

高压输电线路的双端电气量综合测距方法

翟永昌¹, 李永丽¹, 曾治安², 马志宇¹

(1. 天津大学电力系, 天津 300072; 2. 重庆电力公司, 重庆 400014)

摘要: 给出了一种高压输电线路故障综合测距系统, 综合了行波测距和基于线路集中参数、分布参数的常规测距方法, 从而实现了故障的准确定位; 利用小波来准确地检测波头到达时刻, 提高测距精度; 对行波测距中的不利因素进行了分析、改进, 提出了在电压过零、行波测距不能正常启动时利用故障后的重合闸脉冲进行测距的方法, 并利用 EMDC 进行仿真计算, 验证了其正确性和准确性。

关键词: 输电线路; 故障测距; 行波; 重合闸; 小波变换

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)15-0029-05

0 引言

高压输电线路故障的快速、精确测距, 长期以来得不到较好的解决, 这直接影响故障线路的供电恢复时间, 也给线路运行维护人员带来了沉重的负担。为了解决这一难题, 国内外学者对故障测距进行了广泛深入的研究。现有的故障测距方法按所采用的暂态或稳态量可分为: 利用故障稳态量的常规测距与利用故障暂态行波的行波测距; 按照所采用的电气量的不同可分为: 基于单端量的故障测距和基于双端量的故障测距。本文主要是研究双端量测距。

基于双端量的故障测距原理上能够消除过渡电阻、系统阻抗等影响, 仿真精度比较好, 有很好的应用前景。目前已经出现了很多基于双端量的测距方法, 这些方法可分为常规测距和行波测距。基于故障稳态量的常规测距一直是国内外研究的热点^[1~6], 仿真精度高, 利用故障录波器中的电压电流值进行故障定位, 容易实现, 不需要额外的硬件设备投资, 但是在现场受一些实际因素的影响比较大, 如: 两端数据采样不同步, 电压、电流互感器的传变特性, 线路参数不准确, 故障暂态谐波等。基于故障暂态行波的行波测距^[7,8]原理上能够克服常规测距的一些不利因素, 可以达到很高的精度(误差小于 300 m), 但是需要有两端数据的交换通道和两端时间同步设备(GPS), 同时在电压过零点和线路首末端都不能准确测距。可见常规测距和行波测距可以互相配合使用, 取长补短。本文主要研究这种综合测距系统及行波测距中死区的消除。

1 基于集中参数常规测距^[1]

在高压架空输电线路较短时, 输电线在工程实际

中可以用集中参数表示。系统示意图如图 1 所示。

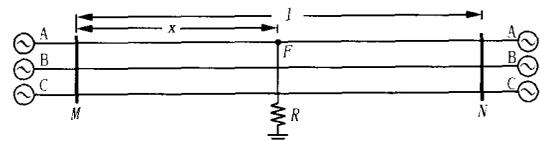


图 1 三相线路内部故障

Fig. 1 Faulted transmission lines

在三相电力系统的不对称故障分析中广泛采用对称分量法, 这种方法的优点是把不对称的系统变成三组相互独立的对称系统, 使计算三相电路问题变成只计算单相电路, 从而使计算大为简化。对称分量法用于故障测距后, 不再需要选出故障相。

如图 1 所示的两侧电源系统, 在 F 点发生短路故障后可以分解为正、负、零 3 个独立的序网。对不同的序网可以写出以下电压方程统一表达式:

$$\begin{cases} U_{FJ} = U_{MJ} - I_{MJ}xZ_J \\ U_{FJ} = U_{NJ} - I_{NJ}(l-x)Z_J \end{cases} \quad (1)$$

其中: J 为序网号, 由故障类型决定。三相短路 J = 1; 两相短路 J = 1, 2; 接地短路 J = 1, 2, 0。Z_J 为单位长度序阻抗。

由式(1)可解得故障距离:

$$x = \frac{U_{MJ} - U_{NJ} + I_{NJ}lZ_J}{(I_{MJ} + I_{NJ})Z_J} \quad (2)$$

式(2)是 M、N 两端电气量同步时的计算公式, 实际线路两端的保护装置或录波器采样数据往往不同步, 为消去不同步采样的影响, 引入不同步角, 同时考虑到电压和电流互感器的误差, 设电压量的不同步角为 α_1 , 电流量的不同步角为 α_2 , 则有:

$$\begin{cases} U_{FJ} = U_{MJ} - I_{MJ}xZ_J \\ U_{FJ} = U_{NJ}e^{j\alpha_1} - I_{NJ}e^{j\alpha_2}(l-x)Z_J \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)解得故障距离为:

$$x = \frac{U_{M1} - U_{N1}e^{j\theta_1} + I_{N1}e^{j\theta_2}IZ_L}{(I_{M1} + I_{N1}e^{j\theta_2})Z_L} \quad (4)$$

