

输电线路的故障行波测距方法研究

王璐¹, 文武松²

(1. 重庆第二师范学院 数学与信息工程系, 重庆 400067;

2. 重庆通信学院 电力工程系, 重庆 400035)

摘要: 高压输电线路发生故障后的暂态电流行波中包含故障距离信息, 它可用于实现精确故障测距。基于暂态电流行波的故障测距方法可分为双端量行波测距和单端量行波测距两种。本文详细分析了故障行波的形成和传播过程, 介绍了两种故障测距的原理和实现方法, 并针对实现过程中的一些关键和难点问题进行了深入剖析, 给出了解决方案。

关键词: 故障测距; 电流行波; 输电线路

中图分类号: TM755

文献标识码: A

文章编号: 1008-6390(2017)02-0117-06

一、引言

高压输电线路故障测距方法主要有两类: 一是阻抗法, 二是行波法。阻抗法以工频电气量为基础, 通过求解差分或微分形式表示的电压平衡方程式而实现故障测距, 这种算法大部分是建立在一种或几种简化假设之上。而经验表明, 这些假设经常带来很大的误差, 通过对这些误差进行补偿或者采用多端线路数据, 可以在一定程度上提高算法精度, 但对于某些系统结构或故障类型, 阻抗算法存在明显不足, 如高阻接地, 多电源线路, 断线故障, 分支线路, 线路结构不固定, 有时同杆、有时分杆架设的双回线, 直流输电线路等^[1]。即使在阻抗算法可以使用的场合, 由于受互感器误差特性和过渡阻抗等多种因素的影响, 阻抗算法往往不能满足对故障测距的精度要求。行波故障测距的研究可追溯到 20 世纪 50 年代, 人们根据电压和电流故障行波在线路上有固定的传播速度这一特点, 提出了多种行波故障测距方法, 并分为 A、B、C 三种类型。其中, A 型是根据故障点出现的行波到达母线后反射到故障点, 再由故障点反射后到达母线的时差来测距; B 型是根据故障点出现的行波分别向两侧母线运动的时差来实现测距; C 型是故障后人为施加高频或直流信号, 根据雷达原理测距, 该方法还需要利用电力线

载波通道, 可靠性和准确性难以满足系统要求。

早期的行波法使用由电流行波和电压行波组成的方向行波作为测距依据, 但理论和实践证明, 普通的电容分压式电压互感器不能传变频率高达数百 kHz 的电压行波信号, 为了获取电压行波则需要附加专门的行波耦合设备, 使得装置结构复杂、投资增大。此外, 早期行波法对行波信号的测量和记录缺乏足够的技术条件, 对行波信号的分析也没有合适的数学方法, 这都制约了对行波信号的利用和行波测距的研究和发展。20 世纪 90 年代, 以西安交通大学葛耀中教授和英国 Bath 大学的 P. F. Gale 为代表的团队, 对普通电流互感器传变暂态电流行波的能力进行了深入的理论分析和现场试验。结果表明: 普通的电流互感器具有良好的行波传变性能, 并以此为基础提出了利用电流行波实现故障测距的原理和方法^[2], 打破了长期以来只利用行波测距的局面。近年来, 学者们将小波变换这一先进的数学工具应用于输电线路行波故障测距中, 取得了很好的检测效果。同时, 微电子技术和计算机技术的飞速发展, 也给行波信号的测量、采集和记录带来了极大的方便。这些技术上的进步给行波故障测距的研究和开发带来了新的生机。

本文首先从等效电路模型出发, 分析了故障行波的形成和传播过程, 并以此为基础阐述了两端电

收稿日期: 2016-10-15

基金项目: 重庆市高校优秀成果转化资助重大项目“柴油机状态监测与故障诊断系统及其产业化”(KJZH14112); 重庆市教委应用基础研究项目“电网电压同步控制技术研究”(KJ1501406)

