

模拟电压控制电流源在谐波补偿上的应用研究

李伟国, 陈隆道*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为了提高供电可靠性和电能质量,设计了一种新型的小功率谐波补偿系统,该系统以模拟电压控制电流源(VCCS)作为主变换电路,通过对 DSP 输出的谐波信号进行倒相放大变换后重新注入电网,以达到消除电网谐波的目的。首先对整个谐波补偿系统的结构原理做了简要论述,然后对 VCCS 的直流、交流和温度等特性进行了重点分析,最后应用 Multisim 和 Matlab 进行了实验。研究结果表明,该系统可有效克服电力滤波器中电力电子器件非线性工作的缺点,同时其强稳定性及优良的时频响应特性,使其在小功率用电器谐波抑制领域具有良好的应用前景。

关键词: 运算放大器;电压控制电流源;谐波补偿

中图分类号:TM131

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2012)03-0365-04

Study of VCCS used in harmonics compensation device

LI Wei-guo, CHEN Long-dao

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to improve the power quality, a low-power system for harmonics compensation was proposed. The new equipment used a voltage controlled current source (VCCS) as the primary converter circuit. It made harmonic suppression by amplifying and reversing the harmonics signal acquired by the DSP, then feeding it back to the power grid. The structure and the principle of the system were introduced briefly while the DC, AC and the temperature characteristics of the VCCS were analyzed comprehensively. Simulation result with Matlab and Multisim demonstrates the advantages of the new system; it efficiently eliminates the nonlinearity inherited in the power electronic device used for power filter. Also its moderate stability and outstanding time-frequency response characteristic make it have a wide application in harmonic compensation with low-power.

Key words: operational amplifier; voltage-controlled current source(VCCS); harmonics compensation

0 引 言

目前,在解决电能质量问题的现行办法中,最常见的是使用电力电子控制器来提高供电可靠性和提高电能质量,特别是对有源电力滤波器(active power filter, APF)的研究,更是当前研究的重要领域^[1-8]。但是,APF有其自身难以克服的缺点,例如电力电子器件的非线性工作状态,使APF在补偿谐波的同时,自身也成为谐波源之一,且其成本较高,技术复杂,体积较为庞大,大多数适用于对配电网的集中补偿,而对小功率用电器进行单元补偿则会造成资源浪费。

模拟电路因其结构简单、成本低廉、体积较小、且元器件均工作在线性状态^[9-13],在进行小功率谐波补偿时有着极大的优势。本研究设计的基于模拟VCCS的谐波补偿装置,正是充分利用了模拟电路的这些特点,克服了电力电子控制器本身非线性不足,并通过优化组合,使该设备在频域和时域方面均达到谐波补偿的要求,在实际应用中取得了良好的补偿效果。

本研究首先介绍整个系统的结构原理,然后对主电路VCCS进行理论计算、元器件的选择和各种特性的分析,并以表格的形式给出谐波补偿效果,最后论述该设备的使用价值和研究意义。

收稿日期:2011-08-18

作者简介:李伟国(1982-),男,山东聊城人,主要从事谐波补偿和电能质量方面的研究。E-mail:liweiguook@sina.com

通信联系人:陈隆道,男,教授,博士生导师。E-mail:clongdao@vip.sohu.com

1 系统结构和原理

系统设计的主要目的是用来对单相小功率家用电器进行谐波补偿。该系统主要包括4部分:电流检测电路、谐波调理电路、DSP运算电路和压控电流源。其中,压控电流源电路为整个系统的主电路。

