

DOI: 10.7667/PSPC180258

# 一种用于校验双端行波测距装置的测试系统的研发与测试

王伟<sup>1</sup>, 吴亚辉<sup>2</sup>, 李志勇<sup>1</sup>, 庄良文<sup>1</sup>, 周鹏鹏<sup>1</sup>

(1. 许昌开普电气研究院, 河南 许昌 461000; 2. 清华大学电机系电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 双端行波测距技术利用故障行波的初始波头抵达故障线路两端的时间差来实现故障定位, 比单端测距和传统测距技术有着较高的精度和可靠性。双端行波测距装置在投入运行前必须经过专门的校验和测试, 这是传统的继电保护测试仪所不能做到的。提出了一种用于校验该装置的测试系统的设计实现方案, 并对系统样机做了大量的实验测试。实验结果表明, 该测试系统的电压、电流输出具有很高的频率精度、幅值精度和同步性, 满足双端行波测距装置的校验需求。

**关键词:** 双端测距; 测试系统; 校验; 测试; 行波

## Development and test of a test system for verifying double-ended traveling wave fault location equipment

WANG Wei<sup>1</sup>, WU Yahui<sup>2</sup>, LI Zhiyong<sup>1</sup>, ZHUANG Liangwen<sup>1</sup>, ZHOU Pengpeng<sup>1</sup>

(1. Xuchang Ketop Electric Research Institute, Xuchang 461000, China; 2. State Key Lab of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The double-ended traveling wave fault location technology uses the time difference between the initial wave head of the fault traveling wave to achieve fault location, and has higher accuracy and reliability than single-ended and traditional fault location techniques. The double-ended traveling wave fault location equipment must undergo special check and test before putting into operation, this is what the traditional relay protection tester can't do. This paper presents a design and implementation scheme for a test system which is used to verify the equipment, and a large number of experimental tests are performed on the prototype. The experimental results show that the voltage and current output of the test system have high frequency accuracy, amplitude accuracy and synchronism, which can meet the verification requirements of the double-ended traveling wave fault location equipment.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600).

**Key words:** double-ended fault location; testing system; verification; test; traveling wave

## 0 引言

电力线路测距装置的功能是在故障发生后迅速、准确地定位故障位置, 从而使检修人员能够快速处理永久性故障、消除隐患以保证电力系统的安全稳定和经济运行<sup>[1-3]</sup>。

传统的测距技术基于工频稳态故障信息, 易受过渡电阻、系统结构、负荷电流以及互感器变换误差等因素的影响而导致故障定位误差较大<sup>[4-5]</sup>。当电

力系统输电线路发生故障时, 故障点所产生的故障行波包含丰富的故障信息, 如故障方向、发生时刻和发生位置等<sup>[6-8]</sup>。因此基于高频暂态行波信息的故障测距技术已经成为当今电力系统继电保护领域重要的新兴研究方向之一<sup>[9-12]</sup>。行波测距技术在原理上不受传统测距干扰因素的影响, 具有精度更高、可靠性更强的优势<sup>[13-15]</sup>。同时, 小波变换的引入使得故障初始行波和反射波更容易被检测<sup>[14,16]</sup>, 大大提高了行波测距的实用性。因此, 行波测距已在我国高压输电系统中广泛配置<sup>[17-20]</sup>。行波测距又分为单端测距和双端测距, 其中单端测距的优点是设备

基金项目: 国家重点研发计划基金资助(2016YFB0900600)

成本低, 无需时标系统和通信, 不受线路长度误差影响。但其缺点也很明显, 由于依赖反射波的识别, 一旦识别失败, 测距精度就大大降低。双端测距则只识别两个方向的初始行波, 原理简单, 结果可靠, 但是需要双端装设和时间同步, 对通信质量和可靠性要求较高。目前由于网络条件的成熟和智能化变电站的推进, 双端测距所需的通信条件已经逐渐完备, 因此双端行波测距装置的优势可以在高压输电系统中得到充分发挥, 与此同时也产生了越来越多的对该类装置进行校验测试的需求<sup>[21-25]</sup>。

