

# 电力传输线故障定位的行波技术 原理与应用综述

杜 刚<sup>1</sup>, 陈云良<sup>2</sup>, 党晓强<sup>2</sup>

(1. 成都电业局龙泉供电局, 四川 成都 610100; 2. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

**摘 要:**基于行波信息对电力传输线故障点进行定位的技术近年来发展很快。结合架空线路分析行波传播的一般概念、电路模型、数学模型、速度选择问题和故障行波的特征, 介绍利用故障行波进行测距的单端法、双端法和波速未知等三种原理; 介绍外部施加行波脉冲信号对电力电缆故障进行分析和定位的常用方法。介绍行波测距装置的应用现状。最后对电力传输线故障中的行波技术应用做了评述。

**关键词:**行波理论; 电力架空线; 电力电缆; 故障定位

**Abstract:** Technology for fault location of power transmission lines and power cable based on traveling waves has made a rapid progress and wild application in recent years. The general concept of traveling wave theory combined with transmission line is introduced as well as circuit model of transmission line, mathematics model, the speed of fault traveling wave and its wave features. Single terminal method, double terminal method and unknown wave speed method for fault location are introduced. Method of impulse signal input power cable for fault location is described. At last, some reviews of the application of traveling wave to fault location of power transmission lines and power cable are given.

**Key words:** traveling wave theory; power transmission line; power cable; fault location.

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1003-6954(2008)02-0057-03

行波法故障定位原理提出已久, 但由于当时技术条件限制, 未能有成熟的产品推广应用。20 世纪 90 年代以来随着计算机、通信和信号采集处理技术的发展, 人们对暂态波过程的处理能力得到提高, 把行波信息和新技术联系起来应用于高压架空传输线和输电电缆故障点定位和探测的研究应用很多。下面结合架空传输线说明行波传播的一般理论概念, 介绍目前利用故障行波对电力传输线和电缆进行测距的常规技术, 并对行波技术在该领域的应用做了评价和展望。

## 1 架空传输线上的行波传播

### 1.1 基本概念

电力系统分析中通常所采用的基于电路的数学模型适用于频率很低或波长很大的情况, 当所考虑对象的物理尺寸大于波长也即频率很高时, 就必须用电磁波理论取代电路理论。暂态行波是指系统非正常运行过程中突然出现, 而后又逐渐消失的行波, 产生的原因有短路、断线、操作、雷击和雷电感应等, 它是系统处于非正常状态的特征。传输线上的行波测距是利用故障时刻的高频暂态分量进行的。

行波的折射与反射: 传输线是均匀的分布参数元件, 行波在沿线路传播时, 所遇到的波阻抗通常不变, 当行波传播至线路与其它设备的连接点时, 电路参数发生突变, 波阻抗也随之突变, 行波电压、电流在线路上建立起来的传播关系被破坏, 这时会有一部分行波返回到输电线路, 另一部分通过连接点传至其他电路环节中, 这种现象就称为行波的反射和折射现象。

### 1.2 数学模型

对于传输线一地等值电路, 可以将线路看成是由无数个长度为  $dx$  的小段所组成。设单位长度导线的电感及电阻分别为  $L_0, r_0$ ; 单位长度导线对地的电容及电导分别为  $C_0, g_0$ 。则长度为  $dx$  线段的参数应为  $L_0 dx, r_0 dx, C_0 dx, g_0 dx$ , 则线路的等值电路如图 1。

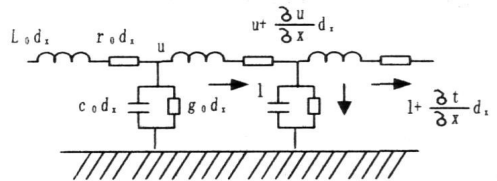


图 1 单导线线路的等值电路

行波传播的数学模型由上面等值电路推导得:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = r_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \quad (1)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = g_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

通常输电线路的对地电导很小,可以略去。以地为回路的线路电阻要引起波的衰减和变形,其影响随波的传播距离而增加。略去  $r_0$ 、 $g_0$  后,应用拉氏变换求解方程(1)、(2)可得:

$$u = u_q(t - \frac{x}{v}) + u_f(t + \frac{x}{v}) \quad (3)$$

$$i = i_q(t - \frac{x}{v}) + i_f(t + \frac{x}{v}) \quad (4)$$

其中: $v$  为行波传播速度,  $u_q(t - \frac{x}{v})$  代表一个以速度  $v$  向  $x$  正方向行进的电压波,  $u_f(t + \frac{x}{v})$  代表一个以速度  $v$  向  $x$  负方向行进的波。通常称  $u_q$  为前行电压波,  $u_f$  为反行电压波。同样称  $i_q$  为前行电流波,  $i_f$  为反行电流波。行波方程具体解的表达式由给定的边界条件及初始决定。