作者简介: 王璐(1980—), 女, 重庆市人, 副教授, 研究方向: 人工智能, 智能控制。

流行波故障测距和单端电流行波故障测距的基本原理。其次,详细介绍了两种测距装置的实现方案,并对影响测距精度和稳定性的一些关键问题进行了深入剖析,给出了一些有效的解决方法。

二、电流行波故障测距原理

与电压互感器(TV)相比,电流互感器(TA)具有良好的高频电流信号传变能力。因此,基于电流行波的故障测距方法被广泛应用于高压输电线路中。

(一) 故障行波的形成

如图1所示,若故障发生在MN段线路中的F

点,根据叠加原理,故障后的电力系统可以等效为正常运行网络和故障网络的叠加。在故障网络中,附加电源是一个电压源,数值等于故障点F故障前的电压。在故障点附加电压源的作用下,附加电源要将自己的电压传递给其他非故障节点,由于线路分布参数中存在电感电容等储能元件,电感电流和电容电压是不能突变的,它们需要一个充电过程,这个过程就是故障行波形成和传播的过程。图1(a)是发生了故障的电力系统,图1(b)是图1(a)的等效电路,而图1(b)可以表示为正常运行网络(图1(c)所示)和故障网络(图1(d)所示)的叠加。图1中 e_f 为故障点附加电源电压。

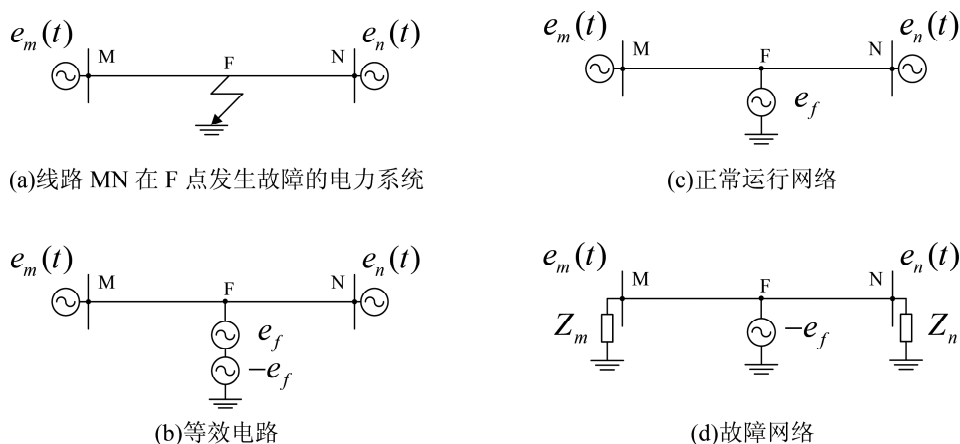


图1 故障电力系统的等效电路

高压输电线路具有分布参数特征,在线路电压等级不高、距离不长的情况下,故障行波在线路上有接近光速的固定传播速度^[3],频率不高时其波长会远大于线路长度,此时可用集中参数等效电路来

代替分布参数电路,从而大大简化对输电线路的分析和计算。在忽略线路分布电阻和分布电导时,单相导线中故障行波传播过程中的分布参数等值电路如图2所示。

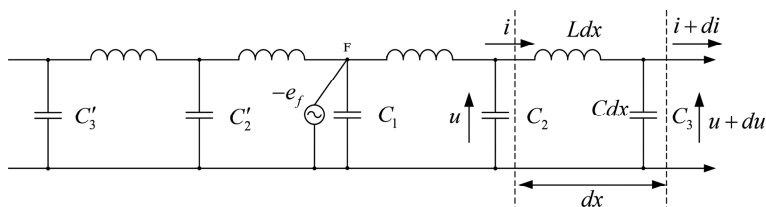


图2 单相导线中故障行波传播的分布参数等值电路

假设线路某点的电压和电流分别为 u 和 i , 经过 dx 段后电压和电流分别为 $u+du$ 和 $i+di$, 其中, 电压增量 du 由分布电感 Ldx 产生, 电流增量 di 由分布电容 Cdx 产生。根据基尔霍夫定律可很容易得到行波电压、电流与导线参数的关系:

$$\begin{cases} -\frac{du}{dx} = L \frac{di}{dt} \\ -\frac{di}{dx} = C \frac{du}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

