

# 利用故障线路暂态波形的新型故障测距方法

李一峰<sup>1</sup>, 陈平<sup>2</sup>

(1. 广东海洋大学信息学院, 广东 湛江 524088; 2. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049)

**摘要:** 分析了故障暂态电流行波的基本理论, 在此基础上提出了一种新的单端行波故障测距原理, 即利用故障线路暂态行波的现代行波故障测距原理, 并将其划分为2种运行模式, 标准模式下的原理是利用在线路测量端感受到的由本端分闸初始行波浪涌形成的第1个正向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, 而扩展模式下是利用在线路测量端感受到的由对端分闸初始行波浪涌透过故障点到达本端时产生的第1个正向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, 理论分析和实测波形分析均表明该原理是可行的, 并可以同时适用于永久性故障和瞬时性故障, 而且不受电压过零故障的影响, 在标准模式下还受线路对端母线反射波的影响, 从而克服了现有单端行波故障测距原理所存在的不足。

**关键词:** 线路; 故障测距; 暂态; 原理

## Method in fault location using fault tripping induced travelling waves

LI Yi-feng<sup>1</sup>, CHEN Ping<sup>2</sup>

(1. Information College, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255031, China)

**Abstract:** The generation mechanism of transient travelling waves caused by fault tripping of transmission lines is analyzed. Based on this analysis, a novel principle—new type modern travelling wave based fault location principle is presented. The new type principle can be classified into two independent modes of operation which are called standard mode and extended mode. Theoretical analysis and actual waveform based transient analysis show that the new type principle is feasible, and it can be applied to permanent and transient faults. The new type principle can not be affected by zero crossing faults, and also can not be affected by the bus reflected surges coming from the opposite terminal of the faulty line under the standard mode, so it overcomes the limitations of the existing single-ended travelling waves based fault location principles.

**Key words:** lines; fault location; transient; theory

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)06-0005-03

## 0 引言

20世纪90年代, 我国提出利用电流暂态信号的输电线路行波故障测距技术<sup>[1,2]</sup>, 从而推动了现代行波故障测距技术的发展<sup>[3,4]</sup>, 并相继研制出集多种原理的现代行波故障测距装置和系统, 其绝对测距误差已经能够达到200 m以内<sup>[5]</sup>。

但是, 现有的行波故障测距原理还存在一些问题, 如A型测距原理在一定条件下不能正确识别来自故障点和线路对端母线的反射波, D型测距原理的测距精度受GPS和线路长度的影响, 而E型测距原理则不能反应瞬时性故障。此外, 当线路发生电压过零故障时, 由于故障暂态信号的幅度过于微弱,

从而使得A型和D型原理均难以发挥作用。

本文提出了一种利用故障线路分闸暂态行波的新型现代行波故障测距原理, 并通过实测暂态波形分析获得了验证。

## 1 故障线路分闸暂态行波的产生

当线路故障导致继电保护装置动作于断路器跳闸时, 在断路器分闸瞬间, 由于电弧的出现(此时触头间电流并不为零), 必然在线路上引起暂态行波过程。在线性电路的假设前提下, 故障分闸电弧暂态行波的产生机理可以利用叠加原理来分析。

断路器分闸于故障线路的行为等效于分闸瞬间在其触头间并联接入一个电弧电阻以及两个幅值相

同、相位相反的附加电流源,其中电弧电阻可以用非线性电阻来描述<sup>[9]</sup>。图1(a)为故障线路MN在M端断路器分闸时的等效电路,其中线路两端所连接的网络 $A_M$ 和 $A_N$ 均为有源网络。假定附加电流源的电流 $i_F(t)$ 选取为断路器分闸前通过其触头间的电流(为故障稳态电流),则图1(a)中的网络可以分解为分闸前稳态网络(故障稳态网络)和分闸附加网络,分别如图1(b)和1(c)所示。在分闸附加网络中的 $P_M$ 和 $P_N$ 均为无源网络。

断路器分闸电弧暂态行波过程的波源就是在分闸附加网络中突串于断路器触头之间的附加电流源。该附加电流源产生的初始行波浪涌将以接近光速的速度向两个相反的方向传播,并在故障点、断路器触头和系统中其它波阻抗不连续点之间来回反射和透射,直到进入稳态。

