

文章编号:1001-1609(2004)05-0342-03

用于高压直流的光电电流互感器研究

毕 然¹, 徐 雁¹, 朱明钧¹, 叶妙元¹, 张 艳², 王建生²

(1. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 西安高压电器研究所, 陕西 西安 710077)

Study on the Hybrid-optical Direct Current Transducer Used for HVDC

BI Ran¹, XU Yan¹, ZHU Ming-jun¹, YE Miao-yuan¹, ZHANG Yan², WANG Jian-sheng²

(1. College of Electrical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute, Xi'an 710077, China)

摘要:介绍了一种光电电流互感器的基本原理。针对传统互感器的不足,提出了全新的设计方案,使用分流器作为传感头,配以数字化处理电路,采用了光供电和光纤传输数据,并同时给出模拟和数字两种输出。初步试验表明,该方案切实可行。这种互感器动态性能好,在体积、重量和造价方面优势明显,有望在直流输电中获得应用。

关键词: 直流电流互感器; 高压直流输电; 分流器; 光供电
中图分类号: TM452 **文献标识码:** A

Abstract: The principle of the hybrid-optical direct current transducer is introduced. Aiming at the shortcomings of conventional transformer, a new design is adopted, which uses ohmic shunt as sensor, optical fiber to send digitized data, gets power for controlling unit at high potential terminal from optical source, and has the outputs in both analog and digital formats. The experiment results indicate this method is feasible. And it has good dynamic performance and advantages with size, weight and costs. It will be used for HVDC in the future.

Key words: direct current transducer; HVDC; ohmic shunt; optical powered source

1 引言

高压直流输电已在我国得到了快速发展,目前大多数的直流输电系统中仍然采用传统的直流电流互感器来获取信号,虽然在性能上基本能满足测量要求,但随着直流输电电压的升高,它们的缺点也越来越明显。近年来,国外电气公司已开发出一系列用于直流输电的光电电流互感器(OCT)。如我国三峡至常州 500 kV 直流输电系统就使用了 ABB 公司的 OCT,用于线路的直流电流及谐波电流、交流侧不平衡电流、桥臂电流等的测量。

目前国内光电互感器的研制主要集中于实现交

流电压和电流的测量,用于直流测量的光电互感器尚未见有报道。笔者介绍了一种用于线路直流电流测量的 OCT,分析了它的优点,并说明了其主要原理和设计要点,同时给出了试验结果。

2 直流光电电流互感器的优点

传统的直流电流互感器通常基于铁心线圈的电磁效应,这使得它难以准确反映暂态电流,此外,当系统出现较大的故障电流时,该互感器可能会饱和,准确度下降。另一方面,随着电压的升高,它的体积和重量大大增加,绝缘成本升高,价格昂贵。

新型直流互感器采用分流器作传感头,其体积小、成本低。高、低压电路间信号用光纤传输,绝缘问题容易解决,使整个系统也具有体积小、重量轻、成本低的特点。它的主要优点包括^[1]:①重量轻,仅为传统直流电流互感器的 1/40;②使用光纤连接,高、低压间没有电气连接;③具有良好的动态性能。

另外它还有无电磁干扰、无铁磁损耗、安全可靠、与电力自动化系统网络兼容等许多优点。

3 系统原理与技术参数

图 1 为直流光电电流互感器原理框图。系统包括以下几个主要部分:高压侧传感头(分流器),高压侧电路部分(放大、A/D 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(串并转换、D/A 输出等)和光供电部分(包括高压和低压)。

高压侧传感头为分流器,串入直流母线,其输出电压送高压侧电路,经放大和 A/D 变换后,以数字信号形式通过光纤传至低压侧电路,处理后可获得反映被测电流的输出信号。绝缘子支撑高压部分,同时实现高低压间的绝缘;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。系统的主要技术参数为:直流;额定电压:120 kV;

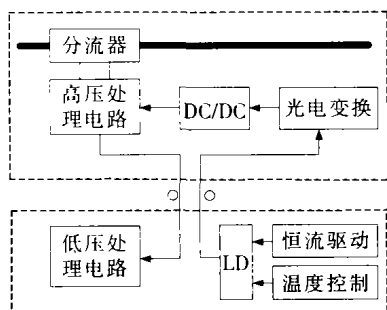


图1 直流光电电流互感器原理框图

额定电流:3 000 A;准确级:0.5/5 P;阶跃响应;最大上升时间<400 μ s。

4 系统设计

4.1 分流器设计

分流器是传统的测量直流大电流的装置,其原理是根据被测电流通过已知电阻上的电压降来确定被测电流的大小。与常规电阻不同,一般分流器都被设计成4端结构:两个电流端钮和两个电位端钮。工作时电流端钮串入母线,两个电压端钮间的电位差即为电压降。分流器的特点是结构简单,性能稳定可靠,测量的准确度不受外磁场的影响;缺点是本身消耗的功率较大^[2]。根据系统设计要求,当分流器中通过额定电流时,其输出为75 mV。

