

9-14-2020

Research and application of field calibration method for the DC electronic voltage transformer in converter stations

Mengmeng ZHU

Kunming University of Science and Technology , Kunming 650051 , China ; Electric Power Research Institute , YunnanPower Grid Co ,Ltd , Kunming 650217 , China

Quancong ZHU

Electric Power Research Institute , YunnanPower Grid Co ,Ltd , Kunming 650217 , China

Hongchun SHU

Kunming University of Science and Technology , Kunming 650051 , China

Min CAO

Electric Power Research Institute , YunnanPower Grid Co ,Ltd , Kunming 650217 , China

Jun SUN

Wuhan Pandian Electrical Technology Co , Ltd , Wuhan 430108 , China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

ZHU, Mengmeng; ZHU, Quancong; SHU, Hongchun; CAO, Min; SUN, Jun; DONG, Jun; SONG, Jian; and TIAN, Xincui (2020) "Research and application of field calibration method for the DC electronic voltage transformer in converter stations," *Journal of Electric Power Science and Technology*: Vol. 35: Iss. 3, Article 25.

DOI: 10.19781/j.issn.16739140.2020.03.025

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol35/iss3/25>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

Research and application of field calibration method for the DC electronic voltage transformer in converter stations

Authors

Mengmeng ZHU, Quancong ZHU, Hongchun SHU, Min CAO, Jun SUN, Jun DONG, Jian SONG, and Xincui TIAN

换流站直流电子式电压互感器现场校准方法 研究与工程应用

朱梦梦^{1,2}, 朱全聪², 束洪春¹, 曹敏²,
孙军³, 董俊¹, 宋健¹, 田鑫萃¹

(1. 昆明理工大学, 云南 昆明, 650051; 2. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明, 650217;
3. 武汉磐电科技股份有限公司, 湖北 武汉, 430108)

摘要: 由于缺乏相应试验设备、关键技术及检测规程, 目前应用较为广泛的直流电子式电压互感器现场准确度校准试验未充分开展。在此背景下, 首先分析其原理、传变机理及误差源, 再针对换流站合并单元无同步信号端口接入的情况, 提出一种异地同步现场校准方案, 并开展了高准度的现场校准系统研制及不确定度分析。最后, 将所提方法应用于永富直流工程现场进行工程验证, 该案例可为中国换流站直流电子式电压互感器现场校验提供参考依据。

关键词: 现场校准; 采样延时; 同步信号; 闭环; 不确定度

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.03.025 中图分类号: TM89 文章编号: 1673-9140(2020)03-0179-06

Research and application of field calibration method for the DC electronic voltage transformer in converter stations

ZHU Mengmeng^{1,2}, ZHU Quancong², SHU Hongchun¹, CAO Min², SUN Jun³,
DONG Jun¹, SONG Jian¹, TIAN Xincui¹

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China; 2. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China; 3. Wuhan Pandian Electrical Technology Co., Ltd., Wuhan 430108, China)

Abstract: Due to the lack of corresponding test equipment, key technologies and test procedures, the field accuracy calibration test is not fully carried out for the DC electronic voltage transformer (DCEVT) which is widely used in the power grid at present. Under this circumstance, its theory, transmission mechanism and error source are completely analyzed firstly. Then, for the fact that there is no synchronous signal port accessing in the converter station merging unit. A scheme of synchronous field calibration in different places is proposed, and the development of high accuracy field calibration system and uncertainty analysis is carried out. The proposed method is verified in Yongfu DC project, which provides a reference for the field calibration of DC electronic voltage transformer in converter station in China.