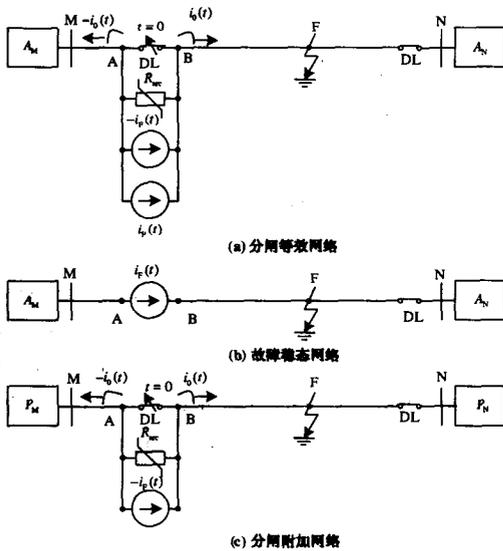


图1 分闸电弧暂态行波的产生

Fig.1 Transient travelling by fault tripping

## 2 新型故障测距原理

### 2.1 新型测距原理的运行模式

新型现代行波故障测距原理为利用故障线路分闸暂态行波的单端测距原理。下面以故障线路分闸产生的电流行波为例,对新型测距原理进行阐述。

#### (1) 标准模式

标准模式下的新型现代行波测距原理利用在线路测量端感受到的由本端分闸初始行波浪涌形成的第1个正向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,如图2所示,其中M端为测量端。为了实现这种测距模式,在测量端感受到的第1个正向行波浪涌必须是本端断

器分闸时所产生的初始行波浪涌(此时测量点不存在反向行波浪涌),在此基础上还必须能够准确、可靠地检测到该行波浪涌在故障点的反射波。

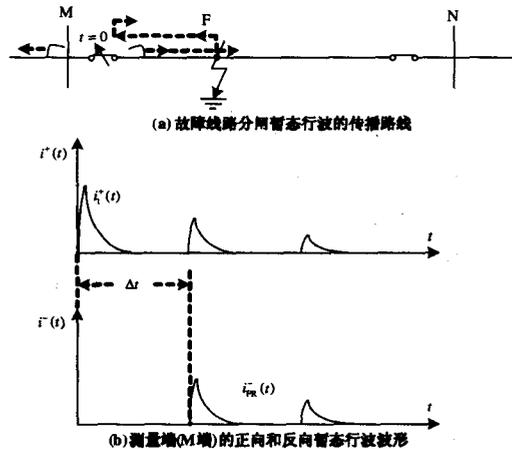


图2 新型测距原理——标准模式

Fig.2 Principle based fault location—standard mode

#### (2) 扩展模式

扩展模式下的新型现代行波测距原理利用在线路测量端感受到的由对端分闸初始行波浪涌透过故障点到达本端时产生的第1个正向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,如图3所示。为了实现这种测距模式,在测量端感受到的第1个正向行波浪涌必须是经过故障点透射过来的对端分闸初始行波浪涌到达本端母线时引起的反射波(此时测量点同时存在反向和正向行波浪涌),在此基础上还必须能够准确、可靠地检测到测量点第1个正向行波浪涌在故障点的反射波。

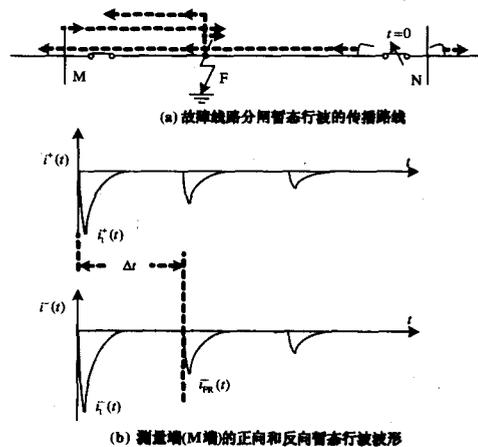


图3 新型测距原理——扩展模式

Fig.3 Principle based fault location—extended mode

## 2.2 相关技术问题

### (1) 对端分闸初始行波浪涌的影响

当线路测量端感受到的初始行波浪涌为对端断路器分闸所产生时, 在测量点可以按扩展模式来分析故障距离。

当线路测量端感受到的初始行波浪涌为本端断路器分闸所产生时, 测量点在继初始行波浪涌即第 1 个正向行波浪涌之后最先到来的反向行波浪涌要么是初始行波浪涌在故障点的反射波, 要么是对端分闸初始行波浪涌在故障点的透射波。若二者极性相反, 则不会影响标准模式和综合模式下的测距结果, 否则会出现误判现象。

