

±500 kV 换流站直流电流互感器现场校准装置与技术

周一飞

(国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072)

摘要: 随着中国超高压直流输电工程大量建成并投入商运,作为关系到直流输电系统稳定、安全、可靠运行的关键测量设备之一的直流电流互感器,目前主要依赖进口,并且还比较缺乏自主的产品性能检测手段和设备,因此,目前无论在换流站的投运前,还是在运行检修时,对其进行性能考察都比较困难,或成本很高,从而导致了难以准确掌控和把握该类型直流测量设备真实的运行状况。所提的直流互感器现场校准用设备与技术,通过在实际直流工程现场进行实际应用,证明了其有效性和实用性,并在实际应用中取得了良好的效果。

关键词: 直流输电; 直流电流互感器; 高精度直流电流比较仪; 高稳定度直流电流源; 无线同步采集装置

Abstract: With the development of HVDC transmission projects which have been completed and put into commercial operation, the application of direct current transformer which is one of key measuring equipment for the stable, safe and reliable operation of DC transmission system will be increasingly widespread. But it mainly depends on the import, and there lacks independent test method and equipment for product performance. Therefore, at present, whether before commissioning of converter station or during operation maintenance, it is difficult to do the performance investigation or the cost is high, which results in the fact that it is hard to accurately control and grasp the real operation conditions of this type of DC measurement equipment. The proposed field test equipment and technology for DC transformer have proved to be effective and practical by actual applications in DC projects, and the good effect has been achieved in practical application.

Key words: DC transmission; DC current transformer; high-precision DC current comparator; high-stability DC current source; wireless synchronous acquisition device

中图分类号: TM835 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)06-0050-05

0 引言

超特高压直流输电技术的发展起源于20世纪60年代。瑞典查尔穆斯理工(Chalmers)大学于20世纪60年代中期开始着手研究超、特高压(±750 kV)输电线路等工作。此后,欧洲的前苏联、南美洲的巴西等国也投入到超特高压输电工程的研究和工程实践工作中来^[1]。IEEE(美国电气与电子工程师协会)和CIGRE(国际大电网会议)均在20世纪80年代中后期指出^[2]:根据已有技术和运行经验,±500 kV、±800 kV均是合适的直流输电电压等级^[3]。中国历时数年对高压直流输电的电压等级多方研究论证并进行不断技术攻关,同时考虑到对直流输电技术的研发水平和直流设备的研究及生产能力,坚定了必须明确一个特高压直流输电等级作为方向,并最终锁定±800 kV为中国特高压直

流输电的标称电压^[4]。

直流互感器是直流输电系统的重要一次设备^[5],为系统的控制和保护提供准确可靠的测量信息,其运行可靠性和测量准确性直接关系到直流输电系统的安全稳定运行^[6]。为了开展直流换流站电流传感器的现场校准,需研究现场校准用电源的技术要求、适用于现场校准用的标准装置类型和结构、测量线路和误差处理方法及大电流计量标准装置的校准技术^[7]。目前已投运的换流站采用的直流互感器大部分均为进口,国产化水平偏低^[8],在实际运行中,部分换流站的直流互感器多次出现故障,有些故障直接导致了直流系统的单极闭锁。然而目前换流站用直流互感器一般只进行过出厂校准试验,由于缺乏相应的试验手段和试验设备,且无相关直流互感器标准和技术监督规程可依,直流互感器在国内进行现场校准试验和例行校准的条件十分匮乏。

