

电子式电流互感器传感头的相位差研究

邱志刚^a, 张庆凌^b, 贾春荣^a, 侯国强^a, 金建国^a

(河北理工大学 a. 信息学院; b. 科研处, 河北 唐山 063009)

Phase Error Research of Electronic Current Transformer's Sensor

DI Zhi-gang^a, ZHANG Qing-ling^b, JIA Chun-rong^a, HOU Gou-qiang^a, JIN Jian-guo^a

(Hebei Polytechnic University, a College of Information; b. Research Department, Tangshan 063009, China)

摘要: 为了降低传感头的相位差,从传感元件 Rogowski 线圈及后续处理电路的特点出发,对线圈和后续电路所产生的相位差进行分析计算,在此基础上设计合理的相位补偿电路,并给出试验结果。结果表明,相位调理电路完全能够补偿传感头所产生的相位差,从而使电流互感器的精度达到国标 0.2 级标准。

关键词: 电流互感器; 传感头; Rogowski 线圈; 相位补偿
中图分类号: TM452.92 文献标志码: A

Abstract: Solving sensor's phase difference is essential for improving the precision of electronic current transformer. In order to reduce the sensor's phase difference, according to the characteristic of Rogowski coil and subsequent disposal circuit, this paper analyzed and calculated the phase difference of sensor. Then, reasonable circuit compensating the phase difference was designed. At last the test result was presented. The result indicates that the phase compensation circuit could compensate entirely the phase difference induced by sensor. So as to, the precision of current transformer could be improved to 0.2 level.

Key words: current transformer; sensor; Rogowski coil; phase compensation

0 引言

电流互感器是电力系统中进行电能计量和继电保护的重要设备,其精度及可靠性与电力系统的安全、可靠和经济运行密切相关。然而随着电力工业的发展,电力传输系统容量不断增加,传统的电磁式电流互感器暴露出一系列严重的缺点而不能满足电力系统的要求^[1]。与此同时,电子式电流互感器以其突出的优点脱颖而出^[2]。目前电子式电流互感器的传感头主要采用光纤、磁光材料及空心互感器(即

Rogowski 线圈)作为传感元件,笔者设计的电流互感器采用 Rogowski 线圈作为传感元件。

先对 Rogowski 线圈的测量原理及设计进行研究介绍,根据其输出信号的特点设计特定的后续处理电路,然后对线圈和后续电路带来的相位差进行分析推导,并给出试验数据。

1 Rogowski 线圈测量原理

Rogowski 线圈在电力系统早已用来测量电流,与传统电流互感器相比,它具有以下突出优点^[3]: ①线性度好; ②测量精度高,精度可设计到高于 0.1%,一般为 1%~3%; ③测量范围宽,由于 Rogowski 线圈没有铁心饱和,同样的线圈可以用来测量的电流范围可以由几安培到几千安培; ④频率范围宽,可设计到 0.1 Hz~1 MHz,特殊的可设计到 200 MHz; ⑤可以测量其它技术不能使用的受限制领域的小电流。

正是因为以上优点,笔者所研究的电子式电流互感器采用 Rogowski 线圈做传感元件,同时,为了实际需要,专门设计了用于小电流测量的高精度 Rogowski 线圈^[4]。

Rogowski 线圈测量原理体现在:当电流 $I(t)$ 流过初级绕线时,在次级线圈的感应电势 $e(t)$ 为

$$e(t) = -\frac{\mu N_1 N_2 h}{2} \ln \frac{R_o}{R_i} \frac{dI(t)}{dt} \quad (1)$$

