

# 电子式电流互感器研究评述

郭志忠<sup>1,2</sup>

(1. 许继电力科学研究院, 北京 100085; 2 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 对 Rogowski 线圈电流互感器和光学电流互感器这两种主要的电子式电流互感器进行了基本的评述。在动态测量品质方面, 光学电流互感器优于 Rogowski 线圈电流互感器。两种电子式电流互感器都形成了实用化技术。电子式电流互感器对提高电网动态观测的准确性, 对提高继电保护的動作可靠性, 对于数字电力系统的建设都具有重要意义。

**关键词:** 电子式电流互感器; Faraday 电磁感应原理; Faraday 磁旋光效应原理; Rogowski 线圈

**中图分类号:** TM452 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)14-0011-04

## 0 引言

电子式互感器泛指电子化测量输出方式的电力系统互感器, 涵盖不同的测量原理、方法以及测量传输方式<sup>[1]</sup>。电子式电流互感器有两种传感原理: Faraday 电磁感应原理和 Faraday 磁旋光效应原理。属于 Faraday 电磁感应原理的有铁心线圈和空心线圈两种传感结构, 空心线圈结构的电流互感器又叫做 Rogowski 线圈电流互感器。属于 Faraday 磁旋光效应原理的包括块状玻璃和光纤两种传感结构, 这类电流互感器又叫做光学电流互感器。Rogowski 线圈电流互感器和光学电流互感器是两种主要的电子式电流互感器。

“准确测量任何时刻的电流瞬时值”是电流互感器的理想测量品质。广泛使用的铁磁线圈电流互感器, 尽管稳态测量精度能够满足 0.2 级电能计量的要求, 然而短路故障时存在磁路饱和现象, 导致动态测量能力差, 是保护装置误动和拒动的重要原因。为了保证保护装置动作的可靠性和实现电网的动态可观测性<sup>[2]</sup>, 必须提高电流互感器的动态测量精度, 这是研制电子式电流互感器的最重要驱动力。

电压等级越高, 铁磁线圈电流互感器的绝缘结构越复杂、绝缘费用越高。测量的光纤传输方式是简化绝缘结构、大幅度降低成本的有效途径, 是电子式互感器的必然趋势。对于光学电流互感器, 测量的光纤传输顺其自然, 对于基于电磁感应原理的电流互感器, 需要采用电光转换的手段。

现代电网的二次系统是实时信息化系统, 要求互感器提供标准的信号输出, 而不是具有负载能力的二次电流或者二次电压输出。测量输出电子化是

电子式互感器的基本特征, 是建设数字电力系统的基本需要。

测量方法准确化、测量传输光纤化、测量输出电子化是电子式互感器的三个主要发展趋势 (参见图 1)。

面向 Rogowski 线圈电流互感器和光学电流互感器, 本文评述电子式电流互感器的研究状况。

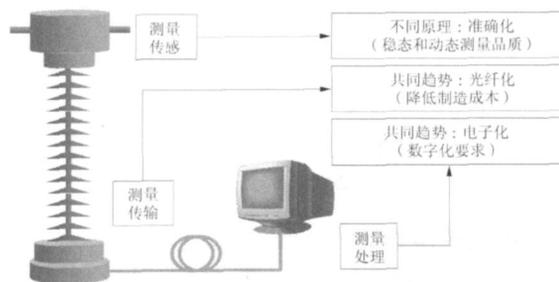


图 1 电子式电流互感器的组成

Fig 1 Composite of electronic current transformer

## 1 Rogowski 线圈电流互感器

### 1.1 基本原理

Faraday 电磁感应原理叙述“磁场变化产生感应电动势”的事实, 就是

$$e(t) = - \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

其中:  $e(t)$  为感应电动势,  $\phi$  为磁通,  $t$  为时间。

Faraday 电磁感应原理是 Rogowski 线圈电流互感器的传感基础。这在基本原理上决定了 Rogowski 线圈电流互感器不能测量稳恒直流, 对于变化比较缓慢的分量, 比如非周期分量, 也不能保证测量精度。很显然, Rogowski 线圈电流互感器是存在测量频带问题的电流互感器。

