

煤矿 35 kV 配电线路行波故障测距技术

王玉梅¹, 季 涛^{1,2}

(1. 潍坊学院 信息与控制工程学院, 山东 潍坊 261061;

2. 山东大学 控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 为解决煤矿供电系统中 35 kV 线路故障点不易查找的问题, 提出了综合利用母线端检测到的故障初始电流行波和线路末端检测到的故障初始电压行波实现线路故障快速定位的新方法。分析发现, 线路单相接地和相间短路故障都产生行波线模分量, 因此对各种类型故障都可采用参数稳定的线模分量作为测量信号, 利用可靠的双端行波测距法测量出故障点位置。简要介绍了行波故障测距系统的构成及基本工作原理, 详细阐述了行波信号的获取、超高速数据采集、时钟精确同步以及故障测距精度的提高等关键技术问题的解决方案。现场试验证明了所提方法的正确性。

关键词: 煤矿供电; 中性点非有效接地; 行波故障测距; 单相接地故障

中图分类号: TM 711; TM 773

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)10-0042-03

煤矿 35 kV 配电线路的运行方式一般采用中性点非有效接地方式, 线路发生单相接地故障时, 由于故障电流微弱、电弧不稳定等原因, 使故障点定位成为难题。线路发生相间短路故障时, 则会造成停电事故。

许多专家学者对小电流接地系统线路故障点定位问题进行了研究, 提出了很多原理和方法^[1-3]。在输电线路行波测距技术成功应用的基础上^[4-6], 本文提出对单相接地、相间短路故障均采用参数稳定的线模分量作为测量信号, 利用双端行波故障测距原理实现线路故障的快速准确定位。

1 行波故障测距原理

现代行波测距原理主要包括单端测距原理和双端测距原理; 前者是利用线路故障时在测量端感受到的第 1 个正向电压或电流行波浪涌与其在故障点反射波之间的时延, 计算测量点到故障点之间的距离; 后者是利用线路内部故障产生的初始电压或电流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^[7]。

2 行波故障测距信号的选择

2.1 行波信号模分量的选择

实际三相系统中各相行波之间存在耦合, 采用凯伦布尔变换将相量行波分解为独立的模分量^[8], 变换矩阵为

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_A \\ x_B \\ x_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 x_1, x_2 为电压或电流行波的线模分量, x_0 为电压或电流行波的零模分量。

对于单相接地故障, 相当于在故障点附加了与该点故障前电压大小相等, 方向相反的虚拟电源, 这个虚拟电源产生向线路两端运行的电压、电流行波。设线路的零模和线模波阻抗分别为 Z_0, Z_1 和 Z_2 , 则线路上的电压行波和电流行波各模分量表示为

$$u_0 = Z_0 i_0, \quad u_1 = Z_1 i_1, \quad u_2 = Z_2 i_2 \quad (2)$$

设故障点过渡电阻为 R_F , 在故障附加网络中, 故障点处的相量边界条件为

$$\begin{aligned} u_{FA}(t) + i_{FA}(t) &= -u_A(t) \\ i_{FB}(t) &= 0, \quad i_{FC}(t) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $u_{FA}(t), i_{FA}(t), i_{FB}(t)$ 和 $i_{FC}(t)$ 分别为故障电压(虚拟电源)和故障电流, $u_A(t)$ 为故障前 A 相的相电压。

由式(1)和式(3)可得:

$$i_0 = i_1 = i_2 = i_{FA}(t) / 3 \quad (4)$$

$$u_0 + u_1 + u_2 + i_{FA}(t) R_F = u_{FA}(t)$$

由式(2)(4)求出故障点初始电压行波线模和零模分量分别为

$$u_1 = u_2 = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 6R_F} u_{FA}(t) \quad (5)$$

$$u_0 = \frac{Z_0}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 6R_F} u_{FA}(t) \quad (6)$$

