

2017 年全国大学生电子设计竞赛

微电网模拟系统（A 题）



ZJA259

汪*_朱*_张*

2017 年 8 月 12 日

摘 要

本设计由两个独立逆变装置向负载提供能量来模拟微电网系统，逆变器拓扑结构采用三相全桥逆变电路。两台逆变器中的 MOS 管分别由两块独立的 STM32 单片机输出的 SPWM 波，通过 L6388 驱动电路来控制，其死区时间由 CPLD 控制。其中逆变器 1 作恒压源，逆变器 2 作恒流源，两者均采用 PID 反馈调节 SPWM 波的频率来保持电压电流的恒定。逆变器 2 先采集 1 输出的电压，获得其相位等参数，算法实现跟踪，再输出 SPWM 波从而保证同相输出。两台逆变器保持输出设定的功率比和减小电流差，是由两块单片机通过 WIFI 收发模块通讯来控制实现，体现了互联网+。此外，还具有按键、显示等功能。实验证明，本系统效率可达到 92%，THD 小于 1%，负载调整率小于 0.1%，人机交互界面友好，满足题目所有要求。

1 方案设计与论证

1.1 总体方案

系统总体方案图如下图 1 所示。

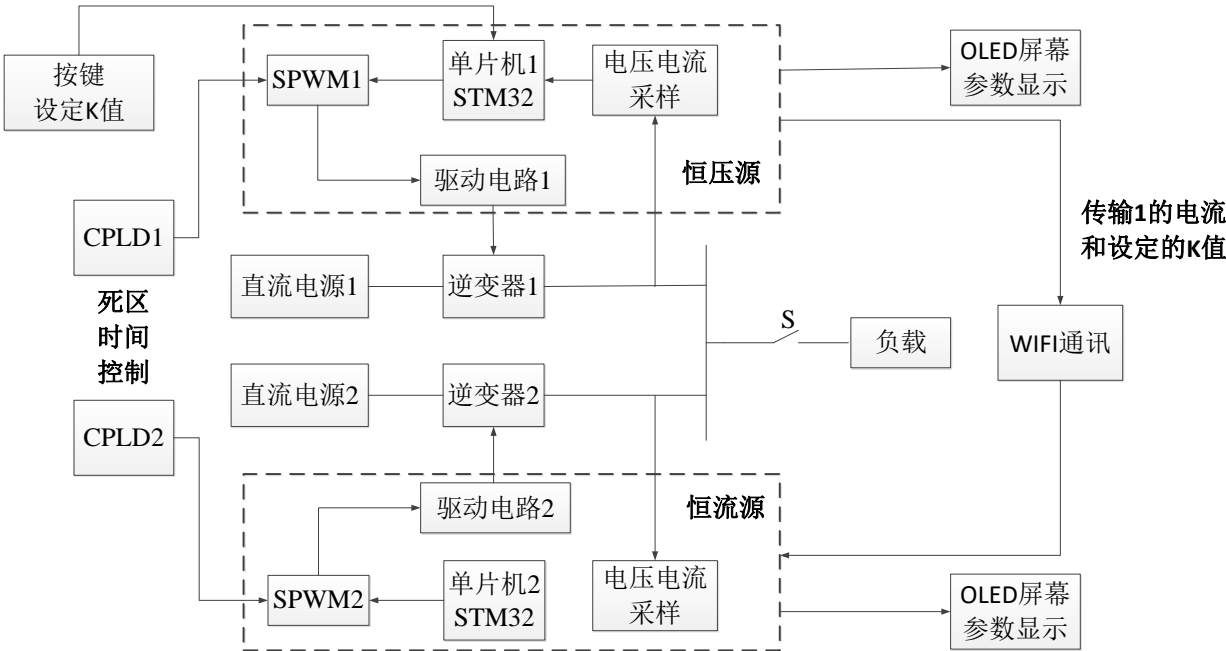


图 1 系统总体方案图

1.2 恒压恒流控制方案

方案一：采用单级 DC-AC 控制

电压电流采样之后，STM32 单片机通过 PID 反馈调节 SPWM 波的占空比率，来控制逆变器的 MOS 管的导通和关断时间，从而控制输出电压电流达到设定要求。

方案二：采用 DC-DC-AC 两级控制

直流电源输入逆变器前加一级 DC-DC 变换，电压电流采样之后，直接反馈调节 DC-DC 变换后的电压，相当于改变逆变器的输入电压，从而控制输出电压电流达到设定要求。

