

# 复杂配电网线路行波故障定位方法的研究

王子剑 王晗

国网邯郸供电公司

**摘要:** 随着电力系统的不断发展和智能化水平的提升,配电网的故障定位技术逐渐成为研究的热点。本文探讨了复杂配电网线路波故障定位方法的研究,介绍了行波故障定位技术的基本原理,即分析由故障引起的行波传播特性来实现定位。接着分析了影响行波传播和测量的关键因素,包括传播速度、衰减规律、反射和折射规律、传感器技术以及数据分析方法。讨论了不同类型传感器的性能指标对定位精度的影响。同时阐述了传感器的最佳布置策略。数据分析方面,强调信号预处理、特征提取、故障定位算法和结果验证的重要性。

**关键词:** 行波故障定位; 复杂配电网; 行波传播; 传感器技术; 数据分析

【DOI】 10.12252/j.issn.2096-627X.2022.08.091

## 引言

为复杂配电网开发精确的故障定位技术,对于提高电网恢复能力、稳定性和服务质量至关重要。但是,应用于错综复杂的现代电网时,传统保护和测量设备在速度和精度方面存在局限性。基于行波的故障定位方法已成为一种有前景的解决方案。通过利用故障产生的高频瞬态信号,可以实现更高的定位精度。最近的政策指令,包括2022年电网现代化计划和2023年电力行业创新计划,强调需要培育像行波故障定位器等创新技术,以增强电网的分析和控制能力。

### 一、行波故障定位技术的基本原理

行波故障定位技术是建立在行波在电力系统中的传播规律基础上的一种故障分析和定位方法。当配电网中发生各类短路或接地故障时,都会在故障点产生高频的暂态行波。这些行波带有发生故障的瞬时信息,以接近光速的速度沿电力线路传播,在遇到线路上的各种波阻抗不连续点时,会发生反射和折射现象。行波故障定位系统通常布置有电压、电流传感器,这些传感器可以捕获传播或反射的行波信号。系统利用行波从故障点发出到被传感器测量所花费的时间差,结合该线路的参数,采用数学运算和信号分析,可以算出行波传播的距离,最终定位确定故障点的具体位置。相比基于电力系统稳态参数计算的保护装置,行波故障定位可利用高频瞬变信号实现快速高精度定位,不受故障电阻、过渡电阻影响,适用于各类故障的检测与定位。在行波故障定位中,常用的测量信号包括电压行波和电流行波,其中电流行波受干扰较小、稳定性更好,因此在工程实践中,多采用电流传感器获取电流行波信号来实现对电力故障的有效并快速地定位。

### 二、行波传播特性

#### 1. 行波传播速度

行波在电力线路中的传播速度受到多种因素的共同

影响,主要决定因素包括导线的材料构成、截面尺寸和线路绝缘介质状况等。一般来说,在常规架空线路中,受日射加热使导线产生一定温升的条件下,10-30kV电压等级铝绞线的行波传播速度约为0.93倍光速;在一些特殊案例如山地高寒地区,由于导线温度较低,爬升期铝绞线行波传播速度可能低至0.8倍光速。与架空线路相比,电缆线路由于受绝缘层材质影响更大,如10kV XLPE绝缘电缆行波传播速度普遍在0.5-0.6倍光速,相对较低。另外值得注意的是,架空线路发生短路故障后的行波传播速度也会受影响产生改变量:过渡故障期间,由于导线迅速升温,行波传播速度可临时增加10%以上;而故障清除后,亦可能出现一定时间的速度衰减现象。因此,为实现高精度的行波故障定位系统,有必要根据线路实际运行参数建立数学模型,实现针对不同线路、不同工况的行波传播速度的准确辨识,这将有助于后续数据分析和故障点定位计算的提高准确率。

#### 2. 衰减特性

行波在电力线路上传播时会发生一定的衰减,这种衰减主要源于线路固有的电气参数对信号的损耗作用,包括电阻消耗、电感和电容耦合损耗等。这种衰减表现为行波信号振幅和能量的逐渐减小,严重影响行波在线路上传播的距离。影响行波衰减的因素较多,其中线路长度是主要因素,波在线路中传播的距离越远,衰减越明显。此外,电力线路的材质和截面也会对行波产生不同程度的衰减效应,例如铝绞线较铜绞线、细导线较粗导线更容易引起行波衰减。一般来说,10kV配电网中10-20公里的架空线路对行波信号衰减在10%左右,而同长度的电缆线路可达20%以上。严重的行波衰减不利于获取清晰完整的行波波形,降低了行波定位系统的测距范围和精度。为实现高性能的行波故障定位,需要通过优化线路结构来减小行波在传播过程中的衰减量。常用优化手段包括采用大截面导线、优化绝缘子悬挂高度、

使用低损耗材料等技术手段来减小线路参数和耦合对行波的影响。此外，补偿滤波、自适应增益控制等数字信号处理技术的应用也可针对线路衰减的随机性获得一定的校正效果，提升行波信号的可用性。

