

基于小波分析的电力电缆行波故障测距

李骏, 范春菊

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 提出了基于小波分析的电力电缆行波故障测距方法。该方法向待测电力电缆注入脉冲电流, 利用小波分析对采样信号进行多分辨分析, 得到模极大值点的位置, 也就是采样信号突变点的位置, 该突变点的位置反映了故障点的位置, 从而实现电力电缆的故障测距。ATP Matlab 下的仿真计算结果表明, 较之于传统的行波测量方法, 该方法可以准确识别反射脉冲, 降低电缆线路分支和近区故障反射波对测量精度的影响, 测距精度不受故障类型的影响, 测距误差小于一个采样距离。

关键词: 电力电缆; 故障测距; 脉冲电流法; 小波分析

中图分类号: TM77 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)14-0015-04

0 引言

由于行波法具有原理简单、不受电缆故障类型和线路不对称因素影响的优点, 已经成为目前在现场普遍采用的电力电缆故障测距方法。应用于电力电缆故障测距的行波法包括脉冲电流法、脉冲电压法和低压脉冲反射法^[1]。但是, 行波法也会遇到其无法避免的缺陷, 包括两个方面: 反射波难以识别和行波波速不易确定。反射波难以识别的原因在于行波不仅会在待测线路故障点处产生反射, 而且会在该线路中所存在的阻抗不匹配点或分支点产生反射, 直接造成反射波难以识别。行波法测距理论的前提之一就是假设在待测线路中行波的波速是常数, 然而实际情况中并非如此。根据行波波速的计算公式可以得出, 待测线路导体的电导率、导体的绝缘状况及线路所处的外界环境都会影响行波在该线路中的传播速度。另外, 行波的频率成分复杂, 高频成分传播速度快, 但是衰减也快。这就造成行波波形畸变, 难以得到测量时间参考点, 也难以确定行波波速。一般而言, 电缆中的行波波速^[2]为 106 ~ 207 m/μs。由此可见上述影响给测距结果带来的误差是不容忽视的。

小波分析方法能将频率成分复杂的信号分解成不同频率的信号分量, 可以在时域上直接反映出信号的位置、幅值和波形, 有效实现所需信号与噪声的分离。目前, 小波分析已广泛应用于滤波、奇异信号检测、信号边缘检测等数字信号处理领域^[3]。本文利用小波分析所具有的时频局部特性, 来分析电力电缆行波故障测距中反射脉冲的起始点位置, 即行波信号的奇异点^[4]位置。与传统的行波测距方法

相比, 该方法可以大大减少反射波难以识别和行波波速不易确定这两大问题对测距精度的影响。

1 小波分析的基本理论

满足 $\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0$ 的函数 $\psi(t)$ 称为基小波, 这
使得 $C = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt} < \infty$ ($\psi(t)$ 为 $\psi(t)$ 的傅里叶变换), 即小波具有能量有限性, 这称为小波的容许性条件^[5]。经过平移和伸缩, 可得到一组小波:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \left[\frac{t-b}{a} \right]$$

式中: $a, b \in \mathbb{R}, a > 0$; a 为伸缩因子; b 为平移因子。对于满足 $x(t) \in L^2$ 信号的连续小波变化为:

$$WT_x(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, a > 0 \quad (1)$$

等效的频域表示为:

$$WT_x(a, b) = \frac{\sqrt{|a|}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) \psi^*(\omega/a) e^{j\omega b/a} d\omega \quad (2)$$

式中: $X(\omega)$, $\psi(\omega)$ 分别是 $x(t)$, $\psi(t)$ 的傅里叶变换, $\psi^*(\omega)$ 为 $\psi(\omega)$ 的共轭。对于信号 $x(t)$ 连续小波变化的逆变换为:

$$f(t) = \frac{1}{C} \int_a^b \int_{-\infty}^{\infty} W_f(a, b) \left[\frac{t-b}{a} \right] da db \quad (3)$$

在实际运用中, 特别是在计算机实现上, 往往需要把连续小波及连续小波变换离散化。这种离散化后的小波和相应的小波变换就是二进小波和二进小波变换。二进小波变换的定义式如下:

如果函数 $\psi \in L^1 \cap L^2$ 是一个二进小波, 若存在二常数 $0 < A < B < \infty$ 使得:

$$A \sum_{k=-Z}^Z | \wedge (2^{-k}) |^2 = B \quad a \quad e \quad (4)$$

条件式 (4)称为稳定性条件^[5]。若 $A = B$, 则称为最稳定条件。而函数序列 $\{W_{2^j k} f\}_k$ 叫做 f 的二进小波变换, 其中:

$$W_{2^j} f(k) = \frac{1}{2^j} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \wedge (2^{-j} t - k) dt \quad (5)$$

