

Exploration of the Compensation Method of Open-Close Current Sensor

Shuhong Hu¹, Jiale Tian¹, Shun Li¹, Miaoli Lv¹, Di Tang¹, Wenjia Shi¹, Jinrong Wang¹, Junming Tang²

¹State Grid Zhejiang Electric Power Company Research Institute, Hangzhou Zhejiang

²Longshine Technology Co., Ltd., Wuxi Jiangsu

Email: hu_shu_hong@sina.com

Received: Apr. 6th, 2018; accepted: Apr. 20th, 2018; published: Apr. 27th, 2018

Abstract

This paper analyzes the error factors of open-close current sensor and presents three compensation methods, and the compensation schematic diagram is given. In addition, this paper introduces an adaptive compensation method based on control theory, which uses a two-stage sensor structure and introduces input and output feedback. The method implements the adaptive compensation by adjusting the gain ratio automatically after detecting the iron core working point. High precision and good linearity can be achieved in full range.

Keywords

Open-Close, Current Sensor, Compensation Method, Adaptive

开合式电流传感器的补偿方法探讨

胡书红¹, 田家乐¹, 李舜¹, 吕妙莉¹, 唐迪¹, 施文嘉¹, 汪金荣¹, 唐军明²

¹国网浙江省电力公司电力科学研究院, 浙江 杭州

²朗新科技股份有限公司, 江苏 无锡

Email: hu_shu_hong@sina.com

收稿日期: 2018年4月6日; 录用日期: 2018年4月20日; 发布日期: 2018年4月27日

摘要

本文在开合电流传感器等效电路模型的基础上分析了其误差影响因素, 并总结提出了三种原理性的补偿方法, 给出了相应的补偿原理图。同时, 本文介绍了一种基于控制理论的自适应补偿方法, 该方法是在

结合原理性补偿的基础上,选择了一种双级传感器结构,引入基于输出反馈的参考输入反馈,并能够通过检测铁芯当前工作点自动调整电路增益比例进行自适应补偿,在全量程内能够实现较高的精度和很好的线性度。

关键词

开合式, 电流传感器, 补偿方法, 自适应

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在电力系统中,开合式结构的电流传感器具有很好的应用前景,尤其是在要求不断电时对传感器进行现场校验的情形,它不仅能够很方便地进行在线安装;而且由于气隙的存在,其剩磁影响非常小,抗饱和能力也大大增强。

然而,由于铁芯开气隙后,其磁导率会显著下降,对开合式高精度电流传感器的研制变得很困难,并且目前在这方面的研究较少,仅在一些测量要求不高的领域有应用,如图 1,为江苏科兴电器有限公司申请的实用新型专利开启式高精度电流传感器,这种电流传感器不仅对机械加工工艺有很高的要求,而且应用上也有自身的局限性。在 John 发表的文献[1]中,设计了用于钳形电流表的开合式电流传感器,如图 2,采用了运放构成的有源补偿电路,但在全量程内存在线性不好的问题。

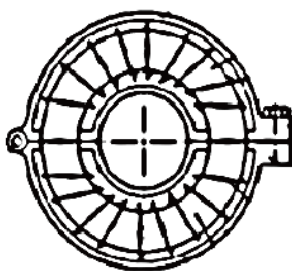


Figure 1. The high precision current sensor with open-type structure

图 1. 开启式高精度电流传感器结构

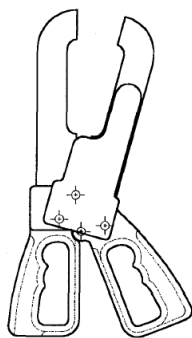


Figure 2. The clamp current sensor

图 2. 钳形电流传感器

本文正是针对开合式电流传感器的补偿方法进行研究，在对开合式电流传感器的误差分析基础上，总结了原理性的补偿方法，最后提出了引入控制理论的自适应补偿方法，能够实现较高的精度，并在全量程内具备较好的线性度，对开合式高精度电流传感器的研制有非常重要的指导意义。

