

# 改进行波雷电定位法的应用研究

刘 敏

(成都电业局继电保护所, 四川 成都 610021)

**摘 要:**应用一种改进的双端行波输电线路雷击定位方法,用系统中线路进行仿真分析加以验证,证明其实用价值。此方法不需要事先确定波速,消除了波速的不确定性所带来的误差,定位精度高于传统双端行波定位法。

**关键词:**输电线路;雷击;雷电定位系统;行波理论;定位

**Abstract:** The paper combined with a lightning strikes detection and location method based on an improved double-terminal traveling wave theory, the analysis and simulation of an existing transmission line in power system shows that this new method is correct and it provide the basis of engineering application. The method doesn't need to determine the velocity of the traveling wave before measurement, so the measurement error caused by the uncertainty of the wave velocity can be avoid. Compared with the traditional traveling wave location method, this method is more efficient and accurate for lightning location.

**Key words:** Transmission line; Lightning strikes; Lightning location system; Traveling wave theory; location

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

“经济发展,电力先行”,电能作为国民经济的支柱,在其发展过程中发挥着越来越重要的作用。随着国民经济的飞速发展,对电力系统供电质量及稳定性的要求也越来越高,输电线路的安全运行,直接影响到电网的稳定运行和向用户的可靠供电,在电力系统中占据着举足轻重的地位,关系到国计民生。

雷击是造成高压输电线路跳闸的主要原因。快速准确的雷击定位,不仅能够减轻线路检修人员的工作量,迅速查找线路的雷击故障点,尽快恢复供电,减少停电时间,减轻经济损失,而且能够监测各运行线路的落雷情况,收集雷击数据,为防雷保护研究人员提供参考。对输电线路雷击点的定位问题的研究具有很高的社会意义和经济效益。

## 1 发展现状

传统的雷电定位系统<sup>[1]</sup>LLS(Lightning Location System, LLS)是 20 世纪 70 年代由美国人首先提出并研制的,以后在欧美各国逐步得到广泛的应用,现已成为当前电力系统研究雷电活动最主要的技术手段之一<sup>[1~4]</sup>。目前,雷电定位技术常见的有定向定位、时差定位及“定向+时差”综合定位 3 种技术,其中综合定位结合定向定位和时差定位两者的优点,可充分利用探测到的全部有效数据,剔除方向误差和无

效时间数据,使雷电定位误判次数大大的减少,现在各网省电力系统中得到了广泛的应用<sup>[5~7]</sup>,但受探测站距离、地形地貌、气象条件等复杂因素的影响,存在明显的地区差异<sup>[8~9]</sup>。

由于现有部分故障测距装置不仅能够对输电线路短路故障点进行测距,而且还能够探测到线路上的雷击并对其实施定位,因此可以利用输电线路的故障测距方法来进行雷击定位。

现有故障测距方法主要分为两大类:一是故障分析法,二是行波法<sup>[10]</sup>。故障分析法受过滤电阻和线路不对称等因素的影响,精度不太理想,并且采用工频分量分析计算,不适合雷电定位。行波法由于采用高频分量分析计算,更适合雷电定位,并且不受过滤电阻和线路不对称以及信息提取时间等因素影响。

现有行波测距法包括单端法和双端法。单端行波测距法有两种,一种是通过检测初始行波浪涌到达母线端时刻与故障点反射波到达时刻的时间差,来实现测距,也称为标准模式;另一种是通过检测初始行波浪涌到达母线端时刻与对端母线反射波到达时刻

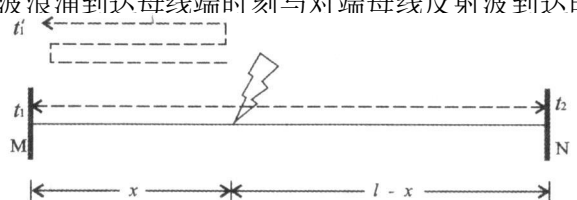


图 1 行波测距原理示意图 1

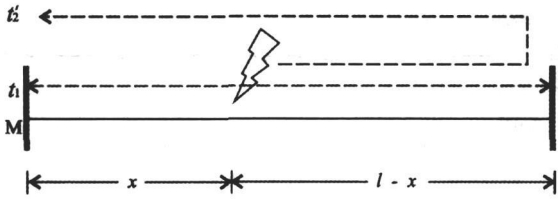


图 2 行波测距原理示意图 2

的时间差,来实现测距,也称为扩展模式<sup>[11~12]</sup>。

设线路全长为  $l$  km,故障点到 M 端母线的距离为  $x$  km,故障点初始行波到达 M 端母线的时间为  $t$ ,故障点反射行波到达 M 母线的时刻为  $t_1'$ ,对端母线反射行波到达 M 母线的时刻为  $t_2'$ ,暂态行波波速为  $v$  对于第一种方法,即标准模式,则有:

$$t_1' - t = \frac{3x - x}{v} = \frac{2x}{v} \quad (1)$$

可得:

$$x = \frac{1}{2} (t_1' - t) v \quad (2)$$

对于第二种方法,即扩展模式,则有:

$$t_2' - t = \frac{2l - x - x}{v} = \frac{2(l - x)}{v} \quad (3)$$

可得:

$$x = l - \frac{1}{2} (t_2' - t) v \quad (4)$$

其中:  $x$  为靠近故障端的母线到故障点的距离。

双端行波测距方法是利用线路内部故障产生的初始行波浪涌到达线路两端测量点的绝对时间之差值计算故障点到两端测量点之间的距离,它需要 GPS 对两端时钟进行同步。设故障初始行波到达 N 端母线的时刻为  $t$ ,则有:

$$t - t = \frac{l - x - x}{v} = \frac{l - 2x}{v} \quad (5)$$

可得:

$$x = \frac{v(t - t) + l}{2} \quad (6)$$

从式 (2)、(4)、(6) 可以看出,无论是单端法还是双端法,其精度主要是由时间参数 (波达时刻) 和速度参数 (行波波速) 来确定的。波速是影响行波法测距精度的一个重要因素。

在波速的确定上,传统的做法是取一个接近光速的值,或者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。由于实际波速的大小与架空线路的架设方式及结构、地形地貌、气象条件、温度等因素有关,

对于不同的线路,同一线路的不同区段,波速是不固定的,采用光速或传统的固定波速的方法不可避免的会带来测距误差。所以,这就需要研究出一种改进的行波测距算法,来消除波速的不确定性所带来的测距误差。

## 2 改进行波雷击定位法

由于传统的行波定位法,无论是单端法还是双端法,其精度主要是由时间参数 (波达时刻) 和速度参数 (行波波速) 来确定的。消除波速对测距的影响是提高测距精度的一个研究重点<sup>[13~15]</sup>。

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,雷击点距离近端母线为  $l$   $\beta_1$ 、 $\beta_2$  分别表示线路两端的反射系数,  $\beta_0$ 、 $\alpha_0$  为雷击点的反射和折射系数。图 3 显示了遭受雷击的线路上行波的传播和折反射情况。

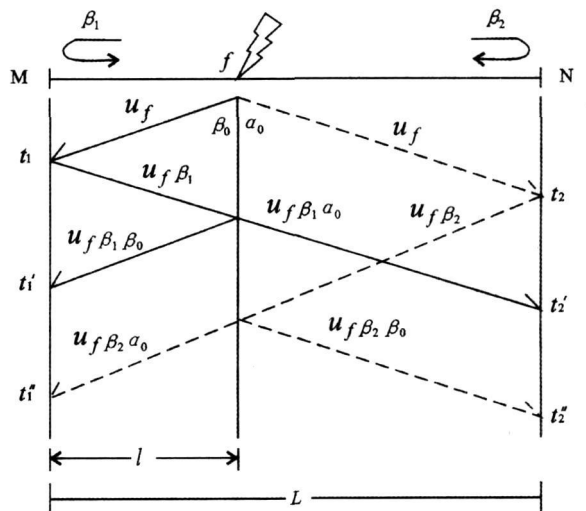


图 3 行波网格图

首先利用小波变换,检测出雷击行波的波达时刻。本方法在定位计算中需要测定的是雷击入射波浪涌和第一个反射波浪涌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。

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波的性质,即确定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波;离雷击点远的母线检测到的第一个反射波是对端母线反射波。

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到达时刻和雷击点反射波到达时刻,  $t_1$ 、 $t_1'$  分别为离雷击点远的一端入射波到达时刻和对端母线反射波到达时刻。

