

全国大学生电子设计竞赛设计报告

——山东赛区

单相逆变器并联运行系统（A 题）



2023 年 8 月 5 日

摘要

本文设计并制作了由 2 个单相逆变器组成的并联系统，系统可以向电阻负载 R_L 供电，也可以通过变压器 T 并入 220V 电网。系统采用梁山派GD32F470 作为主控 MCU，使用 H 桥 SPWM 方式实现逆变原理，使用BUCK模块进行降压，通过使用霍尔传感器进行电流采样，过零比较器进行相位调整，使用 PID 算法进行电流电压控制，从而监测与控制电路，使其满足并网要求。系统的性能经过测试和分析，满足设计要求，具有较高的效率和稳定性，能够实现逆变器的并联运行和并网运行。本设计以本设计各个模块布局合理，系统稳定性较好，制作成本较低，经过测试后，能够完成题目的基本要求与发挥部分。

关键词： SPWM 波逆变、梁山派GD32F470、PID算法、过零比较器

目录

1	设计任务与要求	4
1.1	基本要求	4
1.2	发挥部分	4
2	系统方案设计	5
2.1	设计方案的比较与选择	5
2.1.1	逆变器拓扑结构的选择	5
2.1.2	主控 MCU 的选择	5
2.1.3	电流采样方案的选择	5
2.2	系统设计结构原理	6
3	系统理论分析与计算	7
3.1	逆变器电路原理与SPWM	7
3.2	逆变器并网运行原理与控制	7
4	电路与程序设计	9
4.1	电路设计	9
4.1.1	电路总体框图	9
4.1.2	模块电路图	9
4.2	程序设计	9
4.2.1	程序功能描述	9
4.2.2	程序设计思路	9
5	系统测试及结果分析	11
5.1	测试方案	11
5.2	测试结果及分析	11
6	结论	12
A	附录	13

1 设计任务与要求

设计并制作由2个单相逆变器组成的并联系统，系统框图如图1所示，逆变器并联后可为电阻负载 R_L 供电，也可通过变压器T并入220V电网。

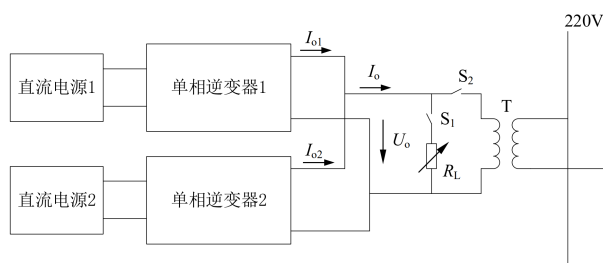


图 1: 单相逆变器并联示意图

1.1 基本要求

1. 断开 S_2 ，闭合 S_1 ，仅用逆变器1向 R_L 供电。输出电压有效值 U_o 为 $24V \pm 0.2V$ ，频率 f_o 为 $50Hz \pm 0.2Hz$ 时，输出电流有效值 I_o 为 $2A$ 。
2. 在基本要求 1 的工作条件下，输出交流电压总谐波畸变率（ THD ）不大于 2%。
3. 在基本要求 1 的工作条件下，逆变器1的效率 η 不低于88%。
4. 断开 S_2 ，闭合 S_1 ，仅用逆变器1向负载供电， I_o 在 $0A \sim 2A$ 间变化时，负载调整率 $S_{I1} \leq 0.2\%$ 。

1.2 发挥部分

1. 断开 S_2 ，闭合 S_1 ，逆变器1和逆变器2并联，共同向 R_L 供电， $U_o = 24V$ ， $f_o = 50Hz$ 时， $I_o = 4A$ 。
2. 断开 S_1 ，闭合 S_2 ，逆变器1与逆变器2并联且能并网，能在 $2A \sim 4A$ 范围内按数字设定输出电流 I_o ，其误差绝对值应小于设定值的6%。
3. 断开 S_1 ，闭合 S_2 ，逆变器1与逆变器2并联且并网， I_o 在 $1A \sim 3A$ 间变化时，逆变器1及逆变器2的输出电流比值 $K = I_{o1} : I_{o2}$ 可在指定范围（ $0.5 \sim 2$ ）内按数字设定自动分配，其相对误差的绝对值不大于5%。
4. 其他。

2 系统方案设计

2.1 设计方案的比较与选择

2.1.1 逆变器拓扑结构的选择

方案一 使用IRF1407 MOS管搭建H桥逆变电路

IRF1407为N沟道，漏源电压75V，连续漏极电流为130A，导通电阻为7.8mΩ。

方案二 使用BSC070N10NS MOS管搭建H桥逆变电路

BSC070N10NS为N沟道，漏源电压为100V，连续漏极电流为80A、导通电阻小仅为7mΩ。

综合以上两种方案，我们选择方案二。

2.1.2 主控 MCU 的选择

方案一 GD32F470

GD32F470 基于 ARM Cortex-M4 内核，主频可达 240MHz；具有很多个GPIO接口，多个定时器；支持多种通信接口和外设；ADC DAC精度较高，为国产芯片，封装的函数库简单易懂。

方案二 STM32G431RBT6

GD32F470 基于 ARM Cortex-M系列内核，主频可达 170MHz；具有52个GPIO接口，多个定时器，支持较多通信接口和外设；ADC DAC精度很高，但其使用的HAL库代码较为抽象难懂。

