

# 基于 DSP 的离网逆变器的研制

林旭成, 杨 苹

(华南理工大学电力学院 广东省绿色能源技术重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:** 以基本的单相正弦脉宽调制逆变器为对象, 对其进行数学模型的建立。采用电压电流闭环控制, 通过 MATLAB 对系统进行仿真, 并以 DSP(TMS320LF2407A) 为控制芯片进行实验验证。结果显示采用双环 PI 控制的离网逆变器输出效果良好, 能满足交流负载要求。

**关键词:** 离网逆变器; 数学建模; 双闭环控制

**中图分类号:** TM464

**文献标识码:** A

## Research of the Off-Grid Inverter Based on DSP

LIN Xu-cheng, YANG Ping

(Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Based on the single-phase sinusoidal pulse width modulation inverter, the mathematical model of the inverter was built. Using MATLAB to simulate the system with voltage and current double loop control, and used DSP (TMS320LF2407A) as the control chips to verify the simulation. The results showed that the off-grid inverter works well with double-loop PI control, meets the AC load requirements.

**Key words:** off-grid inverter; mathematical modeling; dual closed-loop control

## 0 引言

电力电子技术的迅猛发展, 有力地促进和推动了新能源技术的进步。逆变器在风能和太阳能的开发利用中起着至关重要的作用, 承担着把风机或者太阳能板转换过来的电能变为可直接供居民使用的交流电或馈送到电网中的任务<sup>[1]</sup>。

离网逆变器就是将风能或者太阳能板发出来的电通过升压, 逆变环节直接给交流负载供电, 其功能类似于一个微电网。

为了提高供电质量, 降低输出电压畸变率, 使输出电压在输入波动和负载变化时能保持稳定, 一般采用电压外环电流内环的双环 PID 控制的方法。

## 1 逆变器的控制模型

### 1.1 逆变系统的总体设计

如图 1 所示, 拓扑结构采用单相全桥逆变电路。通过 AD 口采集输出负载端的电压和电感上的电流, 在 DSP 内部通过 PI 双环控制, 产生 SPWM 信号波, 直接驱动 IPM 模块(内含 IGBT, 续流二极管, 驱动电路和过压、过流、过热保护), 使其正常工作。总体框图如图 1 所示。

### 1.2 SPWM 逆变器的建模

当系统的带宽远小于开关频率时, 以至于系统的变

化相对于开关频率而言足够缓慢, 就可以忽略单个开关周期内的状态变化细节, 状态的总体变化趋势可用连续序列的单个开关周期内状态均值的改变来等效。

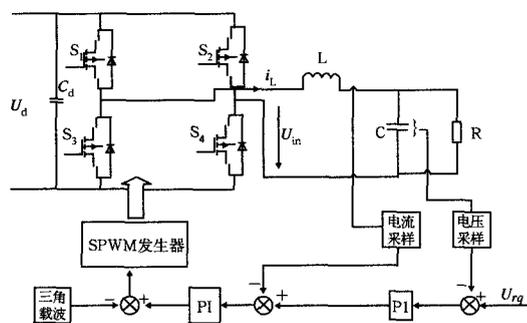


图 1 电路拓扑结构

采用双极性 SPWM 调制时, 调制信号为  $U_s(t) = U_{sm} \sin \omega_s t$ , 三角波幅值为  $U_{cm}$ , 频率为  $f_c$ 。

$$U_{in} = \begin{cases} +U_d & S_1 \text{ 通}, S_4 \text{ 通} \\ -U_d & S_2 \text{ 通}, S_3 \text{ 通} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $U_d$  为逆变器直流端的输入电压。

当载波频率  $f_c$  远大于调制信号频率  $f_s$  时, 系统可用开关周期状态平均值来分析

$$\begin{aligned} \overline{U_{in}} &= \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} U_{in} dt = \frac{1}{T_c} [T_c D(t) U_d - T_c (1 - D(t)) U_d] \\ U_d &= [2D(t) - 1] U_d \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $D(t)$  为占空比,  $D(t) = \frac{\tau(t)}{T_c}$ ,  $\tau(t)$  为开关管导通时间;  $T_c$  为开关周期。

当  $T_s < T_c$  时, 在一个开关周期中正弦波调制信

收稿日期: 2010-05-26

作者简介: 林旭成(1985-), 男, 广东茂名人, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电气传动。

