

混合式光电电流互感器相位补偿技术

刘家芳^{1,2}, 刘霞忠²

(1. 邵阳学院 电气信息工程学院, 湖南 邵阳 422004;

2. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 介绍了一种关于混合式光电电流互感器的相位补偿技术, 阐述了传感头 Rogowski 线圈的测量原理, 分析了积分相位补偿和时延相位补偿的工作机理和特性, 并给出了电路原理图, 实验测试结果证明了其有效性。

关键词: 混合式光电电流互感器; Rogowski 线圈; 相位补偿

中图分类号: TM 452

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)05-0030-04

混合式光电电流互感器作为一种过渡型的传光型电子式电流互感器, 运行稳定可靠, 已经取得了比较满意的测量结果, 目前已趋近实用化^[1]。本文介绍了笔者在研究混合式光电电流互感器中所采用的一种相位补偿方法, 包括积分相位补偿和由于信号传输处理等造成的时延相移补偿。对互感器而言是一个完整的相位补偿过程。

1 混合式光电电流互感器测量原理

混合式光电电流互感器采用 Rogowski 线圈 (RC) 做传感头, 在高压端利用 RC 线圈的优良特性感应出与被测电流成一定关系的信号, 然后经过一系列信号处理把信号经光纤传送到低压端, 用于测量和保护等。混合式光电电流互感器的测量原理主要是传感头 RC 线圈的测量原理, 下面简单介绍其测量原理。

RC 线圈由一环绕于非磁性材料上的导线组成, 用于电流测量主要基于安培环路定理和电磁感应定律。图 1 示出了一种 RC 线圈电流传感的原理结构。

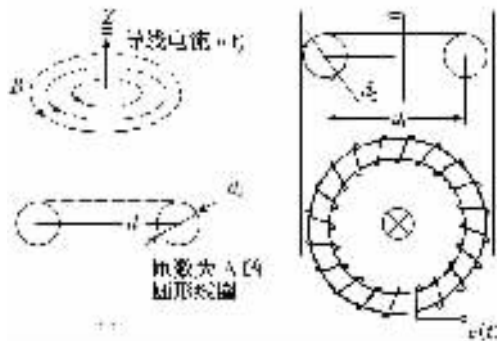


图 1 Rogowski 线圈测量原理图

Fig.1 The measuring principle diagram of Rogowski coil

考虑一个理想的线圈模型, 即假设在圆环截面积及线圈绕线均匀、导线直径、相邻线匝间距可忽

略, 当载流导线从线圈环心穿过, 可得出闭合线圈感应电势 $e(t)$ 与测量电流 $i(t)$ 之间的对应关系为^[2]

$$e(t) = -M \frac{di(t)}{dt} = -[\mu_0 N (d_1 - \sqrt{d_1^2 - d_2^2})] \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

式中 M 为线圈回路与一次导线回路之间的互感系数; N 为线圈总匝数; μ_0 为真空磁导率; $i(t)$ 为一次导线电流; d_1 为线圈的圆环直径; d_2 为线圈截面直径。

可见当 N, d_1, d_2 确定时, 该线圈输出电压仅依赖于测量电流对时间的微分 di/dt , 测量 i 只要对 e 进行积分即可。

2 积分相位补偿

2.1 积分相位补偿

从上一节可以知道, RC 线圈的输出信号为被测量信号的微分, 对于工频的余弦信号而言, 输出与测量信号间有一个 90° 的相移, 因此, 对线圈输出信号进行积分不仅是对信号还原, 而且也是一个相位补偿过程。因此, 在设计积分电路时, 应充分考虑积分电路的性能对测量的影响。笔者在研究在 RC 线圈后加一个如图 2 所示的有源积分电路。

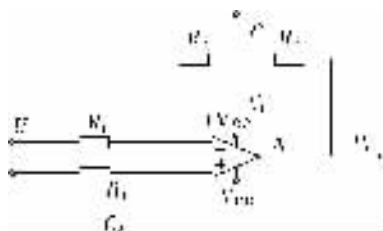


图 2 有源积分电路图

Fig.2 Circuitry of active integrator

由图 2 得积分传递函数为

$$G(s) = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{R_2 (C_1 R_2 s + 2)}{R_1 (R_2 C_1 s + 1)^2} \quad (2)$$