分流器工作时自身温度变化将导致其电阻值也发生变化,成为影响系统误差的因素。在该设计中分流器采用了卧式结构,该结构方式可将分流器设计得较长,加大其散热面积,从而提高了温度稳定性。同时,分流器由高电阻系数、低温度系数的锰铜合金制成,使分流器电阻受温度变化影响很小。另一方面,温度变化还将产生热应力,也会影响分流器的电阻值,在设计中采用了柔性连接方式,消除了热应力的影响。

分流器的额定温升为60 K,当环境温度为40 $^{\circ}$ C时,最高温度可达100 $^{\circ}$ C,此时其电阻值可由式(1)求得。

$$R_t = R_m [1 + \alpha(t-20) + \beta(t-20)^2] \quad (1)$$

式中: R_t 为温度 t ($^{\circ}$ C)时的电阻值, R_m 为20 $^{\circ}$ C的电阻值。对锰铜, $\alpha=10 \times 10^{-6}/K$, $\beta=-0.25 \times 10^{-6}/K$,当 $t=100$ $^{\circ}$ C时, $R_t=R_m(1-8 \times 10^{-4})$ 。因此,理论上由温度影响产生的相对误差最大为-0.08%。

4.2 高压侧电路设计

分流器的输出是直流电压信号,对于该信号的测量,一种较简单的方法是使用电压/频率变换,其电路结构简单,输出适合数字远传。但它响应速度慢,并且在宽量程范围内准确度不容易保证,因此采用了逐次逼近式的A/D变换方法。

高压侧电路的主要功能是对分流器的输出进行预处理和A/D变换,采样结果经电光变换后通过光

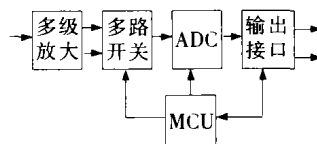


图2 高压侧电路原理框图

纤传送到低压侧,其原理见图2。

系统要求被测电流的最大值为额定电流的600%,并在10%~600%范围内保证测量准确度。由于输入信号范围较大,这里使用了多级放大,其中第1级采用了差动放大的形式,以有效抑制共模信号。为减小失调电压和温漂的影响,并考虑到电源的要求,放大器选择了单工作电源的斩波稳零放大器。A/D变换器为14位逐次逼近型,输出为串行方式。

多路开关的切换,A/D采样的启动和输出的时序均由单片机(MCU)控制。根据每次的采样值,MCU可以决定多级放大输出中的哪一个作为下一次A/D采样的输入。MCU定时启动A/D转换,通过对输出接口的控制,产生输出时序并进行电光变换,将信号耦合进光纤发送。

由于普通发光二极管(LED)的驱动电流较大(通常约需10 mA),这里的电光变换采用了垂直腔面发射激光器(VCSEL),其驱动电流小于5 mA。MCU和A/D转换器均工作在休眠方式,以降低功耗。根据实测,输入为额定值时,整个高压侧电路功耗约为65 mW,使用光供电完全可以正常工作。

4.3 光供电及绝缘设计

高压端电路的供电通常有3种方法:使用小CT从母线取能量、太阳能电池供电和光供电。小CT供电只能用于交流系统,太阳能电池供电的可靠性不高,因此该系统采用了光供电方式。光供电的优点主要有性能稳定、不受电网波动的影响、噪声小,同时还有利于实现高、低压间的绝缘。光供电的原理见图1。激光二极管(LD)在恒流源的驱动下输出光功率,并通过光纤送到高压端的光电转换器件,其输出经DC/DC变换后,即得到高压端电路工作所需的电压^[3]。

激光二极管是一种高功率密度的器件,微小的驱动电流变化将导致输出光功率的极大变化。因此LD的驱动使用了恒流源,在0~2 A范围内可调,并通过反馈控制来获得最低的电流偏差。同时,LD的发光波长和输出功率可能随温度变化,为此采用了半导体制冷技术,使LD工作在20 $^{\circ}$ C左右,以输出恒定的光功率。该设计中选用的LD在最大驱动电流下能输出大于1 W的光功率,输出光中心波长为808 nm。

光电转换器可以将波长为780~820 nm的入射光转换为电能,它与LD之间使用光纤连接,经变换后可得到约5 V的稳定直流电压,转换效率约为25%。

光供电光纤和信号传输光纤通过光纤引线杆引至底座,光纤引线杆则固定在绝缘子内。系统采用了

硅橡胶复合绝缘子,由硅橡胶伞裙和真空浇注的环氧筒组合而成。环氧筒承受机械负荷,支撑高压侧传感头;硅橡胶伞裙粘在环氧筒外壁,保护环氧筒免受环境条件的影响并提供必要的爬电距离。硅橡胶复合绝缘子的使用,大大减小了系统的质量和体积。

