

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311825

直流电子式电压互感器阶跃响应特性现场 试验方法及装置*

朱梦梦^{1,2}, 翟少磊^{1,2}, 朱全聪^{1,2}, 何兆磊³

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究所 昆明 650217; 2. 云南省绿色能源与数字电力量测及控保重点实验室 昆明 650217; 3. 云南电网有限责任公司计量中心 昆明 650200)

摘要:直流电压互感器的暂态阶跃特性对直流系统控保装置至关重要,首先研究了影响直流电子式电压互感器暂态传变特性的因素,分析了阶跃响应技术参数及其试验装置性能指标要求。基于此,提出一种直流电压互感器阶跃响应特性现场试验方法,研制出基于固态开关的阶跃电压源及试验装置,实现了陡上升、长脉宽方波电压输出和暂态信号的同步测量。试验结果表明,提出的直流电子式电压互感器阶跃响应特性现场试验方法及装置满足标准规定要求,并在实际±500 kV 直流工程换流站开展了阶跃响应现场试验,为直流电压互感器的暂态性能测试和评估提供了技术依据。

关键词:阶跃响应;方波电压;固态开关;现场试验;低通滤波器

中图分类号: TM835.4 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.40

Field test method and device for step response characteristics of DC electronic voltage transformer

Zhu Mengmeng^{1,2}, Zhai Shaolei^{1,2}, Zhu Quancong^{1,2}, He Zhaolei³

(1. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China; 2. Yunnan Key Laboratory of Green Energy, Electric Power Measurement Digitalization, Control and Protection, Kunming 650217, China; 3. Measurement Center of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650200, China)

Abstract: The transient step characteristic of the DC voltage transformer is very important to the control and protection device of the DC system. In this article, firstly, the factors affecting the transient transmission characteristics of DC electronic voltage transformers are studied. The technical parameters of step response and the performance requirements of the test device are analyzed. Based on this, a field test method for the step response characteristics of the DC voltage transformer is proposed. A step voltage source and test device based on a solid-state switch are developed. The synchronous measurement of steep rise, long pulse width square wave voltage output, and transient signal are realized. The test results show that the proposed field test method and device of step response characteristics of the DC electronic voltage transformer meet the requirements of the standard. The field test of step response is carried out in the actual ±500 kV DC project converter station, which provides a technical basis for the transient performance test and evaluation of the DC voltage transformer.

Keywords: step response; square wave voltage; solid state switch; field test; low-pass filter

0 引言

直流输电技术在解决电力能源逆向分布、新能源并

网接纳系统、改善电力能源配置和提高可靠性等方面应用越来越广泛^[1-3],作为直流系统重要测量设备的直流电子式电压互感器^[4-5],是控制保护装置进行调节、动作的关键数据源头,其对暂态阶跃信号的传变特性是否准确

收稿日期:2023-08-23 Received Date: 2023-08-23

* 基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFF0201202)、云南省技术创新人才培养对象项目(202205AD160005)、云南电网有限责任公司科技项目(YNKJXM20220161)资助

可靠,关乎着直流输电系统的安全稳定运行^[6]。特别是柔性直流输电系统的惯量小,加之设备端口电容的影响,在发生故障后暂态电压首波头极陡,这对直流电子式电压互感器暂态测量性能提出了更高要求。

目前,人们已对直流电子式电压互感器的检测试验技术开展了深入研究。文献[7]提出了一种换流站数字量直流电压互感器现场同步校准技术,并在现场开展了应用及数据分析。文献[8]研究了柔性直流工程用直流电压测量装置的暂态响应试验技术,提出了基于 MARX 发生器的阶跃方波电压源。文献[9]开展了从直流电压互感器远端模块输入端进行阶跃响应测试技术的研究,但是此种方法在现场测试中不易实现。文献[10]进行了特高压直流电流测量装置阶跃响应特性校验系统研究,其系统最大输出电流 3 000 A,阶跃方波上升时间 7 μs ,持续时间 10 ms,过冲幅值小于 1%。文献[11]针对直流电压互感器现场暂态校验技术进行研究,并在苏南统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)工程中进行了应用,以上的这些研究成果均为直流电子式电压互感器现场暂态特性试验提供了参考。但由于缺少相关的暂态阶跃试验技术及装备,直流电子式电压互感器一般不进行暂态阶跃特性现场试验,这给直流系统可靠运行埋下了安全隐患。在已投运的直流工程中,出现了由于直流电压互感器暂态传变特性不满足要求等原因引起的线路行波保护不能正确动作^[12]。实际上这些问题可以通过开展直流电压互感器的暂态阶跃响应试验进行验证和提出改进措施。

