

不受波速和噪声影响的雷击定位模式识别法

唐启红¹, 汪颖^{1,2}, 肖先勇^{1,2}

(1 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2 智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要:基于行波传输理论,提出了不受噪声和波速影响的雷击定位模式识别新方法。按实际中经常出现的故障性和非故障性雷击,将雷击分为故障性与非故障性两种模式,并利用采集到的故障波形的首波头、故障点反射波和对端母线透射波 3 波头间关联关系建立隶属度函数与定位公式。对含噪声的行波信号经小波变换得到含噪声出现时刻的 n 个波达时刻,对其种组合计算两种模式的隶属度,然后以隶属度最小对应模式的定位公式计算雷击点位置,输出雷击模式。对某 500 kV 输电系统的仿真结果证明,所提出的方法定位精度高,不受波速和噪声影响。

关键词:雷击定位;小波变换;模式识别;隶属度函数;隶属度;波速;噪声干扰

Abstract: According to the traveling wave theory, a lightning stroke location method based on wavelet transform and pattern recognition is proposed. First of all, the lightning strokes are divided into two modes, that is, faulty lightning and non-faulty lightning. The membership functions and lightning stroke location formulas of these two modes are established based on association relation of the initial traveling wave head and wave head reflected from lightning stroke point and remote bus. Then the wavelet transform is used to analyze the traveling wave current signal which contains noises, and the one-to-one corresponding relationship between wavelet transform modulus maxima and the catastrophe point of traveling wave signal is used to obtain the traveling wave arrival time which is used to calculate the membership degree of the two modes. Finally, based on location formula of the mode which has the minimum membership degree, the position of lightning stroke on transmission line is calculated. The result of location is not affected by noise interference and the uncertainty of wave velocity.

Key words: lightning stroke location; wavelet transform; pattern recognition; membership function; membership; wave velocity; noise interference

中图分类号: TM866 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2010)03-0033-05

0 前言

超、特高压输电线路距离长、分布广,跨越地理环境复杂,易受雷击影响。按强度不同,雷电可分为故障性雷击和非故障性雷击,一方面,故障性雷击将引起绝缘闪络导致线路故障跳闸,运行资料表明,线路跳闸多数是由雷击所引起,是线路故障的主要原因之一^[1];另一方面,非故障性雷击干扰可能引起线路保护误动造成线路非故障性跳闸,对电力系统造成不必要的损失。无论故障性或非故障性雷击势必都会影响到电力系统的正常运行,对经济生活造成损失。雷击的快速准确定位,找到雷击点,是加快恢复供电,减少停电损失的重要途径,但现有定位法易受行波波速和噪声等多种因素影响,因此迫切需要对此开展深入研究。

国内外对行波测距理论及应用已做了大量研究,

其中,准确捕捉行波波头到达时刻(以下简称波达时刻)是关键。小波变换具有一定时频分辨率,能分析信号局部化特征,适合于检测行波波头这样的突变信号^[2],通过小波变换可提高故障定位准确度和可靠性^[3-5]。

采集到的行波信号往往含有噪声,需进行消噪,但消噪方法均难以做到真实信号不丢失而噪声完全消除^[6],未被消除的噪声干扰将影响定位正确性。

噪声干扰^[7]、波头识别(故障点反射波头与对端母线透射波头的识别)^[8-9]以及波速^[9-10]是影响定位准确性的重要因素,但现有文献大多并未对这三个因素全面考虑,尤其对噪声干扰考虑较少。如文献^[9-10]提出了不受波速影响的测距方法,但均未考虑噪声干扰的影响。文献^[9]利用小波变换模极大值幅值和极性进行波头识别,也可能因噪声干扰而出错。文献^[7]提出了故障定位的模式识别法,但其噪声是在行波经小波变换后人为加入的脉冲,带有一定

