

低失真和超高稳定度的交流高电压放大器

金宁¹, W.G.Kürten Ihlenfeld²

(1. 中国计量学院 信息工程学院, 浙江 杭州 310018)

2. Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB, Bundesallee 100, 38116, Braunschweig, Germany)

摘要:介绍了一种基于变压器升压原理的高压交流放大器,放大器正向通道由功率电流驱动器和变压器组成,一个由另一精密仪表互感器、缓冲器和高增益误差放大器组成的精密反馈回路对变压器输出电压进行误差补偿,实现了精确稳定的电压放大性能。放大器以应用于标准功率源为设计目标,具有60/120/240/480V四个量程,由放大电路、监控电路、微处理器电路组成,具有量程选择、LCD显示、通信、电压采样、过零检测、过流检测与保护等功能。文中给出了放大器的设计方案,详细介绍了测试系统与测试方法,结果表明该放大器幅度和相位的1小时稳定度优于 0.5×10^{-6} ,谐波失真(*THD*)小于0.0022%。该放大器的特点是所有有源电子器件均工作在低压状态,因此发热少,性能稳定,非常适合应用于10Hz~1kHz频率范围的高精度电测与计量系统中。

关键词:交流电压;放大器;变压器;反馈;高稳定性

中图分类号:TM933

文献标识码:A

文章编号:1001-1390(2009)07-0062-04

High Voltage AC Amplifier of Lowest Distortion and Highest Stability

JIN Ning¹, W.G.Kürten Ihlenfeld²

(1. China Jiliang University, Information engineering college, Hangzhou 310018, Zhejiang, China.

2. Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB, Bundesallee 100, 38116, Braunschweig, Germany)

Abstract: A high voltage AC amplifier based on magnetic transducers is introduced. The circuit employs a power feed-forward path, which is built with a power current booster and a power transformer. The output of the transformer is regulated by a precision feedback control consisting of a precision buffer amplifier, an instrument transformer and a high-gain error-correcting amplifier, on which high accuracy and stability over time are ensured. The amplifier, which designed for the use in a standard power source, has the four ranges of 60/120/240/480V. The entire circuit is composed of the amplifying circuit, the micro-controller circuit, the sampling and protecting circuit, which has the specialties of range selection, LCD display, key set, input sampling, zero-crossing detecting, over-current protection, etc. The principle and design are given and the measuring system is introduced. The measured stability of amplitude and phase of the amplifier are all below 0.5×10^{-6} over one hour with a very low distortion (*THD*) of 0.0022%. The amplifier is complemented with all electronic devices operated at low power thus less heat would be delivered. It meets the most demanding of electric measurement and calibration purposes in the frequency range of 10Hz to 1kHz.

Key words: AC voltage, amplifier, transformer, feedback, high stability

0 引言

高压交流放大一般采用高压大功率场效应管或双极型晶体管实现,由于元器件承载高压,运行时往往伴随有大量的热量散发,影响电路的可靠性和稳定性,必不可少的高压电源电路和散热措施使放大电路的结构复杂和庞大。电压互感器也可以实现电压放大,但是输出功率和带宽受到限制,增益(变比)随着负载变化很大。然而在电功率测量与计量检定系统中

应用的放大器,如标准功率源中的电压放大器,往往工作在工频范围,其关键性能要求是高稳定性和低失真度,对输出功率和带宽的要求并不高,因此,如果采取一定的措施提高变压器放大电压的精度和稳定度,则可以满足应用要求。文献[1]采用另一个已知幅度和相位误差、空载运行的电压互感器通过反馈来补偿原变压器的误差,使变压器电压增益稳定性得到了很大程度提高。文献[2]以变压器作为电压放大元件,通过