Key words: field calibration; sampling delay; synchronization signal; closed loop; uncertainty

收稿日期: 2018-06-02; 修回日期: 2018-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(51667010, 51807084)

通信作者: 朱梦梦(1986-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事交、直流互感器检测与故障诊断技术研究; E-mail: 396923800@qq.com

直流电子式电压互感器(DC electronic voltage transformer, DCEVT)作为高压直流输电系统的重要一次设备,对直流输电系统以及直流换流站等变电设备的安全稳定运行起着极其重要作用^[1-6]。为确保 DCEVT 测量的准确和可靠性,需要在其出厂时和现场进行准确度的校准工作,但是由于直流电子式电压互感器本体一般安装在直流场,与保护控制室的二次部分相距较远,给现场校准试验带来了一定难度。

文献[7]详细阐述直流分压器及相关的测量系统的构成及现场试验方法,提出直流分压器低压侧参数的调整依据,并指出由于受制于特高压直流电压源以及高压直流标准分压器制造技术条件,因此,在现场进行额定电压下的校验就成为了技术难题;文献[8]提出一种模拟量输出型直流电压互感器的现场校准方法,采用 GPS 实现同步下的校准,但未开展 DCEVT 现场同步校准试验;文献[9]提出基于异地 GPS 与智能数字变电站同步测量和数据采集以及多途径数据远传技术的直流互感器现场校验技术方案,但未涉及国内换流站目前应用较为广泛的 FT3 通信协议,而且未开展 DCEVT 的现场校准试验,所述校验方法距离现场工程应用还有一定距离。可见,目前对 DCEVT 现场校准还停留在采用开环校验系统,此种测试方法同步准确度低、可靠性差,往往满足不了现场校准要求。

该文针对 DCEVT 采样率和协议种类多、合并单元无对时信号输入的情况,提出一种现场校准方法,构建异地同步闭环现场校准系统,并在现场开展校准试验。

1 DCEVT 原理及现场校准方法

1.1 DCEVT 传输链路及误差来源分析

±500 kV 永仁至富宁直流工程系统结构如图 1 所示,换流站中安装了 4 台 DCEVT,分别安装在极线 and 中性母线各 2 台,作为直流电压测量的关键装置,其基本结构如图 2 所示^[10]。

实际上,DCEVT 通过精密电阻分压器传感直流一次电压,采用并联的电容来确保频率特性。二

次电压输出一般为 50 V 左右,然后电阻盒(低压分压板)将此电压转换为多个独立信号传送给不同的远端模块进行处理,输出私有协议的数字信号并通过光纤传送到合并单元(MU)进行处理,最后输出 FT3 协议数据提供给二次控制保护系统使用。

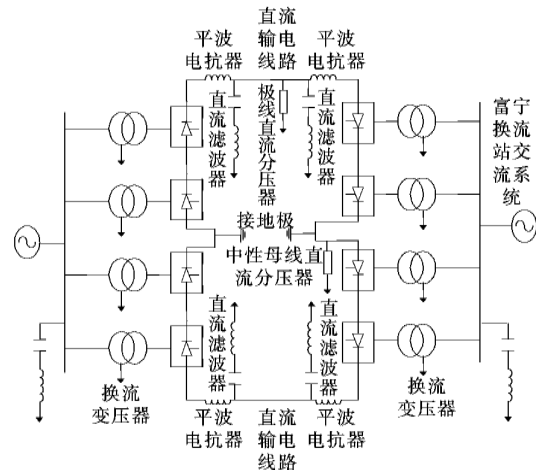


图 1 系统结构

Figure 1 System structure diagram

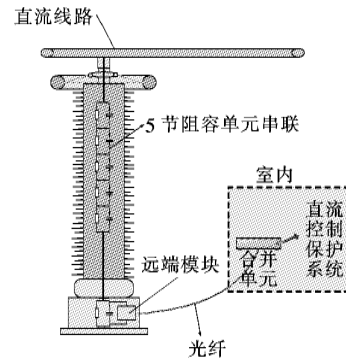


图 2 基本结构

Figure 2 Basic structure diagram

从图 2 可以看出,DCEVT 在一次电压传变到 MU 输出信号时,主要误差源有:①一次分压器产生的误差;②电阻盒的二次分压引起的误差;③远端模块的滤波及信号调理、ADC 引入的误差;④MU 插值同步及系数调整等带来的误差。

