

# 小电流下空心线圈电流互感器的 输出波形质量测试

侯姗<sup>1</sup>, 赵志山<sup>2</sup>

(1. 晋中职业技术学院, 山西 晋中 030600;

2. 廊坊供电公司, 河北 廊坊 065000)

**摘要:** 为了给生产厂家产品设计和改善提供依据, 对小电流下互感器输出波形质量进行测试。介绍了空心线圈的结构和工作原理, 对互感器输出波形进行采集。将一台 220 kV GIS 用互感器作为实验仪器, 在小电流下对互感器输出波形精度、暂态饱和性和稳态性进行测试。发现小电流下, 空心线圈传感头输出受干扰的影响较大, 而积分放大单元和相位补偿单元输出信号受干扰程度不大; 在小电流下, 一定程度上会导致电流互感器出现局部暂态饱和, 但不会长期保持; 小电流下容易受到外界环境的干扰, 导致不同时刻输出电压相差较大, 互感器输出波形不稳定。

**关键词:** 小电流; 空心线圈; 电流互感器; 输出波形; 质量测试

**中图分类号:** TM452 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed21894

## Test of Output Waveform Quality of Hollow Coil Current Transformer Under Small Current

HOU Shan<sup>1</sup>, ZHAO Zhishan<sup>2</sup>

(1. Jinzhong Vocational and Technical College, Jinzhong 030600, Shanxi, China;

2. Langfang Power Supply Company, Langfang 065000, Hebei, China)

**Abstract:** In order to provide the basis for the design and improvement of the manufacturer's products, the output waveform quality of the transformer under small current was tested. The structure and working principle of the hollow coil were introduced, and the output waveform of the transformer was collected. A 220 kV GIS transformer was used as the experimental instrument to test the output waveform accuracy, transient saturation and stability of the transformer under small current. It is found that the output of the hollow coil sensor head is greatly affected by the interference under small current, while the output signals of the integral amplification unit and the phase compensation unit are not interfered to a large extent; under small current, the partial transient saturation of the current transformer will occur to some extent, but it will not be maintained for a long time; under small current, it is easy to be interfered by the external environment, resulting in a large difference of the output voltage at different times, the output waveform of transformer is unstable.

**Key words:** small current; hollow coil; current transformer; output waveform; quality test

电流互感器的输出波形质量需达到系统或设备工况的要求, 常规电磁式电流互感器的铁心饱和问题为影响输出波形质量的主要因素<sup>[1]</sup>。和常规电磁式电流互感器相比, 互感器具有低压侧无开路高压危险、精度高、体积小、频率响应范围宽、测量范围大等优点, 被广泛应用<sup>[2]</sup>。

当前在互感器相关标准中, 有关误差等级的要求和常规电磁式电流互感器是相同的, 未有效反映互感器输出特点<sup>[3]</sup>。由于生产企业通常不具备高压大电流的测试环境, 为了便于分析, 只能在小电流下分析互感器的输出波形质量。

常规电磁式电流互感器因为具有非线性磁

**基金项目:** 国家自然科学基金(55208486)

**作者简介:** 侯姗(1982—), 女, 硕士, 讲师, Email: zhaozhishan@yeah.net

特征,所以电流互感器在各工况下特别是故障电流下的输出有很高的随机性,在小电流条件下测试无法反映其输出特征<sup>[4]</sup>。而互感器存在线性特征,可利用叠加原理进行分析,在小电流下测试,能够有效体现其传送特性<sup>[5]</sup>。因此,本文在小电流下对互感器的输出波形质量进行测试,为生产厂家产品设计和改善提供依据。

