

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180947

直流输电工程直流电流互感器现场暂态校验技术

庞福滨, 刘 琦, 嵇建飞, 卜强生, 张 弛

(国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要: 随着直流输电工程建设的不断推进, 直流电流互感器的现场校验技术逐渐成为直流输电领域的一大研究热点。针对目前直流电流互感器现场暂态性能校验技术的研究空白, 分析了现有直流电流互感器的工作原理及其现场校验方法, 研制了一套基于信号回采和预畸调节的便携式直流电流互感器现场暂态校验系统。该系统通过修正产生接近于仿真信号的阶跃大电流, 其 500 kHz 的高速发送和采集模块保障了暂态过程采样与波形还原的准确性。利用该测试系统, 在苏南 UPFC 工程实现了国内首次直流电流互感器的现场暂态性能试验。对极线和阀出口侧互感器的上升时间、最大过冲和暂态延时进行了测试, 试验结果为直流电流互感器的暂态性能评估提供了依据。该技术在直流电流互感器现场校验中具有重要的推广意义。

关键词: 直流电流互感器; 现场校验; 暂态性能; 信号回采; 预畸调节

On-site transient performance calibration of DC current transformer for HVDC transmission project

PANG Fubin, LIU Yu, JI Jianfei, BU Qiangsheng, ZHANG Chi

(State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: With the constantly development of High-Voltage Direct Current (HVDC) transmission system construction, the on-site calibration of DC current transformer has become the major research interest in HVDC transmission field. According to the research gap of the on-site transient performance calibration technology, the working principle of the existing DC current transformer and the on-site calibration method are analyzed. A set of portable transient performance calibration system for DC current transformer is devised based on signal resampling and pre-distorting adjustment. By revision, the system produces the large step current close to the simulation signal, and its 500 kHz high speed sending and collecting modules ensure the accuracy of the sampling and waveform restoring during the transient process. Furthermore, the first on-site transient performance test of the pole and converter valve DC current transformers has been carried out with the system in Sunan UPFC Project. The rising time, maximum overshoot and the transient delay of the pole and converter valve transformers are tested, and the results provide the basis for the evaluation of the DC current transformers. The technology has a good application prospect for the on-site DC current transformer calibration.

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

Key words: DC current transformer; on-site calibration; transient performance; signal resampling; pre-distorting adjustment

0 引言

近年来, 直流输电工程凭借其在高电压等级、远距离、大功率电能传输方面的经济性和控制灵活

性, 已经成为跨区域输电的重要手段^[1-3]。截止到2016年, 国内已经有在建及在运的直流换流站超过30座, 构成了我国超高压及特高压输电网络的重要枢纽^[4]。直流电流互感器作为直流输电工程中不可或缺的一次设备, 承担着直流系统的控制保护及运行状态监测等重任, 其现场校验技术也日益受到关注。由于缺少相关的校验技术设备, 直流电流互感器一般不进行现场校准试验, 这给换流站的稳定可

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51707090); 国家电网有限公司科技项目资助“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”

靠运行埋下了安全隐患。在已投运的直流换流站中，出现了多起由于互感器暂态特性不一致、极性安装错误等原因引起的保护闭锁甚至误动作事件^[5-8]，而这些问题均可以通过开展直流电流互感器的现场校验进行发现和整改。

针对直流电流互感器现场校验问题，国内外的专家和学者开展了广泛的研究。文献[9]研制了一套包含直流电流比较标准、5 000 A 高稳定度直流电流源和 GPS 无线同步数据采集系统的现场校准系统，利用该系统对向家坝—上海直流输电工程中的光电流互感器进行了现场校准，结果表明在额定电流 20% 以上时，被测互感器的误差小于 0.3%，满足规范的要求。针对直流电子式电流互感器在现场校准中遇到的数字化同步和抗干扰问题，文献[10]设计了含有光纤同步和具备现场抗干扰能力的磁调制式直流电流比较仪，并对校准系统的性能和不确定度进行了分析计算。文献[11]对测差法、双表法、异地测量等多种直流电流互感器的现场试验方法的优缺点进行了对比，给出了直流互感器的评价体系。文献[12]提出了一种采用高精度商用标准器构建而成的直流电流互感器校验系统，其直流电流的动态测试范围不小于 2 000 A；在实验室环境下，对±900 A 以内变化电流的校验准确度优于 2×10^{-5} 。文献[13]研制了基于法拉第磁光效应的光学直流电流互感器，并对其进行了现场校准试验，重点考察了其在长时间运行、-15℃~27℃ 宽温度动态范围内的稳定性进行了测试，结果表明其准确度满足日本电器学会 JEC-1201 中 1PS 等级的要求。

