

输电线路雷击故障情况下的短路点定位方法

郭宁明, 覃 剑

(中国电力科学研究院, 北京市 100192)

摘要: 输电线路雷击故障情况下, 由于雷电流幅值差异较大, 有可能导致雷击点与短路点位置不同, 这就影响了行波测距的精度。此时, 雷电波在短路点发生反射, 而利用雷电波和短路点反射波到达的时间差可以计算雷击点与短路点的间距。基于上述分析, 提出在已知雷击点时, 通过计算雷击点与短路点的相对位置, 从而实现短路点定位的新方法。同时也分析了可能影响该短路点定位的相关因素。EMTDC 仿真及实例验证证明了所述短路点定位方法的正确性。

关键词: 故障测距; 雷击; 行波; 小波变换; 短路点定位

中图分类号: TM773; TM855

0 引言

目前, 基于行波原理的故障测距装置获得了广泛应用, 它的应用对提高输电线路运行的安全性、可靠性有重大意义^[1-6]。在实际运行中, 也存在一些影响行波故障测距装置应用效果的因素^[7], 其中包括输电线路雷击, 而在山区线路中, 雷击是导致线路故障的主要原因^[8]。输电线路雷击对行波故障测距装置的影响主要体现在: 当雷击电流较小时, 雷电流在雷击点没有造成短路, 雷电波沿输电线路传输一段距离后, 在绝缘薄弱处导致故障, 此时, 雷击点与短路点位置不同, 而行波故障测距装置定位的行波源为雷电波, 这就影响了行波故障测距装置的精度。本文提出了在雷击故障情况下利用雷电波与短路点反射波到达的时间差对短路点进行定位的方法。

1 雷击故障暂态过程分析

输电线路遭受雷击后, 雷电波向线路两侧传播, 在绝缘薄弱处发生闪络后, 由于大多数情况下, 雷击持续时间相对较长 ($40 \mu\text{s} \sim 100 \mu\text{s}$), 因此, 雷电波的波尾部分在短路点发生了反射^[9]。电流行波的反射系数如下式所示:

$$i = \frac{i_t}{i_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (1)$$

式中: Z_1 和 Z_2 分别为行波的入射侧和透射侧阻抗。

由式 (1) 可知, 雷电波波尾部分的反射行波应与雷电波的极性相反。

EMTDC 仿真模型如图 1 所示, 线路模型为频率相关模型^[10], 线路两侧设置了避雷器等电气元

件^[11]。从工程实践出发, 本文主要分析电流信号, 雷击点与短路点距离根据需要调节。当雷击点与短路点间距为 3 km 时, 雷击时刻与短路发生时刻相差 $25 \mu\text{s}$, 短路过渡电阻 10Ω 。

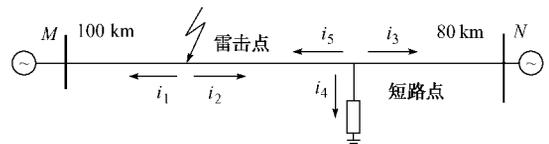


图 1 EMTDC 仿真系统模型
Fig. 1 Model of EMTDC simulation system

如图 1 所示, M 端采样到的第 1 个电流行波为雷电流行波 i_1 , 而雷电波尾部分从短路点反射的电流行波为 i_5 , 两者极性相反。由于现有行波故障测距装置已经能够实现对雷击点的精确定位, 因此, 利用雷电流行波 i_1 与反射波 i_5 到达时间差并结合波速可以获得雷击点与短路点间相对距离, 从而实现短路点的定位。

根据上述分析, 雷击故障情况下短路点定位步骤如下:

- 1) 判定故障性质 (确定故障类型是否为雷击故障, 可参见文献 [12]);
- 2) 判断短路点与雷击点位置是否一致 (利用线路两侧电流波形的相关系数判断);
- 3) 选取故障线路侧, 判断雷击侧与线路侧;
- 4) 精确定位短路点, 计算雷击点与短路点间相对距离。

