

行波故障测距装置的检测与评价

刘慧海¹, 张晓莉¹, 姜博², 艾淑云¹, 田秋松³

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 清华大学电机系, 北京 100084; 3. 河南省电力公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 为了开展行波故障测距装置型式试验, 分析了输电线路行波故障测距装置的相关标准, 提出了装置的检测项目。针对行波故障测距精度主要影响因素, 建立了行波故障测距装置功能和性能测试系统, 并通过测试实例, 详细介绍了仿真模型建立及故障的设置方法。试验结果证明了测试方法的有效性和实用性。最后依据 DL/T 357-2010 标准, 在多年设备检测的基础上, 提出行波测距装置评价体系, 对装置的软件与硬件综合性能进行评判, 提出装置应用范围, 为工程设备选型提供技术依据和保证。

关键词: 行波故障测距装置; 型式试验; 功能和性能测试系统; 仿真模型; 评价体系

Testing and evaluation method of fault location equipment based on traveling wave

LIU Huihai¹, ZHANG Xiaoli¹, JIANG Bo², AI Shuyun¹, TIAN Qiusong³

(1. Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Henan Electric Power Corporation, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to carry out the type test of fault location equipment, the relevant standards of transmission line travelling wave fault location equipment are analyzed. In view of the influence factors of range accuracy, functional and performance testing system and test items are proposed. Through detailed introduction of test case, the methods of simulation model establishing and fault setting are introduced in detail. Experimental results demonstrate the validity and practicability of the method of testing. At last, according to the standard DL/T 357-2010 and on the basis of examination of fault recorders throughout the years, an evaluation mechanism of fault location equipment is proposed, which can evaluate software and hardware comprehensive performance of device, and can put forward the device applications scopes that provide technical support and guarantee for device selection.

Key words: traveling wave fault location equipment; type test; functional and performance testing system; simulation model; evaluation system

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)01-0145-05

0 引言

行波测距装置可以精确定位线路故障点, 大大减少巡线的工作量, 缩短故障修复时间, 提高供电可靠性, 目前已广泛进入工程应用^[1-2]。与行波测距的应用领域取得的显著进步不同, 行波试验技术明显落后于行波应用技术^[3], 目前国内投运的装置基本上均未进行型式试验验证。随着行波故障测距装置的大量使用, 选择性能优异的能满足电网运行要求的行波故障测距装置是最基础和最重要的环节。因此对行波故障测距装置的检测和评价进行研究, 对设备选型和运行具有重要的意义。

1 行波故障测距装置检测研究现状

行波故障测距法是根据行波传输理论来实现输电线路故障测距的方法^[4-5]。目前继电保护装置试验

检测手段包括电力系统动态模拟仿真、全数字实时仿真(RTDS)、继电保护测试仪等。电力系统动模实验是基于物理仿真的动态模拟, 能用来进行电力系统机电暂态以及动态过程的实时仿真研究, 但是由于无法产生高频暂态行波, 无法满足行波测距装置的检测需要。加拿大 Manitoba 大学研制的 RTDS 是一个实时的电力系统仿真器, 它采用数字仿真和相应的模拟放大电路来模拟包括电力系统故障在内的各种电力系统状态, 但是受当今科学技术发展限制存在如下缺点: (1) 输出频率最高只能达到 20 kHz, 不能输出行波信号的高频部分; (2) RTDS 的仿真受节点数目的限制, 一般情况下只能计算十几个节点, 不能产生频率高达数百千赫兹的暂态行波过程。

为规范行波故障测距装置的设计、制造和使用, 2010 年中国电力企业联合会发布了“输电线路行波故障测距装置技术条件”标准^[6]。行标中给出了装

置的技术要求,对于装置功能和性能等测试,未给出详细的试验条件和方法,因此对行波测距装置检测技术进行深入研究具有重要的意义。

2 型式试验检测系统与测试项目

为了全方位地检验行波故障测距装置的性能,依据标准从不同角度来评价行波故障测距装置性能,主要包括:1)环境适应能力测试;2)电磁兼容性测试;3)功能及性能测试等。中国电力科学研究院继电保护及安全自动装置实验室配备了世界一流的电磁兼容和环境测试设备,可以进行各类现场环境的模拟与测试,其常规的试验项目和方法同继电保护装置。

