

# 应用于断路器中的光供电式空心电流互感器

张明明, 陈庆, 汪本进, 李红斌

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

Optically Powered Air Core Current Transformer for Application in Circuit Breaker

ZHANG Ming-ming, CHEN Qing, WANG Ben-jin, LI Hong-bin

(College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

摘要: 介绍了一种应用于断路器中的光供电式空心电流互感器的原理、结构及性能。提出采用光纤在高、低压侧间传送测量信号及其高压侧所需要的能量, 绝缘结构相对简单, 将空心电流互感器组合在断路器中可减小设备占地面积和体积。所研制的电流互感器采用基于印刷电路板的空心线圈的结构, 线圈二次绕组无需手工绕制和电阻调整; 并对额定电流 20 A, 300 A 及 3 000 A 的样机分别进行了测试, 结果表明该系列电流互感器计量准确度均达到 0.2 S 级, 保护准确度为 5P20。

关键词: 电子式电流互感器; 空心电流互感器; 断路器

中图分类号: TM452.94

文献标识码: A

Abstract: Optically powered air core current transformer applied in circuit breaker is reported in several aspects including the theory, the structure and the properties. By using the optical fiber, the signals are transmitted between the high voltage side and ground, and source power is supplied to high voltage side. The insulation structure of current transformer is comparatively simple, and the area and cubicle occupied by the facility will decrease while the air-core current transformer is combined with the breaker. Without hand-making and resistance adjustment, a new structure of air-core coil, based on printed circuit boards, is adopted by the transformer. Type test results show that when the rated current varies from 20 A to 3 000 A, the accuracy of air core current transformer meets 0.2S class for metering and 5P20 for protection.

key words: electronic current transformer;

air core current transformer; circuit breaker

## 1 引言

在电力系统中, 互感器, 断路器这两种装置一般是由不同的厂家设计和制造, 传统的铁心电流互感器体积大而笨重, 从结构、绝缘方面而言, 两者也无

法组合在一起。电子式电流互感器的出现将有可能结束这一局面。

如果将体积小、精度高的电子式电流互感器与断路器合二为一, 将大大地减小设备的总尺寸, 且成本有所降低。根据 IEC 标准, 从测量原理分类, 电子式电流互感器包含了光学电流互感器、空心电流互感器(又称为 Rogowski 线圈)及低功率型电流互感器 3 种。早在 20 世纪 80 年代初, 国外就有学者从事基于空心线圈的电子式电流互感器在中压开关中的运用研究, 但由于相关技术的限制, 空心线圈一般用来做保护通道的测量或者是大电流(额定电流为数百安培以上)的计量通道的测量<sup>[1]</sup>。随着技术的发展, 特别是基于 PCB 的空心线圈的新结构的出现, 使得测量准确度大大提高, 在数十安培的额定电流系统中运用同一个空心线圈作为传感头实现计量和保护的双重功能已经成为可能。

笔者介绍的应用于 35 kV 断路器的系列电子式电流互感器, 已依据 IEC60044-8 《Electronic Current Transformer》标准, 对额定电流 20, 300 A 和 3 000 A 的电流互感器样机分别进行了全套型式试验, 结果表明, 该电流互感器在额定电流 20~3 000 A 的范围内, 计量准确度达到 0.2 S 级, 保护准确度为 5P20。并且十项电磁兼容试验结果均为 A 级。

## 2 工作原理及结构

如图 1 所示, 整个互感器由 4 部分组成: 传感部分、高压侧电路、低压侧电路和激光供能系统。传感部分将被测电流信号转变成与其微分信号成比例的电压信号; 高压侧电路将此信号积分还原, 并数字化后再变成光信号, 用光纤传输至低压侧; 低压侧电路将信号解调成与被测一次电流成比例的模拟电压输出。激光供能系统将低压侧激光器发出的光能用光

收稿日期: 2006-02-06

作者简介: 张明明(1966-), 男, 工程师, 长期从事电子式电流、电压互感器的研发工作。

纤传至高压侧再转换成电能信号供给高压侧电路工作。其中传感部分和高压侧电路放在断路器的顶部，绝缘子与断路器的瓷瓶并行连接，光纤从绝缘子中穿过，低压侧电路放置于断路器操作机构内，电流互感器系统与断路器结合紧密，对断路器的外形和性能没有任何负面影响。

