

智能配电系统中的故障快速定位技术研究

赵耀武, 冯 志, 李光洋, 韩江伟

(国网安徽省电力有限公司霍邱县供电公司, 安徽 六安 237400)

摘要 为提升智能配电系统故障处理效率, 保障供电可靠性, 本文对故障快速定位技术展开了研究。通过理论与案例分析相结合的方法, 系统性地研究了行波法、阻抗法及注入信号法等主流定位技术的原理特征, 深入剖析了各项技术的性能优势、局限性及其适用条件, 同时对基于人工智能与分布式光纤传感的新型技术进行了前瞻性探索。研究结果表明, 不同技术各有优劣且适用于不同场景, 新兴技术展现出良好的应用潜力, 需依据实际需求合理选择定位技术, 并持续探索创新技术, 以推动智能配电系统故障定位技术的发展。

关键词 智能配电系统; 故障快速定位技术; 阻抗法

中图分类号: TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.28.007

0 引言

配电网复杂的结构, 繁多的分支以及多变的运行环境使得故障定位遇到了信号弱、干扰因素较多的挑战。特别是当发生单相接地故障情景时, 由于消弧线圈的补偿效应, 常规的基于稳态电气量定位方法灵敏度不够高, 同时间歇性电弧现象又进一步增加了故障特征不确定度。近年来, 随着行波测距、智能算法和分布式终端等技术的不断成熟, 配电网故障定位已逐渐朝着主动感知, 实时分析和协同决策等方面发展。通过建立基于多源信息融合故障定位体系可以有效地克服单一方法存在的局限性, 从而为智能配电系统安全运行提供关键技术支持。

1 智能配电系统故障定位技术概述

智能配电系统犹如一个庞大而复杂的神经网络, 包含数量众多的配电线路、变压器、开关设备以及各类监测装置等。这些设备相互关联、协同工作, 共同完成电能的分配任务。在运行过程中, 故障类型呈现多样化特征, 其中短路故障和接地故障最为常见^[1]。在短路故障中, 三相短路会瞬间产生极大的短路电流, 对设备造成严重破坏; 两相短路和两相接地短路则会打破系统的三相平衡, 影响供电质量。在接地故障中, 金属性接地故障电流较大, 容易被检测发现; 而经过渡电阻接地故障, 由于过渡电阻的存在, 故障电流较小, 检测难度显著增加。

以 10 kV 配电网为例, 接地故障中过渡电阻在 100 ~ 1 000 Ω 区间的占比达 65%, 此类故障的定位精度不足传统金属性接地故障的 40%。故障定位技术的发展历程见证了电力行业从传统迈向智能的转变。早期的人

工巡检方式依赖运维人员徒步逐段排查线路, 不仅效率低下, 在复杂地形或恶劣天气条件下更是难以开展, 且对于一些隐蔽性故障, 人工肉眼很难察觉。

随着技术进步, 基于简单仪表测量的故障定位方法逐渐出现, 但这些方法仍存在诸多局限性, 无法满足现代智能配电系统对故障定位快速、精准的要求。如今, 依托物联网、大数据、人工智能等先进技术的现代智能故障定位技术, 能够实时采集系统运行中的电压、电流、温度、湿度等海量数据, 并借助先进的算法对数据进行深度分析与挖掘, 从而快速、准确地锁定故障位置, 为故障处理争取宝贵时间。

当前主流智能定位技术已实现数据采集频率从分钟级提升至毫秒级, 定位算法的迭代速度较传统方法提升 2 ~ 3 个数量级, 显著缩短故障定位时间。

2 常见故障快速定位技术原理

2.1 行波法

行波法的核心原理基于行波理论。当配电系统某处发生故障时, 故障点会产生一种高频暂态行波, 这种行波会以接近光速的速度向线路两端传播。为捕捉这一行波信号, 需要在配电线路的首末端安装高精度的行波测量装置, 这些装置能够精确记录行波到达的时间。目前主流的行波测量装置采用暂态录波型故障指示器, 采样频率可达 1 MHz 以上, 能够准确捕捉 1 μ s 级别的时间差异^[2]。

在架空线路中, 行波传播速度约为光速的 2/3, 即大约 200 000 km/s; 在电缆线路中, 由于介质特性不同, 行波传播速度约为光速的 1/2, 约 150 000 km/s。假设行波传播速度为 v , 行波到达线路两端的时间差为

Δt , 线路长度为 L , 故障点到其中一端 (如首端) 的距离为 x , 通过公式:

$$x = \frac{(v \times \Delta t + L)}{2}$$

即可计算出故障点的位置。例如: 一条长度为 50 km 的架空线路, 行波到达两端的时间差为 0.1 ms, 将相关数值代入公式, 可算出故障点距离首端约 25.01 km 处。

