

# 脉冲注入法和单端故障行波法相结合的直流输电系统 接地极线路故障测距

张怿宁<sup>1</sup>, 郝洪民<sup>2</sup>, 李京<sup>2,3</sup>, 李录照<sup>3</sup>

(1. 中国南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广东 广州 510663; 2. 山东理工大学智能电网研究中心, 山东 淄博 255000; 3. 山东科汇电力自动化股份有限公司, 山东 淄博 255087)

**摘要:** 分析了直流输电系统在单极运行方式下, 接地极线路故障暂态行波和外部注入脉冲信号在接地极线路上的传播过程。以此为基础, 提出一种将脉冲注入法和单端故障行波法相结合的接地极线路故障测距方案。首先通过在换流站直流中性母线处监测接地极线路故障暂态行波识别线路是否发生故障, 在线路故障暂态过程结束后从中性母线向线路注入脉冲信号。根据脉冲注入法得到初步测距结果, 并以此确定故障区段。然后, 根据确定的故障区段, 进一步用单端故障行波法再次获得测距结果。最后, 对两次测距结果取平均值, 作为最终测距结果。以PSCAD/EMTDC为仿真平台, 搭建了直流输电系统在单极运行方式下的接地极线路故障测距仿真模型。并借助Matlab对仿真波形数据进行分析, 表明所提出的接地极线路故障测距方案是可行的。

**关键词:** 高压直流输电; 接地极线路; 脉冲注入法; 故障暂态行波; 故障测距

## Fault location of HVDC grounding electrode lines based on combination of pulse injection method and single-ended fault travelling wave method

ZHANG Yining<sup>1</sup>, HAO Hongmin<sup>2</sup>, LI Jing<sup>2,3</sup>, LI Luzhao<sup>3</sup>

(1. M & T Center, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510663, China; 2. Smart Grid Research Center, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 3. Shandong Kehui Power Automation Co., Ltd., Zibo 255087, China)

**Abstract:** The propagation process of the fault transient traveling waves and the external injected pulse signals in the grounding electrode lines of high-voltage direct current (HVDC) transmission system in monopole operation mode is analyzed. On this basis, a fault location scheme for grounding electrode lines is presented based on the combination of pulse injection method and single-ended fault travelling wave method. The scheme identifies firstly whether the electrode lines is faulted by monitoring the electrode lines fault transient traveling wave on the converter station DC neutral bus. After the circuit fault transient process finished, a pulse signal is injected from the neutral bus. The preliminary result is obtained according to the pulse injection method by which the fault location section is determined. Then, according to the fault location section, the second result is obtained by the single-ended fault travelling wave method. The final measured result is the average of two location results. On the PSCAD/EMTDC simulation platform, the monopole HVDC transmission system simulation model is built for fault location analysis of grounding electrode lines. Matlab is used to process the simulation waveform data, indicating that the proposed fault location scheme for grounding electrode lines is feasible.

**Key words:** HVDC transmission; grounding electrode lines; pulse injection method; fault transient travelling waves; fault location

## 0 引言

高压直流输电以其独特的优势, 在我国得到了

快速的发展。高压直流输电系统广泛应用双极两端中性点接地运行方式, 其接地系统主要由接地极、接地极线路和导流系统等几部分构成<sup>[1]</sup>, 其中接地极线路的主要作用是为直流电流提供通路。可见, 接地极线路故障必然会影响整个直流输电系统的正常运行<sup>[2]</sup>。

适用于直流输电系统接地极线路的故障测距方

基金项目: 南方电网云南金沙江中游送电广西直流输电工程专题研究项目(010000WS24130002); 南方电网超高压输电公司重点科研项目

法主要可分为 3 大类：阻抗法、录波数据分析和行波法。阻抗法需要在换流站利用外加电源向接地极线路注入一定频率的交流信号，并通过实时测量接地极线路首端电压相量和电流相量的比值(阻抗)获得故障点位置。这种方法的基本思想来源于交流输电线路的阻抗测距方法<sup>[3-5]</sup>，因而测距精度受线路参数、故障类型和过渡电阻等因素的影响较大。录波数据分析法利用换流站常规录波器记录到的接地极线路故障数据构造测距函数，进而求解获得故障距离<sup>[6-7]</sup>，其存在的主要问题是测距精度受故障高频暂态的影响。行波法通过检测暂态行波在接地极线路上的传播时间获得故障点位置<sup>[8-12]</sup>，具体分为单端故障行波法、双端故障行波法和脉冲信号注入法 3 种类型。单端故障行波法和双端故障行波法只利用线路故障本身产生的暂态行波，已经成功用于交流和直流输电线路的故障测距，并在故障行波检测和处理方面不断取得新的突破<sup>[13-15]</sup>。