2 短路点初步定位

短路点的初步定位包括: 判断雷击点与短路点位置是否一致 (当雷击点与短路点位置不一致时,

才需要对短路点精确定位); 选取故障线路侧。当雷击点与短路点位置不同时,线路两侧采样到电流行波存在明显差异,此时线路 M 侧(雷击侧)和 N 侧(短路侧)采样到的电流行波可分别表示为式(2)和式(3):

$$i(t) = \begin{cases} I_0(e^{\vec{T}_1} - e^{\vec{T}_2}) & 0 & t < t_0 \\ I_0(e^{\vec{T}_1} - e^{\vec{T}_2}) + I_m \sin(\omega t + \phi) & t_0 & t < \end{cases} \quad (2)$$

$$i(t) = \begin{cases} I_0(e^{\vec{T}_1} - e^{\vec{T}_2}) & 0 & t < t_0 \\ j I_0(e^{\vec{T}_1} - e^{\vec{T}_2}) + I_m \sin(\omega t + \phi) & t_0 & t < \end{cases} \quad (3)$$

式中: j 为透射系数; t_0 为故障发生时间。

由式(2)、式(3)可知,由于透射系数总小于 1, M 侧采样到的故障电流中雷电波所占比例相对较大,而雷电流中高频分量比例较高,因此,在较短时间内,雷击侧采样到的故障电流的低频分量占总能量比例总低于短路侧采样到的故障电流,可以根据线路两侧能量分布确定雷击侧(仿真数据及波形对比参见附录 A)。

3 短路点精确定位

本文分析中采用小波变换模极大值法进行短路点定位。设第 1 个到达雷击侧的电流行波极性均为正(+)极性,到达时间为 t_1 ,在雷击侧采样到的第 1 个负极性电流行波,到达时间为 t_2 ,波速为 v ,则雷击点与短路点之间的相对位置为:

$$l = \frac{1}{2}(t_2 - t_1)v \quad (4)$$

EMTDC 仿真中电流行波的小波变换模极大值如图 2 所示。利用小波变换分析暂态信号时,需要选择合适的小波及分析尺度^[13-14]。本文分析中采用基函数 B 样条小波^[15-16]。

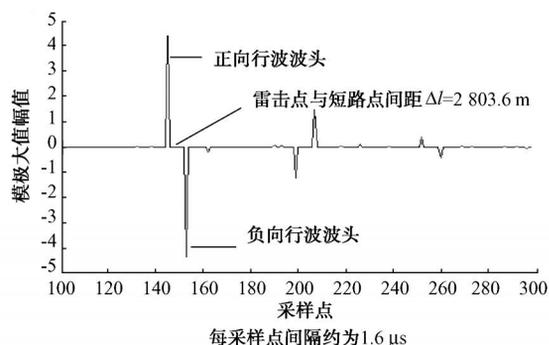


图 2 故障电流的小波变换模极大值(间距为 3 km)
Fig. 2 Wavelet transform coefficient modulus maxima of fault current

由图 2 可知,从小波变换模极大值判断,第 1 个正向行波波头到达时间 t_1 为第 145 点,第 1 个负向行波波头到达时间 t_2 为第 157 点,间隔时间 t 为 12 个采样点;根据仿真中采样频率 625 kHz 和 EMTDC 软件提供的波速可知,每个采样点间距为 467.27 m;由此可得出雷击点与短路点间距约为 2803.6 m,误差为 -196.4 m(负号代表比实际数据小,下同)。EMTDC 仿真中,该测距方法对不同雷击点与短路点间距情况下均可行,因此可认为该测距方法在正常故障情况下具有一定的可行性。

