单相交流电子负载

**摘要：**本系统为单相交流电子负载，能模拟电阻性、电感性、电容性负载并以50Hz交流电回馈能量。该装置以全桥PWM整流、单相全桥逆变器为主拓扑，采用数字锁相环获取电网电压相位，对网侧电压电流进行dq变换后，闭环控制直流母线电压和整流器输入电流。系统在30V输入电压、2A输入电流的额定工况下可模拟电阻性、电感性、电容性负载，输入功率因数在0.50~1.00的范围内步进可调，电流控制误差不超过0.02A，功率因数控制误差不超过0.002，模拟纯电阻性负载时系统损耗功率Δ*P*低至1.925W。此外具有输入电压电流测量、输入过压过流保护功能，以及恒电流、恒电阻、恒功率三种额外的负载模拟模式，并具有良好的人机交互界面。

**关键词：**电力电子负载 能量回馈 PWM整流 dq坐标变换

# 方案论证

## 比较与选择

### 整流器拓扑方案选择

方案一：Boost PFC电路。不控整流电路结构简单，响应迅速，方便整体电路的控制。但是无法控制无功电流，且整流二极管通态损耗大，整体效率低。

方案二：PWM整流电路。电路拓扑结构更为复杂。但是稳定性好，功率因数可以更稳定地控制，同步整流损耗远小于整流二极管通态损耗，效率更高。

综合考虑，为了控制无功电流，选择方案二，PWM整流电路。

### 逆变器拓扑方案选择

方案一：全桥逆变电路。使用全桥电路级联LC低通滤波器组成逆变电路。此方案电路结构较为复杂，但在相同情况下其损耗更低。

方案二：半桥逆变电路。使用半桥电路与两只电容组成逆变电路。此方案电路结构简单，但通过开关管的电流为全桥逆变电路的两倍，损耗更高。

综合考虑，为了减小系统的功耗，使用方案一，全桥逆变电路。

## 系统总体方案描述



图 1系统总框图

系统由主电路、测量电路、辅助电源电路、控制电路、人机交互电路组成，系统总框图如图 1所示。

其中主电路由单相整流电路与单相逆变器级联组成。前级采用PWM整流器实现AC-DC变换并控制输入电流大小及功率因数；后级单相逆变器实现了题目要求的能量回馈功能，将整流后的能量变换为50Hz交流电，并输出到外接的负载电阻器上。测量电路实现了对输入电压、电流和中间直流电压的测量。

# 二.理论分析与计算

## 2.1 不同类型负载的模拟

前级PWM整流器通过对输入电流的有功分量与无功分量进行控制，以实现不同类型负载的模拟，PWM整流器控制部分包括锁相环与电流控制环路。系统通过数字锁相环获取输入电压的频率和相位，并根据相位建立同步旋转的dq坐标系。由于是以输入电压*U*1的相位建立d轴，因此电流*I*1 的d轴分量为有功电流，而q轴分量为无功电流。通过对其分别控制，即可实现改变有功、无功电流的大小的功能，对输入侧功率因数进行调控。

电流控制环路引入输入电压前馈，独立控制dq变换后的输入电流的d轴（有功）分量和q轴（无功）分量。根据功率因数的目标值计算d轴电流和q轴电流的目标值，而后通过调控输出的SPWM改变电流的有功无功分量至目标值。其控制框图如图 2所示。



图 2电流环路控制框图

## 2.2 能量回馈的方法

后级逆变器将直流电逆变为交流电，实现50Hz的交流电回馈。其电压控制环路通过调控后级SPWM的调制比维持直流母线电压*U*dc稳定。

当直流侧电压*U*dc超过给定值*U*dc\*时，PI调节器输出增大，即逆变器调制比增加，可使逆变器输出回馈功率增加。此时直流母线电容储能减小，直流母线电压回落，使电压保持稳定。在直流母线电压低于给定值时同理。其控制框图如图 3所示。