式(1)中 R_i 为骨架内径; R_o 为骨架外径; h 为骨架高度; N_1 、 N_2 为线圈初级、次级匝数。

由此可见,传感头的输出信号是被测电流的微分,因此在后续电路中必须加入积分器将微分信号还原。此外,为了滤除高频干扰,在后续电路需要引

收稿日期: 2007-03-16; 修回日期: 2007-05-11

基金项目: 河北省科技攻关计划项目(062035161D-1); 河北省教育厅自然科学基金项目(2006427); 河北理工大学研究基金(z200724)。

作者简介: 邱志刚(1975-),男,讲师,硕士,从事光电子技术、光纤传感及测量等方面的教学与研究工作。

入低通滤波器。在传感头中的 Rogowski 线圈、积分电路和低通滤波器都将引入相位差。下面就对各部分所引入相位差进行分析推导。

2 Rogowski 线圈相位差分析

考虑分布参数 (Rogowski 线圈的等效电感 L_0 、电阻 R_0 和电容 C_0) 的影响, 线圈的输出电压 u_0 为

$$u_0 = E(t) \frac{1/(j\omega C_0)}{j\omega L_0 + R_0 + 1/(j\omega C_0)} = \frac{E(t)}{1 - \omega^2 L_0 C_0 - j\omega R_0 C_0} \quad (2)$$

对于一个确定的 Rogowski 线圈, 由式 (1) 可知, 感应电势和一次电流呈微分关系, 输出电压与一次电流之间有一定的相位差, 而且此相位差会造成线圈的输出电压与一次电流不再是严格的微分关系, 由式 (2) 可知, 线圈带来的相位差 φ_1 为^[5]

$$\varphi_1 = -\arctan \frac{R_0 C_0 \omega}{1 - \omega^2 L_0 C_0} \quad (3)$$

式中 L_0 、 R_0 、 C_0 分别为 Rogowski 线圈的等效电感、电阻和电容。利用 L、R、C 测试仪测得线圈各参数值为: $R_0=50.7892 \Omega$, $L_0=989.36 \mu\text{H}$, $C_0=20 \text{ pF}$, 则根据式 (3) 可得, 当测量 50 Hz 工频信号时, 其相位差 $\varphi_1=1.17^\circ$

3 积分器的相位差分析

为了使线圈输出电压与一次电流成线性比例, 在处理电路中需加入积分电路。笔者采用的是有源惯性环节积分器, 其电路图见图 1。

此积分器的实际频率特性方程为

$$K_F(j\omega) = \frac{1}{(1 + \frac{j\omega}{\omega_0}) (1 + j\frac{\omega}{\omega_c})} \quad (4)$$

式 (4) 中: $\tau = R_1 C_1$ 为积分器的积分时间常数; K_0 为 $\omega=0$ 时的开环增益; $\omega_0 = 1/\tau$; $\omega_c = 1/(2R_2 C_2)$ 为相应极点的时间常数; f_0 为截止频率; 乘积 $K_0 \omega_0$ 为运算放大器的开环增益-带宽积。由此可得, 当输入为交流信号时, 由积分器所引入的相位差为

$$\varphi_2(\omega) = \arctan(\frac{1}{K_0 \omega \tau}) - \arctan(\frac{\omega}{\omega_c}) \quad (5)$$

取 $\tau = R_1 C_1 = 0.0047 \text{ s}$, 开环增益 $K_0 = 10^7$, $f_0 = 500 \text{ kHz}$, $\omega = 2\pi \times 50$, 则由积分器引入的相位误差 $\varphi_2 = 3.8794273 \times 10^{-6}^\circ$

4 滤波器的相位差分析

为了设计需要, 处理电路中需加入滤波器以滤除高频信号, 笔者采用二阶巴特沃斯低通滤波器来完成, 其电路图见图 2。

其传递函数为

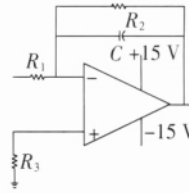


图1 积分电路

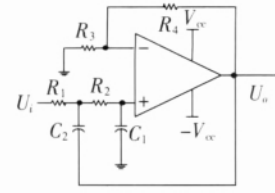


图2 滤波器电路

$$A(s) = \frac{A_{uf}}{1 + (3 - A_{uf})sRC + (sRC)^2} \quad (6)$$

式 (6) 中 $A_{uf} = 1 + R_3/R_4$ 为滤波器的增益, $R_1 = R_2 = R = 10 \text{ k}\Omega$, $C_1 = C_2 = C = 0.01 \mu\text{F}$, $R_3 = R_4 = 40 \text{ k}\Omega$, 则 $A_{uf} = 2$, $s = j\omega$ 。将这些参数代入传递函数, 可得

$$A(j\omega) = \frac{2}{1 + 1 \times 10^{-4}j\omega + 1 \times 10^{-8}j^2\omega^2} = \frac{2}{1 - 2 \times 10^{-8}\omega^2 + 1 \times 10^{-4}j\omega}$$

