

一种输电线路故障测距的精细积分新算法

彭正伟, 赵进全, 田正雄, 周先

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对以往精细积分算法在计算暂态信号时误差较大、迭代结果容易发散的问题, 通过使用一种新的差分格式对算法进行了改进, 提高了算法的稳定性, 增强了其对暂态信号的分析能力, 并通过构造测距函数实现了基于暂态信号的输电线路故障定位. 为使测距算法适用于双端数据异步的情况, 利用故障前信号, 提出了一种确定双端录波数据不同步时差和修正线路长度的算法, 将其应用于三相输电线路的故障测距之中. 算例仿真结果显示, 采用该算法, 故障定位精度绝对误差不超过 0.6 km, 最大相对误差为 0.25%, 且测距结果不受故障过渡电阻的影响, 证明了算法的有效性.

关键词: 精细积分法; 故障测距; 双端异步

中图分类号: TM77 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)12-0061-05

Fault Location Algorithm Based on Improved Precise Integration

PENG Zhengwei, ZHAO Jinquan, TIAN Zhengxiong, ZHOU Xian

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming the traditional precise integration method with big error in calculating transient signal and dissipated iteration, a new difference scheme improving the stability of algorithm and enhancing the analysis ability to the transient signal is proposed to achieve transmission line fault location based on transient signals by constructing a distance function. To apply the scheme to the double-side asynchronous data, an algorithm is adopted to calculate the two-terminal asynchronous time difference and length of transmission line based on the pre-fault recorded signal, and to calculate the fault location for three-phase transmission line. The simulation results show that the higher measurement accuracy without affecting by the fault transition resistance is achieved, the absolute error for fault location gets lower than 0.6 km, and the relative error is only 0.25%.

Keywords: precise integration method; fault location; two-terminal unsynchronized data

输电线路故障测距法主要分为行波法和故障分析法^[1-3]. 行波法具有响应速度快、定位精度高的特点, 但需要专门的行波提取装置, 成本高, 技术复杂. 故障分析法大多基于双端录波数据, 具有技术简单、易于实现的优点. 现有故障分析算法大多基于工频量, 需要较长的录波数据和较好的滤波算法, 而基于故障暂态量的故障分析法不需要这些, 实用性更强.

精细积分法是一种有效的暂态分析计算方法, 具有算法稳定、结构简单且计算过程中空间步长与时间步长相互独立等特点, 因此很适合耦合传输线

的瞬态分析^[4]. 在以往的研究中, 通常是将电报方程在时域内直接差分离散, 然后采用数值积分对方程进行求解. 这种算法过程简单, 计算方便, 但由于忽略了离散过程中产生的截断误差, 所以当信号的采样频率较低时会产生很大的计算误差, 甚至会在迭代计算过程中计算发散, 无法准确获取线路暂态过程. 为了提高算法对线路暂态过程的分析能力, 增强算法的稳定性, 本文对原有的精细积分法进行了改进, 提出了新的分析算法, 并利用故障前的冗余信息, 提出了适用于双端异步且具有线路长度自校准

的三相线路故障测距新算法.

1 双端同步暂态信号的故障定位原理

1.1 双端同步信号的故障点定位

如图1所示的故障线路,利用双端同步录波数据,基于分布参数电报方程,分别使用 m 端和 n 端记录的电压、电流值,可以确定出线路 mf 段和 nf 段上任一点在该时刻的电压 $U_{mf}(x,t)$ 和 $U_{nf}(x,t)$. 在故障点 f 处,有

$$U_{mf}(x,t) = U_{nf}(x,t) \quad (1)$$

令

$$E(x) = \sum_{t=t_1}^{t_2} |U_{mf}(x,t) - U_{nf}(x,t)| \quad (2)$$

则 $E(x)$ 在故障点 f 处具有最小值,因而只要确定输电线上的沿线电压分布,就可利用该最小值点的位置得到故障点的距离 x 值.

