

输电线路单端行波测距法和双端行波测距法的对比

覃 剑¹, 葛维春², 邱金辉², 郑心广²

(1. 中国电力科学研究院, 北京市 100085; 2. 辽宁省电力有限公司, 辽宁省沈阳市 110006)

摘要: 介绍了单端行波法和双端行波法的原理, 研究和分析了实际应用过程中单端法和双端法误差产生的主要原因, 同时对单端法和双端法的优缺点进行了比较, 为实现行波法准确故障定位提供了依据。

关键词: 故障测距; 输电线路; 单端行波测距法; 双端行波测距法

中图分类号: TM773

0 引言

对 220 kV 及以上电压等级的电网, 当线路发生故障后, 必须进行寻线, 以寻找故障点, 根据故障造成的损坏程度判断线路能否继续运行还是须停电检修。高压输电线路故障的准确定位, 能够缩短故障修复时间, 提高供电可靠性, 减少停电损失。对于占绝大多数的能够重合成功的瞬时性故障来说, 准确地测出故障点位置, 可以区分是雷电过电压造成的故障, 还是由于线路绝缘子老化、线路下树枝摆动造成的故障等, 从而及时发现事故隐患, 采取有针对性的措施, 避免事故再次发生。因此, 线路故障后快速寻找故障点就成为保证电网安全稳定运行的一项关键技术, 也是长期以来困扰电网运行的主要难题之一, 输电线路精确故障定位具有重要意义。

1 行波测距法

故障测距的任务就是当线路的某一点发生故障时, 通过线路两端的实测电流、电压及线路阻抗等参数计算出故障距离。通常, 输电线故障测距方法有 2 类: 一类是阻抗法, 是直接计算故障阻抗或其百分比的算法; 另一类是行波法, 利用高频故障暂态电流、电压的行波等来间接判定故障点的距离。

现有的故障录波器及保护装置上的测距方法都是基于阻抗法, 由于原理上的缺陷, 过渡电阻、系统阻抗、负荷电流等因素都会对测距精度产生影响。国家标准虽然对故障录波器的测距精度要求为 3%, 但在高阻接地等故障情况下, 一般录波器和保护装置的该项指标很难达到。

行波测距建立在考虑输电线路的分布参数、直接利用故障产生的暂态行波信号并对其进行分析和

计算的基础之上^[1~4]。从 20 世纪 70 年代开始, 电力系统开始了对行波技术的应用研究, 但由于受许多相关技术的制约, 例如行波信号的获取方法、精确定时问题、数据处理方法等, 一直没有真正解决实际生产运行中的相关问题。

原先制约行波测距法应用的 2 个主要因素为:

1) 由于故障发生时刻的不确定性、母线接线方式不确定性造成反射波的不确定性, 以及故障距离的变化导致行波主频率的不确定性等因素造成的故障分量的提取和计算算法上存在问题。初始行波到达母线后, 行波电压和电流都将呈现尖锐变化, 即线路故障产生的暂态行波是一个突变的、具有奇异性的信号, 因此, 无论是单纯的频域分析法(例如匹配滤波器法和主频率法), 还是单纯的时域分析法(例如求导数法和相关法), 都不能精确描述暂态行波这类非平稳变化信号。

2) 如何精确确定故障行波的到达时间和行波传播速度的问题。故障行波在输电线路上传播时以不同模式传播, 每种模式中各频率分量的传播速度和衰减也不尽相同, 使行波在输电线上传播时产生色散, 造成行波到达时间难以准确判断。同时, 行波传播距离较近时, 行波中高频分量丰富, 这部分高频分量以接近光速传播; 而行波传播距离较远时, 行波中高频分量减少, 波头中相应高频分量会以相对较低的速度传播, 使行波传播速度难以准确选取。无论是单端行波法还是双端行波法, 故障距离都主要由以下 2 个参数决定: 一是时间参数——故障行波到达时间差; 二是速度参数——故障行波传播速度。原有行波测距法基本上都没有把由该方法所确定的行波到达时间与故障定位用行波传播速度很好地结合起来, 导致定位精度可能较低, 而且可能受故障点位置、故障电阻大小、故障类型等的影响。

20 世纪 90 年代末,行波研究取得重大进展,以上 2 个问题得到了较好的解决^[5],并开发研制完成了利用小波变换技术的基于行波法的测距装置。行波原理的测距装置显示出很大的优越性。