2. 开合式电流传感器的误差分析

2.1. 开合式电流传感器的等效电路模型

电流传感器是电流信号的变换装置，是基于电磁感应原理而工作的。而对于开合式电流传感器，同样也是利用电磁感应原理进行工作，因此它仍可以用变压的 T 型等效电路来建立其等效电路模型。由于开合式电流传感器的涡流损耗非常小，同时为了分析方便，下面忽略开合式电流传感器的涡流损耗，并将其一次侧折算到二次侧，则开合式电流传感器的 T 型等效电路为(图 3)：

其中 Z'_1 为一次侧绕组的漏电感和内阻等效到二次侧的阻抗， Z_M 为激磁阻抗， Z_2 为二次侧绕组的漏电感和内阻构成的阻抗， Z_L 为负载阻抗。

2.2. 开合式电流传感器的误差分析

根据开合式电流传感器铁芯的磁动势平衡有，

$$n_1 i_1 - n_2 i_2 = n_2 i_0 \quad (1)$$

即，

$$i_0 = \frac{n_1}{n_2} i_1 - i_2 \quad (2)$$

其相量形式即为根据等效电路而列的节点方程，

$$\dot{I}_0 = \dot{I}'_1 - \dot{I}_2 \quad (3)$$

所以可以得到电流传感器的复数误差为，

$$\varepsilon = \frac{\dot{I}_0}{\dot{I}'_1} = \frac{Z_2 + Z_L}{Z_2 + Z_L + Z_M} = f + j\delta \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{\dot{I}_0}{\dot{I}'_1} = \frac{Z_2 + Z_L}{Z_2 + Z_L + Z_M} \quad (5)$$

其中，

$$Z_M = j\omega \frac{un_2^2 s}{l} \quad (6)$$

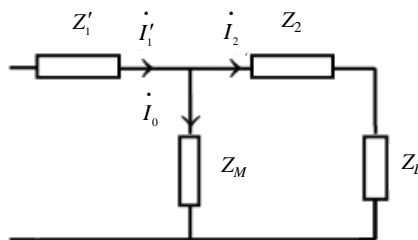


Figure 3. The equivalent circuit of open-close current sensor
图 3. 开合式电流传感器等效电路

根据上面的误差公式可知，为了降低电流传感器的误差，根本上是降低励磁电流。可以从优化开合式电流传感器的结构参数入手，如增加二次绕组匝数，增大铁芯截面积和减小磁路长度等。然而，为了进一步提高开合式电流传感器的精度，就必须考虑其它的补偿方法了。

从开合式电流传感器的等效电流可以看出，为了进一步对其补偿，可以从以下三方面思路展开：

- 1) 既然励磁电流是误差的来源，可以直接提取励磁电流，将其叠加到二次负载上，那么二次负载上的电流就没有误差；
- 2) 励磁电流是电流传感器工作的根本原因，并不能完全消除励磁电流，如果通过外部电路来提供励磁电流，那么等效电路中折算到二次侧的一次电流就会等于二次电流，二次电流将没有误差；
- 3) 为了降低开合式电流传感器的误差，可以通过降低激磁阻抗两端的电压来实现，那么在二次回路中提供一个适当的电动势，使激磁阻抗两端的电压基本上为零，也可以提高开合式电流传感器的精度。

3. 基于开合式电流传感器原理的补偿方法

3.1. 直接补偿二次电流

电流传感器是根据电磁感应原理工作的，而根据前面对开合式电流传感器的误差分析知道，励磁电流又是电流传感器误差的来源，所以并不能完全消除励磁电流。然而，如果能够将励磁电流提取出来[2][3]，并注入到二次负载中，那么在理论上可以实现零误差，这种方法就是直接对二次电流进行补偿，如下图4。

对于闭合铁芯的电流传感器，其激磁阻抗并不是一个定值，根本原因是闭合铁芯磁化特性的非线性影响。但是，对于开合式电流传感器，由于其气隙的存在，其磁化特性的线性度会变好。利用这一特性，取一个最小的气隙，在这个气隙下，其非线性影响不会使电流传感器的精度达不到设计期望。下面是直接补偿二次电流的原理图(图5)。

