

基于 TMS320F2802x 的数字发电机解决方案

Victor Zheng

MCU FAE Team

ABSTRACT

小型汽油发电机在应急供电，野营，抢险救灾等场合的应用越来越广泛。

本文介绍了一种基于 TMS320F2802x 的数字发电机解决方案。该方案采用一颗 C2000 系列的 TMS320F2802x 单片机作为主控芯片来实现整流、逆变和控制整个发电机的工作。系统在不同负载下均有较好的输出波形和动态响应，并且可以提供可靠的过压，过流保护功能。

目录

ABSTRACT.....	1
1. 简介.....	2
2. 系统框图.....	2
2.1 数字发电机系统框图.....	2
2.2 数字发电机电控板框图.....	3
2.3 AC-AC 变换器的规格.....	3
3. 整流器控制系统设计.....	3
3.1 整流器原理图.....	3
3.2 整流器软件控制思路.....	4
4. 步进电机控制系统设计.....	5
4.1 驱动电路原理图.....	5
4.2 步进电机规格.....	5
4.3 步进电机控制的软件实现.....	5
4.3.1 位置控制.....	5
4.3.2 旋转控制.....	6
5. 逆变器控制系统设计.....	7
5.1 逆变器主电路原理图.....	7
5.2 软件设计.....	7
5.2.1 TMS320F2802x 的外设资源的分配.....	7
5.2.2 调制方式和 PWM 波形生成.....	8
5.2.3 软件框架.....	10
5.2.4 Main 函数流程.....	11
5.2.5 逆变器环路控制及 ADC 中断服务程序.....	11
5.2.6 主状态机框图.....	12
5.2.7 保护功能.....	13
6. 实验波形.....	13
7. 参考文献.....	14

1. 简介

数字便携式发电机一般是以内燃机为动力拖动电机发电，再把发电机发出的高频交流电经过 AC-AC 变换器变成稳定的 50Hz 正弦交流输出。本文介绍了以 TI 的 C2000 系列 TMS320F2802x 为主控器件的数字发电机控制系统的软硬件设计。

2. 系统框图

2.1 数字发电机系统框图

传统的发电机的结构如图 1 所示。汽油机拖动同步电机，同步电机直接输出工频交流电到用电设备。这种发电机的结构简单可靠性较高，但它也有很多的缺点。比如输出电能的质量不高，输出的正弦波的频率和幅值容易因负载波动而变化，输出波形的 THD 比较大等等。另外，因为需要发动机的转速恒定，限制了发电机的转子的结构（例如无法采用多对极转子），导致铜和铁的使用较多，转子尺寸和重量都比较大。这也使得整机效率较低（即使在轻载时也必须保持恒定的转速）。

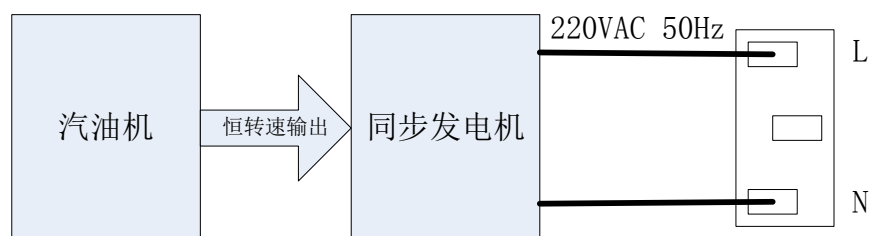


图 1. 传统发电机框图

从图 1 和图 2 的对比中可以看到数字发电机与传统发电机相比，最大的区别是多了一个 AC-AC 变换器。传统的发电机中汽油机的转速必须恒定，同步电机才能输出频率稳定的 50Hz 的交流电。数字发电机中汽油机的转速可以在一定范围内调节，同步电机输出的三相交流电是频率可变的高频电能。正是由于同步电机输出频率的提高，使得同步电机自身的体积和重量大大减轻。同等功率的发电机，数字与传统相比可以减轻 30% 以上的重量。同时数字控制的 AC-AC 变换器可以提供更加稳定、高质量的输出波形。燃料使用效率也较高。