虽然目前对直流电流互感器现场校验的研究已经取得了一定的成果，但这些研究成果多围绕其稳态准确度校准来开展。随着直流电流互感器应用的不断推广，不同原理的电流互感器可能会用于同一元件的差动保护，这对其暂态特性提出了较高的要求^[14]。国家电网公司明确规定了直流电子式互感器暂态特性应有的性能指标^[15]，但现有暂态特性试验设备体积大且较为笨重，多在实验室环境下使用，不便于运输和开展现场试验^[16]。由于缺少相关试验设备，直流电流互感器的现场暂态特性试验一直未能有效开展。为此，本文研制了一套基于信号回采和预畸调节的便携式直流电流互感器现场暂态校验系统，利用该系统对苏南 UPFC 工程中极线和阀出口侧的直流电流互感器开展了现场暂态特性试验，试验结果为评估直流电流互感器的暂态性能提供了数据依据。

1 直流电流互感器原理及现场校验方法

1.1 直流电流互感器基本原理

根据工作原理，直流电流互感器可以分为零磁通型和光电型两种^[17]。零磁通型直流电流互感器基于磁通势平衡原理，其测量结构由直流场或阀厅的一次传感头部分和控制室内的二次反馈调节控制部分组成：一次传感头部分通过原绕组上电流产生的磁通势与副绕组的反馈电流产生的反磁势建立接近相等的磁通平衡，但两者之间仍有较小的差动磁势；二次反馈调节控制部分则根据这一磁通势的不平衡来调节副绕组的输入电流，从而构成具有深度负反馈的闭环系统。因此，零磁通型直流电流互感器具有准确度高的优点，但由于其高压绝缘难度大^[18]，一般只用于 200 kV 以下的电压等级，多用于换流站中性线上或地极引线的直流电流测量。

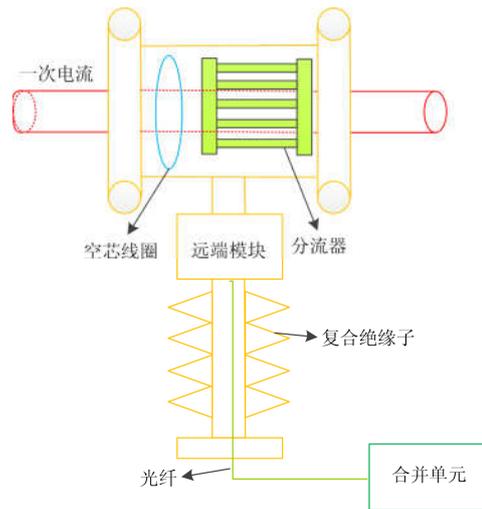


图 1 有源式直流电流互感器结构图

Fig. 1 Layout diagram of active DC current transformer

光电型直流电流互感器采用光纤实现数据的传输，提升了测量系统的抗干扰能力，同时具有绝缘简单、无饱和谐振等优势^[19]，在高电压等级的直流输电工程中得到了广泛应用。根据其传感头有无电源，可以分为有源式直流电流互感器和无源式直流电流互感器。有源式直流电流互感器的结构如图 1 所示，其一次传感头包括分流器和空芯线圈，分流器用来传感直流电流，空芯线圈用来传感谐波电流，采用激光供电的远端模块在就地采集分流器及空芯线圈的输出信号并通过光纤传输给控制室内的合并单元。有源式直流电流互感器融合了分流技术和光纤通信技术，解决了高低压之间的绝缘问题和电磁干扰问题，是直流输电系统中应用最多的技术方案。

无源式直流电流互感器普遍采用法拉第磁光效应原理^[20], 其中典型代表为直流全光纤电流互感器, 其工作原理如图 2 所示。光源发出的光经过耦合器后, 进入起偏器变成线偏振光。线偏振光经过偏振分光后在 X 轴和 Y 轴形成相互垂直的线性偏振光, 两线偏振光经过相位调制和传输光纤后仍是正交的, 再通过波片后分别转变为左旋和右旋的圆偏振光。在一次电流磁场的作用下, 两个圆偏振光产生正比于电流的相位差, 并在反射镜处反射后原路返回, 两者的偏振态互换, 左旋光变为右旋光, 右旋光变为左旋光, 再次经历磁场的法拉第磁光效应, 两圆偏振光产生的相位差加倍($\Delta\varphi = 4VNI$, $\Delta\varphi$ 为相移, V 为光纤的维尔德常数, N 为光纤的传感环圈数, I 为一次电流的大小), 经过波片后又变为线偏振光, 实现偏振方向的互换。带有电流信息的光强信号经过耦合器输出到达解调电子电路, 最终计算出被测电流。

