

DOI: 10.7667/PSPC150993

# 输电线路雷击组合测距新算法

郭小红, 朱永利, 陈旭, 赵磊, 高艳丰

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 针对现有输电线路雷击定位方法存在的诸多缺点, 提出一种新的测距算法。该算法综合考虑雷电定位系统(LLS)和单端行波测距法的特点及适用性。首先利用现有 LLS 判断出雷击的大致距离, 然后利用该距离及线路参数来准确识别故障点反射波和对端母线反射波到达测量端的时刻, 进而利用单端行波测距法精确测得雷击距离。该算法克服了地理环境、探测站距离等因素对 LLS 定位精度的影响, 以及单端行波测距因无法准确辨识故障特征波前而导致测距精度无法保证的不足。在雷击故障时, 测距公式充分利用测量数据, 消除了波速不确定的影响, 并在一定程度上消除了弧垂和线路长度变化对其带来的影响。EMTP 仿真结果验证了该算法的正确性, 并且测距精度得到很大的提高。

**关键词:** 输电线路; 雷击定位; 组合测距; 行波; LLS; 测距死区

## A new combined lightning locating algorithm for transmission lines

GUO Xiaohong, ZHU Yongli, CHEN Xu, ZHAO Lei, GAO Yanfeng

(School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** For the defects of existing lightning location methods for transmission lines, a new combined lightning locating algorithm is proposed. It takes into account the characteristics and application of Lightning Location System (LLS) and one terminal location methods. Firstly, existing LLS is adopted to recognize the lightning distance approximately. Then, the accurate arriving times of wave fronts are obtained with this approximate distance and the line parameters, which involve the reflected wave fronts from the fault point and the opposite terminal of fault line. Finally, accurate results are obtained with one terminal location methods. The algorithm overcomes not only the effects of the geographical environment, detection stations distance and other factors on the locating accuracy of LLS, but also the shortage that the locating accuracy of the single-ended traveling wave method can not be guaranteed because of the difficulty in recognizing traveling-wave fronts. Under lightning stroke fault, locating formula makes full use of measured data, which eliminates the effects of velocity's uncertainty and the error brought by the conductor sag and the change of line length on the measurement data to a certain extent. The EMTP simulation results verify that the algorithm is correct, and lightning locating accuracy is greatly improved.

**Key words:** transmission lines; lightning location; combined lightning location; traveling wave; LLS; dead zone of fault location

## 0 引言

准确的输电线路故障测距不仅对及时修复线路和保证可靠供电, 而且对电力系统的安全稳定和经济运行都有十分重要的作用<sup>[1]</sup>。而高压输电线路距离长, 跨越的地理环境比较复杂, 容易遭受雷击, 故对于雷击的定位具有重要的意义<sup>[2]</sup>。故障测距可分为故障分析法和行波法。由于故障分析法测距精度不高, 故行波法是现在研究的热点<sup>[3-5]</sup>。

许多学者对于雷击利用行波测距原理定位进行了研究<sup>[6-10]</sup>。行波测距原理分为单端行波测距和双端行波测距。

双端行波测距法需要双端同步, 设备投资大, 即使采用 GPS 时钟同步定位系统, 考虑到硬件延时、采样率差别等因素引起的误差, 也很难做到完全同步的数据, 故测距结果误差比较大<sup>[11]</sup>。

单端行波测距法原理简单, 不需要时标系统及两端通信系统, 设备投资小; 不受线路长度误差、

线路两侧一二次设备和相关硬件时间差等因素的影响,故测距精度较高。但一旦不能正确识别故障点反射波和对端母线反射波<sup>[12-13]</sup>,测距精度将无法保证。因此,单端行波测距法很难作为独立的测距方法单独使用来满足电力系统对精确定位的要求。

目前,我国已在全国95%的省网中建立了省域LLS,即采用综合雷电定位系统(基于定向定位和时差定位2种技术)。LLS易于实现雷击定位。但由于受地理环境、探测站的距离等因素的影响,故其定位精度不高,其实测误差在1~3 km范围内<sup>[14-16]</sup>。

基于上述单端行波测距和LLS的特点和适用性,本文提出一种新的组合测距算法对雷击进行定位。将单端行波测距法与已有的LLS进行组合,对雷击输电线路进行雷击定位。这样既克服了单端行波测距识别反射波困难而导致测距精度无法保证的缺点,又克服了LLS受地理环境、探测站距离等因素影响而导致测距精度不高的不足,从而实现了雷电的精确定位。仿真表明,这种组合测距算法能在很大程度上提高雷击的测距精度。