针对以上问题,本文首先分析了影响直流电子式电压互感器暂态传变特性的关键因素,提出一种现场阶跃响应特性试验方法,研制出长脉宽、陡上升的方波电压源,构建了直流电压互感器现场暂态阶跃特性试验系统,并在实际工程中开展了现场测试,验证了所提现场试验方法和装置系统的有效性,解决了直流电压互感器暂态阶跃响应试验无法依从标准在现场进行测试的难题。

1 暂态传变特性及阶跃响应试验装置要求

1.1 直流电子式电压互感器结构及暂态传变特性

直流电子式电压互感器主要由直流分压器、远端模块、合并单元、光纤传输等元件组成^[13],其暂态特性是其对一次回路暂态电压快速、准确响应的性能,包括频率响应特性和阶跃响应特性^[14],为更好研究直流电子式电压互感器各环节对其暂态信号传变特性影响,将直流电子式电压互感器的结构简化为 3 部分如图 1 所示。

图 1 中, R_1 、 C_1 为直流分压器高压臂电阻和电容, R_2 、 C_2 为低压臂的电阻和电容。 U_1 为直流分压器一次电压, U_2 为低压臂二次输出电压, U_3 为远端模块低通滤波

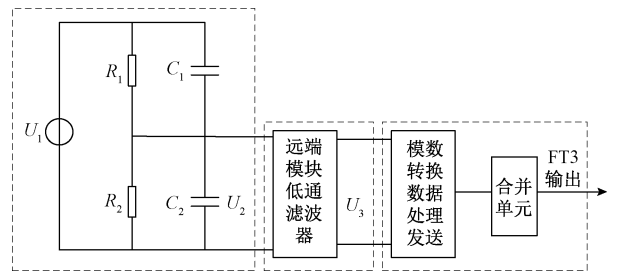


图 1 直流电子式电压互感器等效结构

Fig. 1 Equivalent structure diagram of the DC electronic voltage transformer

器端口电压,远端模块中的电阻盒(分压板)的结构与直流分压器结构特性类似,在等效时不予以考虑,第 2 个虚框是远端模块低通滤波器,而 A/D 转换准确度及数据的处理发送则对暂态传变特性无明显影响。不难看出,直流电压互感器的阶跃响应特性主要受制于直流分压器电容、电阻参数和低通滤波器环节影响。图 1 中的直流分压器一次侧电压与二次侧电压比为:

$$\frac{U_1}{U_2} = 1 + \frac{R_1}{R_2} \times \frac{1 + j\omega C_2 R_2}{1 + j\omega C_1 R_1} \quad (1)$$

当输入一次信号为直流分量时,分压比与高低压臂的电阻值有关。当输入一次信号频率趋近无穷大时,分压比与高低压臂的电容值相关。可见,对于直流电压测量而言是通过电阻实现,而对于暂态阶跃的电压的测量则是通过电容实现。为了获得良好的宽频特性,直流分压器阻容分压回路设计为 $R_1 C_1 = R_2 C_2$,此时一次分压器的分压比与频率无关,但是当参数不相等时,则会对阶跃信号传变出现超调(过冲)等失真现象。

在工程实际中受远端模块体积、功耗等因素影响,一般低通滤波器是由无源电路元件组成。现以工程使用的巴特沃斯低通滤波器为例,通常 n 阶巴特沃斯低通滤波器的传递函数表达式如下:

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_c)^{2n}}} \quad (2)$$

式中: n 为滤波器阶数; ω_c 为截止频率。考虑低通滤波器情况下的幅频和延时特性曲线如图 2 所示。

从图 2(a) 可以看出,在频域内无法不失真地传变各个频率信号,而从图 2(b) 可以看到,延时特性曲线中产生了上冲和波动,反映在时域暂态阶跃波形上则会出现延迟滞后和超调等现象。经过低通滤波器后阶跃电压的变化如图 3 所示。

低通滤波器的截止频率对暂态电压波形的上升时间有影响,截止频率越高,输出波形的上升越小。实质上直流电子式电压互感器整个传输链路中任何一个元件参数发生改变,将影响暂态阶跃信号的传变特性。鉴于直流

