

空心线圈作为保护用电流互感器的理论分析和试验

徐 雁, 朱明钧, 郭晓华, 张 庆, 叶妙元
(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北省武汉市 430074)

摘要: 开发新型电子式互感器是电力系统自动化和数字化的一个发展方向, 文中论述了空心线圈用做电流互感器的工作原理及与传统互感器的不同之处, 根据保护的要求, 重点分析了频响工作特性, 并针对具体对象研制了样机。样机试验结果为: 对保护, 在 2 kHz 频宽、20 倍额定电流范围内, 误差小于 1%; 对测量, 可达 0.2 级。理论分析和试验结果证明空心线圈电流互感器以其线性好、频带宽、无饱和、体积小等优点能完全满足电力系统保护和测量的需要, 而且特别适用于微机化保护装置和电子式测量仪器。

关键词: 空心线圈; 电流互感器; 保护; 测量

中图分类号: TM452; TM551

0 引言

电力互感器是电力系统自动化最基本的测量设备之一, 在电力系统被广泛地应用。目前, 电磁式互感器得到了比较充分的发展, 然而, 随着电力传输容量的不断增长, 电网电压等级的不断提高及保护要求的不断完善, 铁心式电流互感器已逐渐暴露出与之不相适应的弱点, 如固有体积大、磁饱和、铁磁谐振、动态范围小、使用频带窄等, 已难以满足电力系统发展的要求, 因此, 寻求更理想的电流互感器已是当务之急。

目前, 已在电力系统中广泛应用的以微处理器为基础的数字保护装置、计量测试仪表、运行监控系统以及发电机励磁控制装置等都要求采用低功率、紧凑型的电压和电流量测代替常规的电流互感器和电压互感器, 这是电力系统技术创新面临的重要任务, 它对提高电力系统特别是电力系统保护的可靠性具有重要意义^[1]。

Rogowski 的空心线圈结合现代集成电子技术作为电力电流互感器, 以其突出的优点, 得到了广大研究人员的青睐。空心线圈电流互感器采用非磁性材料作为传感器, 无饱和、无剩磁、体积小、频带宽、输出低电平小电流信号, 特别适用于电力系统数字保护装置。华中科技大学早在 20 世纪 70 年代就空心线圈互感器在高压大电流、脉冲大电流、焊接电流等方面做了大量的工作, 积累了丰富的经验, 为现在开发研制电力系统保护用空心线圈电流互感器打下了坚实的基础。

1 空心线圈电流互感器工作原理及特点

研制的空心线圈电流互感器的传感原理如图 1 所示。

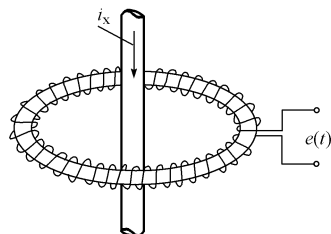


图 1 空心线圈电流互感器传感原理图
Fig. 1 Sensor diagram of air-core coil current transformer

采用一环形非磁性骨架, 骨架半径为 r , 截面积为 $S=dh$, 线圈均匀缠绕在此环形骨架上, 可以证明测量线圈所交链的磁链与环形骨架内的被测电流 i_x 存在线性关系^[2]。当 $r \gg d$ 时, 空心线圈单位长度 dL 上的小线圈所交链的磁链 $d\varphi$ 为:

$$d\varphi = \frac{N}{2\pi r} S B_L dL$$

式中: B_L 为磁感应强度在测量线圈轴线方向上的切线分量; N 为小线圈的总匝数。

整个空心线圈的小线圈所交链的总磁链 φ 为:

$$\varphi = \frac{NS}{2\pi r} \oint B_L \cdot dL = \frac{NS\mu_0}{2\pi r} \oint H \cdot dL$$

根据全电流定律, 磁场强度 H 沿任意封闭轮廓积分等于穿过这封闭轮廓所限定面的电流, 即:

$$\oint H \cdot dL = i_x$$

则有:

$$\varphi = \frac{NS\mu_0 i_x}{2\pi r}$$

整个线圈的感应电势 $e(t)$ 为:

$$e(t) = -\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{NS\mu_0}{2\pi r} \frac{di_x}{dt} \quad (1)$$

当线圈骨架材料一定、尺寸一定、绕制线圈所用的导线线径一定时,则 r, N, S 均可视为恒定值,感应电势 $e(t)$ 就正比于被测电流 i_x 的微分值。

传感器输出的信号 $e(t)$ 是被测信号 i_x 的微分值。为求得输出与 i_x 的直接线性关系,积分器是模拟电路部分的关键。设积分器积分参数为 R 和 C , 则有:

$$u_x(t) = -\frac{1}{RC} \int e(t) dt = \frac{1}{RC} \frac{NS\mu_0 i_x}{2\pi r} \quad (2)$$