## 1 相模变换与小波奇异点检测理论

由于输电线路各相之间存在电磁耦合,采用文献[17]中的相模变换,变换矩阵如式(1)。

$$S^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & -3 \\ 1 & -3 & 2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

考虑到地模分量的波速受大地电阻率、过渡电阻等影响,存在严重的衰减,参数随频率变化比较大,并且行波衰减较为严重,行波波速不稳定,对雷击定位的测距精度影响比较大<sup>[18]</sup>,故采用线模分量进行雷击定位分析。

对任意能量有限的信号 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换定义为

$$W_{\psi} f(s, x) = f(t) \times \psi_s(t) = |s|^{-\frac{1}{2}} \int_R f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-x}{s}\right)} dt \quad (2)$$

其中: $s$ 为尺度伸缩因子; $x$ 为时间平移因子; $\psi(t)$ 为一个基本小波或母小波; $\overline{\psi(t)}$ 是 $\psi(t)$ 的复共轭。

若 $s$ 、 $x$ 取离散值 $s=s_0^m$ ,  $x=nx_0s_0^m$ ,  $s_0>1$ ,  $x_0>1$ ,  $m$ 、 $n$ 取任意整数,即得到 $f(t)$ 的离散小波变换。

多分辨率分析是运用小波作时频分析的常用分析方法:在满足采样定理的前提下,利用低通滤波器 $h(n)$ 和高通滤波器 $g(n)$ 对采样信号 $f(n)$ 进行二频带划分,分解为细节系数和近似系数,再将近似系数继续进一步分解为两系数,而细节系数不再分

解。如此重复可得到任意尺度下的细节系数 $d_j(n)$ 和逼近系数 $c_j(n)$ 。信号在第 $j+1$ 层分解尺度如下:

$$\begin{cases} c_{j+1}(n) = \sum_k h(k-2n)c_j(n) \\ d_{j+1}(n) = \sum_k g(k-2n)c_j(n) \end{cases} \quad j=1, 2, \dots, N \quad (3)$$

其中, $N$ 为信号小波分解层数,尺度越高,则频带越低。

小波变换具有多分辨率及“变焦性”的特点,在信号的奇异性检测中得到广泛应用。信号的奇异值检测常利用小波变换的模极大值原理,其定义如下。

设信号 $f(t)$ 的小波变换是 $W_{\psi} f(s, x)$ ,则 $W_{\psi} f(s, x)$ 在尺度 $s$ 下,对任意 $x \in (x_0 - \delta, x_0 + \delta)$ ,有

$$|W_{\psi} f(s, x)| < |W_{\psi} f(s, x_0)| \quad (4)$$

则称 $x_0$ 为小波变换在尺度 $s$ 下的模极大值点。

若函数在某点间断或者某阶导数不连续,则称函数在该点具有奇异性,称该点为函数的奇异点。这些奇异点与小波变换的模极大值点一一对应,因此,可以用小波变换的模极大值来检测信号的奇异点。输电线路遭受雷击后出现的暂态行波,具有非常明显的奇异性,因此,可以通过对监测点处雷击暂态电流行波的线模分量进行小波变换,提取模极大值对应时刻,从而实现雷击定位计算。

研究表明, $B$ 样条小波光滑且对称,在所有多项式样条函数中具有最小支撑,有近似最小的时频窗,而三次 $B$ 样条小波在具有噪声情况下检测信号的奇异性是渐近最优的<sup>[19]</sup>,因此本文选用三次 $B$ 样条小波函数分析行波信号。

## 2 组合测距原理

单端行波法线路故障如图1所示。设线路全长为 $l$ , $t_1$ 为故障行波到达 $m$ 端的时刻, $t_2$ 为故障点反射波到达 $m$ 端的时刻, $t_3$ 为对端母线反射波到达 $m$ 端的时刻,故障行波的波速设为 $v$ ,则故障点 $f$ 距 $m$ 端的距离 $x$ 为

$$x = \frac{t_2 - t_1}{2} v \quad (5)$$

$$x = l - \frac{t_3 - t_1}{2} v \quad (6)$$

雷击输电线路按雷电强度可分为雷击故障与雷击未故障。对于雷击故障与雷击未故障的识别可采用文献[20-21]。由于雷击故障时有故障行波经故障点的反射波,而雷击未故障时并不存在故障行波经故障点的反射波,故本文对雷击定位分雷击故障与雷击未故障两种情况进行分析。

