

基于改进双端行波定位法的线路雷击点定位

郭涌涛, 代颖, 邓武军

(宜宾电业局, 四川 宜宾 644002)

摘要: 现有雷电定位系统探测到的电磁波存在的波形传播延时和地形传播延时, 将使定位精度受到影响。考虑到输电线遭受雷击时将产生向两端变电站母线运动的行波, 结合现有的行波测距理论, 提出一种改进的双端行波定位法对雷击点进行定位。通过在线路两端母线处采集雷击入射行波、母线反射行波或者雷击点的反射行波信号, 利用小波变换提取行波波头特征点, 精确确定行波到达时刻, 进而确定一个只包含距离和时间的函数求解出雷击点的位置, 实现不受波速影响的雷击点定位。该方法不需要事先确定行波波速, 和传统行波定位法相比, 消除了波速的不确定性带来的定位误差。大量 PSCAD/EMTDC 仿真结果表明, 该方法能够有效地对雷击点进行定位, 定位精度高。

关键词: 输电线路; 雷击点定位; 双端法行波; 波速

Abstract: The accuracy of lightning strike location system is affected by the delay of the detected electromagnetic wave due to the waveform and the terrain. Considering that lightning strike will generate traveling wave toward both sides of the transmission line, an improved double terminal traveling wave location method is presented for the location of lightning strike. Using wavelet transform to extract the characteristics of the wave front at both sides of transmission line, the arrival time of the traveling wave from the point of strike, echo from the point of strike or echo from the opposite busbar can be measured. Then a function involving time and distance can be made and the point of strike is obtained. Compared with the traditional traveling wave method, this new method doesn't need to determine the traveling wave velocity, so the measurement error caused by the uncertainty of the wave velocity can be avoid. A large amount of PSCAD/EMTDC simulation results show that this new method is efficient and accurate in locating the lightning strike.

Key words: transmission line; lightning strike location; double terminal method of traveling wave; wave velocity

中图分类号: TM773 文献标识码: B 文章编号: 1003-6954(2008)03-0019-05

电力系统中, 为了能快速有效地对雷击保护设备进行修复, 及时恢复供电, 对雷击点进行精确定位显得十分重要。由于雷击难以预测, 应用传统的方法搜集与掌握雷电分布、雷电流概率等基本参数具有明显的局限性不能实现雷击点的精确定位; 目前普遍采用雷电定位系统进行雷击点的定位取得了比较好的效果^[1-3]。但该系统以探测站测定放电辐射的电磁波为基础, 受波形传播延时误差和地形传播延时误差影响, 据相关文献介绍, 测距误差在 1~3 km, 定位误差存在明显的地区差异。同时往往在雷电时, 1 min 内可接收到多个雷击, 较难判断真正引起线路故障是哪一个雷^[4]。

行波理论应用于输电线路故障测距国内外已做了大量研究, 准确捕获行波波头到达时刻是关键。小波变换具备频域和时域局部性, 适合于检测行波波头等突变信号。大量文献表明, 基于小波变换的行波测距法测距精度高, 可靠性好^[6-12]。但现有行波测距法在获取波头时间后, 必须结合波速才能实现故障测

距, 在以往的研究中, 波速被认为接近光速或是根据已知线路参数按照公式 $v = 1/\sqrt{LC}$ (L, C 分别为单位长度导线电感和电容值) 事先计算线路波速进行定位计算。而行波波速受到地理气象条件、温度和线路参数变化等因素影响, 是不确定的值, 选取固定波速的方法增大了定位误差。

这里提出利用行波测距理论结合小波变换来对输电线路雷击点进行定位, 同时考虑到波速的不确定性, 不宜将波速取为一个定值进行定位计算, 提出不受波速影响的改进双端行波定位法。

1 小波变换与奇异性检测原理

设 $\Psi(t) \in L^2 R$ (平方可积函数空间), 若其傅立叶变换 $\bar{\Psi}(\omega)$ 满足容许性条件:

$$C_{\Psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\bar{\Psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (1)$$

