

现代行波故障测距原理及其在实测故障分析中的应用 —D型原理

陈平¹,葛耀中¹,徐丙垠²,李京²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 山东科汇电气股份有限公司, 山东 淄博 255031)

摘要: 输电线路上的实际暂态行波波头总是存在一定的上升时间,这使得故障初始行波浪涌到达线路两端测量点的时刻难以被准确标定,从而导致现有的双端行波故障测距方法存在不可避免的测距误差。在分析D型双端现代行波故障测距原理及其准确性的基础上提出了带补偿量的D型双端行波故障测距算法,该算法利用故障初始行波浪涌波头起始点所对应的绝对时刻与测距装置直接检测到该行波浪涌到达时绝对时刻之间的相对时间差来对测距误差进行补偿。实测故障分析表明,D型现代行波故障测距原理具有很高的可靠性,其绝对测距误差不超过1 km。

关键词: 输电线路; 现代行波故障测距; 全球定位系统; D型原理; 电流暂态

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)03-0014-04

0 引言

输电线路行波故障测距技术因具有测距精度高和适用范围广等优点,一直为继电保护专业人员所关注^[1]。早在20世纪50年代,国外就研制出A、B、C、D等4种基本型式的行波故障测距装置,但因其存在可靠性差、构成复杂以及价格昂贵等问题,终究没有得到推广应用。

20世纪90年代初,在A型早期行波故障测距原理的基础上,我国提出了利用电流暂态故障分量的A型现代行波故障测距原理、算法和实现方案^[2,3],从而推动了现代行波故障测距(MTWL)的发展^[4]。另一方面,全球定位系统在电力系统中的应用^[5],为现代电力系统同步时钟的研制创造了条件^[6],进而使得D型现代行波故障测距原理得到发展。

1995年,国内研制出利用电流暂态分量的输电线路现代行波故障测距装置,它集成了A、D、E等3种现代行波故障测距原理,其平均绝对测距误差在400 m以内^[7]。2000年,国内又推出功能更为强大的现代行波故障测距系统,其绝对测距误差可控制在200 m以内^[8]。

近年来,国内学者开始将现代A型行波故障测距原理用于继电保护,并提出了基于小波变换的测距式行波距离保护原理^[9,10]。实测故障分析表明^[11],现代A型行波故障测距原理具有很高的测距精度,但测距算法的可靠性还有待于进一步提高。

本文在分析D型双端现代行波故障测距原理

及其准确性的基础上提出了带补偿量的双端行波故障测距算法,并将其用于实际故障产生的电流暂态波形分析。

1 D型现代行波故障测距基本原理

D型现代行波故障测距原理为利用故障暂态行波的双端测距原理,它利用线路内部故障产生的初始行波浪涌到达线路两端测量点时的绝对时间之差值计算故障点到两端测量点之间的距离。

设线路MN故障产生的初始行波浪涌以相同的传播速度 v 到达M端和N端母线的绝对时间分别为 T_M 和 T_N ,则M端和N端母线到故障点的距离可以表示为:

$$\begin{cases} D_{MF} = \frac{1}{2} [v(T_M - T_N) + L] \\ D_{NF} = \frac{1}{2} [v(T_N - T_M) + L] \end{cases} \quad (1)$$

式中: L 为线路MN的长度。

为了准确标定故障初始行波浪涌到达两端母线的时刻,线路两端必须配备高精度和高稳定度的实时时钟,而且两端时钟必须保持精确同步。另外,实时对线路两端的电气量进行同步高速采集,并且对故障暂态波形进行存储和处理也是十分必要的。

D型早期行波故障测距装置采用载波方式实现线路两端测距装置的时间同步,因而难以获得较高的测距精度。D型现代行波故障测距原理采用内置全球定位系统(GPS)接收模块的电力系统同步时钟实现精确同步,这使得线路两端的时间同步误差

平均不超过 $1 \mu\text{s}$, 而由此产生的绝对测距误差不超过 150 m 。

2 D型现代行波故障测距原理的准确性分析

D型现代行波故障测距原理利用线路长度、波速度和故障初始行波浪涌到达故障线路两端母线时的绝对时间之差值计算故障距离。因此,能否获得准确的线路长度、波速度和故障初始行波浪涌的到达时刻,将直接影响测距准确性。

