

# 用于行波保护测试的暂态信号发生器关键技术

董新洲,冯 腾,王 飞

(清华大学 电机系,北京 100084)

**摘要:** 作为暂态行波保护测试仪的重要组成部分,暂态信号发生器可将故障数据不失真地转换成模拟电压小信号。在介绍了暂态信号发生器的技术要求和工作原理的基础上,对其若干关键技术问题进行了讨论与研究。针对故障数据的处理方法、高速高精度数模转换的实现方案以及多路模拟输出的同步性等问题进行了深入分析。通过试验验证了测试仪暂态信号发生器工作的可靠性和有效性。

**关键词:** 暂态行波保护测试仪; 暂态信号发生器; 故障数据处理; 数模转换; 同步输出

**中图分类号:** TM 77

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.11.011

## 0 引言

作为电力系统继电保护领域重要的新兴研究方向之一,基于高频暂态行波信息的故障检测技术近年来已得到了迅速的发展。以行波原理为理论基础的保护、故障测距和故障选线装置不断被研制开发,这使得行波类继电保护装置的性能测试技术成为了受到广泛关注的研究领域。

传统的继电保护测试手段包括:电力系统动态模拟、实时数字仿真器(RTDS)和传统的微机型继电保护测试仪,它们由于所用模型或输出频率限制等原因无法真实再现故障行波信号,因此并不适用于基于暂态行波故障信息的继电保护装置的性能测试<sup>[1]</sup>。暂态行波保护测试仪<sup>[1-2]</sup>应用多路高精度高速数模转换和宽频率功率放大技术,有效地解决了上述问题,为行波类继电保护装置的研制、开发、试验、检测以及工程应用提供了有利的技术支持,并成功应用于输电线路行波故障测距装置<sup>[3-4]</sup>、配电线路单相接地行波保护装置<sup>[5]</sup>、配电线路单相接地行波选线装置<sup>[6-7]</sup>、输电线路行波方向比较式纵联保护装置<sup>[1]</sup>等的测试中。

暂态行波保护测试仪包括暂态信号发生器、行波大电流功率放大器和行波高电压功率放大器 3 个部分。暂态信号发生器可将故障数据(电力系统的现场录波数据或电力系统仿真软件所计算生成的仿真数据)不失真地转换成模拟电压小信号,并输出至电压、电流功率放大器,起到了“故障行波信号源”的作用。

作为暂态行波保护测试仪的重要组成部分,暂态信号发生器的概念最早出现于 20 世纪 90 年代<sup>[2]</sup>,

后经不断改进,逐步形成了现在的多路同步输出的高频高精度任意波形信号发生器。本文对文献<sup>[1]</sup>中暂态行波保护测试仪的暂态信号发生器部分的若干关键技术问题进行讨论与研究。针对故障数据的处理方法、高速高精度数模转换的实现方案以及多路模拟输出的同步性等问题进行了深入分析。最后,通过试验验证了暂态行波保护测试仪的暂态信号发生器工作的可靠性和有效性。

## 1 暂态信号发生器的技术要求与工作原理

### 1.1 暂态信号发生器的技术要求

为了使暂态行波保护测试仪能够真实地再现暂态行波故障信息的特征,测试仪输出的最高频率应达到 100 kHz 以上<sup>[1]</sup>。因此,暂态信号发生器在进行数模转换时的数字量输入时间间隔应远小于 5  $\mu\text{s}$ ,在此段时间内应保证多路数模转换全部完成,本文中选取 1.5  $\mu\text{s}$  的时间间隔。

暂态行波保护测试仪的输出信号幅值应尽量实现连续可调。若能保证暂态信号发生器数模转换输出的幅值分辨率(能够实现的最小幅值变化量)小于 0.1 mV,则使用放大倍数为 10 的电压功率放大和电流功率放大时(即 1 V 放大为 10 V 或 10 A),暂态行波保护测试仪最终输出的电压可实现分辨率达 1 mV 的连续可调,电流可实现分辨率达到 1 mA 的连续可调,满足测试需要。

