

高精度工频恒流源设计

杨永辉¹ 颜晓燕² 郭恒¹ 王建¹

(1.国网电力科学研究院,武汉 430074;2.天津市电力公司技术中心,天津 300384)

摘要:首先给出了设计的性能参数,之后对恒流源的工作原理进行了分析,提出了高精度工频恒流源的设计方案,介绍了方案中关键电路的设计要点,详细说明了恒流源的热设计、可靠性设计和软件校正的方法,最后给出试验数据和结论。

关键词:恒流源;工频;高精度;Howland电路;功率放大器

中图分类号:TM919

文献标识码:B

文章编号:1001-1390(2009)10-0072-04

The Design of AC High Precision Constant Current Source

YANG Yong-hui¹, YAN Xiao-yan², GUO Heng¹, WANG Jian¹

(1.State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China.

2. Tianjin Electric Power Corporation Technical Center, Tianjin 300384, China)

Abstract: This paper presents the performance parameters first, then analyzes the working principle of the constant-current source, puts forward the design method of the high-precision power-frequency constant-current source, introduces the key point of the significant circuit, gives the method of thermal design, reliability design and software design, finally gives test data and conclusions.

Key words: constant-current source, power-frequency, high-precision, Howland circuit, power magnifier

0 引言

在电力测试仪表及其校验装置中,往往要求高精度的工频恒流源,并且要求恒流源的输出相位和幅值可调,市场上的恒流源在精度、稳定度、幅值、相位、价格等方面无法同时满足要求,对于这一类恒流源往往需要自行设计。本文在方案选择、硬件电路设计、热设计、稳定性分析、和软件校正等方面,探讨高精度恒流源的设计方法。

1 设计要求

本恒流源用于电容型设备绝缘在线监测系统校验装置中,其要求如下:

工作温度:20℃~40℃

工作频率:40~60Hz

电流输出范围:0.1~2000mA

电流输出准确度:0.1%

相位调节范围:180°~+180°

相位精度:1/60°

输出功率:20W

2 电路设计及原理

本电路的工作原理如图1所示,本电路主要由信号发生电路、恒流源电路和反馈采样电路等三部分构成。

信号发生电路由计算机控制,发生幅度和相位可调的控制信号,经恒流源电路后输出,输出信号经采

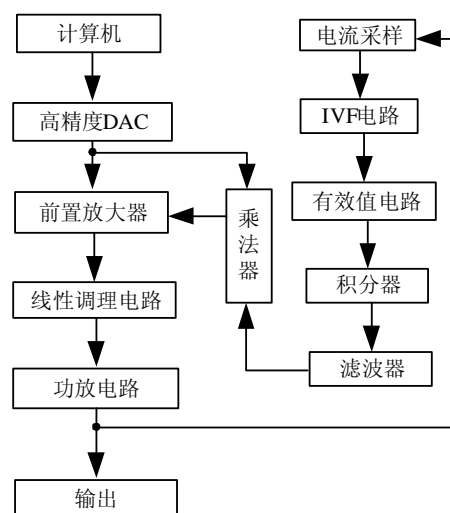


图1 系统结构图

Fig.1 System structure diagram

样、处理后,反馈到恒流源电路的输入端,以保证恒流源电路的输出精度。其中信号发生电路是由高精度 D/A 卡构成,实际输出控制信号的精度为 0.07mV,可以满足本系统的精度要求。本系统的设计重点是恒流源电路和反馈采样电路。

2.1 恒流源方案的选择

传统的恒流源一般使用三极管构成“串联型稳压电路”,即电路中的三极管与负载是串联关系,通过比较采样电流和标准电流信号的差异来控制三极管的导通程度,从而在负载上获得恒定的电流输出。这种方式结构有以下不足之处:一是电路的工作范围受到限制,为了使电路的输出稳定,其静态工作点必须处于调整管的线性放大区。但在电路输出的调节范围很大的情况下,静态工作点会发生改变。二是输出效率低,大部分电流浪费在调节管上^[1]。由于本系统的输出电流的幅值和相位要求可调,而且输出电流比较大,所以不宜采用这种工作结构。

