

DOI: 10.7667/PSPC201791

特高压电容式电压互感器误差在线同级比对技术研究

徐思恩, 冯宇, 汪本进, 吴士普, 邵明鑫

(中国电力科学研究院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 作为特高压计能装置的重要组成部分, 电容式电压互感器(Capacitor Voltage Transformer, CVT)需要定期进行误差校验, 以判断其是否符合准确度等级要求。当前 CVT 误差校验存在着几个问题急需解决: (1) 高抗出线侧 CVT 交接试验无法在全电压下进行; (2) 停电校验困难; (3) 校验结果偏离 CVT 在线状态下的实际值。为此迫切需要开展在线同级比对研究。在此背景下, 以特高压 CVT 的误差特性为研究对象, 进行了在线误差校验研究装置和试验方法研究, 并将研制的在线校验系统, 用于特高压浙福工程中的特高压电容式电压互感器的误差现场试验, 获得了 CVT 在运行过程中的误差特性数据, 验证了该方法可以实现对 CVT 的在线同级比对。

关键词: 特高压; 交接试验; 电容式电压互感器; 在线同级比对; 信号转换装置

Research on on-line peer comparison of UHV capacitor voltage transformer error

XU Sien, FENG Yu, WANG Benjin, WU Shipu, SHAO Mingxin

(China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: As an important part of the UHV energy metering device, Capacitor Voltage Transformer (CVT) needs periodic error checking to determine whether it meets the accuracy level requirement. At present, there are several problems needed to be solved in CVT error checking: (1) It can not carry out the full voltage acceptance test on the CVT beside the high resistance; (2) Off-line calibration is hard to implement; (3) The verification result deviates from the actual value of CVT online state, so it is urgent to carry out on-line peer comparison research. Under this background, this paper takes the error characteristics of UHV CVT as the research object and studies the research device and test method of on-line error checking. The developed online checking system is used in error field test of UHV capacitor voltage transformer of Zhejiang-Fuzhou UHV project and the on-line error characteristics data during CVT operation is obtained, verifying that using the method can achieve CVT on-line peer comparison.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. GYB17201600161).

Key words: UHV; on-site acceptance test; capacitor voltage transformer; on-line peer comparison; signal conversion equipment

0 引言

发展特高压是中国电网发展的必然趋势。特高压工程的输送功率在百万千瓦以上, 与其他电压等级相比对电能计量设备的性能要求更高, 电容式电压互感器(Capacitor Voltage Transformer, CVT)是计量的关键设备之一; 按照国家检定规程, CVT 要定期进行误差检测。但特高压的特殊性决定了无法停电进行离线检测, 因此在其他电压等级常用的离线方法无法使用到特高压上。同时, 由于 CVT 自身

结构的问题^[1], 离线检测结果与其实际运行状态下的真实误差特性差别很大。尤其在特高压等级下由于设备规模和尺寸巨大, 这一问题更加突出。

因此, 为了准确反映 CVT 的误差情况, 在现场开展 CVT 误差特性同级比对十分必要^[2-9]。

1 特高压 CVT 误差特性同级比对方法

图 1 为电压互感器误差特性在线同级比对系统的整体结构框图。二次信号转换装置将站中屏柜上的信号引入并进行隔离和采集变换, 转化为低压小信号接入电压互感器误差校验仪进行误差计算。

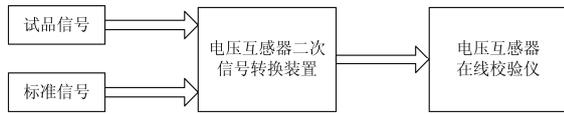


图 1 电压互感器误差在线同级比对系统整体结构框图

Fig. 1 Block diagram of voltage transformer error on-line alignment system

1.1 二次信号转换装置

图 2 为电压互感器二次信号转换装置单元电路的原理图，每个单元电路配置四路信号通道，可以对一台特高压 CVT 的四个绕组进行保护和隔离。通过双层 4:1 转换开关进行绕组之间的切换，实现对电压互感器的四个绕组分别进行比对，采集到的电压信号，经过小型高精度的双级电压互感器进行电气隔离，针对不同信号进行电压转换后输出，进入到在线校验系统进行误差校验。