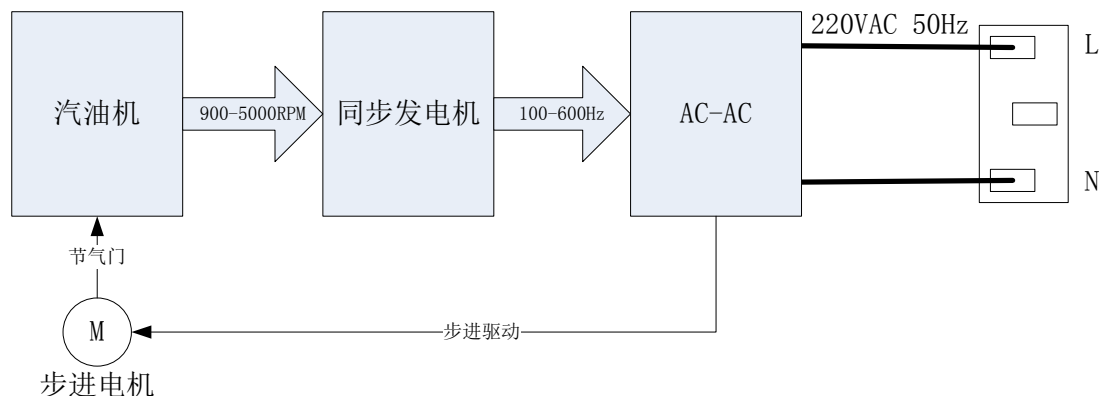


图 2. 数字发电机框图

2.2 数字发电机电控板框图

发电机的整个电控板包括：整流器功率电路，逆变器功率电路，步进电机驱动电路，辅助电源，DSP 控制电路。

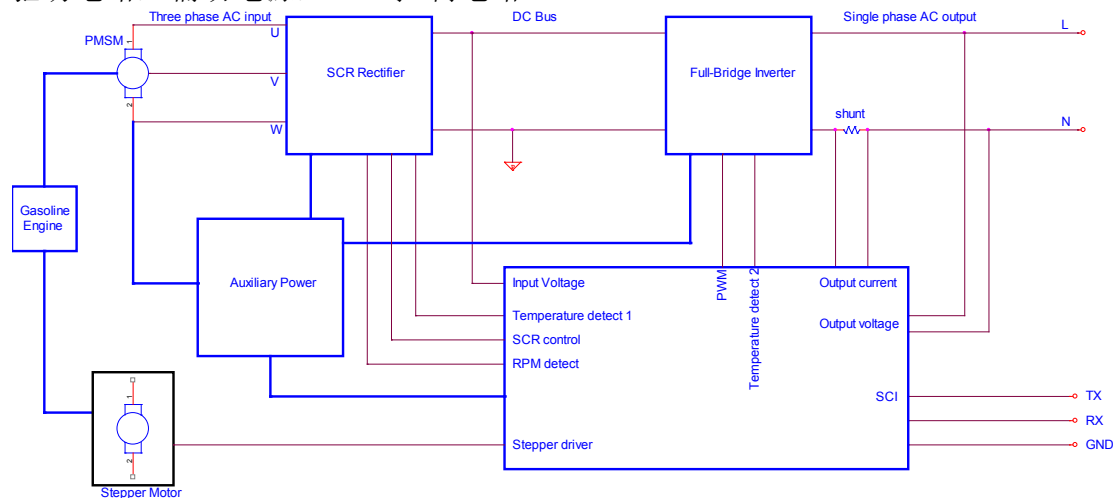


图 3. AC-AC 变换器系统框图

2.3 AC-AC 变换器的规格

三相交流输入，单相交流输出。

最大输入电压：600VAC line-line。

输出波形：正弦波。

输出频率：50Hz $\pm$ 1%

输出电压：220VAC $\pm$ 10%

额定输出功率：3kW

THD：小于 5%。

3. 整流器控制系统设计

3.1 整流器原理图

输入到 AC-AC 变换器的电能是幅值和频率都可变的三相交流电。我们首先要将三相交流输入整流成稳定的直流输出，然后才能逆变。

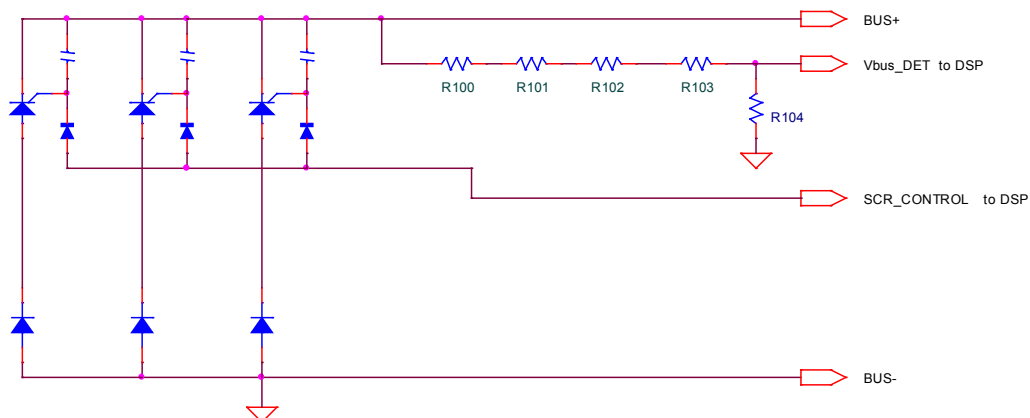


图 4. 整流器原理图

综合成本和调压的需求在这里使用了三相半控整流桥。整个三相整流桥使用了三个二极管和三个可控硅。这里我们把三个可控硅的门极接在一起，用DSP的一个引脚统一控制。

3.2 整流器软件控制思路

由于SCR只能在换流点自然关断，所以控制的周期必须大于输入电压的周期。整流器的控制回路工作在2kHz以下的频率，所以简单的电压滞环比较控制就可以满足要求。而且还最大限度的节约CPU资源。具体的控制方法见图5。