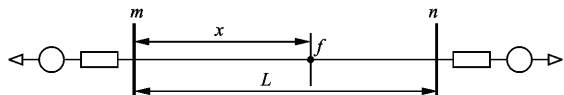


图1 故障线路示意图

1.2 改进精细积分法的输电线路暂态信号

三相输电线路系统的电报方程为

$$-\frac{\partial U(x,t)}{\partial x} = R(x)I(x,t) + L(x) \frac{\partial I(x,t)}{\partial t} \quad (3)$$

$$-\frac{\partial I(x,t)}{\partial x} = G(x)U(x,t) + C(x) \frac{\partial U(x,t)}{\partial t} \quad (4)$$

$$U(x,t) = [u_a(x,t), u_b(x,t), u_c(x,t)]^T$$

$$I(x,t) = [i_a(x,t), i_b(x,t), i_c(x,t)]^T$$

$R(x)$ 、 $L(x)$ 、 $G(x)$ 、 $C(x)$ 为 3×3 的三相输电线路单位长度电阻、电感、电导和电容矩阵.

对式(3)、式(4)在时域内双向差分离散,再经过外推,得

$$\frac{\partial U_k}{\partial x} = -L \frac{8I_{k+1} - 8I_{k-1} - I_{k+2} + I_{k-2}}{12\Delta t} - RI_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial I_k}{\partial x} = -C \frac{8U_{k+1} - 8U_{k-1} - U_{k+2} + U_{k-2}}{12\Delta t} - GU_k \quad (6)$$

式中: $\Delta t = t/M$; $U_k = U(x, k\Delta t)$; $I_k = I(x, k\Delta t)$, $k = 0, 1, 2, \dots$. 将式(5)、式(6)改写为矩阵形式

$$dX/dx = HX + F \quad (7)$$

其中

$$H = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & -R & -\frac{L}{\Delta t} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \frac{L}{2\Delta t} & -R & -\frac{L}{2\Delta t} & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & -\frac{L}{12\Delta t} & \frac{2L}{3\Delta t} & -R & -\frac{2L}{3\Delta t} & \frac{L}{12\Delta t} \\ & & & 0 & & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ & & & \vdots & & \frac{L}{2\Delta t} & -R & -\frac{L}{2\Delta t} \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & \frac{L}{\Delta t} & -R \\ -G & -\frac{C}{\Delta t} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{C}{2\Delta t} & -G & -\frac{C}{2\Delta t} & & \vdots & & & \vdots \\ -\frac{C}{12\Delta t} & \frac{2C}{3\Delta t} & -G & -\frac{2C}{3\Delta t} & \frac{C}{12\Delta t} & & & \vdots \\ 0 & & \ddots & \ddots & \ddots & 0 & & \\ \vdots & & \frac{C}{2\Delta t} & -G & -\frac{C}{2\Delta t} & & & \\ 0 & \dots & 0 & \frac{C}{\Delta t} & -G & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= (U_1, \dots, U_M, I_1, \dots, I_M)^T \\ \mathbf{F}_j &= \\ &\left(\frac{\mathbf{L} \cdot I_{0j}}{\Delta t}, 0, \dots, 0, -\frac{\mathbf{L} \cdot I_{0j}}{\Delta t}, \frac{\mathbf{C} \cdot U_{0j}}{\Delta t}, 0, \dots, 0, -\frac{\mathbf{C} \cdot U_{0j}}{\Delta t} \right)^T \\ &j = 0, 1, 2, \dots \end{aligned}$$