相比较方案一中三相 SPWM 波不断反馈调节变化，方案二中的 SPWM 波占空比始终保持不变，需要改变的仅是 DC-DC 变换的单个 PWM 波，控制简单，但是增加了一级 DC-DC 变换电路，增加了电路的复杂性，同时会消耗部分功率，降低了效率。故本系统选择方案一。

1.3 SPWM 波发生电路

方案一：采用全硬件分立元器件电路搭建，产生三角波信号作为载波来调制经过处理后的输入参考正弦波信号。

方案二：采用三相 SPWM 逆变器专用芯片 EG8030。EG8030 芯片是一款数字化的、功能完善的自带死区控制的三相纯正弦波逆变发生器芯片，可应用于 DC-AC 单级工频变压器升压变换架构。外接 16MHz 晶体振荡器，能产生高精度、失真和谐波都很小的三相 SPWM 信号。并具备完善的采样机构，能够采集电流信号、温度信号、三相电压信号，实施处理，实现输

出稳压和各项保护功能。芯片采用 CMOS 工艺，内部集成 SPW 正弦发生器、死区时间控制电路、幅度因子乘法器、软启动电路。

方案三：采用 STM32F103 单片机编写程序产生 SPWM 波。STM32 系列是为要求高性能、低成本、低功耗的嵌入式应用专门设计的 ARM Cortex-M3 内核。运行速度快，时钟频率可达到 72MHz，11 个定时器以及丰富的 I/O 口，并内置 3 个 12 位 A/D 转换器，2 个 12 位 D/A 转换器，其高级定时器可产生带死区互补的 PWM 波。

虽然采用专用芯片 EG8030 来设计电路会方便，但是不易于随时调整控制输出的大小，而全硬件搭建电路，增加了电路复杂性，在三相电路中不易控制。STM32F103 系列单片机功耗低，运算速度快，可以根据采样来的电压电流信号反馈调节，随时改变 SPWM 波的占空比输出，从而到达不同要求的电压电流，故本设计选用方案三。

1.4 逆变器控制方案

方案一：采用一块单片机同时控制两台逆变器的 SPWM 波。

方案二：采用两块单片机分别控制各自逆变器的 SPWM 波。

方案一实行起来，简单易操作，而且每一相的输出电压电流都是同相，无需再进行相位调整。但是方案一似乎不满足“微电网”这个标题，因为在实际电网中，每个逆变器都是独立工作的，并不是由同一个控制中心控制。故本设计选择方案二。

2 方案理论分析与计算

2.1 同时运行控制策略

逆变器 1 采样其输出电压，通过 PID 反馈调节 SPWM 波的频率使之输出恒压，即逆变器 1 作为恒压源，同时为了获得其功率，需再采样其输出电流。逆变器 2 采样其输出电流，通过 PID 反馈调节 SPWM 波频率使之输出恒流，即逆变器 2 作为恒流源，同时为了保证同相，还需采集其电压。首先逆变器 1 输出能量，逆变器 2 不输出，单片机 2 采集逆变器 1 输出的电压，获得其相位等参数，算法处理后跟踪其电压，再输出相应的 SPWM 波，从而实现同相，同相实现的原理框图如下所示。两台逆变器通过 WIFI 模块 ESP8266 通讯，单片机 1 将逆变器 1 输出的电流值和题目要求设定的 K 值传输至单片机 2，单片机 2 再输出相应的 SPWM 波。以上，系统即相当于三相同相位的恒压源与恒流源并联后输出能量，故可使负载保持恒压恒流；通过 WIFI 通讯实现电流差和功率比的要求。

