

# 2025 年全国大学生电子设计竞赛

## 能量回馈的变流器负载试验装置（A 题）



2025 年 8 月 2 日

## 摘    要

本系统以三相全桥电路为核心拓扑，TMS320F28335 为系统主控，搭建具有能量回馈功能的变流器负载测试装置。系统由三相逆变器、三相 PWM 整流器、滤波模块、辅助电源模块、采样模块、主控模块等部分组成。变流器工作模式分为带载模式和回馈模式。系统可以自动检测状态，通过连接单元自动更换工作模式，从而决定变流器 1、变流器 2 的工作模式。在带载模式下，变流器 1 作为三相对称电压源向负载供电；在回馈模式下，启动变流器 2，通过三相 PWM 整流向直流电源回馈能量。负载调整率降低至 0.06%，uTHD 降低至 0.5%，相关指标满足题目设计要求。

**关键词：**三相逆变；三相 PWM 整流；QPR 控制

## 目录

1. 系统方案设计 .....	1
1.1. 主控制器件的论证与选择 .....	1
1.2. 能量回馈方式的论证与选择 .....	2
1.3. 电流采样电路的论证与选择 .....	2
1.4. 控制系统的论证与选择 .....	2
2. 系统理论分析与计算 .....	3
2.1. 系统控制方案的分析 .....	3
2.2. 无源滤波器的计算 .....	4
2.3. 硬件保护动作阈值的计算 .....	4
3. 硬件电路与程序设计 .....	4
3.1. 硬件电路设计 .....	4
3.2. 程序设计 .....	6
4. 测试方案与结果分析 .....	7
4.1. 测试方案 .....	7
4.2. 测试条件与仪器 .....	8
4.3. 测试结果及分析 .....	8
5. 总结 .....	8
6. 参考文献 .....	8

# 能量回馈的变流器负载试验装置（A 题）

## 【本科组】

### 1. 系统方案设计

本系统主要由 DSP 控制模块、功率拓扑、采样模块、无源滤波模块、辅助电源模块组成。三相逆变作为变流器 1 产生三相对称交流电，三相 PWM 整流器将三相交流电转换为直流，升压回馈至直流电源，实现能量回馈；无源滤波模块对功率拓扑输出的方波进行滤波；采样模块完成对输出电流与电压的采样与反馈；辅助电源将高压直流电转换为低压直流电，实现与功率拓扑的隔离并向控制系统供电。