同时,暂态行波保护测试仪需实现多路电压、电流信号的同步输出。测试中,常使用电力系统中的三相电压、三相电流、零序电压以及零序电流信号,这就要求暂态信号发生器可实现 8 路模拟信号同步输出。

此外,为方便测试,暂态信号发生器还应实现对故障发生前的系统正常运行时间和故障后稳态时间的自由控制。

### 1.2 暂态信号发生器的工作原理

暂态行波保护测试仪暂态信号发生器部分由嵌

收稿日期:2017-01-08;修回日期:2017-07-27

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

Project supported by the Major Program of the National Natural Science Foundation of China(51120175001) and the National Key R&D Program of China(2016YFB0900600)

入式计算机(上位机)、数模转换模块和开关量检测回路 3 个模块组成,其工作原理如图 1 所示,具体说明如下。

**a.** 嵌入式计算机可以运行专用的上位机软件,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。

**b.** 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器大部分组成。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,通过逻辑器件控制实现多路同步,并通过前置功率放大后生成故障模拟电压小信号输出至功率放大系统。

**c.** 开关量检测回路可记录被测试装置的动作信息,并反馈至上位机。

### 1.3 暂态信号发生器的关键技术

综合上述分析,在暂态信号发生器的研发过程中应重点考虑如下关键技术:

**a.** 通过合理的故障数据分割和循环输出实现自由控制故障发生前系统的正常运行时间和故障后的稳态时间;

**b.** 通过选取合适的数模转换器及其外部运放实现高速高精度的数模转换,保证在  $1.5 \mu\text{s}$  的时间间隔内完成多路数模转换,并满足输出幅值分辨率小于  $0.1 \text{ mV}$ ;

**c.** 通过多路开关和采样保持的时序配合实现 8 路模拟信号同步输出。

## 2 故障数据处理

故障数据通常来自电力系统的现场录波数据或是电力系统仿真软件所计算生成的仿真数据。其长度往往较短,常为几十到几百毫秒。若想自由控制故障发生前系统的正常运行时间和故障后的稳态时间,需要对故障数据进行分割。通常将故障数据分割为如下几个部分。

**a.** 故障前系统正常运行时的数据。该段数据只需截取 1 个周期即可,由于该部分为正弦信号,变化较为平缓,因此,其输出频率可适当降低,以节省存

储空间。可通过调整该段重复播放的次数实现对故障发生前系统正常运行时间长度的控制。

**b.** 从故障发生时刻开始至行波信号发生若干次折反射后的数据。一般情况下该段数据长度约为几毫秒。该段数据中包含丰富的故障信息,各类基于行波原理的故障检测装置均采集该段数据进行分析。因此,应保证该段数据的输出频率尽可能高,取为暂态信号发生器的最高输出频率。

**c.** 此后的暂态行波过程涉及较多次折反射波的叠加,故障检测装置不易使用该部分波形,因此可略微降低其输出频率。该部分波形应一直持续到某个会使系统发生突变的事件发生,如保护装置动作、故障发展、故障转移等。

**d.** 每当会使系统发生突变的事件发生时,均应重复步骤 **b**、**c**,以保证暂态行波初始过程的精确。

**e.** 当系统进入故障后的稳态时,每个周期的波形基本不变,该段数据只需截取 1 个周期即可,由于该部分近似为正弦信号,变化较为平缓,因此,其输出频率可适当降低,以节省存储空间。可通过调整该段数据重复播放的次数实现对故障后稳态时间长度的控制。

针对每组仿真数据,在已知每次突变事件发生时刻(如按照时间先后顺序依次设为  $t_1, t_2, \dots, t_n$ )后,可将数据分为  $2n + 2$  个部分,记作  $\text{case}_0, \text{case}_1, \dots, \text{case}_{2n+1}$ 。对于每个 case,应考虑数据范围、输出频率和循环输出次数 3 个因素,如表 1 所示。