严格来讲,无论是传统的故障测距原理,还是行波故障测距原理,其测距结果都表示故障点到线路末端的实际导线长度。但巡线时往往将测距结果当作地理上的水平距离并以此作为查找故障和计算测距误差的依据,而并不考虑线路弧垂的影响。同样,线路全长也是以水平距离的形式预先给定,当线路较长时,计及弧垂影响后的实际导线长度与导线水平长度相差较大。D型行波故障测距原理需要利用线路全长,因而其测距误差往往比其它不需线路全长的行波故障测距原理(如A型原理)的测距误差要大。比较理想的做法是利用线路设计数据计算出不同温度条件下沿线各档距内的实际导线长度,进而获得实际线路导线的总长度(用于D型测距),并最终将故障测距结果换算为故障所在档距或杆塔号。

故障暂态行波具有从低频到高频的连续频谱,其中不同频率分量的传播速度是不相同的。行波分量的频率越低,其传播速度越慢;行波分量的频率越高,其传播速度也越快,并且越趋于一致(接近光速)。随着电压等级的不同,输电线路暂态行波中高频分量的传播速度大约在光速的 $97\% \sim 99\%$ 范围内变化,具体可以利用线路结构参数进行计算,也可以实际测量。

为了获得准确的测距结果,故障初始行波浪涌的到达时刻应定义为其中能够到达测量点的最高频率分量的到达时刻。从时域来看,故障初始行波浪涌的到达时刻就是其波头起始点所对应的时刻,该时刻的测量误差取决于采样频率和GPS对时误差。采样频率越高,对故障初始行波波头起始位置的标定误差越小;GPS对时误差越小,对故障初始行波波头起始时刻的标定误差越小。由于暂态行波中的高频分量在传播过程中随传播距离的增加会发生较大程度的衰减,因而当采用固定的波速度时,到达线路两端的故障初始波头时间差越大(即故障点越靠近线路某一端),其测量误差也越大。研究发现,GPS接收机普遍存在输出信号瞬时不稳定、卫星失锁以

及时钟跳变等问题^[12],因而其输出的时间信息和秒脉冲信号(1 PPS)不能直接利用,必须附加高稳定度守时钟,并且需要消除偏差超过某一限定范围的时间同步信号。

当综合考虑以上因素时,D型现代行波故障测距原理的准确性将略低于A型现代行波故障测距原理的准确性,但测距误差一般不会超过 1 km ,这一点也已经被实测故障分析所证明。

3 带补偿量的D型双端行波故障测距算法

设线路MN两端测量点直接感受到本线路内部故障产生初始暂态信号超过某一检测门槛值的绝对时间分别为 T_M 和 T_N ,对应此时刻的采样序号分别为 K_{M1} 和 K_{N1} ,两端测量点的故障暂态信号中距离初始波头起始点最近的采样序号分别为 K_{M1}'' 和 K_{N1}'' ,则故障初始行波浪涌实际到达M端和N端母线的绝对时间(即对应波头起始点的时间) T_M 和 T_N 可以表示为:

$$T_M = [T_M - T_S(K_{M1} - K_{M1}'')] + T_M'' \quad (2)$$

$$T_N = [T_N - T_S(K_{N1} - K_{N1}'')] + T_N'' \quad (3)$$

式中: T_S 为采样周期; T_M'' 为M端故障暂态信号中第 K_{M1}'' 个采样点与初始波头起始点之间的时间差; T_N'' 为N端故障暂态信号中第 K_{N1}'' 个采样点与初始波头起始点之间的时间差。

由式(1)给出的D型现代行波故障测距算法可以改写为:

$$\begin{cases} D_{MF} = \frac{1}{2} [v(T_M - T_N) + L] + \frac{1}{2} v T \\ D_{NF} = \frac{1}{2} [v(T_N - T_M) + L] - \frac{1}{2} v T \end{cases} \quad (4)$$

式中: $T = (T_M'' - T_N'')$

$$T_S[(K_{M1} - K_{M1}'') - (K_{N1} - K_{N1}'')] \quad (5)$$

从实用的角度,可取 $T_M'' - T_N'' = 0$,从而有:

$$T = -T_S[(K_{M1} - K_{M1}'') - (K_{N1} - K_{N1}'')] \quad (6)$$

式(4)直接利用故障初始行波浪涌波头起始点对应的绝对时刻与测距装置直接检测到该行波浪涌到达时绝对时刻之间的相对差值来对测距结果进行补偿,而不必具体计算故障初始行波浪涌波头起始点对应的绝对时刻,这给测距算法的实时应用带来了方便。

