

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.07.025

100 kA 大电流互感器现场校验方法的研究

李随朝, 赵 昱, 李素洁, 韩尚霖

(西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077)

摘要: 为了解决 100 kA 大电流互感器的误差现场校准及量值传递溯源问题, 笔者介绍了一种利用等安匝原理测量大电流互感器的负载励磁电流及小校大的方法来确定 100 kA 大电流互感器的误差, 首先通过测量大电流互感器二次绕组直流电阻和二次负载励磁电流误差, 然后在小电流下测量大电流互感器的基本误差, 最后计算线性匝比误差, 并推算 100 kA 大电流互感器的实际误差值, 很好地解决了大电流互感器现场升流困难的量值传递问题, 并通过大量的试验数据论证了该方法的可行性和正确性。结果说明该方法是完全正确的, 且具有现场可操作性和实用性。

关键词: 100 kA; 大电流互感器; 负载励磁电流法; 等安匝; 小校大; 误差试验; 现场校验

Field Calibration Technology of 100 kA Large Current Transformers

LI Suichao, ZHAO Yu, LI Sujie, HAN Shanglin

(Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to solve the 100 kA current transformer error calibration and quantity value transfer and traceability problem, the author introduces the a utilization of ampere measuring principle of large current transformer load excitation current and small school method to determine the 100 kA current transformer error, we begin by measuring a large current transformer secondary winding DC resistance and secondary load excitation current error, then measure the large current transformer basic error in the small current, finally, calculate the linear error turns ratio, and estimate the 100 kA large current transformer actual error, well solve the problem of the value of current difficulties in the field of large current transformers, and through a large number of experimental data proved the feasibility and correctness of the method. The results shows that the method is completely correct, and have a field operational and practical.

Key words: 100 kA; current transformer; load excitation current; equal ampere turns; small level calibration grade; error test; site verification

0 引言

随着计量校准工作的不断深入, 目前中国各行业各部门都必须对电流互感器进行强制检定或校准, 然而对于大电流互感器(例如 30~100 kA)来讲, 进行现场校准或送校准实验室进行校准, 都是一件非常困难的事^[1-2], 主要的原因是大电流源的升流问题很难解决, 且需要很大的电源容量。为了很好地解决大电流互感器现场校准及量值传递问题, 基于电流互感器的基本原理, 结合校准试验方法和试验

数据结果的研究^[3], 笔者提出了利用电流互感器等安匝原理, 测量大电流互感器(CT)的二次负载励磁电流, 并采用小电流校大电流的方法来确定 100 kA 大电流互感器的误差, 并取得了满意效果。

1 大电流互感器的主要技术参数:

为了更好地说明问题, 笔者选择了一台 30~100 kA 的大电流互感器作为研究对象。该大电流互感器的额定电压为 660 V, 准确等级为 0.2 级, 主要研究其误差特性试验的误差确定, 所采用 100 kA 大电流互感器的主要技术参数见表 1。

表1 主要技术参数

Table 1 Main technical parameters

参数	数值
型号	HLD-100
额定一次电流/kA	30、40、50、60、75、80、100
额定二次电流/A	5
准确等级	0.2级
额定频率/Hz	50
额定负荷/VA	50
功率因数	$\cos\varphi=0.8$
额定电压/kV	0.66
一次接线端子	P ₁ -P ₂
二次接线端子	S ₁ -S ₂ , S ₃ , ..., S ₇ , S ₈

2 大电流互感器的等值电路及误差分析

大电流互感器是根据电磁感应原理制成,它由高导磁硅钢片 I 和一次线圈 P₁P₂ (一般为穿心一匝) 及二次线圈 S₁S₂ 组成。一、二次线圈均绕于铁心 I 上,通过法拉第电磁感应原理进行电流比例转换。当电流互感器为理想电流互感器时(即无损耗能量互换),便有一次电流安匝数等于二次电流安匝数,也就是等安匝原理^[4],即

$$I_1 W_1 = I_2 W_2. \quad (1)$$

这时电流与其匝数成反比,其电流比例系数为

$$k_n = \frac{I_1}{I_2} = \frac{W_2}{W_1}. \quad (2)$$

事实上电流互感器由于铁心存在损耗,在能量传递过程中是存在消耗的,便有励磁损耗电流 I_0 产生,于是便有电流互感器的误差产生即

$$\varepsilon = -\frac{I_0}{I_1} = -\frac{I_0 W_1}{I_1 W_1} \times 100\%. \quad (3)$$

