

换流站直流电流互感器现场测试的关键技术

朱梦梦^{1,2,3}, 束洪春¹, 罗强⁴, 田鑫萃¹, 林聪^{2,3}, 曹敏^{2,3}

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650217;

3. 中国南方电网有限责任公司电能计量重点实验室, 昆明 650217;

4. 江苏凌创电气自动化股份有限公司, 镇江 212009)

摘要: 高压直流输电的控制保护系统需要依靠直流电流互感器(DCCT)提供相应电气量的测量信号, 故 DCCT 对高压直流输电控制保护系统的稳定准确运行具有决定性作用。然而受制于合理试验方法、精密实验设备以及相关标准规程的缺乏, 针对 DCCT 的现场测试工作尚无法在较大范围内充分开展。为此针对 DCCT 现场测试中直流分量精确提取、DCCT 的数字输出接口、DCCT 无同步信号接入下的数据同步以及测试系统不确定度等关键技术问题开展了研究, 提出了一种直流电流互感器现场同步测试方法。通过前置 AD 采集单元采集 DCCT 输出信号, 结合含有直流分量的小波系数来精确提取直流分量, 采用 FPGA 实现 DCCT 的数字接口, 基于绝对延时时间实现数据同步, 分析了测试系统不确定度来源并给出了评定方法。研制出了 1 套直流电流互感器现场测试系统, 结合 ± 500 kV 永富直流工程, 在国内首次开展了从低电流至额定电流等不同电流输入情况下换流站全站数字量输出型 DCCT 的现场同步测试, 结果表明该测试系统整体不确定度优于 5×10^{-4} 。

关键词: 直流电流互感器; 绝对延时; 同步测试; 小波变换; 不确定度分析; 直流分量; 频率响应

Key Technology on Field Tests for DC Current Transformer of Converter Station

ZHU Mengmeng^{1,2,3}, SHU Hongchun¹, LUO Qiang⁴, TIAN Xincui¹, LIN Cong^{2,3}, CAO Min^{2,3}

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Power Science Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China;

3. Key Laboratory of CSG for Electric Power Measurement, Kunming 650217, China;

4. Jiangsu Ling Chuang Electric Automation Co., Ltd., Zhenjiang 212009, China)

Abstract: DC current transformer (DCCT) provides measurement signals for an HVDC control and protection system, which plays an important role in the accurate and stable operation of the control and protection system. However, field tests of DCCT have never been carried out due to the deficiency of feasible test methods, sophisticated equipment and relative standard. Consequently, we studied the key technologies for DCCT field tests, such as the accurate extraction of DC components, the digital output interface of DCCT, the data synchronization of DCCT without synchronous signal access and the uncertainty of test system. Meanwhile, we analyzed and estimated the source of the uncertainty with the DCCT output signal acquired by the A/D acquisition unit, which is decomposed by the wavelet to obtain the direct current. Moreover, the FPGA was applied for the digital interface of the DCCT on the basis of the synchronization of the absolute time delay. In order to complete the field tests of DCCT, a set of DC transformer test system was developed for the ± 500 kV Yongfu HVDC system. At last, the first field tests in China with multiple values of DC, from 10% rated current to 100% rated current, were carried out for all the DCCT with digital output in the converter station. The results reveal that the uncertainty of the developed test system is less than 5×10^{-4} .

Key words: direct current transformer; absolute delay; synchronous test; wavelet transform; uncertainty analysis; DC component; frequency response

基金资助项目: 国家自然科学基金(51267009; 51807084); 云南电网有限责任公司职工技术创新项目(ZCDK20193003)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China(51267009, 51807084), Technical Innovation Project for Employees of Yunnan Power Grid Co., Ltd. (ZCDK20193003).

0 引言

直流电流互感器(DCCT)是直流输电系统的重要一次设备, 对系统中使用的直流互感器进行安装前的型式试验、出厂试验以及交接试验和周期检测是保证直流输电系统安全运行不可缺少的工作^[1-5]。直流电流互感器的整个信号传递由于涉及多个环节且为直流系统的测控与保护提供重要的电流信号, 它的直流分量传变准确度、频率响应及暂态阶跃特性是否满足要求是系统安全运行的关键所在。依据 DL/T 274—2012《±800 kV 高压直流设备交接试验》要求, 应开展直流电流互感器现场准确度和频率响应交接试验工作。

文献[6]研制了数字量输出电子式电压互感器的高精度在线校验系统, 实现了运行中电子式电压互感器的在线校验。文献[7-8]提出了一种直流互感器现场校准方法, 该方法是根据标准源侧和被校互感器两端的数字万用表读数, 采用对讲机或 GPS 同步实现直流互感器的校准。此种方法依赖于 GPS 的准确同步, 且对直流电流源稳定性要求较高, 同时不能对直流互感器绝对延时时间进行测试。可见, 现有的测试仅对直流互感器的稳态比值误差进行简单测试, 且都在开环方式下进行, 同时并没有涉及直流电流互感器的频率响应测试^[6-10]。国内外对 DCCT 的现场校准技术已经取得了一定成果, 但仍然无法达到现场实际开展测试工作的要求, 现场测试方案、直流分量准确提取以及 DCCT 无同步信号接入等问题缺乏深入研究及对策, 缺乏体积小、便于运输的专业测试设备, 更没有统一的校准规范和检定规程。

