

基于STM32的变流器能量回馈系统设计与实现

刘申澳, 金 海

浙江理工大学, 信息学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2022年2月11日; 录用日期: 2022年3月25日; 发布日期: 2022年4月2日

摘 要

能量回馈系统以全桥逆变电路和同步BOOST升压电路作为主电路, 采用STM32单片机作为主控芯片, 产生一路PWM波和双路互补的SPWM波通过以IR2103芯片为核心的驱动电路驱动上述核心电路的MOS管。系统通过OP07精密整流电路采集交流电流信号反馈至单片机, 利用PID算法调节PWM波输出的占空比及SPWM波输出的调制比, 从而控制系统的稳定输出。本设计能够实现输出频率在10~100 Hz范围内1 Hz步进可调, 稳定输出不同恒定值设定下的工作电流, 逆变得到的正弦波失真度控制在2%以下, 能够有效实现能量的回馈利用, 系统整体的效率可达到90%。

关键词

变流器, 能量回馈, 全桥逆变, PID闭环, 交流采样, 不控整流

Design and Implementation of Converter Energy Feedback System Based on STM32

Shen'ao Liu, Hai Jin

School of Information, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

Received: Feb. 11th, 2022; accepted: Mar. 25th, 2022; published: Apr. 2nd, 2022

Abstract

The energy feedback system uses a full-bridge inverter circuit and a synchronous BOOST booster circuit as the main circuit. And an STM32 microcontroller as the main control chip is used to generate one PWM wave and two complementary SPWM waves to drive the MOS tubes of the above core circuit through a drive circuit with the IR2103 chip as the core. The system collects the AC current signal through OP07 precision rectifier circuit and feeds it back to the microcontroller. The PID algorithm is used to adjust the duty cycle of the PWM output and the modulation ratio of the SPWM output to control the stable output of the system. This design can achieve 1 Hz step ad-

justment in the output frequency range of 10~100 Hz, and make the output stable at different constant value settings of the operating current, the inverter obtained sine wave distortion control below 2%, can effectively realize the energy return utilization, and the overall efficiency of the system can reach 90%.

Keywords

Converter, Energy Feedback, Full-Bridge Inverter, PID Closed-Loop, AC Sampling, Uncontrolled Rectification

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着社会经济的迅速发展, 工业和生活用电量显著增加, 电力能源问题也日趋严重, 因此降低电子设备中的能量损耗已成为一项重要的研究课题。通常情况下变流器在进行负载试验时, 在变流器的输出端连接负载, 该负载的能耗就成为输出电能消耗, 为了实现节约电能, 应进行能量回馈。就此问题, 本文提出了一种基于变流器负载试验的能量回馈系统设计方案, 能够有效地解决变流器带载时的能量损耗问题。系统主要由两个部分构成, 第一部分是 DC/AC 转换, 该部分主要以 STM32F103 单片机为核心, 通过自然数查表法控制硬件 PWM 模块生成 SPWM 脉冲信号, 采用双极性调制方案驱动单相全桥逆变电路, 输出经过 LCL 滤波电路便可在负载端得到稳定的正弦交流电。第二部分将逆变得到的交流电进行整流滤波, 再通过上述主控芯片调制出 PWM 脉冲信号, 经过 IR2103 驱动电路驱动 MOS 管控制同步 BOOST 升压电路, 并通过反馈电路连接到逆变器的输入端口, 与直流电源共同给逆变器电路提供电源, 最终实现能量的有效回馈利用。

