

A New Arithmetic of Single-Port Wavelet Fault Location for Small Current Grounding System*

Qiuyan Liang, Haibo Zhou[#], Guoling Niu, Xiang Ma

Mechanical Engineering Department, Jia Musi University, Jia Musi
Email: [#]124734278@qq.com

Received: Oct. 23rd, 2012; revised: Nov. 6th, 2012; accepted: Nov. 28th, 2012

Abstract: The single-port wavelet fault location has the merits that location speed is fast, it is not need inspect lines, low cost and may locate many times, so it is one of the effective methods of single-phase grounding fault location of small current grounding system. But its location precision is influenced by many factors, especially the speed precision of the wavelet. On the basis of wavelet theory, it proposes a new arithmetic of single-port wavelet fault location for small current grounding system which not influenced by the speed of wavelet. The result shows that the arithmetic is correct and the simulation result shows that the precision of this arithmetic is better than the traditional single-port wavelet fault location method.

Keywords: Small Current Grounding System; Single-Phase Grounding Fault; Wavelet Fault Location

小电流接地系统单端行波故障定位新算法*

梁秋艳, 周海波[#], 牛国玲, 马翔

佳木斯大学机械工程学院, 佳木斯
Email: [#]124734278@qq.com

收稿日期: 2012年10月23日; 修回日期: 2012年11月6日; 录用日期: 2012年11月28日

摘要: 单端行波故障定位法以定位速度快, 无需巡线, 成本低, 可以进行多次定位等优点, 成为小电流接地系统中单相接地故障定位的有效方法之一。但是其定位精度容易受到多种因素的影响, 尤其是受到行波的波速精度的影响, 在行波理论的基础上提出一种不受行波波速影响的单端行波故障定位算法, 理论推导结果表明, 这种算法正确可靠。仿真结果表明, 这种定位算法的精度优于传统的单端定位方法。

关键词: 小电流接地系统; 单相接地故障; 行波故障定位

1. 引言

在我国电力系统中, 大多数中低压配电网中性点的工作方式均采用中性点非直接接地或中性点经消弧线圈接地, 这种系统又称为小电流接地系统。单相接地故障是小电流接地系统中最常见的故障, 发生单相接地时, 由于故障点电流很小, 而且三相之间的线

电压仍然保持对称, 因此一般允许继续运行 1 至 2 小时^[1]。但是此时没有发生故障的两相对地电压要升高 $\sqrt{3}$ 倍, 为了防止故障进一步扩大造成两点或多点接地, 给电力系统带来更大的损失, 运行人员应该快速、准确地对配电线路发生的单相故障进行诊断定位然后切除故障, 提高配电线路运行的可靠性。

2. 配电网单相接地故障定位方法原理分析

在配电网中每条母线上都有多条出线, 每条出线

*资助信息: 佳木斯市 2011 年度重点科研课题(11184); 黑龙江省大学生创新创业训练计划项目(2012sj012); 佳木斯大学科学技术指导项目(L2011-035)。

[#]通讯作者。

上又有很多分支线，所以当发生单相故障时，首先需要确定的是故障发生在哪条出线上，然后确定故障点所在的分支或者故障区段，最后在故障分支或者故障区段上确定故障点的具体位置。目前，单相故障定位的方法大致分为以下几类。

2.1. 故障测距法

(1) 阻抗法

阻抗法是依据故障线路的阻抗与故障距离成正比的原理，发生故障时，通过测量到的电流与电压值计算出故障回路的阻抗值，进而可以计算出故障点装置安装处的距离。这种方法的优点是投资少，但是应用的前提是输电线路为均匀线路，实际的线路不可能是完全均匀的线路，会受到线路负荷、电源波动及路径阻抗的影响，因此阻抗法的定位精度并不是很高。

