

DOI: 10.7667/PSPC151514

输电线路雷击点与闪络点不一致的辨识与定位

马仪¹, 黄然¹, 申元¹, 束洪春², 余多², 沐润志², 白冰²

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217; 2. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 当输电线路遭受雷击导致故障, 而雷击点与闪络点位置不同时, 双端测距将定位至雷击点而非闪络点, 行波测距精度会受到不利影响。根据双端感受到的后续波头中与首波头极性相同的第一个波头含有的故障信息, 对雷击点与闪络点的一致性进行辨识。并且提出“距离一致性比较”的方法对雷击点与闪络点不一致情况进行闪络点定位, 同时对该测距方法进行适用性以及影响因素分析。仿真实验和实测数据验证了所提新方法的可靠性和有效性。

关键词: 电力系统; 雷击; 输电线路; 闪络; 测距

Inconsistent identification and location of transmission line lightning point and flashover point

MA Yi¹, HUANG Ran¹, SHEN Yuan¹, SHU Hongchun², YU Duo², MU Runzhi², BAI Bing²

(1. Electric Power Research Institute, Yunnan Electric Power Test Research Institute (Group) Co., Ltd., Kunming 650217, China;
2. School of Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: When the transmission lines fault occurred due to lightning strike, and the lightning strike point is not the same as flashover point, double ended traveling wave fault location device will locate out lightning strike point rather than flashover point. So traveling wave location accuracy will be adversely affected. Based on the fault information of the first head that double ended felt in subsequent wave heads which polarity is the same as first wave head, this paper identifies the consistency of lightning strike point and flashover point, and proposes the method of “distance consistency comparison” to locate flashover point when lightning strike point and flashover point are inconsistent. Meanwhile, the applicability and influencing factors of the location method are analyzed. Simulation experiment and real data verify the reliability and validity of proposed new method.

Key words: power system; lightning; transmission line; flashover; fault location

0 引言

运行经验表明, 雷击是导致输电线路发生故障的主要原因之一^[1]。雷击杆塔塔顶或避雷线时, 雷电流幅值一般较大, 故障情况下雷击点与闪络点间距离若在一个杆塔档距之内, 则认为雷击点与闪络点一致; 绕击导线时, 雷电流幅值一般较小, 这时往往在雷击点未发生闪络, 而雷电行波沿线路传输一段距离后, 在绝缘薄弱处发生闪络^[2], 此时雷击点与闪络点间的距离大于一个杆塔档距, 形成了雷击点与闪络点不一致的情况, 这将直接影响到现有行波测距算法的可靠性^[3-4]。可见, 雷击点与闪络点不一致情况下的故障行波测距应引起足够的重视。

目前基于行波原理的输电线路故障测距装置已在电力系统中得到了广泛应用, 这对提高输电线路

运行的安全性、经济性和可靠性具有重大意义^[5-6]。当输电线路遭受雷击导致故障, 而雷击点与闪络点位置不同时, 若采用双端行波测距, 通过行波在输电线路上的折反射仅能计算出雷击点位置, 无法确定闪络点位置; 若采用单端行波测距, 由于行波源的增加, 后续有效波头的识别将更加困难, 这些都将影响行波测距装置的精度。随着行波测距领域研究的深入, 一些学者已经开始对雷击点与闪络点不一致情况下的故障测距进行了研究。文献[2]针对高压直流输电线路发生雷击点与闪络点不一致情况, 利用线路两端保护安装处检测到的电压行波线模幅值变化规律, 实现了雷击侧和闪络侧的识别、雷击点的定位和闪络点的定位。此法适用于1 000 km的直流长线路, 对交流较短的线路不一定可靠, 且对于雷击点与闪络点不一致距离小于5 km

的情况,不易采用此方法。文献[2]针对交流线路雷击与闪络点不一致情况,采用一定时窗内雷击侧采样到的故障电流低频分量占总能量比例低于短路侧采样到的故障电流,利用线路两侧能量分布差异确定雷击点与闪络点的相对位置,该算法受雷电流参数和阻波器边界元件等因素影响较大。

然而现有的对雷击点与闪络点不一致情况(如图 1)的研究均是用来故障测距^[7],而未进行雷击点与闪络点是否一致的辨识。本文对行波在雷击点与闪络点不一致情况下的行波传播特点进行分析,根据双端感受到的后续波头中与首波头极性相同的第一个波头含有的故障信息,对雷击点与闪络点的一致性进行辨识,并且提出“距离一致性比较”的方法对雷击点与闪络点不一致情况进行闪络点定位。同时对该测距方法进行适用性分析以及影响因素分析,并经过大量仿真和实测数据验证本论文所提的新方法可靠、有效。

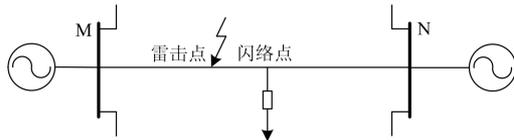


图 1 雷击点与闪络点不一致示意图

Fig. 1 Lightning strike point and flashover point is different

1 雷击输电线路故障电磁暂态特征

输电线路遭受雷击或发生闪络时,在故障点将产生向两侧母线运动的行波^[8]。线路上的行波传播且到达两个不同波阻抗线路的连接点或到达接有集中参数的节点时,行波就会发生折射、反射^[9-10](见图 2)。当发生故障性雷击或线路短路故障时,在故障点因其线路波阻抗不连续而会出现行波折射和反射。在一定的时间窗内,母线处检测到的行波信号

