

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200805

直流电压测量装置暂态阶跃响应性能现场测试技术

张平¹, 杨朋威¹, 汤汉松², 刘卫明¹, 陈肖璐¹, 杜智超¹

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司电力科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010000;

2. 江苏凌创电气自动化股份有限公司, 江苏 镇江 212009)

摘要: 为提高特高压直流输电工程的安全性, 针对目前换流站内运行的电压测量装置缺乏有效的暂态特性检测手段的问题, 研究了一种适用于直流电压测量装置的暂态阶跃响应现场测试技术。分析了直流电压测量时阶跃过冲电压及响应延时的产生机理, 提出了一种基于低电压分段测试的暂态阶跃响应现场测试方法。采用交直流电压叠加测试实现暂态阶跃过冲电压测试, 通过二次系统暂态阶跃测试、广义多项式曲线拟合及三次样条插值实现阶跃响应延时测试。在现场搭建测试系统对直流电压测量装置进行检测, 结果表明, 该测试技术可满足现场暂态阶跃响应检测的需求。

关键词: 直流电压测量装置; 暂态阶跃响应; 低电压分段测试; 交直流电压叠加; 暂态阶跃测试

Field test technology of the transient step response features of a DC voltage measuring device

ZHANG Ping¹, YANG Pengwei¹, TANG Hansong², LIU Weiming¹, CHEN Xiaolu¹, DU Zhichao¹

(1. Electric Power Research Institute of State Grid East Inner Mongolia Electric Power Company Limited, Hohhot 010000, China; 2. Jiangsu LingChuang Electric Automation Co., Ltd., Zhenjiang 212009, China)

Abstract: The voltage measuring devices running in a converter station can lack the means to detect an effective transient characteristic. To improve the security of a UHVDC transmission project, this paper researches a field test technology of transient step response suitable for a DC voltage measurement device. It analyses the generation mechanism of step overshoot voltage and response delay in DC voltage measurement, and proposes a field test method of transient step response based on a low voltage subsection test. It uses AC and DC voltage superposition to realize the test for transient step overshoot voltage, realizes the step response delay test through a transient step test, generalized polynomial curve fitting and cubic spline interpolation. It builds a system to test the device on site, and the results show that the test technology can meet the needs of the field detection for transient step response.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51707090) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China “Key Technologies Research and Application of On-site Test and Operation and Maintenance Optimization of UHVDC Control and Protection System” (No. 5210EF180013).

Key words: DC voltage measuring device; transient step response; stepwise low voltage test; superposition of AC and DC voltages; transient step test

0 引言

由于具有传输距离远、输送功率大和调节速度快等优点, 特高压直流输电工程已经成为我国特高压电网的重要组成部分, 在西电东送、能源优化等

方面发挥的作用日益显著^[1-7]。

直流电压测量装置是特高压直流输电工程的关键设备之一, 其暂态、稳态性能直接关系到特高压直流输电工程的运行安全^[8-13]。近几年, 多次发生由于直流电压测量装置暂态阶跃响应时间过长、暂态阶跃过冲二次侧击穿等原因导致的直流输电工程闭锁的故障^[14]。

目前, 已经有大量文献对直流电压测量装置的现场校准试验技术和传变特性进行了研究^[15-16]。文

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51707090); 国家电网公司科技项目“特高压直流控制保护系统现场测试及运维优化关键技术研究与应用”(5210EF180013)

献[17-18]分别介绍了±500 kV、±800 kV直流电压互感器的现场校准技术。文献[19]在研究分压比不确定性的基础上通过构建一种基于试验测量的直流分压器校准分析计算模型。文献[20]分析了直流分压器阶跃响应动态性能,研究了二次分压板拓扑结构以及低通滤波器截止频率对直流分压器传变特性的影响。文献[21]指出正常情况下直流分压器的暂态阶跃性能优越,在直流系统一次回路充电瞬间,直流分压器二次侧可以及时响应,且进一步研究了直流分压器二次侧回路击穿后的暂态响应过程。文献[22]指出采用阻容分压原理的直流分压器拥有良好的幅频特性。