根据互感器的“T”型等效原理,可建立起大电流互感器的等值电路见图1。

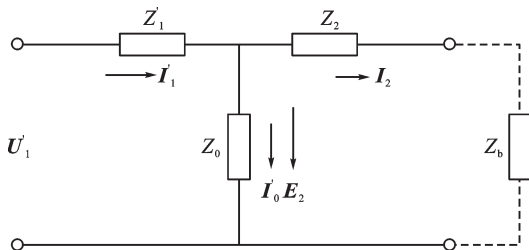


图1 等值电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram

图1中: Z_1 为电流互感器的一次绕组等效阻抗,它包含一次绕组电阻及一次绕组漏电抗; Z_2 为电流互感器的二次绕组等值阻抗,它包含二次绕组电阻及二次绕组漏电抗; Z_0 为电流互感器的铁心励磁阻抗,它呈非线性特性。 I_1' 为电流互感器一次电流折

算值(按等安匝原理折算); I_2 为电流互感器二次电流值; I_0 为电流互感器的铁心励磁电流,它呈非线性特性,通常表现为误差电流; E_2 为电流互感器二次感应电势; Z_b 为电流互感器二次负载阻抗^[5]。

依据能量守恒定律可得电流互感器一次二次间的磁势平衡方程式如下

$$I_1 W_1 - I_2 W_2 = I_0 W_1. \quad (4)$$

依据电流互感器的误差定义为折算至相同侧的二次电流与一次电流之差对一次电流的百分数表示^[4],即可得

$$\varepsilon = \frac{I_2 - I_1/k_n}{I_1/k_n} = \frac{K_n I_2 - k_n}{I_1} \times 100\%. \quad (5)$$

也可表示为

$$\varepsilon = \frac{I_0 W_1}{I_1 W_1} \times 100\%. \quad (6)$$

根据等值电路图1,不难得出:

$$E_2 = I_2 (Z_1 + Z_b); \quad (7)$$

$$E_2 = I_0' Z_0. \quad (8)$$

对于电流互感器来讲二次绕组一般为环形绕制,其漏电抗非常之小,近似为零。所以二次绕组阻抗 Z_2 近似等于二次绕组电阻 R_2 ,这样式(7)就可以表示为

$$E_2 = I_2 (Z_2 + Z_b). \quad (9)$$

而对于等值电路中励磁阻抗 Z_0 远大于二次阻抗 Z_2 千倍以上,于是式(8)还可近似表示为

$$E_2 = I_0' (Z_0 + Z_2) = I_0' (Z_0 + R_2). \quad (10)$$

由式(1)-(6)不难得出电流互感器的误差公式还可表示为

$$\varepsilon = -\frac{I_0 W_1}{I_1 W_1} = -\frac{I_0' W_2}{I_2 W_2} = -\frac{I_0'}{I_2} \times 100\%. \quad (11)$$

这样一来,便可以将电流互感器一次线圈开路,从二次线圈侧施加 E_2 的电压,进而测量得到二次侧的励磁电流 I_0' ,也就是电流互感器的误差电流,其实测电路见图2。

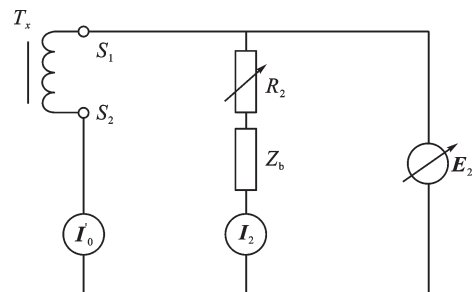


图2 测量电流互感器二次侧励磁电流模拟图

Fig. 2 The simulation of the two side excitation current of the current transformer

在图2中,电流互感器二次线圈两端的感应电势 E_2 是通过给二次绕组模拟电阻 R_2 和二次负载阻抗 Z_b 施加二次电流 I_2 得到的。CT 二次负载阻抗 Z_b