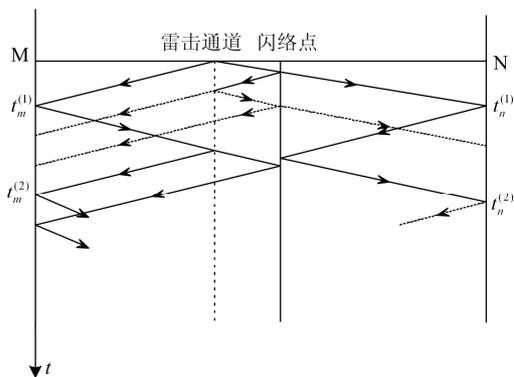


图 2 雷击点与闪络点不一致故障线路行波折反射网格图

Fig. 2 Fault line traveling wave refraction and reflection grid when the lightning strike point and the flashover point is inconsistent

中就含有雷击点的初始行波、闪络点反射行波和母线的反射行波。闪络故障发生在线路前半段时(相对于近端母线),闪络点的反射波先到达;闪络故障发生在线路后半段时,对端母线的反射波先到达。

由于雷电通道会在云层与线路之间持续时间大于 50 μs,因此在注入导线的雷电流行波在闪络点发生反射回到雷击点时,雷电通道的存在会导致雷击点的波阻抗不连续,行波会在闪络点与雷击点之间多次折反射,导致线路两端观测到的波形存在大量反映雷电通道与闪络点之间距离的波形振荡。

2 输电线路雷击点与闪络点不一致的辨识与定位方法

2.1 方法原理

由上文的分析可知,在雷击(绕击)输电线路故障的情况下,雷击产生的初始行波和故障初始行波沿故障线路传至线路两端,根据双端感受到的首波头到达时差可定位雷击点,雷击点距 M 端和 N 端距离分别记为 $x_m^{(1)}$ 和 $x_n^{(1)}$ 。

若雷击点与闪络点一致,则 M、N 端感受到的后续波头中与首波头极性相同的第一个波头 w_m 、 w_n 应分别为雷击初始行波以及故障初始行波在故障点的反射波,反映的即为故障位置。

若雷击点与闪络点不一致,则 M、N 端感受到的后续波头中与首波头极性相同的第一个波头 w_m 、 w_n 所含有信息可分为三种情况。一是雷击初始行波经故障点的反射波、二是雷击初始行波在雷电流通道存在时经雷电流通道的反射波、三是雷击初始行波和故障初始行波在故障点的反射波。

根据 M、N 端感受到的后续波头中与首波头极性相同的第一个波头 w_m 、 w_n 到达时差分别进行单端测距,得到 $x_m^{(2)}$ 和 $x_n^{(2)}$,将 $x_m^{(2)}$ 、 $x_n^{(2)}$ 和 $x_m^{(1)}$ 、 $x_n^{(1)}$ 进行一致性比较,进而对雷击点和闪络点是否一致进行辨识以及对闪络点进行定位。本文中将靠近雷击点的一侧称为雷击侧,靠近闪络点的一侧称为闪络侧。

2.2 方法实现

按上述原理所构成的方法主要包括雷击点定位、雷击点闪络点一致性辨识与闪络点定位两个步骤。

(1) 雷击点定位

设输电线路全线长为 l ,发生雷击故障时雷击初始行波和故障行波到达 M、N 端的时刻分别为 $t_m^{(1)}$ 、 $t_n^{(1)}$ 。则可根据式(1)、式(2)进行双端行波测距^[9]。

$$x_m^{(1)} = \frac{l - v\Delta t}{2} \quad (1)$$

$$x_n^{(1)} = l - x_m^{(1)} \quad (2)$$

式中: $\Delta t = t_n^{(1)} - t_m^{(1)}$; v 为经验波速。

(2) 雷击点闪络点一致性辨识与闪络点定位

设后续波头中与首波头极性相同的第一个波头 w_m 、 w_n 到达 M、N 端的时刻分别为 $t_m^{(2)}$ 、 $t_n^{(2)}$ 。则可根据式(3)、式(4)分别进行单端测距^[9], 得:

$$x_m^{(2)} = v\Delta t_m \quad (3)$$

$$x_n^{(2)} = v\Delta t_n \quad (4)$$

$$\Delta t_m = t_m^{(2)} - t_m^{(1)} \quad (5)$$

$$\Delta t_n = t_n^{(2)} - t_n^{(1)} \quad (6)$$

a. 若 $|x_m^{(1)} - x_m^{(2)}| < \zeta$, 且 $|x_n^{(1)} - x_n^{(2)}| < \zeta$, 说明后续波头 w_m 、 w_n 分别为雷击初始行波以及故障初始行波在故障点的反射波。则判雷击点与闪络点一致, 雷击点位置即为闪络点位置。