则称 $\Psi(t)$ 为母小波函数。

将任意 $L^2(R)$ 空间中的平方可积函数 $f(t)$ 在母

小波下进行展开,称这种展开为函数 $f(t)$ 的连续小波变换,其表达式为:

$$WT_f(\alpha, \tau) = \langle f(t), \Psi_{\alpha, \tau}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \int_{\frac{t-\tau}{\alpha}} f(t) \Psi^* dt \quad (2)$$

式中: α 是尺度因子, $\alpha > 0$; τ 是平移因子;

若 a, b 只取离散值 $a = a_0^m, b = nb_0 a_0^m, a > 1, b_0 > 1, m, n$ 取任意整数,就得到 $f(t)$ 的离散小波变换。

在运用小波变换进行时频分析时,多分辨率分析理论是常用的方法。所谓多分辨率分析是指在满足采样定理的前提下利用一对镜像滤波器 $\{h_n\}, \{g_n\}$ 对采样信号进行二进频带划分,将信号分解为细节部分 W_1 和大尺度逼近部分 V_1 ,然后将大尺度逼近部分 V_1 进一步分解,如此重复就可以得到任意尺度上的逼近部分和细节部分,具体算法如下:

$$c_{j+1, k} = \sum_n g_n(n-2k) c_{j, n} \quad (3)$$

$$d_{j+1, k} = \sum_n h_n(n-2k) c_{j, n} \quad (4)$$

式中 j 的不断变化,可得到不同尺度上的逼近系数 c 和小波系数 d ,尺度越高频带越低。可通过观察该信号在不同频带上的表现,实现特征提取。

若函数在某处间断或某阶导数不连续,则称函数在此处有奇异性。小波变换所具有的“变焦”性,可以对函数的奇异性进行更为有效的分析。当选用平滑函数的一阶导数作为小波函数时,信号的尖锐变化点在小波变换下将出现极值,称为模极大值。信号的小波变换的模极大值与信号的突变点一一对应。电力系统输电线在遭受雷击后产生的暂态行波到达检测点时,表现出明显的奇异性,其中包含了雷击点的信息。利用小波变换的模极大值能精确检测出这些信息,实现雷击点定位。

2 雷击点定位方法

2.1 小波基函数的选取

小波种类繁多,主要包括正交小波、半正交小波、双正交小波等^[13]。不同的小波基有不同的用途,在分析同一个问题的结果上也有差别。在突变点的检测上,小波函数的选取至关重要。一般认为时频振荡少,支撑集短的小波更为适合作奇异信号的检测。同时要想小波变换不改变突变点的位置需要用具有线

性相位的对称小波,否则点位会发生平移,造成定位误差。大多数样条小波和双正交小波都是对称的,国内文献多用三次 B 样条小波进行故障测距。文献^[13]提出,在滤波器阶数相同的情况下,双正交小波检测突变的能力要优于样条小波。综合分析以上几点,本文采用 Biorthogonal 双正交小波进行分析。

2.2 小波变换尺度的选取

小波变换尺度的选取对突变信号的准确检测也十分重要。小波变换实际上是把信号按不同的频带进行逐层分解,在不同尺度下分解出不同频带的信号。理论上讲,尺度越小,所包含的频率成分越高,小波系数的模极大值与突变点的对应就越准确,大量利用小波变换进行信号突变检测的文献也是利用最小尺度下的小波变换进行分析。但是,雷击时产生的行波信号包含了从低频到数百 kHz 的频率成分,不同频率分量具有不同的传播速度和衰减。行波到达时间由行波中被分析频带信号强度最大的位置确定,而行波的传播速度由被分析频带的中心频率所确定,行波中的各频率分量的衰减与雷击点位置有关,主频分量范围反比于雷击点位置。距离越近,行波高频分量衰减减少,相应主频分量较高;距离越远,行波高频分量衰减大,主频分量降低^[9,10]。所以在高频分量衰减大的情况下,较大尺度的小波模极大值能更准确对应突变时刻。

