

# 基于有源功率因数校正的高功率因数电源设计

吴小斐,王归新,陶 鑫,莫显聪

(三峡大学 电气信息学院 湖北 宜昌 443002)

**摘 要:**构建有源功率因数校正(APFC)的高功率因数直流电源。该系统采用 TI 公司专用 APFC 整流控制芯片 UCC28019 作为控制核心,构成电压外环和电流内环的双环控制。其中内环电流环作用是使网侧交流输入电流跟踪电网电压的波形与相位;外环电压环为输出直流电压控制环,外环电压调节器的输出控制内环电流调节器的增益,使输出直流电压稳定。系统采用 ATmega16 单片机进行监控,完成输出电压的可调以及输入功率因数、输出电压、输出电流等的实时测量与显示和输出过流保护等功能。实测表明,系统性能指标完全达到或超过设计要求。

**关键词:**APFC;直流电源;UCC28019;ATmega16

**中图分类号:**TN710

**文献标识码:**B

**文章编号:**1004-373X(2010)02-195-03

## Design of High Power Factor Power Supply Based on Active Power Factor Correction

WU Xiaofei, WANG Guixin, TAO Xin, MO Xiancong

(Institute of Electrical Information, China Three Gorges University, Yichang, 443002, China)

**Abstract:** An Active Power Factor Correction (APFC) based on DC power supply with a very high AC power factor is constructed. The DC power supply takes UCC28019 made by TI company as the core of system control. The control structure of the system consists of an inner current loop and an outer voltage loop. The function of the inner current loop is to shape a sinusoidal AC input current waveform in phase with AC input voltage. The outer one is output DC voltage loop and the output of voltage regulator regulates inner loop gain to maintain a stable output DC voltage. ATmega16 MCU is adopted to implement the system monitoring, including output voltage adjustment, real-time sampling and displaying of operation parameters such as input power factor, DC output voltage and DC output current and the output over current protection. Experiment results show that performances of the system meet or better than the requirement.

**Keywords:** APFC; DC power supply; UCC28019; ATmega16

## 0 引 言

随着电力电子技术的发展,从 20 世纪 60 年代开始,电力电子装置大量出现和工业及生活领域。如整流装置、电子整流器等接到电网时,电网电流将产生非正弦畸变,导致电网电压产生畸变和高次谐波,影响其他用电设备、通信的正常运行,严重时还影响到发电设备的安全运行。因此,如何改善电力电子装置的输入电流波形和功率因数,成为电力电子产品开发需要考虑的重要因素。本文介绍一种基于有源功率因数校正(APFC)的高功率因数电源设计方案。

## 1 方案设计

### 1.1 理论分析

图 1 为单相升压型 PFC 基本电路<sup>[1]</sup>。PFC 工作方式分为不连续电流模式(DCM)和连续电流模式(CCM),DCM 缺点较为明显。该设计采用 CCM 方式。

电压外环和电流内环的双闭环控制<sup>[2]</sup>。电压控制器的输出是输入电流幅值指令  $I_m$ ,该指令与电网电压的整流信号相乘作为电流给定。因为电流给定是和电网电压信号波形成比例,所以电流给定信号与输入电压同相。电流内环使输入电流尽可能跟踪电流指令,最终的 PWM 驱动波形由电流控制器决定。由于电流内环的存在,驱动波形的占空比按正弦规律变化,使电感电流的平均值为正弦。故有时 CCM 方式也被称为平均电流控制方式。CCM 的输入电流畸变很小,动态响应也比 DCM 快得多。由于 CCM 方式的输入电流连续,所以同等输入功率时,CCM 方式比 DCM 的平均输入电流小,不像 DCM 那样有很高的峰值电流。相比较而言,CCM 的开关管电流应力小,适用的功率范围比 DCM 大。经过上述分析后,该系统采用 CCM 方式的升压型 PFC 电路。

### 1.2 方案设计

根据设计要求,输出电压范围在 30 ~ 36 V 之间稳定可调,输入电压低于输出电压,故系统前级采用 Boost 斩波电路升压,实现逆变器输入电压稳定。为降

收稿日期:2009-08-20

低网侧 EMI,在隔离变压器副边与整流桥之间接入 EMI 抑制网络。

系统控制采用 TI 专用 APFC 芯片 UCC28019,该控制系统包括电流内环和电压外环,其中电流内环的作用是控制网侧输入电流的波形和相位,使输入电流波形畸变小、功率因数高;电压外环的作用是控制输入电流的幅值,以使输出直流电压在各种扰动下保持期望值。

