输电线路行波故障测距装置试验研究

近年来，基于行波理论的故障测距装置已经广泛进入工程应用，目前的试验手段包括动模试验无法产生高频暂态行波，行波故障测距装置的测试与评估已成为亟待解决的问题。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，针对行波故障测距准确度主要影响因素，建立了装置功能和性能测试系统，提出了装置的检测项目，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。

刘慧海　张晓莉　艾淑云／中国电力科学研究院
田秋松／国网河南省电力公司

刘慧海／工程师

关键词／Keywords
行波故障测距装置·
型式试验·
测试系统·
评价体系·

行波故障测距装置可以准确定位线路故障点，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，目前已广泛应用于工程实际[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]，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。

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。根据行波在输电线路上有固定的传播速度约等于光速的特点，通过测量和记录线路故障时由故障点产生的行波到达母线的时间实现准确故障测距[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）和继电保护测试仪等。电力系统动模试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，无法满足行波故障测距装置的试验室检测需要。 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，因此对行波故障测距装置检测技术进行深入研究具有重要的意义。

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，主要包括环境适应能力测试、电磁兼容性能测试和功能及性能测试等。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，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

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常规的继电保护装置。

1. 行波故障测距装置主要影响因素

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和线路两端CT延时不一致等[7]，这些因素会影响输电线路行波故障测距方法的准确性，为此装置也采取了相应的解决方案，有必要对这些因素的影响提出相应的测试方案。

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方法的影响，搭建功能与性能的测试系统如图1所示的。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。将仿真的数据通过电缆传输给暂态行波保护测试仪[8]，暂态行波保护测试仪根据仿真的数据产生对应的暂态行波信号；双端测距的行波故障测距装置通过GPS同步，将暂态行波保护测试仪的暂态输出连接到被测装置的行波电流输入端，模拟暂态电流行波。

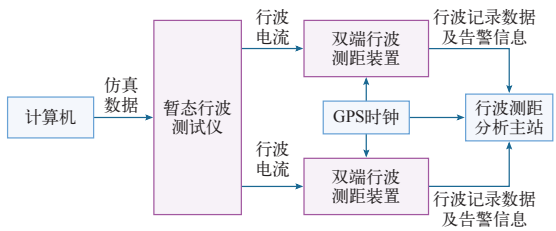

图1　测试系统

该系统能够灵活地进行各种接线方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、光传波速度等因素影响，对装置的测距准确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]。

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，试验内容主要包括以下几方面。

1）暂态行波数据采集的准确性。行波故障测距原理完全基于行波故障测距算法，而装置准确捕获的暂态故障行波信号数据则是应用算法的必备条件。

2）算法的准确性和通用性。在行波采集功能正确时，通过故障仿真以及历史故障波形回放的方式进行试验。

3）时间同步功能。双端行波故障测距为了准确标定故障初始行波浪涌到达两端母线的时刻，要求线路两端的测距装置必须保持精确的同步。

4）通信功能。将线路两端暂态行波数据记录上传到行波测距分析主站，如果通信有误，也不能根据线路两端的行波数据计算出故障点的具体位置。

5）报警功能。装置起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]。

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、二次电缆传播和二次侧负荷模型等[3]。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。

1. 仿真模型

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

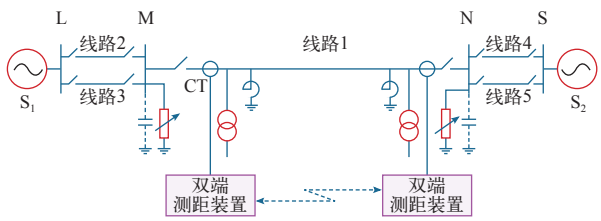

图2　750 kV输电线路仿真结构简图

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750 kV线路，其参数如表1所示。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

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。

表1 750 kV线路参数

线路参数	正序	零序
R/（Ω/km）	0.012 7	0.272 9
L/（mH/km）	0.853 1	2.673 8
C/（nF/km）	13.67	9.3

在M、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=4.111 7 H，中性点小电抗L_N=0.569 0 H，对地电容C=10 nF。

仿真采用双电源系统，首端电源S_1为发电机组，末端电源S_2为电网，输送功率为2 000 MW。电源S_1、S_2采用理想交流电源AC3PH，中性点直接接地，幅值为612.298 kV（相电压峰值），即线电压有效值为750 kV，频率为50 Hz，两电源保持S_1领先S_2功角30°，仿真过程中电源保持不变。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 Ω/km，零序电阻R_0=28.16 Ω/km，正序电感L_1=0.18 mH/km，零序电感L_0=0.428 mH/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做理想电流源，忽略一次绕组的电阻和漏感，电流比选择2 000：1。励磁电感L_m采用非线性电感，励磁特性由电流互感器的伏安特性得到。正常运行时，L_m为10 H，磁滞损耗和涡流损耗等效电阻R_m=1 000 Ω，L_2=2.3 mH，R_2=2 Ω；C_s为二次绕组杂散电容，C_s=1 nF。