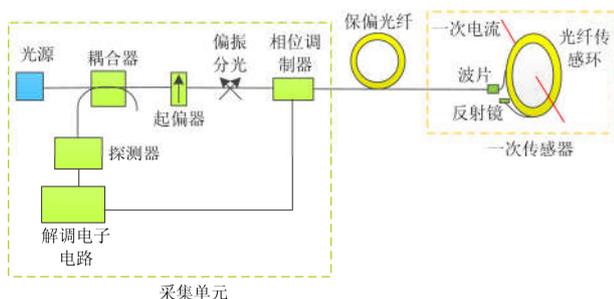


图 2 直流全光纤电流互感器原理

Fig. 2 Principle of DC fiber optical current transformer

1.2 直流电流互感器现场校验方法

目前, 对直流电流互感器的校验一般采用直流电流源施加一次电流, 通过对比标准源侧与被校互感器侧输出的方法来进行, 其校验方法如图 3 所示。直流电流源产生的一次电流同时通过标准源侧和被校互感器侧: 标准源侧的标准直流互感器将一次电流信号以高准确度等级转换为二次电流信号, 并经过模拟信号转换将电流信号转换为电压信号, 再由直流稳态单元完成模数转换, 并按照其自定义格式输出至直流电流互感器校验仪; 被校互感器侧经过一次转换器和二次转换器, 将一次电流信号传变为其定义格式的数字量输出的电压信号, 也传送至直流电流互感器校验仪。校验仪同时接收标准源侧和被校互感器侧的信号, 将其解析并转换为对应的一次电流, 最终完成被校互感器的校验。

不同于交流互感器, 直流电流互感器的二次输出在控制室内, 距离其一次本体所在的直流场往往较远, 因此直流电流互感器的现场校验存在现场的标准侧信号输出与控制室内被校互感器二次输出的

同步读取问题^[21-22]。为解决此问题, 工程上一般采用对讲机方式或 GPS 方式来同步现场和控制室内的数字信号输出, 并辅之以高稳定度的直流电流源, 以减小其输出的一次电流波动对测量结果的影响。

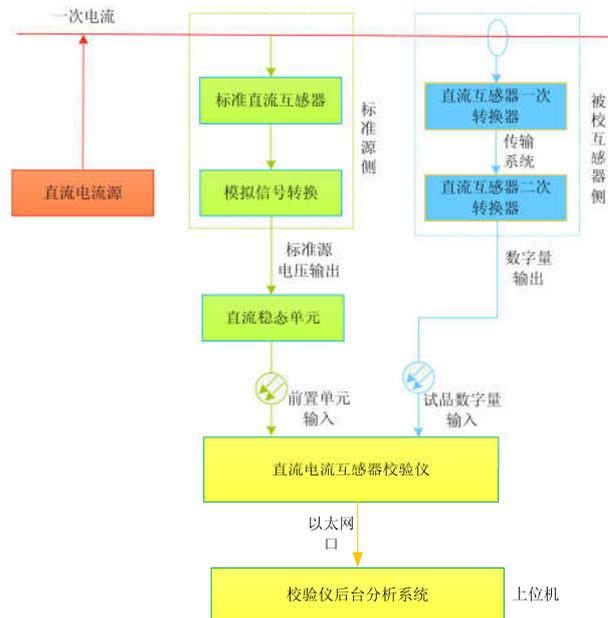


图 3 直流电流互感器现场校验方法

Fig. 3 On-site calibration of DC current transformer

2 直流电流互感器暂态校验技术

前文介绍了直流电流互感器的原理及现场校验方法, 为开展其暂态性能测试, 研制了一套基于信号回采及预畸调节的直流暂态阶跃源, 并给出了直流电流互感器暂态性能测试的实现方法。

2.1 直流暂态阶跃源系统原理

对于零磁通型直流电流互感器, 其输出为模拟量信息, 在进行暂态校验时需要充分考虑到模拟量信号在校验仪中传输特性的改变, 因此对校验仪的要求较高; 而对于光电型直流电流互感器, 其互感器的输出直接即为数字量, 校验仪只需对信号进行解析和转换, 其校验结果受校验仪传输特性的影响较小。

如图 4 所示, 基于信号回采和预畸调节的直流暂态阶跃源通过上位机建立直流暂态阶跃测试所需的仿真模型及参数, 由 PowerPC 实现仿真数据的生成及传输。为输出高采样率的阶跃源信号数据, 系统的仿真步长可达 $2 \mu\text{s}$, 其 500 kHz 的高速运行速度也保证了暂态测试过程中数据的采样及波形还原的准确性。接收到暂态阶跃测试数据后, 由暂态数据输出控制模块实现高速稳定的 D/A 转换控制, 并用转换后的模拟小电压信号驱动后级的线性功放,

以产生暂态测试的阶跃电流信号。

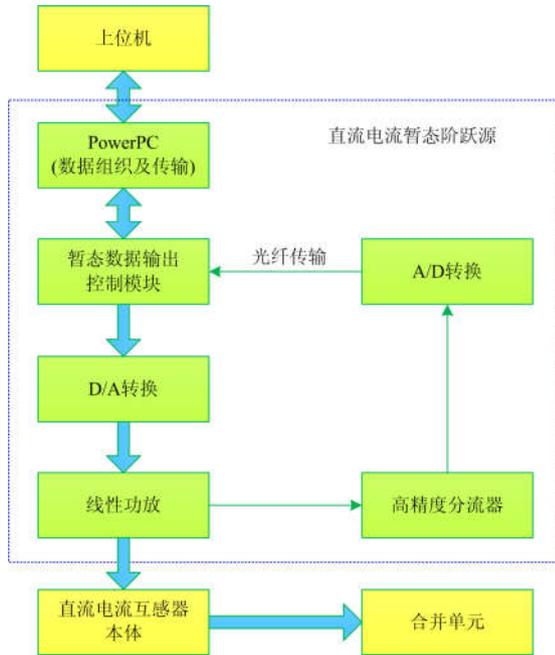


图4 基于信号回采和预畸调节的直流暂态阶跃源原理图
Fig. 4 Principle of DC transient step current source based on signal resampling and pre-distorting adjustment

