

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190342

## 高压电流互感器泄漏电流测量及消除方法研究

李敏, 靳绍平, 胡琛, 杨爱超, 吴宇, 王毅, 李东江

(国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

**摘要:** 针对高压状态下泄漏电流影响标准电流互感器、无法准确地检测高压计量设备的问题, 研制了一套零泄漏电流高压电能标准装置。解决了泄漏电流影响标准电流互感器准确测量问题, 填补了电能标准装置泄漏电流消除领域技术空白。阐述了泄漏电流产生的原理并分析了其对电流互感器的误差影响, 提出了基于互感器校验仪的泄漏电流测量方法, 可实现电流互感器屏蔽和绝缘水平精准评估。实验证明所研制的零泄漏电流高压电能标准装置能消除泄漏电流, 实现在模拟运行工况下对高压电能计量设备的误差检测。

**关键词:** 泄漏电流; 等电位; 高压电能标准

### Research on leakage current measurement and elimination method of high voltage current transformer

LI Min, JIN Shaoping, HU Chen, YANG Aichao, WU Yu, WANG Yi, LI Dongjiang  
(State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China)

**Abstract:** The high voltage metering equipment cannot be accurately detected, because the leakage current affects the standard current transformer under high voltage. For the problem, a set of zero leakage current high voltage electric energy standard device is developed. This device not only solves the problem that the leakage current affects the accurate measurement of the standard current transformer, but also fills the technical blank in the field of leakage current elimination of the electric energy standard device. The principle of leakage current generation is described and its influence on the error of current transformer is analyzed. A leakage current measurement method based on the transformer calibrator is proposed, which can realize accurate measurement of current transformer shielding and insulation level. Experiment shows that the developed zero leakage current high voltage electric energy standard device can eliminate leakage current and realize error detection of high-voltage electric energy measurement equipment under simulated operating conditions.

This work is supported by Science and Technology Project of Stated Grid Corporation of China (No. 52182017001M).

**Key words:** leakage current; equipotential; high voltage electric energy standard

## 0 引言

高压电能计量设备是在高电压状态下测量电能的器具或组合, 是配电网中最常用的电能测量元件之一, 其整体误差通常通过理论计算综合误差的方式来评价<sup>[1-2]</sup>, 故不能标定高压电能计量设备的整体准确度。近年来, 高压电能表<sup>[3-6]</sup>及配网一二次融合设备迅速发展, 其误差只能整体检测。文献[7]研制了一种高压电能计量装置整体误差校验台, 介绍了校验台的软硬件设计原理。文献[8]提出了采用标准

互感器、电能表等计量标准进行 10 kV 高压电能计量装置整体校验台的校准方法, 并评定校准结果的不确定度。但是, 目前高压电能计量装置整体校验台及其校准依然还是采用更高等级的标准互感器和电能表来检定和校准。

高压电能计量装置通过互感器<sup>[9-11]</sup>将电力系统中一次高电压和大电流按比例变换成二次标准信号, 然后计算电能量。电流互感器(以下简称 CT)一、二次绕组经过绝缘后均匀地绕制在同一磁芯上, 这种制造工艺不可避免地存在分布电容和漏电感, 当 CT 一次回路处于工作电压时将产生电容电流, 即泄漏电流<sup>[12]</sup>, 该泄漏电流叠加到互感器校验仪测

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(52182017001M)

量回路产生附加误差, 影响测量结果。国标 GB/T 20840.4-2015 组合互感器的补充技术要求和电力行业标准 DL/T668-2017 测量用互感器检验装置将泄漏电流作为 CT 误差变化的一个影响量, 并给出了在模拟运行工况下对 CT 的检验方法。目前, 国内对泄漏电流的研究主要集中在避雷器上<sup>[13-25]</sup>, 对电流互感器泄漏电流的研究较少。文献[25-27]分析了泄漏电流对 CT 误差的影响原理并给出了 CT 在高压下的误差计算方法。文中实验结果表明, 一般 CT 在工作电压下的泄漏电流为毫安级别, 由于某些高压标准 CT 本身屏蔽措施不到位, 存在较大的泄漏电流, 造成检定不准确。

综上所述, 国内外学者仅开展了测量用 CT 在泄漏电流影响下的误差特性分析, 并建议采用在模拟实际运行工况下对 CT 开展误差检测, 但并未对高压电能标准装置中的标准 CT 泄漏电流的测量及其消除技术开展研究。文中采用互感器校验仪进行 CT 泄漏电流测量实验, 得到了 CT 泄漏电流的正交分量和同向分量, 可精确评价 CT 屏蔽和绝缘水平, 并提出标准 CT 一二次等电位消除泄漏电流的方法, 在此基础上研制了零泄漏电流高压电能标准装置。