图 3电压环路控制框图

# 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

该主电路前后级均采用单相全桥拓扑，前级电路作为PWM整流器控制输入侧电压电流及功率因数，后级电路采用单相逆变器将能量反馈回电力系统。

系统主电路拓扑图如图 4所示。



图 4主电路拓扑图

### 3.1.2输入交流侧电感参数计算

交流侧电感的设计主要考虑两个因素：一是输入电流的跟踪性能；二是其对输入电流波动的抑制作用。它们分别决定了电感取值的上下限。

经过计算可得，电感大小的取值范围是：



其中，*U*1为输入电压幅值，*U*dc为输出直流电压，*T*S为开关周期，Δ*is*max为一个开关周期内允许的最大电流波动，考虑到后级的稳定性，取Δ*is*max = 30% *I*1，ω为输入电压角频率，*I*1为输入电流幅值。

代入参数计算得，电感最小值*L*min= 813 μH，电感最大值*L*max= 500 mH，实际中留取裕量，电感取值为1 mH。

### 3.1.3 输出交流侧电感、电容参数计算

输出交流侧电感、电容组成一个LC低通滤波器。为了更好的滤波效果，需要综合考虑设计电感、电容的大小。在设计电感大小时，主要考虑电感上的最大电压降和纹波抑制效果。这分别决定了电感大小的上下限。根据计算可以得到，



其中，*U*dc为直流母线电压，*T*S为开关周期，Δ*is*max为一个开关周期内允许的最大电流波动，考虑到后级的稳定性，取Δ*is*max = 30% *I*2，*U*2为输出电压幅值，*I*2为输出电流幅值。

代入参数计算得，电感最小值*L*min= 348 μH，电感最大值*L*max= 15 mH。

电容的取值应当考虑如下两个条件：一是滤波器截止频率应当小于载波频率的0.1倍，并大于基波频率的10倍；二是在基波频率下滤波电容吸收的无功功率不大于系统有功功率的5%。根据计算可以得到，电容大小需要同时满足





其中，*L*为实际选择的电感大小，*P*2为交流侧输出功率，*f*为逆变器开关频率，*U*2为交流侧输出电压幅值。

经过综合考虑，取电感大小为470 μH，电容大小为20 μF。

### 3.1.4直流电容参数计算

为了抑制直流侧纹波，需要设计合理的直流母线电容。经过计算，在cos*φ* = 1的情况下，直流电容的大小有



其中，*U*1为输入电压幅值，*I*1为输入电流幅值，ω为输入电压角频率，*U*dc为输出直流电压，Δ*udc*max为输出直流电压允许的最大波动，取Δ*udc*max = 3%*U*dc。

代入参数计算可得电容C = 892 μF，实际中留取裕量，电容取值为 1000 μF。

### 3.1.5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。最终选择TI公司生产的CSD19501KCS，其最大耐压80V，可导通100A电流，其导通电阻为5.5m，栅极电荷总量为38nC，输出电容为784pF。

## 3.2 控制电路与控制程序

系统采用STM32F407系列单片机作为控制器。控制系统分为PWM整流器输入电流控制和逆变器输出控制两部分，两部分同时运行。其中，逆变器输出控制采用开环控制的方法，按照预先设置的调制方法生成50Hz的正弦波。

控制系统首先读取母线电压和输入电压电流，并构造一个滞后实际单相系统 90°的虚拟正交分量来构建两相静止 αβ 坐标系；锁相环由输入电压解算出频率与相位信息。根据相位信息对输入电压与输入电流进行 αβ - dq 坐标变换；由电压环控制直流母线电压，根据功率因数的待调值计算得到输入 d 轴电流和 q 轴电流的目标值，对前后级的SPWM进行调控。程序流程图如图 5所示。



图 5控制流程图

# 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

（1）调节输入电压*U*1 = 30V。设定输入电流*I*1 = 2A。设定输入侧功率因数cos*φ*1在0.50 ~ 1.00（超前）与0.50 ~ 1.00（滞后）的范围内变化，每次变化0.1。使用功率分析仪测量实际输入侧电压*U*1、电流*I*1与功率因数。

（2）在（1）条件下设定输入侧功率因数cos*φ*1 = 1。使用功率分析仪测量实际输入侧电压*U*1、电流*I*1、功率因数cos*φ*1，回馈侧电压*U*2、电流*I*2、功率因数cos*φ*2，并计算得到输入功率*P*1、回馈功率*P*2和Δ*P*。