## 1 互感器工作原理

### 1.1 互感器内部结构

互感器内部的核心构造是空心线圈。在印制板上均匀布置环状线路,得到图1所示的空心线圈。

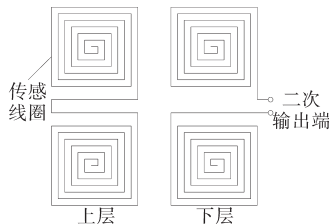


图1 空心线圈结构

Fig.1 Structure of the hollow coil

互感器内部空心线圈每层都存在如图1所示的4个一样的平面线圈,将各层相邻的线圈串联在一起,通过孔把各层线圈依次串联起来,将始、末端当成输出端,构建成二次传感线圈,组成了互感器的核心部分。

### 1.2 工作原理分析

由于互感器中的二次线圈与测试电流一次导体间有铰链磁链存在,只要测试电流 $I(t)$ 出现变化,也就是相应磁链发生变动,那么各个线圈中就会形成与测试电流变化率相关联的感应电动势,这些电动势方向一致,按照顺序依次串联并彼此叠加,由此即可输出一个与测试电流变化率成正比的电压信号 $U(t)$ 。

对二次感应电动势 $U(t)$ 与测试电流 $I(t)$ 间的关系进行分析<sup>[6]</sup>,得到单个空心线圈与一次导体间的互感,即

$$H(z) = \frac{\eta_0}{2\pi} \sum_{i=1}^N \left\{ [x - 2(i-1)y] \ln \frac{z+x-(i-1)y}{z+(i-1)y} \right\} \quad (1)$$

式中: $x$ 为空心线圈边长; $y$ 为两印线之间距离; $z$ 为直导体与空心线圈间的距离; $N$ 为空心线圈绕制匝数; $\eta_0$ 为真空磁导率。

令

$$R(z) = [x - 2(i-1)y] \ln \frac{z+x-(i-1)y}{z+(i-1)y} \quad (2)$$

则 $H(z)$ 可表示为

$$H(z) = \frac{\eta_0}{2\pi} \sum_{i=1}^N R(z) \quad (3)$$

一次导体能分成8段直导体,各段直导体和空心线圈的间距存在4种情形,分别是: $z_1, z_2, z_3, z_4$ 。假定印制板层数为 $M$ ,一次导体和传感线圈的纵向距离为0,也就是使二者处于相同平面,由此能够确定空心线圈的互感系数,即

$$\begin{aligned} \delta &= M \times [4H(z_1) + 4H(z_2) + 4H(z_3) - 4H(z_4)] \\ &= \frac{2M\eta_0}{\pi} \sum_{i=1}^N [R(d_1) + R(d_2) + R(d_3) - R(d_4)] \end{aligned} \quad (4)$$

把 $z_1, z_2, z_3, z_4$ 依次代入式(2)与式(3)中,直导体与空心线圈间的距离 $z$ 和一次导体圆筒直径 $d$ 的位置相等,从而求出 $H(z_1), H(z_2), H(z_3), H(z_4)$ 与 $R(d_1), R(d_2), R(d_3), R(d_4)$ 。

设 $R_i$ 与 $R_0$ 依次为

$$R_i = R(d_1) + R(d_2) + R(d_3) - R(d_4) \quad (5)$$

$$R_0 = \sum_{i=1}^N R_i \quad (6)$$

$R_0$ 用于描述单层印刷线路围起来的面积,由此可得:

$$\delta = \frac{2M\eta_0}{\pi} \sum_{i=1}^N R_i = \frac{2M\eta_0}{\pi} R_0 \quad (7)$$

根据电磁感应定律,感应电动势 $U(t)$ 如下式:

$$U(t) = -\delta \frac{zI(t)}{t} = \frac{2M\eta_0 R_0}{\pi} \cdot \frac{zI(t)}{t} \quad (8)$$

通过上述分析知道,互感系数 $\delta$ 由两个因素决定:1)线圈的结构、大小、匝数以及线圈与一次导体间的位置情况<sup>[7]</sup>;2)印刷版层数 $M$ 。只有当这两个因素一定时,才能准确确定互感系数 $\delta$ ,此时 $\delta$ 为一常数。