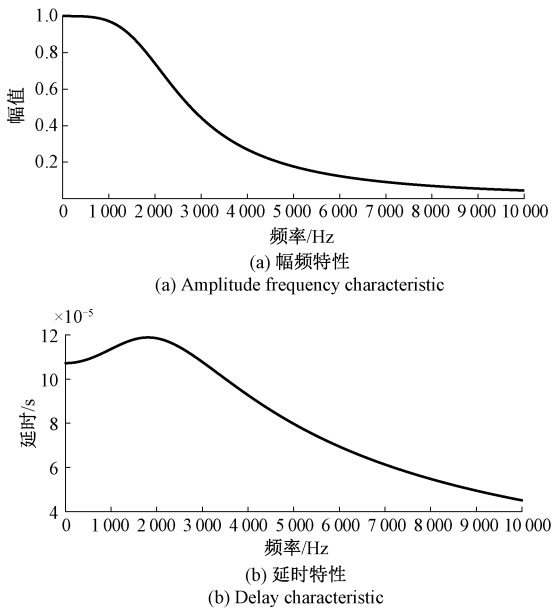


图2 幅频和延时特性曲线

Fig. 2 Amplitude frequency and delay characteristic curve

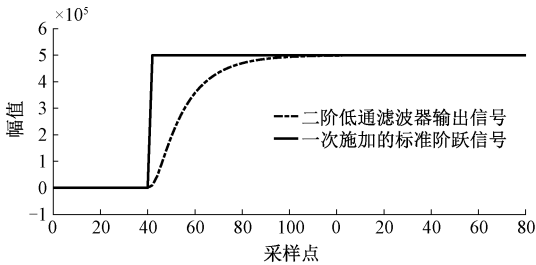


图3 经低通滤波器后的阶跃信号

Fig. 3 Step signal after the low-pass filter

电子式电压互感器设备制成后,从生产厂房运送至换流站现场,经过安装调试、长期户外运行情况,有必要在现场开展直流电压互感器的阶跃响应试验,对其性能指标作出评价。

本文通过建立的直流电子式电压互感器等效电路,分段研究了整个传输链路幅频和延时特性,理论分析了分压器、低通滤波器等被动元件等值参数变化对直流电压互感器暂态特性的影响。

1.2 阶跃响应试验装置性能指标要求分析

本文根据现阶段实施的标准中对直流电压互感器阶跃响应技术参数和试验装置性能要求分析,并结合拟开展的现场直流电子式电压互感器额定电压为 500 kV,因此确定阶跃电压源应具备如下主要技术指标:额定阶跃电压幅值 ≥ 50 kV,上升时间应 $\leq 10 \mu\text{s}$,脉宽持续时间应 ≥ 5 ms,超调 $\leq 5\%$,建立时间 ≤ 2 倍额定阶跃响应时间(按照额定阶跃响应时间 500 μs 考虑,建立时间应 ≤ 1 ms)。

对于阶跃响应的测量装置而言,其超调小于 5%,阶跃响应时间小于被试品额定阶跃响应时间的 1/20,建立时间小于被试品额定阶跃响应时间的 2 倍,稳态幅值测量准确度优于 3%。

2 阶跃响应现场试验系统设计及关键技术

2.1 阶跃响应现场试验方法研究

工程中广泛使用的直流电子式电压互感器为数字量输出型,在传变环节、采样率及多种协议等诸多方面的因素,使得现场检测试验天然地存在着很大难度。此外,合并单元无对时信号输入,同步检测不易实现,加之直流电压互感器安装位置离地高,造成现场试验中高空挂接导线困难、试验负载及安全风险倍增。在现行的标准中要求阶跃响应试验应在直流电压互感器额定二次负荷和原装光缆/电缆下进行,主要考查直流电压互感器阶跃响应特性是否满足设计指标。

直流电子式电压互感器阶跃响应现场试验采用直接测量法原理,此时需要实现对标准器和被试品的二次信号进行同步采集。其中,标准器应具备阶跃电压信号的精确传变,故采用阻容分压器原理设计作为标准器,二次信号为模拟量输出小电压。而对于被试品直流电子式电压互感器,其二次信号采用 IEC 60044-8 标准中的 FT3 协议进行传输。结合以上分析,提出了一种直流电子式电压互感器阶跃响应特性现场同步校验方法,将试验系统产生的阶跃电压波形施加至被测直流电子式电压互感器和标准分压器,阶跃响应校验系统在同步模块的驱动下,同步接收标准分压器的模拟信号和通过光纤从被测直流电子式电压互感器合并单元引出的数字量信号,并对其报文进行解析,最终实现阶跃响应特性的现场同步校验。

本文研制的直流电子式电压互感器现场阶跃响应校验系统,其中针对标准器二次模拟量小电压信号而言,利用高速采集卡实现标准信号的高精度采集,其采样频率为 1 MHz,确保能准确捕捉阶跃电压信号。而当前工程中直流电子式互感器合并单元输出的数字量,多采用 FT3 协议,其具有传输数据量大、传输速度快等优点,特别是柔性直流工程中直流互感器的采样率达 100 kHz,因此现场校验系统需对数字量输出的 FT3 报文进行准确解析,并得到被试品直流电子式电压互感器的一次采样值,以便完成阶跃响应参数计算。综上,高速报文解析装置是实现数字量报文接收和参数计算的关键一个环节,本文提出了基于现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)和嵌入式系统双构架的高速报文解析装置的设计方案,高速报文解析装置包括 FPGA 和通讯接口底板,以及运行操作系统和协议栈的嵌入式中央处理器(central processing unit, CPU)板,整个系统由 FPGA 保证数据处理的实时性,