### 1.2 传感结构与稳态测量精度

Rogowski线圈是缠绕在环状非磁性骨架上的空心线圈(见图2)。这在传感结构上根本解决了铁心线圈电流互感器的磁路饱和问题。

空心线圈的磁链与被测电流  $i$  的关系是

$$=M i \quad (2)$$

其中

$$M = \frac{N^2 S \mu_0}{l} \quad (3)$$

这里,  $M$  是互感系数,  $N$  是线圈匝数,  $l$  是环的周长,  $S$  是线圈所围面积,  $\mu_0$  是磁导率。

互感系数  $M$  为常数是高测量精度的基础, 这要求: 空心线圈的截面积处处相等; 线匝的缠绕处处均匀; 骨架截面要细小, 并且骨架厚度与骨架内径相比能够忽略。空心线圈的制造工艺问题是保证 Rogowski线圈电流互感器稳态测量精度的关键问题之一。

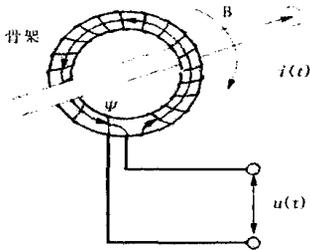


图2 Rogowski线圈

Fig 2 Rogowski coil

### 1.3 电光转换导致的有源方式

为了减少测量信号的传输损耗、简化绝缘结构和降低绝缘费用, 悬挂式 Rogowski线圈电流互感器采用光纤信号传输方式。这就需要在高压端完成电光转换, 所以传感头必然是有源方式。这样要面临光传输供能容量、电磁干扰等问题, 在电路设计和芯片选择上受到了局限。高压端的电光转换是保证稳态测量精度和保证运行稳定性的障碍之一。目前, 非混合式的悬挂式 Rogowski线圈电流互感器在稳态测量方面还不能满足精度要求。

应用于 GIS 中的 Rogowski线圈电流互感器, 不需要高压端的电光转换, 稳态测量已经达到了精度要求。

### 1.4 信号处理与测量频带

Rogowski线圈电流互感器有两种基本的信号处理方式: 自积分方式和微分方式。这两种信号处理方法都具有带通频率响应特性, 都不能完全再现动态电流的变化情况<sup>[3]</sup>。Rogowski线圈电流互感器的

测量频带取决于基本的测量原理, 信号处理方法不能根本解决。

电流较小时, Rogowski线圈电流互感器的取相灵敏度相对较小, 输出的电压信号变得很弱。小电流时的微弱信号处理也是 Rogowski线圈电流互感器面临的难点问题。

## 2 光学电流互感器

### 2.1 基本原理

Faraday磁旋光效应原理叙述了这样的事实: 线性偏振光通过置放在磁场中的 Faraday旋光材料时, 偏振面将发生与磁场大小成正比的偏转(图3), 就是

$$= \mu V_L H d l \quad (4)$$

这里,  $\phi$  为 Faraday旋光角(偏振面的转角),  $\mu$  为旋光材料的磁导率,  $V$  为旋光材料的 Verdet常数,  $H$  为磁场强度,  $L$  为通过旋光材料偏振光的光程长度。

Faraday磁旋光效应原理具有良好的测量线性度, 不仅可以测量变化电流, 而且可以测量稳恒电流。很明显, 基于 Faraday磁旋光效应原理的光学电流互感器在测量原理上不存在测量频带问题。

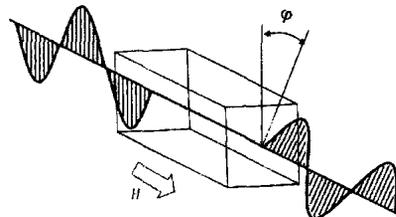


图3 法拉第磁旋光效应原理

Fig 3 Faraday electric-magnetic effect

### 2.2 测量精度的温漂问题

光学电流互感器, 输出光强是 Faraday旋光角、线性双折射的函数, 就是<sup>[4]</sup>:

$$J_o = \frac{J_i}{2} \left[ 1 \mp \frac{\sin \alpha}{2} \cdot 2 \pm (-1)^2 \cdot \sin^2 \left( \frac{\alpha}{2} \right) \cdot \sin(4 \alpha) \right] \quad (5)$$

这里,  $J_o$  是输出光强,  $J_i$  是输入光强,  $\alpha$  是起偏器透光轴与系统坐标轴的夹角, 并且,

$$= \sqrt{2 + (2 \alpha)^2} \quad (6)$$

对于不完全各向同性的 Faraday旋光材料, 环境温度的改变将引起线性双折射的变化, 由式(7)可以看出, 这将导致 Faraday旋光角的测量出现温度漂移现象, 使互感器的稳态测量精度不能满足

