

暂态行波保护测试仪

董新洲,冯 腾,王 飞,施慎行,王 宾,罗澍忻

(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: 随着对基于暂态行波故障信息的继电保护装置的不断研发,目前迫切需要一种试验装置对其进行测试。对暂态行波保护测试仪输出频率、幅值的技术要求进行了讨论与研究,提出了具体的实现方案及硬件系统。分析了影响行波继电保护装置测试的相关因素。最后,通过对暂态行波保护测试仪实际应用的举例验证了其工作的正确性和有效性。

关键词: 测试仪; 继电保护; 行波; 技术要求; 实际应用

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.02.029

0 引言

当电力系统中的线路发生故障后,由故障点的电压突变引起的暂态故障行波与故障特征及系统结构等因素有关,其中包含了故障的类型、发生时刻、发生位置等丰富的故障信息。近年来,随着电力系统的迅速发展,基于高频暂态行波信息的故障检测技术已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^[1-6]。与此同时,越来越多以行波原理为理论依据的继电保护装置相继诞生,因此迫切需要一种试验装置对其进行测试。对于基于暂态行波故障信息的继电保护装置,目前常用的测试手段有 3 种:电力系统动态模拟、实时数字仿真器 RTDS(Real Time Digital Simulator)和传统的微机型继电保护测试仪。

电力系统动态模拟可依据相似原理建立电力系统中各个元件的物理模型,把实际的电力系统中各个部分(包括发电机、变压器、电力传输线路、负荷等)按照相似条件进行设计,最终组成一个完整的电力系统模型,并使用该模型代替实际电力系统进行各种正常或故障状态的试验研究,它能够复制电力系统中的各种运行状态^[7-8]。但由于动态模拟中采用集总参数元件进行电力传输线路模拟,不能真实再现实际电力系统中传输线路上传播的暂态行波,因此,它不能测试基于暂态行波故障信息的继电保护装置。

RTDS 可以对复杂的电力系统进行较为全面的实时仿真。RTDS 采用数字仿真和模拟信号功率放大相结合的方法来模拟电力系统故障过程,具备了测试基于暂态行波故障信息的继电保护装置的基本条件^[9]。但是,RTDS 中的功率放大系统不能产生频

率高达数百千赫兹、幅值高达几十安的宽频带大电流暂态行波信号。此外,RTDS 造价高,整套装置体积大、不便携,且升级难度大,不便于广泛使用。因此其也不能满足基于暂态行波故障信息的继电保护装置的测试要求。

传统的微机型继电保护测试仪^[10-13]一般仅能模拟由工频量以及各次谐波量所组成的电力系统故障信息,因此它仅能测试基于工频故障信息的继电保护装置的動作特性,并不能测试基于暂态行波故障信息的继电保护装置。

因此,需要研究一种能够真实再现电力系统故障后互感器二次侧全频带信号的测试装置,填补国内外在该领域的空白,为行波类保护技术的研究、开发、试验、检测乃至工程应用奠定基础。暂态行波保护测试仪的构想源自 20 世纪 90 年代。为了测试新研发成功的基于行波原理的测距装置,文献[14]研制了暂态信号发生器。该信号发生器能产生多路高频信号,用于模拟输电线路故障时的暂态电压和电流行波,但该发生器无高电压、大电流驱动能力。随后的研究重新定位并设计了暂态行波保护测试仪的功能和软硬件结构。文献[15]可给行波保护装置提供高频、同步的多路电压和电流试验信号。文献[16]可以产生宽带高频、大功率的暂态行波电压、电流,用作继电保护装置的试验信号源,并能够测试被测装置的动作性能,但输出电流幅值有限。文献[17]提出了暂态行波保护测试仪的初步实现方案,但未完成高频大电流的功率放大。文献[18-19]对暂态行波保护测试仪的软硬件系统进行了优化。本文对暂态行波保护测试仪的技术要求进行了理论分析,实现了其完整构想,设计了测试方案并给出了实际应用。

1 暂态行波保护测试仪的技术要求

为了接近电力系统的实际情况,下文采用图 1 所示的 750 kV 输电线路仿真模型对暂态行波保护测

收稿日期:2015-11-26;修回日期:2016-12-08

基金项目:国家自然科学基金重大国际合作项目(51120175001);
国家重点研发计划(2016YFB0900600)