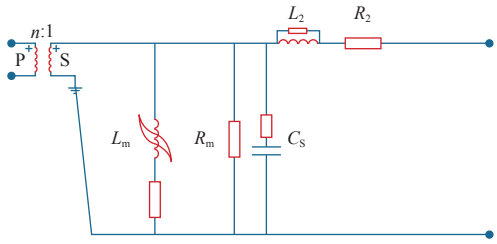

图3 电流互感器仿真模型

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，二次控制电缆末端串联ATP中测量电流元件Probe Current，经小电阻接地，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。

2. 生成暂态行波测试仪所需数据文件

图2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K_1（距M侧1 km）、K_2（距M侧100 km）、K_3（距M侧200 km）和K_4（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°和5°，过渡电阻分别为10 Ω、100 Ω、200 Ω和400 Ω进行仿真；反向故障，模拟线路3发生AB两相接地故障，故障时刻的电压相角为30°，接地电阻为0.01 Ω，故障距离为（距M母线）1 km、300 km。

仿真生成p14文件后，转化为测试仪所用的$case_0$（故障前工频稳态）、$case_1$（故障开始0.02 s）和$case_2$（故障后0.02 s）数据，设置$case_0$重复500次，即每间隔10 s故障发生一次。

3. 装置功能和性能测试

装置分别经线路1M 、N侧2 000/1（高压侧）的电流互感器接入系统。装置设置定值：电压等级为750 kV，CT电流比为2 000：1，波速度为293 m/μs（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K_1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$case_1$（故障初始阶段）的原始波形如图4所示。

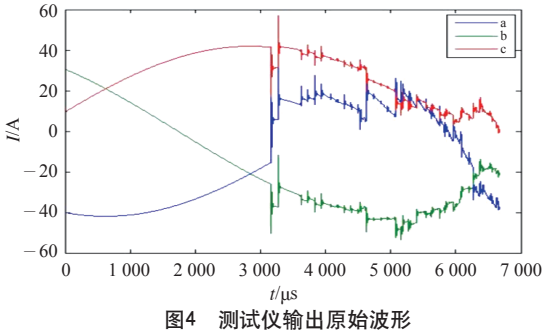

图4 测试仪输出原始波形

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

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

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。

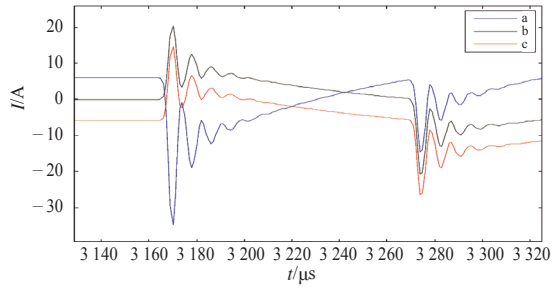

图5　理论暂态行波波形

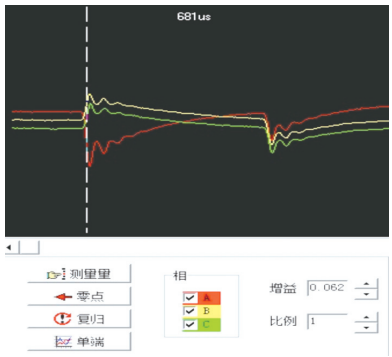

图6　被测装置采集暂态行波波形

（2）测距误差测试

根据搭建的测试进行装置的测距误差测试。区外故障时装置不起动测距，区内故障以K_1故障点为例，测试结果如表2所示。

表2　K_1故障点装置测距结果

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	不起动	
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	不起动	

结束语

通过研究分析国内外输电线路行波故障测距装置的相关标准，建立了行波故障测距装置的测试系统和测试方法。测试结果表明，该方法可以应用于行波故障测距装置的检测。本文未考虑对加装串联电容器补偿装置线路以及母线不同出线等情况的仿真测试，下一步工作将开展进一步的测试研究，并开展装置的型式试验，为电网工程输电线路行波故障测距装置的选型和运行提供技术依据。

参考文献

[1] 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．

[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．

[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，2011，6 (31)：74-78．

[4] 刘巍，张建勋，徐亮，等．行波测距技术在500 kV输电线路上的应用 [J]．华北电力技术，2007 (12)：27-29．

[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．

[6] 国家能源局．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．

[7] 覃剑，葛维春，邱金辉，等．影响输电线路行波故障测距准确度的主要因素分析 [J]．电网技术，2007，2 (31)：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]．2004-03-06．

[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，2013，16 (41)：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．

（收稿日期：2014－04－03）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net