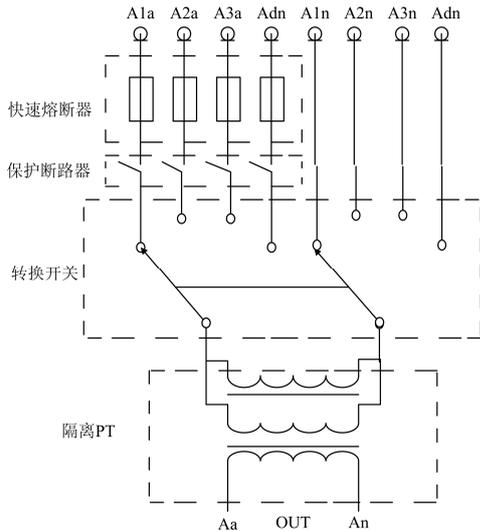


图 2 PTZZ-1 型电压互感器二次信号转换装置单元电路原理图

Fig. 2 Schematic diagram of unit circuit for signal conversion device of PTZZ-1 voltage transformer

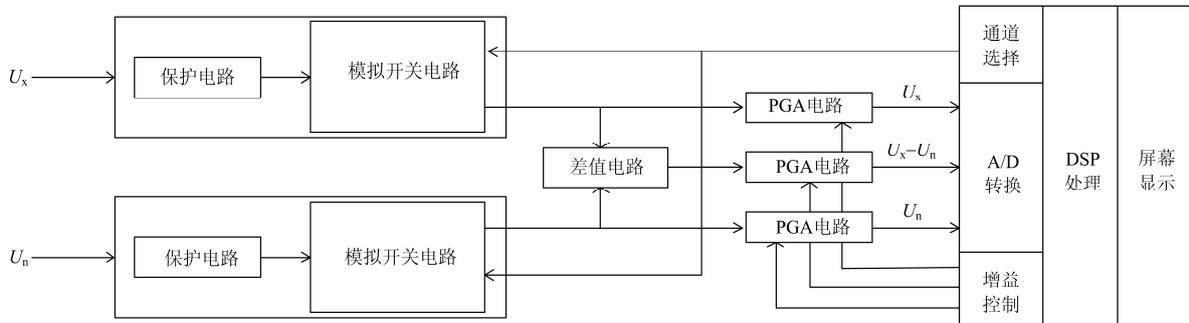


图 3 PTZJ-1 型电压互感器在线校验仪原理图

Fig. 3 Schematic diagram of on line calibrator for PTZJ-1 type voltage transformer

1.2 互感器校验仪

图 3 为 PTZJ-1 型电压互感器在线校验仪原理图，其信号采集与处理的原理是：电压互感器二次装置采集到的二次电压 U_x 和参考电压互感器的二次电压 U_n ，通过现场的信号线将其传输到电压互感器校验仪，通过模拟开关对其进行采集和选择，选择任意一路经过差值电路和 PGA 增益电路进行数据处理，再经过 A/D 转换送至 DSP 进行误差的计算，给出比对结果，再选择一路，直到三路比对完毕。

2 现场试验

以浙北—福州工程为例，采用 1000 kV CVT 用于线路侧和主变侧电能计量、电压测量及系统保护。在四个站的 GIS 中 I 母和 II 母的 A 相各安装了一台 1000 kV 母线罐式电磁式电压互感器(以下简称母线 PT)，其中，在安吉站 I 母的 A、B、C 相各有一台 1000 kV PT 用于核相。变电站内采用的母线 PT 具体参数如表 1。

表 1 母线 PT 参数

Table 1 Bus PT parameter

参照标准	GB1207-2006	额定功率	50 Hz
型号	SVR-100E	相数	单相
额定电压	1100/1800/2400 kV	电压系数	1.5 U_n 30 s
绕组	二次绕组 1	二次绕组 2	剩余绕组
线圈电压	100/ $\sqrt{3}$ V	100/ $\sqrt{3}$ V	100 V
额定负荷	15 VA	15 VA	15 VA
准确级	0.5	0.5(3P)	3P

浙福工程中特高压母线 PT 的二次绕组第一绕组供货要求是 0.5 级，实测值满足 0.1 级，接近 0.05 级的要求，且误差数据稳定(如表 2 所示)，可作为 CVT 误差在线校验量值传递的标准器。

表 2 安吉站 I 母试验数据(第一绕组)

Table 2 I master test data at Anji station (first winding)

相位	误差	出厂数据	交接数据
A 相	$f/\%$	0.05	0.04
	$\delta/(^\circ)$	0.1	0.24
B 相	$f/\%$	-0.01	+0.025
	$\delta/(^\circ)$	-1.8	0
C 相	$f/\%$	-0.02	+0.019
	$\delta/(^\circ)$	-1.9	-0.1

2.1 试验方案

在浙江—福州工程中, 安吉站为唯一装有三相母线 PT 的站, 适合进行 PT 和 CVT 的同级校准。以三相 PT 的第一绕组作为参考标准, 使用三相电压互感器现场在线校验仪, 对高抗侧三相 CVT 的第一绕组绕组同时进行校验。用同样的方法, 依次对高抗侧三相 CVT 的第二和第三绕组进行校验。