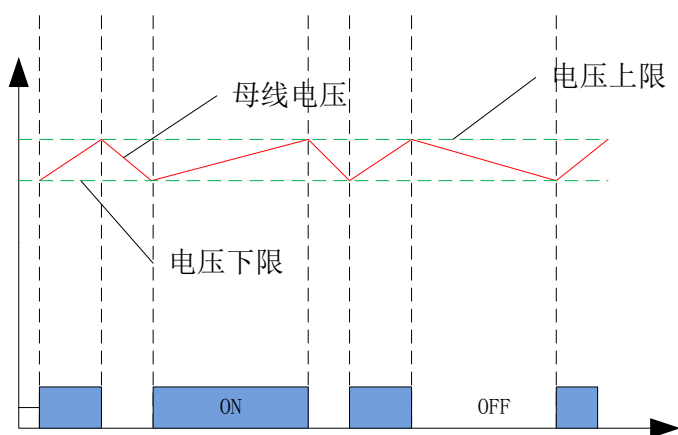


图 5. 电压滞环比较控制

首先设置电压的上限和下限，确定一个正常工作的母线电压范围。当测得的母线电压低于下限时打开SCR，当测得的母线电压高于上限时关闭SCR。

4. 步进电机控制系统设计

4.1 驱动电路原理图

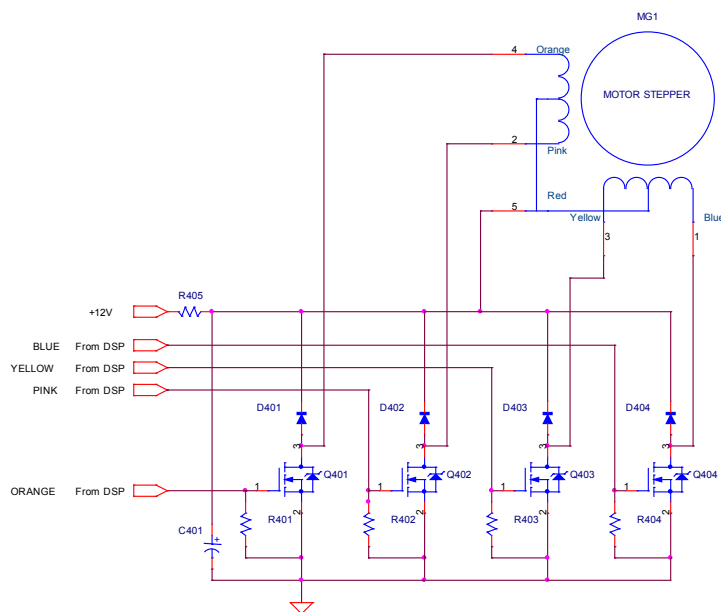


图 6. 步进电机驱动电路原理图

4.2 步进电机规格

步进电机的型号为 24BYJ24。驱动的方式见表 1。步进电机的具体规格如下：

额定电压：12VDC

相数：4 相

相电阻：200 ohm

端子位号	导线颜色	1	2	3	4	5	6	7	8
5	红色	+	+	+	+	+	+	+	+
4	橙色	—	—						—
3	黄色		—	—	—				
2	粉色				—	—	—		
1	蓝色						—	—	—

表 1.驱动方式

4.3 步进电机控制的软件实现

4.3.1 位置控制

这台小型的步进电机是用来控制汽油机的节气门的。通过控制节气门的角度，我们可以控制汽油机的输出功率。

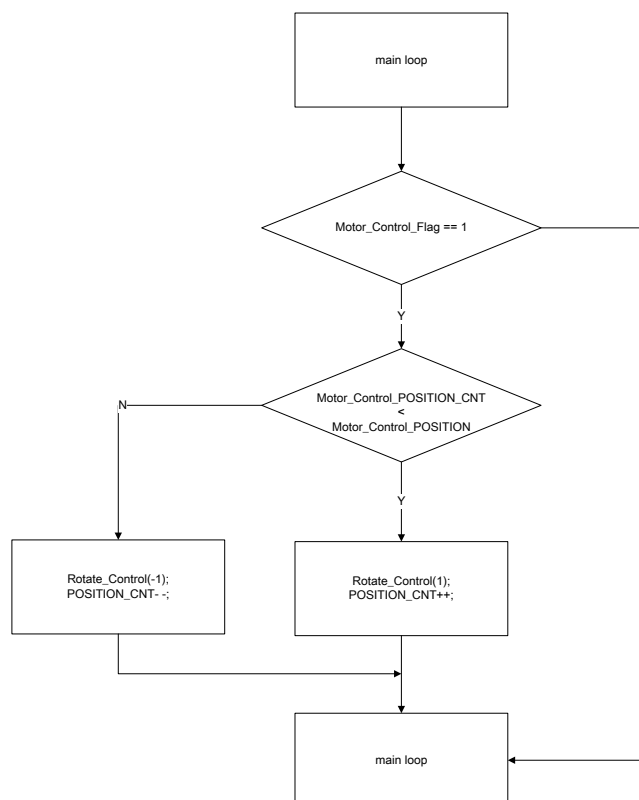


图 7. 步进电机位置控制流程图

步进电机采用位置控制的方式，初始的位置为 0。当前的位置小于设定的位置值时，步进电机正转一步，位置计数器递增。当前的位置值大于设定的位置值时，步进电机反转一步，位置计数器递减。程序中 `Motor_Control_Flag` 是用来控制步进电机的控制频率和转速的。当 `Motor_Control_Flag` 被置 1 的时候，步进电机才能前进或后退一步。我们在定时器中断服务子程序中周期的将 `Motor_Control_Flag` 置 1。需要注意的是这个标志位实际上控制的是转速，因此不能大于电机最大启动转速，否则会造成电机无法启动。

4.3.2 旋转控制

在图 7 的位置控制中电机转动的执行时通过函数 `Rotate_Control` 实现的，这个函数每执行一次，电机就转一步。参数 `direction` 控制的是旋转的方向，1 为顺时针旋转，-1 为逆时针旋转。函数的内部是一个包含 8 状态的状态机，与表 1 的 8 个阶段对应。F2802x 用 4 个 GPIO 控制步进电机，分别对应步进电机的橙、黄、粉、蓝四条引线。在图 8 中某个状态内写的颜色代表相应的 GPIO 为高电平，其余的 GPIO 为低电平。