### 1.3 波速度的选择

故障测距研究关心的是行波传播时间和波速以及此二者的精确化。电磁场的波动特性说明了电磁作用的传递以有限速度进行。波速的大小由媒质的特性决定:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (5)$$

式中: $\mu_r$ 、 $\epsilon_r$  分别为相对磁导率和相对介电常数。 $c \approx 3 \times 10^8$  m/s 为电磁波在自由空间传播的速度,即光速。电力电缆单位长度对地电容较大,故电缆中的波速一般为光速,架空传输线上的故障行波波速通常取为光速,由于实际波速的计算与架空线路的结构、所在地区大地的电阻率、线路的分布电感和分布电容有关,因此对于不同线路的实际  $v$  是不同的,采用光速代替实际行波速度会带来测距误差。

## 2 传输线上的故障行波测距分析

故障行波的产生如图 2 所示,当传输线 MN 上某点 F 发生故障时,由叠加原理,故障时 F 点电势为零,相当于在故障点 F 处加一个与该点正常负荷状态下大小相等、方向相反的电压。在该电压作用下,将产生由故障点 F 向线路两端传播的行波。设故障发生

时刻为  $t=0$ ,如图 3 故障点 F 的电压和电流行波向线路的两端传输,到达 M、N 点时由于波阻抗不连续,行波将发生反射和透射,反射后的行波再次到达故障点时,又将发生反射和透射,这种过程循环往复,直至能量消耗完毕进入故障后稳态。

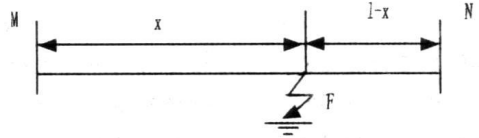


图 2 线路故障示意图

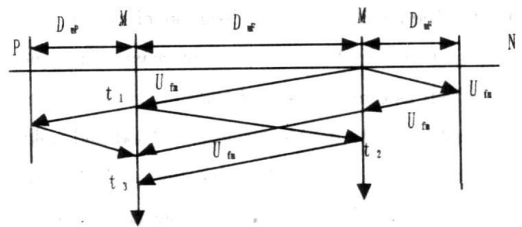


图 3 故障行波的传播示意图

### 2.1 行波速度为已知的测距方法

#### 2.1.1 单端法

在传输线发生故障时,故障产生的电流行波在故障点于母线之间来回反射。单端法通过母线处感受到的故障初始行波脉冲与由故障点反射回来的行波脉冲之间时间差  $\Delta t$  测距。如图 2 所示以短路故障为例:设线路长度为  $l$ ,波速度为  $v$ ,故障点距离 M 端为  $x$ ,故障初始行波与由故障点反射波到达母线的时刻分别为  $T_1$ 、 $T_3$ ,则故障距离  $x$  为:

$$x = x \frac{1}{2} v \Delta t = \frac{1}{2} v (T_3 - T_1) \quad (6)$$

#### 2.1.2 双端法

通过故障初始行波到达线路两端测试点的时刻来计算故障点的距离。如图 2 所示线路全长为  $l$ ,故障点距 M 端为  $x$ ,距离 N 端为  $l-x$ ,行波到达母线 M 端和 N 端的时刻分别为  $t_1$ 、 $t_1'$ ,则有:

$$x = \frac{v(l - t_1') + l}{2} \quad (7)$$

由(6)和(7)式可知,测距关键在于准确记录电流行波到达线路两端的时间和波速信息。由前面分析比较知道双端行波测距法仅利用故障产生的第一个行波波头信号,不受故障点透射波的影响,而且初始行波一般比较强烈,线路过渡电阻的电弧特性、系统

运行方式变化、线路分布电容及负荷电流等对测距准确性不会造成较大影响。故利用双端数据利于更加准确地判断故障距离,但测距装置必须有两端数据的交换通道和两端时间同步设备,增加了装置的生产成本。