方案三 STC89C52

STC89C52价格便宜，供货周期短；但基于 8051 内核，主频只有 12MHz；内存容量小；IO和定时器数量少。

综合以上两种方案，我们选择方案二。

2.1.3 电流采样方案的选择

方案一 电阻采样

电阻采样电路简单，成本低，但是电阻功耗大，且电阻的阻值会随着温度的变化而变化，影响采样精度。

方案二 霍尔传感器采样

霍尔传感器采样电路复杂，成本高，但是霍尔传感器功耗小，且不受温度影响，采样精度高。

方案三 使用HLW8032电能采样模块采样简单，不需要进行滤波和运算，直接输出有效值和功率值；缺点是采样精度低，传输速度慢。

综合以上两种方案，我们选择方案二。

2.2 系统设计结构原理

根据题目要求和设计方案，本文设计了如图2所示的系统结构原理图。

图 2: 系统结构原理图

3 系统理论分析与计算

3.1 逆变器电路原理与SPWM

逆变是将直流电能转换为交流电能的过程，逆变器是实现逆变的电路。本文采用H桥 SPWM 方式实现逆变，其原理如图3所示。

图 3: H桥SPWM逆变原理图

SPWM是一种常用的逆变控制方法，其基本思想是将正弦波信号与三角波信号进行比较，当正弦波大于三角波时，输出高电平；当正弦波小于三角波时，输出低电平。这样就可以得到一系列宽度不等的脉冲信号，其平均值近似于正弦波。通过调节正弦波的幅值和频率，可以控制输出电压的幅值和频率。

根据 SPWM 法的原理，可以推得

$$T_{on} = \frac{ARR - CCR}{ARR} = \frac{U_c \sin(\omega t_o)}{U}$$

故单片机中寄存器的值应赋值为

$$CCR = ARR - \frac{U_c \sin(\omega t_o)}{U} \times ARR$$

3.2 逆变器并网运行原理与控制

逆变器并网运行是指逆变器将输出电能输送到电网中的方式，其目的是提高系统的经济性和环保性。逆变器并网运行需要满足以下条件：并网逆变器的输出电压幅值与电网电压幅值相等，频率与电网频率相等，相位与电网电压相位相等并网逆变器具有良好的并网保护功能，能够应对电网故障和异常情况。

本文采用相位移位控制方式实现逆变器并网运行，其原理如图4所示。

相位移位控制方式是指通过调节逆变器输出电压与电网电压之间的相位差，来控制逆变器向电网输送能量。相位移位控制方式的优点是控制简单，响应快，但缺点是存在谐波干扰，需要进行滤波处理。

本文采用以下方法实现相位移位控制：通过过零比较器检测电网零点，并将信号送入单片机进行计数，得到电网周期和频率。通过霍尔传感器采样电流，并将信号送入单片机进行处理，单片机将电网与逆变器差异对比计算出误差信号，并通过 PID 算法进

图 4: 并网运行原理图

行反馈调节。根据反馈调节结果，调节 SPWM 信号的相位差，实现逆变器与电网之间的并网。

图 5: 系统电路图

图 6: 电路总体框图

4 电路与程序设计

4.1 电路设计

根据系统结构原理图，本文设计了如图5所示的系统电路图。

4.1.1 电路总体框图

4.1.2 模块电路图

4.2 程序设计

4.2.1 程序功能描述

根据题目要求，软件中基础部分主要实现逆变器输出符合要求的电流电压，发挥部分可实现逆变器的并联且能并网，电流电压频率等均满足要求。

4.2.2 程序设计思路

根据系统功能需求和控制方法，本文设计了如图8所示的程序流程图。

程序由以下几个部分组成：

- 程序初始化：配置单片机的时钟、中断、外设等参数，初始化串口屏和 DMA，设置 PWM 的频率和占空比，设置 PID 的参数和范围，设置逆变器的工作模式和输出参数。

- 主循环：

循环执行以下任务：

通过串口接收串口屏发送的数据，并解析出用户输入的指令和参数，根据指令和参数进行相应的操作或设置。通过 DMA 获取ADC采样值传输到内存中，并对采样值进行滤波和运算，并与设定值进行比较，计算出误差信号，并通过 PID 算法

图 7: 模块电路图

图 8: 模块电路图

进行反馈调节。接收过零比较器发送的信号，并对信号进行计数，并根据反馈调节结果，调节 PWM 的相位差，实现逆变器与电网并网。

- 中断服务：定时器中断：定时产生 PWM 信号，并更新 PWM 的占空比和相位差。DMA 中断：在 DMA 传输完成后，清除 DMA 标志位，并重新启动 DMA 传输。串口中断：处理串口发送的数据，清除串口中断标志位，并重新启动串口传输。

5 系统测试及结果分析

5.1 测试方案

为了验证系统的性能是否满足设计要求，本文设计了以下测试方案：

测试一 断开S2，闭合S1,测试逆变器1向负载供电时的输出电压、电流、频率、THD 等参数，以及负载调整率等指标。

测试二 断开S2闭合S1，测试两个逆变器并联向负载供电时的输出电压、电流、频率等参数。

测试三 断开S2闭合S1，测试两个逆变器并联且并网后的输出电流、输出电流比值、其误差绝对值。

5.2 测试结果及分析

6 结论

系统的性能经过测试和分析，满足设计要求，具有较高的效率和稳定性，能够实现逆变器的并联运行和并网运行。本文的主要创新点和优点如下使用高性能的单片机 GD32F470 控制逆变器，充分利用其高速运算和多功能外设的特点，实现多任务的并行处理和高效率的数据传输。使用主从控制方式实现逆变器并联运行，简化了调机制，提高了同步精度和灵活性。使用相位移位控制方式实现逆变器并网运行，简化了控制方法，提高了响应速度和可靠性。使用触摸屏作为人机交互界面，方便了用户对系统的操作和监测。

A 附录

1. 主要元器件清单：
2. 部分程序代码如下：