表 1 各部分数据的数据范围、输出频率和循环输出次数

Table 1 Data range, output frequency and cycle output times of different parts of data

case	数据范围	输出频率	循环输出次数
$\text{case}_0$	$t_1$ 前 20 ms 至 $t_1$	低	取决于期望的故障发生前系统的正常运行时间
$\text{case}_{2k-1} (k=1, 2, \dots, n)$	$t_k$ 至 $t_k$ 后若干毫秒	高	1
$\text{case}_{2k} (k=1, 2, \dots, n-1)$	$\text{case}_{2k-1}$ 结束至 $t_{k+1}$	中	1
$\text{case}_{2n}$	$\text{case}_{2n-1}$ 结束至进入稳态	中	1
$\text{case}_{2n+1}$	$\text{case}_{2n}$ 结束至 $\text{case}_{2n}$ 结束后 20 ms	低	取决于期望的故障发生后的稳态时间

图 2 为输电线路发生故障后母线处的 A 相电流波形。100 ms 时,线路发生 A 相金属性接地故障,

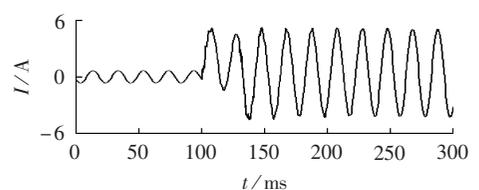


图 2 故障后的 A 相电流波形

Fig.2 Waveform of phase-A current after fault

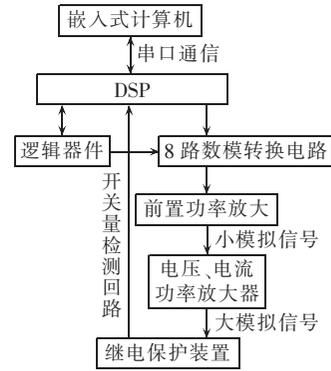


图 1 暂态信号发生器工作原理图  
Fig.1 Working principle diagram of transient signal generator

130 ms 时发展为三相短路故障。

按照前文分析,共有 2 次会使系统发生突变的事件发生,因此应将数据分成 6 个部分。第 1 次突变事件发生时刻  $t_1$  为 100 ms,  $case_0$  的数据范围为  $t_1$  前 20 ms 至  $t_1$ , 即 80 ms 至 100 ms。  $case_1$  的数据范围为  $t_1$  至  $t_1$  后若干毫秒, 此处取 3 ms, 即 100 ms 至 103 ms。  $case_2$  的数据范围为  $case_1$  结束至第 2 次突变事件发生时刻  $t_2$ , 即 103 ms 至 130 ms。  $case_3$  的数据范围为  $t_2$  至  $t_2$  后若干毫秒, 即 130 ms 至 133 ms。  $case_4$  的数据范围为  $case_3$  结束至进入稳态,  $case_5$  的数据范围为进入稳态后的一个周期。分割后的各 case 波形如图 3 所示。

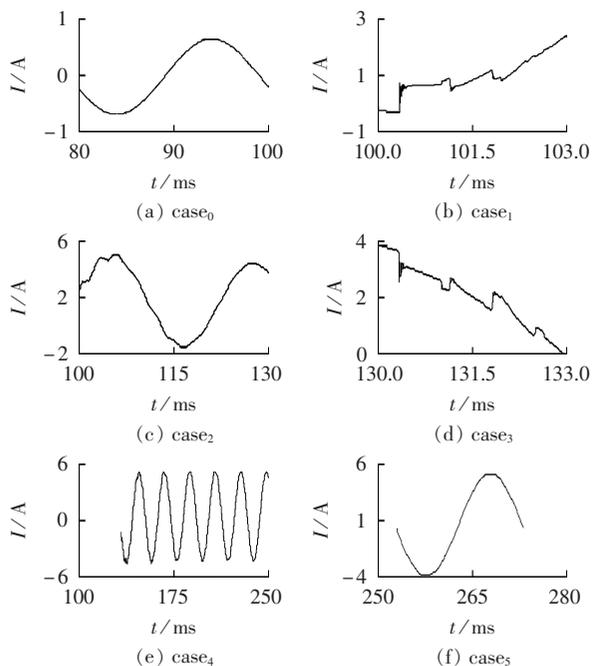


图 3 各部分数据的波形

Fig.3 Waveform of different parts of data

从上述分析可知,实现合理的故障数据分割的前提是准确地获知各次系统突变事件的发生时刻。当故障数据为电磁暂态仿真软件获得的仿真数据时,由于各次系统突变事件时刻是仿真设定的,可以直接得到,并不存在困难。而当故障数据为现场的故障录波数据时,则需要对数据波形进行分析,人工确定各次系统突变事件的发生时刻,进而对故障数据进行分割。