Project supported by the Major Program of the National Natural Science Foundation of China(51120175001) and the National Key Research and Development Plan of China(2016YFB0900600)

测试仪所需满足的技术要求进行分析。模型中,故障发生在线路 L_1 上,相邻线路 L_2 — L_5 用于模拟行波的折反射,采用存在一定相角差的双电源等效系统中的其余部分。线路 L_1 长 400 km,线路 L_2 和 L_3 长 320 km,线路 L_4 和 L_5 长 380 km,双等效电源相角差为 30° 。考虑母线 M 处的相关电气量。输电线路的参数如表 1 所示。

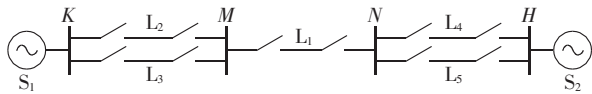


图 1 750 kV 输电线路系统
 Fig.1 750 kV transmission system

表 1 750 kV 输电线路参数

Table 1 Parameters of 750 kV transmission line

线路参数	参数值	
	正序	零序
电阻	0.0127 Ω/km	0.2729 Ω/km
电感	0.8531 mH/km	2.6738 mH/km
电容	13.67 nF/km	9.3 nF/km

1.1 频率要求

由于实际的测试装置只能输出有限频带的信号,因此需要研究暂态行波保护测试仪应达到多高的输出频率才能保证行波信号的不失真。

当电力系统中的线路发生故障时,根据叠加原理,故障后的网络可等效为故障前正常运行的负荷网络和故障分量网络的叠加,如图 2 所示。对于故障分量网络,可将其视为将整个系统中的电势取 0,而在故障点处加一电压,该电压与线路正常运行时该处的电压大小相等、方向相反。由于此电压的影响,将会出现由故障点向线路两端传播的行波。

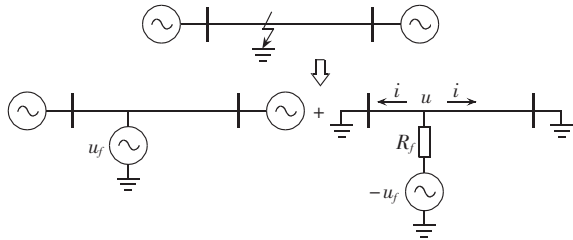


图 2 故障后的网络分解

Fig.2 Decomposition of faulty network

由于故障行波实际是由故障分量网络中的附加电源产生的故障初始行波及其后续折反射波叠加而成,在故障附加电源初相角不为 0° 时,故障初始行波及其后续的折反射波都会出现突变的波头,使故障行波为一全频带的信号。

考虑图 1 模型中线路 L_1 距 M 侧 100 km 处发生故障电压初相角为 90° 的 A 相金属性短路故障,选取该次故障后故障相的电流波形进行频谱分析。图 3 为其 100 Hz 以上频率的频谱分析结果。

从图 3 中可以看出,故障行波在理论上虽然是一

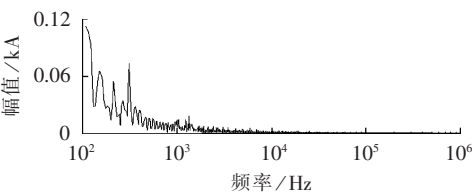


图 3 电流故障行波的频谱分析

Fig.3 Spectral analysis for traveling wave of fault current

个全频带的信号,但其能量主要集中在 100 kHz 以下。

由于暂态行波保护测试仪再现的是互感器二次侧信号,因此在分析其输出频率要求时,应考虑电力互感器的传变特性。通过对电力互感器宽频带响应模型的分析可知,电流互感器在 100 kHz 以上的频率段幅值衰减较大,在 10 dB 以上;电容式电压互感器在 1 kHz 以上频带的频率响应出现多处的带通和带阻特性,幅频响应总体上呈现衰减特征^[20]。因此,暂态行波保护测试仪的最高输出频率达到 100 kHz 以上,可以满足绝大多数情况下的要求。