所以由滤波器引入的相位差

$$\varphi_3 = \arctan \frac{1 \times 10^{-4}\omega}{1 - 2 \times 10^{-8}\omega^2}$$

如果对 50 Hz 的工频电流信号进行测量时 $\omega = 2\pi \times 50$, 则 $\varphi_3 = \arctan 0.0315136 = 1.806^\circ$

5 相位补偿电路设计

由以上分析可知, Rogowski 线圈以及后续电路会引入一定的相位差, 而电子式电流互感器标准 IEC 60044-8 规定电子式电流互感器要有模拟输出接口, 这就要求对相位进行校正, 以达到国标的要求。目前对相位进行校正可采用全通滤波器^[6]、选频网络以及数字移相器^[7]等方案, 其调相都是在 $0 \sim 180^\circ$ 当调节度数在 90° 左右时, 很容易实现, 但在调节度数比较小的时候, 就很难实现。

在该课题中, 相位补偿环节主要用于补偿 Rogowski 线圈、积分环节、滤波环节带来的相位差, 由分析计算可知, 调节应该在 $2^\circ \sim 10^\circ$ 。传统方案均不适合要求。为了能够合理补偿电流互感器的相位差, 实现在很小的范围调节相位, 采用了两个一阶全通滤波电路串联的方案^[8], 并且采用高精度运算放大器 Max422 来构成调相电路, 电路图见图 3。

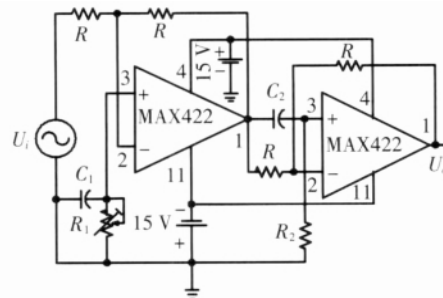


图3 相位补偿电路

将 R_1 换为可调电阻以实现对接位的调解。通过仿真, 调相结果最为理想时调相电路的幅频、相频仿真结果见图 4、5, 图中 R 为可调电阻 (下转第 353 页)

基值)。此故障将对双 12 脉动换流器中点对地的“M”避雷器形成最大应力。

(2)±800 kV 双换流器接线中阀避雷器的最大连续运行电压(MCOV)比±500 kV 单换流器接线的阀避雷器低,其参考电压也比单换流器避雷器的低。因此当最高电位换流变阀侧绕组发生单相接地故障时,双换流器接线中的阀避雷器将承受更大的能量应力,要求的并联柱数也更多。如果在直流线路过电压发生时发生上述故障,由于阀侧绕组对地电位高,最高电位的阀避雷器承受的应力可能明显高于其它阀避雷器,从而使前者要求的并联柱数更多。±500 kV 单换流器接线问题则不突出。

(3)最高电位换流变阀侧绕组的 MCOV 很高,一般要在最高电位阀侧绕组与地之间加装“ A_1 ”避雷器以降低换流变高压阀侧对地绝缘水平。已有的±500 kV 直流工程的单换流器换流站均不用加装该避雷器。

(4)±800 kV 换流站平波电抗器电感值较大,将其分为两台制作,分别置于极线及中性母线,有利于

降低换流器高压端接地故障时中性母线避雷器的应力,同时阻隔了从中性线侵入的雷电波。

4 结语

针对±800 kV 直流换流站每极 2 个 400 kV 12 脉动换流器串联的结构,推荐了±800 kV 避雷器的配置方案。同时选取典型工况,对整流站直流侧几个关键点可能出现的直流暂态过电压进行了简要模拟计算。通过计算分析并与 500 kV 单 12 脉动换流器接线作比较,总结了±800 kV 每极 2 个 400 kV 12 脉动换流器串联结构换流站的过电压保护特点。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑 (2005 年)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [2] 赵晓君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [3] IEC TS 60071-5 Insulation Co-ordination-part 5: Procedures for High-voltage Direct Current (HVDC) Converter Stations [M]. International Electrotechnical Commission, 2002.