双端行波测距装置在出厂前应通过相关测试实验。传统的测试手段, 包括电力系统动态模拟、实时数字仿真器(Real Time Digital Simulator, RTDS)以及传统的继电保护测试仪, 都不能有效测试基于高频暂态行波的双端行波测距装置, 而需要借助专门的暂态行波测试仪。文献[26]提出了暂态行波测试仪的实现方案, 并对所研制的样机进行了大量测试, 证明了该方案的可行性。文献[27]针对文献[26]中所提方案, 在故障数据分段处理、高速数模转换以及多路同步性方案等方面进行了优化。本文在文献[27]的基础上, 提出了屏柜式暂态行波测试仪方案和功率放大器小型化方案, 不但省略了之前繁冗的接线工作, 还使得测试系统移动化、便携化。另外, 根据新的测试系统特点开发出了界面更加友好、易操作的上位机软件, 使测试者可以轻易将故障仿真数据上传至暂态信号发生器。本文还对所研发测试系统进行了大量的实验测试。

## 1 双端测距原理

如图 1 所示, 母线 M 和 N 两端已经过时间同步装置(GPS 时钟)定时, 若故障初始行波到达 M、N 两母线的时刻分别被记录为  $t_M$  和  $t_N$ , 则故障距离可由以下公式计算得出。

$$l_M = [(t_M - t_N)v + L]/2 \quad (1)$$

$$l_N = [(t_N - t_M)v + L]/2 \quad (2)$$

式中:  $l_M$ 、 $l_N$  和  $L$  分别为故障点到母线 M 的距离、故障点到母线 N 的距离和线路全长;  $v$  为故障行波在输电线路上的传播速度, 可以根据线路结构参数计算出, 也可以通过实测获得, 一般设置为  $295 \sim 299 \times 10^3$  km/s 之间的一个数值<sup>[13]</sup>。

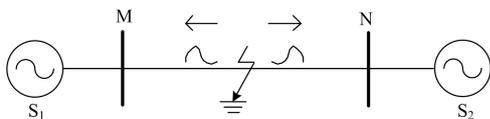


图 1 双端测距原理示意图

Fig. 1 Schematic of the principle for double-ended fault location

## 2 双端行波测距装置测试系统实现方案

双端行波测距装置测试系统可分为暂态信号发生器和功率放大系统两大部分。其中, 暂态信号发生器由上位机、数模转换模块和开入开出回路组成, 可将仿真软件(如 EMTP/ATP 或 PSCAD/EMTDC)中模型所产生的仿真数据转换为模拟量并输出至功率放大系统; 功率放大系统由行波高电压功率放大器和行波大电流功率放大器组成, 可将暂态信号发生器输出的模拟量放大至电力互感器二次侧输出的级别。根据文献[26]和[27]的分析调研, 测试系统的输出最高频率应能达到 100 kHz, 输出电压的稳态有效值应能达到 100 V, 瞬时值应能达到 170 V, 输出电流的稳态有效值应能达到 50 A, 瞬时值应能达到 150 A。

暂态信号发生器的上位机软件应具有友好的人机交互界面, 支持单采样率及多采样率的波形数据, 可手动进行数据分段并能自动完成数据转换。软件界面如图 2 所示, 图中游标将波形数据分为四段, 一般为故障前稳态段、故障暂态段、故障过渡段以及故障后稳态段。每段数据均可设置单独的数据间隔和循环次数参数。6 路电压、6 路电流及 4 路开关量数据顺序可调, 可灵活分配输出通道。

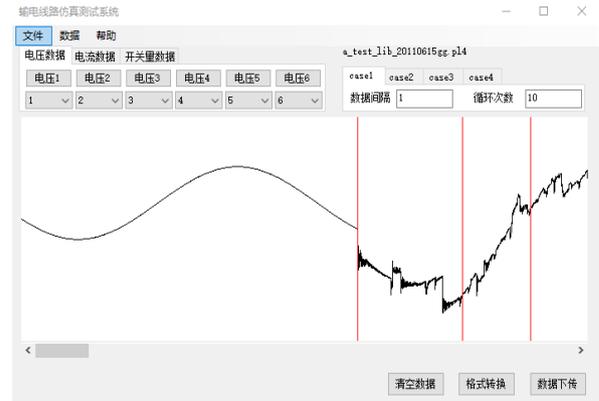


图 2 上位机软件界面

Fig. 2 PC software interface

数模转换模块由数字信号处理器(DSP)核心, 多路高精度高速数模转换电路和两级功率放大电路组成。上位机与 DSP 之间通过串口或网口进行通信, 将数字量形式的故障数据上传并由数模转换电路转换为模拟电压小信号。本设计方案提供四路电压、四路电流的模拟输出通道, 并具备冗余配置。

