

一种大量程宽范围变频功率标准源的研究

摘要: 当前,变频技术已经获得了广泛使用,但是变频电量的计量却是空白。本文提出了一种用于计量和测试产品性能的大量程宽范围变频功率标准源的设计。采用 DDS 作为信号发生器,分别产生一定频率的电压信号和电流信号,信号控制全桥开关功率放大器,再驱动线性功率放大器,分别输出电压和电流,并对电压电流进行测量并反馈回控制器,用 PI 算法进行闭环控制,从而使功率源输出电压及输出电流的真有效值保持稳定。实验结果表明,系统运行稳定,电压电流输出精度高,达到了 0.1 级。

关键词: 功率标准源 变频 DDS

中图分类号: TM933 文献标识码: B

The research of a wide range frequency conversion standard power source

Liu Liangjiang¹ Chen Haowei² Peng Zhengliang¹ Wang Ning² Liao Zhongchi²

(1. Hunan Institute Of Metrology & Test, Changsha, 410014; 2. Hunan YINHE ELECTRIC CO. LTD, Changsha, 410073)

Abstract: Nowadays, frequency conversion technology is widely used, but the measurement of frequency conversion energy is blank. The paper presents a new design of wide range frequency conversion standard power source, which is widely used to measure and test product performance. Two DDS are used as signal generators, which individually generate voltage signal and current signal of certain frequency. The signal control switch mode power amplifier, which drive linear power amplifier, Then voltage and current are output. The voltage and current are measured and the signal are feed back to main controller, which control the output using PI arithmetic to keep the effective value of the output voltage and current steady. The experiment result shows that the system run stable and the precision of output voltage and current reached 0.1 grade.

Key words: standard power source, frequency conversion, Direct Digital Synthesizer

1 概述

当前,变频技术已经获得了广泛使用,但是变频电量的计量却是空白。变频功率标准源是提供精确稳定的变频交流电压、电流和功率信号的基础测量仪器,可用于校准各种电压、电流和功率仪表和传感器,在国民经济建设中发挥着重要的作用^[1-3]。用于计量和产品试验等领域的功率源对输出波形要求较高,要求输出完整的正弦波信号,对于正弦波的失真度有一定的限制。而用于电能表计量时,其功率源输出的不是真实的功率,而是利用产生“虚功率”的方法来实现电能的计量,并且要求这种交流功率源的频率、电流、电压、相位都能够独立调节^[4, 5]。

目前,国内外对变频功率标准源的报导不多,产品很少,仅有美国 fluke 公司宣称 6100B 可以作为变频功率标准源,但是其电压电流范围很小,频率范围也很窄。针对这一需求,本文按照 0.1 级标准设计的变频功率标准源如下:输出的频率范围 1~400Hz;输出电压范围 0~10000V;输出电流范围 0~500A;频率、电压、电流和相位能方便的设置,从而使得功率的大小和功率因数可调。