本文针对单极运行方式下的直流输电系统，将脉冲注入法和单端故障行波法用于接地极线路故障测距，并实现了两者的有机结合。

## 1 故障暂态行波和注入脉冲信号的传播过程

### 1.1 故障暂态行波传播过程

直流输电系统在单极运行方式下，接地极线路流过和运行极线路一样大的直流电流，接地极线路上存在很高的直流电压。在这种情况下，一旦接地极线路发生故障，线路上将出现明显的暂态行波过程。

接地线路故障产生的暂态行波将从故障点同时向中性母线和接地极两个方向传播，并在到达直流输电系统中性母线和接地极时发生反射，相应的反射波到达故障点时会同时发生反射和透射，如图 1 所示。

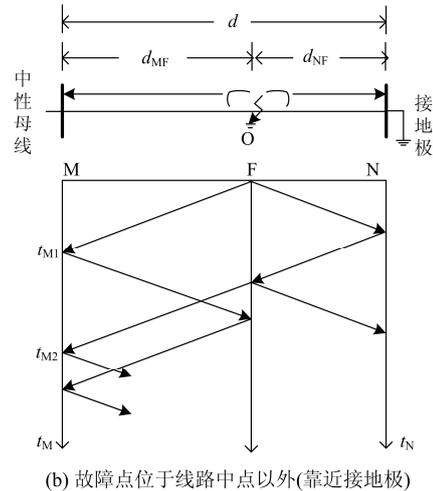
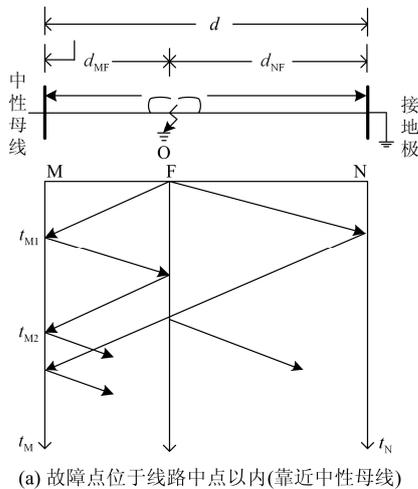


图 1 直流接地极线路故障暂态行波传播示意图

Fig. 1 Propagation diagram of fault generated transient travelling waves on a grounding electrode line

在图 1 中： $d$  表示接地极线路全长； $F$  表示故障点； $d_{MF}$  表示故障点到中性母线  $M$  端的距离； $d_{NF}$  表示故障点到接地极  $N$  端的距离； $O$  点表示接地极线路的中点位置； $t_{M1}$  表示故障初始行波到达中性母线的绝对时刻； $t_{M2}$  表示故障点反射波到达中性母线的绝对时刻(对于线路中点以内故障)或者接地极反射波到达中性母线的绝对时刻(对于线路中点以外故障)。

### 1.2 注入脉冲信号传播过程

在直流输电系统中性母线处注入一个脉冲信号，该脉冲信号将沿接地极线路向接地极方向传播，如图 2 所示。

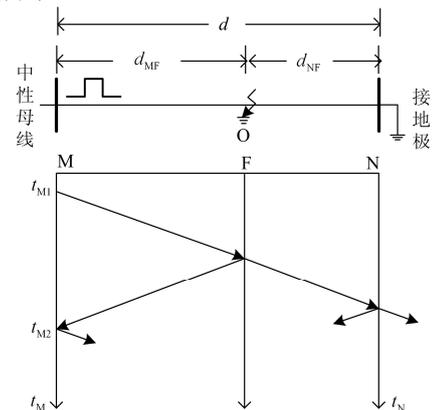


图 2 注入脉冲信号在直流接地极线路上的传播示意图

Fig. 2 Propagation diagram of injected pulse signal on a grounding electrode line