由于线性功放的控制精度一般是信号的低频段，而暂态测试所用的阶跃电流信号具有丰富的高频分量，因此线性功放在信号的阶跃区内的输出特性会产生畸变。为此，利用高精度分流器对功放输出的大电流信号进行信号回采和A/D转换，并将转换后的预畸信号以光纤传输给暂态数据输出控制模块(光纤传输用来实现一次系统与二次系统之间的隔离)，再根据最小均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)方法^[23]对回采信号的波形畸变情况进行修正调节，其修正原则为

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N (X_m - S_m)^2} = \frac{\|X_m - S_m\|_2}{\sqrt{N}} \leq \delta \quad (1)$$

式中： ε 为输出信号的均方根误差； N 为输出信号的采样点数； X_m 为暂态阶跃源的理想输出； S_m 为暂态阶跃源的实际输出； $\|\cdot\|_2$ 为2-范数； δ 为修正门限值。通过设定修正门限 δ ，实现功放输出的阶跃电流信号与原始仿真信号之间的高度拟合，最终作为直流电流互感器暂态性能测试的信号源。

此外，暂态阶跃源的阶跃信号特性与其负载回路的阻抗特性有关，由于阶跃信号富含高频分量，而电感具有阻碍高频交流信号的作用，因此需要降低回路的电感值，选用的试验导线应尽量短、粗且单位长度的感抗参数值较低^[24]。同时，为了提高功

放的工作效率，暂态阶跃源采用推挽式功放，以在较低的电源电压下获得较大的输出功率。

2.2 直流电流互感器暂态特性测试方法

如图5所示，在直流电流互感器的暂态测试中，直流暂态阶跃源提供测试所需的一次暂态阶跃信号，直流暂态单元的作用相当于标准互感器，将暂态电流转换成二次小电压信号，再进行模数转换和格式定义，并将最终信号输出给直流电流互感器校验仪；在被校互感器侧，经过一次转换器和二次转换器，一次暂态阶跃信号转换为其定义格式的数字化输出的电压信号，也传送到直流电流互感器校验仪。直流电流互感器校验仪接收直流暂态单元和被校互感器侧的信号，并将其解析并转换为对应的一次电流，通过上位机中的后台分析系统完成直流电流互感器的最大过冲、上升时间等暂态特性的计算与评估。

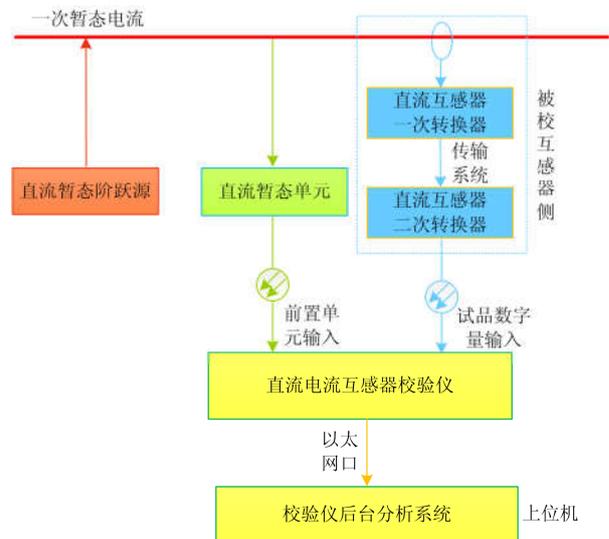


图5 直流电流互感器暂态特性测试方法

Fig. 5 Testing method of transient performance of DC current transformer

在实际工程应用中，由于保护和测量的需要，有不少直流电子式电流互感器与传统电磁式互感器共同用作某一元件的差动保护的实例，这就要求两者对一次电流信号具有相同的传输延时。由于直流电子式电流互感器存在异步传输、合并单元打包处理等环节，其延时远大于几乎不存在传输延时的电磁式互感器^[25]，因此需要准确测量此延时并对保护装置进行延时补偿，以确保两种互感器配合使用时不因延时问题导致保护出现差流。忽略频率响应特性的影响，此传输延时等同于直流电子式电流互感器在阶跃信号激励下的暂态延时，在工程上一般通

过在互感器一次侧施加阶跃信号, 并利用图 5 中测试原理比较被校互感器阶跃信号终止时刻延迟于直流暂态单元标准源阶跃信号终止时刻的大小来确定, 其具体示意图如图 6 所示。