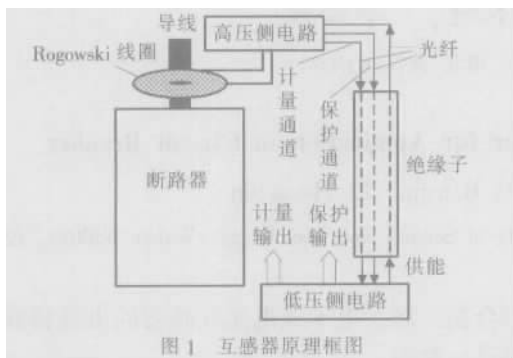


图 1 互感器原理框图

### 2.1 传感部分

传感部分采用空心线圈作为敏感单元，装在断路器的上部，被测导体从线圈中心穿过。传统手工绕制的空心线圈示意图如图 2 所示，整个线圈均匀地绕在一个环形的非磁性骨架上<sup>[1]</sup>。由全电流定律和电磁感应定律可得到空心线圈互感系数 M 以及线圈的自感系数 L:

$$M = \frac{\mu_0 N h}{2} \ln \frac{R_a}{R_i}; L = \frac{\mu_0 N^2 h}{2} \ln \frac{R_a}{R_i} = N \cdot M$$

式中:  $i(t)$  为一次侧电流;  $\mu_0$  为真空磁导率;  $N$  为线圈匝数;  $h$  为线圈骨架高度;  $R_a$  为骨架外径;  $R_i$  为骨架内径。

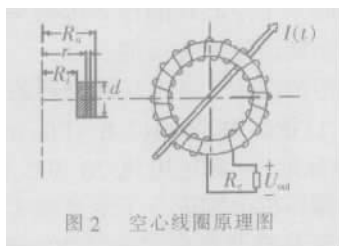


图 2 空心线圈原理图

采用印刷电路板构成的空心线圈<sup>[2]</sup>由 2 个或者多个印刷电路板制成的线圈串联连接而成，如图 3 所示。该方案线圈的原理与传统的空心线圈的原理完全一样，都是在骨架上均匀绕线。线圈为双面板，绕线通过过孔来穿越骨架的上下表面。该结构用现在的印刷电路板设计制造工艺制作起来非常简单，绕线密集匀称。其自感系数和互感系数的估算和传统的空心线圈的方法一样。这种 PCB 新型结构的空心线圈测量准确度高，试验结果表明，比传统手工绕制的线圈测量准确度能提高 1~2 个数量级，且能同时满足计量和保护的双重要求，并能够容易地实现完全的生产自动化，对空心线圈的大规模生产和推广应用具有非常重要的实用价值。

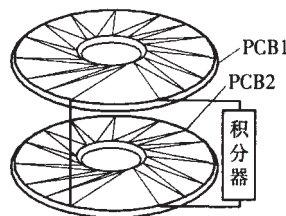


图 3 基于 PCB 的平板型 Rogowski 线圈结构示意图

### 2.2 高、低压侧电路

在该互感器中，采用了同一个空心线圈提供计量和保护两个不同功能的信号输出，但由于两者测量范围不同，计量要求测量额定电流的 1%~120%; 保护要求测量额定电流的 1~20 倍，因此高压侧电路也相应地分成两路，如图 4 所示，空心线圈输出信号经积分还原并数字化后再变成光信号，用光纤传输至低压侧，低压侧电路将信号解调成与被测一次电流成比例的模拟电压输出。

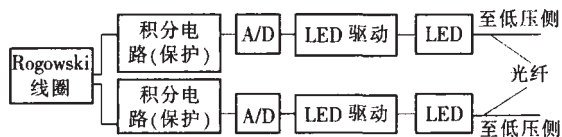


图 4 高压侧电路原理框图

高压侧电路中的关键技术是精密积分技术和模数转换技术。在实际应用中，除了采用性能好的模拟器件构建积分器外，因为要对交流信号进行长时间积分，不可能周期性地将输出复位为 0，为了解决 DC 失调的问题，对理想积分器进行了改进，在电容 C 上并联  $R_1$ ，它还能避免运放的输出饱和，见图 5。改进的模拟积分器的传递函数为:

$$\frac{e_o(s)}{e(s)} = -\frac{R_1}{R} \left( \frac{1}{1+R_1Cs} \right) - \frac{1}{RCs} \quad (s \gg 1/R_1C)$$

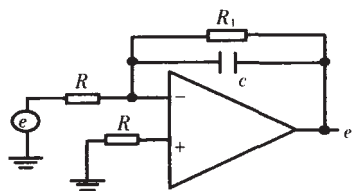


图 5 改进的模拟积分器

特别要注意的是: IEC 标准对被测电流频率变化时，输出信号相位随频率变化有相应的要求<sup>[3]</sup>。取  $R=39 \text{ k}$ ， $R_1=10 \text{ M}$ ， $C=100 \text{ nF}$ ，改进的模拟积分器的幅频特性、相频特性曲线见图 6。

