

基于EMD滤波改进的直流电流互感器 现场测试研究

杨朋威, 万全, 刘春晖, 陈更, 许才

(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)

摘要: 直流电流互感器是高压直流输电系统的核心设备, 其现场测试系统设计的合理性、准确性对直流输电系统尤为重要。对当前直流电流互感器现场测试系统存在误差的原因进行分析, 提出了改进的直流电流互感器现场闭环测试方法。该方法通过高精度同步模块实现标准源模拟量和被测数字量的同步采集, 解决了延时造成的误差; 通过18位高精度A/D采集并引入EMD算法对电流直流分量进行提取, 滤除了大量谐波, 提高了测试系统的测量精度; 设计了用于直流电流互感器暂态阶跃响应测试的阶跃源系统, 并通过实验证明了该系统的可行性。提出的改进的直流电流互感器闭环测试系统由于解决了延时误差, 减小了谐波误差, 可提高测试系统的测量精度, 并且由于EMD算法计算简单可靠, 有较高的工程应用性。

关键词: 直流电流互感器; 同步测试; 绝对延时; 经验模态分解; 阶跃特性

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed21207

DC Current Transformer Field Test System Based on EMD Filtering

YANG Pengwei, WAN Quan, LIU Chunhui, CHEN Geng, XU Cai

(Electric Power Research Institute, State Grid East Inner Mongolia Electric Power Company Limited, Hohhot 010000, Nei Moggol, China)

Abstract: The DC current transformer is the core equipment of the HVDC transmission system. The rationality and accuracy of the field test system design are especially important for the DC transmission system. The causes of the error of the DC current transformer field test system were analyzed, and an improved on-site closed-loop test method for DC current transformer was proposed. The synchronous acquisition of the standard source analog quantity and the measured digital quantity was realized through the high-precision synchronization module, and the error caused by the delay was solved by this method. The current DC component was also extracted through the 18-bit high-precision A/D acquisition and the EMD algorithm, and a large number of harmonics was filtered, and the measurement accuracy of the test system was improved. The step source system for transient step response test of DC current transformer was designed, and the feasibility of the system was proved by experiments. The proposed improved DC current transformer closed-loop test system solves the delay error and reduces the harmonic error, which can improve the measurement accuracy of the test system. And as the EMD algorithm is simple and reliable, it has high engineering applicability.

Key words: DC current transformer; synchronous test; absolute delay; empirical mode decomposition(EMD); step response

近年来, 高压直流输电系统已广泛投入使用, 直流电流互感器作为直流输电系统测量、保护和控制的核心设备, 其在暂稳态工作时的准确性和可靠性在直流输电系统的安全稳定运行中起到至关重要的作用, 因此有必要对直流电流互感器进

行现场测试。目前直流电流测量装置根据其测量原理分为3类: 光电式、零磁通式和全光纤式。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、阶跃响应最大过冲、上升和趋稳时间等关键指标进行测试。

作者简介: 杨朋威(1989—), 男, 硕士, 工程师, Email: 1641238505@qq.com

针对直流电流互感器现场测试问题,国内外学者进行了相关研究,文献[1]设计了磁调制式直流电流比较仪,采用光纤同步,有一定的抗现场干扰能力。文献[2]系统对比了测差法、异地测量等多种现场测试方法的优缺点,但目前直流电流互感器现场测试系统发展尚不完善,存在延时、谐波等造成误差的情况。文献[3]采用GPS实现直流电流互感器的同步测试,但不能测试绝对延时时间。文献[4]采用小波变换对A/D采样后的数据进行处理,提高了电流直流分量的测量精度,但存在小波基的选取困难的问题,还需进行深入研究。

针对当前直流电流互感器现场测试系统存在误差的问题,本文提出了改进的直流电流互感器现场闭环测试方法,通过加装高精度同步模块解决延时同步问题,采用工程应用性较强的经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)滤除谐波分量,提高了直流电流互感器现场测试系统的测量精度。