表3 二次负载励磁电流误差测试数据
Table 3 Two load excitation current error test data

变比(A/A)	误差	额定电流百分比									二次负荷/(VA)
		2%	5%	10%	15%	20%	50%	80%	100%	120%	
30 000/5	$f/\%$	-0.130	-0.099	-0.077	-0.071	-0.068	-0.061	-0.059	-0.058	-0.057	50
	$\delta/(')$	0.95	0.60	0.45	0.40	0.37	0.29	0.25	0.23	0.21	
40 000/5	$f/\%$	-0.095	-0.066	-0.054	-0.049	-0.045	-0.043	-0.040	-0.040	-0.039	50
	$\delta/(')$	0.68	0.40	0.33	0.28	0.26	0.20	0.18	0.17	0.15	
50 000/5	$f/\%$	-0.079	-0.059	-0.048	-0.043	-0.040	-0.037	-0.035	-0.034	-0.033	50
	$\delta/(')$	0.59	0.39	0.29	0.25	0.23	0.18	0.15	0.14	0.13	
60 000/5	$f/\%$	-0.301	-0.224	-0.161	-0.131	-0.120	-0.084	-0.072	-0.068	-0.064	50
	$\delta/(')$	1.78	1.05	0.69	0.56	0.48	0.30	0.25	0.21	0.20	
75 000/5	$f/\%$	-0.255	-0.183	-0.134	-0.113	-0.100	-0.069	-0.061	-0.057	-0.055	50
	$\delta/(')$	1.47	0.90	0.56	0.47	0.40	0.26	0.21	0.18	0.17	
80 000/5	$f/\%$	-0.266	-0.178	-0.136	-0.108	-0.099	-0.069	-0.060	-0.059	-0.057	50
	$\delta/(')$	1.57	0.83	0.55	0.45	0.39	0.25	0.20	0.19	0.18	
100 000/5	$f/\%$	-0.213	-0.141	-0.100	-0.085	-0.076	-0.055	-0.050	-0.044	-0.043	50
	$\delta/(')$	1.33	0.68	0.45	0.37	0.33	0.21	0.18	0.17	0.16	

3.3 校准大电流互感器 T_x 的基本误差

用西安某研究院 10 kA 及以下标准电流互感器 (0.01 级) 级联 5 A/1 A、0.5 A 小电流标准电流互感器 (0.01 级) 校准大电流互感器 T_x 在 20% I_n 以下的基本误差, 其校验线路^[6]见图 4, 测量结果见表 4。

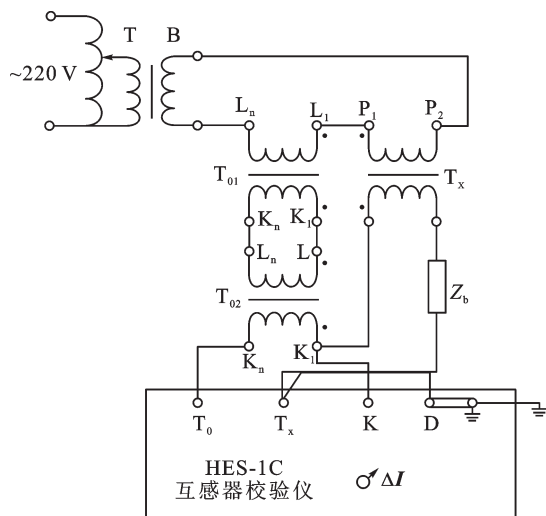


图4 电流互感器基本误差测量线路

Fig. 4 Basic error measuring circuit for current transformer

图4中: T 为调压器; B 为升流变压器; T_{01} 为 10 kA 标准电流互感器; T_{02} 为小电流标准电流互感器; T_x 为被试大电流互感器; Z_b 为电流互感器负载箱; HES-1C 为互感器校验仪。

表4 为小电流下被试大电流互感器 (T_x) 的真实误差。

3.4 计算线性匝比误差

依据表3及表4的测量数据, 就可以计算出线性匝比误差 (即比差补偿量) 和相角误差 (即角差补偿量), 因为大电流互感器各相同对应点的误差应该是相同的, 于是便得到线性匝比误差和相角误差的计算公式见式 (13)、(14)。