b. 根据雷电流的特征, 设雷电流通道持续时间设为 t_c , 即当雷击点距离量测端距离 $x_i \leq vt_c/2$, ($i = m, n$) 时, 若 $|x_m^{(1)} - x_m^{(2)}| < \zeta$ 且 $|x_n^{(1)} - x_n^{(2)}| \geq \zeta$, 说明后续波头 w_m 为雷击初始行波经雷电流通道的发射波, 而 w_n 为故障初始行波经故障点的反射波。则判 M 侧为雷击侧, N 侧为闪络侧。 $x_n^{(2)}$ 为闪络点距 N 侧的距离。

c. 若 $|x_m^{(1)} - x_m^{(2)}| \geq \zeta$ 且 $|x_n^{(1)} - x_n^{(2)}| < \zeta$, 则判 M 侧为闪络侧, N 侧为雷击侧。 $x_m^{(2)}$ 为闪络点距 M 侧的距离。

d. 若满足

$$\begin{cases} |x_m^{(1)} - x_m^{(2)}| \geq \zeta \\ |x_n^{(1)} - x_n^{(2)}| \geq \zeta \\ |x_m^{(1)} + x_n^{(1)} - (x_m^{(2)} + x_n^{(2)})| < \varepsilon \\ x_m^{(2)} - x_m^{(1)} < 0 \end{cases}$$

说明后续波头 w_m 、 w_n 为雷击初始行波和故障初始行波在故障点的反射波, 由 $x_m^{(2)} - x_m^{(1)} < 0$ 可知, M 侧为闪络侧, N 侧为雷击侧。 $x_m^{(2)}$ 为闪络点距 M 侧的距离。

e. 若满足

$$\begin{cases} |x_m^{(1)} - x_m^{(2)}| \geq \zeta \\ |x_n^{(1)} - x_n^{(2)}| \geq \zeta \\ |x_m^{(1)} + x_n^{(1)} - (x_m^{(2)} + x_n^{(2)})| < \varepsilon \\ x_m^{(2)} - x_m^{(1)} > 0 \end{cases}$$

则判 M 侧为雷击侧, N 侧为闪络侧。 $x_n^{(2)}$ 为闪络点距 N 侧的距离。

f. 若满足

$$\begin{cases} |x_m^{(1)} - x_m^{(2)}| \geq \zeta \\ |x_n^{(1)} - x_n^{(2)}| \geq \zeta \\ |x_m^{(1)} + x_n^{(1)} - (x_m^{(2)} + x_n^{(2)})| \geq \varepsilon \end{cases}$$

算法失效, 需折算后再次计算或者采用其他测距方法。以上式中 ζ 、 ε 依经验整定为 $\zeta = 2 \text{ km}$ 、 $\varepsilon = 2 \text{ km}$ 。算法流程如图 3 所示。

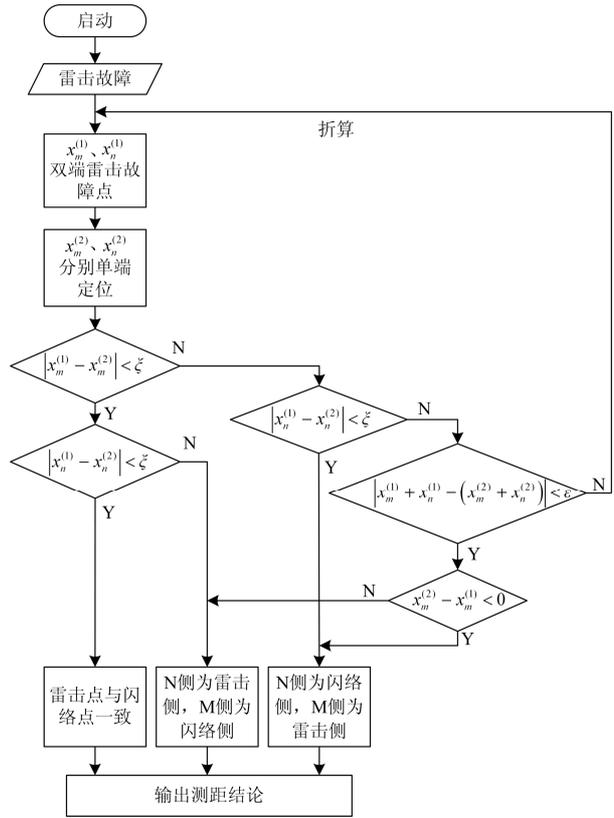


图 3 算法流程图

Fig. 3 Algorithm flow chart

3 仿真实例及算法精确性影响因素分析

3.1 仿真实例分析

以图 4 所示的仿真系统为例, 线路全长 150 km, 采样率为 1 MHz, 杆塔与线路模型见图 4 和图 5, 杆塔使用多波阻抗模型进行模拟, 输电线路为四分裂导线。雷电流模型选用双指数模型, 其数学表达式为

$$i = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (7)$$

式中: 雷电流的波头为 $2.6 \mu\text{s}$, 波尾为 $50 \mu\text{s}$; α 为 20 000; β 为 1 666 666.7; I_0 为雷电流幅值。