为解决换流站 DCCT 现场测试的关键技术问题, 本文针对 DCCT 现场测试中直流分量提取、DCCT 的数字输出接口、DCCT 无同步信号接入下的同步校验和测试系统不确定度及频率特性测试方法等关键问题开展了研究, 研制出 1 套高准确度直流电流互感器同步测试系统, 最后在实际工程中验证了测试系统实用性并对不确定度进行分析和评定。

1 特(超)高压换流站 DCCT 原理及应用现状

本文以永仁至富宁±500 kV 直流输电工程直流电流测量装置为对象, 该直流系统的额定输送功率为双极 3 000 MW、单极 1 500 MW, 额定电流为

3 000 A, 额定直流电压为±500 kV, 线路送电距离约为 577 km。永仁换流站为整流运行, 富宁换流站为逆变运行, 系统结构如图 1 所示。

直流场直流电流测量装置包括阀厅极线直流电流测量装置、阀厅中性母线直流电流测量装置、直流场极线直流电流测量装置、直流场中性母线直流电流测量装置、金属中线、金属回线开关及站内接地开关电流测量装置。直流滤波器电流测量装置包括滤波器高压侧电流测量装置、滤波器低压侧电流测量装置、滤波器不平衡电流测量装置。换流变中性点安装有直流偏磁电流测量装置。

目前直流电流测量装置原理分为 3 类: 光电式直流电流互感器、零磁通式直流电流互感器、全光纤式直流电流互感器。永富直流输电工程采用的是光电式直流电流互感器, 它主要由一次传感器(分流器、罗氏线圈)、远端模块、光纤及绝缘子以及合并单元组成, 如图 2 所示。

为了保证直流电流互感器传变的准确性, 需要对其直流测量准确度、频率响应和暂态阶跃响应等关键指标进行测试。

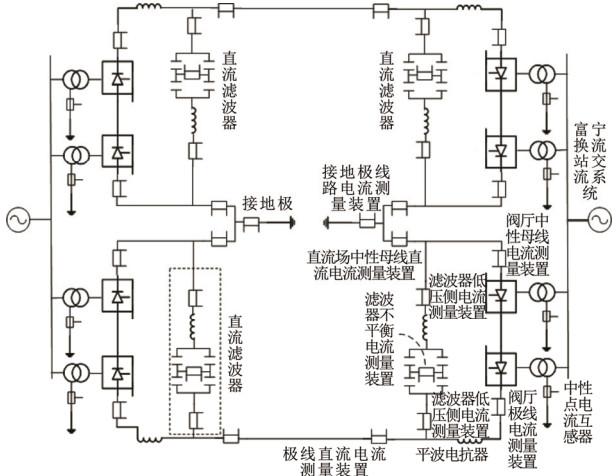


图 1 永富直流输电系统结构图

Fig.1 Structure diagram of the Yongfu HVDC transmission system

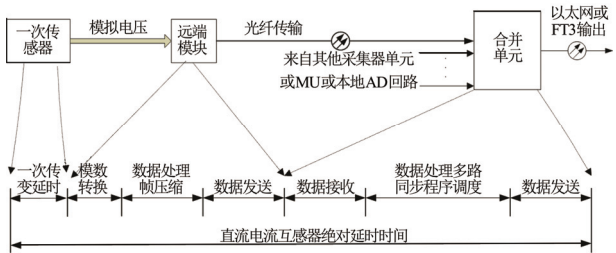


图 2 直流电子式电流互感器基本原理

Fig.2 Basic structure of DC electronic current transformer

2 基于延时同步的 DCCT 现场闭环测试系统

2.1 基于延时同步的 DCCT 现场测试方案

目前换流站直流电流互感器与控制保护室中合并单元相距较远,且大多数合并单元不提供接收和输入的同步信号端口,基于上述现场情况,本文提出一种 DCCT 直流分量及谐波响应特性现场测试系统总方案,系统结构和基本原理如图 3 所示。其中标准通道包括直流电流比较仪、谐波电流标准器及校验仪高精度 AD 采集模块,测试通道包含校验仪同步以及数据分析处理单元等。其中,标准源信号和被测直流互感器信号在“时钟同步单元”的控制下进行同步采集,对每一个标准源和试品的采样值均打上精确的时标,即基于绝对延时时间同步。系统基于绝对延时同步实现闭环测试,通过精确标定标准源和被测试品时标,以适应不同试品的延时。