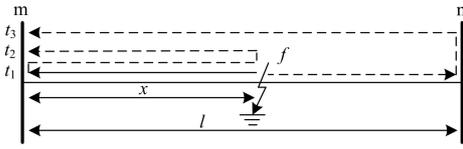


图 1 单端行波法故障定位示意图

Fig. 1 Fault location schematic diagram of the single-ended traveling wave method

对于雷击输电线路发生故障时, 大多数情况下, 故障点与雷击点之间的距离在数座杆塔之内, 故可近似认为故障点与雷击点一致。本文对雷击输电线路故障时仅考虑故障点与雷击点相一致的情况。

利用单端行波原理对雷击进行故障定位时, 由于不易识别故障点的反射波与对端母线反射波到达 m 端的时刻, 而利用 LLS 求出的雷电点的误差又较大, 故可以先利用 LLS 得到故障距离的大致范围  $x'$ , 由式(5)、式(6)可得到故障点反射波与对端母线反射波到达 m 端的大概时刻  $t'_2$ 、 $t'_3$  分别为

$$t'_2 = \frac{2x'}{v} + t_1 \quad (7)$$

$$t'_3 = \frac{2(l-x')}{v} + t_1 \quad (8)$$

利用小波分析的模极大值原理, 分别在模极大值图形中  $[t'_2 - \mu, t'_2 + \mu]$  与  $[t'_3 - \mu, t'_3 + \mu]$  时刻内寻找模极大值(其中  $\mu$  为最大误差), 分别标定故障点的反射波与对端母线反射波到达的时刻  $t_2$ 、 $t_3$ 。

求得  $t_2$ 、 $t_3$  的时刻, 反带入式(5)或式(6)可求得故障距离。

当利用式(5)或式(6)求故障距离时, 由于行波波速具有色散现象不易确定<sup>[18]</sup>, 故求得的误差较大。并且在实际电网系统中输电线路的长度是杆塔间的距离, 并没有考虑弧垂与线路长度变化的影响, 当考虑弧垂与线路长度变化的影响时, 输电线路长度变化的范围可达到  $0.9l \sim 1.1l$ (分别对应于冬天和夏天)<sup>[22]</sup>, 而雷击经常发生在炎热的夏季, 这时输电线路长度的变化能到达  $1.1l$ 。当近似认为线路杆塔档距和弧垂变化相等的情况下, 即认为现场线路长度放大一定增益系数  $\varepsilon$  后的数值<sup>[23]</sup>, 则式(5)、式(6)变为

$$\xi x = \frac{t_2 - t_1}{2} v \quad (9)$$

$$\xi x = \xi l - \frac{t_3 - t_1}{2} v \quad (10)$$

其中,  $x$  为故障距 m 端的地面距离, 即杆塔间的距离。则由式(9)、式(10)可得

$$x = \frac{t_2 - t_1}{t_2 + t_3 - 2t_1} l \quad (11)$$

从式(11)可看出, 求得的故障距离公式中消去了波速  $v$ , 并且在一定程度上消除了线路弧垂与线路长度变化的影响。

由于 LLS 定位误差在  $1 \sim 3$  km, 在考虑极端情况下, 当 LLS 定位误差在  $\pm 3$  km 时, 由  $x = v(t_1 - t_0)$  (其中  $t_0$  为故障发生的绝对时刻), 可求得的  $t_1$  的误差为  $\pm 3/v$ ; 由式(7)、式(8)可求得  $t'_2$ 、 $t'_3$  与真实的  $t_2$ 、 $t_3$  的最大误差都为  $\pm 9/v$ 。故要使  $[t'_2 - \mu, t'_2 + \mu]$ 、 $[t'_3 - \mu, t'_3 + \mu]$  分别包含  $t_2$ 、 $t_3$ ,  $\mu$  的值应不小于  $9/v$ 。当考虑输电线路长度变化  $\varepsilon$  倍时,  $\mu$  的值应不小于  $9\varepsilon/v$ , 考虑极端情况下, 即线路长度变化  $1.1l$  时, 则  $\mu$  的值应不小于  $9.9/v$ 。