(2) 行波法

依据行波理论的内容，一旦线路发生故障，就会产生向线路两侧传播的行波信号，我们可以利用在线路两侧捕捉到的暂态行波信号来完成故障的测距。行波法依据故障定位装置的数量又分为单端定位和双端定位。如图 1 为单端行波故障定位示意图，这种定位方式的原理是根据测量故障产生的行波在母线及故障点之间往返一趟的时间来计算故障距离^[2]。图中只在母线 M 侧单端装设故障定位装置，在 F 点处发生单相接地故障， M 处检测到故障初始行波脉冲的时间为 t_1 ，故障点反射回来的行波到达 M 侧的时间为 t_2 。设故障点到母线 M 的距离为 X_L ， v 为波速，则有：

$$X_L = 1/2v(t_2 - t_1) \quad (1)$$

双端定位法的原理是通过测量故障行波到达线路两侧的时间差来计算故障距离。如图 2 所示，在母线 M 及 N 两侧都装上故障定位装置，故障发生后初始行波波头到达母线 M 及 N 侧的时间分别为 t_M 和 t_N ， MN 线路全长为 L ，那么故障点 F 到 M 侧距离 X_M 和到 N 侧距离 X_N 可以计算为：

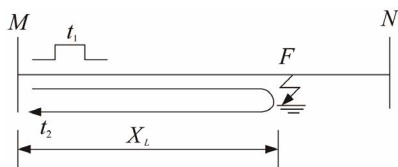


Figure 1. The diagram of single-port wavelet fault location
图 1. 单端行波故障定位示意图

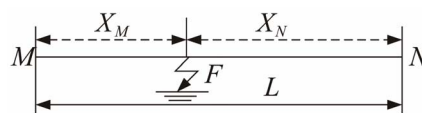


Figure 2. The diagram of double-port wavelet fault location
图 2. 双端行波故障定位示意图

$$\begin{cases} X_M = \frac{v(t_M - t_N) + L}{2} \\ X_N = \frac{v(t_N - t_M) + L}{2} \end{cases} \quad (2)$$

单端定位需要采用故障初期的暂态电气量，所以需要设置较高的采样率才能精确的捕捉到行波波头，这时，采样信号往往容易受到各种噪声的干扰。双端定位需要在线路两侧设置定位装置，还要有精准的同步时钟，同时还受到采样频率的限制，这种方式成本很高。

2.2. S 信号注入法

S 信号注入法的基本思想是在发生故障后通过闲置的三相电压互感器的中性点向接地线路注入特定频率的电流信号，为了不受到线路分布电容的影响，注入的电流信号的频率为 60 Hz，电流信号会沿着故障线路经过接地点注入大地，通过检测注入电流信号的特征和路径即可实现故障点的测距和定位^[3]。

S 号注入法不会对运行设备产生任何的不良影响，对注入的交流信号的检测也不受系统运行情况的影响，它是一种解决低压配电网单相接地故障定位问题的有效方法，定位准确，通用性好，接线简单，缺点是需要巡线，定位时间较长。

2.3. 户外故障点探测法

户外故障点探测法的基本思想是在线路的主要节点上加装故障探测器，根据故障点发生故障前后的电气量特征的不同来确定故障所在的区段。文献[4]中提出利用发生单相接地故障前后零序电流所产生的磁场大小来确定故障点的位置。由于零序电流的大小受到电网的分布电容大小及接地方式的影响，此方法的探测精度不高。文献[5]中根据故障点前向支路、后向支路和非故障支路的零序电流、零序电压的特点，提出通过测量和分析空间磁场和电场的 5 次谐波的幅值和相位关系来判断系统单相接地故障点。但 5

次谐波的幅值较小，不容易检测，这就需要通过提高检测装置的灵敏度和抗干扰能力，这种方法只适用于中性点非直接接地系统，不适用于中性点经消弧线圈接地系统。

3. 波速对单端行波故障定位法的影响

单端行波故障定位法以定位速度快，无需巡线，成本低，可以进行多次定位等优点，成为小电流接地系统中单相接地故障定位的有效方法之一。但在实际应用中其定位精度要受到多种因素的影响。由公式(1)和公式(2)可以看出，要找到故障点的位置，波速是个重要的参数，所以影响定位精度的一个重要因素就是行波波速的精度。而输电线路的行波波速是与线路的实际参数相关的，输电线路的具体参数又是随着系统的频率而变化的，因此要得到行波波速的精确计算值并不是很容易的。