2.2 现场闭环测试系统设计

根据图 3 所示的现场 DCCT 测试系统,高稳定直流电流源产生一次直流电流通过直流电流比较仪和被测直流电流互感器,直流电子式互感器校验仪标准模拟量接口接收直流电流比较仪输出电流信号并经标准电阻器变换的模拟量电压信号,将其作为标准信号。若被测直流电流互感器为模拟量输出型,其输出二次模拟信号接至校验仪被测模拟量接口;若被测直流电流互感器为各类型(FT3 等)数字量输出式,校验仪通过 FPGA 实现 DCCT 的数字接口并进行报文解析,最后将采集的信号上传至数据分析处理单元进行计算,进而实现直流电流互感器的直流准确度、谐波准确度和时间特性测试。

标准器、直流电子式互感器校验仪和被测 DCCT 构成 1 个闭环回路,其中校验仪通过同步采集标准器和被测 DCCT 的二次值,通过协议解析、计算得到两者的一次电流值,通过式(1)计算被测 DCCT 的准确度比值误差。

$$f = \frac{I_c - I_p}{I_p} \times 100\% \quad (1)$$

式中: I_c 为被测直流互感器一次电流值; I_p 为标准直流一次电流值。频率响应测试中比值误差与相位误差计算与传统交流电子式电流互感器测试方法一致,此处不做说明。

2.3 现场测试系统不确定度分析

根据图 3 的直流电流互感器现场测试系统得到其简化模型,如图 4 所示, ε_r 为测试通道输出的误

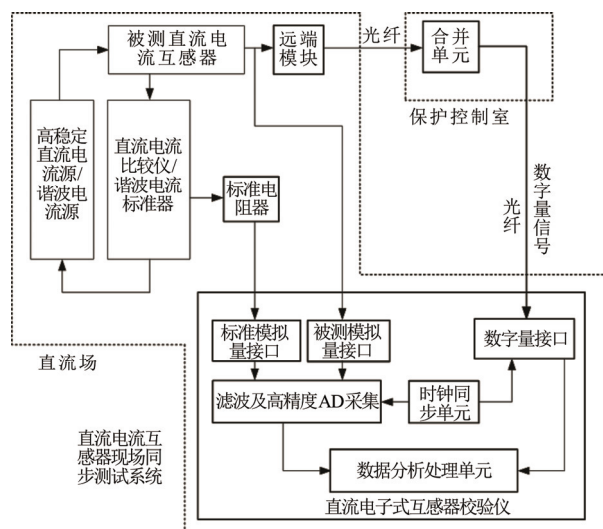


图3 直流电流互感器现场同步测试系统图

Fig.3 Field test system diagram of DC current transformer

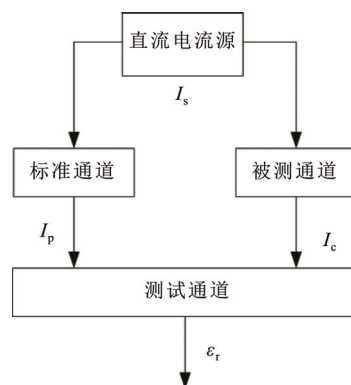


图4 测试系统模型

Fig.4 Test system model

差, I_s 表示直流电流源。为了更为直观地了解其测试系统对测试结果的影响,假设直流源产生的一次直流电流 I_s 通过标准器和被测品,然后校验仪通过采集标准器和被测品的二次信号进行比值误差计算,并得出相应的测试结果。

引入式(2),来更为直观地描述引入误差对测试系统的影响^[1]

$$\varepsilon_r = \frac{|I_c| - |I_p|}{|I_p|} \times 100\% = \frac{\left(\frac{|I_c|}{|I_s|} - 1\right) - \left(\frac{|I_p|}{|I_s|} - 1\right)}{\left(\frac{|I_p|}{|I_s|} - 1\right) + 1} = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_b}{\varepsilon_b + 1} \quad (2)$$

式中: ε_c 为被校测道实际输出的误差; ε_b 为标准通道引入的误差。

结合图 4 和式(2),影响直流电流互感器现场测试的误差主要有以下组成。

1) 测试系统的测试通道测量重复性引入的不

确定度分量 u_1 , 主要来自校验仪的分辨力、报文解析有效性、直流源输出性能等引入的误差, 采用 A 类评定方法进行评定, 并进行多组测量获得合并样本标准差, 从而获得一个自由度较大的标准差。

2) 测试系统的标准通道引入的不确定度分量 u_{21} 。其中, u_{21} 主要是由直流电流比较仪和标准电阻器引入的不确定度。

3) 测试系统中的直流电子式互感器校验仪高精度 AD 转换分别引入的不确定分量 u_{22} 。 u_{22} 主要来源于校验仪高精度取样电阻温度影响及 AD 采样环节等因素。

4) 直流源输出稳定性及同步引入的不确定分量 u_{23} , 由于采用了基于绝对延时的异地同步校准技术以及实时反馈控制的高稳定直流电流源, 因此可以忽略该不确定度分量对校准结果的影响。

