

现代行波故障测距装置及其运行经验

陈平¹, 徐丙垠², 李京², 董新洲³, 葛耀中¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西省西安市 710049; 2. 山东科汇电气股份有限公司, 山东省淄博市 255031)
(3. 清华大学电机系, 北京市 100084)

摘要:介绍了 XC-11 型现代输电线路行波故障测距装置的构成及工作原理,并总结了该装置自 1995 年以来在我国电网中的运行经验。该装置直接采集常规电流互感器二次电流信号,并采用 3 个独立的单片机系统分别完成高速数据采集与处理、GPS 时间同步与锁定以及通信和人机对话等功能。装置实现了 A、D、E 等 3 种现代行波故障测距原理,其中 A 型和 E 型均为单端原理,而 D 型为双端原理。运行经验表明,该装置具有较高的可靠性、准确性及性能价格比,其平均绝对测距误差不超过 400 m,最大绝对误差不超过 900 m。

关键词:输电线路; 现代行波故障测距; GPS; 小波

中图分类号: TM773

0 引言

输电线路行波故障测距技术因其适用范围广,不受过渡电阻、系统参数、串补电容、线路不对称及互感器变换误差等因素的影响,一直为国内外继电保护科研工作者所关注。早期的行波故障测距装置因存在可靠性差、构成复杂以及价格昂贵等问题,一直没有得到推广应用^[1]。

20 世纪 90 年代初,我国提出利用暂态电流信号的输电线路行波故障测距技术^[2,3],从而推动了现代行波故障测距(MTWFL)技术的发展^[4],并迅速商业化。

1995 年,西安交通大学和山东科汇电气股份有限公司等单位联合研制出利用暂态电流的 XC-11 型输电线路行波故障测距装置,它利用专门研制的高速数据采集与处理模块^[5]以及电力系统同步时钟^[6](内置 GPS 接收模块)分别实现对线路暂态电流信号的采集以及精确时间同步,并集成了 A、D、E 等 3 种现代行波故障测距原理^[4]及其实时算法。为了进一步提高测距装置的可靠性和准确性,还开发了利用暂态电流小波模极大值分量的行波故障分析软件包^[7]。到目前为止,该装置已在我国许多电网投入运行,其平均绝对测距误差不超过 400 m。

本文介绍了 XC-11 型输电线路行波故障测距装置的构成、工作原理及其在我国电网中的运行经验,并指出了需要进一步解决的问题。

1 装置构成

XC-11 型输电线路行波故障测距装置采用多

CPU(单片机)结构,如图 1 所示。整个装置主要包括高速数据采集与处理单元、GPS 接口单元、主控单元以及键盘、大屏幕液晶显示器和打印机等部件,其中各单元均含有独立的 CPU(最初为 8098,后改为 80C196),并通过串行接口组成主从式多机通信系统。

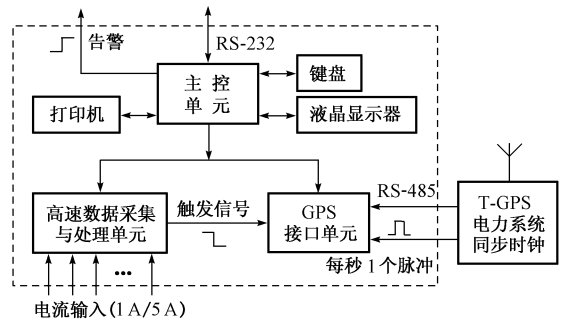


图 1 XC-11 构成框图
Fig. 1 Structure of XC-11

高速数据采集与处理单元负责暂态电流信号的采集(采样周期为 1.28 μs)、故障检测、故障选相、故障录波以及单端行波故障测距等功能,其中故障检测功能采用了硬件触发和软件确认两级防误措施。

GPS 接口单元负责接收来自 T-GPS 电力系统同步时钟的秒同步脉冲信号(每秒 1 个脉冲)和标准时钟信息,并准确标定暂态行波触发时刻(精确到 1 μs)。

主控单元完成人机对话、双端行波故障测距、生成故障报告(包括行波触发时间、故障线路、故障类型、故障距离及故障波形等数据)、显示暂态波形、打印测距结果、异常告警以及通信等功能。

2 工作原理

XC-11 型输电线路行波故障测距装置具有 A, D, E 等 3 种现代行波故障测距原理^[4]。A 型和 E 型均为单端原理,其中 A 型原理利用在线路一端测量到的故障暂态行波在故障点与本端或者对端母线之间往返一次的传播时间,计算故障点到本端或者对端母线之间的距离,而 E 型原理利用在线路一端测量到的由本端重合闸产生的暂态行波在本端母线与故障点之间往返一次的传播时间计算故障点到本端母线之间的距离。D 型为双端原理,它利用故障初始行波浪涌到达线路两端母线的 GPS 时间差计算故障点到线路任一端母线之间的距离。