## 1 泄漏电流对 CT 误差的影响

由于工艺的原因, CT 一、二次绕组之间不可避免存在分布电容和漏电抗  $Z_C$ , 当一次绕组处于工作电压  $U_e$  时将产生电容电流  $I_x$ , 此电容电流即泄漏电流。

根据 DL/T668-2017 的要求, 对配网电流互感器的误差检测需要在额定工作电压  $U_E$  下, 检测原理如图 1 所示。当一次施加高压电流时, 标准 CT 和被试 CT 产生的泄漏电流  $I_{x0}$  和  $I_{x1}$  从一次绕组流入二次绕组, 根据 CT 误差计算公式可得到 CT 在电压  $U_E$  下的实际误差  $\varepsilon$  如式(1)所示, 其中  $K$  为 CT 变比。

$$\varepsilon = \frac{K(I_{21} + I_{x1}) - K(I_{20} + I_{x0})}{K(I_{20} + I_{x0})} \quad (1)$$

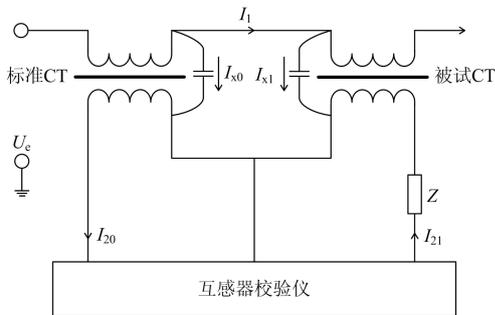


图 1 高压状态下电流互感器检定图

Fig. 1 Verification chart of current transformer under high voltage

由于高压标准 CT 泄漏电流远小于二次工作电流, 即  $I_{x0} \ll I_{20}$ , 式(1)可简化为

$$\varepsilon \approx \frac{I_{21} - I_{20}}{I_{20}} + \frac{I_{x1} - I_{x0}}{I_{20}} = \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon \quad (2)$$

从式(2)可知, 在高压状态下, CT 的实际误差由低压下的测量误差  $\varepsilon_0$  和被试 CT 和标准 CT 泄漏电流引起的附加误差  $\Delta\varepsilon$  组成。如果标准 CT 本身的泄漏电流大, 将会引起较大的测量误差, 故如何减小和消除泄漏电流对测量的影响非常重要。

为了研究泄漏电流对 CT 的影响, 对某组合互感器中 CT 进行实验, 实验方法如图 2 所示。其中虚线框内为被试 CT, 采用程控升压升流方式, 输出电压、电流夹角可  $0 \sim 360^\circ$  调节,  $Z$  为电流负载箱, 校验仪为准确度 2 级数字式互感器校验仪。依次检测其在零电压和 0.8 倍、1 倍、1.2 倍额定工作电压  $U_E$  下的误差, 并将数据绘制为图 3。

从图 3 中可以看出, 当施加的工作电压  $U_e$  增加, CT 的误差曲线愈加弯曲; CT 在 20% 额定电流  $I_n$  以下时误差变化非常大, 甚至超出 CT 的基本误差限值, 而在 20%  $I_n$  以上时, 误差变化迅速减小到可忽略不计。特别地, 在工作电压下, CT 比值差是朝正方向偏移, 而 CT 相位差均朝负方向偏移。

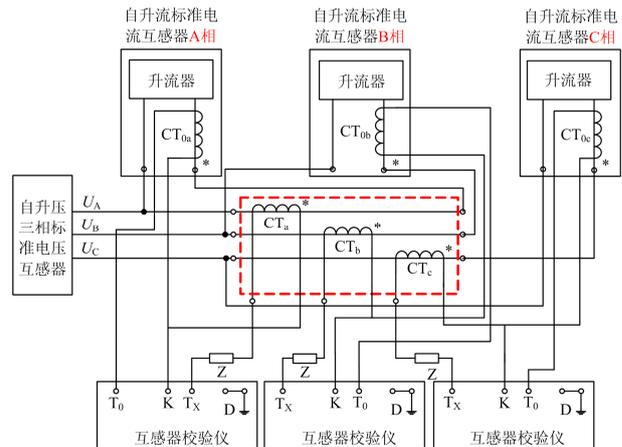
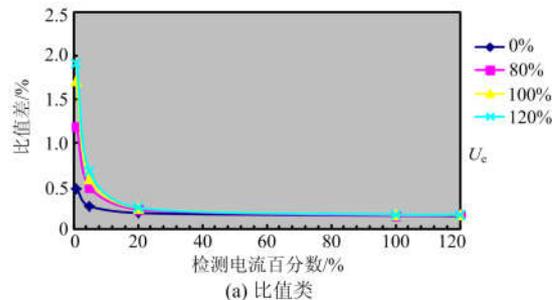