各不确定度分量彼此不相关, 合成标准不确定度表示为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_{21}^2 + u_{22}^2} \quad (3)$$

当采用直接电流比较法现场校准直流电流互感器时, 通常要求直流电流源的稳定度给测量不确定度带来的影响不超过被校互感器误差限值的 1/10, 若校准 0.2 级直流电流互感器, 则直流电源的稳定度应 $<0.02\%/min$ 。而本文采用基于绝对延时的同步校准技术, 校验系统通过高精度同步模块对标准器和被校互感器打上时标, 采用光纤同步可以达到很高的准确度, 通过采集一定时窗数据通过数字滤波进行直流电流分量的提取, 使得直流电流源的波动和低频分量的影响与直流互感器的准确度相比可以忽略^[9]。

3 DCCT 现场测试设备及关键技术

由图 3 可以看出, 影响测试系统整体准确度的因素主要有: 直流电流比较仪的准确度、直流电流源稳定性、直流电子式互感器校验仪中 AD 采集、同步模块以及数据分析软件等。因此如何控制直流电流比较仪、高稳定直流电流源以及直流电子式互感器校验仪的准确度和稳定度对现场整体校准系统高准确度实现显得尤为主要。

3.1 基于实时采样反馈的高稳定直流电流源

直流电流互感器的输出多为数字接口且传输的是一次电流值, 现场校准需采用直接比较法原理, 作为标准器的直流电流比较仪准确度等级应高于

0.05 级。直流电流比较仪是直流大电流高精度测量与计量的专用仪器, 它由测量环和辅助装置组成^[12-13]。本系统使用的直流电流比较仪经国家高电压计量站校准, 直流电流比较仪整体准确度等级达到 0.005 级, 实践证明其输出电流 $<4 \text{ kA}$ 时稳定度优于 0.02%。

作为直流电流互感器现场校准系统核心模块的高稳定直流电流源, 为了减小设备体积及重量, 直流电流源采用开关电源的结构, 由于电源自身设计的准确度和稳定性不高, 难以确保输出电流由接近零值稳定上升至被测试直流电流互感器的额定电流的准确度优于 0.05%。为了解决高稳定直流电流源的准确度及稳定性, 现场校准试验中, 提出基于直流电流比较仪实时反馈控制技术, 采用直流电流比较仪作为直流电流采样环节, 采用多级稳压和多模块并联控制提升系统的输出电流稳定度和准确度。通过增加控制策略以确保设置电流与输出电流的误差, 将输出电流稳定度从 0.1% 提升至 10% 额定值以上到最大量程范围内稳定度优于 0.05%, 实现与直流比较仪同数量级的稳定度和准确度, 达到一体化标准源的效果^[9]。

针对高稳定直流电流源在现场进行了准确度及稳定度试验, 每个设置电流点持续输出时间为 10 s, 经现场试验高稳定直流电流源稳定度优于 0.05%, 在 300~1 000 A 时直流源输出的准确度优于 1%, 在 2 000~3 000 A 之间的直流源准确度优于 0.2%, 额定电流的准确度优于 0.05%, 满足现场校准 0.2 级直流电流互感器的要求。

3.2 基于高精度 AD 采集和小波变换的直流分量提取关键技术

在直流电流互感器现场测试中, 由于换流站现场电磁干扰、试验设备自身噪声、标准源二次模拟量微弱等因素, 加大了直流分量和谐波分量精确提取的难度。因此, 将高精度 AD 采样所得数据序列进行小波变换处理^[14], 用以提升直流分量的提取准确度。

3.2.1 高精度 AD 采样设计

针对 0.2 级的直流电流互感器, 要求校验仪的准确度等级至少达到 0.05 级, AD 采样设计结构如图 5 所示。

其中 AD 转换环节误差是影响校验仪整体准确度的重要因素, 高精度 AD 的误差可由式(4)得出。

$$\begin{cases} \gamma_{AD} = \frac{\gamma_{\max}}{U_{in}} \\ \gamma_{\max} = \pm \frac{d}{2} \\ d = \frac{U_s}{2^N - 1} \end{cases} \quad (4)$$

式中: N 为有效位数; γ_{AD} 为 AD 误差; γ_{\max} 为 AD 最大误差; U_{in} 为校验仪 AD 单元设计输入的额定电压; U_s 为满量程输入电压; d 为 AD 能分辨最小模拟输入电压变化量, 即 AD 的有效位数 N_{ENOB} 为

$$N_{ENOB} = \frac{D_{SINAD} - 1.76}{6.02} \quad (5)$$

式中 D_{SINAD} 为信噪比加失真。

为确保直流信号在 10%~100% 额定电流下模数转换和信号采集的准确度和完备性, 在直流电子式互感器校验仪设计时, 采用噪声低至 $60 \mu V$ 零延时的逐次逼近型(SAR)单极性模数转换器(ADC), 信噪比(R_{SNR})达 88 dB, 有效位数(N_{ENOB})达到 14.3 位, ADC 采样率设置为 20 kHz。采用 RC 二阶低通滤波作为抗混叠滤波, 带宽设计为 3 kHz, 电阻温漂为 $5 \times 10^{-6}/^{\circ}C$, 电容选型为 $30 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ 的 NPO 陶瓷电容。