但是,由于高电压暂态阶跃源以及暂态阶跃响应特性测试标准的缺失,直流电压测量装置暂态阶跃响应特性的相关测试,尤其是现场测试工作一直未能有效开展,且直流电压阶跃时的过冲电压是一个瞬时过程,测试时尖峰很难被捕捉。针对此,本文在直流电压测量装置暂态特性的理论分析基础上,建立了一套直流电压测量装置的暂态仿真系统,分析了直流电压测量装置暂态特性的相关影响因素及其影响程度。同时,提出了一种基于分段测试的直流电压测量装置的暂态阶跃响应特性测试技术,并对工程现场的直流电压测量装置进行了暂态阶跃响应特性测试试验。

1 直流电压测量装置结构与延时组成

目前高压直流电压测量装置基本都是采用阻容分压原理^[23],其结构如图1所示。

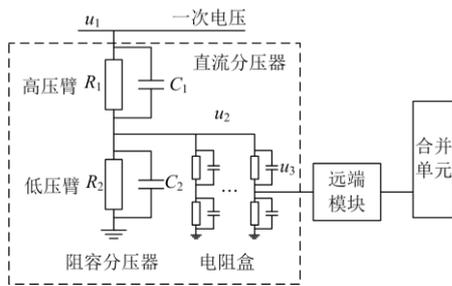


图1 直流电压测量装置原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of DC voltage measuring device

如图1所示,直流电压测量装置主要由直流分压器、远端模块以及合并单元几部分组成。其中,直流分压器中的阻容分压器由高压臂和低压臂两部分组成,其利用基于等电位屏蔽技术的精密电阻分压器传感直流电压,利用并联电容分压器均压并保证频率特性。高压臂由多节模块化的阻容单元串联而成,根据所测量的电压等级设计串联级数;低压臂额定二次输出电压为50 V。

直流分压器中的电阻盒实际上是一个低压分压板,分压板将分压器输出的低压信号转换为多路信号给多个远端模块进行处理。

远端模块接收电阻盒的输出信号,并进行信号调理滤波、模数转换等处理后,输出串行数字光信号。合并单元接收并处理远端模块下发的数据,并将测量数据进行多路同步程序调度后按规定的协议传输以供二次设备使用。

因此,直流电压测量装置的各个组成部分对一次电压信号的转换和处理时间构成了整个直流电压测量装置的延时,如图2所示。

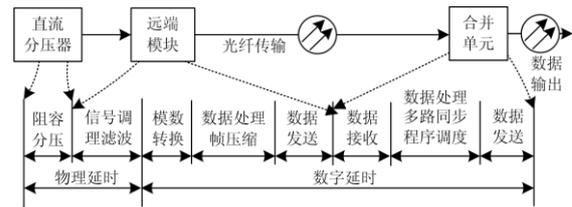


图2 直流电压测量装置的测量延时构成

Fig. 2 Composition of time delay of the DC voltage measuring device

从图2中可以看出,直流电压测量装置的测量延时是由模拟电压(直流分压)、采集单元(信号调理滤波、模数转换、数据处理帧压缩、数据发送)、光纤传输、合并单元(数据接收、数据处理多路同步程序、数据发送)几个环节共同构成。其中,直流分压与远端模块的信号调理滤波所带来的延时共同构成了直流电压测量装置的物理延时。进入模数转换后的延时与信号本身无关,而是由数字测量系统本身的采样速率、处理方式、传输环节等共同决定。

2 暂态阶跃响应性能分析

从图2可知,直流电压测量装置的数字延时环节不仅与信号本身无关,也不会带来暂态阶跃响应过冲现象。因此,本文主要针对直流电压测量装置的物理延时环节的暂态阶跃响应性能进行分析。

2.1 直流分压器暂态阶跃响应性能分析

为了减少杂散参数对RC电路结构的影响,实际应用中高压臂是由多节模块化阻容单元串联而成,图1所示电路为多节模块化阻容单元串联的等效电路图,阻容分压器的分压比为

$$\beta = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{R_1(1 + j\omega R_2 C_2) + R_2(1 + j\omega R_1 C_1)}{R_2(1 + j\omega R_1 C_1)} \quad (1)$$

式中: $u_1(t)$ 为所测量的一次电压; $u_2(t)$ 为阻容分压器低压臂输出电压; R_1 、 C_1 分别为阻容分压器高压臂等效电阻和等效电容; R_2 、 C_2 分别为阻容分压

