

## 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。控制器采用电压电流 PI 双环调控控制电压电流，实现对输出电压电流的控制以输出无功功率。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， $\text{THD} \leq 1.2\%$ ，静态功耗  $P_{\text{Loss}} \leq 3\text{W}$ ，无功补偿效率  $\eta \geq 98.03\%$ ，同时系统具有过流保护和友好的人机交互功能。

**关键词：**动态无功补偿 PWM 整流

# 一、方案论证

## 1.1 比较与选择

方案一：静止无功补偿器。采用控制晶闸管的开断的方法，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：静止无功发生器。对待补偿系统无功功率实时采样反馈，控制 PWM 整流器向系统发出无功功率完成无功补偿，该系统调节速度更快，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 PWM 整流器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。

经过比较，为达到高效动态无功补偿和更小的失真度，最终选择方案二。

## 1.2 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：

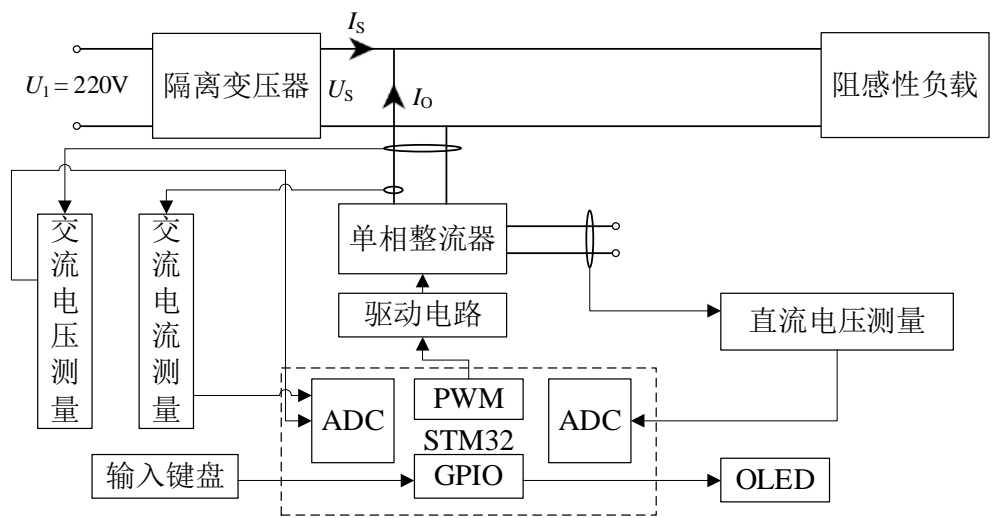


图 1 系统总框图

# 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。

### 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 dq 变换与电压电流 PI 双环调控

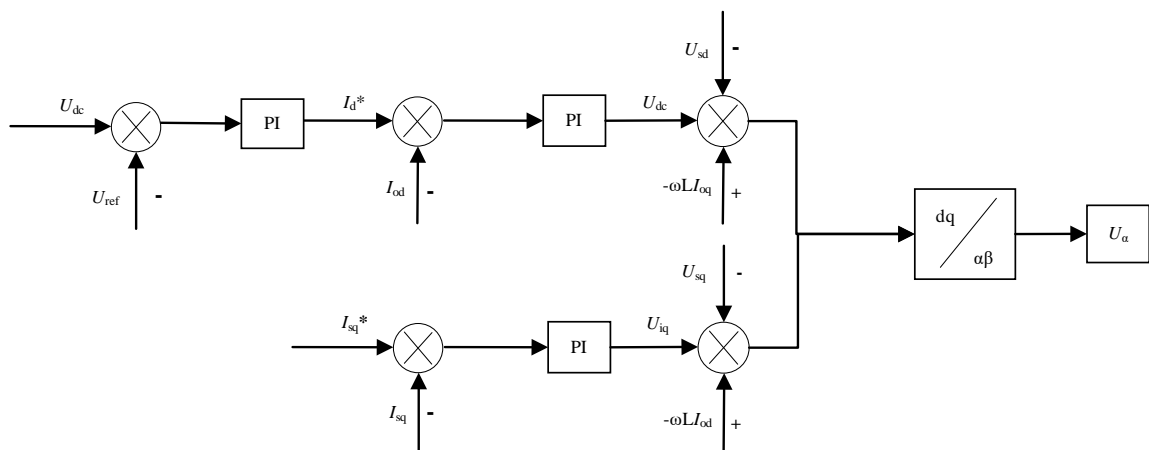


图 2 电流电压双环调控程序框图

将读入的网侧电压信号经 PI 调节后得到误差信号  $\Delta w$ ，再与理论角频率  $2\pi f$  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  $\theta$ ，实现 PLL 锁相环。利用锁相环得到的相位  $\theta$ ，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。

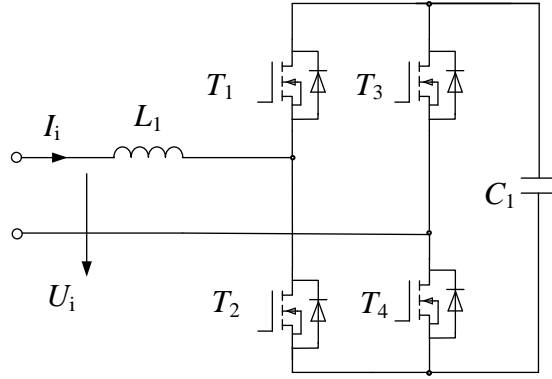


图 3 主拓扑电路图

##### 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

$$C \geq \frac{U_s I_s}{2\omega U_{dc} \Delta u_{dc \max}}$$

其中， $U_s$  为输入电压， $I_s$  为输入电流， $\omega$  为输入电压角频率， $U_{dc}$  为输出直流电压， $\Delta u_{dc \max}$  为输出直流电压允许的最大波动。

