

新型 PCB 空心线圈电流互感器的设计与研究

彭春燕¹, 周有庆², 曹志辉², 龚伟²

(1. 广东电网公司韶关供电局, 广东 韶关 512025; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 为了进一步提高传统空心线圈的互感系数及其稳定性, 以获得高精度的测量结果, 提出一种新型 PCB 板空心线圈电流互感器。它具有全新的物理结构, 通过其自身采取的抗干扰措施能够有效的抵抗外界的电磁干扰; 并且, 经过简单的组合即能有效地提高其互感系数。分析了新型 PCB 板空心线圈电流互感器的传感原理及抗干扰机理, 给出了在不同电流级别下 PCB 空心线圈的结构以及一次导线的摆放特点, 并针对其中一种设计结构制作了实际模型, 进行了线性度与抗干扰能力测试, 结果表明: 额定电流为 100A 时, 其测量准确度达到了 0.2 级, 且具有较强的抵抗外界电磁场干扰的能力。

关键词: 印制电路板; 空心线圈; 电流互感器; 电磁干扰

中图分类号: TM933.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)05-0031-04

Design and Research on New PCB Air-Core Coil Current Transducer

PENG Chun-yan¹, ZHOU You-qing², CAO Zhi-hui², GONG wei²

(1. Shaoguan Branch of Guangdong Power Grid Company, Shaoguan 512025, China; 2. Electricity and Information Engineering College, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: To further improve mutual inductance and stability of conventional air-core coil, a new PCB air-core coil current transducer was proposed, to achieve high fidelity measurement. The new PCB air-core coil current transducer with completely new physical structure can efficiently repel outside electromagnetic interference by its special anti-interference ability, and can significantly improve transducer's mutual inductance by simple combination of PCBs. The basic inductive principle and anti-electromagnetic interference mechanism of the new transducer were analyzed; the PCB structure designs for different current levels and the location of primary coil were presented. A prototype of one design was made, and its linearity and anti-interference ability were tested. The experiment indicates that the accuracy of the PCB air-core coil current transducer can reach 0.2 class under the rated current of 100A with enhanced anti-electromagnetic interference ability.

Key words: printed circuit board; air-core coil; current transducer; electromagnetic interference

0 引言

在电力系统中, Rogowski 线圈已经应用于线路电流测量, 供计量和保护之用。与传统的电流互感器相比, Rogowski 线圈具有低功率输出、不存在磁饱和问题、测量线性度好、测量频带宽等优点, 成为电力系统中电流互感器发展的新方向^[1-7]。

为了获得高精度测量值, Rogowski 线圈制作时必须遵循以下原理: 线圈密度恒定; 骨架截面积恒定; 线圈横截面与中心线垂直^[8]。但是对于手工绕制的 Rogowski 线圈而言, 一般无法满足计量要求, 也

不适合批量生产, 印制电路板 (PCB) 的出现很好地解决了这个问题^[9, 10]。PCB 型 Rogowski 线圈制作简单方便, 绕线密集均匀, 可以做得非常精确, 即容易保证线圈密度的恒定, 但仍然很难保证线圈横截面与一次导线的位置不变, 从而有可能引起较大的测量误差。

为了进一步提高空心线圈的互感系数及其稳定性, 增强线圈的抗干扰能力, 提出了一种新型 PCB 空心线圈, 其一次导体与二次线圈紧贴或者一起印制在 PCB 板上, 两者处于同一平面上, 相对位置恒定, 且磁耦合更强; 二次线圈采用独特的螺旋绕线方式, 彼此补偿能有效抵抗外界磁场的干扰。

