

DOI: 10.7667/PSPC151963

# 输电线路双端故障测距时域算法实用研究

王海港, 谢民, 孙月琴, 邵庆祝, 王同文

(国网安徽省电力公司, 安徽 合肥 230022)

**摘要:** 对因山火、树障等引起的输电线路较长过程电弧放电故障, 频域故障测距算法的稳定性较差。现有的采用双端不同步数据的时域算法, 对这种情况仍存在精度不足的问题。为提高时域算法的实用性, 以比较从线路两侧计算的故障点电压波形一致性为基础, 提出了时域故障测距方程的数值解法。在分析长过程电弧性故障特征的基础上, 给出了算法在实用时的计算过程。基于仿真验证了算法的准确性, 并对算法进行了线路参数及测量误差的稳定性验证。利用现场 220~1 000 kV 不同电压等级的故障数据对算法的实用性进行了分析。

**关键词:** 输电线路; 长过渡过程; 电弧; 故障测距; 时域算法

## Practical study on transmission line two terminal time-domain fault location method

WANG Haigang, XIE Min, SUN Yueqin, SHAO Qingzhu, WANG Tongwen

(State Grid Anhui Electric Power Company, Hefei 230022, China)

**Abstract:** The transmission line flashover induced by tree or forest fire is a transition process with arc and high fault resistance. Fault locating methods of frequency domain are all unstable. For the time-domain algorithms, there is no one which has good accuracy for the longer transition process faults. Based on asynchronous data from two ends of the fault transmission line, this paper puts forward a new numerical solution for the time domain algorithm by comparing the consistency of the fault voltage deduced from line two terminals. By analysis of the arcing long transition fault process, the computation method is demonstrated step by step. Simulations based on EMTDC are performed to verify its accuracy and stability under different parameters and measurement errors. At the end, the practicability is tested by several 220~1 000 kV field cases.

**Key words:** transmission line; long transition process; arc; fault locating; time-domain algorithm

## 0 引言

因山火、树障、异物短路等引起的输电线路故障是输电线路故障的常见原因<sup>[1]</sup>。由于输电线路杆塔较高, 这类故障的共同点是导线与地之间的空气间隙被击穿<sup>[2-3]</sup>, 故障放电电弧较长且不稳定, 故障过程有较长过渡性, 有时在线路跳闸时, 过渡过程还没有结束。在这类故障过渡过程中, 故障电压存在大量谐波, 故障电流不仅谐波含量较大, 而且可能存在间断及发展特性<sup>[4-5]</sup>。这种情况下的输电线路故障测距存在较大困难<sup>[6-7]</sup>。对基于频域的算法<sup>[8-11]</sup>, 由于需要提取工频相量, 在故障过渡过程中, 不同起始和不同宽度的时间窗输出的电压电流相量会差别很大。因此, 无论是单端故障测距算法还是双端故障测距算法均存在数据窗选取的问题而无法有效

测距<sup>[12]</sup>。对于时域算法, 单端测距方法即使考虑电弧故障特征<sup>[13]</sup>, 由于其存在假设条件, 应用范围受到了限制。对双端时域测距方法, 由于实用中两侧数据不同步, 不同步时间的精确计算是影响时域算法实用性的主要问题。文献[14]提出了利用故障前数据用频域法计算输电线路两侧数据的不同步时间差, 这种计算方法对绝缘击穿前即存在电游离过渡过程的长过程故障, 计算结果无法满足实用要求。

为解决时域算法精度问题, 基于输电线路长过程电弧故障实例, 利用分布参数模型及波动方程, 基于对故障点电压的波形一致性比较, 得出满足条件的故障距离的数值解。通过对输电线路参数的合理取值, 提高了时域测距算法的通用性。通过仿真数据对算法进行了精度和误差稳定性分析, 利用 220~1 000 kV 不同电压等级的现场数据验证了算法的实用性。

## 1 测距方程及其算法

### 1.1 时域测距原理

输电线路故障测距模型如图 1 所示。设故障发生在距 s 端  $x$  处, 线路全长为  $L$ 。对三相输电线路, 利用凯伦贝尔变换, 可将三相测量电压和电流分别转换为一个零模分量和两个线模分量。对解耦后的零模分量和线模分量, 分别从两侧计算故障点处相应的电压模量, 利用故障点处电压时域一致性原理, 建立测距方程。