由嵌入式系统和传输控制协议 (transmission control protocol, TCP) 保证数据传输的可靠性。

高速报文解析装置接收直流电子式电压互感器合并单元输出的 FT3 报文, 现场校验系统的时钟同步装置开始触发同步信号, 此时标准信号的高速采集卡立刻采样, 高速报文解析装置收到同步触发信号后对 FT3 报文进行打时标处理, 并通过 FPGA 进行解码和数据缓冲处理, 然后通过并行总线传输至运行嵌入式操作系统 CPU 进行数据参数提取, 通过 TCP 协议经以太网传送至校验系统上位机, 以便实现标准模拟量和被试品直流电子式电压互感器数字量之间的高精度同步。

直流电子式电压互感器阶跃响应现场试验系统如图 4 所示, 阶跃电压发生装置通过试验系统控制, 产生试验一次回路所需的陡上升、长脉宽阶跃电压, 并施加给标准器和被试品一次侧。标准器为阻容分压原理, 高压臂电阻电容分别为 R_{11} 、 C_{11} , 低压臂电阻电容分别为 R_{12} 、 C_{12} 。阶跃响应信号测量系统同步接收标准器二次输出的模拟量 u_b 和被试品合并单元引出的 FT3 数字量信号 u_c , 并完成数据的解析及阶跃响应关键参数的计算。

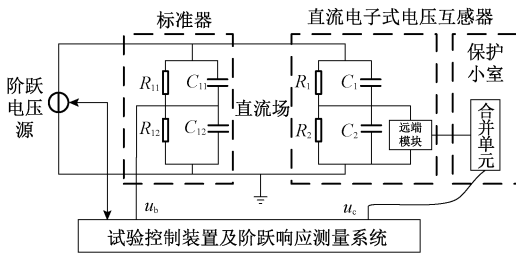


图 4 阶跃响应特性现场试验系统

Fig. 4 Field test system for step response characteristics

为更直观的阐明直流电压互感器现场阶跃响应指标参数的计算^[14], 典型的阶跃响应试验波形和参数计算示意图如图 5 所示。

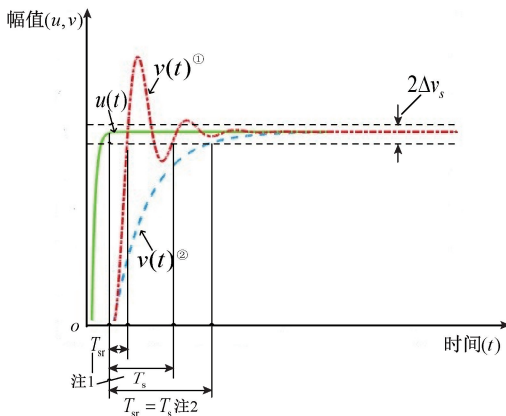


图 5 阶跃响应特性测试曲线示意图

Fig. 5 Diagram of step response characteristic test curves

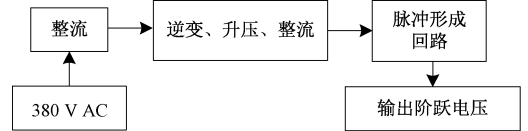
其中, $u(t)$ 为阶跃信号输入变量, $v(t)$ 为阶跃信号输出变量, V_{∞} 为阶跃信号的稳态值, $2\Delta v_s$ 为规定允差, Δv_s 通常为 $3\% V_{\infty}$ 或 $5\% V_{\infty}$, ①为具有欠阻尼特性的阶跃响应, ②为具有过阻尼特性的阶跃响应。其中 T_s 为趋稳 (建立) 时间, T_{sr} 为阶跃响应时间。超调 (过冲) 定义为偏离输出变量最终稳态值的最大瞬态偏差, 其计算方法在此不再赘述。

而上升时间 T_r 是从输出变量达到最终稳态值的 10% 的时刻 $t_{10\%}$ 起到第 1 次到达最终稳态值与初始稳态值之差的 90% 的时刻 $t_{90\%}$ 为止的持续时间, 公式如下:

$$T_r = t_{90\%} - t_{10\%} \quad (3)$$

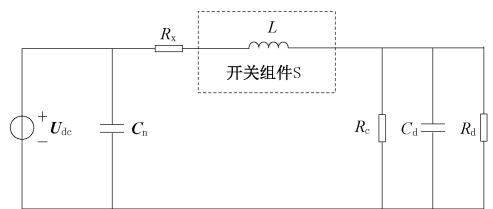
2.2 基于固态开关的阶跃电压源装置研制

直流电压互感器现场暂态响应试验的关键设备是阶跃电压源, 为了获得几十千伏级阶跃电压输出、 μs 级上升时间和 ms 级的脉宽持续时间, 本文采用基于固态开关的陡上升、长脉宽阶跃电压源设计方案^[15-16], 建立阶跃电压源等效电路, 从理论上分析不同电路参数改变时对阶跃电压源的上升时间、脉宽持续时间等指标的影响。阶跃电压源整体系统设计由高压直流电源、高压储能系统、脉冲形成回路、传输线及控制电路等组成, 暂态阶跃电压源电路拓扑结构如图 6 所示。