器低压臂等效电阻和等效电容; ω 为一次电压的角频率。

从式(1)可知, 当一次电压为直流, 即 $\omega = 0$ 时, 可以得到阻容分压器的直流电压分压比为

$$\beta_{DC} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (2)$$

当一次电压的角频率足够大时, 可以得到阻容分压器的高频分压比为

$$\beta_{HF} \approx \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可知, 直流电压的测量主要是通过阻容分压器的电阻部分实现的, 而高频信号的测量则是通过阻容分压器的电容部分实现的。

当被测一次电压为阶跃信号, 即 $u_1(t) = U_1 \varepsilon(t)$ 时, 可以得到阻容分压器的阶跃响应信号为

$$u_2(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_1 \varepsilon(t) + U_2(0_+) e^{-t/\tau_1} \quad (4)$$

式中: U_1 为一次电压阶跃值; $\varepsilon(t)$ 为单位脉冲函数; $\tau_1 = R_2 C_2$ 是阻容分压器低压臂时间常数; $U_2(0_+)$ 为暂态阶跃响应初始电压。

$$U_2(0_+) = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_1 - \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_1 = \frac{R_1 C_1 - R_2 C_2}{(C_1 + C_2)(R_1 + R_2)} U_1 \quad (5)$$

根据式(5)可知, 当阻容分压器高、低压臂阻容回路时间常数一致, 即 $R_1 C_1 = R_2 C_2$ 时, $U_2(0_+) = 0$, 阻容分压器具有理想的暂态阶跃跟随特性。

如图 1 所示, 电阻盒是由多个与阻容分压器结构相同的分压回路组成。因此, 为了保证整个直流分压器具有理想的阶跃跟随特性, 设计上应保证电阻盒内部高、低压回路、电阻盒等效输入电阻和电容回路以及阻容分压器高、低压臂等阻容时间常数相等。

在直流分压器的实际运行过程中, 电阻盒和阻容分压器低压臂的阻容时间常数一般不会发生变化。但是, 受杂散电容的影响, 阻容分压器高压臂的电容值会发生变化, 进而使得其阻容时间常数发生变化, 导致直流分压器的暂态阶跃响应不是一个理想的阶跃跟随过程, 而可能出现暂态阶跃响应的过冲现象。

利用 Matlab/Simulink 软件搭建了直流分压器的仿真模型, 直流分压器按照某工程实际参数设置, 其低压臂额定输出为 50 V, 阻容分压器高压臂电阻值为 $100 \times 10^6 \Omega$ 、电容值 $1 \times 10^{-6} \mu\text{F}$, 低压臂电阻值为 $33.3 \times 10^3 \Omega$ 、电容值 $3 \times 10^{-3} \mu\text{F}$, 高、低压臂和电

阻盒的阻容时间常数均为 $100 \mu\text{s}$ 。

分别针对阻容分压器各参数未发生变化、高压臂电容参数变化和低压臂电容参数变化等 3 种情况下直流分压器的暂态电压阶跃响应性能进行了仿真, 仿真波形如图 3 所示。

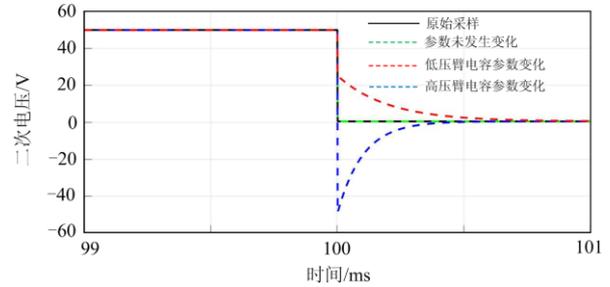


图 3 直流分压器的暂态阶跃响应仿真结果

Fig. 3 Simulation results of the transient step response of DC voltage divider

从图 3 中可以看出, 阻容分压器高、低压臂时间常数一致时, 直流分压器具有完好的暂态阶跃特性, 不存在过冲电压和响应延时。当高、低压臂时间常数不一致时, 则会出现暂态阶跃响应初始电压和响应延时。其中, 暂态阶跃响应初始电压由电容分压比来决定, 响应延时由阻容分压器低压臂的时间常数决定。尤其是当阻容分压器高压臂电容受杂散电容影响增大时, 直流分压器会出现暂态阶跃响应的过冲现象, 过冲电压将严重影响直流电压测量装置二次系统的安全, 甚至导致直流输电工程的误闭锁。