图 2 泄漏电流对 CT 误差影响实验方法

Fig. 2 Experimental method for the effect of leakage current on CT error



(a) 比值类

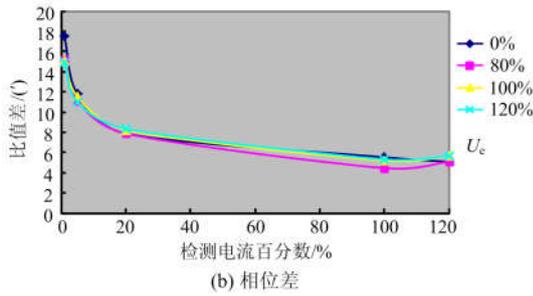


图3 泄漏电流对CT误差的影响

Fig. 3 Influence of leakage current on CT

为了得出CT在高压运行状态下泄漏电流对误差的影响规律，通过程控功率源改变施加电压和电流的夹角研究泄漏电流对电流互感器的影响，实验方法如图2所示，实验步骤如下所述。

1) 在零电压的状态下，按规程测量CT基本误差，此数据为背景数据，记录在表1对应电流百分数的第一列；

2) 在施加额定电压  $U_E$  状态下，测量CT误差数据；

3) 在步骤2)的基础上，施加反相180°的额定电压  $-U_E$ ，测量CT误差数据，计算测得误差与步骤2)误差的平均值，并记录在表1对应电流百分数的第二列。

由表1可以看出，将CT施加额定电压  $U_E$  和反相额定电压  $-U_E$  状态下测得的数据进行代数平均，得出的数据和零电压状态下CT误差相近，说明泄漏电流的影响具有方向性。

表1 泄漏电流对CT影响实验

Table 1 Influence of leakage current on CT

| 电流百分数               | 1     |       | 5     |       | 20    |       | 100   |       | 120   |       |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $f / \%$            | 0.283 | 0.248 | 0.076 | 0.065 | 0.062 | 0.047 | 0.054 | 0.054 | 0.058 | 0.055 |
| $\delta / (^\circ)$ | 15.45 | 15.03 | 10.03 | 9.97  | 6.57  | 6.24  | 2.20  | 1.82  | 1.92  | 1.71  |

## 2 CT 中泄漏电流的测量方法

泄漏电流的大小可直接反映CT的屏蔽和绝缘水平，可精确指导制造商对CT生产工艺的改进。IEC 61869-4-2013给出了一种泄漏电流测量方法，原理图如图4所示，测试电压表为高精度毫伏表，测试线为屏蔽双绞线。在1.2倍额定电压  $U_E$  下，分别测量CT二次绕组端子  $S_1$  接地时和  $S_2$  接地时毫伏表的电压  $U_x$  (计算用值取两次测量中的较大值)，泄漏电流即为  $U_x$  与二次串联电阻  $R$  之比。额定二次电流为5A时，测试电阻  $R$  取  $5 \Omega$ 。此种测量方法原理简单，但是在实际应用中的局限性在于：1) 采用的高精度毫伏表容易受强磁场干扰，导致测量失准；2) 双绞线抗干扰效果不佳；3) 测算结果为泄漏电流的模，不能分析其相量关系。

