

# 基于 ITD 的高压直流输电线路行波故障测距法

付 华,程 诚,曹庆春

(辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院 辽宁 葫芦岛 125105)

**摘 要:** 针对行波测距时波头到达母线时间精度提取困难的问题,提出了应用固有时间尺度分解(ITD)原理提取行波时频信息,通过 ITD 自适应地将故障行波信号分解得到原始信号完整的时频分布,可以准确得到行波波头到达母线的时刻。针对行波速度难以准确确定的问题,利用 A 型测距法与 D 型测距法相结合,提出了一种不受行波波速影响的测距法,以克服预设波速与实际波速存在的误差,提高测量精度。仿真实验表明:方法有效,误差精度较 D 型测距法好,在一定程度上提高了故障测距精度。

**关键词:** 故障测距; 固有时间尺度分解; 行波; 波速

中图分类号: TP721.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-9787(2018)03-0068-04

## Travelling wave fault ranging method for HVDC transmission lines based on ITD

FU Hua, CHENG Cheng, CAO Qing-chun

(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

**Abstract:** Aimed at problem of difficulty in extracting precision of arrival time from wave arrival at bus bar in travelling wave ranging, the intrinsic time-scale decomposition (ITD) principle is proposed to extract the time-frequency information of the travelling wave. The complete time-frequency distribution of the original signal is obtained by utilizing ITD to decompose the fault traveling wave signal adaptively, so that the accurate time for wave arrival at the bus bar can be obtained. Aiming at the problem that the traveling wave velocity is difficult to be accurately determined, a distance measuring method which is not affected by traveling wave velocity is proposed by using the A-type and the D-type distance measuring methods, so as to overcome the error between the preset wave speed and the actual wave speed to improve the measurement precision. Simulation results show that the combination of these two algorithms is effective, and the error precision is better than D-type method. To some extent, it can improve precision of fault location.

**Keywords:** fault ranging; inherent time-scale decomposition (ITD); travelling wave; wave velocity

### 0 引言

高压直流输电线路较长、沿途地理环境情况复杂,输电线路故障率较高,故障发生时不易巡线发现和排除<sup>[1-3]</sup>,因此,准确的直流输电线路故障定位对减少因输电线路故障引起的经济损失及耗费的人力物力具有重大意义。

行波波头到达母线时刻的提取精度和故障行波的波速是直接影响基于行波测距方法测距精度的主要原因。目前提取故障行波固有频率的工具主要有小波变换、快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)、经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)、局部均值分解(local mean decomposition, LMD)<sup>[4-7]</sup>等。但各算法在提取故障行波固有频率时均存在缺陷。

当线路结构参数和运行环境变化,行波波速会受到影

响。线路故障时沿线路传播的暂态故障行波拥有从低频至高频的持续频谱,传播速度随频率分量的差异而不同,频率分量越高传播速度越快,于是行波中频率最高的分量将最早达到测量点,而其他频率分量需经由一定的延时后才能到达测量点。文献[9]提出了一种考虑波速变化特性的测距新方法,但算法相对复杂。

固有时间尺度分解(intrinsic time-scale decomposition, ITD)法<sup>[10]</sup>对原始信号有完整的时频分布,实时反映出信号的时频信息,可以对行波波头到达母线时刻进行标定,减少了不必要插值和筛选、边缘效应小、精度高、提升了时频信息的有效性和精确性。

本文中采用 ITD 法提取行波的时频分布,并将 A 型测距法与 D 型测距法结合(A-D 法)消除速度计算参量,降低

了因速度选取不当引起的误差。对所提出的算法进行仿真分析,结果证明了方法的有效性,较D型算法更有优势。

### 1 基于ITD的行波时频信息获取

设 $X_t$ 为故障行波信号, $L$ 为基线提取算子。将 $L$ 作用于原信号后,余量为固有旋转分量,分解可表示为

$$X_t = LX_t + (1-L)X_t = L_t + H_t \quad (1)$$

式中 $L_t$ 为基线信号; $H_t$ 为固有旋转分量,且

$$HX_t = (1-L)X_t = H_t - L_t \quad (2)$$

设 $\tau_k (k=1, 2, \dots, n)$ 为行波信号 $X_t$ 的局部极值点,定义 $\tau_0=0$ , $X_t$ 的定义域为 $[0, \tau_{t+2}]$ , $L_t$ 和 $H_t$ 在 $[0, \tau_t]$ 上有意义。分别用 $X_k$ 和 $L_k$ 表示 $X(\tau_k)$ 和 $L(\tau_k)$ 。 $L$ 为 $(\tau_k, \tau_{k+1})$ 上定义的基线提取算子