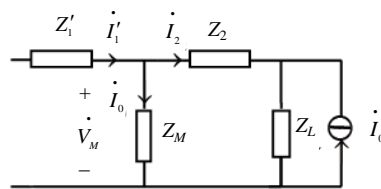


Figure 4. The schematic diagram of compensating secondary current
图4. 直接补偿二次电流原理图

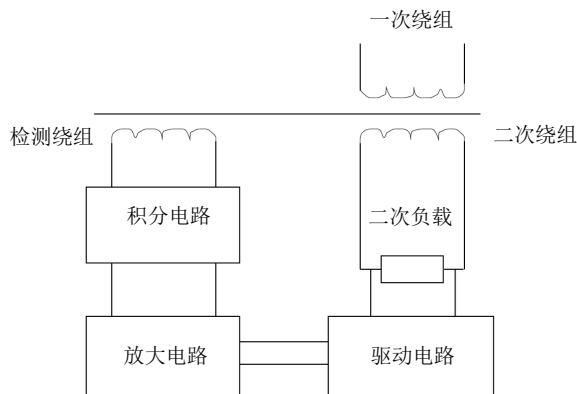


Figure 5. The structure of compensating secondary current
图5. 直接补偿二次电流结构

其工作原理为：当一次绕组中通有电流时，在二次负载中会形成二次电流，由于励磁电流的存在，在检测绕组中会感应电压，其感应电压与励磁电流满足如下关系。

$$u_{\text{感应电压}} = un \frac{s}{l} \frac{di_{\text{励磁电流}}}{dt} \quad (7)$$

其中， u 为铁芯的等效磁导率， n 为检测绕组匝数， s 为铁芯的截面积， l 为铁芯的平均路径长度。

所以通过积分电路可以得到与励磁电流成比例的信号，然后将该信号经放大处理，从而得到对应的误差电流，最后将这个误差电流通过驱动电路注入到二次负载中，实现直接补偿的目的。

3.2. 提供励磁电流的补偿方法

根据前面对开合式电流传感器的误差分析知，如果通过外部电路提供励磁电流[4]，从而减小一次电流提供的励磁电流，那么也可以达到很好补偿效果，实现较高的精度。下面就是提供励磁电流补偿的一个原理图(图 6)。

从原理图上可以看出，其采用了双级结构， T_1 作为辅助铁芯， T_2 作为主铁芯，当主铁芯上存在励磁电流时，即没有达到零磁通，那么就会在主铁芯的检测绕组上感应出电压，该感应电压通过信号调理电路的处理后得到与励磁电流成比例的电压，最后由跨导放大将这个比例电压转换成励磁电流注入到辅助铁芯的辅助绕组上，从而实现提供励磁电流的补偿。

3.3. 提供二次电动势的补偿方法

由前面的误差分析知，电流传感器的误差是由于励磁而损失的那部分电流产生的，而根据等效电路，励磁电流可表示为，

$$i_0 = \frac{\dot{V}_M}{Z_M} \quad (8)$$

并且，

$$\dot{V}_M = \dot{I}_2 (Z_2 + Z_M) \quad (9)$$

所以，为了提高开合式电流传感器的精度，可以降低激磁阻抗两端的电压 \dot{V}_M ，那么励磁电流就会变小，从而达到补偿的目的[5]。而为了降低激磁阻抗两端的电压 \dot{V}_M ，可以在二次回路中提供一个电动势 \dot{V}_C ，如下图 7，

使该电动势近似满足，

$$\dot{V}_C \approx \dot{I}_2 (Z_2 + Z_L) \quad (10)$$

那么，

$$\dot{V}_M \approx 0 \quad (11)$$

即使得励磁电流非常小，从而实现补偿的目的。

下面是一个提供二次电动势补偿的具体原理图(图 8)，

其中， T_2 为辅助铁芯，即为了提供二次电动势而引入的，选择适当的 Z_x 可以使 $\dot{V}_M \approx 0$ ，从而达到补偿的目的； T_1 为主铁芯，未被完全补偿的电动势将通过它提供。

