

基于小波模极大值的单端行波故障测距

马丹丹, 王晓茹

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 将小波变换对信号奇异性的检测功能应用到输电线路的测距中, 根据故障行波电流信号线模分量的模极大值性质, 提出一种故障测距方案, 该方案经过 PSCAD/EMTDC 仿真验证, 具有较高的可靠性和精确性, 不受过渡电阻、故障类型及故障距离等的影响。

关键词: 故障测距; 小波变换; 行波; 单端法

Single terminal methods of traveling wave fault location based on wavelet modulus maxima

MA Dan-dan, WANG Xiao-ru

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: This paper discusses wavelet transformation and the singularity detection applied in transmission line fault location, and proposes a new fault location method constructed by combining with module component of traveling-wave and power current. The method is based on the module maximum of wavelet transformation. PSCAD/EMTDC simulation results show that this method is efficient in fault location and the locating accuracy is high, unaffected by different fault type, fault resistance and fault location.

Key words: fault location; wavelet transform; traveling wave; single terminal methods

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)03-0055-05

0 引言

随着我国各大电力系统的容量和电网区域不断扩大, 电网运行管理也更加复杂, 电力系统的安全稳定问题日益突出。线路故障后迅速、准确地判断出故障位置, 不仅可以减轻巡线负担, 及时修复线路, 保证可靠供电, 而且可以减少因停电造成的综合经济损失。因此快速、准确的故障定位对电力系统安全稳定和经济运行具有十分重要的意义。

输电线路故障测距的主要方法一般分为: 阻抗法和行波法。阻抗法在原理上受系统参数、线路参数及过渡电阻的影响很大, 测距精度较难保证。行波法包括单端法和双端法, 目前单端法大多根据第一个行波波头和故障点反射产生的行波波头到达母线的时差求得故障距离。双端法是由故障点产生的行波到达两端母线的时差来测距。因双端法只检测第一个行波波头到达的时刻, 现有的行波测距算法中其测距精度相对较高, 但双端行波测距需要全球定位系统和两端行波数据传输系统等, 成本较单端法增加一倍。故单端法行波故障测距的研究具有很强的现实意义, 而单端法行波测距的关键即是故障点反射波头、对端母线反射波经故障点后的透

射波头和相邻母线的透射波头等检测。本文主要解决了区分来自故障点和对端母线的反射行波, 其他相关问题将在后续研究中解决。文献[1~5]对故障行波到达母线的各种波头极性和幅值进行了分析研究。文献[6]利用对端母线的反射行波也包含着故障信息这一特点, 提出了不受波速影响的单端故障测距算法。文献[7]提出了消除相邻母线反射行波的“波行比较法”。

本文首先分析了基于小波变换的暂态行波信号的奇异性检测理论, 利用故障电流行波线模分量的模极大值性质, 提出一种新的测距方案, 该方案经过 PSCAD/EMTDC 仿真验证, 具有较高的可靠性和精确性, 不受过渡电阻、故障类型及故障距离等的影响。

1 小波变换及信号的奇异性检测

1.1 小波变换

输电线路发生故障后的暂态行波具有突变、奇异的特点。传统的傅立叶分析方法实质上是一种纯频域的全局分析方法, 利用傅立叶变换分析时会把能够反映故障特征的局部信号在整个频域内平滑掉, 从而丢失了用于分析故障的有用信息, 导致产

生较大的误差。传统的时域检测分析方法如微分法、相关法等存在受噪声及线路参数频率特性的影响较大的不足。而小波分析对对突变的信号具有良好的检测能力。

设函数 $\Psi(x)$ 满足:

$$\int_{\mathbb{R}} \Psi(x) dx = 0 \quad (1)$$

则称 $\Psi(x)$ 为基本小波或母小波。令 $\Psi_s(x)$ 表示对 $\Psi(x)$ 对尺度 s 的伸缩

$$\Psi_s(x) = \frac{1}{s} \Psi\left(\frac{x}{s}\right) \quad (2)$$

任意信号 $f(x) \in L^2(\mathbb{R})$ 的连续小波变换 $Wf(s, x)$ 可以表示为

$$Wf(s, x) = f \cdot \Psi_s(x) \quad (3)$$

设该小波函数在尺度 s 下, 在 x_0 的某一邻域 S , 对一切 x 有 $|Wf(s, x)| \leq |Wf(s, x_0)|$, 则 x_0 为小波变换的模极大值点, $Wf(s, x_0)$ 为小波变换的模极大值。