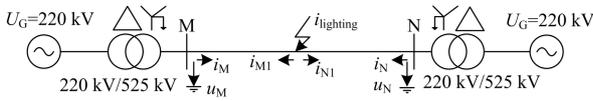
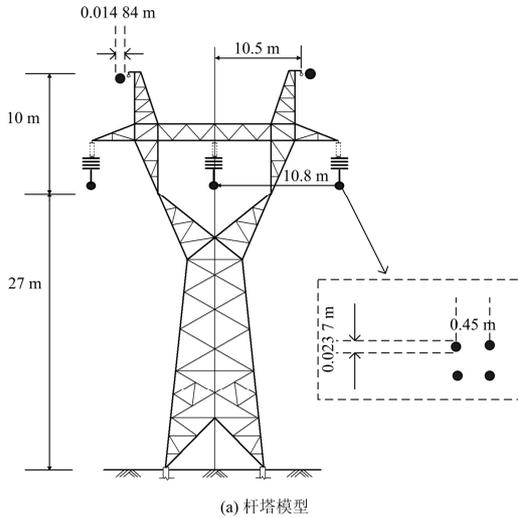
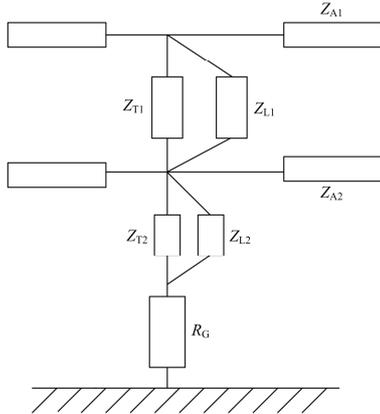


图 4 500 kV 线路模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of 500 kV line model



(a) 杆塔模型



(b) 杆塔多波阻抗模型

图 5 500 kV 杆塔模型

Fig. 5 500 kV tower model

绝缘子伏秒特性曲线由式(8)确定。

$$U_{s-t}(t) = 400L_x + 710L_x t^{-0.75} \quad (8)$$

式中： t 为雷击开始到闪络所经历的时间，单位为 μs ； L_x 为绝缘子串长度，本文中绝缘子长度选为 5.46 m [11]。

考虑冲击电晕对雷击波形的影响，根据文献[12]所述可以得到如图 6 所示的冲击电晕等效电路。图 6 中， C_f 为冲击电晕在导线上引起的附加电容， C_0 为导线几何电容， D_1 和 D_2 为理想稳压二极管。

本文将导线分为若干段来近似考虑冲击电晕对沿线暂态电流、电压波形的影响，建立如图 7 所示的考虑冲击电晕和参数频变的线路模型。

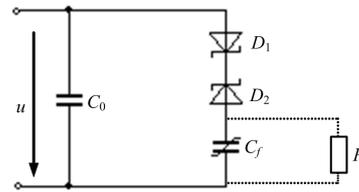


图 6 冲击电晕等效电路

Fig. 6 Impulse corona equivalent circuit

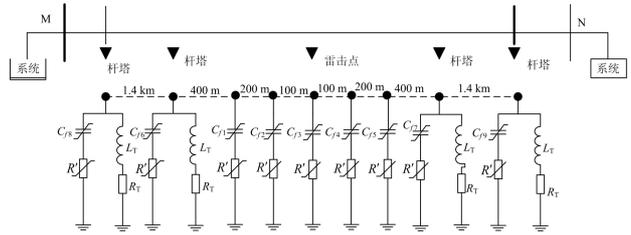
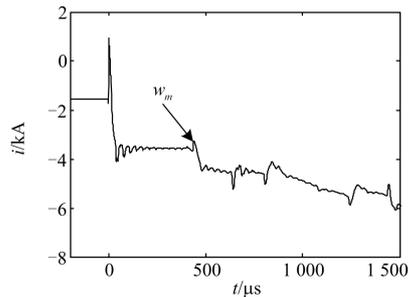


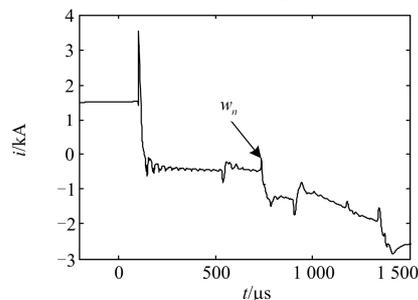
图 7 考虑冲击电晕和频变参数的线路模型

Fig. 7 A line model considering the impact of the corona and frequency parameters

例 1 设线路全长为 160 km ，雷电流为负极性雷电流，幅值为 12 kA ，已知线路发生绕击 A 相导线故障，雷击点距保护安装处 65 km ，雷击点与闪络点一致，故障线路两端电流波形如图 8 所示。双端首波头到达时刻分别为 $t_m^{(1)} = 218\ \mu\text{s}$ 、 $t_n^{(1)} = 318\ \mu\text{s}$ 。根据式(1)和式(2)，得出雷击点距 M 侧距离为 $x_m^{(1)} = 65.1\text{ km}$ 、



(a) 雷击点与闪络点一致时的故障线路M端电流波形



(b) 雷击点与闪络点一致时的故障线路N端电流波形

图 8 雷击点与闪络点一致时的故障线路两端电流波形
Fig. 8 Current waveforms of fault line double terminals when the lightning strike point and flashover point is consistent