为避免接地线和开关电源带来的噪声干扰, 采用蓄电池模块单独供电, 同时避开其他高发热模块, 减少温度对元器件的影响。整机加强控制散热温度, 结构尽量减少开孔以增强密封性, 加强电磁屏蔽设计, 并对重要的敏感元件使用专用屏蔽设计, 各环节综合保证模数转换的高精度、高线性度和高稳定性。

3.2.2 利用小波变换提升直流分量提取准确度

一般现场测试中直流电流源中不仅包含着直流分量、谐波分量、甚至含有少量的非周期分量。加之现场易受外界电磁场及开关电源屏蔽效果干扰, 现场得到的直流电流录波如图 6 所示。

由图 6 可知, 如果直接采用采样值作为直流分量将与实际偏差较大。直流源输出的电流为

$$i(n) = D(n) + A(n) + \sum_{k=1}^p I_k \sin(\omega_k t + \theta_k) \quad (6)$$

式中: $i(n)$ 为电流离散值; I_k 表示 k 次谐波的幅值; ω_k 、 θ_k 分别为 k 次谐波信号的角频率和初始相位角; p 表示最高次谐波信号; $D(n)$ 为直流分量; $A(n)$ 为噪声干扰分量。现对式(6)在 1 个工频周期内进行积分运算, 则式(6)中第 3 项为 0, 即得到式(7)为

$$\sum_{n=1}^N i(n) = \sum_{n=1}^N D(n) + \sum_{n=1}^N A(n) +$$

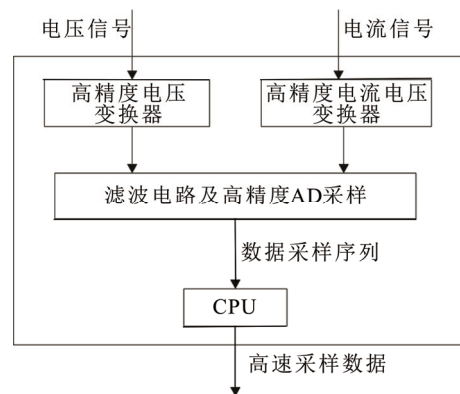


图 5 直流电子式互感器校验仪 AD 采样基本结构

Fig.5 Basic structure of AD sampling for DC electronic transformer calibrator

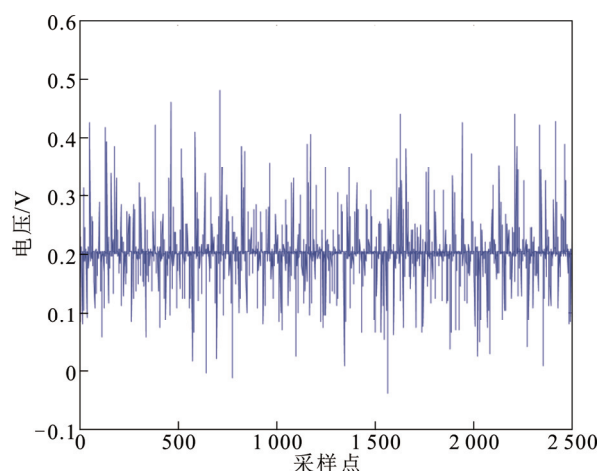


图 6 未经滤波的直流源输出信号

Fig.6 DC source output signal without filtering

$$\sum_{n=1}^N \left(\sum_{k=1}^p I_k \sin(\omega_k t + \theta_k) \right) = D' + A' \quad (7)$$

式中: D' 和 A' 为 1 个周期内的积分; N 为采样电流离散值的总数。

实际工程中选取数据同步采集后的 10 个工频周期采样数据按照式(8)计算直流分量, 计算式可简化为

$$\bar{D} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i(n) \quad (8)$$

式中 \bar{D} 为采用 10 个工频周期采样数据计算的直流分量。由式(8)可知, 直接采用式(8)往往无法完全滤除掉高频干扰分量。现采用小波变换将标准信号和被测信号进行 6 层分解, 时窗长度为 200 ms, 并选取直流分量所在的频带 a_0 , 频率范围为 0~78.125 Hz 的小波系数求取直流分量, 如式(9)所示

$$\bar{D} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i_{a_0}(n) \quad (9)$$

