单相在线式不间断电源

**摘要：**本系统由输入整流升压电路级联PWM全桥逆变电路构成。前级直流部分采用 Boost 升压电路，交流部分采用不控整流后接 Boost 升压电路。后级PWM全桥逆变电路产生稳定可控的正弦波。控制器采用电压闭环分别控制直流母线电压及交流输出电压，检测到断开交流电源后，可即时切换至直流电源供电。该电路输出电压稳定，交流供电时负载调整率和电压调整率小于0.1%，频率稳定在50Hz，误差小于0.02%。直流供电额定状态下系统效率可达到96.1%。该不间断电源输出电压为正弦波，THD小于2%。

**关键词：**不控整流Boost电路 PWM全桥逆变 电压控制

# 方案论证

## 比较与选择

### 交流回路拓扑选择

方案一：不控整流级联Boost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：PWM整流器级联Boost PFC电路。PWM整流器无整流二极管，功耗较低。但Boost PFC电路拓扑结构与控制系统较为复杂，会增加不必要的控制系统复杂度。

综合考虑，为了使控制更加稳定并简化整体电路，选择方案一。

### 电压控制方案选择

方案一：直接对逆变器的输出电压进行采集并进行控制，中间电路无需设置测量模块。这种方式结构简单，但是对控制系统的要求较高，难以保证控制稳定性及精度。

方案二：将Boost输出母线电压及逆变输出电压分开采集和控制，电路耦合程度更低，控制精度更高，响应时间更短，使得最终输出的电压更加稳定。

综合考虑，为了保证更高的电压控制精度和更好的稳定性，选择方案二。

## 系统总体方案描述

系统包括不控整流电路、Boost电路、逆变器电路、交流电压电流测量电路、直流电压测量电路以及单片机控制电路和保护电路，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。

## 2.2 Boost电路输出稳压控制方法



图2 直流电压控制策略框图

在Boost电路闭环控制中，采样输出直流电压实时值，与参考设定值求差，再送入PI控制器进行计算，将计算值输入PWM控制器调控PWM波对应的占空比，通过变换器输出调控后的直流电压。

## 2.3 输出交流电压稳压控制方法



图3 直流电压控制策略框图

在逆变器电路闭环控制中，采样输出交流电压实时值，计算其有效值并与参考设定值求差，再送入PI控制器进行计算，将计算值输入SPWM控制器调控SPWM波对应的调制比，通过变换器输出调控后的交流电压。

# 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

该主电路交流供电部分采用不控整流电路，后级接入一个Boost升压电路，直流供电部分采用Boost 升压电路。两者并联后，再后接一个PWM全桥逆变电路。系统主电路原理图如图3所示。



图4 主拓扑电路图

1. Boost电路电感参数计算

Boost的直流输入电压为24V，交流输入电压为36。由于Boost电路在低电压情况下工况更为恶劣，因此以直流输入计算电感参数。设定输出电压为65V,经计算占空比D=0.63。Boost电感计算公式如下：



其中*D*为占空比，*Ud*为输入直流电压，*U*d=24V，*I*d为电感电流，*I*d=1.4A，rd为电感电流纹波率，取rd=0.4，*f*c为调制波频率，*f*c=20kHz。

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

直流母线电容用以抑制直流母线电压上的纹波。为了使母线电压的波动大小控制在一定范围内，直流侧电容取值不能太小。为了提升母线电压的响应速度，直流电容取值也不能过大。直流侧电容参考取值范围如下：



式中，母线电压纹波△*U*m=0.02V，*R*L=30Ω，为响应时间，=50ms，计算得，实际直流电容取为2000uF。

（3）输出交流侧电感参数计算

系统交流电感的取值不仅影响系统的动静态性能，还会对输入电流波形等其他因素产生影响。增大电感值可以抑制交流侧电流的谐波，但是会影响电流跟踪的快速性。由电流纹波率计算输出交流侧电感，可得输出交流侧电感的表达式为：



其中*Ub*为全桥逆变电路输入直流母线电压，*U*b=65V，*I*o为输出交流侧电感电流幅值，*I*o=1.414A，ro为输出交流侧电流纹波率，取ro=0.3，*f*c为调制波频率，*f*c=20kHz。

代入参数计算得，电感*L*=1.04mH，实际中留取裕量，电感取值为1.3mH。采用铁硅铝磁粉芯和2股并绕的0.7mm漆包线线绕制电感。

（4）输出交流侧电容参数计算

LC低通滤波器的截止频率是应当基波频率5到10倍，是开关频率的1/10到1/5。基波频率为50Hz，开关频率为20kHz，因此可取截止频率*fm*=1kHz。根据截止频率确定电容值，



其中*L*为输出交流侧电感，实际取值为*L*=1.3mH。

代入参数计算得，电容C=19.48uF，实际中为了方便选型，选取一个容值10uF、高频性能较好的CBB电容。实际截止频率*fm*=1396 Hz

（5）开关管的选择

开关管承受电压和导通电流为母线电压峰值和电流的有效值，分别为65V和1A，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

### 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。前级采用HCPL2630对控制器产生的驱动信号进行隔离，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