小波变换的模极大值点与暂态行波的突变点是一一对应的。小波模极大值的幅值表示信号的变化强度, 模极大值的极性表示信号的变化方向。使得对暂态行波信号突变点的分析转化为对信号的小波变换模极大值的分析, 从而大大简化问题的分析和计算。

1.2 信号的奇异性检测

一个突变的信号在其突变点处必是奇异的。检测和识别信号的突变点并用奇异性指数 Lipschitz α 可以用来描述信号的奇异性, 从而检测或识别信号的突变点。

信号的 Lipschitz α 指数一般定义为:

定义 设 n 是一非负整数, $n < \alpha \leq n+1$, 如果存在常数 A 和 $h_0 (h_0 > 0)$ 及 n 次多项式 $P_n(h)$, 使得对于任意 $h \leq h_0$, 均有 $|f(x_0 + h) - P_n(h)| \leq A|h|^\alpha$, 则称 $f(x)$ 在 x_0 是 Lipschitz α 指数的。如果上式对所有 $x_0 \in (a, b)$ 均成立, 且 $x_0 + h \in (a, b)$, 则称 $f(x)$ 在 (a, b) 上是一致 Lipschitz α 的。

若函数 $f(x)$ 在某一点奇异, 由前面的分析可知, 小波变换的模极大值点对应于信号的奇异点, 那么该点的小波变换 $Wf(s, x)$ 与该点的 Lipschitz α 指数必存在内在的联系。Mallat 证明了如下结论, 如果函数 $f(x)$ 在区间 (b_1, b_2) 的小波变换 $Wf(s, x)$

满足式

$$|Wf(s, x)| \leq Ks^\alpha \quad (4)$$

则 $f(x)$ 在区间 (b_1, b_2) 具有一致的 Lipschitz α 指数。式中 K 为一个与小波 $\Psi(x)$ 有关的常数。当尺度 $s = 2^j$ 时, 得式

$$|Wf(s, x)| \leq K2^{j\alpha} \quad (5)$$

两边取对数得

$$\log_2 |Wf(s, x)| \leq \log_2 K + j\alpha \quad (6)$$

可知, 当 Lipschitz 指数 $\alpha > 0$ 时, 小波变换模极大值随尺度 j 的增大而增大; 当 Lipschitz 指数 $\alpha < 0$ 时, 小波变换模极大值随尺度 j 的增大而减小。

2 基于小波变换的单端测距算法

2.1 B 样条小波

电力系统暂态行波故障测距, 需要准确刻画行波到达的时刻, 从理论和实际应用的观点看, 具有紧支集的小波是最富吸引力的。而 B 样条小波在同阶多样条函数中具有最小支集, 非常适合用于突变点的检测。

n 阶 B 样条函数定义为:

$$N^n(t) = N^{n-1} * N^1(t) = \int_0^1 N^{n-1}(t-x) dx \quad (7)$$

$$\text{其中: } n \geq 2, \quad N^1(t) = \begin{cases} 1 & t \in [0, 1] \\ 0 & t \notin [0, 1] \end{cases}$$

令 $N_{2^j}^n(x)$ 是 $N^n(x)$ 的二进伸缩, 即

$$N_{2^j}^n(x) = \frac{1}{2^j} N^n\left(\frac{x}{2^j}\right) \quad (8)$$

则 $N_{2^j}^n(x)$ 可生成一系列互相嵌套的多样条函数空间, 即多分辨分析, 而 n 阶 B 样条 $N^n(x)$ 是该多分辨分析的生成元, 即尺度函数。若同时选择 $n+1$ 阶的 B 样条 $N^{n+1}(x)$ 在尺度 2^{-1} 伸缩的导数作为小波函数, 即

$$\Psi^n(x) = \frac{dN^{n+1}(x)}{dx} \quad (9)$$

则它们将满足二尺度方程

$$\begin{cases} N^n(x) = \sum h_k N^n(2x-k) \\ \Psi^n(x) = \sum g_k N^n(2x-k) \end{cases} \quad (10)$$