当接地极线路中存在故障时，故障点形成波阻抗不连续点，注入脉冲在该点将会产生反射和透射，反射波向中性母线  $M$  端传播，并在到达  $M$  端时再

次发生反射;透射波向接地极 N 端传播,到达 N 端时也会发生反射。

假定中性母线指向接地极线路的方向为正方向,则注入的脉冲信号为正向行波信号,它在故障点的反射波为反向行波信号。

## 2 脉冲注入法和单端故障行波法相结合的故障测距方案

### 2.1 利用脉冲注入法确定线路故障区段

正常情况下,在直流输电系统中性母线端实时监测直流接地极线路暂态行波并识别线路是否发生故障。也可以直接利用接地极线路的保护动作信号来确认线路故障。

若检测到线路已经发生故障,则待故障暂态过程结束后(本文设定故障发生后 0.05 s),从中性母线端向线路注入脉冲信号,并检测其在线路故障点的反射波,进而利用脉冲信号注入时刻和故障点反射波到达时刻之间的时间差初步计算出故障点位置。

如图 2 所示,设脉冲信号发射时刻为  $t_{M1}$ ,故障点反射波到达测量端的时刻为  $t_{M2}$ ,两者之间的时间差为  $\Delta t = t_{M2} - t_{M1}$ ,则初步故障测距结果可以表示为

$$l_1 = \frac{1}{2}v\Delta t \quad (1)$$

式中,  $v$  表示暂态行波在接地极线路中的传播速度。

根据式(1)给出的初步测距结果可以确定故障区段:

- 1) 当  $l_1 \leq d/2$  时( $d$  为线路全长),判定故障点位于线路中点以内(MO 段);
- 2) 当  $l_1 > d/2$  时,判定故障点位于线路中点以外(NO 段)。

### 2.2 利用单端故障行波法计算故障距离

#### 1) 故障点位于线路中点以内

如图 1(a)所示,当故障点位于线路中点以内时,测量点感受到的第 2 个反向行波浪涌为故障点反射波,因而故障点到中性母线的距离可以表示为

$$l_2 = \frac{1}{2}v(t_{M2} - t_{M1}) \quad (2)$$

#### 2) 故障点位于线路中点以外

如图 1(b)所示,当故障点位于线路中点以外时,测量点感受到的第 2 个反向行波浪涌为接地极反射波,因而故障点到中性母线的距离可以表示为

$$l_2 = d - \frac{1}{2}v(t_{M2} - t_{M1}) \quad (3)$$

### 2.3 给定最终测距结果

采用脉冲注入法和单端故障行波法相结合的故

障测距方案,可以得到两次故障定位结果。理论上,这两次测距结果应该是相同的。在实际应用中,考虑到参数选择和测量误差的影响,这两次测距结果往往不相同,但非常接近。为此,可对两者取平均值作为最终测距结果,这就提高了故障测距可靠性。

最终测距结果可以表示为

$$\bar{l} = \frac{1}{2}(l_1 + l_2) \quad (4)$$

## 3 测距方案评价

单端故障行波法具有测距准确性高的优点,但这种方法不容易可靠识别故障暂态行波波形中第 2 个反向行波浪涌的性质。

对于脉冲注入法而言,注入脉冲信号在故障点的反射波总是先于接地极反射波达到测量点,因而不存在识别第 2 个反向行波浪涌的问题。但是,单独使用脉冲注入法测距存在的问题是容易受到故障暂态过程的影响。

本文通过在直流输电系统中性母线端实时监测直流接地极线路暂态行波并识别线路是否发生故障(或者直接利用接地极线路的保护动作信号来确认线路故障)。一旦检测到线路已经发生故障,则待故障暂态过程结束后(躲过一定延时),通过脉冲注入法确定线路故障区段,根据故障区段信息即能可靠识别故障暂态行波波形中第 2 个反向行波浪涌的性质,从而实现了脉冲注入法和单端故障行波法的有机结合,并能够同时保证故障测距的可靠性和准确性。

## 4 仿真验证分析

### 4.1 仿真建模

本文利用电磁暂态分析软件 PSCAD 建立单极运行方式下的高压直流输电系统仿真模型,如图 3 所示。其中:  $AC_1$ 、 $AC_2$  为 500 kV 交流电源;  $T_1$ 、 $T_2$  为变压器;  $HB_1$ 、 $HB_2$  为换流桥;  $D$  为直流输电线路;  $C$  和  $H$  构成谐波滤波器;  $X_1$ 、 $X_2$  为两根平行的架空线路(长度相同),代表接地极线路,其首端并联后连接直流系统中性点,末端并联后经接地电阻