安吉站高抗侧 CVT 误差特性在线试验方案现场布置接线图如图 4, CVT 的二次接线端子由现场汇控柜接出, 引进变电站内的保护小室, 试验的接线以及试验过程均在保护小室内完成, 降低了环境因素对校验设备的误差影响。将高抗侧 CVT 的二次绕组的电压信号和标准母线上的 PT 的电压信号均通过二次信号转换装置接入电压互感器在线校验仪进行误差校验, 在进行误差校验时, 通过电压互感器二次信号转换装置的转换开关对 CVT 的二次绕组进行切换。

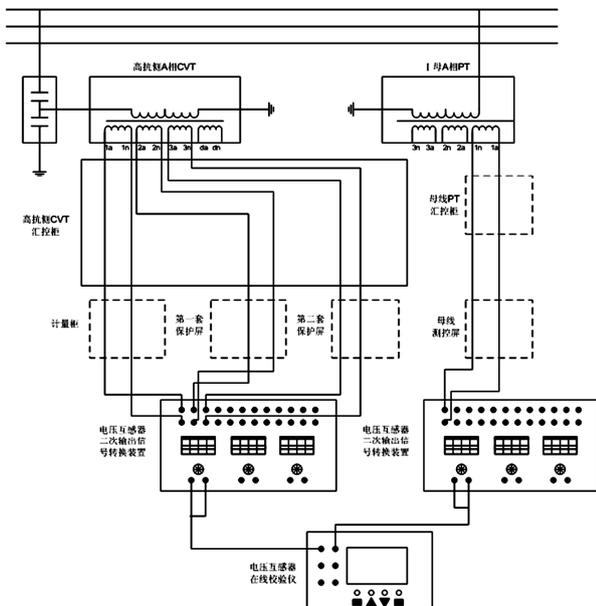


图 4 安吉站高抗侧 CVT 误差特性在线校验试验布置图

(这里为避免图形复杂, 只给出单相)

Fig. 4 Test layout of Anji station high resistance side CVT error characteristic online verification (single phase)

2.2 安吉站在线误差数据

安吉站安兰 I 线采用 I 母 PT 和主变侧 CVT 分别作为标准器对高抗侧和非高抗侧 CVT 进行在线误差校验。以母线 PT 作为标准器对主变侧 CVT 进行在线误差校验数据如表 3 所示。全部误差数据在额定一次电压和空载情况下获得, 以交接试验和在线误差测量数据为基础值, 采用算术平均值的方法获得主变侧 CVT 自身误差数据^[10-15]。

表 3 安吉站安兰 I 线主变侧 CVT 误差数据

Table 3 CVT error data of main transformer side of

Anlan I line in Anji station

相位	绕组	误差	交接试验	以 PT 为标准	算数平均值
A 相	第一绕组	$f/\%$	-0.06	-0.072	-0.066
		$\delta/(^\circ)$	+1	+3.770	+2.385
B 相	第一绕组	$f/\%$	-0.04	-0.068	-0.054
		$\delta/(^\circ)$	+1	+3.296	+2.148
C 相	第一绕组	$f/\%$	0	-0.040	-0.020
		$\delta/(^\circ)$	+1	+5.798	+3.399

在线误差校验系统测量得到的安吉站安兰 I 线高抗侧 CVT 在线误差如表 4 所示。

表 4 安吉站安兰 I 线高抗侧 CVT 误差数据

Table 4 CVT error data of high resistance side

Anlan I line of Anji station

相位	绕组	误差	以 PT 为标准	以主变侧 CVT 为标准
A 相	第一绕组	$f/\%$	-0.153	-0.142
		$\delta/(^\circ)$	+0.762	+0.748
B 相	第一绕组	$f/\%$	-0.1555	-0.149
		$\delta/(^\circ)$	0.868	0.441
C 相	第一绕组	$f/\%$	-0.099	-0.079
		$\delta/(^\circ)$	2.98	2.254

分析数据可知, 以母线 PT 作为标准器测量得到的高抗侧 CVT 比值差小于以变压器侧 CVT 作为标准器测量得到的比值差, 以母线 PT 作为标准器测量得到的高抗侧 CVT 相位差大于以变压器侧 CVT 作为标准器测量得到的相位差, 具体为: A 相第一绕组 f 主变 CVT— f 母线 PT=0.011%, δ 母线 PT— δ 主变 CVT=0.014', B 相第一绕组 f 主变 CVT— f 母线 PT=0.0065%, δ 母线 PT— δ 主变 CVT=0.427'; C 相第一绕组 f 主变 CVT— f 母线 PT=0.02%, δ 母线 PT— δ 主变 CVT=0.726'。对于 0.2 级的绕组而言, 采用两种标准器最后获得的绝对误差偏差小于 0.05 级电压互感器误差限值, 可认为该偏差来源于标准器的偏差, 两种校验方法均可以满足试验需求。