2.3 新方法实现

前文已述,输电线路气象条件、温度和线路参数的变化将导致行波波速的不确定性,按事先确定的行波波速进行计算会给定位带来误差。本文提出不受波速影响的改进双端行波测距法,结合小波尺度的选取,提出两种实现方法。

设遭受雷击的线路全长为 L , M 和 N 分别表示线路两端母线的位置,雷击点 f 距离近端母线为 l , β_1, β_2 分别表示线路两端的反射系数, β_0, α_0 为雷击点的反射和折射系数,如图 1 所示。

图 1 显示了遭受雷击的线路上行波的传播和折反射情况。本方法在定位计算中需要测定的是雷击入射行波波头和第一个反射行波波头分别到达两端母线的时刻,即只取两端小波变换的前两个模极大值点。显然,小波变换的第一个模极大值点对应的是入射波到达时刻,通过比较两端入射波到达的先后可判定它们离雷击点的远近,进而确定第二个模极大值对应的反射行波的性质,即是雷击点反射回的行波还是

对端母线反射回的行波。离雷击点近的母线检测到的第一个反射波是雷击点反射行波；离雷击点远的母线检测到的是对端母线反射行波。为方便描述，这里统一规定 t_1, t_1' 分别为离雷击点近的一端测得的入射波达时刻和雷击点反射波到达时刻， t_2, t_2' 分别为离雷击点远的一端入射波达时刻和对端母线反射波达时刻。

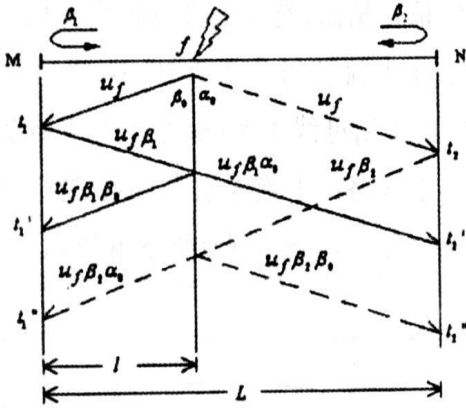


图1 行波网格图

方案一：选择最小尺度的小波变换作分析，其特点是不需要测定雷击点反射波到达近端母线的时刻。首先比较两端的波达时刻，确定 t_1, t_2 ，进而确定 t_2' 。设行波波速为 v ，可列写方程如下：

$$(t_2' - t_2)v = 2l \quad (5)$$

$$(t_2 - t_1)v = L - 2l \quad (6)$$

联立求解方程组，可得：

$$l = \frac{(t_2' - t_2)L}{2(t_2' - t_1)} \quad (7)$$

方案二：考虑到行波主频分量的衰减问题，若雷击行波到达线路两端母线的距离相差较大时，采用的方法是：距离雷击点近端母线采用小尺度下的小波变换作为判别波达时刻依据，选择小尺度下对应的波速 v_1 ；距离远端母线采用较大尺度小波变换作为判别波达时刻依据，选择该尺度下对应的波速 v_2 。还是首先比较两端波达时刻，确定 t_1, t_2 ，进而确定 t_1', t_2' ，列写方程如下：

$$(t_1' - t_1)v_1 = 2l \quad (8)$$

$$(t_2' - t_2)v_2 = 2l \quad (9)$$

$$\frac{L-l}{v_2} - \frac{L}{v_1} = t_2 - t_1 \quad (10)$$

联立求解方程组，得：

$$l = \frac{(t_2' - t_2)L}{t_2' + t_2 + t_1' - 3t_1} \quad (11)$$

式(7)、(11)中都不含波速，从而实现不受波速影响的雷击点定位。

特别需要指出的是，雷击造成绝缘子闪络引起线路故障的情况下，利用方案一和方案二均能较好的进行定位，理论上方案二的定位精度相对要高一些。但在许多情况下，雷击过电压低于线路绝缘水平不会引起线路故障，在雷击点不会出现反射波，利用方案二无法对这些雷击进行测量。方案一由于没有利用雷击点的反射波到达时刻参与计算，所以无论雷击引起线路故障与否都可用该方案进行定位。