首先比较两端的波达时刻, 确定  $t_1$ 、 $t_1'$ , 进而确定  $t_2$ 。设行波波速为  $v$  可列写方程如下:

$$(t_1' - t_1)v = 2l \quad (7)$$

$$(t_2 - t_1)v = L - 2l \quad (8)$$

联立求解方程组, 可得:

$$l = \frac{(t_1' - t_1)L}{2(t_2 - t_1)} \quad (9)$$

式中不包含波速, 从而实现不受波速影响的雷击点定位。

### 3 仿真分析

选用成都电业局 220 kV 彭云线做仿真来验证此方法的正确性。

仿真输电线路选用彭云线的简化模型, 如图 4 所示。仿真线路为全长 30 km, 电压等级为 220 kV 的三相无损传输线, 输电线路采用频率相关模型 (Frequency Dependent Model), 采样频率为 1 MHz。

用标准双指数雷电波模拟雷击线路时产生的雷电流波形, 国际电工委员会 IEC 将浪涌  $t_1 = 1.2 \mu s$  波长  $t_2 = 50 \mu s$  作为雷电冲击实验的标准波形, 记为  $1.2/50 \mu s$  采用此波形进行仿真计算, 雷击采用标准电流源模型。

线路两端母线处均模拟装设行波测距装置测量仿真波形, 并通过相模变换, 消除三相线路间的电磁耦合, 得到三相线路的  $\alpha$  模分量进行分析计算。仿真时没有考虑测量元件的时延特性, 测得的波形数据利用 Matlab 分析实现多尺度的小波分析。

算例 1: 雷电流为  $1.2/50 \mu s$  标准波形, 幅值为 175 kA, 负极性, 在距 M 端母线 8.5 km 处发生雷击杆塔塔顶事故。

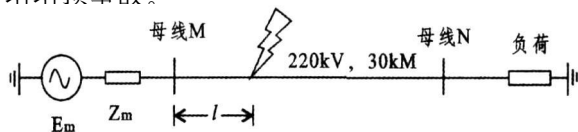


图 4 彭云线仿真系统线路模型

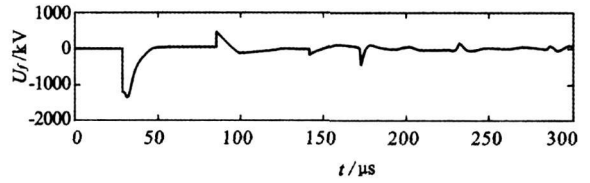


图 5 M 端母线小波分析结果

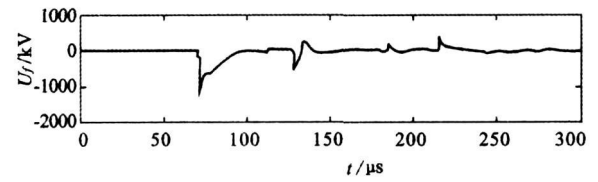


图 6 N 端母线小波分析结果

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:

$$t_1 = 28.5 \mu s \quad t_2 = 71.8 \mu s \quad t_2' = 128.5 \mu s$$

将时间和距离参数代入前面推导的式子可得:  $l = 8.505 \text{ km}$ , 即雷击点离 M 端距离为 8.505 km。绝对误差  $\Delta x = 8.505 - 8.05 = 0.005 \text{ km}$ , 定位误差  $\epsilon = 0.005/30 \times 100\% = 0.017\%$ 。

算例 2: 雷电流为  $1.2/50 \mu s$  标准波形, 幅值为 15 kA, 负极性, 在距 M 端母线 19.5 km 处发生线路绕击。

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 N 端母线比 M 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:

$$t_1 = 35.1 \mu s \quad t_2 = 65.2 \mu s \quad t_2' = 135.2 \mu s$$

将时间和距离参数代入前面推导的算式得:  $l = 10.4865 \text{ km}$ , 即雷击点离 M 端的距离为 19.5105 km。绝对误差  $\Delta x = 19.5105 - 19.5 = 0.0105 \text{ km}$ , 定位误差  $\epsilon = 0.0105/30 \times 100\% = 0.035\%$ 。

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,采用前面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的双端定位法(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 (%)
20	2.5	2.485 0	0.075	2.570 4	0.352
	9.3	9.295 4	0.023	9.304 4	0.022
	14.1	14.101 8	0.009	14.055 2	0.276
40	7.6	7.604 8	0.012	7.745 6	0.364
	13.8	13.793 1	0.017	13.872 8	0.182
	24.3	24.287 9	0.030	24.232 8	0.168