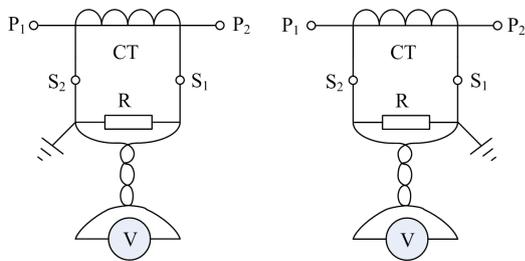


图4 泄漏电流测量原理图

Fig. 4 Schematic diagram of leakage current measurement

为克服上述方法的局限性，文中提出了基于HEG2型电工式互感器校验仪的CT泄漏电流测量方法，测量原理见图5，HEG2型电工式互感器校验仪如图6所示，是目前省级互感器检测机构常用的手动型互感器校验仪，可检定0.01级及以上准确度等级的电压电流互感器和比例标准，其电导、电纳测量分辨率可达  $1 \times 10^{-7}$ 。根据互感器校验仪测导纳的原理，当CT一次升到工作电压时，互感器校验仪的K、D回路和a、x回路分别测量被试CT的泄漏电流  $I_x$  和标准电压互感器  $PT_0$  二次电压  $U_2$ 。互感器校验仪根据  $U_2$ 、 $I$  可得到被试CT的电导值  $G$  和电纳值  $B$ 。通过得到的电导和电纳可反推出CT一、二次之间泄漏电流的同相分量  $I_G$  和正交分量  $I_B$ ，计算公式见式(3)和式(4)，式中  $K$  为标准电压互感器  $PT_0$  的额定变比。这种方法的优势在于利用常规互感器检定设备，实现对CT泄漏电流同相分量和正交分量的测量，并可通过测得的  $I_G$ 、 $I_B$  评估CT的屏蔽和绝缘水平。

$$I_G = U_2 \times K \times G \quad (3)$$

$$I_B = U_2 \times K \times B \quad (4)$$

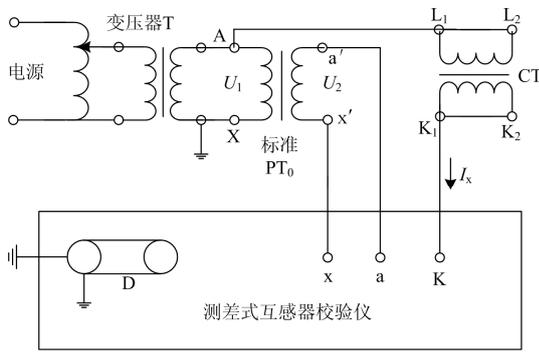


图 5 基于互感器校验仪泄漏电流测量方法

Fig. 5 Leakage current measurement method based on differential transformer calibrator



图 6 电工式 HEG2 型互感器校验仪

Fig. 6 Electric HEG2 transformer calibrator

### 3 零泄漏电流高压电能标准装置

从前文对泄漏电流产生原理的阐述可知,运行状态下的标准 CT 不可避免会产生泄漏电流。文中提出了电能标准装置中 CT 泄漏电流的消除方法,并在此基础上,设计了零泄漏电流高压电能标准装置,其原理如图 7 所示。装置分高、低压区间,包括双二次绕组双级电压互感器  $PT_G$ 、标准 CT、模数转换 AD、中央处理器 CPU、通信模块、直流电源、后台 PC 等。高压区间完成电压、电流采样后计算电能,将 CT 二次、AD 采样单元、CPU、直流电源及通信模块公共端与一次高电压等电位,这样 CT 的一次绕组和二次绕组等电位,没有了电压差,即可消除 CT 的泄漏电流;低压区间主要为零电位状态的显示模块,完成电能量脉冲输出及显示;高、低压区间采用光纤或者无线等方式与 PC 通信,解决高电压与零电位数据传输的隔离问题。装置可在高压等电位状态下进行单相电压、电流同步采样后计算电能,三个单相装置可构成三相高压电能标准装

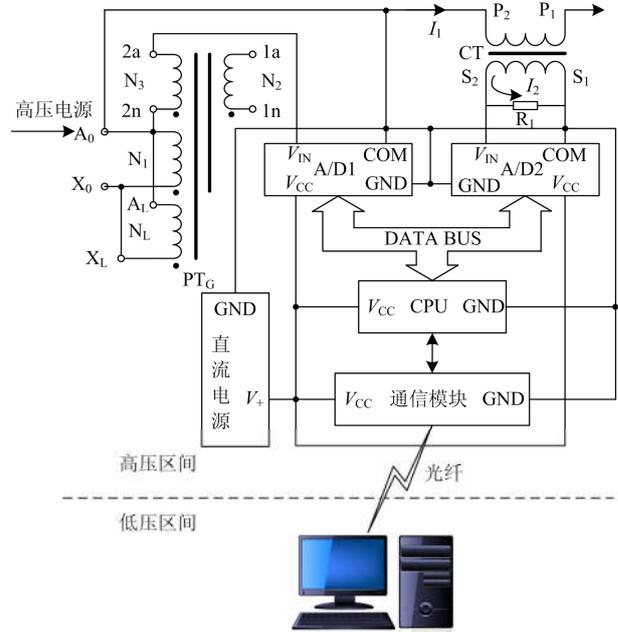


图 7 零泄漏电流高压电能标准装置原理图

Fig. 7 Schematic diagram of zero leakage current high voltage electric energy standard device

