

# 分体串联式电压标准应用于 750 kV 检定车

樊博<sup>1</sup> 李伟<sup>1</sup> 展宗辉<sup>1</sup> 张浩森<sup>1</sup> 王伟<sup>2</sup> 程志强<sup>1</sup> 王涛<sup>1</sup> 舒一飞<sup>1</sup> 邢雅<sup>3</sup>

(1. 国网宁夏电力公司电力科学研究院 银川 750002;

2. 国网宁夏节能服务有限公司 银川 750002;

3. 国网宁夏电力公司培训中心 银川 750002)

**摘要:** 为了解决当前 750 kV 电压互感器误差试验存在标准体积庞大、工作任务繁重和安全隐患突出等问题,提出了一种现场检定车研制技术方案。该方案采用串联谐振升压和比较法试验原理,独具特点的是标准电压互感器采用分体串联非标组合式原理,应用工频电压串联加法和分体式结构设计,将上下级电压标准通过高压隔离互感器进行一次和二次串联,能够在满足规定耐压强度和准确度要求的前提下大幅降低设备体积和绝缘要求,而且下级 330 kV 电压标准可单独使用,从而可极大地提高设备利用率。此外还介绍了电容式电压比例标准方法,分析了现场试验环境对该电压标准的影响误差,并通过现场应用实例的试验数据表明,利用检定车开展 750 kV 电压互感器误差检定试验结果与电容式电压比例标准方法的试验结果基本一致,说明本文设计方案的试验结果准确可靠,具备实际应用价值。

**关键词:** 750 kV 变电站; 检定车; 误差试验; 串联式电压标准

**中图分类号:** TM452 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

## Series standard voltage transformers for 750 kV transformer calibration cart system

Fan Bo<sup>1</sup> Li Wei<sup>1</sup> Zhan Zonghui<sup>1</sup> Zhang Haomiao<sup>1</sup> Wang Wei<sup>2</sup>

Cheng Zhiqiang<sup>1</sup> Wang Tao<sup>1</sup> Shu Yifei<sup>1</sup> Xing Ya<sup>3</sup>

(1. Power Science Research Institute of State Grid Ningxia Power Co., Yinchuan 75002, China;

2. Energy Services Co. Ltd. of State Grid Ningxia Power Co., Yinchuan 750002, China;

3. Power Science Research Institute of State Grid Ningxia Power Co., Yinchuan 750002, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of huge equipment, workload and security risks in 750kV Transformer error on-site testing, this paper introduces a new design of 750 kV transformer calibration cart for field test. It uses series resonant boost and comparison method to complete the test, and the most distinctive features of the design is the series standard voltage transformers (SSTV). SSTV based on the theory of voltage summation method and parted type structures, it can be divided into two stages and be connected by high voltage isolation transformers (HVIT). This method can greatly reduce the equipment volume and insulation requirements on the premise of meeting the requirements of accuracy and the compressive strength significantly, the bottom is independently used in 330 kV voltage level test and greatly improve the utilization of the equipment. In addition, we introduce the capacitive standard method and the error analysis of the environmental impact of the SSTV. The final practical application example compares the results between the capacitive standard and SSTV, it shows that two results are basically identical, so the transformer calibration cart has the value of practical application.

**Keywords:** 750 kV substation; calibration cart; error testing; series standard transformer

## 1 引言

随着我国超高压电网的建设和持续发展,宁夏先后投入运行多个 750 kV 大容量输电工程,大量 750 kV 和

330 kV 电压互感器的计量误差检定工作亟待进行,而传统的互感器现场校验方法由于试验设备体积大、重量重、导致工作量非常繁重,且长时间停电导致经济效益低下,再者由于试验、设备分散,需起重机械紧密配合进行临时搭建,试