1 基本理论

1.1 直流电流互感器延时同步问题

直流电流互感器从一次传感器获得模拟信号到通过以太网或FT3输出数字信号的过程中包括多段延时:一次传感器存在一次传变延时;一次传感器获得的模拟电压发送到远端模块需要进行数模转换;远端模块通过光纤将数字量电流信号传递给合并单元需要进行数据处理帧压缩,并且数据传送也存在延时;合并单元接受数据同时进行数据处理多路同步程序调度,然后进行数据发送,通过以太网或FT3输出,绝对延时时间构成如图1所示。绝对延时问题是所有设备特别是保护控制系统这种对实时性要求很高的系统设备的关键问题之一,因此本文从互感器应用的角度提出了确切的延时时间定义。

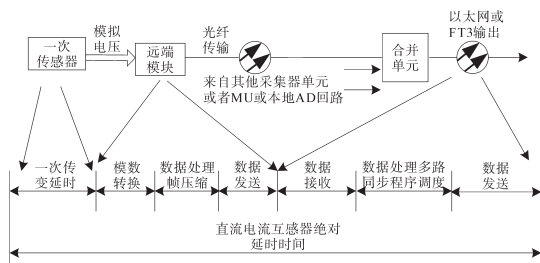


图1 直流电流互感器绝对延时时间构成

Fig.1 The absolute delay time composition of DC current transformer

1.2 直流电流互感器闭环测试装置设计

直流电流互感器闭环测试装置结构如图2所示,图中测试仪的电压输入为一次电流的标准输出,是模拟信号;通过FT3/光ETH输入测试仪的信号为被测直流电流互感器传输过来的数字量电流信号。标准的模拟信号通过信号调理输入A/D模块将模拟信号转换成数字信号。标准数字信号和被测数字信号都通过FPGA进行报文解析,然后将处理后的标准信号和被测信号一同输入PowerPC进行数据分析处理,计算被测互感器的直流和谐波准确度。

该测试仪通过高精度同步模块实现标准源模拟量和被测数字量的同步采集。如图2所示,标准的模拟信号在进行模数转换时就被打上精确的时标,之后标准数字信号和被测数字信号在进行FPGA报文解析和数据分析处理时也通过同步模块进行精确的时间标识,即实现了直流电流互感器的实时同步闭环测试。由于在数据接收和处理过程中均对数据进行了精确的时间标识,故在因互感器不同产生传输延时和数据处理延时不同的情况下,测试仪均可正确工作。

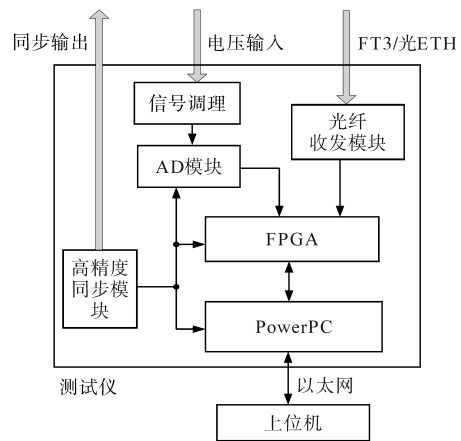


图2 直流电流互感器闭环测试装置系统结构图

Fig.2 Structure of DC current transformer closed-loop test device system

1.3 现场闭环测试系统误差分析

图3为现场测试系统简化模型。

如图3所示,一次电流为 I_c ,测试仪的电压输入为电流标准器获得的二次电流 I_1 ,经高准确度电流互感器和标准电阻器后获得的电压,经FT3/光ETH输入测试仪的为被测电流互感器传来的被测电流 I_c ,测试仪的输出为实际误差 ε_c 。实际误差的表达式为^[5]

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{|I_c| - |I_b|}{|I_b|} \times 100\% \\ &= \frac{\left(\frac{|I_c|}{|I_s|} - 1\right) - \left(\frac{|I_b|}{|I_s|} - 1\right)}{\left(\frac{|I_b|}{|I_s|} - 1\right) + 1} \\ &= \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_b}{\varepsilon_b + 1} \end{aligned} \quad (1)$$