2. 能量回馈系统总体设计

本系统设计由全桥逆变电路、同步 BOOST 升压电路、整流滤波电路、交流电流采样电路、辅助电源模块、IR2103 驱动电路、OLED 显示模块等部分构成。直流电 40 V 供电的情况下, 经过全桥逆变电路得到正弦交流电输出到负载端, 由 SPWM 控制理论可知: 当单相逆变器输入为 40 V 时, 输出的理论最大值为 $20\sqrt{2}$ V, 由于 SPWM 波不能始终保持满调制比输出, 且结合实际损耗情况, 要保证提供反馈端能够提供稳定的 40 V 直流电, 需要在整流滤波电路的输出端加入一个 BOOST 同步升压电路, 最终通过反馈电路连接到逆变器的输入端口, 与直流电源共同给逆变器电路提供电源, 最终实现能量的有效回馈利用。电压和电流的控制都采用 PID 控制方法, 对输出的电压或者电流进行采样反馈, 再经过单片机的处理, 形成负反馈闭环控制, 有效地保证了系统输出的稳定性, 并且提高了系统整体能量回馈效率。系统总体的设计框图如图 1 所示。

3. 系统硬件设计

3.1. 全桥逆变电路

逆变器又称 DC/AC 变换器, 主要功能是将输入的直流电转换成交流电输出。目前, 逆变电路主要分为两种: 半桥逆变器和全桥逆变器。半桥逆变器虽然电路简单成本低, 但是因为其开关管数量少, 导致

开关电流大, 功耗大, 所以只适用于小功率的场合。相比之下, 全桥电路功耗较小, 适用于大功率电路, 应用较为广泛, 因此本设计选用的是全桥逆变电路, 将输入直流电转换为所要求的高质量交流电。

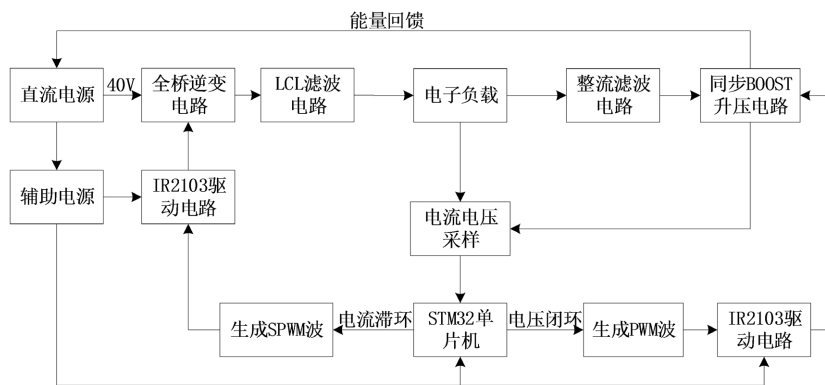


Figure 1. Overall system design diagram
图 1. 系统总体设计图

电压型全桥逆变电路可以看成是由两个半桥电路组合而成的, 其电路的拓扑如图 2 所示。Q1~Q4 分别是四个型号为 IRF540 的开关管, 电路一共有四个桥臂, 桥臂 G1 和 G3 为一对, 桥臂 G2 和 G4 为另一对, 成对桥臂同时导通, 两对交替各导通 180 度。当电流按照正极→G1→LC→G3→负极, 此时电压为 U_{in} 。之后 U_{G1} 、 U_{G3} 变为低电平, G1、G3 关断, U_{G2} 、 U_{G4} 电平变为高电平。当电流按照正极→G4→LC→G2→负极, 这时电压为 $-U_{in}$, 由此可见, 当 4 个开关管如此循环工作时, 输出端就会形成交流电, 通过改变功率管驱动电压波形便可以得到成正弦变化的平均电压[1]。