依据行波理论中线路行波过程的特点，行波的传递速度是由线路的电容和电感决定的，可以将行波的波速表示为^[6]：

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3)$$

式中： L ——线路单位长度的电感；

C ——线路单位长度的电容。

在理想的真空条件下，我们可以认为行波的波速即是光速，这样就可以在不考虑各种损耗的基础上，用光速来代替行波波速进行故障定位。但是在实际应用中，线路的结构不可能完全相同，线路单位长度的对地分布电容和线路单位长度的电感都是不能完全相同的，所以在不同的线路结构中，波速是不相等的，即使在同一种结构的线路中，线路的具体参数也是在不同时刻有不同值，所以用一个接近光速的值来反映波速也是不准确的。

假设 Δt 是行波从一侧母线传输到另一侧母线所用的时间， L 为输电线路的全长，定位系统设定的行波波速是 $v_1 = 3 \times 10^8$ m/s，线路上实际的波速为 v ，那么波速的相对误差可以用公式 $e_v = \Delta v / v \times 100\%$ 来计算，绝对误差可以用 $\Delta x = |v - v_1|$ 来计算。

假设在单端定位法中， t_1 为测量端检测到的故障初始行波波头的时刻， t_2 为捕捉到的第一个反射波波头的时刻。当第一个反射波就是故障点的反射波时，

可以计算出发生单相故障的位置与测量端的距离为：

$$x_L = \frac{1}{2} v_1 (t_2 - t_1) \quad (4)$$

则存在相对误差：

$$e_x = \Delta v \times \frac{t_2 - t_1}{2L} \times 100\% \quad (5)$$

存在绝对误差：

$$\Delta x = \frac{1}{2} \Delta v (t_2 - t_1) \quad (6)$$

可以看出，单端行波定位法中，如果故障的位置一定，那么计算出的距离误差是与行波波速的误差成正比的。

4. 单端行波故障定位法的改进

如图 3 所示，当线路中 F 点发生单相接地故障后，就会产生向两侧母线传递的行波，根据行波理论，当行波遇到线路阻抗不连续时会产生折射和反射现象。利用故障初始行波与故障点反射行波之间时间差计算故障距离的公式为：

$$x = \frac{1}{2} v (t_1 - t_0) \quad (7)$$

式中： v ——行波波速

t_1 ——故障初始行波到达母线 M 侧的时刻

t_0 ——单相接地故障发生的绝对时刻

当故障点 F 距离母线 M 侧的长度大于线路 MN 全长的一半时，第二个到达母线 M 侧的行波就是对端母线 N 的反射波，如果此时利用这个波头进行计算，得到的结果将是故障点 F 到达对端母线 N 的距离。为此检测第二个波头就可以用小波分析的方法，如果检测的结果确实是母线 N 的反射波，就应该将这个波头去掉，采用第三个波头进行计算。而实际上，来自于对端母线的反射波也是含有故障点信息的，也可以用来进行故障定位，计算公式表示为：

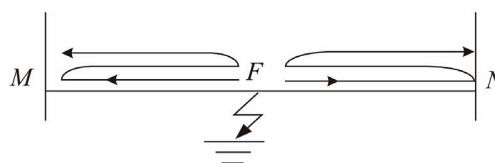


Figure 3. The fault point wave transmission
图 3. 故障点处行波的传输

$$x = L - \frac{v(t_3 - t_1)}{2} \quad (8)$$

式中: t_3 表示对端母线 N 反射行波到达母线 M 侧的时刻。

所以我们不能轻易丢掉对端母线反射回来的行波信息, 完全可以考虑将它引入到单端行波故障定位算法中来。

假设 x 为故障点 F 到达母线 M 侧的距离, L 为线路 MN 的全长, 速度 v 为在发生单相接地故障开始的很短一段时间内行波的波速, v 是一个未知数, 假设全线路的悬垂系数是相同的, t_0 为单相接地故障发生的绝对时刻, t_1 为故障初始行波到达母线 M 侧的时刻, t_2 为故障点反射行波到达母线 M 侧的时刻, t_3 为对端母线 N 反射行波到达母线 M 侧的时刻, 根据行波理论可以得到方程组:

$$\begin{cases} v(t_1 - t_0) = x \\ v(t_2 - t_0) = 3x \\ v(t_3 - t_0) = 2L - x \end{cases} \quad (9)$$

在以上方程组中, 时间 t_1 、 t_2 、 t_3 可以通过检测装置, 经小波变换的方法来确定, 线路 MN 的长度 L 也是已知量, 则方程组中共有 t_0 、 v 和 x 三个未知量, 可以求出唯一解。将方程组中前两个式子进行比较可以得到:

$$\frac{t_1 - t_0}{t_2 - t_0} = \frac{1}{3} \quad (10)$$

所以可以求出:

$$t_0 = \frac{3t_1 - t_2}{2} \quad (11)$$

将方程组中后两个式子进行比较可得:

$$\frac{t_2 - t_0}{t_3 - t_0} = \frac{3x}{2L - x} \quad (12)$$

将式(11)代入(12)可得:

$$\frac{t_2 - \frac{3t_1 - t_2}{2}}{t_3 - \frac{3t_1 - t_2}{2}} = \frac{3x}{2L - x} \quad (13)$$

最后可得:

$$x = \frac{(t_2 - t_1)L}{t_3 - 2t_1 + t_2} \quad (14)$$

从式(14)中可以看出, 故障点距离母线 M 侧的距

离表达式中不含行波波速 v , 所以波速的精度不会影响故障定位的精度, 实现不受波速影响的单端行波故障定位。

5. 单端行波故障定位新算法的验证

通常信号的突变点都是非平稳信号, 其中含有非常丰富的故障信息, 它们反映了故障引起的撞击、振荡和结构的变形与断裂、转速的突变摩擦等, 所以突变信号比稳定信号更应引起重视。提取有用的行波信号是实现行波故障定位的关键, 因此, 在进行检测奇异点之前必须去除噪声的影响, 避免故障信号完全淹没在噪声信号中。常用的去噪方法有小波变换和数学形态学方法。

5.1. 基于小波变换的去噪方法

一个含有噪声的一维信号的模型可以表示为^[7]:

$$s(i) = f(i) + e(i) \quad (15)$$

式中, $f(i)$ 为真实信号; $e(i)$ 为噪声; $s(i)$ 为含噪声的信号。

假设函数 $\varphi(x)$ 满足:

$$\int_R \varphi(x) dx = 0 \quad (16)$$

则称 $\varphi(x)$ 为母小波或基本小波。令 $\varphi_s(x)$ 表示 $\varphi(x)$ 对尺度 s 的伸缩 $\varphi_s(x) = \frac{1}{s} \varphi\left(\frac{x}{s}\right)$ 任意信号

$f(x) \in L^2(R)$ 的连续小波变换 $wf(s, x)$ 可以表示为:

$$wf(s, x) = w\varphi(x) \quad (17)$$

设该小波函数在尺度 s 下, 在 x_0 的某一邻域对一切 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。这样可以把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。

5.2. 小波变换模极大值与奇异点关系

小波的奇异性检测能确定奇异点发生的时刻, 即

找出突变点的位置,因此小波奇异性检测可用于准确的提取波头。

一个突变的信号在其突变点必然是奇异的。检测和识别信号的突变点并用 lipischitz α 来刻画它就是信号的奇异性检测理论。奇异性指数 lipischitz α 定义如下^[8]:

设 $0 \leq \alpha \leq 1$, 若存在常数 K , 使得在点 t_0 的邻域有下式成立:

$$|f(t) - f(t_0)| \leq K |t - t_0|^\alpha \quad (18)$$

则称函数 $f(t)$ 在点 t_0 的奇异性指数是 α 。如果 $\alpha = 1$, 则函数 $f(t)$ 在 t_0 是可微的, 称函数 $f(t)$ 没有奇异性; 如果 $\alpha = 0$, 则函数 $f(t)$ 在 t_0 间断。 α 越大, 说明奇异函数 $f(t)$ 越不奇异; α 越小, 说明奇异函数 $f(t)$ 在 t_0 点变化越尖锐。函数(或信号)的奇异性可用 lipischitz α 来刻画, 其数值可通过小波变换模极大值在不同尺度的数值计算出来。

函数 $f(x) \in L^2(R)$ 与它的小波变换满足如下关系:

$$|w_s f(t)| \leq K |2^j|^\alpha \quad (19)$$

当 S 取为 2^j 且 $w_{2^j} f(t_0)$ 是小波变换模极大值时, 可得:

$$|w_{2^j} f(t_0)| \leq K |2^j|^\alpha \quad (20)$$

从而 lipischitz α 可由下式计算:

$$\alpha = \log_2 \frac{w_2^{M+1} f(t_0)}{w_2^M f(t_0)} \quad M \in Z \quad (21)$$

因此, 若要检测一个信号 $f(t)$ 的奇异点, 只需对该信号进行小波变换, 找出变换后的模极大值点, 则该点即为信号的一个突变点。信号的奇异性检测理论给出了具有突变性质的信号在何时发生突变以及变化剧烈程度的数学描述, 可以用小波变换的模极大值来表示。特别地, 对于噪声信号, 它的模极大值随着尺度的增大而减小; 对于阶跃信号, 小波变换模极大值不随尺度变化而变化; 对于一般信号, 其模极大值随着尺度的增大而增大。

5.3. 基于数学形态学的去噪方法

数学形态学以腐蚀和膨胀两种基本运算为基础,

定义了开运算、闭运算以及形态梯度等概念。利用结构元素 $g(x)$ 对信号 $f(x)$ 的膨胀、腐蚀、开运算、闭运算分别定义为^[9]:

$$\begin{aligned} (f \oplus g)(x) &= \max\{f(x-y) + g(y)\} \\ (f \ominus g)(x) &= \min\{f(x+y) - g(y)\} \\ f(\circ g)(x) &= [(f \ominus g \oplus g)](x) \\ (f \odot g)(x) &= [(f \oplus g) \ominus g](x) \end{aligned} \quad (22)$$

采用形态算子及其组合可构成数学形态滤波器, 对信号进行处理往往采用形态开、闭的级联形式, 定义对信号的开 - 闭和闭 - 开运算分别为:

$$\begin{aligned} oc(f(x)) &= f(\circ g \bullet g)(x) \\ oc(f(x)) &= f(\bullet g \circ g)(x) \end{aligned} \quad (23)$$

虽然形态开 - 闭和闭 - 开滤波器可同时滤除信号中的正、负脉冲噪声, 但由于开运算的扩展性和闭运算的反扩展性, 它们均存在统计偏移现象, 此时开 - 闭滤波器输出幅度偏小, 而闭 - 开滤波器的输出幅度偏大, 在很多情况下, 单独使用它们并不能取得最好的滤波效果。因此可以采用形态开 - 闭和闭 - 开滤波器的平均组合形式构造一个数学形态学滤波器。滤波器输出即为:

$$y(x) = [oc(f(x)) + co(f(x))]/2 \quad (24)$$

5.4. 形态 - 小波消噪算法的引入

一般在现场采集到的行波信号既有白噪声, 又有脉冲噪声的干扰, 虽然小波变换能敏感的检测到奇异点的同时还能有效的去除白噪声, 但是它对脉冲噪声去除效果较差; 形态学滤波器在保留原信号的全局和局部特征的同时能有效地滤除脉冲噪声的影响^[10]。因此, 可以考虑到把小波变换和数学形态学各自的优点结合到一起, 得到一种形态 - 小波定位算法用于电力系统故障定位。这种算法主要用于解决暂态行波在滤除白噪声和脉冲噪声时遇到的困难, 利用数学形态学原理设计的滤波器在有效抑制各种噪声的同时, 较好地保留了行波波头的故障特征。小波变换算法则可有有效的检测出故障行波波头并进行精确定位, 从而为各种行波故障定位及分析提供了可靠的判据。