主观性,且其定义的模式繁多,模式一与模式四(或模式二与模式三)定义的隶属度为同一函数,定位精度同样受波速影响。因此,从满足工程实用化要求的角度,需要研究一种综合考虑噪声、波速及波头识别等多种因素的定位方法。

因此,基于文献 [7] 模式识别的思想,提出了雷击单端定位的改进模式识别方法。该方法考虑了噪声干扰影响,避免了利用波速进行定位,无需单独算法进行波头识别。根据雷击是否造成故障,将雷击定义为两种模式:模式一,故障性雷击;模式二,非故障性雷击;选取能列写波速和定位距离为求解变量的两组独立方程的 3 个波头的波达时刻,根据三者间行波传输关联关系建立两种模式的隶属度函数与定位公式。利用隶属函数可进行波头识别,无需额外算法;定位公式为只含波达时刻与线路总长的函数,定位结果不受波速影响。对检测到的含噪声行波信号进行小波变换,得到含噪声干扰出现时刻的 n 个波达时刻数据,将其种组合输入模式识别程序,求取每种组合对于两种模式的隶属度,最后以隶属度最小对应模式的定位公式确定雷击点,含噪声的组合则因不满足行波传输理论隶属度较大被排除。

1 信号的小波奇异性检测及消噪

若信号(函数)在某处间断或某阶导数不连续,则称该信号在此处有奇异性。用小波法分析信号奇异性需引入小波变换模极大值点同信号突变点之间的关系。

定义:在某尺度 a_0 下,若存在点 (a_0, b) 使得

$$\frac{\partial W_f(a_0, b)}{\partial b} = 0 \quad (1)$$

则称点 (a_0, b) 为局部极值点,且 $\frac{\partial W_f(a_0, b)}{\partial b}$ 在 $b=b_0$ 上有一过零点。如果对 b_0 的某一邻域内任意点 b 有 $|W_f(a_0, b)| \leq |W_f(a_0, b_0)|$ 则称 (a_0, b_0) 为小波变换的模极大值点。

当小波函数看作某一平滑函数的一阶导数时,信号小波变换模局部极大值点对应于信号突变点,模极大值点与信号突变点一一对应。输电线路遭受雷击产生的暂态行波信号具有明显的奇异性,包含有雷击点的信息,因此可用雷击后暂态行波小波变换模极大值,实现雷击点的准确定位。根据检测信号奇异性的

特点,采用了 Biorthogonal 双正交小波 [5] 对其进行分析。

利用小波变换第 1 层分解的细节系数经小波阈值消噪,并适当降低阈值,允许少量噪声干扰存在,以保证真实行波信号不丢失。然后利用消噪后得到的包含噪声干扰出现时刻的波达时刻数据进行雷击定位。

2 模式识别雷击定位原理

为列写两组独立方程解得不受波速影响的定位公式,则选用首波头、雷击故障点反射波头和对端母线透射波头 3 个波头的波达时刻进行雷击定位。但雷击未造成故障时不存在故障点反射波,雷击定位利用首波头和 2 个对端母线透射波头。

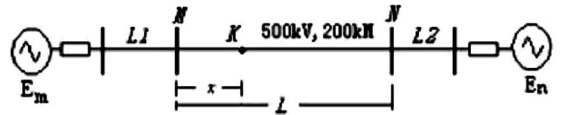


图 1 500 kV 仿真系统模型

设 L 为遭受雷击的线路长度, M, N 为两端母线,如图 1,行波传播速度为 v 当雷击发生在距 M 端 x km 的 K 处,按到达时刻先后,在 M 端检测到的上述三个波头到达时刻依次记为 t_{1m}, t_{2m} 和 t_{3m} 。不同的雷击模式和对应不同的行波传输路径,据此建立两种模式的隶属度函数,实现雷击的模式识别定位。

