

混合式光电电流互感器中 Rogowski 线圈传感头设计

周均德,周有庆,吴桂清,彭红海

(湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要: 针对传统电流互感器易饱和、绝缘复杂等缺点,介绍了一种混合式光电电流互感器传感头用于测量的新型空心电流互感器。空心线圈传感头(Rogowski 线圈传感头)是由金属导线均匀密绕在一非磁性的骨架上做成的。它具有无磁饱和、绝缘方法简单、测量范围宽等优点。空心线圈传感头由于其感应机理和结构的原因,容易受到外界磁场和温度变化的影响。针对干扰磁场采取了屏蔽等措施,从材料和元器件选择上解决了温度的影响。并试做了一个传感头,试验结果表明,该传感头效果良好,达到了 0.2% 的精度。

关键词: 光电电流互感器; Rogowski 线圈; 混合式; 传感头

中图分类号: TM 452

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2006)07-0072-03

随着微机保护、电网运行与监视系统等的运用,互感器不再需要高功率输出,这使得以 Rogowski 线圈为传感头的互感器成为可能。它能很好地满足大电网电力系统测量、计量和保护等要求^[1-4]。

光纤电流互感器(OCT)可分为无源型 OCT(MOCT)和混合型 OCT(HOCT)2 类。MOCT 因环境温度的影响和双折射等问题,使其应用受到了影响^[5]。HOCT 的传感头采用 Rogowski 线圈取样,高压侧采用有源电子电路,它能较好地满足要求^[6-7]。

1 Rogowski 线圈与传统电流互感器比较

与传统互感器比较,Rogowski 线圈的优点是:

- a. 测量精度高,可达到 0.1%,一般在 1%~3% 间;
- b. 量程大,因其没有铁芯,不会出现磁饱和,故其测量范围可从几安到几千安;
- c. 频率响应范围宽,可达 0.1 Hz~1 MHz 至更大;
- d. 因其体积小、易绝缘、无铁芯,故造价低;
- e. 应用领域广。

2 Rogowski 线圈

Rogowski 线圈测量电流原理如图 1 所示。它是由金属导线绕制在一个非磁性骨架上做成的。根据全电流定律和电磁感应定律,可以推导出线圈骨架内磁通 Φ 和线圈感应电动势 $e(t)$ ^[8]。

设 i 为导体中流过的瞬时电流(A); r 为线圈骨架的任意半径(m); r_a 为骨架外径(m); r_b 为骨架内径(m); h 为骨架高度(m); N 为绕组匝数; μ_0 为真空磁导率,其值为 $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。

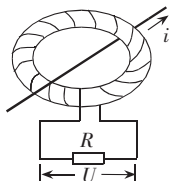


图 1 Rogowski 线圈
测量原理图

Fig.1 Schematic diagram of Rogowski coil

由全电流定律:

$$\oint H dl = I, \quad H = I / 2 \pi r$$

得:

$$B = \mu_0 H = \mu_0 I / (2 \pi r)$$

而

$$\varphi = \oint B ds = \oint \frac{\mu_0 I}{2 \pi r} ds = \int_{r_b}^{r_a} \frac{\mu_0 I h}{2 \pi r} dr = \frac{\mu_0 h I}{2 \pi} \ln \frac{r_a}{r_b}$$

$$\Phi = N \varphi = \frac{N \mu_0 h I}{2 \pi} \ln \frac{r_a}{r_b}$$

所以,由电磁感应定律得:

$$e(t) = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{N \mu_0 h}{2 \pi} \ln \frac{r_a}{r_b} \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

绕组互感系数 M 为

$$M = \frac{N \mu_0 h}{2 \pi} \ln \frac{r_a}{r_b} \quad (2)$$

则

$$e(t) = -M \frac{dI}{dt} \quad (3)$$

由式(1)可知,感应电动势 $e(t)$ 只与线圈的尺寸、匝数和一次电流有关,而与其他因数无关。

其实式(1)的计算是以磁场均匀分布于线圈中为前提的。理论计算表明,只要线圈绕制均匀,则通流导体的位置没有影响,互感系数 M 始终是一常数。

3 积分器

由 $e(t) = -M dI/dt$ 可知:Rogowski 线圈的二次输出电压与被测通导体电流的导数成正比,所以,两者之间相差 90° ,故在线路里需要加一积分环节,使输出量与被测量在相位上一致。积分器的积分信号精确才能保证后面的信号数字变换的正确及整个测量系统的精度,因此,积分环节是个很重要的环节。