其中

$$\varepsilon_c = \frac{|I_c|}{|I_b|} - 1$$

$$\varepsilon_b = \frac{|I_b|}{|I_s|} - 1$$

式中: ε_c 为被测通道的输出误差; ε_b 为标准通道的误差。

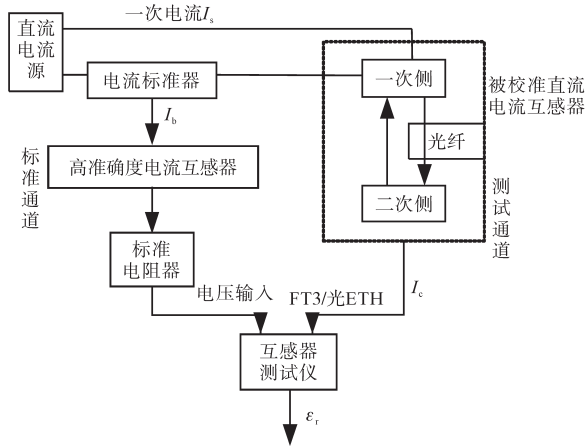


图3 现场测试系统简化模型

Fig.3 Simplified model of field test system

结合图2、图3和式(1)可知,测试系统误差的组成有3个方面:

1)被测通道引起的误差 ε_c 。由于直流电流源产生的一次电流存在波动性,且电流中含有一定的谐波,尤其在直流系统发生故障时,会产生电流阶跃现象,此时电流中会包含大量的谐波分量,导致直流互感器测量时会产生误差;电流互感器测得的信号通过光纤远距离传输存在延时误差。

2)标准通道引起的误差 ε_b 。首先,电流标准器的测量精度影响二次电流 I_b 的准确性,电流标准器的测量精度受工程现场磁场环境、电磁屏蔽等因素的影响;此外,高精确度电流互感器的测量精度和标准电阻器的精确性也是引起标准通道误差的重要原因;同被测通道一样,电流阶跃产生的谐波分量也会引起标准通道的测量误差。

3)互感器测试仪内部引起的误差。该误差

包括A/D转换模块的转换精度误差,FPGA的报文解析误差,PowerPC进行数据分析处理的误差。

针对延时产生的误差,所设计测试系统采用高精度同步模块,将标准的模拟信号、标准的数字信号及被测数字信号在做相应处理时均进行了精确的时间标识,因此可减小或忽略该误差的影响。

通过上述误差分析可以发现,忽略延时产生的误差后,测试仪内A/D模块的转换精度以及系统发生故障产生电流阶跃时的测量精度对直流互感器测试系统的准确度十分重要。对于测试仪内的A/D模块,采用高精度A/D采集和EMD滤波结合的方法来提高转换精度,设计相应的阶跃源对直流电流互感器进行暂态阶跃响应测试,下面对此进行详细介绍。

1.4 基于高精度A/D采集和EMD的直流分量提取

针对现场测试环境产生的噪声干扰、电磁干扰使A/D采样模块误差加大的问题,采用18位高精度A/D实现信号采集,并对采样后的数据进行EMD滤波,提高采样信号的准确度。

EMD滤波的具体步骤如下:

1)先根据信号的极大值点和极小值点求出其上包络线和下包络线的平均值为

$$m = \frac{v_1(t) + v_2(t)}{2} \quad (2)$$

式中: $v_1(t)$ 、 $v_2(t)$ 分别为上包络线和下包络线。

2)将时域采样数据 $s(t)$ 和 m 的差值记为 h ,即

$$s(t) - m = h \quad (3)$$

3)把 h 看做新的 $s(t)$,重复步骤1)和2),直到 h 满足固有模态函数(intrinsic mode function, IMF)的两个条件为止,记作:

$$c_1 = h \quad (4)$$

4)将 c_1 看做一个IMF,记作:

$$s(t) - c_1 = r \quad (5)$$

并将 r 看做新的 $s(t)$,重复步骤1),2),3),将以后得到的IMF依次记为 c_2, c_3, \dots ,直到 r 呈现单调趋势时停止,于是有:

$$s(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r \quad (6)$$

即把原信号分解为 n 个IMF c_1, c_2, \dots, c_n 和一个剩余分量 r ,用流程图表示如图4所示。

由于EMD分解结果中每个固有模态函数的特征时间尺度不是在分解前事先给定的,而是算法根据信号的特征提取的,因此计算的冗余度

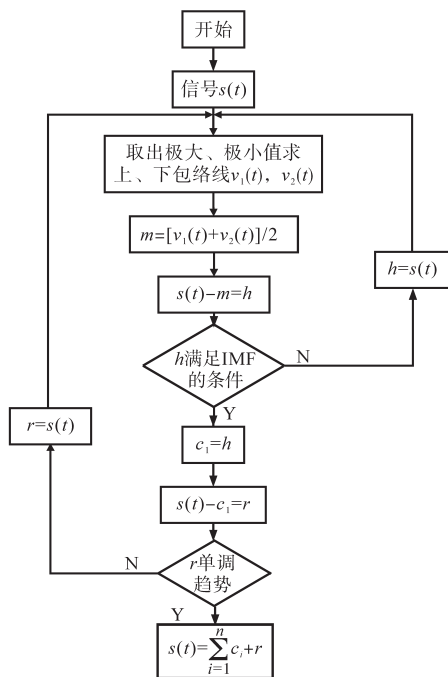


图4 EMD分解流程图

Fig.4 The process of EMD decomposition

小、计算效率高。而且由上述的分解计算过程可见,整个经验模式分解不需要复杂的数学计算,算法容易实现,适用于工程应用^[6]。

1.5 阶跃源设计

在直流系统遭受扰动或者发生故障时,直流电流会发生阶跃现象,产生大量的谐波分量,较稳态运行时更多。因此当直流输电系统处于此类暂态过程时,要对直流电流互感器的测量精度进行单独测试。此时测试系统的直流电源要能够模拟系统暂态过程中产生的阶跃电流。本文采用的阶跃源系统结构图如图5所示。

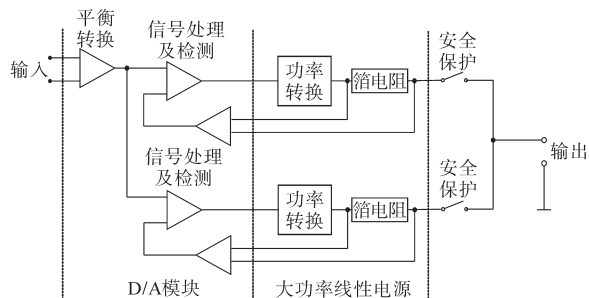


图5 直流电流互感器阶跃特性仿真阶跃源系统结构

Fig.5 Step source system structure of DC Current transformer step characteristic simulation

阶跃源系统的输入是由PowerPC生成的阶跃电流数字信号。该信号通过D/A模块转换成模拟小信号,经大功率线性电源转换成大的模拟电流。D/A模块由平衡转换模块和信号处理及检测模块组成,信号处理及检测模块为具有超低零

漂、温漂的运算放大器。面对电力系统较强的电磁干扰,平衡模块可以减小运算放大器因干扰产生的共模噪声。大功率线性电源由功率转换模块和箔电阻组成。功率转换模块采用MOS功率器件,箔电阻为低温漂高精度并且电感特性很弱的检流电阻。整个阶跃源系统还配有过热过载保护以保证系统安全。

2 实例分析

2.1 工程概况

以某特高压直流输电线路上的直流电流互感器为研究对象,该系统的额定电压为±800 kV,额定电流为6.25 kA,双极额定输送功率为10 000 MW,线路全长为1 234 km。送端工作在整流状态,受端为分层结构,高压阀接500 kV交流系统,低压阀接1 000 kV交流系统,工作在逆变状态,系统结构如图6所示。

