

文章编号:1001-1609(2002)03-0023-04

用于 110 kV 变压器的空心线圈电流传感器研究

郭晓华, 叶妙元, 徐雁, 朱明钧, 张庆, 廖京生, 胡爱华

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

RESEARCH OF THE ROGOWSKI CURRENT TRANSDUCER USED IN 110 kV TRANSFORMER

GUO Xiao-hua, YE Miao-yuan, XU Yan, ZHU Ming-jun, ZHANG Qing, LIAO Jing-sheng, HU Ai-hua

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

摘要: 介绍了一种用于 110 kV 变压器的空心线圈电流传感器的主要特点、测量原理、系统结构和设计方法,并给出了实验结果。

关键词: Rogowski 线圈; 积分器; 电流传感器

中图分类号: TM933.1 **文献标识码:** A

Abstract: The characteristics, the principle, the system structure and the method of design of a Rogowski current transducer used in the 110 kV transformer are introduced in this paper. The test results are presented.

Key words: Rogowski coil; integrator; current transducer

空心线圈电流传感器解决了使用传统电磁式互感器带来的一系列问题,如故障电流发生时易出现磁饱和、频带窄、动态范围小、加工工艺复杂等,它不含铁心,无磁滞效应,无磁饱和现象,不仅测量的准确度和带宽有明显改善,而且体积小、重量轻、造价低廉,易于实现测量和保护自动化与数字化。

笔者介绍一种基于空心线圈原理的电流传感器,简称 ROCT- ,这种传感器额定电流 600 A,用于 110 kV 变压器之中,获取测量、保护信号。测量部分精度达 0.2 级,保护部分满足 5P20,已于 2001 年 9 月通过了权威部门鉴定,符合 IEC60044-8 电子式电流传感器标准要求,主要技术指标与 ABB、SIEMENS 公司的空心线圈电流传感器相当。

1 系统结构

ROCT- 电流传感器系统框图如图 1 所示。

系统分为传感器(空心线圈)和模拟电路两部分。空心线圈输出正比于被测电流变化率的电压信号,经测量和保护电路分别积分、放大、滤波、移相等

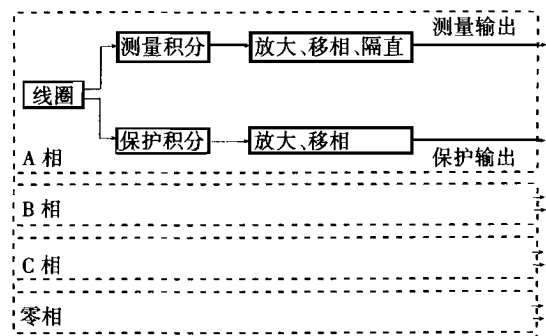


图 1 传感器结构框图

分别处理后给出额定有效值 4 V (测量) 和 150 mV (保护) 的输出电压。

2 测量原理

空心线圈又称 Rogowski 线圈,当绕制非常均匀,小线圈所包围的面积非常细小而且均匀时,线圈两端的电压 u 与穿过线圈中心的电流 i_p 有如下关系:

$$u = M \frac{di_p}{dt} \quad (1)$$

式中: M 为互感系数,设 n 为线圈单位长度的匝数, S 为横截面积,有:

$$M = n\mu_0 S \quad (2)$$

空心线圈实际为一微分环节。 u 经积分后,还原出被测电流 i_p [1]。

3 空心线圈

线圈在设计时必须注意以下几点: 互感 M 足够大,提供的信号超过可能存在的干扰电平,但同时线圈绕组电压不能过大,以免击穿线圈绝缘。为便于加工,骨架截面一般做成矩形。式(1)在一定近似条件下成立,骨架高度和厚度都不能太大,尤其在

收稿日期:2002-01-21; 修回日期:2002-03-20

磁场梯度方向上尽可能小,形成扁平线圈。线圈半径越小,这一点越应特别注意。骨架精加工,截面积均匀;线匝均匀密绕并与磁通方向垂直,从工艺上保证 n 、 S 均匀。这样制成的空心线圈为无定向结构,在复杂外界磁场下也能够准确测量被测电流,且母线在线圈内的相对位置变化时引起的误差足够小。线圈绕成偶数层,通常绕制一圈与小线匝循环方向相反的“回线”。线圈外加一层金属屏蔽,抑制外界杂散磁场的影响。屏蔽不可形成回路,否则将沿屏蔽层形成环流,对被测电流产生的磁场起抵消作用。考虑到长期运行、外界环境对温度稳定性的需要,选用热膨胀系数(笔者选用 25 ppm/K)尽可能小的材料制成骨架,实验表明, - 40 ~ 70 范围内温度变化给线圈带来的误差 < 0.05%。选用的漆包线不能过细,以免绕制过程中发生断线。