4 实测故障分析

4.1 普通交流线路

2000年6月23日17时36分17秒,广西柳州供

电局所管辖的 110 kV 埠屯线(洛埠变—屯秋变)发生故障。由于屯秋变只有屯埠线和浮屯线(屯秋变—浮石变)两回 110 kV 线路(线路总长度为 90.6 km),为了节省投资,只对洛埠变和浮石变的线路进行监视,其中埠屯线和浮屯线的电流暂态故障分量波形如图 1 所示。根据 D 型行波测距原理获得的故障点位置距洛埠变和浮石变分别为 6.3 km 和 84.2 km(显示在两端波形窗口上方),实际故障点距洛埠变 6.2 km。从图 1 可以看出,两端波形较为复杂,通过单端 A 型原理不容易获得可靠的故障距离。

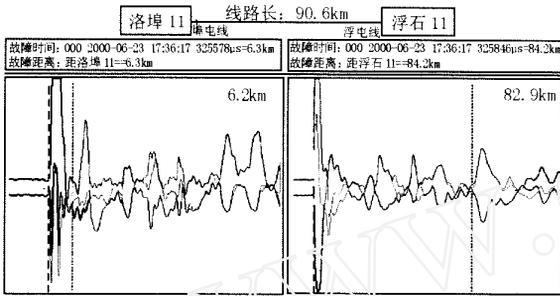


图 1 埠屯/浮屯线两侧电流暂态故障分量波形及测距结果

Fig. 1 Current transient fault component waveforms and locating results at both ends of Line Butun/Futun

4.2 双回线路

2002 年 4 月 16 日 4 时 29 分 39 秒,黑龙江绥化电业局所管辖的 220 kV 康绥甲线发生 B 相接地故障,故障线路两侧的电流暂态故障分量波形如图 2 所示。根据 D 型行波测距原理获得的故障点位置距绥化变和康金变分别为 9.2 km 和 55 km,实际故障点距绥化变 8.955 km。

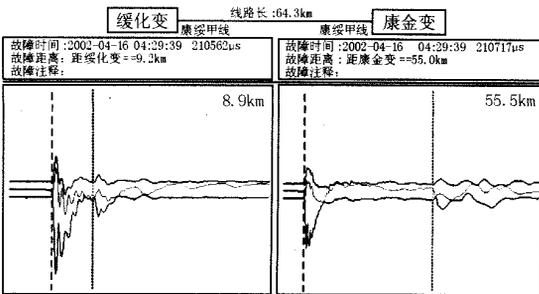


图 2 康绥甲线两侧电流暂态故障分量波形及测距结果

Fig. 2 Current transient fault component waveforms and locating results at both ends of Line Kang Sui No. 1

4.3 串联补偿线路

2002 年 6 月 3 日 20 时 21 分 24 秒,北京供电局所管辖的带串联电容补偿(补偿度为 35%)的 500 kV 大房双回线之大房二线发生故障,故障线路两侧的电流

暂态故障分量波形如图 3 所示。根据 D 型行波测距原理获得的故障点位置距大同二电厂和房山变分别为 171.9 km 和 116 km,与实际故障点位置的误差不超过 400 m。从图 3 可以看出,两端波形均较为复杂。

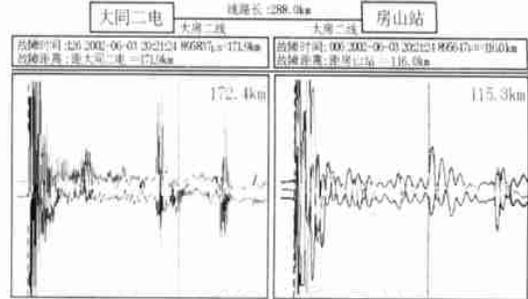


图 3 大房二线两侧电流暂态故障分量波形及测距结果

Fig. 3 Current transient fault component waveforms and locating results at both ends of Line Da Fang No. 2

4.4 直流输电线路

2002 年 1 月 18 日 14 时 38 分 28 秒,我国第 1 条 ± 500 kV 直流输电线路—葛南线在麦元中继站到上海南桥站之间的区段内发生故障。原先给定本区段线路全长为 513 km,由此根据 D 型行波测距原理获得的故障点位置距麦元侧 128.3 km。但利用该区段线路两端的故障暂态数据进行单端 A 型行波测距所获得的故障点位置距麦元站和南桥站分别为 123.3 km 和 381.7 km。由于通过这两种原理获得的故障距离相差太大(为 5 km),于是怀疑该区段线路全长存在较大误差。利用该区段线路两端的 A 型测距结果进行校正后的该区段线路全长为 505 km,由此重新获得的 D 型行波测距结果为距麦元站 124.3 km,距南桥站 380.6 km。该区段内线路两端的故障暂态电流(通过专门研制的行波耦合器取得)如图 4 所示。实际故障距离为距麦元站 123.5 km。