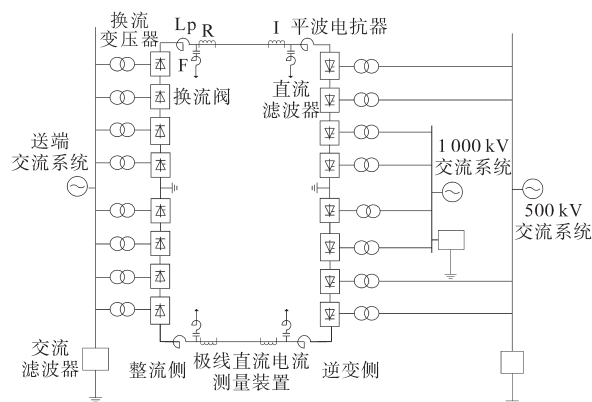


图6 特高压直流输电系统结构图

Fig.6 Structure diagram of UHVDC transmission system

所研究直流电流互感器位于直流输电工程中直流线路上靠近换流阀处,为光电式,它主要由一次传感器(分流器和罗氏线圈)、远端模块、光纤绝缘子以及合并单元组成,如图7所示^[7]。

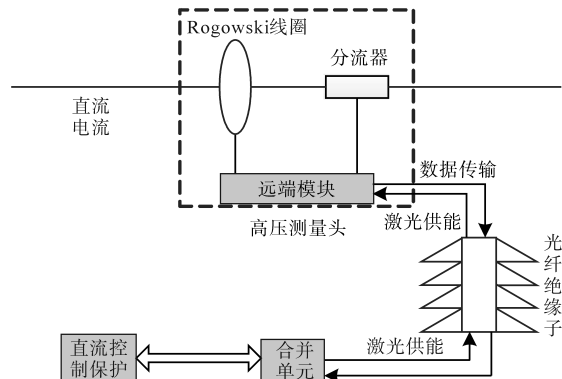


图7 光电式直流电流互感器结构图

Fig.7 Structure diagram of photoelectric DC current transformer

2.2 稳态测试

以该特高压直流输电线路电流为闭环测试系统的一次电流。被测直流电流互感器的采样频率为 50 kHz。采用EMD对A/D模块转换后的数字信号进行分解,得到如图8所示波形。

图8中, i 为未经EMD分解的原始数字信号, $IMF_1 \sim IMF_5$ 为谐波信号分量,其中 IMF_1 分量的频率最高,后面随之递减,即随着分解层数的增加频率逐渐下降, i_{res} 为经EMD分解后提取的直流量,同 i 相比,提取后直流电流谐波含量大大减少。

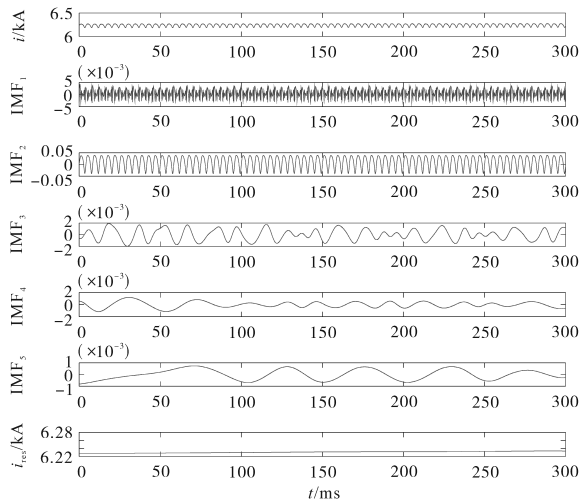


图8 利用EMD提取直流量

Fig.8 Extraction of DC components by EMD

对标准值为 6 250 A 的一次电流进行测试。首先用普通的互感器测试系统进行 10 次数据测试,得到改进前的电流测量值;再用选取 18 位高精度 A/D 转换模块和 EMD 分解改进的互感器测试系统进行 10 次数据测试,得到改进后的电流测量值。测试结果如表 1 所示。