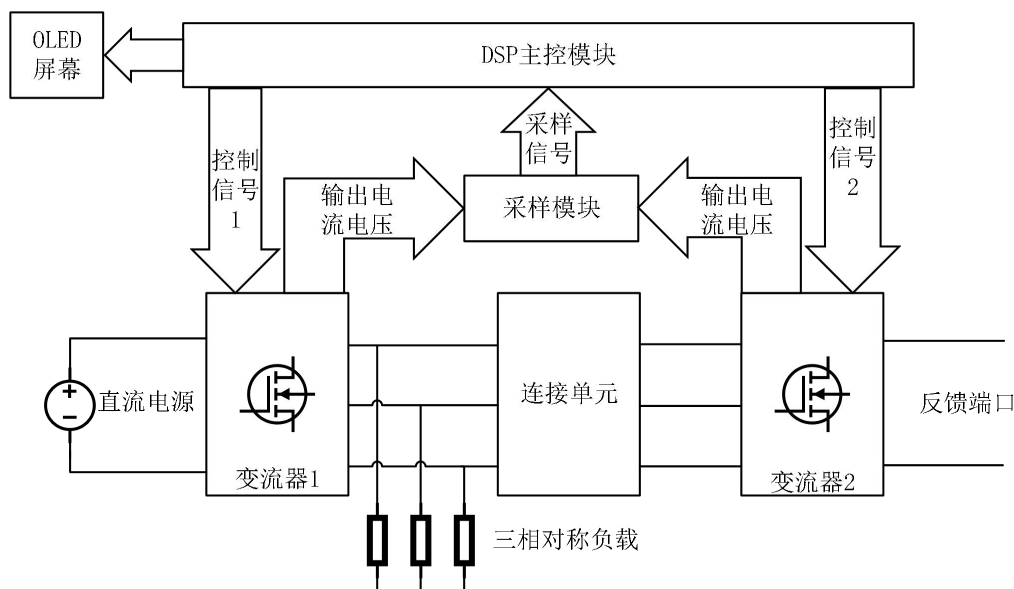


图 1 能量回馈的变流器负载试验装置系统框图

下面分别就主控制器件、能量反馈方式、系统控制策略进行论证与选择。

#### 1.1. 主控制器件的论证与选择

方案一：采用意法半导体的 STM32G4 系列 MCU 作为主控芯片。G4 系列具有 170MHz 主频，模拟、数字外设丰富。其中 ADC 可达 4Msps，但是需要依赖 DMA 实现数据转运。

方案二：采用德州仪器的 TMS320F28335 系列 DSP 作为主控芯片。在算力方面，内置硬件 FPU，具有更短的中断延时，处理能力更强。外设方面，ADC 最大可达 12.5Msps，无需依赖 DMA 转运，外设独立度更高。

综合以上两种方案，选择 TMS320F28335 芯片作为系统主控。

## 1.2. 能量回馈方式的论证与选择

方案一：采用三相无控整流与后级 Boost 升压。由于通过二极管整流，导通损耗大。二极管无控整流为降压型拓扑，无法获得高于交流线电压峰值的直流电压，所以需要额外引入 Boost 升压变换器，导致系统更加复杂，效率低下，无法满足题目要求。由于前级逆变器与后级整流器共地，导致二极管整流桥实际工作在半波整流模式，无法工作在全波整流模式，进而需要更大的直流电容为后级 Boost 升压电路储存足够的能量与电压。

方案二：采用三相 PWM 整流器。三相 PWM 整流器为升压型拓扑，可以直接输出高于交流线电压峰值的直流电压，可以直接并联直流电源，直流侧电容小。因此，能量反馈部分仅需要三相 PWM 整流器一级变换器，系统简单。同时，逆变器输出电流为正弦波，对逆变器瞬间冲击小，可以有效减小能量回馈部分对逆变器的干扰。整流部分由 MOSFET 完成，导通损耗远远小于二极管无控整流损耗，系统效率更高。

综合考虑系统复杂度与变换器效率，选择三相 PWM 整流器。

## 1.3. 电流采样电路的论证与选择

方案一：采用电流感应放大器。电流感应放大器通过采集并放大采样电阻压降，作为电流反馈信号。承受共模电压范围小，在大电流、相电压波动时容易击穿。电阻耗散功率大。

方案二：采用互感器。通过电流的磁效应采集电流传感信号。隔离能力强。电流型输出，后续调理电路复杂。同时自身具有漏感、饱和现象，信号精度低，谐波衰减大。

方案三：采用霍尔电流传感器。通过霍尔效应采集电流，不依赖压降。功耗低。内置放大、偏置电路，后续调理电路简单。隔离性能好。

综合考虑采样精度与隔离性能，选择霍尔电流传感器为电流采样方式。

## 1.4. 控制环路的论证与选择

方案一：全数字回路，采用 Park 变换和 PI 控制。通过将三相静止坐标系变换至两相旋转坐标系，实现交流量到直流量的变换。但是 dq 坐标系下系统无法感知零序分量，且 PI 自身具有积分饱和的特性，环路稳定性差。坐标变换依赖大量正、余弦计算，极大限制了最大 PWM 调制频率。

方案二：全数字回路，采用 A-C 相下的双准比例-谐振控制。QPR 自身含有正弦信号的拉普拉斯变换，可对正弦信号实现无静差跟踪。而且不依赖坐标变换，对单片机处理性能要求低。

