**三相AC-DC变换电路**

**摘要：**本系统由三相整流电路级联Buck变换器构成，以STM32F407VET6单片机为逆变器和整流器的控制器，实现三相AC-DC变换。整流控制器采用数字锁相环进行锁相，利用dq变换及PI控制算法控制整流器的电流幅值及相位稳定。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95.2%，输入侧功率因数可达0.998，并且可在0.90~1.00范围内可调。同时系统具有过压过流保护和友好的人机交互功能。

**关键词：**PWM整流同步锁相 功率因数校正

# 方案论证

## 比较与选择

### 整流器拓扑选择

方案一：不控整流级联Boost电路与PWM全桥逆变电路。不控整流电路结构简单，响应迅速，输出稳定，方便整体电路的控制。

方案二：Boost PFC电路级联PWM全桥逆变电路。采用UCC21089进行Boost PFC的控制，但Boost PFC的整流二极管通态损耗大，效率低。

综合考虑，为了使控制更加稳定，选择方案一。

### 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，使得系统可靠性提高，但是却需要额外的隔离电源，驱动的功耗大。

方案二：不带隔离的驱动。此种方案没有隔离，虽然系统稳定性和安全性稍弱，但是大大简化了电路的设计，驱动的功耗小。

综合比较，为减小系统的复杂度并提高系统效率，选择方案二。

## 系统总体方案描述

系统包括三相整流器、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。本系统采用 控制法进行均流，可实现三相整流以及功率因数调节，输出稳定的直流电，辅助电源电路为驱动电路、测量电路、控制电路等供电，主机电路利用PID控制器进行电压闭环，输出稳定电压，从机电路利用dq坐标变换和PID控制器进行锁相及电流闭环，达到均流目的。显示电路提供良好的人机交互界面，可以实时监控输入的三相线电压及线电流，

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、导通损耗和电感铜耗、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48kHz。

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。因此开关管的输入电容和输出电容尽量小。

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。选择电容时应使等效串联电阻尽量小。

## 2.2 功率因数调整方法

## 2.3 稳压控制方法

# 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

该主电路采用不控整流电路，后级接入一个Boost升压电路，再后接一个PWM全桥逆变电路。并联的直流储能电路经继电器控制接入Boost电路输入端。系统主电路原理图如图3所示。



图4 主拓扑电路图

代入参数计算得，电感*L*=1.35mH，实际中留取裕量，电感取值为1.5mH。采用铁硅铝磁粉芯和2股并绕的0.7mm漆包线线绕制电感。

（2）直流电容参数计算

（3）输入交流侧电感参数计算

（4）输出交流侧电容参数计算

（5）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5 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6 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7 驱动电路原理图

## 3.2 控制电路与控制程序

### 3.2.1 Boost电路控制程序设计

图8 Boost电路控制程序框图 图9 逆变器电路控制程序框图

### 3.2.2 逆变器控制程序设计

### 3.2.3 自动切换直流供电程序设计

图10 自动切换直流供电程序框图 图11 输出过流保护程序框图

### 3.2.4 输出过流保护程序设计

如果系统输出电流超过1.2A，就会触发过流保护程序，关断驱动信号，同时控制继电器断开从而实现保护。

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，断开继电器，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，使交流输入线电压*U*i=28V，通过调节负载使得直流输出电流*I*o=2A，用三相功率分析仪测定输入侧交流线电压、相电流、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0.1A~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*i，使*U*i在23V~33V之间变化，测量输出电压*U*o，计算电压调整率。

（4）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、三相功率分析仪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：输入交流电线电压*U*i=28V，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*i/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 |
| 35.98 | 0.998 | 30.01 | 49.99 |  |

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*i=28V，输出电压*U*o=36V，输出电流*I*o在0.1A~2.0A变化，记录输出电压并计算负载调整率。式中*U*o2为*I*o=2.0A时的直流输出电压，*U*o1为*I*o=0.1A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 |
| 25.995 | 0.101 | 30.01 |
| 23.991 | 0.413 | 30.01 |
| 24.013 | 0.607 | 30.01 |
| 24.011 | 0.803 | 29.99 |
| 23.997 | 1.016 | 30.00 |

由上表可知负载调整率小于0.3%。

### 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*i在23V~33V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=23V时的直流输出电压，*U*o2为*U*s=33V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*i/V | 输出电压*U*o/V |
| 1.01 | 36.02 | 29.99 |
| 1.00 | 35.98 | 30.01 |
| 1.02 | 35.97 | 30.02 |
| 1.01 | 35.99 | 30.02 |

电压调整率小于0.3%。

### 4.2.4 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0.90~1.00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 |
| 0.90 | 1.421 |  |
| 0.92 |  |  |
| 0.94 |  |  |
| 0.96 |  |  |

由上表可知误差绝对值不大于0.02

## 4.3 测试结果分析

通过测试，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0.3%，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96.1%。

# 总结

本系统实现了单相在线式不间断电源系统。该电源系统工作在额定输入交流电压下输出交流电压稳定，负载调整率与电压调整率均低至0.1%，交流电源供电状态下输出交流电压失真度≤0.1%，断开交流电源后可以即时切换至直流供电，输出交流电压稳定，直流供电下额定功率下系统效率高达90.64%，同时系统具备过流保护功能。