系统框图如图1所示。

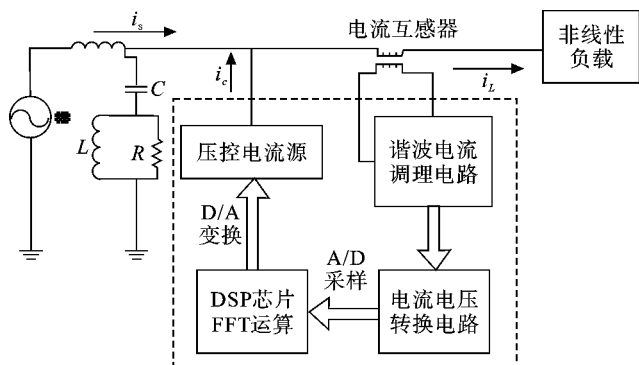


图1 系统框图

当电网标准正弦电压施加在非线性负载时,其电流会产生一定的畸变。在该装置中,本研究采用电流互感器和采样电阻组成的小电流检测电路(假设电流电压转换比为A),对输电线上的谐波电流进行实时检测,并将检测到的电流转换为小信号电压,该电压经过谐波调理电路(包括低通滤波器和A/D采样抗混叠电路)后,滤除高频谐波部分,将频带控制在1 kHz以内,经DSP的A/D电压采集通道,按照一定的采样速率对谐波进行数据采集,然后送入由DSP控制芯片所构造的数字滤波器进行滤波,消除基波后进行FFT反变换处理,得到的波形经D/A还原并送入压控电流源,压控电流源的电压电流转换比为1/A,且相移为180°,注入的波形经过倒相放大后通过电抗器注入电网,即可与电网中原谐波进行反向抵消,从而消除电网中的谐波污染。

从上述的原理分析中可知,压控电流源电路作为输入输出端口,其作用最为关键,也是整个装置的核心部分,其输出值的精确度直接影响谐波的补偿效果,下面对压控电流源电路的设计进行重点分析。

2 VCCS的理论分析

压控电流源的设计电路如图2所示。

其电路分为两部分,前一部分为电压跟随装置,其目的是减小电流并联负反馈对输入电阻的影响,增大装置的输入电阻;后一部分为主放大电路,采用电流并联负反馈来稳定输出电流,在输出级中采用互补放大电路的模式,实现了双极性输出的目的,使交流正负半波均得到放大。具体分析如下:

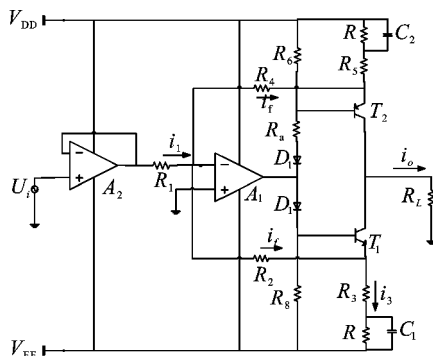


图2 压控电流源模型

在图2中,电阻 R_6 、 R_a 、 R_8 和 D_1 、 D_2 为三极管 T_1 、 T_2 提供了静态工作点,使三极管处于微导通状态。当正弦波电压 U_i 处于正半周时,即 $U_i > 0$ 时, T_2 管导通,根据文献[14]中对简单压控电流源的分析可得:

$$i'_0 = -u_i \left(\frac{R_4 + R_5}{R_1 R_5} \right) (u_i > 0) \quad (1)$$

同理可得,当 U_i 处于负半周,即 $U_i < 0$ 时, T_1 管导通,根据式(1)可得:

$$i'_0 = -u_i \left(\frac{R_3 + R_2}{R_1 R_3} \right) (u_i < 0) \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可知,只要电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 、 R_5 选取合适,输出电流 i_o 上、下半周将严格对称。

本研究假设运算放大器的最大正输出电压为 V_{OM} ,最大负输出电压为 $-V_{OM}$,则:

$$u_{i \max} = \frac{R_1}{R_2} (V_{BE} + V_{OM}) \quad (3)$$

$$u_{i \min} = \frac{R_1}{R_2} (V_{BE} - V_{OM}) \quad (4)$$

只有当 $u_{i \min} < u_i < u_{i \max}$ 时,才存在式(1)、式(2)的线性关系。受到电源电压 V_{DD} 的限制,输出电流最大值满足:

$$I_{O \max} < \frac{V_{DD}}{R_L} \quad (5)$$

在实际应用中,本研究要根据输出电流的大小和各电阻的取值,来保证控制电压在合理范围。另外,为了调整互补电路的静态工作点,本研究将 R_a 设置为可变电阻器,通过对 R_a 的调节,可使发射极静态电位 R_e 为0 V,即输出电压为0 V,以便消除交越失真的现象。