4.4 低压侧电路设计

高压侧的光信号通过光纤传到低压侧后,经 PIN 光电二极管变为电信号,再经移位寄存器串并转换后,就得到了并行信号。MCU 读取该值,处理后送 D/A 还原,作为最终的模拟输出。同时 MCU 还控制 LED 显示,并从串口按一定格式发送处理结果,作为数字输出。当输入为额定电流时,模拟二次输出为 1.5 V。

4.5 算法设计

该系统的被测电流中除直流外,还有一定的谐波分量,其中 2 次谐波(100 Hz)最大,约为额定电流的 5%;其它高次分量相对很小,可不考虑。鉴于系统响应时间的要求,未采用硬件滤波,使用了具有高速和高稳定性的软件处理方法。

高压侧的 A/D 变换对 2 次谐波进行整周期采样,每周期采 32 点,即采样时间间隔约为 313 μs。低压端 MCU 对连续 32 点采样值进行累加后求平均,就可以将 2 次谐波滤除。这里采用了滑动平均滤波的方法,将本次采样值和过去的 31 次采样值一起求平均,得到的值可立即送 D/A 输出,以保证每个采样值都可以产生有效输出。

5 实验方法与结果

5.1 分流器线性度试验及结果

校验大电流分流器较理想的方法是采用差值测量法,这样对电源和测量仪表的要求相对低些,易于满足。但受条件限制,试验中采用的是与标准分流器输出直接比对的方法,且仅实现了额定值及以下电流的测量,其中标准分流器的准确度为 0.03%。表 1 为线性度试验结果, U_2 表示被测分流器的输出, U_1 表示标准分流器的输出。对表中数据进行直线拟合后,按(2)式求得线性度,其中 K 为拟合直线的斜率。

表 1 分流器线性度试验结果

U_2 /mV	U_1 /mV	线性度 /%
76.58	303.8	0.069
60.41	239.9	-0.034
37.42	148.6	-0.033
15.32	60.86	-0.069
8.101	32.18	-0.076

$$\text{线性度} = \frac{KU_2 - U_1}{U_2} \times 100\% \quad (2)$$

5.2 处理电路部分的线性度试验及结果

由于难以获得稳定的直流大电源,处理电路部分(包括高压端和低压端电路)的线性度试验不宜采用直接连接分流器的方法;可以用直流稳流源和标准电阻来模拟输入电流和分流器,它们的性质相似,

并可以得到很高的稳定性。标准电阻上的电压降作为处理电路的输入,试验通过测量该输入和低压端电路的模拟输出来获得整个电路部分的线性度。图 3 为试验接线图,表 2 为试验结果。其中直流稳流源稳定度为 0.005%,标准电阻为 0.01 级, V_1, V_2 为 6 位半高精度数字表,其直流电压准确度为 0.002%。

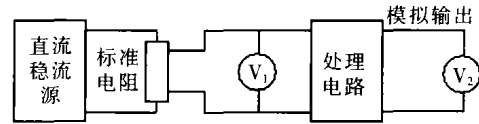


图 3 处理电路部分线性度试验接线图

表 2 处理电路部分线性度试验结果

U_2 /mV	U_1 /mV	线性度 /%	U_2 /mV	U_1 /mV	线性度 /%
108.8	5.439	0.018 3	1 351.9	67.57	0.042 9
133.6	6.678	0.029 9	1 506.1	75.27	0.046 4
150.8	7.538	0.026 5	2 236.1	111.8	0.040 2
191.9	9.594	0.010 4	3 334.4	166.6	0.102 0
521.1	26.05	0.023 0	4 530.5	226.3	0.099 4
726.4	36.31	0.027 5	6 539.6	326.6	0.107 1
1 055.9	52.78	0.032 2	8 715.5	435.3	0.109 1

注: U_2 为处理电路输出; U_1 为标准电阻压降; 线性度的计算方法同式(2)。

表 1 和表 2 说明,分流器和处理电路部分都具有较好的线性度。进一步还需要对输出标定,进行准确度试验,以获得系统的电流误差(比值误差),其计算方法与式(2)相似,只是将 K 替换为额定变比^[4]。线性度试验和准确度试验的结果都能够反映系统的非线性,且都是相对误差,因此可以通过线性度试验的结果来估算系统的准确级。