此外,当选择现场的故障录波数据作为数据源时,应选用高精度的故障录波器,其采样频率应足够高。若录波器采样频率过低,则无法真实记录故障行波信息,无法测试基于行波原理的继电保护装置。

### 3 高速高精度数模转换的实现

数模转换指的是从数字信号到模拟信号的转换,实现数模转换的电路称为数模转换器。暂态信号

发生器部分的核心是高速高精度数模转换。

数模转换器主要由基准电源、位权网络、寄存器、模拟开关和求和电路组成。其工作原理如下:基准电源作用在位权网络上产生与各位数字量对应的模拟量,寄存器中所存储的数字量的各位数码分别控制对应的模拟开关接通位权网络产生的各模拟量,求和电路对各模拟量进行求和,从而实现数字信号到模拟信号的转换。

#### 3.1 数模转换精度和转换速度

为实现高速高精度的数模转换,需对数模转换精度和转换速度<sup>[8-9]</sup>进行着重分析。

在数模转换中通常用分辨率和转换误差来描述转换精度。较高的分辨率是高精度数模转换的必要条件。在无其他数模转换误差的理想状态下,转换精度就是分辨率的大小。分辨率用输入二进制数码的位数给出,也可用数模转换器能够分辨出的最小电压与最大输出电压之比给出分辨率。 $N$ 位数模转换器的分辨率为  $1/(2^N-1)$ 。

若希望暂态信号发生器数模转换输出的幅值分辨率小于 0.1 mV,则当数模转换器的最大输出电压为 5 V 时,其位数应满足:

$$\frac{1}{2^N-1} \leq \frac{0.1}{5000} \quad (1)$$

由式(1)可解得  $N \geq 15.6$ , 即应至少选用 16 位的数模转换器。

由于数模转换的各个环节在参数和性能上与理论值之间不可避免地存在着差异,因此各类转换误差也会影响转换精度。转换误差表示实际的数模转换特性和理想转换特性之间的最大偏差,主要包括比例系数误差、平移误差和非线性误差等。

比例系数误差和输入数字量的大小成正比,多由参考电源偏离标准值所引起。平移误差使转换特性曲线发生平移,为一常数,与输入数字量的数值无关,可由所用运算放大器的零点漂移引起。非线性误差既非常数也不与输入数字量成正比,可由电路中模拟开关的导通内阻以及导通压降、所使用的电阻网络中电阻阻值的不精确、所用三极管之间特性的不一致等多方面原因引起。

此外,当输入的数码发生突变时,可能有多个模拟开关需要改变开关状态,由于它们的动作速度不同,会产生动态转换误差。

数模转换速度取决于数模转换器的建立时间。所谓建立时间,是指从输入的数字量发生突变开始,直到输出电压值进入与稳态值相差  $\pm 0.5 \text{LSB}$  (最低有效位)范围以内的时间。如所用数模转换器中未集成运放,还应考虑外部运放的建立时间。

当暂态信号发生器选用 16 位数模转换器和 32 位 DSP 时,只能同时实现 2 路数模转换。若需实现 8 路模拟信号的同步输出,可对 DSP 数据线进行复用,1.5  $\mu\text{s}$  内先后完成 4 路数模转换。因此,数模转换器和外部运放的建立时间应小于 375 ns。

### 3.2 数模转换器类型的选择

根据权重信号的不同,数模转换器可以分为电压式、电荷式和电流式,其中电流式可进一步分为电阻网络型和电流舵型<sup>[10-11]</sup>。

电压式开关树型数模转换器由电阻分压器和接成树状的开关网络组成,由于所用开关数量随数模转换位数的增加呈指数增长,因此不适用于高分辨率数模转换器。电荷式电容网络数模转换器利用电容分压原理工作,在输入数字量位数较多时各个电容的电容量相差很大,影响集成度,且电容充、放电时间的增加也降低了转换速度。电阻网络型数模转换器利用电阻网络将电压转换为电流,其中的模拟开关有一定的导通电阻和导通压降,且每个开关的情况又不完全相同,影响转换精度。