模式一:故障性雷击

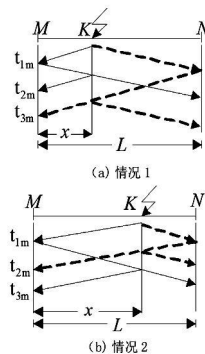


图 2 模式一行波网络图

情况一:当 $0 \leq x \leq L/2$ 时, t_{1m}, t_{2m} 和 t_{3m} 分别对应首波头、故障点反射波头和对端母线透射波头,行波网络图如图 2(a)。根据行波传输理论,有

$$\begin{cases} v(t_{2m} - t_{1m}) = 2x_1 \\ v(t_{3m} - t_{1m}) = 2(L - x_2) \end{cases} \quad x_1, x_2 \in [0, L/2] \quad (2)$$

情况二:当 $L/2 < x \leq L$ 时, t_{1m}, t_{2m} 和 t_{3m} 分别对应

首波头、对端母线透射波头和故障点反射波头, 行波网格图如图 2(b)。根据行波传输理论, 有

$$\begin{cases} v(t_m - t_m) = 2(L - x_1) \\ v(t_m - t_m) = 2x_2 \end{cases} \quad x_1, x_2 \in (L/2, L] \quad (3)$$

令 $\mu(x) = |x_2 - x_1|$ 将式 (2)、(3) 代入 $\mu(x)$ 可知, 情况一和情况二求得的 $\mu(x)$ 相等。因此定义模式一的隶属度函数为

$$\mu(x) = |x_2 - x_1| \quad (4)$$

其中 x_1, x_2 满足

$$\begin{cases} v(t_m - t_m) = 2x_1 \\ v(t_m - t_m) = 2(L - x_2) \end{cases} \quad x_1, x_2 \in [0, L] \quad (5)$$

但仅利用式 (4)、(5) 无法确定雷击发生在距离 M 端的 x 或 $L-x$ 处, 这是因为利用式 (4)、(5) 定义的隶属度函数 $\mu(x)$ 无法识别故障点反射波和对端母线透射波的缘故, 因此引入 $\mu'(x)$ 对模式一的两种情况进行识别。

情况一: 根据图 2 有

$$v(t_m + \frac{t_m - t_m}{2}) = 2L \quad (6)$$

定义隶属度函数为

$$\mu'(x) = \left| v(t_m + \frac{t_m - t_m}{2}) - 2L \right| \quad (7)$$

情况二: 根据图 3 可得

$$v(t_m + \frac{t_m - t_m}{2}) = 2L \quad (8)$$

定义隶属度函数

$$\mu'(x) = \left| v(t_m + \frac{t_m - t_m}{2}) - 2L \right| \quad (9)$$

模式二: 非故障性雷击

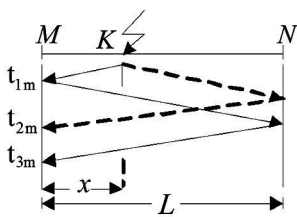


图 3 模式二行波网格图

根据图 3 可得

$$\begin{cases} v(t_m - t_m) = 2(L - x_1) \\ v(t_m - t_m) = 2x_2 \end{cases} \quad x_1, x_2 \in [0, L] \quad (10)$$

定义其隶属度函数为

$$\mu(x) = |x_2 - x_1| \quad (11)$$

假设雷击后, M 端检测到 $n (n \geq 3)$ 个波头, 波达

时刻依次记为 t_1, t_2, \dots, t_n 其中可能含有干扰波头 (当 $n > 3$ 时, 除定义的模式一和模式二定位利用的三个波头, 其余波头皆视为干扰波头, 包括噪声干扰和无用波头), 它们有 C_n^3 种组合。对每种组合计算两种模式的隶属度 $\mu(x)$, 找出所有 C_n^3 种组合中隶属度最小的组合, 应用隶属度 $\mu(x)$ 最小的组合对应模式的雷击定位公式计算雷击点位置, 并输出该组合及对应的模式。若隶属度 $\mu(x)$ 最小的为模式一, 则应利用隶属度 $\mu'(x)$ 对模式一的两种情况进行识别, 应用隶属度 $\mu'(x)$ 最小对应的定位公式计算雷击点位置。定位公式如下。