目前比较常用的方法是使用改进型 Howland 电流泵电路,这种电路适用于负载接地的应用。如图 2 所示。可将该电路认为是差分放大电路,具有一个差分输入和一个差分输出。 V_1 被放大 R_f/R_i 倍加到电阻 R_s 上, I_{out} 的输出电流为 R_s 上压降除以电阻 R_s 。其计算公式如下:

$$I_{out} = V_1 \frac{R_f}{R_i \cdot R_s} \quad (1)$$

在图 2 所示电路中,运放 U1 为普通运放,其电流输出通过 Q1 扩流实现。图示扩流电路只是一个示意,实际使用时,要考虑正负信号输出,三极管基极电流,三极管的温度系数等一系列问题。在元器件选择、电路板尺寸、可靠性、电路调试和产品的开发时间等方面需要很多投入。由于以上问题,本系统采用图 3 所示的方案。

图 3 也采用 HOWHAND 电流泵方法,不同的是 U1 采用功率运放,扩流部分不使用分立元件实现,本系

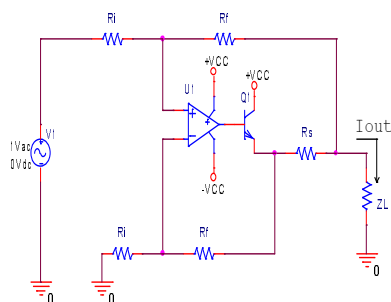


图 2 HOWLAND 电流泵基本型原理图

Fig.2 HOWLAND normal schematic diagram

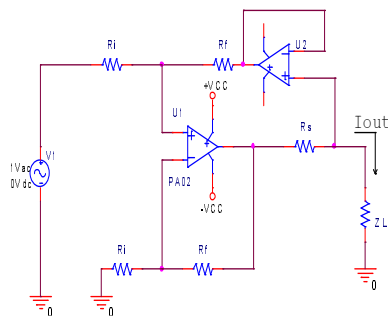


图 3 HOWLAND 电流泵改进型原理图

Fig.3 HOWLAND improved schematic diagram

统使用 PA02 为功放单元^[2],该芯片是由 APEX 公司生产的高性能功率运放,该运放的输出电流最大为 $\pm 5A$,失调电压温度系数为 $\pm 10\mu V/^\circ C$,可以满足本系统的设计要求。图中 U2 为电压跟随器,使反馈回路的阻抗与输出阻抗隔离。本电路的好处是解决了图 2 电路中所面临的绝大部分问题。

2.2 采样反馈电路设计

虽然 PA02 有良好的输出能力和很小的温漂,但在实际测试中发现,其长期稳定性不能达到设计要求,如表 1 所示。由表 1 可以看出,由于受芯片温升的影响,PA02 的输出电流出现负偏差,因此必须加入采样负反馈电路,负反馈电路的性能是保证本系统准确度和稳定度的关键,必须认真设计与调试。负反馈电路主要包括采样电路、有效值电路和积分器电路。采样电路使用高精度、低相差的电流互感器。有效值电路采用集成真有效值芯片,很好的解决了信号中包含高次谐波所带来的计算误差问题。

表 1 PA02 输出测试表

Tab.1 PA02 output test

理论值/A	测量值/A	测量时间/min	芯片温度/ $^\circ C$	误差/(%)
1.0000	0.9991	1	16	-0.0009
1.0000	0.9989	5	39	-0.0011
1.0000	0.9984	10	49	-0.0016
1.0000	0.9973	20	62	-0.0027

3 热设计

热处理技术必须能够尽可能的将热量从半导体的结移走,从而使工作温度维持在最小,并获得最大的可靠性^[3]。进一步的目标是将散出的热对其他设备的影响降到最小。 θ_{JC} 是结到壳的热阻。它是影响功率处理能力的主要参数。当允许 $25^\circ C$ 的壳温和最大的结温,就可以得出最大内部额定功耗,即:

$$P_{max} = (T_{jmax} - 25) / \theta_{JC} \quad (2)$$

这个额定值和由大多数晶体管生产厂商利用的

方法所取得的额定值一致。在用这个额定值之前 检查一下可能引起这个额定值降级的因素 比如环境温度、散热器的热阻和绝缘衬垫的热阻等。实际的公式如下：

$$P_{\max} = (T_{j\max} - T_A) / (\theta_{JC} + \theta_{HS} + \theta_{HSC}) \quad (3)$$