置。零泄漏电流高压电能标准装置可通过时间同步的方式实现电压互感器及电流互感器的单独检测。由于标准 CT 不需要高压绝缘,可有效降低制造成本,同时可降低设备重量约 85% 以上。

零泄漏电流高压电能标准装置样机如图 8 所示。高压部分双级电压互感器  $PT_G$ 、标准 CT 以及电能计算单元位于图中左侧的龙门架顶上,龙门架下被试品为二次融合柱上开关,龙门架采用环氧树脂与低压部门隔离。图中右侧为低压程控电源和误差计算单元,高、低压部分通过光纤实现隔离。



图 8 零泄漏电流高压电能标准装置

Fig. 8 Zero leakage current high voltage equipotential electric energy standard device

### 3.1 双二次绕组双级电压互感器

由于零泄漏电流高压电能标准装置进行高压等电位采样以后,装置中的标准电压互感器和标准 CT 需要进行重新设计。文中设计了双二次绕组双级电压互感器,其包括励磁绕组  $N_L$ 、一次绕组  $N_1$ 、双二次绕组  $N_2$  和  $N_3$ 。励磁绕组  $N_L$  独立于一次绕组  $N_1$  提供运行时的励磁电流,可有效提高标准电压互感器的准确度等级。二次绕组  $N_2$  测量值以地电位为参考,用于一次电压监测和程控电源的反馈检测。二次绕组  $N_3$  测量值以一次电压为参考,用于计算电能。其结构原理和实物如图 9 和图 10 所示。

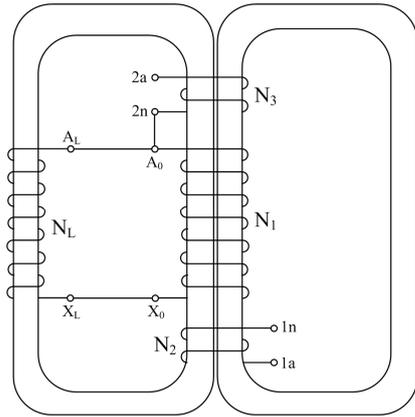


图 9 双二次绕组双级电压互感器原理图

Fig. 9 Schematic diagram of double secondary winding two-stage voltage transformer



图 10 双二次绕组双级电压互感器

Fig. 10 Double secondary winding two-stage voltage transformer

### 3.2 宽量程零磁通电流比例变换器

CT 是最常用的电流比例变换器,具有原理简单、稳定性高等优点,但是其缺点也非常明显,准确度不高,大而笨重、接线繁琐,检定量程切换时需多次拆接导线,费时费力,容易出错,很难实现对被试品的自动检定。

为了实现电流标准的宽量程和程控功能,有效减小变换器的体积和重量,文中设计了宽量程零磁通电流比例标准,其原理如图 11 所示。磁平衡检测

绕组  $N_T$  检测铁芯 I 的磁平衡状态,磁平衡电路通过负反馈驱动电路补偿二次绕组  $N_2$  的电流,消除励磁电流<sup>[1]</sup>,实现主铁芯 I 的零磁通状态,有效提高电流比例变换器的准确度,其电路如图 12 所示。二次绕组  $N_2$  设计成多个测量抽头的形式,控制单元可通过控制继电器  $J_{01} \sim J_{05}$  实现不同量程的切换,电流测量范围为  $1 \sim 600 \text{ A}$ 。二次绕组  $N_2$  通过电阻  $R$  采样方式进行  $I/V$  转换后输出二次电压信号  $U_i$ 。宽量程零磁通电流比例变换器实物如图 13 所示。

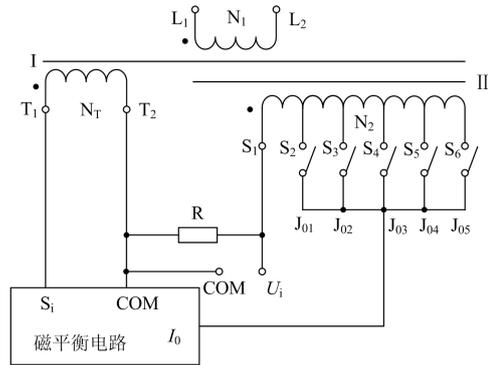


图 11 宽量程零磁通电流比例变换器原理图

Fig. 11 Schematic diagram of zero flux current ratio converter with wide measurement range