DCEVT 整个传输链路不仅包含了幅值误差,还包含了采样延时。尤其是分压器在长期运行下,暂态高电压会导致二次分压板上电阻阻值发生漂移,引起测量异常。同时,远端模块的滤波及信号调理回路元器件长时间运行,性能和参数会发生变化,

也会引起测量误差。综上所述问题给 DCEVT 高准确度设计提出了很大的挑战。

1.2 现场校准方法研究

在换流站现场中,控保系统不依赖于同步信号而运行,故合并单元一般不接同步对时信号,且二次输出一般距离直流分压器约 100 m,因此该文提出如图 3 所示的直流电子式电压互感器现场同步闭环校准方法。高稳定直流电压源给标准直流高压分压器、被校直流电压互感器提供一次直流电压,并产生可由直流电子式互感器校验仪进行比对分析的标准信号和被校信号,其中标准直流高压分压器二次输出标准模拟量信号,被校信号由保护室的 MU 输出。通过光纤从 MU 中引出带有 FT3 协议的信息量,这样使得整个校准系统能够完成闭环测试,具备极高的精度和准确性。

由图 2 可以知道,直流分压器经过 2 次分压、A/D 转换以及插值同步、MU 系数调整等,会产生采样延时,一般通过如图 3 所示基于稳态电压的延时测试方法。图 4 为延时测试原理,在 DCEVT 一次侧施加稳定工频电压,校验仪同步检测 MU 输出的基波相位和一次侧电压基波相位,结合当前实测频率,由相位差换算出绝对延时时间,这样就通过测量工频电压相位差实现直流电子式电压互感器延时测试。

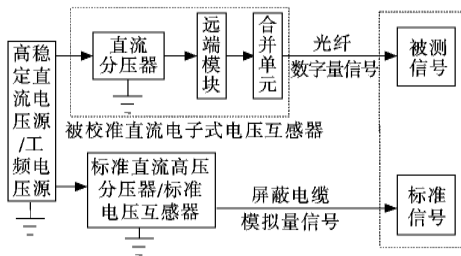


图 3 现场校准方法

Figure 3 Field calibration method

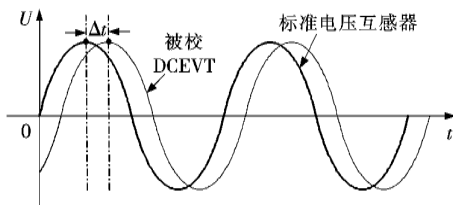


图 4 延时测试原理

Figure 4 The time delay testing principle

2 校准系统的关键设备研制及不确定度分析

2.1 基于异地同步、多通信协议解析的校验技术

根据图 3 的校准方法,该文设计高准确度的现场校准系统,如图 5 所示,由直流电子式互感器校验仪、标准直流高压分压器及直流电压源等组成。

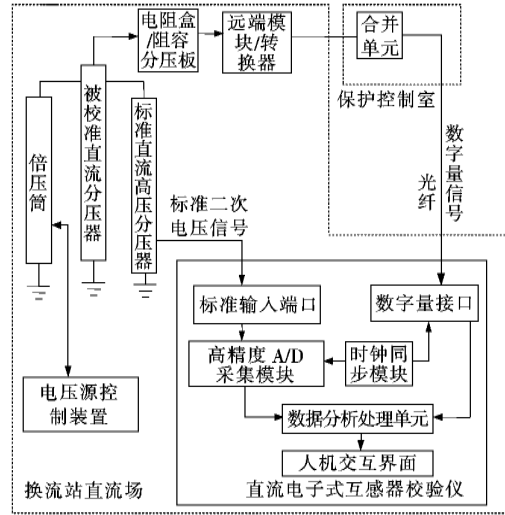


图 5 现场校准系统

Figure 5 Field calibration system

现场校准时,电压源控制倍压筒产生高稳定直流一次电压提供给标准直流分压器和被校 DCEVT。标准二次电压信号进入校验仪的标准输入端口,通过六位半的数表完成高精度 A/D 转换。校验仪数字量接口接收 MU 输出的 FT3 数字报文并进行解析,获得被校互感器的数据。时钟同步模块确保标准信号和被校信号同步采集,然后将测量数据发送到数据处理分析单元进行数据对比计算,比值误差公式:

$$f = \frac{(U_c - U_p)}{U_p} \times 100\% \quad (1)$$

式中 U_c 为被校 DCEVT 的值; U_p 为标准值。上述研制的现场校准系统能够完成 DCEVT 幅值测量、比值误差计算等工作。

2.2 标准直流高压分压器

现场校准 0.2 级的 DCEVT,一般标准器的准确度等级应达到 0.05 级,该文采用基于电阻分压原理的标准直流高压分压器^[8,11]。影响准确度等级的 2 个关键因素:一是分压电阻的阻值变化影响,通过

选取合适的电阻型号和不同的配置使用来确保精度；二是电晕放电以及泄漏电流造成的测量误差，一般通过均压设计以及合适的均压罩结构减小电晕放电带来的误差，采用测量层电阻和屏蔽层电阻不仅可保证均压，也可以减小旁路漏电流带来的影响。

结合以上分析研制的±500 kV 标准直流高压分压器，为了满足现场校准需要，标准直流分压器的二次额定输出电压为 5、50 V 共 2 个档位，其分压比为 $10^5 : 1$ 和 $10^5 : 10$ 。在实验室进行标准直流分压器的校准，其结果如表 1、2 所示，其中分压比准确度满足 0.05 级要求，可作为直流高压标准使用。

表 1 二次输出为 50 V 时标准分压器校准结果

Table 1 The calibration results of the standard voltage divider when the two output is 50 V

档位	外施电压/kV	差值电压 $\Delta U(\text{mV}) = U(\text{检}) - U(\text{标})$	分压比
$10^5 : 10$	50	+0.662	10 001.3/1
	100	+0.659	10 000.7/1
	150	+0.569	10 000.4/1
	200	+0.495	10 000.2/1
	250	+0.460	10 000.2/1
	300	+0.620	10 000.2/1
	350	+0.275	10 000.1/1
	400	-0.538	9 999.9/1
	450	-0.725	9 999.8/1
500	-0.737	9 999.9/1	

表 2 二次输出为 5 V 时标准分压器校准结果

Table 2 The calibration result of the standard voltage divider when the two output is 5 V

档位	外施电压/kV	差值电压 $\Delta U(\text{mV}) = U(\text{检}) - U(\text{标})$	分压比
$10^5 : 1$	50	+0.109	100 022/1
	100	-0.002	100 000/1
	150	-0.027	99 998/1
	200	-0.040	99 998/1
	250	-0.079	99 997/1
	300	-0.144	99 995/1
	350	-0.221	99 994/1
	400	-0.188	99 995/1
	450	-0.359	99 992/1
	500	-0.501	99 990/1

2.3 高稳定度直流电压源

高稳定度直流电压源工作原理如图 6 所示。其

中脉冲调宽功率滤波中包含两级稳压电路，第一级稳压电路作为初始稳压电源，将滤波后带有较大纹波的直流电压稳压成纹波很小的直流电压作为第二级稳压电路的输入电压，然后第二级脉冲调宽稳压电路为精密稳压电源且具有很高的电压输出精度，输出的电压信号与调节信号比对后，得到的误差信号经过加权控制，使得第一级脉冲调宽稳压电路稳定到给定电压附近，再由第二级脉冲调宽稳压电路将输出电压稳定到给定电压。