根据原理图，有如下方程，

$$\dot{V}_M = \dot{I}_2 (Z_L + Z_x) - \dot{I}_3 Z_x \quad (12)$$

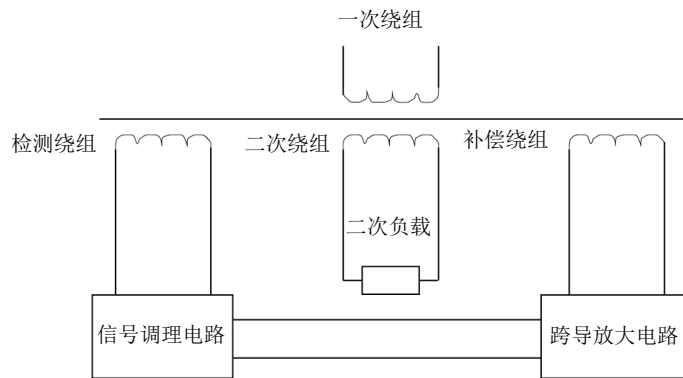


Figure 6. The structure of compensating excitation current
图 6. 提供励磁电流的补偿方法结构

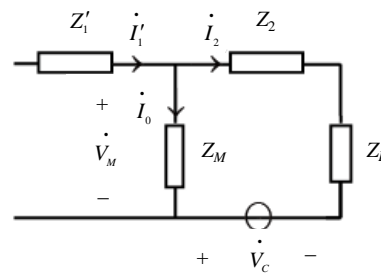


Figure 7. The schematic diagram of compensating secondary electromotive force
图 7. 提供二次电动势的补偿方法原理

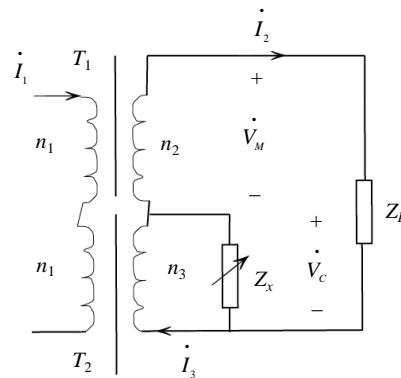


Figure 8. The structure of compensating secondary electromotive force
图 8. 提供二次电动势的补偿方法结构

又,

$$n_2 \dot{I}_2 \approx n_3 \dot{I}_3 \tag{13}$$

所以为了使 $\dot{V}_M \approx 0$, 可调节 Z_x , 使其基本上满足,

$$Z_x \approx \frac{n_3}{n_2 - n_3} Z_L \tag{14}$$

则可以达到补偿的目的。

4. 引入控制理论的自适应补偿

控制理论最基本的任务是对给定的被控制系统设计所能满足期望的性能的闭环控制系统，即寻找反馈控制规律。本文正是旨在为开合式高精度电流传感器的设计寻找有效的补偿方法而引入控制理论的反馈策略。

在控制理论中，状态反馈和输出反馈是控制系统设计的两种主要策略，而输出反馈又分状态微分反馈和参考输入反馈。在本文，对开合式电流传感器的补偿引入的是参考输入反馈策略。

4.1. 基于输出反馈的参考输入反馈原理

在控制系统的设计中，为了有效的地对一个被控对象 $G(s)$ 进行控制，常常运用参考输入反馈闭环系统，它不仅容易实现，而且一般能够得到满意的效果。这种系统的原理是把输出反馈系统的输出与参考输入对比，然后将误差信号送给控制器系统，最后作用于被控对象 $G(s)$ ，从而实现强有力的控制效果。这种系统的原理图一般为(图 9)：

