

DOI: 10.7667/PSPC171076

# 采用等安匝原理的自校式 CT 误差测量方法

冯宇<sup>1</sup>, 尹志荣<sup>2</sup>, 王欢<sup>1</sup>, 姜敏<sup>3</sup>, 白洋<sup>3</sup>, 王晓琪<sup>1</sup>

(1. 电网环境保护国家重点实验室(中国电力科学研究院武汉分院), 湖北 武汉 430074; 2. 国网山西省电力公司检修分公司, 山西 太原 030032; 3. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原 030001)

**摘要:**为解决特高压交流输电气体绝缘封闭式开关设备(Gas-Insulated metal-enclosed Switchgear, GIS)中的电流互感器(Current Transformer, CT)现场误差测量试验难以开展的问题,提出了采用等安匝原理的自校式 CT 误差测量方法。通过在 CT 铁心上设置同样结构的双二次绕组,以实现 CT 误差的自校。正常运行时双二次绕组并联连接;进行误差测量时,双二次绕组分开,通过向其中一个绕组(等效一次绕组)输入电流,构造出等效于正常运行状态下的磁势,通过自校法测差电路可实现对另一绕组(等效二次绕组)的误差测量。与传统比较法相比,可有效降低现场工作环境下对大型试验设备和电源的要求,减少试验和运维工作量。对工程用自校 CT 线圈的仿真及试验,验证了所提方法的有效性。

**关键词:**特高压; 电流互感器; 等安匝; 自校; 误差测量

## An error measurement method of self calibration current transformers by using the theory of equal ampere-turns

FENG Yu<sup>1</sup>, YIN Zhirong<sup>2</sup>, WANG Huan<sup>1</sup>, JIANG Min<sup>3</sup>, BAI Yang<sup>3</sup>, WANG Xiaoqi<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection (China Electric Power Research Institute Wuhan Branch), Wuhan 430074, China; 2. Maintenance Corporate of Shanxi Provincial Electric Power Corp, Taiyuan 030032, China; 3. Electric Power Research Institute, Shanxi Provincial Electric Power Corp, Taiyuan 030001, China)

**Abstract:** In order to solve the problems occurred in field error measurement of current transformer in UHV AC transmission Gas-insulated Metal-enclosed Switchgear (GIS), an error measurement method of self calibration CT realized by equal ampere-turns is proposed. Double secondary windings with the same structure are arranged in the CT's core to realize error self calibration of CT. In normal working condition, the double secondary windings are connected in parallel; in the error test, the double secondary windings are separated, through inputting current to one of the secondary winding (equivalent to primary winding), the magnetic potential under the equivalent normal working condition is constructed, and the measurement of CT's error can be realized by measuring the other winding's current (equivalent to the secondary winding) under the self calibration circuit. Compared with the traditional comparison method, it can effectively reduce the requirements of large-scale test equipment and power supply in field work, and reduce the workload of test and operation and maintenance. The simulation and experiment of the self calibration CT used in the engineering demonstrate the effectiveness of the method.

This work is supported by Science and Technology of State Grid Corporation of China (No. GY71-15-034).

**Key words:** UHV; current transformer; equal ampere-turns; self calibration; error measurement

## 0 引言

随着电网容量的不断增大和特高压交流工程的不断发展,工程用 CT 已获得广泛应用<sup>[1-2]</sup>,目前国内特高压交流工程用 CT 多为 GIS 母线式和变压器

套管式。研究表明<sup>[3-6]</sup>,CT 经过长时间运行后,易出现剩磁、老化、二次负荷变化等现象,从而影响其测量准确度。GB 50150-2006《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》规定了 CT 在交接时需进行交接试验,其中就包含了 CT 的误差测量<sup>[7]</sup>;国家计量检定规程 JJG 1021-2007《电力互感器检定规程》则要求:用于电能计量的 CT 在投运后,需定