为简化分析, 设线路为无损线, 利用分布参数模型, 计算相应的模量。

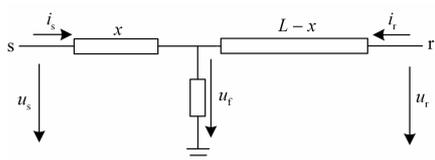


图 1 输电线路故障示意

Fig. 1 Mode of a fault transmission line

以线模分量为例, 设  $u_s, u_r, i_s, i_r$  为 s 侧和 r 侧电压和电流线模分量, 则从 s 侧计算的故障点  $x$  处电压线模分量为

$$u_{fs}(x, t) = \frac{1}{2} \left( u_s \left( t + \frac{x}{v} \right) - i_s \left( t + \frac{x}{v} \right) \times Z_c \right) + \frac{1}{2} \left( u_s \left( t - \frac{x}{v} \right) + i_s \left( t - \frac{x}{v} \right) \times Z_c \right) \quad (1)$$

式中:  $Z_c$  为线路线模波阻抗;  $v$  为线模波速度。式(1)左边由两部分组成, 分别表示相应的前行波和反行波。同式(1), 从 r 侧计算的故障点处电压线模分量为  $u_{fr}(L-x, t+t_d)$ ,  $t_d$  为输电线路两侧采样的不同步时间。

时域测距方程即为

$$u_{fs}(x, t) = u_{fr}(L-x, t+t_d) \quad (2)$$

### 1.2 测距方程数值算法

从式(1)可知, 故障点线模电压分量为故障点前行波电压和反行波电压的和。因已知量为输电线路两侧的测量电压电流, 基于行波传输的概念, 可分别对两侧测量处的前行波和反行波按行波抵达故障点处的时间  $x/v$  和  $(L-x)/v$  进行插值, 从而获得故障点处的线模电压分量。经过插值后的故障点处线模电压分量满足式(2)。

对测距方程式(2), 存在两个未知数, 即不同步时间  $t_d$  和故障距离  $x$ 。求故障距离  $x$  的算法分两个步骤。

首先利用故障前的数据将两侧数据同步。在故障前, 从线路两侧计算的线路上任一点处的电压模

量均应该是相同的, 实测的采样值应能够满足一致性要求。为评估一致性, 取半个周期的采样数据进行时域比较。

设  $t_0$  为故障前计算采样点的起始时刻, 分别从两侧计算  $L/2$  处电压, 对半周波线模分量电压计算值进行比较。

$$f(t_d) = \sum_{n=0}^{N/2} \left| u_{fs} \left( \frac{L}{2}, t_0 - n \cdot T_s \right) - u_{fr} \left( \frac{L}{2}, t_0 + t_d - n \cdot T_s \right) \right|$$

式中:  $T_s$  为采样周期;  $N$  为每周波采样点数;  $n$  为正整数。  $t_d$  求解步骤如下:

以  $t_0$  对应的采样点为基准, 往前逐个采样点计算  $f(t_d)$ , 在一周波范围内比较  $f(t_d)$  最小值对应的采样点时刻与  $t_0$  的时间差  $t_{\min}$ 。

以  $t_{\min}$  为基准, 在其前后相邻采样间隔内, 以 0.01 ms 精度要求, 用插值法计算  $f(t_d)$  最小值对应的的时间差即为  $t_d$ 。

然后, 在已知  $t_d$  时, 用插值法将  $u_{fs}$  和  $u_{fr}$  同步得  $u'_{fs}$  和  $u'_{fr}$ 。令

$$f(x) = \sum_{n=0}^{N/2} \left| u'_{fs}(x, t_1 + n \cdot T_s) - u'_{fr}(L-x, t_1 + n \cdot T_s) \right|$$

其中:  $t_1$  为故障后开始计算的采样点所对应的时刻;  $x$  为故障点距 s 侧的距离。在 0 到  $L$  范围内, 以要求的精度, 搜索  $f(x)$  最小值对应的  $x$  值, 即为故障距离。

## 2 测距算法对长过程故障的实用性研究

### 2.1 长过程电弧性故障特点

以某 220 kV 输电线路山火故障为实例, 对故障点电压电流的时域特性展开研究。该故障为山火引起的 B 相单相跳闸。该输电线路两侧的故障录波器记录了相应的电压电流数据, 其送电侧电流波形曲线如图 2 所示。