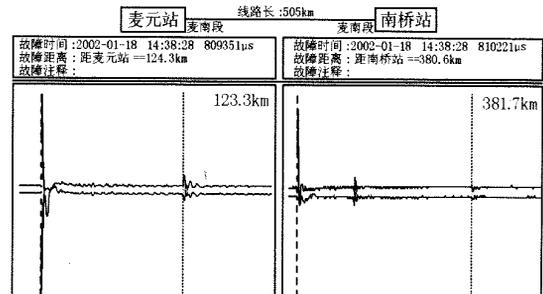


图 4 麦南段两侧电流暂态故障分量波形及测距结果

Fig. 4 Current transient fault component waveforms and locating results at both ends of Section Mai-Nan

5 结语

本文提出了一种带补偿量的D型双端行波故障测距算法,并将其用于实际故障产生的电流暂态波形分析,为现代行波故障测距技术的进一步推广奠定了基础。实测故障分析表明,D型现代行波故障测距原理具有很高的可靠性。由于受线路长度和GPS的影响,D型行波原理的测距误差稍大于A型行波原理的测距误差,但一般不会超过1 km。

参考文献:

- [1] 葛耀中(GE Yao-zhong). 新型继电保护与故障测距原理与技术(New Types of Protective Relaying and Fault Location: Theory and Techniques) [M]. 西安:西安交通大学出版社(Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press), 1996.
- [2] 徐丙垠(XU Bing-yin). 利用暂态行波的输电线路故障测距技术(博士学位论文)(Fault Location Technology of Transmission Lines Based on Travelling Waves, Doctoral Dissertation) [D]. 西安:西安交通大学(Xi'an: Xi'an Jiaotong University), 1991.
- [3] 徐丙垠,葛耀中,朱锡贵(XU Bing-yin, GE Yao-zhong, ZHU Xi-gui). 利用暂态电流行波的输电线路故障测距技术(Fault Location Based on Fault Generated Current Transients) [A]. 第五届全国继电保护学术年会论文集(Proceedings of the Fifth Protective Relaying Conference) [C]. 北京(Beijing): 1993.
- [4] 徐丙垠,李京,陈平,等(XU Bing-yin, LI Jing, CHEN Ping, et al). 现代行波测距技术及其应用(Modern Travelling Wave Based Fault Location Technology and Its Application) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(23): 62-55.
- [5] Cory B J, Gale P F. Satellites for Power System Applications [J]. Power Engineering Journal, 1993, 7(5): 201-207.
- [6] 徐丙垠,李桂义,李京,等(XU Bing-yin, LI Gui-yi, LI Jing, et al). 接收GPS卫星信号的电力系统同步时钟(Synchronous Clock in Power System by Receiving Signal from GPS) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1995, 19(3): 44-47.
- [7] 陈平,徐丙垠,李京,等(CHEN Ping, XU Bing-yin, LI

- Jing, et al). 现代行波故障测距装置及其运行经验(Modern Travelling Wave Based Fault Locator and Its Operating Experience) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2003, 27(6): 66-69.
- [8] 陈平,徐丙垠,李京,等(CHEN Ping, XU Bing-yin, LI Jing, et al). 现代行波故障测距系统的研制(Development of Modern Travelling Wave Based Fault Locating System) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2003, 27(12): 81-85.
- [9] 葛耀中,董新洲,董杏丽(GE Yao-zhong, DONG Xin-zhou, DONG Xing-li). 测距式行波距离保护的研究(一)——理论与实现技术(Travelling Wave-based Distance Protection with Fault Location, Part One: Theory and Technology) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(6): 34-40.
- [10] 董杏丽,葛耀中,董新洲(DONG Xing-li, GE Yao-zhong, DONG Xin-zhou). 测距式行波距离保护的研究(二)——原理方案与仿真试验(Travelling Wave-based Distance Protection with Fault Location, Part Two: Scheme and Simulation) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(9): 53-58.
- [11] 陈平,葛耀中,徐丙垠,等(CHEN Ping, GE Yao-zhong, XU Bing-yin, et al). 现代行波故障测距原理及其在实测故障分析中的应用——A型原理(Modern Travelling Wave Based Fault Location Principle and Its Applications to Actual Fault Analysis——Type A Principle) [J]. 继电器(Relay), 2004, 32(2): 13-18.
- [12] 王元虎,周东明(WANG Yuan-hu, ZHOU Dong-ming). 卫星时钟在电网中应用的若干技术问题(Some Technical Problems of Satellite Clock Applied on Power Network) [J]. 中国电力(Electric Power), 1998, 31(2): 10-16.