期对 CT 进行误差测量<sup>[8]</sup>。

目前,对 CT 误差的测量方法可分为直接法(比较法)和间接法(负荷外推法、低压外推法等多种方法)。比较法目前最为成熟,其原理是通过比较电路测量被检 CT 与标准器 CT 的比值差和相角差,从而得到被检 CT 相对于标准器 CT 的误差。采用比较法时,需对 CT 所在的一次回路施加最高 120% 的 CT 额定一次电流,特高压用 CT 的额定一次电流最大值为 6 000 A,因此在一次回路中需施加最大 7.2 kA 的一次电流。就当前的技术水平而言,在特高压变电站实现如此规模的升流工作,难度十分巨大。此外,较长的试验回路不仅会消耗较大有功功率的回路电阻,而且其回路电感也很大,会消耗大量的无功功率。因此,该项试验对电源容量要求很高,且需对测试回路进行无功补偿<sup>[9-10]</sup>。文献[11]提出了基于电力电子元器件的智能化检定系统,自动进行无功补偿,但该测量方法未改变试验接线方式,工作量也无明显减少。总而言之,特高压 CT 误差的比较法存在升流难度大、测试系统设备繁多、接线难度大的困难。

鉴于上述困难并考虑到特高压设备的特点,GB/T 50832-2013《1 000 kV 系统电气装置安装工程电气设备交接试验标准》规定:误差测量以比较法为准,如果施加电流达不到规定值,可采用间接法检测,使用间接法的前提是用比较法测量 20%  $I_N$  (额定一次电流)点的误差。在间接法中,若通过负荷外推法测量误差,所施加的一次电流虽有所减小,但同样存在试验接线难度大、一次回路长、阻抗大的缺点;对于低压外推法而言,由于特高压用 CT 自身没有一次导体,其误差测量方式并不适用<sup>[12]</sup>。

文献[13]对非均绕等安匝法进行了有限元仿真研究,得到铁心中磁场分布与绕制角度的变化特征。文献[14]提出采用一次导体并联等安匝的方法进行升流,其方式较串联升流方式更符合实际情况,但该方法更适用于出厂试验,在变电站实际工作情况下实施的可行性较小。

综上所述,现场误差试验因存在诸多困难,致使特高压 CT 在交接试验和后续运维中,无法严格执行国标和计量规程的相关规定要求<sup>[15]</sup>。本文提出的自校式 CT 误差测量方法,可有效降低现场工作环境下对大型试验设备和电源的要求,减少试验和运维工作量,解决当前对特高压用 CT 无法严格按照检定规程进行误差测量的难题,为其周期性误差测量奠定基础,从而有效保证 CT 测量结果的准确性,为确保电量贸易公平、准确地评估电网运行经济性等工作提供支撑。

本文以特高压 GIS 用 CT 为例对自校法进行阐述,该方法同样适用于变压器套管式 CT。

## 1 特高压用自校式 CT 原理

### 1.1 当前特高压 GIS 用 CT 误差检定方法

当前 GIS 用 CT 误差试验主要通过比较法测量误差<sup>[16]</sup>:由调压器、升流器产生的一次大电流经软导线连接 GIS 进线套管,输入 GIS 导体,并从 GIS 另一侧的出线套管输出。由于套管高达十多米,因此,其接线难度和任务量巨大,试验电流施加示意图如图 1 所示。

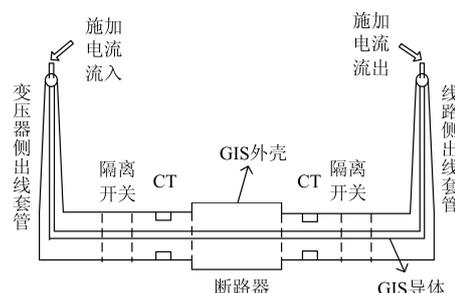


图 1 特高压 GIS 用 CT 试验电流施加示意图

Fig. 1 Schematic diagram of current application of CT test for UHV GIS

### 1.2 自校式 CT 基本原理

电流互感器的磁势平衡方程式为

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1 \quad (1)$$

式中:  $\dot{I}_1$  为 CT 一次电流;  $N_1$  为一次绕组匝数;  $\dot{I}_2$  为二次电流;  $N_2$  为二次绕组匝数;  $\dot{I}_0$  为 CT 励磁电流。