在式 (13)、(14) 中: f_x 和 δ_x 为表4中各点误差数据; f_L 和 δ_L 为表3中各点误差数据。将表4中相对应各点误差数据减去表3中相对应各点误差数据, 剔除不可信点, 计算其平均值, 便可得到线性匝比误差 Δf 和相角误差 $\Delta \delta$ 值, 见表5。

3.5 推算 100 kA 大电流互感器的实际误差值

利用测量大电流互感器 (T_x) 二次负载励磁电流误差的方法可以推算出 100 kA 大电流互感器的实际各点误差值, 其方法原理先是将 100 kA 大电流互感器在 10% 或 20% 额定电流下的误差, 用小电流 (如 10 kA 以下) 标准电流互感器测量准确, 见表4; 然后测量大电流互感器 T_x 的二次负载励磁电流误差, 见表3; 再利用式 (13) 和 (14) 计算求出大电流互感器 T_x 的线性匝比误差 Δf 和相角误差 $\Delta \delta$; 最后将线性比差量 Δf 和角差量 $\Delta \delta$ 值叠加到大电流互感器 T_x 的二次负载励磁电流误差 (表3所列数据) 上, 便可推算出 100 kA 大电流互感器 T_x 的各点实际误差值, 见表6。

4 校准方法的验证

通过上述论证, 可以利用测量大电流互感器二

表 4 小电流下基本误差测试数据
Table 4 Basic error test data for small current

变比(A/A)	误差	额定电流百分比					二次负荷/(VA)
		2%	5%	10%	15%	20%	
30 000/5	$f/\%$	0.093	0.109	0.102	0.110	0.114	50
	$\delta/(')$	0.24	0.16	0.15	0.11	0.10	
40 000/5	$f/\%$	0.084	0.058	0.077	0.108	0.131	50
	$\delta/(')$	0.24	0.17	0.10	0.07	0.08	
50 000/5	$f/\%$	0.053	0.036	0.050	0.079	0.104	50
	$\delta/(')$	0.17	0.14	0.05	0.04	0.06	
60 000/5	$f/\%$	-1.642	-1.602	-1.607	-1.672	-1.722	50
	$\delta/(')$	-0.26	-0.12	-0.16	-0.14	-0.17	
75 000/5	$f/\%$	-1.211	-1.149	-1.130	-1.132	-1.128	50
	$\delta/(')$	-0.19	-0.14	-0.14	-0.12	-0.11	
80 000/5	$f/\%$	-0.871	-0.812	-0.768	-0.754	-0.749	50
	$\delta/(')$	-0.14	-0.05	-0.05	-0.04	-0.03	
100 000/5	$f/\%$	-0.787	-0.810	-0.812	0.803	-0.796	50
	$\delta/(')$	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	

表 5 线性匝比误差和相角误差量
Table 5 Linear turns ratio error and phase angle error quantity

变比(A/A)	误差	额定电流百分比					二次负荷/(VA)	平均值
		2%	5%	10%	15%	20%		
30 000/5	$f/\%$	0.223	0.208	0.179	0.181	0.182	50	$\Delta f = 0.195$
	$\delta/(')$	-0.71	-0.44	-0.30	-0.29	-0.27		$\Delta \delta = -0.40$
40 000/5	$f/\%$	0.179	0.124	0.131	0.157	0.176	50	$\Delta f = 0.153$
	$\delta/(')$	-0.44	-0.23	-0.23	-0.21	-0.18		$\Delta \delta = -0.26$
50 000/5	$f/\%$	0.132	0.095	0.098	0.122	0.144	50	$\Delta f = 0.118$
	$\delta/(')$	-0.42	-0.25	-0.24	-0.21	-0.17		$\Delta \delta = -0.26$
60 000/5	$f/\%$	-1.341	-1.378	-1.446	-1.541	-1.602	50	$\Delta f = -1.462$
	$\delta/(')$	-2.04	-1.17	-0.85	-0.70	-0.65		$\Delta \delta = -1.08$
75 000/5	$f/\%$	-0.956	-0.966	-0.966	-1.019	-1.028	50	$\Delta f = -0.993$
	$\delta/(')$	-1.66	-1.04	-0.70	-0.59	-0.51		$\Delta \delta = -0.90$
80 000/5	$f/\%$	-0.605	-0.634	-0.632	-0.646	-0.650	50	$\Delta f = -0.633$
	$\delta/(')$	-1.71	-0.88	-0.60	-0.49	-0.42		$\Delta \delta = -0.82$
100 000/5	$f/\%$	-0.574	-0.669	-0.712	-0.718	-0.720	50	$\Delta f = -0.679$
	$\delta/(')$	-1.32	-0.66	-0.43	-0.36	-0.32		$\Delta \delta = -0.62$