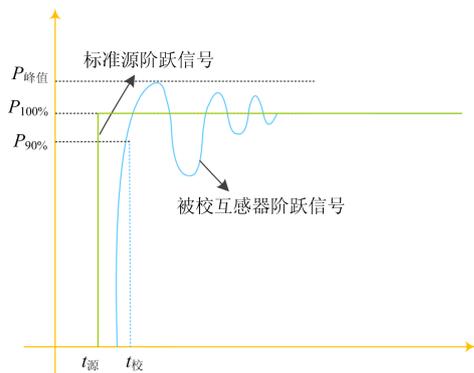


图 6 直流电子式电流互感器传输延时计算方法示意图

Fig. 6 Calculating method of transient delay of DC electronic current transformers

图 6 中, 标准源阶跃信号及被校互感器阶跃信号分别为直流电子式电流互感器校验仪转换后的标准源一次电流和被校互感器测得的一次电流; $P_{峰值}$ 、 $P_{100\%}$ 、 $P_{90\%}$ 分别为被校互感器在阶跃信号激励下输出的过冲峰值、阶跃信号幅值和阶跃信号幅值的 90%; $t_{校}$ 为被校互感器阶跃终止时刻, 定义为其输出的阶跃信号从低值穿越到阶跃幅值 90% 处 $P_{90\%}$ 的时刻; $t_{源}$ 为标准源阶跃信号终止时刻, 定义为从低值到信号幅值 $P_{100\%}$ 处的时刻, 由此可得被校互感器的延时 $t_{延时}$ 为

$$t_{延时} = t_{校} - t_{源} \quad (2)$$

需要说明的是, 图 6 中标准源阶跃信号为理想的阶跃信号, 在实际工程中是不存在的, 由直流电流互感器校验仪转换后的标准源阶跃信号也是类似于被校互感器阶跃信号的振荡波形, 此时 $t_{源}$ 的取值也为阶跃信号从低值穿越到阶跃幅值 90% 处 $P_{90\%}$ 的时刻。 $t_{源}$ 、 $t_{校}$ 均根据校验仪采得的波形进行线性插值计算获得。

3 直流电流互感器现场暂态测试及结果分析

3.1 测试概况

利用直流电流互感器暂态测试技术, 在苏州南部电网 500 kV 统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)工程(简称“苏南 UPFC 工程”)中直流阀厅内极线侧及阀出口侧的有源式直流电流互感器开展了国内首次现场暂态特性试验。现场试验照片如图 7 所示。



图 7 苏南 UPFC 工程极线有源式直流电流互感器暂态阶跃试验现场

Fig. 7 On-site transient performance calibration of polar active DC current transformer in Sunan UPFC Project

极线及阀出口侧互感器的额定电流分别为 1 000 A 及 2 000 A。在图 7 中, 通过暂态阶跃源施加阶跃信号, 由校验仪同时采集直流暂态单元和被校互感器的接收信号并对数据进行分析。被校互感器远端模块中的备用芯直接将控制室内的合并单元输出引至就地试验现场, 解决了标准侧信号输出和被校互感器二次输出同步读取的问题。

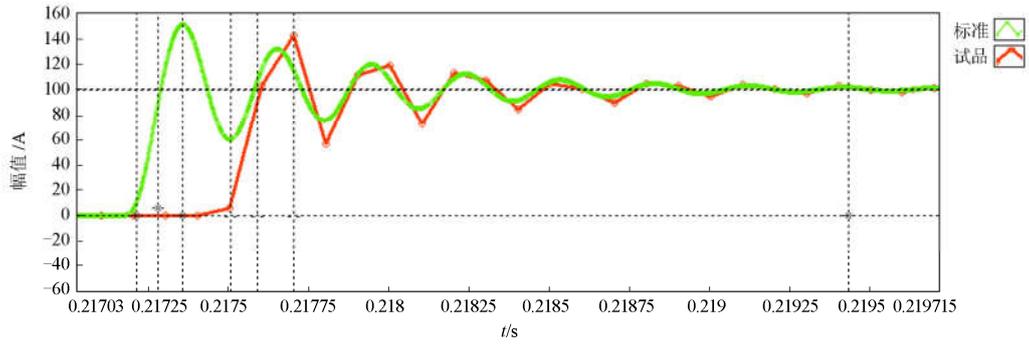
3.2 测试结果及分析

极线侧、阀出口侧的直流电流互感器输出信号分别为 10 kHz 的 IEC60044 版 FT3 格式和 50 kHz 的自定义 FT3 格式。暂态阶跃源的最大输出阶跃电流为 300 A, 利用暂态阶跃源分别对两处互感器施加 100 A 及 300 A 阶跃信号, 测量了标准源及被校互感器的上升时间、最大过冲及两者之间的暂态延时等指标, 极线侧、阀出口侧的直流电流互感器暂态测试结果分别如图 8、图 9 所示。