其中, L ——线路单位长度电感, H/km;
 C ——线路单位长度电容, F/km;
 u, i ——距离故障点 x 处的电压和电流。

结合图2电路, (1)式可进一步变形为:

$$\begin{cases} \frac{d^2 u}{dx^2} = LC \frac{d^2 i}{dt^2} \\ \frac{d^2 i}{dx^2} = LC \frac{d^2 u}{dt^2} \end{cases} \quad (2)$$

针对图1, 当线路MN的F点发生金属性故障

时,可求得上述方程的特解。M、N 两端的电压行波、电流行波可分别表示如下^[4]:

$$u_M(t) = -e(t - t_M) - f_M e(t - t_M) + f_M e(t - 3t_M) + f_M^2 e(t - 3t_M) + \dots \quad (3)$$

$$i_M(t) = \frac{e(t - t_M) - f_M e(t - t_M) - f_M e(t - 3t_M) + f_M^2 e(t - 3t_M) + \dots}{Z_c} \quad (4)$$

$$u_N(t) = -e(t - t_N) - f_N e(t - t_N) + f_N e(t - 3t_N) + f_N^2 e(t - 3t_N) + \dots \quad (5)$$

$$i_N(t) = \frac{e(t - t_N) - f_N e(t - t_N) - f_N e(t - 3t_N) + f_N^2 e(t - 3t_N) + \dots}{Z_c} \quad (6)$$

其中, $Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$ 为波阻抗;下标 M、N 分别代表线路的 M 端和 N 端; t_M 、 t_N 为行波从故障点运行到 M 端、N 端母线所用时间; f_M 、 f_N 为行波在 M 端、N 端母线的反射系数(一般情况下为负实数); $-e(t)$ 为故障网络中的附加电压源电压。

式(4)(6)中的前两项表示由故障点产生的向母线运动的电流行波的第一个波头分量,三、四两项表示初始行波在母线处发生了反射后又返回到故障点,并在故障点发生全反射后又运动到母线的第二个波头分量,其时间间隔为 $2t_M$ 、 $2t_N$ 。

从(3)~(6)式还可以看出:故障后第一个行波波头到达母线,对电流行波和电压行波其表现是不同的,由于反射系数 f_M (f_N) 为负实数,在 $t = t_M$ ($t = t_N$) 时刻,电流行波的前行波和反行波是相互增强的,而电压行波则是减弱的,因此利用电流行波实现两端行波测距较之电压行波更灵敏。

(二)故障测距原理

由于电流故障行波在线路上有接近光速的恒定传播速度,通过检测变电站母线端的电流行波波头分量记录行波到达的时间间隔,则可测算出故障点的位置。基于这一原理的故障测距方法可分为两端电流行波测距和单端电流行波测距两种。

1. 两端电流行波故障测距原理

由图 1 可知,电流行波到达两侧母线的真实反映了故障点距离两侧母线的距离。设电流行波第一次到达 M 端、N 端母线的的时间分别为 t_{1M} 和 t_{1N} ,故障点 F 到 M 母线端的距离为 X_M ,到 N 母线端的距离为 X_N ,电流行波波速为 V ,MN 两端线路长度为 L ,则:

$$X_M = \frac{(t_{1M} - t_{1N})V + L}{2} \quad (7)$$

$$X_N = \frac{(t_{1N} - t_{1M})V + L}{2} \quad (8)$$

可见,如果能准确知道初始行波到达两侧母线的的时间,则可实现精确故障测距。

2. 单端电流行波故障测距原理

与两端电流行波故障测距方法不同,单端电流行波测距只需检测线路中一个母线端上行波到达的

时间,由此计算出故障点的位置距离。图 1 中故障产生的行波传播过程如图 3 的网格图所示:

