

行波法在电气化铁道牵引网故障测距中应用的可行性研究

焦在滨,高仕斌

(西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要: 根据电气化铁道牵引网的各种供电方式,在具体分析的基础上,讨论了行波法在电气化铁道牵引网故障测距中应用的可行性,并对一些需要考虑的问题作了初步的探讨。

关键词: 行波; 电气化铁道; 牵引网; 故障测距

中图分类号: TM744 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)07-0033-04

1 引言

近年来随着电子技术和计算机技术的发展以及小波分析等数学工具在故障信息分析和检测领域的应用逐渐成熟,利用故障的高频暂态信息中的行波进行故障测距的方法在电力系统中得到了广泛的应用。电气化铁道牵引网采用的是工频单相 25 kV 交流供电制式,其供电原理和结构与电力系统中的高压传输线有很多相似之处,但也有其自身的显著特点。本文分析了行波法应用于电气化铁道牵引供电系统的可行性,以期能够通过行波法在电气化铁道牵引网中应用行波测距,达到缩短抢修时间,提高运输效率的目的。

2 行波测距理论

电力系统的高压传输线和电气化铁道中的牵引网的作用都是传输电能,实际的输电线路一般可以看作是均匀分布参数电路,由于存在着分布电感和分布电容,当线路上发生故障时,故障点会产生向线路两端传播的行波。如果在传输过程中输电线的参数和波阻抗发生变化,那么行波就将发生反射和折射现象。行波法就是利用波在故障点与母线以及其他波阻抗之间的传播(发生反射和折射现象)来实现对故障点的快速精确测距的。

传统的行波法测距装置根据实现方法的不同可以分为 3 种类型^[1]。

A 型装置利用故障点产生的行波,根据波在故障点和测量点(一般设在母线处)往返一次的时间和行波的波速利用公式 $D_F = \frac{l}{2}$ 来确定故障点的位置(式中 t 表示行波在故障点与测量点之间传播所用的时间)。这种类型的测距装置实现的关键在于识别反射波是来源于故障点还是对端母线。这种装置适用于单端供电的线路。

B 型装置利用故障点产生的行波到达线路两端的时间,借助于两端的通信实现测距,由于不需要识别行波的性质,因此实现起来困难较小。近年来随着 GPS 技术的发展,使得基于 GPS 的精确对时双端行波法(D 型装置)得以实现^[2],其原理与 B 型装置一样。当 F 点发生故障后,将产生向两端母线 m 和 n 传播的行波(如图 1 所示,其中箭头方向为行波传播的方向),母线 m 和 n 处的行波测距装置记录下行波波头信号到达的时刻,然后利用公式 $D_F = \frac{(t_m - t_n) \cdot l}{2}$ 即可得到故障点距两端的距离。这种装置适用于双端供电的线路,由于 GPS 可以精确获得行波到达的时刻,使得这种方法计算故障距离是精确并且稳定的。

The study in protection theory, disposition and realization of TCSC device

HU Yü-feng, YIN Xiang-gen, CHEN De-shu, ZHANG zhe

(Department of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Sci. & Tech., Wuhan 430074, China)

Abstract: Aim at the protection system of TCSC device and based on the introduction of its primary fault type, this paper analyzes the basic disposition and structure, explains the basic theory and realization method of the protection system detailedly, at the same time, expatiates their functions and effects. Hoping the paper can provide a full-scale reference in this research field.

Key words: unbalance protection; overload protection; high-temperature protection; energy protection; capacitor discharge function; insulated platform flashover protection; three-phases un-identical protection

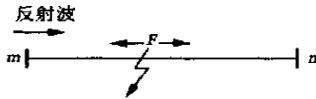


图 1 行波法测距原理图

Fig. 1 sketch of feasibility of using traveling wave in the fault location

C型装置是利用特定的装置在故障发生后发射高压高频或直流脉冲信号,根据脉冲在装置和故障点间往返的时间进行测距的。由于这种类型的装置需要附加专用设备,并且利用电力线载波通信,显然根据电气化铁路的特点,这种装置是不适用于电气化铁路牵引供电系统的。