模式一情况一, 令 $x_2 = x_1 = x$ 代入式 (2) 解得, 雷击点距离 M 端的距离

$$x = \frac{(t_m - t_m)L}{t_m + t_m - 2t_m} \quad (12)$$

行波波速

$$v = \frac{2L}{t_m + t_m - 2t_m} \quad (13)$$

模式一情况二, 令 $x_2 = x_1 = x$ 代入式 (3) 解得, 雷击点距离 M 端的距离

$$x = \frac{(t_m - t_m)L}{t_m + t_m - 2t_m} \quad (14)$$

行波波速

$$v = \frac{2L}{t_m + t_m - 2t_m} \quad (15)$$

模式二, 令 $x_2 = x_1 = x$ 代入式 (10) 解得, 雷击点距离 M 端的距离

$$x = \frac{(t_m - t_m)L}{t_m + t_m} \quad (16)$$

行波波速

$$v = \frac{2L}{t_m - t_m} \quad (17)$$

计算雷击点位置的式 (12)、(14) 和 (16) 均不含波速 v 因此该方法定位精度不受波速影响。

3 模式识别雷击定位步骤

为验证该方法的有效性, 在行波信号中加入了噪声。含噪声的行波信号小波变换第 1 层分解的细节系数经小波阈值消噪后各局部模极大值反映了雷击行波的波达时刻, 也包含噪声干扰。将含噪声出现时刻的波达时刻数据输入模式识别程序进行雷击点定位, 其步骤如下。

步骤 1: 设置行波波速初始值 v_0 和迭代次数 k

步骤 2: 运用式 (4) 和 (5)、(10) 和 (11) 计算波达时刻所有组合的隶属度 $\mu(x)$, 确定 $\mu(x)$ 最小值 $\min \mu$ 及对应的波达时刻组合;

步骤 3: 判断 $\min \mu$ 对应的模式, 若为模式一转到步骤 4; 若为模式二, 运用式 (16)、(17) 计算雷击点位置 x 及行波波速 v 转到步骤 6;

步骤 4: 运用式 (7)、(9) 计算 $\mu'(x)$, 确定 $\mu'(x)$ 最小值 $\min \mu'$;

步骤 5: 判断 $\min \mu'$ 对应模式一的哪种情况, 若为情况一, 运用式 (12)、(13) 计算雷击点位置 x 及行波波速 v 若为情况二, 运用式 (14)、(15) 计算雷击点位置 x 及行波波速 v

步骤 6: 比较 v 和 v_0 , 若 $\epsilon = |v - v_0| < 10^{-3}$ 或达到迭代次数 k 输出雷击点位置及相应的雷击模式; 否则, 令 $v_0 = \frac{v + v_0}{2}$, 转到步骤 2。

4 仿真及算例分析

4.1 仿真系统

采用典型 500 kV 超高压输电系统, 见图 1, 仿真输电线路 M-N 段为全长 $L=200$ km, 电压等级 500 kV 的三相有损传输线, 采用频率相关模型, EMTDC 采样频率为 1 MHz

国际电工委员会 (IEC) 将波头 $t_f=1.2 \mu s$ 波长 $t_r=50 \mu s$ 作为雷电冲击实验的标准波形, 记为 1.2/50 μs 其波形定义如式 (18)。采用此波形模拟雷击线路时产生的雷电流波形, 采用电磁暂态仿真软件 PSCAD /EMTDC 进行雷击仿真。

$$i = A I_L (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (18)$$

在母线 M 处装设测量元件, 检测仿真波形, 将测得的数据用 MATLAB 编程实现第 2 节介绍的模式识别方法进行雷击点的定位。

4.2 仿真结果分析

采用电流行波信号经 Clark 变换后的线模分量作为测量信号, 根据文献 [7], 其波速为 299 739 777 m/s 但雷击点定位公式 (12)、(14) 和 (16) 均不利用波速 v 在模式识别中设置 v_0 不需要精确值, 波速可经过迭代不断进行修正, 直到与定位输出波速满足一定误差要求 ϵ , 因此近似取 $v_0 = 2.997 \times 10^8$ m/s 在如下的算例中均以雷击发生时刻为零时刻, 选取雷击