$$LX_t = L_t = L_k + \frac{L_{k+1} - L_k}{X_{k+1} - X_k} (X_t - X_k) \quad (3)$$

其中

$$L_{k+1} = \alpha \left[ X_k + \frac{\tau_{k+1} - \tau_k}{\tau_{k+2} - \tau_k} (X_{k+2} - X_k) \right] + (1-\alpha) X_{k+1} \quad (4)$$

式中 $\alpha$ 为依比例提取的固有旋转分量幅度线性增益控制参数,取值范围为 $(0, 1)$ ,通常取0.5。

每完成一次分解后,得到一个基线信号和一个表示信号中局部相对高频成分的固有旋转分量,再次对所得基线信号分解,直到得到一个单调信号或满足设定的分解条件结束。信号分解最终得到一组瞬时频率逐渐持续减少的固有旋转分量(PRB)和一个趋势余量。整个过程可表示为

$$X_t = HX_t + LX_t, HX_t = (H+L)LX_t = [H(1+t) + L^2]X_t = \left( H \sum_{k=0}^{p-1} L^k + L^p \right) X_t \quad (5)$$

通过对行波信号进行ITD,可以直观地得到故障行波波头到达测量点时的时间。

### 2 行波故障测距模型设计

行波分析算法分为单端算法和双端算法,单端算法多用A型测距方法,双端算法常用D型测距方法<sup>[10]</sup>。

A型算法通过检测两个相邻波头的时间差得到故障点距监测点M端距离为

$$X = \frac{v(t_2 - t_1)}{2} \quad (6)$$

D型法在故障发生后,线路故障距M段和N段的长度 $X_m$ 和 $X_n$ 分别为

$$X_m = [v \times (t_m - t_n) + L] / 2 \quad (7)$$

$$X_n = [v \times (t_n - t_m) + L] / 2 \quad (8)$$

其中 $t_m = t_1$ ,由式(6)得 $v = X \frac{(t_2 - t_1)}{2}$ ,代入式(7)有

$$X_m = \frac{L(t_2 - t_1)}{2(t_2 - 2t_1 + t_n)} \quad (9)$$

式中 $X_m$ 为故障点到M测母线距离; $t_1$ 为行波初次到达M测母线的时刻; $t_2$ 为行波初次经N处反射后到达M测母线的时刻; $t_n$ 为故障行波到达N测母线的时刻; $L$ 为线路总长度。

将式(6)~式(8)联立得出一种新的算法,即A-D法。原理如图1。

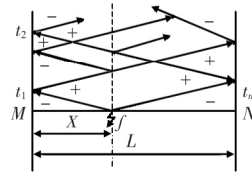


图1 A-D型测距方法原理

经故障点f向M端发出的初始行波是M端检测的首个负极性波头,此时标出的时间为 $t_1$ 。经折射或反射再次到达M端时,极性均为负,而f向N端发出的初始行波是N端检测的首个负极性波头,标定时间即为 $t_n$ ,但经反射后达到N端波头极性为正,即为M端首个正极性波头,标定时间为 $t_2$ 。

该方法只需得到行波到达母线两端的具体时刻即可得出故障点位置,不需要考虑预设速度引起的误差。仅需使用ITD可以精确行波波头到达时刻,提高了测距的精确度。

### 3 行波故障测距仿真分析

#### 3.1 仿真模型

参考云广 $\pm 800$  kV特高压直流输电系统参数,在PSCAD/EMTDC中建立 $\pm 800$  kV特高压直流输电系统模型。系统的额定电压800 kV,额定输送功率5000 MW,为了便于仿真,全长取1500 km,采取单极双12脉动换流器串联的一次主回路接线方法,直流输电线路为六分裂导线。