幅频特性和相频特性曲线如图 3 所示。

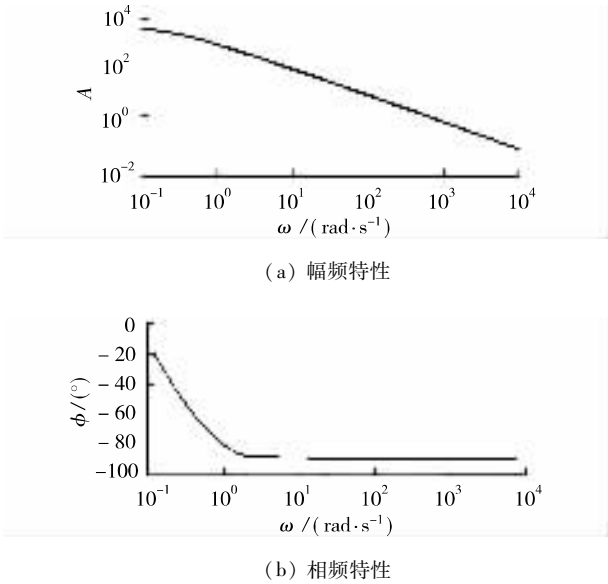


图 3 积分电路的幅频特性和相频特性曲线
Fig.3 Amplitude-frequency and phase-frequency curves of integrator

设待测电流为 $I(s)$, 线圈输出电压为 $E(s)$, 有 $E(s) = -M s I(s)$, 则线圈后接积分电路的线圈积分器组合传递函数为

$$H(s) = \frac{U_o(s)}{I(s)} = \frac{M s R_2 (C_1 R_2 s + 2)}{R_1 (R_2 C_1 s + 1)^2} \tag{3}$$

幅频和相频特性表达式为

$$\text{mag}(\omega) = \sqrt{\frac{M^2 R_2^2 \omega^2 (R_2^2 \omega^2 C_1^2 + 4)}{R_1^2 (R_2^2 C_1^2 \omega^2 + 1)^2}} \tag{4}$$

$$\text{phase}(\omega) = \arctan\left(-\frac{2 M R_2 \omega}{M R_2^2 C_1 \omega^2}\right) - \arctan\left(\frac{2 R_2 C_1 \omega}{1 - R_2^2 C_1^2 \omega^2}\right) \tag{5}$$

当 $R_2^2 C_1^2 \omega^2 \gg 1$ 时, 化简式 (5) 相位差可近似表示为

$$\arctan \frac{2}{R_2 \omega C_1 (3 + R_2^2 C_1^2 \omega^2)} = \frac{\sqrt{2} \omega_0^3}{2 \omega^3} \text{ (rad)} \tag{6}$$

式中 $\omega_0 = \sqrt{2}/(R_2 C_1)$, 通过求解 $d\text{mag}(\omega)/d\omega = 0$ 得到, 即线圈积分器有最大比值差时的角频率值。

由以上分析可见, 线圈积分器具有十分优良的幅频特性和相频特性, 相位差与信号频率的三次方成反比, 对于测量 50 Hz 工频信号, 假设要保证最大的相角差小于 1.5°, 只要取 $f_0 = 16 \text{ Hz}$, $\omega_0 = 2 \pi f_0 = 100.48 \text{ (rad/s)}$ 即可。

2.2 实验测试

实验中取积分电阻 $R_1 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 20 \text{ M}\Omega$, $C_1 = C_2 = 0.1 \text{ }\mu\text{F}$, RC 线圈输出信号经过积分器后的输出波形由数字示波器录制, 如图 4 所示。从图中可以看出, 积分器不仅很好地完成了积分加相移的