设故障发生时刻为  $t=0$ , 线路本端和对端分闸的时刻分别为  $t_M$  和  $t_N$ 。当测量点感受到的初始行波浪涌为本端分闸所产生时, 如果对端分闸初始行波浪涌先于本端初始行波浪涌在故障点的反射波到达测量点, 则线路两端分闸时刻必然满足以下关系:

$$t_N + \tau_L < t_M + 2\tau \quad (1)$$

式中:  $\tau_L$  为暂态行波由对端断路器触头到本端测量点的传播时间, 即暂态行波沿整个故障线路的传播时间;  $\tau$  为暂态行波在本端测量点与故障点之间的传播时间。

由式(1)可以得到:

$$t_N - (t_M + \tau_L) < 2(\tau - \tau_L) < 0 \quad (2)$$

$$(t_N + 2\tau') - (t_M + \tau_L) < 0 \quad (3)$$

式中:  $\tau'$  为暂态行波在对端断路器触头与故障点之间的传播时间。

由式(2)和式(3)可知, 从故障线路对端来看, 不仅初始行波浪涌是由该端断路器分闸时所产生, 而且继初始行波浪涌之后最先到来的反向行波浪涌必然是该初始行波浪涌在故障点的反射波。

以上分析表明, 当测量端感受到的初始行波浪涌为本端断路器分闸所产生时, 如果在继初始行波浪涌之后最先到来的反向行波浪涌为对端分闸初始行波浪涌在故障点的透射波, 且二者极性相反(对于电压暂态行波), 则线路本端在标准模式和综合模式下将获得错误的测距结果, 而线路对端在这两种测距模式下却可以获得正确的测距结果。

统计表明<sup>[6]</sup>, 输电线路发生接地故障时, 线路两端断路器的分闸时间总是存在一定的差异, 并估计为(0.01~0.05) s。因此, 在一般情况下, 可以不必考虑对端分闸初始行波浪涌对标准模式和综合模式下行波故障测距的影响。

### (2) 电弧重燃的影响

断路器开断故障线路后, 由于电弧重燃的影响

而将在故障线路上产生多次暂态行波过程。但除了第 1 个正向行波浪涌外, 新型现代行波故障测距原理所检测的行波浪涌均为反向行波浪涌, 因而每一次电弧重燃所产生的初始行波浪涌及其在故障点的反射波都不会对故障测距产生影响, 前者从行波传播方向上可以被躲开, 后者则从时间上可以被躲开。

在超高压线路上, 断路器的灭弧能力很强, 因而故障线路被开断后一般不会发生电弧重燃现象。

### (3) 三相线路中断路器分闸类型的影响

在三相输电线路中, 当断路器首次开断单相故障时, 一般只分闸于故障相, 而当开断多相故障以及重合失败的任何类型故障(一般为永久性故障)时, 需要分闸于所有三相。严格来讲, 三相不可能同时分闸, 因而当断路器分闸于三相线路时往往会相继产生多个电弧暂态行波过程。从模域来看, 不同类型的分闸行为所产生初始模行波分量的特性也是不同的; 而同一类型的分闸行为所产生模行波分量在不同类型故障点的传播特性却是不同的。因此, 为了实现新型现代行波故障测距原理, 必须同时结合具体的故障和断路器分闸类型来选择合适的分闸暂态行波分量。

## 3 实测波形分析

图 4 给出了吕梁电业局所管辖 220 kV 汾兑线(全长 64.3 km) 2005 年 4 月 5 日发生的 B 相接地故障和分闸时在汾阳侧记录到的含故障线路在内 3 条线路的 B 相电流暂态分量波形。

