

# 电子式电流互感器的一种高压侧低功耗信号调制方法

范红勇, 李红斌, 张艳

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

## A Signal Modulation Method on High Voltage Side of Electronic Current Transformer with Low Power Consumption

FAN Hong-yong, LI Hong-bin, ZHANG Yan

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

**摘要:** 高压光纤电流互感器高压侧大多采用激光供电方式。为了提高系统可靠性,要求高压侧电路功耗尽可能低,对高压侧信号调制方法提出了较高的要求。相对于一般的 A/D 转换电路, V/F 转换电路结构简单,功耗低,并且转换速度可以满足计量及稳态保护的要求。介绍了一种基于 V/F 转换原理的空芯电流互感器高压侧信号调制方法,并在低压侧实现解调。经试验,系统线性度在 5%~120% 额定输入测量范围内达 0.04%, 高压侧电路功耗仅 23 mW。

**关键词:** Rogowski 线圈; 光供电; 功耗; V/F 转换

**中图分类号:** TM452

**文献标识码:** A

**Abstract:** Optical power supply is usually adopted by the high voltage side of electronic current transformer. To improve the reliability of the system, the power consumption of modulation circuit in high voltage side is demanded as low as possible. Compared with general A/D conversion circuit, the V/F circuit has simple structure and low power consumption, and the conversion speed can meet the requirement of steady-state protection. A kind of modulation method based on the V/F principle is introduced. The test results show that the power consumption of high voltage side circuit is only 23 mW and the system linearity is 0.04% from 5% to 120% within the rated input scope.

**Key words:** Rogowski coil; optical power supply; power consumption; voltage to frequency converter

## 0 引言

根据 IEC 60044-8 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、空芯电流互感器(又称为 Rogowski 线圈)及低功耗型电流互感器 3 种。从应用的电压等级分类,可以分成中压(10~35 kV)、高压(110 kV 及以上)、超高压(500 kV

及以上)等。现阶段实用化的高压电子式电流互感器主要是以空芯线圈为传感单元,低压侧的半导体激光器通过供能光纤给高压侧的调制电路供电,将高压侧的含有被测电流信息的电压信号转换成数字信号驱动发光二极管,通过信号传输光纤以光脉冲的形式传输至低压侧。但目前存在的最关键问题是高压侧工作的电路功耗过大,多在 200 mW 左右<sup>[1]</sup>。一般光电转换的效率较高时为 30%,这就要求光源(半导体激光器)的出纤功率至少达到 600 mW 以上,而出纤功率在这种数量级的光源,一般寿命较短,远远不能满足电力系统对互感器的寿命要求(30 年),同时其成本非常昂贵,但是功耗的降低意味着互感器的性能将会随之降低。在功耗和性能之间必须寻求一个最佳的平衡点。笔者通过合理设计高压侧信号的调制方式,使高压侧的电路功耗降到 23 mW,同时系统具有理想的线性度;而激光器的出纤功率的大幅度降低,也延长了激光器的使用寿命。

## 1 系统原理及主要技术参数

图 1 为高压电子式电流互感器的原理框图。系统包括以下几个主要部分:高压侧传感头(空芯线圈),高压侧电路部分(积分放大、V/F 变换等),绝缘和信号传输部分(复合绝缘子、光纤);低压侧信号处理部分(F/V 变换、低通滤波、A/D 与 DSP 系统等)和供电部分(包括高压和低压)。

被测导体从线圈中心穿过,高压侧传感头为空芯线圈,其输出送至高压侧电路,经积分放大和 V/F 变换后,以脉冲信号形式通过光纤传至低压侧电路,经过还原处理后可获得反映被测电流的模拟输出信号,再通过 A/D 转换与 DSP 系统的处理,可得到相