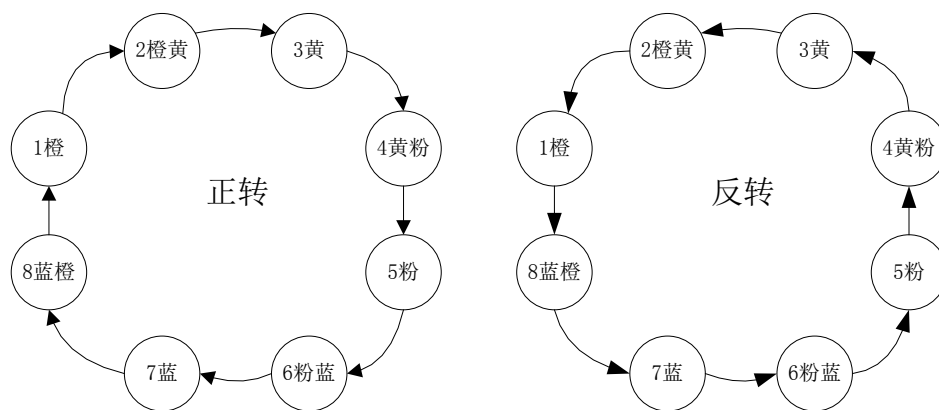


图 8. 旋转控制状态机

5. 逆变器控制系统设计

5.1 逆变器主电路原理图

逆变器采用了全桥拓扑，H 桥的输出经过 LC 滤波输出 50Hz 的正弦交流波形。

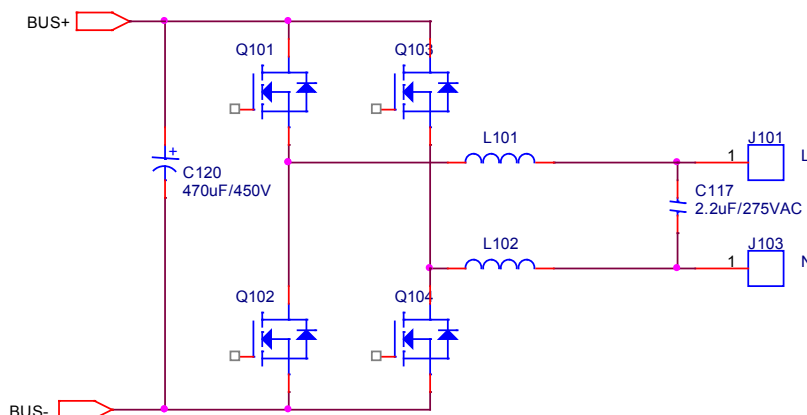


图 9. 逆变器功率电路原理图

5.2 软件设计

5.2.1 TMS320F2802x 的外设资源的分配

TMS320F28027 是 Piccolo A 系列的中资源最丰富的一颗，本文是用 F28027 完成整个设计的。由于 F2802x 系列是管脚兼容的外设资源基本相同，用户可根据自己的需求在其中选择性价比最高的器件。下面是 F28027 的简单描述：

- 高效 32 位中央处理单元(CPU) (TMS320C28x™)
- 60MHz (16.67ns 周期时间)。
- 3.3V 单电源。
- 集成型加电和欠压复位。
- 两个内部零引脚振荡器。
- 多达 22 个复用通用输入输出(GPIO) 引脚。
- 三个 32 位 CPU 定时器。
- 片载闪存、SRAM、一次性可编程(OTP) 内存。
- 代码安全模块

- 串行端口外设(SCI/SPI/I2C)
- 增强型控制外设
 - 增强型脉宽调制器(ePWM)
 - 高分辨率 PWM (HRPWM)
 - 增强型捕捉(eCAP)
 - 模数转换器(ADC)
 - 片上温度传感器
 - 比较器

可以看到 F2802x 的资源很丰富。表 2 是在整个 AC-AC 变换器的控制中我们对外设资源的分配。

peripherals module	peripherals name	Pin Num.	Signal Name	Description
ADC	ADCINA0	10	Temp1_DET	整流器温度检测
	ADCINA2	9	Vin_DET	直流母线电压检测
	ADCINA6	4	Vout_DET	输出电压检测
	ADCINA7	6	Iout_DET	输出电流检测
	ADCINB1	13	Temp2_DET	全桥温度检测
Capture	ECAP1	25	RPM_DET	同步发电机转速检测
ePWM	PWM2A	37	PWM2A	Q102
	PWM2B	38	PWM2B	Q101
	PWM3A	39	PWM3A	Q104
	PWM3B	40	PWM3B	Q103
GPIO	GPIO0	29	SCR_CONTROL	整流器 SCR 控制
	GPIO6	41	Orange	步进电机橙
	GPIO7	42	Pink	步进电机粉
	GPIO29	1	Yellow	步进电机黄
	GPIO34	19	Blue	步进电机蓝
	GPIO32	31	LED601	运行指示灯
	GPIO33	36	LED602	故障指示灯
SCI	SCITX	47	TX	串口发送
	SCIRX	48	RX	串口接收

