

逆变电源

1 引言

信息技术的迅速发展,对供电系统的容量、性能和可靠性要求越来越高,也推动着电力电子技术的研究不断深入。多模块并联实现大容量电源被公认为当今电源变换技术发展的重要方向之一。

对于实现大容量的逆变电源,同样也可以采用并联技术。由于逆变电源常采用新型全控功率开关器件构成单元模块,受功率开关器件容量限制,单个逆变电源模块的容量是十分有限的,通过多个模块并联进行扩容,不仅可以充分利用新型全控功率开关器件的优势,减少系统的体积,降低噪声,还可以提高系统的动态响应速度和逆变器的通用性。

1.1 逆变电源并机的原理

交流电源间的并联运行远比直流电源并联运行复杂,由于是正弦波输出,必须要解决以下问题:

1) 两台或多台投入并联运行时,相互间及系统的频率、相位、幅度必须达到一致或小于容许误差时才能投入,否则会引起系统不稳定或各逆变单元间产生环流;

2) 并联工作过程中,各逆变单元输出必须保持一致,否则,频率微弱差异的积累将造成系统输出幅度的周期性变化和波形畸变,相位不同使输出幅度不稳;

3) 均流要求高,均流包括有功和无功均流,即功率的平均分配包括有功功率和无功功率的平均分配;

4) 故障保护除单元内部故障保护外,当均流或同步异常时,要将相应有故障的逆变单元切除,确保系统的稳定。

解决上述问题的关键是解决均流问题,鉴于此,采用有功和无功并联控制方式。

该控制方式实际上是实现并联功率偏差控制。当并联逆变单元出现输出有功或者输出无功不一致时,通过检测出本单元的有功或无功偏差值,来调节逆变单元输出电压的相位和幅值,保证每一个逆变单元输出的有功与无功相等,达到均流的目的。图 1 是两个逆变单元并联给负载供电的网络模型。逆变单元 1 的输出有功 P_1 和无功 Q_1 分别为:

$$P_1 = E_1 U \sin \delta_1 / X \quad (1)$$

$$Q_1 = (E_1 U \cos \delta_1 - U^2) / jX \quad (2)$$

逆变单元 2 的输出有功 P_2 和无功 Q_2 分别为:

$$P_2 = E_2 U \sin \delta_2 / X \quad (3)$$

$$Q_2 = (E_2 U \cos \delta_2 - U^2) / jX \quad (4)$$

由式 (1) ~ 式 (4) 可知,有功的大小主要取决于功率角 δ ,无功的大小主要取决于逆变单元的输出幅值 E_1 和 E_2 ,因此可以通过调节功率角 δ 来调节输出有功功率的大小,通过调节逆变单元输出电压的幅度来调节无功的大小,从而可实现各输出电源模块的均流。

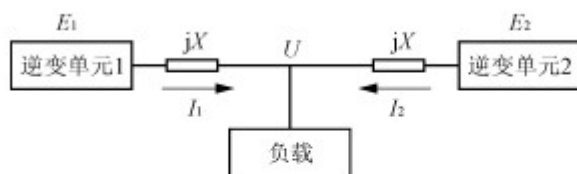


图1 两个逆变单元并联给负载供电的网络模型

1.2 逆变电源并机的数字控制

早期的微处理器运算速度有限，通常只具有给定正弦波的发生、控制逆变电源的开关及实现保护显示等功能，逆变电源的核心——逆变器的控制仍然需要模拟电路的参与。随着电机控制专用 DSP 的出现和控制理论的发展，使得逆变电源的控制技术朝着全数字化的方向发展。

逆变电源采用数字控制，具有以下明显优点：

1) 每个并联运行的逆变单元模块都采用全数字化控制，易于在模块之间更好地进行均流控制和通信，或者在模块中实现复杂的均流控制算法，从而实现高可靠性、高冗余度的逆变单元并联运行系统；