积分器输出 $u_x(t)$ 与被测电流成线性关系,只要准确地测量 u_x 就可获得 i_x 。

通过适当地放大和补偿非理想情况造成的相移,可将信号 $u_x(t)$ 调整为 IEC 标准规定的标准值,该值与被测信号 i_x 成严格的线性关系。模拟电路根据保护和测量的不同要求,分别将保护和测量的额定信号输出调整为 150 mV(有效值)和 4 V(有效值)。数字电路的额定输出分别为 01CFH 和 2D41H。系统结构框图如图 2 所示。

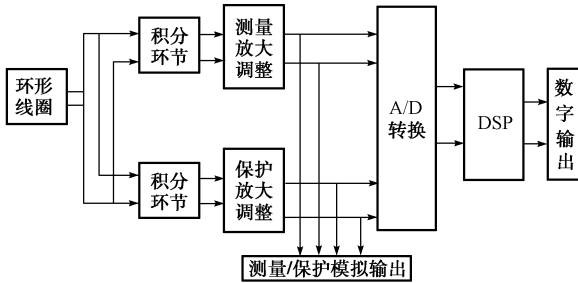


图 2 空心线圈电流互感器结构框图
Fig. 2 Structure diagram of air-core coil current transformer

从以上的设计原理可以看出,空心线圈电流互感器由于不含铁心,从理论上消除了磁饱和现象,改善了电磁式电流互感器频带窄和范围小的缺点。由于不存在剩磁和磁饱和,电流互感器的测量准确度和稳定性也大为改善。同时,空心线圈电流互感器相对传统互感器体积大大减小,重量大为减轻,十分有利于产品的绝缘设计和产品的小型化。空心线圈电流互感器与传统电流互感器在二次输出上有很大的不同,电流互感器的二次输出不再是一个电流量而是一个电压量,而且没有二次输出不能开路的限制,它的小电压信号输出可以十分方便地实现量化,或与计算机接口实现数字化保护、测量和传送。

2 空心线圈电流互感器频率响应特性分析

由于保护用电流互感器在频率响应方面有一定的要求,下面根据空心线圈电流互感器的原理分析其状态性能。空心线圈电流互感器的等效电路如图 3 所示。

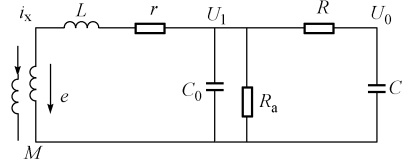


图 3 空心线圈电流互感器的等效电路
Fig. 3 Equivalent circuit of air-core coil current transformer

图中: i_x 为原方被测电流; M 为空心线圈的互感; L 为自感; r 为内阻; C_0 为寄生电容; R_a 为取样电阻; R 为空心线圈后接积分器的积分电阻; C 为空心线圈后接积分器的积分电容; $e(t)$ 为感生电动势; U_1 为实际输出电压; U_0 为空心线圈互感器积分器的输出电压。

该系统的传递函数 $W(p)$ 为:

$$W(p) = \frac{U_0(p)}{I(p)} = \frac{U_1(p)}{I(p)} \frac{U_1(p)}{U_i(p)} \frac{U_0(p)}{U_1(p)} = \frac{M}{RLCC_0} \frac{p}{\left(p + \frac{1}{RC} \right) \left(p^2 + 2\delta p + \omega'^2 \right)} \quad (3)$$

式中:

$$\delta = \frac{1}{2LC_0} \left(\frac{L}{R_a} + rC_0 \right)$$

$$\omega' = \frac{1}{\sqrt{LC_0}} \sqrt{\frac{R_a + r}{R_a}}$$

ω_0 为空心线圈的固有振荡频率,

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_0}}$$

在实际工作状态下 $\delta < \omega'$, 二次回路实际上为一振荡环节, 输出电压 U_0 与被测电流 i_x 在正弦稳态下的振幅之比为:

$$|W(j\omega)| = \frac{MR_a}{R_a + r} \omega \left\{ \sqrt{1 + (\omega RC)^2} \cdot \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right]^2 + 4 \left(\frac{\delta}{\omega_0'} \right)^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0'} \right)^2} \right\}^{-1} \quad (4)$$