CT 在正常运行状态下,励磁电流很小,因此在忽略励磁电流的情况下,式(1)可简化为

$$\dot{I}_1 N_1 = -\dot{I}_2 N_2 \quad (2)$$

由安培环路定理,磁路欧姆定律和磁路基尔霍夫定律可知:绕在磁路上的线圈匝数与线圈电流的乘积等于磁路中的磁场强度与磁路的线积分。因此可用多匝小电流缠绕的方式实现单匝大电流的磁场效应<sup>[17]</sup>,即等安匝原理,特高压用自校式 CT 就是基于这一原理实现自校功能的。

本文提出的特高压自校式 CT 结构如图 2(b)所示,与常规 CT 相比,增加了一个绕组  $WS_3$ ,  $WS_3$  为与  $WS_2$  匝数相等、结构完全相同的另一个二次绕组<sup>[18]</sup>,开关  $K_1$  和  $K_2$  用于控制  $WS_2$  和  $WS_3$  的连接关系。当自校式 CT 正常运行时,开关  $K_1$  和  $K_2$  均闭合,  $WS_2$  和  $WS_3$  处于并联状态,本文将其命名为

运行状态；进行误差测量时，开关  $K_1$  和  $K_2$  同时打开， $WS_2$  和  $WS_3$  形成匝数 1/1 的自校模式，本文将其命名为自校状态，即将  $WS_2$  视为等效一次绕组， $WS_3$  视为等效二次绕组，结合等安匝原理可知，一次绕组  $WS_1$  1 匝通过 6 kA 时的磁场效应(6 000 安匝)等于其二次绕组  $WS_2$  6 000 匝通过 1 A 时的磁场效应(6 000 安匝)，此时无需对  $WS_1$  施加电流，而只需对  $WS_2$  通入 1 A 的额定二次电流，即可在 CT 铁心中建立正常运行状态下的等值磁势，再通过自校法测差电路比较绕组  $WS_2$  和  $WS_3$  中电流，即可实现对 CT 误差的测量。

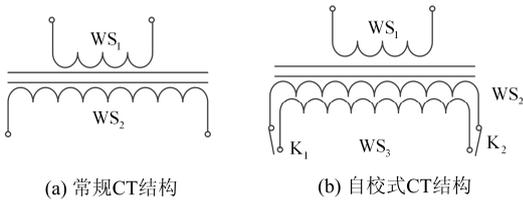


图 2 CT 结构设计图

Fig. 2 CT structure design drawing

## 2 自校式 CT 的状态及误差分析

### 2.1 状态分析

#### 1) 运行状态

$WS_2$  和  $WS_3$  并联，等值电路如图 3(a)所示，由于在分析 CT 工作特性时，只注意一、二次电流的变换，而不考虑一次电压的变化，因此在绘制 CT 等值电路图时，通常忽略一次绕组端电压和阻抗<sup>[19]</sup>，图 3(a)中  $i'_1$ 、 $i_0$ 、 $i_2$  分别为 CT 的一次折算到二次的电流、励磁电流和二次电流； $Z'_0$ 、 $Z_{21}$ 、 $Z_{22}$  分别为励磁阻抗、绕组  $WS_2$  的阻抗和绕组  $WS_3$  的阻抗，理论上存在  $Z_{21} = Z_{22}$  的关系； $Z_{2n}$  为二次引线及二次负荷的总阻抗值。其中， $Z_{21}$ 、 $Z_{22}$  是包含了二次绕组电阻与已考虑自感和互感影响的电抗值。

#### 2) 自校状态

等值电路如图 3(b)所示，与图 3(a)的差别是一次侧和二次侧阻抗发生了变化。

### 2.2 误差分析

以励磁安匝表示的 CT 比值差和相角差误差公式如式(3)所示<sup>[19]</sup>。

$$\begin{cases} f = -\frac{I_2 Z_{2\Sigma} L_C}{2\pi f \mu A_C N_2 I_1 N_1} \times \sin(\alpha + \theta) \times 100\% \\ \delta = \frac{I_2 Z_{2\Sigma} L_C}{2\pi f \mu A_C N_2 I_1 N_1} \times \cos(\alpha + \theta) \times 3440(') \end{cases} \quad (3)$$