2) 易于采用先进的控制方法和智能控制策略，使得逆变电源的智能化程度更高，性能更完美；

3) 控制灵活，维护方便，系统的一致性好，成本低。

正弦波逆变电源的控制策略有 PLD 控制、无差拍控制、模糊控制等。对于高性能的逆变电源的设计，模糊控制器有着以下优点：

1) 模糊控制器的设计过程中不需要被控对象的精确数学模型，模糊控制器有着较强的鲁棒性和自适应性；

2) 查找模糊控制表只须占用处理器很少的时间，因而可以采用较高采样率来补偿模糊规则和实际经验的偏差。

2 系统概述

2.1 系统特性

1) 基于 DSP56F805 全数字化设计，控制元器件少，可靠性高，稳定度高；

2) 高可靠性 SPWM 设计；

3) 采用 CAN 总线技术，并机安装方便；

4) 可实现 N+1 逆变单元并联扩容；

5) 各逆变单元独立工作，民主均流；

6) 采用独特调控原理，“均流不平衡度” $\leq 2\%$ ；

7) 可带电热更换，操作维护方便；

8) 输出电压精度高，为 $220(1\pm 1\%)V$ ；

9) 输出频率精度高，为 $50\pm 0.001Hz$ ；

10) 全 LCD 数字显示、测量，菜单控制操作，便于对系统状态进行在线实时监测；

11) 智能化控制，RS-232 标准接口，可方便实现本地和远程集中监控管理；

12) 保护功能全，具有直流输入极性反接保护，直流输入电压过高、过低保护，输出电压过高保护，过载保护，短路保护，过热保护等。

2.2 系统概述

2.2.1 逆变电源并联系统

本逆变电源以 DA2000HP (2000VA) 逆变单元为核心，配以监控器、静态开关等，组成一个完整的逆变电源并联系统。DA-HP 逆变电源并联系统工作原理框图见图 2。

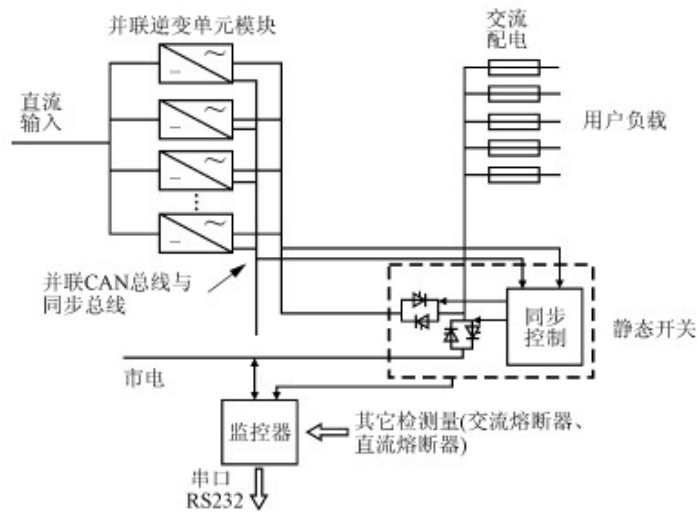


图2 DA-HP逆变器电源并联系统工作原理框图

本系统工作时，首先每台逆变单元 DA2000HP 进行自检，当检测到输入电压、温度和硬件都正常后进行同步和锁相，最后逆变单元送出交流电压。当检测到输入电压超低或超高、温度超高或硬件故障，逆变单元停止输出。逆变单元正常工作时，实时通过 CAN 总线检测系统的电压、电流、相位等参数，及时进行控制，实现逆变单元之间同相及均流，同时并联 CAN 总线与同步总线实时地把系统的参数、状态送给监控器，监控器通过 RS 232 接口把系统的参数、状态送给微机。在工作过程中，若逆变单元检测到故障，则快速进行“脱机”处理，即把出故障的逆变单元从系统中脱离，确保系统的稳定，同时发出告警信号及信息，提醒用户及时处理。

系统中的静态开关的作用是保证用户负载供电的不间断，当逆变系统出现故障时，静态开关及时接通市电，断开逆变系统，负载由市电供电。

2.2.2 逆变单元

DA2000HP 逆变单元采用 DSP 芯片 DSP56F805 及先进的数字信号处理 (DSP) 技术，使得逆变单元的变换、控制、反馈、测量、显示、通信等实现数字化控制和管理。同时运用先进的软件技术，控制和保护关键电路，尽可能减少整机元器件的数量，降低由于温度、老化等问题引起的不稳定因素，提高逆变单元的稳定性和可靠性。