当装置所监视的某一线路 MN 内部 F 点发生故障时,由故障点电压突变而产生的暂态行波将以速度 v (接近光速,具体取决于线路分布参数)从故障点向线路两端传播,如图 2 所示。

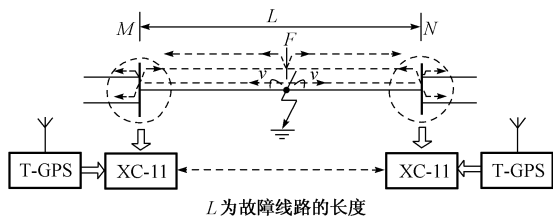


图 2 XC-11 工作原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the principle of XC-11

设故障初始行波浪涌到达线路两端测量点并引起相应测距装置触发的 GPS 时间分别为 T_M 和 T_N , 则根据 D 型行波故障测距原理,故障点到 M 端和 N 端的距离可以分别表示为:

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

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

故障初始行波浪涌到达 M 端和 N 端母线时将同时发生反射和透射,其中母线反射波将向着故障方向传播。母线反射波到达故障点时也将同时产生反射和透射,相应的故障点反射波和透射波将分别向着本端和对端母线方向传播。设 M 端测距装置所测量到的本端母线反射波与其在故障点反射波之间的时间延迟,以及本端故障初始行波浪涌与对端故障初始行波浪涌在对端母线反射波之间的时间延迟分别为 τ_M 和 τ_M' , N 端分别为 τ_N 和 τ_N' , 则根据现代 A 型行波故障测距原理可知, τ_M 和 τ_N 对应于行波在故障点与 M 端母线之间往返一次的传播时间, τ_N 和 τ_M' 对应于行波在故障点与 N 端母线之间往返一次的传播时间,因而故障点到 M 端和 N 端的距离又可以分别表示为:

$$D_{MF} = \frac{1}{2} v \tau_M = \frac{1}{2} v \tau_N' \quad (3)$$

$$D_{NF} = \frac{1}{2} v \tau_N = \frac{1}{2} v \tau_M' \quad (4)$$

对于永久性故障,当故障被切除后重合闸动作时所产生的暂态行波到达故障点时将产生反射和透射。设 M 端和 N 端测距装置所测量到的本端重合闸产生的初始行波浪涌与其在故障点反射波之间的时间延迟分别为 τ_{MR} 和 τ_{NR} , 则根据 E 型行波故障测距原理,故障点到 M 端和 N 端的距离还可以分别表示为:

$$D_{MF} = \frac{1}{2} v \tau_{MR} \quad (5)$$

$$D_{NF} = \frac{1}{2} v \tau_{NR} \quad (6)$$

3 运行经验

3.1 运行所暴露的问题及解决方案

经过大量的仿真试验后,1995 年 12 月和 1996 年 9 月,两台 XC-11 型现代行波故障测距装置先后在东北电网的辽阳 500 kV 变电所和董家 500 kV 变电所投入试运行。辽阳变电所的测距装置监视丰辽线和董辽线共两条 500 kV 线路,董家变电所的测距装置监视董辽线、董王线和元董一线共 3 条 500 kV 线路,作为两个变电所公共线路的董辽线同时配置了单、双端测距功能(直接利用两个变电所已有的 T-GPS 电力系统同步时钟实现精确秒同步),其他线路只配置了单端测距功能。

试运行初期,装置误启动现象非常严重。从暂态录波结果来看,装置误启动原因主要表现在以下 3 个方面:①雷电波干扰;②电气噪声;③系统中开关正常操作。

频繁误启动给运行维护带来诸多不便,而且往往错过或“冲掉”了真正的故障记录。为解决这一问题,采取了以下 3 种措施:

a. 适当提高硬件启动门槛。将硬件回路触发电压由 0.2 V 提高到 0.5 V,与此对应的电流互感器二次暂态电流瞬时值约为 0.5 A~7 A(可调)。

b. 增加了基于暂态电流的行波启动算法,并作为内部启动元件。

c. 将保护动作或中央信号引入测距装置,并作为外部启动信号(可选配)。

经过上述改进,装置的误启动现象基本得到消除。

1997 年 6 月 30 日,董辽线发生 C 相接地故障,安装在辽阳变电所的行波故障测距装置可靠启动,经人工分析本端故障行波波形成得出故障距离为

129.3 km, 而实际故障距离为 128.5 km。令人遗憾的是, 安装在董家变电所的行波故障测距装置因临时退出运行而失去了一次双端测距的机会。后来通过分析董辽线倒闸操作时两端测距装置的启动报告, 验证了双端测距原理及算法的正确性。