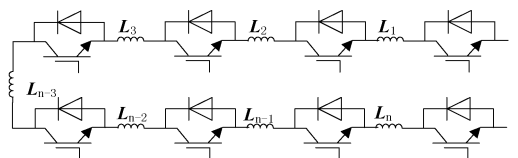
(a) 阶跃电压源原理示意图

(a) Schematic diagram of step voltage source principle



(b) 阶跃电压源等效电路

(b) Equivalent circuit diagram of step voltage source



(c) 基于串联型的 IGBT 结构原理

(c) Equivalent circuit diagram of step voltage source

图 6 暂态阶跃电压源电路拓扑结构

Fig. 6 Topology of transient step voltage source circuit

阶跃电压源原理如图 6(a) 所示, 其中前级高压直流电源将 380 V 的市电进行整流、高频逆变升压等过程为储能系统提供能量, 并输出稳定的高压直流电压。后级的脉冲

形成回路输出的脉冲电压上升时间、波形品质与采用的开关组件、电路参数直接相关。阶跃电压源等效电路拓扑结构如图6(b)所示,主要包含高压直流电源 U_{dc} 、储能电容 C_n 、限流电阻 R_x 、以及开关组件S的等效电感 L 、下拉电阻 R_c 、等效负载 R_d 和 C_d 等。而脉冲形成电路拓扑方案采用固态开关型,开关器件作为脉冲形成电路核心之一,为便于在直流换流站现场开展工作,一般要求设备体积小、便于运输,阶跃电压源装置选取绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistors, IGBT)作为脉冲形成电路的开关组件,鉴于单个IGBT承受的最大电压有限,实际中将多个IGBT串联起来使用,以便控制开关组件的导通与关断,并在等效负载上得到近似方波电压信号。

暂态阶跃电压波形产生的主要过程包括充电阶段、放电阶段和泄能阶段。首先,充电阶段主要由高压直流电源给储能电容充电,充电结束后关断直流电源。然后,进入放电过程阶段,储能电容在IGBT开关组件的控制下对负载进行放电,产生试验所需的暂态阶跃电压波形。最后,泄能阶段IGBT关断,此时回路只剩下拉电阻 R_c 和并联等效负载 R_d 和 C_d ,通过并联下拉电阻对负载电容上存储的能量进行释放。

图6中,储能电容 C_n 一般是 μF 级,远大于现场直流电压互感器的 pF 级等效电容 C_d ,因此可将储能电容视为一个恒压源。鉴于设备体积空间因素考虑,将串联的IGBT布置成环形,也导致了等效电感 L 的产生。利用仿真软件建立阶跃电压源等效电路仿真模型,通过多次仿真数据得出,IGBT开关组件的等效电感直接影响阶跃波形的陡度,而过大会使得波形出现震荡,因此在设计制造中应尽量减少回路电感,制造过程中尽量使用特性一致性好的IGBT来确保电压分布均匀,串联布置的IGBT的等效电路如图6(c)所示。另外,限流电阻 R_x 越小阶跃波形上升时间越小,但也会给阶跃波形带来过冲振荡的风险,与此同时 R_x 过小会增大一次回路的电流值,对开关性能要求高,且成本会相应增加。泄能阶段实质是一阶电路零输入状态,回路中的下拉电阻 R_c 变大,会增加脉冲电压的下降时间。

根据设计参数进行仿真计算,波形如图7所示。

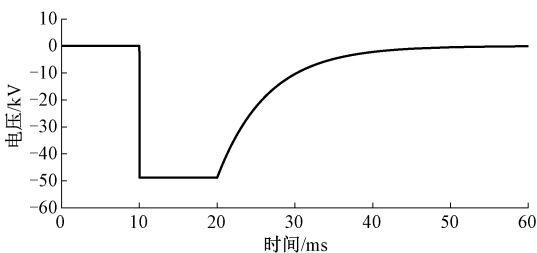


图7 阶跃电压输出幅值为 -50 kV 的仿真波形

Fig. 7 Simulation waveform diagram with step voltage output amplitude of -50 kV

从图7可知,阶跃电压源达到设计要求,阶跃电压幅值为 -50 kV ,下降时间 $<5\ \mu\text{s}$,且波形无明显过冲振荡,趋稳时间 $<10\ \mu\text{s}$,脉宽持续时间为 $>5\text{ ms}$,其平顶波形在持续时间内跌落不大于阶跃幅值的 1.5% 。结合以上分析,本文研制的直流电压互感器暂态特性试验装置如图8所示。