DA2000HP 逆变单元工作原理框图见图 3。

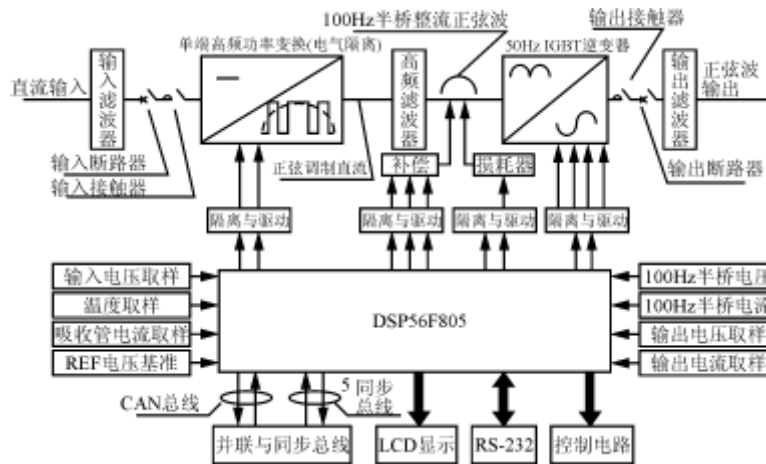


图 3 DA2000HP 逆变电源工作原理图

DA2000HP 逆变单元主变换电路采用高可靠性的单端高频功率变换电路，变换频率为 64kHz。直流输入通过输入滤波器、输入断路器、输入接触器送入单端高频功率变换电路，经过变换，变压器次级输出高压正弦调制波形。高压正弦调制波形经过高频滤波器滤去高频成分，得到 100Hz 半桥正弦波。100Hz 半桥正弦波经过 50Hz IGBT 逆变桥变换得到 50Hz 220V 纯净的正弦波。最后，50Hz 220V 纯净的正弦波通过输出接触器、输出断路器、输出滤波器送给负载。

为了提高逆变单元的可靠性和负载适用性，在 50Hz IGBT 逆变桥前增加补偿器及损耗器。

DA2000HP 逆变单元采用的算法是模糊控制算法，把电压误差和电流作为输入模糊变量，实现逆变单元模糊控制。

2.3 DSP56F805 简介

Motorola 公司开发的数字信号处理器 DSP56F805 具有 16 位高速定点运算能力，既有单片机（MCU）灵活控制功能和丰富的外设，又有 DSP 高速运算能力，非常适合电源控制、电机控制、工业控制、仪表制造等领域。这种型号的数字信号处理芯片具有如下优点：

1) 很高的处理速度

- 单指令执行周期为 25ns（工作频率为 80MHz 时），即每 s 可执行 40M 条指令；
- 单周期 16×16 并行乘-累加器；

2) 特有的并行结构

——采用 Harvard 结构，程序区与数据区的存储单元是分开的，高效 16 位 DSP56800DS P 内核；

- 3 条内部地址总线和 1 条外部地址总线；
- 4 条内部数据总线和 1 条外部数据总线；

- 3 条内部地址总线和 1 条外部地址总线；
- 4 条内部数据总线和 1 条外部数据总线；

3) 编程灵活

- 具有类似单片机的编程方式；
- 支持高级 C 语言编程；
- 开发方便，灵活的 EVM 板及丰富的 SDK 软件包；

4) 高度集成的内部资源

——片上集成闪存（Flash）及 RAM，计有 31.5K×16 位的程序 Flash，512×16 位程序 RAM，4K×16 位的数据 Flash，2K×16 位数据 RAM，2K×16 位的启动 Flash；

——2 个独立的 PWM 模块，每个 PWM 模块带有 6 个可独立编程 PWM 输出脚，3 个电流传感取样脚和 4 个故障检测输入脚，支持中心对准 PWM 和边沿对准 PWM 工作方式；

——可同时工作的 2 个 12 位 ADC 模块，每个 ADC 模块包含 4 路输入脚，ADC 模块可与 PWM 模块同步工作；

- 14 路独立的输入输出口，18 路复用的输入输出口；
- 1 个 CAN2.0 模块；
- 2 个异步串行口（SCI）和 1 个同步串行口（SPI）；
- 2 个微分解码器；
- 4 组计数定时器；
- 内置 COP 模块，方便完成看门狗（Watchdog）功能；
- 2 个外部中断源；
- 可编程的 PLL 时钟；
- JTAG/OnCE 接口，方便调试及生产。

3 系统硬件

系统硬件电路包括主控单元，A/D 电路，PWM 电路，并机与同步电路，检测、控制及显示电路，JTAG/OnCE 电路，RS-232、时钟及电源电路等。主控芯片用了一片 144-pinLQFP 封装的 DSP56F805 数字信号处理器，具体电路如图 4。