2 单端行波测距法

2.1 原理

对一般性故障,单端行波测距的关键是准确求出行波第 1 次到达测量端与其从故障点反射回测量端的时间差,并且包括故障行波分量的提取。

单端行波测距依据的公式主要为:

$$l = \frac{(t_2 - t_1)v}{2} \quad (1)$$

式中: l 为故障点距离; t_1, t_2 分别为故障产生行波第 1 次到达测量点的时间及其从故障点反射回测量点的时间; v 为行波传播速度。

对高阻故障而言,单端行波测距的关键是准确求出行波第 1 次到达测量端与从对端母线反射回测量端的时间差,其测距依据的公式主要为:

$$l = L - \frac{(t_3 - t_1)v}{2} \quad (2)$$

式中: L 为线路长度; t_3 为故障产生行波从对端母线反射回测量点的时间。

常用的单端行波测距算法有求导数法、相关法、匹配滤波器法、主频率法和小波变换法等。求导数法是根据在检测点测到的行波的一阶或二阶导数是否超过设定的阈值来判断行波是否到达母线的一种时域方法,当行波中含有高频分量时该方法的效果较好(近距离故障),但该方法对噪声比较敏感,测距精度不高。相关法是利用互相关函数求出到达母线行波及其从故障点反射回母线的时延,进而求出故障位置的方法,由于受多种因素影响,实际应用有一定困难。匹配滤波器法是建立在相关法基础上的方法,它可通过使用高通滤波器来反应行波波头分量以提高测距可靠性,并已在实际中应用,但其测距结果受母线端所连接的输电线数目等因素影响。主频率法的核心是由行波中频谱最强的分量决定故障距离(即 $f=2v/l$, 其中 f 为主频率),其思路主要是从较长时间段来考察行波频率范围,使所求行波主频较低而且定位精度也受到影响。小波变换具有在时域、频域表征信号局部特征等特点,非常适合分析故障行波信号,但应用小波变换技术时若没有考虑行波传播过程中的色散影响,没有选择合适的小波及尺度,测距精度也会受到影响。因此,以上几种算法使用时都受到一定条件的限制。

2.2 应用时产生误差的主要原因

单端行波法产生的误差主要是原理性误差。由于行波在特征阻抗变化处的折反射情况比较复杂,非故障线路不是无限长,由测量点折射过去的行波分量经一定时间后又会从测量点折射回故障线路,受这些因素的影响,使得行波分析和利用单端行波精确故障测距有较大困难。若反射或透射回测量点的行波识别错误,则测距误差大小是不确定的。但基于单端法的测距装置的测距结果基本不受线路两端设备和硬件的时间不一致性的影响,且除高阻故障外,测距结果基本不受线路长度误差的影响。

2.3 优缺点

单端行波测距法的优点主要是:

1) 单端行波测距法较双端行波测距法的成本降低一半以上,可以不需要全球定位系统(GPS)及两端数据通信等,测距结果的实时性高。

2) 如果准确判断出故障点反射或透射回测量点的行波,由于测距结果基本不受线路两端设备和硬件的时间不一致性的影响,故测距精度能够满足电力系统对精确故障定位的要求,通过对现场故障数据分析,测距误差在 500 m 以内。

单端行波测距法的缺点主要是单端法原理存在较大缺陷。行波的极性和幅值是行波最重要的特征之一,在很多线路结构和故障情况下,无法进行单端测距,同时,单端测距还会存在测距死区的问题。若想用单端行波法实现可靠测距,需要结合阻抗法进行联合单端测距,在单端行波法失效的情况下,用阻抗法的测距结果作为补充,这样才能弥补单端行波法和单端阻抗法各自的不足,实现可靠的故障定位。

3 双端行波测距法

3.1 原理

双端行波测距是通过计算故障行波到达线路两端的时间差来计算故障位置,其测距精度基本不受线路的故障位置、故障类型、线路长度、接地电阻等因素的影响。它依据的公式主要为:

$$l_1 = \frac{L - (t_2 - t_1)v}{2} \quad (3)$$

$$l_2 = \frac{L - (t_1 - t_2)v}{2} \quad (4)$$

式中: l_1, l_2 分别为故障点到两端的距离; t_1, t_2 分别为行波到达线路两端的时间。

双端行波法的关键是准确记录下电流或电压行波到达线路两端的时间,误差应在几微秒以内,以保证故障测距误差在几百米内(行波在线路上的传播

速度近似为 $300 \text{ m}/\mu\text{s}$, $1 \mu\text{s}$ 时间误差对应约 150 m 的测距误差)。它需要专用的同步时间单元。随着 GPS 的广泛应用, 利用接收 GPS 的卫星信号可以获得精度在 $1 \mu\text{s}$ 以内的时间脉冲。现在一般都将 GPS 作为双端行波法的同步时间单元。