式中 $T_{j\max}$ 为最大结温 T_A 为环境温度 θ_{JC} 为芯片热阻, θ_{HS} 为散热器的热阻 θ_{HSC} 绝缘衬垫的热阻。

本系统的最大工作温度为 40°C ,最大输出功率为 20W ,在负载很小的情况下 ,所有的功率耗散在芯片上 ,约为 20W ,查 PA02 的手册知 θ_{JC} 为 2.1°C/W ,没有使用绝缘衬垫 θ_{HSC} 为零 ,考虑到实际实用 , $T_{j\max}$ 取 100°C ,代入公式(3)后 ,得到 θ_{HS} 为 0.9°C/W ,考虑到散热器和放大器的界面热阻 ,环境温度的变化 ,选择热阻为 0.68°C/W 的散热器。由于芯片发热量比较高 ,还要考虑其热量对其它电路元件的影响问题 ,比如散热器的热量不能使反馈电阻的值变化等 ,本系统将散热器安装在机箱的后面板上 ,使散热器的热量直接散到系统的外面去 ,很好的解决了这个问题。

4 可靠性设计

接地性负载在稳定性方面明显具有一定的优势。一般不需要外加手段来获得稳定性。出现稳定性问题的可能原因是电路的输出阻抗呈现容性 ,当驱动感性负载时会产生震荡。该等效电容如下：

$$C_{eq} = \frac{R_i + R_f}{2\pi f_0 R_i R_s} \quad (4)$$

式中 f_0 为放大器的增益带宽积。

该电容同感性负载可以产生共振电路 ,通常由于快速转换导致振荡。最简单有效的补偿是“Q- 缓冲网络”技术 ,确定感性负载的鸣叫频率和输出电容值。然后 ,在共振频率下选择一个相当于电感感抗十分之一的电阻 ,再串联一个电容 ,该电容的容抗在共振频率

下相当于十分之一的电阻值。如图4所示。

为了减少等效电容的影响 R_i 和 R_s 应稍大一些 ,而且用一个有着较大增益带宽积的运算放大器也可以减小电容的影响。当要求一个有很好的高频特性的电路时 ,必须将两个电阻中的任何一个或两个都提高到最大限制值 ,但这两个电阻值太大时 ,由寄生电容和放大器的输入电容所带来的影响会很明显。由于本系统工作频率在工频段 ,对高频没有特别要求。由于输出电流比较大 R_s 的取值不可能很大 ,采用提高 R_i 的方法来减小等效电容的影响。另外 R_i 和 R_f 的失配会带来很大的误差 ,一个 1% 的不匹配 ,就会产生几乎 20% 的传输误差。要使电阻匹配大于 0.1% ,电阻最好选用同一批次的型号 ,因为同一批次的电阻有很好的性能匹配。实际应用中在反馈网络中加上一个微调电位器 ,以获得更好的放大器性能。

5 软件校正

由于本系统的输出电流跨度比较大 ,范围从 0.1~2000mA 连续可调 ,不同电流输出时 ,功率放大器的工作温度会有所变化 ,功率放大器内集成的输出单元的工作点也有所不同 ,因此会使输出有一定的非线性 ,为了消除这个影响 ,可以用软件校正的方法来消除这个误差。

具体的方法是 ,首先记录整个区间内的原始值 ,用这些值进行多项式拟合 ,本系统使用 3 次多项式拟合后 ,其方差为 10 的负 7 次数量级 ,达到了设计要求。将拟合后得到的拟合系数添加到输入端 ,完成整个系统的软件校正。

6 试验与结论

本系统设计完成后 ,对系统的性能进行了测试 ,测试的环境温度为 25°C ,湿度为 70% ,万用表型号为

表2 恒流源输出测试

Tab.2 Constant-current source output test

理论值/mA	实测值/mA	误差/ (%)
0.5	0.4999	0.0002
1	0.9997	0.0003
5	5.001	-0.0002
10	9.999	0.0001
50	49.99	0.0002
100	100.01	-0.0001
500	500.09	-0.00018
1000	1000.12	-0.00012
1500	1499.95	0.00003
2000	2000.5	-0.00025

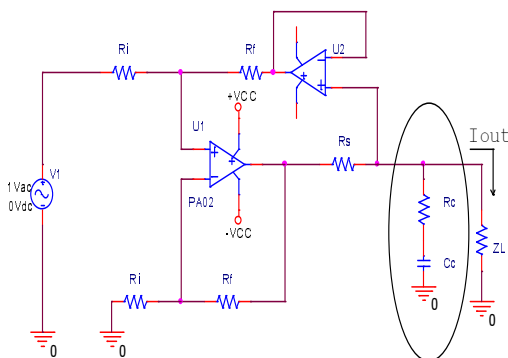


图4 恒流源电路的稳定性补偿

Fig.4 Stability compensation of constant-current source

FLUKE 8846A 测量数据如表2所示。

表2中数据没有包含数据的长期稳定性特征,由于测试点比较多,测试时采用系统连续运行2小时的单点变化范围测试和数据在不同环境温度条件下测试相结合的方法,考核系统的稳定性,经长期考核,本系统的精度和稳定度都在设计误差要求的范围之内。采用本系统为恒流源的某电力仪表校验装置,已经取得计量部门的合格证书,得到了实际应用。