## 2 互感器输出波形采集

忽略空心线圈互感器本身参数对输出波形采集准确度的影响,互感器输出波形采集等效电路图如图2所示,主要分为空心线圈与积分器两部分<sup>[8]</sup>。其中, $R_a$ 为积分电阻; $R_b$ 为反馈电阻; $R_c$ 为平衡电阻; $C_1$ 为积分电容。这里 $R_b$ 主要用于消除积分漂移, $R_c$ 主要用于抑制输入偏置电流干扰。

将运放失调因数、积分漂移以及偏置电流引起的误差忽略,这样有损积分器电路的时域如下式:

$$u_0(t) = -\frac{1}{R_a C_1} e^{-\frac{t}{T}} \int_0^t e(\varepsilon) e^{\frac{\varepsilon}{T}} d\varepsilon - u_c(0_+) e^{-\frac{t}{T}} \quad (9)$$

其中  $T = R_b C_1$   
 式中:  $\varepsilon$  为时间  $t$  的自变量;  $T$  为积分器的时间常数;  $u_c(0_+)$  为 0 时刻积分电容上的初始电压, 通常设为 0。

根据上述内容可知, 采用积分器输出电压复原一次电流, 仍有一个折算关系存在<sup>[9]</sup>, 且与  $T$  值有关。

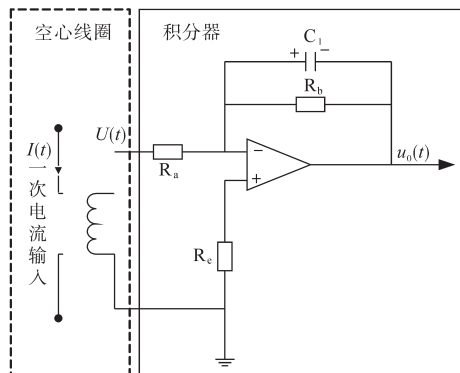


图2 互感器输出波形采集等效电路图  
 Fig.2 Equivalent circuit diagram of output waveform acquisition of transformer

### 3 小电流下互感器输出波形质量测试

#### 3.1 实验仪器

将一台 220 kV GIS 用互感器作为实验仪器<sup>[10]</sup>, 如图 3 所示。



图3 实验仪器  
 Fig.3 Experimental instrument

#### 3.2 小电流下互感器输出波形精度测试

在实验仪器中设置 5%~50% 的额定电流完成测试<sup>[11]</sup>。在额定电流下, 互感器传感头、积分放大、相位补偿各点的实验波形如图 4 所示。当前传感头输出信号比上一次电流超出 90°左右, 这是因为传感头输出信号较小, 容易被噪声干扰导致毛刺的出现, 经积分处理后<sup>[12]</sup>, 波形恢复, 和一次电流之间存在 2°左右的相差。因为无源积分电流能够在一定程度上实现滤波, 所以经积分放大处理后波形较为光滑。