2.2 远端模块暂态阶跃响应性能分析

远端模块负责对电阻盒输出的小电压信号进行信号调理, 完成模数转换, 并将数字信号编码后发送, 系统架构如图 4 所示。

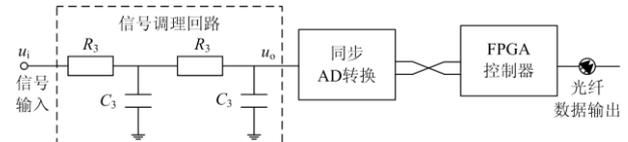


图 4 远端模块系统架构图

Fig. 4 Architecture of remote-terminal module

如图 4 所示, 远端模块中的信号调理回路负责对信号进行滤波处理, 一般采用二阶无源滤波设计。二阶无源滤波器中的阻容参数完全一致时, 其对于阶跃响应的等效回路是一阶 RC 系统。一阶 RC 系统的等效电阻记为 $R_{eq} = 2R_3$, 等效电容记为 $C_{eq} = 2C_3$ 。

根据基尔霍夫电压定律, 得到信号调理回路的输入电压 $u_1(t)$ 、输出电压之间的 $u_0(t)$ 表达式为

$$u_i(t) = R_{eq} C_{eq} \frac{du_o(t)}{dt} + u_o(t) \quad (6)$$

根据式(6)可解得信号调理回路输出电压 $u_o(t)$ 的阶跃响应公式。

$$u_o(t) = (1 - e^{-t/\tau_2}) U_i \varepsilon(t) \quad (7)$$

式中: U_i 为输入电压阶跃值; $\tau_2 = R_{eq} C_{eq} = 4R_3 C_3$ 是信号调理回路的时间常数。

同样利用 Matlab/Simulink 软件搭建了图 4 所示的信号调理回路的仿真模型, 其截止频率为 3 kHz, R_3 为 $2.4 \times 10^3 \Omega$, C_3 为 $2.2 \times 10^{-3} \mu\text{F}$ 。信号调理回路的暂态阶跃响应仿真波形如图 5 所示。

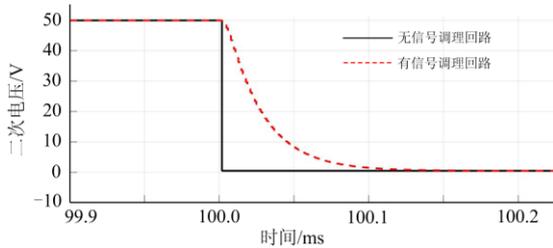


图 5 信号调理回路暂态阶跃响应仿真结果

Fig. 5 Simulation result of the transient step response of the signal conditioning circuit

从图 5 可以看出, 信号调理回路暂态阶跃响应不存在过冲电压, 但是存在较大的延时。实际上, 信号调理回路的暂态阶跃响应延时与其截止频率密切相关。当信号调理回路的截止频率较低时, 直流电压测量装置的暂态阶跃响应延时就会被拉长, 有可能会致直流输电工程的误闭锁。

3 直流电压测量装置暂态阶跃响应性能现场测试技术

通过前文的分析可以看出, 现场运行过程直流电压测量装置的暂态阶跃响应受杂散电容以及信号调理回路的影响均较大。但由于高压直流电压暂态阶跃源的缺乏, 直流电压测量装置暂态阶跃响应性能的现场测试工作一直无法有效开展, 导致无法及时发现长期运行后直流电压测量装置的性能变化, 给直流输电工程的安全运行带来了隐患。

针对此, 本文提出一种基于低电压分段测试的直流电压测量装置暂态阶跃响应测试系统。该系统由交直流叠加测试、二次系统电压暂态阶跃测试两大功能组成。其中, 交直流叠加测试主要通过测试直流分压器交直流稳态变比差利用公式计算出直流分压器的暂态阶跃响应过冲尖峰电压值, 二次系统电压暂态阶跃响应测试则主要测试直流电压测量装置的暂态阶跃响应延时。

3.1 交直流叠加测试

根据上文分析可知, 影响直流分压器的暂态阶跃过冲电压的主要因素为杂散电容对于高压臂电容值的改变, 其电压波形为一个尖峰波, 直接的暂态阶跃测试是难以测到直流分压器的暂态阶跃电压响应峰值。在工程实际应用中 $C_2 \gg C_1$, 可以根据式(5)和式(1)得出电压阶跃响应时阶跃响应过冲峰值与阶跃响应电压的百分比为

$$\varepsilon\% = \frac{\beta_{DC} U_2(0_+)}{U_1} = \frac{R_1 C_1 - R_2 C_2}{(C_1 + C_2) R_2} \approx \frac{R_1 C_1}{C_2 R_2} - 1 \quad (8)$$