#### 3.2 仿真验证

在直流输电线路正极距离M端母线250,500,750,1000 km处设置接地电阻值为100  $\Omega$ 的故障点,线路全长1500 km,信号采样频率1 MHz,故障发生时间设置0.5 s。

1) 行波提取:故障点距M端500 km,整流侧、逆变侧故障电流如图2所示。

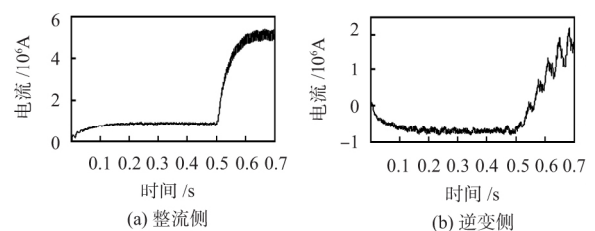


图2 500 km时整流与逆变侧故障电流

2) 利用ITD原理中的式(2)~式(4)分别对整流侧逆变

测故障行波进行分解得到含有故障信息的高频分量( proper rotation component  $\mu$ PRC)  $\mu$ PRC<sub>1</sub>  $\mu$ PRC<sub>2</sub> 如图3、图4。

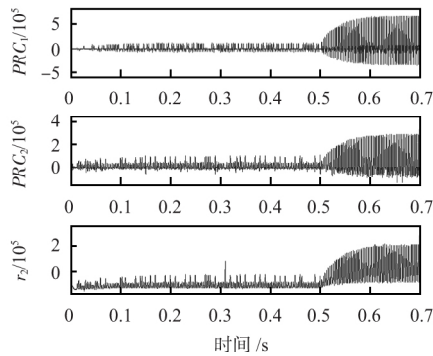


图3 M端ITD分析后的波形

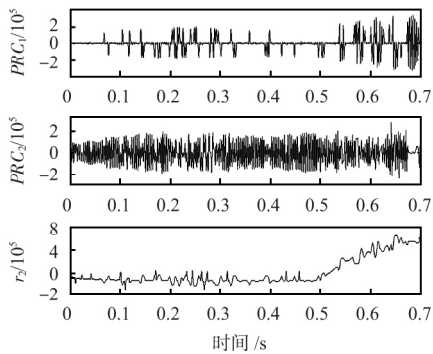


图4 N端ITD分析后的波形

3)  $\mu$ PRC<sub>1</sub> 中首次突变最大的点,即所需的初次行波到达时间,故障点在 500 km 时  $t_m = 0.502574$  s  $t_n = 0.503634$  s。

4) 寻找除初始行波以外的第一个与初始行波波头极性相反的波头,并记录  $t_2 = 0.504697$  s。

5) 利用式(9)进行测距计算,得出  $x = 500.23$  km,可知误差为 0.23 km,在误差允许范围内;利用式(8) D 型测距算法计算,令  $v = 3 \times 10^5$  km/s 得出  $x = 509.75$  km。

同理,故障点分别距离 N 端为 250, 750, 1000 km 处进行故障仿真,图5~图10为得到的故障电压行波,并进行ITD。分别确定行波到达时刻如下:

1)  $t_m = 0.502276$  s  $t_2 = 0.508825$  s  $t_n = 0.505586$  s,代入式(9)得  $x = 249.09$  km。利用 D 型公式得  $x = 253.5$  km。

2) 可得  $t_m = 0.501828$  s  $t_2 = 0.533584$  s  $t_n = 0.501822$  s,代入式(9)得  $x = 750.15$  km。采用 D 型算法得  $x = 750.9$  km。

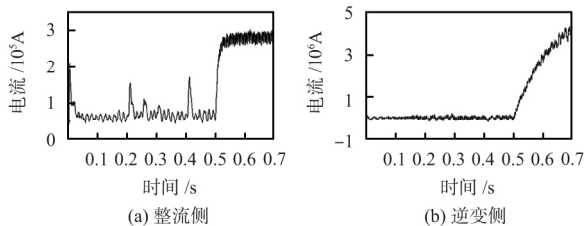


图5 故障距离 250 km 时整流和逆变侧电流

3) 可得  $t_m = 0.504537$  s  $t_2 = 0.506213$  s  $t_n = 0.504118$  s 代入式(9)得  $x = 999.86$  km。代入式(8)的  $x = 812.85$  km。