根据结构图可知，对这种控制系统的设计，关键是设计输出反馈系统 $F(s)$ 和控制器系统 $K(s)$ 。

4.2. 在原理性补偿的基础上引入参考输入反馈的补偿方法

为了设计开合式高精度电流传感器，下面遵循如下设计思路：

- 1) 首先，运用原理性补偿将开合式电流传感器的误差降到一定范围；
- 2) 然后，对原理性补偿的开合式电流传感器引入参考输入反馈的补偿方法。

即把原理性补偿的开合式电流传感器作为被控对象，构建其输出反馈的闭环系统，进一步提高开合式电流传感器的精度。

本文选择了双级传感器结构[6] [7] [8] [9]，这种结构是基于提供二次电势的补偿方法而设计的，二次电势是通过一个辅助铁芯来实现的，即使辅助铁芯承担主磁通，从而使二次回路的电势基本上由辅助铁芯上的绕组来提供，最终使得主铁芯上的激磁阻抗两端的电压非常小，从而导致主铁芯上的励磁电流基本上为零。另外，在这种传感器结构上，很容易引入补偿设计，为进一步引入参考输入反馈的补偿提供了可能。其结构如下图(图 10)。

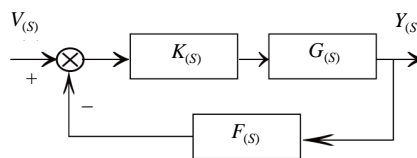


Figure 9. The schematic diagram based on Input and output feedback
图 9. 基于输出反馈的参考输入反馈原理图

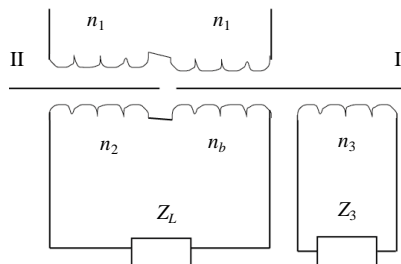


Figure 10. The two-stage sensor structure
图 10. 双级传感器结构

其中, n_1 为一次绕组, 分别绕在铁芯 I 和铁芯 II 上; n_2 、 n_b 为二次绕组, 分别绕在铁芯 II 和铁芯 I 上; n_3 为辅助绕组, 如果优化选择 n_b 、 n_3 和 Z_3 , 可以使铁芯 I 承担主磁通, 而使铁芯 II 中的磁通很小, 基本上为零磁通[10], 从而实现高精度开合式电流传感器。

下面是在提供二次电动势补偿的双级电流传感器结构的基础上引入参考输入反馈的补偿, 进一步提高开合式电流传感器的精度。为了将二次输出电流与一次电流进行比较, 得到误差信号, 只需在主铁芯 II 上添加一个检测绕组, 处理检测绕组的感应电压即可; 同时, 添加一个补偿绕组, 通过控制系统电路输出一个补偿电流到补偿绕组, 实现参考输入反馈。其原理图如下(图 11):

因为对铁芯 II 列磁动势平衡方程有:

$$n_1 i_0 = n_1 i_1 - n_2 i_2 \tag{15}$$

而检测绕组的感应电压为:

$$u_{\text{感应电压}} = u n_{\text{检测绕组}} n_1 \frac{s di_0}{l dt} \tag{16}$$

这样检测绕组上的感应电压就是输出信号与输入信号经比较后得到的误差信号, 将其送入控制器系统电路, 最后由控制器系统电路产生一个反馈电流作用于励磁回路中, 即通过在铁芯 I 中的补偿绕组注入一个与铁芯 II 中励磁误差电流相关联的反馈电流, 从而减小铁芯 II 中的误差励磁电流, 实现参考输入反馈的闭环补偿系统。

4.3. 引入控制理论的自适应补偿

由铁芯的磁化特性知, 铁芯在不同的励磁电流下, 其磁导率不同, 它们属于非线性关系, 励磁电流难以直接提取。本文结合铁芯的磁化特性, 通过检测励磁的大小判断铁芯的工作点, 自动调整电路的放大倍数来实现自适应补偿。结构图如下(图 12)。