在仿真软件上建立仿真模型, 在故障母线电流行波上模拟脉冲噪声和白噪声干扰, 图 4 是对叠加了正、

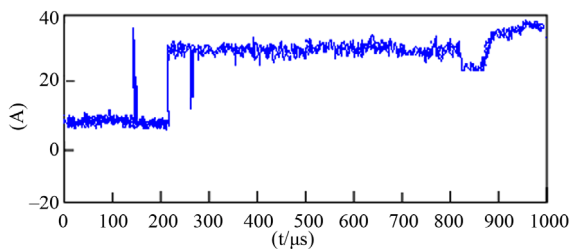


Figure 4. The wavelet with random noise
图 4. 含综合噪声的行波

负脉冲信号后的 α 模量电流行波信号叠加白噪声，模仿电流信号受综合噪声干扰的情况。图 5 所示为用形态 - 小波方法对综合噪声进行消噪后的效果。

对比图 4 和图 5 可以看出，使用形态 - 小波消噪算法后不仅能够完全滤除尖脉冲的影响，在滤除白噪声方面也能较好的保持原信号形状，较单纯的形态学和小波变换消噪，行波波头更平滑，这能准确的反映输电线路故障电流行波信号的突变时刻，能更准确地检测到行波波头。

5.5. 不受波速影响的单端行波故障定位方法的仿真验证

影响行波故障定位精度的因素中最主要的是波速，提出一种不受波速影响的单端行波故障定位方法，并在理论上验证了该方法的准确性。针对这一新方法，利用 MATLAB/SimPower 工具箱对发生单相接地时故障电流的特性进行仿真分析，进而观察使用该方法进行故障定位的可靠性和精确性。

假设线路 a 距离母线 M 端 7.5 km 处在 0.025 s 时发生了 A 相单相接地故障，接地电阻为 10 Ω ，截取 0.025 s 到 0.026 s 之间 1000 μs 的 α 模量电流行波信号进行分析，并且将观测零点移至 0.025 s。图 6、图 7 显示了发生单相故障时母线 M 侧 α 模量电流行波小波变换情况。