表 4 的数据证明使用 0.1 级的 PT 和 0.2 级的 CVT 对 0.2 级的 CVT 进行在线校验时,测量得到的高抗侧 CVT 的绝对误差相等。因此,可以使用主变侧的 CVT 对高抗侧的 CVT 进行误差在线校验。

2.3 功率流对在线误差数据的影响

在特高压 CVT 在线校验现场试验中,由于各接线端子之间距离过长,有时甚至达到几百米,如此长的线上通过电流将产生压降影响在线校验结果。因此需要分析功率流对特高压 CVT 在线校验的误差影响。

以工程为例,经过计算得:

$$R = 0.014008(\Omega)$$

$$C = 18270.12(\text{pF})$$

$$L = 100.812(\mu\text{H})$$

系统调试时频率为 50 Hz,此时阻抗值为

$$Z = \frac{(R_m + j\omega L) \times \left(-j\frac{1}{\omega C}\right)}{R_m + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} \approx 0.0014008 + 0.031671j$$

经过实测,系统调试时电流最大达到 290.74 A,系统调试时电压为 616.09 kV,则产生的压降为

$$\Delta U = Z \times 290.74\text{A} \approx 0.407 + j9.216(\text{V})$$

$$U' = 616090 - 0.407 - j9.216 =$$

$$616089.593(\cos 0.00086^\circ - j\sin 0.00086^\circ)(\text{V})$$

产生的压降为

$$\frac{U - U'}{U} \times 100\% = -0.00006\%$$

产生的相位差为 0.00086°,即 0.0516',对实际测量的影响可以忽略不计。

2.3 在线误差数据分析

对浙福工程安吉站所采用的两种标准器获得的在线误差之间产生的偏差进行计算,获得 CVT 误差修正值,计算结果如表 5 所示。

表 5 CVT 误差修正值

Table 5 CVT error correction

相位	绕组	误差	误差修正值
A 相	第一绕组	$f/\%$	-0.011
		$\delta/(')$	+0.014
B 相	第一绕组	$f/\%$	-0.006
		$\delta/(')$	+0.43
C 相	第一绕组	$f/\%$	-0.020
		$\delta/(')$	+0.73

由 PT 温度特性可知,母线 PT 测量值更加准确可靠。以母线 PT 为标准器测量得到数据作为参考值,利用母线 PT 作为标准器与主变侧 CVT 作为标

准器时获得的误差数据比较,获得两种参考标准的误差修正值。该“CVT 误差修正值”应包含温度、外电场等综合因素对 CVT 在线误差测量产生的影响。当外界测量温度和外电场近似时,该修正值对于不同的变电站而言是一个常数,在变电站内没有 PT 时,可以利用其对 CVT 进行在线误差校验。

采用算术平均值的方法对表 4 数据进行整理,安吉站内 CVT 采用两种标准器之间产生的 CVT 误差修正值的统计如表 6 所示。

表 6 安吉站 CVT 误差修正值统计数据

Table 6 Statistical data of Anji station CVT error correction

绕组	误差	安吉站
第一绕组	$f/\%$	-0.012
	$\delta/(')$	+0.4

表 6 的数据计算得到,相对于母线 PT 使用主变侧 CVT 作为标准器获得的线路侧 CVT 比值差向负偏,相位差向正偏,且具有一致性。

3 结论

通过对特高压 CVT 在线校准的试验和分析分析,得到以下结论:

1) 特高压 CVT 误差特性在线校验系统可以一次性地对各特高压变电站 CVT 进行全站校验。采用在线比较方式能更方便、准确地测量 CVT 误差,对在线误差测量技术的进一步发展奠定了基础。

2) 对同一台 CVT 采用母线 PT 及变压器侧 CVT 分别作为标准器进行误差测量,获得“CVT 误差修正值”,通过对实测数据的分析发现对于同一个变电站而言,该值是一个常数,其值高于被检 CVT 两个准确度等级。该值不仅证明了变电站内设备运行的稳定正常,还为同级别 CVT 误差比对提供了指导。

参考文献

- [1] 吴士普, 王晓琪, 李璿, 等. 1000 kV CVT 误差的现场试验方法[J]. 高电压技术, 2009, 44(5): 973-979.
WU Shipu, WANG Xiaiqi, LI Xuan, et al. Site test method of error for 1000 kV capacitor voltage transformer[J]. High Voltage Engineering, 2009, 44(5): 973-979.
- [2] 周雪青, 郝晓光, 张岩坡, 等. 基于分段拟合算法的电流互感器误差研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 139-143.
ZHOU Xueqing, HAO Xiaoguang, ZHANG Yanpo, et al. Research on the error of current transformer based on subsection fitting algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 139-143.