直流分压器衰减时间常数设计值 $R_1 C_1 = R_2 C_2 = 10^{-4}$, 所以仅需要测得 $R_1 C_1$ 的变化值即可获得阶跃响应过冲峰值与阶跃响应电压的百分比 $\varepsilon\%$ 值。

因此本文采用交直流叠加的稳态测试来代替暂态阶跃测试, 测试得到相关的参数后间接计算得到暂态阶跃响应初始电压。搭建的阻容分压器测试系统如图 6 所示。

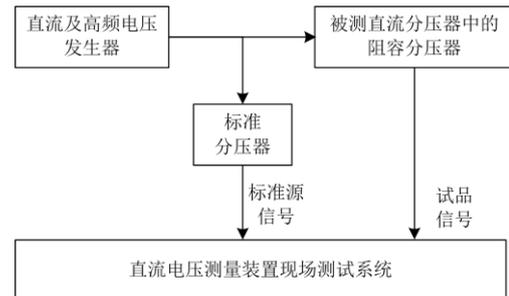


图 6 直流分压器交直流叠加稳态测试示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the AC and DC voltages superposition test of DC voltage divider

如图 6 所示, 测试时直流及高频电压发生器施加 300~1 000 V 的交直流叠加的电压信号, 分别通过标准分压器以及被测直流分压器转为小电压信号被直流电压测量装置现场测试系统采集。标准源信号及试品信号经过高精度模数转化后形成离散化的数字量, 并采取交直流提取算法独立并行处理的算法, 从离散采样值中高精度提取出测试所需的交直流分量。

对于标准源信号和试品信号中交流分量的提取, 取 200 ms 时间窗数据, 首先进行基波频率的跟踪。测得交流分量的频率后进行加 Hanning 窗处理, 对加窗序列进行傅氏变换, 即可获取交流分量的幅值及相位。

对于标准源信号和试品信号中直流分量的提取, 取交流 10 周波时间窗数据, 采取广义多项式拟合用来计算直流分量幅值, 以消除谐波信号及白噪声的影响。

根据标准源信号和试品信号的交直流分量计算结果, 可以分别计算出阻容分压器的直流分压误差 σ_1 和交流分压误差 σ_2 。

在工程实际应用中 $R_1 \gg R_2$ 、 $C_2 \gg C_1$, 所以可将式(1)、式(2)、简化为

$$\beta = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} \approx \frac{R_1(1+j\omega R_2 C_2)}{R_2(1+j\omega R_1 C_1)} \quad (9)$$

$$\beta_{DC} \approx \frac{R_1}{R_2} \quad (10)$$

再根据其实际测量误差可得

$$\frac{1+\sigma_2}{1+\sigma_1} \frac{\beta}{\beta_{DC}} \approx \frac{(1+j\omega R_2 C_2)}{(1+j\omega R_1 C_1)} = \frac{(1+j\omega 10^{-4})}{(1+j\omega R_1 C_1)} \quad (11)$$

将计算得出 $R_1 C_1$ 的值代入式(8), 最终获得阶跃响应过冲峰值与阶跃响应电压的百分比 $\varepsilon\%$ 值完成测试。

3.2 二次系统暂态阶跃延时测试方法

如图7所示, 二次系统电压暂态阶跃延时的测试过程是通过低电压直流电压暂态阶跃源施加直流电压阶跃信号至电阻盒输入侧, 以测试直流电压测量装置中电阻盒和远端模块等二次系统的零状态阶跃响应特性, 并对阶跃响应波形进行数值分析, 提取出延时时间信息。

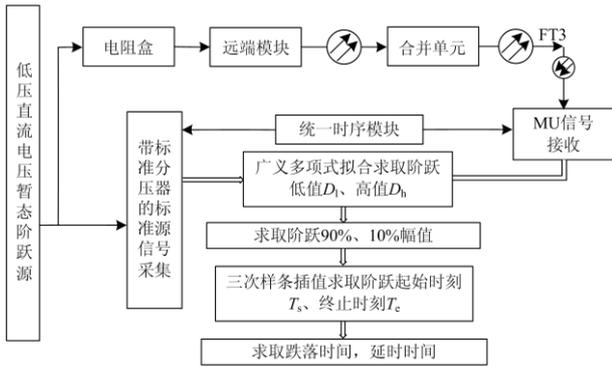


图7 二次系统电压暂态阶跃响应延时测试方法

Fig. 7 Test method of the transient voltage step response time delay of the secondary system