综上所述,为了使暂态行波保护测试仪能够真实再现暂态行波故障信息的特征,应使其输出的最高频率达到 100 kHz 以上。同时,电力系统中的三相电压、三相电流、零序电压以及零序电流是同步模拟信号,这就要求暂态行波保护测试仪实现多路电压、电流信号的同步输出。

1.2 幅值要求

当电力系统处于正常运行状态时,电压互感器的额定二次侧相电压为 57.7 V。当故障发生后,电压一般会跌落或基本不变,并不会明显增大。但对于中性点非有效接地系统,当其发生单相接地故障时,故障相电压跌落,非故障相电压有效值上升为 100 V。因此,为了能够与电力系统现场信号相符,暂态行波保护测试仪输出的稳态电压有效值应能达到 100 V。

当故障发生后,故障暂态过程中会产生较高的电压,表 2 给出了不同故障情况下的最高暂态电压值与故障前稳态电压幅值的比 p_u ,其中 θ 为故障时刻故障点的电压相角,即故障电压初相角。

表 2 不同故障情况下的暂态最高电压

Table 2 Highest transient voltages of different faults

故障类型	故障位置	p_u		
		$\theta=0^\circ$	$\theta=45^\circ$	$\theta=90^\circ$
单相接地	线路首端	1.5657	1.5953	1.8168
	线路中部	1.2954	1.4121	1.4254
	线路末端	1.1832	1.5953	1.5805
两相接地	线路首端	1.3620	1.5465	1.4919
	线路中部	1.2349	1.3037	1.2777
	线路末端	1.2554	1.2960	1.2541

从表 2 中可以看出,故障后的最高暂态电压可达故障前电压幅值的 1.8 倍以上。但当线路较短时,多次折反射波会产生叠加,使暂态电压升高至故障

前电压幅值的 2 倍以上。但考虑绝大部分情况,为保证电压故障行波的完整性,暂态行波保护测试仪能保证输出幅值高达故障前电压幅值 2 倍的暂态电压信号即可,因此瞬时电压幅值应能达到 170 V。

当电力系统处于正常运行状态时,电流互感器的额定二次电流为 1 A 或 5 A;当电力系统发生故障时,故障相电流将急剧增大,一般认为故障相电流可达正常运行时的 10 倍以上,即 10 A 或 50 A。因此,暂态行波保护测试仪输出的稳态电流有效值应能达到 50 A。

考虑较为严重的故障情况,如在出口处发生故障电压初相角为 90° 的三相金属性短路故障,此时的三相电流波形如图 4 所示。此时,故障后的暂态电流最高可达故障前电流幅值的 20.629 倍。为保证电流故障行波的完整性,暂态行波保护测试仪应能输出幅值高达故障前电流幅值 20 倍的暂态电流信号,因此瞬时电流幅值应能达到 150 A。

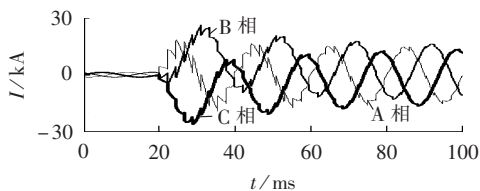


图 4 严重故障时的三相电流波形

Fig.4 Three-phase current waveforms during serious fault

综上所述,为了使暂态行波保护测试仪能够真实再现暂态行波故障信息的特征,其输出的稳态电压有效值应能达到 100 V,瞬时电压幅值应能达到 170 V;稳态电流有效值应能达到 50 A,瞬时电流幅值应能达到 150 A。