代入参数计算可得电容  $C = 892 \mu\text{F}$ ，实际中留取裕量，电容取值为  $1000 \mu\text{F}$ 。

##### 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：

$$L > \frac{U_b}{2f_c I_o r_o}$$

其中  $U_b$  为全桥逆变电路输入直流母线电压， $U_b=65\text{V}$ ， $I_o$  为输出交流侧电感电流幅值， $I_o=1.414\text{A}$ ， $r_o$  为输出交流侧电流纹波率，取  $r_o=0.3$ ， $f_c$  为调制波频率， $f_c=20\text{kHz}$ 。

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

## 3.2 控制电路与控制程序

### 3.2.1 控制程序设计

单项无功补偿电路控制器在 PLL 锁相环获取交流母线电压相位后，通过电流互感器测量输出电流信号及负载电流信号，通过 dq 变换和电压电流 PI 双闭环以及 dq 反变换调节输出 PWM 波的占空比，以实现控制输出电流，使得网侧电流虚轴分量为  $-2\text{A}$  至  $0.5\text{A}$  之间的任意值，参考值由外部键盘输入给定。控制程序流程图如图 4 所示。

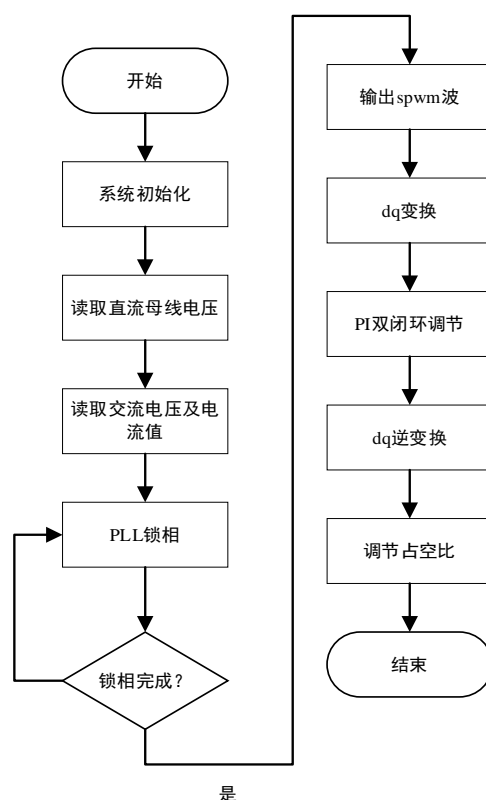


图 4 控制程序流程图

### 3.2.4 保护程序设计

系统完成初始化后，ADC 对母线直流电压进行检测。如果检测到过压，会即刻断开 SPWM 波的输出，从而实现系统的过压保护。触发保护后等待 4 秒，如果 4 秒内无过压，即自动恢复输出。

当检测到输出电压超过  $65\text{V}$  时，触发过压保护程序。

## 四.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  $\eta$ 。

#### 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  $U_s=28V\sim32V$ ，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 $\pm 0.05\text{A}$ 。

#### 4.2.3 失真度

测试条件：输入交流电压  $U_s=32\text{V}$ ，设置输入电流  $I_s$  无功分量为 $-2\text{A}$ ，使用功率分析仪读取输出电压失真度。

表 3 功率因数测量结果记录表

交流电压 $U_s/\text{V}$	输入电流 $I_s$ 无功分量/ $\text{A}$	仪器显示值 THD/%
32.012	-1.99	1.2

由上表知输出电压失真度 $\leq 2\%$ 。

#### 4.2.4 静态损耗

测试条件：输入交流电压  $U_s=32\text{V}$ ，设置输入电流  $I_s$  无功分量为  $0\text{A}$ ，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 $U_s/\text{V}$	输入电流 $I_s / \text{A}$
32.012	0.049

经过测试，装置的静态损耗为  $1.3\text{W}$ 。

#### 4.2.5 无功补偿效率

测试条件：设置输入交流电压  $U_S$  为  $32\text{V}$ ， $I_S$  无功分量为 $-2\text{A}$ ，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/ $\text{W}$	视在功率/ $\text{VA}$	效率 $\eta$
1.3	66	98.03%

### 4.3 测试结果分析

通过测试，本系统可适应  $28\text{V}\sim 32\text{V}$  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  $0\text{A}\sim 2\text{A}$  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  $P_{\text{Loss}}$  为  $1.3\text{W}$ ，无功补偿效率  $\eta$  为  $98.03\%$ 。

## 五. 总结

本系统采用静止无功发生器方案，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  $0\text{A}\sim 2\text{A}$  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， $\text{THD}\leq 1.2\%$ ，静态功耗  $P_{\text{Loss}}$  为  $1.3\text{W}$ ，无功补偿效率  $\eta$  为  $98.03\%$ ，同时系统具有过流保护和友好的人机交互功能。