次负载励磁电流误差和小校大的方法来校验出大电流互感器的误差,但仍然需要通过其他方法来验证它的正确性和可行性。采用的方法是用西高院 50 kA 大电流比例标准系统对 100 kA 大电流互感器 T_x 进行直接校准基本误差的量值传递过程,其校准线路同见图 4,图 4 中的 T_{01} 、 T_{02} 替换成 50 kA 大电流比例标准系统。对 30 kA/5 A、40 kA/5 A、50 kA/5 A 三档变比进行直接校准验证,其校准结果见表 7。

5 测试系统误差不确定度的分析

在实际的校准应用当中,既有系统性的误差,也有随机性的误差存在,所以有必要对测试系统误差的不确定度加以分析说明。根据测量误差来源分析,校验系统误差修正后的不确定度由两部分组成:校验仪在测量重复性方面引入的不确定度 U_1 ,即 A 类不确定度;标准器具、校验设备和相关试验环境在试验系统校验中引入的不确定度 U_2 ,即 B 类

表6 100 kA 大电流互感器的实际误差值

Table 6 Actual error value of 100 kA large current transformer

变比(A/A)	误差	额定电流百分比									二次负荷/(VA)
		2%	5%	10%	15%	20%	50%	80%	100%	120%	
30 000/5	$f/\%$	0.065	0.096	0.118	0.124	0.127	0.134	0.136	0.137	0.138	50
	$\delta/(')$	0.55	0.20	0.05	0.00	-0.03	-0.11	-0.15	-0.17	-0.19	
40 000/5	$f/\%$	0.058	0.087	0.099	0.104	0.108	0.110	0.113	0.113	0.114	50
	$\delta/(')$	0.42	0.14	0.07	0.02	0.00	-0.06	-0.08	-0.09	-0.11	
50 000/5	$f/\%$	0.039	0.059	0.070	0.075	0.078	0.081	0.083	0.084	0.085	50
	$\delta/(')$	0.33	0.13	0.03	-0.01	-0.03	-0.08	-0.11	-0.12	-0.13	
60 000/5	$f/\%$	-1.763	-1.686	-1.623	-1.593	-1.582	-1.546	-1.534	-1.530	-1.526	50
	$\delta/(')$	0.70	-0.03	-0.39	-0.52	-0.60	-0.78	-0.83	-0.87	-0.88	
75 000/5	$f/\%$	-1.248	-1.176	-1.127	-1.106	-1.093	-1.062	-1.054	-1.050	-1.048	50
	$\delta/(')$	0.57	0.00	-0.34	-0.43	-0.50	-0.64	-0.69	-0.72	-0.73	
80 000/5	$f/\%$	-0.899	-0.811	-0.769	-0.741	-0.732	-0.702	-0.693	-0.692	-0.690	50
	$\delta/(')$	0.75	0.01	-0.27	-0.37	-0.43	-0.57	-0.62	-0.63	-0.64	
100 000/5	$f/\%$	-0.892	-0.820	-0.779	-0.764	-0.755	-0.734	-0.729	-0.723	-0.722	50
	$\delta/(')$	0.71	0.06	-0.17	-0.25	-0.29	-0.41	-0.44	-0.45	-0.46	

表7 用50 kA 电流比例标准校验100 kA 大电流互感器的数据

Table 7 Calibration data of 100 kA current transformer with 50 kA current ratio standard