式 (5)的逆变换为:

$$f(t) = \sum_{j,k} W_{2^j} f(k) \wedge (2^{-j} t - k) \quad (6)$$

在尺度 2^j 下的逆变换公式为:

$$f_{2^j}(t) = \sum_k W_{2^j} f(k) \wedge (2^{-j} t - k) \quad (7)$$

式 (7)就是二进小波变换在特定尺度 (2^j) 下重构的时间信号, 也就是保持该尺度不变, 仅对平移因子进行积分, 对这种重构信号分析就可以排除其它频率成分的干扰。

经常用来进行信号处理的正交小波有 Daubechies, Morlets, Coiflets 和 Symlets 小波。为了能够准确地检测出行波信号中的奇异点, 需要综合考虑所选用的正交小波在时、频两域的紧支撑性、带通滤波性以及分析奇异信号时所必须具有的正则性等性能。Daubechies 系列小波是正交小波, 由于经过 Daubechies 小波分解得到的高频信息和低频信息可以完整地反应故障信息, 所以选择 Daubechies 小波来分析行波信号。另外, 在应用时可以通过选择适当的小波阶数来调整小波的信号处理性能, 虽然小波变换的阶数越多, 其重构信号越接近于原始信号, 但所需要的计算量也就越大。考虑到工程应用的实际情况, 最终选择 4 阶 Daubechies 小波对采集到的故障电力电缆行波信号进行小波分析。

4 阶 Daubechies 小波的低通滤波器的系数 $h(n)$ 为: $\{ -0.0106, 0.0329, 0.0308, -0.1870, -0.0280, 0.6309, 0.7148, 0.2304 \}$, 高通滤波器的系数可以通过式 (8) 得到。

$$g(n) = (-1)^n \overline{h(1-n)} \quad (8)$$

小波分解过程如图 1 所示。假设 $h(n)$ 和 $g(n)$ 是高通和低通滤波器, 那么分解系数 a_j 和 d_j 代表了分辨率为 2^j 的低频和低频信息。分解系数 d_j 完全表征了采样信号 s 在 2^j 尺度下的高频重构信号, 是本文中分析行波法脉冲点位置的依据。

2 基于小波分析的电力电缆行波测距理论

本文采用直流脉冲法, 利用外加脉冲电源向电力电缆的故障相注入低压脉冲, 当脉冲信号遇到阻

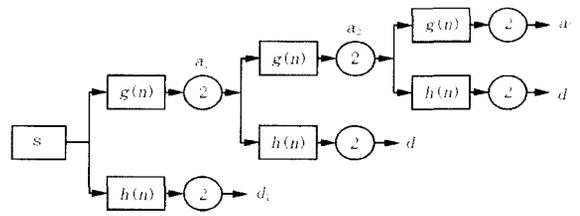


图 1 离散小波变换的分解过程

Fig 1 Decomposing procedure of discrete wavelet transform

抗不匹配点, 即故障点 (短路点、断线点、接地点等) 时, 通过使用安装于电缆首端的电流互感器采集于故障点处反射的行波信号, 根据发射脉冲与反射脉冲的往返时间差和脉冲在电力电缆中传播的波速度, 便可计算出故障点离测试点的距离^[6], 具体计算公式如下:

$$L = V \times \frac{t}{2} \quad (m) \quad (9)$$

其中: L 为从测试点到故障点的距离 (m); V 为行波在电缆中的传播 ($m/\mu s$); t 为发射脉冲和反射脉冲之间的时间间隔 (μs)。

当待测电缆线路中既无分支接头, 又无发生故障的阻抗不匹配点, 那么电流互感器采集到的信号应为正常衰减的脉冲信号。此时对采集到的信号进行小波分析将不会检测到任何信号量的模极大值点。

当待测电缆线路中存在分支接头或阻抗不匹配点时, 电流互感器将采集到脉冲信号在阻抗不匹配点上的反射信号。此时, 首先通过式 (5) 对采集到的脉冲信号进行多尺度的小波变换, 然后再利用式 (7) 对该脉冲信号在高频下进行单支重构。经过单支重构后的脉冲信号只包含有高频信号分量, 即可利用此重构的脉冲信号来确定反射脉冲到达的时间和波速。