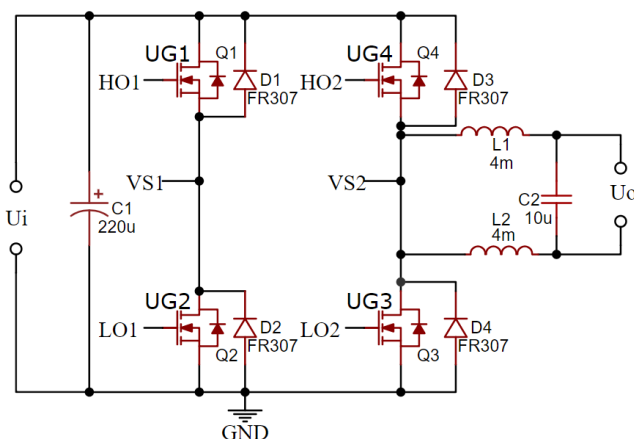


Figure 2. Full-bridge inverter circuit diagram
图 2. 全桥逆变电路图

3.2. IR2103 驱动电路

在上面一节中, 确认逆变电路的开关管选择为 IRF540, 那么由于 IRF540 的驱动电压是 10 V, 而 STM32 单片机输出的 SPWM 波信号的电压远远达不到这个电压值, 所以在两级电路中间, 我们还需要一个驱动电路, 增大输入信号的电压值以驱动开关管正常工作。驱动芯片选择美国 IR 公司的 IR2103 芯片, IR2103 因为该芯片是一个集成了双通道和栅极驱动[2]的高度集成模块, 另外这款芯片是高速高压的,

恰好可以满足设计的要求; 该芯片可以搭建自举电路, 达到驱动上桥的目标, 所以这款芯片在 MOS 管的驱动电路、开关电源中应用十分广泛。

IR2103 的输入电源电压在 10 V 到 20 V, 输出的电平为一组互补的输出电压 HO 和 LO, 输入与输出对应逻辑关系如图 3 所示, 根据其内部原理图逻辑, 输出高电平 HO 端是两个输入端的一个与的关系, LO 输出端是两输入端的反向之后再与的关系, 实际应用中, 我们将两个输入端连接在一起, 这样根据上述的输入输出逻辑关系, 我们即可以得到两个互补的输出信号, 即 HO 输出端和输入端是同向的, 而 LO 则是刚好相反的。IR2103 应用电路如图 4 所示, 实际电源供电选择 18 V, 足够大的供电电压保证输出电压可以完全达到驱动电压的电压值, 在输入电源与地之间接入一个电解电容, 起到滤波的作用; 二极管 D1 和电容 C7 是自举二极管和自举电容, IR2103 的自举电路相当于一个 Boost 升压电路, 在开关频率很高的前提下, 利用自举升压二极管、自举升压电容等电子元件, 使电容放电电压和电源电压叠加, 从而使电压升高[3]。

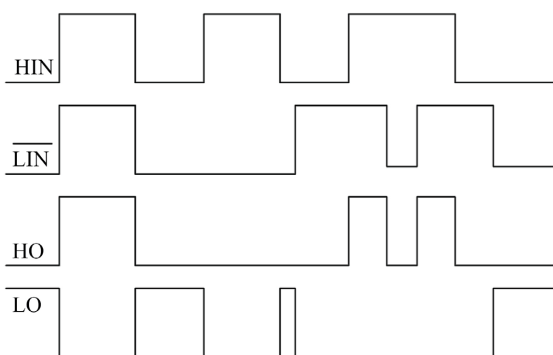


Figure 3. IR2103 input-output logic diagram

图 3. IR2103 输入与输出逻辑图

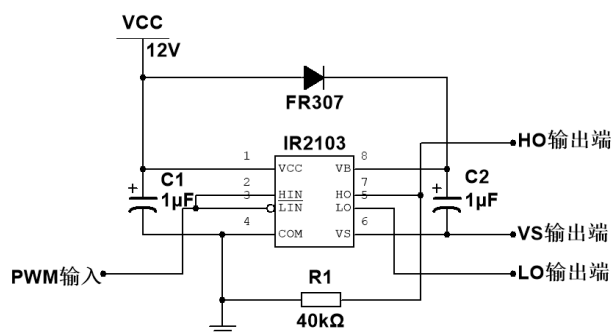


Figure 4. IR2103 application circuit diagram

图 4. IR2103 应用电路图

3.3. 单相桥式整流电路

在线式 UPS 为负载供电时需要将市电进行 AC/DC 和 DC/AC 两次变换, 其中第一次 AD/DC 变换就需要用到单相桥式整流电路的整流作用。单相桥式整流电路又称整流桥, 由四个二极管组成(二极管 V1 和 V3 构成一对桥臂, 二极管 V2 和 V4 构成一对桥臂), 结构图如图 5 所示。