由式(4)可画出对数幅频曲线,如图4所示。

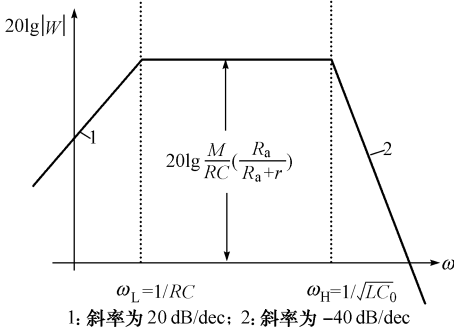


图4 空心线圈电流互感器的对数幅频特性曲线

Fig. 4 Amplitude-frequency characteristic curve of air-core coil current transformer

空心线圈的上、下限频率分别为 f_L 和 f_H :

$$f_L = \frac{1}{2\pi RC}$$
$$f_H = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_0}}$$

理论上的工作频率范围 Δf 为:

$$\Delta f = f_H - f_L = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_0}} - \frac{1}{2\pi RC}$$

在实际应用中,考虑最佳阻尼情况和保护与测量的相对误差要求,工作频率范围会相应减小;而且随着相对误差要求的提高,频带范围亦会变窄,这是因为随着误差要求的提高,必然提高线圈输出信号的信噪比。这样就导致单位长度匝数增加,最后使 L, C_0, M 增加,上限频率 f_H 下降。

电力系统保护用电流互感器按照国标规定分为5 P 级和10 P 级。本文按5 P 级要求,则额定电流时,二次保护输出值的相对误差 ϵ 应小于 $\pm 1\%$ 。由式(4)可推导证明在 $\epsilon = \pm 1\%$ 时有:

$$f_L' = \frac{10f_L}{\sqrt{2}} \quad f_H' = \frac{f_H}{2.66}$$

电流互感器作为保护用,要求如实反映13次以内谐波,13次以上的谐波分量很小,可忽略;而短路暂态过程的时间常数一般在几十ms以上,所以实际的频率响应要求只在1 kHz以内。作为测量用电流互感器,主要测量稳态时的基波有效值,所以空心线圈电流互感器从理论上和实际上都完全能满足用于电力系统的电流互感器的要求。

3 实际设计与试验结果

在大量的理论研究和充分试验的基础上,设计制作了一组圆环形空心线圈电流互感器。针对保护用电流互感器一般都置于户外运行的情况,对空心

线圈的骨架材料及互感器所用电子元器件都做了精心的选择,尤其注意了温度变化的影响;另外,为了适应恶劣的电磁干扰环境,对空心线圈做了特别的处理,对二次电路进行了电磁兼容性设计。对电力系统中每相电流一般需要2个测量,2个保护共需4个电流互感器的情况,在采用空心线圈电流互感器时,经过充分考虑,现用一个空心线圈代替,保护和测量由二次线路分别处理输出。新的方案使线圈部分体积大大缩小,二次输出能直接输出到微机保护装置。针对实际所用的空心线圈电流互感器,现设计样机的主要技术指标为:400 A,保护5 P20级,计量0.2级,测量0.5级,输出组合0.2/0.5/5 P/5 P,环形线圈外径 $D=130$ mm。

测量和保护信号集于一个线圈上,根据前面分析可知要同时考虑频率响应和误差的要求,并对温度变化的影响及外部干扰影响也做了相应的测试。

3.1 频率响应试验

首先,将线圈与二次电路部分整个作为电流互感器整体,施加0~2 kHz的正弦信号,观察其幅频特性的变化。图5为试验原理图。

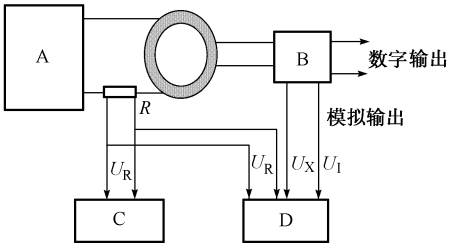


图5 空心线圈电流互感器的频率响应试验原理图
Fig. 5 Experiment diagram of air-core coil current transformer

图中:A为频率在0~2 kHz变化的电流源,利用标准电阻 R 采样,用真有效值电压表C测量; U_R 为标准输入量;空心线圈二次电路B的输出 U_I 为互感器的输出,由真有效值电压表D测量。

观察其输出、输入幅值比 K 的变化,以50 Hz为参考标准,试验测试数据如表1所示。

表1 保护回路的频率响应特性
Table 1 Amplitude-frequency characteristic for the protective circuit

频率 f/Hz	幅值比 K	变化率 $\delta/(\%)$
16.5	1 325	0.75
50.1	1 335	0.00
150.1	1 338	-0.22
300.2	1 340	-0.37
600.0	1 342	-0.57
1 001.8	1 345	-0.75
1 501.5	1 353	-1.35
2 003.0	1 367	-2.40

