

文章编号: 1000-5013(2011)03-0276-04

一种微机保护电流传感器的设计及性能分析

卢小芬¹, 周有庆², 彭春燕², 刘乐群²

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021;

2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 对 Rogowski 空心线圈进行结构改进, 提出一种微机保护用新型电流传感器. 详细分析该传感器的基本结构与工作原理, 给出其稳态和暂态时输入输出关系. 模拟实验结果表明, 该传感器对外界干扰磁场和相邻相干扰磁场同样具有很好的抗干扰能力; 当 $(L_0, R_0) \ll R \ll R_f$ 时, 测量电流时的误差及相位移均可满足准确级的要求. 此外, 暂态特性分析表明, 输出电压能够准确反映输入的直流分量电流.

关键词: 电流传感器; 保护; 微机; 电力系统; Rogowski 空心线圈

中图分类号: TM 452.02; TM 772

文献标志码: A

目前, 电力系统广泛使用电磁式电流传感器进行微机保护, 即将电流互感器的二次电流变换成微处理器允许接收范围的小电压信号. 由于电力系统向大容量、超高压和特高压方向发展, 当电磁式电流变换器出现短路电流或存在非周期分量时, 易出现磁饱和现象, 此外, 通频带不够宽、剩磁等缺点也对电流互感器的暂态误差影响很大, 进而影响电力系统微机保护装置的性能^[1]. 近年来, 基于 Rogowski 空心线圈的电子式电流互感器在微机保护领域已得到逐步应用^[2-3], 但其结构大多复杂、抗干扰能力有限^[4]. 本文对 Rogowski 空心线圈结构^[5-6]进行改进, 提出一种应用于微机保护系统的新型结构电流传感器.

1 原理与结构

1.1 结构分析

新型电流传感器为两层结构, 一次导体采用一匝或多匝导线绕制, 二次导体采用平面螺旋线圈, 其结构原理如图 1 所示.

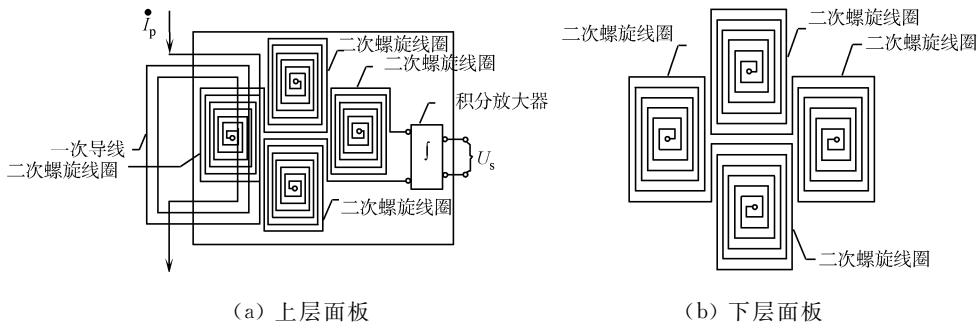


图 1 新型电流互感器结构图

Fig. 1 Structure of the new style electric current transducer

每层印制电路板(PCB)上均有 4 个相同形状的平面螺旋线圈, 可以将其设计成方形、圆形、椭圆形或其他形状并对称摆放, 将平面螺旋线圈的磁中心连线后应为等边四边形(正方形或菱形). 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, 首末端头作为二次电压的输出端.

收稿日期: 2010-05-23

通信作者: 卢小芬(1972-), 女, 副教授, 主要从事电力系统与自动化的研究. E-mail: lxf@hqu.edu.cn.

基金项目: 湖南省重大科技专项(05GK1002-1); 国务院侨办科研基金资助项目(09QQ01); 福建省泉州市科技重点项目(2009G7)

同理,PCB平面螺旋线圈可设计成偶数多层板,各层PCB的对应位置平面螺旋线圈要互相串联,4个多层平面螺旋线圈依次反极性串联输出二次电压;或者设计成双层板叠装成多层PCB,采用多个双层PCB输出二次电压端互相串联输出二次电压。

1.2 传感原理

二次线圈与被测电流一次导体之间存在交链磁链,只要被测电流 $i_p(t)$ 发生变化,即所交链的磁链发生变化,则每个螺旋线圈中就会产生与被测电流变化率有关的感应电动势,电动势方向均相同.电动势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 $e(t)$.由电磁感应定律,可得

$$e(t) = -M \frac{di_p(t)}{dt}. \quad (1)$$

式(1)中: M 为一次导体与二次螺旋线圈之间的互感系数.