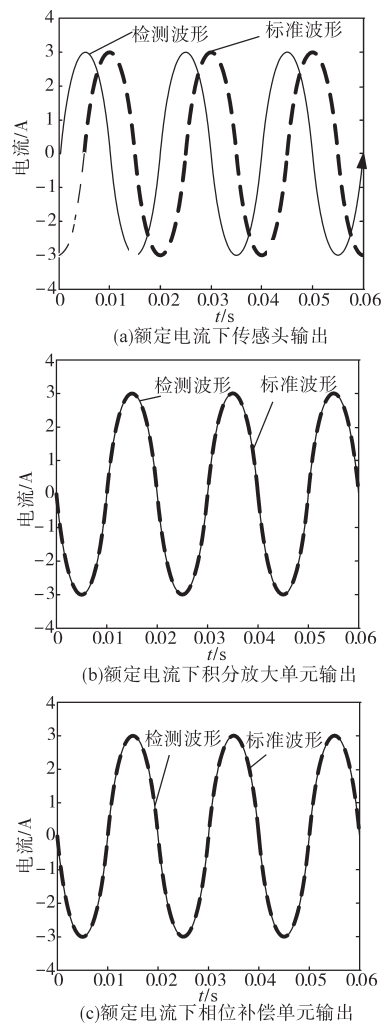


图4 额定电流下实验波形  
 Fig.4 Experimental waveforms of rated current

依据上述分析, 给出额定电流在 5%~50% 范围内变化时, 互感器输出波形准确性测试结果, 如表 1 所示。

表 1 互感器输出波形精度测试结果

Tab.1 Test results of output waveform of transformer

额定电流百分数/%	空心线圈		积分放大		相位补偿		总谐波畸变率/%
	比差/%	相差/°	比差/%	相差/°	比差/%	相差/°	
5	6.55	92.56	-2.75	2.98	-1.22	-38.3	5.49
10	6.36	91.23	-0.39	2.88	-1.06	27.61	5.01
20	6.25	88.95	0.25	2.76	-0.55	18.21	2.05
30	6.92	91.16	-0.12	2.53	-0.16	-2.14	1.15
40	6.83	89.22	0.16	2.47	-0.26	16.22	1.03
50	6.59	89.13	0.13	2.39	-0.33	-3.05	0.95

分析表 1 可知, 互感器在额定电流和小电流下的输出波形精度完全符合电流互感器的要求, 总谐波畸变率最高为 5.49%。本测试对互感器不同单元进行测试, 尽管在一定程度上会导致测量误差的出现, 但是测试结果是在合理范围内的。

常规电流互感器需要充分的输出功率才可对二次设备进行驱动,而互感器输出功率特别小,所以小电流下容易受到电磁的干扰。在5%小电流下互感器传感头、积分放大、相位补偿各点的输出波形如图5所示。

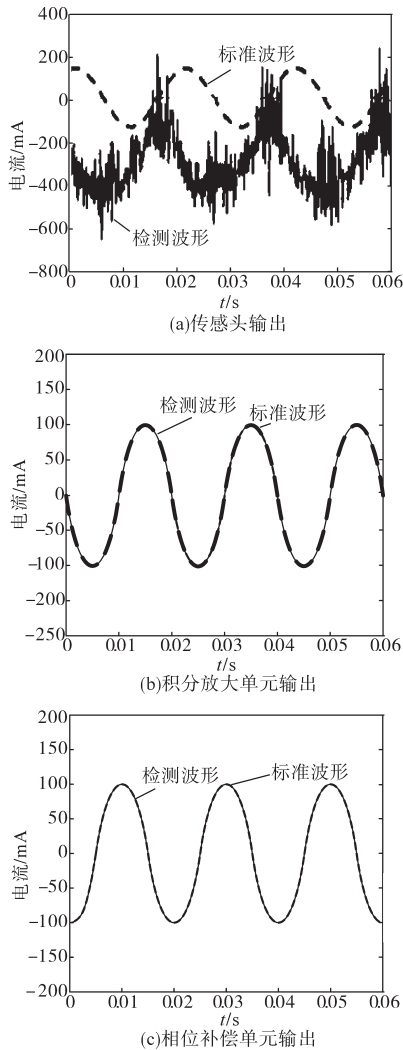


图5 小电流下输出波形

Fig.5 Output waveforms at low current

分析图5可知,小电流下,空心线圈传感头输出受干扰的影响较大,而积分放大单元和相位补偿单元输出信号受干扰程度不大,这主要是因为实验互感器的信号处理电路有效消除了输出波形的畸变。

### 3.3 小电流下互感器输出波形暂态饱和和测试

在电流较大的情况下,一定程度上会导致互感器暂态饱和,如图6所示。对输出差动电流进行谐波分析可以看出,其谐波含量相对较大,高于阈值20%,对含差动保护的电流互感器不会产生影响,这是因为本文应用空心线圈与积分器两部分将运放失调因数、积分漂移以及偏置电流引