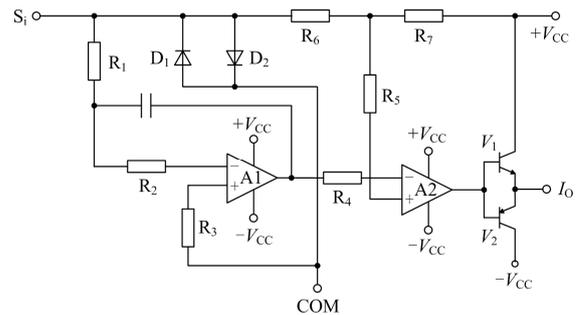


图 12 磁平衡功率放大电路图

Fig. 12 Diagram of magnetic balance detection and power amplification circuit



图 13 宽量程零磁通电流比例变换器

Fig. 13 Zero flux current ratio converter with wide measurement range

## 4 实验验证及分析

### 4.1 泄漏电流测量方法验证

按照 IEC61869-4-2013 提到的方法(见图 4)进行验证, 被试品为两组干式和油浸式三相组合互感器中的 CT, 测试数据见表 2。其中文中提出测量方法实验数据为  $I_1$ , 利用图 4 测试原理得到的实验数据为  $I_2$ , 从实验结果来看, 得出的泄漏电流基本相等, 证明了所提方法的正确性和有效性。干式组合互感器中 CT 的泄漏电流比油浸式组合互感器 CT 小很多, 相差一个量级, 油浸式组合互感器 CT 泄漏电

流主要来源于同相分量, 说明其绝缘性能不好。

### 4.2 零泄漏电流高压电能标准装置验证

为了验证设计的正确性, 采用间接法对研制的零泄漏电流高压电能标准装置进行泄漏电流测试。测试方案如下: 在标准电流互感器 CT 上同时施加额定电压  $U_E$  和工作电流, 工作电流为标准 CT 最大量程 600 A 的 1%、5%和 20%, 通过改变电压电流的功率因数角, 记录标准 CT 的二次电流值于表 3, 从实验结果来看, 在一次电流不变的条件下, 改变电压电流的夹角, 二次电流最大变化率为 0.08%, 证明泄漏电流对一二次等电位后的标准 CT 影响可忽略不计。

表 2 基于互感器校验仪的泄漏电流测量数据

Table 2 Data of leakage current based on differential transformer calibratator

| 项目           | $U_2/V$          | $G/\mu S$ | $B/\mu S$ | $I_C/mA$ | $I_B/mA$ | $I_1/mA$ | $I_2/mA$ |
|--------------|------------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| 干式组合<br>互感器  | JLSZY-10W3(A 相)  | 57.7      | 0.15      | 0.114    | 0.866    | 0.658    | 1.087    |
|              | JLSZY-10W3(B 相)  | 57.7      | 0.12      | 0.089    | 0.692    | 0.514    | 0.862    |
|              | JLSZY-10W3(C 相)  | 57.7      | 0.15      | 0.115    | 0.866    | 0.664    | 1.091    |
| 油浸式组<br>合互感器 | JLSZW-10 kV(A 相) | 57.7      | 2         | 0.1      | 11.54    | 0.577    | 11.554   |
|              | JLSZW-10 kV(B 相) | 57.7      | 1         | 0.111    | 5.77     | 0.64     | 5.805    |
|              | JLSZW-10 kV(C 相) | 57.7      | 2         | 0.1      | 11.54    | 0.577    | 11.554   |

表 3 零泄漏电流高压电能标准装置测量数据

Table 3 Measured data of high voltage equipotential electric energy standard device

| 一次电流/A | 功率因数       |            |            |            |
|--------|------------|------------|------------|------------|
|        | 1.0        | 0.5L       | 0.8C       | -1.0       |
| 6      | 0.050 05 A | 0.050 02 A | 0.050 09 A | 0.050 04 A |
| 30     | 0.250 03 A | 0.250 01 A | 0.250 06 A | 0.250 02 A |
| 120    | 1.000 02 A | 0.999 99 A | 1.000 05 A | 1.000 01 A |

## 5 总结

1) 文中剖析了泄漏电流产生的机理, 通过实验方式探讨了其对电流互感器误差的影响规律, 得出泄漏电流主要影响电流互感器在 20%额定电流以下的测量误差, 同时其影响具有方向性。

2) 本文提出了基于电工式互感器校验仪的泄漏电流测量方法, 该测量方法可精准评估电流互感器的屏蔽和绝缘水平。

3) 研制了零泄漏电流高压电能标准装置样机, 解决了泄漏电流影响标准 CT 准确性的问题, 填补了这一领域的空白。该零泄漏电流高压电能标准装置不仅可以对高压电能计量装置的整体进行检测, 还可以对电压互感器、电流互感器及各类电压电流传感器单独进行检测。

### 参考文献

[1] 杨光盛, 崔幼, 宣玉华, 等. 基于 CRITIC 和理想点法的计量设备运行质量评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 62-69.