式中 $i_{a_0}(n)$ 为电流信号经过小波分解为 0~78.125 Hz 频率范围的电流离散值。

若被测直流互感器数字量的采样频率为 10 kHz, 输入的直流量为 3 200 A, 采用 db4 小波将直流互感器二次离散信号进行 6 层小波分解, 得到的结果如图 7 所示。其中, d_1 为频率范围 2.5~5 kHz 的频带, d_2 为频率范围 1.25~2.5 kHz 的频带, d_3 为频率范围 0.625~1.25 kHz 的频带, d_4 为频率范围 312.5~625 Hz 的频带, d_5 为频率范围 156.25~321.5 Hz 的频带, d_6 为频率范围 78.125~156.25 Hz 的频带。

对采用高精度 AD 采集和小波变换结合研制的直流电子式互感器校验仪进行准确度性能测试的数据, 如表 1 所示。

由表 1 可知, 采用直流分量所在的频带 a_0 小波系数提取直流分量, 一方面可以滤除掉高频干扰, 另一方面可以提高直流分量的提取准确度, 满足现场测试系统的要求。

3.3 直流电子式互感器校验仪

上文阐述采用高精度 AD 和小波变换提高直流分量提取准确度, 但是在直流电流互感器现场校验中, 保证被校通道和标准通道 2 路信号的同步是校准系统的关键所在, 否则校准计算的结果不能满足误差准确度要求。为了满足同步的准确度, 校验仪设计时采用稳定度 $5 \times 10^{-9}/^{\circ}\text{C}$ 恒温晶振时钟模块, 在接收外部同步信号时准确度优于 0.2 μs , 用以输出同步信号时准确度优于 0.5 μs , 满足现场校准要求。

换流站中合并单元多数采用 FT3 等协议进行通信, 即使合并单元采用的通信协议数据帧格式是固定的, 但不同生产厂家的合并单元数据帧长短不同会造成校验仪解析困难。为了解决多通信协议的自适应解析, 基于 FPGA 实现 DCCT 的数字接口, 并兼容了国内外直流互感器主流生产厂家所采用的规约协议, 在试验前可通过校验仪的配置界面进行选择, 以满足不同通信协议下直流电流互感器的现场校验工作。

本文研制的换流站直流电子式互感器校验仪能够完成换流站直流电子式互感器的幅值测量、比

值差校验、复合误差校验、频率特性测试、谐波测量等所有准确度相关测试。同时, 能够实现对互感器绝对延时时间、报文离散时间的准确测试。

3.4 谐波电流源

直流系统在运行时含有大量的直流分量和部分谐波分量, 尤其在直流系统出现扰动和故障时, 谐波分量含量将随之增大, 因此在现场测试 DCCT 对直流分量的传变准确度时, 需要测试其对谐波分量的频率响应特性, 这样才能为直流系统控制和保护提供可靠、准确的信号。其中, 现场的频率特性测试设备包含电子式互感器频率校验仪、工频电流测试设备和谐波电流源设备, 工频电流测试设备参数如表 2 所示。

采用工频电流测试设备实现谐波电流源的现场比对验证, 以确保谐波源的准确性。谐波电流源采用信号发生器产生不同频率的谐波信号, 通过功率放大器输出对应的谐波电流。同时, 利用高精度取样电阻采集谐波标准小电压信号, 作为测试系统的标准谐波信号, 电子式互感器校验仪通过计算分析得到互感器的比值误差和相位误差, 实现直流电

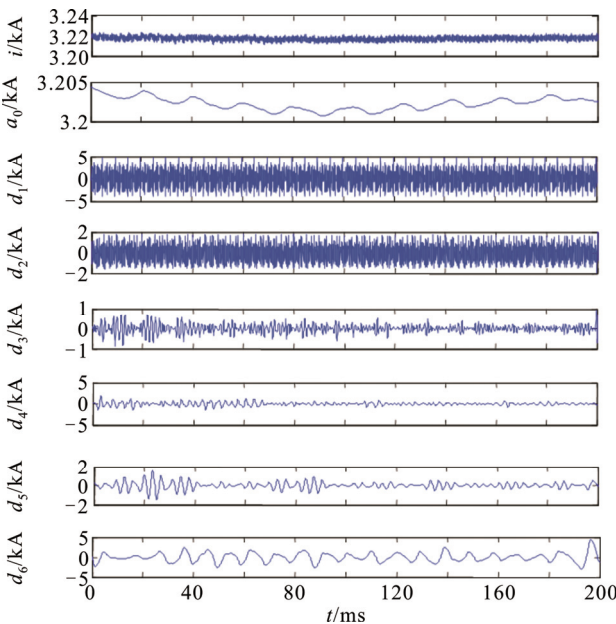


图 7 利用小波系数提取直流分量
Fig.7 Extraction of DC components by wavelet coefficient

表 1 标准值与利用校验仪测量值
Table 1 Standard value and measuring values by using checking instrument

标准值/A	3 200	3 000	2 000	1 000	300	100
校验仪测量值/A	3 201.354 1	3 001.106 5	2 000.962 7	1 000.405 4	300.106 7	100.046 2