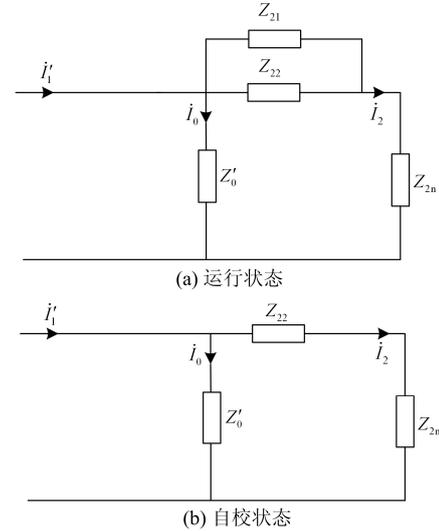


图 3 等值电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram

式中： $Z_{2\Sigma}$  为二次回路总阻抗； $L_C$  为铁心的平均磁路长度； $\mu$  为铁心导磁系数； $A_C$  为铁心有效截面积； $\alpha$  为二次阻抗角； $\theta$  为铁心损耗角。

结合图 3(a)和图 3(b)的 CT 等值电路，可得出两种状态下的误差计算公式如式(4)和式(5)所示。

运行状态误差计算公式：

$$\begin{cases} f = -\frac{I_2 (Z_{21} // Z_{22} + Z_{2n}) L_C}{2\pi f \mu A_C N_2 I_1 N_1} \times \sin(\alpha + \theta) \times 100\% \\ \delta = \frac{I_2 (Z_{21} // Z_{22} + Z_{2n}) L_C}{2\pi f \mu A_C N_2 I_1 N_1} \times \cos(\alpha + \theta) \times 3440(') \end{cases} \quad (4)$$

自校状态误差计算公式：

$$\begin{cases} f = -\frac{I_2 (Z_{22} + Z_{2n}) L_C}{2\pi f \mu A_C N_2 I_1 N_1} \times \sin(\alpha + \theta) \times 100\% \\ \delta = \frac{I_2 (Z_{22} + Z_{2n}) L_C}{2\pi f \mu A_C N_2 I_1 N_1} \times \cos(\alpha + \theta) \times 3440(') \end{cases} \quad (5)$$

当 CT 铁心工作在线性区域，即假定  $\mu$  不变时，由式(4)、式(5)可知，二次绕组阻抗的变化是造成比较法和自校法误差测量出现差异的根本原因。在实际情况下，CT 测量误差主要来源于励磁电流  $i_0$  (CT 二次电流和励磁电流存在阻抗分流的关系)。由于在自校法时存在  $Z_0 \gg (Z_{22} + Z_{2n})$ 、比较法时存在  $Z_0 \gg (Z_{21} // Z_{22} + Z_{2n})$  的关系，可知自校状态下  $i_0$  相较于运行状态  $i_0$  略大，因此理论上自校状态误差更大，当自校法满足误差限值时，比较法更满足误差限值。

## 3 仿真分析

选用 ANSYS 有限元分析软件，以特高压工程

用 CT 为基础建立自校式 CT 仿真模型,在三维瞬态电磁场工作环境下开展相关仿真计算。模型建模参数为:铁心材料选用 1J85 型坡莫合金,其  $B-H$  曲线如图 4 所示,铁心内径为 1 130 mm,外径为 1 190 mm,厚度为 15 mm。一次绕组采用 GIS 一次导体模型,内外半径分别为 75 mm/90 mm,长度为 1 600 mm,大于铁芯的直径长度,设置铝质材料;  $WS_2$  和  $WS_3$  分别以 6 组每组 1 000 匝串联线圈等效,均匀非紧密环绕于铁芯,材料属性为铜。在二次绕组外对称布置 3 组铜质平衡绕组,每组 400 匝,均匀包覆二次绕组。建立的仿真模型如图 5 所示,图中蓝色部分和青色部分分别代表二次绕组  $WS_2$  和  $WS_3$ ,外部包覆平衡绕组,网格剖分后的模型如图 6 所示。

通过 ANSYS 场路耦合可实现 CT 的磁感应效应,CT 运行状态和自校状态的耦合外电路如图 7 所示,图中,一次绕组 W0 代表 GIS 一次导体, W1~W12 分别代表构建的二次绕组部件,并通过电路连接实现串并联结构, W1~W6、W7~W12 分别代表了绕组  $WS_2$  和  $WS_3$ , W13~W18 分别组成了 3 组反极性连接的平衡绕组。