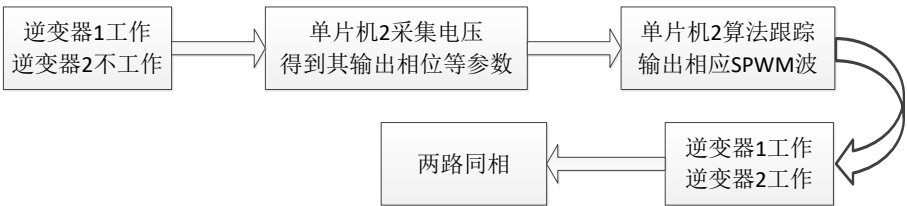


图 2 同相实现流程框图

2.2 提高效率和减小 THD 的方法

逆变器效率的提高，即是要减小逆变器的相关损耗，而逆变器的损耗主要包括铁损、铜损和开关损耗，故本系统提高效率的方法主要从这三大方面入手。首先铁损包括两种，一种是磁滞损耗，与导磁材料材质和磁感应强度有关，即低损耗高导磁率铁芯，并且用低的激磁电流以降低磁感应强度，这样能降低磁滞损耗。另一种是涡流损耗，是由于铁芯自身感应电势形成环形电流而造成电阻发热损耗。这种损耗一个办法是提高导磁材料电阻率，比如铁氧体的磁芯；另一个办法是减小环形电流，比如很薄的硅钢片。其次是铜损，选择粗的漆包线，各个引线也尽可能选择粗一点，增大截面积以减小线路电阻，从而减少损耗。最后是开关损耗，选择低导通电阻的 MOS 管，以及在满足要求的基础上适当降低开关频率。

谐波畸变很大一部分是由于非线性负载产生的，而题目所给负载为电阻负载，故本系统不考虑其他类型负载可能产生畸变的情况。本系统中减小 THD 的方法主要是绕制合适的电感，减小 SPWM 波的死区时间，选择低导通电阻的高速 MOS 管以及驱动能力强的驱动芯片。

2.3 电容和电感的选择

逆变电路三相输出采用 LC 滤波，去除输出正弦波上的毛刺。

电容选择 $4.7\mu\text{F}$ 的 CBB 电容，用于减小输出脉动和低频干扰。这里选择 CBB 电容的原因，是因为 CBB 电容以金属化聚丙烯膜串联结构型式，无极性，绝缘阻抗很高，频率特性、电性能优异，能抗高电压、大电流冲击，具有损耗小，可靠性高和有自愈性能。

电感采用铁氧体的磁芯，2mm 线径漆包线绕制而成。其中逆变器 1 的电感绕制 1mH 大约 32 圈左右，逆变器 2 的电感绕制 1.6mH 大约 63 圈左右。

2.4 SPWM 波

驱动信号 SPWM 波的由规则采样法计算生成，其频率越大，则绕制的电感值可以减小，但频率越大，开关损耗也会相应增加，故本系统设计的 SPWM 波的载波频率选择 20kHz。

2.5 有效值计算

交流电流的有效值为 $I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$ ，而单片机采集的电流信号是离散的，但是采样频率足够快，故有效值可直接离散化求，在一个周期内的采样电流平方和的累加值除以采样次数，再开根号，即采样电流的方均根值，用公式表示即为 $I = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n i_j^2}$ 。

电压的有效值求法与上述电流求法一样。

3 硬件电路与设计程序

3.1 主电路

两个逆变器的主电路都是由 6 个 MOS 管构成的全桥电路，MOS 管选择 IRF1010E，其参数 $V_{DSS} = 60\text{V}$ ， $R_{DS(on)} = 12\text{m}\Omega$ ， $I_D = 84\text{A}$ ，满足题目要求。电路图如下图 3 所示。

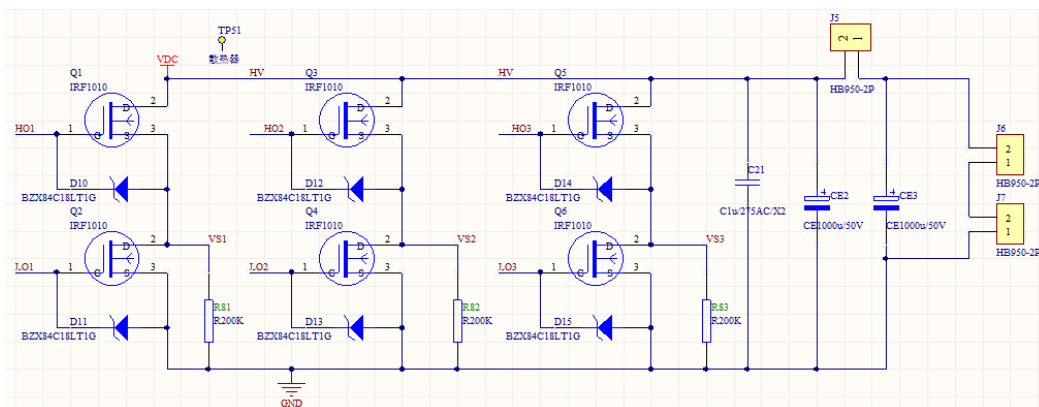


图 3 主电路图

3.2 驱动电路

MOS 管驱动芯片选择 L6388ED，满足题目要求。其动态响应快，典型通断延迟时间 225/160ns、内部死区时间 220~420ns、匹配延迟时间 40ns；栅极驱动输入电压宽达-0.3~18V，具有 600V 自举能力，400mA/650mA 输出驱动能力的高速 MOSFET 驱动芯片；可支持 400kHz 高频开关。MOS 管驱动电路如右图 4 所示。