2 总体构成及原理

变频功率标准源采用传统的设计思想,利用产生“虚功率”的方法来实现变频功率的输出,所设计的系统如图 1 所示。系统以主控制器为核心,负责接收人

机界面输入的参数和采集电压、电流的实际输出值，经过计算后形成控制量分别输给电压和电流信号发生器。

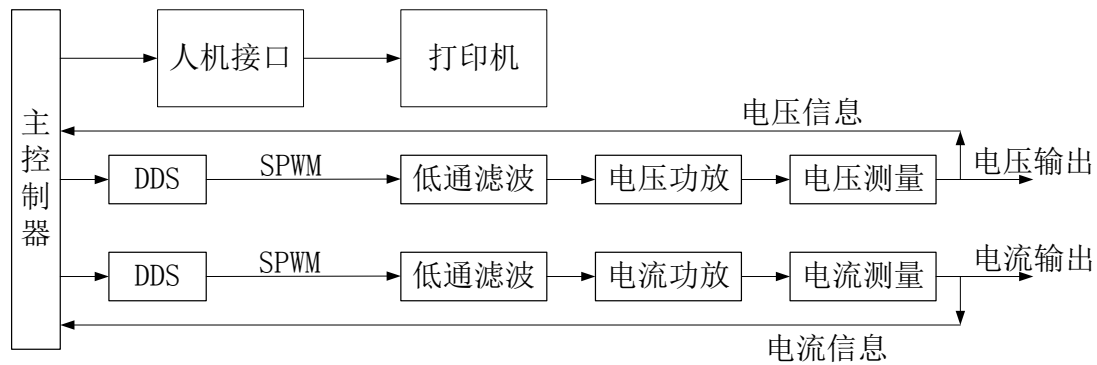


图 1 变频功率标准源原理图

其中，人机界面由按键、旋钮和液晶屏等组成，负责接收用户输入的设置参数和显示输出结果。电压、电流信号发生器接收主控制器的控制信号进而产生真实的电压、电流信号推动功放输出。

3 关键技术

3.1 精密频率控制技术

正弦波往往通过 SPWM 方式产生的，频率经过定时器分频。要产生 1Hz~400Hz 的频率，传统做法往往采用锁相频率合成的方法，其运算公式：

$$f_{vco} = f_0 \frac{M}{N} \quad (1)$$

式中 f_{vco} 为定时器需要的时钟频率， f_0 为系统的基准时钟频率。

由于传统的信号发生器都是采用模拟的方法实现，稳定性差、调试困难。本设计采用基于 DDS (Direct Digital Synthesizer) 技术的数字信号发生器，DDS 是近年来发展起来的一种新的频率合成技术，具有相对带宽很大、低成本、低功耗、高分辨率、快速转换时间（小于 20 ns）、频率切换时相位连续、可以产生任意波形、全数字化结构便于集成、可编程等优点。DDS 能够与计算机技术紧密结合在一起，克服了模拟频率合成和锁相频率合成等传统频率合成技术电路复杂、设备体积较大、成本较高的不足。本设计中采用 DDS 信号发生器极大地提高了变频功率标准源输出的灵活性和稳定性^[6]。

3.2 大电流功率放大器

传统的信号源一般采用模拟功放，效率低、可靠性差、带载能力不强，使其无法满足高电压或大电流的输出要求^[7,8]。D 类功放利用极高频率的转换开关电路来放大信号，具有效率高，体积小的优点。本文中，变频功率标准源采用了开关型 D 类功放+线性功放构成的复合功放作为功率输出，具有效率高、带载能力强、波形失真小等特点，极大地提高了功放这一易损部分的可靠性，其原理图 2 所示。通过输出端并联技术，使得变频功率标准源可以输出大至数千安培的电流。