当  $[t'_2 - \mu, t'_2 + \mu]$  包含  $t_3$  或者  $[t'_3 - \mu, t'_3 + \mu]$  包含  $t_2$  时, 分辨不清哪个是故障点的反射波, 哪个是对端母线的反射波。

令  $[t'_2 - \mu, t'_2 + \mu]$  包含  $t_3$  或者  $[t'_3 - \mu, t'_3 + \mu]$  包含  $t_2$ , 在极端情况下, 由式(5)~式(8)可得

$$\begin{aligned} \frac{2x'}{v} \pm \mu &= \frac{2(l-x)}{v} \\ \frac{2(l-x')}{v} \pm \mu &= \frac{2x}{v} \end{aligned} \quad (12)$$

当 LLS 得到雷击距离的大致范围  $x'$  与实际雷击距离  $x$  相差 3 km 时, 由式(12)可得

$$x = \frac{l}{2} - \frac{6 \pm v\mu}{4} \quad (13)$$

由上述分析可知, 当雷击输电线路发生故障时, 雷击点发生在  $[\frac{l}{2} - \frac{6+v\mu}{4}, \frac{l}{2} - \frac{6-v\mu}{4}]$  之间时, 有可能使  $[t'_2 - \mu, t'_2 + \mu]$  包含  $t_3$  或者  $[t'_3 - \mu, t'_3 + \mu]$  包含  $t_2$ , 即存在分辨不清故障点反射波还是对端母线反射波的死区范围为  $[\frac{l}{2} - \frac{6+v\mu}{4}, \frac{l}{2} - \frac{6-v\mu}{4}]$ 。在这时可在模极大值图形中  $[t'_2 - \mu, t'_2 + \mu]$  或者  $[t'_3 - \mu, t'_3 + \mu]$  范围时刻内寻找模极大值对应的时刻为  $m_1$ 、 $m_2$ , 令  $t_2 = m_1$ ,  $t_3 = m_2$  和  $t_3 = m_1$ ,  $t_2 = m_2$  分别代入式(11), 在人工巡线时, 对这两处附近重点检查即可。

当雷击输电线路无故障时, 由于不存在故障点的反射波, 只有对端母线的反射波, 故只需找到对端母线的反射波到达 m 端的时刻  $t_3$  即可, 可利用在模极大值图形中  $[t'_3 - \mu, t'_3 + \mu]$  时刻内寻找模极大值, 标定为对端母线反射波到达的时刻  $t_3$ 。利用式(7)即可得到雷击点距 m 端的距离  $x$ 。

### 3 仿真实验

本文采用 ATP-EMTP 进行仿真实验。仿真系统

线路模型如图 2 所示, 仿真系统的电压等级为 500 kV, 输电线路采用 JMARTI 频率相关特性的架空线, 全长 200 km。

输电线路的正序和零序参数分别为:  $R_1=0.0212 \Omega/\text{km}$ ,  $L_1=0.8872 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $C_1=0.0131 \mu\text{F}/\text{km}$ ;  $R_0=0.1251 \Omega/\text{km}$ ,  $L_0=2.3915 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $C_0=0.00483 \mu\text{F}/\text{km}$ 。根据线路参数可求得线模的波速为  $v=293.33 \text{ m}/\mu\text{s}$ 。

m 侧系统参数为:  $R_{M1}=1.0515 \Omega$ ,  $L_{M1}=80.154 \text{ mH}$ ,  $R_{M0}=0.6 \Omega$ ,  $L_{M0}=63.4 \text{ mH}$ ; n 侧系统参数为:  $R_{N1}=8.76 \Omega$ ,  $L_{N1}=102.54 \text{ mH}$ ,  $R_{N0}=2.53 \Omega$ ,  $L_{N0}=78.823 \text{ mH}$ 。

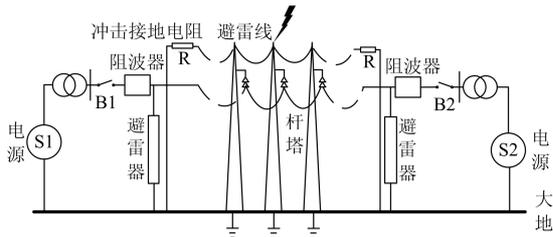


图 2 500 kV 仿真系统线路模型

Fig. 2 Line model used for the 500 kV simulation system

雷电流采用 Heiler 模型<sup>[24]</sup>, 其模型参数为

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \times \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} \exp(-t/\tau_2) \quad (14)$$

$$\eta = \exp\left(-\frac{\tau_1}{\tau_2} (n \frac{\tau_2}{\tau_1})^{1/n}\right) \quad (15)$$