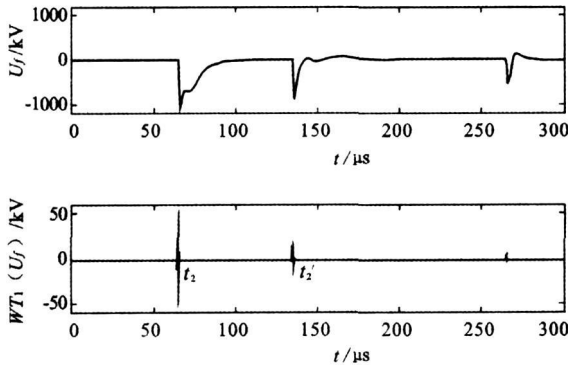


图 7 M 端母线小波分析结果

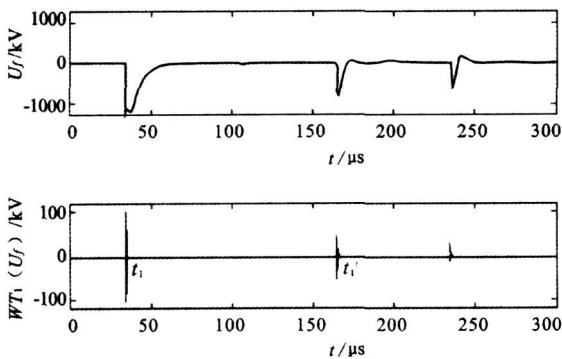


图 8 N 端母线小波分析结果

可见,选取固定波速的传统双端定位法定位误差较大,这是由于线路的波速不是一个定值,它受到线路参数变化、气候环境等因素的影响。采用的改进方法,其算法本身并不包括波速这个物理量,所以不受波速变化的影响,其定位精度有了明显的提高。

通过以上的分析和计算可以看出,采用的雷击定位算法是可行和有效的。改进的行波测距方法能准确地计算出线路上发生雷击的位置,若以 1 MHz 的

采样频率对信号进行采样,其理论定位精度高于雷电定位系统的定位精度。

### 4 结论

分析了现有雷电定位系统中各种定位方法的优点与不足,在行波理论的基础上采用了一种改进的双端行波输电线路雷击定位方法,该方法根据行波传播原理,构造了不含波速的表达式,消除了波速的不确定性给测距带来的误差,并用系统中实际线路进行仿真分析加以验证,证明其实用价值。由于方法消除了波速的不确定性所带来的误差,相对于采用固定波速的传统双端定位法,理论定位精度明显高于传统双端行波定位法。

### 参考文献

- [1] 张畅生,方子帆. GPS 及其在雷电定位系统中的应用 [J]. 现代电力, 2002, 19(2): 43-49.
- [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): 3-6.
- [3] 赵文光,陈家宏,张勤,等. 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] 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.
- [5] 顾承显. 雷电定位技术在华东电网中的应用 [J]. 华东电力, 2004, 32(1): 1-3.
- [6] 张新华. 湖北电力雷电定位系统运行分析 [J]. 湖北电力, 2004, 28(2): 14-15.
- [7] 张建春. 雷电定位系统在湖南永州的应用分析 [J]. 高电压技术, 2003, 29(8): 55-56.
- [8] 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.
- [9] 张勤,赵文光,王光财,等. 新的综合雷电定位系统的误差计算 [J]. 高电压技术, 2002, 26(2): 54-55.
- [10] 全玉生,杨敏中,王晓蓉,等. 高压架空输电线路的故障测距方法 [J]. 电网技术, 2000, 24(4): 27-3.
- [11] 陈平,葛耀中,徐丙垠,李京. 现代行波故障测距原理及其在实测故障分析中的应用——A 型原理 [J]. 继电器, 2004, 32(2): 13-18, 43.
- [12] 陈平,葛耀中,徐丙垠,李京. 现代行波故障测距原理及其在实测故障分析中的应用——D 型原理 [J]. 继电器, 2004, 32(3): 14-17, 28.
- [13] 覃剑,陈祥训,郑健超. 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.