不考虑二次螺旋线圈自身的结构参数,感应电压信号经积分放大后的输出电压为

$$u_s(t) = -\frac{1}{RC} \int e(t) dt = \frac{M}{RC} i_p(t) = \frac{i_p(t)}{K_{ra}}. \quad (2)$$

式(2)中: R, C 为积分电路的积分电阻与电容; K_{ra} 为电子式电流传感器一次电流输入与二次电压输出的额定变比, $K_{ra} = RC/M$. 参见图1可知,一次导体与4个二次螺旋线圈总的互感系数 $M = M_{1,2} + M_{1,3} + M_{1,4} - M_{1,5}$. 其中: $M_{1,2}, M_{1,3}, M_{1,4}, M_{1,5}$ 分别为一次导线与二次螺旋线圈2,3,4,5之间的互感系数.

2 性能分析

2.1 抗干扰性

实际应用中,传感器不仅能抗远端磁场(可视为均匀磁场)的干扰,还能抗附近或邻相电流带来的磁场干扰.从图1可知,PCB上4个二次螺旋线圈因结构参数完全一致且依次串接.当外界均匀磁场垂直作用于PCB上时,4个二次螺旋线圈的感应电动势大小相同,方向相反,通过依次串接最终抵消,使得外界干扰磁场在整个传感器中无响应输出.因此,该传感器对外界干扰磁场具有很好的抗干扰能力.

相邻相作用于传感器上的磁场即可视为均匀磁场或梯度磁场,若将其视为均匀磁场,易知相邻相作用在整个传感器中无响应输出;若将其视为梯度磁场,由线性原理可知,螺旋线圈2与螺旋线圈5的感应电动势之和等于螺旋线圈3与螺旋线圈4的感应电动势之和.又因为和感应电动势方向相反,顺次串联后传感器最终亦无响应输出.综上所述,该传感器对相邻相干扰磁场同样具有很好的抗干扰能力.

2.2 稳态工作性能

新型电流传感器的等效电路图,如图2所示.图2中: L_0 为空心线圈的自感; R_0 为空心线圈的内阻; C_0 为线圈杂散电容; M 为空心线圈的互感.测量工频电流时,空心线圈处在微分状态,通过它的输出端接积分器,可实现对输出电压的积分.为简化分析,忽略杂散电容的影响,由等效电路可得其传递函数为

$$H(s) = R_f M s / (R_f C s + 1)(L_0 s + R_0 + R). \quad (4)$$

将其转化为

$$s M I_p(s) = E(s) = U_s(s) (L_0 C s^2 + (r C + \frac{L_0}{R_f}) s + \frac{r}{R_f}). \quad (5)$$

式(5)中: $r = R_0 + R$. 式(5)的相量图,如图3所示.电流传感器测量电流时的误差 ϵ 及相位移 φ 为

$$\epsilon = (K_{ra} U_s - I_p) / I_p \approx \frac{\sqrt{R_0^2 (\omega L_0)^2}}{\sqrt{(R + R_0)^2 + (\omega L_0)^2}}, \quad (6)$$

$$\tan \varphi = \left[U_s L_0 C \omega^2 - U_s \frac{r}{R_f} \right] / \left[U_s (r C + \frac{L_0}{R_f}) \omega \right] \approx \frac{\omega L_0}{R}. \quad (7)$$

由式(6),(7)可知,当 $(L_0, R_0) \ll R \ll R_f$ 时,电子式电流互感器测量电流时的误差 ϵ 及相位移 φ 均可满足准确级的要求.

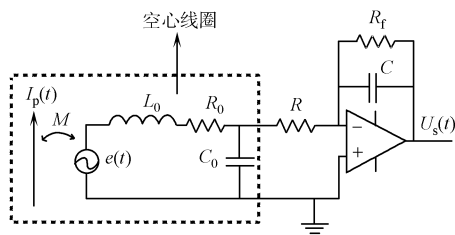


图2 新型电流传感器的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of the electric current transducer