方案三：数字模拟回路混合。通过加法器、移相器等模拟模块完成部分环路计算。这种方式控制误差大，相位裕度小，参数设置、修改复杂，控制效果不佳。

综合考虑控制效果和实现难度，选择纯数字化环路、准比例-谐振控制作为本装置的主要控制手段。

## 2. 系统理论分析与计算

### 2.1. 系统控制方案的分析

#### 2.1.1. 系统设计简述

整流器部分采用全数字控制环路设计。采用基于准比例谐振的直接电流控制技术。逆变器、整流器共用一个 DSP 作为主控芯片，可以省略整流器对输入电压的锁相，直接使用逆变器控制环路参考相位作为相位信号。在共用一个主控单元时，可通过内部 ePWM 的时基模块实现载波同步。与双主控相比，该方式可大大提高 PWM 同步效果，抑制载波环流。连接单元为共模电感、MKP21 电容角接组成的 EMI 滤波器。在提高整流器、逆变器输出质量的同时，通过共模电感抑制载波环流，大大提高环路稳定性。

#### 2.1.2. 三相整流器环路设计与能量回馈原理

三相 PWM 整流器为升压型拓扑，直流输出电压高于交流线电压峰值，故 PWM 整流器输出可以直接并联直流电源。此时由直流电源提供稳定直流电压，不需要整流器稳定直流电压，整流器工作在电流源模式，向直流电源回馈电流。在电流源工作模式下，只需要单电流环控制输入电流。为实现对正弦信号的无静差跟踪，电流环采用 QPR 控制，通过逆变输出交流电压前馈解耦提高响应速度。逆变器采用三相三桥臂输出，无零线，不带有零序分量。此情况下，三相系统由三自由度系统降低为两自由度系统，只能同时控制 A、C 两相的相电流。在整流模式下，整流器持续向直流电容充电，提高直流侧储能电容电压。电容电压高于直流母线电容时，电流由直流电容流向直流电源，实现向直流电源的功率回馈。

由于滤波器电容采用角形连接，逆变器输出相电压为高频开关波形，故选择采集  $U_{ab}$ 、 $U_{bc}$  两个线电压。利用以下方程反算 A、C 两相的相电压。三相桥臂角接，直接采集线电流作为相电流。对相电流、相电压进行直接控制。

$$U_{ab} + U_{bc} + U_{ca} = 0 \quad \#(2.1)$$

$$U_a - U_b = U_{ab} \quad \#(2.2)$$

$$U_b - U_c = U_{bc} \quad \#(2.3)$$

$$U_c - U_a = U_{ca} \quad \#(2.4)$$

## 2.2. 无源滤波器的计算

### 2.2.1. 滤波电感的计算

电感上的压降通常应在额定电压 5% 以内，根据以下公式计算电感值上界：

$$L \leq \frac{5\%U}{\omega I} \approx 1\text{mH} \#(2.5)$$

取最大电感电流纹波为电流最大值的 20%：

$$\Delta I_{\text{MAX}} = \frac{V_{\text{DC}}}{4Lf_s} = 0.2I_{\text{out}} \#(2.6)$$

可得电感值下界： $L \geq \frac{V_{\text{DC}}}{4\Delta I_{\text{max}}f_s} \approx 450\mu\text{H}$

由上述公式推导结果，综合考量环路延迟、滤波效果后，取滤波电感值为 680 $\mu\text{H}$ 。

### 2.2.2. 滤波电容的计算

滤波电容通常允许通过无功电流不超过额定值 5%，根据以下公式计算电容值上界：

$$C \leq \frac{5\%I}{\omega U} \approx 3.3\mu\text{F} \#(2.7)$$

电感、电容组成 LC 滤波电路，取截止频率为  $f_{\text{sw}}/10$ ， $f_{\text{sw}}$  为桥臂开关频率。

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1}{LC}} = 2\pi f_n \#(2.8)$$