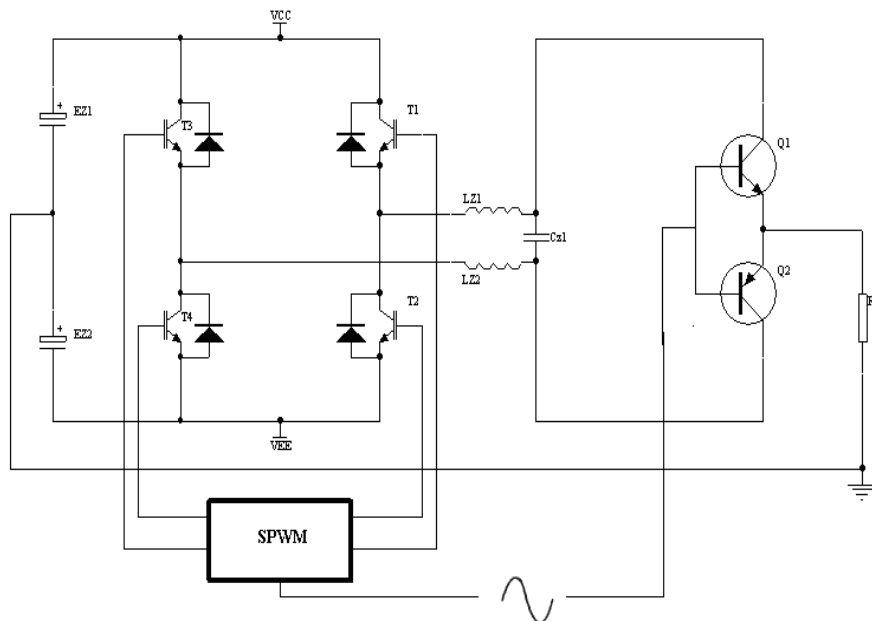


图 2 开关线性复合变频大电流输出功放原理图

图 2 中，T1~T4 是传统的全桥逆变电路，选用 IGBT 全控功率元件，Q1、Q2 线性调整管，选用 MOSFET 大电流调整管，Ez1、Ez2 是电容，Lz1、Lz2 是滤波电感，Cz1 是滤波电容，Ro 是负载。原理如下，全桥逆变电路采用 SPWM 逆变方式输出 SPWM 波，经过 Lz1、Lz2 和 Cz1 构成的低通滤波器滤除高次谐波后成为比较干净的正弦电压波，最后通过 Q1、Q2 线性放大输出电流。依靠 Ez1 和 Ez2 两个输入直流母线支撑电容的分压作用产生零位电压。

3.3 高电压功率放大器

目前交流稳压调压方式大致可以分为三种：一是机械调压稳压式；二是脉宽调制(PWM)逆变稳压方式；三是线性放大逆变方式。这三种工作方式各有优缺点：机械调压稳压式反应速度慢，且只能输出与市电频率一致的电压；脉宽调制(PWM)逆变稳压方式输出功率范围宽、效率高、输出电压中高频噪声和波形失真较大，不易实现电源的相位控制；线性放大逆变方式容易实现输出交流的高精度、高稳定性、反应速度快、但电源效率较低，实现大范围内电源调整需要输出电压分档。

本文采用了线性放大逆变方式，其主要特点是：采用新型功放模块主振放大式电路，电路全集成化、体积小、稳定性好、可靠性高。输出的交流电压、电流、频率均可程控或手控，并具有过载保护功能。通过输出端串联技术，使得变频功率标准源可以输出高达上万伏的电压。

3.4 精密相位控制技术

传统的方法是将正弦信号经离散抽样后再数字化，将数字化波形数据顺序放出来，经 D/A 电路还原成阶梯形信号，最后经过滤波器恢复成正弦信号。这种方法受波形抽样密度的限制，若要使相位调节精度 0.01° 时，须将一个正弦波形作 36000 次抽样，抽样率 $50\text{Hz} \times 36000 = 1.8\text{MHz}$ 。当频率为 400Hz，若要使调节精度为 0.01° 时，抽样率将达到 14.4 MHz。

此外，每个抽样点都要量化为二进制数据，必须考虑量化误差，因此对 D/A 的位数有一定要求。不难看出，对相位最为敏感的抽样点在过零点。当设计相位

调节细度要求为 0.01° 时, 因为 $\sin 0.01^\circ = 0.000175$, 而 $0.000175 \times 8192 = 1.4336$, 所以这时最少应采用 13 位以上的 D/A。本设计中采用 DDS 信号发生器产生电压电流信号, 其 D/A 远远超过 13 位, 采样速率也足以满足设计要求。

3.5 闭环控制技术

当用户将频率、电压、电流和相位参数输入系统, 系统经过计算向 DDS 波形发生器发出相应命令, DDS 波形发生器的输出经过功率放大器放大后为负载提供相应的电压、电流或功率。此时, 将负载上的电压或电流真有效值实时反馈给系统, 经过计算后调整指令以保持输出恒定并达到期望值, 实时的电压或电流通过人机界面被显示出来, 并可以保存。控制原理如图 3 所示。PI 控制具有原理简单, 易于实现, 适用面广, 控制参数相互独立, 参数的选定比较简单等优点, 因此控制算法采用传统的 PI 比例积分控制^[9]。