2.3 暂态特性

电力系统正常运行的破坏大多是由短路故障引起的. 发生短路时,系统从一种状态剧变到别一种状态,并伴随产生复杂的暂态现象. 高压输电线路的暂态电流中通常包含基频分量、直流分量及高频分量,微机保护电流传感器对暂态电流的响应可视为它对各部分分量响应的叠加. 当系统发生三相短路时,考虑最严重情况,接入微机保护一次线圈的电流互感器的暂态电流假定为“全偏移”,其表达式为

$$i_p(t) = \sqrt{2} I_{psc} (-\cos \omega t + \exp(-t/T_p)) + i_{pres}(t). \tag{8}$$

式(8)中: I_{psc} 为一次电流对称分量方均根值; T_p 为暂态一次时间常数; $i_{pres}(t)$ 为一次剩余电流,包括谐波,分数谐波分量及一次直流电流. 根据式(4),当 $(L_0, R_0) \ll R \ll R_f$ 时,在工频电流分量 $i_{p,1}(t) = -\sqrt{2} I_{psc} \cos \omega t$ 作用下,传递函数可近似为 $|H(j\omega)| = M/RC$,则二次电压输出值为

$$u_{s,1} = -|H(j\omega)| \sqrt{2} I_{psc} (-\cos \omega t + \varphi). \tag{9}$$

式(9)中: φ 是相位差. 由于空心线圈测量电路具有较宽的通频带,此相移一般很小,并可通过后级的移相电路加以校正. 对直流分量 $i_{p,2}(t) = \sqrt{2} I_{psc} \exp(-t/T_p)$,其拉氏变换为 $I_{p,2}(s) = \sqrt{2} I_{psc} / (s + 1/T_p)$,则在直流分量作用下二次电压输出值为 $U_{s,2}(s) = H(s) I_{p,2}(s)$. 经拉氏逆变换,可得到输出电压为

$$u_{s,2}(t) = a_1 \exp(-t/T_1) + a_2 \exp(-t/T_2) + a_3 \exp(-t/T_p).$$

式中: $T_1 = \frac{L_0}{R_0 + R}$; $T_2 = R_f C$; $a_1 = \sqrt{2} M I_{psc} T_p / [L_0 / R_f - (R + R_0) C] (T_p - T_1)$; $a_2 = \sqrt{2} M I_{psc} T_p / [L_0 / R_f - (R + R_0) C] (T_2 - T_p)$; $a_3 = \sqrt{2} M I_{psc} R_f T_p / [(R + R_0) (T_2 - T_p) (T_p - T_1)]$.

二次输出电压包含 3 个分量,第 1 分量为衰减时间常数 T_1 的指数衰减分量,第 2 分量为衰减时间常数 T_2 的指数衰减分量,第 3 分量的衰减时间常数为 T_p 的指数衰减分量,与输入电流相同,是希望得到的输出. 由于 L_0 值一般很小,因此 T_1 值亦很小. 第 1 分量衰减的非常快,对输出电压的影响很小,可以将其忽略; T_p 为一次系统参数, T_2 为可设计参数,如满足 $T_2 \gg T_p$,则第 3 分量的衰减过程内,第 2 分量基本不变,使输出电压波形基本与第 3 分量波形一致,即接近于输入的电流波形.

当 $T_2 \gg T_p$,即 $R_f C \gg T_p$ 时,且 $R_0 \ll R \ll R_f$,第 2,3 分量系数分别为 $a_2 \approx \frac{T_p \sqrt{2} M I_{psc}}{R_f C RC}$, $a_3 \approx \frac{\sqrt{2} M I_{psc}}{RC}$;

第 2,3 分量对一次直流分量的灵敏系数分别为 $K_2 = |\frac{a_2}{\sqrt{2} I_{psc}}| = \frac{T_p M}{R_f C RC}$, $K_3 = |\frac{a_3}{\sqrt{2} I_{psc}}| = \frac{M}{RC}$.

综上所述,第 3 分量对输入的直流分量的灵敏度与工频分量的灵敏度相同. 当 $R_f \gg T_p$ 时, $K_2 \ll K_3$,即第 2 分量对输出电压的影响非常小,因此,输出电压能够准确反映输入的直流分量电流.

微机保护用空心线圈的电流传感器具有很宽的频带,理论上 $f_h = 1/2\pi \sqrt{L_0 C_0}$,频率在 1 MHz 以上. 因此,需考虑的高频分量均在通频带内,空心线圈传感器对高频分量的灵敏度系数也应为 M/RC ,能如实反映保护所需频率分量.