距 N 侧距离为 $x_n^{(1)}=94.9$ km。M、N 端感受到的后续波头中与首波头极性相同的第一个波头 w_m 、 w_n 到达双端的时刻分别为 $t_m^{(2)}=651$ μs 、 $t_n^{(2)}=952$ μs 。据式(3)和式(4)计算可得 $x_m^{(2)}=64.517$ km、 $x_n^{(2)}=95.483$ km。由于满足

$$|x_m^{(1)} - x_m^{(2)}| = 0.583 < \zeta$$

且 $|x_n^{(1)} - x_n^{(2)}| = 0.583 < \zeta$ ，则可判定雷击点与闪络点一致，测距结果为 65.1 km，误差为 100 m。

例 2 已知输电线路发生雷击故障，设线路全长为 160 km，雷电流为负极性雷电流，幅值为 12 kA，已知线路发生绕击 A 相导线故障，雷击点距保护安装处 65 km，闪络点距保护安装处 60 km，雷击点与闪络点不一致，此时故障线路两端电流波形如图 9 所示。双端首波头到达时刻分别为 $t_m^{(1)}=218$ μs 、 $t_n^{(1)}=318$ μs 。根据式(1)和式(2)得出雷击点距 M 侧距离为 $x_m^{(1)}=65.1$ km、距 N 侧距离为 $x_n^{(1)}=94.9$ km。M、N 端感受到的后续波头中与首波头极性相同的第一个波头 w_m 、 w_n 到达双端的时刻分别为 $t_m^{(2)}=618$ μs 、 $t_n^{(2)}=984$ μs 。据式(3)和式(4)计算可得 $x_m^{(2)}=59.6$ km、 $x_n^{(2)}=99.2$ km。由于满足条件 e，即

$$\begin{cases} |x_m^{(1)} - x_m^{(2)}| = 5.5 \geq \zeta \\ |x_n^{(1)} - x_n^{(2)}| = 4.33 \geq \zeta \\ |x_m^{(1)} + x_n^{(1)} - (x_m^{(2)} + x_n^{(2)})| = 1.17 < \varepsilon \\ x_m^{(2)} - x_m^{(1)} = -5.5 < 0 \end{cases}$$

则可判断 M 侧为闪络侧，测距结果为在线路距 M 侧 65.1 km 处雷击，而在 59.6 km 处发生故障。误差为 -400 m。

3.2 算法精确性影响因素分析

(1) 母线类型对量测端电流行波波头的影响

电流行波在母线端会发生反射，电流反射系数的计算公式为

$$\beta_i = \frac{\dot{I}^-}{\dot{I}^+} = \frac{Z_C - Z_2}{Z_2 + Z_C} \quad (9)$$

式中： $Z_2 = \dot{U}_2 / \dot{I}_2$ 为母线端负载； Z_C 为线路特征阻抗。

若母线端只有一条线路，由于入射行波的波头前沿部分基本上是较高频率分量，这些较高频率分量对应的变压器等设备的等效阻抗一般较大，远大于线路阻抗，使得电流行波的反射系数可能接近于 -1，电流行波波头高频分量经反射后削弱，甚至电流行波中波头的入射部分和反射部分可能相互抵消，以致所测电流行波波头变缓。如图 10 所示。

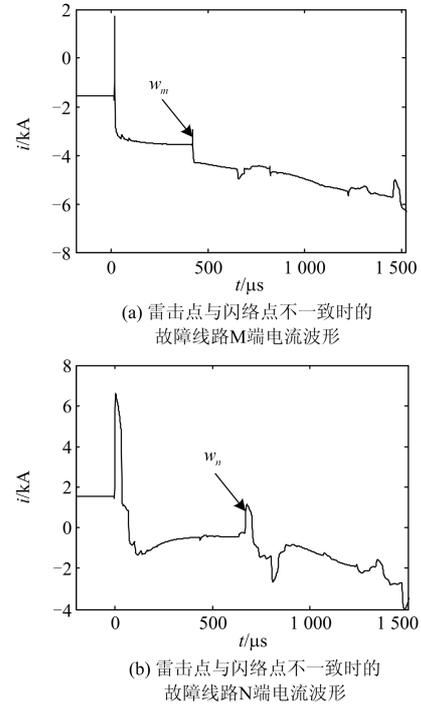


图 9 雷击点与闪络点不一致时的故障线路两端电流波形
Fig. 9 Current waveforms of fault line double terminals when the lightning strike point and flashover point is inconsistent

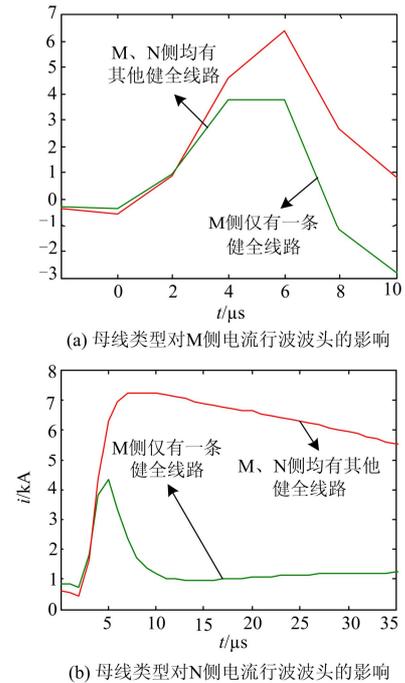


图 10 母线类型对 M、N 侧电流行波波头的影响
Fig. 10 Influence of bus type on N and M side electric wave head