对式(7)采用龙格-库塔法求解^[4],便可得到三相输电线路上的电压、电流分布。

由于使用精细积分法求解电报方程时,需要采用差分近似对时间的导数,从而产生截断误差。同时,因为采用迭代算法,每次计算都将前一次的计算结果作为初值,对其进行差分 and 数值积分运算,因而计算误差会随迭代次数而呈指数累增,即

$$\bar{\epsilon}_{\text{sum}} \approx (1 + \bar{\epsilon})^k \tag{8}$$

式中: $\bar{\epsilon}$ 表示总的误差; $\bar{\epsilon}$ 表示单次的计算误差; k 表示迭代次数。

通过泰勒展开可以推知式(5)产生的截断误差为 $\left(\frac{\Delta t^4}{30}\right) \mathbf{I}^{(5)}(\xi)$,对于式(6)同理。以往文献采用的单向差分近似微分算法的截断误差为 $\frac{1}{2} f''(\xi) \Delta t$ 。为了说明这两种误差对计算结果的影响,本文采用一个工频量和高次谐波分量的混叠信号来近似故障暂态信号(故障暂态信号可以看作是工频量和多个高次谐波分量的混叠信号),通过推导来验证两种误差结果对计算结果的影响。

一个简化的暂态信号模型如下

$$f(t) = A \sin(\omega t + \varphi_1) + B \sin(n\omega t + \varphi_2) \tag{9}$$

单向差分产生的截断相对误差为

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{0.5 f''(\xi) \Delta t}{f'(\xi)} = \\ &= \frac{A \omega^2 \Delta t \sin(\omega \xi + \varphi_1) + B n^2 \omega^2 \Delta t \sin(n\omega \xi + \varphi_2)}{2(A \omega \cos(\omega \xi + \varphi_1) + B n \omega \cos(n\omega \xi + \varphi_2))} \end{aligned} \tag{10}$$

当高次谐波能量较高,即 $Bn \geq A$ 时,则有

$$\frac{\omega \Delta t}{4} \tan(n\omega \xi + \varphi_2) \leq |\epsilon_1| \leq \frac{\omega \Delta t}{2} \tan(n\omega \xi + \varphi_2) \tag{11}$$

如果不考虑正切函数的影响,只看总体性的相对误差,则

$$(\pi/2) (f_n/f_s) \leq \bar{\epsilon}_1 \leq \pi f_n/f_s \tag{12}$$

式中: f_n 为高次谐波频率; f_s 为信号采样频率。同理,本文采用的改进格式总体相对误差满足

$$\frac{\pi}{30} \left(\frac{f_n}{f_s}\right)^4 \leq \bar{\epsilon}_2 \leq \frac{\pi}{15} \left(\frac{f_n}{f_s}\right)^4 \tag{13}$$

当暂态信号中部分高次谐波能量较高时,若信

号采样频率相对于高次谐波频率不是很高,则采用单向差分的经典算法时,计算结果将随着迭代次数的增加而发散,甚至会完全失序。本文采用的改进算法大幅减小了近似过程中的计算误差,在迭代次数有限时,可以有效地对暂态信号进行跟踪,提高了对暂态过程的捕捉能力。

下面,通过一个算例予以说明。图 2 所示电路为采用电磁暂态程序 EMTP-ATP 建立的 500 kV 交流输电模型。线路参数^[5] $R_1 = 0.020\ 8\ \Omega/\text{km}$, $R_0 = 0.114\ 8\ \Omega/\text{km}$, $L_1 = 0.898\ 4 \times 10^{-3}\ \text{H}/\text{km}$, $L_0 = 0.288\ 6 \times 10^{-3}\ \text{H}/\text{km}$, $C_1 = 0.012\ 9 \times 10^{-6}\ \text{F}/\text{km}$, $C_0 = 0.005\ 2 \times 10^{-6}\ \text{F}/\text{km}$ 。故障点位于距 m 端 100 km 处。