- [3] 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.
- [4] 张侃君, 戚宣威, 胡伟, 等. YD 型换流变三角形绕组 CT 饱和对直流保护的影响及对策[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 99-105.
ZHANG Kanjun, QI Xuanwei, HU Wei, et al. Impact of the CT saturation of the delta winding on the HVDC protection and its countermeasure[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 99-105.
- [5] 王玲, 冯宇, 邱进, 等. 电压互感器谐波特性测量用可控谐波电压源的构建[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 106-111.
WANG Ling, FENG Yu, QIU Jin, et al. Construction of controllable harmonic voltage source for harmonic characteristic measurement[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 106-111.
- [6] 冯宇, 王晓琪, 陈晓明, 等. 电容式电压互感器电路参数对电网谐波电压测量的影响[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4968-4975.
FENG Yu, WANG Xiaoqi, CHEN Xiaoming, et al. Influences of circuit parameters of capacitor voltage transformer on grid harmonic voltage measurements[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4968-4975.
- [7] 彭卉, 邹舒, 付永生, 等. 冲击负荷接入电网的电能质量分析与治理方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 54-61.
PENG Hui, ZOU Shu, FU Yongsheng, et al. Research of the power quality problem and treatment scheme for impact loads connected into power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 54-61.
- [8] 梁志瑞, 叶慧强, 赵飞. 电力系统谐波状态估计研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 157-159.
LIANG Zhirui, YE Huiqiang, ZHAO Fei. Overview on power system harmonic state estimation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 157-159.
- [9] 李昊翔. 基于电容分压的电子式电压互感器的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
LI Haoxiang. Research on electronic voltage transformer based on capacitive voltage divider[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [10] 冯宇, 谢超, 王玲, 等. 电子式电压互感器谐波传变特性分析[J]. 高压电器, 2014, 50(11): 97-102.
FENG Yu, XIE Chao, WANG Ling, et al. Analysis on harmonic transfer characteristics of electronic voltage transformers[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(11): 97-102.
- [11] 孟祥甫, 刘于超, 李振东. 电容式电压互感器现场校验方法改进探讨[J]. 电测与仪表, 2010, 47(7): 16-19.
MENG Xiangfu, LIU Yuchao, LI Zhendong. Discussion the improvement of field calibration of capacitor voltage transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010, 47(7): 16-19.
- [12] 余春雨, 王晓琪, 盛国钊. CVT 现场校验的误差来源与分析[J]. 电力电容器, 2000(3): 27-31.
YU Chunyu, WANG Xiaoqi, SHENG Guozhao. Error source and analysis on CVT worksite calibration[J]. Power Capacitors, 2000(3): 27-31.
- [13] 王珏昕, 曹凤田, 王乐仁, 等. 非传统互感器的原理与性能分析[J]. 吉林电力, 2010, 38(5): 8-12.
WANG Juexin, CAO Fengtian, WANG Leren, et al. Theory and performance analysis of un-traditional transformer[J]. Jilin Electric Power, 2010, 38(5): 8-12.
- [14] 李璿, 余春雨, 王晓琪, 等. CVT 附加相差对容性设备介损在线监测的影响[J]. 电测与仪表, 2013, 50(11): 10-13.
LI Xuan, YU Chunyu, WANG Xiaoqi, et al. Effect of CVT additional phase error on on-line monitoring of dielectric loss factor for capacitive equipment[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(11): 10-13.
- [15] 孙建涛, 文习山, 王晓琪, 等. 绝缘在线监测中电容式电压互感器的误差校正[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(16): 61-66.
SUN Jiantao, WEN Xishan, WANG Xiaoqi, et al. Error correction of capacitor voltage transformers for insulation on-line monitoring[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(16): 61-66.

收稿日期: 2017-07-05

作者简介:

徐思恩(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事变压器及互感器技术应用及研究; E-mail: xusien@epri.sgcc.com.cn

冯宇(1978—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事变压器及互感器技术应用及研究; E-mail: fengyu@epri.sgcc.com.cn

汪本进(1972—), 男, 学士, 工程师, 主要从事变压器及互感器技术及应用及研究。E-mail: wangbenjin@epri.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)