表 2. 外设资源使用列表

5.2.2 调制方式和 PWM 波形生成

发电机要通过脉宽调制输出正弦波，正弦波的调制方式主要分为单极性和双极性调制。当采用双极性调制时，一个开关周期内中无论正负半周四个管子都要开关一次。当占空比为 50% 时，输出的电压为 0V。在单极性调制中，正半周只有 Q101 和 Q104 开关，负半周只有 Q102 和 Q103 开关。当占空比为 0% 时，输出的电压为 0V。

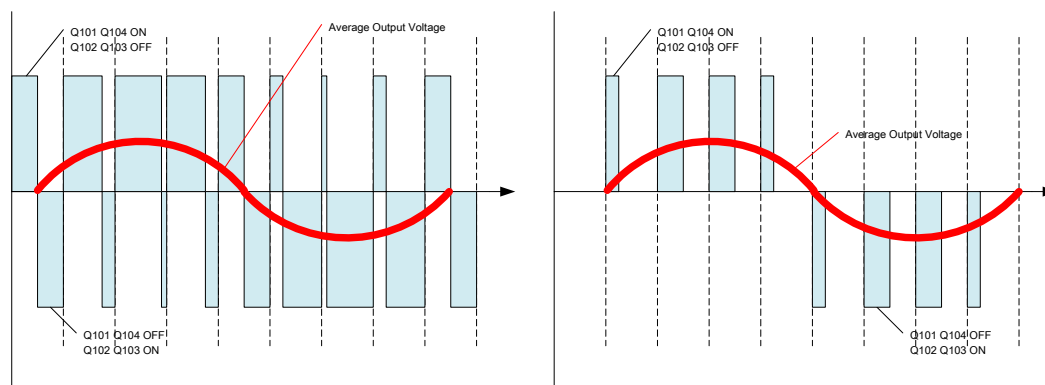


图 10. 双极性调制（左）和单极性调制（右）

下面这段程序是 PWM 模块的配置程序。变量 Period 代表 PWM 周期寄存器的值。当开关频率为 30kHz 且系统时钟为 60MHz 时，Period = 2000。变量 DBValue 代表死区时间。每一个 PWM 模块控制一个半桥的桥臂，PWM 的 A、B 通道配置成互补输出。

```
EPwm2Regs.TBCTL.bit.PRDL = TB_SHADOW;
EPwm2Regs.TBPRD = Period;
EPwm2Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0;
EPwm2Regs.TBCTR = 0;
EPwm2Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UP;
EPwm2Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = TB_DIV1;
EPwm2Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = TB_DIV1;
EPwm2Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_DISABLE;
EPwm2Regs.TBCTL.bit.SYNCSEL = TB_SYNC_IN;
EPwm2Regs.CMPCTL.bit.LOADAMODE =
CC_CTR_PRD;
EPwm2Regs.CMPCTL.bit.LOADBMODE =
CC_CTR_PRD;
EPwm2Regs.CMPCTL.bit.SHDWAMODE =
CC_SHADOW;
EPwm2Regs.CMPCTL.bit.SHDWBMODE =
CC_SHADOW;
EPwm2Regs.AQCTLA.bit.ZRO = AQ_SET;
EPwm2Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_CLEAR;
EPwm2Regs.AQCTLB.bit.ZRO = AQ_CLEAR;
EPwm2Regs.AQCTLB.bit.CBU = AQ_CLEAR;
EPwm2Regs.DBCTL.bit.OUT_MODE =
DB_FULL_ENABLE;
EPwm2Regs.DBCTL.bit.POLSEL = DB_ACTV_HIC;
EPwm2Regs.DBFED = DBValue;
EPwm2Regs.DBRED = DBValue;
```

```
EPwm3Regs.TBCTL.bit.PRDL = TB_SHADOW;
EPwm3Regs.TBPRD = Period;
EPwm3Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0;
EPwm3Regs.TBCTR = 0;
EPwm3Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UP;
EPwm3Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = TB_DIV1;
EPwm3Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = TB_DIV1;
EPwm3Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_ENABLE;
EPwm3Regs.TBCTL.bit.SYNCSEL = TB_SYNC_IN;
EPwm3Regs.CMPCTL.bit.LOADAMODE =
CC_CTR_PRD;
EPwm3Regs.CMPCTL.bit.LOADBMODE =
CC_CTR_PRD;
EPwm3Regs.CMPCTL.bit.SHDWAMODE =
CC_SHADOW;
EPwm3Regs.CMPCTL.bit.SHDWBMODE =
CC_SHADOW;
EPwm3Regs.AQCTLA.bit.ZRO = AQ_SET;
EPwm3Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_CLEAR;;
EPwm3Regs.AQCTLB.bit.ZRO = AQ_CLEAR;
EPwm3Regs.AQCTLB.bit.CAU = AQ_CLEAR;
EPwm3Regs.DBCTL.bit.OUT_MODE =
DB_FULL_ENABLE;
EPwm3Regs.DBCTL.bit.POLSEL = DB_ACTV_HIC;
EPwm3Regs.DBFED = DBValue;
EPwm3Regs.DBRED = DBValue;
```

下面我们来介绍一下双极性调试的代码实现。我们用变量 Duty 表示需要输出的占空比，它的取值范围是 -32768 到 32766。当占空比为 32767 时代表 100% 占空比，输出电压为 +VBUS。当占空比为 -32768 时代表 -100% 占空比，输出电压为 -VBUS。

```
Temp1=(Duty*Period)>>16;
Temp2=Pwm_Period/2 + Temp1;
EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = Period- Temp2;
EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA = Temp2;
```