2.1 模极大的确定

当反射脉冲到达故障点时, 行波信号将会发生突变。利用小波分析对信号进行多尺度分析, 因为信号在突变处的小波变换将会出现模极大值, 所以可以通过确定模极大值点出现的时间来确定发射波到达的时间^[7]。模极大值代表所观测信号的幅值和突变的程度, 因此测试脉冲发射后检测到的第一个模极大值出现的时刻就是高频信号所代表的突变信号到达的时间。

图 2、图 3 是由 ATP/Matlab 仿真得到的在不同故障类型下, 采集相同通道 (故障相) 内行波电流信号 s 及其在 Daubechies 小波三尺度分解后在尺度 2^1

下的高频重构信号波形 d_1 。由重构波形 d_1 很容易识别出第一个模极大值点的位置,这也就是反射波到达时间。由图 2、3 可以看出对于不同的故障类型,所采集到的行波信号具有不同的小波分析特征,但因为用来进行故障测距计算只是重构波形 d_1 的第一个模极大值点的位置,所以小波分析特征的不同不会影响测距结果。

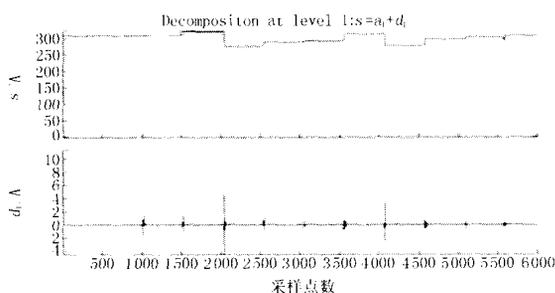


图 2 两相短路故障波形图

Fig 2 Two-phase short-circuit fault simulation diagram

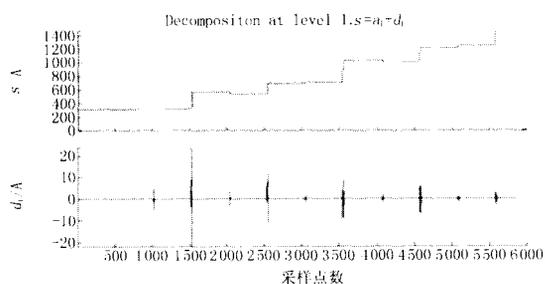


图 3 单相高阻接地故障波形图

Fig 3 Single phase high impedance grounded fault simulation diagram

2.2 行波波速 v 的确定

对采集到的行波信号进行小波变换而得到的高频分量是在某一频带范围内的高频信号,该高频信号所包含的频率成分相近,在现场将非故障相一端接地短路,来测量此高频信号在电缆线路中的行波波速。频率相近的行波信号在同一种型号电缆中的波速和衰减程度也应是相近的,以此波速作为利用重构高频信号测距时所采用的行波波速,相比较于传统的仅用同一波速来代替具有复杂频率成分脉冲信号的行波波速,无疑将会提高测距的精度。

2.3 影响因素与解决办法

在现场可能遇到的情况有:

第一是高频采样带来的噪声影响。采用行波信号的故障测距方法一般要求采样装置具有较高的采样频率,因此采集到的反射信号不可避免地会受到噪声干扰。如果采用小波分析的方法,就可以大大

降低噪声的干扰程度。因为无论是自然环境的白噪声还是突发性的噪声干扰,其小波变换的模极大值会随着变换尺度的增加而迅速衰减。因此采用小波分析可以很容易地驱除噪声影响。

第二是电流互感器的非线性时延误差影响。这是行波测距法难以解决的问题,在条件允许的情况下,可以采用时延较小的光电流互感器来降低时延带来的误差。

第三是电缆线路多分支或近区故障带来的影响。如果电缆线路分支较多或者故障点距离测量点较近,很容易造成行波信号难以区分。可以采用向故障相线路和健全相线路同时注入相同的脉冲信号,然后对采集到的两组信号求差,最后以求差后的结果作为小波分析的原始数据来识别故障点的位置。这样就可以去除故障相线路中不是故障点的其它信号奇异点,达到精确测距。