YANG Guangsheng, CUI You, XUAN Yuhua, et al. CRITIC and TOPSIS based operating quality evaluation of metering equipment[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 62-69.

[2] 陈向群. 电能计量技能考核培训教材[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

[3] 胡顺, 徐芝贵. 高压电能表的研制进展[J]. 电测与仪表, 2008, 45(1): 1-3.

HU Shun, XU Guizhi. The development progress of high voltage watt-hour meter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2008, 45(1): 1-3.

[4] 卜正良, 尹项根, 涂光瑜. 高压电能表的研制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 89-93.

BU Zhengliang, YIN Xianggen, TU Guangyu. Development of HV watt-hour meter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 89-93.

[5] 代燕杰, 孙慧, 文燕, 等. 高压电能表电能示值误差及合格评定方法[J]. 电测与仪表, 2013, 50(5): 125-128.

DAI Yanjie, SUN Hui, WEN Yan, et al. Electric energy

- indication error and conformity assessment method of electricity meter with high voltage terminals[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2013, 50(5): 125-128.
- [6] 郭琳云, 尹项平, 张乐平, 等. 基于高压电能表的计量装置在线校验技术[J]. *电力自动化设备*, 2009, 29(12): 79-82.
- GUO Linyun, YIN Xiangping, ZHANG Leping, et al. On-line calibration of energy metering device based on high voltage energy meter[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2009, 29(12): 79-82.
- [7] 郭琳云, 徐芝贵, 张乐平, 等. 高压电能计量装置整体误差校验台[J]. *电测与仪表*, 2010, 47(1): 18-21.
- GUO Linyun, XU Guizhi, ZHANG Leping, et al. High voltage electric energy measurement device integrated error calibration stand[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2010, 47(1): 18-21.
- [8] 岳长喜, 侯兴哲, 章述汉, 等. 10 kV 高压电能计量装置整体校验台的校准[J]. *电测与仪表*, 2010, 47(增刊2): 132-136.
- YUE Changxi, HOU Xingzhe, ZHANG Shuhan, et al. Calibration of integrated error verification equipment for 10 kV high voltage electrical energy measurement device[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2010, 47(S2): 132-136.
- [9] PADMANABAN S, BHASKAR M, MAROTI P, et al. An original transformer and switched-capacitor (T & SC)-based extension for DC-DC boost converter for high-voltage/low-current renewable energy applications: Hardware implementation of a new T & SC boost converter[J]. *Energies*, 2018, 11(4): 783-793.
- [10] 向先直. 电流互感器二次极性检测装置研制与应用[J]. *电网与清洁能源*, 2018, 34(1): 89-92.
- XIANG Xianzhi. Development and application of secondary polarity detection device for current transformer[J]. *Power System and Clean Energy*, 2018, 34(1): 89-92.
- [11] 吴文宣, 唐志军, 晁武杰, 等. 基于智能变电站组合设备仿真测试与集成联调技术方案研究[J]. *电网与清洁能源*, 2018, 34(4): 42-48.
- WU Wenxuan, TANG Zhijun, CHAO Wujie, et al. Study on technical scheme of simulation test and integration of combined equipment in intelligent substation[J]. *Power System and Clean Energy*, 2018, 34(4): 42-48.
- [12] 三相组合互感器: JB/T 10432—2004[S].
- Three phase combined instrument transformers: JB/T 10432—2004[S].
- [13] 毛颖科, 关志成, 王黎明, 等. 基于泄漏电流脉冲主成分分析的外绝缘污秽状态评估方法[J]. *电工技术学报*, 2009, 24(8): 39-45.
- MAO Yingke, GUAN Zhicheng, WANG Liming, et al. Evaluation of contamination levels of outdoor insulators based on the principal components analysis of leakage current pulses[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009, 24(8): 39-45.
- [14] 王尧, 李奎, 任伯飞, 等. 基于全相位傅里叶变换的调制交直流漏电电流检测方法[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(18): 254-260.
- WANG Yao, LI Kui, REN Bofei, et al. Study of flux gate current detecting method for AC-DC earth leakage current based on apFFT[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(18): 254-260.
- [15] 杨翠茹, 杨帅, 唐铭骏, 等. 较低湿度下含糖污秽绝缘子放电特性[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(10): 346-353.
- YANG Cuiru, YANG Shuai, TANG Mingjun, et al. Discharge mechanism of polluted insulator with glucose under low humidity[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(10): 346-353.
- [16] 陈伟根, 汪万平, 夏青. 绝缘子污秽放电泄漏电流的多重分形特征研究[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(1): 50-56.
- CHEN Weigen, WANG Wanping, XIA Qing. Research on multi-fractal characteristics of leakage current for contamination discharge of insulators[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(1): 50-56.
- [17] 李金亮, 杜志叶, 阮江军, 等. 基于有限元法的避雷器阻性电流检测的相间干扰计算分析[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(18): 184-190.
- LI Jinliang, DU Zhiye, RUAN Jiangjun, et al. Calculation and analysis of interphase interference for monitoring resistive current of arresters based on the finite element method[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(18): 184-190.
- [18] 李智威, 李化, 杨佩原, 等. 不同场强下金属化聚丙烯膜电容器泄漏特性[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(9): 274-280.
- LI Zhiwei, LI Hua, YANG Peiyuan, et al. Leakage characteristic of metallized polypropylene film capacitors under different electric fields[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(9): 274-280.

