单相无功补偿装置

**摘要：**本系统由单相PWM整流电路构成，以STM32F407ZGT6单片机为整流电路的控制器，利用整流电路可控制电压电流的特性实现无功功率补偿。

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。

该电路可适应28V~32V输入电压，并补偿目标阻感性负载产生的电流无功分量或者根据设置在0A~-2A的范围内调整*I*S的感性无功电流。该系统在额定工况下，THD＜1.2%，静态功耗*P*LOSS＜1.6W，无功补偿效率η＞96.7%，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 无功补偿

# 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 PFC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

系统包括隔离变压器、阻感性负载、单相整流器、开关管驱动电路、直流电压测量电路、交流电压测量电路、交流电流测量电路、单片机控制电路以及显示电路，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

该主电路为单相PWM整流电路。系统主电路拓扑电路图如图3所示。



图4 主拓扑电路图

### 3.1.2 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cosφ=1，则有



其中，*U*S为输入电压，*I*S为输入电流，ω为输入电压角频率，*U*dc为输出直流电压，△*u*dc max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 = 892 uF，实际中留取裕量，电容取值为 1000 uF。

### 3.1.3 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。

## 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

调节系统输入交流电压*U*S为28V~32V，测量完全补偿后的*I*S无功分量大小；设定输入交流电压*U*S为32V，手动在0A~-2A的范围内调节*I*S的感性无功电流，并测量无功电流的实际大小，与屏幕显示值进行对比；设定输入交流电压*U*S为32V，测量*I*S无功分量为-2A时，电流*I*O的THD；断开阻感性负载，设置输入交流电压*U*S为32V，*I*S无功分量为0A，测量装置的静态损耗；设置输入交流电压*U*S为32V，*I*S无功分量为-2A，测量装置的无功补偿效率η。

### 4.1.2 测试仪器

自耦变压器、隔离变压器、手持万用表CA5212、手持式万用表FLUKE15B+、三相功率分析仪

## 4.2 测试结果及其完整性

### 4.2.1 完全补偿时*I*S无功分量的大小

测试条件：输入交流电*U*s=28V~32V，测量完全补偿后的*I*S无功分量大小并记录

表1 完全补偿时*I*S无功分量

|  |  |
| --- | --- |
| *U*S/V | *I*S无功分量/A |
| 28 | 0.01 |
| 29 | 0.02 |
| 30 | -0.01 |
| 31 | 0.02 |
| 32 | -0.02 |

由上表可知补偿后无功分量大小符合要求。

### 4.2.2 手动调节感性无功电流

测试条件：设定输入交流电压*U*S为32V，手动在0A~-2A的范围内调节*I*S的感性无功电流，并测量无功电流的实际大小，与屏幕显示值进行对比。

表2 手动调节感性无功电流

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 设定值/A | 实际值/A | 屏幕显示值/A |
| 0.0 | 0.01 | 0.0 |
| -0.5 | -0.51 | -0.5 |
| -1.0 | -0.99 | -1.0 |
| -1.5 | -1.52 | -1.5 |
| -2.0 | -1.99 | -2.0 |

由上表可知误差小于±0.05A。

### 4.2.3 失真度

测试条件：输入交流电压Us=32V，设置输入电流IS无功分量为-2A，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 | 输入电流IS无功分量/A | 仪器显示值  THD/% |
| 32.012 | -1.99 | 1.2 |

由上表知输出电压失真度≤2%。

### 4.2.4 静态损耗

测试条件：输入交流电压Us=32V，设置输入电流IS无功分量为0A，断开阻感性负载，测试装置的静态损耗。

表5 放电模式电压调整率测试结果记录表

|  |  |
| --- | --- |
| 交流电压Us/V | 输入电流IS /A |
| 32.012 | 0.049 |

经过测试，装置的静态损耗为1.57W。

### 4.2.5 无功补偿效率

## 4.3 测试结果分析

通过测试，本系统可适应28V~32V输入电压，并补偿目标阻感性负载产生的电流无功分量，或者根据设置在0A~-2A的范围内调整*I*S的感性无功电流。该系统在测试条件下，THD为1.2%，静态功耗*P*LOSS为1.57W，无功补偿效率η为96.7%。

# 总结

本系统实现了单相无功补偿装置。该装置可并联于电网上，并为特定负载进行无功功率补偿，或在0A~-2A的范围内调整感性无功电流为特定值。该系统在额定工况下，THD＜1.2%，静态功耗*P*LOSS＜1.6W，无功补偿效率η＞96.7%，同时系统具有过流保护和友好的人机交互功能。