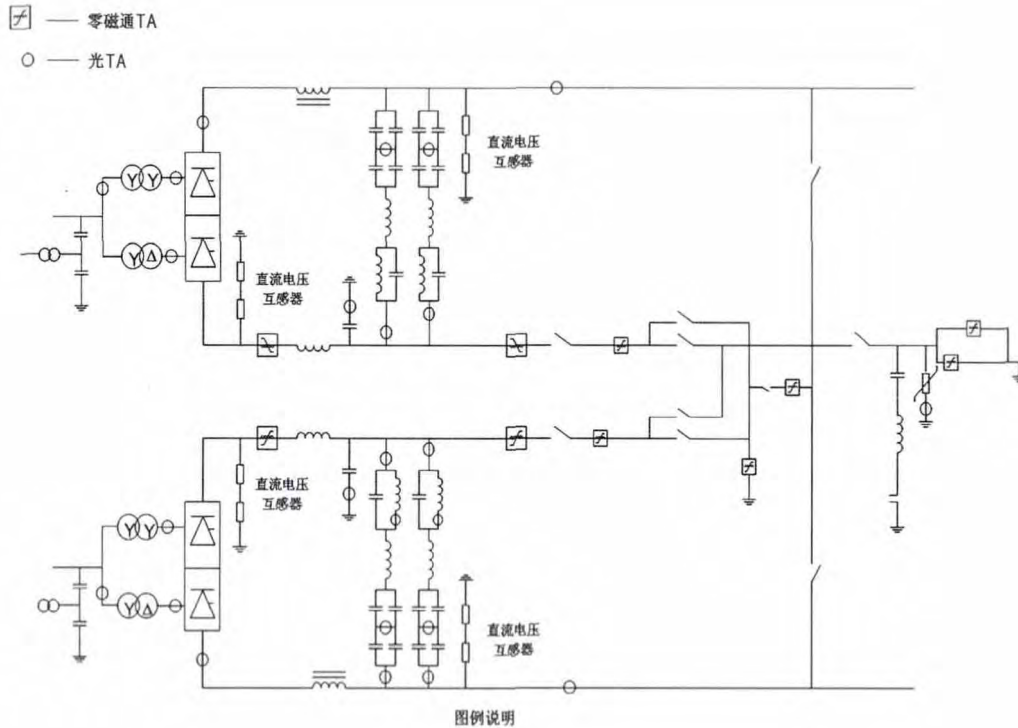


图1 换流站直流部分接线图

1 直流换流站中直流电流互感器概况

目前已投运换流站使用的直流电流互感器按原理分为光电流互感器(OTA)与零磁通直流电流互感器(零磁通TA),它们的特点不同,TA易于解决绝缘的问题,零磁通TA的准确度比较高,因而将它们应用于换流站不同位置。OTA主要用于直流阀厅内极线、直流场极线以及直流滤波器高压侧回路的电流测量。零磁通式直流电流互感器用于阀厅内直流中性线、直流场中性线以及直流场NBGS开关的电流测量^[9]。图1是某换流站直流部分的接线图,可以看到,直流电流互感器在换流站中应用十分广泛。

2 现场校准设备

用于超高压直流换流站直流电流互感器现场校准的装置分为两类:一类是现场用标准设备,主要是直流电流比例标准装置——直流电流比较仪;另一类就是校准用辅助设备,包括现场用高稳定度直流电流源^[10]和无线同步数据采集装置。

2.1 直流电流比例标准

校准0.2级的直流电流互感器要求标准器的准

确度至少应达到0.05级。磁调制式直流比较仪^[11]是20世纪60年代加拿大科斯托尔斯(Kusters)首先研制成功的,其准确度高达 1×10^{-6} 以上,现在世界各国已经采用这种直流电流比较仪作为直流电流比较标准^[12]。为开展国内超高压直流电流互感器现场校准试验,特试制了5kA直流电流比较仪作为校准试验中的标准器^[13],该电流比较仪的电流比例准确度等级达到 2×10^{-6} 。在实际校准试验中,该直流电流比较仪要外接负荷电阻,使得比较仪可以输出电压。校准试验中采用的负荷电阻为0.01级高精度电阻,因此直流电流比例标准装置的整体准确度优于0.02%。

2.2 高稳定度直流电流源

随着国内超高压直流输电工程的陆续投运,适用于现场电流互感器校准的直流电流源要求越来越高。不仅需要该类电源的输出电流能够在零到额定范围内连续并且可调,而且还要保证其输出电流的高稳定度和高准确度,同时为了满足现场测试的实际需求,还尽量要求此类电源体积小、重量轻、可靠性高。