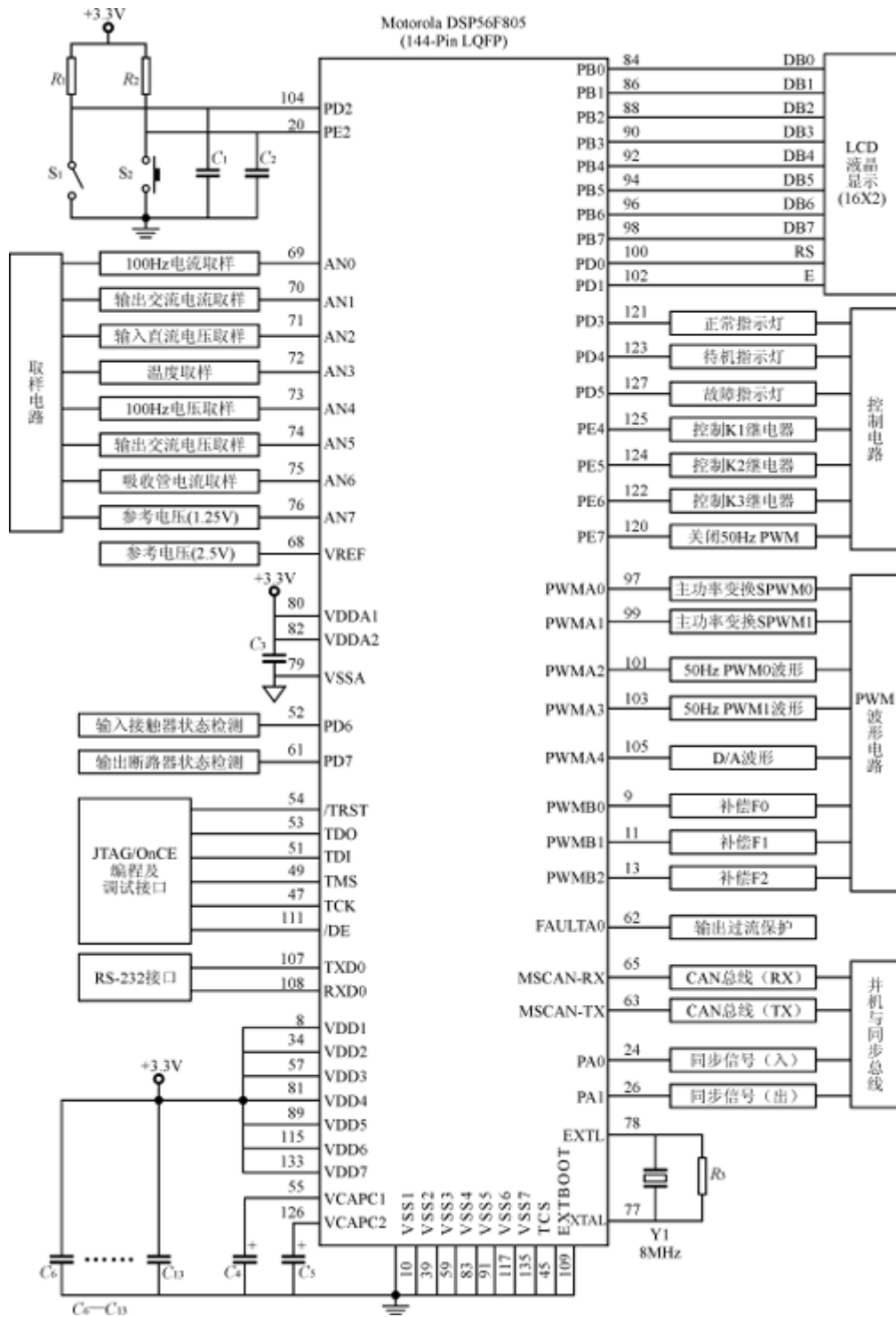


图 4 系统硬件

3.1 主控单元

硬件以 DSP56F805 为中心，充分利用其 A/D、PWM、内部 Flash、CAN 等自带功能，简化了设计。

系统工作正常时，PWMA0~PWMA1 脚输出一对 SPWM 波形，通过隔离与驱动电路驱动单端变换电路功率管（MOSFET），再经过主变压器升压，次级得到高压 SPWM 正弦调制波形，经过 L、C 滤波得到纯净的 100Hz 半桥正弦波。PWMA2~PWMA3 脚输出一对 PWM

