云端分析平台与边缘计算节点的故障定位系统,云端部署强大服务器集群和先进算法,可集中存储、处理分析海量数据;边缘计算节点靠近数据源,能初步处理分析本地数据,快速判断故障迹象,简单故障可直接定位反馈,实现快速响应处理,提高故障定位效率。

4.3 应用效果对比分析

在应用效果对比上,优化后的故障精准查找技术优势显著。传统故障定位依赖人工巡线和简单电气量测量,过程繁琐耗时,如处理复杂短路故障平均需2小时;而优化技术借高精度传感器实时采集、5G/LoRa高效传输及云端和边缘计算快速分析,10分钟内就能准确定位,大幅缩短时间,

提升供电可靠性。定位误差率方面,传统方法受测量精度等因素影响,对10千伏线路定位误差率平均达 ± 500 米,运维排查范围大;优化技术通过精确测量、先进算法和多技术协同,将误差率降至 ± 50 米内,提高定位准确性。经济性上,该技术减少停电损失,试点区域应用后每月因停电造成的经济损失平均减少约30%;还降低抢修成本,避免盲目排查和过度抢修,抢修成本平均降低约25%。

4.4 典型案例分析

在试点区域,有两个典型案例彰显了故障精准查找技术的成效。案例1中,雷雨天气里一条10千伏线路遭雷击,出现高阻接地故障。分布式故障指示器借LoRa通信将故障信息传至监控中心,高精度传感器采集的电气数据经5G传至云端。云端利用先进算法和多技术协同定位,迅速确定故障在第3条分支距主干约2.3公里处。运维人员据此赶到现场,发现是绝缘子被雷击破损,从故障发生到恢复供电不到30分钟,极大减少了停电损失。案例2里,施工导致一条10千伏线路单相断线,分布式故障指示器检测到电流异常后预警并上传信息。边缘计算节点初步判断为断线故障并传关键信息至云端,云端结合历史和实时数据确认故障,通知运维人员。运维人员赶赴前通过远程监控掌握情况、做好抢修准备,到达后迅速修复,避免故障扩大。同时,还加强了对施工区域的巡查和防护,有效预防了类似故障再次发生。

5 结论与展望

本研究聚焦10千伏配电线路故障精准查找难题,综合运用多源数据融合、智能化算法优化、硬件设备升级部署以及抗干扰与容错机制设计等手段,构建起适应复杂场景的故障精准查找体系。现场应用效果显著,该技术大幅缩短故障定位时间、降低定位误差率,减少停电损失与抢修成本,供电可靠性得以显著提升,典型案例也证实其在应对雷击、外力破坏等故障时有效且实用。展望未来,可拓展引入气象、地理信息等多源数据提升故障预测能力,探索量子计算、区块链等新兴技术在故障精准查找中的应用,助力实现更高效、安全、智能的故障诊断与处理。

参考文献

- [1] 蔡学广.10千伏配电线路施工管理[J].中国电力企业管理,2023,(36):66.
- [2] 徐永顺.10千伏配电线路防雷措施初探[J].中国电力企业管理,2021,(18):94.
- [3] 刘子卉.探索10千伏配电线路降损优化途径[J].中国电力企业管理,2019,(20):41.
- [4] 钟祥伟.10千伏配网线路故障因素与预防对策研究[J].科学技术创新,2018,(33):34-35.