为提高电流源的输出电流的精度,现场校准试验用所设计制造的5kA高稳定度直流电流源使用直流电流比较仪作为采样环节,并增加PI控制环节,减小给定电流与输出电流的误差。三相交流电经过三相不控整流、DC/AC高频逆变器、高频变压



图2 高稳定直流电流源电路框图

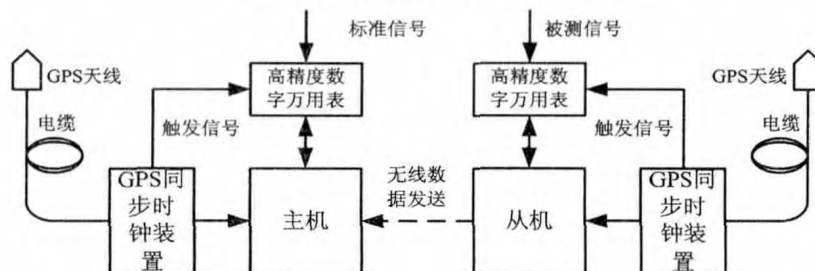


图3 GPS无线同步数据采集装置原理图

器输出再经过全波不控整流、滤波最终得到所需直流电流,原理如图2所示。

2.3 同步数据采集装置

在直流互感器现场校准试验中,标准的输出与被校准互感器的输出分别位于直流场与控制室,当被校准互感器的二次输出为模拟信号时,为了能够同步测量标准输出和被校准互感器的输出,需要使用GPS无线同步触发测量技术。

该装置由主(从)机测试系统、GPS同步时钟装置、高精度数字万用表等几个部分组成,其中主机通过Labview平台(虚拟仪器技术)与GPS装置、高精度数字万用表进行接口。利用该装置进行直流互感器现场校准时,主机置于直流场,从机位于控制室,两者通过无线通讯技术连接。

3 直流电流互感器校准方法(异地同步测量法)

3.1 测量原理

当被校准直流电流互感器的输出与标准器的输出由于场地的限制相距较远时,建议采用本方法。如图4所示,1为标准直流电流比较仪;2为被校准直流电流互感器;3为标准电阻(直流电流比较仪负荷); U_p 为直流电流比例标准输出的电压,信号取自于直流场标准器侧; U_s 为被校准直流电流互感器的二次输出电压,信号取自于控制室。同步测量两地的信号并转换为对应的一次电流,经比较即可得到被校准直流电流互感器的误差。这种方法称之为异地同步测量法。

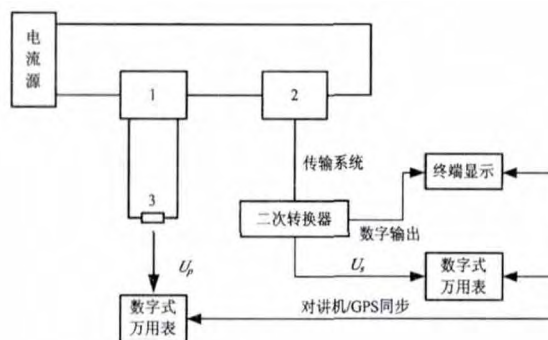


图4 异地同步测量法校准直流电流互感器原理图
电流比值误差表达式按式(1)计算为

$$\varepsilon = \frac{U_s - U_p}{U_p} \times 100\% \quad (1)$$

3.2 试验方法

1) 当被校准直流电流互感器二次没有模拟输出接口时,只能通过人工方式同步直流场数字式万用表和控制室终端显示的读数,此时对直流电流源输出电流的稳定度要求很高。为降低读数延迟造成的误差,需采取多次重复测量取平均值的方法;

2) 当被校准直流电流互感器二次具有模拟输出接口时,采用GPS无线同步数据采集装置(见图3)同步测量两地信号,此时由于同步精度很高,对电流源输出电流的稳定度要求可以降低。

4 直流电流互感器现场校准

使用异地同步测量法和上述试验设备对±500 kV德阳换流站内极线上的OTA进行了现场校准试验,注入电流主回路长度约为50 m,主回路连接导线采用3根额定1 000 A大电流导线并联。测量点为额