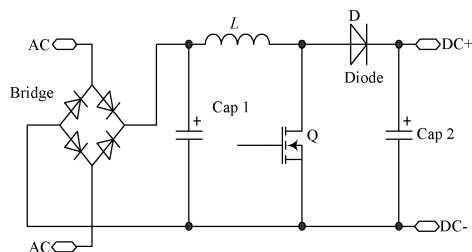


图1 单相升压型 PFC 基本电路

为实现输出电压的连续可调和系统参数的显示,采用 Atmel 公司 ATmega16 单片机进行系统监控。为使输出电压可调,由 PS2 键盘设定输出值,送入单片机。采用 8803 驱动的 240128 液晶显示器显示系统信息。

系统保护拟采用单片机控制的继电器过流保护与控制芯片的封锁保护双重保护方案。在检测到输出电流超过 2.5 A 时,单片机发出控制电平对 UCC28019 进行封锁并通过继电器断开主电路;当检测到输出电流正常时,电路恢复正常运行。

## 2 系统实现

### 2.1 控制方案分析及实现

主电路的输出直流电压信号  $V_{out}$  和基准电压  $V_r$  比较后,送入电压误差放大器 VEA,得到  $V_{comp}$  引脚电压,该电压决定了 GMI 网络的增益和 PWM 比较器的参考三角波的斜率<sup>[3]</sup>。输入电流经采样电阻转化为电压信号,此信号经放大器放大送入 GMI 网络以实现输入平均电流的采样,得到的信号与三角波进行比较得到特定占空比的 PWM 波。特定占空比的 PWM 波保持输出电压稳定。UCC28019 的控制框图如图 2 所示。

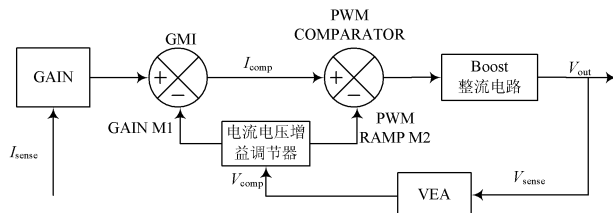


图2 UCC28019 的控制框图

### 2.2 主回路器件的选择及参数计算

#### 2.2.1 开关管的选择

在该设计中,最大输出电压为 36 V,开关管最大实

际漏源电流为 7.618 A,但是考虑到实际电压电流尖峰和冲击<sup>[4]</sup>,电压电流耐量分别取 2.5 和 2 倍裕量,故开关管的最大耐压应大于 90 V,最大导通电流应大于 15 A。基于上述要求,在此采用  $V_{ds} = 200\text{ V}$ ,  $I_d = 30\text{ A}$ ,  $R_{ds} = 85\text{ m}\Omega$  的 MOSEFT 管 IRF250,这完全满足设计要求。

#### 2.2.2 续流二极管的选择

由于该电路采用 Boost 拓扑结构,因此续流二极管的选择非常重要。在电路中受输出大电容的影响,续流二极管应满足最大整流电流大于 7.618 A,最大反向电压大于 72 V,受储能电感及开关管的影响,续流二极管的反向恢复时间要尽量小。鉴于此要求,这里采用 MOSEFT 中的反向快恢复二极管作为续流二极管,它的反向恢复时间完全达到设计要求,实际使用效果很好。

#### 2.2.3 电感的参数计算

该电路采用 Boost 拓扑结构,Boost 电路工作在电流连续工作模式(CCM)。根据 Boost 电路输出电压表达式,可得 PWM 占空比:

$$D = 1 - V_{in}/V_{out} \quad (1)$$

最大占空比  $D_{max}$  发生在输入直流电压最低(18 V)而输出直流电压最高(36 V)时候,最小占空比  $D_{min}$  发生在输入直流电压最高(23 V)而输出直流电压最低(30 V)时<sup>[5]</sup>,则根据电流临界连续条件求得电感值为:

$$L = \frac{V_{out} \times D \times \frac{1-D}{f_{sw(tye)} \times I_{RIPPLE}}}{\frac{36 \times 0.5 \times 0.5}{65 \times 0.2 \times 7.618}} = 90.85 \mu\text{H} \quad (2)$$