其中: θ_1 、 θ_2 可以通过故障前的采样值求得。由于任何故障都有正序分量,并且正序分量有利于消去线路零序互感的影响。所以故障距离的计算可只用正序网络。

2 基于分布参数常规测距^[2~6]

在高压架空输电线较长时,要取得精确的测距结果,输电线要以分布参数表示,考虑分布电容的影响。由长线传输方程知,对于图1线路上任一点的电压方程为:

$$\begin{cases} U_x = U_M \text{ch } \alpha x - Z_C I_M \text{sh } \alpha x \\ U_x = U_N \text{ch } \alpha(l-x) - Z_C I_N \text{sh } \alpha(l-x) \end{cases} \quad (5)$$

对于 F 点有:

$$U_{MF}^{(m)}(x) = U_{NF}^{(m)}(x, \theta) \quad (6)$$

其中:上标(m)代表模分量; θ 为不同步角;下标 MF 代表从 M 侧折算出的 F 点的电压;下标 NF 代表从 N 侧折算出的 F 点的电压。

对式(6)两侧取幅值,可消去 θ ,有: $|U_{MF}^{(m)}(x)| = |U_{NF}^{(m)}(x, \theta)|$ 将 x 进行迭代求解,即可求出故障距离。

这种方法都不受故障类型、过渡电阻、两侧系统运行情况的影响,具有较好的实用性,较易实现。使用 EMIDC(Electric-Magnetic Transients in DC systems)仿真了 750 kV 线路各种故障来验证测距方法,仿真系统模型见附录,仿真结果如表 1。

表 1 750 kV 线路各种故障的仿真情况

Tab.1 Simulation results of different faults in 750 kV transmission line

实际距离	AG	BC	BCG	ABC	ABCG
50	49.99	50.01	50.01	50.01	50.0
100	100.01	99.98	99.99	99.98	100.0
150	150.00	150.00	150.00	150.00	150.0
200	199.99	200.02	200.01	200.02	200.0
250	250.01	249.99	249.99	249.99	250.0

通过 EMIDC 仿真可见,测距精度满足工程实际的需要。

3 行波测距

1) 行波测距原理^[7,8]

线路故障后,设 v 为行波波速,行波波头到达 M 点的时刻为 t_M ,到达 N 点的时刻为 t_N ,故障时刻

为 t ,则在 M 点对于行波有:

$$x = v(t_M - t) \quad (7)$$

在 N 点对于行波有:

$$l - x = v(t_N - t) \quad (8)$$

由式(7)、(8)可推得:

$$x = \frac{v}{2}(t_M - t_N) + \frac{l}{2} \quad (9)$$

要准确地测距关键在于准确捕捉行波波头。电流互感器有很好的高频响应特性,它能传输高达 100 kHz 以上的高频信号,能满足暂态行波测距的要求,所以目前大多利用电流行波。

2) 小波变换识别波头^[9~11]

小波变换是一种信号的时间—尺度(时间—频率)分析方法,它具有多分辨率分析的特点,而且在时频两域都具有表征信号局部特征的能力,在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率,很适合于探测正常信号中夹带的瞬态反常现象并展示其成分,所以被誉为分析信号的显微镜。

通过采用多分辨分析的信号分解算法,可将信号在时间和频率不同的尺度上进行分解,观察信号在各个尺度上的表现,提取所需的特征。这里,尺度具有频带的含义,多分辨分析的过程即为频带剥离的过程。Mallat 分解算法就是用一组低通滤波器和高通滤波器对信号进行滤波,从而将信号分解成不同频率通道成分,据此,可实现数字信号滤波。另外,小波变换的模极大值集中体现了信号的奇异性,白噪声的性态与信号的奇异性态在小波变换下具有截然不同的性质,即噪声信号所产生的小波变换模极大值随尺度的增大而减小,其它信号引起的小波变换模极大值随尺度的增大而增大(对于阶跃信号保持不变)。据此可以有效地消除噪声。