3 仿真实验

为验证新型微机保护电流传感器性能,设计并制作了样机,如图 4 所示. 该样机二次螺旋线圈由 3 块双层 PCB 面板分别串联而成,首端与末端作为感应电势的输出端与积分器相连. 单个二次螺旋线圈,其最外回绕线尺寸为 30,60 mm,由外向内逐回绕线,绕线宽度为 0.3 mm,绕线间空隙宽度为 0.3 mm,共线绕 20 回. 二次螺旋线圈中心部分留有的空白区域,使传感器在具有更大的灵敏度系数的同时减小传感器本身的结构参数值(如 R_0, L_0),因此具有更好的动态特性.

微机保护新型电流传感器一次线圈采用等安匝法模拟大电流,采用精密仪表测量积分器输出后的二次电压值. 图 5 为该新型电子式电流互感器线性度;图 6 为其输出电压与输入电流波形. 从图 6 中可看出,二次输出电压能很好地随一次电流线性变化,能满足微机保护装置对电流传感器的精度要求.

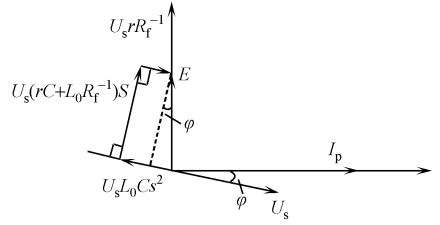


图 3 空心线圈的相量图

Fig. 3 Vector of the air coil

将通以大电流的干扰导线置于实验模型附近,相距为 0 cm 时,比差变化在 0.15% 以内;当距离大于 10 cm 时,比差变化几乎为零;实验模型的三相同时通入测量电流,感应电压不变,相互间基本无影响.因此,PCB 平面型 Rogowski 线圈对外磁场干扰有较好的抵御效果.

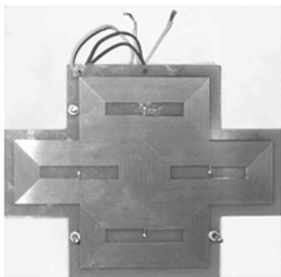


图 4 二次 PCB 平面螺旋线圈实物
Fig. 4 Model of the PCB coil

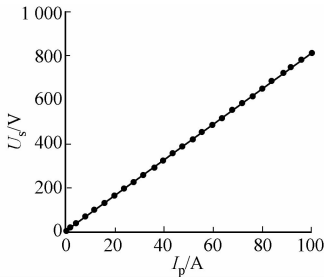


图 5 新型电流互感器的线性度
Fig. 5 Linearity of the new style electric current transducer

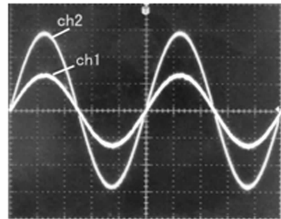


图 6 二次电压与一次电流波形图
Fig. 6 Waveform of primary current and secondary voltage

4 结束语

理论分析和实验结果表明,该传感器原理正确,具有结构简单、测量精度高、无铁心和磁饱和现象、频带宽、抗干扰能力强等特点,可以在现有微机保护和微机测控系统中替代常规电磁式电流传感器.

参考文献:

[1] 陈建玉,孟宪民,张振旗,等. 电流互感器饱和对继电保护影响分析和对策[J]. 电力系统自动化,2000,24(6):54-56.
[2] 李九虎,郑玉平,古世东,等. 电子式互感器在数字化变电站中的应用[J]. 电力系统自动化,2007,31(7):94-98.
[3] 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.
[4] 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.
[5] 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.
[6] 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]. 高电压技术,2004,30(4):54-56.

Design and Performance of a Novel Current Sensor for Microprocessor-Based Relay Protection

LU Xiao-fen¹, ZHOU You-qing²,
PENG Chun-yan³, LIU yue-qun⁴

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;
(2. Electricity and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: A novel electric current sensor (ECS) prototype for microprocessor-based relay protection was proposed in the paper. The prototype makes some improvement on the structure of the rogowski coil. Both the fundamental structure and the principle of the ECS was analyzed in detail, then the static and transient input-output relationship of the ECS was given also. Simulated results verify that, the ECS has the same anti-interference capability for the adjacent magnetic field as to the outside magnetic field, and the error and phase shift can meet the accuracy requirements during the current measuring when $(L_0, R_0) \ll R \ll R_f$. In addition, the transient characteristic analysis show that the output voltage can accurately reflect the input of the DC component current.

Keywords: current sensor; relay protection; microprocessor; power system; rogowski coil