功率放大部分采用超大规模集成电路技术, 可将模拟电压小信号放大为高电压、大电流信号, 真实再现电力系统二次侧的信号。功率放大系统由前置放大电路、功率放大电路和过电压过电流保护电路组成。功率放大电路采用负反馈电路来保证精度要

求,同时采用多路冗余并行输出技术来保证可靠性。

本设计方案在吸取文献[26]经验的基础上,将暂态信号发生器的输出电压幅值从±5 V 提高到了±10 V,即提升至 RTDS 设备的输出标准。RTDS 设备可以连接至电压电流功率放大器的冗余配置通道,以达到联合测试或对比测试的目的。

### 3 双端行波测距装置测试系统的性能测试

#### 3.1 电压输出测试

电压输出测试的实验设计如图 3 所示,其中 V 为电压表, F 为频率计, R0—R3 为可变电阻,起限流作用。测试过程如下:首先制作理论波形数据,频率分别为 50、1 k、10 k、50 k 和 100 k,单位为 Hz,幅值分别为 1、5 和 8,单位为 V;将所制作的数据下传至测试系统,利用电压表和频率计测量测试系统的电压功放输出,每组数据均测量 5 次求平均值并记录。测试结果如表 1 所示,其中电压功放的放

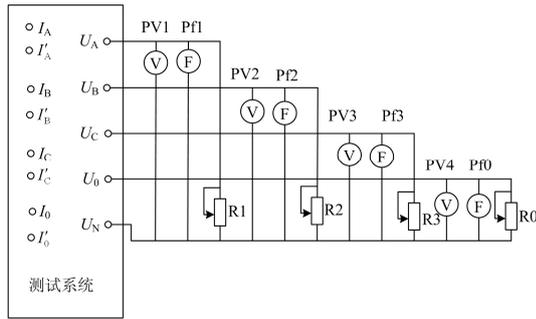


图 3 电压输出测试实验设计

Fig. 3 Experimental design for the test of voltage output

表 1 电压输出测试实验结果

Table 1 Experimental result of the voltage output test

理论波形		实测波形					
频率/幅值/ Hz V	频率/ Hz	频率 误差/%	幅值/V	幅值误差/%			
1	50.00	0.00	11.89	-11.89	-0.92	-0.92	
50	5	50.04	0.08	59.16	-59.16	-1.40	-1.40
	8	50.04	0.08	95.22	-95.22	-0.81	-0.81
1 k	1	1.001 k	0.10	11.92	-11.92	-0.67	-0.67
	5	1.001 k	0.10	59.24	-59.24	-1.27	-1.27
	8	1.001 k	0.10	95.32	-95.32	-0.71	-0.71
10 k	1	10.1 k	1.00	11.90	-11.90	-0.83	-0.83
	5	10.1 k	1.00	59.20	-59.20	-1.33	-1.33
	8	10.1 k	1.00	95.30	-95.30	-0.73	-0.73
50 k	1	50.1 k	0.20	11.92	-11.92	-0.67	-0.67
	5	50.1 k	0.20	59.28	-59.28	-1.20	-1.20
	8	50.1 k	0.20	95.46	-95.46	-0.56	-0.56
100 k	1	100.1 k	0.10	11.89	-11.89	-0.92	-0.92
	5	100.1 k	0.10	59.28	-59.28	-1.20	-1.20
	8	100.1 k	0.10	95.22	-95.22	-0.81	-0.81

大倍数为 12。相对误差的定义为:(测量值-理论值)/理论值,以百分数表示,电流实验与之相同。

从表 1 可以看出,测试系统的电压输出频率相对误差最高为 1.00%,幅值相对误差最高为 1.40%。

#### 3.2 电流输出测试

电流输出测试的实验设计如图 4 所示,其中 A 为电流表, F 为频率计, R0~R3 为可变电阻,将电流信号转变为电压信号攻频率计测量。测试过程与电压输出测试类似,测试结果如表 2 所示,其中电流放大倍数为 5。