(2) 近端雷击故障时，雷击点与闪络点不一致距离 Δx 及 Δx 与故障距离 x 相对关系对算法的影响
当雷击点与闪络点不一致距离 Δx 较小时，由于

雷击产生的行波与闪络点反射行波到达量测端时间间隔太小，本算法在雷击点与闪络点不一致距离 $\Delta x \leq 3 \text{ km}$ 时，无法判别雷击点与闪络点不一致的情况，造成算法失效；对 Δx 与故障距离 x 相对关系进行仿真分析，得出其相对关系对本文提出的算法无影响，仍能精确测出雷击点与闪络点的距离。

4 实际工程中疑似雷击点与闪络点不一致波形分析

2013年9月12日，大理供电局大苏线 II 回发生故障跳闸，图 11 和图 12 分别为苏屯变和大理变相应故障波形图，其中故障相为 C 相，对应图中红线部分。

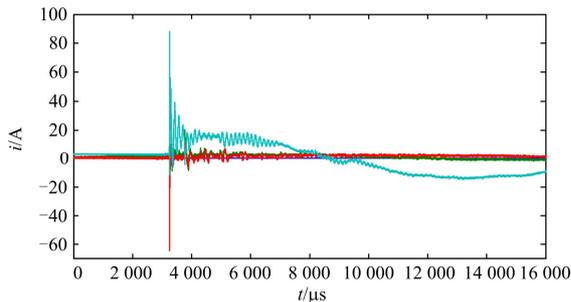


图 11 苏屯变故障三相波形

Fig. 11 Three-phase fault waveform of Sutun substation

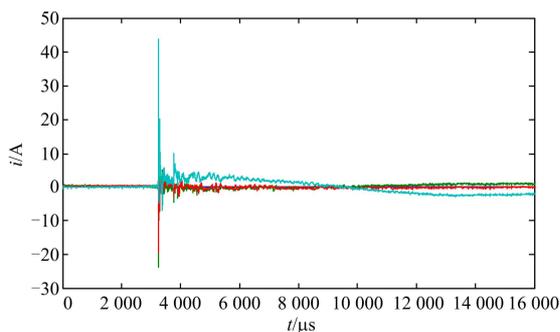


图 12 大理变故障三相波形

Fig. 12 Three-phase fault waveform of Dali substation

图 13 和图 14 为故障相的波形放大图，由图可知，在故障初始波头存在明显的后续振荡，且振荡存在明显的等间隔分布特征，疑似为雷击点与闪络点不一致的故障波形。

由于大苏 II 回线两端均装有故障行波测距装置，两个站分别进行单端测距和两个站通过 GPS 时间匹配所得结果如表 1 所示，表 1 的测距结果均为距苏屯变的距离。

由表 1 可知，测距结果满足前文所叙述的关于雷击点与闪络点不一致情况的测距情况。

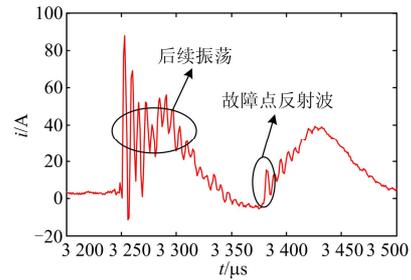


图 13 苏屯变故障波形

Fig. 13 Fault waveform of Sutun substation

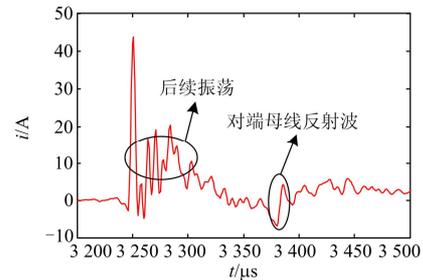


图 14 大理变故障波形

Fig. 14 Fault waveform of Dali substation

表 1 行波测距结果

Table 1 Traveling wave ranging results

	双端 测距结果	大理变 测距结果	苏屯变 测距结果
测距 结果	18.2 km	19.4 km	17.6 km
对应杆 塔号	148	150	147

雷电定位系统由美国科学家 Martin A Uman 和 E Philip Krider 教授于 20 世纪 70 年代提出并实现，我国在 20 世纪 80 年代末由原广西电力局、原水电部武汉高压研究所(武高院)和中科院北京空间中心分别从美国引进了雷电定向定位系统设备，1991 年初在浙江电网装设了国内最早国产的雷电定向定位实验性系统。经过 20 年的不断发展，形成了覆盖全国电网的全自动、大面积、高精度、实时雷电监测网络^[13-18]。雷电定位系统目前无法直接获取其原始数据，其主要的的应用方式一般为通过 WEB 进行查询，并将查询结果从雷电定位系统服务器下载至本地。表 2 所示为 2013 年 9 月 12 日大理供电局大苏线 II 回发生故障跳闸时，通过 WEB 查询得到的雷击相关信息，包括雷击引起的空气中电磁场变化到达测点的时间、雷击点位置、雷击回击数、雷击极性等信息。

