

# 基于积分器零漂的罗氏线圈电流互感器稳态采样误差

郭又华

( 国网四川省电力公司检修公司, 四川 成都 610041)

**摘要:** 由某运行的智能化变电站罗氏线圈电流互感器稳态采样值出现较大的直流误差的现象出发, 介绍了罗氏线圈电流互感器积分电路的基本原理和零漂引起积分漂移的机理, 推导了有损积分器的传递函数, 分析得出因积分器电路参数取值不当造成过大直流分量。在对积分电路参数进行调整后, 罗氏线圈电流互感器幅值误差和相角误差达到相关规范要求。

**关键词:** 罗氏线圈; 电流互感器; 积分器; 采样误差

**Abstract:** According to the relatively large DC error occurred in steady - state sampling value of Rogowski coil current transformer in a running smart substation , the basic principle of integrator circuit of Rogowski coil current transformer and the mechanism of integral drift caused by zero drift are introduced , the transfer function of lossy integrator is derived. It is obtained that the excessive DC component is caused by the improper value of the feedback resistance through the analysis. After adjusting the parameters of integrator circuit , the amplitude error and phase angle error of Rogowski coil current transformer meet the requirements of the relative regulations.

**Key words:** Rogowski coil; current transformer; integrator; sampling error

中图分类号: TM762 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2014)01 - 0081 - 03

## 0 引言

电子式互感器与传统互感器相比, 在绝缘性能、动态范围、抗干扰能力、抗饱和能力、体积、价格等方面具有较大的优势<sup>[1]</sup>, 受到研究人员的广泛关注。按其构成原理不同, 分为无源式与有源式。无源式电子电流互感器利用法拉第( Faraday) 磁光效应感应被测信号, 又称为磁光式互感器( MOTA); 有源式电子互感器利用电磁感应等原理感应被测信号, 对于电压互感器采用电阻、电容或电感分压等方式, 对于电流互感器采用罗氏( Rogowski) 线圈<sup>[1, 2]</sup>。

基于罗氏线圈的电子式电流互感器凭借其原理上的优势正在逐渐推广应用, 同时也出现一些新的问题。在某运行的智能化变电站, 主变压器低压侧保护用电流采集器上送波形显示: 主变压器空载时波形呈现一定的直流分量, 且双采样通道直流分量大小不一致, 最大瞬时值不超过额定电流的 4%; 在负荷状态下, 负荷分量叠加直流分量, 使波形发生偏移。采样值误差已威胁到主变压器的安全运行, 不得不停电检查。针对出现的稳态电流采样误差问题, 这里从罗氏线圈电流互感器工作原理、积分电路

参数选取的角度进行了讨论, 得出了积分器参数不合理导致积分漂移, 采样误差过大的结论。经过调整积分器电路参数解决了直流误差超标的现象, 为分析类似问题提供了一条新思路。

## 1 罗氏线圈互感器积分电路

为了方便论述, 还是需要简要介绍一下罗氏线圈互感器的工作原理。罗氏线圈是将导线均匀绕制在非磁性环形骨架上的空心线圈, 根据安培环路定律和电磁感应定律, 被测电流产生的磁场在线圈两端感应的电动势( 罗氏线圈输出电压) 正比于被测电流对时间的微分。因此罗氏线圈输出电压必须经过积分变换才能还原被测电流的值。

$$i(t) = -\frac{1}{M} \int_0^t E(t) dt \quad (1)$$

式中  $E(t)$  为罗氏线圈输出电压;  $i(t)$  为被测电流;  $M$  为线圈与载流导线之间互感<sup>[3-6]</sup>。

由于偏置电压是运算放大器的固有特性, 理想积分器很容易就达到饱和至电源电压而起不到积分效果。为解决该问题, 实际应用时最简单的办法是

在积分电容两端并联一负反馈电阻,构建 RC 耗能回路,这种积分器即有损积分器<sup>[7]</sup>。本案中使用的有损积分器电路和参数如图 1 所示。

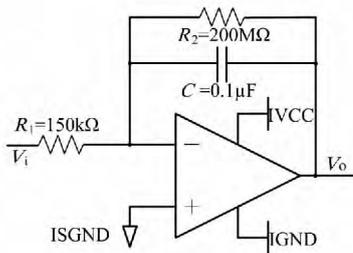


图 1 有损积分器电路和参数

由于构成积分器的实际元器件都不是理想元件,运放的偏移、电容的泄漏与损耗、运放及其他模拟器件的时漂和温漂造成 Q 点发生偏移等因素都会使积分器的输出产生漂移。表现为当输入电压为零时,输出电压偏离零值附近,即所谓零漂。