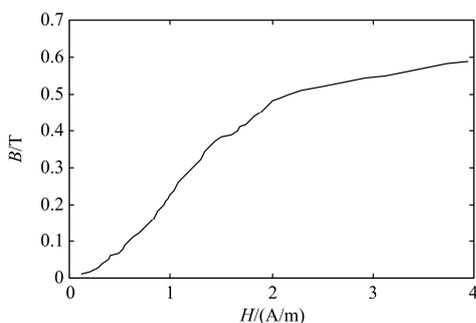
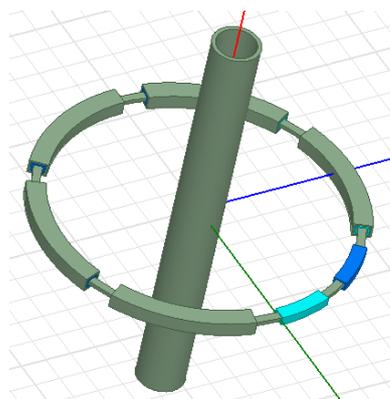
图 4 1J85 型号坡莫合金  $B-H$  曲线Fig. 4  $B-H$  curve of 1J85 type of permalloy

图 5 自校式仿真模型

Fig. 5 Self calibrated CT simulation model

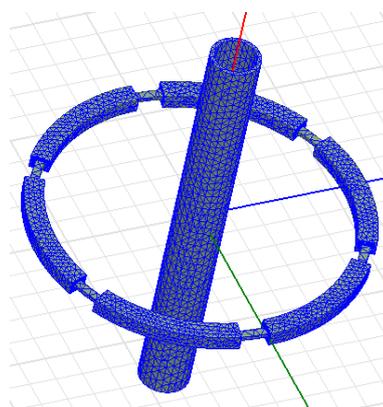
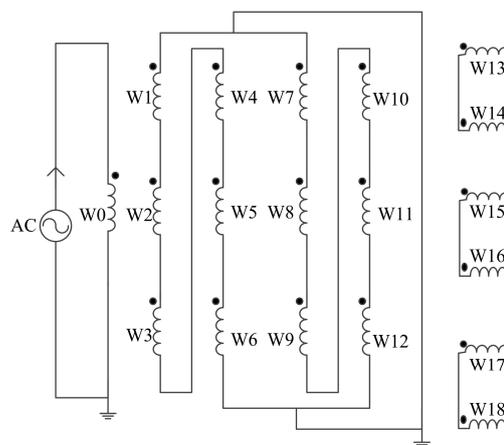


图 6 仿真模型剖分图

Fig. 6 Simulation model subdivision diagram

以 CT 额定工作点( $100\% I_N$ )为例进行说明,在比较法时一次电流从 GIS 一次导体通入有效值为 6 kA 的工频电流,仿真计算二次绕组  $WS_2$  和  $WS_3$  的并联电流;在自校法时一次电流从绕组  $WS_2$  通入有效值为 1 A 的工频电流,仿真计算绕组  $WS_3$  的电流。进而比较两种情况下二次电流的差异。需要指出的是:两种状态下的外电路仅改变绕组的接线方式和输入电流的大小,其他参数均未发生改变。

仿真结果如图 8 所示,从图中可以看出,由自校法与比较法仿真计算得到的数据高度吻合,经数据处理可知:比较法二次输出电流有效值为 0.999 8 A,比值差为  $-0.02\%$ ,相角差为  $0.028'$ ,自校法二次侧输出电流有效值为 0.998 6 A,比值差为  $-0.14\%$ ,相角差为  $0.371'$ ,两种方法的比值差异为 0.001 2 A,相角差异为  $-0.343'$ ,仿真结果验证了通过自校法对自校式 CT 进行误差试验的可行性。对其他误差试验工作点( $1\% I_N$ 、 $5\% I_N$ 、 $20\% I_N$ 、 $120\% I_N$ )的仿真亦有同样结论。