经上述分析可知, 中性点非有效接地系统发生单相接地故障时, 故障初始行波包含线模和零模分量, 且其幅值受故障点过渡电阻的影响。

采用同样的方法分析各种类型故障可知: 线路发生接地故障时, 会产生行波线模分量和零模分量; 线路发生相间短路故障时, 会产生行波线模分量, 而不存在零模分量。

由于地模行波分量受零序电感和电阻的影响较大, 在传播过程中存在严重的损耗与参数随频率变化现象, 行波衰减大且波速度不稳定。而线模行波分量受正序电感和电阻的影响较大, 但受频率的

影响远不及地模所受的影响^[9]。由于各种类型的故障都会产生初始行波线模分量,所以选择参数比较稳定的线模分量作为故障测距测量信号,提高了故障测距精度。

2.2 线路末端电压、电流测量信号的选择

故障行波传播到线路末端时,由于波阻抗不连续而发生折射和反射,入射电流行波 i_F 和电压行波 u_F 的反射系数分别为

$$\begin{aligned}\rho_i &= (Z_F - Z_M) / (Z_M + Z_F) \\ \rho_u &= (Z_M - Z_F) / (Z_M + Z_F)\end{aligned}\quad (7)$$

式中 Z_F 为故障线路的波阻抗; Z_M 为从故障线路向线路末端观察的等效波阻抗。

由于入射波和反射波叠加形成故障线路检测点的行波,得到故障线路末端检测到的电流和电压波表达式分别为

$$i = i_F + i_F \rho_i, \quad u = u_F + u_F \rho_u \quad (8)$$

对于煤矿 35 kV 配电线路母线端,一般出线较多,由上述分析可知:多出线系统故障线路中电流和电压行波在线路末端的反射系数满足

$$\rho_i > 0, \quad \rho_u < 0 \quad (9)$$

式(9)表明:故障线路电流行波在线路末端发生正反射,而电压行波发生负反射。电流行波容易获取,而电压行波不易获取,应该选用电流行波作为测距信号。

对于在 35 kV 配电线路末端,一般通过变压器将其降压成 6 kV 为矿井供电,由于变压器交流阻抗很大,对于高频行波信号,其相当于开路,从故障线路向线路末端观察的等效波阻抗 $Z_M \rightarrow \infty$,由式(7)(8)可得 $i \approx 0, u \approx 2 u_F$,即开路状态的线路末端几乎检测不到电流波,而检测到的电压波加倍,应该选择电压行波作为测量信号。

3 关键技术问题的解决

3.1 行波信号的获取方式

煤矿 35 kV 线路两端都带有电流、电压互感器,电流互感器和电磁式电压互感器可以很好地传变暂态行波信号。利用普通的电压、电流互感器测量行波信号,行波测距装置可象普通的保护装置那样,直接接入电压、电流互感器的二次回路,不需要装设任何附加设备。

结合上文行波信号在线路末端反射规律的分析,故障行波信号可通过如下方式获得:对于煤矿 35 kV 线路母线端,利用已有电流互感器获取故障发生时的故障初始电流波作为测量信号;对于 35 kV 线路末端,利用已有的电磁式电压互感器获取故障发生时的故障初始电压波作为测量信号。

3.2 超高速数据采集

为保证行波测距分辨率在 300 m 以上,行波信号采集频率不应低于 500 kHz,为了进一步提高系统的行波测距分辨率,装置的信号采样频率为 1 MHz。常规的由微处理器直接控制模数转换器的方式很

难实现^[10]。为解决这个问题,设计了专门实现信号高速数据采集电路单元(DAU)记录故障行波信号。线路故障时,DAU 单元在记录下预定时间内的暂态行波后,停止数据采集,然后以相对较慢的速度将记录的数据送入由微处理器构成的中心处理单元进一步保存、处理,有效地解决了高频行波信号难以捕捉和测距分辨率低的问题。

3.3 双端装置的 GPS 精确时钟同步

对于双端测距方法而言,如果要达到不小于 300 m 的测距分辨率,两端装置时间同步精度应达到 2 μ s,利用基于全球定位系统(GPS)的同步时钟输出,能够实现两端测距装置 1 μ s 的时间精确同步^[11]。