表1 直流电流互感器测试系统量测值

Tab.1 Measurement of DC current transformer test system

| 标准值/A | 改进前/A | 改进后/A |
|-------|-----------|-----------|
| 6 250 | 6 245.348 | 6 247.853 |
| 6 250 | 6 292.079 | 6 250.148 |
| 6 250 | 6 252.418 | 6 251.716 |
| 6 250 | 6 250.427 | 6 250.482 |
| 6 250 | 6 250.574 | 6 259.418 |
| 6 250 | 6 248.005 | 5 264.749 |
| 6 250 | 6 250.148 | 6 250.874 |
| 6 250 | 6 249.015 | 6 249.416 |
| 6 250 | 6 246.754 | 6 248.452 |
| 6 250 | 6 230.487 | 6 251.571 |

从表1中可以看出,直流电流互感器测试系统改进前出现了 6 292.079 A 或者 6 230.487 A 这样误

差较大的不良数据,采用EMD分解后滤除了大量的谐波分量,虽然不能完全达到标准值,但量测值都趋近于标准数据,避免了误差较大数据的出现。

2.3 暂态阶跃响应测试

以该特高压直流输电系统为例,当直流线路发生过渡电阻为 0 Ω 的接地短路故障时,实际故障波形如图9所示。

从图9中可以看出,当直流输电系统发生短路故障时,电流阶跃变化量最大可以控制在 5 000 A 以内,本文所设计的阶跃源通过线圈配件可以输出最大达 6 000 A 的电流,满足幅值要求。

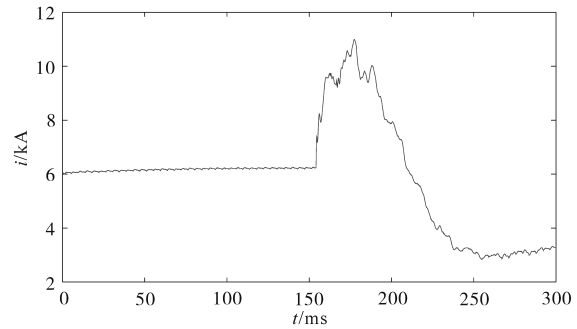


图9 直流输电线路故障电流波形

Fig.9 Fault current curve of DC transmission line

直流电流互感器阶跃特性测试系统仍采用图3所示闭环测试系统。与稳态测试不同的是此时的直流电流源采用图5结构的阶跃源。在进行阶跃响应测试时,为方便操作,采用幅值为 200 A 的阶跃电流信号。未经EMD改进和经过EMD改进的直流电流互感器闭环测试结果如图10和图11所示。

根据图10和图11波形数据可以得到标准互感器和被测直流电流互感器暂态阶跃特性对比分析如表2所示。

表2 标准互感器和被测互感器阶跃响应特性对比

Tab.2 Comparison of step response characteristics between standard transformer and measured transformer

| | | 上升时间/ μ s | 最大过冲/% | 暂态延时/ μ s |
|-------|----|---------------|--------|---------------|
| 未EMD | 标准 | 415.5 | 13.8 | - |
| | 改进 | 493.1 | 3.1 | 77.6 |
| EMD改进 | 标准 | 440.0 | 13.7 | - |
| | 改进 | 490.8 | 3.8 | 50.8 |

从表2中可以看出,被测互感器的上升时间略长于标准互感器,最大过冲低于10%,满足标准要求。相对于标准互感器,被测互感器由于需要进行数据处理、传输距离远等原因存在近 100 μ s 的延时,通过与标准源对比,经过EMD改进后