2 ms 后的样本点, 每两个采样点间隔为 $1 \mu s$, 共 2 000 个采样点。

算例一: 模式一的第一种情况

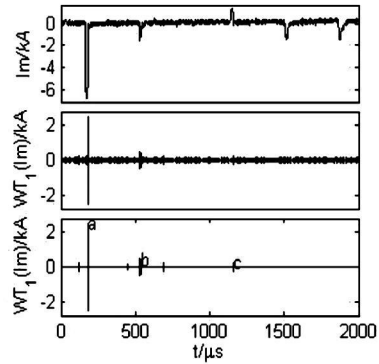


图 4 算例一行波信号及其小波变换

图 4 给出了距 M 端 54 km 处发生故障性雷击的行波信号及其小波变换结果。其中, 图 4(上) 为加入噪声的行波电流线模信号 (M 端检测); 图 4(中) 为小波变换第 1 层分解细节系数; 图 4(下) 为第 1 层分解细节系数经小波阈值消噪后含干扰的波达时刻脉冲波形 (以下算例相同)。

将图 4(下) 的波达时刻导入第 2 节的模式识别定位程序, 输出为“模式一的情况一”, 定位波头为 a、b、c (其余为干扰波头), 对应的波达时刻 $t_m = 182 \mu s$, $t_m = 542 \mu s$, $t_m = 1 157 \mu s$ 代入式 (12) 得雷击点与 M 端距离 x 为 53.933 km, $\Delta x = 53.933 - 54 = -0.067$ km, 定位误差 $\epsilon = (-0.067 \div 200) \times 100\% = -0.034\%$ 。

算例二: 模式一的第二种情况

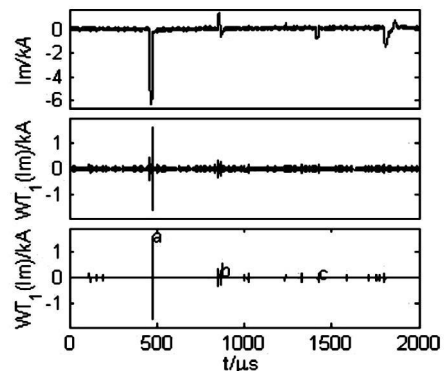


图 5 算例二行波信号及其小波变换

图 5 给出了距 M 端 142 km 处发生故障性雷击的行波信号及其小波变换结果。将图 5(下) 的波达时刻导入模式识别定位程序, 输出为: “模式一的情况二”, 定位波头为 a、b、c 即 $t_m = 476 \mu s$, $t_m = 863 \mu s$, $t_m = 1 424 \mu s$ 代入式 (14) 得 $x = 142.022$ km, Δx