整流的原理是利用二极管的单向导电性, 将交流电压的负电压整流成正电压(也就是将负半轴的电压对折到正半轴), 形成直流脉动电压, 波形如图 6 所示。当交流电压 u_2 输入正半周期时, 二极管 V1 和 V3 导通, V2 和 V4 截止, 此时在输出端的负载电阻上形成上正下负的电压 u_0 。相反, 当交流电压 u_2 输

入负半周期时, 二极管 V2 和 V4 导通, V1 和 V3 截止, 同样在输出端负载电阻上形成上正下负的电压[4]。由此可以可知当输入为完整交流电时, 负载上即可得到直流脉动电压。

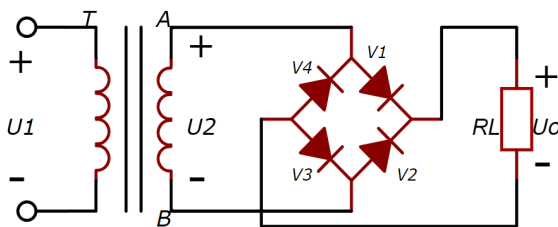


Figure 5. Single-phase bridge rectifier circuit diagram
图 5. 单相桥式整流电路图

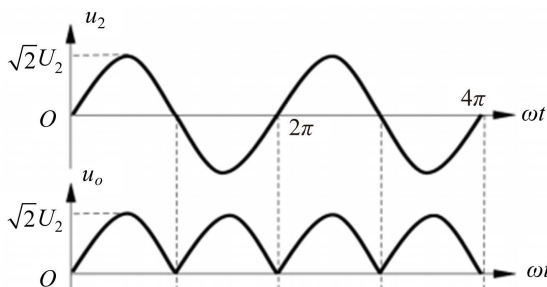


Figure 6. AC-DC pulsating voltage waveform diagram
图 6. 交流与直流脉动电压波形图

3.4. 交流采样电路

为了将负载电流稳定在恒定值并且实现对电流的设定恒定值进行切换, 要求对于逆变器的输出电流进行采样计算。首先需要通过电流互感器将采样电路和主电路隔离开来, 在把经过电流互感器的信号进行精密整流得到电压信号, 此电压信号传送到单片机再根据欧姆定律计算出电路的电流值。电流取样电路如图 7 所示, 采用 TA1015-1M 型电流互感器, TA1015-1M 是一款将大电流信号转换为小电流信号的高精度隔离电流测量芯片。为了把交流电转换为直流电, 必须要采用整流电路, 全波整流电路输出时只改变输出电压的相位, 而保留输出电压的形状。全波整流、半波整流在功能上与精密整流一样, 但是二者的适用范围完全不同。本系统选用了 OP07 芯片来设计精密整流电路, OP07 芯片是一种低噪声, 非斩波稳零的双极性运算放大器集成电路, 它具有非常低的输入失调电压, 在很多应用场合不需要增添额外的调零措施, 具有低失调、高开环增益的优点。

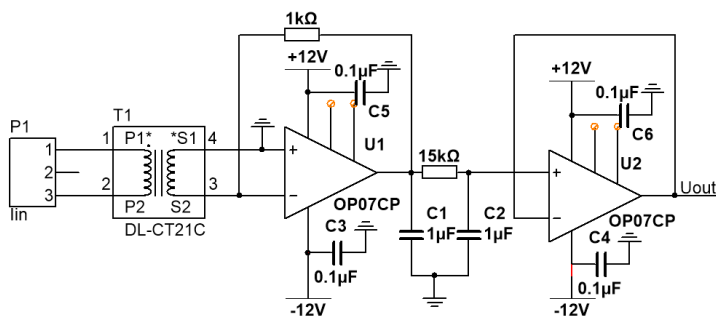


Figure 7. Current transformer sampling circuit
图 7. 电流互感器采样电路

4. 系统软件设计

4.1. 软件总体设计

软件部分主要实现单向 SPWM 的产生、逆变器输出电压有效值的恒定及你能量回馈装置中 BOOST 电路所需的 PWM。键盘模块实现了频率设置和恒定电流值的设定切换, OLED 显示模块显示逆变输出电压有效值、电流有效值。程序流程图如图 8 所示。系统采用了 PID 算法, 提高了控制精度, 使得变流器输出电流恒定在设定值, BOOST 输出端反馈的电压有效值稳定在 40 V。