收稿日期: 2009-04-12; 修回日期: 2009-06-18

实用新型专利号: ZL 200620052695.2。

作者简介: 彭春燕 (1983), 女, 硕士研究生, 主要从事电子式互感器研究。

1 PCB 空心线圈的结构与原理

1.1 结构介绍

PCB 空心线圈的结构见图 1,单层 PCB 面板上正、反面均有四个绕向相同的均匀对称分布的平面螺旋线圈,正面与反面之间的螺旋线圈通过‘过孔’联接,首末两个端头作为信号输出端,构成二次线圈,见图 1(a)、(b)。一次导体紧贴或镶嵌在印制板上,围绕半数彼此不相邻的螺旋线圈构成环路,见图 1(c)。在 PCB 板上有两个补偿线圈和两个传感线圈,以抵消外界干扰磁场造成测量误差。图 1 中正面处于主对角线上的二次线圈为传感线圈,处于副对角线上的二次线圈为补偿线圈,传感线圈与补偿线圈反向串联,以保证在外界干扰磁场作用下整个二次线圈的输出电压为零。若在一次线圈输入端通入电流,此时传感线圈与补偿线圈的磁通方向相反,整个二次线圈产生的总电动势等于传感线圈电动势加上补偿线圈电动势。

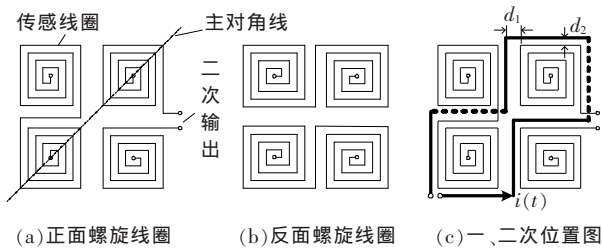


图 1 PCB 空心线圈结构图

1.2 传感原理

参见图 1(c),二次线圈与被测电流一次导体之间存在铰链磁链,只要被测电流发生变化,即所铰链的磁链变化,则每个螺旋线圈中就会产生一个与被测电流变化率相同的感应电动势,且电动势方向均相同,顺次串联而相互叠加,输出一个正比于被测电流变化率的电压信号 $e(t)$, $e(t)$ 为

$$e(t) = -M \frac{di}{dt} \tag{1}$$

由式(1)知,PCB 空心线圈输出的是一个微分信号,因此需对其进行积分以还原出被测电流。

1.3 抗干扰原理

以 PCB 空心线圈的一面传感线圈为例,分析其抵抗外界磁场干扰的机理,见图 2。

i_1, i_2, i_3 为附近干扰电流,与印制板处于同一平面,干扰电流 i_1 产生的交变磁场通过螺旋线圈 A、D 时,两螺旋线圈感应的电动势大小相等,方向相反,串接而相互抵消,线圈 B、C 感应的电动势也相互抵消;同理, i_2 产生的交变磁场通过螺旋线圈 A、B 时

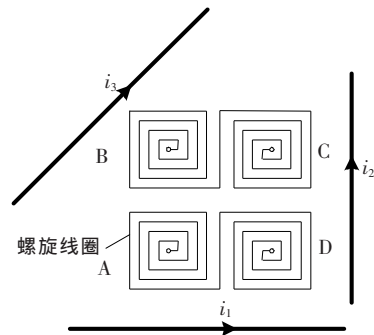


图 2 抗干扰分析图

串接而相互抵消,通过螺旋线圈 C、D 时串接而相互抵消; i_3 产生的交变磁场可视为一次导体 i_1, i_2 产生的交变磁场的叠加,因此, i_3 产生的交变磁场在 4 个螺旋线圈中无感应电动势输出。PCB 空心线圈基本也不受附近电流产生的干扰磁场的影响。

当远端干扰磁场穿过线圈时,螺旋线圈 A、D 感应的电动势大小相等、方向相反,串接而相互抵消,同样在螺旋线圈 B、C 中感应的电动势也相互抵消。因而,PCB 空心线圈基本不受远端磁场干扰的影响。

以上分析说明,PCB 空心线圈基本不受外磁场干扰的影响。

2 大电流情况下 PCB 空心线圈的结构设计

图 1 所示的 PCB 空心线圈一次导体紧密围绕半数不相邻的二次螺旋线圈,磁耦合强,且一次导体依次在 4 个二次螺旋线圈中产生的感应电动势方向相反,通过串接相互叠加,互感系数大,灵敏度高,可用于小电流的测量,尤其可作为电子式电能表和继电保护专用电流变换器。但如果应用于大电流测量,其印制的一次导线细小,且在 PCB 面板上长度过长,发热严重,必将影响到测量的安全性和准确性。为此可采用如图 3 所示的布局结构,其抗干扰原理与图 1 所示的 PCB 结构相似。在图 3(a)中,线圈 A'、D' 与线圈 B'、C' 组成两组反向串联的线圈;当外界存在干扰磁场时(图 3(a)中电流 i 产生的磁场),线圈 A'、D' 的感应电势与线圈 B'、C' 感应电势相互抵消。但当被测一次电流如图 3 中(c)、(d)的摆放时,线圈 B'、C' 输出的感应电势要比线圈 A'、D' 的感应电势大得多。因此,整个二次线圈可以输出一个正比于一次电流变化率的感应电压信号。