2.1 行波故障测距装置主要影响因素^[7]

根据近年来行波故障测距装置运行经验分析,对输电线路行波故障测距方法的主要影响因素包括:雷电波、故障位置、故障时电压相角、故障类型、线路类型、母线端线路数目、给定被测线路长度误差、线路两端测距装置时间误差、线路两端CT延时不一致等,有必要针对这些影响因素提出相应测试的项目。

2.2 功能与性能测试系统

为了研究不同影响因素对装置测距算法的影响,搭建功能与性能的测试系统如图1所示。

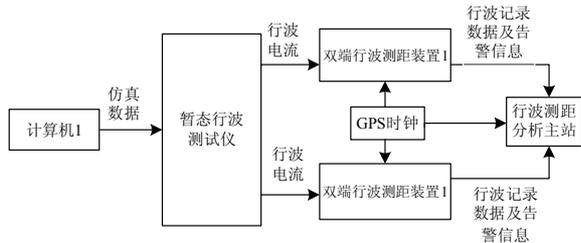


图1 测试系统
Fig. 1 Testing platform

利用PC机仿真工具软件搭建试验模型进行仿真,得到故障时线路的电流。暂态行波保护测试仪^[8]根据仿真的数据产生对应的电流信号,通过放大器输出给装置。双端测距装置通过GPS时钟同步,并将行波记录数据及告警信息传送给分析主站。

该系统能够灵活地进行各种接线形式下不同故障的模拟,可对装置波形采集和算法的准确性进行考核。而装置在实际运行时,由于电流互感器的特性、光传播速度等因素影响,对装置的测距精度会造成很大的影响。为解决数字仿真和电网运行差异问题,实际测试时预先收集部分现场和动模试验的典型故障波形,通过历史故障波形方式开展对装置

的全面考核^[9]。

2.3 功能与性能测试项目

对行波故障测距装置的功能与性能进行测试,试验内容主要包括:

- 1) 暂态行波数据采集的准确性。主要验证装置硬件数据采集功能。
- 2) 算法的准确性和通用性。装置基于行波原理的故障测距算法验证。
- 3) 时间同步功能。双端行波故障测距保持精确的时间同步功能测试。
- 4) 通信功能。线路两端暂态行波数据记录上传到行波测距分析主站,并准确计算出故障点的具体位置等相关功能测试。
- 5) 报警功能。要求装置启动行波记录与运行异常时,应通过液晶显示和指示灯告警,并通知控制中心^[10]。

3 试验实例

行波传播全过程仿真是装置性能测试的关键,需建立能描述实际行波产生和传播过程的仿真系统,包括输电线路故障、电流互感器传变、二次电缆传播、二次侧负荷模型等^[3,11]。下面以山东科汇生产的电流型双端测距装置XC-100测试为例,详细介绍仿真模型建立及故障的设置方法。

3.1 仿真模型

仿真模拟750kV双电源输电线路系统,简图如图2所示。线路1长度为400km,线路2、线路3、线路4、线路5长度均为320km。

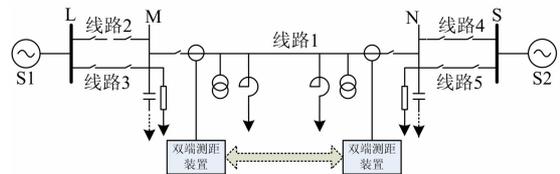


图2 750kV输电线路仿真结构简图

Fig. 2 Simulation diagram of 750 kV transmission line

线路采用串联接入电阻的分布参数模型,线路参数参照实际750kV线路,其参数如表1所示。线路模型采用分段串入电阻的Bergeron三相线路模型LINEZT_3,忽略对地电导G。

在M和N两侧线路,采用并联电抗器的无功补偿方式,并在高压电抗器中性点与地间增加适当的小电抗,补偿度取90%,取电抗器 $L_p=4.1117H$,中性点小电抗 $L_N=0.5690H$,对地电容 $C=10nF$ 。