### 3. 反射和折射规律

行波在电力线路上传播过程中，当遇到线路波阻抗的不连续点或突变点时，必然会出现反射和折射现象的产生。这些反射或折射点主要集中在线路的各种故障地点、分支点以及其他过渡电阻突变区域。产生反射和折射的本质原因在于这些点处的电气参数突变，导致进入点前和点后波阻抗值发生了急剧变化。根据传播理论，当入射行波的波长远小于障碍物的几何尺寸时，反射和折射的程度与波阻抗的变化幅度成正比。在配电网中，线路故障点、导线连接点以及Tap分接头都是典型的波阻抗变化区域，当行波进入这些区域时很容易发生反射。另外，支路和主干路径的波阻抗差异也会导致行波产生折射效应。这些强烈的反射和折射行波携带丰富的故障特征信息，通过分析检波器测量所获得的反射或折射行波的到达时间和信号波形参数，采用数学模型运算，可以有效识别故障点的位置和故障类型。例如，在支路反射波激波波头之前检波到达的行波为进波，其时间反映了波从检波器到故障点的传播距离。反射波的极性、幅值也与故障性质相关。因此，反射和折射波的分析是构建高性能行波故障定位系统的技术基础。

## 三、传感器技术

### 1. 传感器类型

行波故障定位系统需要专门的传感设备来获取线路上含有故障特征信息的电气信号，按测量物理量，常用的传感器类型主要包括电流传感器和电压传感器两大类。其中电流传感器是实现行波定位的首选传感部件，工作原理是通过安装在线路导线或设备端子上的互感器件，采用电磁感应的方式，准确地将大电流转换为标准化的微小信号电流或电压输出，从而实现线路中数百乃至上千安培级的短时冲击电流或高频行波电流的精确复制。这类电流互感传感器包括传统的电流互感器、Rogowski电流互感器、光纤传感器等类型。它们能以很宽的频率响应范围在不对主电路产生影响的前提下获取丰富的行波电流信号。此外，电压型传感器也用于某些场合，特点是通过直接接触或电容耦合方式获取导线与大地间的电压，典型器件有电容分压器、电压互感器等。但其频率响应范围和灵敏度较电流互感器差一些。无论何种类型的行波传感器，为获得清晰可靠的行波波

形，都需要具备较宽频宽、快速暂态响应特性。此外，传感器的带宽特性还决定了其对高频行波数量的覆盖能

### 2. 传感器性能

传感器的技术指标和性能水平是保证行波故障定位系统能够高效、准确工作的基础。对行波定位准确度影响最大的传感器性能指标主要集中在几个方面：第一是灵敏度和最小可测量水平。高灵敏度使传感器能够检测到远端或衰减严重的微弱行波，这对扩大系统规模、应用于长距离输电线路至关重要。典型要求是传感器能够检测到0.1%的线路额定电流，以保证获取较弱反射波或折射波。第二关键指标是动态范围，这决定了传感器对行波信号检波的动态范围和分辨细微波形的能力。一般要求传感器动态范围高达150dB以上，以实现从数十安培小信号到数百kA以上大电流的同时测量。第三是频率响应范围与波形记录长度，这关系到传感器对行波宽频段成分的覆盖和捕捉时间窗的大小，200kHz以上带宽及20微秒左右的波形存储时间是行波定位的基本需求。除此之外，环境适应性能好、可靠稳定是传感器的必要条件。在线监测的特点还要求传感器完全避免对主线路的干扰。

### 3. 传感器布置

传感器的设置位置和布置方式对行波故障定位系统的性能指标有重大影响。优化的传感器布置有助于减少噪声干扰，提高对故障行波的捕捉灵敏度，是实现高可靠性和定位精度的重要手段。目前，传感器布置主要遵循以下几个原则：第一，重点区域密集设置。根据统计研究，配电网路上不同区域的故障率存在差异，应重点密集安置传感器，覆盖故障率较高的线路和设备。第二，关键节点优先设置。在主分支点、组接箱等阻抗变化剧烈的区域首先设置传感器，这些区域反射和折射效应明显，有利于提高定位可靠性。第三，减少传感死区。由于行波信号衰减影响，应适当增设传感器以减少测量盲区。第四，噪声抑制优化。通过调整传感器在线路上确切的挂装位置，可以利用线路参数抑制噪声，避开部分噪声源的影响。此外，在数字信号处理层面，还可以采用相关算法自动识别和消除噪声成分。针对行波定位系统的关键指标，传感器的设置需要兼顾对故障行波检测灵敏度的提高和对干扰信号的抑制。