式中: $f_{sw(tye)}$  为 UCC28019 的振荡频率; $I_{RIPPLE}$  为输出纹波电流; $V_{out}$  为最大输出电压。实际绕制储能电感为  $108 \mu\text{H}$ 。

#### 2.2.4 输入滤波电容的参数计算

根据 Boost 电路的工作特点,输入电容的作用为滤除由储能电感、整流电路产生的高次谐波,则有:

$$C_{in} = \frac{I_{RIPPLE}}{8 \times f_{sw} \times V_{in\_RIPPLE(max)}} = \frac{0.2 \times 7.618}{8 \times 65 \times 0.06 \times \sqrt{2} \times 15} = 2.302 \mu\text{F} \quad (3)$$

式中: $f_{sw}$  为 UCC28019 的振荡频率; $V_{in\_RIPPLE(max)}$  输入纹波电压; $I_{RIPPLE}$  为输入峰值电流。实际输入电容采用  $2.2 \mu\text{F}$ 。

#### 2.2.5 输出电容的参数计算

考虑到输出直流电压纹波等,滤波电容计算如下:

$$C_{out(min)} = 2 \times P_{out} \times \frac{t_{HOLD1TP}}{V_{out}^2 - V_{out\_HOLDUP(min)}^2}$$

$$= \frac{2 \times 72 \times 20}{36^2 - 30^2} = 7\,272.7 \mu\text{F} \quad (4)$$

式中:  $P_{\text{out}}$  为最大输出功率,  $V_{\text{out}}$  为最大输出直流电压,  $V_{\text{out\_HOLDUP(min)}}$  为最低输出直流电压,  $t_{\text{HOLD}}$  为交流电的周期。实际输出电容采用  $8\,000 \mu\text{F}$ 。

## 2.3 其他器件参数计算

### 2.3.1 电流取样电阻的参数计算

输入电流检测信号送到 UCC28019 的 ISENSE 脚, 其内部最低门槛电压为  $0.66 \text{ V}$ , 而软过流保护要求在最大峰值电流的  $125\%$ , 则取样电阻计算:

$$R_{\text{sense}} = \frac{V_{\text{SOC}}}{I_{\text{L\_PEAK(max)}} \times 1.25} = \frac{0.66}{8.379\,8 \times 1.25} = 0.063 \quad (5)$$

实际采用康铜丝作采样电阻, 实际取值  $0.055$ , 略小于理论计算阻值。

### 2.3.2 UCC28019 其他外围器件参数的计算

UCC28019 其他外围器件参数的计算如下:

$$C_{\text{I\_COMP}} = \frac{\text{GMI} \cdot M_{\text{I}}}{K \times 2 \times f_{\text{I\_AVG}}} = 910 \text{ pF} \quad (6)$$

实际采用  $1\,000 \text{ pF}$ , 其他器件选用如下:

$$C_{\text{V\_COMP}} = 4.7 \mu\text{F}, R_{\text{V\_COMP}} = 36 \text{ k}, C_{\text{V\_COMP}} = 0.22 \mu\text{F},$$