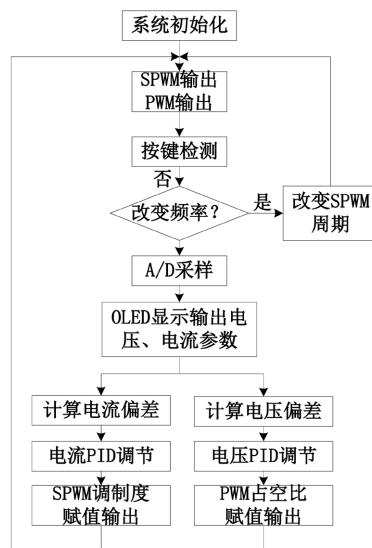


Figure 8. System main program flow chart

图 8. 系统主程序流程图

4.2. PID 算法实现

在稳定主路输出电压和支路输出电流都用到了 PID 控制, PID 控制在系统闭环控制系统中得到诸多应用。它的原理容易理解, 离散的数据也让计算更加容易, 且只需要确认三个参数, 一般积分参数电路控制是用不到的, 应用最多的是比例微分调节, 所以其具有参数的选定比较简单的优点[5]; 图 9 是 PID 控制的基本原理图, 即得到系统的输出后, 将输出经过比例, 积分, 微分 3 种运算方式, 叠加到输入中, 从而控制系统的输出, 形成闭环控制。

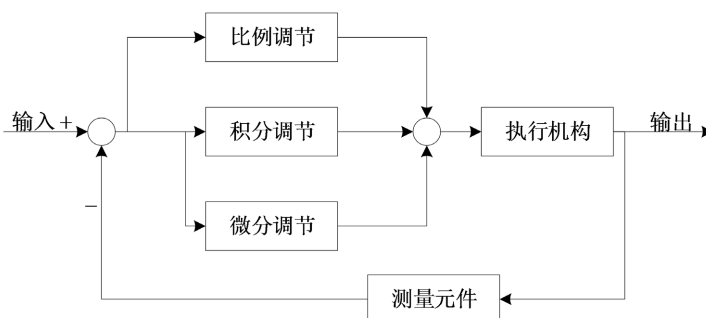


Figure 9. PID control principle diagram

图 9. PID 控制原理图

从上图可知, 我们需要设置比例系数、积分系数和微分系数, 且这些计算关系都是利用输出值与基准值之间的误差进行分析的, 对于离散的情况, 积分就是一个累加, 微分就是前后两项输入值之差, 而比例是最简单的, 直接对误差进行处理, 一般总的 PID 计算公式为[6]:

$$u(k) = k_p e(k) + k_i \sum_0^k e(n) + k_d (e(k) - e(k-1)) \quad (1)$$

式(1)中, k_p 、 k_i 、 k_d 分别为比例系数、积分系数和微分系数, $e(k)$ 是实际值与基准值的差, 也即是误差; 实际计算中, 最难的就是根据实际情况确定这三个系数, 比例系数一般是控制整个控制速度的快慢, 若比例系数较大, 那么调节速度就会较快, 但随着而来的问题就是稳定性很差, 可能不能稳定在基准值附近, 若比例系数太小, 那么调节速率就会很慢, 那么整个系统调节速率跟不上变化的速率, 那系统就会一直在变化, 不能达到稳定的状态, 所以需要在实验中不断时间确定一个稳定的比例系数; 积分系数由于这个积分项会将前面若干次的误差进行累计, 所以可以很好的消除稳态误差; 微分项的作用是让整个系统不要超出基准值, 由上述公式可以看出, 当当前误差值小于前一个误差值时, 也就是越来越接近目标值时, 微分项整个就是负值, 这样就让整个系数变小, 那么我们需要改变的值的增加或者减少的增量就会变小, 也就是达到慢慢接近目标值的目的, 让整个系统更加稳定, 不会出现突然变大又突然变小的情况。