如前所述,分流器温升影响产生的相对误差约为 -0.08%,取分流器的线性度为 0.1%,处理电路的线性度为 0.1%,可估算系统的误差为:

$$\sqrt{(-0.08\%)^2 + (0.1\%)^2 + (0.1\%)^2} = 0.162\%$$

满足了系统设计 0.5 级的要求。

5.3 处理电路阶跃响应试验

理想的分流器是一个纯电阻,但实际上,它不可避免地存在着残余电感。此外,当电流快速变化时,集肤效应也将引起电阻值的变化,这些都会对阶跃响应产生影响。经验表明,各种结构分流器的响应时间都较小,一般不会超过 10 μs,这与处理电路的响应时间相比要小得多,可以不予考虑。因此系统的动态性能只需研究处理电路部分。可以使用信号源产生标准方波,模拟分流器的输出,其最大值为 75 mV,对应于输入电流为额定值时。将该方波作为处理电路的输入,并用示波器同时观察该方波及电路的输出,即可获得系统的阶跃响应情况。

按以上方法测得上升时间约为 100 μs,无超调,满足系统对动态性能的要求。

6 结语

通过对分流器和处理电路的 (下转第 348 页)

表4 出线首端接地时($R_f=0.5\Omega$),
架空线末端健全相暂态电压

R_n/Ω	最大值/p.u.	平均值/p.u.	标准偏差/p.u.	幅值的98%/p.u.
5.0	2.990 4	2.192 49	0.444 87	2.984 72
10.0	3.009 1	2.207 76	0.445 43	3.002 98
15.0	3.025 3	2.215 08	0.451 53	3.019 01
20.0	3.039 5	2.220 49	0.457 99	3.033 11

5 结语

(1)由于接地故障电流在几安至几百安的范围
内都有可能发生弧光接地过电压,并且中性点经小
电阻接地系统的立即跳闸也需要零点几秒的时间,
因而在中性点经小电阻接地系统中,一旦接地故障
发生在架空线上时,仍然可能发生弧光接地过电压。

(2)中性点经小电阻接地系统中,由于小电阻能
有效释放残余电荷,即使发生重燃,过电压的幅值也
不会因多次重燃而明显增加。因而研究中性点经小
电阻接地系统的弧光接地过电压,只考虑一次燃弧
就能够满足要求,其最大计算值小于3.1 p.u.

(上接第341页)

6 结语

新型消弧线圈调节速度更快,使得故障的检测
和消除的时间大大缩短;运行更加安全可靠,保障了
电网运行的安全性;实时在线测量对地电容电流,结
果准确。随着科技的发展,大功率晶闸管的单管容量
及反向电压逐渐提高,而且价格下降,性能稳定。可
以预测,这种新型消弧线圈具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 要焕年,曹梅月.电力系统谐振接地[M].北京:中国电力出

(上接第344页)

精心设计,系统获得了优良的准确度、稳定性和动态
性能。光纤传输信号可靠性高,抗干扰能力强,和光
供电相结合,简化了绝缘设计,大幅度减轻了系统的
重量、缩小了体积、降低了造价。

参考文献:

- [1] J Ammon, Dr H Huang. Innovations in HVDC Technology

(3)中性点经小电阻接地系统中,相比传统的接
地方式,能够有效地降低系统中性点的过电压水平,
这对变压器的制造是有利的。

(4)10kV配电网中性点经小电阻接地后,不仅弧
光接地过电压发生的几率减小,而且即使发生了弧光
接地,其过电压也在允许范围之内,从而很好地解决
了传统接地方式所不能解决的弧光接地过电压问题。

参考文献:

- [1] 解广润.电力系统过电压[M].北京:水利电力出版社,1985.
[2] 靳晓东,李谦,王晓瑜,等.配电网弧光接地过电压的仿
真及分析[J].高电压技术,1994,20(3):71-75.
[3] 万善良.上海市区配电网中性点接地方式的技术分析[A].中
性点接地技术研讨会[C],无锡,1999.
[4] 施围.电力系统过电压计算[M].西安:西安交通大学出版
社,1988.

作者简介:高亚栋(1968-),男,在读硕士,研究方向为电
力系统过电压的计算机仿真及保护。

版社,2000.

- [2] 陈伯超.新型可控饱和电抗器理论及应用[M].武汉:武汉
水利电力大学出版社,1999.
[3] 陈玉琴,陈志业.晶闸管投切电容式消弧线圈的设计与应用
研究[J].电力系统自动化,2001(14):38-40.
[4] 曾祥君,于水源.配电网谐振状态与单相接地状态的辨识[J].
电力系统自动化,1998,22(8):41-43.

作者简介:赵志丽(1980-),女,硕士研究生,目前从事配
网自动化和消弧线圈应用方面的研究。

[Z]. Germany: Siemens AG, 2000.

- [2] 揭秉信.大电流测量[M].北京:机械工业出版社,1987.
[3] 吴士普,刘沛,徐雁,等.光电电流互感器中的光供电技
术应用研究[J].高电压技术,2004,30(4):52-53.
[4] IEC60044-8. Electronic Current Transformers[S].

作者简介:毕然(1979-),男,辽宁人,硕士研究生,主
要研究新型互感器及检测方法。

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!