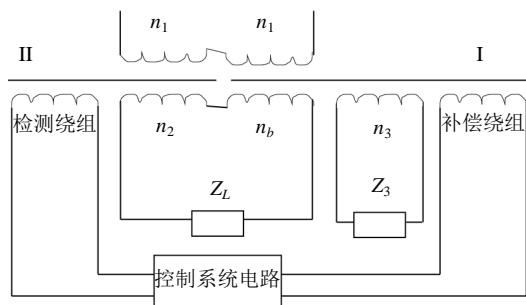


Figure 11. The structure based on Input and output feedback

图 11. 参考输入反馈结构

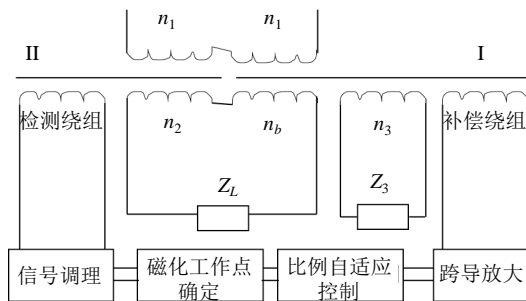


Figure 12. The daptive structure

图 12. 自适应补偿结构

该自适应补偿结构是在双级电流传感器的结构上增加了两个绕组和一个控制系统电路，控制系统电路包括信号调理功能块、磁化工作点确定功能块、比例自适应控制功能块和跨导放大功能块。各绕组和功能块的作用为：

检测绕组：检测绕组在铁芯 II 上，通过检测绕组上的感应电压可以提取电流传感器的误差电流。

信号调理功能块：对检测绕组上感应出的电压信号进行信号处理。

磁化工作点确定功能块：通过信号调理功能块处理后的误差信号，并结合铁芯的磁化特性曲线，确定铁芯此时工作时的磁导率。

比例自适应控制功能块：根据铁芯当前的磁导率对跨导放大功能块的比例增益进行自动控制，同时将反馈信号输出到跨导放大功能块。

跨导放大功能块：将反馈信号进行跨导放大输出到补偿绕组。

该自适应补偿结构是在原理性补偿的开合式电流传感器引入参考输入反馈的补偿，能够达到较高的精度，并且引入自适应控制，能够根据铁芯当前工作点自动调整反馈信号的增益，在全量程内能够实现很好的线性度。

5. 总结

本文分析了开合式电流传感器的误差影响因素，总结提出了三种原理性的补偿方法；同时，提出了一种基于输出反馈的参考输入反馈的双级补偿结构，该结构通过自动调整电路的放大倍数来达到自适应补偿的目的，为高精度开合式电流传感器的设计提供了有效的参考补偿方法。

参考文献

- [1] Ramboz, J.D. (1996) A Highly Accurate, Hand-Held Clamp-On Current Transformer. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **45**, 445-448. <https://doi.org/10.1109/19.492764>
- [2] 李群, 杨以涵, 李士琨. 电流传感器误差补偿装置的研制[J]. 电网技术, 1996(8): 38-40.
- [3] 李群, 杨以涵. 电流传感器的外部有源补偿方法[J]. 供用电, 1998(4): 20-21.
- [4] 李群, 黄伟, 杨以涵, 李蕾. 电流传感器有源补偿方法[J]. 华北电力技术, 1997(2): 25-26.
- [5] Slomovitz, D. and Santos, A. (2012) A Self-Calibrating Instrument Current Transformer. *Measurement*, **45**, 2213-2217. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.05.001>
- [6] Betts, P.J. (1983) Two-Stage Current Transformers in Differential Calibration Circuits. *IEE Proceedings A Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, Reviews*, **130**, 324-328. <https://doi.org/10.1049/ip-a-1.1983.0058>
- [7] 赵修民. 0.002 级双级电流传感器的研制[J]. 仪表技术, 1998(8): 12-14.
- [8] 赵修民. 升流双级电流传感器[J]. 变压器, 1979(3): 22-25.
- [9] 双级式 0.02 级标准电流传感器[J]. 电测与仪表, 1968(Z4): 19-24.
- [10] 刘君, 吴广宁, 周利军, 等. 零磁通传感器的研究[J]. 电力自动化设备, 2009(8): 67-70.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2331-0235，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：jsta@hanspub.org