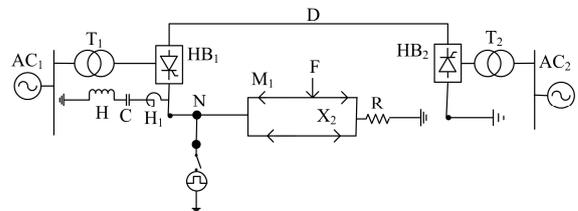


图 3 单极运行方式下的高压直流输电系统仿真模型  
Fig. 3 Simulation model of HVDC transmission system under single-pole operation mode

R 入地。故障点 F 设在接地极线路 X<sub>1</sub> 上, 用于故障探测的脉冲信号由一可控脉冲电源产生, 并从接地极线路首端(测量端)注入。

有关参数设置如下。

- 1) 直流输电线路长度: 400 km;
- 2) 接地极线路长度:  $d=100$  km;
- 3) 接地极线路末端接地电阻:  $0.3 \Omega$ ;
- 4) 脉冲电源幅值: 48 V;
- 5) 仿真计算步长:  $1 \mu\text{s}$

根据仿真计算求得暂态行波在直流接地极线路中的传播速度为  $v=298$  km/ms。

## 4.2 故障测距仿真

### 4.2.1 近距离故障

在接地极线路上设置故障点距离测量端 30 km, 故障类型为非金属性接地故障, 过渡电阻为  $1 \Omega$ , 故障发生时刻为 0.6 s, 测量端提取到的故障暂态行波波形如图 4 所示(图中横坐标起始刻度对应于 0.6 s)。

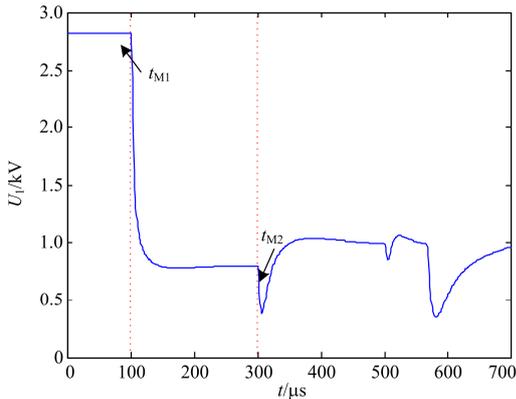


图 4 接地极线路 30 km 处故障产生的暂态波形  
Fig. 4 Transient waveform generated by a fault on the grounding electrode line, 30 km away from the measurement point

在 0.65 s 时刻注入幅值为 48 V、脉冲宽度为 32  $\mu\text{s}$  的单极性脉冲信号, 测量端提取到注入脉冲信号产生的暂态波形如图 5 所示(图中横坐标起始刻度对应于 0.6499 s)。

对图 5 波形数据进行分析, 可计算出脉冲信号发射时刻和反射波到达时刻之间的时间间隔为  $\Delta t=200 \mu\text{s}$ , 对应的初步测距结果为

$$l_1 = \frac{1}{2} \times 298 \times 0.2 = 29.8 \text{ km}$$

显然,  $l_1 < d/2$ , 表明故障点位于线路中点以内。

据此可以确定, 在图 4 所示的故障暂态行波波形中, 第 2 个行波浪涌为故障点反射波。进一步地, 可计算出中性母线测量端感受到的故障初始行波浪涌和故障点反射波之间的时间间隔为 202  $\mu\text{s}$ , 故障点

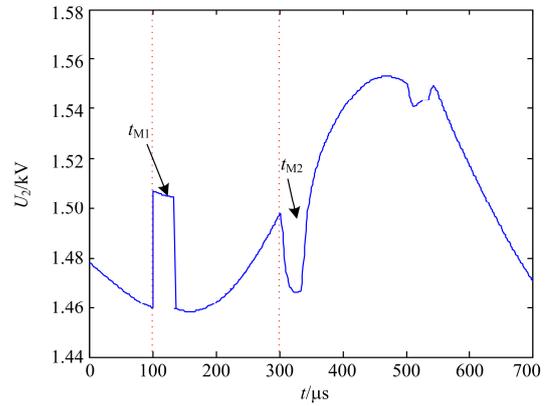


图 5 接地极线路 30 km 处故障时注入脉冲信号产生的暂态波形

Fig. 5 Transient waveform generated by injected pulse signal in case a fault occurred on the grounding electrode line, 30 km away from the measurement point