4 影响短路点定位的相关因素

4.1 绝缘击穿和建弧时间

雷击导致故障情况下,不是雷电波到达短路点后立刻发生短路故障,雷击过电压导致的绝缘击穿和建立电弧都需要时间^[17]。从雷击发生到雷电波在故障电流发生反射所经过的时间为:

$$T = T_e + T_f + T_v \quad (5)$$

式中: T_v 为雷电波从雷击点传输到短路点的时间; T_f 和 T_e 分别为绝缘击穿和建弧时间。

如图 3 所示,线路 M 侧采样到的第 1 个正向行波波头和第 1 个负向行波波头时间差为 $t_2 - t_1$,该时间差为 $2T_v + T_f + T_e$ 。

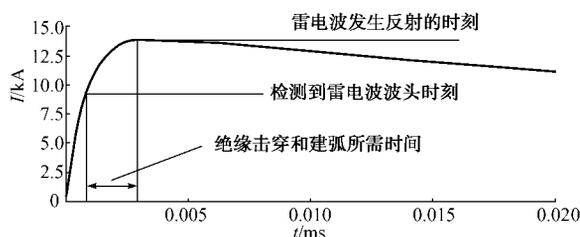


图 3 T_e 和 T_f 对短路点定位的影响
Fig. 3 Influence on fault location which caused by T_e and T_f

$T_f + T_e$ 难以给出准确值,因此存在 2 种可能:

1) 当 $T_f + T_e$ 比较小,在 2 个采样点中发生(按 625 kHz 的采样频率则为 1.6 μs),就不会影响到最终的结论,雷击点与短路点间距 $l = 2T_v v$ 。

2) 当 $T_f + T_e$ 比较大时,线路 M 侧检测到的雷电波波头到达时刻为 t_1 ,将有 $t_2 > t_1 + 2T_v$,此时雷击点与短路点间距 ($l = 2T_v v$) 就小于计算结果 $l = (2T_v + T_f + T_e)v$,计算结果将偏大。在实际故障测距中,当 $1.6 \mu s < T_f + T_e < 3.2 \mu s$ 时,将存在 233.64 m 的故障误差;当 $3.2 \mu s < T_f + T_e < 4.8 \mu s$ 时,将存在 467.27 m 的故障误差。当 $T_f + T_e > 6.4 \mu s$ 时,测量误差将进一步增大。仿真验证中,当

雷击点与短路点间距为 3 km, $T_f + T_e = 10 \mu s$ 时, 测量误差为 504.525 m, 比 $T_f + T_e = 5 \mu s$ 时有所增大。

在大多数实际故障情况下, 绝缘击穿为电击穿, 其击穿时间在 $3 \mu s$ 以内, 因此对该短路点定位方法影响较小, 但故障是由沿面放电等因素导致时, 绝缘击穿时间较长, 就可能影响对短路点的定位。

4.2 过渡电阻

雷击导致故障情况下, 初始电流行波的暂态特性主要由雷电波本身特性决定, 而对短路点定位时, 雷电波在短路点的反射行波则会受过渡电阻影响。当过渡电阻幅值较大时, 雷电波反射波的幅值将大幅下降, 仿真中过渡电阻为 10 和 500 时, 雷电波反射波对比如图 4 所示。

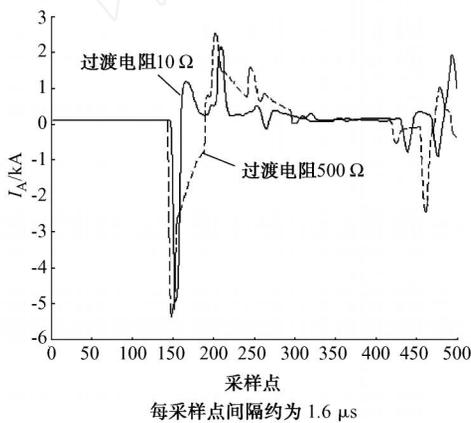


图 4 不同过渡电阻(10 / 500)情况下雷电流反射波对比

Fig. 4 Comparison of reflected wave under conditions that fault transitional resistance is different