其中:  $I_0$  为通道头部电流幅值;  $\tau_1$  为前沿时间常数;  $\tau_2$  为延迟时间常数;  $\eta$  为幅值校正因子;  $n$  为常数, 值域[2, 10]。

考虑到实际中电流互感器能有效地传输高频分量, 本文采用电流行波进行雷击定位, 采用频率为 1 MHz。

表 1 列出了雷击故障时, 本文所提方法对雷击的测距结果。由表 1 可看出, 在 LLS 误差较大时,

表 1 雷击故障时测距的仿真结果

Table 1 Simulation results of fault location under lightning stroke fault

雷击 距离/ km	LLS 距离/ km	时刻/ $\mu\text{s}$					计算 距离/ km
		$t_1$	$t'_2$	$t'_3$	$t_2$	$t_3$	
20	17	56	171.9	1303.7	191	1282	19.838
50	47	159	479.5	1202.2	498	1180	49.853
80	83	281	846.9	1078.7	826	1098	80.029
110	113	383	1153.5	976.2	1133	995	110.132
130	127	430	1295.9	927.7	1319	906	130.256
150	147	498	1500.3	859.4	1517	840	149.743
170	173	588	1767.6	772.1	1745	793	169.897
190	193	657	1972.9	704.7	1951	727	189.736

本文所提方法大大降低了 LLS 的测距误差, 能满足电力系统的误差范围, 具有较高的测距精度。

表 2 列出了雷击未故障时, 本文所提方法对雷击的测距结果。由表 2 可看出, 在雷击未故障时, 本文所提方法也能大幅度降低 LLS 的测距误差, 并具有较高的测距精度。

表 2 雷击未故障时测距的仿真结果

Table 2 Simulation results of lightning location under lightning stroke non-fault

雷击 距离/km	LLS 距离/km	时刻/ $\mu\text{s}$			计算 距离/km
		$t_1$	$t'_2$	$t_3$	
30	27	92	1271.6	125	29.723
50	47	159	1202.2	1180	50.256
70	67	228	1134.8	1116	69.762
90	93	316	1045.6	1065	90.149
110	107	383	976.2	995	110.242
140	143	487	875.6	898	139.721
160	157	534	827.2	808	159.814
180	183	622	737.9	759	179.907

表 3 列出了输电线路发生雷击故障, 当考虑线路长度变化 1.1l 时, 本文方法的测距结果(其中雷击距离与计算距离为杆塔间的距离)。由表 3 可知, 在雷击故障时, 本文所提方法也能适用于输电线路长度变化的情况, 从测距结果可看出, 本文方法能有效地克服输电线路长度的变化。

表 3 雷击故障时考虑输电线路长度变化的测距仿真结果

Table 3 Simulation results of fault location considering change of line length under lightning stroke fault

雷击 距离/ km	LLS 距离/ km	时刻/ $\mu\text{s}$					计算 距离/ km
		$t_1$	$t'_2$	$t'_3$	$t_2$	$t_3$	
20	17	76	203.5	1448.5	225	1428	19.853
50	47	188	540.5	1335.5	562	1315	49.833
80	83	301	923.5	1178.5	903	1200	80.213
110	113	413	1260.5	1065.5	1237	1090	109.794
130	127	487	1439.5	1034.5	1462	1013	129.913
150	147	561	1663.5	958.5	1687	935	150.133
170	173	636	1933.5	838.5	1911	863	169.774
190	193	713	2160.5	765.5	2139	786	190.260

由第 2 小节分析可知, 可求得  $\mu$  约为  $34 \mu\text{s}$ , 故当雷击故障大约发生在距 m 端 95~104 km 处, 有可能分辨不清故障点的反射波和对端母线的反射波。如当雷击故障距 m 端 99 km, 由 LLS 求得的故障距离为 101 km。由模极大值图形可得初始行波到达 m 端的时刻  $t_1$  为  $345 \mu\text{s}$ , 由式(7)、式(8)可求得  $t'_2$ 、 $t'_3$  分别为  $1033.6 \mu\text{s}$ 、 $1020 \mu\text{s}$ , 需要在  $999.6 \sim 1067.6 \mu\text{s}$  时刻内寻找  $t_2$ , 在  $986 \sim 1054 \mu\text{s}$  时刻内寻找  $t_3$ , 而在