3 互感系数计算

以图 3(c)中的设计布局为例,设一次导体宽度为 D ,并具有一定厚度,其中线与所贴二次螺旋线圈中线重合,因此,其磁链效果可与图 4 等效。

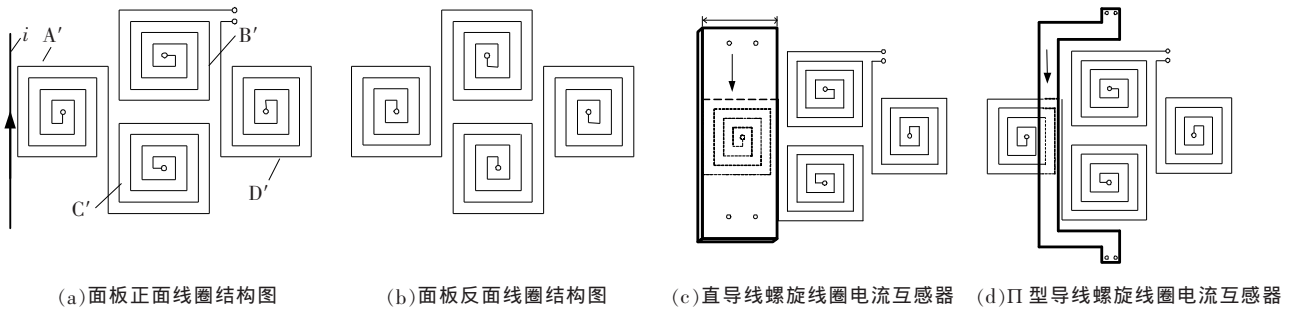


图3 测量大电流时 PCB 空心线圈结构图

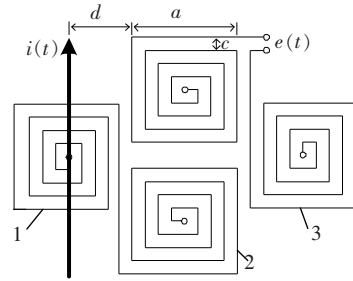


图4 大电流 PCB 空心线圈作用等效图

电流 $i(t)$ 处于螺旋线圈 1 的中线位置,因此,电流 $i(t)$ 在螺旋线圈 1 中感应的电动势为 0。

由文[8-10]可知,通有电流 $i(t)$ 的一次导体与螺旋线圈 2 的互感系数为

$$M = \int_d^{d+a} \frac{\mu_0}{2\pi x} \times a dx + \int_{d+c}^{d+a+c} \frac{\mu_0}{2\pi x} \times (a-2c) dx + \dots + \int_{d+(n-1)c}^{d+a-(n-1)c} \frac{\mu_0}{2\pi x} \times [a-2(n-1)c] dx \ln = \frac{\mu_0}{2\pi x} \sum_{k=1}^n [a-2(k-1)c] \frac{d+a-(k-1)c}{d+(k-1)c} \quad (2)$$

式(2)中, a, c, d 的物理意义见图 4, n 为单个螺旋线圈的匝数, μ_0 为真空磁导率。

令 $S(d)$ 和 $M(d)$ 分别为

$$S(d) = [a-2(k-1)c] \ln \frac{d+a-(k-1)c}{d+(k-1)c} \quad (3)$$

$$M(d) = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{k=1}^n S(d) \quad (4)$$