波形，通过隔离与驱动电路驱动功率管（IGBT），得到 50Hz220V 纯净的正弦波。PWMA4 作为 D/A 转换，经滤波成直流信号，通过隔离与驱动电路驱动损耗器。PWMB0~PWMB2 作为输出口，根据无功功率，选择适当的电容，通过隔离与驱动电路驱动补偿器。A/D 电路时刻检测输入电压、输出电压、输出电流、机内温度等参数，当发现一个或多个参数超过软件的设定值，DSP 立即关断 SPWM 信号，并发出报警信号。另外，FAULTA0 作为输出过流取样，一旦 FAULTA0 电压超过阈值，DSP 立即关断 PWM 输出。

3.2 A/D 电路

DSP56F805 的 ADC 模块具有下述特点：

- 1) 12 位精度；
- 2) 同时或连续采样工作方式；
- 3) 同时采样工作方式下，8 个通道转换时间为 26.5ADC 时钟周期，即 $26.5 \times 0.2\mu\text{s} = 5.3\mu\text{s}$ ；
- 4) 可由 PWM 的内部同步信号或定时器或外部信号触发 ADC 转换。

为提高转换速度，本系统采用同时采样工作方式，并由 PWMA 内部同步信号触发进行 A/D 转换。2 个 ADC 模块的配对情况如下：

AN0（100Hz 电流取样）——AN4（100Hz 电压取样）；

AN1（输出交流电流取样）——AN5（输出交流电压取样）；

AN2（输入直流电压取样）——AN6（吸收管电流取样）；

AN3（温度取样）——AN7（参考电压 1.25V）。

由于 ADC 采样的量有直流量和交流量，故对两种不同的量需进行分别处理。

直流量（输入直流电压、温度及参考电压 1.25V）采用一般的数字滤波处理方式，表达式如式（5）。

$$X = \frac{K_1 \times X(n-1) + K_2 \times X(n)}{2} \quad (5)$$

式中：X 为 A/D 采样结果；

X(n-1) 为第 n-1 次的采样结果；

X(n) 为第 n 次的采样结果；

K₁、K₂ 为修正系数。

交流分量包括 100Hz 电压、电流、输出电压、电流、吸收管电流。在一个周期内（10ms）采样 160 次，根据式（6）~式（8）算出有关的功率值。

$$S = K_s \sum_{i=1}^{160} [|U(i)| \times |I(i)|] \quad (6)$$

$$P = K_p \sum_{i=1}^{160} [U(i) \times I(i)] \quad (7)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (8)$$

式中：S 为视在功率；

P 为有功功率；

Q 为无功功率；

K_s、K_p 为修正系数。

3.3 PWM 电路

DSP56F805 PWM 模块具有以下主要特点：

- 1) 3 组互补的 PWM 对或 6 个独立的 PWM；
- 2) 死区可调；
- 3) 半周期重载能力；
- 4) 20mA 输出驱动能力。

本系统 2 个 PWM 模块工作方式如下：

PWMA0, PWMA1 (SPWM0, SPWM1) 工作于互补的 PWM 对，用于产生 SPWM 调制波，载波为 64kHz，调制波为 100Hz；

PWMA2, PWMA3 (PWM0, PWM1) 工作于软件控制的 I/O，产生 50Hz 方波信号。把 100Hz 半波变换为 50Hz 全波；

PWMA4 (D/A) 工作于 D/A，根据机内温度或损耗产生修正的信号调整吸收功率管；

PWMB0, PWMB1, PWMB2 (F0~F2) 工作于软件控制的 I/O，用以控制补偿电路。

3.4 并机与同步电路

同步电路由 PA0, PA1 完成，其中 PA0 为输入脚，检测外部（其它的逆变单元）的 50Hz 同步信号，PA1 为输出脚，用以送出本机的 50Hz 同步信号。当系统上电后，本机先检测有无外部同步信号，若有则本机跟踪外部的信号，并发出一个同步信号，若无则工作于本机的同步信号。

并机由 CAN 完成。CAN 模块负责收集其它逆变单元的状态值（电压、电流、频率、有功功率、无功功率等）并发送本身的状态值。

3.5 检测、控制及显示电路

1) PD2 设置为输入口，当 S1 开关合上后电源才启动；

2) PD6, PD7 设置为输入口，分别检测输入接触器状态及输出断路器状态，只有两个都正常逆变单元才工作；

3) PB0~PB7, PD0, PD1, PE2 为 LCD 显示控制电路，其中 PE2 为输入口，为显示菜单按键 S2, PD0, PD1 为输出口，控制 LCD 的 RS 及 E, PB0~PB7 为输出口，送出信号给 LCD 的数据口 DB0~DB7；