如图7所示, 二次系统电压暂态阶跃延时测试方法采用广义多项式拟合用来计算二次系统输出的阶跃低值 D_l 和阶跃高值 D_h , 以消除掉低值时的噪声误差, 以及阶跃初期的过冲波动对阶跃高值的影响, 为阶跃幅值计算以及后续的10%及90%幅值计算提供精确依据。

经过曲线拟合后, 基于拟合曲线求取阶跃高值 D_h 与低值 D_l , 进而可以求取阶跃10%对应的幅值为 $D_{10\%} = D_l + 0.1 \times (D_h - D_l)$, 阶跃90%对应的幅值为 $D_{90\%} = D_l + 0.9 \times (D_h - D_l)$ 。

标准源采用1 MHz采样率, 无需进行采样插值处理直接记录 $D_{10\%}$ 与 $D_{90\%}$ 对应的阶跃起始时刻 T_{s1} 与阶跃终止时刻 T_{e1} 。

被测直流电压测量装置的采样速率为10~50 kHz, 阶跃过程采样点数很少。为了精确获得被测直流电压测量装置的阶跃起始时刻 T_{s2} 及终止时刻 T_{e2} , 需要对合并单元的采样值进行三次样条插值以提高计算精度。

由此可以结算得到被测直流电压测量装置的跌落时间差为 $T_{e2} - T_{s2}$, 延时时间为 $T_{s2} - T_{s1}$ 。

4 现场测试应用

按照所提出的直流电压测量装置暂态阶跃响应性能现场测试技术, 搭建了高压直流电压测量装置的暂态阶跃响应性能测试系统, 分别对直流分压器中的阻容分压器进行了交直流叠加测试, 对二次系统进行暂态电压阶跃测试。

交直流叠加测试结果如图8所示。

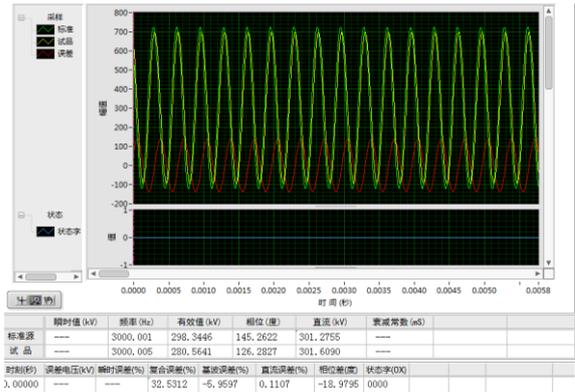


图8 交直流电压叠加测试结果

Fig. 8 AC and DC voltages superimposition test results

如图8所示, 采用300 V直流电压叠加300 V 3 kHz的交流电压进行交直流叠加测试, 此次测试的直流误差为-0.11%, 交流误差为-5.96%。表1给出了4次交直流电压测试的结果。将测试结果代入式(11)与式(8), 计算可得 $\varepsilon\%$, 即被测试品直流分压器的暂态过冲电压峰值为阶跃电压值的7.9%小于10%满足直流分压器的现场应用需求。

表1 交直流稳态测试结果

Table 1 AC and DC voltages superimposition test results

次数	1	2	3	4
直流误差/%	-0.11	-0.12	-0.07	-0.14
交流误差/%	-5.96	-5.93	-5.90	-6.02

二次系统电压暂态阶跃响应延时测试结果如图10所示, 此次测试的整体响应延时时间为317 μs ,

下降响应时间差为 195.9 μs，测试结果表明产品的阶跃响应时间特性满足整体响应延时小于 500 μs 下降响应时间差小于 250 μs 的标准要求。

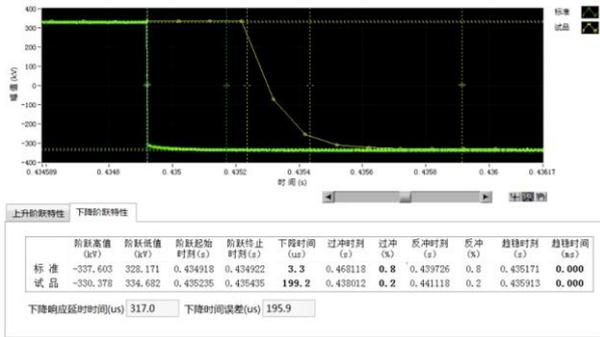


图 9 二次系统电压暂态阶跃响应延时测试结果

Fig. 9 Transient voltage step response time delay rest results of the secondary system