3.2 应用时产生误差的主要原因

1) 测距装置固有的原理性误差。由于采用不同的分析方法, 各种双端行波法的测距精度也相差较大。对于考虑行波色散的影响并采用小波变换技术对行波数据分析计算, 该项误差可以较小^[5]。但对于监测有多回线路结构的行波测距装置, 双端行波法原理上存在一定的缺陷。图 1 所示在母线 M 和 N 之间的二回线路, 它们的长度分别为 L_1 和 L_2 , 且有 $L_1 > L_2$ 。假设在线路 L_1 的位置 G 发生短路故障, 故障点 G 位于母线 M 侧, 它与 M 距离为 $l_1 < L_1 - L_2$ 。故障位置 G 产生了如图 1 所示的向线路两端运动的电流行波 i_1 和 i_2 , 电流行波 i_1 在 M 处产生透射到线路 L_2 上的电流行波 i_3 , 电流行波 i_3 通过线路 L_2 运动到母线 N , 再透射到线路 L_1 上产生电流行波 i_4 。由于 $l_1 < L_1 - L_2$, 则 $l_1 + L_2 < L_1$, 即电流行波 i_4 比电流行波 i_2 先到达母线 N , 因此式(3)、式(4)的双端行波法公式无法直接使用, 这种情况在多回线路结构发生故障时同样会出现。

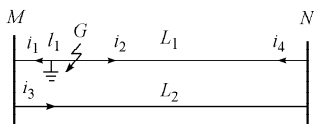


图 1 二回线路故障点行波信号折反射
Fig. 1 Traveling wave propagation

若 l_1 与 $L_1 - L_2$ 相差较大, 例如 $L_1 - L_2 - l_1 \approx 3 \text{ km}$, 则电流行波 i_4 比电流行波 i_2 先到母线 N 约 $10 \mu\text{s}$, 采样频率较高时, 可以通过母线 M 测量到的电流行波 i_1 的极性来区分出电流行波 i_4 (与 i_1 反极性) 和电流行波 i_2 (与 i_1 同极性) 分别到达 N 的时间, 这时仍可通过式(3)、式(4)测距。若 $l_1 \approx L_1 - L_2$, 则很难区分出电流行波 i_4 和电流行波 i_2 到达 N 的时间, 这时双端行波法的测距结果会产生一定的误差。

2) 给定被测线路长度 L 的误差。由式(3)、式(4)可见, 双端行波测距法要求给定的被测线路长度是准确的。线路长度的误差 ΔL 将会导致 $\Delta L/2$ 的测距误差。通过测距装置的长期运行经验和输电线路长度的设计和实测方法可知, 一般输电线路的给定长度是杆塔间的水平地理距离之和, 较少考虑线路的弧垂影响, 即使考虑线路的弧垂影响, 而线路的

弧垂受天气和线路负荷等因素的影响较大, 而且导线弧垂与杆塔结构有关, 尤其当 2 个杆塔跨河流和山脉时, 其挡距一般为 $500 \text{ m} \sim 2 \text{ km}$, 此时杆塔间导线形状一般为悬链线, 弧垂较大, 因此线路给定长度会与实际长度有一定的误差。通过安装测距装置发现并证实的原先给定长度有较大误差的线路就有福建与华东联网的 500 kV 福双线、辽宁的 220 kV 清虎乙线等, 个别线路长度误差达 20 km 。由于测距装置的测距误差在 500 m 以内, 用测距装置能够校核出误差大于 1 km 线路的实际长度, 校核线路长度的误差也可保证在 500 m 以内。

3) 线路两端电流互感器时延不一致导致的固定时间误差。由于线路电流互感器时延小于 $1 \mu\text{s}$, 两端电流互感器的时延一般在 $1 \mu\text{s}$ 以内。

4) 线路两端电流互感器二次侧到测距装置屏的电缆长度差。每 100 m 电缆长度差将导致约 $0.7 \mu\text{s}$ 的固定时间误差。

5) 线路两端测距装置硬件产生的时间误差。包括: 两端信号传感器的固定时延误差, 一般在 $1 \mu\text{s}$ 以内; 以两端 GPS 时标产生的随机误差, 一般在 $1 \mu\text{s}$ 以内; 高速采集板等硬件误差。

以上由第 3 至第 5 个因素造成的各项误差有正有负, 累积误差一般较小, 对测距结果不会造成较大影响; 但对个别线路, 如果各项误差正好都为正或负, 将会产生一定的积累误差, 影响计算公式中 $v(t_2 - t_1)$ 的值, 导致一个固定测距误差, 对测距结果造成一定影响。对于固定误差, 可以通过多次故障来修正。

3.3 优缺点

双端行波法的优点主要是:

1) 由于母线两端都只检测第 1 个到达的行波, 线路的过渡电阻的电弧特性、系统运行方式的变化 (是否多分支线路等)、线路的分布电容以及负荷电流等对测距复杂性不会造成大的影响, 因此, 双端行波法比单端行波法测距结果的可靠性更高。