### 2.2 行波速度未知时的双端测距方法

实际的传输线三相间存在着电磁耦合,在发生不对称接地故障时会产生在线路的相与相之间运动的线模分量以及在线路与大地之间运动的地模分量。因此还可以选择通过相模变换捕捉零模和线模分量到达两检测点的时刻实现测距,消除波速对测距精度造成的影响。

相模变换是指对输入信号进行模变换,主要是为去掉各相间电磁耦合。在模空间,各模量相互独立,可采用单相线路的方法分别对各模量进行分析。如采用凯伦贝尔变换,由输入电流行波的采样值  $i_a(n)$ 、 $i_b(n)$ 、 $i_c(n)$  得到线模  $i_\alpha(n)$ 、 $i_\beta(n)$  和地模  $i_0(n)$  的离散值,即:

$$3i_\alpha(n) = i_a(n) - i_b(n) \tag{8}$$

$$3i_\beta(n) = i_a(n) - i_c(n) \tag{9}$$

$$3i_0(n) = i_a(n) + i_b(n) + i_c(n) \tag{10}$$

以图 2 为例,设线模速度为  $v_1$ ,零模波速为  $v_0$ ,线模分量到达母线 M 端和 N 端的时刻分别为  $t_1$ 、 $t_1'$ ,零模分量到达母线 M 端和 N 端的时刻分别为  $t_2$ 、 $t_2'$ ,则计算接地点:

$$x = \frac{l(t_2 - t_1)}{(t_2 + t_2') - (t_1 + t_1')} \tag{11}$$

在发生非接地型故障时,由于零模分量为零,无法获得  $t_2'$ 、 $t_2$ ,因此这种方法只能用于接地故障测距。该原理应用的最大困难在于零模分量衰减很快,因此在远距离传输线路中不易采用,目前也还没有采用该原理的线路行波测距装置。由于诸如发电机和变压器以及母线的单相接地故障比例很大,所以这种方法进行电气主设备绕组接地故障定位的科研前景仍然很大。

### 2.3 行波信号的提取

电压和电流的故障暂态分量从线路末端提取,由于其所覆盖的频带很宽,从几千赫兹到几百千赫兹,为了能够在二次侧观察到线路上的行波现象,要求电压、电流信号变换回路要有足够快的响应速度。常规的电容分压式电压互感器截止频率太低,不能满足行波测距的要求。如果要提取暂态电压,需要采用专门

设计的暂态信号耦合器。通过理论分析和实验结果证明常规电流互感器有很快的高频响应特性,它能传输高达 100 kHz 以上的高频信号,能够满足暂态行波测距的要求。由于其简单、经济、可靠,基于电流暂态量的行波故障测距技术得到推广。当然如果可以同时采集到线路末端互感器侧的二次行波型号,在原理上无疑是最为完备的。目前正处在研究试验阶段的光互感器可望成为传变暂态行波信号的理想工具。

## 3 电力电缆故障的行波定位

在电力电缆故障的探测与定位方法中,尚未达到与输电线故障在线检测与测距的成熟程度,很少有提到在线行波概念。一般所用外加脉冲的概念,其实也是一种对行波信息的利用。脉冲行波法是电缆故障测距中的常用方法,基于行波的电力电缆故障离线测距方法通常有:①低压脉冲反射法用于电缆的低阻、短路及断路故障。测试时,向故障电缆注入一个低压脉冲使其在电缆中传播,脉冲遇到阻抗不匹配点(短路、断路和中间接头等)时发生反射,记录反射脉冲与发射脉冲的时间差  $\Delta t$ 。同理于(6)式,由已知脉冲在电缆中的波速度为  $v$ ,可以计算阻抗不匹配点到测量点的距离。②脉冲电压法适用于高阻和闪络故障,由直流高压或脉冲高压信号击穿电缆故障点,利用放电电压脉冲在观察点与故障点之间往返一次的时间来测距,适用于高阻和闪络故障。③脉冲电流测试法,通常包括直流高压闪络法和冲击高压闪络法,同样适用于高阻和闪络故障,但由于克服了脉冲电压法的缺点,所以应用更广泛。上面方法测试原理中的共同点都是通过从外面向故障电缆注入电脉冲信号,然后利用放电脉冲在信号采集点与故障点之间往返一次的时间来确定故障点位置。