表 2 给出了 4 次二次系统电压暂态阶跃响应延时测试的结果。

表 2 二次系统电压暂态阶跃响应延时测试数据

Table 2 Transient voltage step response time delay rest results of the secondary system

次数	1	2	3	4
暂态响应延时/μs	317	321	319	318
跌落时间差/μs	196	199	197	197

对测试结果进行分析取平均值，计算出暂态阶跃的初始电压值以及二次系统电压暂态阶跃响应延时和跌落时间差，最终获得直流电压测量装置的完整暂态响应特性。

4 结论

直流电压测量装置暂态阶跃响应特性直接影响直流控保的安全性与可靠性，但高压暂态阶跃源的缺失使得直流电压测量装置的现场测试无法开展。通过对直流电压测量装置暂态阶跃响应特性的理论和仿真分析可知，影响其暂态阶跃响应特性的主要因素是直流分压器的暂态阶跃电压过冲以及信号调理回路的二次低通滤波所带来暂态阶跃响应延时，而阶跃过冲电压由于是一个近似理想阶跃过程，所以其尖峰电压快速衰减现场测试时基本不可能被捕捉。针对此，论文提出了一种直流电压测量装置的低电压分段现场测试方法。采用交直流电压叠加测试进行直流分压器的稳态测试，并利用交直流之间的变比差通过公式计算获得其阶跃过程的过冲电压值；采用二次系统电压暂态阶跃响应延时测试，并利用广义多项式曲线拟合以及三次样条插值技

术，实现暂态阶跃响应延时测试。通过开发的直流电压测量装置暂态阶跃响应性能现场测试系统，对工程现场的直流电压测量装置进行了测试，测试结果能够验证所提出的暂态阶跃响应性能测试方法的可行性。

参考文献

- [1] 何贤彪. 特高压直流输电技术现状以及我国的应用前景[J]. 通讯世界, 2018, 2: 216-217.
HE Xianbiao. Current situation of UHVDC transmission technology and its application prospect in China[J]. Telecom World, 2018, 2: 216-217.
- [2] 谢永涛, 李希哲, 傅康, 等. ±800 kV 特高压直流输电工程技术[J]. 西北水电, 2019, 175(2): 78-82.
XIE Yongtao, LI Xizhe, FU Kang, et al. ±800 kV UHVDC transmission engineering technology[J]. Northwest Water Power, 2019, 175(2): 78-82.
- [3] 李鹏, 李金忠, 崔博源, 等. 特高压交流输电装备最新技术发展[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1068-1078.
LI Peng, LI Jinzhong, CUI Boyuan, et al. Achievements in the newest technology of UHV AC power transmission equipment[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1068-1078.
- [4] 陈国平, 李明节, 许涛. 特高压交直流电网系统保护及其关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 2-10.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao. System protection and its key technologies of UHV AC and DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 2-10.
- [5] 彭吕斌, 何剑, 谢开贵, 等. 特高压交流和直流输电系统可靠性与经济性比较[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1098-1105.
PENG Lübin, HE Jian, XIE Kaigui, et al. Comparison of reliability and economy between UHVAC and UHVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1098-1105.
- [6] CASTRO L M, TOVAR-HERNANDEZ J H, GONZALEZ-CABRERA N, et al. Real-power economic dispatch of AC/DC power transmission systems comprising multiple VSC-HVDC equipment[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 107(5): 140-148.
- [7] 董存, 梁志峰, 礼晓飞, 等. 跨区特高压直流外送优化提升新能源消纳能力研究[J]. 中国电力, 2019, 52(4): 41-50.
DONG Cun, LIANG Zhifeng, LI Xiaofei, et al. Study on power optimization of the trans-regional UHVDC delivery channels in promoting renewable energy accommodation capacity[J]. Electric Power, 2019, 52(4): 41-50.
- [8] 裴昂, 吕思颖, 秦昕, 等. 特高压直流输电系统换流站故障过电压研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 149-154.