积分零漂是不可能完全消除的,但是可以通过一些方法减小零漂。包括从选材出发,选用温度稳定性高的电容元件、失调电压和失调电流较小的精密运放,采用技术手段在输入端对失调进行补偿或调零<sup>[8-9]</sup>,采用数字处理算法如 Hilbert 变换消除直流零漂<sup>[10]</sup>。除此之外,加大积分时间常数可以减小零漂<sup>[11]</sup>。可见对于已经定型的技术方案,合理配置积分器参数是减小零漂简单、有效的手段。

同模拟积分器相比,数字积分器中的模数转换器和运放驱动电路等模拟电路结构简单稳定,受温漂、时漂影响小,实现其积分器功能的算法则完全不受环境因素影响,具有一致性,并可以针对模拟电路的漂移进行有效的补偿。但由于本案采用的是硬件积分方案,因此数字积分器的优劣并不是这里需要论述的重点。

## 2 有损积分器的传递函数

如图 1 所示,根据放大器的“两虚”原则  $V_- = V_+ = 0$ ,流入放大器的电流等于零,则流过  $R_1$  的电流等于流过电容  $C$  和反馈电阻  $R_2$  的电流,所以

$$\begin{aligned} (\dot{V}_i - V_-) / R_1 &= (V_- - \dot{V}_0) / \left[ (R_2 / sC) / \left( R_2 + \frac{1}{sC} \right) \right] \\ &= (V_- - \dot{V}_0) / [R_2 / (1 + sCR_2)] \end{aligned}$$

则有

$$\dot{V}_i / R_1 = -\dot{V}_0 / [R_2 / (1 + sCR_2)] \quad (2)$$

于是有损积分器  $s$  域传递函数为

$$H(s) = \frac{\dot{V}_i}{\dot{V}_0} = -\frac{R_2 / R_1}{1 + sCR_2} \quad (3)$$

其频域传递函数为

$$H(j\omega) = \frac{R_2 / R_1}{1 + j\omega CR_2} = \frac{1}{R_1 / R_2 + j\omega CR_1} \quad (4)$$

其幅频特性可写成为

$$|H(\Omega)| = H_0 \cdot \frac{\Omega_0}{\sqrt{\Omega^2 + \Omega_0^2}} \quad (5)$$

由此相频特性写成为

$$\Phi(\Omega) = \arctan(\Omega / \Omega_0) \quad (6)$$

式(5)、(6)两式中  $\Omega = 2\pi f$  为输入电压的角频率,  $\Omega_0 = 1 / (R_2 C)$ ,  $H_0 = R_2 / R_1$ ,式(4)中令  $\omega = 0$ ,故有损积分器对直流分量的增益为

$$H(0) = R_2 / R_1 \quad (7)$$

而由于  $R_1$  远小于  $R_2$  ( $R_2$  通常为兆欧级),则式(4)中  $R_1 / R_2 \approx 0$ ,可将有损积分器传递函数简化为

$$H(\Omega) = \frac{1}{2\pi f CR_1} \quad (8)$$

若  $f$  为交流信号基波频率,则式(8)即为有损积分器对交流基波分量的增益。

## 3 误差分析

在罗氏线圈电流互感器运行一段时间后,由于模拟电路元件老化和温度的变化,积分器的失调电压也随之改变,且各运放的失调电压并不一致,且运放对交流和直流信号的传递函数是不一样的,这就导致运行一段时间后发生采样误差超标的现象。

国标 GB/T 20840.8 - 2007 要求保护用电子式电流互感器一次端子通过额定准确限值一次电流时,比差不超过百分之一,角差不超过 60'。

将图 1 所示积分器电路参数  $R_1$ 、 $R_2$  代入式(7),可得出该有损积分器直流分量增益约为 1 333。另将  $C$  与  $R_1$  代入式(8), $f$  取基波频率 50 Hz,可求出交流基波增益约等于 0.212。