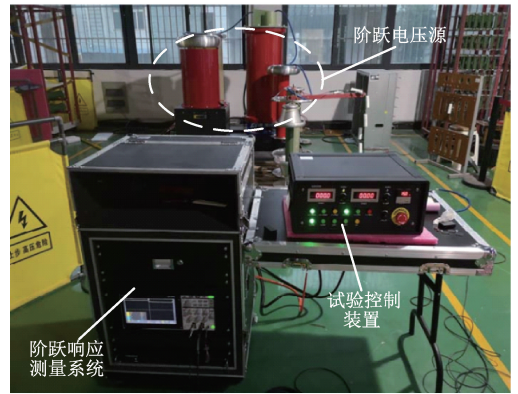


图8 直流电压互感器暂态特性试验装置

Fig. 8 DC voltage transformer transient characteristic test device

在国家权威机构对本文研制的直流电压互感器暂态特性试验装置进行测试,并通过检测。实验结果表明,在输出阶跃电压幅值为 50 kV 时的测量波形上升时间 $\leq 10\ \mu\text{s}$,波形平滑且无过冲,趋稳时间 $\leq 100\ \mu\text{s}$,持续时间满足在 $1\sim 5\text{ ms}$ 连续可调。按照行业标准DL/T 2184—2020《直流输电用直流电压互感器暂态试验导则》中对阶跃试验装置的要求,研制的方波电压源满足现场开展 $\pm 500\text{ kV}$ 直流电压互感器的暂态特性试验技术指标要求。

3 工程实例验证

3.1 现场试验系统准确性保障及建立

在 $\pm 500\text{ kV}$ 直流输电工程换流站中开展极线用直流电子式电压互感器的阶跃响应现场试验,该直流电压互感器是基于阻容分压原理,额定一次电压为 500 kV ,其中高压臂电容为 286 pF 、电阻为 $500\text{ M}\Omega$,合并单元采样频率为 10 kHz ,采用FT3通信协议。暂态响应特性设计指标是按照GB/T 26217—2010《高压直流输电系统直流电压测量装置》要求,响应时间 $\leq 250\ \mu\text{s}$,暂态响应试验要求是在直流电压互感器高压端施加测量范围 10% 以上的一个阶跃电压,在输出端测量暂态响应特性。

为满足对上升时间 $<10\ \mu\text{s}$ 阶跃波形的高精度采集,暂态校验系统采样频率为 1 MHz ,系统包含两个模拟量采集通道,且具备上升和下降时间、阶跃响应时间、趋稳时间、超调等阶跃响应参数的计算分析。支持FT3报文

协议解析,被试品的最高采样频率为 100 kHz。标准器采用阻容分压原理设计,基于此构建的直流电压互感器阶跃响应试验系统满足标准规定要求^[17]。

3.2 试验结果及分析

本次试验场地是直流工程换流站直流场,试验对象为换流站极线用直流电子式电压互感器,按照现场安全管控要求进行试验,并全程对现场作业进行视频监控,确保现场作业安全。

在现场进行直流电子式电压互感器阶跃响应试验的步骤具体为,在高空作业车的配合下,拆除直流一次侧管母与直流分压器的引线,将高压一次引线与管母进行断开,依次连接被试品和阶跃响应电压发生装置、标准分压器的一次高压接线。阶跃响应测量系统连接标准器的二次模拟电压信号和被试品合并单元通过光纤引出的 FT3 信号。逐项检查试验系统接线是否正确,以及安全距离是否达到要求,并确保接地可靠,直流电子式电压互感器阶跃响应现场试验如图 9 所示。

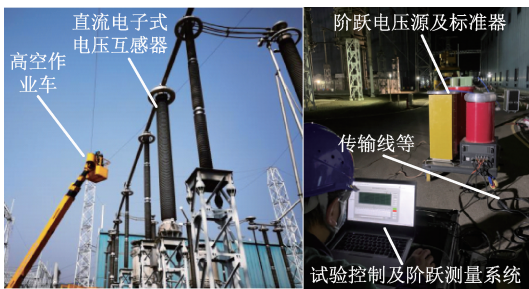


图 9 阶跃响应现场试验

Fig. 9 Step response field test wiring diagram

现场试验时,首先给暂态特性校验装置进行低压供电,当低压供电正常,然后开启高压供电,按照设置的试验电压给储能电容充电,根据提前预设的脉宽持续时间,通过驱动信号控制 IGBT 开关组件的导通与关断,此时脉冲回路放电至被试品和标准器一次侧高压端,同时阶跃响应测量系统接收标准器信号和换流站保护小室中合并单元通过光纤引出的 FT3 数字量,最终完成阶跃电压波形的展示和指标参数计算分析。直流电子式电压互感器现场阶跃响应试验波形如图 10 所示。