2 暂态行波保护测试仪的实现方案

暂态行波保护测试仪^[14-19]的工作原理是多路高精度高速数模转换和宽频率功率放大,其具体的工作流程包括以下几个方面。

(1)故障数据准备:故障数据既可以是电力系统的现场录波数据,也可以是电力系统仿真软件计算生成的仿真数据。

(2)数模转换:把准备好的故障数据不失真地转换成模拟电压小信号。

(3)功率放大:将模拟电压小信号经电压功率放大器和电流功率放大器分别放大成电力系统互感器二次侧的高电压和大电流信号。

(4)开关输入量检测:暂态行波保护测试仪以开关量的形式将被测装置的动作行为读入,并能判断继电保护装置的动作性能,自动形成测试报告。

暂态行波保护测试仪由暂态信号发生器、行波

大电流功率放大器和行波高电压功率放大器三部分组成,其硬件系统整体结构如图 5 所示。

暂态信号发生器部分可分为嵌入式计算机(上位机)、数模转换模块和开关量检测回路 3 个部分。嵌入式计算机可以运行暂态行波保护测试仪专用的上位机软件,将利用电磁暂态程序(EMTP)计算出的电力系统暂态故障仿真数据或者故障录波装置记录的故障录波数据经格式转换后传送到数模转换模块,并接收开关量检测回路反馈的被测装置动作情况,进行分析后形成测试报告。数模转换模块由数字信号处理器(DSP)及其外围电路、高精度高速数模转换电路和前置功率放大部分组成。DSP 接收到上位机传送的数据信息和开始试验的命令后,将电力系统故障数据输出至数模转换电路,并通过前置功率放大后生成故障模拟电压小信号。开关量检测回路可记录被测装置的动作信息,并向上位机反馈。上位机与 DSP 通过串口进行数据通信。

功率放大系统采用超大规模集成电路技术将暂态信号发生器输出的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。功率放大系统分为行波高电压功率放大器和行波大电流功率放大器 2 种。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。功率放大系统采用多路冗余并行输出技术来保证可靠性,同时采用负反馈电路来保证精度要求。

图 6 为输入暂态行波保护测试仪的故障仿真数据波形和暂态行波保护测试仪输出信号的录波器录波数据波形,二者波形十分相近。由于录波装置的采样频率限制及其信号采集电路的传变特性不理想,二者略有不同。录波波形可清晰地反映初始行波和后续的各次折反射波,与仿真数据一致,验证了本文实现方案的正确性和有效性。

3 测试影响因素分析

下面对图 2 中的故障分量网络进行分析。对于均匀换位的无损线路,在不考虑频变参数的情况下,使用 Karenbauer 变换矩阵对三相线路进行相模变换,以实现三相之间的解耦。变换矩阵 S 及其逆矩

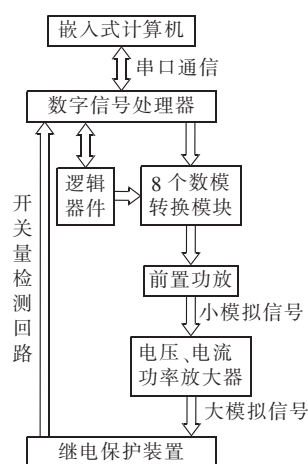
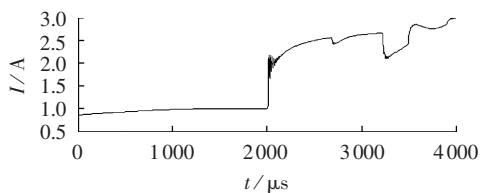
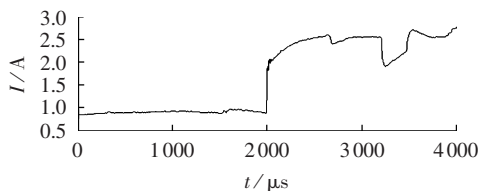


图 5 暂态行波保护测试仪硬件系统

Fig.5 Hardware system of test platform for protection equipments based on transient traveling wave



(a) 仿真数据波形



(b) 录波器录波数据波形

图 6 仿真数据波形与录波器录波数据波形

Fig.6 Simulative waveform and recorded waveform

阵 S^{-1} 如下:

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix}, S^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于系统侧,模域的电压、电流初始行波有如下关系:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^m &= \mathbf{Z} \mathbf{i}^m \\ \mathbf{u}^m &= [u_0 \quad u_\alpha \quad u_\beta]^T \\ \mathbf{i}^m &= [i_0 \quad i_\alpha \quad i_\beta]^T \\ \mathbf{Z} &= \text{diag}(Z_0, Z_1, Z_1) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, u_0 为故障点的零模电压初始行波; u_α 和 u_β 为故障点的线模电压初始行波; i_0 为故障点流向一端母线的零模电流初始行波; i_α 和 i_β 为故障点流向一端母线的线模电流初始行波; Z_0 和 Z_1 分别为零模和线模波阻抗。