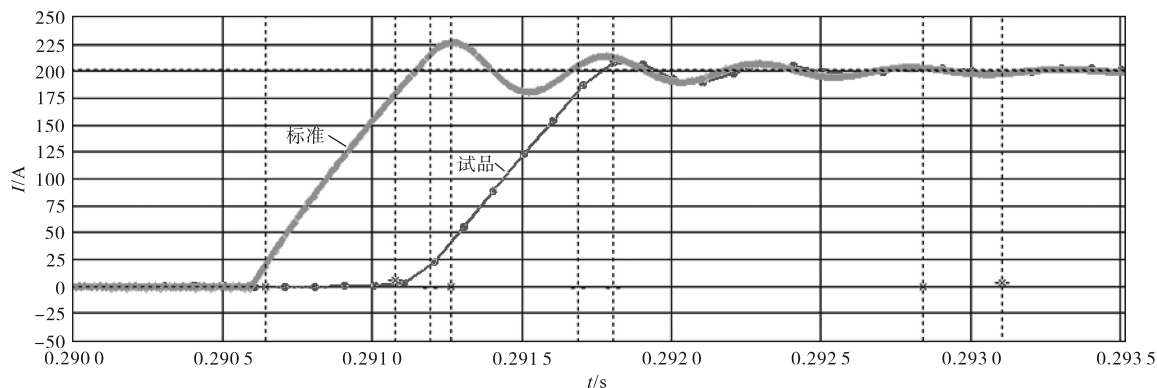


图10 EMD改进前直流电流互感器暂态阶跃响应曲线

Fig.10 Transient step response curve of DC current transformer without EMD improvement

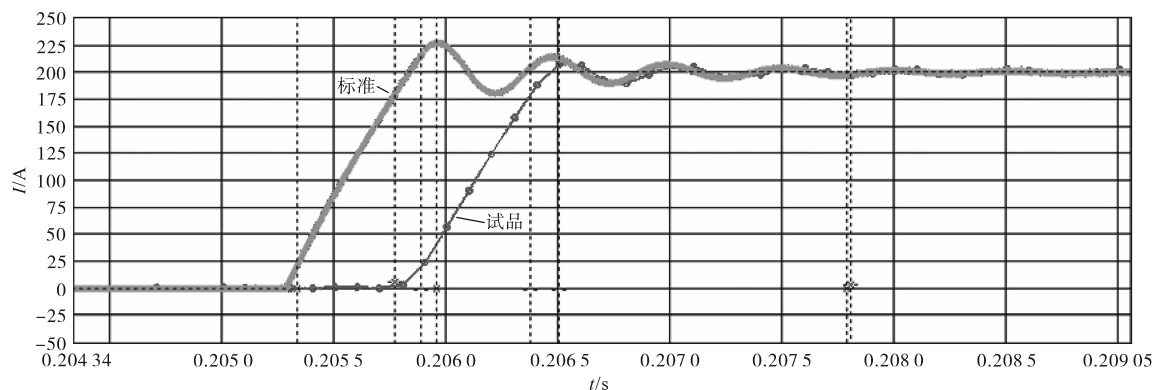


图11 EMD改进后直流电流互感器暂态阶跃响应曲线

Fig.11 Transient step response curves of DC current transformer improved by EMD

的测试方法,并未增加测试暂态延时,因此具有一定的工程实用性。

3 结论

设计了直流电流互感器现场闭环测试系统,通过在测试系统内加装高精度同步模块解决了延时传递问题。采用EMD方法对电流直流分量进行提取,提高了测量数据的准确性,并且由于该方法计算过程简单高效,适应于工程应用。设计了针对暂态阶跃响应测试的阶跃源系统,试验表明可以满足阶跃响应测试要求。

参考文献

[1] 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-

5235,5404.

- [2] 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(s1):119-123.
- [3] 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.
- [4] 朱梦梦,束洪春,罗强,等.换流站直流电流互感器现场测试的关键技术[J].高电压技术,2019,45(8):2522-2530.
- [5] 柏航.高压直流电流互感器现场校准抗干扰及不确定度研究[D].武汉:华中科技大学,2016.
- [6] 刘晨光,王宗林.一种基于经验模态分解的梁式桥冲击系数检测计算方法[J].低温建筑技术,2019,41(9):43-45,51.
- [7] 杨忠州,谢婷婷,冯建华,等.高压直流电流互感器稳态误差校验技术研究[J].高压电器,2018,54(9):142-147.

收稿日期:2019-12-03

修改稿日期:2019-12-19