当 $n=3$ 时, 可得如下滤波器参数^[7]:

$$h_k = \{0.125, 0.375, 0.375, 0.125\}$$

$$g_k = \{0, 2, -2, 0\}$$

$$k = \{-2, -1, 0, 1\}$$

本论文工作即采用上述的三阶 B 样条小波。

2.2 算法及其原理

2.2.1 本文算法

单端故障测距的关键是准确求出行波第一次到达测量端与从故障点或者对端母线反射回到测量端的时间差^[1-8]。然而在接地故障中, 故障发生在线路前半段时, 故障点的反射波先到达; 故障发生在线路后半段时, 对端母线的反射波先到达。因此, 如何区分来自故障点和对端母线的反射行波成为一个难题^[1]。本文在理论和仿真研究的基础上得出母线均接有多条(两条以上)线路的系统结构下, 双端母线的反射系数均为负, 则对端母线的反射波和初始行波反极性, 而故障点的反射行波和初始行波同极性; 在母线上只有被测线路时, 则对端母线的反射波和初始行波同极性, 而故障点的反射行波和初始行波反极性。从而解决了第二个行波波头的识别问题得到故障距离。

2.2.2 算法原理分析

当输电线路发生故障时, 如图 1 行波将在波阻抗不连续点持续发生折反射现象。

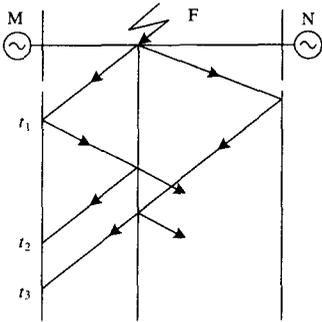


图 1 行波网格图

Fig.1 Lattice diagram of traveling waves

根据文献[8]令折射系数:

$$\alpha = 2Z_2 / (Z_1 + Z_2) \quad (11)$$

$$\text{反射系数: } \beta = (Z_2 - Z_1) / (Z_1 + Z_2) \quad (12)$$

令 M 为测量母线, 根据行波的折反射规律可知 M 处故障暂态电压为:

$$\begin{aligned} u_m(t) = & (1 + \beta_m)u_f(t - \tau_m) + \beta_m\beta_f(1 + \beta_m) \cdot \\ & u_f(t - 3\tau_m) + \beta_m\alpha_f(1 + \beta_m) \cdot \\ & u_f(t - 2\tau_n - \tau_m) + \dots \end{aligned} \quad (13)$$

故障暂态电流:

$$\begin{aligned} i_m(t) = & -(1 - \beta_m)u_f(t - \tau_m) / Z - \beta_m\beta_f(1 - \beta_m) \cdot \\ & u_f(t - 3\tau_m) / Z - \beta_m\alpha_f(1 - \beta_m) \cdot \\ & u_f(t - 2\tau_n - \tau_m) / Z + \dots \end{aligned} \quad (14)$$

将故障暂态电流分解为暂态初始分量、故障点反射波分量、对端母线反射波分量得:

1) 故障初始行波分量

$$i_1(t) = -(1 - \beta_m)u_f(t - \tau_m) / Z + \dots \quad (15)$$

2) 故障点反射波分量

$$i_2(t) = -\beta_m\beta_f(1 - \beta_m)u_f(t - 3\tau_m) / Z + \dots \quad (16)$$

3) 对端母线反射波分量

$$i_3(t) = -\beta_m\alpha_f(1 - \beta_m)u_f(t - 2\tau_n - \tau_m) / Z + \dots \quad (17)$$

式(13)~(17)中 τ_m 为行波在线路 MF 段的传播时间, τ_n 为行波在线路 NF 段的传播时间。 β_m 为行波在母线 M 处的反射系数, β_f 为行波在故障点 F 的反射系数, β_n 为行波在母线 N 处的反射系数, α_f 为行波在故障点处的折射系数, Z 为线路 MN 的波阻抗。

当母线接有多回出线时, 反射系数 β_m 、 β_n 小于 0, 故障点反射系数 β_f 为负, 故障点处的折射系数 α_f 大于 0, 从而得出故障点反射波与初始行波同极性, 对端母线反射行波与初始行波反极性; 当母线上只有被测线路时, 此时母线反射系数 β_m 、 β_n 大于 0 小于 1, 则故障点反射波与初始行波反极性, 对端母线反射波与初始行波同极性。本文所做仿真研究工作均是利用电流反向行波浪涌。

在三相系统中, 相间线路存在耦合。利用凯伦贝尔变换将 a, b, c 三相相量转换为 0, α , β 模量, 各模量之间无耦合关系, 相互独立。凯伦贝尔变换矩阵为

$$T_i = T_u = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$T_i^{-1} = T_u^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