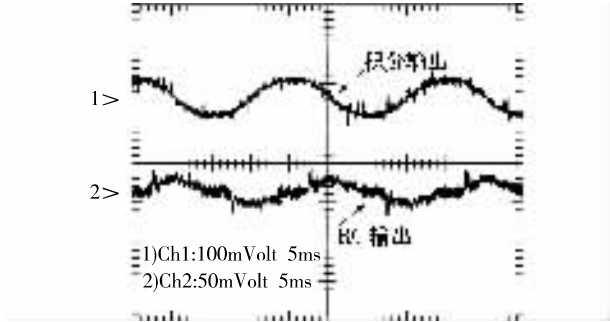


图 4 积分器实验测试波形
Fig.4 Experimental waveforms of integrator

功能、还原出了原信号, 还产生了超前相位, 这对后面的由于时延造成的相移补偿是有利的。图中的毛刺是由于 RC 线圈受到外界干扰引起的, 与积分器的性能无关。

3 时延造成的相移补偿

由于传统的电磁式互感器都是模拟输出, 为了使电子式电流互感器能和传统的系统兼容, 电子式电流互感器标准 IEC 60044-8 规定电子式电流互感器除了带有数字输出接口外, 还应该模拟输出接口^[3]。

设计的混合式光电电流互感器, 由于电路中存在传输延迟、信号处理、滤波等环节, 必然会产生相位移动, 对相位进行校正来达到规定的标准是电子式电流互感器模拟输出必备的环节。对这种相位的校正可采用滤波器、选频网络等方法, 最终的目的是改变获得信号的相位, 尽可能实现和被测量信号一致。笔者在设计中采用的是全通滤波器后加一级反向器的方法。

全通滤波器 (即移相滤波器) 由于理论上在全部频率范围内的幅频响应是一个常数, 可以用来对相位进行连续调节, 并且不会因为相位调节带来幅值的变化, 非常适合于相位调节。由于通常在设计混合式电流互感器时滤波器都采用二阶低通滤波器, 为了尽可能补偿低通滤波器带来的相移, 笔者选用典型的二阶全通滤波器实现本部分的相位调节。电路如图 5 所示。

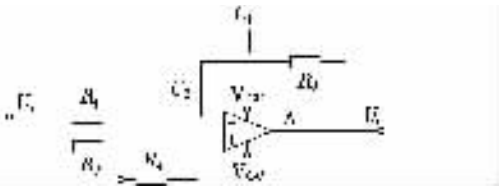


图 5 全通滤波器电路图
Fig.5 Circuitry of all-pass filter

选择 $C_1 = C_2 = C$, $R_3/R_4 = 4R_1/R_2$, 其传递函数为

$$H(s) = K_{f_0} \frac{s^2 - (\omega_0/Q)s + \omega_0^2}{s^2 + (\omega_0/Q)s + \omega_0^2} \tag{7}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{C \sqrt{R_2 R_1}}, \quad Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}$$

$$K_{f0} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} = \frac{Q^2}{1 + Q^2}$$

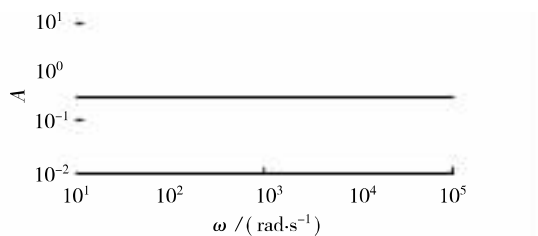
其幅频特性和相频特性表达式为

$$\text{mag}(\omega) = K_{f0} \quad (8)$$

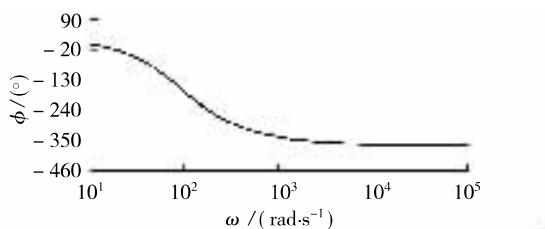
$$\text{phase}(\omega) = -2 \arctan \frac{(\omega_0/Q)\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} = -2 \arctan \left\{ 1 / \left[Q \left(\frac{\omega_0}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_0} \right) \right] \right\} \quad (9)$$