号近似为恒值。调制过程如图2所示。由图2有

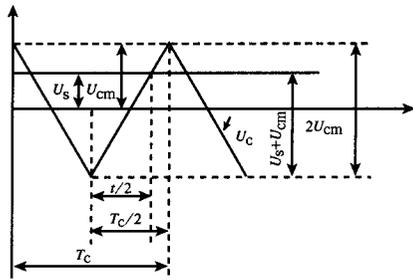


图2 双极性调制波形图

$$D(t) = \frac{\tau(t)}{\frac{T_c}{2}} = \frac{U_s(t) + U_{cm}}{2U_{cm}} \quad (3)$$

$$\text{即} \quad 2D(t) - 1 = \frac{U_s(t)}{U_{cm}} \quad (4)$$

$$\text{由上式得} \quad \overline{U_{in}} = \frac{U_s(t)}{U_{cm}} U_d \quad (5)$$

因 $U_s(t)$ 为连续模拟变量时， $\overline{U_{in}}$ 也为连续变量。当采用开关周期状态平均法时，用 $\overline{U_{in}}$ 等效 $U_{in}$ 瞬时值，也可以将 $U_{in}$ 看作模拟连续变量

$$U_{in} = \overline{U_{in}} = \frac{U_s(t)}{U_{cm}} U_d \quad (6)$$

$$\text{即} \quad \frac{U_{in}}{U_s(t)} = \frac{U_d}{U_{cm}} = K_{PWM} \quad (7)$$

故逆变器的传递函数等效为一比例环节，

$$G_{INV}(s) = K_{PWM} \quad (8)$$

## 2 控制系统的设计

### 2.1 控制系统结构

本系统采用PID双环控制方式。参考正弦电压与输出电压比较得到的误差电压经过PI调节后作为电流的参考指令与电感电流作比较，电流误差信号再经过PI控制后与三角载波比较产生占空比来控制逆变器的开关。和电压单闭环相比，增加了电感电流内环控制，使得系统的带宽增大，反应速度加快，系统抗干扰能力强，稳定性好，调节时间短，谐波含量小<sup>[2]</sup>，同时能有效地限制负载电流，起保护作用，更具优越性。

根据系统的结构，控制方法和逆变器的建模结果，系统的总体结构框图如图3所示。

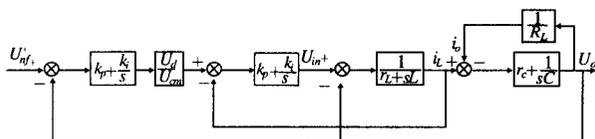


图3 控制结构框图

### 2.2 控制芯片

TMS320LF2407A芯片是TI公司的一款功能强大的数字信号处理器。其优点有：

(1)采用高性能静态CMOS技术，供电电压为3.3

V，减低了功耗；

(2)最高频率可达40MHz，提高了控制器的实时控制能力；

(3)两个管理器模块EVA和EVB，每个包含：2个16位通用定时器；8个16位的PWM通道；

(4)完成1路A/D转换的时间仅需375ns；

(5)可编程的PWM死区控制可防止上下桥臂直通。当外部引脚PDPINTx出现低电平时能快速关断PWM通道，对系统提供快速可靠的保护。可见TMS320LF2407A具有离网逆变器数字化设计所需的结构特点。

### 2.3 增量式PI控制的实现

由于PI控制简单，参数易于整定等，尤其是和DSP结合后大大提高了系统的可靠性，改善了控制效果<sup>[3]</sup>，所以本系统采取PID控制。比例环节P能及时地成比例反映控制系统的偏差，减小偏差，校正偏差，使反应迅速。I能消除或减小稳态误差，改善系统的稳态性能。PI控制的实现流程图如图4所示。同时由于位置式算法和整个过去的状态有关，计算式中要用到过去偏差的累加值，容易产生较大的积累误差，计算量较大，不便于软件编程。本系统采用增量控制法，其具有编程方便、易于实现等优点。

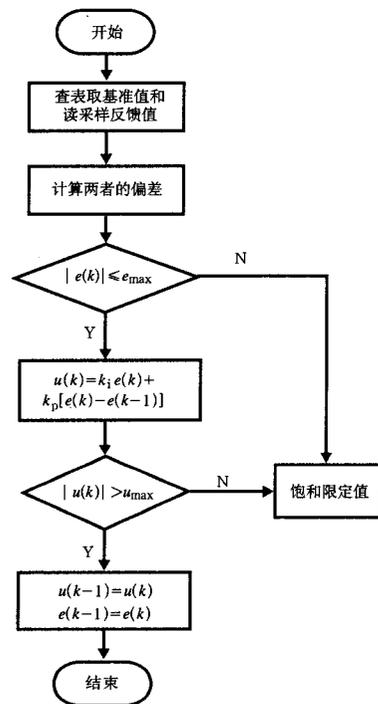


图4 PI控制的程序流程图

### 2.4 SPWM波的产生

利用DSP中的事件管理模块(EV)可以产生SPWM波。DSP中的三角载波是通过定时器的连续增/减计数模式来实现。而正弦调制波则是通过将参考正弦波制成表格，查表获得代表正弦波的数字量得到。采用