适用于电气化铁路牵引网故障测距的行波信号可以采用以下两种方法获得:一是利用测量点的电压和电流信号合成正向行波 $u_1(t)$ 和反向行波 $u_2(t)$ ^[1]:

$$u_1(t) = [u_m + Z i_m(t)] / 2 \quad (1)$$

$$u_2(t) = [u_m - Z i_m(t)] / 2 \quad (2)$$

另一种方法是直接利用暂态信号形成行波^[3]:

$$i_m(t) = \frac{1}{Z_c} [-u_F(t - \tau) + k_m u_F(t - \tau) - k_m k u_F(t - 3\tau) + k_m^2 k u_F(t - 3\tau) + \dots] \quad (3)$$

$$u_m(t) = u_F(t - \tau) + k_m u_F(t - \tau) + k_m k u_F(t - 3\tau) + k_m^2 k u_F(t - 3\tau) + \dots \quad (4)$$

式中: u_m, i_m 分别为反射点的电压和电流; Z 为等效波阻抗; u_F 为初始电压; k_m, k 分别为反射点和故障点的反射系数。

3 行波法在电气化铁路中应用的可行性

电气化铁路牵引供电系统的作用是为电力机车提供电能,电力机车利用受电弓滑动取流,正常运行情况下采用单相单端供电方式,为了适应电力牵引负荷的特点,减少对电力系统以及通信线的影响,其变压器的接线方式和牵引网的供电方式都有自身的特点。牵引供电系统具体的供电方式主要有直接供电方式、BT(吸流变压器)方式和AT(自耦变压器)方式。而且牵引变电所母线的出线方式也不同,对于单线牵引网,每个供电臂只有一条出线;而对于复线和站场牵引网,每个供电臂上有多条出线。复线牵引网上下行接触线在供电臂的终端联接在一起,形成了实际上的双端供电方式。另外,为了提高供电的灵活性、可靠性和安装设备的方便,还设置了开闭

所和分区所,其内部的结线以及倒闸操作都将对行波的传播造成一定的影响。

以上这些因素都是电气化铁道牵引网区别于电力系统高压传输线的特点,必须在应用行波进行测距的过程中给予充分的考虑,否则必然会导致应用的失败。下面根据电气化铁道供电方式以及出线的特点,对行波法在电气化铁道中应用的可行性进行具体的分析。

3.1 BT供电方式

BT供电方式原理如图2所示^[4],为了减少电气化铁道谐波对通信线的影响,在牵引网中串联接入了1:1的吸流变压器。吸流变压器的存在将对行波的传播产生严重的影响,行波波头中含有大量的高频成分,这样就使得吸流变压器的绕组实际上起到了阻波器的作用,行波将不能通过吸流变压器到达测量点。根据行波传输理论,行波在传输过程中的反射系数和折射系数分别为 $k_R = \frac{Z - Z}{Z + Z}$ 和 $k_T = \frac{2Z}{Z + Z}$ 。由于吸流变压器及其连接线路的等效波

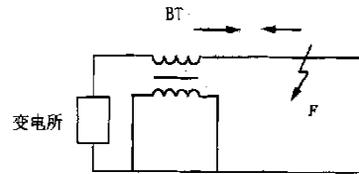


图 2 BT供电方式原理图

Fig. 2 Sketch of BT function

阻抗 Z 远大于线路的波阻抗 Z ,即 $Z \gg Z$ 。由公式可得 $k_R \approx 1$,可以看出吸流变压器可以很好的对行波形成反射,而折射波由于绕组的波阻抗的影响将迅速削弱而不能到达测量点。但是由式(3)和(4)反射点(测量点)的电压和电流都是入射波和反射波的叠加,由式(3)可以看到由于 $k_R \approx 1$ 就使得反射点的电流由于反射系数的影响将变得接近于0,因此对于这种供电方式,在选择暂态信号的时候,应该选择电压行波而不是暂态电流,否则测距将失败。

从上面的分析,可以看到,BT供电方式可以利用电压行波的波头信号实现故障测距,但是由于吸流变压器的客观阻波作用,必须在吸流变压器两端设置相应的波头信息采集和定位装置才能达到良好的效果,而接触悬挂负载的大小又会影响整个牵引网的弹性从而影响电力机车在高速运行的过程中的受流特性,因此虽然在理论上BT供电方式可以利用电压行波的波头信号实现故障测距,但是实际中