到中性母线的距离为

$$l_2 = \frac{1}{2} \times 298 \times 0.202 = 30.1 \text{ km}$$

最终测距结果为

$$\bar{l} = \frac{1}{2}(l_1 + l_2) = 29.95 \text{ km}$$

### 4.2.2 远距离故障

在接地极线路上设置故障点距离测量端 70 km, 其他所有参数与 4.2.1 节中设定的参数相同。测量端提取到的故障暂态行波波形和注入脉冲信号产生的暂态波形分别如图 6 和图 7 所示。

对图 7 波形数据进行分析, 可计算出脉冲信号发射时刻和反射波到达时刻之间的时间间隔为  $\Delta t=469 \mu\text{s}$ , 对应的初步测距结果为

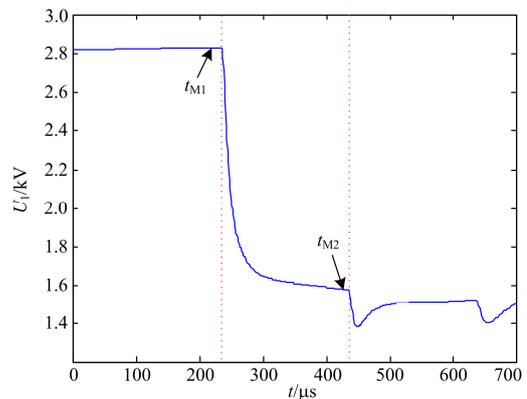


图 6 接地极线路 70 km 处故障产生的暂态波形  
Fig. 6 Transient waveform generated by a fault on the grounding electrode line, 70 km away from the measurement point

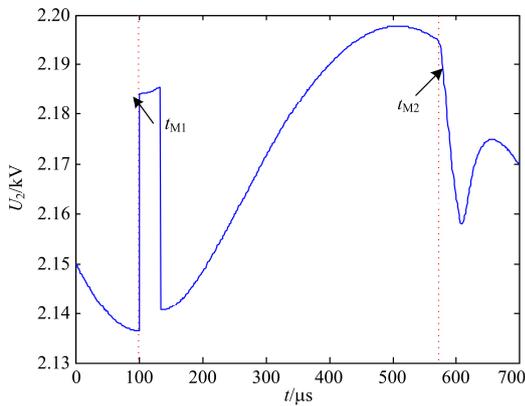


图7 接地极线路 70 km 处故障时注入脉冲信号产生的暂态波形

Fig. 7 Transient waveform generated by injected pulse signal in case a fault occurred on the grounding electrode line, 70 km away from the measurement point

$$l_1 = \frac{1}{2} \times 298 \times 0.469 = 69.88 \text{ km}$$

显然,  $l_1 > d/2$ , 表明故障点位于线路中点以外。

据此可以确定, 在图 6 所示的故障暂态行波波中, 第 2 个行波浪涌为接地极反射波。进一步地, 可计算出中性母线测量端感受到的故障初始行波浪涌和接地极反射波之间的时间间隔为 201  $\mu\text{s}$ , 故障点到中性母线的距离为

$$l_2 = 100 - \frac{1}{2} \times 298 \times 0.201 = 70.05 \text{ km}$$

最终测距结果为

$$\bar{l} = \frac{1}{2}(l_1 + l_2) = 69.97 \text{ km}$$

#### 4.2.3 仿真结果统计

表 1 中给出了直流接地极线路上 6 个不同地点发生非金属性接地故障时, 根据脉冲注入法和单端故障行波法相结合的测距方案获得的最终测距结果。可以看出, 测距误差可以达到 300 m 以内。

表 1 仿真结果统计

Table 1 Statistics of simulation results

序号	实际故障距离/km	测距结果/km	测距误差/km
1	20	19.82	0.18
2	30	29.95	0.05
3	40	39.73	0.27
4	50	50.31	0.31
5	70	69.97	0.03
6	85	85.32	0.32