由表 1 可知, 过渡电阻不会改变反射波极性, 但会影响其幅值, 过渡电阻增大, 反射波幅值则降低。在大多数实际故障中, 过渡电阻幅值相对较小, 但当雷击导致故障是通过其他外物(如树枝等)接地, 也存在出现大过渡电阻的可能, 当过渡电阻较大时, 就可能导致反射波波头较难识别, 这就可能影响到该短路点定位方法的使用。

表 1 不同过渡电阻情况下反射波模极大值

Table 1 Module maxima of reflected wave under conditions that fault transitional resistance is different

过渡电阻/	小波变换模极大值	
	入射波	反射波
10	346.57	-390.26
100	348.16	-172.68
500	349.81	-169.39
1 000	350.33	-93.97

5 现场采集故障数据分析

以下为一组实际故障数据分析。图 5 所示波形为 2006 年 5 月 31 日, 在辽宁辽李 1 号线线路两侧采集到的电流波形, 雷击点与短路点位置不一致导致原有测距误差 1 209 m。图 6 为 B 相放大图。

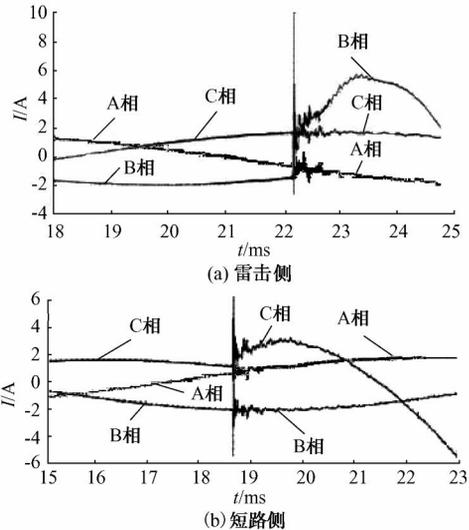


图 5 故障电流原始波形

Fig. 5 Original wave of fault current

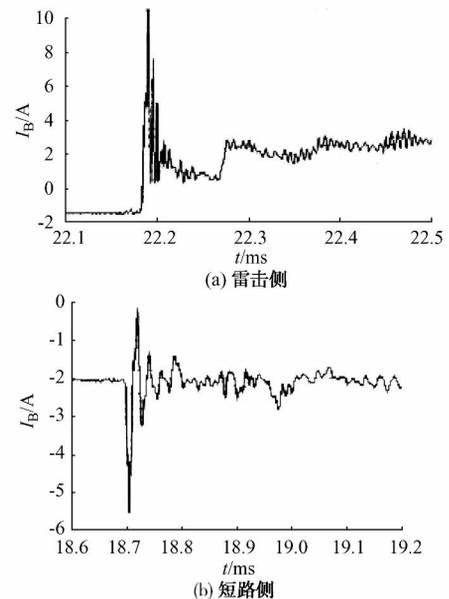


图 6 B 相故障电流波头部分局部放大

Fig. 6 Partial magnification to head of fault current

如图 5、图 6 所示, 当雷击点与短路点位置不一致时, 线路两侧波形有较大差异。采用本文所述方法计算可准确识别雷击点所在侧。如图 7 所示, 根据线路雷击侧数据可计算得到雷击点与短路点间距为 1 168.2 m, 与巡线记录对比, 经过本文所述方法修正后测距误差减小为 40.7 m。现有数据分析中

测距误差在 40.7 m ~ 1 401.9 m 之间。本文分析中主要采用单尺度计算,分析尺度选择对测距结果影响较大,可采用多种手段提高测距精度^[2-5]。需要指出的是,本文所述方法主要针对雷击点与短路点相距 5 km 以内的情况。当雷击点与短路点间距超过 5 km 以上时,行波测距的误差往往是由其他雷击造成。