单极性调制的代码需要区分是正半周还是负半周。变量 **Flag** 为 1 时表示正半周，0 表示负半周。我们用变量 **Duty** 表示需要输出的占空比，它的取值范围是 0 到 32676。

```
Temp1=(Duty* Period)>>15;
If(Flag==1)
{
EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = 0;
EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA = Temp2;
}
else if(Flag==0)
{
EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = Temp2;
EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA = 0;
}
```

当使用双极性控制时电感电流始终是连续的，这使得在过零点附近波形畸变比较小。另外因为电感电流连续，所以控制也较为容易。但单极性调制可以减少一个开关周期中开关管开关的次数，从而降低开关损耗。本文出于对损耗和散热的考虑采用了单极性调制。

5.2.3 软件框架

整个控制软件包括一个主循环，三个中断。三个中断分别是：定时器 Timer0 中断，ADC 转换完成中断，Capture 中断。定时器中断里有一个状态机负责整个发电机的运行控制。ADC 中断负责逆变器的环路控制和保护。Capture 中断负责发动机转速测量。

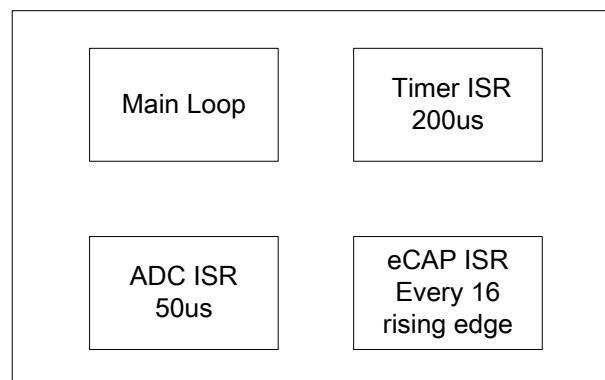


图 11. 逆变器功率电路原理图

中断名称	执行指令周期
RAM	3K byte
Flash	8K byte
CPU 使用率	33.01%

表 3. CPU 资源表

中断名称	执行指令周	执行时间(us)	中断间隔(us)	CPU 使用率
------	-------	----------	----------	---------

	期			
ADC 中断	899	14.98	50	29.97%
Timer0 中断	327	5.45	200	2.73%
ECAP 中断	93	0.31	500	0.31%
剩余				66.99%

表 4. 中断程序的 CPU 占用率表

5.2.4 Main 函数流程

在主程序中除了系统和外设的初始化，主要还有三部分的内容。(1) 计算输入电压的平均值，并控制整流器 SCR 的开关。(2) 计算输出电压、电流的有效值并限制输出功率。(3) 计算发动机的转速，并通过控制步进电机调节汽油机节气门来控制汽油机转速。