电流舵型数模转换器采用恒流源,不再受开关内阻和压降的影响,没有大电容需要充电,速度较快,且便于集成,可在规模可控的条件下达到较高的精度和速度。按照译码方式的不同,电流舵型数模转换器可分为二进制码型、热偶码型和分段译码型 3 种。

二进制码型可利用 R-2R 网络实现,其输入可直接控制电流开关,无需额外的译码电路,整个转换电路的版图面积很小。但是,R-2R 网络存在着由于电阻匹配度不够精确所产生的误差,特别是当输入数据位数很大时,转换误差更大。热偶码型首先将输入二进制数码译成热偶码,由热偶码控制信号驱动完全相同的电流开关,得到转换后的输出电流。输出电流随输入数码单调变化,有效避免了二进制码结构中的毛刺问题,具有动态转换误差小的优点。同时,当输入数据位数很大时,可大幅减小数模转换误差,提高转换器的性能。但是,译码电路增加了路径延时,降低了数模转换速度,另外随着电流支路数的增多,芯片面积也极大地增加了。分段译码型将以上 2 种译码方式进行折中,其基本思想是将输入数码分成低位和高位分别进行译码。高位数码采用热偶码,即控制电流大小相等的电流支路;低位数码采用二进制直接译码的方式,即控制电流大小倍增的电流支路。这样的译码方式使得转换精度和芯片面积都有很好的折中,既解决了全热偶码型芯片面积大的问题,又改善了二进制码结构转换误差大的问题,适用于暂态信号发生器。

### 3.3 所选数模转换器及其外部运放性能分析

暂态信号发生器所选用的数模转换芯片为一款

16 位的高速电流舵型数模转换器,同时具备良好的交流和直流性能,其硬件结构如图 4 所示。

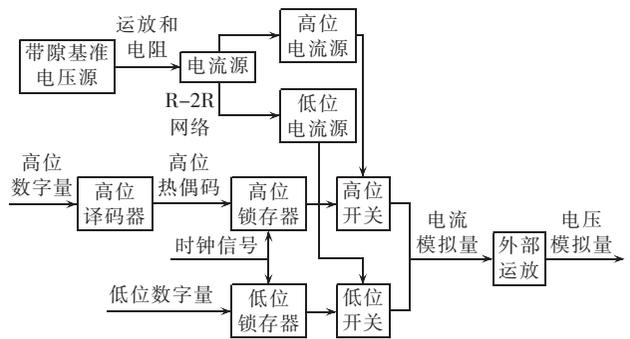


图 4 数模转换器及其外部运放工作原理示意图  
Fig.4 Principle diagram of DA converter and its external operational amplifier

该芯片内部集成有温度补偿带隙基准电压源,其利用一个与温度成正比的电压和一个与温度成反比的电压之和,二者温度系数相互抵消,实现与温度无关的电压基准,实现对比例系数误差的控制。该电压源可通过内部控制放大器和外部电阻的配合产生芯片所需电流源。芯片内的边沿触发式输入锁存器可有效消除由于输入各位数字量不同步导致的输出信号毛刺。芯片采用分段电流源架构,高位数字量通过译码器生成热偶码,低位数字量使用 R-2R 网络生成电流源阵列,所用激光微调薄膜电阻具备较高的精度,可有效减小非线性误差。芯片专有的开关技术,可抑制动态转换误差。

作为一款电流输出的数模转换器,其电流输出送至外部运放的求和点,从而提供缓冲电压输出。所选用的运放可以较好地抑制零点漂移,从而减小平移误差。

此外,所用数模转换芯片的建立时间为 25 ns,外部运放的建立时间为 16 ns,满足暂态信号发生器要求。

## 4 多路模拟信号输出的同步

暂态信号发生器应满足多路模拟信号同步输出的要求。当其选用 16 位数模转换器和 32 位 DSP 时,只能同时实现 2 路数模转换。对于 8 路同步模拟信号,应在 4 路数模转换依次完成后同时输出,若 4 路均由同一数模转换器完成,则需要 2 级采样保持电路配合实现。下面以 8 路模拟信号同步输出为例,分析暂态信号发生器多路模拟信号同步输出的实现方案。