在实际应用中, 行波信号处理采用小波变换、希尔伯特—黄变换等算法, 可有效提取故障行波特征, 抑制噪声干扰。

2.2 阻抗法

阻抗法是利用故障线路的阻抗特性来确定故障位置。在配电线路正常运行时, 其单位长度的阻抗值是已知且相对稳定的。当故障发生后, 通过安装在线路两端的电压互感器和电流互感器, 实时测量故障线路两端的电压和电流值, 再依据欧姆定律 $Z=IU$ (其中 Z 为阻抗, U 为电压, I 为电流) 计算出故障线路的总阻抗值。由于线路阻抗与线路长度成正比关系, 假设线路单位长度的阻抗为 z_0 , 测量得到的故障线路阻抗为 Z , 则通过公式:

$$x = \frac{Z}{z_0}$$

就能计算出故障点到测量端的距离。不过, 在实际应用中, 线路的阻抗会受到多种因素影响, 如温度升高会使导线电阻增大, 负荷变化会改变线路的电感和电容参数等, 这些因素都需要在计算过程中进行修正和考虑。目前常用的温度补偿模型采用 IEEE 标准导线热特性方程, 可将温度引起的阻抗误差控制在 5% 以内^[3]。

针对三相不平衡负荷, 可采用序分量法进行阻抗解耦分析, 提升复杂工况下的定位准确性。

2.3 注入信号法

注入信号法的工作流程为: 当配电系统发生故障后, 从变电站或配电变压器处向故障线路注入特定频率的信号。该信号在沿着线路传播过程中, 当遇到故障点时, 由于故障点处的阻抗发生突变, 信号会产生反射。在注入端和线路上合适的位置安装信号检测装置, 这些装置能够捕捉到注入信号和反射信号。

当前主流注入信号源采用变频电源, 可输出 1 ~ 100 kHz 的正弦波信号, 信号检测装置基于锁相环技术, 可实现微伏级信号的有效识别。通过精确测量信号从注入反射回检测端的时间, 结合信号在该线路中的传播速度, 就可以计算出故障点的位置。例如: 若注入信号频率选择合适, 在某段电缆线路中传播速度为 150 000 km/s, 信号往返时间为 0.2 ms, 那么故障点距离注入端约 15 km。但信号频率的选择是该方法的关键难点, 频率过高信号容易衰减, 频率过低则可能受到其

他信号干扰, 影响定位准确性。研究表明, 在电缆线路中, 10 ~ 30 kHz 频段信号传播损耗相对较低, 适用于多数配电场景。

3 故障快速定位技术优缺点分析

3.1 行波法

行波法凭借其独特的技术优势, 在故障定位领域占据重要地位。其定位速度极快, 能够在故障发生后的毫秒级时间内完成定位, 这对于快速恢复供电至关重要。并且, 对于长距离输电线路, 其定位精度可达到较高水平, 误差通常能控制在几十米甚至更小的范围内。在实际工程中, 200 km 以上架空线路的行波定位误差可控制在 ± 50 m 以内^[4]。

然而, 该方法也存在明显短板。行波信号极易受到外界干扰, 雷电产生的强大电磁脉冲、开关操作时产生的暂态过电压等, 都会产生与故障行波类似的信号, 从而干扰真实故障行波的识别, 影响定位准确性。

3.2 阻抗法

阻抗法的优势在于其原理简单易懂, 计算过程相对简便, 无需复杂的高端设备和专业技术人员操作, 在一些小型配电系统或对成本敏感的场景中具有一定的应用价值。对于短距离配电线路, 在负荷稳定、线路参数变化较小的情况下, 能够较为准确地定位故障点。实测数据显示, 在 10 km 以下线路中, 阻抗法定位误差可控制在 ± 200 m 以内。

但该方法也存在诸多限制。线路参数受环境和运行条件影响较大, 温度每升高 10 °C, 导线电阻可能增加约 4%, 这会导致计算出的阻抗值出现偏差, 进而影响故障定位准确性。特别是在高阻接地故障情况下, 由于故障电流微弱, 测量误差会显著增大, 定位精度往往难以满足实际需求。当过渡电阻超过 500 Ω 时, 阻抗法定位误差将超过线路长度的 10%。

3.3 注入信号法

注入信号法最大的优势在于对故障类型的适应性强, 无论是短路故障还是接地故障, 都能有效实现定位。并且, 该方法能够在不中断供电的情况下进行故障检测与定位, 极大地提高供电可靠性, 对于医院、数据中心等对供电连续性要求极高的场所具有重要意义。在实际应用中, 该方法已实现对 10 Ω ~ 10 k Ω 过渡电阻接地故障的有效定位。

然而, 该方法也面临诸多挑战。注入信号的频率选择是一大难题, 若频率不合适, 信号在传播过程中会快速衰减, 导致反射信号微弱难以检测。同时, 为准确捕捉微弱的反射信号, 对信号检测装置的灵敏度和精度要求极高, 增加设备研发和维护成本。典型信