3 主要元器件的选择

在该装置的实际测试中,本研究采用典型的单相全控桥式整流电路作为谐波源模型,以常用的阻感负载(150 Ω 的电阻和200 mH的电感)模拟用电设备,根据傅里叶谐波检测法得到一个周期的谐波电流,如图3所示。

由图3可知,当电网电压经过整流桥和阻感负载

之后,返回到电网变压器二次侧的电流发生了严重畸变,当负载感性增强时,谐波电流波形近似为矩形波,在对谐波电流进行整周期采样后,由快速傅里叶变换(FFT)分析得到其频谱图,如图3所示。

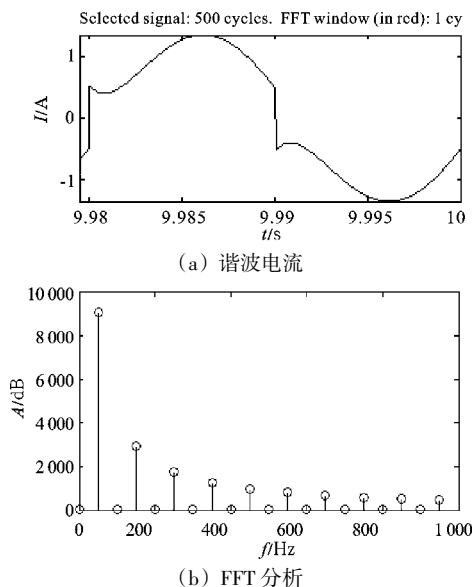


图3 谐波电流及其FFT分析

由分析可得,谐波电流通过前级谐波调理电路后,滤去了1 kHz以上的高次谐波,只保留了1 kHz以内的低频谐波,且只有奇次谐波,最高谐波电流幅值低于2 A。根据对谐波电流的分析,可以得出压控电流源的基本要求如下:输出功率20 W~50 W,输出电流0~2 A,输入电压0~100 mV,电路截止频率大于1 MHz,时域响应时间不大于2 ms。根据上述要求,在搭建电路时,本研究采用了通用型集成运算放大器LM741,其共模抑制比高达90 dB,且开环增益 $A_{ol}=200$ K,能够满足接入电流并联负反馈时 $A_f=1/F$,截止频率为1 MHz,瞬态响应时间0.3 μ s,以上指标完全满足系统要求。对三极管的选择,要求其集射极间有足够的耐压特性,以防止击穿,且温度系数要求较高,温漂反应低缓。根据这些要求,选择了3DG6D NPN型和A950 PNP型三极管结成互补放大电路,其 $U_{(BR)CEO}$ 均为30 V,且耗散功率相加为0.7 W,特征频率均在100 M以上,可以满足系统要求。

以上为主要元器件参数选择,为了提高三极管的放大系数,本研究采用10 μ F的电容 C_1 、 C_2 作为旁路电容,在实际电路中 ± 15 直流供电电源上采用了0.1 μ F的去耦电容,滤去高频干扰。为了保障电路的温度特性,在工作时稳定在可靠状态,还采用了OSH-4725C-MP小型散热来进行管温散热。