8 路模拟信号同步输出的实现方案如图 5 所示。在数模转换芯片后连接一个多路开关,将不同路的数字量在同一片数模转换芯片中进行数模转换,得到的模拟量通过多路开关输出至多个第一级采样保持芯片。多路开关联通哪个采样保持芯片,该采样

保持芯片就置于采样状态;多路开关联通其他采样保持芯片时,该采样保持芯片就置于保持状态。在第一级多路采样保持芯片均得到模拟信号后,第二级采样保持芯片置于采样状态随后保持,以保证多路同步输出。

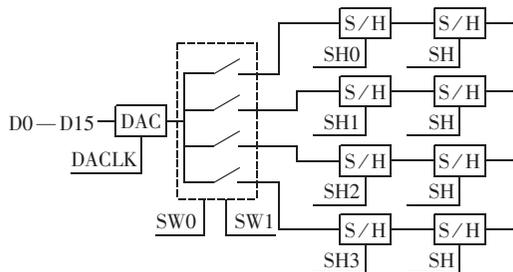


图 5 多路同步输出的实现方案

Fig.5 Implementation scheme of multi-channel synchronous outputs

由于采样了多路开关和 2 级采样保持,其时序配合十分关键,多路同步输出的时序配合如图 6 所示。其中,CLK0—CLK3 为数字量控制信号,对应 4 路信号的数字量输入,当某一 CLK 为“1”时,则 DSP 数据线输出对应路的 16 位数字信号至数模转换器。在此期间,数模转换器的时钟信号给出一上升沿,完成数模转换。随后,通过多路开关和两级采样保持的配合实现多路同步输出。

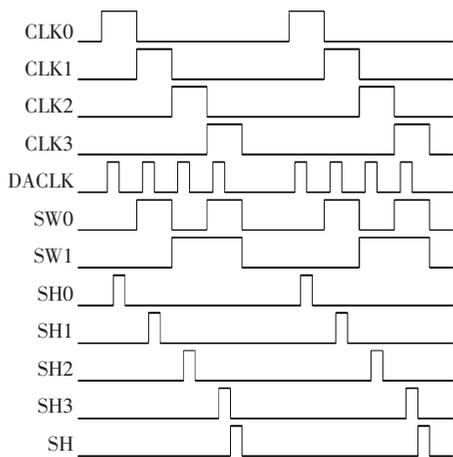


图 6 多路同步输出的时序配合

Fig.6 Sequential coordination of multi-channel synchronous outputs

## 5 暂态行波保护测试仪的暂态信号发生器测试结果

### 5.1 暂态行波保护测试仪的暂态信号发生器正弦波测试

利用仿真软件生成不同频率、不同幅值的正弦波测试信号,使用示波器对暂态行波保护测试仪暂态信号发生器的输出波形进行检测,测试结果见表 2。

上述结果均为 5 次测量值的平均值。当输出频率大于 10 kHz 的正弦波时,由于输入数字量的点数

表 2 暂态信号发生器的正弦波测试结果  
Table 2 Testing results of sine wave output of transient signal generator

理论波形		实测频率/kHz	实测幅值/V	
频率/kHz	幅值/V		最大值	最小值
0.05	0.5	0.05	0.50	
	1		1.01	
	3		3.01	
1	0.5	1	0.51	
	1		1.00	
	3		3.02	
10	0.5	10	0.50	
	1		1.00	
	3		3.00	
	5		5.00	

过少,输出波形会出现较大跳变,不宜进行测试。从表 2 所示结果可以看出,测试仪暂态信号发生器的输出效果十分理想。

### 5.2 暂态行波保护测试仪的暂态信号发生器方波测试

利用仿真软件生成不同频率、不同幅值的方波测试信号,使用示波器对暂态行波保护测试仪暂态信号发生器的输出波形进行检测,测试结果如表 3 所示。

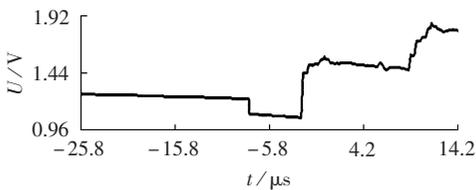
表 3 暂态信号发生器的方波测试结果  
Table 3 Testing results of square wave output of transient signal generator