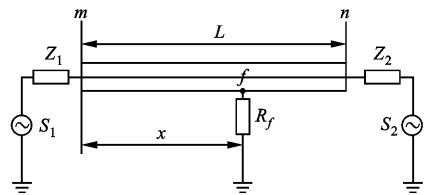
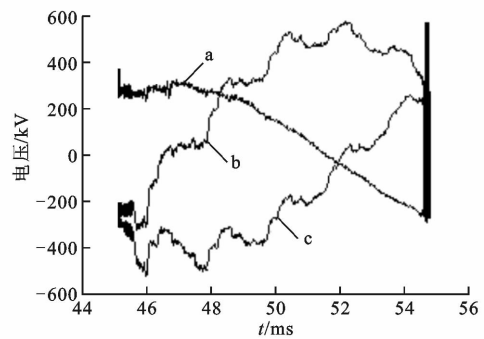
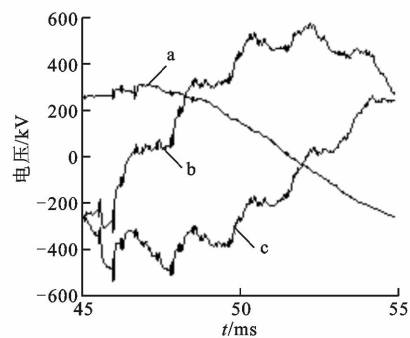


图 2 三相输电线路接地短路故障

应用 m 端记录的数据计算故障后的故障点电压波形,结果如图 3 所示。



(a)改进算法的计算结果



(b)故障点的仿真波形

图 3 应用改进算法对故障暂态信号的计算结果

由图 3 可见,改进算法计算出的电压暂态波形与实际仿真结果十分接近,同时迭代结果不会因为暂态信号频谱变化而产生发散,算法的稳定性较高.

2 双端异步数据的转化及线长校准

在实际电力系统中,由于电压、电流传感器的迟滞效应等因素,双端录波器的录波数据一般是不同步的,因此双端异步数据的测距算法比同步数据算法具有更大的实用性.同时,在温度、地形、自重等多因数影响下,实际的线路长度与理论长度之间有一定的差距,因此准确获取输电线路的实际长度可以有效地减小测距误差.为了使算法在数据不同步的情况下,依然能够准确定位故障点,需要在故障定位前将双端异步数据转化为准同步数据,并对线路长度进行校正,然后应用同步数据算法对异步数据的线路故障进行准确定位.

输电线故障暂态信号可用以下模型来描述^[6]

$$f(t) = \begin{cases} A_g \cos(\omega_1 t + \phi_g), & t < t_0 \\ A_0 e^{\frac{t-t_0}{\tau}} + \sum_{k=1}^n A_k \cos[k\omega_1(t-t_0) + \phi_k], & t \geq t_0 \end{cases}$$

(14)

由式(14)可以看出,故障前是稳态工频信号,故障后的信号主要由衰减直流分量和高次谐波组成.根据行波理论,信号在输电线上传输的幅值衰减和线路长度参数有关,而相位变化则包含着信号的时间信息.因此,利用故障前录波器记录的冗余数据,通过双端信号幅值、相位间的关系便可确定不同步角和线路长度.

设双端数据的不同步时差为 $\Delta\tau$,则故障前,两端的工频电压、电流满足关系

$$\dot{U}_n e^{j\omega\Delta\tau} = \frac{\dot{U}_m + \dot{I}_m Z_c}{2} e^{\gamma L} + \frac{\dot{U}_m - \dot{I}_m Z_c}{2} e^{-\gamma L} \quad (15)$$

$$\dot{U}_m e^{-j\omega\Delta\tau} = \frac{\dot{U}_n + \dot{I}_n Z_c}{2} e^{-\gamma L} + \frac{\dot{U}_n - \dot{I}_n Z_c}{2} e^{\gamma L} \quad (16)$$

式中: $\gamma=(ZY)^{1/2}$ 是传输线上电压、电流行波的传播常数; $Z_c=(Z/r)^{1/2}$ 为传输线的特性阻抗; $\dot{U}_m$ 、 $\dot{I}_m$ 、 $\dot{U}_n$ 、 $\dot{I}_n$ 分别为 m 端和 n 端的电压、电流工频相量.可见,利用故障前的录波数据,求解式(15)、式(16),就可确定双端数据间的不同步时差 $\Delta\tau$ 和线路全长 L .