表 1 750 kV 线路参数

线路参数	正序	零序
$R/(\Omega/\text{km})$	0.012 7	0.272 9
$L/(\text{mH}/\text{km})$	0.853 1	2.673 8
$C/(\text{nF}/\text{km})$	13.67	9.3

仿真采用双电源系统, 首端电源 S1 为发电机组, 末端电源 S2 为电网, 输送功率 2 000 MW。电源 S1、S2 采用理想交流电源 AC3PH, 中性点直接接地, 幅值 612 298 V(相电压峰值), 即线电压有效值 750 kV, 频率 50 Hz, 两电源保持 S1 领先 S2 功角 30° , 仿真过程电源保持不变。两电源内阻相同, 均用集中参数的三相对称线路模型 LINESY_3 模拟, 取正序电阻 $R_1=2.11 \Omega/\text{km}$, 零序电阻 $R_0=28.16 \Omega/\text{km}$, 正序电感 $L_1=0.18 \text{ mH}/\text{km}$, 零序电感 $L_0=0.428 \text{ mH}/\text{km}$, 线路长度为 1 km。

为了使电流互感器有良好的传变特性, 采用的仿真模型如图 3 所示。运用理想变压器, 电流互感器一次侧看作理想电流源, 忽略一次绕组的电阻和漏感, 变比选择 2 000:1。励磁电感 L_m 采用非线性电感, 励磁特性由 CT 的伏安特性得到。正常运行时, L_m 值为 10 H, 磁滞损耗和涡流损耗等效电阻 $R_m=1\ 000 \Omega$, $L_2=2.3 \text{ mH}$, $R_2=2 \Omega$; C_s 为二次绕组杂散电容, $C_s=1 \text{ nF}$ 。

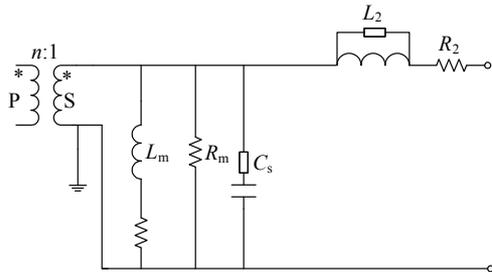


图 3 电流互感器仿真模型

Fig. 3 Simulation diagram of current transformer

电流互感器二次侧负荷为二次控制电缆, 仿真时采用 NODA 电缆模型, 模拟 4 芯铜芯聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套铜带屏蔽控制电缆 KVVVP2-4, 二次控制电缆末端串联 ATP 中测量电流元件 ProbeCurrent, 经小电阻(阻值 $5\text{E}-7 \Omega$)接地, 所需的仿真得到的电流数据由 Probe Current 输出, 双端共 6 路电流信号。

3.2 生成暂态行波测试仪所需数据文件

对图 2 所示的电力系统, 在上述仿真模型下, 进行正向、反向各种故障的仿真。正向故障, 分别模拟线路 1 区内故障, 设置故障点 K1(距 M 侧 1 km), K2(距 M 侧 100 km), K3(距 M 侧 200 km),

K4(距 M 侧 399 km), 在各故障点设置金属性单相接地、两相短路接地、两相相间短路、三相短路以及三相短路接地故障, 并在各故障点模拟单相接地故障时, 选择故障时刻电压相角分别为 30° 、 20° 、 10° 、 5° , 过渡电阻分别为 10Ω 、 100Ω 、 200Ω 、 400Ω 时进行仿真。反向故障, 模拟线路 3 发生 AB 两相接地故障, 故障时刻电压相角 30° , 接地电阻 0.01Ω , 故障距离(距 M 母线)1 km、300 km。

仿真生成 pl4 文件后, 转化为测试仪所用的 case0(故障前工频稳态), case1(故障开始 0.02 s), case2(故障后 0.02 s)数据, 设置 case0 重复 500 次, 即每 10 s 间隔故障发生一次。

3.3 装置功能和性能测试

装置分别经线路 1 M、N 侧 2 000/1 的电流互感器接入系统。装置设置定值: 电压等级 750 kV, CT 变比 2 000:1, 波速度 $293 \text{ m}/\mu\text{s}$ ^[12](根据仿真系统线路参数计算)。