综合考量电容耐压、高频滤波效果，选择 MKP 电容，容量 2 $\mu\text{F}$ ，采取三角形连接。

## 2.3. 硬件保护动作阈值的计算

### 2.3.1. 过流保护阈值

装置额定输出电路 2A，过流保护阈值设定为 2.5A。电流采样选用 CC6902SO-5A 霍尔电流传感器，400mV/A 灵敏度，当电流到达阈值时输出电压 1V，分压得信号  $I_{\text{SAMPLE}}$ ，送至后级由 LMV393 搭建的窗口比较器，高于比较器上限，产生过流保护信号。

### 2.3.2. 过压保护阈值

过压保护阈值设定为 34V，电压采样采用 INA149 高共模差分运放，并带有 1.5V 参考电压，当前级检测电压升至 34V，经过 1/31 分压输入 INA149，输出 2.6V 信号  $V_{\text{SAMPLE}}$ ，送至后级由 LMV393 搭建的窗口比较器，高于比较器设定上限，产生过压保护信号。

## 3. 硬件电路与程序设计

### 3.1. 硬件电路设计

#### 3.1.1. 功率拓扑框图

变流器 1 与变流器 2 均采用三相全桥拓扑，连接单元包括空气开关及共模电感。空

气开关用于切换电阻负载、变流器 2；共模电感用于抑制载波环流。

功率拓扑框图见图 2，主回路原理图见图 3，无源滤波模块原理图见图 4。

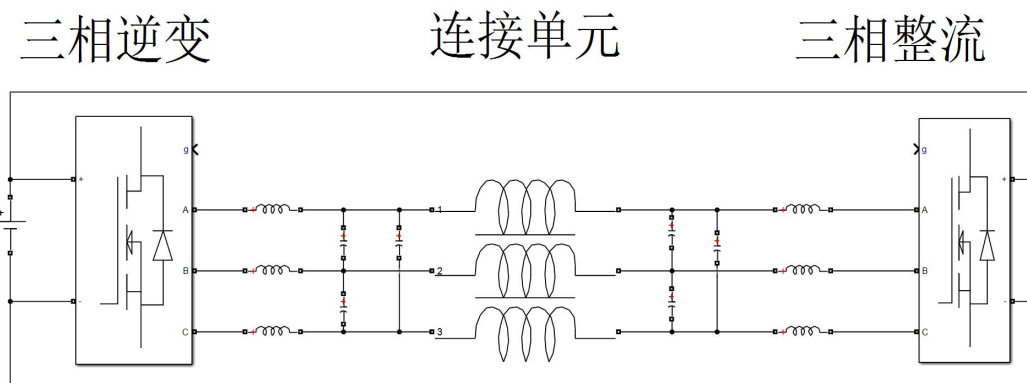


图 2 功率拓扑子系统框图

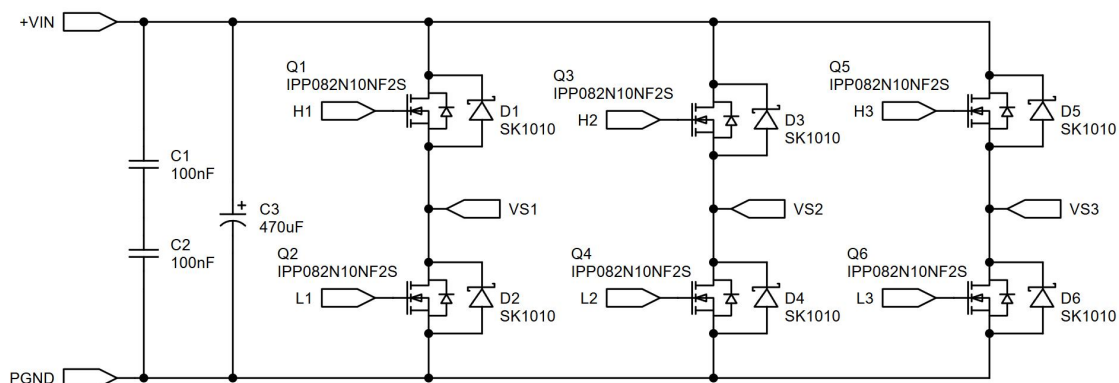


图 3 三相全桥电路原理图

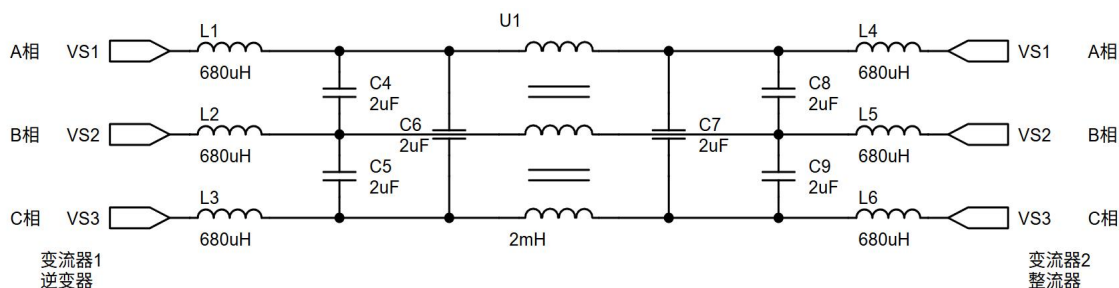


图 4 无源滤波模块原理图

### 3.1.2. 采样子系统框图与电路原理图

逆变输出为浮地输出，需要隔离的电压电流采样方式。综合上文所述，采用高共模差分运放 INA149 作为电压采样方式，CC6902 霍尔电流传感器作为电流传感方式。偏置由基准源产生。信号经过 RC 低通滤除 50Hz 分量后作为参考信号，送至比较器 TLV3202 负端实现过零比较。这种方式的优点是对偏置变化不敏感，在偏置干扰大时仍可产生占空比 0.5 的方波，作为硬件锁相信号。采样反馈信号经过窗口比较器，产生硬件保护信号，送至 DSP 内的 TZ 模块，用于实现硬件过流、过压保护。采样子系统电路图见图 5。