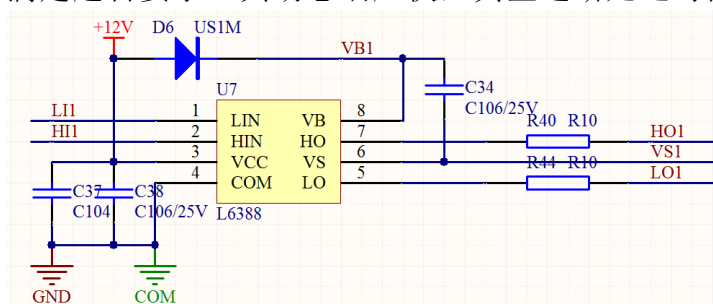


图 4 驱动电路

3.2 测量电路

电压和电流的测量通过分别通过电压互感器和电流互感器来采样，经过一个放大器电路，再由单片机检测和控制。由于单片机不能采样负电压，故在放大器正输入端接入 $1/2 V_{cc}$ 的直流偏置。其中电压互感器选择 TV31D 2mA/2mA，电流互感器选择 GNG 5A/5mA，放大器电路如右图 5 所示。

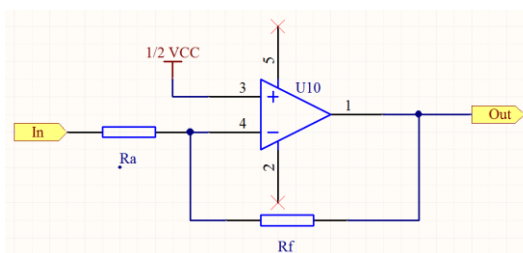


图 5 放大器电路

3.4 辅助电源

辅助电源由变压部分、滤波部分、稳压部分组成。采用三端稳压管实现，为整个系统提供 3.3V，5V 和 12V 电压，确保电路的正常稳定工作。原理图如下图 6 所示：

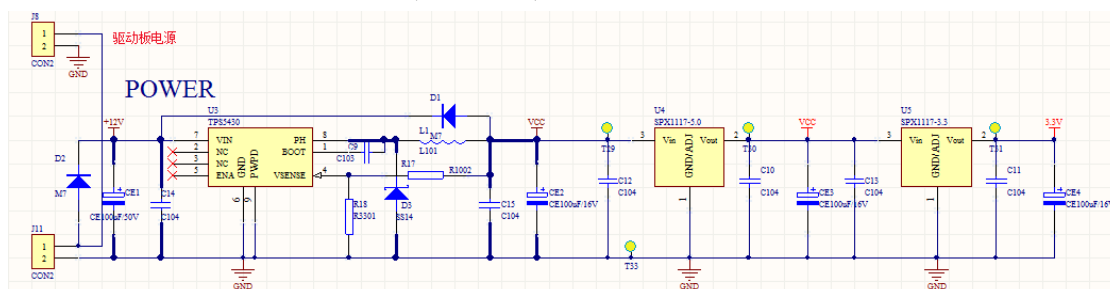


图 6 辅助电源

3.5 程序设计

本系统 STM32 单片机采用 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 操作系统运行程序，将应用开发与底层代码隔离，不需要进程管理，内存管理，外设管理等各种资源管理和软件层级划分。