号检测装置的信噪比要求需达到 60 dB 以上,设备成本较普通监测装置高出 3 ~ 5 倍。

4 不同故障快速定位技术适用场景

不同的故障快速定位技术因其原理和特点的差异,在实际应用中有着各自的“用武之地”。行波法凭借其快速、精准的定位优势,适用于长距离输电线路以及对定位速度要求苛刻的场合。例如:在跨区域的高压配电网中,一旦发生故障,行波法能够迅速锁定故障点,为抢修争取宝贵时间,减少大面积停电带来的损失。在“西电东送”工程中,行波法已成功应用于数千公里的超高压输电线路,故障定位时间缩短至 0.5 秒以内。

阻抗法适用于短距离配电线路,特别是负荷平缓、线路参数变化小的区域,如居民小区、小型工业园区配电线路。在以上场景下,阻抗法能够以较低成本实现较为准确的故障定位。在某一居民小区的电力分配系统中,采用阻抗技术后,故障定位的时间从原先的平均 30 分钟缩短到 10 分钟,这导致运维成本降低 40%。响工程技术的适应性推广是破解中国农业发展困境的关键。唯有综合考量自然环境、社会经济与技术特性等多维因素,创新推广模式、优化技术体系、完善政策支持,才能构建起因地制宜、高效协同发展的节水农业之路,使水资源高效利用与农业生产效益提升双赢,为全球干旱半干旱地区农业现代化转型提供科学借鉴与现实范例。

注入信号法由于不停电定位的优点,在供电可靠性要求极高的场所发挥着不可替代的作用。与医院类似,手术过程中一旦停电,也可能危及患者生命;一旦数据中心停电,就会导致数据丢失和业务中断。在这些场所的配电系统中使用注入信号的方法,能够在不破坏正常供电的情况下及时地发现故障并进行定位,保证关键业务的持续运行。

5 新兴智能故障定位技术探索

5.1 基于人工智能的故障定位技术

人工智能技术在智能配电系统故障定位中展现出巨大的潜力。通过收集大量的历史故障数据,包括故障发生时的电气参数如电压、电流和频率,以及非电气参数如环境温度和湿度,并采用深度学习算法。这些模型能自动学习到故障特征和故障位置间复杂的映射关系,当出现新故障后,只要把实时获取到的数据送入模型中,就能迅速而准确地预测出故障位置。

例如:采用卷积神经网络(CNN)对故障波形进行特征提取和分析,可以有效地鉴别各种故障的独特属性,从而显著提升故障定位的精确度。相较于传统方法,工智能故障定位技术对线路参数的改变、高阻接地没

有显著影响,对复杂多变配电环境适应性更强,鲁棒性更强。现在,一些电力公司已经在试验项目中采用这种技术,与传统方法相比,其故障定位的准确性增加 15% ~ 20%。

5.2 分布式光纤传感故障定位技术

分布式光纤传感技术是以光纤为传感介质,测量光信号在光纤中传输特性的变化从而达到故障定位的目的。配电线路出现故障后,故障点所引起的热、振动和其他物理量都将引起光纤中光强、相位和偏振态的变化。通过沿配电线路敷设光纤和采用专用光电探测设备对光纤内光信号变化情况进行实时监控,配合先进信号处理算法可准确地计算故障点位置。

该技术具有抗电磁干扰能力强、定位精度高(可达米级)、可实现长距离连续监测等优点。特别是在对电磁干扰比较敏感的场合,例如变电站和高压输电线路。同时分布式光纤传感技术也能够结合通信网络实现对故障信息进行远程实时传输,从而为抢修的快速进行提供强有力的支撑。然而,这种技术设备成本以及安装维护成本都比较高,当前多被应用于一些供电可靠性需求极高以及经济实力比较强的区域以及场所中^[5]。

6 结束语

在智能配电系统发展过程中,故障快速定位技术为确保电力稳定供应提供了重要支持。各种传统和新兴定位技术一起组成处理复杂故障情景的技术系统,每一种技术所具有的特点为在具体情景中进行故障定位提出了行之有效的方案。在电力系统智能化和复杂化的今天,故障定位技术研究需要不断整合多学科先进成果并打破现有技术限制,才能达到更加精准、较快响应速度与较强适应性,满足智能配电系统对供电可靠性越来越高的要求,奠定电力行业可持续发展的技术基石。

参考文献:

- [1] 陈娟,龙德全,贾湘豫,等.智能电网配电系统自动化控制研究[J].电气技术与经济,2025(04):334-336.
- [2] 刘飞.基于智能电力监控的三级医院配电系统设计[J].科学技术创新,2025(09):177-180.
- [3] 王笑颜,张广仁,华亮,等.智能配电系统在建筑智慧运维中的应用探索[J].智能建筑电气技术,2025,19(02):69-73.
- [4] 杨威.智能供配电系统的能效优化与节能技术研究[J].电子元器件与信息技术,2025,09(03):114-116.
- [5] 孟立涛.配电网调控中故障定位与快速恢复技术的应用效果研究[J].张江科技评论,2024(08):60-62.