4 积分器

普通 RC 积分器在最不利的情况下(即输入电压为脉冲函数),积分运算的相对误差上限 $= \frac{1}{RC}$,一般取时间常数 100 t 方能保证精度。在这么大的积分常数下,信号衰减严重。

理想电子积分器的可等效为 $(K_0 + 1) RC$, K_0 为运放开环放大倍数。由于积分时间常数比普通 RC 积分增大了 K_0 倍,故积分运算误差相对于普通 RC 积分减小了 K_0 倍,同时输出电压相对增大了 K_0 倍,精度与输出幅值的矛盾得以解决。但是,测量电力系统中的稳态交流电流时,积分器工作时间很长,运放失调电压、失调电流、偏置电流、温度漂移等因素经电容不断累积,积分漂移严重,给测量带来了很大误差,甚至无法正常工作。为了稳定工作点,选用失调及温漂小的运放,并以带反馈电阻的近似积分器(又称“惯性环节”,见图 2)代替理想电子积分器。值得注意的是,惯性环节引入了近似误差,对正弦稳态电流幅值,相对误差为:

$$\left(\right) = \frac{\frac{1}{RC} - \frac{R_2/R}{\sqrt{1 + (R_2 C)^2}}}{1/RC} = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{R_2 C}\right)^2}} \quad (3)$$

令 $X = (1/ R_2 C)^2$,展开成幂级数,忽略高次项得:

$$\left(\right) = 1 - \left(1 - \frac{1}{2} X + \frac{3}{8} X^2 - \dots \right)$$

$$\left(\frac{1}{2} X = \frac{1}{2} (1/ R_2 C)^2 \right) \quad (4)$$

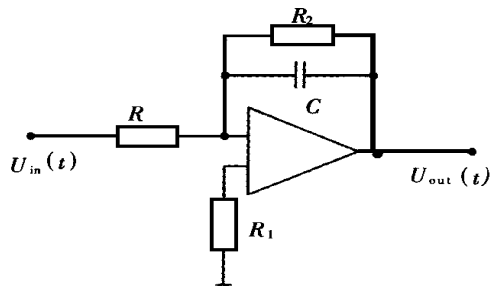


图 2 近似积分器(惯性环节)

式(4)是选择反馈电阻大小的依据^[2]。只要元件参数选择合理,既能有效抑制积分漂移,稳定工作点,又能将反馈电阻引入的近似误差控制在允许的范围。

电网发生短路故障时,信号中含有较大的非周期分量,且衰减时间较长,近似误差比测量稳态电流时大很多。电流高达额定电流 20 倍时,近似积分器甚至出现饱和。笔者对保护电路积分处理采取了特殊措施,使其满足 5P20 要求。

5 误差分析

测量系统总的静态误差由以下两部分组成:

(1) 空心线圈的测试误差:包括母线位置影响误差、外磁场影响误差、温度影响误差。该系统中母线与线圈相对位置固定,位置影响误差可忽略。

(2) 电路的误差:包括温度影响误差、近似积分误差。外界温度改变时电路中电阻、电容的值发生变化,而积分时间常数的改变是温度误差的主要来源。ROCT- 中选中了温度系数小的电子元器件,并在电路中采取了补偿和修正措施。

$$= \sqrt{\frac{2}{1} + \frac{2}{2} + \frac{2}{3} + \frac{2}{4}} = 0.143\% \quad (5)$$

式中: $1, 2, 3, 4$ 分别为线圈温度误差(- 0.000 454)、电路温度误差(- 0.001 03)、外磁场影响误差(0.000 6)、积分器近似误差(0.000 653 5)。 $1 \sim 3$ 由实验得出, 4 可根据电路参数计算得出。

6 实验结果

6.1 精度实验

传统电流互感器校验方法不能适用于电子式传感器,稳定的大功率电流源又很难获得,故用等安匝方法产生校验电流。实验接线如图 3 所示,在空心

线圈上均匀地绕制等安匝校验线圈,穿过空心线圈的电流即为等安匝校验线圈每一匝通过的电流 \times 安匝模拟数。用高精度工频数字多用表测量等安匝线圈输入电流、传感器输出电压、电流与电压间相位差,计算传感器的比差和角差。实验中所使用的电流源、表计均经权威部门检定合格。

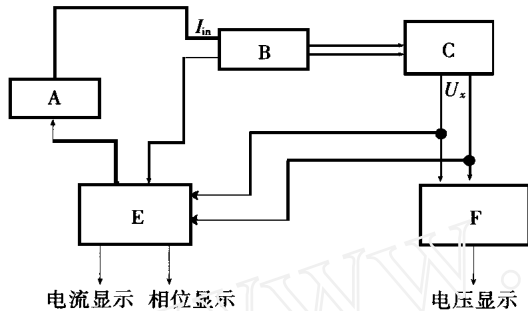


图2 实验接线图

A——高稳定度电流源(65 VA, 稳定度0.02% / min);
B——外部绕有等安匝模拟线圈的 Rogowski 线圈; C——二次回路; E, F——高精度工频数字多用表(电压、电流、相位测量误差均为 $\pm 0.05\%$)