3 仿真实验及结果分析

3.1 仿真模型建立

仿真实验在电力系统暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 中进行，仿真输电线路如图2所示。

仿真线路为全长 300 km，电压等级为 500 kV 的三相有损传输线，输电线采用频率相关模型(Frequency Dependent Model)，EMTDC 的采样频率为 1 MHz。

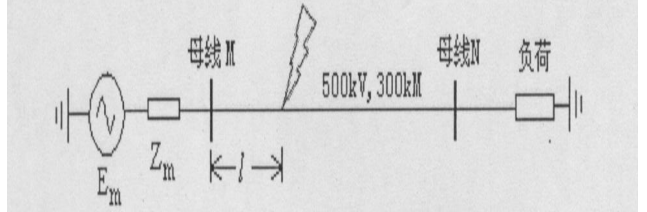


图2 500 kV 仿真系统线路模型

线路参数如下：

$$H = 34 \text{ m}, h_g = 27.25 \text{ m}, h_c = 17.62 \text{ m}$$

$$r_c = 20.35 \text{ mm}, r_g = 5.5 \text{ mm}$$

$$R_c = 0.0409 \text{ } \Omega/\text{km}, R_g = 2.86 \text{ } \Omega/\text{km}$$

其中： H 为杆塔高度； h_c, h_g 分别为导线和避雷线的平均高度； r_c, r_g 分别为导线和避雷线半径； R_c, R_g 为导线和避雷线的直流电阻。

线路两端母线处均装设测量元件测量仿真波形，测得的波形数据利用 Matlab 编程实现多尺度的小波分析。

3.2 仿真结果分析

算例1：雷电流波形为 $1.2/50 \mu\text{s}$ ，幅值为 175 kA，负极性，在距 M 端母线 85 km 处发生雷击杆塔塔顶事故。由于雷电流幅值大于线路反击绝缘水平，故造成

绝缘子闪络。检测情况如图3、4所示。

根据图中的小波变换结果即可进行雷击点的定位。这里分别采用前面提到的两种方案进行计算。

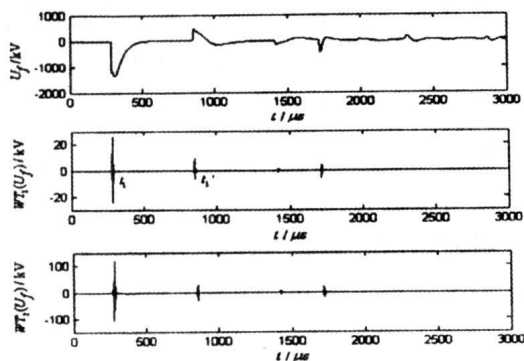


图3 M端母线小波分析结果

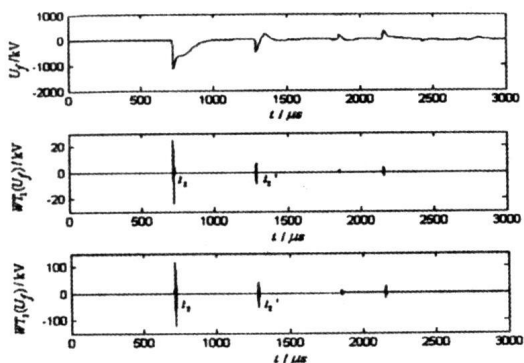


图4 N端母线小波分析结果

第一种方案:只考虑小波变换的第一层分解。从两端小波变换的第一个模极大值出现的时刻的大小可以判断出M端母线比N端母线距离雷击点近,结合两端小波变换的第二个模极大值可以确定参数如下:

$$t_1=285 \mu\text{s}, t_2=718 \mu\text{s}, t_2'=1285 \mu\text{s}$$

将时间和距离参数代入式(7)可得:

$$l=85.05 \text{ km}, \text{即雷击点离M端距离为} 85.05 \text{ km}.$$

绝对误差 $\Delta_x=85.05-85=0.05 \text{ km}$, 定位误差 $\epsilon=0.05/300 \times 100\%=0.017\%$ 。

第二种方案:雷击点与两端母线的距离相差较大,考虑高频分量衰减的影响。M端母线距离雷击点更近,所以M端选用第一层小波变换确定时间参数,N端选用第二层小波变换确定时间参数。参数确定

如下:

$$t_1=285 \mu\text{s}, t_1'=851 \mu\text{s}$$

$$t_2=719 \mu\text{s}, t_2'=1286 \mu\text{s}$$

将参数代入式(11)得:

$$l=85.007 \text{ km}. \text{绝对误差} \Delta_x=85.007-85=0.007 \text{ km}, \text{定位误差} \epsilon=0.007/300 \times 100\%=0.002\%.$$

从以上分析结果可以看出,对于本例,所采用的两种方法均有较好的定位精度,考虑频率衰减的第二种方案定位精度稍高,符合前文的理论分析。

算例2:雷电流波形为1.2/50 μs ,幅值为15 kA,负极性,在距M端母线195 km处发生线路绕击。雷电流幅值小于线路绕击绝缘水平,不会造成绝缘子闪络引起线路故障。检测情况如图5、6所示。

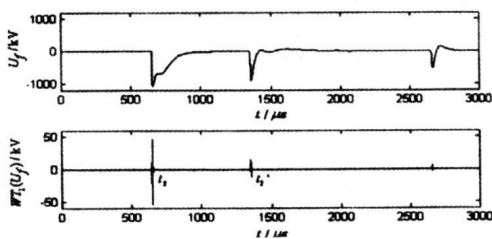


图5 M端母线小波分析结果

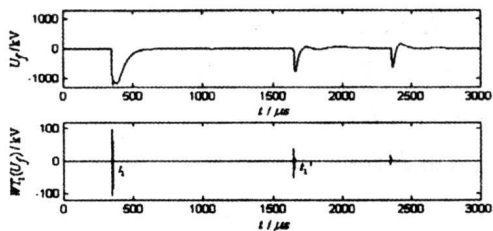


图6 N端母线小波分析结果

由于没有引起线路故障,雷击点不会有反射波出现,第二种方案不适用,采用第一种方案进行定位。此时有:

$$t_1=351 \mu\text{s}, t_2=652 \mu\text{s}, t_2'=1352 \mu\text{s}$$

利用公式(7)求得:

$$l=104.895 \text{ km}, \text{即雷击点离M端的距离为} 195.105 \text{ km}. \text{绝对误差} \Delta_x=195.105-195=0.105 \text{ km}, \text{定位误差} \epsilon=0.105/300 \times 100\%=0.035\%.$$

可见,对于没有引起线路故障的雷击,利用本文提出的第一种定位方案也能实现准确定位。

类似地,对不同长度输电线在不同位置遭受雷击

进行了多次仿真实验,采用本文提出的改进双端行波定位法的第一种方案与传统的不考虑波速变化影响双端定位法(取 $v = 296 \text{ m}/\mu\text{s}$)进行定位精度比较,结果见表1。