模极大值图中, 在 999.6~1 067.6  $\mu\text{s}$  或者 986~1 054  $\mu\text{s}$  时刻内都有两个时刻 1 019、1 035  $\mu\text{s}$ , 在这时分辨不清故障点的反射波和对端母线的反射波。分别令  $t_2=1 019 \mu\text{s}$ ,  $t_3=1 035 \mu\text{s}$  和  $t_2=1 035 \mu\text{s}$ ,  $t_3=1 019 \mu\text{s}$  带入式(11), 可得雷击故障距 m 端的距离为 98.827 km 和 101.173 km。在人工巡线时, 对这两处重点检查, 很容易查找到故障点。

#### 4 结论

(1) 利用 LLS 定位出雷击的大概距离来准确识别故障点反射波和对端母线反射波达到测量端的时刻。该算法既克服了现有的 LLS 定位误差比较大的缺点, 又弥补了单端行波测距法无法准确识别故障特征波前而导致测距精度无法保证的不足。

(2) 雷击故障时, 充分利用测量的数据推导出定位公式, 该公式既消除了波速, 又在一定程度上消除了弧垂和线路长度变化对其带来的影响; 并给出了雷击故障时有可能分辨不清故障点反射波和对端母线反射波的死区范围。

(3) 由 EMTP 仿真和计算结果可知, 该方法有效克服了 LLS 和单端行波测距的缺点, 大大提高了其雷击测距的精度, 且计算量小, 简单易行, 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]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996: 56-57.
- [2] 陈小雄, 黄新波, 朱永灿, 等. 输电线路雷击故障点远程定位位置的设计[J]. 高压电器, 2013, 49(7): 53-59. CHEN Xiaoxiong, HUANG Xinbo, ZHU Yongcan, et al. Design of the remote location device for lightning strike fault point on transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(7): 53-59.
- [3] 刘慧海, 张晓莉, 姜博, 等. 行波故障测距装置的检测与评价[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 145-149. LIU Huihai, ZHANG Xiaoli, JIANG Bo, et al. Testing and evaluation method of location equipment based on traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 145-149.
- [4] 陈仕龙, 谢佳伟, 毕贵红, 等. 一种特高压直流输电线路神经网络双端故障测距新方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 257-264. CHEN Shilong, XIE Jiawei, BI Guihong, et al. A novel two terminal fault location method used ANN for UHVDC transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 257-264.
- [5] 司马文霞, 陈伟, 杜林, 等. 基于输电网中故障行波分布和网络依赖图的故障定位算法[J]. 高压电器, 2010, 46(6): 45-49. SIMA Wenxia, CHEN Wei, DU Lin, et al. A fault location method of high voltage grid transmission line based on overvoltage online monitoring signal[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(6): 45-49.
- [6] 马仪, 申元, 王磊, 等. 基于行波理论的输电线路雷击定位方法研究与应用[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1382-1390. MA Yi, SHEN Yuan, WANG Lei, et al. Lightning fault location method and its application for transmission line based on traveling wave method[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5): 1382-1390.
- [7] 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. WU Hao, XIAO Xianyong. Lightning strike location of transmission line based on wavelet transform and traveling wave theory[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 86-90.
- [8] 高艳丰, 朱永利, 闫红艳, 等. 基于 VMD 和 TEO 的高压输电线路雷击故障测距研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 24-33. GAO Yanfeng, ZHU Yongli, YAN Hongyan, et al. Study on lightning fault locating of high-voltage transmission lines based on VMD and TEO[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 24-33.
- [9] 姚陈果, 吴昊, 王琪, 等. 基于非接触式雷电流测量装置的新型线路分布式雷击故障定位方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2894-2902. YAO Chenguo, WU Hao, WANG Qi, et al. Novel distributed lightning fault location method for transmission line based on non-contact measurement device of lightning current[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2894-2902.
- [10] 郭宁明, 覃剑. 输电线路雷击故障情况下的短路点定位方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 74-77. GUO Ningming, QIN Jian. Location method of short-circuit point for transmission lines under lightning stroke fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 74-77.
- [11] 何军娜, 陈剑云, 艾颖梅, 等. 电力系统行波测距方法及其发展[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 148-153. HE Junna, CHEN Jianyun, AI Yingmei, et al. Fault location methods based on traveling wave theory for power system and its development[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 148-153.
- [12] 郑秀玉, 丁坚勇, 黄娜. 输电线路单端故障定位的阻抗-行波组合算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010,

38(6): 18-21.  
 ZHENG Xiuyu, DING Jianyong, HUANG Na. Impedance-traveling wave assembled algorithm of one-terminal fault location for transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 18-21.