理论波形		实测频率/kHz	实测幅值/V	
频率/kHz	幅值/V		最大值	最小值
0.05	0.5	0.0499	0.50	-0.50
	1	0.0500	1.00	-1.00
	3	0.0500	3.00	-3.00
	5	0.0500	5.01	-5.01
1	0.5	1	0.50	-0.50
	1	1	1.01	-1.00
	3	1	3.01	-3.01
10	0.5	10	0.50	-0.50
	1	10	1.01	-1.01
	3	10	3.01	-3.01
55.55	5	10	5.01	-5.01
	0.5	55.58	0.50	-0.50
	1	55.57	1.00	-1.00
111.1	3	55.59	3.00	-3.00
	5	55.53	5.01	-5.01
	0.5	111.0	0.50	-0.50
166.7	1	111.1	1.00	-1.00
	3	111.0	3.00	-3.00
	5	111.1	5.01	-5.01
333.3	0.5	166.7	0.50	-0.50
	1	166.7	1.00	-1.00
	3	166.9	3.00	-3.00
	5	167.1	5.01	-5.01
	0.5	332.2	0.50	-0.50
	1	334.2	1.00	-1.00
	3	333.0	3.00	-3.00
	5	334.3	5.01	-5.01

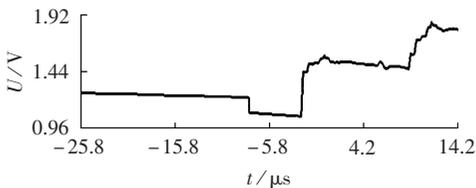
表 3 所示结果均为 5 次测量值的平均值,从表中可以看出,测试仪暂态信号发生器的输出效果十分理想。

### 5.3 暂态行波保护测试仪的暂态信号发生器故障波形测试

图 7 为仿真数字信号与暂态行波保护测试仪暂态信号发生器输出信号的对比图。从图中可以看出,暂态行波保护测试仪的暂态信号发生器输出的信号与仿真数字信号除有很小的毛刺外,并无实质性差异,验证了暂态信号发生器输出信号的准确性和有效性。



(a) 仿真数字信号



(b) 暂态信号发生器输出信号

图 7 仿真数字信号与暂态信号发生器输出信号的对比

Fig.7 Comparison between simulative digital signal and output signal of transient signal generator

## 6 结语

暂态行波保护测试仪能够满足测试基于暂态行波故障信息的各类新型电力系统继电保护装置的需要,其暂态信号发生器部分可对故障数据进行高精度数模转换,输出多路同步的小电压模拟信号。为自由控制故障测试波形,本文提出了合理有效的故障数据分割方法。通过对数模转换的详细分析,选出了符合暂态行波保护测试仪要求的数模转换芯片及其外部运放。为实现多路模拟信号的同步输出,本文设计了多路开关和 2 级采样保持电路相互配合的实现方案。最后,通过试验验证了暂态行波保护测试仪暂态信号发生器工作的可靠性和有效性。

### 参考文献:

- [1] 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. Transient travelling wave protection test platform[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(2):192-198.
- [2] 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.

- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 阎石. 数字电子技术基础[M]. 5 版. 北京:高等教育出版社,2006:520-524.
- [9] 康华光,陈大钦. 电子技术基础数字部分[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2001:396-398.
- [10] 赵伟兵. 高速 CMOS 数模转换器的设计[D]. 北京:清华大学,2005.  
ZHAO Weibing. Design of high-speed CMOS digital-to-analog converters[D]. Beijing:Tsinghua University,2005.
- [11] 钟书鹏. 12 位高速电流开关型数模转换器的研究[D]. 北京:清华大学,2006.  
ZHONG Shupeng. Study on 12 bit high-speed current-steering digital-to-analog converter[D]. Beijing:Tsinghua University,2006.

