**单相AC-DC变换电路**

**摘要：**本系统由单相PWM整流电路级联Buck变换电路构成，以STM32F407ZGT6单片机为整流电路和Buck变换电路的控制器，实现单相AC-DC变换。整流控制器采用数字锁相环获取电网电压相位，利用dq变换进行解耦，并通过PI控制算法控制整流器的电流幅值及相位稳定。使用PI控制算法控制Buck变换电路的输出电压。该电路输出电压稳定，在额定工况下，负载调整率和电压调整率均小于0.1%，整机效率可达95.64%，输入侧功率因数可达0.998，并且可在0.80~0.998范围内可调。同时系统具有过流保护和友好的人机交互功能。

**关键词：**PWM整流电流解耦 功率因数校正 坐标变换

# 方案论证

## 比较与选择

### 整流器拓扑选择

方案一：不控整流电路级联Boost PFC电路。不控整流电路结构简单，响应迅速，方便整体电路的控制。但是整流二极管通态损耗大，整体效率低。

方案二：PWM整流电路级联Buck电路。电路拓扑结构更为复杂。但是稳定性好，功率因数可以更稳定地控制，同步整流开关损耗远小于整流二极管通态损耗效率更高。

综合考虑，为了提升控制的稳定性和效率，选择方案二。

### 驱动的选择：

方案一：带隔离的驱动。此种方案将主电路与控制电路隔离，虽然稍微提升了系统的功耗，但是可以使得系统可靠性显著提高。

方案二：不带隔离的驱动。此种方案没有隔离，虽然电路复杂度小，但是牺牲了一定的稳定性，在特殊工况下容易损坏。

综合比较，为提升系统的稳定性，选择方案一。

## 系统总体方案描述

系统包括单相整流器、Buck变换电路、辅助电源、驱动电路、测量电路以及单片机控制电路和显示电路。整流电路使用PWM整流电路方案，采用dq坐标变换和PI控制器进行相位控制，可以实现单相整流和功率因数调节，输出稳定直流电。后级Buck变换电路使用PI控制算法实现电压电流双闭环，输出稳定的低压直流电。显示电路提供良好的人机交互界面，可以实时监控输入的单相线电压及线电流，

系统总框图如图1所示：



图1 系统总框图

# 二.理论分析与计算

## 2.1 提高效率的方法

系统的损耗主要包括开关管的开关损耗、导通损耗，电感铜耗、铁耗，电容等效电阻等无源器件的损耗。因此提高效率应尽可能减小这些因素的损耗。

1. 减小开关管开关损耗的方法

选择合适的开关频率：过高的开关频率会增大开关管的损耗，但开关频率过低则会增大滤波电感的体积和重量。综合考虑，开关频率取20kHz。

选择合适的开关管：开关管会有开关损耗，结电容和电路分布电感影响其开关损耗。因此开关管的反向恢复电容尽量小。

1. 减小开关管导通损耗的方法

选择合适的开关管：开关管的导通电阻影响其导通损耗，因此开关管导通电阻越小越好。但开关管的寄生电容和导通电阻参数矛盾，二者往往不能同时最小，需折衷考虑。

1. 减小无源器件损耗的方法

选择合适的电感：电感太小，电流谐波抑制能力差；电感太大，铜耗大。因此需选择大小合适的电感。同时，电感设计时应适当降低电流密度和磁通密度，减小损耗。选择电容时应采用并联多个小电容等方法，使等效串联电阻尽量小。