要求,这就是 Faraday磁旋光效应电流互感器的测量精度温漂问题。

光学电流互感器有块状玻璃传感和光纤传感两种结构。对于光纤传感结构,由于温度对线性双折射的影响更为严重,所以研究工作主要集中在块状玻璃结构上。

测量精度的温漂是个复杂的难点问题<sup>[5]</sup>。从各向同性角度出发的改变材料配方、改进烟火工艺的各种努力结果并不理想;测量精度的温漂现象不仅与环境温度的绝对值有关,而且与环境温度的变化率有关,很难找到可靠的温度补偿方案;隔热方法可以缓解温度变化梯度的影响,但不能解决绝对温度的长期影响问题。

### 2.3 长期运行稳定性问题

按照安培环路定律,块状玻璃的双层闭合光路被认为是理想的抗电磁干扰的光学传感结构。然而,这样的结构光程长并且光路复杂,引发了长期运行的稳定性问题:静态工作光强逐步衰竭,一段时间之后光学电流互感器失去正常工作的能力。

分布参数的光路分析表明,双层闭合光路结构并不具有完全的抗电磁干扰能力<sup>[6]</sup>,所以没有必要坚持闭合光路的做法。长期运行的稳定性与依赖于光路长度、结构和参数的静态工作光强的温度特性密切相关。保证 Faraday磁旋光效应电流互感器的长期运行稳定性,必须从简化光路结构入手。

## 3 研究历程与实用化概况

高品质的电流互感器长期以来是电力系统领域的研究热点。

在上个世纪 90 年代初期之前,提高电流互感器动态测量精度的希望主要寄托于 Faraday磁旋光效应原理,开始研究光学电流互感器。早在 1965 年就出现了挂网试运行的报道<sup>[7]</sup>。在光纤技术快速发展的推动下,上个世纪 80 年代研究工作取得系列成果。伴随着挂网运行报道的不断出现,伴随着已经取得了实用化结果的文献宣称,光学电流互感器的实用性却受到了普遍的怀疑。原因是测量精度的温漂问题不能有效解决,块状玻璃传感结构的光学电流互感器还存在长期运行稳定性问题。研究工作从上个世纪 90 年代后期逐渐进入了低潮。

上个世纪 90 年代中期之后,研究重点开始逐渐转向 Rogowski线圈电流互感器,标志着研究主流又回到了 Faraday电磁感应原理。尽管 Rogowski线圈的动态测量品质受到基本原理的限制,但是可以彻

底解决磁路饱和问题,可以大幅度提高故障情况下基波测量的精度。目前研究工作已经取得了实用化成果,在组合电器(GIS)中的应用已经达到了产品化要求,并投入了工程应用。采用与铁心线圈互感器组合的悬挂式 Rogowski线圈电流互感器也具备了实用化的技术条件。

从传感原理上讲, Faraday磁旋光效应原理明显优越于 Faraday电磁感应原理。这是多数研究转向 Rogowski线圈电流互感器的同时光学电流互感器的研究并没有停止的关键原因。2004 年,自适应光学电流互感器研制成功(参见图 4),有效解决了测量精度的温漂问题和长期运行的稳定性问题。稳态测量精度达到 0.2 级,非周期分量最大瞬时值误差小于  $\pm 1\%$ 。样机在 110 kV 输电线路挂网 25 个月,运行稳定。标志着基于 Faraday磁旋光效应原理的电流互感器具备了实用化条件。

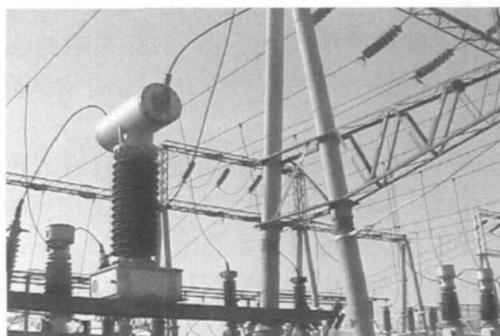


图 4 自适应光学电流互感器

Fig 4 Self-adaptive optical current transformer

目前已经产生了关于电子式电流互感器的国际标准: IEC60044 - 8,这个标准涵盖但并不专门针对光学电流互感器:不仅没有形成对动态电流的测量精度更加严格的规定,而且也没有形成光学电流互感器精度温漂问题和长期运行稳定性的相关标准。随着光学电流互感器实用化技术的出现,标准也会逐步完善起来。