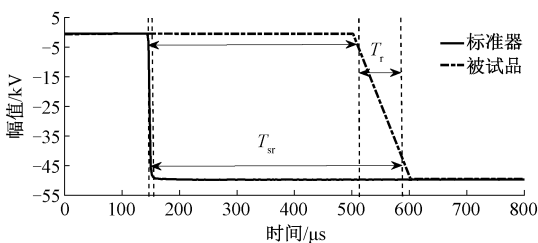


图 10 阶跃电压为 -50 kV 波形

Fig. 10 Waveform diagram with step voltage of -50 kV

现场进行直流电子式电压互感器阶跃响应试验的结果如表 1 所示。

表 1 阶跃响应试验结果

Table 1 Step response test results

阶跃电压源标准输出指标参数		被试品阶跃响应指标测试结果	
下降时间 $T_r/\mu\text{s}$	4.0	下降时间 $T_r/\mu\text{s}$	80
脉宽长度/ms	5	阶跃响应时间 $T_{sr}/\mu\text{s}$	428
过冲/%	0.2	超调/%	0.2
趋稳时间/ μs	≤ 100	趋稳时间/ μs	428

由表 1 可以看出,直流电子式电压互感器的阶跃上升时间 T_r (阶跃值 10% 到阶跃值 90% 的时间)为 80 μs ,阶跃响应时间 T_{sr} 为 428 μs ,小于额定阶跃响应时间 500 μs ,试验结果表明直流电子式电压互感器阶跃响应特性符合设计指标。

4 结 论

本文研究了直流分压器和低通滤波器对直流电子式电压互感器暂态转变特性的影响,详细分析了阶跃响应技术参数及其试验装置性能指标要求,在此基础上,提出了一种直流电子式电压互感器阶跃响应特性现场试验技术,得出如下结论。

1) 分段研究了直流电子式电压互感器整个传输链路的幅频和延时特性,理论分析了分压器、低通滤波器等被动元件等值参数变化直流电压互感器暂态特性的影响。

2) 研制出基于固态开关的阶跃电压源,实现了陡上升、长脉宽的方波电压信号输出,其额定阶跃电压幅值 ≥ 50 kV,上升时间 ≤ 10 μs ,脉宽持续时间 ≥ 5 ms,满足常规直流输电和柔性直流输电用直流电压互感器阶跃响应试验技术要求。

3) 采用本文提出的试验方法及研制的装置,在 ± 500 kV 直流工程换流站中开展了直流电子式电压互感器现场阶跃响应试验,并对阶跃响应关键参数进行了测量,阶跃响应时间 T_{sr} 为 428 μs ,上升时间 T_r 为 80 μs 。通过此次直流电子式电压互感器现场阶跃响应试验,验证了整体试验方案的可行性和暂态特性试验技术,表明已具备开展直流电压互感器暂态特性现场试验和相关指标分析能力。下一步将在柔性直流工程换流站中开展直流电压互感器暂态阶跃特性试验。

参考文献

- [1] 陈继开, 窦延辉, 李国庆, 等. 交流暂态故障对柔性直流系统影响的评判研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(12): 3129-3136.