## 4 行波测距装置应用现状

20 世纪 90 年代以来,国内外制造商们已有很多行波测距的产品投入实际运行,并且积累了多年的运行经验,也产生了较大的经济效益。英国的 Hathaway 公司在 1992 年研制出利用行波暂态分量的现代行波测距装置原型样机,并在苏格兰电网投入试运行。1993 年,该公司推出正式的行波测距系统。至 2001 年为止,该公司分别在苏格兰和 (下转第 65 页)

- [15] 吴京涛. 基于PMU的电力系统动态监测系统软件包的框架研究[D]. 北京:清华大学电机工程与应用电子技术系, 2001.
- [16] 谢小荣, 李红军, 吴京涛, 等. 同步相量技术应用于电力系统暂态稳定性控制的可行性分析[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 10-14.
- [17] Snyder A F, Hadjsaid N, Georges D, et al. Inter-area oscillation damping with power system stabilizers and synchronized phasor measurements. 1998 International Conference on Power System Technology, 1998, 2(8): 790-794.
- [18] Xie Xiaorong, Li Jian, Xiao Jinyu, et al. Inter-area damping control of STATCOM using wide-area measurements. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, 2004, 1: 222-227.
- [19] Bretas N G, Phadke A G. Real time instability prediction through adaptive time series coefficients. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 1999, 1: 731-736.
- [20] Wang Yi-Jen, Liu Chih-Wen, Sue Len-Dar. A remedial control scheme protects against transient instabilities based on phasor measurement units (PMUs) — A case study. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, 2: 1191-1195.
- [21] Nuqui R F, Phadke A G, Schulz R P. Fast On-line voltage security monitoring using synchronized phasor measurements and decision trees. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001, 3: 1347-1352.
- [22] Milosevic B, Begovic M. Voltage stability protection and control using a wide-area network of phasor measurements. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(1): 121-127.
- [23] Snyder A F, Ivanescu D, Hadjsaid N, et al. Delayed input wide-area stability control with synchronized phasor measurements and linear matrix inequalities. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, 2: 1009-1014.
- [24] Mekki K, Snyder A F, Hadjsaid N, et al. Damping controller input-signal loss effects on the wide-area stability of an interconnected power system. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, 2: 1015-1019.

(收稿日期: 2007-12-10)

(上接第59页) 南非的132~400 kV的电力系统中共安装了30套行波采集单元, 所监视的线路包括3条串联补偿线路和一条直流线路。加拿大的不列颠哥伦比亚水电公司在1993年研制出双端行波故障测距系统, 并安装在不列颠哥伦比亚省的14个500 kV变电所, 覆盖线路总长超过5 300 km。该系统通过专门研制的耦合装置采集故障产生的高频电压信号。实际运行表明, 上述系统均可以将故障定位到300 m以内。国内科汇公司推出行波测距产品十多年来, 取得很大的成功。产品XC-2000投入在数个省网和南方电网以及500 kV葛南直流输电线路运行, 测距平均绝对误差小于200 m。

## 5 结论与展望

行波测距技术能够实现高压架空线路故障的精确定位, 具有简单、可靠、适应性强和适用面广的特点。电力电缆故障的离线探测与定位较成熟, 其原理也比较简单, 发展方向是联系应用架空线上的成熟技术, 发展在线行波故障点定位。

现代行波故障测距系统需要解决的关键问题仍然包括的有: 信号的确定性与防范受扰动的问题; 波

速的精确性与测距误差如何进一步控制; 小波变换和GPS与行波测距的有效结合以及研制光互感器用于取得暂态信号等问题。新的基于行波信息的故障定位原理的开拓及行波和相关新技术的应用结合也是发展的大方向。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 李友军, 王俊生, 郑玉平, 等. 几种行波测距算法的比较[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(14): 36-39.
- [3] 陈平, 牛燕雄, 徐丙垠, 等. 现代行波故障测距系统的研制[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 81-85.
- [4] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安交通大学出版社, 2007.
- [5] 乔峰, 余发山, 张宇华. 基于行波法的输电线路故障测距的研究[J]. 煤矿机电, 2004(5): 69-72.
- [6] 张正团, 文锋, 徐丙垠. 基于小波分析的电缆故障测距[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(1): 49-52.

### 作者简介:

党晓强(1975~), 男, 四川西昌人, 博士, 讲师, 从事电气设备故障诊断方面的教学和研究工作。

(收稿日期: 2008-01-20)