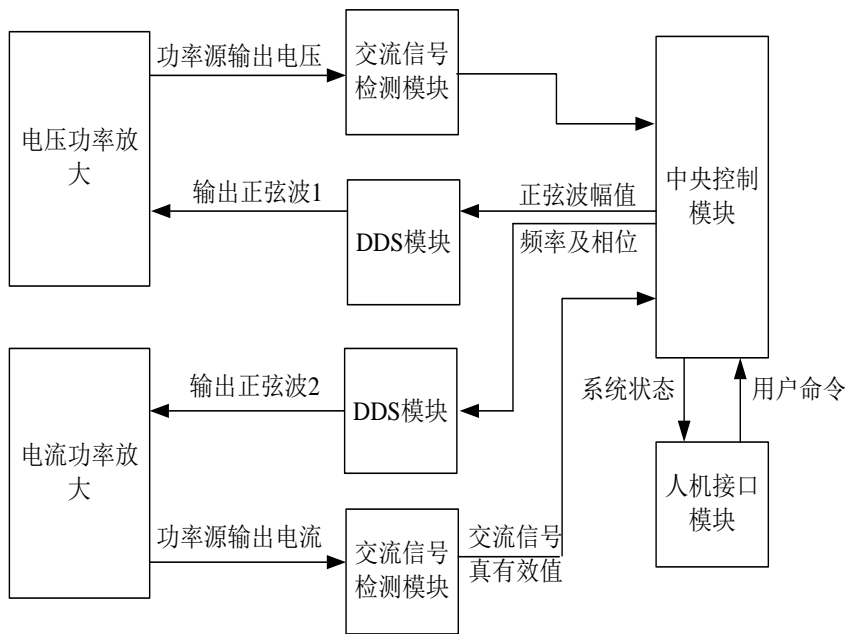


图 3 闭环反馈控制原理图

4 实验结果

按照设计的思路, 实际制作了一台样机, 为了验证功率源实际的效果, 采用银河电气 WP4000 进行了检测。结果符合 0.1 级, 以下是检测的部分参数。

表 1 交流电压测量结果 单位: V

仪器输出示值	实际值				
	10Hz	50 Hz	100 Hz	200 Hz	400 Hz
10.0000	10.00031	10.00035	10.00120	10.00057	10.00049
50.0000	50.0010	50.0017	50.0014	50.0016	50.0011
100.000	99.9991	100.0003	100.0002	100.0005	100.0001
220.000	219.9987	220.0012	220.0026	220.0014	220.0021
380.000	380.005	380.008	380.010	380.014	380.012
500.00	500.006	499.996	500.006	500.005	500.002
1000.0	999.977	999.992	999.993	1000.003	1000.005

表 2 交流电流测量

单位: A

仪器输出示 值	实际值				
	10Hz	50 Hz	100 Hz	200 Hz	400 Hz
1.00000	0.99997	1.00001	1.00004	1.00005	0.99999
10.0000	10.0000	10.0001	10.0004	10.0000	9.9998
50.0000	50.0012	50.0002	49.9913	49.9992	50.0007
80.0000	80.0020	80.0006	79.9856	79.9901	80.0015

5 结论

本文提出的大量程宽范围变频功率标准源设计方案,在湖南银河电气有限公司制作了样机,并进行了大量的试验。样机达到的指标为:输出频率范围 1~400Hz;输出电压范围 0~10000V;输出电流范围 0~500A;波形失真度小于 0.5%;相位分辨率 0.01°。样机试验表明,设计合理,样机运行稳定可靠。

参考文献

- [1] 唐浩,陈永泰.高性能程控三相交流功率源的研制[J].电测与仪表,2007,44(4):53-55.
- [2] 李桂祥,王隆刚.程控三相精密线性功率源的设计[J].电源技术应用,2002,5(3):66-68.
- [3] 肖永清.标准功率源中的精密相位调节技术[J].电测与仪表,2001,38(6):46-47.
- [4] 吕勇军.程控多功能三相功率源的设计[J].电源技术,2002,11:68-70.
- [5] 郑孟,杨毅,马皓.基于 TMS320F2812 的变频调压功率信号源设计[J].电源技术应用,2006,9(6):5-9.
- [6] 王洪全.基于插值 DDS 的程控功率源[J].电气时代,2008,1:106-107.
- [7] 史延东,王泊洋,宁飞.D 类功放开关电源的设计与实现[J].科学技术与工程,2011,11(11):2483-2487.
- [8] 王玉斌.新型功率运算放大器 PA05 及其在线性功率源中的应用[J].电测与仪表,2002,39(10):39-41.
- [9] 李恩政,王新亚,韩有华.三相标准功率源控制算法研究[J].仪表技术,2009,9:55-57.