精密的电路设计实现了高稳定度的120V高压输出,放大器幅度和相位30分钟稳定度达到了 1×10^{-6} 以内。

本文设计了一种增益10到80、最大输出达到480V、50mA的交流电压放大器,放大器采用变压器实现不同量程的电压放大,通过由另一精密仪表互感器与高增益误差放大器组成的精密电压反馈电路进行误差补偿,获得了精确稳定的电压放大性能。该放大器还设计有微处理器电路实现电路监控、数字显示、键盘、通信等功能。与一般的高压放大器相比,该放大器具有超高稳定度,并且所有有源电子器件均工作在低压状态,发热少,结构简单且性能稳定。该放大器为高精度电功率测量与校准系统^[3-5]中的标准功率源而设计,也可应用于其他10Hz~1kHz频率范围的高精度电测量与校准系统。

1 放大器工作原理

电压放大器工作原理见图1,输入电压为 V_i ,输出电压采用四线制形式,具有SENSE HI和LO端口。T1为升压变压器,用来实现电压放大,放大倍数(变比)为 k_1 ,输出为 V_{out} ,T2是高精度电压互感器,变比为 k_2 ,T2将输出电压降压后反馈到输入端(V_{2S}),A为高增益误差放大器,反馈电压与输入电压之差(误差电压 $V_r = V_i - V_{2S}$)被放大器A放大,输出 V_{rout} 被送到输出端对 V_{out} 进行误差补偿,从而构成一个完整的电压负反馈环路。电路中的双buffer驱动器起到缓冲隔离作用,其中Buffer1为功率型大电流电压跟随器,它提供给负载所要求的输出功率。放大器输出电压计算如下:

$$\begin{aligned} V_{out} &= V_{out} + V_{rout} = k_1 V_i + V_r A \\ &= k_1 V_i + (V_i - V_{2S}) A \\ &= k_1 V_i + A V_i - \frac{V_{2P}}{k_2} A \\ &= (k_1 + A) V_i - \frac{V_{out}}{k_2} A \end{aligned}$$

整理得:

$$V_{out} = \frac{k_1 + A}{k_2 + A} k_2 V_i$$

误差放大器A具有极高增益,几乎开环运行, $A \gg k_1, A \gg k_2, k_1 \approx k_2$,于是有:

$$V_{out} \approx k_2 V_i$$

可见,电压放大器的增益(V_{out}/V_i)主要取决于互感器T2的变比。因此要得到高精度的放大性能,必须对互感器T2进行高精度设计,而误差放大器A的反馈调节能力是电路实现快速调节获得高稳定度的关键。

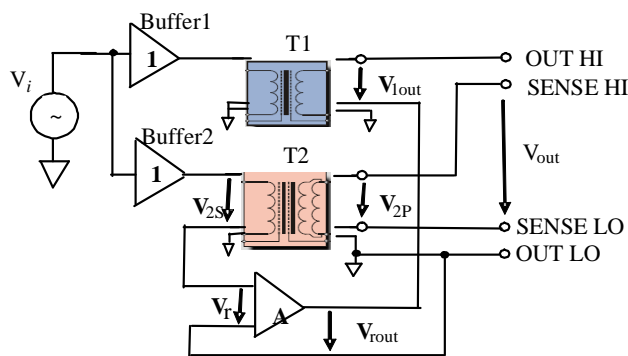


图1 放大器原理框图

Fig1. The principle of the Amplifier

在这个放大器中,Buffer1和Buffer2都运行在输入端,放大器A只是用来补偿磁性变压器的误差电压,因此他们都处于低电压运行状态。为了提供负载功率,放大器A必须具有负载要求的电流驱动能力 I_{load} ,Buffer1提供T1初级线圈的电流,该电流的大小为 kI_{load} 。

2 放大器设计方案

基于上述原理设计了输入0~6V范围、量程为60/120/240/480V的电压放大器,其结构框图如图2所示,包括模拟部分和数字控制以及监测电路。数字部分与模拟部分采用光耦隔离。数字控制采用微处理器(89C55)实现,具有量程控制、LCD显示、键盘输入、通信接口等功能,监测电路实现电压电流过零点检测、过流检测、电源电压正常检测等功能。模拟放大电路关键部分设计如下:

(1) 快速开关S1:作用是在量程切换或紧急状态时将输入电压置零,保护驱动器A1,且使输出为零。选用了数控双通道低泄漏MOSFET型模拟开关DG403,由微控制器控制,与控制电路之间用光耦隔离。

(2) 大电流驱动放大器A1:采用FET输入型功率运放,考虑到负载功率要求最大为24W(480V输出时伴随电流要求达到50mA),A1的最大电流输出要求达到4A。本电路采用了PA19运放,连接成同相电压跟随器形式,电源电压采用 $\pm 15V$ 。放大电路进行了电容进行补偿以驱动大容性负载和在低频时获得较好的增益平坦度。

(3) 高压变压器T1:初级线圈输入电压范围0~6V,次级线圈输出最大电压480V(50mA),线圈匝数比有1:10/20/40/80四种,可由微处理器控制量程选择开关进行选择。该变压器为自行绕制。

(4) 精密仪表电压互感器:采用不同磁性材料制作的双层绕组变压器,具有宽的电压动态范围,磁性

绕组在次级线圈一侧。该变压器有两个静电屏蔽层和一个磁性合金屏蔽层,具有非常精确的匝数比。

(5)误差放大器A3:由两级运算放大器构成,第一级放大器(LT1056)通过设置在反馈通道的T形滤波器实现高增益谐振放大,在工频范围可提供4000倍左右的增益,在直流(防止直流漂移)和高频(防止高频振荡)时增益基本为0;第二级放大器(OP551)的增益设置为2,具有100mA的电流驱动能力,主要功能是提供负载电流。A3的输出通过交流耦合接到输出回路,耦合电容约为4000 μF,以隔断信号中的直流成分。

(6)信号采样及过流保护电路:通过1欧姆的采样电阻对A1输出电流采样,通过高输入阻抗差分放大器、比较器进行脉冲整形,由光电耦合器隔离后送入微控制器,以监视输出电流的大小。

(7)过零检测电路:由滤波电路和比较器组成,用来检测输入信号幅值和波形的零点位置,实现在输入电压过零时刻开启放大器和在输入电流的过零时刻关闭放大器,避免感性负载的瞬时高压对电路的冲击。

整个电路所有电子器件全部运行于低的电源电压状态,所用到的最高电源电压为30V(A2的电源电压),因此该电路结构简单,功率耗散很小。

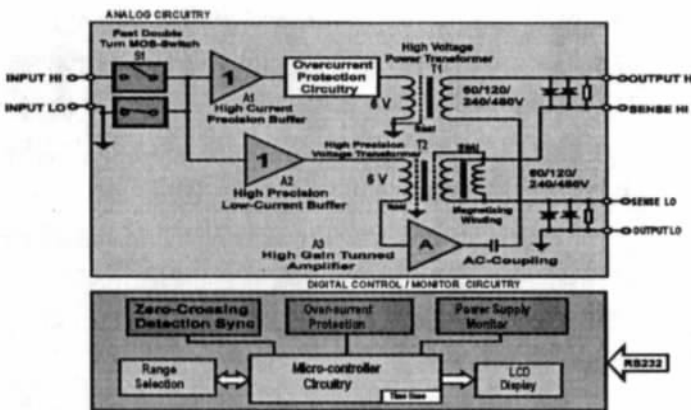


图2 放大器结构框图

Fig2. The structure of the amplifier

3 测试方法与测试结果

3.1 测试方法

放大器性能测试系统如图3所示,由数字合成电压信号源、采样电压表、数据处理软件组成^[2]。数字合成电压信号源输出电压信号 V_1 到被测放大器输入端,放大器的输出被精密的分压器(IVD)分压,将输出电压 V_{out} 减低到与输入电压相同量级 V_2 , V_1 与 V_2 两路电压被采样,采样间隔由系统时钟同步控制,两路采样数值由计算机软件 and 算法进行信号处理,得到被测放大器增益稳定度(幅度和相位)、源电压和输出电压谐波