图 4 双层面板 (正、反面各 4 个螺旋线圈) 总的互感系数为

$$M_1 = 2 \times [2M(d) - M(d+a+c)] \quad (5)$$

为增大互感系数,可将多个双层面板顺次串联,则组合式线圈末端的感应电动势等于每个面板输出感应电动势的累加^[11]

$$M = nM_1 \quad (6)$$

假设每层线圈几何参数相同,故它们的自感 L 和 C 杂散电容和应满足

$$L = L_1 + L_2 + \dots + L_n = nL_1 \quad (7)$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} = \frac{C_n}{C_1} \quad (8)$$

代入固有频率计算公式,组合式线圈的固有频率 f 为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{nL_1 \frac{C_1}{C_n}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (9)$$

可见, n 层 PCB 面板组合以后的等效互感系数增加为原来的 n 倍,而固有频率不变。

4 准确度及抗干扰测试实验

用于测试实验的实际模型是根据图 1 所示的结构制作的。为改善互感器的抗干扰性,提高互感系数,将 PCB 空心线圈制作成多层板的 PCB 线圈,并集成积分放大电路,见图 5。将其设计成 8 层板三相 PCB 空心线圈电流互感器,上下两层均为覆铜片,两者通过孔连接接地,作为电磁屏蔽罩,中间 6 层印制二次传感线圈。每相的线圈参数如下:线圈层数 $N=6$,单个小螺旋线圈匝数 $n=13$,边长 $a=396 \text{ mil}$ ($1 \text{ mil}=0.0254 \text{ mm}$),印制线间隔 $c=12 \text{ mil}$,一次导体与二次线圈有两种间距 $d_1=60 \text{ mil}, d_2=42 \text{ mil}$ 。见图 1(c),将图中一次导线分解成多段直导线后,运用公式(4)可计算出单条直导线对单个螺旋线圈的互感系数,为简化计算,只考虑一次导体与它相邻的二次线圈之间的互感,可求得互感 M 为 $1.678 \times 10^{-6} \text{ H}$ 。当一次电流为 100 A 时,测得经积分放大后(10 倍)的二次

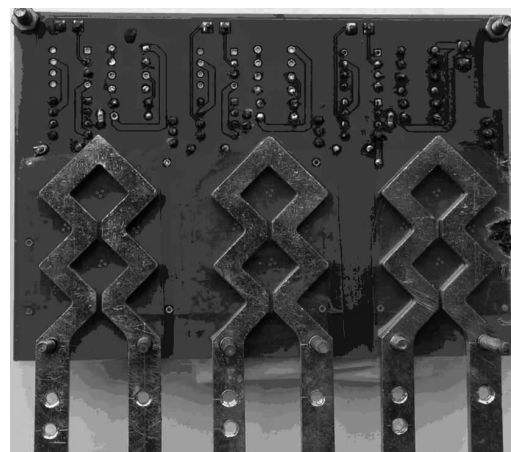


图5 多层 PCB 板实物模型图

输出电压为 0.51 V, 可得其实测互感为 1.62×10^{-6} H, 实测值与理论计算值相当接近。

表 1 实验数据

测点 (I/I_N)/%	比差/%	角差/(')	测点 (I/I_N)/%	比差/%	角差/(')
1	-0.38	14	50	0.05	5
10	0.21	10	100	0.02	5
20	-0.11	8	120	-0.05	5

将被测电流额定值定为 100 A, 对图 5 所示的电路板进行了测试, 其中一个通道的测量结果见表 1。试验结果表明, 当一次电流在额定值的 10%~120% 之间变化时可满足 0.2 级的要求。

外磁场干扰实验: 将通过额定电流的干扰导线置于实验模型附近, 相距为 0 时, 比差变化 0.15% 以内; 当距离大于 10 cm 时, 比差变化几乎为 0; 实验模型的三相同步通入测量电流, 感应电压不变, 相互间基本无影响。因此, PCB 空心线圈对外磁场干扰有较好的抵御效果。

5 结论

(1) 提出一种新型 PCB 空心线圈, 其互感系数大, 抗干扰能力强, 测量精度高。

(2) 对不同级别的电流分别提出了与之相对应的 PCB 空心线圈的结构, 以保证其测量精度。

(3) 对实际模型进行了测试实验, 结果表明: 在对小电流测量时, 其准确度达到了工程要求, 且有较

强的抗电磁干扰能力。

参考文献:

- [1] YU D C, CUMMINS J C, WANG Z D, et al. Correction of Current Transformer Distorted Secondary Currents Due to Saturation Using Artificial Neural Networks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 189-194.
- [2] ANDRZEJ K, WALTER K. Combined Sensors for Current and Voltage are Ready for Application in GIS [C]//CIGRE, Paris, France, 1998.
- [3] 袁季修, 盛和乐, 吴聚业. 保护用电流互感器应用指南[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [4] 李伟凯, 张慧哲, 郑绳植. 电子式互感器数字输出接口[J]. 仪表技术与传感器, 2005(11): 54-56.
- [5] 贾春荣, 邱志刚, 张庆凌, 等. 电子式电流互感器相位补偿设计[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 76-79.
- [6] 申 焯, 王士敏, 罗承沐. 一种电子式电流互感器的研制[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(18): 41-44.
- [7] 徐 雁, 朱明钧, 郭晓华, 等. 空心线圈作为保护用电流互感器的理论分析和试验 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(16): 52-55, 78.
- [8] 罗苏南, 田朝勃, 赵希才. 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.
- [9] 陈 庆, 李红斌, 张明明, 等. 3 种 Rogowski 线圈的设计及其性能分析[J]. 仪表技术及传感器, 2005(7): 54-55, 58.
- [10] 陈 庆, 李红斌, 张明明, 等. 采用主副印刷电路板构造的 Rogowski 线圈性能分析及设计 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 79-82.
- [11] 李红斌, 陈 庆, 张明明, 等. 一种基于印刷电路板的高准确度 Rogowski 线圈[J]. 高压技术, 2004, 30(4): 54-56.

(上接第 30 页)

处理中, 通过采用算术平均值和分批估计相结合的数据融合方法, 分别对交流情况和直流情况下电晕放电紫外测量结果进行了处理, 从不同方法所得的标准差可以看出, 通过数据融合方法可以得到比算术平均值更加可靠的测量结果, 而且该方法程序编写简单, 计算量小, 计算结果可靠性高, 适合于现场应用。

参考文献:

- [1] 迟殿林, 曾庆立. 用紫外成像检测电气设备外绝缘状况[J]. 东北电力技术, 2005, 26(1): 22-23.
- [2] 戴立波. 紫外成像技术在高压设备带电检测中的应用[J]. 电力系统及其自动化, 2003, 27(22): 97-98.
- [3] 朱德恒, 严 璋. 高压绝缘[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- [4] 蒋 焯. 紫外电晕检测仪在电晕放电检测中的应用[J]. 华东电力, 2004, 32(8): 34-35.
- [5] 滕鹤松. 紫外成像技术及其应用[J]. 光电子技术, 2001, 21(4):

294-297.

- [6] 靳贵平, 庞其昌. 紫外成像检测技术[J]. 光子学报, 2003, 32(3): 294-296.
- [7] 傅晨钊, 周建国, 肖 嵘, 等. 紫外电晕检测仪检测线路绝缘子的模拟试验[J]. 华东电力, 2005, 33(6): 50-53.
- [8] 王晓宏. 数据融合技术及其在电器试验数据采集中的应用[J]. 微计算机信息, 2004, 20(1): 46-47.
- [9] 陈坚红, 李 蔚, 盛仁德, 等. 一种火电机组在线性能计算中的数据融合方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 152-156.
- [10] 王冠凌, 凌有铸, 于世海, 等. 数据融合技术在消防车检测系统中的研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2008, 136(2): 82-84.
- [11] 崔雪英, 蔡振江, 肖志刚, 等. 基于数据融合的绝缘油击穿电压测试仪[J]. 电工技术, 2004(1): 70-72.
- [12] 李兰君, 喻寿益, 唐耀庚, 等. 数据融合在变压器油击穿电压测试仪中的应用[J]. 高压技术, 2008, 34(6): 1267-1269.
- [13] 黄德祥, 曹 建. 数据融合技术在电力设备在线监测系统数字滤波中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 31-33.
- [14] 夏卓君. 分布图法在疏失误差处理中的应用[J]. 实用测试技术, 2002, 28(2): 33-34.