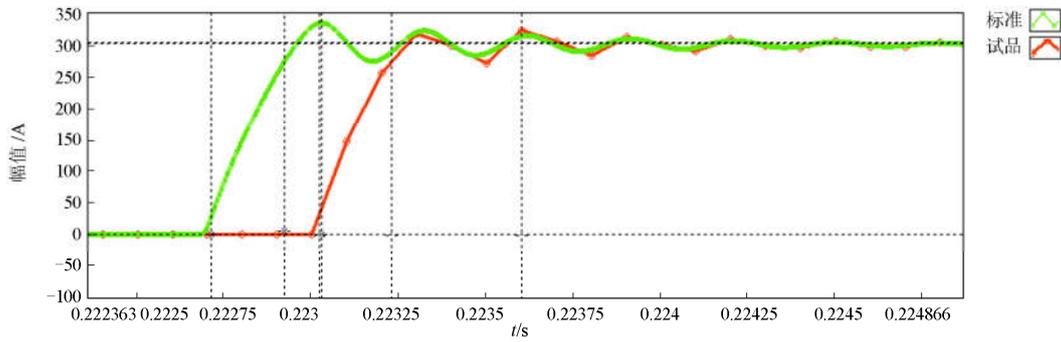
根据图 8、图 9 的测试结果, 采用线性插值法对两处互感器的上升时间、最大过冲及暂态延时进行了统计计算, 计算结果如表 1 所示。

从表 1 中可以看出:

(1) 当暂态电流为 100 A 时, 标准源和被校极线侧、阀出口侧直流电流互感器的上升时间均小于 150 μ s, 满足《高压直流输电直流电子式互感器技术规范》的要求; 但由于阶跃源信号幅值较小, 阶跃信号上升时间小, 暂态阶跃源的调节的时间比较短, 因此此时标准源的最大过冲较大, 被校互感器的最大过冲也相应较大。



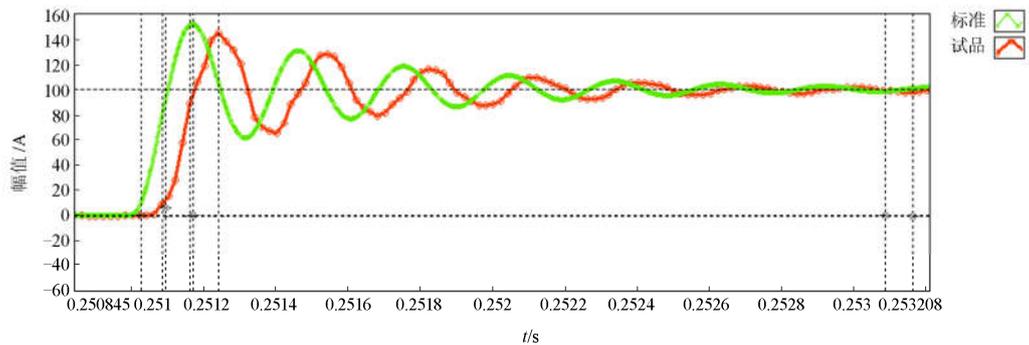
(a) 阶跃幅值 100 A, 输出信号 10 kHz



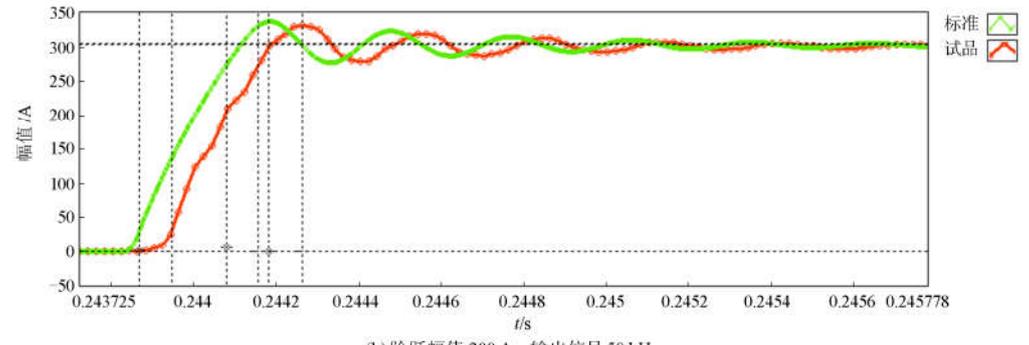
(b) 阶跃幅值 300 A, 输出信号 10 kHz

图 8 极线侧直流电流互感器暂态特性试验结果

Fig. 8 Transient performance test result of the pole transformer



(a) 阶跃幅值 100 A, 输出信号 50 kHz



(b) 阶跃幅值 300 A, 输出信号 50 kHz

图 9 阀出口侧直流电流互感器暂态特性试验结果

Fig. 9 Transient performance test result of the converter valve transformer

表 1 标准源与被测互感器暂态性能比较

Table 1 Transient performance comparison between the standard source and the tested transformer

| 互感器 | 暂态 电流/A | 上升时间/ μs | | 最大过冲/% | | 暂态 延时/ μs |
|-----|------------|---------------------|-------|--------|------|-------------------------|
| | | 标准源 | 试品 | 标准源 | 试品 | |
| 极线侧 | 100 | 68.9 | 82.5 | 51.0 | 43.5 | 309.3 |
| | 300 | 207.4 | 207.3 | 10.3 | 6.8 | 307.4 |
| 阀出 | 100 | 67.0 | 77.3 | 51.1 | 45.0 | 69.3 |
| 口侧 | 300 | 212.0 | 210.0 | 10.4 | 9.0 | 76.6 |