变比(A/A)	误差	额定电流百分比									二次负荷/(VA)
		2	5	10	15	20	50	80	100	120	
30 000/5	$f/\%$	0.082	0.098	0.107	0.112	0.118	0.124	0.136	0.141	0.142	50
	$\delta/(')$	0.38	0.21	0.15	0.13	0.10	0.07	0.05	0.03	0.024	
40 000/5	$f/\%$	0.095	0.078	0.061	0.079	0.092	0.106	0.118	0.127	0.136	50
	$\delta/(')$	0.42	0.23	0.11	0.08	0.02	-0.01	-0.07	-0.11	-0.135	
50 000/5	$f/\%$	0.062	0.041	0.052	0.068	0.079	0.093	0.104	0.115	0.122	50
	$\delta/(')$	0.28	0.19	0.10	0.05	0.03	0.07	0.10	0.12	0.13	

不确定度^[17]。

依据 JJF 1059—1999 规定计算各类不确定度。

5.1 A 类不确定度计算

A 类不确定度即用试验标准偏差来表征,选取一台性能稳定的 0.2 级大电流互感器,在 10%额定电流下利用电流比例标准系统装置进行重复性测定,共测量 10 次,根据贝塞尔实验标准偏差计算公式计算得出不确定度为比差 0.13×10^{-4} ,角差 $0.06'$ 。

5.2 B 类不确定度计算

针对此试验系统,B 类不确定度的来源主要有标准器具的等级,互感器校验仪的误差,试验环境的影响。已知标准电流互感器的精确等级为 0.01 级,互感器校验仪的精确等级为 1.0 级,电流负载箱及模拟电阻器的精确等级为 3.0 级,在此试验过程中因为是在室内进行试验,因此温度、湿度和空间电磁场的影响不显著,在计算过程中,没有计入环境对试验准确度的影响。考虑到被试电流互感器为 0.2 级,

且为大电流变比 30 kA/5 A~100 kA/5 A,以及 CT 特性等因素的影响,所以根据不确定度的预评估规则和大电流互感器试验数据的实际状况计算得出 B 类不确定度的不确定度为比差 0.42×10^{-4} ,角差 $0.14'$ 。

5.3 合成标准不确定度

合成标准不确定度即测量结果标准偏差的估计值,是由其他各量协方差计算,根据计算公式 $u = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u_{(x_i)}^2}$ 计算出大电流互感器测试系统误差的合成标准不确定为比差 0.44×10^{-4} ,角差 $0.15'$,取包含因子 $k=2$,则此测试系统的扩展不确定度为比差 0.88×10^{-4} ,角差 $0.30'$ 。

6 结语

由表 6 和表 7 不难看出,采用二次负载励磁电流法和直接校准法两种不同的方法,测算结果基本一致,相差仅万分之一左右,所以测量结果的数据是可信的。同时由表 6、7 还可以看出,测量结果均

满足 0.1 级要求, 这对于一个 0.2 级大电流互感器来讲, 这个测量结果是相当满意的。因此可以肯定的说, 利用测量大电流互感器二次负载励磁电流误差和小校大的方法来校准大电流互感器的误差是完全可行的, 且准确可靠。

通过以上论述说明, 利用等安匝原理测量大电流互感器的负载励磁电流及小校大的方法来确定 100 kA 大电流互感器的误差, 这一方法是完全正确的, 且具有现场可操作性和实用性, 解决了大电流互感器的现场误差校验问题。

参考文献:

- [1] 谭洪恩, 胡浩亮, 雷 民. 电子式互感器现场校准技术实验分析[J]. 高电压技术, 2010, 36: 2992-2995.
TAN Hong'en, HU Haoliang, LEI Min. Experimental analysis on the field calibration technology of electronic transformers[J]. High voltage technology, 2010, 36: 2990-2995.
- [2] 李 鹤, 李 前, 胡浩亮. 变电站用电流互感器在线校准系统的研制[J]. 电测与仪表, 2013(12): 5-8.
LI He, LI Qian, HU Haoliang. Development of on-line calibration system for current transformers for Substations [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2013(12): 5-8.
- [3] 李随朝, 任稳柱, 姜 宁. 1 000 kV 标准电压互感器的校准方法研究[J]. 高压电器, 2014, 50(4): 54-60.
LI Suichao, REN Wenzhu, JIANG Ning. Calibration technology of 1 000 kV standard voltage transformers[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4): 54-60.
- [4] 赵修民. 测量用互感器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
ZHAO Xiumin. Current transformers for measurements[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1986.
- [5] 吴良科, 刘 浩, 岳长喜, 等. 二次负荷仿真法现场校验电流互感器[J]. 高电压技术, 2010, 36(8): 2012-2016.
WU Liangke, LIU Hao, YUE Changxi, et al. Secondary load simulation method site verification on current transformer[J]. High Voltage Technology, 2010, 36(8): 2012-2016.
- [6] 吴德武. 电流互感器误差试验小电流数据跳动分析[J]. 大科技, 2012(10): 53-54.
WU Dewu. Analysis of small current data of current transformer error test[J]. Big Technology, 2012(10): 53-54.
- [7] 李 波, 贺艳平, 曹 敏. 精密工频电流—电压比例变换器的设计及校准方法研究[J]. 中国测试, 2014, 40(6): 74-78.
LI Bo, HE Yanping, CAO Min. Design and calibration method of the precision frequency current voltage converter[J]. China test, 2014, 40(6): 74-78.
- [8] 赵玉富. 电流互感器的现场检验[J]. 河南电力, 2015(4): 16-18.
ZHAO Yufu. Current transformer site inspection[J]. Henan Electric Power, 2015(4): 16-18.
- [9] 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]. 高压电技术, 2009, 35(5): 1200-1205.
ZHANG Shuhan, ZHU Yue, WU Liangke, et al. 750 kV GIS current transformer site verification test methods[J]. High Voltage Technology, 2009, 35(5): 1200-1205.
- [10] 赵屹涛, 赵修民. 现场高压和大电流互感器测量原理的探讨[J]. 电测与仪表, 1998(8): 21-23.
ZHAO Yitao, ZHAO Xiumin. Discussion on field high voltage and large current transformer measuring principle[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 1998(8): 21-23.
- [11] 赵素华, 康文勇. 电流互感器的现场检定[J]. 电测与仪表, 2006, 43(3): 37-39.
ZHAO Suhua, KANG Wenyong. Current transformer site verification[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2006, 43(3): 37-39.
- [12] 江 立, 霍大勇, 赵颖博. 电流互感器现场校验方法探讨[J]. 科技资讯, 2007(4): 9-10.
JIANG Li, HUO Dayong, ZHAO Yingbo. Discussion on field calibration method for current transformer[J]. Technology Information, 2007(4): 9-10.
- [13] 张杰梁, 林 勇, 陈爱玲. 大电流互感器现场校验技术的应用现状与研究进展[J]. 机电技术, 2015(3): 129-132.
ZHANG Jieliang, LIN Yong, CHEN Ailing. Application status large current transformer on site verification technology and research progress[J]. Mechanical & Electrical Technology, 2015(3): 129-132.
- [14] 周永佳, 许灵洁, 李航康, 等. 发电机出口大电流互感器误差的现场测量方法[J]. 浙江电力, 2011, 30(11): 34-37.
ZHOU Yongjia, XU Lingjie, LI Hangkang, et al. On-site error verification method for high current transformer of generator outlet[J]. Zhejiang Electric Power, 2011, 30(11): 34-37.
- [15] 张克中, 黄影平, 赵锦华. 大电流互感器短暂时间校验方法的研究[J]. 华东电力, 1996(6): 7-9.
ZHANG Kezhong, HUANG Yingping, ZHAO Jinhua, et al. Research on large current transformer short time calibration method[J]. Huadong Electric Power, 1996(6): 7-9.
- [16] JJF 1068—2000 工频电流比例标准装置校准规范[S]. 2000.
JJF 1068—2000 Frequency current ratio standard device calibration specification[S]. 2000.
- [17] 尚秋峰, 张 静, 董建彬. 电子式电流互感器校准系统不确定度评定方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(18): 63-66.
SHANG Qiufeng, ZHANG Jing, DONG Jianbin. Evaluation method for the uncertainty of calibration system for electronic current transformer[J]. Automation of Electric Power System, 2008, 32(18): 63-66.

李随朝(1957—), 男, 高级工程师, 本科, 主要从事精密互感器的研制及检测标准等。

赵 昱(1988—), 男, 工程师, 本科, 主要从事精密互感器及大电流设备的计量校准工作。