3.4 故障测距精度的提高

相比于高压输电线路,35 kV 配电线路电阻大,导致高频信号快速衰减,行波波头到达线路检测点的准确时间难以确定,而波头检测时间的准确性直接影响到测距精度。利用前文所述的损耗较小、参数比较稳定的线模分量作为测量信号,可以减小其影响。另外,通过分析发现:尽管行波在配电线路传播的过程中损耗严重,导致测量点的初始行波波头上升缓慢,但是只要能够准确检测出行波波头起始点到达测量点的准确时间,就能够保证测距精度。故障产生的行波是一种具有突变性质的非平稳变化信号,突变点标志着行波到达检测点。因为小波分量的模极大值与信号的尖锐变化点相对应^[12],将小波分量模极大值出现时间确定为初始行波脉冲到达时刻,可以准确标定出行波波头起始点到达时间,从而大幅提高了故障测距精度。

4 行波测距系统

4.1 系统构成

行波测距系统主要由 GPS 对时单元、数据采集处理单元、当地后台机以及通信单元构成。

GPS 对时单元接收 GPS 卫星信号获得准确的时间信息,以保证线路两端测距装置的时间的精确同步。

数据采集单元的主要功能是监视并捕捉线路的故障行波信息,为了保证测距精度,数据采集频率为 1 MHz。

后台处理机安装有行波分析软件,将采集到的行波数据存储到计算机硬盘中并在现场进行分析,同时通过通信网络进行 2 个站间的数据交换,实现故障测距。

通信单元是实现双端测距装置的数据交换,从而实现线路故障的快速自动测距。2 个站之间通过 Modem 或网络等进行通信,交换各自采集到的故障信息。

4.2 系统工作原理

系统正常运行时,GPS 对时单元每秒给本站的数据采集单元提供一次对时,使 2 个站的时间保持

一致。数据采集单元始终监视着线路的状态,如果线路上发生故障,就将采集到的故障波形连同初始行波波头到达线路本端的准确时刻记录下来,并与后台计算机通信,将故障信息存储到容量更大的硬盘上。2 个站间利用通信网络自动进行故障数据交换,利用双端的故障时刻由分析软件自动计算出故障距离。

5 现场试验

2004 年,在某 35 kV 线路做人工接地试验,线路全长 8.7 km,故障点在距离母线端 7 km 处,利用双端测距装置检测到的故障位置在距离母线端 7.3 km 处,测距误差为 0.3 km,线路两端记录到的母线端故障电压波形 u_B 及线路末端故障电压波形 u_L 如图 1 所示。

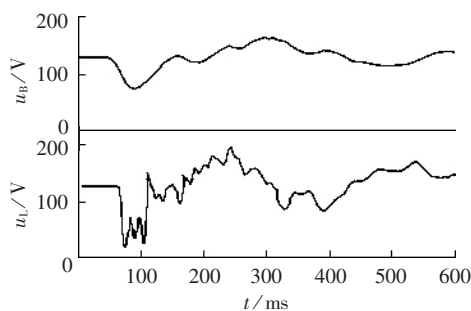


图 1 人工单相接地故障测距波形
Fig.1 The tested traveling waves of single-phase-to-ground fault

6 结论

通过本文的分析论证,可得到以下结论:

- 利用线路故障瞬间产生的行波信号可以实现煤矿 35 kV 配电线路故障(尤其是单相接地故障)的快速、准确定位;
- 中性点非有效接地系统单相接地故障也产生行波线模分量,从而线路各种类型的故障都可采用参数稳定的线模分量作为测量信号;
- 为保证线路故障定位的可靠性,应该采用双端行波法测量故障距离;
- 现场人工接地试验验证了双端行波测距原理应用于煤矿配电线路故障测距的可行性。

参考文献:

- [1] 桑在中,潘贞存,李磊,等. 小电流接地系统单相接地故障选线测距和定位的新技术[J]. 电网技术,1997,21(10):50-52.
SANG Zai-zhong, PAN Zhen-cun, LI Lei, et al. A new approach of fault line identification, fault distance measurement and fault location for single phase-to-ground fault in small current neutral grounding system[J]. Power System Technology, 1997, 21(10): 50-52.
- [2] RANJBAR A M, SHIRANI A R, FATHI A F. A new approach for fault location problem on power lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(1): 146-151.