(a) 运行状态

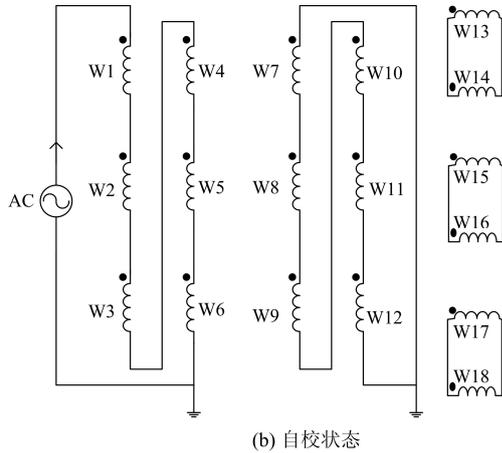


图 7 外电路耦合接线图

Fig. 7 Schematic diagram of external circuit coupling

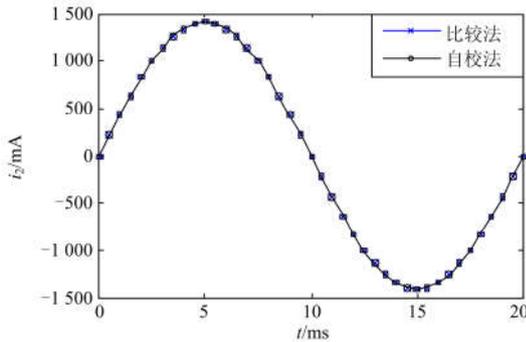


图 8 二次侧仿真电流波形图

Fig. 8 Secondary side simulation current waveform

## 4 自校式 CT 线圈的研制与试验

### 4.1 试验过程及接线方式

为了验证所提方法的正确性，本文研制了自校式 CT 样机，如图 9 所示，CT 准确度等级为 0.2 级，电流比为 6 000/3 000/1 A，额定负荷 10 VA。



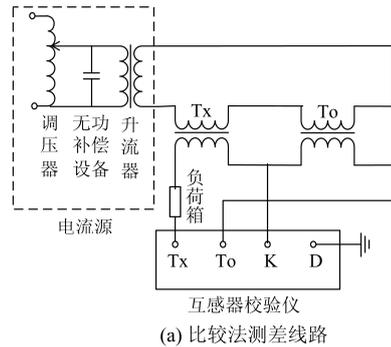
图 9 自校式 CT 样机

Fig. 9 Self calibrated CT prototype

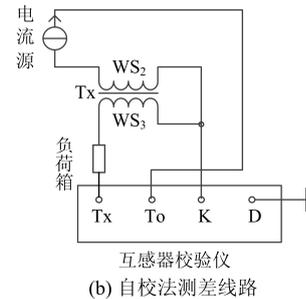
对自校式 CT 分别采用比较法和自校法进行实际误差测量，上述两种状态下，二次负荷分别设置加载 10 VA 和 0 VA 功率，功率因数均为 0.8。

比较法测差线路如图 10(a)所示，经电流源(调压器、升流器及无功补偿设备)产生一次电流，Tx 与 To(0.05S 级)二次输出信号进入校验仪，校验仪对两路信号进行误差比较。

自校法测差线路接线图如图 10(b)所示，绕组 WS<sub>2</sub> 通入试验电流，通过测差电路，经校验仪比较绕组 WS<sub>3</sub> 与 WS<sub>2</sub> 的电流。