1) 暂态行波数据采集的准确性检查

以 K1 点 A 相金属性接地(故障初相角 30°)为例进行波形对比说明, 测试仪所播放的 case1(故障初始阶段)的原始波形如图 4 所示。

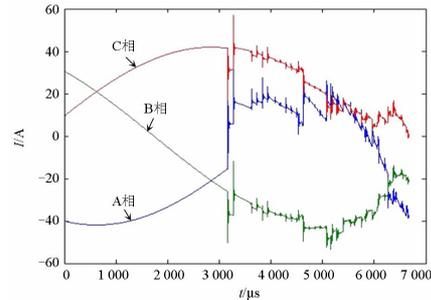


图 4 测试仪输出原始波形

Fig. 4 Original waveform that tester output

用 Matlab 编写带通滤波程序, 对波形进行放大, 并将三相略微错开后取反(因为仿真与录波的正方向选取不同), 得到图 5, 与图 6 装置采集暂态行波相比基本相同。

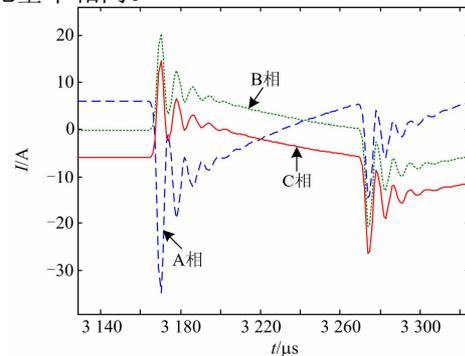


图 5 理论暂态行波波形

Fig. 5 Transient traveling wave in theory

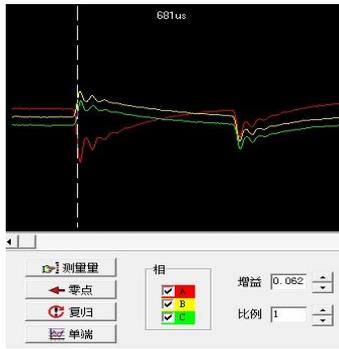


图 6 被测装置采集暂态行波波形

Fig. 6 Transient traveling wave that equipment acquired

2) 测距误差测试

根据搭建的系统进行装置的测距误差测试。模拟区外故障时装置可靠不启动测距，区内故障以 K1 故障点为例，测试结果如表 2 所示。

表 2 K1 故障点装置测距结果

Table 2 Fault location results of K1 fault point

故障类型	故障时刻 电压相角	理论故障 距离/km		装置实测 故障距离/km	
		M 端	N 端	M 端	N 端
单相 金属性接地	30°	1	399	0.7	399.3
两相 金属性短路	30°	1	399	0.6	399.4
单相经过渡电 阻 10 Ω 接地	30°	1	399	0.6	399.4
单相经过渡电 阻 100 Ω 接地	30°	1	399	0.7	399.3
单相经过渡电 阻 200 Ω 接地	30°	1	399	0.6	399.4
单相经过渡电 阻 400 Ω 接地	30°	1	399	不启动	
两相短路再经 10 Ω 接地	30°	1	399	0.7	399.3
三相短路	30°	1	399	0.6	399.4
单相 金属性接地	20°	1	399	0.6	399.4
单相 金属性接地	10°	1	399	0.4	399.6
单相金属性 接地	5°	1	399	不启动	

4 测试评价

根据文献[6]规定的试验项目，提出行波测距装置评估体系。首先根据运行单位和设计部门选型要求确定评估指标；其次，确定权重，对评估模型优化，确定评估模型；最后，对参试的装置试验的结果进行分析与打分，给出装置评估结果。

该评估模型主要从正确性、可靠性两方面对装置进行评判。其中可靠性包含不拒动和不误动两个

方面；准确性是对故障测距装置最重要的要求，准确性一般用测距误差来衡量，包括绝对误差和相对误差。标准要求线路长度在 300 km 以下，双端测距平均误差应不大于 500 m；线路长度在 300 km 及以上，双端测距平均误差应不大于 1 000 m。国家电网公司颁布的《全国电力调度系统“十五”科技发展规划纲要》对线路故障测距提出了比以往更高的要求，即要求综合误差不超过 1%^[13]。