4 压控电流源的特性分析

4.1 直流工作点的选取

针对上述特定的补偿对象模型,从原理分析可见,

本研究所选的2个三极管在直流状态下均工作在微导通状态。取电路上半部分为例,假设三极管的基极电流此时为1 mA,且运算放大器为理想运放,当输入电压 $U_i=0$ 时,则输出电压 U_o 也为0,此时由欧姆定律可得:

$$(R+R_5)=\frac{15-0.7-0.7-U_{Ra}}{1\beta mA} \quad (6)$$

式中: β —三极管的电流放大倍数,此处假设 $\beta=50$, $R_a=0\sim 150\ \Omega$ 。

R 与 C_2 (10 μ F)旁路电容构成回路来提高放大倍数,选取 $R=200\ \Omega$,则 $R_5\approx 60\ \Omega$ 。二极管采用肖特基二极管,因其最大正向电流较大,在长时间使用时不容易损坏,为了减小二极管的耗散功率,取 $R_6=R_8=500\ \Omega$ 。上述取值为三极管选择了合适的静态工作点,只为理论值,实际电路还要根据环境要求适当变换。电路的下半部分分析与此类似,但是由于2个三极管的放大倍数不同,在电阻选取时也要适当变化。

4.2 交流特性分析

交流分析的主要任务是将一个或两个交流电源扫描过一定的频率,本研究将电路在直流工作点附近线性化,然后求出小信号电压或电流的幅度与相位的频率响应。在该装置中,由于从电流互感器检测出的电流很小,经过采样电阻和电压放大处理后基本在5 mV以内,又因为谐波电流基本在150 Hz~1 kHz范围内,该实验中采用5 mV、150 Hz和5 mV、1 000 Hz两路典型信号进行交流测试,对幅频特性、温度特性和波形畸变率分别进行测试。由于整个电路在0~10 kHz以内,均有良好的放大特性,150 Hz与1 000 Hz并无太大区别。下面给出0~10 kHz的仿真数据,如图4所示。

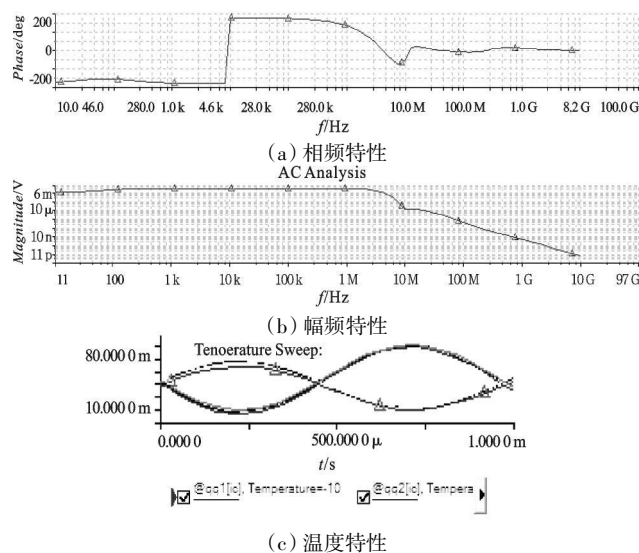


图4 电路的频率特性与温度情况

由于谐波补偿装置是针对一定带宽的谐波电流进行补偿,其输入信号一般都是周期性的非正弦复杂

信号,对电路的频率特性有着严格的要求,该电路的频率特性如图4(a)、图4(b)所示。由图4可见,在0~10 kHz的带宽中,电路的幅值放大倍数和相位均保持比较稳定,始终保持了等比例反相放大的功能,且保有很大的裕量,能够保证输入信号的稳定放大。

温度对于模拟电路来说是一个重要环境参量,由于温度变化而引起的温漂现象和三极管热击穿等问题,对整个电路的损害很大,严重时可使整个系统瘫痪,因此,本研究在设计电路时充分考虑了温度对电路的影响,并在-10℃~5℃以内对电路进行了温度特性分析,如图4(c)所示。由图4(c)可见,电流源输出波形随温度变化不大,温度特性较为稳定,并且为了使三极管基极电压稳定,本研究采用了二极管作为稳压管稳压的措施,保证了电路可靠工作。