考虑到测量的是工频电流,而且全通滤波器在品质因素 $Q=1$ 时,在 ω_0 附近具有很好的灵敏度,而且线性度很好,所以本设计选择品质因素 $Q=1$,在 $\omega_0 = 104\pi$ 处相位移 -180° , $C_1 = C_2 = 0.1 \mu\text{F}$, $R_1 = 15.3 \text{ k}\Omega$, $R_3 = R_4 = 110 \text{ k}\Omega$, R_2 为 $150 \text{ k}\Omega$ 的可调精密电位器,当选择到 $R_2 = 61 \text{ k}\Omega$ 时滤波器具有很好的相位特性。

由式(9)可知全通滤波器在 50 Hz 的频率处有一个约 -170° 的相位,设计中在滤波器输出后接一级反相器,就可实现一个约 10° 的超前相位对时延相位差进行补偿。而且此全通滤波器可以通过调节不同的 R_2 值进行相位补偿调节。其幅频特性和相频特性如图 6 所示。



(a) 幅频特性



(b) 相频特性

图 6 全通滤波器的幅频特性和相频特性曲线

Fig.6 Amplitude - frequency and phase - frequency curves of all-pass filter

4 综合实验测试

前面介绍的 2 种相位补偿功能不同,在混合式电流互感器中的应用也不同。积分相位补偿应用在 RC 线圈输出之后,在系统的高压采样端;全通滤波相位补偿应用在系统的低压控制端的模拟输出部分。笔者对这两种补偿效果做了一个整体性的实验测试,从采样板上接入 90 Hz 的正弦信号,整个互感器测量电子线路输入和模拟输出用数字示波器录制波形如图 7、图 8 所示。从波形重合展开图 8 可以看

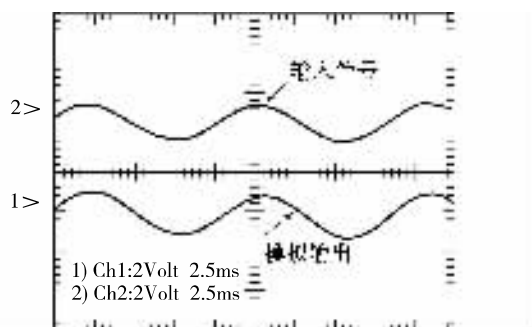


图 7 90 Hz 时系统输入 / 输出比较图

Fig.7 Diagram of the comparison between input and output of system in 90 Hz

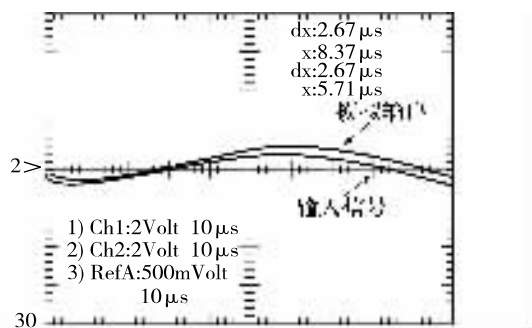


图 8 90 Hz 时系统输入 / 输出重合展开图

Fig.8 Outspread both input and output of system in 90 Hz

出在 90 Hz 时,系统滞后的时间约为 $6 \mu\text{s}$,约滞后为 0.194° 。经测试,此补偿方法在工频 50 Hz 左右能保证相位差在 0.3° 以内。可见,相位补偿器能很好地完成相位补偿作用。

5 结论

电子式电流互感器发展到今天,技术已日趋成熟,许多研制中的难点都已经找到相应的解决办法,相信不久的将来国内就会有成熟的产品面市^[7]。本文针对电子式电流互感器信号处理的要求,提出了一个完整的从积分相位补偿到信号传输时延相位补偿的方法,给出了电路原理图,分析了其性能,经过实验测试,结果表明了该方法的有效性,不失为一个有效的相位补偿方法。

参考文献:

- [1] Fiber Optic Sensors Working Group. Optical current transducers for power systems: A review[J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**, 1994, 9(4): 1778 - 1788.
- [2] 乔 卉,刘会金,王群峰,等. 基于 Rogowski 线圈传感的光电电流互感器的研究[J]. **继电器**, 2002, 30(7): 40 - 43.
QIAO Hui, LIU Hui-jin, WANG Qun-feng, et al. The research of optical current transducer based on Rogowski coil[J]. **Relay**, 2002, 30(7): 40 - 43.
- [3] IEC 60044 - 8, Electronic current transformers[S].
- [4] 王群峰,刘会金,陈允平. 混合式光电电流测量系统的研究[J]. **中国农村水利水电**, 2002, (12): 73 - 75.