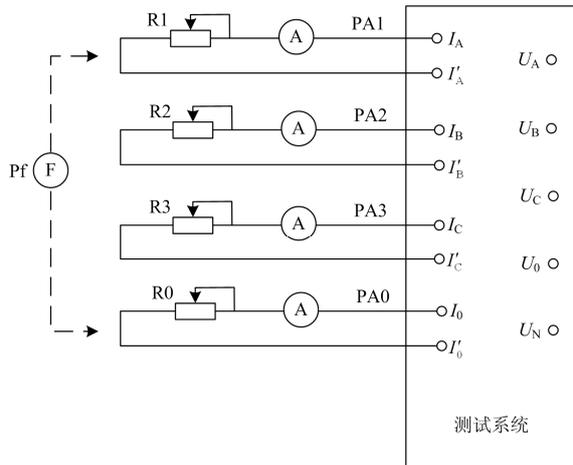


图 4 电流输出测试实验设计

Fig. 4 Experimental design for the test of current output

表 2 电流输出测试实验结果

Table 2 Experimental result of the current output test

理论波形		实测波形					
频率/幅值/ Hz V	频率/ Hz	频率 误差/%	幅值/A	幅值 误差/%			
1	50.00	0.00	5.12	-5.12	2.40	2.40	
50	5	50.04	0.08	25.08	-25.08	0.32	0.32
	8	50.04	0.08	40.12	-40.12	0.30	0.30
1 k	1	1.001 k	0.10	5.15	-5.15	3.00	3.00
	5	1.001 k	0.10	25.24	-25.24	0.96	0.96
	8	1.001 k	0.10	40.21	-40.21	0.53	0.53
10 k	1	10.1 k	1.00	5.11	-5.11	2.20	2.20
	5	10.1 k	1.00	24.96	-24.96	-0.16	-0.16
	8	10.1 k	1.00	39.89	-39.89	-0.27	-0.27
50 k	1	50.1 k	0.20	5.09	-5.09	1.80	1.80
	5	50.1 k	0.20	24.73	-24.73	-1.08	-1.08
	8	50.1 k	0.20	39.87	-39.87	-0.33	-0.33
100 k	1	100.1 k	0.10	5.13	-5.13	2.70	2.70
	5	100.1 k	0.10	25.92	-25.92	3.68	3.68
	8	100.1 k	0.10	39.82	-39.82	-0.45	-0.45

从表 2 可以看出, 测试系统的电流输出频率相对误差最高为 1.00%, 幅值相对误差最高为 3.68%。

### 3.3 双端行波测距装置功能性实验

利用所研制的测试系统对双端行波测距装置进行功能性实验, 测试平台为某公司生产的 HPR-7003 行波测距测试平台。功能性实验设计如图 5 所示。首先在 EMTP/ATP 中仿真电力系统输电线路故障数据, 所建系统模型如图 6 所示, 在母线 m、n 两端装设双端行波测距装置, TA 为电流互感器, 线路全长  $L$  为 400 km。根据仿真模型中的传输线参数, 将波速度设置为 292.616 km/s。实验结果如表 3 所示, 可以看出在各种情况下的测距误差都不超过 1 km。将距母线 m 端 100 km 处 A 相金属性接地故障的仿真数据与双端测距装置的录波数据分别作图进行对比, 如图 7 所示。可以看出, 录波数据能够有效地跟随仿真数据的变化, 模拟出准确的故障后稳态过程。该实验结果表明, 所研制测试系统能够重现电力系统故障稳态, 可以有效地对基于行波的故障检测装置进行测试实验。

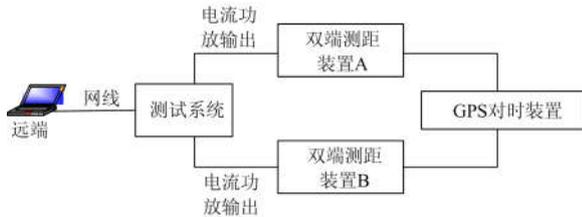


图 5 双端测距装置功能性实验设计

Fig. 5 Experimental design for the functional test of the double-ended fault location equipment