## 四、数据分析方法

### 1. 信号预处理

针对采集到的行波信号，为了提高后续分析的准确性，需要进行必要的信号预处理来提高信号质量。具体

而言,由于实际配电线路环境复杂,测量信号中不可避免地混入了各种噪声,例如由于开关操作、负载变动引起的脉冲干扰,天气原因产生的随机噪声等。这些噪声成分如果不加以控制,将对后续特征提取和定位分析造成干扰。因此,需要通过信号滤波的方法消除噪声。一般采用带阻滤波器可有效滤除高频噪声。对于极低频的噪声,则可以通过高通滤波进行去除。同时,由于不同传感器的量程响应可能存在差异,需要进行归一化处理,使信号幅值映射到统一量化范围内,方便不同传感器采集信号的比较。此外,还需要检查信号的时域连续性,发现并修复由于传感器故障造成的波形缺失情况。经过上述预处理后,行波信号质量可以明显改善,有效成分被提取提升,干扰噪声被压制减弱,使后续的特征提取和分析更加准确可靠。

## 2. 特征提取

在对原始行波信号进行预处理过滤干扰噪声后,下一步就是需要提取出有效的故障特征信息以供定位分析。主要的特征参数包括行波在传感器测量点的到达时间、幅值大小和频率成分。为获取这些关键特征数据,可以采用时域分析、频域分析或时频结合分析等信号处理方法。具体而言,从时域波形上可以识别不同行波组分的到达时间,并通过电力系统参数计算波的传播距离,这是实现基于行波抵达时间差的故障定位算法的基础。同时,时域波形还包含幅值信息,通过测量波峰值可以判断故障类型,也可用于行波识别。而从频域分析的角度看,故障引起的不同类型行波其主要频率成分各不相同,例如早期线路参数突变引起的高频性行波和后期放电形成的低频信号,频谱分析可以有效识别这两类行波。另外,还可以应用小波变换等时频方法,在时间和频率两个维度上共同分析行波信号,既考查时域特性又观测频域特征,提取更丰富的模式信息。将上述多种特征提取方法有机结合,可以形成行波的特征指纹,标识不同类型故障,有利于精确判断故障位置。

## 3. 故障定位算法

在获取了行波信号的关键特征参数后,下一步就是研究选择什么样的故障定位算法,以实现故障点位置的准确判断。目前较为常用的故障定位算法可以分为两大类:一是基于行波传播时间差的定位方法,二是基于行波形态识别的定位方法。基于时间差方法的基本原理是通过测量同一故障产生的行波在不同传感器位置的到达时间差,结合导线的参数,采用三边量测或多点量测的数学模型,可以反算出行波的传播距离,从而定位故障位置。这种方法计算简单直观,但需要较精确的到达

时间数据支持。基于行波形态识别的方法则是通过事先建立一个行波模式库,收录各种典型故障情况下的行波特征波形。当实际发生故障时,通过匹配波形找到最相似的一组模式,即可推断故障位置。这种方法对信号噪声有一定抵抗力,但需要大量的事先波形训练。针对实际应用,可以根据线路长度、传感器布置和噪声水平等条件,选择使用时间差定位法或模式识别法,也可以考虑合理融合两种算法的优点。

## 4. 结果验证与优化

在得到初步的故障定位结果后,必须进行进一步的验证与优化,以提高结果的准确性和可靠性。首先需要通过实际操作验证结果的正确性,即人工找到实际的故障位置,与系统定位结果进行比较,如果两者吻合,则验证了该次定位的有效性。如果存在偏差,则需要分析定位误差的原因,可能的原因为传感器数据误差,算法模型不适用,甚至线路参数错误等。找到误差源后,需要反向调整传感器布置方案,改进信号处理算法,修正线路参数数据等,进行定位模型的修正,以提高系统的自学习和适应能力。此外,如果某些故障类型的定位误差明显较大,则需要针对这类故障单独建立定位模型,进行专题优化。同时,可以收集定位结果的大数据,采用深度学习等方法,训练系统自动校正定位偏差。如果功能区划分明确,也可以仅针对某一区域进行局部模型调优。

## 结束语

复杂配电网络的行波故障定位技术研究仍面临诸多挑战,亟须深入开展。本文系统梳理了该领域的基本原理、影响因素、技术难点等,为后续研究提供了框架和指导。关键是继续提高传感设备性能,优化数据处理算法,实现高精度实时定位。此外,将行波技术与AI、大数据等前沿技术结合,建立自动化、智能化的联合故障分析平台,也是重要的研究方向。总体而言,行波故障定位技术展现出广阔的应用前景。本文内容可为行业和学术界深入开展理论创新、工程应用、标准制定等方面的工作提供借鉴。相信通过不断努力,必将研发出适用于未来智慧电网的精确、可靠的行波故障定位新技术。

## 参考文献

- [1]唐禹强. 配电网故障定位方法研究[J]. 光源与照明, 2021, (11): 129-131.
- [2]王德海, 傅洪全, 陈曦等. 电力输配电线路运行短路故障自动检测方法研究[J]. 制造业自动化, 2021, 43(11): 173-177.