系统完成初始化后，将测量Boost电路输出的直流电压并与设定值对比，通过稳压闭环程序调控PWM波的占空比大小，使得Boost输出的直流电压稳定在设定值处。



图8 Boost电路控制程序框图

### 3.2.2 逆变器控制程序设计

系统完成初始化后，保持Boost电路的闭环控制使输出直流电压稳定，同时测量并计算逆变器输出交流电压的有效值并与设定值对比，通过逆变器稳压闭环程序调控SPWM波对应的调制比，使得输出交流电压的有效值稳定在设定值处。



图8 逆变器电路控制程序框图

### 3.2.3 自动切换直流供电程序设计

系统持续检测并计算输入电压的有效值。当交流电源断开后，测得输入电压有效值小于10V的阈值时，闭合直流供电电路，停止SPWM输出，即切换电源。



图10 自动切换直流供电程序框图

### 3.2.4 输出过压过流保护程序设计

系统完成初始化后，ADC对输出电压和输出电流进行检测。如果检测到过压或者过流，会即刻断开驱动信号，从而实现系统的过压和过流保护。当外部输入恢复信号，即按下输入键盘的特定按键且检测到的输出电压值和输出电流值符合安全范围时，系统恢复正常工作状况。

当检测到输出电压超过40V时，触发过压保护程序；当检测到输出电流超过1.5A时，触发过流保护程序。



图11 输出过压过流保护程序框图

# 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

系统输入36V交流电，调节输出交流电流Io=1A，记录输出电压，测量输出交流电压失真度；在输出电压时，调整输出电流为0.1A~1.0A，测试负载调整率；在输出电流为1A时调节输入交流电压为29V～43V，测试电压调整率；供给直流电，切断交流电，系统自动切换至直流电源供电，调整输出交流电流为Io=1A，测量输出交流电压失真度，计算系统在该状态的效率。逐渐增大输出电流至1.2A，记录关断保护电流。

### 4.1.2 测试仪器

手持万用表CA5212、手持式万用表FLUKE15B+、电能质量分析仪

## 4.2 测试结果及其完整性

### 4.2.1 输出交流电压精度测试

测试条件：输入交流电Us=36V，输出交流电流Io=1A，测量输出交流电压并记录

表1 输出直流电压精度测试结果记录表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 交流电压Us/V | 输出电流Io/A | 输出交流电压/V | 输出交流电压频率f/Hz |
| 35.98 | 0.998 | 30.01 | 49.99 |

由上表可知输出交流电压满足要求。

### 4.2.2 负载调整率测试

测试条件：U1=36V，输出电压Uo=30V，输出电流Io在0.1A~1.0A变化，记录输出电压并计算负载调整率。式中Uo2为Io=1.0A时的交流输出电压有效值，Uo1为Io=0.1A时的交流输出电压有效值。

表2 负载调整率测试结果记录表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 交流电压Us/V | 输出电流Io/A | 输出电压Uo/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0.5%。

### 4.2.3 电压调整率测试

测试条件：输出电流Io=2A，输出电压Uo=30V，输入交流电压Us在29V~43V之间变化，记录输出交流电压Uo并计算电压调整率。Uo1为Us=29V时的交流输出电压，Uo2为Us=43V时的交流输出电压。

表3 电压调整率测试结果记录表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 输出电流Io/A | 交流电压Us/V | 输出电压Uo/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0.5%。

### 4.2.4 失真度测量

测试条件：输入交流电压Us=36V，输出交流电流Io=1A，输出交流电压Uo=30V，使用功率分析仪读取输出电压失真度。

表4 功率因数测量结果记录表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 交流电压Us/V | 输出电流Io/A | 仪器显示值  THD/% |
| 36.012 | 1.013 | 0.9 |

由上表知输出电压失真度≤2%。

### 4.2.5 过流保护功能测试

测试条件：交流电压36V，输出交流电压Uo=30V，逐渐减小输出电阻，增大输出电流记录保护电流

Io保护值：1.19A

输出过流保护功能符合要求。

### 4.2.6 切换直流供电并测试输出电压精度

测试条件：接入直流电源，切断交流电源，系统自动切入直流供电，输入直流电压Us=24V，输出交流电流Io=1A，输出交流电压Uo=36V，读取输出电压

表5 功率因数校正测试结果记录表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 直流电压Us/V | 输出电流Io/A | 输出电压  Uo/V | 频率  f/Hz |
| 24.013 | 1.012 | 36.01 | 49.99 |

由上表可知输出交流电压满足要求，频率满足要求。

### 4.2.7 UPS电路效率测试

测试条件：输入直流电压Us=24V，输出电流Io=1A，输出交流电压Uo=36V，记录输入电流

表6 放电模式电压调整率测试结果记录表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 输入直流电压Ud/V | 输入直流电流Id/A | 输出交流电压Uo/V | 输出交流电流Io/V |
| 23.64 | 1.421 | 29.97 | 1.013 |

由上表可知变换器效率大于90%。

## 4.3 测试结果分析

通过测试，本系统在直流输入和交流输入的额定功率下输出交流电压都稳定，负载调整率与电压调整率都低至0.1%，系统具备过流保护功能。系统能够实现功率因数校正，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96.1%，同时系统具备过流保护功能。