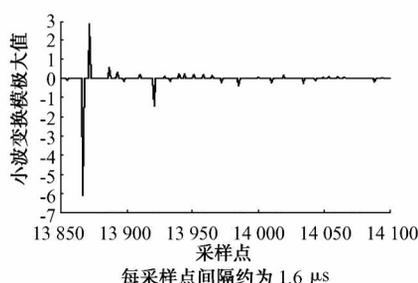


图 7 故障时刻暂态电流小波变换模极大值
Fig. 7 Wavelet transform coefficient module maxima of transient current at fault time

6 结语

输电线路雷击故障情况下,当雷击点与短路点位置不同时,雷电波在短路点发生反射,而利用雷电波与短路点反射波到达的时间差,可以计算雷击点与短路点间距。由于现有行波故障测距装置可以实现对雷击点的精确定位,因此通过计算雷击点与短路点相对位置可以实现对短路点的定位。

本文分析了可能影响短路点定位的因素,其中包括绝缘击穿及建弧时间和短路过渡电阻,当绝缘击穿及建弧时间较长时,会对测距精度造成一定的影响,而较大短路过渡电阻则会降低反射波波头的幅值。但大多数情况下,这 2 个因素对短路点定位的影响较小。

本课题为中国电力科学研究院科技创新基金项目。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术. 西安:西安交通大学出版社,1993.
- [2] 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. 中国电机工程学报,2000,20(8):6-10.
QIN Jian, CHEN Xiangxun, ZHEN Jianchao, et al. A new double terminal method of traveling wave fault location using wavelet transform. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 6-10.
- [3] QIN Jian, CHEN Xiangxun, ZHENG Jianchao. Traveling wave fault location of transmission line using wavelet transform// Proceedings of 1998 International Conference on Power System Technology, August 18-21, 1998, Beijing, China: 533-537.
- [4] 林湘宁,刘沛,李世明,等. 基于故障电流暂态分量的测距研究. 电力系统自动化,2002,26(3):45-50.
LIN Xiangning, LIU Pei, LI Shiming, et al. Studies on fault location of fault-induced transient component. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(3): 45-50.
- [5] 陈平,牛燕雄,徐丙垠,等. 现代行波故障测距系统的研制. 电力系统自动化,2003,27(12):81-85.
CHEN Ping, NIU Yanxiong, XU Bingyin, et al. Development of modern traveling wave based fault location system. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 81-85.
- [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. 电力系统自动化,2003,27(6):66-69.
CHEN Ping, XU Bingyin, LI Jing, et al. Modern traveling wave based fault locator and its operation experience. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(6): 66-69.
- [7] 覃剑. 影响输电线路行波故障测距方法的主要因素分析. 电网技术,2005,29(15):65-70.
QIN Jian. Analysis of the main influence factors for transmission line fault location methods based on traveling wave. Power System Technology, 2005, 29(15): 65-70.
- [8] 易辉,崔江流. 我国输电线路运行现状及防雷保护. 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. High Voltage Engineering, 2001, 27(6): 44-50.
- [9] 郭宁明,覃剑. 行波故障测距中雷电干扰问题的对策//第六届输电配电技术国际会议论文集,2007年11月10日-12日,广州,中国:1216-1221.
- [10] 能源部东北电力设计院编. 电力工程高压输电线路设计手册. 北京:水利电力出版社,1991.
- [11] 水利电力部西北电力设计院,东北电力设计院. 电力工程设计手册(3). 上海:上海人民出版社,1974.
- [12] 郭宁明,覃剑,陈祥训. 雷击对行波故障测距的影响及识别研究. 电力系统自动化,2008,32(5):76-79.
GUO Ningming, QIN Jian, CHEN Xiangxun. Study on identification and effect of traveling wave fault location caused by lightning strokes. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(5): 76-79.
- [13] 陈祥训. 对几个小波基本概念的理解. 电力系统自动化,2004,28(1):1-6.
CHEN Xiangxun. Some basic concepts of wavelets. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(1): 1-6.
- [14] 何正友,钱清泉. 电力系统暂态信号分析中小波基的选择原则. 电力系统自动化,2003,27(10):45-48.
HE Zhengyou, QIAN Qingquan. Mother wavelet option method in the transient signal analysis of electric power systems. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 45-48.
- [15] 陈祥训. Bd小波的滤波参数与小波变换快速算法. 电网技术,1999,23(8):44-46.
CHEN Xiangxun. Fast algorithms of filters coefficients and wavelet transform for Bd wavelets. Power System Technology, 1999, 23(8): 44-46.