### 作者简介:



董新洲

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

(下转第 77 页 continued on page 77)

- systems to support dynamic frequency control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2014,29(4):833-840.
- [15] 胡云花,赵书强,马燕峰,等. 电力系统低频振荡和次同步振荡统一模型阻尼分析[J]. 电力自动化设备,2005,25(7):6-11.  
HU Yunhua,ZHAO Shuqiang,MA Yanfeng,et al. Damping analysis of unified LFO & SSO model in power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(7):6-11.
- [16] 高本峰,李忍,杨大业,等. 双馈风电机组次同步振荡阻尼特性与抑制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):11-20.  
GAO Benfeng,LI Ren,YANG Daye,et al. Damping characteristics and countermeasure of DFIG sub-synchronous oscillation[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(12):11-20.
- [17] ZHONG Q C,WEISS G. Synchronverters:inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2011,58(4):1259-1267.
- [18] 竺炜,唐颖杰,谭喜意,等. 发电机调速附加控制对系统频率稳定的作用[J]. 电力自动化设备,2008,28(12):21-24.

ZHU Wei,TANG Yingjie,TAN Xiyi,et al. Effect of additional control on frequency stabilization[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(12):21-24.

#### 作者简介:



李东东

李东东(1976—),男,安徽阜阳人,教授,博士,主要研究方向为电力系统分析、新能源并网和智能用电(**E-mail**:upwgrp@163.com);

朱钱唯(1992—),男,上海人,硕士研究生,主要研究方向为智能用电、分布式发电并网(**E-mail**:jay2pkf4@hotmail.com);

程云志(1979—),男,安徽桐城人,高级工程师,博士,主要研究方向为新能源建模及并网、电力系统稳定分析、零售电力市场、分布式电源、微电网等(**E-mail**:sjtu\_yh@hotmail.com)。

## Control strategy of virtual synchronous generator based on self-adaptive rotor inertia and damping combination control algorithm

LI Dongdong<sup>1,2</sup>,ZHU Qianwei<sup>1</sup>,CHENG Yunzhi<sup>3</sup>,LIU Qingfei<sup>1</sup>,  
LIN Shunfu<sup>1,2</sup>,YANG Fan<sup>1,2</sup>,BIAN Xiaoyan<sup>1,2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Shanghai Higher Institution Engineering Research Center of High Efficiency Electricity Application, Shanghai 200090, China; 3. Electric Reliability Council of Texas, Taylor 76574, USA)

**Abstract:** The VSG(Virtual Synchronous Generator) can support frequency stability of power grid by solving the problem of lacking inertia in distributed generation system in the inverter control field. However, the existing VSG control strategies often neglect the effect of damping. To further improve the contribution of VSG on the frequency stability, based on the traditional VSG control strategy and combined with the mechanical knowledge, the feasibility that the virtual rotor inertia of VSG can change in real-time is verified. The relationship between the frequency stability and the rotor inertia/damping coefficient is analyzed, and an SA-RIDC(Self-Adaptive Rotor Inertia and Damping Combination control) algorithm is proposed to realize the interleaving control of the virtual rotor inertia and the virtual damping. The proposed SA-RIDC algorithm is compared with the traditional constant parameters control method and the self-adaptive rotor inertia control method by MATLAB/Simulink simulation, the simulative results show that the SA-RIDC algorithm can significantly improve the frequency stability of power grid.

**Key words:** virtual synchronous generator; frequency stability; damping; rotor inertia; self-adaptive control

(上接第 71 页 continued from page 71)

## Key techniques of transient signal generator for test of traveling wave protection

DONG Xinzhou, FENG Teng, WANG Fei

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** As an important part of test platform of transient traveling wave protection, the transient signal generator can transform the fault data into small analog voltage signal without distortion. The technical requirements and working principles of the transient signal generator are introduced, based on which, some key techniques are discussed and studied. The processing method of the fault data, the implementation scheme of high-speed and high-precision DA(Digital to Analog) conversion and the synchronization of the multi-channel analog output are deeply analyzed. The reliability and validity of the transient signal generator are verified by experiments.

**Key words:** transient traveling wave protection test platform; transient signal generator; fault data processing; digital to analog conversion; synchronous output