定时中断,在每个开关周期,程序从参考正弦表中获得相应的数字量,并将它赋值给比较寄存器  $CMPR_x$ 。PWM输出设置为高有效时,当计数值从零开始计数到周期值  $TxPR$  的过程中与  $CMPR_x$  匹配时,则输出高电平;当计数值从周期值  $TxPR$  开始计数到零的过程中与  $CMPR_x$  匹配时,则输出低电平。设置为低有效的另一组 PWM 输出与高有效互补。当到达一个正弦周期时,将查表的指针复位到正弦波的初始处循环读取,其数字实现如图 6 所示。为了同一桥臂的上下开关管直通,两路互补的 PWM 信号还要通过死区时间寄存器 (DBT-CONx) 来设置一定的死区时间。

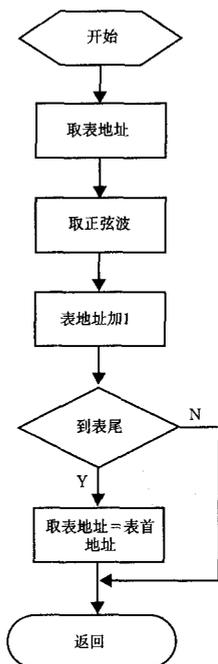


图 5 SPWM 的数字程序流程图

### 3 仿真研究与实验波形

根据文中所采用的逆变控制方案进行 MATLAB 仿真,如图 6 所示。仿真结果如图 7 所示,由图可见即使在负载变化时,输出仍能准确地跟踪参考电压。

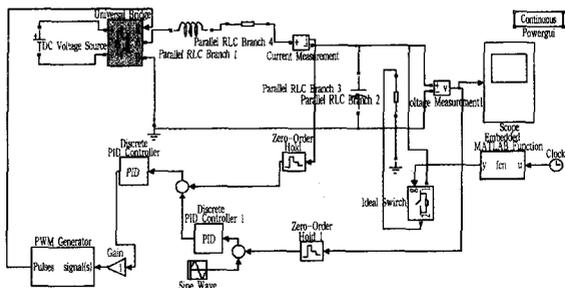


图 6 系统 MATLAB 仿真图

负载开关在 0.2 s 时合上,产生突变,图 7(a)为参考电压波形图,(b)为负载两端的输出电压波形图。由图 7 的仿真结果知,利用双环 PID 控制能达到非常

良好的跟踪效果。

样机试验中,在直流母线电压为 350 V 时,滤波电感取 2.87 mH,滤波电容取 8.8  $\mu$ F,逆变桥采用富士公司型号为 6MBP20RH060 的 IPM 模块,用 TI 公司的 TMS320LF2407A 做控制芯片,利用 TDS3052B 示波器观察输出,得到实际波形如图 8。

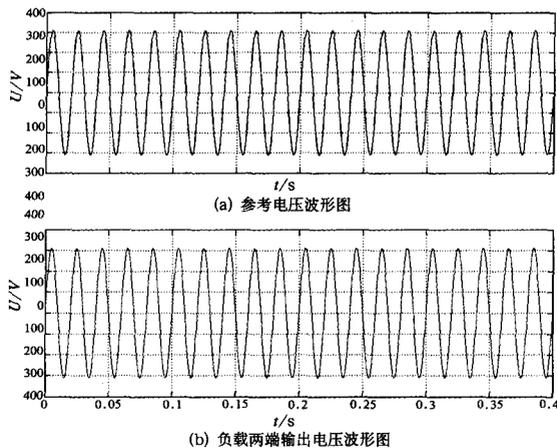


图 7 仿真结果图

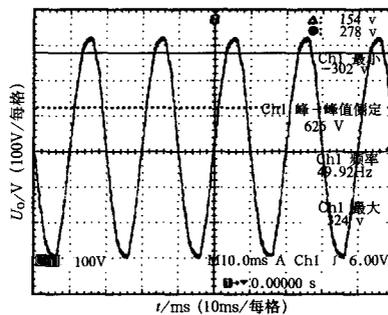


图 8 实验得到的输出波形图

由图 8 可知,输出波形跟电网电压波形十分接近,在电网电压误差范围内。可见,利用双环 PID 控制实际电路是比较有效的。

### 4 结论

本文主要研究了离网型逆变器,目的是为了提其带载能力,输出稳定的电网电压波。为此对逆变器进行了建模,利用 PID 控制构成电压电流双环电路。最后通过了仿真和实验进一步验证了方案的可行性。

#### 参考文献:

- [1] 王兆安,黄俊. 电力电子技术(第四版) [M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [2] 陈颖,张俊洪. PWM 逆变电源的谐波分析及抑制策略 [J]. 船电技术,2005,1:28-30.
- [3] 徐慧,肖岚,严仰光. SVPWM 逆变器数字电压调节技术的研究 [J]. 南京航空航天大学学报,2002,34(5): 456-459.