表 2 雷电监测信息查询结果报表

Table 2 Query results report of lightning monitoring information

对象范围		线路: 共享 10.180.81.79-云南_220_大苏 II 回线(大理) 缓冲区半径(米): 5 000							
时间范围		雷电: 2013-09-12 16:32:26~2013-09-12 16:42:26							
序号	时间	经度	纬度	电流/kA	回击	站数	参与定位的探测站	最近距离/m	最近杆塔
1	2013-09-12 16:33:23.7754	099.685 8	25.341 0	-30.8	5	13	保山,永宁,兰坪,红河,澄江,云县,怒江,思茅,迪庆,大理,双柏,元谋,南华	3 553	141~142
2	2013-09-12 16:33:23.8327	099.715 6	25.348 8	-24.0	-1	11	维西,兰坪,孟定,云县,迪庆,丽江,大理,腾冲,陇川,双柏,南华	3 009	132~133
3	2013-09-12 16:33:23.9708	099.718 8	25.363 6	-14.1	-3	5	保山,大理,兰坪,怒江,双柏	1 551	131
4	2013-09-12 16:33:24.1311	099.710 7	25.359 8	-21.3	-4	8	云县,大理,腾冲,兰坪,双柏,南华,红河,陇川	1 867	132~133
5	2013-09-12 16:35:52.5275	099.679 8	25.333 2	-68.8	-1	19	孟定,云县,迪庆,巴马,丽江,陇川,普提,南宁,乐业,环江,思茅,元谋,荔浦,贵港,靖西,古蔺,毕节,腾冲,文山	3 921	145
6	2013-09-12 16:37:25.1054	099.602 3	25.355 5	-245.6	4	28	西盟,贺州,怒江,迪庆,巴马,三江,茂名,防城港,思茅,雷州,德钦,廉江,永宁,玉林 1,贡山,荔浦,勐仑,贵港,红河,北海,柳州,沙田,勐腊,腾冲,文山,巧家,维西,会东	1 395	154~155
7	2013-09-12 16:37:25.1840	099.644 2	25.342 0	-51.4	-1	16	巧家,德钦,维西,永宁,勐仑,思茅,迪庆,丽江,大理,腾冲,勐腊,陇川,双柏,元谋,南华,文山	1 341	149~150
8	2013-09-12 16:37:25.2119	099.619 7	25.346 9	-11.5	-2	7	云县,大理,腾冲,兰坪,双柏,南华,丽江	33	151~152
9	2013-09-12 16:37:25.2466	099.631 2	25.334 2	-74.3	-3	24	孟定,云县,丘北,迪庆,丽江,陇川,普提,乐业,思茅,永宁,元谋,贡山,兰坪,红河,古蔺,腾冲,文山,南华,勐海,巧家,华宁,维西,宁南,冕山	1 627	150~151
10	2013-09-12 16:38:46.8811	099.641 1	25.302 1	-15.6	1	6	云县,保山,腾冲,兰坪,怒江,双柏	4 975	150~151
11	2013-09-12 16:38:49.2342	099.801 1	25.382 7	-52.0	1	20	孟定,丘北,迪庆,丽江,陇川,乐业,大理,双柏,永宁,元谋,华坪,兰坪,勐仑,红河,澄江,勐腊,腾冲,文山,巧家,维西	2 039	116~117
12	2013-09-12 16:40:59.5240	099.518 8	25.440 3	-16.8	1	5	思茅,大理,迪庆,元谋,丽江	2 708	193

由表 2 可知, 在故障行波到达测量点的时刻(2013-09-12-16:37:25.105)确实在大苏线附近有雷电记录, 且雷电记录较为密集, 可知当时大苏线 II 回线路走廊正遭受雷雨天气袭击。其中发生于 2013-09-12 16:37:25.1054 的第 6 条记录与行波测距装置记录的故障时间最为接近, 雷击位置与现场巡线结果也相差较小, 现场巡线结果确认为雷击故障, 故障位于第 150 号杆塔 C 相绝缘子。雷击记录最为接近第 154~155 号杆塔, 而现场巡线结果为第 150 号杆塔, 可见, 此次雷击故障存在雷击点与闪络点不一致的可能性。

5 结论

(1) 本文根据双端感受到的后续波头中与首波头极性相同的第一个波头含有的故障信息, 对雷击点与闪络点的一致性进行辨识, 并且提出“距离一致性比较”的方法对雷击点与闪络点不一致情况进行闪络点定位, 实现了雷击点与闪络点不一致情况下雷击点与闪络点的精确测距。

(2) 本文分析了算法中可能影响测距精度的一些因素, 当母线端只有一条线路时, 会导致所测电流行波波头变缓, 影响测距结果; 当雷击点与闪络点不一致距离 $\Delta x \leq 3 \text{ km}$ 时, 无法判别雷击点与闪络点不一致的情况, 造成算法失效。雷击点与闪络点不一致的情况普遍存在, 严重影响着现有行波测距算法的可靠性, 应引起足够的重视。