验现场杂乱,存在着诸多不安全因素。近年来,计量检定车因具有功能性强、专业性强、现场应用方便等优点受到人们的日益关注,作为以先进试验设备和设计思路实现的流动计量检定实验室,为宁夏计量检定工作提供了新的研究思路。在试验方法方面,目前在电压互感器现场校验的方法主要为采用电容分压器<sup>[1]</sup>和电磁式标准互感器作标准进行比较的方法,电容分压器校验误差方法的基本思路是以电容分压器作为量值传递标准,采用替代方式对被试 CVT 进行校准,基本上是采用“低压下校准,高压下使用”原则。电磁式标准互感器校验误差是最常见和传统的方法,然而单体式 750 kV 标准电压互感器<sup>[2]</sup>对绝缘结构要求极高,制造工艺难度大,设备体积和重量大,设备利用率不高,不适宜集成在检定车内。文章将在 1 部分叙述检定车的系统组成和工作原理,2 部分介绍以电容分压器作为标准校验的方法,以及分体串联非标组合式电压标准的设计原理与应用于检定车,并分析其误差性能受现场杂散电容的影响,3 部分介绍在现场测试环境下检定车的实际应用情况,并与电容分压标准校验方法进行比对。

## 1 750 kV 互感器检定车系统组成与工作原理

### 1.1 整理功能设计

750 kV 互感器计量检定车用以 750 kV 和 330 kV 电压等级电压互感器现场误差检定工作,整体组成可分为 4 部分:驾驶室,操作室,设备仓,扩展平台。其中驾驶室和操作室作为试验人员主要操作区域。设备仓中配置有调压控制箱、励磁变压器、电压标准、高压电抗器、互感器校验仪、电压负荷箱、测试导线等装置<sup>[3]</sup>,330 kV 检定全套设备集成在设备仓中,另外为保证高电压设备的安全绝缘距离,还配备有相应的设备滑动轨道等机械设备。扩展平台安装有 420 kV 电压标准及用以补充串联谐振升压系统电感值的高压电抗器。检定车的设计遵守以下原则:

1) 集成化特点:试验时车载试验设备无需搬下车,无需依靠外部吊装设备,试验平台能够自动或手动展开达到试验状态,以满足试验升压所需的安全绝缘距离。

2) 组合式特点:试验装置分置于设备仓和扩展平台。设备仓装载 330 kV 电压互感器检定全套设备,可单独开展 330 kV 电压互感器现场误差试验。扩展平台装载 420 kV 标准电压互感器单元并通过单独的辆上运输至试验现场,在现场组合为 750 kV 互感器试验系统。

### 1.2 串联谐振升压原理

在现场校验电容式电压互感器(下文简称 CVT)需要的试验容量非常大,升压设备容量和电源容量均不足,按正常升压的方式将使校验工作无法进行。例如以电容量为  $0.005 \mu\text{F}$ ,电压等级 750 kV CVT 为例,所需试验容量  $U^2 \omega C = 424.12 \text{ kVA}$ ,其一次电压  $U = 1.2 \times 750\,000 / \sqrt{3}$ ,如果使用 380 V 电源,需提供的电流将达到 1 116 A 左右,在现场工作是很难找到满足要求大容量电源。而传统升压

设备和工频试验变压器因体积、重量较大,现场运输条件复杂,无法满足现场搬运、试验的要求。

为解决上述问题,可利用串联补偿原理如图 1 所示,其中  $C$  是表示被试 CVT 等值电容, $L$  表示串联补偿电抗器,当  $\omega L = 1/\omega C$  时,升压器所需的试验电压  $U_2 = IR \leq U_c$  为最小值,其中  $R$  为谐振回路的等效电阻,这样可有效地减小升压设备所需电源容量。检定车实际使用时,依据不同的电压等级合理匹配设备参数和电抗器个数。串联谐振升压优势体现在以下 3 点<sup>[4]</sup>:

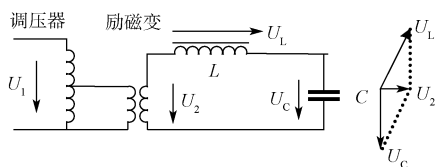


图 1 串联补偿原理

- 1) 大幅降低对现场电源容量要求;
- 2) 短路电流小,当被试品出现闪络或击穿时,回路失谐,回路电流近似等于激励电势除以电抗值;
- 3) 波形畸变小。

### 1.3 检定车 CVT 准确度(误差)试验方法

检定车 CVT 误差试验采用差值法,是电压互感器最常见的试验方法,试验原理见图 2。

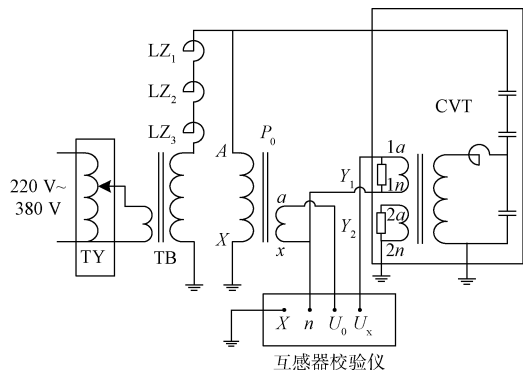


图 2 检定车 CVT 误差试验原理

图 2 中, TY 表示调压控制箱, TB 表示励磁变压器, LZ 表示高压电抗器,这三部分组成升压电源系统。标准电压互感器  $P_0$  与被试电容式电压互感器 CVT 一次并联,二次绕组接规定的二次负荷(电压负荷箱  $Y_1$  和  $Y_2$ ),被检二次绕组的低压端  $1n$  和  $x$  对接,二次绕组高压端  $1a$  和  $a$  接入互感器校验仪差压端  $U_0$  和  $U_x$ ,两者之间的差值  $(U_x - U_0)$  与参考电压  $U_0$  之比即为被试电压互感器的误差  $\epsilon$ ,即:

$$\epsilon = \frac{U_x - U_0}{U_0} \times 100\% \quad (1)$$

比较法校验使用的标准电压互感器应与被检 CVT 的变比相同,准确度等级至少比被检互感器高 2 个等级。但是单体电磁式 750 kV 电压标准互感器由于制造和运输均

十分困难,不适用于现场标准。下文将介绍以比较适合现场要求的电容分压器替代校准的方法,以及检定车采用的分体串联非标组合式标准电压互感器。

## 2 标准电压互感器

### 2.1 电容式电压比例标准

即利用电容分压器,由一台低电压等级的标准电压互感器(应用试验中采用电压等级为220 kV,准确度为0.02级的标准)进行现场校准后作为试验标准,进行误差测试,电容分压器原理如图3所示。

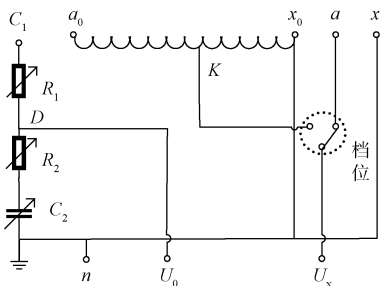


图3 电容分压器原理图

标准电压互感器二次侧连接至电容分压器箱内感应分压器 $a_0$ 、 $x_0$ 端,经感应分压器变压后产生标准电压 $K$ ;通过电容分压原理产生的电压输入到 $C_1$ 端,通过补偿电阻 $R_1$ 、 $R_2$ 及电容 $C_2$ 之后,在 $R_1$ 、 $R_2$ 上产生电压 $D$ ;  $K$ 和 $D$ 一起送到校验仪的差压端,实现将电容分压器校准。当箱内切换测量档时(连接被试CVT时),电压 $D$ 和被试CVT二次端子 $a$ 、 $x$ 电压一起送到校验仪差压端,实现对被试CVT计量误差校验<sup>[5]</sup>,试验电路原理图如图4所示。

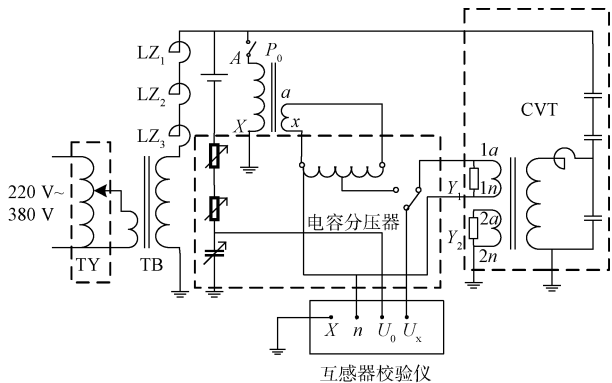


图4 用电容分压器校验CVT试验原理

即采用“低压下校准,高压下使用”原则,先用电容分压器校验标准电压互感器,调节电容分压器的分压比使校验仪示值等于标准电压互感器的检定值,然后切换分压器内部的档位,用被试CVT替换标准电压互感器,从而测定其计量误差,一些文献将此方法命名为“替代法”,试验计量误差值:

$$\epsilon = \frac{N_0 - N}{N_0} (\%), \delta = D - D_0 \geq (\prime)$$

式中: $N_0$ 、 $D_0$ 为校验标准互感器时的误差数据; $N$ 、 $D$ 为校验被试互感器时的误差数据。该方案中设备具有质量较轻、结构简单的特点,为了保证校准装置的准确性,需对标准设备进行周期送检。文章将在应用实例部分以该方法作为对比说明检定车的应用可行性。

### 2.2 分体串联非标组合式标准电压互感器

750 kV分体串联非标组合式电压标准应用电压串联加法原理<sup>[6]</sup>,该原理已成功应用于我国750 kV和1 000 kV超特高压关口计量,建立起1 000 kV工频电压计量标准,其结构如图所示。

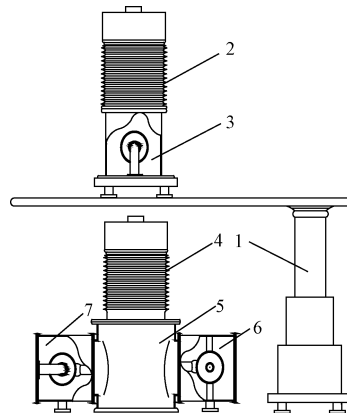


图5 分体串联非标组合式标准电压互感器原理

如图5所示,将非标准电压等级420 kV上级标准电压互感器3与330 kV下级标准电压互感器7以串联结构叠加放置。高压隔离互感器6作为本体式标准电压互感器的二次绕组串联用加法绕组,作用是使上下两级标准电压互感器的二次电压相加,从下级标准电压互感器7输出。上下均压环<sup>[7]</sup>1位于上级绝缘子2两端,起到改善电场分布,提高设备绝缘水平的作用。上级绝缘子2保证上级标准电压互感器3可靠的绝缘,下级绝缘子4保证上级标准电压互感器3与下级绝缘子4及高压隔离互感器6之间可靠的绝缘,连接部分5连接上下标准电压互感器3,7及高压隔离互感器6,并保证三部分可靠地绝缘。

图6所示为分体串联非标组合式标准电压互感器的原理图,其中上级电压互感器 $T_1$ 一次绕组 $A_1N_1$ (一次侧电压 $U_{11} = 420$  kV)与下级互感器 $T_2$ 一次绕组 $A_2N_2$ (一次侧电压 $U_{12} = 330$  kV)串联,组成一次绕组 $AN$ , $T_1$ 二次绕组 $a_1n_1$ 通过隔离变压器(HVIT)与 $T_2$ 二次绕组 $a_2n_2$ 串联组成了二次绕组 $an$ ,SSTV二次电压为 $U_2$ ,一次电压 $U_1 = U_{11} + U_{12}$ 。

本文检定车设计方案选择分体串联非标组合式标准电压互感器作为计量校验量值传递标准,主要分析其具有以下4个方面的优势:

1)标准电压互感器为分体独立式,330 kV下级标准电

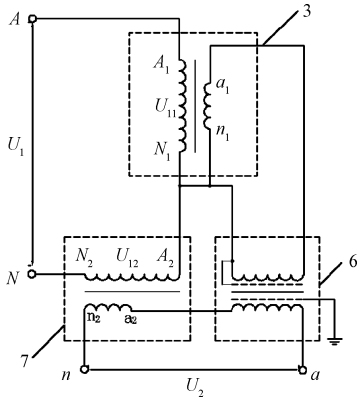


图 6 分体串联非标组合式标准电压互感器原理

压互感器独立可靠地工作。

2)电压标准一次电压由上下级分担,降低了单台的绝缘要求。

3)随着电压等级的提高,该设计方案可大幅降低制造工艺难度<sup>[8]</sup>。

4)体积小,重量轻,分体式安装于检定车的设备仓和扩展平台内,可方便地进行运输。

### 2.3 电压标准受杂散电容影响误差分析

SSTV 属电磁式电压互感器,在不发生绝缘损坏情况下,其误差性能的长期稳定性很好。由于上级标准电压互感器的器身处于高电位,其与高压引线、大地及周围物体之间存在的杂散电容,产生容性泄漏电流会改变 SSTV 上下级的分压系数  $m = U_{12}/U_{11}$ ,进而影响误差<sup>[9]</sup>,根据电压互感器误差理论分析,SSTV 的整体误差  $\epsilon$  可以表示为:

$$\epsilon = (1 - m)\epsilon_{13} + m\epsilon_2 \quad (3)$$

式中:  $\epsilon_{13} = \epsilon_1 + \epsilon_3 + \epsilon_1\epsilon_3$  表示  $T_1$  与 HVIT 的级联综合误差,  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  分别代表  $T_1, T_2$  以及 HVIT 的误差,分压系数变化  $\Delta m$  时,对 SSTV 的误差影响量  $\Delta\epsilon$  表示为:

$$\Delta\epsilon = \Delta m(\epsilon_1 - \epsilon_{13}) \quad (4)$$

式中:  $\Delta m$  受  $T_1, T_2$  等效电容量以及高压引线对高电位壳体及高电位壳体对周边及地的杂散电容影响。通常情况下  $\Delta m < 1\%$ ,即上下级分压系数  $m$  受杂散电容的影响量很小。近似地估计杂散电容量<sup>[10]</sup>为 10 pF,上下级等效电容量 250 pF,由 2 台 500 kV 标准电压互感器串联组成的 1 000 kV SSTV 受到杂散电容影响误差变化值小于  $4 \times 10^{-6}$ ,影响量甚微,所以分体式标准电压互感器与升压一体化装置方案在理论上是可行的,能够满足现场 750 kV 试验要求。

### 3 应用实例分析

试验选取宁夏沙湖 750 kV 变电站二号主变侧 CVT 共计 3 只,互感器型号为 TYD765/ $\sqrt{3}-0.005H$ ,由西安西电电力电容器有限责任公司制造生产,准确度等级为 0.2,额定电压比为 750/ $\sqrt{3}/0.1/\sqrt{3}$  kV,测试环境温度为 5 ℃,湿度为 25%。

检定车的应用实例采用电容分压器替代法进行比较,该方法自 2008 年至今,在宁夏、新疆、青海地区共计完成银川东、黄河、贺兰山、乌北、官亭等 750 kV 变电站以及宁夏多个发电有限公司 750 kV CVT 的现场准确度校验,数量超过 200 台,实用性较强,校验准确度高。依照图 4 试验原理布置电容分压器替代法试验现场,采用 220 kV 标准电压互感器(准确度 0.02 级)配合 200 V 感应分压器(准确度级),其中高压精密气体分压电容由宁夏电科院和国网电力科学研究院共同研制,电容量为 30 pF(上级电容)及 20 pF(下级电容),准确度  $\pm 1\%$ ,试验测定 80% 和 100% 两个测量点的 1a-1n 计量绕组误差数据。检定车的 750 kV 分体串联非标组合式标准电压互感器准确度等级为 0.02 级,额定变比 750/ $\sqrt{3}/0.1/\sqrt{3}$  kV,对同一组电压互感器,试验对比情况见表 1 和表 2。

表 1 电容分压器替代法试验结果

编号	误差	电压百分比		二次负荷	
		80%	100%	容量 VA	cosΦ
A 相: 70406049	<i>f</i>	0.076	0.065	10	0.8
	$\sigma$	4.45	3.11	10	0.8
	<i>f</i>	0.087	0.075	2.5	0.8
	$\sigma$	3.19	2.14	2.5	0.8
B 相: 70406047	<i>f</i>	0.097	0.085	10	0.8
	$\sigma$	3.47	2.56	10	0.8
	<i>f</i>	0.110	0.089	2.5	0.8
	$\sigma$	1.01	0.65	2.5	0.8
C 相: 70406044	<i>f</i>	0.094	0.070	10	0.8
	$\sigma$	3.10	2.43	10	0.8
	<i>f</i>	0.096	0.080	2.5	0.8
	$\sigma$	2.76	2.45	2.5	0.8