- PEI Chan, LÜ Siying, QIN Xin, et al. Study on fault overvoltage of converter station of UHVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 149-154.
- [9] 李俊霞, 严兵, 张爱玲, 等. 特高压直流双极区直流保护系统可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 130-136.
- LI Junxia, YAN Bing, ZHANG Ailing, et al. Reliability research for UHVDC bipolar area DC protection system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 130-136.
- [10] 索之闻, 陈启超, 李晖, 等. 混合直流输电系统送端交流暂态电压特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 125-132.
- SUO Zhiwen, CHEN Qichao, LI Hui, et al. Research on sending end AC transient voltage characteristics of hybrid HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 125-132.
- [11] 余达, 王红星, 卢启付, 等. 直流电子式电流互感器高频特性测试方案设计与验证[J]. 广东电力, 2020, 33(3): 72-78.
- YU Da, WANG Hongxing, LU Qifu, et al. Test and analysis of high frequency characteristics of DC ECT[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(3): 72-78.
- [12] 庞福滨, 刘玓, 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 Fubin, LIU Yu, JI Jianfei, 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.
- [13] LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. A review of the protection for the multiterminal VSC-HVDC grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 239-249. DOI: 10.1186/s41601-019-0136-2.
- [14] 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 Huaping. Analysis on DC system blocking caused 500 kV by pole I pole busbar DC voltage divider fault of kV Longquan converter station[J]. Central China Electrical Power, 2012, 23(2): 42-44.
- [15] 聂琪, 李登云, 胡浩亮, 等. 一种直流互感器暂态校验装置及校验算法设计[J]. 沈阳工业大学学报, 2020, 42(3): 264-269.
- NIE Qi, LI Dengyun, HU Haoliang, et al. Design of a transient calibration device and algorithm for DC transformer[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2020, 42(3): 264-269.
- [16] 张杰, 胡媛媛, 刘飞, 等. 高压直流互感器现场校验关键技术[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 3003-3010.
- ZHANG Jie, HU Yuanyuan, LIU Fei, et al. Critical technology of on-site calibration system for DC electronic instrument transformer[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 3003-3010.
- [17] 李前, 章述汉, 李登云, 等. ± 500 kV 直流电压互感器现场校准技术试验分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2856-2862.
- LI Qian, ZHANG Shuhan, LI Dengyun, et al. Experimental analysis of the on-site calibration technology for ± 500 kV DCPTs[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(11): 2856-2862.
- [18] 章述汉, 周一飞, 李登云, 等. ± 800 kV 换流站直流电压互感器现场校准试验[J]. 高电压技术, 2011, 37(9): 2119-2125.
- ZHANG Shuhan, ZHOU Yifei, LI Dengyun, et al. On-site calibration test of ± 800 kV converter station DC potential transformer[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9): 2119-2125.
- [19] 王奇, 谭炳源, 刘青松, 等. ± 800 kV 直流分压器校准分析计算模型研究与应用[J]. 高压电器, 2017, 53(12): 163-167.
- WANG Qi, TAN Bingyuan, LIU Qingsong, et al. Calibration model for ± 800 kV DC divider[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(12): 163-167.
- [20] 滕予非, 李小鹏, 焦在滨, 等. 高特高压直流分压器传变特性及其对电压突变量保护影响[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 122-130.
- TENG Xufei, LI Xiaopeng, JIAO Zaibin, et al. Analysis of the transfer characteristic of DC voltage divider in UHVDC system and its effects on undervoltage sensing protection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 122-130.
- [21] 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 Yufei, TANG Yong, WANG Xiaohua, 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.
- [22] SPERLING E, SCHEGNER P. A possibility of measure power quality with RC-divider[C] // 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, June 10-13, 2013, Stockholm, Switzerland: 1-4.
- [23] 高压直流输电系统直流电压测量装置: GB/T 26217—2010[S]. 2010.
-
- 收稿日期: 2020-07-08; 修回日期: 2020-09-18
- 作者简介:
- 张平(1989—), 男, 本科, 从事智能电网领域以及直流输电领域的研究工作; E-mail: 1206080308@qq.com
- 杨朋威(1987—), 男, 硕士研究生, 从事智能电网领域以及直流输电领域的研究工作; E-mail: 147704051@qq.com
- 汤汉松(1974—), 男, 本科, 从事智能电网领域以及电子式互感器领域研究工作。E-mail: xsunson@163.com
- (编辑 张爱琴)