由于采用 16×2 位字符型 LCD 模块，查手册知 LCD 的门限电压为

$$V_{ih(\min)}=2.2V, V_{il(\max)}=0.6V,$$

符合 DSP 芯片的逻辑，故 DSP56F805 可直接驱动 LCD，不须电平转换；

4) PD3~PD5, PE4~PE7 为输出口，分别控制有关指示灯及继电器等。

3.6 JTAG/OnCE 电路

DSP56F805 提供 JTAG/OnCE 电路可方便用户把程序写入片内的 Flash 闪存，也方便用户在线编程、修改和升级软件。

3.7 RS-232、时钟及电源电路

DSP56F805 内带两组 SCI，本系统用了 SCI0 作为 RS232 接口，若单机使用时 RS232 作为通信口与 PC 机相连，若并机使用，则该口不用，由主监控器负责与 PC 机通讯。

DSP56F805 有一个带 PLL 锁相环时钟单元，通过软件编程可方便改变 DSP 的时钟。

DSP56F805 主电路由 +3.3V 供电。

为防止噪声干扰影响 A/D 转换精度，A/D 采用独立供电系统。

若外部的数字电路有 +5V 供电系统，与 DSP 接口必要时须进行电平转换。

4 系统软件

4.1 软件原理

系统软件的主要任务是实现数字正弦信号，并稳定输出信号电压，管理各种设备，并且完成并机的协调工作。

系统软件通过查表的方式把数字信号送到脉冲宽度调制电路形成正弦信号 U_s ，通过对输出信号的采样反馈得到 U_f ，经过修正输出正弦信号的幅值以达到稳定输出的目的。其结构图如图 5 所示。



图 5 稳压反馈原理图

考虑到电感性负载对逆变器工作的损害，本机采用电容补偿。在对输出电压和电流进行密集采样之后，算出视在功率 S 、有功功率 P 及无功功率 Q ，

$$S = K_s \sum_{i=1}^n [U(i) \times |I(i)|] \quad (9)$$

$$P = K_p \sum_{i=1}^n [U(i) \times I(i)] \quad (10)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (11)$$

根据无功功率的大小和本机的特性参数，设定无功功率允许窗口，利用查表方法投入适当的电容组合，达到补偿的目的。

4.2 软件模块结构

本系统软件采用模块化设计，根据任务可分为 7 个模块：系统初始化模块、数字正弦信号产生及输出稳定模块、补偿模块、并机均流模块、故障检测处理模块、显示模块、通信模块。其流程如图 6 所示。

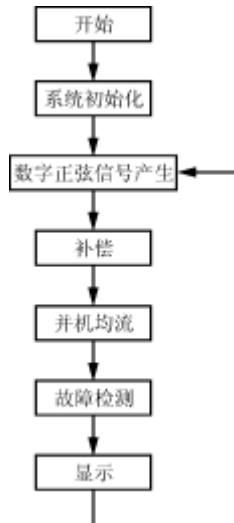


图 6 软件模块图

4.2.1 系统初始化模块

系统初始化模块包括：中断及优先权设置、PWM 设置、定时设置、A/D 设置、通用输入输出口设置、通信口设置等。系统初始化模块是 DSP 工作的开始，程序放在 DSP_init() 子程序及 appconfig.h 程序中。

4.2.2 数字正弦信号产生及输出稳定模块

数字正弦信号产生及输出稳定模块，又分为信号采样及处理模块、输出稳定模块、PWM 重加载中断服务模块等 3 个子模块。

其中信号采样及处理模块又分为：A/D 采样，有功功率计算，无功功率计算，功率因数计算，输出电压有效值计算，输出电流有效值计算等。

输出信号稳定模块主要任务是根据给定的标准信号（输出 220V）和输出的反馈信号之差采用模糊算法，以最快的速度把输出电压调整到标准值。

PWM 重加载中断优先级最高。为保证以最快的速度完成 PWM 重加载工作，此程序采用汇编语言，利用 DSP56F805 的快速 16 位数的乘法，在约 $3\mu\text{s}$ 内完成重加载的计算工作。

4.2.3 补偿模块

逆变器在带感性负载时，一方面功率因数降低，降低了逆变器的有功功率，另一方面滞后的电流会给逆变器带来危害。补偿模块的作用是在带感性负载时，用投入适当电容的方法对感性负载进行补偿。根据信号采样模块计算出无功功率 Q 和本机最大允许无功功率 ΔQ ，采用模糊算法以最快的速度把无功功率调整到允许范围内。