这次故障虽然验证了行波测距的高准确性, 但同时也发现现有的单端测距实时算法存在可靠性较差的问题, 主要表现在难以正确识别故障点或者对端母线反射波, 因而很可能给出错误的自动测距结果。从暂态录波结果来看, 实际故障暂态波形较为复杂, 这使得单端行波故障测距算法的可靠性问题难以在短期内得到解决。

针对单端行波测距的可靠性问题, 从实用的角度建立了以双端测距为主、单端测距为辅的优化组合测距模式。但由于受现场通信通道的限制, 安装在同一条线路两端的测距装置难以直接交换数据。为

此, 开发了基于 MS-Windows 的行波故障分析软件包, 用于远程提取故障行波波记录、自动双端行波故障测距以及计算机辅助下的人工单端和双端行波故障距离分析。

3.2 运行性能分析

到目前为止, 已有数十套 XC-11 型输电线路行波故障测距装置在我国辽宁、山东、甘肃、四川、广西、湖北以及陕西等电网的 110 kV 及以上各电压等级的变电所投入运行, 并捕捉到大量的实际故障。表 1 给出了 1997 年至 2001 年期间的 15 次典型的线路故障以及 XC-11 实测分析结果, 由此可以看出装置的最大绝对测距误差为 900 m, 并且可以计算出装置的平均绝对测距误差为 394 m。利用表 1 所提供的数据, 图 3 给出了 XC-11 的测距误差曲线, 可见其测距性能逐步趋于稳定。

表 1 典型实际故障及 XC-11 测距结果
Table 1 Typical actual faults and the location results by XC-11

序号	故障时间	故障线路	分析距离/km	实际故障距离/km	绝对误差/m
1	1997-06-30T08:01:30	500 kV 董辽线*(董家变-辽阳变)	129.3(距辽阳)	128.5(距辽阳)	800
2	1997-07-05T16:23:45	临邑变 110 kV 黄一临线	23.72	23	720
3	1997-12-14T02:17:49	陇西变 330 kV 陇马线	75.8(距对端)	75.5(距对端)	300
4	1998-04-28T20:35:48	九里变 220 kV 龚九一线	6.5	6.585	85
5	1998-07-04T21:28:54	董家变 500 kV 元董一线	177.6	177	600
6	1999-06-23T11:29:18	浮石变 110 kV 麻浮线	44.9(距对端)	44(距对端)	900
7	1999-06-25T10:12:50	赵庄变 110 kV 赵石线	1.42	1	420
8	1999-07-11T14:36:53	洛埠变 110 kV 杨埠线	6.7(距对端)	6.5(距对端)	200
9	1999-07-25T13:36:33	临邑变 220 kV 济临线	15.59	15.2	390
10	2000-04-27T17:30:08	500 kV 双玉二回*(双河变-玉贤变)	-0.2(距双河)	双河侧出口故障(电流互感器爆炸)	200
11	2000-06-21T15:36:04	金锁变 330 kV 金延线	7.5	8	500
12	2000-06-23T17:36:17	110 kV 埠屯线*(洛埠变-浮石变)	6.3(距洛埠)	6.2(距洛埠)	100
13	2000-09-17T17:49:28	碧口电厂 220 kV 成碧线	47.2	47.4	200
14	2001-06-12T18:06:10	陇西变 330 kV 陇雍线	75.7(距对端)	76(距对端)	300
15	2001-07-04T14:57:38	陇西变 330 kV 陇炳一线	108.2	108	200

注: 带 * 线路的两端装有同步测距装置, 其他线路只在本端装有测距装置。

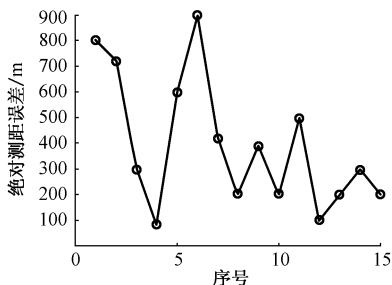


图 3 XC-11 测距误差曲线

Fig. 3 Location error curve for XC-11

4 需进一步解决的问题

经过 6 年多的运行, XC-11 型现代行波故障测距装置积累了极为丰富的现场经验, 但在存储容量、

数据采集、硬件调试以及小波应用等方面还有待进一步改进。

装置最多只能存储 4 次行波故障报告(包含所有被监视线路的暂态电流波形数据), 其中每次暂态行波波形的记录时间约为 2.6 ms。当线路遭雷击时, 装置可能会多次启动。在这种情况下, 如果不能及时提取已有的故障报告, 则真正的故障报告将有可能被扰动所引起的报告所覆盖。