有源积分器由运放、电阻 R 及电容 C 组成。理想的有源积分器如图 2 所示。由图 2 可得出:

$$U_0 = -(1/RC) \int U dt$$

又 $U = e(t) = -M di/dt$, 故有

$$U_0 = MI/RC \quad (4)$$

这样,输出量与被测电流成正比,没有相位差。为解决积分放大器中运放的失调和温度漂移导致的积分器漂移问题,在选择元器件时,尽可能选用输入失调电压小的高性能运放。为抑制漂移,特采用惯性环节取代积分器,即在积分电容两端并联大阻值的反馈电阻 R_f ,如图 3 所示。由于 R_f 的存在,为慢变化的漂移电压提供了一个反馈通道,较好地抑制了漂移。同时, R_f 的引入也可以起到保护积分器的作用。

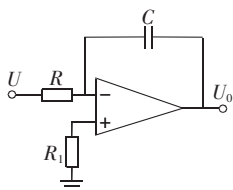


图 2 有源积分器
Fig.2 Active integrator

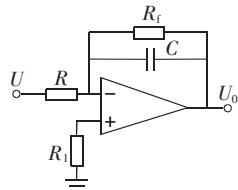


图 3 惯性环节有源积分器
Fig.3 Active integrator with inertial loop

4 误差分析

4.1 外电磁场干扰

外界电磁场对 Rogowski 线圈的影响可分为 2 个方向的影响。

4.1.1 平行于线圈方向的外磁场

如图 4 所示, H' 为外电流在线圈平面上产生的磁场; i 为外电流(A); l 、 m 分别为外电流到圆心和圆边上一点的距离(m)。

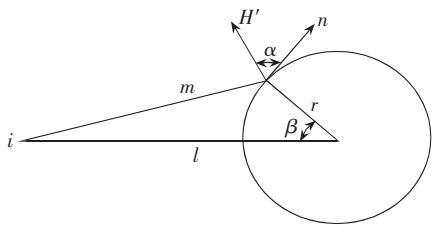


图 4 平行于线圈方向的外磁场影响

Fig.4 The influence of parallel external magnetic field

设 s 和 n 分别为线圈截面积和匝数密度^[9], 则 i 产生的感应电动势为

$$e(t) = \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d}{dt} \oint \mu_0 s n H' dl = - \frac{d\Phi}{dt} (\mu s n \oint H' dl) = 0 \quad (5)$$

式(5)表明:当 s 、 n 均匀时, H' 对线圈感应电动势没影响。当 s 、 n 不均匀时有

$$e(t) = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d}{dt} \oint \mu_0 s n H' \cos \beta dl \quad (6)$$

设 s 均匀, n 不均匀, 即

$$n = \begin{cases} 0 < \beta < \beta' \\ \beta' \leq \beta \leq 2\pi \end{cases} \quad (0 < \beta' \leq 2\pi)$$

则

$$e(t) = - \frac{\mu_0 s n r}{2\pi} \frac{di}{dt} \int_0^{\beta'} \sqrt{l^2 + r^2 - 2lr \cos \beta} \times \cos \left(\beta + \arctan \frac{r \sin \beta}{l - r \cos \beta} \right) d\beta \neq 0 \quad (7)$$

故它对线圈感应电动势有影响。因此在绕制线圈时,一定要均匀紧绕,保证 s 、 n 分布均匀,不易变形^[10]。

4.1.2 垂直于线圈方向的外磁场

垂直于线圈平面的磁场,因其方向与空心线圈的每一匝平行,所以在小线圈中产生的感应电动势为零,对测量值无影响。但是, Rogowski 线圈成螺旋型绕在线圈骨架上,这样就形成了一个大的闭合回路,则外磁场将在此回路中产生一感应电动势。

为解决此一感应电动势,可在绕制线圈时,在线圈内部,即骨架正中回绕一圈与线圈螺旋前进方向相反的绕线^[11],见图 5。为保证所绕回线包围的面积等效于线圈包围的面积,一般取 r_c 为

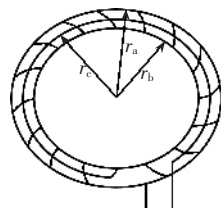


图 5 回线绕制方式
Fig.5 Coils with loop line

$$\pi r_a^2 + \pi r_b^2 = 2\pi r_c^2 \Rightarrow r_c = \sqrt{(r_a^2 + r_b^2)/2}$$