对于故障侧,图 7 可表示所有的线路故障类型:对于单相接地故障,以 A 相接地为例,可将 R_b 和 R_c 设为无穷大, R_a 与 R_g 的和设为故障电阻;其他各个类型的故障可通过改变 4 个电阻的取值实现。

故障点处应满足如下边界条件:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^{ph} + \mathbf{u}_f + 2\mathbf{R} \mathbf{i}^{ph} &= 0 \\ \mathbf{u}_f &= [u_{af} \quad u_{bf} \quad u_{cf}]^T \\ \mathbf{u}^{ph} &= [u_a \quad u_b \quad u_c]^T \\ \mathbf{i}^{ph} &= [i_a \quad i_b \quad i_c]^T \end{aligned} \quad (3)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_a + R_g & R_g & R_g \\ R_g & R_b + R_g & R_g \\ R_g & R_g & R_c + R_g \end{bmatrix} \quad (4)$$

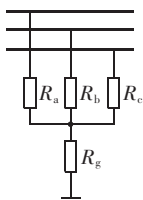


图 7 故障电阻网络
Fig.7 Resistor network of fault

其中, u_{af}, u_{bf}, u_{cf} 为正常运行时故障点的三相电压,若故障发生于时刻 t_0 ,则 $u_{xf} = A_x \sin(\omega t + \theta_x) \varepsilon(t - t_0)$ ($x = a, b, c$; A_x 为正常运行时故障点的 x 相电压幅值, $\omega t_0 + \theta_x$ 为 x 相故障电压初相角, $\varepsilon(t)$ 为单位阶跃函数); u_a, u_b, u_c 为故障点的三相电压初始行波; i_a, i_b, i_c 为故障点流向一端母线的三相电流初始行波; $\mathbf{R}$ 为故障电阻网络矩阵。

相域的电压、电流可通过前文所述的相模变换矩阵转换为模域的电压、电流:

$$\mathbf{u}^{ph} = \mathbf{S} \mathbf{u}^m, \quad \mathbf{i}^{ph} = \mathbf{S} \mathbf{i}^m \quad (5)$$

可解出模域的电压、电流初始行波为:

$$\begin{cases} \mathbf{u}^m = -\mathbf{Z}(\mathbf{S}\mathbf{Z} + 2\mathbf{R}\mathbf{S})^{-1} \mathbf{u}_f \\ \mathbf{i}^m = -(\mathbf{S}\mathbf{Z} + 2\mathbf{R}\mathbf{S})^{-1} \mathbf{u}_f \end{cases} \quad (6)$$

当线路电压等级和线路参数确定时, $\mathbf{Z}$ 与 A_x 均为定值,故障初始行波受故障电阻网络矩阵 $\mathbf{R}$ 和电压初相角的影响,而故障类型和故障过渡电阻直接影响 $\mathbf{R}$ 。由于故障行波会在母线、故障点等波阻抗不连续处发生折反射,后续的折反射波会受到故障位置、线路长度以及母线结构的影响。

综上所述,在设计测试方案时应全面考虑线路自身特性、故障类型、故障位置、故障过渡电阻、故障电压初相角以及母线结构。

4 暂态行波保护测试仪的实际应用

目前,暂态行波保护测试仪已成功应用于清华大学、中国电科院、许昌开普实验室和南网广东中调等多家单位的行波测试中。测试对象涵盖各类基于行波原理的故障检测装置,包括输电线路行波故障测距装置^[21-22]、配电线路单相接地行波保护装置^[23]、配电线路单相接地行波选线装置^[24-25]等。

下面以高压输电线路行波方向比较式纵联保护装置^[2]的测试为例,介绍暂态行波保护测试仪的实际应用情况。

行波方向比较式纵联保护技术基于极化电流行波方向继电器^[1]构成,该方向继电器采用电压行波低频分量的极性和电流行波高频分量的极性构成极性比较式方向保护。对于正向和反向故障,保护安装处所测量到的电压、电流初始行波极性特征不同。正向故障时,电压初始行波与电流初始行波的极性相反;反向故障时,二者的极性相同。线路两端通过通信通道构成纵联方向保护,当线路两端都判断为正向故障时,判定为线路区内故障,两端保护装置发出跳闸信号。