表1 雷击定位结果

线路长度(km)	雷击点与M端母线距离(km)	改进双端法定位结果		传统双端法定位结果	
		计算距离(km)	定位误差(%)	计算距离(km)	定位误差(%)
200	25	24.850	0.075	25.704	0.352
	93	92.954	0.023	93.044	0.022
	141	141.018	0.009	140.552	0.276
400	76	76.048	0.012	77.456	0.364
	138	137.931	0.017	138.728	0.182
	243	242.879	0.030	242.328	0.168
500	52	52.096	0.019	54.344	0.469
	203	202.938	0.012	203.528	0.106
	399	398.981	0.004	397.112	0.378

可见,选取固定波速的传统双端定位法定位误差较大,采用本文提出的改进方法对定位精度有明显的提高。

4 结论

1)考虑到现有雷电定位系统的不足,利用输电线路行波理论结合小波变换,对输电线路雷击点进行定位。分析了传统行波定位法在波速的确定上存在不足,提出不受波速影响的改进双端行波定位方法。仿真试验结果表明,利用行波法能够准确地对输电线路上的雷击点进行定位,改进方法不受线路参数、气象、温度等因素的变化造成的波速不确定性的影响,定位精度明显优于传统定位法。

2)提出的两种新方法的实现方案都能精确计算出雷击点的位置,方案二考虑了行波高频分量在传输过程中的衰减,小波变换尺度的选取不同于方案一,定位精度相对较高,但由于该方案需要利用雷击点的反射行波到达时刻参与计算,不适用于未引起线路故障的雷击定位。方案一则无论雷击引起线路故障与否均适用。

3)行波理论用于输电线路雷击点的定位是新

的探讨和尝试,它可代替现有雷电定位系统的部分功能,也可用于监视线路雷电活动,为相关部门提供分析数据。

参考文献

- [1] 周延龄,黎利佳,苏贻泰.雷电定位系统的开发与应用[J].中国电力,1999,32(7):31-35.
- [2] 吴璞三.雷电定向定位和时差定位系统[J].高电压技术,1995,21(3):3-7.
- [3] 赵文光,陈家宏,张勤,王光财.新的雷电综合定位系统的定位计算[J].高电压技术,1999,25(4):66-68.
- [4] 樊灵孟,李志峰,何宏明,杨楚明.雷电定位系统定位误差分析[J].高电压技术,2004,30(7):61-63.
- [5] 全玉生,邱庆春,邵宇,等.基于双端不同步数据故障定位中的中位修正法[J].高电压技术,2005,31(9):1-4.
- [6] Dipankar C, N K Kishore, Avinash K S, et al. A wavelet multiresolution-based analysis for location of the point of strike of a lightning overvoltage on a transmission line [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(4): 1727-1733.
- [7] Harry L, Abdul M M. GPS traveling wave fault locator systems: Investigation into the anomalous measurements related to lightning strikes[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(3): 1214-1223.
- [8] Robertson D C, Camps O I, Mayer J S, et al. Wavelets and electromagnetic power system transients [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 1050-1058.
- [9] 覃剑.小波变换应用于输电线路行波故障测距的研究[D].北京:中国电力科学研究院,1998.
- [10] 覃剑,陈祥训,郑健超,等.利用小波变换的双端行波测距新方法[J].中国电机工程学报,2000,20(8):6-10.
- [11] 范春菊,张兆宁,郁惟镛.小波方法在超高压输电线路故障测距中的应用[J].电网技术,2003,27(8):50-53.
- [12] 林湘宁,刘沛,刘世明,等.基于故障电流暂态分量的测距研究[J].电力系统自动化,2002,26(2):45-51.
- [13] 程正兴.小波分析算法与应用[M].西安:西安交通大学出版社,1998.
- [14] DL/T 620-1997,交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S],1997.

作者简介:

郭涌涛(1974-),男,本科毕业,工程师,长期从事线路运行与管理工作。

代颖(1969-),男,本科毕业,工程师,长期从事电力系统生产运行管理工作。

邓武军(1967-),男,硕士学位,高级工程师,长期从事电力系统研究和运行、管理。(收稿日期:2008-03-10)