表 2 工频电流测试设备参数

Table 2 Parameters of high power AC current source

设备名称	额定电流/A	额定频率/Hz	准确度等级
工频升流器	0~2 000	50	/
工频标准 电流互感器	(0~2 000)/5	50	0.01S

流互感器现场频率特性的测试。其中谐波电流源参数如表 3 所示。

4 现场试验与数据分析

4.1 直流电流互感器现场测试应用

根据现场 DCCT 校验的需要,建立了试验环境和试验方法。参考国家标准《高压直流输电系统直流电流测量装置 第 1 部分:电子式直流电流测量装置》、中国电力行业标准《直流电子式互感器监督导则》和国家电网公司企业标准《直流互感器校准规范》研制了换流站 DCCT 现场测试系统,用于±500 kV 永富直流输电工程换流站全站的直流电流互感器试验,主要针对 DCCT 开展了直流准确度测试和谐波响应测试,如图 8 所示。换流站共配置了 18 台直流电流测量装置,其中直流场极线直流电流互感器参数如表 4 所示。

由于永富直流工程换流站中合并单元采用 FT3 数字协议,没有二次模拟量输出,合并单元不提供接收同步信号端口,因此无法利用外部同步信号方式进行测试,即现场采用“绝对延时测试法”进行测试试验。现场测试中直流电子式互感器校验仪采集直流电流比较仪标准源信号,同时接收合并单元的数字报文,并给数字报文打上时标,再减去合并单元自身标定的额定延时时间,使其标准源和被测合并单元数字量同步。

现场试验中每个额定电流百分比下进行 10 次重复测试,并根据直流电子式互感器校验仪误差读数计算测量重复性引入的 A 类不确定度 u_1 ;同时,根据校准证书可知直流电流比较仪以及互感器校验仪引入的 B 类不确定度分量分别为 $u_{21}=1.2\times10^{-4}$ 、 $u_{22}=1.67\times10^{-4}$ 。计算时取置信区间 $p=95\%$,包含因子 $k=2$,扩展不确定度为 $U=2u_c$,计算测试结果的扩展不确定度和比值误差如表 5 所示^[15]。

从表 5 中可以发现,系统整体测试不确定度优于 0.05 级准确度等级,且直流电流互感器满足 0.2 级准确度等级设计要求。



图 8 直流互感器现场校准试验

Fig.8 Field calibration test of direct current transformer

表 3 谐波电流源参数

Table 3 Parameters of the test equipment of harmonic

current			
设备名称	额定一次 电流/A	取样电阻 额定电流/A	输出频率/Hz
谐波电流源	100	100	50~1 500

表 4 直流场极线直流电流互感器参数

Table 4 Parameters of DC field pole line DC current
transformer information

名称规格	电压等级/kV	额定电流/A	准确度等级
电子式直流电流互感器	±500	3 000	0.2

表 5 直流电流互感器不确定度和比值误差测试结果

Table 5 Test results of uncertainty and ratio error of DC
current transformer

额定电流百分比/%	比值误差/%	扩展不确定度 U
10	0.15	4.2×10^{-4}
20	0.11	4.1×10^{-4}
40	0.11	4.1×10^{-4}
50	0.11	4.1×10^{-4}
60	0.11	4.1×10^{-4}
70	0.12	4.1×10^{-4}
80	0.09	4.1×10^{-4}
100	0.11	4.1×10^{-4}

4.2 直流电流互感器现场频率响应特性测试及分析

利用本文所述测试系统及方法对直流电流互感器的频率响应进行测试。其中工频电流测试设备产生 50 Hz 的电流,标准电流互感器作为工频标准电流互感器,谐波电流源产生不同频率的谐波分量,测试电流为 100 A,测试结果见表 6。

根据 GB/T 26216.1—2010《高压直流输电系统

表 6 直流电流互感器频率响应测试结果

Table 6 Test results of frequency response of DC current

transformer		
频率/Hz	比值误差/%	相角误差/ μ s
50	-0.08	-26.6
100	-0.06	-67.3
200	-0.17	-79.2
300	0.14	-83.3
400	0.15	-86.4
500	0.18	-84.1
600	0.26	-86.5
700	0.24	-98.0
800	0.35	-103.6
900	0.32	-109.1
1 000	0.39	-126.4
1 200	0.41	-130.7

直流电流测量装置第 1 部分: 电子式直流电流测量装置》中的 7.3.11 条款, 现场试验结果满足规定在 50~1 200 Hz 时比值误差 $\leq 0.75\%$ 及相角误差 $\leq 500 \mu$ s 的要求^[16]。

5 结论

1) 系统通过绝对延时同步、高精度 AD 采集以及多类型协议解析等技术实现了数字量输出直流电流互感器的现场同步测试。

2) 采用含有直流分量的小波系数获取直流分量的方法提升了对直流分量的提取准确度; 通过对整体测试系统不确定度来源分析和评定, 保证了直流电流互感器现场测试可信度。

3) 采用工频电流源和谐波电流源, 在现场开展了直流电流互感器频率响应特性现场测试工作, 积累了现场测试经验。

4) 需要针对 DCCT 的现有技术水平及现场运行需求, 尽快制定出现场试验技术规程或标准, 后续研究的重点应开展直流互感器校验系统的溯源以及 DCCT 现场暂态阶跃特性试验及应用, 保障我国特高压直流输电系统的安全稳定运行。

参考文献 References

[1] 束洪春, 田鑫萃, 白 冰, 等. 基于多测点的特高压长距离直流输电线路行波故障测距[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2105-2113.
SHU Hongchun, TIAN Xincui, BAI Bing, et al. Fault location for traveling wave based on multi measuring points for UHVDC long distance transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2105-2113.