=0.022 km, 定位误差 $\epsilon = -0.011\%$ 。

算例三: 模式二

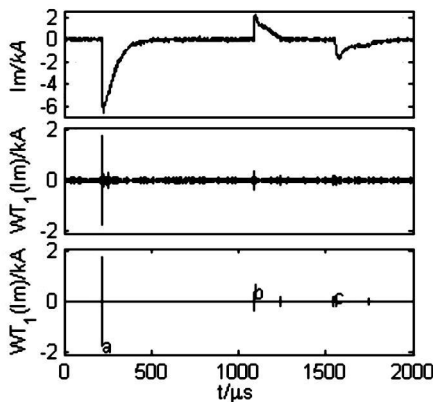


图 6 算例三行波信号及其小波变换

图 6 给出了距 M 端 70 km 处发生非故障性雷击的行波信号及其小波变换结果。将图 6(下)的波达时刻导入模式识别定位程序, 输出为: “模式二”, 定位波头为 a, b, c 即 $t_m = 220 \mu s$, $t_m = 1088 \mu s$, $t_m = 1555 \mu s$, 代入式 (16) 得 $x = 69.963 \text{ km}$, $\Delta x = -0.037 \text{ km}$, 定位误差 $\epsilon = -0.019\%$ 。

类似地, 对不同长度输电线路不同位置发生雷击的情况进行了仿真, 定位结果见表 1(其中 x 为 X 的计算值), 从表 1 可知, 定位误差均小于 200 m, 满足雷电定位精度要求。若不将噪声干扰与实际雷击行波波头加以识别, 错误的利用噪声干扰波头进行雷击定位, 则精度无法确定。

表 1 定位结果

线路全长 L/km	雷击		定位结果及误差		
	模式	X/km	x/km	$\Delta x/\text{km}$	$\epsilon/\%$
150	模式一	40	39.940	-0.060	-0.040
	模式二	97	97.103	0.103	0.069
300	模式一	60	59.850	-0.150	-0.100
	模式一	100	100.050	0.050	0.017
	模式二	224	224.139	0.139	0.046
400	模式二	88	87.874	-0.126	-0.042
	模式一	143	142.975	-0.025	-0.006
	模式二	301	300.934	-0.066	-0.016
	模式二	267	267.112	0.112	0.028

5 结 论

综合考虑噪声干扰、波速及波头识别对定位的影响, 提出了雷击单端定位的改进模式识别方法。

该方法仅利用波达时刻和线路总长求解雷击点位置, 不受行波波速影响。定位精度高, 定位误差小

于 200 m, 满足雷电定位精度要求。

所提出的模式识别方法可有效排除噪声干扰对定位的影响, 可对故障点反射波和对端母线透射波进行识别, 保证定位的正确性。

雷击定位模式识别法对雷击是否造成故障进行了模式分类, 模式一对应故障性雷击; 模式二对应非故障性雷击。雷击定位输出的模式可作为输电线路保护中雷电干扰识别的参考。

参考文献

- [1] 董杏丽, 葛耀中, 董新洲. 行波保护中雷电干扰问题的对策 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 74-78.
- [2] 范春菊, 张兆宁, 郁惟镛. 小波方法在超高压输电线路行波故障测距中的应用 [J]. 电网技术, 2003, 27(8): 50-53.
- [3] Dipankar Chanda, N K Kishore, Avinash K Sinha. 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.
- [4] 吴昊, 肖先勇. 基于小波变换和行波理论的输电线路雷击定位 [J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 86-90.
- [5] Cansin Y Evrenosoglu, Ali Abur. Travelling Wave Based Fault Location for Teed Circuits [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2): 1115-1121.
- [6] 马延凯. 基于小波分析的输电线路行波故障测距的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2006.
- [7] 李学鹏. 高压直流输电线路行波保护及其故障定位的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2005.
- [8] 陈平, 朱瑾, 徐丙垠, 等. 利用重合闸暂态行波的输电线路故障测距 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 76-80.
- [9] 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.
- [10] 李泽文, 曾祥君, 姚建刚, 等. 不受波速影响的输电线路双端行波故障测距算法 [J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2006, 3(4): 68-71.

作者简介:

唐启红 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 电力系统过电压与电磁暂态。

汪颖 (1981-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向: 电能质量及其控制技术、大气过电压。

肖先勇 (1968-), 男, 副教授, 硕士导师, 长期从事电能质量及其控制、大气过电压与绝缘配合的教学研究。

(收稿日期: 2010-01-07)