(a) 比较法测差线路



(b) 自校法测差线路

图 10 测差线路

Fig.10 Schematic diagram of measurement error

### 4.2 试验结果

表 1 和表 2 分别给出了变比为 6 000/1 和 3 000/1 时比较法和自校法的误差测试结果。

表 1 自校式 CT 6 000/1 时误差数据  
Table 1 Self calibration CT 6 000/1 error data

| 误差  | 额定电流百分数/%          |        |        |        |        | 负荷/<br>VA |    |
|-----|--------------------|--------|--------|--------|--------|-----------|----|
|     | 1                  | 5      | 20     | 100    | 120    |           |    |
| 比较法 | $f(\%)$            | -0.076 | -0.055 | -0.044 | -0.036 | -0.069    | 10 |
|     | $\delta(^{\circ})$ | -0.70  | -0.77  | -0.95  | -0.58  | -0.32     |    |
|     | $f(\%)$            | -0.069 | -0.050 | -0.043 | -0.035 | -0.063    | 0  |
|     | $\delta(^{\circ})$ | -0.23  | -0.33  | -0.67  | -0.35  | 0.05      |    |
| 自校法 | $f(\%)$            | -0.023 | -0.030 | -0.031 | -0.031 | -0.031    | 10 |
|     | $\delta(^{\circ})$ | 1.57   | 1.32   | 1.12   | 0.84   | 0.81      |    |
|     | $f(\%)$            | -0.018 | -0.020 | -0.021 | -0.023 | -0.023    | 0  |
|     | $\delta(^{\circ})$ | 1.02   | 0.95   | 0.85   | 0.67   | 0.65      |    |

表 2 自校式 CT 3 000/1 时误差数据  
Table 2 Self calibration CT 3 000/1 error data

| 误差  | 额定电流百分数/%          |       |       |       |       | 负荷/<br>VA |    |
|-----|--------------------|-------|-------|-------|-------|-----------|----|
|     | 1                  | 5     | 20    | 100   | 120   |           |    |
| 比较法 | $f(\%)$            | 0.017 | 0.006 | 0.006 | 0.037 | 0.038     | 10 |
|     | $\delta(^{\circ})$ | 0.94  | 0.74  | 0.24  | -0.59 | -0.61     |    |
|     | $f(\%)$            | 0.041 | 0.025 | 0.019 | 0.033 | 0.035     | 0  |
|     | $\delta(^{\circ})$ | 2.74  | 2.42  | 1.52  | 0.06  | 0.27      |    |
| 自校法 | $f(\%)$            | 0.033 | 0.031 | 0.032 | 0.032 | 0.032     | 10 |
|     | $\delta(^{\circ})$ | -4.03 | -4.05 | -4.06 | -4.06 | -4.05     |    |
|     | $f(\%)$            | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0     | 0         | 0  |
|     | $\delta(^{\circ})$ | -2.58 | -2.58 | -2.60 | -2.60 | -2.60     |    |

从表 1、表 2 可看出, 自校式 CT 线圈满足 0.2 级 CT 的误差限值, 且两种方法的误差变化趋势相同, 误差偏差亦能控制在 0.1 级 CT 误差限值要求以内, 证明了本文所提方法的有效性, 且自校法和比较法具有误差测量一致性的特点。

## 5 结论

1) 提出了采用等安匝原理的特高压用自校式 CT 误差测量方法, 可解决当前现场 CT 误差测量工作因一次升流难度大、所需试验设备多、工作量大等因素导致试验难以开展的问题。

2) 对自校式 CT 两种工作状态进行了理论分析, 得出自校法与常规比较法在误差测量方面具有一致性的结论; 通过对所构建的自校式 CT 模型的仿真研究, 得出自校法在理论上的可行性。

3) 研制了自校式 CT, 并分别采用比较法和自校法进行了实际误差测量。试验测量结果证明了本文所提方法的正确性和有效性。

## 参考文献

- [1] 耿庆申, 卢玉, 樊海荣, 等. 特高压和超高压交流输电系统运行损耗比较分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 72-77.  
GENG Qingshen, LU Yu, FAN Hairong, et al. Comparative analysis of operation losses of UHV AC and EHV AC transmission systems[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 72-77.
- [2] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [3] 戴魏, 郑玉平, 白亮亮, 等. 保护用电流互感器传变特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 46-54.  
DAI Wei, ZHENG Yuping, BAI Liangliang, et al. Analysis