- CHEN J K, DOU Y H, LI G Q, et al. Operating state evaluation for MMC-HVDC system under AC transient faults[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(12): 3129-3136.
- [2] 周力任, 朱力, 耿骥. 高分辨率连续可调的直流电流比例变换装置[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(6): 46-54.
- ZHOU L R, ZHU L, GENG J. Continuous adjustable direct current ratio conversion device characterized by high resolution [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(6): 46-54.
- [3] 邸志刚, 贾春荣, 王文轅, 等. 一种用于小电流测量的电子式电流互感器传感头研究与设计[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(S1): 334-336.
- DI ZH G, JIA CH R, WANG W Y, et al. Research and design of sensor head of electronic current transformer for low amplitude current measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(S1): 334-336.
- [4] 张鹏, 王玮, 徐丙垠, 等. 模拟光电式电流互感器的频率特性分析[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 42-49.
- ZHANG P, WANG W, XU B Y, et al. Analysis of frequency characteristics of analog photoelectric current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 42-49.
- [5] 朱梦梦, 王登, 廖耀华, 等. 直流电子式电压互感器延时特性分析与现场测试[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 126-132.
- ZHU M M, WANG D, LIAO Y H, et al. Field test and analysis of delay characteristics of a DC electronic voltage transformer[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 126-132.
- [6] 陕华平. ± 500 kV 龙泉换流站极 I 极母线直流分压器故障导致直流系统闭锁原因分析[J]. 华中电力, 2012, 23(2): 42-44.
- SHAN H P. Analysis on DC system blocking caused by pole I pole busbar DC voltage divider fault of ± 500 kV Longquan converter station[J]. Central China Electrical Power, 2012, 23(2): 42-44.
- [7] 李登云, 雷民, 熊前柱, 等. 数字量输出型直流电压互感器的误差特性分析[J]. 现代电子技术, 2018, 41(1): 119-123.
- LI D Y, LEI M, XIONG Q ZH, et al. Error characteristic analysis of digital output type DC voltage transformer[J]. Modern Electronics Technique, 2018, 41(1): 119-123.
- [8] 王冰, 张杰, 钟和清, 等. 柔性直流输电用直流电压测量装置暂态响应试验研究与装置研制[J]. 高压技术, 2020, 46(11): 3830-3836.
- WANG B, ZHANG J, ZHONG H Q, et al. Study and development of transient response test system of DC voltage measuring device for VSC-HVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3830-3836.
- [9] 张平, 杨朋威, 汤汉松, 等. 直流电压测量装置暂态阶跃响应性能现场测试技术[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 143-149.
- ZHANG P, YANG P W, TANG H S, et al. Field test technology of the transient step response features of a DC voltage measuring device[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 143-149.
- [10] 邱进, 冯宇, 汪洋, 等. 特高压直流电流测量装置阶跃响应特性校验系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 141-147.
- QIU J, FENG Y, WANG Y, et al. Study on a step response characteristic calibration system of a UHVDC current measurement device [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 141-147.
- [11] 庞福滨, 刘琦, 嵇建飞, 等. 直流输电工程直流电流互感器现场暂态校验技术[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 179-187.
- PANG F B, LIU Y, JI J F, et al. On-site transient performance calibration of DC current transformer for HVDC transmission project[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 179-187.
- [12] 滕予非, 汤涌, 汪晓华, 等. 特高压直流输电工程直流分压器动态特性及其引起的误闭锁机理研究[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2646-1653.
- TENG Y F, TANG Y, WANG X H, et al. Mechanism analysis of error block caused by dynamic characteristics of DC voltage divider in UHVDC [J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2646-1653.
- [13] 国家市场监督管理总局. 高压直流输电系统直流电压测量装置: GB/T 26217—2019[S]. 2019.
- State Administration for Market Regulation. DC voltage measuring device for HVDC transmission system: GB/T

26217—2019[S]. 2019.

- [14] 国家市场监督管理总局. 互感器 第 15 部分:直流电压互感器的补充技术要求: GB/T 20840.15—2022[S]. 2022.

State Administration for Market Regulation. Instrument transformers-part 15: addition requirements for voltage transformers for DC applications: GB/T 20840.15—2022[S]. 2022.

- [15] 王冬冬. 大功率固态开关在脉冲功率应用中的特性研究[D]. 上海: 复旦大学, 2011.

WANG D D. Characteristic analysis of high power solid state switches in pulsed power applications [D]. Shanghai: Fudan University, 2011.

- [16] 王凌云, 王传伟, 李洪涛, 等. 500 kV 固态 Marx 发生器 IGBT 多路驱动高压隔离供电电源的设计[J]. 高电压技术, 2012, 38(1): 236-240.

WANG L Y, WANG CH W, LI H T, et al. Design of 500 kV solid-state Marx generator IGBT driver voltage multi-channel insulated power supply[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(1):236-240.

- [17] 国家能源局. 直流输电用直流电压互感器暂态试验导则: DL/T 2184—2020[S]. 2020.

National Energy Administration. Test guide for transient behaviour of DC voltage transformers for DC transmission system: DL/T 2184—2020[S]. 2020.

作者简介



状态评估技术。

E-mail: 396923800@qq.com

Zhu Mengmeng (Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree, and Ph. D. degree all from Kunming University of Science and Technology in 2010, 2013, and 2023, respectively. He is currently a senior engineer at the Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd.. His main research interests include on-site detection and status assessment technology for AC and DC transformers.



何兆磊, 2012 年于武汉理工大学获得学士学位, 现为云南电网有限责任公司计量中心高级工程师, 主要研究方向为电能计量技术。

E-mail: archer_hzl@126.com

He Zhaolei received his B. Sc. degree from Wuhan University of Science and Technology in 2012. He is currently a senior engineer at the Measurement Center of Yunnan Power Grid Co., Ltd.. His main research interest is electricity metering technology.