(2) 当暂态电流为 300 A 时, 阶跃信号幅值增大, 信号中高频分量增多; 由于被校互感器已经安装于现场较高的指定位置, 测试回路由两根较长的铜缆连接被校互感器, 整体感抗较大, 暂态阶跃源输出的标准源信号无法实现快速上升的阶跃突变, 因此标准源及被校互感器的上升时间超过了 200 μs , 这也给了暂态阶跃源较长的调节时间, 从而使得标准源及被校互感器的最大过冲基本控制在 10% 以内, 满足标准的要求;

(3) 校验系统取标准源及被校互感器的幅度首次达到阶跃信号幅值的 90% 来作为阶跃信号终止时刻, 对于 10 kHz 输出的极线侧互感器, 其暂态信号延迟于标准源信号约 300 μs 左右; 对于 50 kHz 输出的阀出口侧互感器, 其暂态信号延迟于标准源信号约 70 μs 左右。根据厂家提供的说明书, 被校互感器经过信号传变、远端模块处理和合并单元的打包处理、输出等环节, 总计存在 3 个数据点左右的延迟, 与本试验测得的结果一致, 验证了试验的正确性。

4 结论

为解决直流电流互感器现场校验中的暂态特性试验缺乏试验设备的问题, 研制了一套基于信号回采和预畸调节的便携式直流电流互感器现场暂态校验系统, 通过信号回采和最小均方根误差算法修正, 可以对直流电流互感器进行暂态特性试验。利用该系统成功在苏南 UPFC 工程开展了国内首次直流电流互感器现场暂态特性校准试验, 对极线侧及阀出口侧互感器的上升时间、最大过冲和暂态延时等指标进行了测试。在低阶跃幅值时阶跃源的上升时间及高阶跃幅值时的最大过冲均满足现有标准的要求, 测试系统的暂态延时测量结果也与厂家设计结果一致。建议将本测试技术在直流电流互感器现场交接试验中进行推广, 可用于被校互感器的额定

测量值不大的情况。

出于直流暂态阶跃源调节机制和回路感抗参数的限制, 暂态阶跃源低幅值时的最大过冲存和高幅值时的上升时间有待改善, 后续将对其调节方法和回路参数进行研究, 优化暂态阶跃源的试验性能。

参考文献

- [1] 梁旭明, 张平, 常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 1-9.
LIANG Xuming, ZHANG Ping, CHANG Yong. Recent advances in high-voltage direct-current power transmission and its developing potential[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 1-9.
- [2] 许朋见, 黄金海, 许静静, 等. 宾金特高压直流换相失败保护的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 140-146.
XU Pengjian, HUANG Jinhai, XU Jingjing, et al. Study of Bin-Jin UHVDC project commutation failures protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 140-146.
- [3] 刘凯, 张庆武, 侍乔明. 灵绍±800 kV 特高压直流协调频率控制功能应用[J]. 电力工程技术, 2018, 37(4): 14-20.
LIU Kai, ZHANG Qingwu, SHI Qiaoming. Application of coordinated frequency control function in Lingshao ±800 kV UHVDC project[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(4): 14-20.
- [4] 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.
- [5] 杨亚宇, 邵能灵, 范春菊, 等. 基于计算电阻的高压直流输电线路纵联保护[J]. 电工技术学报, 2017, 32(7): 84-94.
YANG Yayu, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. A pilot protection scheme for HVDC transmission lines based on calculated resistance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7): 84-94.
- [6] 陈波, 李俊一, 王军龙, 等. 高精度光学电压互感器技术及应用[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(6): 7-13.
CHEN Bo, LI Junyi, WANG Junlong, et al. Technology