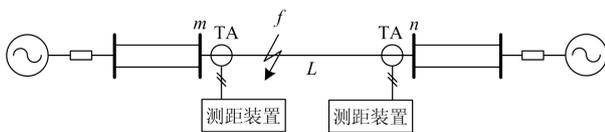


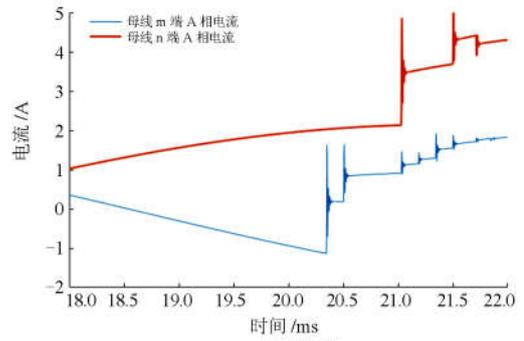
图 6 系统模型

Fig. 6 System model

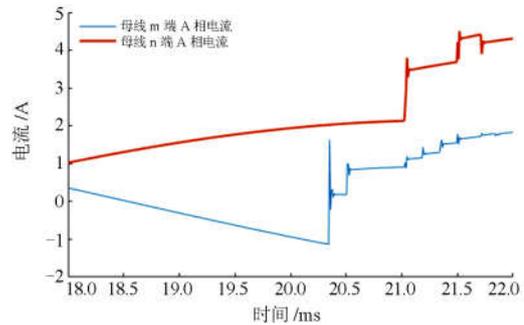
表 3 实验结果

Table 3 Experimental result

故障距离/km	故障类型	过渡电阻/ $\Omega$	故障电压初相角/ $^\circ$	测距结果/km
1	Ag	0	45	0.66
	ABCg	0	45	1.12
	ABCg	300	45	1.45
100	Ag	0	45	100.22
	ABg	0	45	99.76
200	BC	0	45	199.77
	ABCg	0	45	200.32



(a) 仿真数据



(b) 录波数据

图 7 仿真数据与录波数据波形对比

Fig. 7 Comparison between original and recorded data

## 4 结论

双端行波测距装置因其原理上的优势可以实现故障点的精确定位。本文介绍了一种用于校验双端行波测距装置的测试系统, 针对该测试系统的性能进行了大量的精度实验测试, 并进一步利用该测试系统对双端行波测距装置进行了功能性实验。实验结果表明, 该测试系统具有很高的频率精度和幅值精度, 可以有效地对双端行波测距装置进行校验测试。

## 参考文献

- [1] 胡婷, 游大海, 金明亮. 输电线路故障测距研究现状及其发展[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊 1): 146-150. HU Ting, YOU Dahai, JIN Mingliang. Present situation and development of fault location for transmission lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(S1): 146-150.
- [2] 闫红艳, 高艳丰, 王继选, 等. 同杆双回线路行波故障测距的关键问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 120-128. YAN Hongyan, GAO Yanfeng, WANG Jixuan, et al. Study on the key problem of traveling wave fault location in the same pole double circuit[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 120-128.