电流行波信号是一种具有突变性质的非平稳变化的信号,突变点标志着行波到达检测点。捕捉行波波头实际上就是检测其突变点,小波变换是一个非常有效的工具。本文采用三次 B 样条函数作为小波函数对电流行波信号施行二进小波变换,来捕捉行波波头,主要基于以下考虑:二进小波变换具有在时间轴上的平移不变性;B 样条函数在所有多项式样条函数中具有最小支撑;而且三次 B 样条函数对混杂有噪声的信号进行逼近被证明是渐进最优的。

3) 仿真结果

系统接线图如图 1 所示:距 M 端 90 km 处发生

三相接地故障,采样频率为 1 MHz,线路总长 300 km,故障发生在 0.001 s,仿真过程从 0.0 s 到 0.003 s,线路参数见附录。

图 2 即为 M 、 N 两端的电流行波波形图。 I_{am} 、 I_{bm} 、 I_{cm} 分别是 M 侧的 a、b、c 相的电流行波。

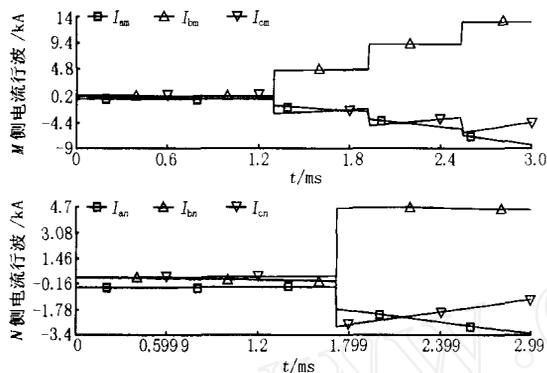


图 2 M 、 N 两端的电流行波波形图

Fig. 2 Travelling wave of currents at double terminals

以 A 相电流行波为例进行三次 B 样条小波变换,利用 Mallat 快速分解算法: $s = d_1 + d_2 + d_3 + a_3$,如图 3 所示为 A 相电流行波分解后的 d_1 层。

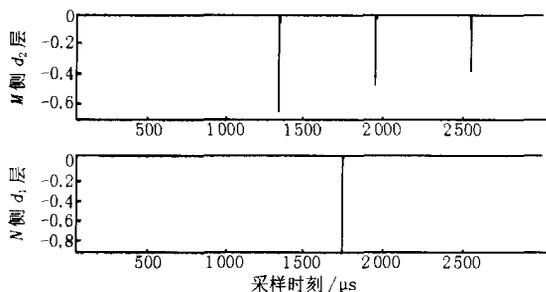


图 3 A 相电流行波分解后的 d_1 层

Fig. 3 Travelling wave decomposing results of phase A current

行波在三相输电线路上的传播可分为线模分量和零模分量。由于零模分量衰减大,并且波速受频率特性影响严重,因此在行波测距和行波保护中使用线模分量。因为大多数高压输电线路的电阻和电导都很小,所以行波的线模分量的波速接近光速并较少受频率和线路结构及参数的影响。

在上面的例子中,选用线模分量进行计算。行波波头第一次到达 M 端对应 $1\ 306\ \mu\text{s}$,行波波头第一次到达 N 端对应 $1\ 717\ \mu\text{s}$ 。根据线路参数计算出线模波速: $2.917 \times 10^5\ \text{km/s}$ 。代入式(9),计算出的故障距离为: $x = 90.055\ \text{km}$ 。

4) 不利因素的分析

a. 电压过零点

在电压相角过零或接近零时发生故障,产生的电压、电流行波比较微弱,会造成保护或测距功能失效。

b. 线路首末端测距死区

测距方法在线路首末端存在死区,这是因为在线路首末端发生故障时,行波在很短的时间内到达母线,受采样部分信号传输特性和采样频率的限制使得行波测距无法正确识别波头,甚至来不及启动。提高采样频率可以减小死区范围,然而无论采样频率如何提高,都不可能完全消除线路首末端存在的测距死区。此时,启动常规测距方法进行故障定位,对行波测距进行补充。

4 利用重合闸脉冲的行波测距改进方法

行波测距中在电压过零时发生故障,会导致双端量的行波测距失败,可以利用重合闸脉冲在故障点的反射测出故障距离。

线路故障后,设 v 为行波波速,故障时刻为 t , M 侧的行波波头经故障点反射后到达 M 侧的时刻为 t_M ,则故障距离为:

$$x = \frac{(t_M - t)v}{2} \quad (10)$$

在实际应用中当线路两端断路器都跳开后,利用线路一端合闸脉冲进行测距。图 1 中,750 kV 线路发生 A 相接地故障,故障点距 M 侧 90 km, M 侧的 A 相断路器在 0.001 s 时合闸,总的仿真时间是 0.003 s。 N 侧的断路器一直断开。