$$C_{\text{V\_INS}} = 0.47 \mu\text{F}$$

其主电路电路图如图 3 所示。

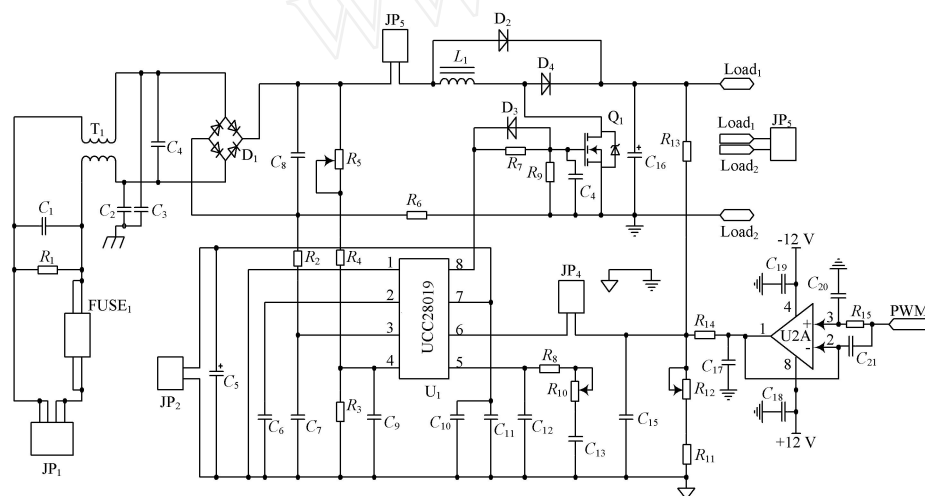


图 3 主电路电路图

## 2.4 保护电路的设计与辅助电源的设计

### 2.4.1 输出过流保护电路的设计

系统采用 UCC28019 芯片内部的封锁功能和继电器实现过流保护。当单片机检测电路过流并控制芯片 Icomp 引脚的电平, 使 Boost 电路停止工作, 但此时电路的输出电压依然为整流后  $23 \text{ V}$  左右的电压, 依然可能存在大电流, 对整个系统有很大的潜在威胁。因而, 该系统在主电路中还加入继电器保护电路, 切断主回路, 达到保护自身电路和负载的功能。

### 2.4.2 辅助电源的设计

辅助电源对整个系统的工作十分重要, 该系统采用三端稳压芯片设计。电路设计简单, 三端稳压构成的线性电源纹波小, 输出电压稳定, 抗干扰能力强。辅助电源输出为  $+12 \text{ V}$ ,  $\pm 15 \text{ V}$ ,  $5 \text{ V}$ 。

### 2.5 数字设定及显示电路设计<sup>[6]</sup>

该系统中采用 PS2 键盘通过 PS2 协议与单片机进行串行通信, 接口简单, 易于实现。为了更好的美化显示界面, 采用控制器为 RA8803 的  $240 \times 128$  带国标字库液晶显示器。液晶显示器通过并行数据总线与单片机进行通信。

## 3 软件设计

软件部分采用 Atmel 公司生产的 AVR 系列单片机 ATmega 16 作为主控芯片。对硬件电路的相关参数进行测量同时参与输出电压的调节<sup>[7]</sup>, 实现数控可调电压输出。对于功率因素等相关参数的测量, 采用霍尔元件传感器为主要检测器件的硬件检测电路, 得到相关数据通过 A/D 送入单片机进行软件算法处理, 最终得到想要的数送到液晶显示; 对于实现输出电压可调, 这里通过键盘设置给定值, 经单片机输出 PWM 波后二次滤波转化为最终的给定模拟量, 再将模拟量送到电压环的外接器, 实现输出电压稳定可调, 见图 4。

## 4 结果及性能分析

### 4.1 误差分析

在测试过程中, 测试电流失真度为  $4.7\%$ , 同时发现实验室市电电压的失真度达到  $2\%$ , 这直接导致所测的电流失真度偏高。另外, 地线干扰以及信号线过长所带来的干扰对整个系统都有一定的影响。

### 4.2 方案的优化与改进

电路工作时, 交流电经桥式整流后并不能得到很平滑的波形, 仍存在一定的误差。而 UCC28019 内部工作原理是: 电流调节为平均电流采样模式, 跟踪电压波形的电流波形经滤波放大后与三角波比较, 所以整流后失真电压波形引起纹波误差, 这个误差将导致输出 PWM 波误差。若芯片在设计上能将此误差考虑在内, 设计效果会更佳。

## 5 结 语

本文介绍了一种高功率因数电源的设计方案, 其成  
(下转第 200 页)

3 A 时,输出线电压有效值应保持在 36 V,误差的绝对值小于 5%。

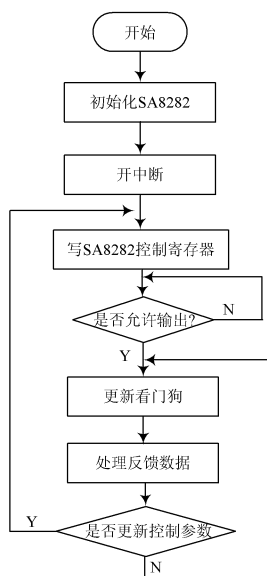


图3 控制程序流程图

在利用单片机和集成芯片配合产生 SPWM 波形控制逆变开关的通断,控制算法更加容易实现编程,使得系统结构简单,控制精度高,可靠性强,同时参数修改容易、编程任务少,单片机的处理任务大为减轻。并且,由于可通过 SA8282 对三相输出电压分别进行调整,可在