- [19] 郑晓钦, 王东. 十五相感应电机对称缺相运行时的定子漏抗计算[J]. 电工技术学报, 2016, 31(15): 25-31.  
ZHENG Xiaoqin, WANG Dong. Calculation of stator leakage reactance of fifteen-phase induction motor under symmetrical fault condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(15): 25-31.
- [20] 段大鹏, 江秀臣, 孙才新, 等. 基于正交分解的 MOA 泄漏电流有功分量提取算法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(7): 56-61.  
DUAN Dapeng, JIANG Xiuchen, SUN Caixin, et al. Extracting algorithm of active power component of MOA leakage current based on orthogonal decomposition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(7): 56-61.
- [21] YANG C H, HAN Y J, SUN X S, et al. Effects of Nd<sup>3+</sup>-substitution for Bi-site on the leakage current, ferroelectric and dielectric properties of Na<sub>0.5</sub>Bi<sub>0.5</sub>TiO<sub>3</sub> thin films[J]. Ceramics International, 2018, 44(6): 6330-6336.
- [22] 王纲, 李剑飞, 陈隆道, 等. 一种基于频率补偿的改进插值谐波分析算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 1-7.  
WANG Gang, LI Jianfei, CHEN Longdao, et al. An improved interpolation harmonic analysis algorithm based on frequency compensation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 1-7.
- [23] WANG Q, BO Z, MA X, et al. Integrated protection based on multi-frequency domain information for UHV half-wavelength AC transmission line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 157-163. DOI: 10.1186/s41601-016-0027-8.
- [24] WU Y H, DONG X Z, MIRSAEIDI S. Modeling and simulation of air-gapped current transformer based on Preisach Theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 111-121. DOI: 10.1186/s41601-017-0046-0.
- [25] 冯凌, 侯兴哲, 周华勇, 等. 三相高压计量箱误差影响量探讨[J]. 电测与仪表, 2010, 47(12): 41-45.  
FENG Ling, HOU Xingzhe, ZHOU Huayong, et al. Discussion of added error for three-phase combined instrument transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010, 47(12): 41-46.
- [26] 刘刚, 熊小伏, 廖瑞金, 等. 泄漏电流对电流互感器误差特性的影响及分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(3): 697-704.  
LIU Gang, XIONG Xiaofu, LIAO Ruijin, et al. Effect and analysis of leakage current on error characteristics of current transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(3): 697-704.
- [27] 刘刚, 熊小伏, 廖瑞金, 等. 基于不同检测方法的高压电流互感器误差比较与分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 103-107.  
LIU Gang, XIONG Xiaofu, LIAO Ruijin, et al. Error comparison and analysis of high-voltage current transformer based on different testing methods[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 103-107.

---

收稿日期: 2019-03-27; 修回日期: 2019-10-21

作者简介:

李敏(1986—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电能计量新技术; E-mail: liminbest86918@126.com

靳绍平(1959—), 男, 大专, 教授级高级工程师, 研究方向为电能计量新技术。E-mail: 13870881746@139.com

(编辑 魏小丽)