(上接第 347 页)

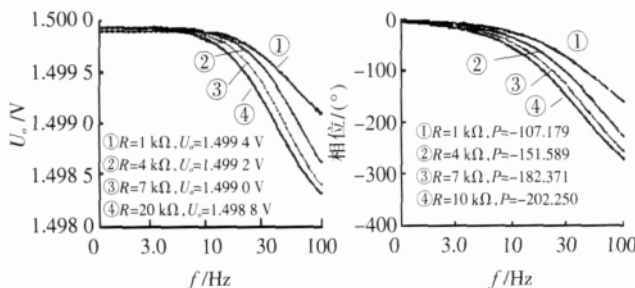


图 4 调相电路幅频响应

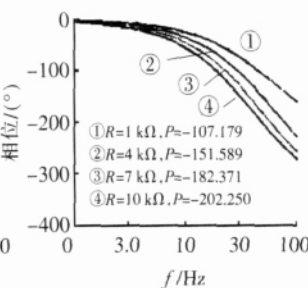


图 5 调相电路相频特性

阻阻值; P 为对应相位差。

由于实际选用的电阻值与理论值有误差,从图 5 中可以看出,全通滤波器的幅值稍微有些波动,但是足以满足对精度的要求。经过试验测试,可得在测量为 0~100 A 时的相位差结果见表 1。

表 1 相位差试验结果

I/A	/()	I/A	/()
0.25	32.4	5.0	11.1
1.00	16.5	6.0	11.3
3.00	13.2	100	22.6

由表 1 可知,在规定的测试范围内试验数据与理论值有一定的误差,这主要是因为试验环境及仪器设备所引起的。若采用更精准的设备,并且在干扰不很严重的情况下完全可以达到 0.2 级标准。

6 结语

通过对电子式电流互感器传感头部分的相位差研究,设计出相位补偿电路并给出 Pspice 仿真结果及试验结果。所研制的电流互感器的测量范围为 0~100 A,试验证明其精度可以达到 0.2 级要求。

参考文献:

- [1] 方志, 邱毓昌, 李双. 光纤电流互感器的发展[J]. 电力建设, 2002, 23(12): 42-45.
- [2] 乔娥, 安作平, 罗承沐, 等. 光电式电流互感器的开发与应用——21 世纪互感器技术展望 [J]. 变压器, 2000, 37(1): 40-43.
- [3] 郭晓华, 叶妙元, 徐雁, 等. 用于 110 kV 变压器的空心线圈电流传感器研究[J]. 高压电器, 2002, 38(3): 23-27.
- [4] 邱志刚, 贾春荣, 郑绳植. 用于小电流测量的高精度 Rogowski 线圈的研究与设计 [J]. 电气应用, 2005, 24(5): 62-65.
- [5] 田朝勃, 索南加乐, 罗苏南, 等. 应用于 GIS 保护及监测的罗氏线圈电子式电流互感器[J]. 中国电力, 2003, 36(10): 53-56.
- [6] 刘家芳, 刘霞忠. 混合式光电电流互感器相位补偿技术[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(5): 30-33.
- [7] 李红斌, 冯凯, 张艳, 等. 光学电流互感器相位误差的分析[J]. 高电压技术, 2004, 30(3): 15-16.
- [8] D E 约翰逊, J R 约翰逊, H P 穆尔. 有源滤波器精确设计手册[M]. 李国荣, 译. 北京: 电子工业出版社, 1984.