存在三相不平衡负载的场合中得到应用。

#### 参考文献

- [1] 刘凤君. 正弦波逆变器[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [2] 张颖超. 高精度三相 PWM 波形产生器 SA8282 在逆变器中的应用[J]. 国外电子元器件,2000(9):3-5.
- [3] 赵良炳. 现代电力电子技术基础[M]. 北京:清华大学出版社,1999.
- [4] 肖金球,虞娟,顾新. 基于 89C51 和 SA8282 的 PWM 中频逆变电源的研制[J]. 苏州科技学院学报,2003,16(3):82-86,90.
- [5] 刘和平. PIC16F87x 单片机使用软件与接口技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2002.
- [6] 徐维祥,刘旭敏. 单片机原理与应用[M]. 大连:大连理工大学出版社,1996.
- [7] 陈国呈. PWM 变频调速及软开关电力变换技术[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [8] 李宏. 电力电子设备用器件与集成电路[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
- [9] 刘茂荣,郭佐,姚中之,等. 三相 PWM 产生器 SA8282 在静止逆变电路中的应用[J]. 电力电子技术,1999,33(5):29-31.
- [10] 王兆安,黄俊. 电力电子技术[M]. 4 版. 北京:机械工业出版社,2000.

作者简介 罗惠谦 男,1957 年出生,湖北武汉人,副教授。研究方向为微机控制技术、汽车电子、电力电子技术。

秦凡 男,1985 年出生,湖北洪湖人,硕士研究生。研究方向为电工理论与新技术。

(上接第 197 页)

本和效率和普通的开关电源差不多,但实现了功率因数校正的功能,使电流波形畸变小于 5%和功率因数高达 0.998。是一种较为理想的 PWM 整流方案。

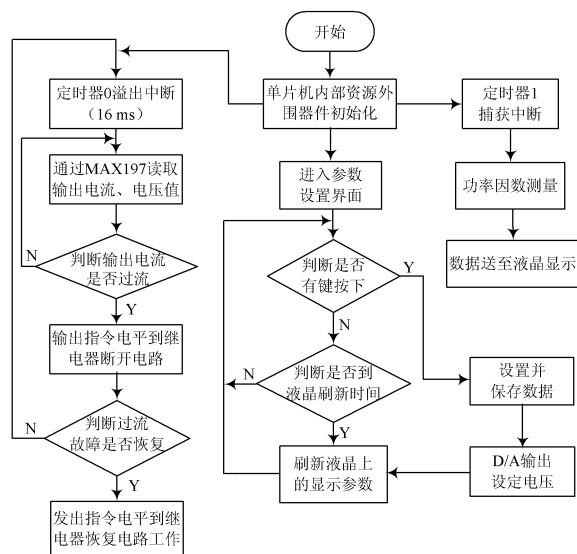


图4 系统软件流程图

#### 参考文献

- [1] Abraham I Pressman. 开关电源设计[M]. 2 版. 王志强,译. 北京:电子工业出版社,2008.
- [2] 李永建,糜晓宇,凌跃胜,等. 关于 Boost 型 APFC 电路最大功率因数的讨论[J]. 河北工业大学学报,2007(6):32-36.
- [3] 施保华. 计算机控制技术[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2007.
- [4] 田一华,王晓华,鲁俊环. 单相 Boost 型 APFC 电路的设计及仿真研究[J]. 佳木斯大学学报:自然科学版,2008(6):733-735.
- [5] 曲学基,王增福,曲敬锐. 稳定电源实用电路选编[M]. 北京:电子工业出版社,2003.
- [6] 高吉祥. 全国大学生电子设计竞赛培训系列教程——模拟电子线路设计[M]. 北京:电子工业出版社,2007.
- [7] 黄志伟. 全国大学生电子设计竞赛系统设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2006.
- [8] 罗佳明,戴庆元. 开关电源 PFC 控制芯片电路和应用分析[J]. 电子器件,2007,30(4):1204-1207.