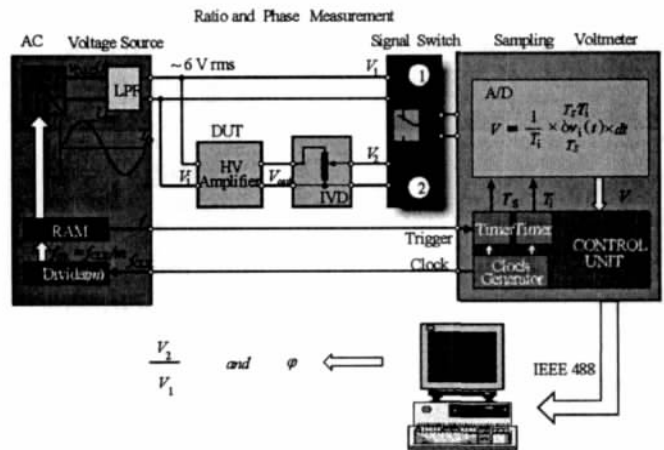


图3 放大器增益($V_{out} / V_{in} = V_2 / V_1$)测试系统

Fig3. Measurement system for gain ($V_{out} / V_{in} = V_2 / V_1$) stability

含量、失真度等性能指标。该测试系统的幅度和相位(弧度)测量不确定度达到 10^{-8} 。

3.2 测试结果

(1)增益幅度和相位的稳定度:信号频率62.5Hz,负载电阻24kΩ。

放大器上电后增益的幅度和相位均有 1×10^{-6} 的漂移,运行30分钟以上漂移趋于稳定。图4为输入6V(有效值)输出120V时的60分钟稳定度曲线,图中零点分别代表幅度和相位的数值与标准值的偏离(分别为+35 μV/V和-19 μrad),可以看出该放大器极佳的稳定性。

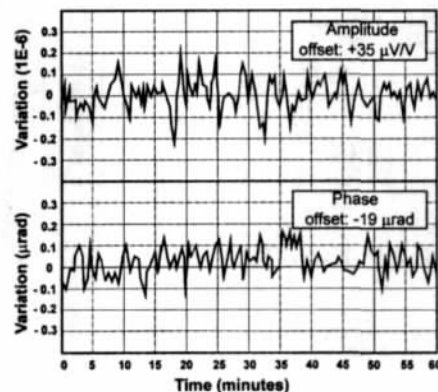


图4 输出 120V 时幅度和相位 60 分钟稳定度曲线

Fig.4 Amplitude and phase stability in 60 minutes

(2)谐波含量和失真:信号频率为62.5Hz,负载电流为5mA。

图5为放大器增益为20时测得的放大器输出电压谐波分布,测得的失真度为0.003%。若考虑输入电压本身的谐波失真(数字合成电压源输出信号失真度测量值为0.002%),可以计算出该放大器总的谐波失真

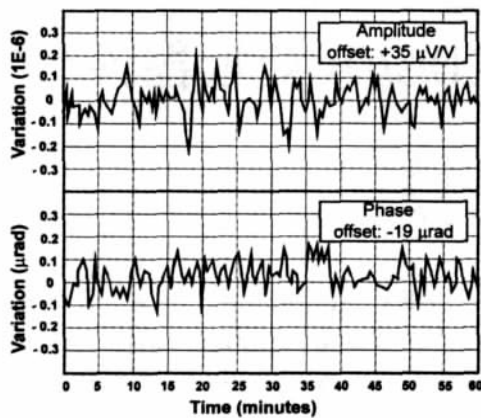


图 5 输出电压的频谱和谐波失真

Fig.5 The spectrum and distortion of the output

(THD)小于-93dB(0.0022%)。

(3)放大器其他指标如下：

小信号带宽: 5Hz~38kHz

输入电压: $V_i = 0.6V$ rms

输入电阻: $1M\Omega$ (60Hz)