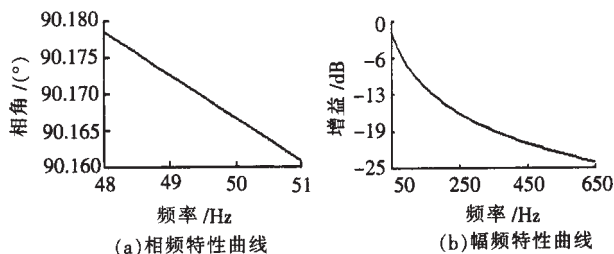


图 6 改进积分电路的幅频特性和相频特性曲线

从图 6 的相频特性曲线可以知道, 相频特性曲线是频率的单调递减函数。使用改进的模拟积分器的空心电流互感器用于计量时, 在额定频率变化范围内, 积分器输出信号的相角波动不超过 0.24 (49.5 Hz 时为 90.170°, 50.5 Hz 时为 90.166°); 用于保护时, 在额定频率变化范围内, 积分器输出信号的相角波动不超过 0.67 (48 Hz 时为 90.176°, 51 Hz 时为 90.164°)。由此可见改进积分器输出信号的相位随被测电流基波频率波动的变化可以满足标准规定的 0.2 级的要求。

模数转换电路采用同步型低功耗电压/频率转换器 AD7740。该芯片是单通道单端同步型 V/FC, 体积小, 节省空间, 不需要外接外部电阻和外部电容来确定转换频率, 其输出频率由外部晶振决定, 而晶体振荡器是可以做到非常稳定的, 故转换电路可以做到在较宽的温度范围内保证准确度不变。

低压侧电路将信号解调成与被测一次电流成比例的模拟电压输出。低压侧信号解调电路也分为计量与保护部分, 与高压侧计量和保护电路相对应。

### 2.3 激光供能部分

激光供能部分的作用是将低压侧激光器发出的光能用光纤传至高压侧再转换成电能信号供给高压侧电路工作。其中值得注意的有两点: ①为了给高压

侧提供可靠的工作电源, 光能在高压侧转换成电能后需经过一级 DC-DC 变换, 将光电转换器输出的电能进行稳压。②低压侧的大功率激光器工作时发热严重, 为了提高工作的可靠性和延长其寿命, 需对激光器的工作环境进行控温。

## 3 结语

光供电式空心电流互感器采用光纤在高、低压侧间传送测量信号及其高压侧所需要的能量, 绝缘结构相对简单, 可将空心电流互感器组合在断路器中, 以减小设备占地面积和体积, 是今后电力系统设备的发展方向。

## 致谢:

对北京华东森源电气有限责任公司对该研究工作的支持表示感谢。

## 参考文献:

- [1] Kojovic L. Rogowski Coils Suit Relay Protection and Measurement [J]. IEEE Computer Applications in Power, 1997, 9(7): 47-52.
- [2] Kojovic L. PCB Rogowski Coils Benefit Relay Protection[J]. IEEE Computer Applications in Power, 2002, 15(7): 50-53.
- [3] IEC60044-8. Electronic Current Transformers[S]. 2002.

(上接第 216 页)

开合感应通过附装在接地开关上具有弹性的辅助触杆及安装在底座上的真空负荷开关, 来实现感应电流开合。该产品在沈阳高压电器产品质量监测试验站顺利通过了开合 B 类电磁感应电流和静电感应电流试验。

2004 年, 西安高压开关有限责任公司也开发出了具有开合感应电流能力的接地开关, 并顺利通过了开合 B 类电磁感应电流和静电感应电流的型式试验。该产品采用额定电压为 35 kV 的真空灭弧室作为开合感应电流的专用灭弧装置。

2005 年 3 月, 长沙高压开关有限公司开发出的 JW - 550(W)/63 型户外交流高压接地开关, 也配用额定电压为 35 kV 的真空灭弧室作用于开合感应电流, 其动作原理与 STB-550/63+CK 型接地开关相同; 该产品依据国家标准 (GB1985) 及国际标准 (IEC1129) 进行了相关型式试验, 试验参数为: 电磁感应电压 35 kV、电磁感应电流 300 A; 静电感应电压 35 kV、静电感应电流 50 A, 开断次数 100 次, 动作时间小于 10 s。

## 7 结语

(1) 随着电网的发展, 同杆双回线路越来越普遍, 接地开关开合感应电流的能力, 应引起运行部门和制造企业的高度重视。

(2) 开合感应电流能力是接地开关的重要参数, 应该按照仿真计算结果选择合适的接地开关。

(3) 现有的接地开关国家和行业标准已不能满足电力系统发展的需要, 应加快相关技术标准的修订工作。

## 参考文献:

- [1] 丁桂芬. 500 kV 出线间隔接地开关开、合感应电流能力的探讨 [J]. 吉林电力技术, 1993(3): 10-12.
- [2] 庞圣海. ZFW-500 型 GIS 中接地开关开合感应电流试验 [J]. 高压电器, 1992, 28(2): 37-42.
- [3] 庞圣海. 高压交流接地开关开合感应电流试验 [J]. 高压电器, 1992, 28(2): 22-24.
- [4] 李斌. 关于同杆双回线检修回路中接地开关开断工况的研究 [J]. 电网技术, 1995, 19(1): 42-46.
- [5] 李长益. 同杆架设或部分同杆架设 500 kV 双回线路接地开关的选择 [J]. 高压电器, 2004, 40(2): 150-152.