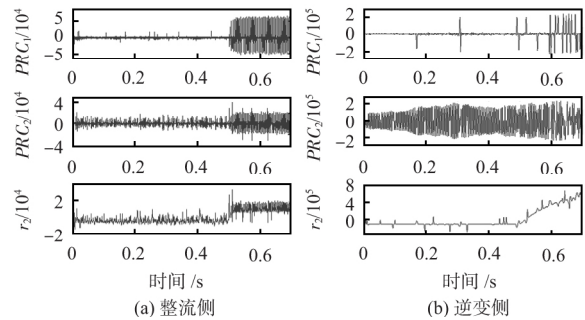


图6 故障距离 250 km 时逆变侧电流行波 ITD

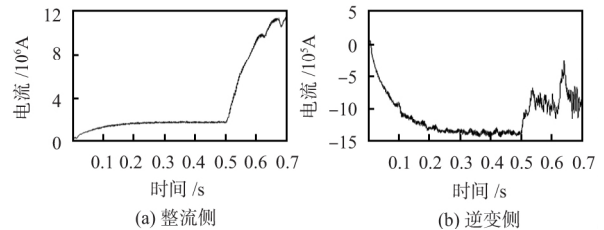


图7 故障距离 750 km 时整流与逆变侧电流

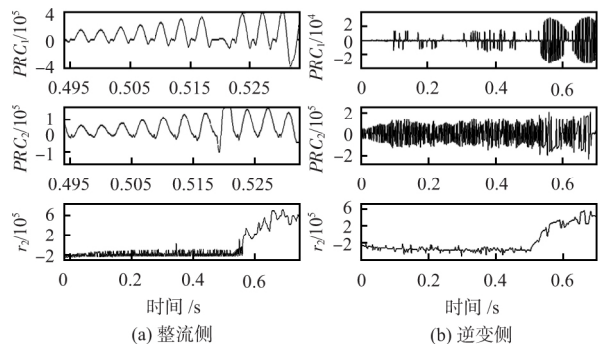


图8 故障距离 750 km 时整流侧与逆变侧行波 ITD

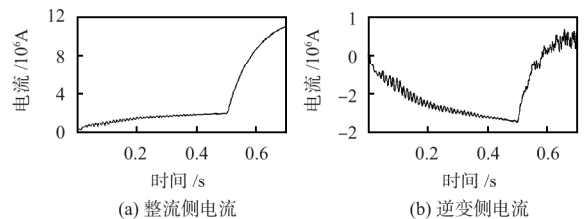


图9 故障距离 1000 km 时整流与逆变侧电流

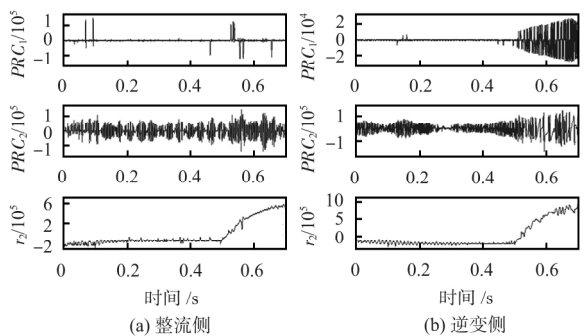


图10 故障距离 1000 km 时整流侧与逆变侧电流行波 ITD

测距结果如表1表明:在不断增加故障距离以及改变过渡电阻值的情况下进行仿真,均能在误差范围内测得故障距离。

#### 4 结论

利用ITD对故障行波时频信息进行提取,减少了不必

表 1 测距结果

故障距离/km	过渡电阻值/ $\Omega$	测量距离/km	误差/km
250	0	250.65	0.65
	100	249.09	0.90
	200	251.04	1.04
500	0	500.80	0.80
	100	500.23	0.23
	200	499.49	-0.51
750	0	750.88	0.88
	100	750.15	0.15
	200	750.70	0.70
1 000	0	1 000.80	0.80
	100	999.86	-0.14
	200	1 001.23	1.23