## 4 应用前景

电子式电流互感器在技术上已经达到了实用化条件。这需要研究以电子式电流互感器为基础的各种电力系统应用。

### 4.1 电网动态观测

为了提高电力系统安全稳定的监视、分析和控制能力,现代电网要求对电力系统具有动态可观测性:不仅要掌握电网的稳态情况,而且还要掌握电网的动态变化情况。以相量测量单元(PMU)为基础的广域

测量系统(WAMS)概念应运而生。PMU的前端是基本的电流和电压测量,电流互感器和电压互感器的动态测量精度是准确观测电网动态过程的基础。

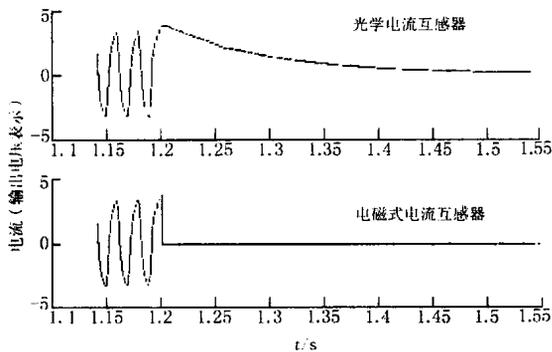


图 5 非周期分量测量的比较

Fig 5 Comparison of aperiodic component measurement

传统的电磁式电流互感器不能很好满足动态测量的要求。

Rogowski线圈电流互感器,不存在磁路饱和问题,但存在测量频带问题,可以在一定的频率范围内满足动态测量的要求。

Faraday磁旋光效应电流互感器,具有大范围的线性测量能力,不存在测量频带问题,是理想的动态测量装置。由图5可以明显看出,基于Faraday磁旋光效应原理的光学电流互感器具有优良的动态电流测量品质。

#### 4.2 继电保护

二十多年以来,电力系统继电保护发展的根本驱动是与计算机技术的结合。在基本的保护原理方面实质性进步并不明显。已经普及应用的计算机保护并不能阻止误动和拒动现象的时有发生。

高可靠的保护原理依赖高精度测量,特别是故障情况下的动态测量。传统的电磁式互感器动态测量能力差,尤其是电流互感器。为了应对电流测量的不准确,在保护逻辑和判据方面采取了诸多方法,仍然不能根本解决问题。

具有准确动态测量能力的互感器,不仅能够准确测量故障的基波,而且能够准确测量非周期分量和各次谐波。一方面,在确保可靠性的基础上,可以简化现行保护装置的保护逻辑和判据,另一方面,在充分利用准确故障动态信息的基础上,可以产生实用化价值的保护新原理,比如利用非周期分量和各次谐波分量准确测量的保护方法。目前已经有了电子式互感器为测量基础的保护装置的挂网运行案例。

以光学互感器为基础,未来可能会实现光学保

护的概念:按照保护原理光强信号直接运算和判定。光学保护将具有更高的可靠性和快速性。

#### 4.3 其它应用

准确的电流/电压动态测量,可以为提高电力系统录波、测距和定位的准确性和可靠性奠定测量基础。

电子式互感器是数字变电站和数字化电力系统的测量来源。这样的数字变电站的运行试点已经出现。

### 5 结论

Rogowski线圈电流互感器和Faraday磁旋光效应电流互感器是两种主要的电子式电流互感器。这两种互感器都不存在传统电磁式电流互感器的磁路饱和问题。

Rogowski线圈电流互感器是存在测量频带问题的有源方式的电流互感器。Faraday磁旋光效应电流互感器,具有大范围的线性测量能力,是没有测量频带问题的无源方式的电流互感器。两种电子式电流互感器已经基本具备了实用化条件。