收稿日期: 2003-04-02

作者简介:

陈平(1969),男,博士研究生,高级工程师,研究方向为电力线路故障测距及继电保护技术;

葛耀中(1929),男,教授,博士生导师,长期从事电力系统新型继电保护与故障测距的理论与应用研究;

徐丙垠(1961-),男,博士,教授,研究方向为电力线路故障监测技术及配电网自动化技术。

Modern travelling wave-based fault location principle and its applications to actual fault analysis—type D principle

CHEN Ping¹, GE Yao-zhong¹, XU Bing-yin², LI Jing²

(1. Dept. of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Kehui Electric Co., Ltd, Zibo 255031, China)

(下转第28页 continued on page 28)

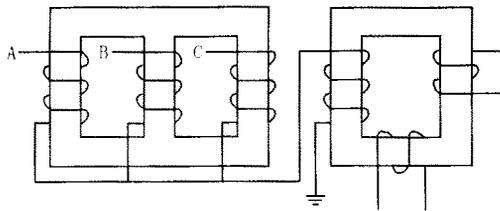


图5 新型三相三柱电压互感器示意图

Fig.5 Schematic diagram of the new voltage transformer with three phases and three poles

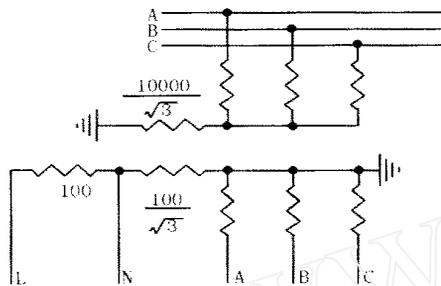


图6 新型三相三柱电压互感器接线原理图

Fig.6 Diagram of the connection of the new voltage transformer with three phases and three poles

合“S注入法”功能外,还具有消谐功能。

参考文献:

- [1] 张慧芬 (ZHANG Hui-fen). 微机通用小电流接地系统单相接地保护 (硕士学位论文) (Microcomputer-based General-purpose Protection Applying to Single Phase to Earth Fault Line Selection for Ungrounded Power System, Thesis) [D]. 济南: 山东工业大学 (Jinan: Shandong University of Technology), 1995.
- [2] 杨以涵 (YANG Yi-han). 电力系统基础 (Basis of Power System) [M]. 北京: 水利电力出版社 (Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1986.

收稿日期: 2003-05-12; 修回日期: 2003-07-17

作者简介:

王 慧 (1958 -), 女, 实验师, 从事电力系统继电保护方面的工作;

胡 珂 (1975 -), 女, 助工, 从事电力系统继电保护方面的工作;

桑在中 (1938 -), 男, 教授, 研究方向为电力系统继电保护。

A S's signal injection method and special connection modes of voltage transformer

WANG Hui, HU Ke, SANG Zai-zhong

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: A series of TY protections based on the S's signal injection method have been widely applied to fault line selection and fault location in power systems in China. Several special connection modes of voltage transformer are needed to eliminate harmonic components because diagnostic signals are injected through voltage transformer. The special connection modes are analyzed in the paper. The modes not only meet the need of eliminating harmonic components, but also are adapt to fault line selection and fault location of the S's signal injection method.

Key words: power system with indirectly earthed neutral; S's signal injection method; voltage transformer; connection mode

(上接第 17 页 continued from page 17)

Abstract: A rising time always exists in the wavefront of an actual transient travelling wave appearing on a transmission line. This makes it difficult to be tagged for the arrival time of the fault induced initial surge at both ends of one transmission line, resulting in unavoidable location error in the existing double-ended travelling wave-based fault location methods. Based on the analysis of type D double-ended modern travelling wave-based fault location principle and its accuracy, the compensated type D fault location algorithm is presented in this paper, which compensates the location error with the relative time difference between the absolute time corresponding to the start point of the fault caused initial surge and the detected arrival time of the fault caused initial surge by the fault locator at each end of the measured line. The actual fault analysis shows that the type D principle possesses very high reliability, and its absolute location error does not exceed 1 km.

Key words: transmission lines; modern travelling wave-based fault location (MTWL); global positioning system (GPS); type D principle; current transient