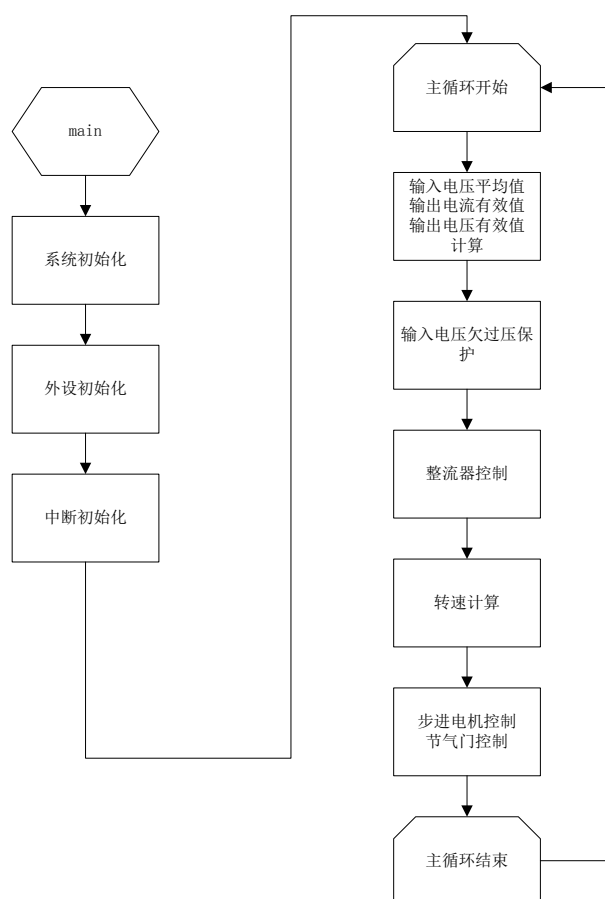


图 11. Main 函数流程图

5.2.5 逆变器环路控制及 ADC 中断服务程序

逆变器输出的是正弦的电压波形，从本质上讲它是一个正弦的电压源。控制环路设计了电压和电流两个环路。电压环控制输出波形，电流环起限流的作用。

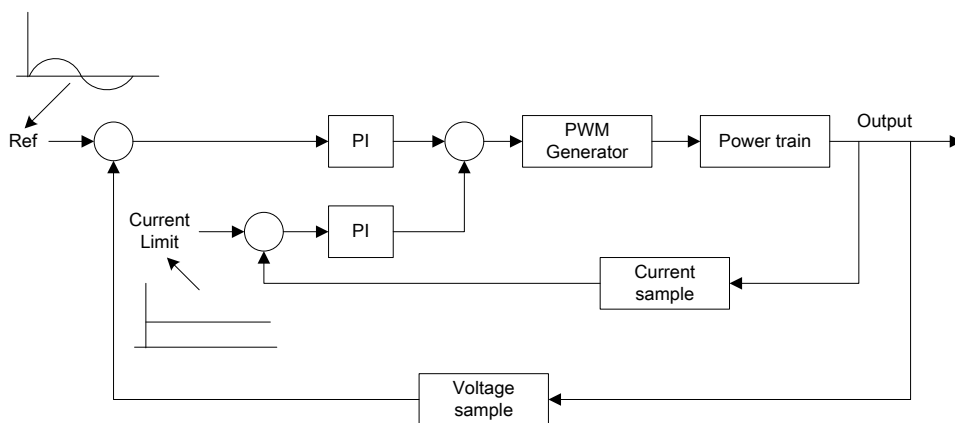


图 12. 逆变器环路控制框图

环路控制都是在 ADC 中断中完成的。ADC 中断除了环路控制还完成过压、过流保护。下面的图 13 是整个 ADC 中断程序的流程。

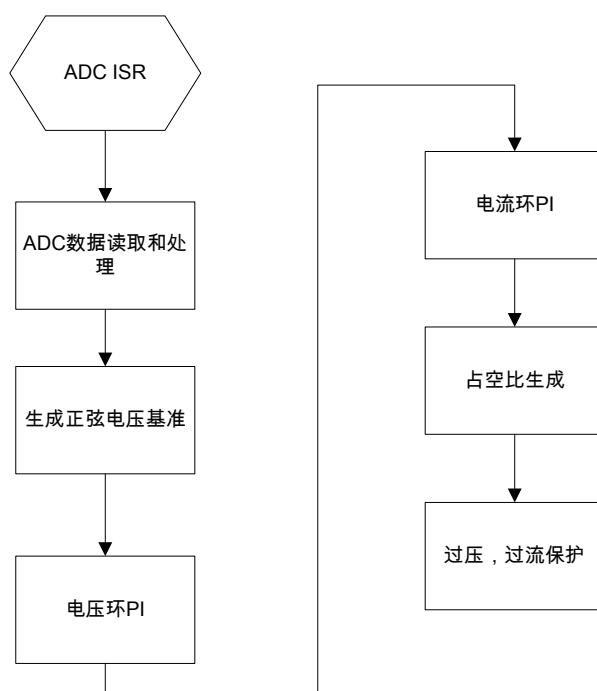


图 12. ADC ISR 流程图

5.2.6 主状态机框图

程序用 Timer0 产生一个周期为 200us 的定时器中断。在这个中断里运行一个状态机来控制整个发电机的运行状态。发电机运行分为四个状态 STANDBY, SOFTSTART, NORMAL 和 FAULT。STANDBY 是待机状态, 在这个状态中, 发电机无输出。当系统满足所有开机条件后进入 SOFTSTART 状态。发电机有输出且执行缓起过程。但输出就绪指示灯不亮, 代表输出的波形还没达到规定的标准。在进入 NORMA 状态后系统正常运行输出就绪指示灯亮起。在上述任何一个状态中, 如果有故障发生则跳入到 FAULT 状态。

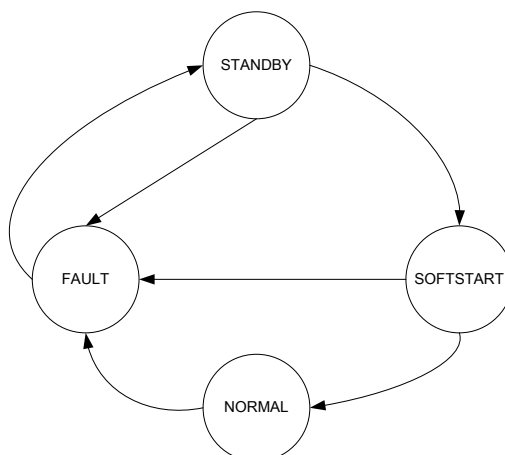


图 12. 状态机框图

5.2.7 保护功能

数字发电机有输入侧的过压、欠压，输出的侧过压、过流等保护功能。这些功能都是用软件的方式来实现的。在程序中把每一次 ADC 采样值和保护阈值比较，当超过阈值时软件触发 TZ 模块。PWM 的 TZ 模块可以预先设定其被触发时的动作。这里我们设置当 TZ 模块触发的时候 PWM 的 A 和 B 通道都输出低电平。也就是关掉所有的 IGBT。

```

EPwm2Regs.TZCTL.bit.TZA = TZ_FORCE_LO;    //EPWM2A will go low
EPwm2Regs.TZCTL.bit.TZB = TZ_FORCE_LO;    //EPWM2B will go low
  
```

6. 实验波形

下面是实际的样机测试的结果。图 13 是满载时的电压电流输出波形。CH2=输出电压，CH3=输出电流

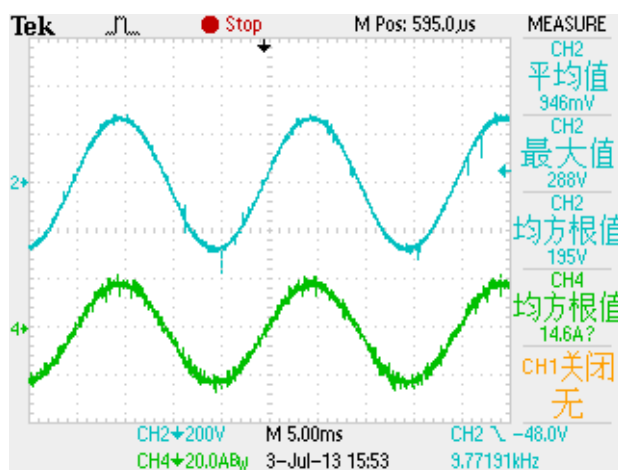


图 13. 满载输出的电压电流波形

图 14 是在满载下输出电压和电流的 THD。左图是输出电流电压的有效值和波形。右图是在左图的电压电流下的 THD。可以看出电压的 THD 是远小于规格要求的 3%。