[13] 马丹丹, 王晓茹. 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, 39(3): 55-59.  
 MA Dandan, WANG Xiaoru. Single terminal methods of traveling wave fault location based on wavelet modulus maxima[J]. Power System Protection and Control, 2009, 39(3): 55-59.

[14] 赵文光, 陈家宏. 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.  
 ZHAO Wenguang, CHEN Jiahong. Position computation on new combined lightning location system[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(4): 66-68.

[15] 樊灵孟, 李志峰, 何宏明, 等. 雷电定位系统定位误差分析[J]. 高电压技术, 2004, 30(7): 61-63.  
 FAN Lingmeng, LI Zhifeng, HE Hongming, et al. Analysis of location error of Guangdong lightning location system[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(7): 61-63.

[16] 司文荣, 陆茂鑫, 王月强, 等. 新一代雷电监测与定位系统研究[J]. 华东电力, 2014, 42(12): 2889-2894.  
 SI Wenrong, LU Maoxin, WANG Yueqiang, et al. A new generation of lightning detection and location system for shanghai power grid[J]. East China Electric Power, 2014, 42(12): 2889-2894.

[17] 宋国兵, 李森, 康小宁, 等. 一种新相模变换矩阵[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 57-60.  
 SONG Guobing, LI Sen, KANG Xiaoning, et al. A novel phase-mode transformation matrix[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 57-60.

[18] 覃剑, 陈祥训, 郑健超. 行波在输电线上传播的色散研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(9): 27-30.  
 QIN Jian, CHEN Xiangxun, ZHENG Jianchao. Study on dispersion of travelling wave in transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(9): 27-30.

[19] 束洪春, 田鑫萃, 董俊, 等. 利用故障特征频带和 TT 变换的电缆单端行波测距[J]. 中国电机工程学报, 2013, 36(22): 103-112.  
 SHU Hongchun, TIAN Xincui, DONG Jun, et al. A single terminal cable fault location method based on fault characteristic frequency band and TT transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 36(22): 103-112.

[20] 段建东, 任晋峰, 张保会, 等. 超高速保护中雷电干扰识别的暂态法研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 26(23): 7-13.  
 DUAN Jiandong, REN Jinfeng, ZHANG Baohui, et al. Study of transient approach of discriminating lightning disturbance in ultra-high-speed protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 26(23): 7-13.

[21] 束洪春, 曹璞璘, 杨竞及, 等. 考虑互感器传变特性的输电线路暂态保护雷击干扰与线路故障识别方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 1-12.  
 SHU Hongchun, CAO Pulin, YANG Jingji, et al. A method to distinguish between fault and lightning disturbance on transmission lines based on CVT secondary voltage and CT secondary current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 1-12.

[22] 梁军, 麻常辉, 负志皓. 基于线路参数估计的高压架空输电线路故障测距新算法[J]. 电网技术, 2004, 28(4): 60-63.  
 LIANG Jun, MA Changhui, YUN Zhihao. A fault location algorithm for high voltage overhead power transmission line based on line parameter estimation[J]. Power System Technology, 2004, 28(4): 60-63.

[23] 郑州, 吕艳萍, 王杰, 等. 基于小波变换的双端行波测距新方法[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 203-207.  
 ZHENG Zhou, LÜ Yanping, WANG Jie, et al. A new two-terminal traveling wave fault location method based on wavelet transform[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 203-207.

[24] 陈水明, 何金良, 曾嵘. 输电线路雷电防护技术研究(一): 雷电参数[J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 2903-2909.  
 CHEN Shuiming, HE Jinliang, ZENG Rong. Lightning protection study of transmission line, part I: lightning parameters[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 2903-2909.

收稿日期: 2015-06-14; 修回日期: 2016-01-18

作者简介:

郭小红(1990-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为输电线路雷击综合定位和电力系统运行、分析与控制; E-mail: guoxiaohong\_hd@126.com

朱永利(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为输变电设备状态在线监测、智能分析和智能电网, 功率电子变换技术等;

陈旭(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为输电线路故障定位和电力系统运行、分析与控制。

(编辑 姜新丽)