- WANG Qun-feng, LIU Hui-jin, CHEN Yun-ping. Study of measurement system on hybrid optoelectronic current transformer[J]. **China Rural Water and Hydropower**, 2002, (12): 73-75.
- [5] 金涌涛, 刘会金, 熊玲玲. Rogowski 线圈频率特性分析及拓宽频率方法[J]. 电测与仪表, 2003, 40(9): 12-15.
JIN Yong-tao, LIU Hui-jin, XIONG Ling-ling. Analysis on the frequency characteristics of Rogowski coil and also means to broaden the bandwidth of frequency response[J]. **Electrical Measurement & Instrument**, 2003, 40(9): 12-15.
- [6] RAY W F, DAVIS R M. Wide bandwidth Rogowski current transducers. Part II: The integrator[J]. **European Power Electronics and Drivers Journal**, 1993, 3(2): 116-122.
- [7] 王少奎. 电子式电流互感器的发展现状及研制难点[J]. 变压器, 2003, 40(5): 20-25.
WANG Shao-kui. Development difficulty points and present situation of electronic current transformer[J]. **Transformer**, 2003, 40(5): 20-25.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

刘家芳(1965-), 男, 湖南隆回人, 讲师, 硕士研究生, 主要从事电力运行与控制方面的研究(E-mail: liu0806@tom.com);

刘霞忠(1979-), 男, 湖南澧县人, 硕士研究生, 主要从事电力系统自动化方面的研究(E-mail: strawtail@163.com)。

Phase compensation technique for hybrid optoelectronic current transformer

LIU Jia-fang^{1,2}, LIU Xia-zhong²

(1. Shaoyang University, Shaoyang 422004, China; 2. Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A phase compensation technique for hybrid optoelectronic current transformer is introduced. The measuring principle of Rogowski coil as the sensor head is also expounded. Two phase compensations are analyzed in their working mechanism and characteristics: integral phase compensation and time-delay phase compensation. Their circuitries are provided. The experiment results prove its validity.

Key words: hybrid optoelectronic current transformer; Rogowski coil; phase compensation

(上接第 29 页 continued from page 29)

- [2] 顾成戎. 锅炉水位、温度自动控制系统及运行经验[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(7): 92-93.
GU Shu-rong. Boiler automatic control system and its operational experience[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2004, 24(7): 92-93.
- [3] KHOSLA R, DILLON T. Learning knowledge and strategy of a neuro-expert system architecture in alarm processing[J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 1997, 12(4): 1610-1618.
- [4] LIN Chin-tend, LEE C S G. Neural-network-based fuzzy logic control and decision system[J]. **IEEE Trans. on Computers**, 1991, 40(12): 1320-1336.
- [5] SRINIVASAN D, TAN S S, CHENG C S, *et al.* Parallel neural network-fuzzy expert system strategy for short-term load forecasting: System implementation and performance evaluation[J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 1999, 14(3): 1100-1106.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

高岩(1967-), 男, 黑龙江富锦人, 副研究员, 博士, 从事热工系统智能控制研究(E-mail: yue_ye@163.com)。

Optimal control of boiler combustion system based on expert system

GAO Yan

(School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The furnace temperature can fleetly reflect the combustion thermal efficiency of coal and the temperature is highest when coal burns most sufficiently, based on which, a method with optimal air blowing quantity offered by expert system in accordance with different combustion conditions is proposed. The knowledge acquisition, as the bottleneck of expert system, is completed using an improved genetic algorithm optimization. To avoid air-blowing confusion during the random search of genetic algorithm, the optimization seeking is processed off-line and the optimal results are fed to expert system, with which expert system decides the optimal air blowing quantity. The system operations normally on site and enhances the heat efficient by 2.6%.

This project is supported by the Beijing Municipal Commission of Education Co-build Key Laboratory Foundation(SYS100070417).

Key words: boiler combustion; air blowing quantity; expert system; neural network; genetic algorithm