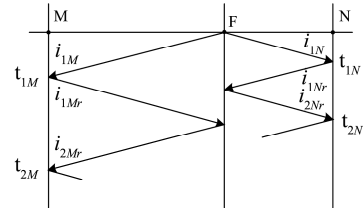


图 3 电流行波传播过程对应的网格图

图 3 中,第 1 次到达 M、N 母线的电流行波分别为 i_{1M} 和 i_{1N} ,到达的时间分别为 t_{1M} 和 t_{1N} ,行波在 M、N 端的反射波 i_{1Mr} 、 i_{1Nr} 返回故障点,又从故障点反射回线路两端。设第 2 次到达 M、N 母线的行波为 i_{2Mr} 、 i_{2Nr} ,到达的时间分别为 t_{2M} 和 t_{2N} 。在行波波速恒定的情况下,每次行波到达母线 M 的时间与图中行波在母线 M 上的反射点到 M 点的几何距离成正比,N 端母线也有同样的结论。线路 M、N 两端测得的故障距离可分别表示为:

$$X_M = \frac{(t_{2M} - t_{1M})V}{2} \quad (9)$$

$$X_N = \frac{(t_{2N} - t_{1N})V}{2} \quad (10)$$

因此,单端电流行波故障测距的关键是准确检测行波到达母线的的时间间隔 $t_{2M} - t_{1M}$ 或 $t_{2N} - t_{1N}$ 。

三、电流行波故障测距的实现

(一)两端电流行波故障测距

1. 实现方案

根据前述测距原理可知,该技术需要在被测线路两端装设测距装置,用于记录故障后的初始电流行波波头,而时间记录和两端时间同步的精度直接决定了测距的精度,因此,必须具备精准的时间基准,通常采用 GPS 同步时钟。测距装置的结构如图 4 所示。

该测距装置由高速数据采集单元、中央处理单元、GPS 接口单元、人机接口单元以及 PC 机接口单元构成。采集单元用于检测、记录和处理行波故障数据,并把结果传送给中央处理单元,采集单元需外

接电流互感器以传变电流信号。GPS 接口单元外接 GPS 模块,把由 GPS 同步时钟提供的时间信息传送给中央处理单元,为故障信息贴上时间标签,提供故障分析的时间依据。多个测距装置与 PC 机构成整个故障测距系统,PC 机与测距装置采用 GPRS 或调制解调器 (Modem) 进行通信,实现两者的数据传递,交换两端所记录的初始行波到达时间。

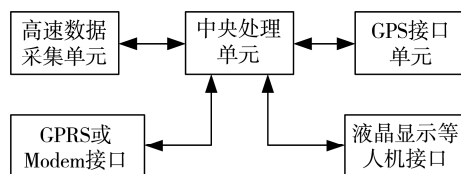


图4 测距装置结构

2. 关键问题

两端测距的特点是仅使用初始行波,因此易于检测,准确度高。而采用 GPS 技术后,两端测距装置可实现 1 μ s 的精确同步^[1],因此,时间基准能满足需要,但需要注意如下一些关键问题:

(1) 高速数据采集

为了保证行波测距分辨率在 500m 以上,行波信号采集频率一般不应低于 600kHz,使用常规的由微处理器直接控制模数转换器 (A/D) 的方式很难实现。需要设计由硬件实现的高速数据采集电路单元记录故障电流行波信号。线路故障时,采集单元在记录预定时间内的暂态电流行波后,停止数据采集,然后以相对较慢的速度将记录的数据送入微处理器进一步保存、处理。

(2) 行波信号的计算处理^[5-7]

利用故障行波进行测距的关键是能够在母线端检测到故障行波。常规的行波脉冲检测方法是通过判断电流行波信号是否越过阈值实现的,此方法抗干扰能力差,且难以精确地确定电流行波波头前沿到达的时刻。线路故障后的暂态行波从信号的角度来看是一个具有突变性质的、非平稳变化的信号,对于这种非平稳变化的信号,傅氏变换是无能为力的,因为傅氏变换是全频域的分析方法,它不能给出信号在何处突变以及变化剧烈程度等信息,因此它也不能对行波信号进行准确的数学描述。而小波变换的出现给突变信号的分析研究带来生机,由于其时频局部化性能,使得它对于像行波信号这样的突变信号分析特别有用。