输出电阻: $\sim 1\Omega$ (60Hz) $\sim 2\Omega$ (1kHz)

最大负载电容: $5nF$

4 结论

本文利用变压器升压原理和精密的电压反馈控制电路实现了一种实用的高压电压放大器,该放大器具有以下特点:

- (1) 超高的长期稳定度；
- (2) 极低的谐波失真；
- (3) 结构简单；
- (4) 所有电子运行在低电压状态(最高30V),可靠性高；
- (5) 极低的内部热量损耗；
- (6) 可以实现输出与输入之间完全电隔离；

(上接第 48 页)

4 结束语

本测试系统的研制采用 DSP 技术通过数字算法实现调制,控制放大器输出,仿真配电网现场运行的各种状态,具有体积小、功率大、效率高、负载特性好等优点。装置利用 GPRS 专网通讯或 RS232 串口实现了终端和网络表的检测。首次将检测多功能电能表、网络电能表、大用户终端、配变综测仪(配变终端)的功能融合在一起,为供电公司检测电力需求管理侧仪表提供了通用、高效、可靠的检测装置。

(7) 可利用计算机进行完全程控操作。

该放大器的不足之处是带宽受限于电压互感器,特别在大信号运行时,当信号频率太低(低于15Hz)易发生振荡,而在频率高时(如高于1kHz)稳定性有所下降。

参考文献

[1] P.Sankaran, P.kanagasabapathy, V.G.K.Murti, "Electronic Error- Compensation of a Voltage Transformers," IEEE Trans.on Instrum.Meas.,vol.28,pp. 86- 88,No.1, March 1979.

[2] W. G. K. Ihlenfeld, "A Simple, Reliable and Highly Stable AC- Voltage Amplifier for Calibration Purposes," IEEE Trans.on Instrum.Meas.,vol.54, pp.1964- 1967,No.5, October 2005.

[3] G. Ramm, H. Moser, and A. Braun, "A New Scheme for Generating and Measuring Active, Reactive and Apparent Power at Power Frequencies with Uncertainties of 5 ppm," CPEM 1998, Washington DC, USA, Conference Digest, Inst.EEE Inc, New York(1998),pp.283- 284.

[4] G. Ramm, H. Moser, and A. Braun, "A New Scheme for Generating Active, Reactive and Apparent Power at Power Frequencies with Uncertainties of 2.5×10^{-6} ", IEEE Trans. On Instrum. Meas., vol 48, pp. 422- 426, Apr. 1999.

[5] W. G. K. Ihlenfeld, Maintenance and Traceability of ac Voltage Ratios and ac Power by Synchronous Digital Synthesis and Sampling, PTB, Braunschweig, Germany, Report E- 76, 2001.

作者简介:

金宁(1967-),女,安徽休宁人,硕士,副教授,研究方向为智能控制仪表与通信技术,曾在德国联邦物理技术研究院(PTB)进修半年,从事电能检测与仪表的计量检定系统电路研究与设计工作。

Email:jinning1117@cjlu.edu.cn

W.G.Kürten Ihlenfeld(1960-),男,西班牙人,1997年在德国布伦瑞克技术大学获电子工程博士学位,研究方向为电路与系统、信号处理、数值计算与半导体器件建模,现在德国联邦物理技术研究院(PTB)从事高精度交流电功率测量电路与电能信号处理工作。

收稿日期 2009-02-02

(田春雨 编发)

参考文献

[1] GB/T 15148—94 电力负荷控制系统通用技术条件[S].

[2] DL/T535—93, 电力负荷控制系统传输规约[S].

作者简介:

刘水(1967-),男,高级工程师,主要从事电力系统自动化的开发研究工作。Email: liushuilijia@163.net

聂方明(1982-),男,主要从事电力测量技术工作。

李平(1962-),男,主要从事电力测量技术的研究开发工作。

收稿日期 2009-02-20

(杨长江 编发)