可以看出,在 0~2 kHz 范围内完全可以达到 IEC 标准规定的要求,同时 2 kHz 的频宽亦足以满足一般保护的要求。

3.2 线性度试验

保护线性度试验应使电流从 I_N 至 $20I_N$ 变化,但因条件所限,实测到 $12I_N$,实验数据如表 2 所示。保护相位差在额定时为 60° ,其他不做要求。另外,采用模拟方法,使 $I_N \sim 20I_N$ 变化,结果如表 3 所示。

表 2 实测保护输出及线性度
Table 2 Linearity for the protective circuit according to actual measurement

量程	I_{in}/A	U_o/V	$\delta/(\%)$
I_N	400.0	0.150 1	0.00
$2I_N$	906.0	0.339 8	-0.12
$4I_N$	1 622.0	0.675 0	0.16
$6I_N$	2 430.0	0.910 9	0.07
$8I_N$	3 200.0	1.213 6	-0.68
$10I_N$	4 032.0	1.504 6	0.56
$12I_N$	4 932.0	1.838 0	0.69

表 3 模拟法保护输出及线性度
Table 3 Linearity for the protective circuit according to analogue method

量程	U_x/V	U_o/V	$\delta/(\%)$
I_N	0.300 0	0.150 0	0.00
$6I_N$	1.835 8	0.905 6	0.85
$12I_N$	3.862 7	1.922 0	0.50
$16I_N$	4.840 7	2.408 4	0.50
$18I_N$	5.664 0	2.808 6	0.80
$22I_N$	6.779 0	3.372 8	0.50

测量线性度试验使用 0.05% 高稳定电流源,采用等安匝方法使空心线圈包围的电流从 $5\%I_N$ 至 $120\%I_N$ 变化,用 0.01% 精密电阻取样标准参考电压值,与二次单元测量模拟输出相比较,标准参考电压和二次模拟输出电压均采用 0.05% 的标准表测试。同时,标准参考信号与模拟输出之间的相位差采用 0.05% 高精度相位计测量。测试电路同图 5。试验数据如表 4 所示,其中 $I_N=400 A$ 。

表 4 测量模拟输出线性度和相位差
Table 4 Linearity and phase error for the measurement circuit

量程	I_{in}/A	U_x/V	$\delta/(\%)$	$\Delta\theta/(\circ)$
$120\%I_N$	481.45	4.817 9	0.05	4.8
$100\%I_N$	400.20	4.002 9	0.00	4.2
$20\%I_N$	80.18	0.800 7	-0.15	3.6
$5\%I_N$	19.92	0.199 3	0.05	-0.6

3.3 温度稳定性试验

系统的温度稳定性直接影响测量结果的准确度。针对电流互感器工作环境的要求,在 $-40^\circ C \sim +60^\circ C$ 温度范围内对线圈部分及模拟电路部分重点做了温度稳定性试验。将传感器与电路均置于温度控制箱内保持 I_x 为 370 A 左右,互感器幅值的温度稳定性如表 5 所示。

表 5 互感器的温度稳定性
Table 5 Temperature stability for the transformer

温度/ $^\circ C$	$\delta/(\%)$	温度/ $^\circ C$	$\delta/(\%)$
-40	0.0 800 80	20	0
-30	0.0 533 87	30	-0.0 080 10
-20	0.0 600 60	40	-0.0 146 80
-10	0.0 266 93	50	-0.0 347 00
0	0.0 533 87	60	-0.0 760 80
10	0.0 200 20		

试验结果表明,温度在 $-40^\circ C \sim +60^\circ C$ 范围内变化,温度变化带来的误差不超过 0.08%。

3.4 相邻母线干扰试验

为考察相邻母线电流产生的磁场对测量的影响,在空心线圈外侧通过与被测电流大小相等的干扰电流 I_{∞} ,当干扰紧邻时影响不超过 0.06%,随着距离的增大其影响急剧减小。

4 结论

理论分析表明,空心线圈电流互感器完全能满足电力系统电流测量和保护的需要。已有的试验证明,空心线圈电流互感器的测量准确度可达 0.2% 以内,保护可达 5 P20 级,而且还能实现更宽电流范围的保护。

参考文献

- 1 曾庆禹(Zeng Qingyu). 电力系统数字光电量测系统的原理及技术 (Principle and Technology of Digital Optical Electric Measurement for Power System). 电网技术 (Power System Technology), 2001, 25(4): 1~5
- 2 揭秉信(Jie Binxin). 大电流测量 (The Measurement of Higher Current). 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 1987

徐 雁(1963—),女,副教授,主要从事新型互感器和智能仪器的研究。E-mail: l20919@public.wh.hb.cn

朱明钧(1939—)男,高级工程师,研究方向为新型互感器。

郭晓华(1975—),女,博士研究生,研究方向为空心线圈电流互感器。