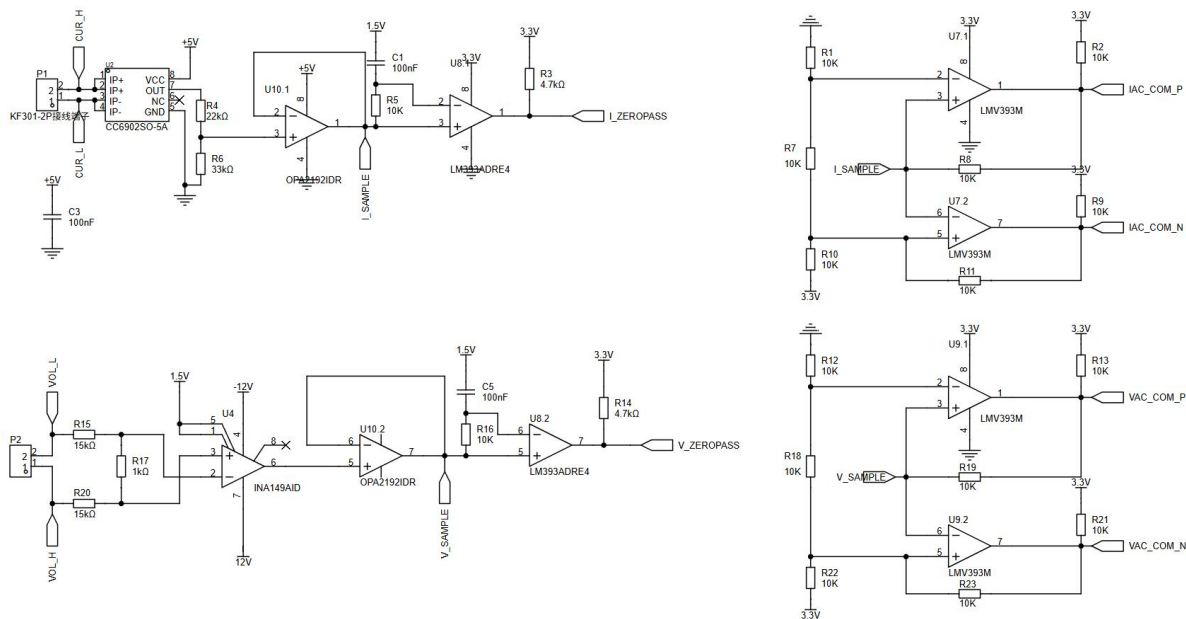


图5 采样子系统电路图

## 3.2. 程序设计

### 3.2.1. 程序功能描述与设计思路

#### 1、程序功能描述

根据题目要求，软件部分主要实现按键驱动、屏幕显示、数据更新、环路计算与发波。

- 1) 按键部分：设置频率、电压、电流、工作模式。
- 2) 显示部分：显示频率、电压、电流、故障状态。
- 3) 环路部分：全数字化控制环路，根据采样值完成环路计算，更新占空比。
- 4) 保护部分：通过 DSP 内的 TripZone 模块接收外部故障信号，硬件关断 PWM。

#### 2、程序设计思路

为保障核心的环路中断不被打断，将环路置于 ADC 中断内，剩余功能均放于主函数完成。

主函数内完成人机交互功能。通过存储当前按键值与上一次循环的按键值，提取按键下降沿作为触发信号，修改对应数值。在频率发生变化时，重新计算 QPR 差分方程系数，完成调频功能。

ADC 中断内完成环路计算。通过 ePWM 触发 ADC 采样，优化系统时序。ADC 完成采样转换后进入 ADC 中断，确保环路输入为当前周期内 ADC 采样值。在周期末尾装载比较值，更新占空比，减少由单周期内占空比多次改变导致的输出抖动。