参考文献

- [1] 易辉, 崔江流. 我国输电线路运行现状及防雷保护[J]. 高电压技术, 2001, 27(6): 44-50.
YI Hui, CUI Jiangliu. The present state and lightning protection of transmission line in China[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(6): 44-50.
- [2] 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. Locating method of short-circuit point for transmission lines under lightning stroke fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 74-77.
- [3] 束洪春, 张斌, 张广斌, 等. $\pm 800 \text{ kV}$ 直流输电线路雷击点与闪络点不一致时的行波测距[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 114-120.
SHU Hongchun, ZHANG Bin, ZHANG Guangbin, et al. Traveling wave based fault location with flashover position different from lightning position for UHVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 114-120.
- [4] 郭宁明, 覃剑, 陈祥训. 雷击对行波故障测距的影响及识别[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(5): 76-79.
GUO Ningming, QIN Jian, CHEN Xiangxun. Lightning strike identification and its effects on the traveling wave fault location[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(5): 76-79.
- [5] 徐丙垠, 陈平, 李京, 等. 现代行波测距技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 62-65.
XU Bingyin, CHEN Ping, LI Jing, et al. Modern fault location techniques based on fault generated travelling waves and their applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(23): 62-65.
- [6] 陈平, 徐丙垠, 李京, 等. 现代行波故障测距装置及其运行经验[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(6): 66-69.
CHEN Ping, XU Bingyin, LI Jing, et al. Modern travelling wave based on fault locator and its operating experience[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(6): 66-69.
- [7] 彭勇, 王志新, 陈军, 等. 输电线路雷击故障定位与识别[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 406-410.
PENG Yong, WANG Zhixin, CHEN Jun, et al. Lightning fault location and recognition technologies in transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 406-410.
- [8] 司大军, 束洪春, 陈学允, 等. 输电线路雷击的电磁暂态特征分析及其识别方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 64-69.
SI Dajun, SHU Hongchun, CHEN Xueyun, et al. Study on characteristics and identification of transients on transmission lines caused by lightning stroke[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 64-69.
- [9] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
- [10] 段建东, 张保会, 郝治国, 等. 超高压线路暂态保护中雷电干扰与短路故障的识别[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(18): 30-35.
DUAN Jiandong, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, et al. Identification of lightning and fault in EHV transmission line transient-based protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(18): 30-35.
- [11] 王斌, 彭宗仁. 500 kV 线路绝缘子电压分布的有限元法计算[J]. 电瓷避雷器, 2003(1): 13-15.
WANG Bin, PENG Zongren. A finite element method for the calculation of the voltage distribution along the 500 kV line insulators[J]. Insulators and Surge Arresters, 2003(1): 13-15.
- [12] 束洪春, 司大军, 于继来. 雷击输电线路电磁暂态仿真[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(17): 68-71, 92.
SHU Hongchun, SI Dajun, YU Jilai. New electro-

- magnetic transient simulation approach considering impulsive corona and frequency-dependence line parameters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(17): 68-71, 92.
- [13] 陈家宏, 康文斌, 肖丽, 等. 雷电方向探测仪[J]. 高电压技术, 1992, 18(3): 31-35.
CHEN Jiahong, KANG Wenbin, XIAO Li, et al. The lightning direction finder[J]. High Voltage Engineering, 1992, 18(3): 31-35.
- [14] 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.
- [15] 杨帅, 邹建明, 喻剑辉, 等. 输电线路与引雷塔雷电监测与雷电流波形分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(6): 1536-1540.
YANG Shuai, ZOU Jianming, YU Jianhui, et al. Monitoring and analysis of lightning current waveform observed on transmission line and lightning tower[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1536-1540.
- [16] 张可, 张凌, 胡燕玲, 等. 输电线路行波测距数据的正弦拟合自动筛选方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 58-64.
ZHANG Ke, ZHANG Ling, HU Yanling, et al. Transmission line traveling wave data automatically screening method based on sine fitting[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 58-64.
- [17] 刘朕志, 舒勤, 韩晓言, 等. 基于行波模量速度差的配电网故障测距迭代算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 88-93.
LIU Zhenzhi, SHU Qin, HAN Xiaoyan, et al. An iterative fault location algorithm using the difference of wave velocity between zero mode component and aerial mode component of traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 88-93.
- [18] 李勋, 黄荣辉, 姚森敬, 等. 一种改进行波时频复合分析的杆塔故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 130-136.
LI Xun, HUANG Ronghui, YAO Senjing, et al. A novel fault location method by tower based on traveling wave time-frequency analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 130-136.
- [19] 吴焯军, 赵淳, 张伟忠, 等. 直流输电线路雷害现状与分析[J]. 高压电器, 2014, 50(5): 134-139.
WU Zhuojun, ZHAO Chun, ZHANG Weizhong, et al. Analysis on lightning damage of DC transmission lines in China[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(5): 134-139.
- [20] 黄文武, 肖明杰, 杨旭, 等. 输电线路雷击闪络分析中杆塔模型的研究[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 166-172.
HUANG Wenwu, XIAO Mingjie, YANG Xu, et al. Research on transmission tower models for lightning flashover analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 166-172.

收稿日期: 2015-08-26; 修回日期: 2015-09-02

作者简介:

马 仪(1969-), 男, 硕士, 高工, 主要从事输电线路建设及安全运行研究;

黄 然(1985-), 女, 硕士, 主要从事输电线路建设及安全运行研究;

申 元(1979-), 男, 硕士, 主要从事输电线路建设及安全运行研究。

(编辑 周金梅)