此时 M 侧的电流行波波形如图 4 所示,对 A 相电流行波用三次 B 样条小波分解后如图 5 所示。

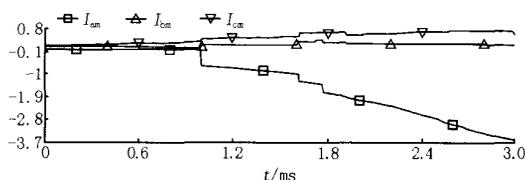


图 4 重合闸时的电流行波

Fig. 4 Travelling wave of current on reclosing

图 5 中 d_1 层的第 1 个突变点对应 M 侧断路器合上 ($1\ 000\ \mu\text{s}$),第 2 个突变点对应合闸脉冲经故障点反射后到达 M 侧 ($1\ 617\ \mu\text{s}$)。利用线模分量进行计算, t_M 对应 $1\ 617\ \mu\text{s}$, t 对应 $1\ 000\ \mu\text{s}$,代入式(10)中可得故障距离为 89.99 km。

综上所述,利用重合闸产生的脉冲来实现行波测距是可行的,计算方法类似于单端测距。可以消除基于双端量的行波测距中电压过零时的死区,与

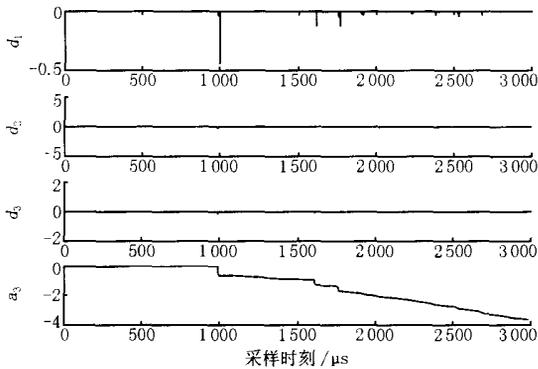


图5 对图4的A相电流行波进行小波分解
Fig.5 Wavelet decomposition of phase A current travelling wave corresponding with Fig. 4

常规测距配合使用效果更佳。

5 综合测距方法^[1,2]

基于双端电气量的测距方法能给出比较准确的测距结果,现综合常规测距和行波测距给出一个综合测距方法。

此综合测距的配置原则为:

- 1) 线路较短时,采用集中参数测距,方法如本文第1章中所述。
- 2) 线路较长时,采用分布参数测距和行波测距互相补偿。具体方法如下:

当线路发生故障后,测距算法中每次分布参数测距都要启动,给出一个故障距离。此时,如果行波测距启动并给出故障距离,则行波测距结果即为最后故障距离。如果行波测距不启动,则分布参数测距结果即为最后的故障距离。

6 结论

本文利用重合闸脉冲解决了行波测距中电压过零时的死区问题,仿真结果表明测距精度比较理想。结合常规测距和行波测距的综合测距方法可以发挥各种测距算法的优势,使各种方法互相取长补短,有利于准确测距。

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] 束洪春,司大军,葛耀中,等(SHU Hong-chun, SI Da-jun, GE Yao-zhong, et al). 利用双端不同步数据的高压输电

线路故障测距实用算法及其实现(Study on Practical Fault Location Algorithm for Two-terminal HV and EHV Transmission Lines Using Asynchronous Data at Both Ends) [J]. 电网技术(Power System Technology), 2000, 24(2): 45-49.