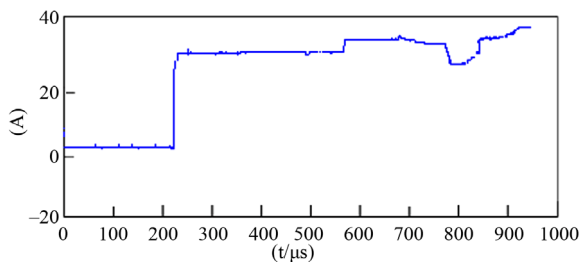


Figure 5. Morphological wavelet denoising effect
图 5. 形态 - 小波消噪效果

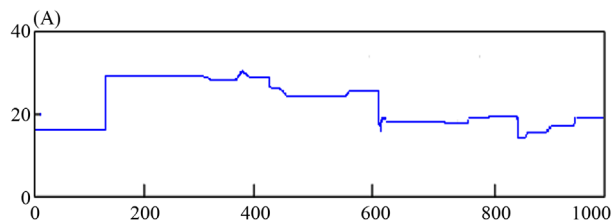


Figure 6. Fault current α modulus
图 6. 故障电流 α 模量

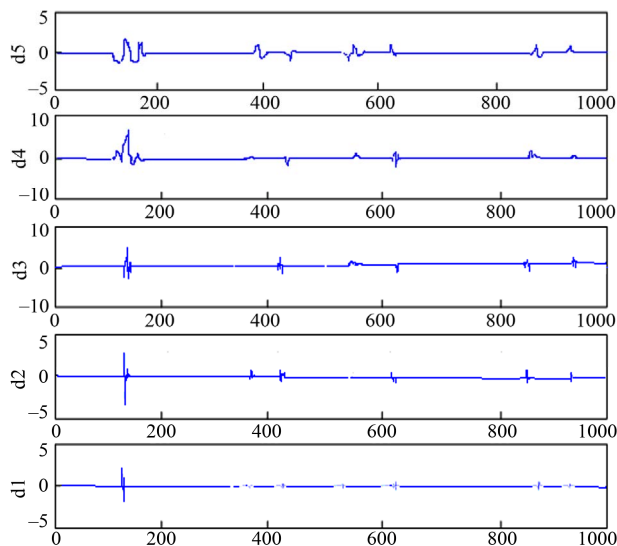


Figure 7. α modulus and its wavelet transform
图 7. α 模量及其小波变换

从图 7 中可以清楚地看出，行波经过小波变换后，清晰地出现了模极大值。根据电流行波在各点的反射情况，故障初始行波与故障点反射波极性相同，而与对端母线反射波极性相反，由此可知第二个小波变换模极大值反映的是故障点反射波，第三个小波变换模极大值反映的是对端母线的反射波，即 $t_1 = 171 \mu\text{s}$ ， $t_2 = 392 \mu\text{s}$ ， $t_3 = 434 \mu\text{s}$ ，由公式计算得出 $x = 7.167 \text{ km}$ ，可见此方法能够比较准确地确定故障距离。

为了更好的验证本算法的正确性，将传统方法与对该模型在不同故障时刻(故障时刻电压相角)、不同故障距离、不同过渡阻抗情况下经修正后得到的故障定位结果进行对比，得到的数据如表 1、表 2 和表 3 所示。

目前应用的行波故障定位方法，行波传输的距离都是按照两杆塔距离来计算的。但是由于线路自重的存在，线路的实际长度是大于杆塔距离的，所以测量母线之间的距离和实际所得到的故障地点是有差异。

单端法其误差为：

Table 1. The results of different fault times ranging
表 1. 不同故障时刻的定位结果

实际故障距离(km)	故障相角(°)	修正后距离(km)	新方法定位绝对误差(km)	传统方法定位结果(km)	传统定位绝对误差(km)
7.5	0	8.12	-0.62	8.24	-0.74
	5	7.97	-0.47	7.01	0.49
	60	7.167	0.333	7.11	0.39
	90	7.391	0.109	7.62	-0.12
10	0	10.48	-0.48	10.52	-0.52
	5	9.702	0.298	10.33	-0.33
	60	10.34	-0.34	10.38	-0.38
	90	9.89	0.11	10.13	-0.13

Table 2. Ranging results of different transition impedance
表 2. 不同过渡阻抗的定位结果

实际故障距离(km)	过渡阻抗 Ω	修正后距离(km)	新方法定位绝对误差(km)	传统方法定位结果(km)	传统定位绝对误差(km)
7.5	20	7.291	0.209	7.258	0.242
	50	7.274	0.226	7.251	0.249
	100	7.169	0.331	7.8	0.352
10	20	10.273	-0.273	10.282	-0.282
	50	9.625	0.375	10.383	-0.383
	100	9.611	0.389	9.59	0.41
	20	7.291	0.209	7.258	0.242
	50	7.274	0.226	7.251	0.249

Table 3. Different distance to fault location results
表 3. 不同故障距离的定位结果

实际故障距离(km)	修正后距离(km)	新方法定位绝对误差(km)	传统方法定位结果(km)	传统定位绝对误差(km)
2	1.872	0.128	1.847	0.153
6	5.813	0.187	5.781	0.219
7.5	7.305	0.195	7.730	-0.230
10	10.207	-0.207	9.726	0.274
12	12.292	-0.292	11.669	0.331
13.5	12.145	0.355	13.148	0.352

$$\varepsilon = k_{xc} \frac{v(t_2 - t_1)}{2} \quad (25)$$

式中, 定义 $k_{xc} = \frac{L_x - L_{gt}}{L_x}$ 为悬垂系数, L_x 为两杆塔间导线的长度, L_{gt} 为两杆塔间的直线距离。