为了简化复指数方程的求解,本文通过使用精细积分法,构造出新的求解算法.该算法不要求解方程,只需分别使用双端数据计算对端的电压分布,并结合计算值与实际值的幅值和相位的对应关系,

便可依次确定线长和不同步时差,具体方法如下.

如图 1 所示的故障线路,应用故障前的双端录波数据进行如下计算.

首先,将 m 端固定,对 n 端数据采用精细积分法,迭代求出在 m 端附近一段线路上的一个周期长度的电压电流组 $[U'_{mk}, I'_{mk}]$,并与 $[U_m, I_m]$ 作差,确定出最小点对应的线路长度 L_{mm} .其次,为了消除方法误差,将迭代计算的方向取反,即将 n 端固定,用 m 段数据,采用同样的方法计算出线路长度 L_{nn} .然后对两次计算得到的结果取均值,可得

$$L = (L_{mm} + L_{nn})/2 \quad (17)$$

最后,利用上步得到的线长 L ,应用 m 端数据计算出 n 端的电压、电流 U'_n 、 I'_n ,通过傅里叶变换分别提取 U'_n 、 I'_n 和 U_n 、 I_n 的相位作差,即可求得不同步时差 $\Delta\tau$.

3 计算实例

对于图 2 所示 500 kV 的交流输电线路,设录波数据的采样频率为 10 kHz,双端不同时差分别设为 500 μ s、1 000 μ s、2 000 μ s,实际线路全长分别为 L_1 (200.000 km)、 L_2 (301.315 km)、 L_3 (404.033 km).利用故障前的录波数据,计算得到线长 (L'_1 、 L'_2 、 L'_3) 和不同步时差 ($\Delta\tau'$) 的计算结果,如表 1 所示.

表 1 双端异步的线路全长和不同步时差的计算结果

$\Delta\tau/\mu\text{s}$	$L_1=200.000\text{ km}$		$L_2=301.315\text{ km}$		$L_3=404.033\text{ km}$	
	$\Delta\tau'/\mu\text{s}$	L'_1/km	$\Delta\tau'/\mu\text{s}$	L'_2/km	$\Delta\tau'/\mu\text{s}$	L'_3/km
500	490	199.96	490	301.26	490	404.01
1 000	1 010	199.96	1 010	301.25	1 010	404.01
2 000	1 990	199.95	1 980	301.25	1 980	404.01

由表 1 知,对故障前录波数据进行处理后,本文的算法可以准确获取双端数据的不同步时差和线路的实际长度,计算结果的最大时间误差只有 20 μ s,而对线路长度的最大计算误差也只有 0.050 km,显示出算法具有较高的精度.

利用表 1 的计算结果,将双端异步数据转化为准同步数据,并使用校正线长替代理论线长,然后进行同步数据下的故障定位.为节省篇幅,下面仅以不同步时差为 1 000 μ s、线路长度为 200 km 为例,验证算法对各种故障的定位效果.

对表 1 中不同步时差为 1 000 μ s 时的计算结果

使用双端数据进行同步校正,然后截取故障后 2~12 ms 间的录波数据.为了提高定位精度,对截取后的数据进行 10 倍的三次样条插值,然后使用同步算法进行定位,结果如表 2 所示.

表 2 故障点距 m 端不同距离时几种故障的定位结果

x/km	单相接地			两相接地			三相接地			相间短路		
	x'/km	$\epsilon/\%$		x'/km	$\epsilon/\%$		x'/km	$\epsilon/\%$		x'/km	$\epsilon/\%$	
10	10.4	0.20		10.4	0.20		10.4	0.20		10.5	0.25	
60	59.7	0.15		59.7	0.15		59.7	0.15		59.6	0.20	
100	100.3	0.15		100.3	0.15		100.3	0.15		100.4	0.20	
160	160.4	0.20		160.4	0.20		160.4	0.20		160.4	0.20	

注:表中 x' 为计算的故障距离, ϵ 为相对误差.