要插值和筛选、边缘效应小、精度高、提升了时频信息的有效性和精确性,能够精确标定行波波头到达母线的时间。并与 A-D 型测距方法结合,综合了单端和双端测距原理的优点,减少了因速度选取产生的误差。通过仿真结果以及 D 型测距法对比表明,2 种算法结合对高压直流输电线路故障定位有一定优势,值得进一步研究。

参考文献:

[1] 宋国兵,高淑萍,蔡新雷,等. 高压直流输电线路继电保护技术综述[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 123-129.

[2] 姚良忠,吴 婧,王志冰,等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6007-6020.

[3] 苏 译,彭敏放,朱 亮. 基于嵌套膜算法的大规模配电网故

障定位[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(5): 48-51.

[4] 董新洲,葛耀中,徐丙垠. 输电线路暂态电流行波的故障特征及其小波分析[J]. 电工技术学报, 1999(1): 59-62.

[5] 邬林勇. 利用故障行波固有频率的单端行波故障测距法[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.

[6] 夏璐璐,何正友,李小鹏,等. 基于行波固有频率和经验模态分解的混合线路故障测距方法[J]. 电力系统自动化, 2010(18): 67-73.

[7] Lin J, Duan J D, Lu H L, et al. Fault location method based on EEMD and traveling-wave speed characteristics for HVDC transmission lines [J]. Journal of Power and Energy Engineering, 2015, 3(4): 106-113.

[8] 张泽宁,徐 敏,刘永浩,等. 考虑波速变化特性的直流输电线路行波故障测距新算法[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 227-232.

[9] 顾小昕. 基于固有时间尺度分解的信号分析与干扰抑制技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.

[10] 付秀伟,孔 峰,付 莉. 基于粒子群神经网络线控转向故障诊断的研究[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(9): 39-44.

作者简介:

付 华(1962-),女,博士(后)教授,博士生导师,主要从事智能检测和数据融合等方面的相关研究工作, E-mail: fxfuhua@163.com。

程 诚(1991-),女,通讯作者,硕士研究生,主要研究方向为电力电子与电力传动, E-mail: 270808592@qq.com。

(上接第 67 页)

4 结 论

本文提出了基于 Copula 函数的多性能退化可靠性评估模型,以较高的准确度描述了导弹多性能指标间的关系及系统的可靠性退化特征。模型在确保评估结果准确的基础上,大幅减小了计算量,为导弹多性能退化可靠性模型研究提供了一种新方法,具有较高的推广性和实用性。

参考文献:

[1] QJ3153-2002. 导弹贮存可靠性设计技术指南[S].

[2] 段鹏程,王学奇,霍建成,等. 基于多传感器的机载导弹环境应力监测装置[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(9): 111-114.

[3] 曾 健,陈俊芳. Copula 函数在风险管理中的应用研究——以上证 A 股与 B 股的相关结构分析为例[J]. 当代财经, 2005(2): 34-38.

[4] Kim I T, Itoh Y. Accelerated exposure tests as evaluation tool for estimating life of organic coatings on steel bridges[J]. Corrosion

Engineering Science and Technology, 2007, 42(3): 242-252.

[5] 刘景森,金 勇. 一种基于吉布斯抽样的 MUSIC 多维参数联合估计算法[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(6): 62-65.

[6] 戴邵武,王克红,钱俭学. 基于 AKPSO 算法的加速度计快速标定方法[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(2): 69-72.

[7] 王 凯. 导弹武器系统贮存环境监测及贮存可靠性评定方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2012.

[8] Nelson R B. An introduction to Copulas [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2006.

[9] 王 琦,冯新喜,杜钦峰. 三维传感器极大似然配准算法[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(11): 54-56.

[10] 张世英. Copula 理论及其在金融分析上的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

作者简介:

戴宗亮(1992-),硕士研究生,主要研究方向为可靠性评估及健康状态预测。