本系统恒压恒流的控制，通过控制 SPWM 的占空比改变输出的电压电流值，以电压的反馈调节为例，程序流程图如下图所示，电流的调节类似。

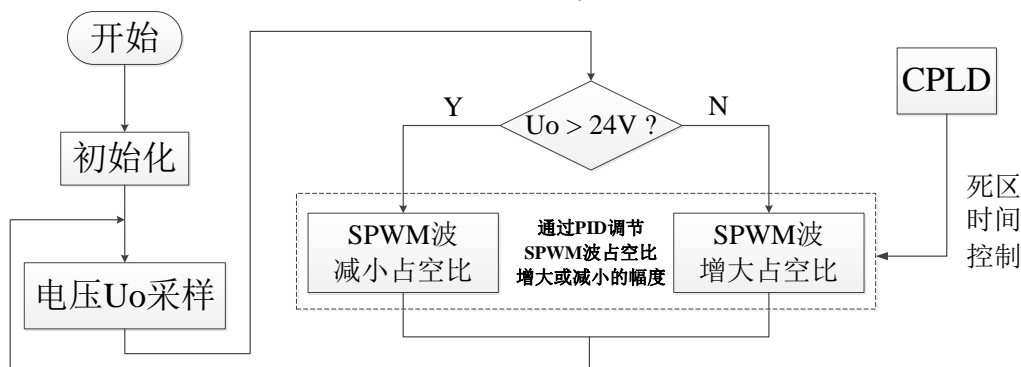


图 7 逆变器 1 的 SPWM 波控制流程图

由于 OLED 显示屏能自发光，分辨率高，可视角度大和低功耗的性能，故本系统显示屏幕选择 OLED 显示屏，其屏幕大小主机逆变装置 1 使用 1.3 寸，从机逆变装置 2 使用 0.96 寸。其显示驱动程序由单片机模拟 SPI 通信来实现。

4 测试方案与测试结果

4.1 测试仪器

万用表：MASTECH MY65

电能质量分析仪：Fluke 43B

4.2 测试方案

- 线电压测量：用万用表测量两相之间的电压即为线电压。
- 线电流测量：由于负载采用 Y 型接法，所以线电流等于相电流。又因为相电流比较好测，故用万用表直接测量相电流即可得到线电流值。
- 频率和 THD 用电能质量分析仪直接测得。

4.3 测试结果与分析

下面所述提及的输出电压电流均为三相线电压、线电流有效值。

基本要求：

- 基本要求（1）和（2）测试，结果均符合题目要求指标，如下表 1 所示。

表 1 测试记录表

	线电流 (A)	线电压 (V)	频率 (Hz)	THD (%)
要求指标	2	24 ± 0.2	50 ± 0.2	≤ 3
实际测得	2.01	24.03	50	< 1

- 基本要求（3）测试，在（1）条件下，输入输出的电压电流和功率以及效率计算如下表 2 所示。逆变器 1 的效率为 92.6%，题目要求为不低于 87%，故满足要求。

表 2 测试记录表

	电压 (V)	电流 (A)	功率 (W)	效率 (%)
输入	47.5	1	47.5	92.6
输出	24	1.06	44	

- 基本要求（4）测试，负载线电流有效值在 0~2A 变化，当电流为 2A 时，负载调整率小于 0.1%，题目要求为≤0.3%，故满足要求。记录值如下表 3 所示。

表 3 测试记录表

I _o (A)	0	2
U _o (V)	24.05	24.01
负载调整率 (%)	< 0.1%	

发挥部分：

下列表格中出现的 I₁、I₂，U₁、U₂，P₁、P₂ 分别表示逆变器 1 和 2 的电流、电压和功率。

- 发挥部分（1）和（2）测试要求：负载电流达到 3A，频率 50±0.2Hz，逆变器 1 和逆变器 2 输出功率为 1:1，两个逆变器输出线电流的差值绝对值不大于 0.1A。负载调整率≤0.3%。各项测试数据如下表 4 所示，均满足题目要求。

表 4 测试记录表

负载电流	频率	负载调整率	I ₁	I ₂	P ₁ : P ₂
3A	50Hz	< 0.1%	1.505A	1.495A	≈1 : 1

- 发挥部分（3）测试要求：负载电流在 1~3A 间变化时，逆变器 1 和逆变器 2 输出功率比值 K 为 1: 2~2:1 内自动分配，两个逆变器输出线电流折算值的差值绝对值不大于 0.1A。各项测试数据数据如下面 5 所示，均满足题目要求。

表 5 测试记录表

负载电流	比值 K	实际功率比	I ₁ (A)	I ₂ (A)	I ₁ 折算值	I ₂ 折算值	差值绝对值
1A	1: 2	1 : 1.98	0.336	0.664	0.672	0.664	0.008
	1: 1	1 : 1.02	0.495	0.505	0.505	0.505	0
	2: 1	1 : 0.529	0.654	0.346	0.654	0.692	0.038
2A	1: 2	1 : 1.99	0.668	1.332	1.336	1.332	0.004
	1: 1	1 : 1.01	0.995	1.005	0.995	1.005	0.01
	2: 1	1 : 0.5	1.333	0.667	1.333	1.334	0.001
3A	1: 2	1 : 2	1	2	2	2	0
	1: 1	1 : 1.01	1.49	1.51	1.49	1.51	0.02
	2: 1	1 : 0.52	1.97	1.03	1.97	2.06	0.09