装置不能实现对暂态信号的不间断采集。每次行波有效触发后, 必须将循环 RAM 中的所有暂态数据转存后才能复归高速采集电路。如果在转存扰动暂态数据期间线路发生故障, 则不能对其进行监测。

装置各模拟回路的触发电平需要通过人工调节

模拟电路参数进行设置,因而硬件调试工作量较大。

此外,实际记录到的暂态电流波形比通过 EMTP 所获得的暂态电流波形要复杂得多,这使得现有的各种单端行波故障测距算法(包括小波模极大值法)难以有效发挥其作用。

5 结论

本文分析了 XC-11 型现代行波故障测距装置的构成、原理及其在我国电力系统中 6 年的运行经验,并指出需要进一步解决的问题。主要结论如下:

a. 采用电流耦合方式,使得现代行波故障测距装置易于实现,而且具有较高的灵敏度;

b. 采用高速数据采集以及 GPS 时间同步等现代技术,使得现代行波故障测距装置具有较高的可靠性和准确性,并且可以将绝对测距误差控制在 400 m 以内;

c. 采用普通单片机以及与之独立的高速数据采集电路,建立以双端测距为主、单端测距为辅的优化组合测距模式,并且能够监视多条线路,使得现代行波故障测距装置具有较高的性能价格比和广泛的适应性;

d. 装置在存储容量、数据采集以及硬件调试等方面还有待进一步改进;

e. 小波变换在行波故障测距中的应用研究必须与实际故障或者重合闸产生的暂态波形相结合,以真正发挥其优越性。

参考文献

- 葛耀中(Ge Yaozhong). 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). 西安:西安交通大学出版社(Xi'an: Xi'an

Jiaotong University Press), 1996

- 徐丙垠(Xu Bingyin). 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). 西安:西安交通大学(Xi'an: Xi'an Jiaotong University), 1991
- 徐丙垠,葛耀中,朱锡贵(Xu Bingyin, Ge Yaozhong, Zhu Xigui). 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). 见:第五次全国继电保护学术年会论文集(In: Proceedings of Fifth Protective Relaying Conference). 北京(Beijing):1993
- 徐丙垠,李京,陈平等(Xu Bingyin, Li Jing, Chen Ping, et al). 现代行波测距技术及其在现代电力系统中的应用(Modern Travelling Wave Based Fault Location Technology and Its Application). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(23)
- 陈平(Chen Ping). 利用暂态电流行波的输电线路故障测距装置的研制:[硕士学位论文](Development of a Transmission Line Fault Locator Using Transient Current Travelling Waves, Thesis). 西安:西安交通大学(Xi'an: Xi'an Jiaotong University), 1994
- 徐丙垠,李桂义,李京等(Xu Bingyin, Li Guiyi, 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). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1995, 19(3)
- 董新洲(Dong Xinzhou). 小波理论应用于输电线路故障测距研究:[博士学位论文](Study of Wavelet Theory Applied in Fault Location of Transmission Lines Based on Travelling Waves, Doctoral Dissertation). 西安:西安交通大学(Xi'an: Xi'an Jiaotong University), 1996

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。E-mail: pingchen1969@263.net

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

李京(1967—),男,硕士研究生,高级工程师,研究方向为电力系统在线监测装置。

MODERN TRAVELLING WAVE BASED FAULT LOCATOR AND ITS OPERATING EXPERIENCE

Chen Ping¹, Xu Bingyin², Li Jing², Dong Xinzhou³, Ge Yaozhong¹

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

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

(3. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The structure and operating principle of XC-11 type modern travelling wave based transmission line fault locator are introduced. The operating experience of the fault locator in China electrical power systems since 1995 is also summarized. The data acquisition of current transient from the traditional current transformer, the high-speed data processing, GPS based time synchronizing and locking, and man-machine dialog etc., are accomplished by three independent singlechip based computer systems respectively. The problems encountered in the past, such as mal-starting, excessive error with single end measuring, are overcome by raising threshold of starting value and applying three different location principles. The on-site operating experience shows that the presented locator has high reliability, accuracy and performance price ratio. The average absolute location error of the locator is less than 400 meters, and the maximum absolute error is less than 900 meters.

Key words: transmission lines; modern travelling wave based fault location (MTWFL); GPS; wavelet