(1) ROCT - 电流传感器测量部分的精度实验,比差 $< 0.2\%$,角差 $< 10'$,符合 IEC60044 - 8 电子式电流传感器标准。实验数据如表 1,表 2 所示($I_N = 600$ A,安匝模拟数 $W = 68$ 匝,等安匝比 = $I_N / W = 8.823 5$ A/匝)。

(2) 即使采用等安匝方法,也难以获得高达 12 000 A 的 20 倍额定电流,故将二次保护电路输入端直接接至信号源,模拟母线电流由 600 A 到 12 000 A 变化时,在空心线圈上产生的微分电压信号 U_{in} ,测得二次保护电路的线性度如表 3 所示。

表 1 比差测试

量程	A相				B相			
	I_{in}/A	U_x/V	$K=U_x/I_{in}$	比差/%	I_{in}/A	U_x/V	$K=U_x/I_{in}$	比差/%
120% I_N	10.777 4	4.886 7	0.453 42	0.002	10.590 8	4.801 2	0.453 34	0.002
100% I_N	8.819 9	3.999 1	0.453 41	0	8.824 1	4.000 4	0.453 35	0
20% I_N	1.784 4	0.810 1	0.453 99	0.13	1.817 5	0.825 1	0.453 98	0.14
5% I_N	0.429 9	0.195 1	0.453 92	0.11	0.422 6	0.192 6	0.455 75	0.53
量程	C相				零相			
	I_{in}/A	U_x/V	$K=U_x/I_{in}$	比差/%	I_{in}/A	U_x/V	$K=U_x/I_{in}$	比差/%
120% I_N	10.774 5	4.883 4	0.453 24	0.002	10.638 5	4.821 2	0.453 18	0.01
100% I_N	8.824 3	3.999 6	0.453 25	0	8.830 1	4.001 2	0.453 13	0
20% I_N	1.786 6	0.811 0	0.454 09	0.19	1.794 5	0.814 4	0.453 83	0.15
5% I_N	0.421 2	0.191 8	0.455 37	0.47	0.434 5	0.197 9	0.455 47	0.52

6.2 温度稳定性实验

分别将空心线圈、二次电路、线圈与电路整体置

表 2 角差测试

量程	A相			B相		
	U_x/V	角差		U_x/V	角差	
		读数	/ (°)		读数	/ (°)
120% I_N	4.854 9	0.09	5.4	4.899 0	0.04	2.4
100% I_N	4.002 0	0.08	4.8	4.072 0	0.02	1.2
20% I_N	0.805 2	0.08	4.8	0.805 4	0.03	1.8
5% I_N	0.195 0	359.91	- 5.4	0.194 6	359.89	- 6.6
量程	C相			零相		
	U_x/V	角差		U_x/V	角差	
		读数	/ (°)		读数	/ (°)
120% I_N	4.993 0	0.07	4.2	4.888 6	0.12	7.2
100% I_N	4.088 3	0.06	3.6	4.000 8	0.11	6.6
20% I_N	0.792 6	0.06	3.6	0.806 2	0.14	8.4
5% I_N	0.194 0	359.94	- 3.6	0.198 1	359.91	- 5.4

表 3 保护电路的线性度

U_{in}/V	U_{out}/V	$k = U_{out}/U_{in}$	/ %
0.150 0	0.037 1	0.247 3	0
0.190 1	0.047 1	0.247 7	0.164
0.572 6	0.142 0	0.248 0	0.266
1.096 7	0.272 0	0.248 0	0.276
1.825 8	0.452 8	0.248 0	0.270
2.888 9	0.719 0	0.248 9	0.627
3.862 7	0.960 9	0.248 8	0.578

入控温箱,在 - 40 ~ 70 范围内每隔 10 取一个温度点,使试品在该温度下停留 30 min,分析输出、输入比值的变化规律。以 20 值为定标值,传感器整体在全温度范围内温度误差不超过 0.12%,测试结果列于表 4。证明这种电流传感器具有良好的温度稳定性。

表 4 温度特性

$t/$	I_{in}/A	U_{out}/V	/ %
- 40	742.35	0.494 9	0.080
- 30	741.75	0.494 5	0.053
- 20	744.30	0.496 2	0.060
- 10	745.95	0.497 3	0.027
0	747.75	0.498 5	0.053
10	748.20	0.498 8	0.020
20	750.15	0.500 1	0
30	738.60	0.492 4	- 0.008
40	739.65	0.493 1	- 0.015
50	739.20	0.492 8	- 0.035
60	735.90	0.490 6	- 0.076
70	734.55	0.489 7	- 0.111