# 三.电路与程序设计

## 3.1 主回路与器件选择

### 3.1.1主电路设计与器件选型

该主电路采用 PWM 全桥整流电路，级联Buck降压电路。系统主电路原理图如图3所示。



图2 主拓扑电路图

（2）直流电容参数计算

当单相PWM整流器的输入功率因数为单位功率因数时，直流母线电压存在二倍基波频率的纹波。为了抑制直流母线上的纹波，需要设计合理的直流母线电容。

经过计算，直流电容的大小至少为



其中，极限情况下，则有



其中，为输入电压，为输入电流，为输入电压角频率，为输出直流电压，为输出直流电压允许的最大波动。

代入参数计算可得电容C = 1892 uF，实际中留取裕量，电容取值为 2000 uF。

（3）输入交流侧电感参数计算

交流侧电感的设计主要考虑两个因素：一是输入电流的跟踪性能；二是其对输入电流波动的抑制作用。它们分别决定了电感取值的上下限。

经过计算可得，电感大小的取值范围是：



其中，为输入电压幅值，为输出直流电压，为开关周期，为允许的最大电流波动，为输入电压角频率。

代入参数计算得，电感*L* = 813 uH，实际中留取裕量，电感取值为1 mH。采用铁硅铝磁粉芯和4股并绕的0.5 mm漆包线线绕制电感。

（4）开关管的选择

开关管承受电压和导通电流为整流器输出电压和电流，分别为50V和2A，开关管选取时应留有余量。同时为减小系统的损耗，需综合考虑开关管的开关损耗和通态损耗，最终选择英飞凌公司的IRF540NPbF，其最大耐压100V，可导通7.5A电流，其导通电阻为44m，输入电容为1960pF，输出电容为250pF。

### 3.1.2 电压电流测量电路设计

电压测量电路选用隔离运算放大器AMC1200，该芯片具有差分输入输出，自带偏置的优点，其输出经分压、跟随器和滤波后输出电压测量信号，测量精度高，线性度好。



图3 电压测量原理图

电流测量电路选用ACS712霍尔电流芯片，该芯片具有隔离效果，导通电阻仅8mΩ，对主电路影响小。芯片输出信号经分压和电压跟随器后输出电流测量信号，可同时测量直流和交流电流，精度高。



图4 电流测量原理图

### 3.1.3 驱动电路设计

驱动电路以IR2110为主要芯片，该芯片可通过自举原理驱动桥臂的上管，实现半桥驱动，通过栅极电阻减小因开关管栅源寄生电容产生的振铃现象，在电阻上并联二极管加快放电速度。原理图如下：

图5 驱动电路原理图

## 3.2 控制电路与控制程序

该控制系统采用电流解耦双闭环控制。

经过分析，单相PWM整流器的数学模型可以表示为

为了提升整流器的控制性能，需要对、进行解耦。解耦后的控制方程为：。

单相PWM整流器闭环控制框图如图所示，

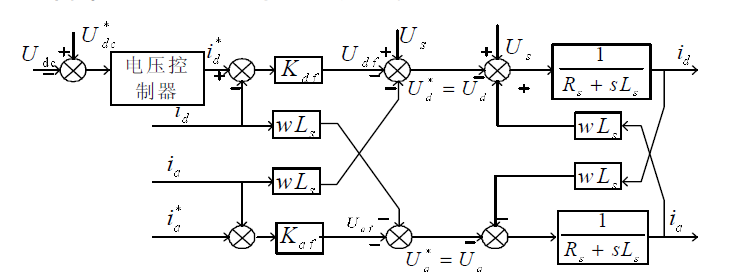


图6 电流解耦双闭环系统框图

### 3.2.4 输出过流保护程序设计

如果系统输出电流超过2.5A，就会触发过流保护程序，关断驱动信号，以及后级的驱动和输出。

在ADC初始化完成后，对输出电流进行检测，如果检测到过流情况就会立刻关闭驱动信号和后级输出，从而实现系统过流保护。4s之后尝试恢复电路，系统继续判断是否过流，是否继续保护。

# 测试方案与测试结果

## 4.1 测试方案和测试条件

### 4.1.1 测试方案

（1）调节变压器，使交流输入电压*U*S=24V，通过调节负载使得直流输出电流*I*o=2A，用功率分析仪测定输入侧交流电压、电流、功率因数，用万用表测定输出侧直流电压、电流，计算效率η。