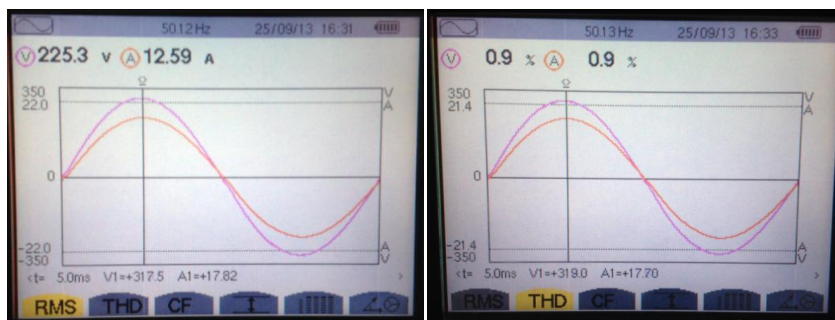


图 14. 输出波形 THD

下面是做过流测试时的电压电流输出波形。CH2=输出电压，CH3=输出电流。可以看到在正弦的峰顶电流被限制在限流点 25A。

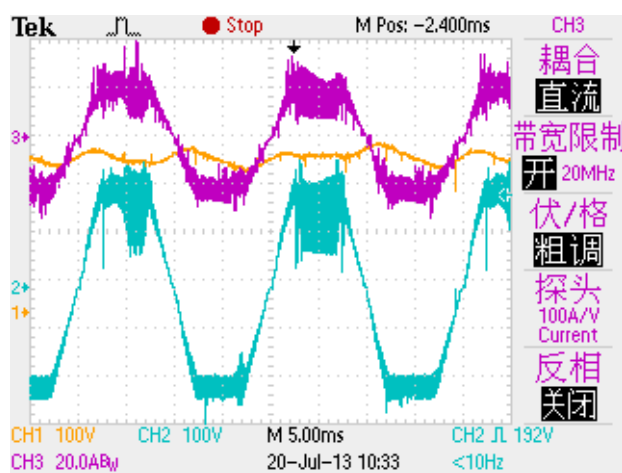


图 15. 输出限流时的电压电流波形

7. 参考文献

1. TMS320F28027 Datasheet。
2. TMS320F28027 用户手册。

重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权根据 JESD46 最新标准, 对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权根据 JESD48 最新标准中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。仅在 TI 保证的范围内, 且 TI 认为 有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种组件的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 组件或服务的组合设备、机器或流程相关的 TI 知识产权中授予 的直接或隐含权限作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从 TI 获得使用这些产品或服务 的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它 知识产权方面的许可。

对于 TI 的产品手册或数据表中 TI 信息的重要部分, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况 下才允许进行复制。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任或义务。复制第三方的信息可能需要服从额外的限制条件。

在转售 TI 组件或服务时, 如果对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数相比存在差异或虚假成分, 则会失去相关 TI 组件 或服务的所有明示或暗示授权, 且这是不正当的、欺诈性商业行为。TI 对任何此类虚假陈述均不承担任何责任或义务。

客户认可并同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供, 但他们将独力负责满足与其产品及其在应用中使用的 TI 产品 相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见 故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因 在此类安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。TI 的目标是利用此类组件帮助客户设计和创立其特 有的可满足适用的功能安全性标准 and 要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使 用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或“增强型塑料”的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的。购买者认可并同 意, 对并非指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独 力负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品, 这些产品主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要 求, TI 不承担任何责任。

	产品		应用
数字音频	www.ti.com.cn/audio	通信与电信	www.ti.com.cn/telecom
放大器和线性器件	www.ti.com.cn/amplifiers	计算机及周边	www.ti.com.cn/computer
数据转换器	www.ti.com.cn/dataconverters	消费电子	www.ti.com.cn/consumer-apps
DLP® 产品	www.dlp.com	能源	www.ti.com.cn/energy
DSP - 数字信号处理器	www.ti.com.cn/dsp	工业应用	www.ti.com.cn/industrial
时钟和计时器	www.ti.com.cn/clockandtimers	医疗电子	www.ti.com.cn/medical
接口	www.ti.com.cn/interface	安防应用	www.ti.com.cn/security
逻辑	www.ti.com.cn/logic	汽车电子	www.ti.com.cn/automotive
电源管理	www.ti.com.cn/power	视频和影像	www.ti.com.cn/video
微控制器 (MCU)	www.ti.com.cn/microcontrollers		
RFID 系统	www.ti.com.cn/rfidsys		
OMAP应用处理器	www.ti.com.cn/omap		
无线连通性	www.ti.com.cn/wirelessconnectivity	德州仪器在线技术支持社区	www.deyisupport.com

邮寄地址: 上海市浦东新区世纪大道1568号, 中建大厦32楼邮政编码: 200122
Copyright © 2014, 德州仪器半导体技术(上海)有限公司