电子式电流互感器是电网动态观测、提高继电保护可靠性和数字电力系统建设的基础装备,将在现代电力系统中发挥重要的基础测量作用。

#### 参考文献:

- [1] IEC60044 - 8, Instrument Transformers, Part 8: Electronic Current Transformers[S].
- [2] Bertsch R J. Wide Area Measurement and Protection System for Emergency Voltage Stability Control[A]. Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE 2002 27-31.
- [3] 尚秋峰. 光学电流互感器实用化方法研究(博士学位论文)[D]. 北京:华北电力大学, 2005.  
SHANG Qiu-feng. Practicability Research on Optical Current Transformer, Doctoral Dissertation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2005.
- [4] 于文斌. 光学电流互感器光强的温度特性研究(博士学位论文)[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2005.  
YU Wen-bin. Temperature Characteristic Research on Irradiance of Optical Current Transformer, Doctoral Dissertation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005.
- [5] 李岩松. 高精度自适应光学电流互感器及其稳定性研究(博士学位论文)[D]. 北京:华北电力大学, 2004.  
LI Yan-song. High-precision Self-adaptive Optical CT and Its Stability Research, Doctoral Dissertation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2004.

(下转第 22 页 continued on page 22)

- (Areva), 2002
- [2] HE Jia-li, LUO Shan-shan, WANG Gang, et al Implementation of a Distributed Digital Bus Protection System [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(4).
- [3] 李莹, 杨奇逊. 分布式微机母线保护的探讨 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(21): 45-47.  
LI Ying, YANG Qi-xun A Study of Distributed Digital Bus Protection [J]. Automation of Electrical Power Systems, 1999, 23(21): 45-47.
- [4] Puri D, Hardy R H S, et al A Local Area Network for an Electrical Substation [J]. IEEE Trans on PAS, 1984, 103(9).

[5] Technical Guide [Z]. AREVA T&D, 2003.

收稿日期: 2004-10-20; 修回日期: 2004-12-06

作者简介:

董杏丽 (1975 - ), 女, 博士, 主要从事电力系统继电保护方面的研究与应用; E-mail: shirley.dong@areva-td.com

徐瑞东 (1970 - ), 男, 高级工程师, 长期从事电力系统继电保护方面的研究与应用;

薄志谦 (1955 - ), 男, 博士, IEEE高级会员, 长期从事电力系统继电保护方面的理论与应用研究。

### Technology and implementation of distributed busbar protection

DONG Xing-li<sup>1</sup>, XU Rui-dong<sup>1</sup>, BO Zhi-qian<sup>2</sup>, WANG Hong-qing<sup>3</sup>

(1. AREVA T&D EA I, Shanghai 201315, China; 2. AREVA T&D, EA I, UK;  
3. East China Electrical Power Test & Research Institute, Shanghai 210315, China)

**Abstract:** Distributed busbar protection is now more and more popular because it can not only simplify secondary wiring and reduce cabinet area requirement but cater for substation automation request. Based on all existing technologies, a distributed busbar protection that is composed of central unit (CU) and bay unit (BU) is described. Current differential theory together with novel CT saturation method is used to implement this scheme. Local confirmation theory in BU makes this protection more reliable. Easy use and excellent selectivity can be achieved by advanced topology technique which provides friendly graphic user interface software.

**Key words:** busbar; current differential protection; distributed

(上接第 14 页 continued from page 14)

- [6] 张国庆. 光学电流互感器的理论与实用化研究 (博士学位论文) [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.  
ZHANG Guo-qing Theory and Practicability Research on Optical Current Transformer [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005.
- [7] Saito S, Fujii Y, Yokoyama K, et al The Laser Current Transformer for EVH Power Transmission Lines [J]. IEEE J QE, 1966, QE - 2: 255-259.

收稿日期: 2005-05-28

作者简介:

郭志忠 (1961 - ), 男, 工学博士, 哈尔滨工业大学教授、博士生导师, 许继电力科学研究院院长, 研究方向为电力系统分析与控制、数字化电力系统、电网络理论、电力系统光学测量技术。

### Comment on the research of electronic current transformers

GUO Zhi-zhong<sup>1,2</sup>

(1. Electric Power Research Institute of XJ Group Co., Beijing 100085, China;  
2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The basic comment on electronic current transformer, including Rogowski coil current transformer and optical current transformer, is presented. It is obvious that the optical current transformer excels the Rogowski coil current transformer in respect of dynamic measurement quality. The practical technologies have been formed for the two kinds of electronic current transformer. The electronic current transformer is significant for improving the accuracy of dynamic observation of power network and the reliability of relaying, and is the fundamental of the construction of digital power system.

**Key words:** electronic current transformer; Faraday electric-magnetic effect; Faraday magnetic-optical effect; Rogowski coil