在实际中,一般取 $r_c = (r_a + r_b)/2$ 。

由于回线取在线圈正中间比较麻烦,做了特殊的工艺上的等效,达到了满意的效果,将在后面表述。

此外,在实际应用中,互感器附近的一些导体、导线等的电场及其激发的磁场也会对传感头产生比较大的影响,为此,可以在线圈外面包绕一层金属箔进行电磁屏蔽,可减小外界干扰带来的误差。

4.2 温度变化的影响

温度变化对传感头的影响分为对 Rogowski 线圈的影响和对积分器的影响。

4.2.1 对 Rogowski 线圈的影响

温度变化会使 Rogowski 线圈骨架的尺寸发生改变,从而影响到 s 和 n 的大小,使得互感系数 M 改变,这样测量值会发生改变。为解决此一问题,可选用热膨胀系数小的骨架材料。陶瓷骨架的温度变化率比较小,但目前国内加工工艺达不到。选用环氧树脂材料做骨架,经过适当的处理,线圈均匀紧绕在骨架上,可以达到要求的精度。

4.2.2 温度对积分器的影响

温度对积分器的影响和解决方法见第 3 节。

4.3 被测导体位置变动的影响

由于制造工艺问题,加上安装和震动等的影响,一次导体很难保证正好在线圈的中心。由前面分析可知,当线圈的 s 和 n 均匀时,被测导体位置的改变不会影响到线圈的输出量。但在实际绕制中,由于工艺等的影响, s 和 n 很难保持均匀,一次导体位置的变化就会对输出有一定的影响。图 4 及式(7)亦可等效于电流 i 在线圈内但不在线圈中心的情况。由式(7)可见:被测导体不在线圈中心对测量输

出是有影响的。因此,在绕制时要尽量保证 s 和 n 的均匀,并且要保证被测导体尽量位于线圈正中心,和线圈有很好的同轴度。

5 设计原则

从以上对传感头的分析可知,要使其输出达到一定的精度(一般为 0.2 % 级),传感头的设计要遵循以下设计原则:

a. 线圈截面积远小于封闭线圈所形成回路的面积,绕线匝垂直于线圈轴线并在骨架上均匀紧绕密绕,绕线不可太细,以免折断;

b. 骨架需要精加工,保证截面面积均匀,对其作适当处理,以使其热胀冷缩尽量不要影响线圈的尺寸和均匀度,选择热膨胀系数小的材料做骨架,并且其截面一般做成矩形;

c. 利用绕制方法和骨架的设计,使互感系数 M 足够大,使当测量电流较小时,线圈提供的信号超过可能的干扰电平;

d. 加电磁屏蔽层和绕制回线以减小外界电磁干扰的影响;

e. 为解决积分器的运放漂移问题,选择输入失调电压小的高性能运放,也可以采用数字积分技术代替模拟积分器。

6 实验性能

本文设计的 Rogowski 线圈,骨架采用环氧树脂材料,尺寸为外径 110 mm、内径 90 mm、高 20 mm,匝数为 1 440 匝。导线采用线径为 0.2 mm 漆包铜线。回线采用了特殊的等效中心回线的方法,测量效果较好。

本文并做了有回线 and 无回线传感头的线性度试验比较。

图 6 为本文设计的 Rogowski 线圈输出电流、电压关系曲线图,从图可见,其输出线性度良好。

图 7 为有回线和无回线的情况下,Rogowski 线圈输出的线性度比较,可见,有回线时其线性度较无回线时好,特别是在被测电流较小时,无回线的线性输出明显较差,说明回线可以有效地减小外磁场的影响。

图 8 是 Rogowski 线

圈的输出比差,从图中可以看出,其误差控制在 0.2 % 以内,达到了较好的精度。

7 结语

本文根据理论分析设计了一种基于 Rogowski 线圈的电流采样传感头。对其制作和选材作了一定的说明,并指出影响其输出效果的各种因素,给出相应的解决方法。对其误差作了相应的分析,最后对所设计的线圈进行了测试,得到较满意的效果,可达到 0.2 % 级的要求。

参考文献:

- [1] 胡娟,吴桂清,周有庆. 不同电压等级下的 Rogowski 线圈电子式电流互感器的研究[J]. 变压器,2002(10):13-15.
HU Juan,WU Gui-qing,ZHOU You-qing. Research on Rogowski coil electric current transformer at different voltage level[J]. Transformer,2002(10):13-15.
- [2] 申烛,罗承沐. 电子式电流互感器的新进展[J]. 电力系统自动化,2001,25(22):59-63.
SHEN Zhu,LUO Cheng-mu. Development of electronic current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(22):59-63.
- [3] Fiber Optic Sensors Working Group. Optical current transducers for power systems;a review[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1994,9(4):1778-1788.
- [4] KACZKOWSKI A,KNOTH W. Combined sensors for current and voltage are ready for application in GIS[C]//International Conference on Large High Voltage Electric Systems,CIGRE'98. Paris:CIGRE,1998:102-106.
- [5] MAFFETONE T D,MC CLELLAND T M. 345 kV substation optical current measurement system[J]. IEEE Transaction on Power Delivery,1991,6(4):1430-1437.
- [6] 柴雄良,陈邦栋. 新型光电混合式电流互感器设计[J]. 激光技术,2003(5):390-395.
CHAI Xiong-liang,CHEN Bang-dong. Design of a novel electro optical hybrid current transducer[J]. Laser Technology,2003(5):390-395.
- [7] 乔峨,黄仁山. 光电式电流互感器的现状和发展[J]. 高压电器,2001(4):43-45.
QIAO E,HUANG Ren-shan. Recent development of optical current transformer[J]. High Voltage Apparatus,2001(4):43-45.
- [8] RADUN A. An alternative low-cost current-sensing scheme for high-current power electronics circuit[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics,1995,42(1):78-84.
- [9] WARD D F,EXON J L T. Using Rogowski coils for transient current measurements[J]. Engineering Science and Education Journal,1993,2(3):105-113.
- [10] 罗苏南,田朝勃,赵希才,等. 空心线圈电流互感器性能分析[J]. 中国电机工程学报,2004,24(3):108-113.
LUO Su-nan,TIAN Zhao-bo,ZHAO Xi-cai. Performance analysis of air-core current transformer[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(3):108-113.
- [11] 罗苏南,赵希才,田朝勃,等. 用于气体绝缘开关的新型空心线圈电流互感器[J]. 电力系统自动化,2003,27(21):82-85.
LUO Su-nan,ZHAO Xi-cai,TIAN Zhao-bo,et al. Research on a novel air-core coil current transformer for GIS [J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(21):82-85.

(责任编辑:柏英武)

(下转第 77 页 continued on page 77)

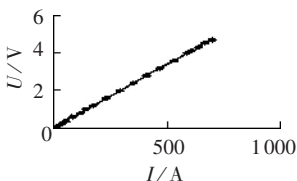


图 6 有放大电路的传感头线性度

Fig.6 The linearity of sensor head with amplifier

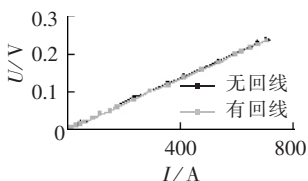


图 7 有无回线输出线性度对比

Fig.7 Linearity comparison between coils with and without loop-line

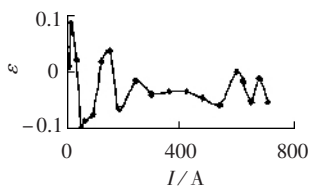


图 8 比差

Fig.8 Current error ratio

作者简介:

周均德(1976-),男,陕西澄县人,硕士研究生,研究方向为电力系统微机保护及变电站自动化(E-mail: zjd761024@sohu.com);

周有庆(1944-),男,河北故城人,教授,博士研究生导师,从事电力系统微机保护及变电站自动化方面的研究;

吴桂清(1967-),男,湖南常德人,讲师,博士研究生,从事电力系统微机保护及变电站自动化方面的研究;

彭红海(1972-),男,湖南怀化人,讲师,博士研究生,从事电力系统微机保护及变电站自动化方面的研究。

Design of Rogowski coil sensor head for hybrid optical current transducer

ZHOU Jun-de,ZHOU You-qing,WU Gui-qing, PENG Hong-hai
(Hunan University,Changsha 410082,China)

Abstract: To avoid shortcomings of conventional current transducers in insulation and saturation, the hybrid optical sensor head of a new type air core current transducer is presented. The Rogowski coil is winding uniformly and closely on a non-magnetic frame,being of easy insulation,non-saturation and large measuring range. Because of its sensing principle and structure,the air core coil is sensitively affected by the field magnetic disturbance and temperature. Anti-interference measures are taken and special materials and components are selected to solve problems. A prototype is made and the experiment result is analyzed. The performance is perfect,and the accuracy is within class 0.2 %.

Key words: optical current transformer; Rogowski coil; hybrid; sensor head