表 2 750 kV 互感器计量检定车试验结果

编号	误差	电压百分比		二次负荷	
		80%	100%	容量 VA	cosΦ
A 相: 70406049	<i>f</i>	0.057	0.049	10	0.8
	$\sigma$	3.17	2.44	10	0.8
	<i>f</i>	0.074	0.060	2.5	0.8
	$\sigma$	3.14	2.44	2.5	0.8
B 相: 70406047	<i>f</i>	0.066	0.058	10	0.8
	$\sigma$	4.10	2.21	10	0.8
	<i>f</i>	0.084	0.069	2.5	0.8
	$\sigma$	1.47	1.54	2.5	0.8
C 相: 70406044	<i>f</i>	0.092	0.065	10	0.8
	$\sigma$	2.56	1.86	10	0.8
	<i>f</i>	0.067	0.047	2.5	0.8
	$\sigma$	3.21	1.54	2.5	0.8

试验结果表明检定车现场试验数据全部符合标准要求,比差和角差均在规程规定限制范围内,与电容分压器替代法测试数据基本一致,可见检定车的测量结果的数据是可信的。

#### 4 结 论

针对750 kV电压等级互感器传统校验工作量大,设备运输困难,安全保障低等问题,研制可应用于750 kV和330 kV电压互感器计量检定车。深入探讨了检定车的升压原理和分体串联非标组合式标准互感器的设计及其误差分析,并与电容分压器替代法进行比较,通过现场对同一组750 kV电压互感器的试验数据验证检定车的可行性。

#### 参考文献

- [1] 毛安澜,王晓琪,王玲,等.电压互感器现场校验新方法的研究[J].电测与仪表,2011,54(48):27-29.
- [2] 周峰,郑汉军,雷民,等.1 000 kV特高压串联式标准电压互感器的研制[J].高电压技术,2009,35(10):2350-2355.
- [3] 易茂祥,陶金,吴友杰,等.一种基于电力线的现场总线设计与仿真[J].电子测量与仪器学报,2015,29(2):258-264.
- [4] 唐旭英.双耦合谐振回路选频特性仿真研究[J].国外电子测量技术,2015,34(3):42-50.
- [5] 高敬更,乔立风,闫宪峰,等.基于LabVIEW和FFT的互感器误差校验系统的研究[J].电子测量技术,2013,36(11):80-83.
- [6] 周峰,岳长喜,雷民,等.基于电压的1 000 kV国家工频电压计量标准[J].计量学报,2012,33(6):541-545.
- [7] 黄海宏,杨胜江,王海欣.多逆变器并联在EAST装置中的应用[J].电子测量与仪器学报,2012,26(9):818-823.
- [8] 徐敏锐,黄奇峰,卢树峰,等.500 kV电力互感器现场校验车设计与应用[J].电测与仪表,2014,51(16A):130-133.
- [9] 郝允志,周黔.动态频率测量的滞后误差分析及改进方法[J].仪器仪表学报,2016,37(1):75-82.
- [10] 李振东,曹建安,余顺花,等.一种电容式电压互感器现场试验方法的研究[J].青海电力,2014,33(2):18-22.

#### 作者简介

**樊博**,1989年出生,硕士研究生,主要研究方向为高压互感器计量检测技术。

E-mail:309007069@qq.com

**李伟**,1966年出生,高级工程师,本科,主要研究方向为高压计量装置智能化检测方法。

**展宗辉**,1983年出生,本科,主要研究方向为互感器计量误差检定。

**张浩淼**,1978年出生,本科,主要研究方向为电能计量装置测试技术。

**王伟**,1968年出生,本科,主要研究方向为电能计量管理技术研究。

**程志强**,1973年出生,本科,主要研究方向为高电压计量与测试技术。

**王涛**,1978年出生,本科,主要研究方向为互感器现场校验新方法。

**舒一飞**,1989年出生,本科,主要研究方向为电能信息采集监控技术。

**邢雅**,1989年出生,研究生,主要研究方向为电力系统保护与控制。