- and its application of high precision optical voltage transformer[J]. *Power System and Clean Energy*, 2017, 33(6): 7-13.
- [7] 习超群, 程炯, 杨世贵. 光电流互感器在换流站直流滤波器中的应用[J]. *电网技术*, 2008, 32(1): 17-19.
XI Chaoqun, CHENG Jiong, YANG Shigui. The application of optical current transformer in converter station DC filter and its fault reason analysis[J]. *Power System Technology*, 2008, 32(1): 17-19.
- [8] 卜强生, 王建明, 袁宇波, 等. 电子式互感器极性校验系统的设计与应用[J]. *江苏电机工程*, 2012, 31(5): 32-36.
BU Qiangsheng, WANG Jianming, YUAN Yubo, et al. Research and application of the polarity verification system of electronic transformers[J]. *Jiangsu Electrical Engineering*, 2012, 31(5): 32-36.
- [9] 李前, 李鹤, 周一飞, 等. ± 800 kV 直流输电系统换流站直流电流互感器现场校准技术[J]. *高电压技术*, 2011, 37(12): 3053-3058.
LI Qian, LI He, ZHOU Yifei, et al. On-site calibration technology of DC current measurement device in converter station of ± 800 kV UHVDC transmission project[J]. *High Voltage Engineering*, 2011, 37(12): 3053-3058.
- [10] 柏航, 徐雁, 肖霞, 等. HVDC 电子式电流互感器现场校准方法及关键问题[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(19): 5227-5236.
BAI Hang, XU Yan, XIAO Xia, et al. Research on field calibration methods and key problems for HVDC electronic current transformers[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(19): 5227-5236.
- [11] 郑欣, 汪司珂, 庞博, 等. 直流电流互感器现场检测方法及应用[J]. *电测与仪表*, 2015, 52(16): 119-123.
ZHENG Xin, WANG Sike, PANG Bo, et al. The method and application of DC current transformer test in field[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2015, 52(16): 119-123.
- [12] CALLEGARO L, CASSIAGO C, GASPAROTTO E. On the calibration of direct-current current transformers (DCCT)[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, 64(3): 723-727.
- [13] TAKAHASHI M, SASAKI K, HIRATA Y, et al. Field test of DC optical current transformer for HVDC link[C] // *Proceedings of the IEEE PES General Meeting*. Minneapolis, July 25-29, 2010, Providence, RI, USA: 1-6.
- [14] 董新洲, 雷傲宇, 汤兰西. 电力线路行波差动保护与电流差动保护的比较研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(1): 1-8.
DONG Xinzhou, LEI Aoyu, TANG Lanxi. Comparative study of traveling wave differential protection and current differential protection for power lines[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(1): 1-8.
- [15] 高压直流输电直流电子式电流互感器技术规范: Q/GDW 530—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
Technical standards for HVDC electronic current transformers: Q/GDW 530—2010[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [16] RIETVELD G, BEEK J, HOUTZAGER E. Accurate DC current ratio measurements for primary currents up to 600A[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, 64(11): 3055-3061.
- [17] 邱进, 吴士普, 汪本进, 等. 特高压直流换流站分压器预试方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(3): 152-157.
QIU Jin, WU Shipu, WANG Benjin, et al. Preventive test method research of UHVDC converter station DC voltage divider[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(3): 152-157.
- [18] 罗苏南, 曹冬明, 王耀, 等. ± 800 kV 特高压直流全光纤电流互感器研制及应用研究[J]. *高压电器*, 2016, 52(10): 1-7.
LUO Sunan, CAO Dongming, WANG Yao, et al. Development and application research of ± 800 kV UHVDC fiber optical current transducer[J]. *High Voltage Apparatus*, 2016, 52(10): 1-7.
- [19] 贾丹平, 伞宏力, 苑玮琦, 等. 基于光纤测温法的电流互感器[J]. *电工技术学报*, 2008, 23(10): 47-52.
JIA Danping, SAN Hongli, YUAN Weiqi, et al. Current transformer based on optical fiber thermometry[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2008, 23(10): 47-52.
- [20] 宋璇坤, 闫培丽, 肖智宏, 等. 全光纤电流互感器技术应用评述[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(8): 149-154.

- SONG Xuankun, YAN Peili, XIAO Zhihong, et al. Comment on the technology and application of fiber optic current transformer (FOCT)[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 149-154.
- [21] 张鼎衢, 潘峰, 林国营, 等. 高压直流电流互感器运行现状及现场校准技术研究[J]. 电力与能源, 2015, 36(6): 787-793.
- ZHANG Dingqu, PAN Feng, LIN Guoying, et al. Optical status and on-site calibration technology for HVDC transformer[J]. Power & Energy, 2015, 36(6): 787-793.
- [22] 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.
- [23] 葛立青, 刘青红, 王建锋, 等. 计及样本容量合理性的风电功率预测考核算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 118-124.
- GE Liqing, LIU Qinghong, WANG Jianfeng, et al. Economic dispatch optimization method for large-scale power grid based on variable dimension reduction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 118-124.
- [24] 景无为, 黄学良, 陈琛, 等. 多组无线电能传输系统间效率影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 457-462.
- JING Wuwei, HUANG Xueliang, CHEN Chen, et al. Study on impacts among wireless power transmission multi-system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 457-462.
- [25] 庞福滨, 杨毅, 袁宇波, 等. 智能变电站保护动作时间延时特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 86-94.
- PANG Fubin, YANG Yi, YUAN Yubo, et al. Research on characteristics of intelligent substation protection time delay[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 86-94.
-
- 收稿日期: 2018-07-26; 修回日期: 2018-08-25
- 作者简介:
- 庞福滨(1987—), 男, 通信作者, 高级工程师, 研究方向为直流电流互感器测试技术、变电站电磁兼容研究与防护; E-mail: pangfubin2006@163.com
- 刘珣(1987—), 女, 高级工程师, 研究方向为直流电流互感器检测及相关试验技术。
- (编辑 姜新丽)