（3）设定工作模式为恒电阻模式，模拟15Ω电阻性负载。设定*U*1在24V ~ 36V的范围内调节。使用万用表测量实际输入侧电压*U*1、电流*I*1，并计算得到等效电阻*R*。

（4）设定工作模式为恒功率模式，模拟电阻性负载并使得功率稳定为60W。在24V ~ 36V的范围内调节输入电压*U*1。使用万用表测量实际输入侧电压*U*1、电流*I*1，并计算得到输入功率*P*1。

### 4.1.2 测试仪器

自耦变压器、隔离变压器、手持万用表CA5212、功率分析仪PW3390-03

## 4.2 测试结果及其完整性

### 4.2.1 额定工况下的输入电流和功率因数调整测试

测试条件：调节输入电压*U*1 = 30V。设定输入电流*I*1 = 2A。设定输入侧功率因数cos*φ*1在0.50 ~ 1.00（超前）与0.50 ~ 1.00（滞后）的范围内变化。使用功率分析仪测量实际输入侧电压*U*1、电流*I*1与功率因数。

表1 额定工况的输入电流和功率因数调整测试结果记录表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 输入电压  *U*1 / V | 输入电流  *I*1 / A | 设定的输入侧功率因数  cosφ1 | 负载属性 | 实际输入侧功率因数  cosφ1 |
| 30.02 | 1.99 | 1.00 | 电阻性 | 0.998 |
| 30.02 | 2.00 | 0.50 | 电感性 | 0.498 |
| 29.98 | 1.98 | 0.70 | 电感性 | 0.699 |
| 30.02 | 2.01 | 0.90 | 电感性 | 0.899 |
| 30.02 | 1.99 | 0.50 | 电容性 | 0.500 |
| 30.00 | 2.01 | 0.70 | 电容性 | 0.699 |
| 29.99 | 1.98 | 0.90 | 电容性 | 0.901 |

由上表可知，输入电流最大绝对误差为0.02A，最大相对误差为1%，功率因数最大绝对误差为0.002，最大相对误差为0.4%。

### 4.2.2 额定工况下的功率损耗测试

测试条件：调节输入电压*U*1 = 30V。设定输入电流*I*1 = 2A。设定输入侧功率因数cos*φ*1 = 1。使用功率分析仪测量实际输入侧电压*U*1、电流*I*1、功率因数cos*φ*1，回馈侧电压*U*2、电流*I*2、功率因数cos*φ*2，并计算得到输入功率*P*1、回馈功率*P*2和Δ*P*。

表2 额定工况下的功率损耗测试结果记录表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 输入电压  *U*1 / V | 输入电流  *I*1 / A | 输入侧功率因数  cos*φ*1 | 回馈电压  *U*2 / V | 回馈电流  *I*2 / A | 回馈侧功率因数  cos*φ*2 |
| 30.00 | 1.99 | 0.999 | 25.01 | 2.31 | 0.999 |





则可得Δ*P* = *P*1 - *P*2 = 1.925W。

## 4.3 测试结果分析

通过测试可知，本系统在额定工作条件下电流控制误差不超过0.02A，功率因数控制误差不超过0.002。额定工况下损耗Δ*P*为1.925W。此外，也可以单独设置负载等效电阻或输入功率，两种模式下其相对误差均不超过0.93%。

# 总结

本系统实现了对交流电源模拟不同特性负载并回馈能量的功能。前级采用PWM整流器实现了电阻性、电感性、电容性负载的模拟；后级采用全桥逆变器实现了能量回馈功能。系统在输入电压*U*1为30.02 V时，*I*1为1.99A；在模拟感性和容性负载时，输入侧功率因数均在0.50～1.00范围内步进可调，步进值为0.01，跟踪误差大小不超过0.002，且在额定工况下，系统回馈损失功率ΔP低至1.925W。与此同时，系统还实现了输入电压电流测量、过压过流保护功能，以及恒电流、恒电阻、恒功率三种额外的负载运行模式，并具有良好的人机交互界面。