表2 ±500 kV 德阳换流站极线 OTA 测试数据

| 测量点 | 标准示值 /A | 试品通道 1 示值 /A | 通道 1 误差 /% | 试品通道 2 示值 /A | 通道 2 误差 /% |
|------------|----------|--------------|------------|--------------|------------|
| 0 A | 0.00 | -0.92 | / | 4.69 | / |
| 上升 300 A | 296.30 | 294.88 | -0.48 | 207.74 | -29.89 |
| 上升 600 A | 597.43 | 595.34 | -0.35 | 600.93 | 0.59 |
| 上升 1 500 A | 1 496.35 | 1 492.35 | -0.27 | 1 497.76 | 0.09 |
| 上升 2 400 A | 2 391.89 | 2 386.46 | -0.23 | 2 392.24 | 0.01 |
| 上升 3 000 A | 2 993.12 | 2 984.83 | -0.28 | 2 990.67 | -0.08 |
| 下降 2 400 A | 2 395.72 | 2 389.51 | -0.26 | 2 395.43 | -0.01 |
| 下降 1 500 A | 1 498.07 | 1 493.87 | -0.28 | 1 499.43 | 0.09 |
| 下降 600 A | 597.93 | 595.94 | -0.33 | 601.63 | 0.62 |
| 下降 300 A | 295.12 | 293.41 | -0.58 | 299.18 | 1.37 |

定电流的 0、10%、20%、50%、80%、100%。测试结果见表 2。



图5 ±500 kV 德阳换流站极线 OTA 试验场景
分析此次校准试验,可以得到如下几点结论。

(1) 德阳极 I 光电流互感器(OTA)在 10% 额定电流点出现超差,且两通道输出数据差距较大,考虑到分流器本身的线性度优良,应当是信号处理与传输环节引入的误差,需要通过现场校准进行调整;

(2) 不同光电流互感器(OTA)的误差-电流曲线则有一定的分散性,这体现了光电流互感器误差影响环节较多的特点,如分流器环节、多级放大环节、各级零点偏置、AD 转换环节等等;

(3) OTA 的工作环境温度范围为 -40 ℃ ~ +50 ℃,如果要在全温度范围内误差均满足 0.5 级要求,则 OTA 的误差温度系数应在 40×10^{-6} 以下。

5 结 论

(1) 测定直流电流互感器误差时,电流上升和下降的误差变差较小,这表明换流站中直流电流互感器的误差性质较为稳定,同时也在一个方面证明所采用的误差校准方法和校准设备的可信度。

(2) 通过开展直流互感器投运前的现场校准试验可以提早发现直流互感器的故障或隐患,对于保障中国直流输电工程安全、优质和经济运行具有重要的意义。

参考文献

- [1] 刘国云. 代因筠. 伊泰普高压直流输电系统总论及其特点[J]. 华中电力, 1995(6): 13-18.
- [2] 李晓黎. 特高压直流输电技术发展综述[J]. 广西电力, 2009(1): 23-26.
- [3] 袁懋振. ±800 kV 直流输电技术研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [4] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [5] 蒋大悲. 高压直流输电用的直流电流互感器[J]. 高压电器, 1982(2): 44-46.
- [6] 赵中原, 方志, 邱毓昌, 等. 高压直流换流站技术现状与发展[J]. 中国电力, 2002, 35(3): 48-51.
- [7] 王乐仁, 雷民, 章述汉. 特高压直流换流站电流电压传感器的测量误差[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 164-167.
- [8] 赵杰, 蔡宗远. 高压直流输电技术自主化迈出重要一步[J]. 电力系统装备, 2005(10): 17-20.

[9] 王红梅. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[D]. 北京: 华北电力大学, 2006.

[10] 王凤至, 张素霞. 自制大电流直流可调电源[J]. 河南师范大学学报, 1994, 18(2): 120.

[11] 揭秉信. 磁调制器的理论分析与计算[J]. 仪器仪表学报, 1982, 3(1): 57-63.