使用 B 样条函数的导函数作为小波函数,将行波信号进行二进制小波变换。因为小波分量的模极大值与信号的尖锐变化点相对应,所以可以将小波

分量的模极大值出现的时间确定为电流行波脉冲的到达时刻。而根据不同尺度(频带)下小波变换的模极大值的大小及极性可以进一步识别被检测信号的性质,来自故障点的电流行波脉冲小波分量在一个有效尺度范围内都有较大的模极大值,而干扰信号只是在小尺度下(高频段)有较大幅度的模极大值。因此,用它可以比较容易地判断是来自故障点的有效电流行波脉冲还是其他干扰脉冲。

(3) 远程通信

两端电流行波故障测距功能的实现需要同时知道线路两端装置记录到的故障电流行波到达时刻,因此,需要解决装置测量数据远传问题。一般做法是在控制中心配置一台 PC 机作为工作站,与电网内所有现场行波测距装置构成行波测距系统。PC 机工作站通过调制解调器 (Modem) 利用电话线路拨号接通现场行波测距装置(或通过 GPRS 远传),读取并长期保存装置记录下的故障电流行波数据,自动或由操作人员在计算机辅助下分析行波数据,确定故障距离。

(4) 电压过零故障

电压相角过零或接近零时发生故障,产生的电压、电流行波比较微弱,会造成保护或测距装置失败。然而,实际中绝大部分线路故障是绝缘击穿故障,电压过零或接近零故障的概率相当小。即便在这种情况下线路发生了故障,在继电保护作用下,开关将跳开故障线路,之后在重合闸作用下,开关将重新闭合,由于故障点往往呈永久金属性短路性质,此时故障并未消失,开关重合所产生的电流行波将会在故障点和母线之间来回传递,因此,利用重合闸脉冲在故障点的反射仍然可以测出故障距离。

(二) 单端电流行波故障测距

单端电流行波故障测距不需要在线路两端同时安装测距装置,也不需要时间同步,更不需要构建两端测距装置之间的远程通信通道,因此,该方法越来越受到学者们的关注。

1. 实现方案

单端电流行波故障测距装置的结构如图 5 所示。该装置由高速数据采集单元、中央处理单元、人机接口组成,中央处理单元与上位机可通过 RS485 通信。

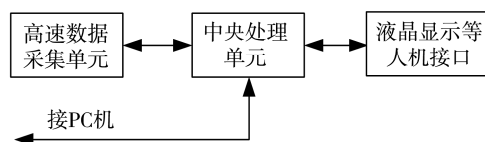


图5 测距装置结构

本装置的核心是中央处理单元中的测距模块(软件),根据前述单端电流行波故障测距的基本原理,测距模块的构成原理如图6所示。测距模块的核心部分是由行波 W_1 和行波 W_2 控制的定时器,当行波 W_1 于时刻 t_1 到达母线处时,定时器启动计时。当行波 W_2 于时刻 t_2 到达母线时,定时器停止计时。定时器测出时间差 $t_2 - t_1$, 然后根据式(9)和(10)求出故障距离。可见,在行波速度 v 已知的条件下,故障距离测量的关键是在母线处准确地检测到行波 W_1 和行波 W_2 。

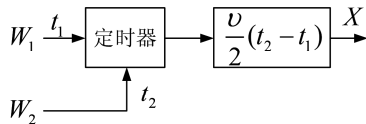


图6 测距模块构成原理

2. 关键问题

和两端电流行波故障测距一样,该方法的实施同样易于受到行波信号和噪声干扰相混淆、电压过零故障、处理器采样频率限制等因素的影响,这些问题都可采用前文中两端测距所述的方法解决。不同的是,单端电流行波故障测距法还受虚假故障反射波等因素的影响,常出现误报、误测距的问题,导致该方法及其测距装置很难成功应用于实际的电力系统^[8]。