(下转第 59 页)

机构“合一 > 分”过程中(即第二次保护过流一段 [0s] 动作发跳闸命令出口时)因某种原因,开关辅助接点切换未到位所致,最终造成事发时越级跳闸的事故。

### 2.3 原因

经过多次的试验发现,当故障电流超过速断电流 [二次值: 17.5 A] 的两倍且断路器重合闸于永久性故障时,跳圈动作后均不能成功分闸;当故障电流在速断电流的 1 到 1.5 倍且断路器重合于永久性故障时,保护和机构均能正确跳闸。反复观察,发现断路器每次不能加速跳闸都是因为断路器分闸弹簧未完全储好能的时候,断路器接到跳闸命令,此时分闸辅助接点已经接通,跳闸命令发出使跳圈动作,造成分闸弹簧释能,机构主轴动作到半分合状态并静止,辅助接点动作到中间间隙状态,开关触头仍在合闸状态,断路器跳闸不成功。

仔细分析开关机构完整的合闸过程:接通合闸电磁铁电源或用手按压合闸按钮,合闸掣子被解脱,储能轴在合闸弹簧力的作用下反向转动,凸轮压在三角杠杆上的滚针轴承,杠杆上的连杆将力传给开关主轴,导电杆向上运动,主轴转动约 60 度时被分闸掣子锁住,开关合闸。在此过程中,分闸弹簧被储上能,绝缘拉杆上触头弹簧亦被压缩,给触头施加了一定压力。完整的分闸过程:接通分闸电磁铁电源或用手按压分闸按钮,分闸掣子解脱,主轴在分闸弹簧和触头弹簧力的作用下反向旋转,开关分闸。

如在分闸弹簧尚未完全储好能的情况下发出分闸脉冲,则分闸将失败。

一旦出现这种情况,只有在断路器重新对合闸弹簧储好能后,将会使机构往合闸方向动作,完成对分闸弹簧的继续储能,分闸辅助接点导通,断路器才能分闸。经测试速断电流越大保护动作时间越短。原因在于微机保护的电流采集工频变化量保护故障电流计算采用实时波形半周积分求面积的方法,故障电流幅值越大,达到定值整定要求的时间越短。经实测,当故障电流在 1.2 倍速断整定电流时保护出口时

间为 30 ms 当故障电流为 10 倍速断整定电流时保护出口时间为 15 ms 也就是说断路器还未完成合闸的前半过程,对分闸弹簧未完全储好能,保护却已发出跳闸命令,此时分闸辅助接点已经接通,分闸线圈动作,断路器肯定分闸不成功。针对分闸命令过早发出而产生的拒动现象,对速断保护增加 100 ms 的延时,重复以上故障断路器均能正确动作跳闸。

确定原因后,针对这一现象专门对多台 ZN-12 型开关进行了广泛的比较性试验,发现都存在开关的“合一 > 分”过程中因间隙时间过短,开关分闸不成功的现象。

由于开关在分闸、合闸过程中机构和辅助接点以及开关本体存在一定的动作时间,该型号的真空开关在开关本体触头从大电流接近放电到开关分闸弹簧储能结束的时间大于 15 ms 且与分闸弹簧初始张弛程度有关;而微机保护故障电流在 1.2 倍整定值时,保护出口时间为 30 ms 故障电流在 10 倍整定值时,保护出口时间为 15 ms 因此如果保护整定时间与开关机构合分固有动作时间配合协调不好时有可能使开关拒动,合闸于故障时将扩大事故范围。

## 3 防范措施

经调度部门同意,将使用了 ZN-12 型开关的所有线路速断保护时间定值由 0s 延长为 100 ms。同时,检修人员在对设备进行安装、检修及试验性检查时,必须认真仔细,各个环节均应检查到位。必须熟悉设备的性能和技术参数,才能做到心中有数。继电保护定值整定时应结合一次设备机构机械性能和实际测试的分、合闸时间参数,综合考虑保护的各种时限,采取必要措施确保保护时限与开关动作时限相匹配,有效避免事故的发生。

### 黄勇简介

黄勇,男,1971 年出生,工程师,宜宾电业局谱电工区主任。  
(收稿日期:2008-05-05)

(上接第 57 页)

2007, 33(1): 86-90.

[14] 覃剑. 输电线路单端行波故障测距的研究 [J]. 电网技术, 2005, 29(15): 65-70.

### 作者简介

刘敏,女,1974 年生,成都电业局继电保护所。

[15] 吴昊,肖先勇. 基于小波变换和行波理论的输电线路雷击点定位新方法 [J]. 高电压技术,

(收稿日期:2008-05-15)