本文限于篇幅, 对双端系统进行仿真得到如图 2 所示线路发生故障时 α 线模分量模极大值结果。

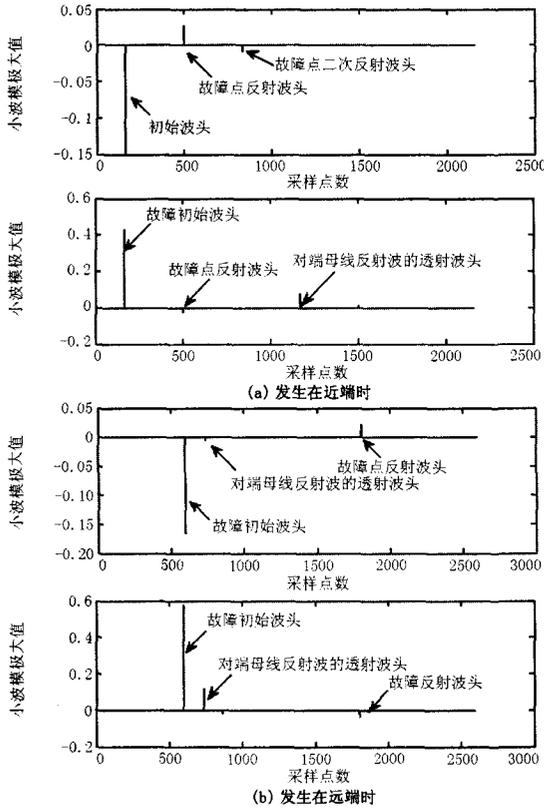


图2 故障时 α 模电流的小波变换模极大值

Fig.2 Modulus maximum of wavelet transform of α module current with fault

当近端发生故障时图 2 (a) 所示经小波变换检测到的第二个行波波头与初始行波波头反极性, 即故障点反射波头从而得到故障距离公式:

$$D = \frac{v(t_2 - t_1)}{2} \quad (20)$$

当远端发生故障时图 2 (b) 所示经小波变换检测到的第二个行波波头与初始行波波头同极性, 即对端母线反射波头从而得到故障距离公式:

$$D = L - \frac{v(t_3 - t_1)}{2} \quad (21)$$

式 (20)、(21) 中:

D 为故障点与测量端的距离; L 为故障线路的长度; v 为波速; t_1 为初始行波到达测量端的时间; t_2 为故障点反射波到达测量端的时间; t_3 为对端母线反射波到达测量端的时间。

算法流程图如图 3 所示。

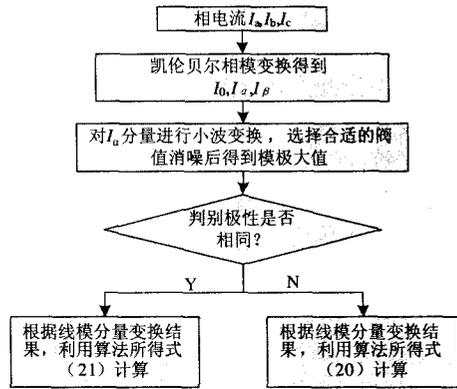


图3 测距算法流程图

Fig.3 Flowchart of fault location algorithm

3 仿真实验

本文采用 500 kV 双端输电系统, 线路 MN 全长 200 km, 如图 4 所示。系统阻抗为

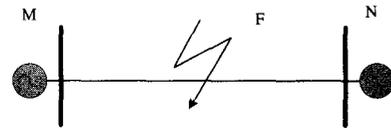


图4 双端仿真线路模型

Fig.4 Simulation line model with two sources

M 侧: $Z_{m1} = 1.05 + j43.18 \Omega$

$Z_{m0} = j29.09 \Omega$

N 侧: $Z_{n1} = 1.06 + j44.92 \Omega$

$Z_{n0} = j37.47 \Omega$

线路参数:

$r_1 = 0.0208 \Omega/\text{km}$

$l_1 = 0.8984 \text{ mH}/\text{km}$

$c_1 = 0.0129 \mu\text{F}/\text{km}$

$r_0 = 0.1148 \Omega/\text{km}$

$l_0 = 2.2886 \text{ mH}/\text{km}$

$c_0 = 0.0052 \mu\text{F}/\text{km}$

定义测距误差 Error%为:

$\frac{\text{实际故障距离} - \text{计算故障距离}}{\text{线路总长}} \times 100\%$ 。本文

采样频率为 1 MHz, 取波速 $v = 2.989 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。表 1 所示为在不同地点发生 A 相接地的测距结果和误差; 表 2 为不同过渡电阻情况下发生 A 相接地时所得测距结果和误差; 表 3 为分别发生单相接地、两相相间短路、两相接地短路和三相短路时的测距结果及误差。由数据可表明所得测距结果有较高的精

确性, 满足故障测距的要求。

表 1 不同故障点的测距结果和测距误差 (A-G)

Tab.1 Different fault location results and errors (A-G)

实际故障距离/km	测量故障距离/km	测距误差/(%)
10	9.899 6	0.050 2%
50	49.952	0.024%
120	119.89	0.055%
180	179.97	0.015%

表 2 不同过渡电阻情况下的测距结果和测距误差 (A-G)

Tab.2 Fault location results and errors affected by factors of fault resistance (A-G)

过渡电阻/ Ω	实际故障距离/km	测量故障距离/km	测距误差/(%)
0	120	119.89	0.055
20	120	119.89	0.055
100	120	119.89	0.055
200	120	119.89	0.055

表 3 不同故障类型情况下的测距结果和测距误差

Tab.3 Fault location results and errors by factors of fault types

故障类型	实际故障距离/km	测量故障距离/km	测距误差/(%)
A-G	50	49.952	0.024
BC	50	50.066	-0.033
BC-G	50	49.952	0.024
ABC	50	50.066	-0.033

4 结语

电力线路的故障检测与准确定位具有显著的社会效益。本文所提行波测距方法的可靠性和精度仿真验证表明不受故障距离、故障过渡电阻及故障类型的影响。但在传输线特性阻抗匹配对端母线无反射波的情况下, 该方法失去作用。

参考文献

- [1] Magnago F H, Abur A. Fault Location Using Wavelets[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998,13 (4): 1475-1480.
- [2] 覃剑, 彭莉萍, 王和春. 基于小波变换技术的输电线路单端行波故障测距[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 62-65.
- QIN Jian, PENG Li-ping, WANG He-chun. Single Terminal Methods of Traveling Wave Fault Location in

Transmission Line Using Wavelet Transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005,29(19): 62-65.

- [3] 艾斌, 吕艳萍. 基于小波模极大值极性的行波信号识别[J]. 电网技术, 2003, 27 (5) :55-57.
- AI Bin, L ü Yan-ping. Traveling Wave Signal Identification Based on Wavelet Polarity of Modulus Maxima[J]. Power System Technology, 2003,27(5): 55-57.
- [4] 曲静. 利用电流行波实现高压输电线路单端故障测距的方法研究(硕士学位论文)[D]. 重庆: 重庆大学, 2002.
- Qu Jing. The Research of Method in Single-ended Fault Location with Transient Current Traveling Wave in the High voltage Transmission Line, Thesis[D]. Chongqing: Chongqing University, 2002.
- [5] 蒋涛, 陆于平. 不受波速影响的输电线路单端行波故障测距研究[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(12): 29-32.
- JIANG Tao, LU Yu-ping. Study of Fault Locating Based on Single Terminal Traveling Waves Avoiding Wave Speed Influence[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004,24(12): 29-32.
- [6] 赵宏图. 小波变换用于电力系统波故障定位的理论和方法(硕士学位论文)[D]. 成都: 四川大学, 2000.
- [7] 董新洲, 葛耀中, 徐丙垠. 利用暂态电流行波的输电线路故障测距研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4).
- DONG Xin-zhong, GE Yao-zhong, XU Bing-yin. Research of Fault Location Based on Current Travelling Waves[J]. Proceedings of the Csee, 1999,19(4).
- [8] 吴维韩, 张芳榴, 等. 电力系统过电压数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- WU Wei-han, ZHANG Fang-liu, et al. Power-system Over Voltage Numerical Method [M]. Beijing: Science Press, 1989.

收稿日期: 2008-03-25; 修回日期: 2008-05-26

作者简介:

马丹丹 (1984-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统暂态信号分析; E-mail: madandan_028@163.com

王晓茹 (1962-), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统保护和安全稳定控制、配电网和变电站自动化技术。