单相无功补偿装置

**摘要：**本系统以单相全桥电路为主拓扑，以STM32F407ZGT6单片机为控制器，实现对外界系统的无功功率补偿。控制器采用数字锁相环进行锁相，电压电流双环控制直流母线电压稳定和输出无功电流大小。系统可适应28V~32V输入电压，实现补偿目标系统电流无功分量至0.01A，并在0A~-2A的范围内步进可调。系统静态功耗1.56W，额定工况下输出电流总谐波畸变率为1.2%，无功补偿效率98.03%。同时具有电压电流测量、过压保护和友好的人机交互界面。

**关键词：**动态无功补偿 PWM整流 dq变换

# 方案论证

## 比较与选择

方案一：选择静止无功补偿器方案。通过控制晶闸管的开断的投切不同大小的补偿电抗器以补偿无功功率。该系统有电路简单、响应速度快、可连续调节无功功率输出的特点。但补偿装置的铜耗和铁耗都比较大，输出到交流系统中的高次谐波较多，同时也难以准确控制功率因数和动态调节无功电流。

方案二：选择动态无功发生器方案。对待补偿系统无功功率实时采样反馈，控制单相PWM整流器向系统发出无功功率完成无功补偿。该装置调节速度更快，调节范围更宽，功耗较低，能精准控制补偿电流大小，具有良好的补偿特性。但其电路拓扑结构与控制系统较为复杂，会增加控制系统复杂度。

经过权衡比较，为达到更优越的动态无功补偿效果和减小装置的谐波污染，最终选择方案二。

## 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，开关管选择和电感的绕制都会对损耗产生影响。

### 2.1.1减小开关管开关损耗的方法

选择合适的开关频率和合理的电路布局：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影响输出电压电流纹波，为此增大滤波电感的体积和重量带来无源器件的损耗。综合考虑后开关频率选取20kHz。同时在开关管开关动作时其寄生结电容和电路分布电感影响其开关损耗，因此选取在一定范围内门极电荷和反向恢复电荷尽量小的开关管。

### 2.1.2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在合理范围内越小越好。但开关管的寄生电容、耐压等级和导通电阻参数矛盾，三者之间往往不能同时最小，折衷考虑后最终选取英飞凌公司生产的IRF540N作为开关管。

### 2.1.3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无功电流控制方法



图2 电流电压双环调控程序框图

将读入的网侧输入电压*U*s经PI调节后得到误差信号Δ*w*，再与理论角频率2πf相加后得到实际角频率。最后经过积分，输出即是电网电压的相位θ，实现锁相并得到实时相位角θ，对读入的电压电流信号进行dq变换。得到dq解算出的电压电流实轴与虚轴值后进行电压电流PI双环调控，改变输出PWM波的占空比，使得母线直流电压保持稳定，且网侧虚轴电流可被调控至参考值。电压电流PI双环调控程序框图如图2所示。

# 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3 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1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，*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，考虑到直流母线电压大小，选取耐压为100V的电解电容。

### 3.1.3 交流电感参数计算

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*为全桥电路输入直流母线电压，*I*o为输出交流侧电感电流幅值，ro为输出交流侧电流纹波率，*f*c为调制波频率。

代入参数计算得，电感*L*=1.04mH，实际设计中留取裕量，电感取值为1.3mH。采用铁硅铝磁粉芯和3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 控制程序设计

控制器通过锁相环获取网侧电压相位对无功补偿装置的输出电流*I*s及负载电流*I*L进行dq变换，将dq变换后得到的结果进行电压电流PI双闭环，再由dq反变换调节输出PWM波的占空比以控制输出电流。控制网侧电流*I*s无功分量为-2A至+2A之间的任意值，其参考值由外部键盘输入给定。控制程序流程图如图4所示。



图4控制程序流程图

### 3.2.2 保护程序设计

系统完成初始化后，通过ADC采样对直流母线电压*U*bus进行检测，若检测到电压高过内部设定值55V，即刻切断SPWM波的输出停止整流器工作，从而实现系统的过压保护。触发保护后4秒内无过压后系统自动恢复工作。

当检测到网侧输入电压*U*s超过50V时，触发过压保护程序，立刻停止对PWM整流器控制并点亮指示灯，待*U*s持续低于于50V 4秒后系统自动恢复工作。

# 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

隔离变压器、自耦变压器、手持万用表CA5212、单相功率分析仪

### 4.2 测试结果及其完整性

### 4.2.1 完全补偿时电流无功分量的大小

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

表1 完全补偿时*I*s无功分量

|  |  |
| --- | --- |
| 输入交流电压*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*I*s无功分量符合要求。

### 4.2.2动态调节感性无功电流

测试条件：设定输入交流电压*U*s为32V，在0A~-2A的范围内调节*I*s的感性无功电流，并由单相功率分析仪测量其实际大小，与设定值进行对比。

表2 手动调节感性无功电流

|  |  |
| --- | --- |
| *I*s无功分量设定值/A | *I*s无功分量实际值/A |
| 0.0 | 0.01 |
| -0.5 | -0.53 |
| -1.0 | -0.98 |
| -1.5 | -1.52 |
| -2.0 | -1.99 |

由上表可知误差小于±0.05A。

### 4.2.3 输出电流谐波总畸变率THD

测试条件：输入交流电压*U*s=32V，设置输入电流*I*s无功分量为-2A，由功率分析仪读取输出电流谐波总畸变率。

表3 功率因数测量结果记录表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 交流电压*U*s/V | 输入电流*I*s无功分量/A | 实际THD/% |
| 32.012 | -1.99 | 1.25 |

由上表知输出电流THD≤2%。

### 4.2.4 静态损耗

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

表4 放电模式电压调整率测试结果记录表

|  |  |
| --- | --- |
| 交流电压*U*s/V | 输入电流*I*s /A |
| 32.012 | 0.049 |

经过测试，装置的静态损耗为1.56W。

### 4.2.5 无功补偿效率

测试条件：设置输入交流电压*U*s为32V，*I*s无功分量为-2A，测量装置的有功功率、视在功率，并计算装置的整体效率。

表5 实际功率数据表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 有功功率/W | 视在功率/VA | 效率η |
| 1.30 | 65.98 | 98.03% |

### 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无功电流分量，或者根据在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，输出交流电流THD为1.25%，静态功耗*P*loss为1.56W，无功补偿效率*η*为98.03%。

# 总结

本系统实现了对外界系统的无功功率补偿。该装置在可变输入交流电压范围内满足无功功率补偿要求，并在0A~-2A的范围内可调整输出无功电流。系统静态功耗≤2W，在额定工况下系统输出交流电流失真度≤2%，无功补偿效率*η*高达98.03%，同时系统具备过压保护功能和实时测量交流电压、交流电流、功率因数功能。