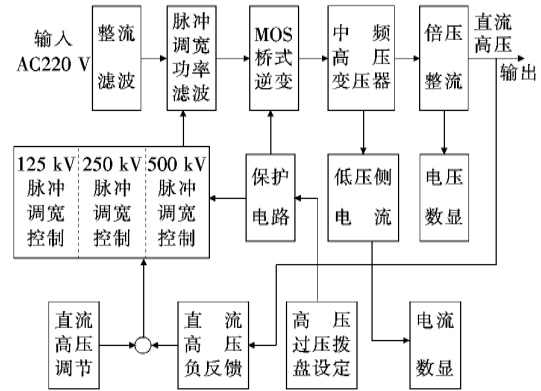


图 6 工作原理

Figure 6 Working principle diagram of high stability DC voltage source

根据式(2)、(3)进行直流电压源稳定度计算

$$S_{\max} = \frac{|U_{\max} - U_0|}{U_0} \times 100\% \quad (2)$$

$$S_{\min} = \frac{|U_0 - U_{\min}|}{U_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中 U_0 为该测试点 0 min 的电压值， U_{\max} 和 U_{\min} 分别为在规定的测试时间内，对某一测试点测得的最大值和最小值，最后直流电压源稳定度在两者取大的一项。为了更准确地测试直流电压源的稳定性，在高稳定直流源输出端分别连接 500 kV/1 mA、500 kV/2 mA、500 kV/4 mA 恒定负载（包括标准直流分压器）。标准直流分压器变比用 10 000 : 1 档，分压器输出端接 Agilent 公司 6 位半高精度万用表 34401A（不加任何滤波措施）。高稳定直流电压源接通电源，预热 5 min 后开始按各档逐点进行测试。每测试点连续测试 3 min，仪表自动测量为连续测量，自动保持所记录到的最大值及最小值，并根据式(2)、(3)进行计算，测试结果显示各点稳定度均优于 0.1%。

2.4 现场校准系统不确定度分析

根据图 5 现场校准系统,分析出影响 DCEVT 校准误差的因素有^[12]:①校验仪准确度,其中关键是 A/D 转换精度;②在现场情况下标准器的准确度;③标准二次电压通过 10 m 左右的电缆接入到校验仪输入端口,带来测量回路受电磁干扰引起的误差;④由数据处理计算、同步精度及电压源性能所引起的测量重复性。

综上所述,校准系统采用的同步触发测量技术使得对校准试验用直流电源的稳定性要求大大降低,降低了电压源短时波动对误差的影响,并且实现标准数据和被校 DCEVT 数据的同步控制采集和数据处理,降低了试验数据处理的工作量,提高了现场工作效率。

3 现场校准试验及数据分析

3.1 现场校准试验及分析

根据现场校准的需要,建立校准试验环境和试验方法,构建现场闭环校准系统。为了确保现场校验时标准直流高压分压器以及直流电压源的准确度,由于受技术和设备条件综合因素,该文采用计量器具核查的方法进行,某电科院建立了 0~200 kV 的直流分压器标准,即通过实验室核查数据来确保此次校准试验中标准直流分压器的准确度和可信度,如图 7 所示。