- of protective current transformer transient response[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 46-54.
- [4] 张佩君, 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] 尹项根, 张哲, 王友怀, 等. 变压器间及其与电流互感器暂态交互作用分析和保护对策[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 1-9.  
YIN Xianggen, ZHANG Zhe, WANG Youhuai, et al. Multiple transformers and CTs interactive effect and its impact on the protective relay[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 1-9.
- [6] 于会群, 李增峰, 吉军, 等. 电厂高压设备无线移动测温系统开发[J]. 热力发电, 2017, 46(11): 61-66.  
YU Huiqun, LI Zengfeng, JI Jun, et al. Development of wireless mobile temperature monitoring system for high voltage equipments in power plants [J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(11): 61-66.
- [7] 中国电力企业联合会. 电气装置安装工程电气设备交接试验标准: GB 50150—2016[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.  
China Electricity Council. Erection works of electrical installations-standard for hand-over test of electric equipment: GB 50150—2016[S]. Beijing: China Planning Press, 2006.
- [8] 国家高电压计量站, 浙江省质量技术监督检测研究院. 电力互感器检定规程: JJG1021—2007[S]. 北京: 中国计量出版社, 2007.  
National High Voltage Metering Station, Zhejiang Institute of Quality and Technical Supervision and Testing. Verification regulation of instrument transformer in power system: JJG1021—2007[S]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2007.
- [9] 吴良科, 刘浩, 岳长喜, 等. 大电流互感器现场检定试验中的无功补偿[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1560-1565.  
WU Liangke, LIU Hao, YUE Changxi, et al. Reactive power compensation of on-site calibration test for current transformers[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1560-1565.
- [10] 章述汉, 朱跃, 吴良科, 等. 750 kV GIS 电流互感器现场检定试验方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(5): 1200-1205.

- ZHANG Shuhan, ZHU Yue, WU Liangke, et al. Method of on-site calibration test for 750 kV GIS current transformers[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(5): 1200-1205.
- [11] 徐敏锐, 黄奇峰, 卢树峰, 等. 1000 kV 特高压 GIS 电流互感器现场误差智能化检定系统设计与应用[J]. 电测与仪表, 2015, 52(22): 68-72.
- XU Minrui, HUANG Qifeng, LU Shufeng, et al. Design and application of intelligent on-site error verification system for 1000 kV UHV current transformer in GIS[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(22): 68-72.
- [12] 吕志强, 田勇, 路夏甲, 等. 现场电流互感器误差测试间接检定法的研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2014(6): 79-81, 103.
- LÜ Zhiqiang, TIAN Yong, LU Xiajia, et al. The research of the indirect calibration methods on the site current transformers error test[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2014(6): 79-81, 103.
- [13] 张皓, 赵伟, 屈凯峰, 等. 非均绕等安匝法试验下电流互感器铁心磁场的研究[J]. 电工电能新技术, 2008, 27(1): 47-50, 54.
- ZHANG Hao, ZHAO Wei, QU Kaifeng, et al. Research on magnetic field of current transformer under non uniformly-distributed equal ampere-turns test[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2008, 27(1): 47-50, 54.
- [14] 郑汉军, 吴良科, 雷民, 等. 并联式等安匝法在 GTA 现场误差校验中应用[J]. 电测与仪表, 2010, 47(12): 31-35, 40.
- ZHENG Hanjun, WU Liangke, LEI Min, et al. Application of parallel and equal ampere turns method on field error calibration GTA[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010, 47(12): 31-35, 40.
- [15] 汪溢, 黄曙, 马凯. 继电保护在线校核技术研究[J]. 热力发电, 2016, 45(8): 87-93.
- WANG Yi, HUANG Shu, MA Kai. Relay protection online verifying technology[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(8): 87-93.
- [16] 孙冲, 耿建坡, 崔海利, 等. 电流互感器误差测试大电流回路特性及改善方法研究[J]. 电测与仪表, 2012, 49(9): 58-62.
- SUN Chong, GENG Jianpo, CUI Haili, et al. Research of current loop impedance and improving method of on-site calibration for current transformers[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(9): 58-62.
- [17] 冯宇, 王晓琪, 汪本进, 等. 采用等安匝合成电源的电流互感器谐波特性测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 3154-3160.
- FENG Yu, WANG Xiaoqi, WANG Benjin, et al. A measurement method of current transformers' harmonic characteristics by using equal ampere-turns synthetic power[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3154-3160.
- [18] 中国电力科学研究院, 国网山西省电力公司. 一种电力系统用 CT 计量绕组的自校线圈: 中国, 201520554853.X[P]. 2015-07-28.
- [19] 凌子恕. 高压互感器技术手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 46-51.

收稿日期: 2017-07-19; 修回日期: 2017-11-20

作者简介:

冯宇(1978—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电能质量分析与控制、互感器技术方面的研究工作。E-mail: fengyu19780119@163.com

(编辑 许威)