参考文献

- [1] 秦玲,张良,赖青贵,等.基于功率运算放大器的恒流源技术研究[J].通信电源技术,2007,24(1):43-46.
QIN Ling, ZHANG Liang, LAI Qing-gui, WANG Hua-cen. Research on the Constant Current Source Based on Power Operation Amplifiers [J]. Telecom

Power Technologies. 2007, 24(1):43-46.

[2] PA02. Power integrated circuits data book[M]. V12:161~171.

[3]应用11热处理技术[M]. Apex Microtechnology corporation:1-3.

Application 11 heat treatment technology [M]. Apex Microtechnology corporation:1-3.

作者简介:

杨永辉(1973-),男,硕士,电力工程师,主要从事电力设备及仪器仪表的研发工作。Email:yangyonghui@sgepri.com

颜晓熾(1957-),女,工程师,长期从事高电压计量设备的校准与检定工作。

郭恒(1960-),男,硕士,高级工程师,主要从事高电压试验,高压开关,绝缘在线检测研究。

王建(1960-),男,高级工程师,主要从事高电压试验,校验装置,绝缘在线检测研究。

收稿日期:2009-04-10

(杨长江 编发)

(上接第 54 页)

视。目前,已越来越成为供电公司管理亟待解决的突出问题,参见表 1(见 54 页)。

2.2 问题解决方法

(1) 对于安装 CPU 载波预付费电能表的客户,我们由工作人员上门给客户插卡,这样保证了卡表的统一性,避免了客户插错卡的情况。

(2) 对于电表出现负电量的故障,我们及时分析,对故障表计或开关及时更换,并向客户解释。在客户再次购电时进行补交电费。

(3) 对于电表不减电量,和电表自走的用户,我们及时联系厂家,跟客户做解释,根据客户的平常用电量,追收或退还客户电量。

(4)对于电表液晶无显示、显示乱码等表计故障可以通过特殊卡片从电表内的 ESAM 或主芯片读出电表内所有数据。

3 CPU 载波预付费电能表的几点改进意见

(1) 将接触式插卡,设计成非接触式输入方式。取消卡与表计的物理接触,减少故障点,延长表计的使用寿命。特别是在改造中,可以避免更换表箱,节约投资。

(2) 生产厂商在生产过程中,除选择优质的元器件外,更应该注重焊接工艺。只有高水平的焊接工艺才能保证表计运行质量。

4 结束语

电力体制改革的模式是市场化,电力行业旨在建立以市场为导向,以服务为宗旨的现代营销理念。电

力作为商品,其贸易结算与交易的基础是电能计量,从营销的角度出发,厂网分开后,对于关口表计,重点需求高精度、高可靠性的多功能电能表;同时,近年来,随着计算机通信技术、网络技术、数据库技术以及互联网技术的飞速发展,对电能的管理提出了更高的要求。对于低端表计,全国城乡两网改造工程基本结束,“一户一表,抄表到户”的计量、收费政策逐步得以落实,面向市场,利用技术手段实现电能抄、核、收自动化、网络化管理,是现代电力营销的基本需求所在。

CPU 载波预付费电能表即实现了普通预付费电能表的先收费,后用电,解决了电费回收难的问题,又很好地解决了普通预付费电能表各种故障不能实时监控等问题,必将在今后有着广阔的应用前景。

参考文献

[1]GB/T18460.1—2001,电卡预付费售电系统总则[S].

[2]GB/T18460.3—2001,电卡预付费售电系统 IC 预付费电表[S].

[3]GB/T9092-1988,计量和负载控制用自动开关[S].

[4]DL/T698-1999,低压电力用户集中抄表系统技术条件[S].

[5]DL/T5189-2004,电力载波通讯技术设计规范[S].

[6]河北省供电公司 CPU 载波预付费电能表招标技术规范[Z].

[7]CPU 载波预付费电能表使用说明书[Z].

作者简介:

沈英珍(1964-),女,大学学历,电力高级工程师,长期从事电能计量管理工作。

收稿日期 2009-07-12

(杨长江 编发)