(下转第 85 页 continued on page 85)

潘贞存 (1962—2008),男,教授,博士生导师,主要研究方向:分布式发电的保护与控制技术、电力系统继电保护和自动装置。

王成山(1962—),男,教育部长江学者特聘教授,国家杰出青年基金获得者,博士生导师,主要研究方向:分布式发电的运行与控制技术、电力系统运行与控制、电力系统规划。

A Substation Area Longitudinal Protection (SALP) Scheme for Distribution System with High DG Penetration

CONG Wei¹, **PAN Zhencun**¹, WANG Chengshan², YU Chunguang¹, WANG Wei¹, XUN Tangsheng³, SONG Zhiming³
(1. Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Key Laboratory of Power System Simulation and Control of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Shandong Electric Power School, Tai'an, 271000, China)

Abstract: Distribution generation (DG) technology has been rapidly developed and the DG penetration level is becoming higher and higher in the distribution system in recent years. The magnitude, direction and distribution of the short circuit current in distribution power system have changed a lot due to the introduction of DGs. This has brought several problems to the traditional staged over current protection devices and may cause them mal-operation. To satisfy the requirements and resolve the existing problems of the relay protection of the distribution systems under high DG penetration level, a new protection scheme is introduced. The new protection scheme is based on longitudinal comparison principle. With the foundation of communication technology, the new scheme is a kind of substation area longitudinal protection with master-slave structure, for the purpose of protecting the whole distribution substation and all of its outgoing feeders that are under high DG penetration level. The operation procedure and fault location method of the protection system is described.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50807032) and Excellent Yong Scientist Scientific Research Foundation of Shandong Province (No. 2007BS01007).

Key words: distribution systems; distribution generation(DG); area longitudinal protection; communication

(上接第 77 页 continued from page 77)

- [16] 陈祥训. 一类样条函数导数型小波. 中国电机工程学报, 1999, 19(8): 76-79.
CHEN Xiangxun. A new class of derivative wavelets based on cardinal B-spline. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(8): 76-79.
- [17] 林福昌. 高电压工程. 北京: 中国电力出版社, 2006.

郭宁明(1980—),男,通信作者,硕士,主要研究方向:电力系统故障诊断。E-mail: guonm@epri.ac.cn

覃剑(1967—),男,博士,教授级高级工程师,主要研究方向:电力设备及电力系统故障分析和诊断、小波变换技术在电力系统的应用。E-mail: jqin@epri.ac.cn

Locating Method of Short-circuit Point for Transmission Lines Under Lightning Stroke Fault

GUO Ningming, QIN Jian

(Electric Power Research Institute of China, Beijing 100192, China)

Abstract: Location of lightning point and fault point may be different under lightning stroke fault of transmission lines, because the amplitude of lightning current is tremendous difference. This may influence on precision of traveling wave locating. When lightning wave reflect at the fault point, the distance between lightning stroke and fault points can be calculated with the arrival time difference between lightning wave and reflect wave. Based on fore mentioned analysis, a new approach to locate fault point through the calculation of relative position between lightning and fault points if lightning point is known is proposed. Factors which may affect the fault locating is also discussed. The validity of the methods is proved by EMTDC simulation and confirmation of real example.

Key words: fault locating; lightning stroke; traveling wave; wavelet transform; short circuit fault point