4.2.4 并机均流模块

并机均流模块是为多单元并联输出时用的。它不仅保证各单元输出电压的幅度、频率、相位一致，而且还要求各单元的输出负载均流。通过 CAN 总线对参与并机的各单元电流进行分析、计算，使本单元电流为总电流的 $1/N$ ，达到均流的目的。

定时锁相电路用来检测相位和频率，使数字正弦信号产生器输出的相位和频率一致。

4.2.5 故障检测处理模块

故障检测处理模块分别对输入电压太高或太低、输出电压太高或太低、输出过载，PWM 电路故障、机内温度、开关管状态进行检测。对所检测的故障分为两类分别进行不同情况处理：对于非致命性故障采用故障显示及报警；对于致命性故障除采用故障显示及报警外，还关闭 PWM 工作以防进一步损害其它器件。

4.2.6 显示模块

显示模块是用来显示逆变电源的工作状态和参数，显示的参数主要有 V_{in} 、 I_{in} 、 V_{out} 、 I_{out} 、 P_{out} 、 θ 等。由于采用 16X2 的 LCD，每次只能显示 V_{out} 及另一个参数，通过循环按动 S_2 键可显示其它参数。

4.2.7 通信模块

通信模块是独立于其它模块单独工作的，通过 CAN 总线管理进行多单元通信工作。各并联运行的单元之间，采用数据包的方式进行通信。数据包中包含有一个数据包标志及若干个数据块。每个数据中又包含了参与并联单元的标识号、输出电流值等信息。通信模块就是负责管理数据包的发送和接收工作，它是独立工作的。它和并机均流模块采用通信的方式传送数据，并机均流模块计算出本机的输出电流后把它放在缓冲区内，并通知通信模块发送信号，当通信模块收到并机均流模块的发送信号后，等到数据包到达本机后，本机状态加入数据包中并发送出去，同时也向并机均流模块发送有效数据包信号。并机均流模块收到通信模块发送来的信号后就到缓冲区中取走数据。

本系统采用 Motorola 公司的 MSCAN 软件进行 CAN 通信软件的编程，方便快捷。

4.3 主程序清单

主程序框图见图 7，主程序清单如下：

```
main ()
{
  Dsp_init(); /* 系统初始化 */
  adc_tans(); /* 输入电压采样 */
  chech_VI_IAl_TT(); /* 检查输入电压是否合适 */
  while (1)
  {
    if(PWMA_INT_F!=0) /* 是否有 PWM 重加载中断到来 */
    {
      adc_trans(); /* 把 A/D 采样结果送入相应缓冲区 */
      bace_hot_protect(); /* 送出脉冲调宽波形到 PWMA4 */
    }
  }
}
```


图 7 主程序流程图

4.3 特殊软件算法说明

本机需要调整的量有：输出电压幅度、频率、相位、功率因数、均流等，所有的算法都采用模糊算法。

输出电压调整的输入变量有电压偏差 E 和变化率 ΔE ，输出控制量为脉冲宽度 Z_c ，因此对输入变量

定义了两个语言：电压偏差和变化率。电压偏差其模糊值为 5 个，即低、较低、中等、较高、高。对于变化率有 3 个模糊值，即减小、不变和增大。根据以上定义作相应的模糊判决。

功率因数补偿的输入变量为有功功率偏差（即反馈无功功率和允许无功功率之差），其模糊值有 3 个，即负、正好、过大。其输出控制量为投入电容的容量，电容的容量组合有 8 种，可根据有功功率偏差来确定电容的容量组合。