会遇到很多问题而不易实现。

3.2 含有串联补偿装置的牵引网

在电气化铁道牵引网中,为了保证牵引网末端的网压,安装了串联补偿装置(如图3所示),串联补偿装置对传统的阻抗法测距产生了严重的影响,阻抗法在含有串联补偿装置的牵引网中不能正常使用。但是,如果应用行波法,这个问题就可以得到解决。牵引网中串联的补偿电容与其他线路的串联波阻抗就是行波波头所看到的等效波阻抗,由于在高频的情况下 $Z_c \rightarrow 0$,所以 $Z \rightarrow Z_0$,由反射系数和折射系数的公式得 $k_R \rightarrow 0, k_T \rightarrow 1$ 。从中我们得到这样的结论:行波的传输基本不受影响,因此这种类型的牵引网可以利用行波法进行测距。

3.3 直接供电方式和AT供电方式

采用直接供电方式的牵引网与电力系统的高压输电线的结构相同,显然可以应用行波法进行测距。

对于AT供电方式而言(如图4所示),由于在牵引网中设置了自耦变压器^[4],故情况比较复杂,但是由于从行波看到的等效阻抗实际上是自耦变压器绕组的波阻抗和线路波阻抗的并联,而变压器绕组的波阻抗当频率比较高时接近于无穷大,故在理想情况下,可以将自耦变压器看作开路,此时将不会产生反射和折射现象。但是在实际情况下将会产生一定的折射和反射,我们可以用设置启动阈值的方法把这种影响滤除。因此只要选择合适的算法,AT供电方式牵引网也可以应用行波法进行测距。

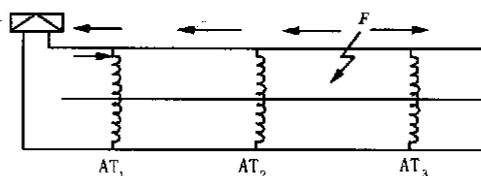


图4 AT供电方式原理图

Fig.4 Sketch of AT function

3.4 复线牵引网

在电气化铁道的复线牵引网区段,往往设置了分区来实现上下行牵引网同相并联供电,达到改善正常运行情况下的供电性能降低压损和能耗的目的,在故障的情况下,可以根据实际情况实现由邻近的牵引网越区供电,保证电力机车的正常运行。如图5所示,由于上下行牵引网在终端连接,因此在复

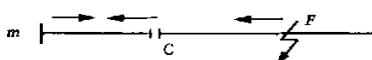


图3 含串联补偿装置的牵引网原理图

Fig.3 Sketch of traction network with series compensation

图5所示,由于上下行牵引网在终端连接,因此在复

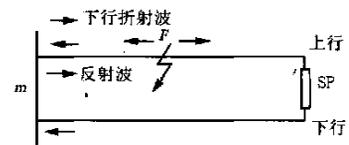


图5 终端互联的复线牵引网原理图

Fig.5 Sketch of multitrack traction network interconnected in the end

线牵引网任何一个位置发生故障时,产生的行波信号将向两侧传播,又因为实际上由于SP中保护装置的动作时间小于行波到达测量点的时间,故行波波头信号将先后到达测量点。可见,这种情况下行波的传播方式与电力系统双端供电的方式是一样的。利用在母线m处测量点的波头检测和定位装置就可以检测到波头到达的时间,由于两个测量装置距离很近,所以可以不用专用的通信装置就可以实现测距。

但是由于上下行牵引网是连在同一条母线m上的,因此,两条接触线的行波信号必然会产生相互的影响。所以在采集到暂态信号后,必须对信号进行具体的分析,以识别出初始行波波头信号。如果采用电流暂态信号作为测距信号,那么通过对行波折射和反射的分析,我们可以得到以下结论,反射波和另外一侧接触线的折射波的方向与初始行波的方向是相反的。通过这个特征就可以有效地识别初始行波的信息,达到精确测距的目的。

根据以上分析,复线牵引网(BT供电方式除外)可以应用行波法进行测距。

3.5 其他需要考虑的问题

(1) 电力机车负荷相对于变电所容量较大,在AT供电方式下,一条供电臂上可能存在同时运行的两台以上的电力机车,机车断路器的分合操作也将在牵引网中产生行波信号,因此必须采用其他的判据(如幅值或者谐波含量)来进行区分。另外在测距启动上最好进行自适应处理,这样可以提高测距启动的可靠性。