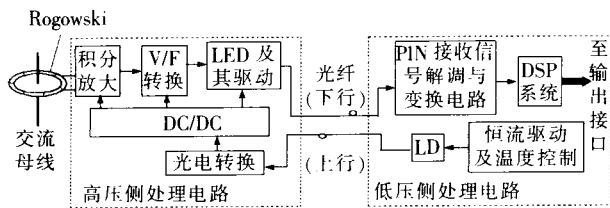


图 1 空芯电流互感器系统框图

应的数字接口输出。绝缘子支撑高压部分,同时实现高低压间的电气绝缘;光纤作为高、低压侧的数据传输通道,高压侧电路所需的能量由光供电部分提供。

## 2 信号调制及其解调电路设计

### 2.1 高压侧调制电路设计

高压侧的空芯线圈输出须经过调制电路转换成数字信号后,再转变成光信号通过光纤传至低压侧电路。常用的调制方法有两种。一种方法是采用 A/D 转换芯片实现模/数转换,包括并行或串行 A/D。并行输出的芯片位数较多,需要大量的光电隔离器件,还需要双向传输,组成的线路结构较复杂,故障率较高,并且由于光电隔离的延迟,实际运用中需要对延迟进行考虑并采取补偿措施,处理比较困难<sup>[2]</sup>,故很少用并行 A/D 对高压侧信号进行模/数转换。串行 A/D 组成的线路结构相对简单,只需一根下行光纤,在交流光纤电流互感器中也常有应用,但一般串行 A/D 转换电路的功耗较低时也超过了 20 mW<sup>[1]</sup>,加上高压侧 LED 驱动,功耗更高;而且由于 A/D 转换芯片通常都需要由指令来启动转换,往往要在高压侧设计一个 CPU 小系统,这就进一步增加了高压侧电路的功耗,降低了系统的可靠性。

另外一种方法是采用 V/F 转换来实现高压侧的信号调制,V/F 转换器是将电压信号转换为频率信号的器件,具有良好的精度、线性和积分输入特点。它的应用电路简单,对外围元件性能要求不高,环境适应能力强,转换速度不低于一般的双积分型 A/D 器件,且价格较低,在一些非快速 A/D 过程中,V/F 转换技术倍受青睐<sup>[3]</sup>。本设计主要针对交流系统的计量及稳态保护,V/F 电路的响应速度也满足要求。由于 V/F 电路的功耗较低,从系统寿命及可靠性方面考虑,高压侧采用了 V/F 转换电路来实现信号调制。

V/F 转换电路采用单通道单端同步型低功耗电压/频率转换器 AD7740。该芯片体积小,节省空间,不需要外接电阻和电容来确定转换频率,其输出频率由外部晶振决定,由于晶振的频率非常稳定,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。为了满足 AD7740 输入范围的要求,必须在高压侧叠加合适的直流偏置电压,并在低压侧解调时还原,使系统输出为交流电压。

在空芯电流互感器中,可采用同一个空芯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 5%~120%,保护要求测量额定电流的 100%~2 000%,因此高压侧电路也相应地分成两路。可设计合适的放大倍数(两路放大倍数可以不同)及直流偏置电压。

### 2.2 低压侧处理电路设计

高压侧传送下来的频率信号是一系列的光脉冲,通过光电探测器 PIN 把接收到的光脉冲转换成电频率信号,可以通过测频间接测出被测交流电流的大小。考虑到在低压侧提供一个模拟接口,这里采用 F/V 转换还原成电压信号的方法,通过低通滤波器,得到需要的模拟通道。该模拟量经过放大和 A/D 采样,送 DSP 进行运算处理得到数字接口。

为了去掉高压侧叠加的直流偏置电压,低压侧使用了减法器,经过调节,可使高压侧输入为零时,低压侧输出也为零。同时,交流测量系统中对相位要求较高,在低压侧须设计移相器,调节处理电路中的相位误差。

## 3 试验数据

### 3.1 线性度试验

根据系统框图设计出了高、低压侧的计量通道电路,用信号发生器产生正弦波信号代替空芯线圈的输出,对空芯线圈之后的系统(包括高压侧处理电路、低压侧处理电路及连接光纤)做了线性度试验。采用图 2 的试验框图,测量高压侧输入电压  $U_1$ 、低压侧解调处理后输出电压  $U_2$ ,记录数据见表 1。

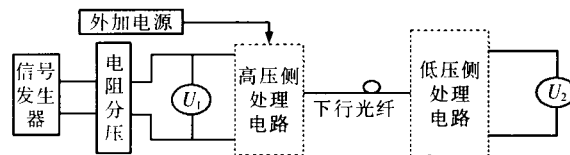


图 2 线性度试验示意图

表 1 电路线性度试验数据

输入电压 $U_1$ /mV	输出电压 $U_2$ /mV	比值 $U_2/U_1$	输入电压 $U_1$ /mV	输出电压 $U_2$ /mV	比值 $U_2/U_1$
0(接地)	0(调零)	-	50.947	462.853	9.085
5.378	48.886	9.090	60.522	549.903	9.086
7.650	69.516	9.087	76.240	692.564	9.084
10.094	91.734	9.088	100.462	912.780	9.086
20.044	182.101	9.085	126.220	1146.58	9.084
30.905	280.803	9.086	150.620	1367.93	9.082
40.870	371.304	9.085	183.782	1669.11	9.082

电路设计时,5%  $I_n$  对应输入为 7.500 mV,则 120%  $I_n$  对应输入为 180 mV。表 1 中数据覆盖了整个测量范围,且已经调零。利用关系式:

$$\text{线性度} = \frac{U_2 - KU_1}{U_2} \times 100\% \quad (\text{下转第 392 页})$$

涡流损耗。电抗器电导损耗： $P_L = I^2 \cdot r$  ( $r$ 为电抗器电阻)；试验电缆介质损耗： $P_C = U_C^2 \omega C \tan \delta$  (交流聚乙烯介质损耗因素取值范围为0.02%~0.05%)。