（2）通过调整负载以改变输出电流*I*o，使*I*o在0.2A~2.0A变化，测量输出电压*U*o，计算负载调整率。

（3）通过调整变压器以改变交流输入线电压*U*S，使*U*S在20V~30V之间变化，测量输出电压*U*o，计算电压调整率。

（4）在空载输出电压*U*o=36V时，接入20Ω电子负载，逐渐降低负载阻值以提升电流，观察过流保护动作。

（5）通过键盘向系统输入设定的功率因数值，在0.90~1.00之间等间距增加，由功率分析仪测量输入侧功率因数并与设定值相比较。

### 4.1.2 测试仪器

自耦变压器、隔离变压器、手持万用表CA5212、功率分析仪PW3390-03

## 4.2 测试结果及其完整性

### 4.2.1 正常工作下输出端口测试

测试条件：输入交流电压*U*S=24V，测量输出直流电压、直流电流、输出侧功率、输入侧功率因数并计算系统效率。

表1 正常工作下输出端口测试结果记录表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 输入电压  *U*S/V | 输出电流  *I*o/A | 输出电压  *U*o/V | 系统效率  η | 输入侧功率因数 |
| 24 | 2 | 36.01 | 95.64% | 0.98 |

由上表可知输出直流电压满足要求。

### 4.2.2 负载调整率测试

测试条件：*U*S=24V，输出电压*U*o=36V，输出电流*I*o在0.2A~2.0A变化，记录输出电压并计算负载调整率。式中*U*o1为*I*o=0.2A时的直流输出电压，*U*o2为*I*o=2.0A时的直流输出电压。

表2 负载调整率测试结果记录表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 输入电压*U*i/V | 输出电流*I*o/A | 输出电压*U*o/V |
| 23.995 | 0.201 | 36.01 |
| 23.991 | 0.813 | 36.01 |
| 24.013 | 1.207 | 36.01 |
| 24.011 | 1.603 | 35.99 |
| 23.997 | 2.016 | 36.00 |



由上表可知负载调整率小于0.5%。

### 4.2.3 电压调整率测试

测试条件：输出电流*I*o=2A，输入交流电压*U*S在20V~30V之间变化，输出电压*U*o=30V，记录输出直流电压*U*o并计算电压调整率。*U*o1为*U*s=20V时的直流输出电压，*U*o2为*U*s=30V时的直流输出电压。

表3 电压调整率测试结果记录表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 输出电流*I*o/A | 交流电压*U*S/V | 输出电压*U*o/V |
| 2.01 | 20.08 | 35.99 |
| 2.00 | 23.98 | 36.01 |
| 2.02 | 26.97 | 36.02 |
| 2.01 | 30.09 | 36.02 |



电压调整率小于0.5%。

### 4.2.4 过流保护测试

测试条件：在空载输出电压*U*o=36V时，接入20Ω电子负载。逐渐调低负载阻值。观察到输出在*I*o=2.51A时关断。断开电子负载，等待4s后电路恢复工作。再次接入负载，观察到电路立刻关断，动作时间不大于 100ms。

### 4.2.5 自动调整功率因数功能测试

测试条件：通过键盘设定功率因数在0.80~1.00之间，在功率分析仪上读取并记录功率因数。

表4 自动调整功率因数功能测试结果记录表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 设定功率因数 | 实际功率因数 | 误差绝对值 |
| 0.80 | 0.801 | 0.001 |
| 0.85 | 0.849 | 0.001 |
| 0.90 | 0.902 | 0.002 |
| 0.95 | 0.951 | 0.001 |
| 1.00 | 0.998 | 0.002 |

由上表可知功率因数误差绝对值不大于0.03。

## 4.3 测试结果分析

通过测试可知，本系统在额定工作条件下输出直流电压稳定，负载调整率与电压调整率都低至0.5%，系统能够实现功率因数可根据设定值调节，且功率因数测量显示准确，同时变换器效率高达95.64%。

# 总结

本系统实现了单相 AC-DC 变换电路。该电源系统工作在额定输入交流电压下输出直流电压稳定，负载调整率与电压调整率均低至0.1%，输出直流电压失真度≤0.1%，额定功率下系统整体效率高达95.64%。可以自校正或手动调整功率因数，调整范围为0.8~1.00，实际最大功率因数可达 0.998。同时系统具备过流保护功能，当输出电流超过阈值后，可以在100ms以内关闭电路输出。