相比于仿真及动模实验室的研究, 从图 2 可以看出明显的故障过渡过程。首先, 在导线经空气击穿前, 故障相 B 相存在明显的预放电电流。经计算, 预放电电流随着时间逼近击穿临界点, 该电流工频分量有效值缓慢递增。其次, 在故障电弧建立过程中, 存在较长时间的过渡过程。第三, 在故障电弧建立过渡过程中, 故障电流存在较大畸变, 含有大量高次谐波。

图 3 所示为故障前送电侧测量的 B 相电流有效值, A 相电流有效值, 以及 B 相与 A 相电流有效值之差。可以看出从测量点即能观测出故障前预放电电流已经很大, 且不断上升, 在临近故障时刻已经超过了负荷电流。

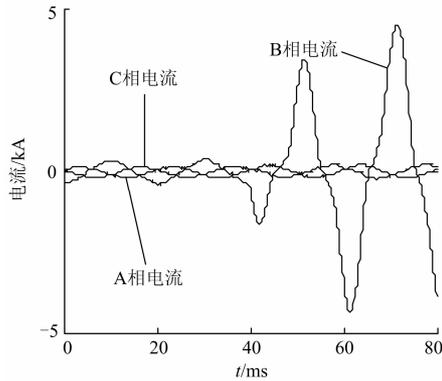


图 2 山火故障 s 侧电流曲线

Fig. 2 Current curves of s side on fire fault

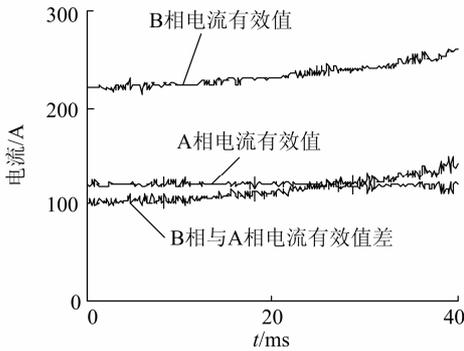


图 3 击穿前电流工频有效值曲线

Fig. 3 RMS current pre-flashover

图 4 给出了故障点电压和故障电流的伏安特性。与金属性故障放电的稳定曲线不同，其伏安特性存在明显的非线性，且随着时间的推移(其物理过程为山火的温度上升、烟尘的积累)，曲线拐点电压也在变化，具有明显的时变性。

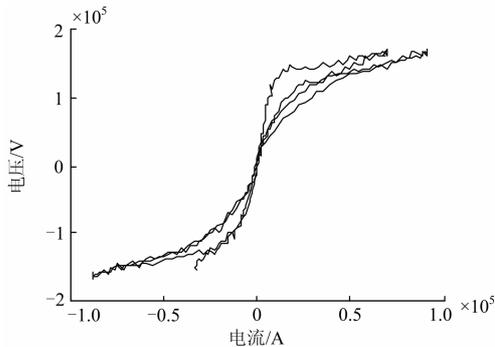


图 4 故障点电压电流特性曲线

Fig. 4 I-V characteristics of fault point

经过对实际中经常发生的山火及树障故障实例进行分析，我们发现这些故障的共同特点是故障过渡过程相对较长(实际中发现的最大超过 5 个周波)。

故障过程中存在明显的电弧预放电及间歇性放电。这种情况下，基于频域的计算，无论是继电保护的故障测距以及各种故障录波器的测距都会发生很大偏差。

### 2.2 长过程电弧性故障时域测距计算过程

针对上述长过程电弧性故障，本节通过实例分析本文时域算法数值求解过程。

式(2)表示的时域测距方程及其数值算法的已知量除实测的电压电流外，还包括输电线路模分量的波阻抗和波速度两个参数，而这两个参数主要由线路电感和电容参数确定。实用中，电感参数一般有较准确的实测值，而电容参数实测值常常误差较大或没有实测参数。为解决这个问题，根据实用中同一电压等级输电线路模波速度较稳定的特点，首先确定波速度的经验值，利用波速度经验值及实测电感参数确定波阻抗参数。

故障实例为 A 相故障。取线模波速度为 291 000 km/s，根据实测电感参数，线模波阻抗为 385.6 Ω。线路长度为 28.31 km。实际经巡线后的故障点距离 s 侧为 22.9 km。两侧数据均为故障录波器记录的数据，线路两侧电压和电流波形如图 5 所示。

