

基于 PCB 平面型 Rogowski 线圈的电流互感器误差分析及积分器设计

纪 哲, 黄 纯, 周有庆, 王海浪, 卢小芬, 刘跃群

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 为了进一步提高印刷电路板(PCB)平面型 Rogowski 线圈电流互感器的测量精度, 根据 PCB 线圈的特点建立了线圈的等值电路; 推导出线圈二次感应电压和一次被测电流的关系式。从频率和温度两方面分析了线圈的误差特性, 指出线圈信号取样电阻(积分器输入电阻)阻值选择是影响线圈频率与温度特性的重要因素, 适当增大取样电阻阻值可改善线圈的频率特性, 并推导出了消除温度影响的阻值选择公式。分析了小电流测量时准确度不高的原因, 在原积分器低频段引入微分环节可减小其低频段的放大倍数, 从而抑制低频干扰。仿真与实验验证了改进的有效性。

关键词: 电流互感器; 平面型 Rogowski 线圈; 印刷电路板; 小电流测量; 误差分析; 积分器

中图分类号: TM 452

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2011)02-0076-03

0 引言

基于 Rogowski 线圈的电流互感器以其线性度好、无磁饱和、测量频率范围宽、动态范围大、结构简单等优点成为互感器研究的热点, 广泛应用于高压、大电流信号测量^[1-5]。在小电流信号的测量应用中, 其准确性难以提高, 究其原因在于 Rogowski 线圈采用非磁性骨架绕制, 互感系数很小, 用于检测小电流时, 线圈二次感应电动势很小, 影响了测量精度^[6-10]。文献[11]提出了一种印刷电路板(PCB)平面型 Rogowski 线圈(简称 PCB 线圈)的绕制方法, 推导出互感系数的计算公式, 论证了线圈的抗干扰能力, 并设计了用于 100 A 额定电流测量的积分器。实验表明, 在一次电流较大时, 测量精度、可靠性较高; 在微小电流测量时, 由于一次电流信号较小, 线圈感应电压信号信噪比小, 比值误差与相角误差随之增大。为提高基于 PCB 线圈的电流互感器的稳态精度, 有必要分析 PCB 线圈的误差特性, 针对其特性对积分器做进一步改进。

1 基于 PCB 线圈的电流互感器

1.1 PCB 线圈

线圈采用多层 PCB 板设计, 绕制方法如图 1 所示, 每层 PCB 上设有 4 个相同的平面螺旋线圈, 围绕同一中心均匀对称分布, 每层相邻的螺旋线圈顺次串联, 层与层之间的螺旋线圈通过过孔顺次串联, 首末 2 个端头作为输出端, 构成二次传感线圈, 如图 1

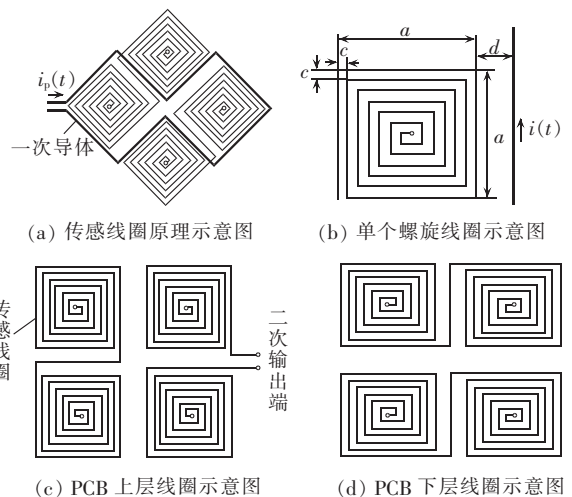


图 1 PCB 平面型 Rogowski 线圈的示意图

Fig.1 Sketch diagram of PCB planar Rogowski coil

(c)(d)所示; 一次导体紧贴或镶嵌在印制板上, 围绕每层半数彼此不相邻的螺旋线圈构成环路, 如图 1(a)所示。

一次电流 i_p 在二次线圈中产生的感应电动势 e_s 为

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

互感系数 M 值的计算方法参见文献[11]。

1.2 PCB 线圈等效电路

Rogowski 线圈的等效电路^[12]如图 2 所示。图中, L_c 为线圈自感, R_c 为线圈电阻, C_1 为线圈匝间电容, C_e 为线圈对地电容, R_0 为负载电阻。

平面型 Rogowski 线圈采用 PCB 设计, 其线圈间距只有 0.3048 mm, C_1 值较大。通过测量制作的 PCB 线圈参数得: $C_1 = 4.9 \mu\text{F}$, $C_e = 0.001 \mu\text{F}$, $L_c = 0.1 \mu\text{H}$, $R_c = 4.1 \Omega$, 可知 $R_c \gg j\omega L_c$, $1/(j\omega C_e) \gg R_0$, 故将等效电路简化为图 3 所示。图中, Z_c 为 C_1 和 R_c 的并联阻抗值。