- [3] 李孟秋,王耀南,王辉,等. 小电流接地系统单相接地故障点探测方法的研究[J]. 中国电机工程学报,2001,21(10):6-9.
LI Meng-qiu, WANG Yao-nan, WANG Hui, et al. A new approach on detecting the single-to ground fault location on power system with neutral unearthed[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 6-9.
- [4] 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.
XU Bing-yin, LI Jing, CHEN Ping, et al. Modern fault location techniques based on fault generated traveling waves and their applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(23): 62-65.
- [5] 陈平,徐丙垠,李京,等. 现代行波故障测距装置及其运行经验[J]. 电力系统自动化,2003,27(6):66-69.
CHEN Ping, XU Bing-yin, LI Jing, et al. Modern travelling wave based fault locator and its operating experience[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(6): 66-69.
- [6] 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.
DONG Xin-zhou, GE Yao-zhong, XU Bing-yin, et al. Study of transmission line fault location based on travelling waves and GPS technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(12): 37-40.
- [7] 季涛,薛永端,孙同景,等. 配电线路行波故障测距初探[J]. 电力系统自动化,2005,29(19):65-69.
JI Tao, XUE Yong-duan, SUN Tong-jing, et al. Fault location for distribution feeders based on traveling waves[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 65-69.
- [8] 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.
- [9] 覃剑,陈祥训,郑健超. 行波在输电线路上传播的色散研究[J]. 中国电机工程学报,1999,19(9):17-30.
QIN Jin, CHEN Xiang-xun, ZHENG Jian-chao. Study on dispersion of traveling wave in transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(9): 17-30.
- [10] 夏俊峰,樊亚东,李静,等. 行波故障测距系统中高速数据采集卡的开发与应用[J]. 电力自动化设备,2006,26(1):48-51.
XIA Jun-feng, FAN Ya-dong, LI Jing, et al. Development of high-speed data acquisition system for traveling-wave fault locating system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(1): 48-51.
- [11] 徐丙垠,李桂义,李京,等. 接收 GPS 卫星信号的电力系统同步时钟[J]. 电力系统自动化,1995,19(3):44-47.
XU Bing-yin, LI Gui-yi, LI Jing, et al. Synchronous clock in power system by receiving signal from GPS[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(3): 44-47.
- [12] 董新洲,贺家李,葛耀中,等. 基于小波变换的行波故障选线研究:第 1 部分 理论基础[J]. 电力系统自动化,1998,22(12):24-26.
DONG Xin-zhou, HE Jia-li, GE Yao-zhong, et al. Research of fault phase selection with transient current travelling waves and wavelet transform: part one theoretical basis[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(12): 24-26.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

王玉梅(1962-),女,山东青州人,教授,研究方向为电力系统自动化(E-mail:wymwfu@tom.com);

季涛(1975-),男,山东潍坊人,博士研究生,主要研究方向为配电网故障测距及配电自动化。

Fault locating of 35 kV transmission lines in coal mine based on traveling waves

WANG Yu-mei¹,JI Tao^{1,2}

(1. Weifang University, Weifang 261061, China; 2. Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: Aiming at the difficulty in locating the fault of 35 kV line of coal mine power supply system, a fast fault locating method is brought forward, which comprehensively utilizes the fault original current traveling wave measured at bus and the fault original voltage traveling wave measured at line terminal. The aerial mode component of traveling waves has been found appeared in the single-phase-to-ground fault and the phase-to-phase short-circuit fault. Thus the aerial mode component with stable parameters can be adopted as measurement signal for different fault types to locate the fault with two-terminal traveling wave locating method. The constitution and basic working principle of fault locating system is introduced, and the solution to essential technical troubles is particularly elaborated, including the gain of traveling wave signal, the acquisition of super high speed data, the precise synchronization of clock and the enhancement of fault locating precision. The field test proves its accuracy.

Key words: coal mine power supply; neutral noneffective grounding; traveling wave fault locating; single-phase-to-ground fault