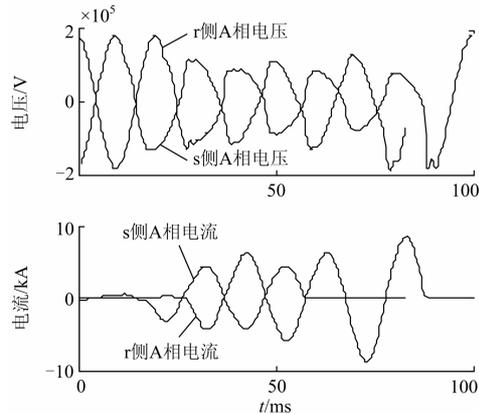


图 5 两侧 A 相测量电压电流

Fig. 5 Voltage and current of A phase from two ends

从波形图可以看出，故障电流存在发展性，在故障起始后逐渐增大，而电压波形畸变较明显，存在明显的长电弧放电过程。根据式(1)，利用凯伦贝尔变换，三相解耦后，分别从 s 侧和 r 侧计算线路中点(L/2)处的模分量，反变换后，可得线路中点处的 A 相电压，如图 6 所示。

由于两侧采样数据的不同步，第一步是利用故障前数据，以线路中点为参考点，将两侧数据同步。通过同步后测量数据从 s 侧和 r 侧计算所得的 A 相电压如图 7 所示。由于线路中点并非故障点，因此故障后的电压曲线一致性仍然较差。

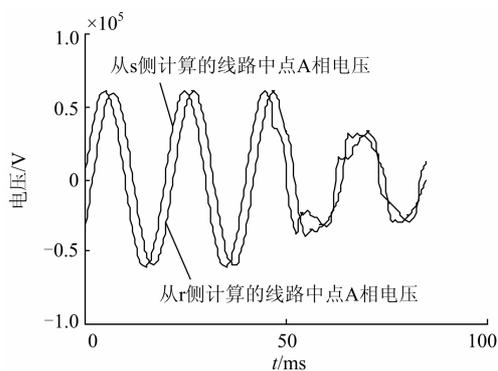


图 6 未同步线路中点 A 相计算电压  
Fig. 6 A phase voltage of the line middle

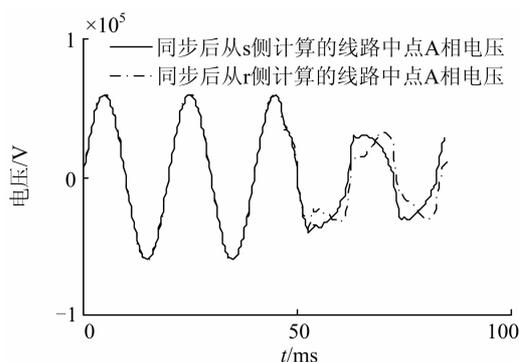


图 7 同步后线路中点计算电压  
Fig. 7 Calculated voltage of the line middle

以 0.1 km 的精度为步长, 以故障后一周波数据为参考, 从 s 侧和 r 侧计算故障点电压波形, 得  $f(x)$  曲线如图 8 所示。可以看出最小  $f(x)$  对应的  $x$ , 即故障距离为 22.4 km。

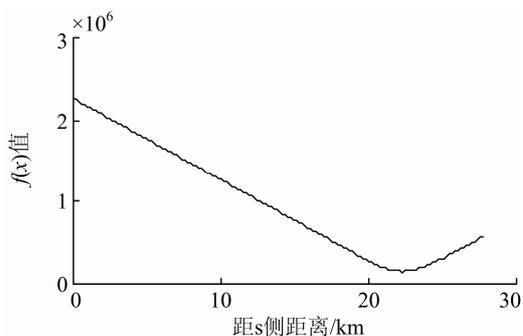


图 8  $f(x)$  曲线  
Fig. 8 Curve of  $f(x)$

在故障点处, 从线路两侧计算的故障点 A 相电压波形如图 9 所示。

可以看出, 在故障距离为 22.4 km 处, 从 s 侧及 r 侧计算的 A 相故障电压已经高度一致, 该电压也反映了故障点处电弧性故障的典型电压特点。

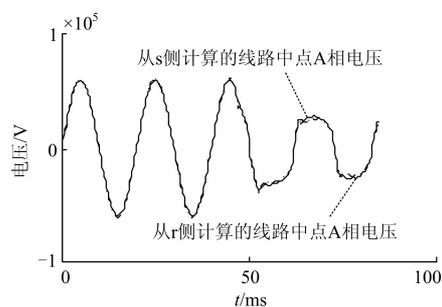


图 9 从两侧计算的故障点电压曲线  
Fig. 9 Voltages of fault location from two terminals data

### 3 测距算法的仿真及实测数据评价

#### 3.1 算法测距精度仿真评价

以 EMTDC 为仿真工具, 建立 220 kV 输电线路仿真模型, 输电线路两侧电压电流数据均按照实际的故障录波器数据格式记录。线路长度为 100 km, 线模波阻抗为  $393 \Omega$ , 波速度为  $2.91 \times 10^4$  km/s。