在对行波故障测距装置测距性能的评估时，综合考虑装置在不同的影响因素比如不同故障时电压合闸角，过渡电阻大小、母线端的接线形式、线路类型等条件下，对装置的软件和硬件综合性能进行评判，最终给出装置应用范围，为工程设备选型提供技术依据和保证。

5 结语

本文研究分析了国内外输电线路行波测距装置的相关标准，详细介绍了行波测距装置的测试系统和测试方法，并给出了基于该系统的测试实例，最后提出了行波测距装置评估模型。该检测方法可以推广并应用于基于行波原理的继电保护和接地选线装置，对于提高电网的运行可靠性具有重要的意义。

参考文献

- [1] 徐敏, 蔡泽祥, 刘永浩, 等. 基于宽频信息的高压直流输电线路行波故障测距方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 259-265.
XU Min, CAI Zexiang, LIU Yonghao, et al. A novel fault location method for HVDC transmission line based on the broadband travelling wave information[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 259-265.
- [2] 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): 35-39.
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): 35-39.
- [3] 甄威, 陈卫, 陈平, 等. 输电线路行波仿真方法及行波试验技术[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 74-78.
ZHEN Wei, CHEN Wei, CHEN Ping, et al. Traveling wave simulation method and traveling wave test technology of transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 74-78.
- [4] 朱永利, 范新桥, 尹金良. 基于三点电流测量的输电

- 线路行波故障定位新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 260-268.
- ZHU Yongli, FAN Xinqiao, YIN Jinliang. A new fault location scheme for transmission lines based on traveling waves of three measurements[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 260-268.
- [5] 王奎鑫, 祝成, 孙佳佳, 等. 输电线路组合行波测距方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 82-86.
- WANG Kuixin, ZHU Cheng, SUN Jijia, et al. Research of combined traveling wave's fault location method on transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 82-86.
- [6] 电力行业继电保护标准化技术委员会. DL/T 357-2010 输电线路行波故障测距装置技术条件[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- Relay Protection of Electric Power Industry Standardization Technical Committee. DL/T 357-2010 specification for transmission line fault location equipment based on traveling wave[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [7] 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.
- [8] 董新洲, 张言苍, 余学文. 暂态行波保护测试仪: 中国, ZL01120138.X[P]. 2004-03.
- DONG Xinzhou, ZHANG Yancang, YU Xuewen. Testing device of transient travelling wave protection: China, ZL01120138.X[P]. 2004-03.
- [9] 钱海, 贾松江, 李治兵, 等. 基于历史故障波形的行波测距装置检验方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 139-143.
- QIAN Hai, JIA Songjiang, LI Zhibing, et al. Inspection traveling wave fault location equipment based on the historical fault waveforms[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 139-143.
- [10] 孔瑞忠, 董新洲, 毕见广. 基于电流行波的小电流接地选线装置的试验[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(5): 63-66.
- KONG Ruizhong, DONG Xinzhou, BI Jianguang. Test of fault line selection device based on current traveling wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(5): 63-66.
- [11] 季涛. 利用电磁式电压互感器实现小电流接地系统行波故障定位和选相[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 172-178.
- JI Tao. Study of the fault location and fault phase position selection based on traveling waves using electromagnetic voltage transformer in neutral non-effective grounding system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 172-178.
- [12] 黄雄, 王志华, 尹项根, 等. 高压输电线路行波测距的行波波速确定方法[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 34-37.
- HUANG Xiong, WANG Zhihua, YIN Xianggen, et al. Traveling wave velocity measurement in fault location based on traveling wave for high voltage transmission line[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 34-37.
- [13] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- GE Yaozhong. New types of protective relaying and fault location theory and technology[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007.

收稿日期: 2014-04-01; 修回日期: 2014-07-30

作者简介:

刘慧海(1981-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统继电保护领域的研究工作; E-mail: hhliu@epri.sgcc.com.cn

张晓莉(1977-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事继电保护领域的研究工作;

姜博(1987-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为配电网故障检测。