[12] 李维波, 李启炎, 任士炎, 等. 新型直流大电流比较仪

的建模与仿真研究[J]. 四川工业学院学报, 2001, 20(2): 8-12.

[13] 李恺, 罗志坤, 欧朝龙, 等. 基于电流比较仪测试直流互感器误差的方法[J]. 湖南电力, 2010, 30(5): 41-44.

(收稿日期: 2013-07-21)

(上接第28页)

究已经取得了很大的进展,但总的来说,多代理技术还不成熟,还需要深入的研究。此外,由于多代理技术的成本较高,加之配电系统对安全性的要求较高,所以多代理技术在配电系统中的应用还较少。但由于多代理技术的诸多优点,随着其成本的降低和技

术的成熟,多代理技术在电力系统中的应用定会越来越广泛。

参考文献

[1] 徐青山. 电力系统故障诊断及故障恢复[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

[2] 孔冰, 赵泽茂, 李红伟. 基于多代理技术的配电网网络复电技术[J]. 电气应用, 2013, 32(7): 28-31.

[3] 刘莉, 陈学锋, 翟登辉. 智能配电网故障恢复的现状与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 148-152.

[4] 李鹏飞. 基于人工智能的配电网故障恢复重构研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.

[5] 冯树海. 配电网网络重构方法研究[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(5): 13-15.

[6] 王照, 马文晓, 高飞. 基于多代理技术的分布式馈线自动化实现方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(6): 54-56.

[7] 丁施尹, 刘明波, 谢敏, 等. 应用多代理技术求解高压配电网故障恢复问题[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 54-60.

[8] 王守相, 李晓静, 肖朝霞, 等. 含分布式电源的配电网供电恢复的多代理方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(10): 61-65.

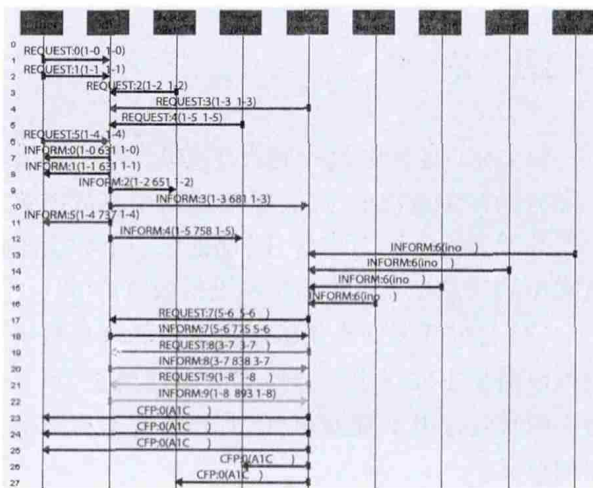
[9] 于卫红. 基于JADE平台的多Agent系统开发技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.

作者简介:

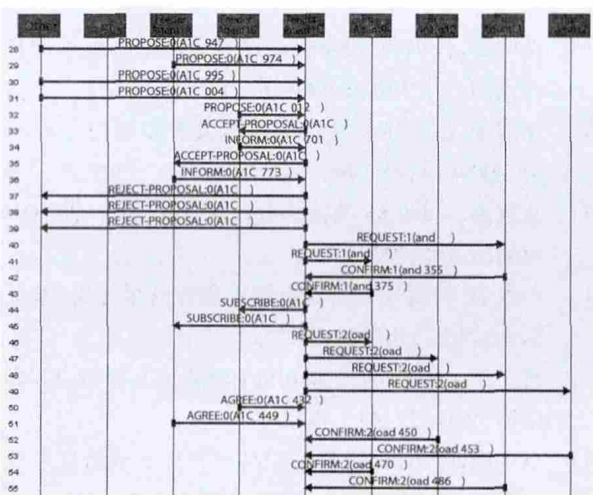
陈晓静(1979),女,工程师,主要从事电网运行监控及智能电网研究工作;

孔冰(1989),男,硕士研究生,主要从事智能体及多代理系统研究。

(收稿日期: 2013-08-05)



(a)



(b)

图3 各代理的交互顺序图