单相接地故障, 两侧数据不同步时间为 2.5 ms, 不同过渡电阻 ( $FR$ ) 及不同故障位置 ( $FL$ ) 情况下的故障测距结果 ( $x$ ) 如表 1 所示。从结果可以看出, 算法不受故障过渡电阻及故障位置的影响, 均具有较高的精度。

表 1 单相接地不同过渡电阻和位置测距结果

Table 1 Single phase to ground results of different fault resistance and fault location

$FR/\Omega$	$FL/\text{km}$	$x/\text{km}$	误差/(%)
0.1	100	100	0
10	100	100	0
100	100	99.4	0.6
10	75	75	0
50	75	74.2	0.8
100	75	74.6	0.4
0.1	0	0.1	0.1
10	0	0.2	0.2
100	0	0.7	0.7

表 2 相间故障不同过渡电阻和位置测距结果

Table 2 Phase to phase fault results of different fault resistance and fault location

FT	$FR/\Omega$	$FL/\text{km}$	$x/\text{km}$	误差/(%)
AB	0.1	0	0.1	0.1
AB	10	75	75.1	0.1
AB	50	100	99.9	0.1
ABG	0.1	0	0.1	0.1
ABG	10	75	75.1	0.1
ABG	50	100	100	0
ABC	0.1	0	0.1	0.1
ABC	10	75	75.1	0.1
ABC	50	100	99.9	0.1

设故障位置为 75 km 处, 过渡电阻 10 Ω, 不同故障类型(FT)和采样不同步时间( $t_d$ )下, 故障测距结果如表 3 所示。

表 3 不同故障类型和不同步时间测距结果

Table 3 Results of different fault type and asynchronous time

FT	FR/Ω	$t_d$ /ms	FL/km	$x$ /km	误差误差(%)
AB	0.1	1	0	0.1	0.1
ABG	50	2.5	75	74.9	0.1
AG	100	5	100	99.8	0.2
ABC	0.1	10	100	99.9	0.1
AB	50	7.5	75	75	0
ABG	100	2	100	99.9	0.1
AG	200	1.5	0	0.1	0.1

从表 3 可以看出, 算法对不同的故障类型, 不同的采样不同步时间均具有较高的精度, 能够满足实用化的需求。

### 3.2 误差分析

实用中, 保护或故障录波用的电压和电流互感器无法做到仿真软件的精度, 会产生传变误差, 同时继电保护或故障录波器的测量单元也会产生误差。在仿真研究过程中, 分别给电压和电流施加 ±5% 的误差。考虑恶劣的情况, 在 s 侧施加 5% 误差, 在 r 侧施加 -5% 误差, 部分仿真结果如表 4 所示。表 4 所示仿真均为在 75 km 处故障, 两侧采样不同步时间 5 ms, 故障过渡电阻 10 Ω 条件下的结果。

表 4 5% 误差条件下测距结果

Table 4 Influence of 5% error

故障类型	s 侧误差	r 侧误差	测量距离/km	相对误差
AG	5%	-5%	75.5	0.5%
AB	5%	-5%	75.3	0.3%
ABG	5%	-5%	75.5	0.5%
ABC	5%	-5%	75.6	0.6%

从仿真结果可以看出, 在测量电压电流均存在误差的条件下, 测距算法的误差会增大。但从相对误差大小可以看出, 该测距算法对线路参数及测量误差来说具有很高的稳定性。

### 3.3 实测数据验证

以上仿真分析是基于输电线路故障不存在过渡过程且过渡电阻为纯电阻得出的, 具有一定的理想性, 且实用中输电线路参数也并非稳定的值。为验证算法的实用性, 需要进一步使用现场数据进行分析。