波形畸变率也是该电路是否线性输出的重要指标,用来判断一定的波形通过放大电路后是否会因为噪声和干扰的影响而使波形发生畸变。本研究在该电路中通过对元器件的选择, THD_i 的计算和仿真结果为:

$$THD_i = \frac{I_H}{I_1} \times 100\% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\% = 0.020\% \quad (7)$$

式中: I_H —谐波含量, I_1 —基波。

可见,波形畸变非常轻微,各元器件均工作在线性区。

由以上对电路的直流分析和交流分析可见,该电路工作状态稳定,线性度良好,可以满足谐波补偿的要求。

5 实际应用

在整个系统设计中,本研究采用了基于霍尔原理的LA28-NP电流传感器,其原副边比为1 000:5,假如输入电流为1 A,则输出电流为5 mA,经过采样电阻转换后,得到0~100 mV电压。通过调理电路滤去1 kHz以上的高频谐波,在DSP的电压采集通道中,所用A/D转换器的输入电压范围为0~3.3 V,采集频率为500 kHz,同时在谐波调理电路中采用了累加升压和跟随反向信号预处理电路,解决了双向电流的A/D采样问题。通过模数变换后,进入由DSP所构造的数字滤波器进行滤除基波的处理,最后输出模拟谐波电压,经反相后注入电网。

本研究在Matlab/Simulink仿真中加入此补偿装置后,各次谐波含有量的变化如表1所示(注:实验中并未考虑电压波动和电压跌落等复杂情况)。由表1中数据可见,在谐波补偿之前,电流谐波含量为27.35%;经过谐波

补偿装置后,总的谐波含有量明显降低,补偿目的得以实现,此实验结果基本满足了文献[15]所给出的《家用和低压电器的谐波限制标准》,具有实际使用意义。

表1 各次谐波含量百分比

谐波次数	补偿前/(%)	补偿后/(%)
3次	8.93	2.75
5次	6.54	0.34
7次	4.82	0.42
9次	3.27	0.86
11次	1.79	0.75
13次	0.90	1.31
15次	0.63	0.21
17次	0.32	0.69
19次	0.15	0.40
THD_i	27.35	7.73

6 结束语

整个谐波装置中,谐波电流检测电路和DSP谐波计算电路与APF的设计思路基本相同,文中并未展开详细论述,只是主电路用模拟VCCS代替了以逆变器为主的电力电子电路,从而实现了谐波的线性变换,同时降低了电路控制的技术复杂度。

另外,在现代生活中,随着家用电器的不断增加,其造成的谐波污染早已与工业用电设备相当,传统的有源电力滤波器由于成本较高,不适合居民用户进行个人投资使用,而本研究介绍的谐波补偿装置则可以解决这一突出矛盾,将其安装在家用电器内部,既不会为用电设备带来额外负担,达到了对每个单元设备进行实时谐波补偿的目的,又可以为进行集中谐波补偿的有源电力滤波器减轻负担,提高了谐波补偿的效率,也更加改善了电能质量。因此,该装置具有良好的使用价值。

参考文献(References):

- [1] 胡 铭,陈 珩. 有源滤波技术及其应用[J]. 电力系统及其自动化,2000,24(3):66-70.
- [2] 李 承,邹云屏. 有源电力滤波器抑制谐波的机理分析[J]. 电力系统及其自动化,2003,27(20):31-34.
- [3] 时丽君,赵建国. 有源电力滤波器在电能质量控制中的应用[J]. 电力系统及其自动化,2002,14(1):67-71.
- [4] 韩静霖,李国峰,张 勇,等. 一种电压控制电流源的设计与应用[J]. 电子技术应用,2008,34(10):64-66.
- [5] 程浩忠. 电能质量讲座第七讲谐波标准及其管理[J]. 低压电器,2007(14):59-64.
- [6] 王 亚,李 鹏,徐立军. 一种单极性输入双极性输出压控恒流源[J]. 仪器仪表学报,2001,22(3):266-267.
- [7] 王兆安,杨 君,刘进军. 谐波补偿和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1998.

(下转第 372 页)