2) 双端行波法的测距结果一般能够满足电力系统对精确故障定位的要求, 测距误差可以在 500 m 以内。

3) 由于输电线路的长度参数一般都是通过设计参数或实测参数得到, 设计参数一般与线路施工后的实际参数会有一定差别, 同时, 实测输电线路长度时, 都是通过测量线路的有关工频参数来推算线路长度, 对试验条件要求很高, 常常会导致实测参数结果不准确。由于双端行波法测距的准确性, 可以用它通过区外故障和区内故障校核输电线路实际长

度,该项技术的实施对继电保护的整定计算和 EMS 高级应用软件的计算精度具有重要意义。

双端行波测距法的缺点主要是:

1) 双端行波测距法的成本较高,还需要 GPS 时标系统及两端数据通信等。

2) 在多回线路结构的原理上存在不足,需要单端行波法作为补充。

4 结论

1) 单端行波测距法虽然要求的设备成本低,不需要时标系统及两端数据通信等,且基本不受线路长度误差和线路两端一、二次设备及相关硬件时间差的影响;但由于原理上的缺陷,一旦不能正确识别反射波时,测距精度无法保证。由于实现单端行波测距法的计算机算法还不成熟,因而难以自动给出准确的测距结果;同时,在很多情况下,也无法通过对单端暂态行波波形的离线分析获得准确的测距结果。因此,单端行波测距法很难作为独立的测距方法单独使用来满足电力系统对精确故障定位的要求。

2) 双端行波测距法虽然要求的设备成本较高,且其测距精度除了由原理误差造成外,还受线路长度的误差以及线路两端一、二次设备和相关硬件时间差的影响,对多回线路的结构原理上存在不足,但对确定线路而言,线路长度的误差以及线路两端一、二次设备和相关硬件时间差等固定测距误差,可通过区外故障或区内故障进行修正;双端行波测距法还具有通过区外故障校核线路实际长度的功能;双端行波测距法比单端行波测距法测距结果更可靠。

3) 要实现准确和可靠的故障定位,需要采用双端行波测距法,当故障线路两端由于某种原因只有一端的行波故障数据而无法实现双端测距时,只能采用单端行波测距法作为补充,但一般不宜采用单

端行波测距法作为独立的测距方法使用。

参 考 文 献

- [1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
GE Yao-zhong. New Types of Relay Protection and Fault Location: Theory and Techniques. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.
- [2] 徐丙垠, 李京, 陈平, 等. 现代行波测距技术及其应用. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 62—65.
XU Bing-yin, LI Jing, CHEN Ping et al. Modern Fault Location Techniques Based on Fault Generated Travelling Wave and Their Applications. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(23): 62—65.
- [3] 覃剑, 陈祥训, 郑健超. 行波在输电线上传播的色散研究. 中国电机工程学报, 1999, 19(9): 27—30, 35.
QIN Jian, CHEN Xiang-xun, ZHENG Jian-chao. Study on Dispersion of Travelling Wave in Transmission Line. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(9): 27—30, 35.
- [4] 覃剑, 黄震, 邱宇峰, 等. 基于小波变换的同杆并架双回线双端行波故障测距. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 51—55.
QIN Jian, HUANG Zhen, QIU Yu-feng et al. Wavelet Transform Based Double Terminal Method of Travelling Wave Fault Location in Double-circuit Parallel Transmission Line. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5): 51—55.
- [5] 覃剑, 陈祥训, 郑健超, 等. 利用小波变换的双端行波测距新方法. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 6—10.
QIN Jian, CHEN Xiang-xun, ZHENG Jian-chao et al. A New Double Terminal Method of Travelling Wave Fault Location Using Wavelet Transform. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 6—10.

覃 剑(1967—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究电力设备和电力系统故障分析和诊断以及小波变换技术在电力系统的应用。E-mail: jqin@epri.ac.cn

葛维春(1961—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事电力系统分析计算及科技管理工作。

邱金辉(1962—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护专业技术工作。

Study on Single Terminal Method and Double Terminal Method of Traveling Wave Fault Location in Transmission Line

QIN Jian¹, GE Wei-chun², QIU Jin-hui², ZHENG Xin-guang²

(1. China Electrical Power Research Institute, Beijing 100085, China)

(2. Liaoning Electric Power Corporation, Shenyang 110006, China)

Abstract: This paper describes the traveling wave principles of single terminal method and double terminal method, investigates the main causes of the generation of errors in actual application while comparing their merits and demerits, thus providing a basis for accurate fault location of traveling wave methods.

Key words: fault location; transmission line; single terminal method of traveling wave; double terminal method of traveling wave