## 5 结语

本文针对单极运行方式下的高压直流输电系

统, 提出一种将脉冲注入法和单端故障行波法相结合的接地极线路故障测距方案, 其主要特点在于首先利用脉冲注入法探测故障点所处线路区段, 进而实现精确故障定位。

直流输电系统在单极运行方式下, 接地极线路故障会产生明显的暂态行波过程。采用脉冲注入法和单端故障行波法相结合的故障测距方案, 能够解决单纯利用单端故障行波法存在的第 2 个反向行波浪涌识别问题, 从而大大提高了故障测距的可靠性和准确性。

## 参考文献

- [1] MA J X, DAWALIBI F P, RUAN W. Design considerations of HVDC grounding electrodes[C] // Transmission and Distribution Conference & Exhibition, 2005: IEEE.
- [2] 张勇军, 陈碧云. 高压直流输电原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [3] 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.
- [4] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 7pp. DOI 10.1186/s41601-016-0025-x
- [5] 束洪春, 田鑫萃, 张悱宁. 接地极线路短路故障快速识别及故障测距研究[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 84-91. SHU Hongchun, TIAN Hongcui, ZHANG Yining. Research on short-circuit fault identification and fault location algorithm for HVDC electrode line[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 84-91.
- [6] 张悱宁, 束洪春, 翟永昌, 等. 基于两种算法融合的接地极线路故障测距[J]. 高电压技术, 2016, 42(8): 2633-2641. ZHANG Yining, SHU Hongchun, ZHAI Yongchang, et al. Fault location for grounding electrode line based on fusion of two algorithms[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(8): 2633-2641.
- [7] 张悱宁, 束洪春, 田鑫萃, 等. 特高压直流输电线路接地极线路高阻故障测距方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 1-7. ZHANG Yining, SHU Hongchun, TIAN Xincui, et al. Research on fault location algorithm for HVDC electrode line high impedance fault[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 1-7.
- [8] 李强, 王银乐. 高压输电线路的故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 192-197. LI Qiang, WANG Yinle. Fault location methods for high voltage power transmission lines[J]. Power System

- Protection and Control, 2009, 37(23): 192-197.
- [9] 王彩芝. 直流接地极线路单端行波故障测距研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2014.  
WANG Caizhi. Research on the DC grounding line single ended traveling wave fault location[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2014.
- [10] 尹晓光, 宋琳琳, 尤志, 等. 与波速无关的输电线路双端行波故障测距研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 35-38.  
YIN Xiaoguang, SONG Linlin, YOU Zhi, et al. Study of fault locating for transmission line double terminal traveling waves unrelated to wave speed[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 35-38.
- [11] 张怿宁, 王彩芝, 陈平, 等. 直流接地极线路故障暂态行波传播特性分析[J]. 中国电力, 2015, 48(3): 88-93.  
ZHANG Yining, WANG Caizhi, CHEN Ping, et al. Analysis of propagation characteristics of transient traveling waves in HVDC grounding electrode line faults[J]. Electric Power, 2015, 48(3): 88-93.
- [12] 蔡永梁, 张楠, 冯鹤, 等. 基于行波原理直流输电系统接地线路故障测距系统设计[J]. 南方电网技术, 2011, 5(2): 48-50.  
CAI Yongliang, ZHANG Nan, FENG Dong, et al. Design of traveling wave based fault location system of HVDC electrode lines[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(2): 48-50.
- [13] 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.
- [14] 高艳丰, 朱永利, 闫红艳, 等. 一种新型的输电线路双端行波故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 8-13.  
GAO Yanfeng, ZHU Yongli, YAN Hongyan, et al. A new fault location method of transmission lines based on double-terminal traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 8-13.
- [15] 高效海, 苏晓龙. 一种新的单端行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 87-91.  
GAO Xiaohai, SU Xiaolong. A new method for single-ended traveling wave fault location[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 87-91.

收稿日期: 2016-09-12; 修回日期: 2016-12-01

作者简介:

张怿宁(1973—), 男, 工学博士, 教授级高级工程师, 主要从事超高压交、直流输电系统自动化, 故障测距, 继电保护与控制的研究、仿真和检修工作; E-mail: 286285430@qq.com

郝洪民(1991—), 男, 工学硕士, 研究方向为电网故障监测与定位;

李京(1967—), 男, 工程硕士, 研究员, 研究方向为电网故障监测与定位。

(编辑 葛艳娜)