

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。

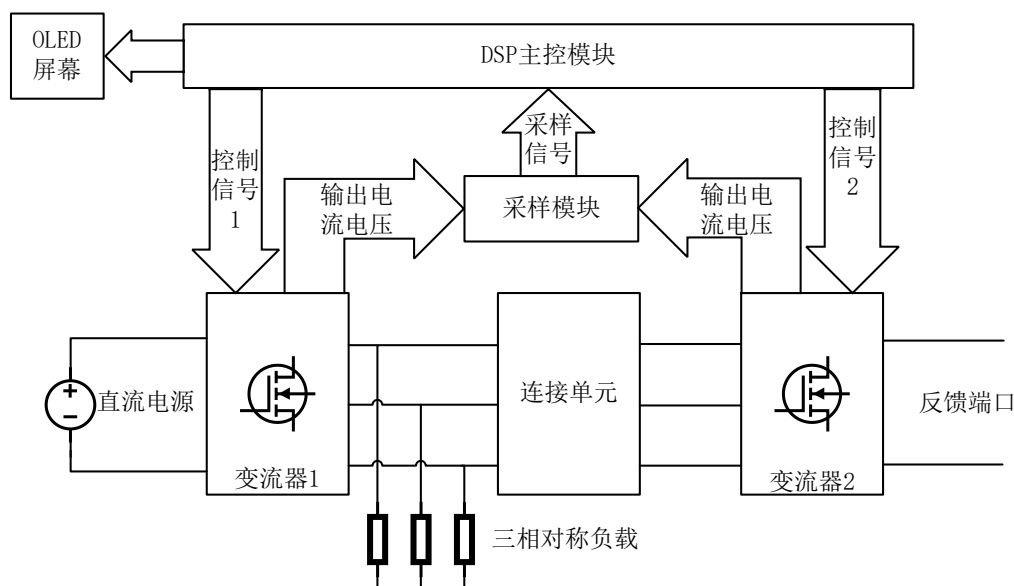


图 1 能量回馈的变流器负载试验装置系统框图

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：

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

取最大电感电流纹波为电流最大值的 20%：

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

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 μH 。

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：

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

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

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

综合考量电容耐压、高频滤波效果，选择 MKP 电容，容量 2 μF ，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_{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_{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。