对于图 4 所示的暂态波形, 利用新型和 A 型现代行波测距原理所获得的故障测距均为距本端 27.4 km, 实际故障点位于距对端 37 km 处。可见, 利用新型和 A 型现代行波测距原理所获得的故障测距结果是一致的, 而且均与实际故障距离相符。

## 4 结论

利用故障线路分闸时产生的暂态行波可以实现单端故障测距, 相应的测距原理称为新型现代行波故障测距原理。理论分析和实测波形分析均表明, 新型原理是可行的, 并可以同时适用于永久性故障和瞬时性故障, 而且不受电压过零故障的影响, 在标准模式下还受线路对端母线反射波的影响, 从而克服了现有单端行波故障测距原理所存在的不足。

为了将新型原理更好地用于实际故障分析, 还需要进一步研究分闸电弧、母线接线方式以及对端分闸初始行波浪涌等因素的影响。

(下转第 31 页 continued on page 31)

- GU Xue-ping, ZHANG Wen-chao. Feature Selection by Tabu Search for Neural-network Based Transient Stability Classification[J]. Proceeding of the CSEE, 2002.
- [5] 王晓红, 王晓茹, 等. 二分类数据的分类结果可视化算法[J]. 西南交通大学学报, 2006, (6): 329-334.
- WANG Xiao-hong, WANG Xiao-ru, et al. Algorithm for Visualization of Classification Results of Two-category Data[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2006, (6): 329-334.
- [6] Burges C.A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition[J]. Data Mining and Knowledge

Discovery, 1998, 2(2): 1-43.

收稿日期: 2007-08-02; 修回日期: 2007-10-11

作者简介:

向丽萍(1981-), 女, 硕士研究生, 研究方向为数据挖掘与电力系统紧急控制; E-mail: xiangliping1981@163.com

王晓茹(1962-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向是电力系统微机保护和安全稳定控制、变电站自动化技术;

王晓红(1977-), 女, 讲师, 博士研究生, 研究方向为数据挖掘与电力系统紧急控制。

(上接第7页 continued from page 7)

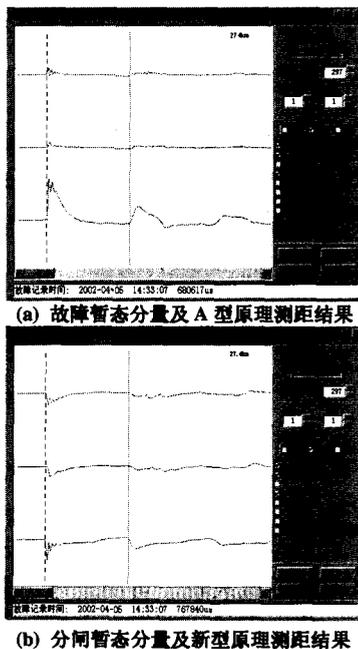


图4 2005年4月5日汾兑线电流暂态分量波形及行波测距结果

Fig. 4 Current transient components of Line Fen-Dui recorded on April 5, 2005 with the principles

## 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.
- GE Yao-zhong. Theory and Techniques for New Types of Protective Relaying and Fault Location[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.
- [2] 徐丙垠. 利用暂态行波的输电线路故障测距技术(博士学位论文)[D]. 西安: 西安交通大学, 1991.

XU Bing-yin. Fault Location Technology of Transmission Lines Based on Travelling Waves, Doctoral Dissertation[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1991.

- [3] 徐丙垠, 葛耀中, 朱锡贵. 利用暂态电流行波的输电线路故障测距技术[A]. 第五次全国继电保护学术年会论文集[C]. 北京. 1993. 63-65.

XU Bing-yin, GE Yao-zhong, ZHU Xi-gui. Fault Location Based on Fault Generated Current Transients[A]. In: Proceedings of Fifth Protective Relaying Conference[C]. Beijing: 1993. 23-25.

- [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 Travelling Wave Based Fault Location Technology and Its Application[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] 陈维贤. 内部过电压基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 1981.

CHEN Wei-xian. Elements of Internal Overvoltage[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1981.

收稿日期: 2007-06-18; 修回日期: 2007-10-29

作者简介:

李一峰(1966-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为电力系统微机继电保护技术的理论研究与应用技术; E-mail: gdzjlyf@126.com

陈平(1969-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力线路故障测距及继电保护技术。