(1) 行波 W_1 的选择

根据上述测距模块的构成原理,当测距装置检测到行波 W_1 时启动定时器,由于母线端接线方式的不同,行波出现在母线处的时间间隔有所不同,若对行波 W_1 选取不当,将造成误测。

如图7所示,实线所示电流行波网格图是最常见的情况,母线 M 处除被测线路外还至少有两条出线或没有出线,当行波 u_f 于时刻 t_{1m} 到达母线 M 时,有明显的反射波返回到 F 点,又于 t_{2m} 时刻返回母线 M。还有一种情况如图中虚线所示的网格图,此种情况相当于母线 M 上除接有被测线路 MN 外,只有一条出线 MR,当行波 u_f 于时刻 t_{1m} 到达母线 M 时,没有反射波出现,行波沿虚线继续前进,当行波电压 u_f 到达母线 R 时才有反射波于时刻 t_{1m}' 通过母线 M 并重新传到故障点 F,又于时刻 t_{2m}' 返回母线 M。显然,在第二种情况下, t_{1m} 时刻到达的行波不能再用作 W_1 来启动定时器。

综合以上两种情况,为保证正确测得故障距离,必须采用母线 M 处的正向行波(由母线 M 传向故

障点的行波)作为 W_1 来启动定时器。

(2) 行波 W_2 的选择

由图7可知,应选择母线 M 处的反向行波(由故障点传向母线 M 的行波)作为 W_2 来停止定时器工作。由于母线 N 端接线方式不同,在 F 点故障时,第一个由被测线路传向母线 M 的行波存在多种路径,图8列出了不同接线方式下的行波网络。其中, t_{2m} 时刻到达的行波为由故障点返回的反向行波;若 N 端除接被测线路外没有其他接出线或至少还存在两条接出线,在 M 端会产生反向行波①;若 N 端除接被测线路外还外接线路 NP,在 M 端会产生反向行波②;若 N 端除接被测线路外还外接线路 NQ,在 M 端会产生反向行波③。在以上四条反向行波中,只有 t_{2m} 时刻的行波能直接作为 W_2 。而反向行波①②③均为对侧母线的反射波,其中,反向行波①②到达母线 M 要早于 t_{2m} , 反向行波③到达母线 M 要晚于 t_{2m} , 直接以这些反向行波作为 W_2 将会使测得的故障距离变小或变大。

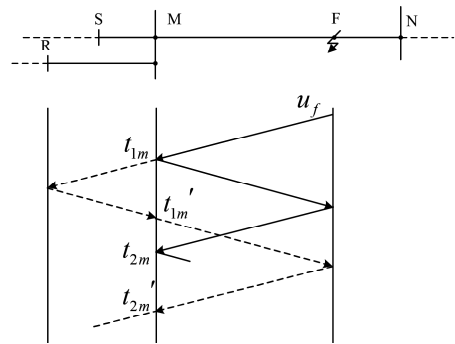


图7 用于 W_1 选择的线路结构和行波网格

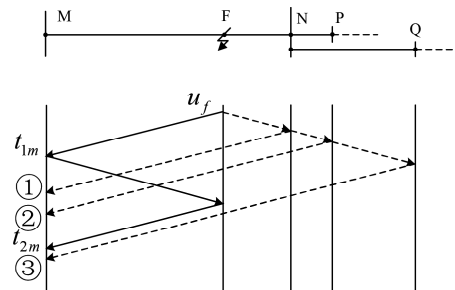


图8 用于 W_2 选择的线路结构和行波网格

为了消除对侧母线反射波的影响,在利用电流行波测距时可使用电流行波极性区分故障点和对侧母线的反射波^[9]。在利用方向行波的条件,仍可用方向行波之间的极性关系识别故障点的反射波。由图8可知,母线 M 处的初始正向行波与故障点的二次反射波的极性相反,而与对侧母线反射波极性