对比直流增益和交流增益可见,积分器对直流分量太敏感,致使元件温漂通过积分器后,产生了非常大的直流增益,从而导致空载时最大出现 0.4In 左右的直流零漂。负荷状态下,采集器输出波形在正常稳态电流的基础上叠加了该直流分量,出现较大的采样误差。但因交流增益很小,只在波形上表

现出来很小的背景噪声。

处理零漂过大简单的方法就是通过适当降低反馈电阻  $R_2$  的值,减小积分器对直流分量的增益。将  $R_2$  从 200 MΩ 降低为 2 MΩ,其增益缩小 100 倍,零漂幅值下降到  $0.004I_n$  以下。由式(4)可知,参数  $R_2$  调整后对交流基波增益的影响基本可以忽略。

又将  $C=0.1 \mu\text{F}$ 、 $R_2=2 \text{ M}\Omega$ ,基波频率  $f$  取 50 MΩ,带入式(6),计算得出基波相位为  $89.09^\circ$ 。尽管依然满足国标,但角差已接近上限。考虑到互感器的综合误差可能大于单纯由积分器造成的角差,因此应适当调整电容的取值。现取  $C=1 \mu\text{F}$ ,计算得出的相位为  $89.91^\circ$ ,角差小于  $6'$ 。

按照新参数更换插件的电容、电阻元件后,实测结果满足要求。但是需要指出,模拟积分器的参数决定着其本身的性能。适当提高积分器的反馈电阻或者积分电容的参数可以改善积分器暂态响应性能。减少  $R_2$  是以降低积分器暂态响应特性为代价的。当参数配置不当,当系统故障时,可能对暂态电流的采样值带来更大的误差,暂态输出波形将严重失真,因此不能一味盲目降低  $R_2$  [5]。

## 4 结 论

罗氏线圈电流互感器相对于传统的电磁式互感器具有很多富有吸引力的优点,因此是技术发展的方向。但由于运算放大电路的固有特性,模拟积分器零漂是不可避免的,必需妥善应对处理,否则将影响采样的精度。

合理配置积分器参数是降低采样值零漂简单有效的方法之一。采用罗氏线圈配合具有良好参数的模拟积分器,不但在测量稳态电流时具有较高的精度,而且能比较真实地反映故障电流的暂态过程。

通过案例分析,发现并处理了某智能化变电站因罗氏线圈电流互感器积分器模拟电路参数选择不

当引起的稳态电流采样误差超标的问题,为分析处理使用电子式电流互感器的采样误差问题提供了一个可供参考的新思路。

### 参考文献

- [1] 李九虎,郑玉平,古世东,等. 电子式互感器在数字化变电站的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 94-98.
- [2] 姚翔,潘贞纯,高厚磊,等. 数字化变电站中电子互感器的应用现状研究[C]. 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十四届学术年会,北京: 中国农业大学, 2008: 1175-1178.
- [3] 龚勇镇. 罗氏线圈电流传感检测技术研究概况[J]. 广西轻工业, 2011(2): 54-56.
- [4] 毛安澜,叶国雄,吴士普, Rogowski 结构电子式电流互感器复合误差的检测方法[J]. 电测与仪表, 2011, 48(4): 30-35, 44.
- [5] 谢彬,尹项根,张哲. 基于 Rogowski 线圈的电子式电流互感器的积分器技术[J]. 继电器, 2007, 35(3): 45-50, 86.
- [6] 谢完成,戴瑜兴. 罗氏线圈电子式电流互感器的积分技术研究[J]. 电测与仪表, 2011, 48(5): 10-13.
- [7] 郭乐,申狄秋,卢家力. 电子式互感器积分方案的比较研究[J]. 电力系统自动化, 2010, 38(18): 111-114.
- [8] 胡思明. 一种减小积分零漂的方法[J]. 电子技术, 1996(2): 28-29.
- [9] 吴昭方. 积分器零漂的自动补偿[J]. 安庆师范学院学报: 自然科学版, 2008, 14(2): 28-30.
- [10] 刘彬,叶国雄,郭克勤,等. 基于 Rogowski 线圈的电子式电流互感器复合误差计算方法[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2391-2397.
- [11] 李沐荪. 跟踪式仪表积分器的设计问题[J]. 长春地质学院学报, 1979(4): 52-60.

作者简介:

郭文华(1979), 工程师,从事继电保护、电测仪表工作。

(收稿日期: 2013-08-01)

# 欢迎投稿 欢迎订阅