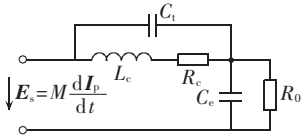


图 2 Rogowski 线圈等效电路
Fig.2 Equivalent circuit
of Rogowski coil

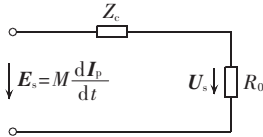


图 3 PCB 线圈等效电路
Fig.3 Equivalent circuit
of PCB coil

由图 3 得线圈输出电压:

$$U_s = j\omega M I_p \frac{1}{1 + Z_c/R_0} \quad (2)$$

定义 $\xi = Z_c/R_0$, 为线圈的频率误差系数, 代入式(2)得:

$$U_s = j\omega M I_p \frac{1}{1 + \xi} \quad (3)$$

若不考虑 ξ 的影响, 则 PCB 线圈实质上相当于一个微分环节, 要使输出电压还原为被测电流形状, 需后接一个积分还原电路。因此, 基于 PCB 线圈的电流互感器是 PCB 线圈与积分电路的集成。

2 误差分析

基于 PCB 线圈的电流互感器总误差为线圈误差和积分器误差之和。线圈误差是因线圈的结构设计不同、参数差别等引入的原理性误差; 积分器误差表现为积分漂移、积分泄漏等, 通过合理的积分器设计可有效减小。本文主要分析基于 PCB 线圈电流互感器的线圈误差。

2.1 误差频率特性分析

由式(3)知, ξ 对 U_s 的幅值与相角均有影响, 且其值与频率有关。因此, 要减小频率变化对线圈输出电压与一次电流微分关系的影响, 应尽可能减小 ξ 值。参数 R_c 、 C_c 为线圈参数, 由线圈设计尺寸和 PCB 材料决定, 不易改变, R_0 为线圈负载电阻, 即积分电路输入阻抗, 可增大积分器输入阻抗, 减小 ξ 。若要求工频下因 ξ 引入的误差小于 0.05%, 即 $1/(1+\xi) > 0.9995$, 求得 R_0 应大于 8.2 k Ω 。

2.2 误差温度特性分析

温度变化时, 由于 PCB 板材的热膨胀特性, 线圈尺寸将随温度发生改变, 从而使互感系数 M 值发生改变^[13-14]。由文献[11]知:

$$M = \frac{2N\mu_0 S}{\pi} \quad (4)$$

单层印刷线路所包围的有效面积:

$$S = a \ln[(d+a)/d] \quad (5)$$

其中, a 为外线圈宽度, d 为线圈与一次导线距离, 如图 1(b)所示。温度升高时, a 、 d 均随 PCB 膨胀而伸长。设 PCB 板材的温度膨胀系数为 α_B , 考虑温度变化的有效面积变为

$$S_T = a(1 + \alpha_B \Delta T) \ln \frac{(d+a)(1 + \alpha_B \Delta T)}{d(1 + \alpha_B \Delta T)} =$$

$$S_0(1 + \alpha_B \Delta T) \quad (6)$$

将式(6)代入式(4)得:

$$M_T = M_0(1 + \alpha_B \Delta T) \quad (7)$$

其中, M_0 、 S_0 分别为温度变化前的线圈互感系数和线圈有效面积。

由式(3)知, 线圈输出电压 U_s 除与互感系数有关, 还与 C_c 和 R_c 的并联阻抗 Z_c 值有关, 设温度变化时, Z_c 的温度变化系数为 α_Z , 则考虑温度变化有

$$Z_{cT} = Z_0(1 + \alpha_Z \Delta T) \quad (8)$$

将式(7)(8)代入式(2)可得考虑温度的线圈输出电压:

$$U_{sT} = j\omega M_0(1 + \alpha_B \Delta T) I_p \frac{R_0}{Z_0(1 + \alpha_Z \Delta T) + R_0} =$$

$$j\omega M_0 I_p \frac{R_0}{Z_0 + R_0} \frac{1 + \alpha_B \Delta T}{1 + (Z_0 \alpha_Z \Delta T) / (Z_0 + R_0)} \quad (9)$$

由式(9)知, 若调整积分器输入阻抗 R_0 值, 使 $\alpha_B = Z_0 \alpha_Z / (Z_0 + R_0)$ 成立, 则温度变化时, 线圈输出电压 U_s 将与温度变化量 ΔT 无关, 即不随温度变化, 因此合理选择 R_0 值, 可消除温度变化对稳态精度影响。