使用暂态行波保护测试仪进行装置的功能测试。测试示意图如图 8 所示,具体测试步骤如下:

a. 在电磁暂态仿真软件 EMTP 中建立仿真测试模型并进行不同故障及非故障情况的仿真;

b. 将 EMTP 生成的仿真测试数据转换成暂态行波保护测试仪可使用的测试文件格式;

c. 播放故障数据,暂态信号发生器输出的模拟电压小信号通过电流功率放大器放大后模拟电流互感器二次侧的电流输出,通过电压功率放大器放大后模拟电容式电压互感器二次侧的电压输出。

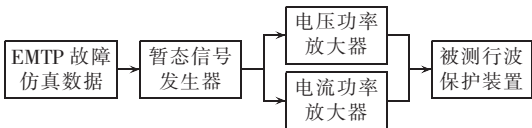


图 8 行波保护装置测试示意图

Fig.8 Test of protection equipments based on traveling wave

测试系统模型如图 9 所示,模型在图 1 的基础上考虑了避雷器、电流互感器、电容式电压互感器和二次控制电缆等可能对行波产生影响的电力系统设备。

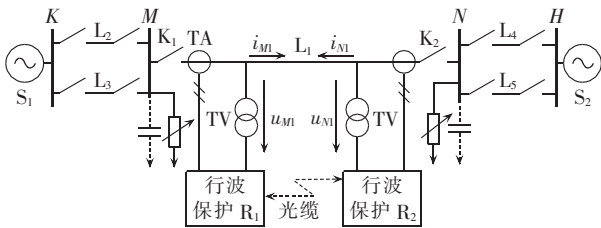


图 9 行波保护装置测试仿真模型

Fig.9 Simulation test model of protection equipments based on traveling wave

由于被测装置的核心算法是根据故障后电压和电流初始行波的极性比较构成判据,因此在初始行波波头不明显的环境下,装置的灵敏性将降低,并可能出现拒动的情况。前文分析表明,影响故障后行波波头幅值的因素主要包括故障类型、故障位置、故障过渡电阻、故障电压初相角等。测试针对上述 4 个因素对保护装置进行了大量的测试,测试中的一些典型情况如表 3 所示。

从表 3 中可以看出,暂态行波保护测试仪可针对各种不同类型的故障情况对被测装置进行测试,并能发现被测装置存在的不足,如当故障初相角过小时,行波波头幅值较小,不易被被测装置检测到,引起装置拒动。

此外,装置在实际运行中,可能受到现场复杂电磁环境的干扰,如:雷击、分合闸操作等。因此,测试中还应考虑上述干扰对被测装置的影响。

表 4 为干扰测试结果。从表 4 中可以看出,暂态行波保护测试仪可针对雷电和操作等干扰对被测装置进行测试。对于雷电干扰,暂态行波保护测试仪能够分别模拟雷击未引发故障和雷击引发故障。对于操作干扰,暂态行波保护测试仪能够分别

表 3 故障测试结果

Table 3 Test results of different faults

故障类型	故障距离 / km	过渡电阻 / Ω	故障电压初相角 / ($^{\circ}$)	动作情况
Ag	1	0	90	跳 A 相
	100	0	90	跳 A 相
	100	0	30	跳 A 相
	100	0	5	跳 A 相
	100	0	0	不动作
	100	100	90	跳 A 相
	100	300	90	跳 A 相
	200	0	90	跳 A 相
	-1	0	90	不动作
BCg	100	0	90	跳三相
	-100	0	90	不动作
BC	100	0	90	跳三相
	-100	0	90	不动作
ABCg	100	0	90	跳三相
	-100	0	90	不动作

表 4 干扰测试结果

Table 4 Test results of different disturbances

干扰类型	发生区间	动作情况
雷击 A 相未引发故障	区内	不动作
	区外	不动作
雷击引发 A 相故障	区内	跳 A 相
	区外	不动作
合闸操作	区内	不动作
	区外	不动作
分闸操作	区内	不动作
	区外	不动作