### 3.2.2. 程序流程图

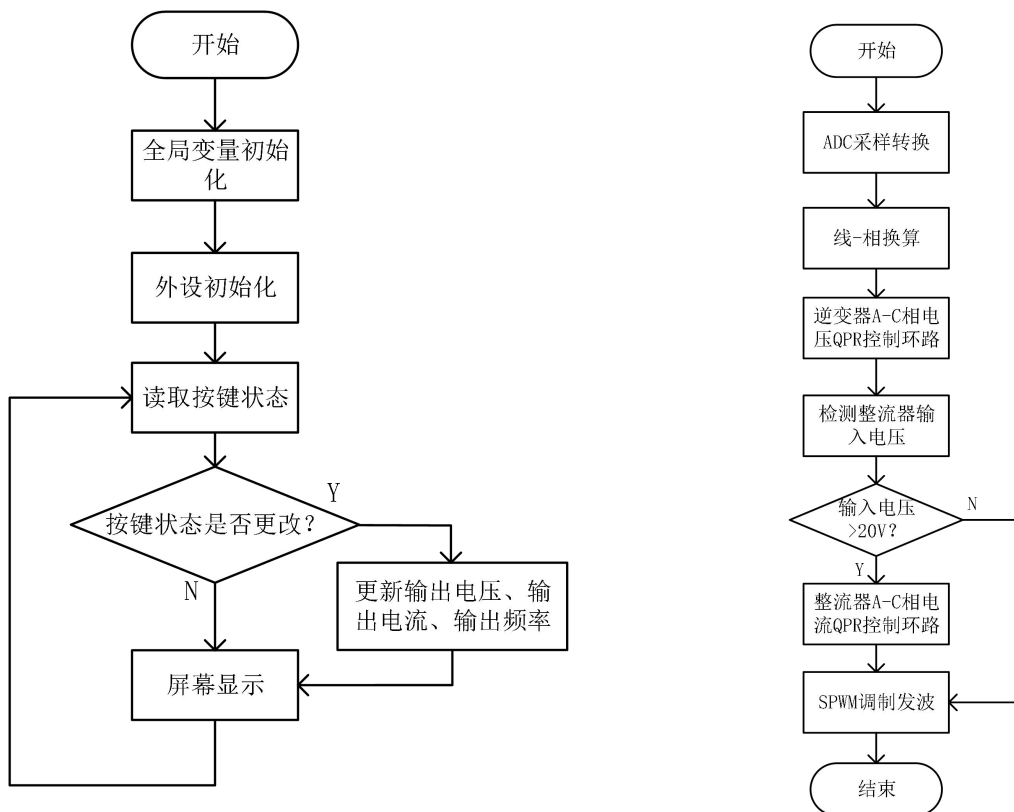


图 6 程序流程图

## 4. 测试方案与结果分析

### 4.1. 测试方案

#### 1、硬件测试

通过直流电源的串联模式，输出确定直流电压、电流，检测采样模块、片内 ADC 采样以及错误信号状态。单片机 ePWM 模块 SPWM 调制，检测三相全桥模块输出，确保无缺相、错序。

#### 2、软件仿真测试

利用 Matlab 中 Simulink 工具箱，对变流器开关模型、控制环路进行仿真与参数的预调试，确保变流器控制环路稳定，响应速率高，环路带宽适宜。

#### 3、硬件软件联调

烧写程序，根据实际波形，微调电流环、电压环控制系数。确保输出电流电压无静差、畸变小，波形无震荡，控制环路稳定可靠。

4.2. 测试条件与仪器

测试条件：检查多次，硬件焊点无虚焊，软件仿真运行正常，输出无静差。三相逆变器、三相 PWM 整流器在独立开环情况下均可正常运行。逆变器带载输出正常，整流器能量反馈正常。

测试仪器：两通道直流电源 SPD3303、五位半数字万用表 SDM3055、双通道示波器 SDS2352、三相功率分析仪 PA333，50 Ω 3A 三相电阻。

4.3. 测试结果及分析

4.3.1. 测试结果

表 1 三相逆变器输出电压测试结果

电压/V	32.011	32.007	31.982	31.961	31.977	31.959
电流/A	0.0000	0.5221	1.0102	1.5321	2.0123	2.5204
uTHD/%	0.31	0.35	0.36	0.42	0.43	0.47

表 2 能量回馈效率测试

电压/V	32.031	32.012	32.011	32.002	31.957	31.908
电流/A	0.5003	1.0314	1.5213	2.0305	2.5606	2.6910
效率/%	91.01	91.50	92.10	92.79	92.85	92.90

4.3.2. 测试分析与结论

根据上述测试数据，由此可以得出以下结论：

- 1、由表 1 得出，逆变器输出谐波少，无静差, 负载调整率符合要求。
- 2、由表 2 得出，整流器功率回馈正常，输入电流谐波含量低，系统损耗小。

综上所述，本设计达到设计要求。

5. 总结

本装置以三相全桥逆变器、三相 PWM 整流器为核心拓扑，以准比例-谐振控制为核心控制手段，搭建一套带有能量回馈功能的变流器负载试验装置。通过准比例-谐振控制方法、SPWM 调制方式，实现了对被试变流器与能量回馈装置的控制。输出谐波含量小，无静差，回馈效率高，控制环路稳定不自激，达到题目基本要求。

6. 参考文献

[1]樊犇, 董锋斌, 王宁, 等. 准比例谐振控制在三相逆变器控制中的应用[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2025, 41 (02) :46-53+108.