3 积分器改进

文献[11]对积分器的设计如图 4 所示。

实验数据显示, 该积分器在一次电流信号较小时误差较大, 分析原因, 主要是其对工频及谐波信号积分的同时对低频 ($f < 2$ Hz) 干扰信号放大, 在被测信号幅值较小时, 信噪比变小, 误差增大^[15]。为减小低频干扰信号的放大倍数, 改进积分器如图 5 所示。

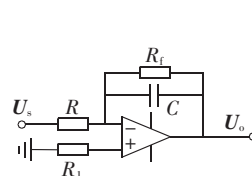


图 4 改进前积分电路
Fig.4 Original integrator

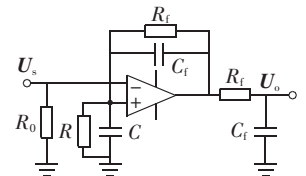


图 5 改进后积分电路
Fig.5 Improved integrator

改进后的积分器在反向端加入电阻 R_0 , 其即为积分器输入电阻。由式(2)知, R_0 值愈大, 线圈输出电压 U_s 与一次被测电流 I_p 的微分关系愈好。考虑 R_0 对线圈温度误差特性的影响, 取 $R_0 = 9.1$ k Ω 。

分析改进积分器的传递函数如下:

$$\frac{U_o}{U_s} = \frac{K(T_1 s + 1)}{(T_2 s + 1)^2} \quad (10)$$

$$K = \frac{R + R_f}{R}, \quad T_1 = \frac{R R_f (C + C_f)}{R + R_f}, \quad T_2 = R_f C_f$$

取 $R = 330$ k Ω , $C = 1$ μ F, $R_f = 1$ M Ω , $C_f = 0.047$ μ F, 改进积分器传递函数的伯德图如图 6 所示。

由图 6 可知, 改进后的积分器在低频段引入微分环节, 以此限制积分器对低频干扰信号的放大, 从而提高了积分器在小信号测量时的信噪比, 使互感器性能得以改善。

4 参数选择与实验

用于小电流 (< 15 A) 测量时, 一次导体印制在 PCB 上, 若测量较大电流可另设一次导体紧贴 PCB

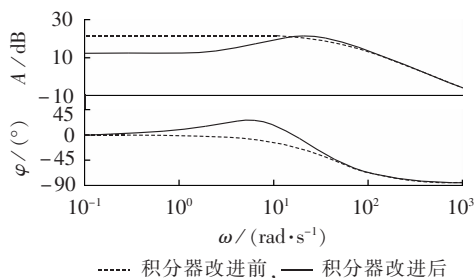


图 6 积分器传递函数伯德图

Fig.6 Bode diagram of integrator transfer function

上。实际电流互感器的制作采用 8 层板设计,上下 2 层覆铜并通过过孔连接接地,作为电磁屏蔽罩,中间 6 层印制二次传感线圈。

使用改进后的积分器测得实验数据,与改进前数据比较如图 7 所示(图中 r 为比值误差, θ 为相角误差, ΔI_p 为额定一次电流百分比)。为突出小信号测量优势,横轴采用对数坐标。

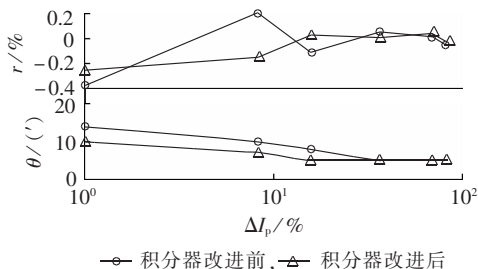


图 7 实验数据

Fig.7 Experimental data

5 结论

a. PCB 线圈的温度和频率误差与积分器输入电阻有很大关系;通过合理的设计可以消除温度影响。

b. 低频干扰是影响基于 PCB 线圈的电流互感器小电流测量准确度的重要因素,减小积分器的低频增益可抑制干扰信号。

c. 实验证明:合理的积分器设计可减小基于 PCB 线圈电流互感器的稳态误差,使精度达到 0.2 级。

参考文献:

- [1] WARD D A, EXON J L T. Experience with using Rogowski coils for transient measurements[C]//IEE Conference on Pulsed Power Technology. London, UK: IEE, 1992:611-614.
- [2] 郭椰艳,游大海. 新型电子式电流互感器测量精度分析[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(8): 27-29.
GUO Chenyan, YOU Dahai. Analysis of measurement precision of electronic current transducer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(8): 27-29.
- [3] 李伟,尹项根,陈德树,等. 基于 Rogowski 线圈的电子式电流互感器暂态特性研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(10): 34-37.
LI Wei, YIN Xianggen, CHEN Deshu, et al. Transient characteristics of Rogowski coil-based current sensor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(10): 34-37.
- [4] 周均德,周有庆,吴桂清,等. 混合式光电电流互感器中 Rogowski 线圈传感头设计[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(7): 72-74, 77.