- [3] 滕林,刘万顺,李莹,等(TENG Lin, LIU Wan-shun, LI Ying, et al). 一种实用的新型高压输电线路故障双端测距精确算法(A Novel Practical Accurate Fault Location Algorithm for HV Transmission Line) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(18): 24-27.
- [4] 陈铮,苏进喜,等(CHEN Zheng, SU Jin-xi, et al). 基于分布参数模型的高压输电线路故障测距算法(Fault Location Algorithm for High Voltage Transmission Line Based on Distributed Parameter) [J]. 电网技术(Power System Technology), 2000, 24(11): 31-33.
- [5] Grigs A A, Hart D G, Peterson W L. A New Fault Location Technique for Two and Three Terminal Lines [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(1): 98-107.
- [6] Kezunovic M, Mrkic J, Perunicic B. An Accurate Fault Location Algorithm Using Synchronized Sampling [J]. Electric Power System Research, 1994, 29(1): 161-169.
- [7] 董新洲,葛耀中,徐丙垠,等(DONG Xin-zhou, GE Yao-zhong, XU Bing-yin, et al). 利用GPS的输电线路行波故障测距研究(Study of Transmission Line Fault Location Based on Travelling Waves and GPS Technique) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1996, 20(12): 37-40.
- [8] 葛耀中,徐丙垠,陈平(GE Yao-zhong, XU Bing-yin, CHEN Ping). 利用暂态行波测距的研究(Study of Fault Location Based on Travelling Waves) [J]. 西安交通大学学报(Journal of Xi'an Jiaotong University), 1995, 29(3): 70-75.
- [9] 杨福生(YANG Fu-sheng). 小波变换的工程分析与应用(Engineering Analysis and Application of Wavelet Transform) [M]. 北京:科学出版社(Beijing: Science Press), 2000.
- [10] Mallat S, Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelets [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1992, 38.
- [11] Mallat S, Zhong S. Wavelet Transform Maxima and Multi-scale Edges in Wavelet and Their Applications [M]. Belykin G Leds Jones and Baftlett Cambridge, 1991.
- [12] 曾祥君,尹项根,陈浩,等(ZENG Xiang-jun, YIN Xiang-gen, CHEN Hao, et al). 新型输电线路故障综合定位系统研究(Study on a New Type of Integrative Fault Location System for Transmission Line) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(22): 39-44.

附录:

750 kV 线路全长 300 km, 三相参数对称, 线路采用贝瑞隆模型, 每周采样 40 点。线路参数如下:

正序: $r = 0.013\ 326\ \Omega/\text{km}$; $x = 0.266\ 079\ \Omega/\text{km}$;

$c = 0.013\ 87\ \mu\text{F}/\text{km}$

零序: $r = 0.321\ 64\ \Omega/\text{km}$; $x = 0.833\ 354\ \Omega/\text{km}$;

$c = 0.009\ 778\ 57\ \mu\text{F}/\text{km}$

收稿日期: 2003-11-23

作者简介:

翟永昌(1979-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: ychzhai@tom.com

李永丽(1963-),女,教授,主要研究方向为电力系统继电保护和变电站综合自动化;

曾治安(1966-),男,高级工程师,主要从事电力系统继电保护运行管理方面的工作。

Integrative fault location method based on double-terminal information of high voltage transmission line

ZHAI Yong-chang¹, LI Yong-li¹, ZENG Zhi-an², MA Zhi-yu¹

(1. Department of Electric Power Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400014, China)

Abstract: The fault location method of transmission line based on voltages and currents at double terminals consists of traditional fault location using fault fundamental component and travelling wave location employing fault transient travelling wave. In this paper, a new type of integrative fault location system for transmission line combining these two methods is developed. Then the traditional fault location method based on lumped parameters and distributed parameters in the line model are integrated into travelling wave method. The precision is enhanced through wavelet transforming to detect the head of travelling wave. The defects in travelling wave location method are analyzed and improved. The method using reclosure impulse is developed when travelling wave is so weak that the location method can't work. The simulation results of EMTDC show that this method is available and accurate.

Key words: power transmission lines; fault location; travelling wave; reclosure; wavelet transform

(上接第 22 页 continued from page 22)

- [5] 万国成,任震,田翔(WAN Guo-cheng, REN Zhen, TIAN Xiang). 配电网可靠性评估的网络等值法模型研究(Study on Model of Reliability network-equivalent of Distribution System Reliability Evaluation) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2003, 23(5): 48-52.
- [6] Billinton R, Wang P. Reliability network-equivalent Approach to Distribution system reliability Evaluation [J]. IEE Proc — Gener, Transm and Distrib, 1998, 145(2): 149-153.
- [7] 陈文高(CHEN Wen-gao). 配电系统可靠性实用基础

(Practical Basis of Distribution System Reliability) [M]. 北京: 中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 1998.

收稿日期: 2003-11-18; 修回日期: 2004-01-08

作者简介:

张腾(1978-), 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划与可靠性研究; E-mail: zht-sohu123@sohu.com

张波(1963-), 男, 教授, 研究方向为电力系统运行与控制。

Evaluation of complex distribution system reliability

ZHANG Teng, ZHANG Bo

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

Abstract: This paper presents a method using failure mode and effect analysis(FMEA) associated with equivalent principle to assess the reliability of complicated distribution system. An equivalent logical model for simple distribution system is also presented. This algorithm turns the complicated distribution system into a simple one step by step using equivalent principle, and then obtains the reliability indexes, which is much more efficient than directly employing FMEA.

Key words: distribution system; reliability; equivalent principle