3 算法仿真

本文采用 ATP/EMTP 对电缆故障进行数值仿真,然后使用 Matlab/Wavelet Toolbox^[8] 对仿真数据进行小波分析。所仿真的电缆线路长度为 3 000 m,电气参数为:

$$R_1 = 2.415 \times 10^{-5} \text{ } \Omega/\text{m}, \quad L_1 = 5.163 \times 10^{-4} \text{ mH/m};$$

$$R_0 = 1.965 \times 10^{-4} \text{ } \Omega/\text{m}, \quad L_0 = 3.975 \times 10^{-4} \text{ mH/m};$$

$$C = 3.171 \times 10^{-4} \text{ } \mu\text{F/m}$$

仿真时采样步长为 10 ns,分别设置电缆在距离测量点 100 m 和 1 000 m 处发生单相接地短路故障、断线故障和相间短路故障。仿真采用直流矩形脉冲,对采集到的信号进行 4 阶 Daubechies 小波的三尺度小波变换。其中 1 000 m 处发生两相短路故障和单相高阻接地故障仿真波形如图 2、3 所示,计算步骤如下:

3.1 计算行波波速

将非故障相一端线路接地短路,测得反射点在第 3 033 个采样点处。所以根据式 (9) 得:

$$v = \frac{2 \times \Delta l}{t} = 197.8 \text{ m}/\mu\text{s}$$

3.2 根据反射行波信号奇异点的位置,计算故障点位置

从图 2、图 3 可以得到行波信号奇异点的位置,根据式 (9) 进行计算的结果如表 1 所示。

$$L = v \times \frac{t}{2} = 197.8 \times \frac{103 \times 10 \times 10^{-3}}{2} = 101.87 \text{ m}$$

$$L = V \times \frac{t}{2} = 197.8 \times \frac{1.010 \times 10^{-3}}{2} = 998.89 \text{ m}$$

仿真结果表明本文所提出方法对电力电缆故障测距效果良好,测距结果不受故障类型的影响,即使在故障条件恶劣时,即过渡电阻较大时,测距误差也在一个采样距离内。由于现场测距装置硬件条件的限制,所以实际测量误差将会大于仿真误差。亟需解决的问题有:需要开发高速采样装置,以提高测距精度;需要采用高速处理芯片,以满足小波分析所需巨大运算量的需求;需要提高硬件电路板设计工艺,以避免装置在高速运行时不稳定。

表 1 电力电缆测距仿真计算结果

Tab 1 Calculation result of electrical cable fault location simulation

实际故障距离 /m	故障类型	反射点的位置 /d	测量结果 /m	测量误差 /m
100 m	断线故障	103	101.87	1.87
	相间短路	103	101.87	1.87
	单相接地故障 /100	103	101.87	1.87
	单相接地故障 /5 000	103	101.87	1.87
1 000 m	断线故障	1 010	998.89	- 1.11
	相间短路	1 010	998.89	- 1.11
	单相接地故障 /100	1 010	998.89	- 1.11
	单相接地故障 5 000	1 010	998.89	- 1.11

3.3 近区故障时的改进方法

当发生近区故障时,不仅需要故障相通道内的行波信号,还需要采集非故障相通道内的行波信号。假定电缆线路发生近区单相低阻(100 Ω)接地故障,故障点位于距离测距装置一端线路 50 m 处。向故障相线路和健全相线路注入相同的脉冲,把所采集到两个通道内的信号之差 s 作为小波分析的原始数据,进行故障测距。仿真波形如图 4 所示。

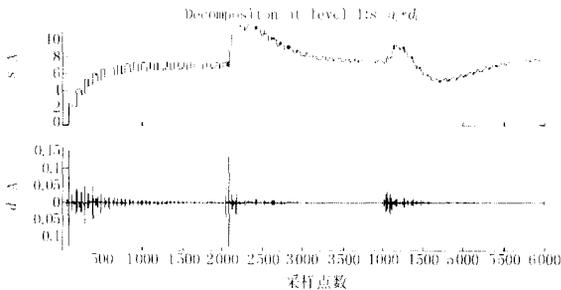


图 4 近区单相短路故障仿真波形

Fig 4 Single phase grounded fault of close area simulation diagram

根据式 (9)进行计算的结果为:

$$L = V \times \frac{t}{2} = 197.8 \times \frac{50 \times 10^{-3}}{2} = 49.45 \text{ m.}$$

测距误差为 0.55 m,在一个采样距离内。

4 结论

本文提出的基于小波分析的电力电缆行波测距方法,综合了行波测距方法简便、适用范围广的特点和小波变换多尺度分析能有效检测信号奇异点的特性。仿真研究表明:采用小波分析处理采样信号可以准确测定反射脉冲到达的时间,减少外界噪声和待测线路自身因素对测距结果带来的误差;行波测距方法可以忽略故障类型对测距结果的影响,采用故障相与健全相行波信号之差作为小波分析的原始信号可以降低近区故障和多分支节点对测距结果带来的误差,实现电力电缆的精确测距。

参考文献:

- [1] 李明华, 闫春江, 严璋. 高压电缆故障测距及定位方法 [J]. 高压电器, 2002, 38(6): 38-40.
LI Ming-hua, YAN Chun-jiang, YAN Zhang. The Fault Location and Pointing of High Voltage Electrical Cable [J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(6): 38-40.
- [2] 邓长胜. 中高压电力电缆及其应用 [J]. 电世界, 2003, 44(6): 8-13.
DENG Chang-sheng. The Application of Medium & High Voltage Electrical Cable [J]. Electrical World, 2003, 44(6): 8-13.
- [3] Mallat S, Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelets [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1992, 38(2): 617-643.
- [4] Mognago F H, Abur A. Fault Location Using Wavelets [J]. IEEE Trans on PWRD, 1998, 13(4): 1475-1480.
- [5] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
YANG Fu-sheng. Engineering Analysis and Application of Wavelet Transform [M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [6] 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. The Principle and Technique of New Type of Relay Protection and Fault Location [M]. Xi an: Xi an Jiaotong University Press, 1996.
- [7] 张正团, 文锋, 徐丙垠. 基于小波分析的电缆故障测距 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(1): 49-52.
ZHANG Zheng-tuan, WEN Feng, XU Bing-yin. The Fault Location of Electrical Cable Based on Wavelet Analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(1): 49-52.

(下转第 91 页 continued on page 91)

Press, 1999.

- [26] Yamayee Z Maintenance Scheduling: Description, Literature Survey, and Interface with Overall Operation Scheduling [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1982, 101 (8): 2770-2779.
- [27] Sarliwen R L. 电力系统规划 [M]. 北京:水利电力出版社, 1984.
- Sarliwen R L. Programming Power System [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1984.

收稿日期: 2004-10-28; 修回日期: 2005-04-15

作者简介:

林海华 (1982 -),女,博士,目前的研究方向为互联网运行控制性能评价标准和输电线路检修;

E-mail: linhaihua@student.dlut.edu.cn

李卫东 (1964 -),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为互联网运行控制及其性能评价标准、电力市场理论与应用、电力系统运行状态可视化和人工智能在电力系统中的应用。

Summarizing the optimized algorithms to transmission line maintenance scheduling

L N Hai-hua, L I Wei-dong

(Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Transmission line maintenance scheduling by manual work is hard to consider both the reliability and economics presently, while optimizing algorithms are able to keep their balance. The situation of the research on transmission line maintenance scheduling at home and abroad is summarized. This paper introduces two types of optimized algorithms to transmission line maintenance scheduling, which are integrated transmission line and generation maintenance scheduling optimization and single transmission line maintenance scheduling optimization. The first type mostly includes two methods that are Benders decomposition-based integrated transmission line and generation maintenance scheduling optimization and the sensitivity analysis method. The later also includes two methods which are Benders decomposition-based transmission line maintenance scheduling optimization and the evaluating reliability-based transmission line maintenance scheduling optimization. After analysing the four methods, the future research direction is presented, which should improve the computing speed and constringency of the optimized algorithms in the way of practicality.

Key words: transmission line; maintenance schedule; optimized algorithm; Benders decomposition; reliability

(上接第 18 页 continued from page 18)

- [8] 胡昌华,张军波,夏军,等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计——小波分析 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2001.
- HU Chang-hua, ZHANG Jun-bo, XIA Jun, et al. System Analysis and Design Based on MATLAB——Wavelet Analysis [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2001.

收稿日期: 2004-10-26; 修回日期: 2004-12-02

作者简介:

李骏 (1980 -),男,硕士研究生,从事电力系统继电保护的研究;

范春菊 (1967 -),女,副教授,在职博士生,长期从事人工智能在继电保护及综合自动化的研究及教学工作。

E-mail: chunjuc@online.sh.cn

Research of electrical cable travelling wave fault location based on wavelet analysis

L I Jun, FAN Chun-ju

(Dept of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A new electrical cable travelling wave fault location based on wavelet analysis is proposed. This method injects impulse current source into electrical cable. It detects sampled signal's mode maximum point by multi-resolution analysis based on wavelet analysis. Because this point is sampled signal's discontinuity point on the cable line, fault location is realized. Compared with traditional fault location method based on ATP/Matlab simulation, this method can precisely identify reflection impulse, reduce the mistake influence of multi-branch cable transmission line and close fault reflecting wave. The result is not affected by fault types and the error of fault location can be maintained in the range of one sampling distance.

Key words: electrical cable; fault location; impulse current experiment; wavelet analysis