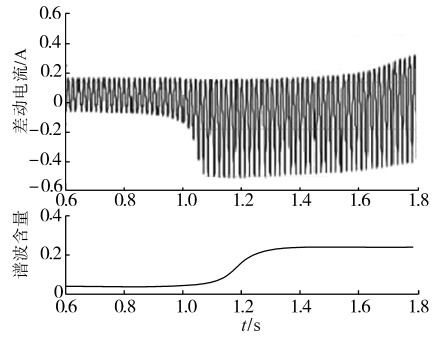


图6 电流互感器暂态饱和

Fig.6 Transient saturation of current transformer

起的误差忽略。然而在电流互感器出现故障的情况下,如果差动保护因高电流导致其饱和而闭锁,则会对输出波形产生干扰。

在小电流下,一定程度上会导致电流互感器出现局部暂态饱和,但不会长期保持。在5%额定电流下,电流互感器输出差动电流波形及谐波含量如图7所示。分析图7可知,谐波含量均低于阈值20%,在一定程度上会导致差动保护误动。

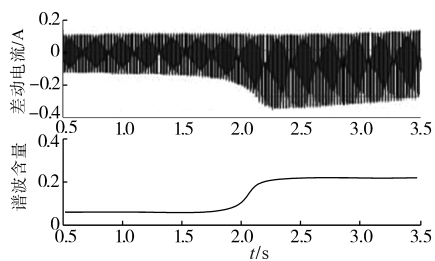


图7 5%额定电流下输出差动电流及其谐波含量

Fig.7 Output differential current and harmonic content at 5% rated current

增加额定电流,验证在10%额定电流下,电流互感器输出差动电流波形及谐波含量,得到结果如图8所示。

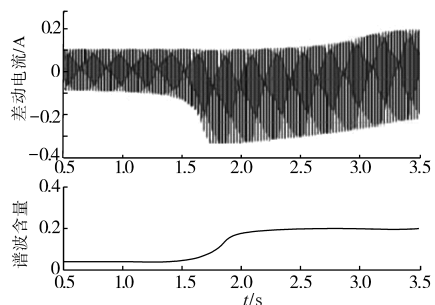


图8 10%额定电流下输出差动电流及其谐波含量

Fig.8 Output differential current and harmonic content at 10% rated current

对比图7和图8可知,在电流有所增加的情况下,谐波含量改变不大,仍出现了局部暂态饱和。然而和图7相比,图8进入饱和的时间有所提前,说明小电流下互感器输出波形会出现局部

暂态饱和现象,但持续时间短。

### 3.4 小电流下互感器输出波形稳态测试

对互感器输出波形进行稳态测试,测试电路如图9所示。

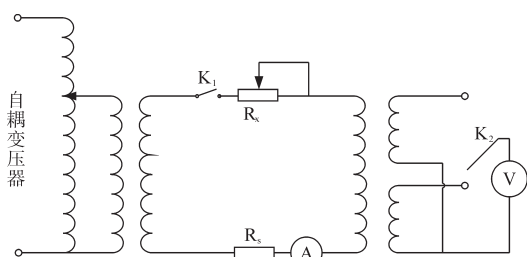


图9 稳态测试电路

Fig.9 Steady-state test circuit

向互感器输入幅值连续可调的输入电压,在输出开路的状态下对其输出信号进行采集。对小电流下互感器输出波形进行记录和比较分析,结果如表2所示。

表2 小电流下输出波形稳态测试

Tab.2 Steady state test of output waveform at low current

电流/A	不同时刻输出电压/V					
	1 s	2 s	3 s	4 s	5 s	6 s
0.50	43.5	46.6	50.9	54.6	63.8	65.2
1.00	57.2	61.3	65.8	69.2	71.5	73.9
1.25	68.6	70.2	74.1	76.5	78.3	80.5
1.50	81.2	82.9	85.1	86.7	88.2	90.6
1.75	93.1	95.3	96.2	98.5	99.3	101.9
2.00	106.8	107.5	109.1	110.3	112.5	113.2