模拟合闸操作和分闸操作。

5 结论

本文在介绍了故障行波理论的基础上,对暂态行波保护测试仪的频率、幅值等方面的技术要求进行了讨论与研究。为了使暂态行波保护测试仪能够真实再现暂态行波故障信息的特征,其输出的最高频率应达到 100 kHz 以上,并实现多路电压、电流信号的同步输出。暂态行波保护测试仪输出的稳态电压有效值应能达到 100 V,瞬时电压幅值应能达到 170 V;稳态电流有效值应能达到 50 A,瞬时电流幅值应能达到 150 A。

暂态行波保护测试仪的工作原理是多路高精度高速数模转换和宽频率功率放大,其具体的工作流程包括故障数据准备、数模转换、功率放大和开关输入量检测。

影响行波原理继电保护装置测试的相关因素包括线路自身特性、故障类型、故障位置、故障过渡电阻、故障电压初相角以及母线结构等,在设计测试方案时应全面考虑上述影响因素。

本文以高压输电线路行波方向比较式纵联保护

装置的测试为例,验证了暂态行波保护测试仪工作的正确性和有效性。暂态行波保护测试仪可应用于各类基于行波原理的故障检测装置,为此类装置的研制、开发、试验、检测以及工程应用提供了有利的技术支持,填补了国内外在该领域的空白。

参考文献:

- [1] DONG Xinzhou, GE Yaozhong, HE Jiali. Surge impedance relay[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1247-1256.
- [2] DONG Xinzhou, LUO Shuxin, SHI Shenxing, et al. Implementation and application of practical travelling wave based directional protection in UHV transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 31(1): 294-302.
- [3] 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.
- [4] DONG Xinzhou, WANG Jun, SHI Shenxing, et al. Traveling wave based single-phase-to-ground protection method for power distribution system[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(2): 75-82.
- [5] 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.
- [6] DONG Xinzhou, SHI Shenxing. Identifying single-phase-to-ground fault feeder in neutral non-effectively grounded distribution system using wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 1829-1837.
- [7] 金启玖, 杨卫国. 电力系统物理模拟综述[J]. 电工技术杂志, 1999(1): 9-11.
JIN Qimei, YANG Weiguo. Overview of the physical simulation of power system[J]. Electrotechnical Journal, 1999(1): 9-11.
- [8] 张兰. 电力系统动态模拟及其应用综述[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2004, 14(1): 20-23.
ZHANG Lan. Overview of dynamic simulation of power system and its application[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering(Natural Science Edition), 2004, 14(1): 20-23.
- [9] MCLAREN P, KUFFEL R, WIERCKX R, et al. A real time digital simulator for testing relays[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(1): 207-213.
- [10] KEZUNOVIC M, REN J. New test methodology for evaluating protective relay security and dependability[C]//Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, Pennsylvania, USA: IEEE, 2008: 1-6.
- [11] THOMAS M, PRAKASH A, NIZAMUDDIN. Modeling and testing of protection relay IED[C]//Power System Technology and IEEE Power India Conference. New Delhi, India: IEEE, 2008: 1-5.
- [12] CHAFAI M, BENTARZI H, OUADI A, et al. PC based testing system for protective relay[C]//International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG). Istanbul, Turkey: IEEE, 2013: 939-943.
- [13] HAZARIKA P, SHUBHANGA K. Development of a relay test bench and an arbitrary waveform generator in RTAI-Linux platform[C]//International Conference on Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology (ICE-CCN). Tirunelveli, India: IEEE, 2013: 595-600.
- [14] 董新洲, 葛耀中, 徐丙垠, 等. 暂态信号发生器[J]. 继电器, 1997, 25(5): 41-43.
DONG Xinzhou, GE Yaozhong, XU Bingyin, et al. Transient signal generator[J]. Relay, 1997, 25(5): 41-43.
- [15] 董新洲, 余学文, 刘建政. 高速同步数/模转换模板及其数据处理、控制方法: CN1271213[P]. 2000-10-25.
- [16] 董新洲, 张言苍, 余学文. 暂态行波保护测试仪及其试验方法: CN1341864[P]. 2002-03-27.
- [17] DONG Xinzhou, LIU J Z, YU Xuewen, et al. New relay testing platform[C]//Seventh International Conference on Developments in Power System Protection. Amsterdam, Netherlands: IEEE, 2001, 54-57.
- [18] 刘岩. 暂态行波保护测试仪的软硬件实现与改进[D]. 天津: 天津大学, 2004.
LIU Yan. The realization and improvement of traveling waves testing platform's hardware and software[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- [19] 王飞. 暂态行波保护测试仪的研制与试验[D]. 北京: 清华大学, 2012.
WANG Fei. Implementation and experiments of transient traveling-wave based relay testing platform[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [20] 王世勇. 基于极化电流行波的方向比较式纵联保护研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
WANG Shiyong. Studies on directional comparison pilot protection based on polarized current travelling wave[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [21] 许飞, 董新洲, 王宾, 等. 新型输电线路单端电气量组合故障测距方法及其试验研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 37-42.
XU Fei, DONG Xinzhou, WANG Bin, et al. Combined single-end fault location method of transmission line and its experiments[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 37-42.
- [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] 王珺, 董新洲, 施慎行. 配电线路单相接地行波保护的实现与试验[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 172-178.
WANG Jun, DONG Xinzhou, SHI Shenxing. Scheme and test of traveling-waves based single-phase-to-ground protection for distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 172-178.
- [24] 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): 63-67.
KONG Ruizhong, DONG Xinzhou, BI Jianguang. Test of fault line selector based on current traveling wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(5): 63-67.
- [25] 姜博, 董新洲, 施慎行. 配电网单相接地故障选线典型方法实验研究[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 67-74.
JIANG Bo, DONG Xinzhou, SHI Shenxing. Experimental research