电抗器的涡流损耗与电抗器的体积大小、流过电抗器的电流、电抗器与铁板的高度等因素有关，需要根据试验设备和现场状况而定。

#### 2.2.4 试验方法的选择

选择采用串联谐振还是串-并谐振的试验回路，参考的主要两个因素是电缆容量和设备额定容量。从式(1)可知，当电缆电容较大时，通过降低试验频率，可以降低试验电流，减少励磁变和电抗器的输出功率。如果频率在试验要求的下限时仍然超出励磁变和电抗器额定容量，应当采用串-并谐振法。

#### 2.2.5 试验中应注意的事项

(1)当电压较高时，电晕损耗的功率不可忽视，过强的电晕会降低回路的品质，且电晕会产生很多干扰，影响试验电压波形。

(2)接地线应短、粗、直，接地点离分压器要近。一旦试品被击穿，击穿电压将瞬时跌落到零，由于 $du/dt$ 很大，流过放电点和回路的电流可以达到千安

(上接第387页)

研究项目的一部分，整个研究项目包括电磁优化设计，温度场计算和绝缘树脂老化实验等。实验分析了温度对变压器绝缘树脂老化的影响，得到的指标表明所用的绝缘材料及该类型干式变压器达到F级绝缘耐热标准。试验方法见2.2实验总体设计方案及2.4实验步骤。

## 4 结语

通过实验，得到了变压器绝缘树脂的热氧老化

(上接第389页)

(其中： $U_1, U_2$ 均以mV计)计算电路的线性度。 $K$ 为拟合直线的斜率，取表1中比值的平均值。可以看出，电路的线性度非常好，在5%~120%  $I_n$ 范围内，线性度达0.04%。

#### 3.2 高压侧功耗试验

高压侧低功耗是设计的出发点。系统正常工作时，高压侧供电电压须大于2.500V，试验中，高压侧供电电压为2.750V，满量程时测量出高压侧供电电流为8.179mA，则高压侧功耗为：

$$2.750 \times 8.179 = 22.5 \text{ mW} \approx 23 \text{ mW}$$

此值远远小于光供电电流互感器高压侧功耗须不超过200mW的要求。

## 4 结语

在光供电电子式互感器中，高压侧电路的低功

耗要求，往往限制了高压侧调制电路的方案。降低功耗既是要求，同时又是难点<sup>[4]</sup>。笔者介绍了一种基于V/F转换的高压侧信号调制方法，并完成了系统设计。经试验，该系统线性度非常理想，且高压侧功耗仅23mW，大大提高了系统可靠性。

(3)电缆的屏蔽层需要通过接地线临时与大地可靠连接再与成套装置连接，不可利用杆塔连接。

## 3 结语

对于交联聚乙烯电缆而言，直流耐压试验已经不适合电缆的投产交接试验，采用交流耐压试验，根据电缆实际电容的大小，选择串联谐振或者串-并联谐振的试验方法，可以很好地模拟电缆的实际运行工况，从而有效地检出电缆的缺陷，保证电力系统的安全运行。

## 参考文献：

- [1] 贾涛. 开展XLPE电缆交流耐压试验的必要性与可行性[J]. 新疆电力, 2002(12): 4-7.
- [2] 江日洪. 浅谈橡塑绝缘电力电缆交接预防性试验的方法[J]. 电力试验, 2005(6): 10-12.

性能参数，如重量损失与时间的关系曲线，温度指数TI等。指标验证了该绝缘材料作为F级绝缘的可信性。通过试验所得的温度指数等数据可以进一步用于变压器寿命评估的参考，建立起关于绝缘材料温度的使用寿命经验公式。

## 参考文献：

- [1] 程尚模. 传热学[M]. 北京：高等教育出版社，1990.
- [2] GB 11026.1-1989. 确定电气绝缘材料耐热性的导则 制定老化试验方法和评价试验结果的总规程[S].

耗要求，往往限制了高压侧调制电路的方案。降低功耗既是要求，同时又是难点<sup>[4]</sup>。笔者介绍了一种基于V/F转换的高压侧信号调制方法，并完成了系统设计。经试验，该系统线性度非常理想，且高压侧功耗仅23mW，大大提高了系统可靠性。

## 参考文献：

- [1] 颜研, 罗承沐. 一种新型光电电流互感器的研制[J]. 传感器技术, 2002(1): 23-27.
- [2] 韩正超. 模拟量信号的隔离及V/F的应用[J]. 四机科技, 2004(2): 23-26.
- [3] 李双, 方志, 赵中原, 等. 一种用在Rogowski线圈电流互感器中的V/F转换电路的设计[J]. 继电器, 2002, 30(10): 55-57.
- [4] 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(5): 20-25.