分析表2可知,小电流下输出电压容易受到外界环境的干扰,导致不同时刻输出电压相差较大,在电流为2 A时达到最大,为113.2 V,而互感器输出波形并不稳定,且电流越小,输出波形越不稳定,因为本文设计方法可以减小空心线圈互感器本身参数对输出波形采集准确度的影响,并由此给出互感器输出波形采集等效电路图。

## 4 结论

本文对空心线圈电流互感器在低电流下的输出波形质量进行了测试,得出以下结论:

1)测试了空心线圈电流互感器在小电流下的输出波形精度。在实验仪器中设置5%~50%的额定电流输出完成测试。结果表明,空心线圈电流互感器在额定电流和小电流下的输出波形精度完全符合电流互感器的要求。空心线圈传感头的输出受干扰影响较大,而积分放大器单元和相位补偿单元的输出信号受干扰影响较小,这主要是由于实验空间的限制,核心线圈电流互感器的信

号处理电路有效地消除了输出波形的失真。

2)测试了小电流下空心线圈电流互感器输出波形的暂态饱和。大电流时,会在一定程度上导致空心线圈电流互感器的暂态饱和;小电流时,会在一定程度上导致电流互感器的局部暂态饱和,但不会长期保持。

3)对空心线圈电流互感器在小电流下的输出波形进行稳态测试,结果表明,空心线圈电流互感器在小电流下的输出电压容易受到外界环境的干扰,导致不同时刻的输出电压相差较大,空心线圈电流互感器的输出波形不稳定,电流越小,输出波形越不稳定。

## 参考文献

- [1] 徐子立,胡浩亮,熊前柱,等.电子式电流互感器的误差分析与在线试验研究[J].科学技术与工程,2016,16(24):198-204.
- [2] 何瑞文,吕梦丽,蔡泽祥.适应继电保护暂态传变的空心线圈电流互感器积分技术研究[J].电测与仪表,2015,52(13):48-55.
- [3] 刘宪爽,肖文波,吴华明,等.基于LabView的光纤电流互感器一体化测试系统设计[J].计算机测量与控制,2017,25(7):39-42.
- [4] 孙向飞,束洪春,周建萍,等.电磁型与电子式电流互感器传变和应涌流比较[J].电力自动化设备,2015,35(2):154-159.
- [5] 单冬红,蔡琪,鲁书喜.基于BP神经网络的谐波电流检测方法研究[J].电子设计工程,2016,24(10):42-44.
- [6] 郑玉平,潘书燕,夏雨,等.变压器空投时电子式电流互感器输出励磁涌流波形异常分析[J].电力系统自动化,2017,41(9):188-193.
- [7] 熊兰,周健瑶,宋道军,等.基于改进J-A磁滞模型的电流互感器建模及实验分析[J].高电压技术,2014,40(2):482-488.
- [8] 陈雷,郑德忠,赵兴涛,等.基于匹配追踪稀疏分解的电能质量扰动检测[J].仪器仪表学报,2015,36(11):2401-2410.
- [9] 谢琼香,何瑞文,蔡泽祥,等.3种电子式电流互感器的传变特性分析与比较[J].电力系统及其自动化学报,2014,26(5):18-22.
- [10] 张鹏,厉森,韩建强.微谐振式传感器检测系统的波形变换电路设计[J].科技通报,2016,32(11):184-187.
- [11] 余发山,王要东,刘倩,等.电网输电过程谐波电流检测方法研究[J].计算机仿真,2016,33(2):153-157.
- [12] 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.

收稿日期:2020-05-12

修改稿日期:2020-06-22