on typical single-phase grounding line selection methods of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015,35(11):67-74.

作者简介:

董新洲(1963—),男,陕西周至人,教授,博士研究生导师,IET Fellow,IEEE Fellow,从事行波保护、行波测距、行波



董新洲

选线、无通道保护、特高压输电线路保护、智能变电站、系统保护和小波变换应用方面的研究(E-mail:xzdong@tsinghua.edu.cn);

冯 腾(1990—),男,山东东营人,博士研究生,从事电力系统故障分析及继电保护装置测试方面的研究。

Test platform of protection equipments based on transient traveling wave

DONG Xinzhou,FENG Teng,WANG Fei,SHI Shenxing,WANG Bin,LUO Shuxin

(State Key Lab of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments,
Department of Electrical Engineering,Tsinghua University,Beijing 100084,China)

Abstract: Since the protection equipments based on the transient traveling wave fault information are constantly developed,their test platform is urgently needed. The technical requirements of test platform of protection equipments based on transient traveling wave for the frequency and amplitude are discussed and researched,and a detailed implementation scheme with hardware system of the test platform is proposed. The related influencing factors in the test of protection equipments based on traveling wave are analyzed. Its correctness and effectiveness are verified by an application.

Key words: test platform; relay protection; traveling wave; technical requirement; application

(上接第191页 continued from page 191)

Analysis of mechanism and review of methods for low-frequency ripple current suppression of single-phase inverter

WANG Fei,LEI Zhifang,LIANG Dong,ZHANG Wei,RUAN Yi

(School of Mechanical Engineering and Automation,Shanghai University,Shanghai 200072,China)

Abstract: The mechanism of low-frequency ripple current suppression is analyzed in detail and in terms of control strategy and topology optimization,the existing methods for suppressing the low-frequency ripple current of two-stage single-phase inverter are discussed respectively for four sections;DC input,front-stage DC/DC converter,DC-bus capacitor branch and back-stage inverter. The basic concept of low-frequency ripple current suppression for single-phase inverter is analyzed,the technical principles,advantages and disadvantages of existing methods are summarized,their characteristics are compared and its future research direction is pointed out. As an example,an experiment for a new Boost inverter verifies the effectiveness of new control strategy for low-frequency ripple current suppression.

Key words: electric inverters; low-frequency ripple current; topology optimization; control strategy optimization