4.3. SPWM 波输出及调节实现

上文提到的 PID 算法控制的是 SPWM 波的调制度, 我们采样的控制方法是双极性调制, 所以不能直接乘上调制度的方法改变输出电压幅值, 双极性 SPWM 波的计算方式为:

$$y = \sin(i * \text{PI}/M * 2) * \text{PWM} \quad (2)$$

其中, x 为序列值, 因为一个周期为 360 度, 所以 i 的取值范围为 0~360, 间隔为 1, PWM 为满占空比对应序列大小。

本次设计采用表格法输出 SPWM 波, 以逆变电路输出正弦波频率为 50 Hz 为例, SPWM 频率为 20 KHz, 即每个正弦波周期包含 400 个 SPWM 周期。所以要在主循环开始前先生成一个由 400 个数字组成且符合正弦变化的数组 $n_sine[]$, 并且通过给 PR1 寄存器赋初值, 即 $\text{PR1} = 800$, 为定时器中断设定频率为 20 KHz。每当定时器触发中断的时候, 就将表格中下一个数字经过换算赋值给 PWM 占空比寄存器 PDC, 即 $\text{PDC1} = (1 + (n_sine[\text{sine}] * M)) * \text{PTPER}$, 从而导致 PWM 输出不断变化, 又因为数据是符合正弦波的规律, 所以导致 PWM 输出波形符合正弦波, 从而实现输出 SPWM 波。

5. 测试方案与结果

在系统调试过程中, 首先设置 SPWM、PWM 低调节速率和 PID 低比例环节参数和积分环节参数, 逐步增加主电路模块的调节速率和积分环节参数, 调试主要以改变 SPWM 调节速率为主, 即改变其定时器中断的频率。测量输出电压稳态波形和频率, 变流器输出电流和 BOOST 电路输出电压及其稳态调节精度。

1) 频率调节

逆变器 1 输出端仅连接电阻性负载, 逆变器能输出 50 Hz、2 A 的单相正弦交流电, 在此条件下, 逆变器输出交流电的频率范围可设定为 10~100 Hz, 步进 1 Hz, BOOST 电路可以反馈 $40 \text{ V} \pm 0.25 \text{ V}$ 的电压到逆变器的输入端, 测试结果如表 1 所示:

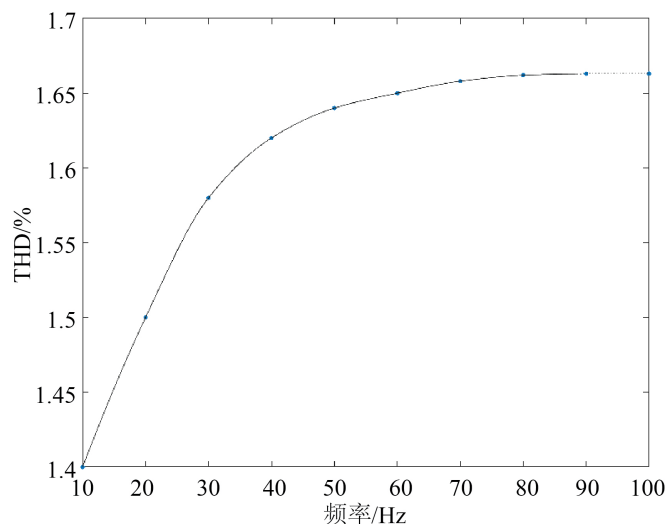
Table 1. Inverter output frequency, voltage, current measurement data**表 1.** 逆变器输出频率、电压、电流测量数据

频率/Hz	20	30	40	50	60	70	80	90	100
电流有效值/A	2.01	2.00	2.01	1.99	2.00	1.99	1.98	2.00	2.01
电压有效值/V	40.225	40.214	40.203	40.145	40.036	39.934	39.855	39.803	39.774