6.3 外磁场影响试验

在空心线圈外部通过与被测电流大小相等、方向平行的干扰电流 I_{in} ,模拟相邻母线电流产生的磁场所带来的干扰,图 4 为示意图。 $I_{in} = I_N = 800$ A,改变两电流之间的距离 d ,测试数据如表 5。其中:

r 为线圈半径; $e(t)$, $e_{no}(t)$ 分别为邻相不通电流、通过电流时被测相的输出电压。

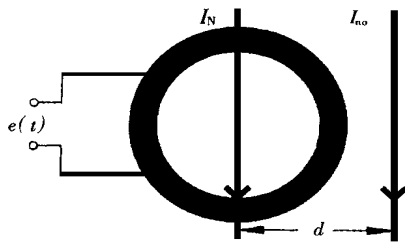


图4 外磁场影响试验示意图

表5 外磁场影响试验

d	$e(t)/V$	$e_{no}(t)/V$	/ %
r	0.328 55	0.328 76	0.06
$2r$	0.328 84	0.328 88	0.01

6.4 EMC(电磁兼容) 试验

依据 GB/ T17626.2 - 1998 和 IEC60044 - 8 等标准要求,对 ROCT - 电流传感器进行了电磁兼容试验,包括静电放电抗扰度试验、射频电磁场辐射抗扰度试验、快速瞬变脉冲抗扰度试验、浪涌(冲击)抗

扰度试验、工频磁场抗扰度试验、脉冲磁场抗扰度试验、阻尼振荡磁场抗扰度试验、振荡波抗扰度试验、电压暂降、短时中断和电压渐变抗扰度试验 9 项内容,全部通过。

7 结论

空心线圈电流传感器具有精度高、稳定性好、抗干扰能力强、动态范围宽、体积小、重量轻、造价低廉等一系列优点,在电力系统中具有广泛的应用前景,可用于变压器、GIS、断路器、PASS 开关中的电流测量,也可独立制成有源光电电流传感器,它的研究和推广具有明显的经济效益和社会效益。

参考文献:

[1] 揭秉信. 大电流测量[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
 [2] 陈本孝. 对交流大电流测量装置中惯性环节的误差分析[J]. 华中工学院学报, 1980, 8(4): 129 - 136.

作者简介:郭晓华(1977 -),女,博士生,现从事电子式电流传感器研究,电话:027 - 87546407。

(上接第 18 页)

6 结论

通信是 SCADA 系统中的重要环节,也是影响 SCADA 系统实时性最显著的环节。下位机和通信机之间,通信方式的选择要考虑的因素较多,因此,可从软件设计的几个方面来提高实时性;在通信机和工作站之间,TCP 和 UDP 的合理选择、直接通信和数据库中转方式的有效结合以及通信规约的合理设计,都将在很大程度上提高系统实时性。

(上接第 22 页)

作原理进行了说明,以实验验证了简化的罗氏线圈测量电流的模型;结合抗干扰措施和提高精度措施对电子线路、单片机采控环节进行了设计。

参考文献:

[1] 王锡凡. 电力工程基础[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1998.
 [2] Ramboz, John D. Machinable Rogowski Coil Design, and Calibration [J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 1996, 45(2): 511 - 515.
 [3] 邹积岩. 罗哥夫斯基线圈测量电流的仿真计算及实验研究[J]. 电工技术学报, 2001, 16(1): 81 - 84.

参考文献:

[1] 提兆旭, 陈赤配. 电力系统计算机调度自动化[M]. 上海:上海交通大学出版社, 1995.
 [2] 盛寿麟. 电力系统远动原理[M]. 北京:水利电力出版社, 1992.
 [3] Modicon Inc. Modicon Modbus Protocol Reference Guide[S]. 1996.
 [4] Anthony Jones, Jim Ohlund. Network Programming for Microsoft Windows[M]. Microsoft Press, 1999.
 [5] 叶世勋. CDT 循环远动规约 [S]. 电力部, 1999.

作者简介:熊泳(1973 -),男,硕士,研究方向为基于计算机网络的智能控制。

[4] 王福瑞. 单片微机测控系统设计大全[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 1999.
 [5] 樊宽军. 微秒级电脉冲的测量[J]. 核技术, 1999, 22(8): 469 - 473.
 [6] 李海燕. 毫秒级罗哥夫斯基线圈的研制[D]. 西安交通大学论文, 1986.
 [7] 马乃祥, 周佩白. 电磁干扰的预防[J]. 华东电力, 1999, 27(11): 47 - 50.
 [8] 孙涵芳. Intel 16 位单片机[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 1995.

作者简介:翟小社(1972 -),男,硕士研究生。