由表 2 可知,本文的定位精度绝对误差不超过 0.6 km,最大相对误差为 0.25%.与文献[5]采用的基于工频相量的传统测距算法相比(文献[5]的最小相对误差为 0.392%),本文方法显示出了较高的测距精度.

为验证算法对故障点过渡电阻的抗性,以上例中的单相接地故障为例,设置故障点过渡电阻分别为 10、50 和 100 Ω 进行仿真测试,结果见表 3.

表 3 不同过渡电阻时的测距误差值

x/km	$R_f=10\ \Omega$			$R_f=50\ \Omega$			$R_f=100\ \Omega$		
	x'/km	$\epsilon/\%$		x'/km	$\epsilon/\%$		x'/km	$\epsilon/\%$	
10	10.3	0.15		10.4	0.20		10.4	0.20	
60	60.1	0.05		59.7	0.15		60.2	0.10	
100	100.1	0.05		100.3	0.15		100.3	0.15	
160	160.2	0.10		160.4	0.20		160.4	0.20	

仿真结果显示,本文算法对故障点过渡电阻具有较高的抗性,定位结果基本上不受故障点过渡电阻的影响.

4 结 论

通过对精细积分法的改进,改善了原有算法在计算暂态信号时迭代结果的稳定性.通过构造新的测距函数和使用基于相量的双端异步时差的求解算法,使得测距算法在双端异步数据的情况下也能精

确确定故障位置,同时线路长度校正算法能够较好地克服由于线长误差造成测距失效的问题.本文的算法稳定性较高,定位结果不受故障点过渡电阻的影响,且对信号的采样频率和数据窗的长度要求较低,可以直接应用故障录波器的录波数据,具有一定的实用价值.

参考文献:

[1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 2 版. 西安:西安交通大学出版社,2007.

[2] 陈平,徐丙垠,葛耀中,等. 一种利用暂态电流行波的输电线路故障测距方法[J]. 电力系统自动化,1999,23(14):29-32.

CHEN Ping,XU Bingyin,GE Yaozhong,et al. A novel method for fault location of transmission lines using fault transient current travelling waves[J]. Automation of Electric Power Systems,1999,23(14):29-32.

[3] 肖东晖,刘沛,程时杰. 架空输电线路故障测距方法综述[J]. 电力系统自动化,1993,17(8):46-56.

XIAO Donghui,LIU Pei,CHENG Shijie. Survey of fault location problem on overhead transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems,1993,17(8):46-56.

[4] 辛丙松,赵进全,杨栓科,等. 一种基于精细积分法的输电线双端故障测距算法[J]. 高压电器,2005,41(2):89-90.

XIN Bingsong,ZHAO Jinqun,YANG Shuanke, et al. A double-terminal fault location algorithm based on precise integration method[J]. High Voltage Apparatus,2005,41(2):89-90.

[5] 张华中,王维庆,朱玲玲,等. 基于双端不同步数据的故障定位算法[J]. 华东电力,2009,37(1):116-119.

ZHANG Huazhong,WANG Weiqing,ZHU Lingling, et al. Fault location algorithms based on two-terminal unsynchronized data[J]. East China Electric Power,2009,37(1):116-119.

[6] 张兆宁,毛鹏,孙雅明. 电力系统故障暂态信号的小波奇异性检测[J]. 继电器,2000,28(4):24-27.

ZHANG Zhaoning,MAO Peng,SUN Yaming. Singularity detection of fault transient signals in power system with wavelet transform[J]. Electric Relay,2000,28(4):24-27.

(编辑 杜秀杰)