由表 1 可知, 变流器输出电流基本稳定在 2 A 左右, BOOST 电路输出端电压基本稳定在 40 V 左右, 电压电流闭环控制有效, 测试结果符合要求。

2) 稳态波形失真度

保持输出电流稳定在为 1 A, 改变正弦波频率, 使其在 1 Hz 至 100 Hz 之间变化, 使用功率分析仪, 得到测试结果如图 10 所示:

**Figure 10.** Distortion of sine waveform at different frequencies**图 10.** 不同频率下正弦波形的失真度

由图 7 所知, 随着输出频率的上升, 稳态下的正弦波失真度有一定幅度的上升, 不过测试数据表明正弦波波形的失真度都在 2% 以下, 说明该项指标符合测试要求。

3) 能量回馈

变流器与能量回馈装置连接, 系统能实现能量回馈。变流器输出电流 $I_1 = 2$ A, 要求直流电源的输出功率 P_d 越小越好, 测试结果如表 2 所示:

Table 2. The relationship between output current and output power, system efficiency**表 2.** 输出电流与输出功率及系统效率之间的关系

输出电流/A	1.99	1.99	2.00	1.99	2.01
直流输出功率/W	13.125	13.114	13.250	13.130	13.267
系统效率	91.25%	90.84%	91.54%	92.36%	90.62%

由表 2 可知, 直流电源的输出功率控制在了 15 W 以下, 并且系统效率达到了 90%, 测试结果符合

要求, 表明能量回馈有效减少了系统的能量损耗。

6. 结论

能量回馈能够维持电网的供需平衡, 最大限度地满足社会用电需求, 实现社会效益与经济效益双赢[7]。本系统采用 STM32F103 单片机作为主控芯片, 以全桥逆变电路和同步 BOOST 升压电路作为主电路, 实际测试数据表明, 将纯阻性负载连接在全桥逆变电路后, 就能输出 50 Hz、2 A 的单相正弦交流电, 其频率可实现在 10~100 Hz 之间 1 Hz 步进调节, 同步 BOOST 升压电路可以反馈 $40\text{ V} \pm 0.25\text{ V}$ 的电压到逆变器的输入端, 能够有效地进行能量反馈, 达到减少能量损耗的目的。PID 控制算法可以实现快速稳定输出电压、电流的功能, 系统的整体效率在 90% 以上。系统整体将有限的能量进行了最大限度地有效利用, 该装置节电率高, 工作性能稳定, 随着我国工业自动化程度的提高、节能减排的发展需求, 通过进一步的优化在节能技术领域可实现应用推广[8]。

参考文献

- [1] 张秀, 郑爽, 史国庆. 24 V 交流单相在线式不间断电源的设计[J]. 中国新技术新产品, 2008(16): 105-106.
- [2] 孙玉轩, 王建华, 张雄. 一种基于 IR2103 驱动的 DC-DC 变换电路[J]. 襄阳职业技术学院学报, 2017, 16(2): 75-78.
- [3] 申浩锋, 高宁波. 基于 IR2103 的步进电机全桥驱动电路设计[J]. 微电机, 2016, 49(10): 67-71.
- [4] 孟秀娟, 刘庆伟. 单相桥式整流电路分析及应用[J]. 南方农机, 2020, 51(14): 167-168.
- [5] 陈刚. 改进的分数阶 PID 控制算法及其应用[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [6] Olana, F.D. and Abose, T.A. (2021) PID Temperature Controller Design for Shell and Tube Heat Exchanger. *International Journal of Engineering and Manufacturing*, **1**, 37-46. <https://doi.org/10.5815/ijem.2021.01.05>
- [7] 陈梦阳, 何紫薇, 池佳豪, 胡安正. 用于能量回馈装置的变流器设计与实现[J]. 电子制作, 2019(10): 9-10+8.
- [8] 唐林. 变流器负载试验中的能量回馈装置电路的探析[J]. 四川职业技术学院学报, 2019, 29(5): 155-159.