(2) 站场接触网结构复杂,其结构和设备(包括线岔、锚段关节以及分相绝缘器和分段绝缘器等)将对行波的传播产生严重的影响,例如在绝缘锚段关节处,由于两条接触线出现换位现象,所以波阻抗将发生变化,对行波的传播产生影响。而线岔由于相当于将一条传输线分为两条,对行波的传播影响将是非常严重的。因此要实现成功测距,就必须在装置的安装位置和算法上综合全面的考虑这些因素,

只有这样才能成功地实现行波测距。

(3) 对于未实现并联方式运行的单线牵引网及终端开路的牵引网,由于不存在对端的母线的反射波,故采用单端进行测距就不需要识别行波信号是来源于故障点还是对端母线,因此适合于采用 A 型装置进行测距。

(4) 暂态信号中含有大量的高频成分,这就要求在信号采集过程中尽量减少失真,以便在信号处理的过程中能够准确的识别出波头的位置。现有的电磁型电压互感器和电流互感器都能够传输频率大于 10 kHz 的暂态信号,电流互感器甚至能够传输 100 kHz 的高频信号,因此能够满足测距装置对信号采集的要求。但是如果应用电容型电压互感器,由于其截止频率比较低,将带来比较的大的测距误差。另外由于电磁波在传输线中的传播速度接近于光速,因此要求信号分析工具必须是无相移的,在选择分析工具(一般采用小波变换)的时候必须考虑这一点。

(5) 为了防止雷击过电压沿馈线窜入牵引变电所,引起所内设备的损坏或保护的误动作,一般的牵引变电所都装有避雷线圈,避雷线圈的装设将影响利用故障行波进行测距,甚至可能导致测距的失败。在实际应用中,可以参考电力系统的做法,即在避雷线圈外侧装设电流互感器和电压互感器,以实现利用行波法进行测距。

4 结论

电力系统高压传输线的行波测距方案经过最近几年的发展已经比较成熟,并且已经有厂家推出了基于行波法和小波分析的测距产品。但是由于电气化铁道自身的复杂性,应用这一理论必须综合考虑网络结构和负荷特点等多方面的因素,因此行波法

在电气化铁道的应用还是空白,另一方面,电气化铁道的故障几率比较高,研究行波测距理论来进行精确测距是必要的。通过本文的探讨,可以得出以下结论。

(1) 行波法进行故障测距对于接触网上装有串联补偿器的牵引网能够克服阻抗法测距原理所存在的不足。

(2) 对于直供和 AT 牵引网,行波法测距原理是适用的。

(3) 对于 BT 牵引网,由于吸流变压器的阻波作用,行波法测距原理的应用受到了限制。

(4) 在具体实现时,还应该充分考虑机车断路器的投切,站场接触网参数、接触网结构,变电所所装设的避雷线圈等方面的影响。

参考文献:

- [1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安:西安交通大学出版社,1996.
- [2] 冉旭,廖培金,等. 行波故障测距法在电气化铁道牵引网中的应用研究[J]. 电网技术,2001,25(2):35-38.
- [3] 林湘宁,刘沛,等. 基于故障电流暂态分量的测距研究[J]. 电力系统自动化,2002,26(3):45-50.
- [4] 曹建猷. 电气化铁道供电系统[M]. 北京:中国铁道出版社,1981.
- [5] 贺威俊,简克良. 电气化铁道供变电工程[M]. 北京:中国铁道出版社,1980.

收稿日期: 2002-05-23; 修回日期:2002-12-31

作者简介:

焦在滨(1976-),男,硕士研究生,研究方向为微机保护及综合自动化;

高仕斌(1963-),男,教授,研究方向为微机保护及综合自动化。

Study on the feasibility of using traveling wave in the fault location in the overhead contact network of electrified railway traction

JIAO Zai-bin, GAO Shi-bin

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In view of all kinds of functions used in the railway power supply system, through analysis, the feasibility of using traveling wave in the fault location in the overhead contact network of electrified railway traction is discussed. And some questions that are worthy of attention in using are discussed too.

Key words: traveling wave; overhead contact network; electrified railway; fault location