对于故障定位来说当悬垂系数为 5%, 线路长度为 100 km 的线路时, 误差最大能达到 5 km, 如综合考虑波速和悬垂系数的影响, 误差可能进一步加大导致定位失败。如果按照悬垂系数 k_{xc} 对依据式(14)得到的结果进行修正, 可以得到下式:

$$x_{sj} = (1 - k_{xc})x \quad (26)$$

式中, X_{sj} 为实际的故障距离。

从表 1、表 2 和表 3 中的数据可以看出, 只有在表 1 中, 故障时电压在过零点附近时, 定位结果的误差较大。原因是在电压过零点附近, 故障点产生的行波信号在到达测量点时基本衰减完, 测量到的行波信号很微弱, 因而对应的小波变换模极大值非常小, 再加上各种噪声的干扰, 不容易识别第一个行波波头, 导致定位失败。但是, 大量研究表明, 单相接地故障发生在初始电压相位角为 10° 以下的几率非常低, 当角度大于 10° 时, 电压行波幅值将达到额定电压的 17%, 可以进行正确检测^[11]。事实上, 由于瞬时电压

幅值很小时不容易出现绝缘击穿，现场的故障大多是发生在电压相角较大的情况下的，即便由于人为破坏，在电压相角很小时发生故障，还可以借助线路跳闸时产生的行波进行定位。采用不受波速影响的单端行波故障定位方法，在大多数情况下，均可以较准确的找到故障位置，定位精度较高，满足电力系统保护的需要。而传统单端行波定位方法采取的是预先假设的波速，即 $v = 3 \times 10^8$ m/s，得到的结果与真实故障距离存在着较大的误差，仿真结果表明不受波速影响的单端行波故障定位方法比传统单端定位方法更具有优越性。

6. 结论

在小电流接地系统单相接地故障定位的众多方法中，行波定位法最为简单实用，而其中又以单端行波定位法定位速度快，无需巡线，成本低，并且可以进行多次定位。但是这种方法由于受到行波波速等因素的影响，从而影响最终的定位精度。文中通过将相对端母线反射波中含有的故障信息引入到原来的单端行波故障定位算法中，得到一种不受波速影响的单端

行波故障定位算法，通过理论公式推导表明，这种方法正确可靠，仿真分析结果也表明，这种定位方法的精度优于传统的单端定位方法。

参考文献 (References)

- [1] 譙坤. 小电流接地系统单相接地故障判断和处理[J]. 农村电气化, 2005, 5: 5-6.
- [2] 戚宇林, 成艳, 杨以涵. 35kV 配电网单相接地故障综合定位方法[J]. 电网技术, 2008, 32(10): 38-42.
- [3] 董凯达. 小电流接地系统单相接地故障测距方法的研究[D]. 天津大学, 2007.
- [4] J. Gjermsted. 省时省钱的架空配电线故障指示器[J]. 电力情报, 1990, 2: 80-87.
- [5] 李孟秋, 王耀南, 王辉等. 小电流接地系统单相接地故障点探测方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 6-9.
- [6] 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): 29-33.
- [7] 孙延奎. 小波分析及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 219-244.
- [8] 马丹丹. 基于小波模极大值的单端行波故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(3): 55-59.
- [9] 蔡秀雯, 杨以涵等. 小波变换和数学形态学在行波故障定位消噪中的应用[J]. 电气应用, 2007, 26(6): 30-33.
- [10] 尹文琴. 数学形态学在电力系统中的应用综述[J]. 继电器, 2007, 35(19): 76-81.
- [11] 章惠团, 蔡自兴. 基于数学形态学的突发性故障快速定位方法[J]. 计算机测量与控制, 2006, 14(1): 9-11.