相同。据此,根据不同母线接线情况可按如下方法计算故障距离。

a) 当对侧母线除被保护线路外还有 2 条及以上出线或 0 条出线时,在初始正向行波与后继到达的第一个反向行波极性相反时,式(9)所得测距结果 X_C 即为 M 端的故障测距结果 $X_M = X_C$ 。在极性相同时, M 端的最终测距结果为 $X_M = L - X_C$ 。

b) 当对侧母线除被保护线路外只有 1 条出线时,对侧母线可能无反射波出现,后继到达的反向行波如图 8 中的②和③所示。其中只有反射波②会对测距结果造成影响(③到达 M 端的时刻大于 t_{2m} , M 端测距装置首先检测到 t_{2m} 时刻到达的反向行波,会以 t_{2m} 作为定时器的停止时刻,因此,计算的故障距离是正确的)。这时最终测距结果必然小于对侧的最终测距结果,由此可以将线路两端的最终测距结果中大的一个确认是该端到故障点的距离。

(3) 单端电气量组合故障测距

由前述分析可知,单端电流行波故障测距受虚假故障反射波的影响较大,对正确反射波的确定在算法上存在一定的难度。为此,清华大学以董新洲教授为代表的团队将行波法和阻抗法进行结合,提出了一种单端电气量组合故障测距算法,并基于该方法率先研制出了一种高精度故障录波与测距装置,成功应用于实际电力系统中^[4]。这种单端电气量组合故障测距的基本原理是:当行波法无法确定是哪个反射行波波头时,可由具有鲁棒性的阻抗测距算法先计算出故障发生的范围,误差不超过线路全长的 10%,在该范围内确定故障点反射行波波头,然后由单端行波测距原理进行精确定位,误差通常会小于 1km。

四、结语

暂态电流行波因含有丰富的时间和距离信息,目前被广泛应用于输电线路的故障测距中。本文分析了故障行波的形成和传播过程,详细介绍了两端电流行波故障测距和单端电流行波故障测距两种技术的基本原理和实现方法。两端电流行波法利用故

障行波到达线路两端的时间差测距,具有测距原理简单、测距可靠、精确度高、技术成熟等优点,但它需要在线路两侧各安装一台现场装置,且要借助 GPS 和构建两侧通信通道,实现成本较高;单端电流行波法是通过测量故障产生的行波在故障点及母线之间往返一趟的时间来计算故障距离的,该测距方法只需安装一台装置,投资小,但波形分析较复杂,测距成功率低。如何利用先进的理论和方法实现故障行波的有效识别,提高单端行波故障测距的精度将是未来的研究热点。

参考文献:

- [1] 董新洲,葛耀中,徐丙垠,等. 利用 GPS 的输电线路行波故障测距研究[J]. 电力系统自动化,1996,20(12):37-40.
- [2] 董新洲,葛耀中,徐丙垠,等. 新型输电线路故障测距装置的研制[J]. 电网技术,1998,22(1):17-21.
- [3] 徐丙垠,李京,陈平,等. 现代行波测距技术及其应用[J]. 电力系统自动化,2001,25(23):62-65.
- [4] 董新洲. 故障行波理论及其应用[G]//第二届水力发电技术国际会议论文集. 北京:中国电力出版社,2009:163-169.
- [5] Jafarian P, Sanaye-Pasand M A. Traveling-wave-based protection technique using wavelet/PCA analysis [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2010, 25(2):588-599.
- [6] 董新洲,刘建政,张言苍. 行波的小波表示[J]. 清华大学学报(自然科学版),2001,41(9):13-17.
- [7] 董杏丽,葛耀中,董新洲. 测距式行波距离保护的研究(二)——原理方案与仿真实验[J]. 电力系统自动化,2002,26(9):1-6.
- [8] 董新洲,葛耀中,徐丙垠. 利用暂态电流行波的输电线路故障测距研究[J]. 中国电机工程学报,1999,19(4):76-80.
- [9] 葛耀中,董新洲,董杏丽. 测距式行波距离保护的研究(一)——理论与实现技术[J]. 电力系统自动化,2002,26(6):34-40.

[责任编辑 刘江南]