[2] 张 弛, 康小宁, 郑永康, 等. 罗氏线圈电流互感器的暂态传变特

性[J]. 高电压技术, 2018, 44(12): 4105-4112.

ZHANG Chi, KANG Xiaoning, ZHENG Yongkang, et al. Transient characteristics of Rogowski coil based current transformers[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(12): 4105-4112.

[3] 马为民, 樊纪超. 特高压直流输电系统规划设计[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2545-2549.

MA Weimin, FAN Jichao. Planning and design of UHVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2545-2549.

[4] 赵有斌, 赵华锋. 直流输电用 ± 500 kV 电压传感器及电流传感器的研制[J]. 高压电器, 2005, 41(4): 299-300, 303.

ZHAO Youbin, ZHAO Huafeng. Study on ± 500 kV voltage and current transducer for HVDC transmission[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(4): 299-300, 303.

[5] 束洪春, 王 璇, 田鑫萃, 等. 交流故障下永富直流换流器差动保护误动风险分析[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 478-487.

SHU Hongchun, WANG Xuan, TIAN Xincui, et al. Mal-operation risk analysis of Yongfu DC converter differential protection under AC fault[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 478-487.

[6] 李振华, 李 闯, 李振兴, 等. 数字量输出电子式电压互感器的高精度在线校验方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 163-167.

LI Zhenhua, LI Chuang, LI Zhenxing, et al. A high accuracy on-line calibration method for electronic voltage transformers with digital output[J]. Automation of Electric Power System, 2015, 39(13): 163-167.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 朱梦梦, 林 聪, 曹 敏, 等. 基于绝对延时的 DCCT 异地同步现场校准方法及不确定度研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(8): 51-56.

ZHU Mengmeng, LIN Cong, CAO Min, et al. Research on field calibration method and uncertainty of DCCT remote synchronization based on absolute delay[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(8): 51-56.

[10] 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.

[11] 尚秋峰, 张 静, 董建彬. 电子式电流互感器校准系统不确定度评定方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(18): 63-66.

SHANG Qiufeng, ZHANG Jing, DONG Jianbin. Evaluation of measurement uncertainty for the calibration system of electronic current transformer[J]. Automation of Electric Power System, 2008, 32(18): 63-66.

[12] 蔡东辉. 直流大电流计量标准装置检定方法及不确定评定[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.

CAI Donghui. The methods of verification & evaluation of metering standard device of heavy direct current[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2012.

[13] 栗营利. 磁调制式直流比较仪的设计与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

- LI Yingli. The design and research of DC current comparator based on magnetic modulator[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [14] 贾清泉, 刘连光, 杨以涵, 等. 应用小波检测故障突变特性实现配电网小电流接地故障选线保护[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 78-82.
- JIA Qingquan, LIU Lianguang, YANG Yihan, et al. Abrupt change detection with wavelet for small current fault relaying[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 78-82.
- [15] 叶德培, 赵峰, 施昌彦, 等. 测量不确定度评定与表示: JJF 1059.1—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- YE Depei, ZHAO Feng, SHI Changyan, et al. Evaluation and expression of uncertainty in measurement: JJF 1059.1—1999[S]. Beijing, China: Standard Press of China, 2013.
- [16] 李宾宾, 李岩, 朱静, 等. 高压直流输电系统直流电流测量装置 第1部分: 电子式直流电流测量装置: GB/T 26216.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- LI Binbin, LI Yan, ZHU Jing, et al. DC current measuring device for HVDC transmission system Part 1: Electronic DC current measuring device: GB/T 26216.1—2010[S]. Beijing, China: Standard Press of China, 2011.



ZHU Mengmeng
Ph.D.candidate

Corresponding author



SHU Hongchun
Ph.D., Professor

朱梦梦(通信作者)

1986—, 男, 博士生, 工程师

主要从事电能计量装置技术与电力互感器现场检定、交直流电子式互感器现场关键测试技术应用及配电网故障检测与保护控制等工作

E-mail: 396923800@qq.com

束洪春

1961—, 男, 博士, 教授, 博导

从事电力系统新型继电保护与故障测距、故障录波、数字信号处理及 DSP 应用等方面的教研工作

E-mail: kmshc@sina.com.cn

收稿日期 2018-12-22 修回日期 2019-05-19 编辑 曾文君