5 实验结果

我们采用 DSP56F805 做出 2 台逆变电源样机，试验结果令人满意。

图 8 为 50Hz 驱动波形，图 9 为 100Hz 半波波形，图 10、图 11 为 SPWM 波形。

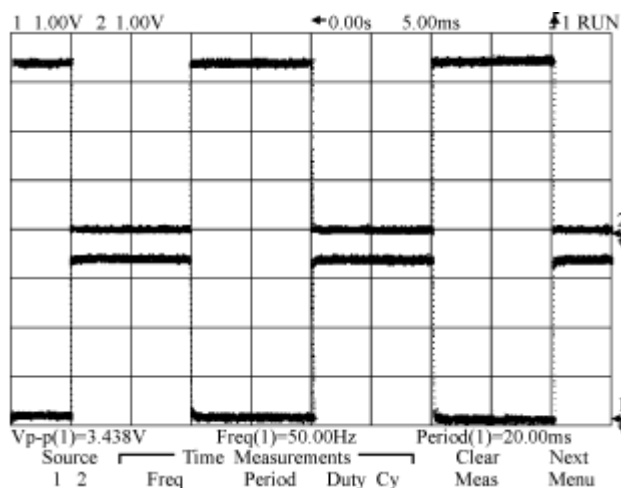


图 8 50Hz 驱动波形

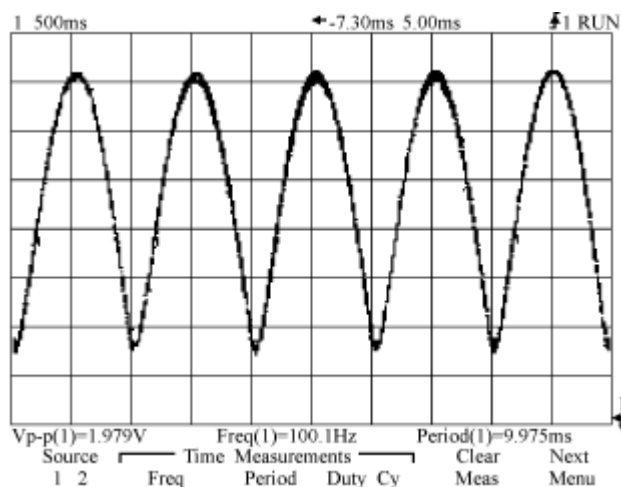


图 10 100Hz 半波波形

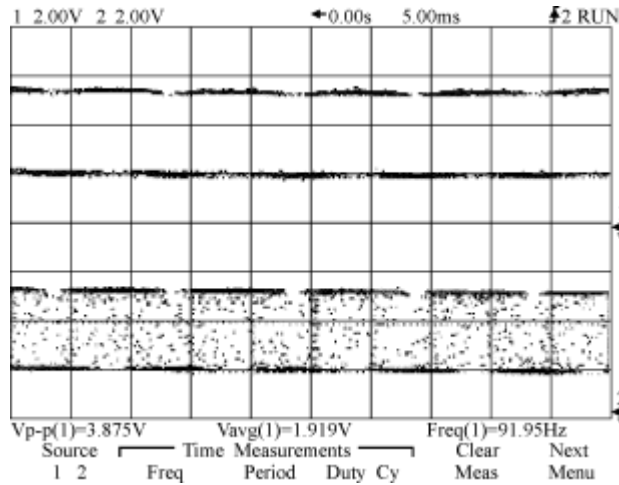


图 10 (低频)

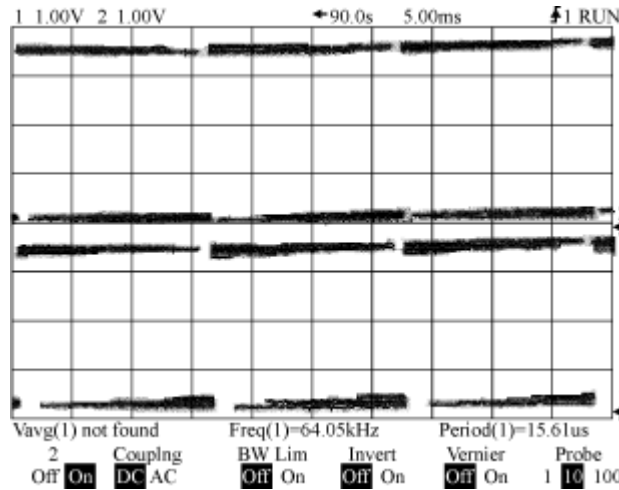


图 11 SPWM 调制波形 (高频)

主要技术参数如下:

- 输入电压 DC40~60V
- 输出电压 AC220 (1±1%) V
- 输出频率 50Hz±0.001Hz
- 输出功率 2000VA
- 均流偏差 ≤2%
- 整机效率 ≥89%

6 结语

本文介绍了基于 DSP56F805 数字化控制的可并机的逆变电源原理, 提出了控制信号的产生过程。实验结果证明了数字化实现的正确性, 取得了较好的结果。基于 DSP56F805 控制的可并机的逆变电源具有实时性好、控制精度高、开发方便和成本低等优点。