- ZHOU Junde, ZHOU Youqing, WU Guiqing, et al. Design of Rogowski coil sensor head for hybrid optical current transducer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(7): 72-74, 77.
- [5] 赵永平,孙金玮,丁明理,等. 高压大电流坡印亭矢量原理功率变送器[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(23): 90-93.
ZHAO Yongping, SUN Jinwei, DING Mingli, et al. Poynting vector based transducer to measure high voltage and current in power transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(23): 90-93.
- [6] 徐雁,叶妙元,张庆,等. 光电互感器的应用及接口问题[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(24): 45-48.
XU Yan, YE Miaoyuan, ZHANG Qing, et al. The interface and supply of optic-electric transducer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(24): 45-48.
- [7] 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.
LUO Sunan, TIAN Chaobo, ZHAO Xicai. Performance analysis of air-core current transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 108-113.
- [8] RAY W F. The use of Rogowski coils for low amplitude current waveform measurement[C]//IEE Conference on Measurement Techniques for Power Electronics. London, UK: IEE, 1991: 1-5.
- [9] 刘艳峰,尚秋峰,周文昌. Rogowski 线圈典型外积分电路暂态性能比较与仿真[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(7): 30-33.
LIU Yanfeng, SHANG Qiufeng, ZHOU Wenchang. Comparison of Rogowski coil transient performance with typical outer integral circuits and its simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(7): 30-33.
- [10] 廖京生,郭晓华,朱明均,等. 用于小电流测量的 Rogowski 线圈电流互感器[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(2): 56-59.
LIAO Jingsheng, GUO Xiaohua, ZHU Mingjun, et al. Rogowski coil current transducer for low amplitude current measurement [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(2): 56-59.
- [11] 龚伟,周有庆,王嗣常,等. 一种测量小电流的 PCB 平面型 Rogowski 线圈[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(22): 79-82.
GONG Wei, ZHOU Youqing, WANG Sichang, et al. A planar Rogowski coil based on PCB for low current measurement [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(22): 79-82.
- [12] 曾中正. 实用脉冲功率技术引论[M]. 西安:陕西科学技术出版社, 2003: 161-164.
- [13] 张红岭,王海明,郑绳植. 热膨胀对 Rogowski 线圈测量准确度的影响[J]. 电工技术学报, 2007, 22(5): 18-23.
ZHANG Hongling, WANG Haiming, ZHENG Shengxuan. Analysis of the thermal expansion effect on measurement accuracy of Rogowski coils[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(5): 18-23.
- [14] 周文中,赵国生,李海洋. Rogowski 线圈测量误差分析及改进措施[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 99-103, 112.
ZHOU Wenzhong, ZHAO Guosheng, LI Haiyang. Error analysis and improved method of Rogowski coil[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 99-103, 112.
- [15] RAY W F, HEWSON C R. High performance Rogowski current transducers[C]//Industry Applications Conference of the IEEE. Rome, Italy: IEEE, 2000: 3083-3090.

(编辑: 李玲)

作者简介:

纪哲(1985-),男,山东莱芜人,硕士研究生,主要从事电子式互感器研究(E-mail: jxxxz2626@126.com);

(下转第 89 页 continued on page 89)

黄 纯(1966-),男,湖南沅江人,教授,博士,研究方向为电力系统自动化、电能质量分析与控制、信号处理在电气工程中的应用(E-mail:yellowpure@21cn.com);

周有庆(1944-),男,河北故城人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统微机保护与综合自动化研究(E-mail:zhouyouqing123@tom.com)。

Error analysis and integrator design for planar Rogowski coil current transformer based on PCB

JI Zhe,HUANG Chun,ZHOU Youqing,WANG Hailang,LU Xiaofen,LIU Yuequn

(College of Electrical and Information Engineering,Hunan University,Changsha 410082,China)

Abstract: In order to further improve the measurement accuracy of planar Rogowski coil current transformer based on PCB(Printed Circuit Board),the PCB coil equivalent circuit is set up and the relationship between its induced secondary voltage and measured primary current is derived. Its error characteristics are analyzed in the aspects of power frequency and temperature. It is pointed out that,the resistance of sampling resistor(input resistor of integrator) is an important factor affecting the frequency and temperature characteristics of coil. Appropriate increase of the resistance may improve the frequency characteristics of coil. The formula for selecting the resistance to completely eliminate the temperature error is derived. The low accuracy of small current measurement is analyzed and a differentiator is added to the low frequency band of original integrator to reduce its low frequency band magnification for low frequency interference suppression. Simulation and experiments verify the effectiveness of the design.

This work is Applied New Pattern Patent(200620052659.2) and Invention Patent(200610032482.4),and is supported by the Major Science and Technology Special Projects of Hunan Province(2009Fj1014).

Key words: current transformer; planar Rogowski coil; printed circuit board; small current measurement; error analysis; integrator