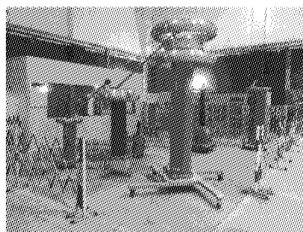


图 7 核查试验

Figure 7 Verification test of divider

其中,永富直流工程富宁换流站极 II 线路 DCEVT 安装前的精度试验结果如表 3 所示。

在换流站现场进行校准时,将二次信号进行必要的隔离,做好安全措施。具体的流程如图 8 所示,图 9 为现场校准试验。

表 3 试验结果

额定电压百分比	比值误差
10	+0.108
20	+0.029
80	-0.025
100	-0.029

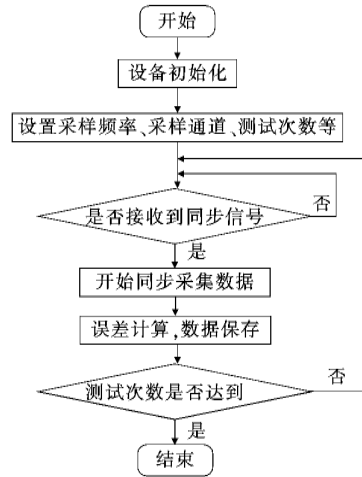


图 8 校准流程

Figure 8 Calibration process



图 9 现场校准试验

Figure 9 Field calibration test of DCEVT

极 II 极线 DCEVT 在富宁换流站正常运行一年后,按照预试定检规程和换流站运维人员的要求,在现场进行了 10% 额定电压下现场同步校准试验。通过 10 次比值误差计算测量重复性,标准器和校验仪带来不确定度分量可以从校准证书获取,结合现场校验回路干扰引入的分量,计算出扩展不确定度,如表 4 所示^[13-14]。

表 4 校准结果

额定电压百分比/%	比值误差/%	扩展不确定度 U
10	+0.099	0.66×10^{-3}

4 结语

该文提出了一种直流电子式电压互感器异地同步现场校准方案,研制了现场同步校准系统,解决了直流电压分量难以准确提取以及换流站 DCEVT 无同步信号校验难题,并在现场进行校准试验和不确定度分析。后续的研究重点应开展频率和阶跃响应试验,建立完善的直流电压互感器现场校准方法以及量值溯源体系。

参考文献:

- [1] 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(4):119-123.
LI Dengyun, LEI Min, XIONG Qianzhu, et al. Error characteristic analysis of digital output type DC voltage transformer [J]. Modern electronics technique, 2018, 41(4):119-123.
- [2] 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+63.
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+63.
- [3] 庞福滨,刘珂,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.
- [4] 林湘宁,相艳会,全江涛,等. HVDC 单极大地运行情况下换流变压器直流偏磁建模仿真[J]. 电力科学与技术学报,2013,28(1):31-35.
LIN Xiangning, XIANG Yanhui, QUAN Jiangtao, et al. Simulation analysis of convert transformer DC-biasing under HVDC system in ground return operation[J]. Journal of Power Science and Technology, 2013, 28(1):31-35.
- [5] 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.
ZHU Mengmeng, SHU Hongchun, LUO Qiang, et al. Key technology on field Tests for DC current transformer of converter station[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8):2522-2530.
- [6] 张天,龚雁峰. 特高压交直流电网输电技术及运行特性综述[J]. 智慧电力,2018,46(2):87-92.
ZHANG Tian, GONG Yanfeng. Research on transmission technologies and operational performance of UHV AC/DC power grid in China[J]. Smart Power, 2018, 46(2):87-92.
- [7] 彭晓莺,金涛. 高压直流分压器的现场试验[J]. 湖北电力,2003,28(S1):3-5.
PENG Xiaoying, JIN Tao. Testing of DC voltage divider on site[J]. Hubei Electric Power, 2003, 28(S1):3-5.
- [8] 李前,章述汉,李登云,等. ± 500 kV 直流电压互感器校准技术试验分析[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 DCPT[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(11):2856-2862.
- [9] 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.
- [10] Marx R. 100kV DC voltage standard divider of the shielded type [C]//Conference on Precision Electromagnetic Measurements, Conference Digest, CPEM 2000, Sydney, NSW, Australia: IEEE, 2000.
- [11] JJG 1007—2005, 直流高压分器检定规程[S].
- [12] 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.
- [13] JJF 1059. 1—2012, 测量不确定度评定与表示[S]. 2013.
- [14] 毛艳,李庆峰,李毅,等. 1000 kV 直流高压分压器的比对与不确定度评定[J]. 电网技术,2012,36(7):38-42.
MAO Yan, LI Qingfeng, LI Yi, et al. Intercomparison and uncertainty evaluation of 1000 kV DC high-voltage divider[J]. Power System Technology, 2012, 36(7):38-42.