- [3] 刘顺桂, 李勋, 张宏钊, 等. 一种采用时间判别法的混合线路故障行波定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 41-46.  
LIU Shungui, LI Xun, ZHANG Hongzhao, et al. A traveling wave fault location method of hybrid line using the discrimination[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 41-46.
- [4] 王伟, 余锐, 陈愚, 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 Wei, YU Rui, CHEN Yu, et al. Application research of fault location of UHV transmission line protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(19): 40-46.
- [5] 鹿洪刚, 覃剑, 陈祥训, 等. 电力电缆故障测距综述[J]. 电网技术, 2004, 28(20): 58-63.  
LU Honggang, QIN Jian, CHEN Xiangxun, et al. Overview of power cable fault location[J]. Power System Technology, 2004, 28(20): 58-63.
- [6] DONG Xinzhou, GE Yaozhong, HE Jiali. Surge impedance relay[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1247-1256.
- [7] DONG Xinzhou, LUO Shuxin, SHI Shenxing, et al. Implementation and application of practical traveling-wave-based directional protection in UHV transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 294-302.
- [8] DONG Xinzhou, KONG Wei, CUI Tao. Fault classification and faulted-phase selection based on the initial current traveling wave[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2): 552-559.
- [9] XU Fei, DONG Xinzhou, WANG Bin, et al. Self-adapted single-ended travelling wave fault location algorithm considering transfer characteristics of the secondary circuit[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(14): 1913-1921.
- [10] 李振兴, 吴李群, 田斌, 等. 不同步双端数据修正波速的单端行波测距算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 16-22.  
LI Zhenxing, WU Liqun, TIAN Bin, et al. Single-terminal traveling wave location algorithm based on amending wave velocity[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 16-22.
- [11] 邹浩, 于仲安, 吴彪, 等. 同塔四回输电线路双端故障测距实用算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 111-116.  
ZOU Hao, YU Zhongan, WU Biao, et al. A new method of fault location with two-terminal data for four-parallel transmission lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 111-116.
- [12] ROOSTAEE S, THOMAS M, MEHFUZ S. Experimental studies on impedance based fault location for long transmission lines[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 169-177. DOI: 10.1186/s41601-017-0048-y.
- [13] 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.
- [14] 董新洲. 小波理论应用于输电线路行波故障测距研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1996.
- [15] 董新洲, 葛耀中, 徐丙垠, 等. 利用GPS的输电线路行波故障测距研究[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(12): 39-42.  
DONG Xinzhou, GE Yaozhong, XU Bingyin, et al. Study of transmission line fault location based on travelling waves and GPS technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(12): 39-42.
- [16] ERNADOH M. ALI A. Fault location using wavelets[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1475-1480.
- [17] 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 fault location and its operating experience[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(6): 66-69.
- [18] 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.
- [19] 范春菊, 姜军, 郭煜华, 等. 输电线路行波故障测距技术的发展与应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(4): 129-134.  
FAN Chunju, JIANG Jun, GUO Yuhua, et al. Development and applications of traveling wave fault location on transmission lines[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(4): 129-134.
- [20] 曾祥君, 尹项根, 林福昌, 等. 输电线路故障GPS行波定位装置实验测试研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 31-34.  
ZENG Xiangjun, YIN Xianggen, LIN Fuchang, et al. Experimentation for the GPS and traveling-wave based fault locator of transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 31-34.

- [21] FENG Teng, DONG Xinzhou, XU Fei, et al. Research on performance test of travelling wave fault locators[C] // Modern Electric Power Systems (MEPS), July 6-9, 2015, Wroclaw, Poland: 1-6.
- [22] 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 fault location equipment based on traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 145-149.
- [23] 覃剑, 葛维春, 邱金辉, 等. 影响输电线路行波故障测距精度的主要因素分析[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 28-35. QIN Jian, GE Weichun, QIU Jinhui, et al. Analysis on main influencing factors for transmission lines fault location precision based on traveling wave[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 28-35.
- [24] 徐丙垠, 李京, 陈平, 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, LI Jing, CHEN Ping, 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.
- [25] 谢民. 220 kV 电网行波测距系统组网运行实践探讨[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(5): 136-138, 141. XIE Min. Networking operation practice of traveling wave based fault locating system for 220 kV grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(5): 136-138, 141.
- [26] 董新洲, 冯腾, 王飞, 等. 暂态行波保护测试仪[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 192-198. DONG Xinzhou, FENG Teng, WANG Fei, et al. Test platform of protection equipments based on transient traveling wave[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 192-198.
- [27] 董新洲, 冯腾, 王飞. 用于行波保护测试的暂态信号发生器关键技术[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 66-71, 77. DONG Xinzhou, FENG Teng, WANG Fei. Key techniques of transient signal generator for test of traveling wave protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 66-71, 77.

收稿日期: 2018-03-11; 修回日期: 2018-05-30

作者简介:

王 伟(1972—), 男, 高级工程师, 现从事电力系统仿真试验研究; E-mail: wangwei@ketop.cn

吴亚辉(1988—), 男, 硕士研究生, 工程师, 现从事电流互感器高频特性建模和暂态保护测试研究;

李志勇(1986—), 男, 硕士研究生, 工程师, 现从事电力系统仿真试验研究工作。

(编辑 张爱琴)