利用现场 6 例 220 kV、500 kV 以及 1 000 kV 故障实测数据对算法进行了实用性验证。6 例故障情况及测量结果见表 5。

表 5 现场数据测距结果

Table 5 Result of the field data

电压等级/kV	线路长度/km	实际故障点/km	测量故障点/km	误差/km
220	48.07	6.5	7.1	0.6
220	137.2	63.6	62.2	1.4
220	28.31	19.8	21.3	1.5
500	108	54.3	52.4	2.1
500	108	35.4	37.8	2.4
1 000	336.6	1.5	0.5	1

从结果可以看出, 算法在应用于不同电压等级输电线路故障测距时, 其误差结果是能够满足实用要求的。

## 4 结论

通过对时域测距方程所描述故障点电压波形的一致性比较而求得输电线路故障点位置的方法既能够适应于金属性故障也能够适应于长过程的高阻电弧性故障。该方法的优点是具有很强的结果稳定性, 既能够适应较大测量误差, 又能够适应不同故障情况。需要指出的是, 所述方法忽略了输电线路电阻, 实用中, 为进一步提高精确度, 可考虑将输电线路分布电阻考虑进来。

### 参考文献

- [1] 吴田, 阮江军, 张云, 等. 输电线路因山火跳闸事故统计特性与识别分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 73-78.  
WU Tian, RUAN Jiangjun, ZHANG Yun, et al. Study on the statistic characteristics and identification of AC transmission line trips induced by forest fires[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 73-78.
- [2] 吴田, 胡毅, 阮江军, 等. 交流输电线路模型在山火条件下的击穿机理[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1115-1121.  
WU Tian, HU Yi, RUAN Jiangjun, et al. Air gap breakdown mechanism of model AC transmission line under forest fires[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1115-1121.
- [3] FONSECA J R, TAN A L, MONASSI V, et al. Effects of agricultural fires on the performance of overhead transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(2): 687-694.
- [4] TERZIJA V V, KOGLIN H J. On the modeling of long arc in still air and arc resistance calculation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1012-1017.
- [5] GODA Y, IWATA M, IKEDA K, et al. Arc voltage

- characteristics of high current fault arcs in long gaps[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 791-795.
- [6] FUNABASHI T, OTOGURO H, MIZUMA Y, et al. Influence of fault arc characteristics on the accuracy of digital fault locators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 195-199.
- [7] 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): 148-154.  
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): 148-154.
- [8] 刘洪正, 高厚磊, 韩志骏, 等. 输电线路加权数据融合故障测距算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 15-20.  
LIU Hongzheng, GAO Houlei, HAN Zhijun, et al. Transmission line fault location algorithm based on weighted data fusion[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 15-20.
- [9] 王利平, 王晓茹, 王伟, 等. 输电线路故障测距实用算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 52-58.  
WANG Liping, WANG Xiaoru, WANG Wei, et al. Study of faults location utilizing algorithm on power transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 52-58.
- [10] NOVOSEL D, HART D G, UDREN E, et al. Unsynchronized two-terminal fault location estimation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(1): 130-138.
- [11] 王立平, 刘星, 樊占峰, 等. 特高压输电线路保护故障测距的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(19): 40-46.  
WANG Liping, LIU Xing, FAN Zhanfeng, et al. Application research of fault location of UHV transmission line protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(19): 40-46.
- [12] 李永坚, 黄绍平, 唐剑东. 几种工频双端测距算法对测量误差的适应性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 134-139.  
LI Yongjian, HUANG Shaoping, TANG Jiandong. Research on adaptability to measurement error for several two-terminal fault location algorithms[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 134-139.
- [13] 王伟, 余锐, 陈愚, 等. 基于故障电弧方波曲线相似度的输电线路单端故障测距时域算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 109-113.  
WANG Wei, YU Rui, CHEN Yu, et al. Single terminal time domain fault location method based on the similarity of square wave for arc grounding fault[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 109-113.
- [14] 梁远升, 王钢, 李海锋. 双端不同步线路参数自适应时频域故障测距算法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(4): 62-66.  
LIANG Yuansheng, WANG Gang, LI Haifeng. Fault location algorithm based on time-frequency-domain with two terminals asynchronous[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(4): 62-66.

收稿日期: 2015-11-09; 修回日期: 2016-01-06

作者简介:

王海港(1977-), 男, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: wanghg03@126.com

谢民(1975-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护管理工作;

孙月琴(1964-), 女, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护管理工作。

(编辑 周金梅)