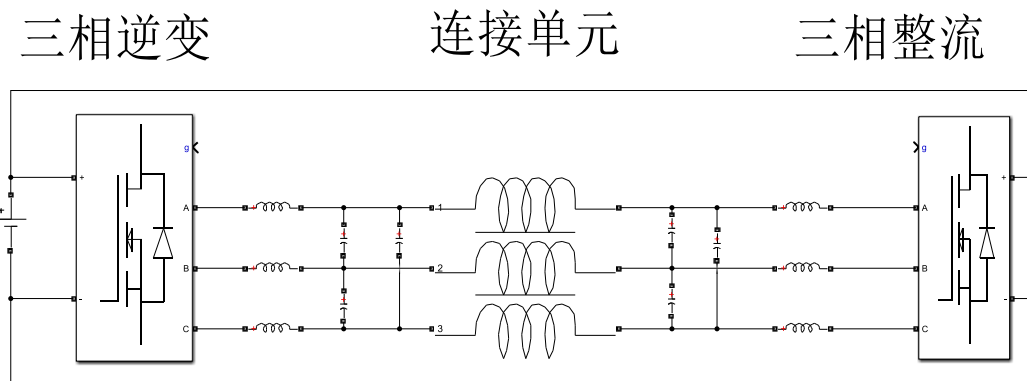


图 2 功率拓扑子系统框图

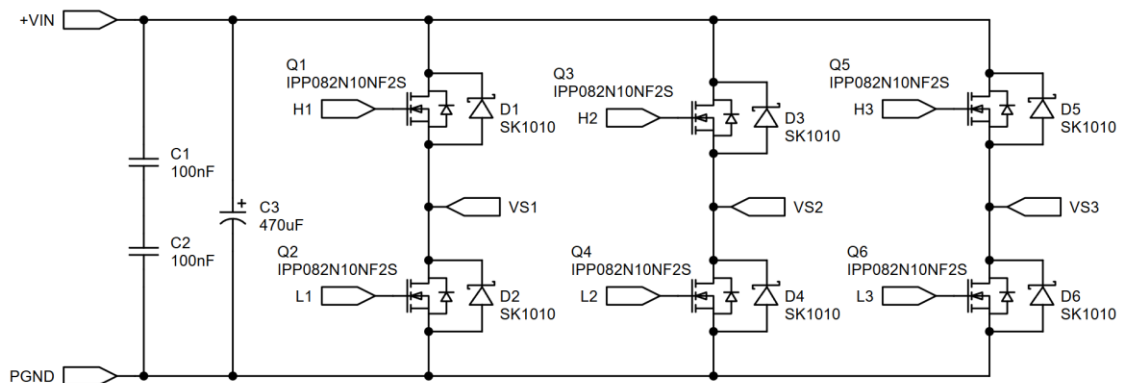


图 3 三相全桥电路原理图

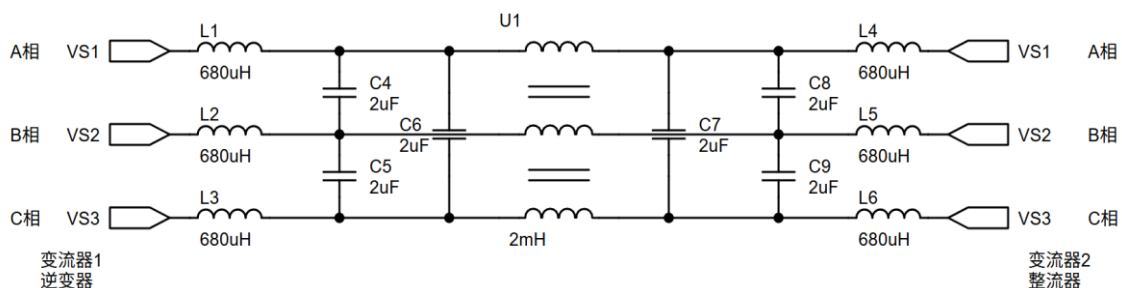


图 4 无源滤波模块原理图

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。

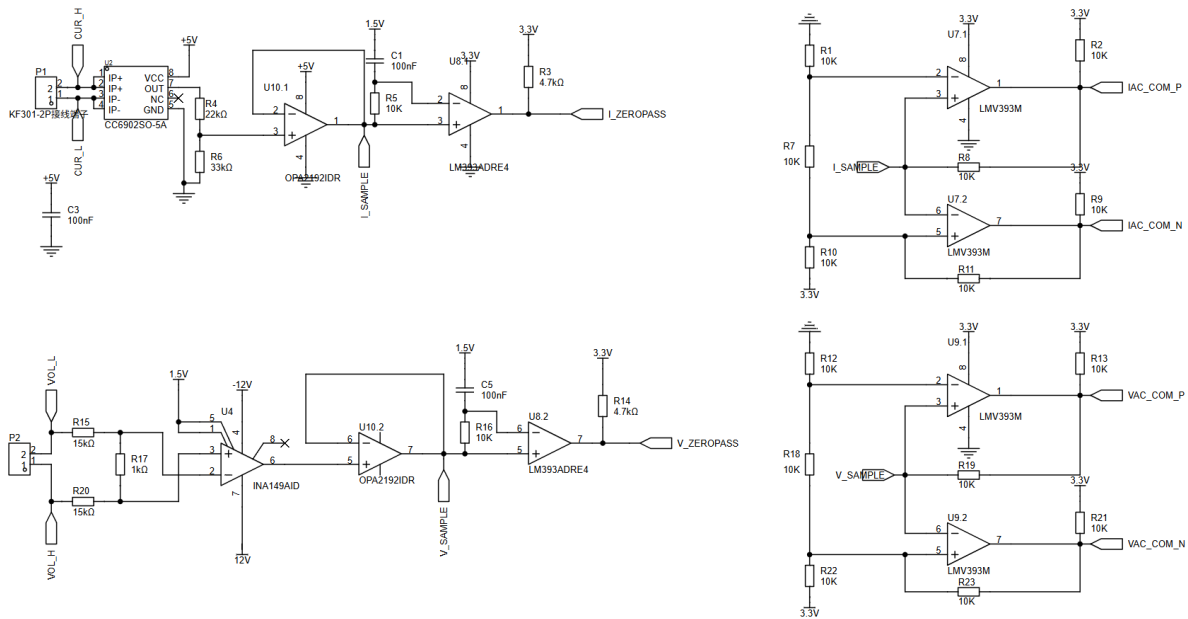


图5 采样子系统电路图

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

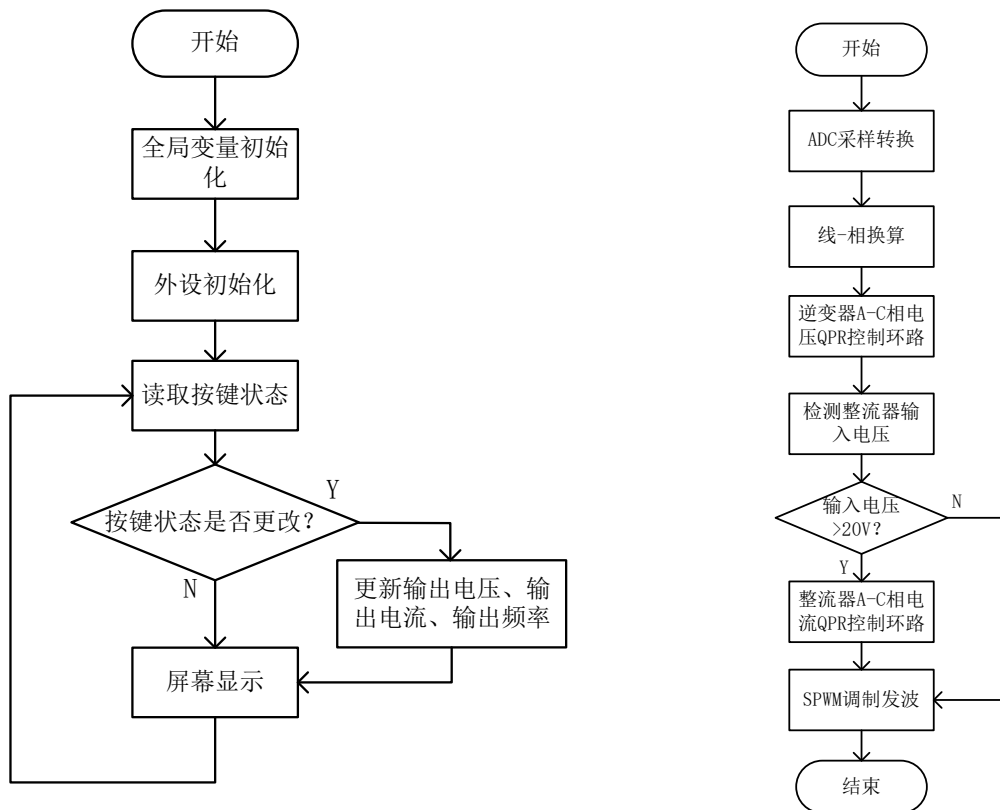


图 6 程序流程图

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.