

# 基于无差拍控制的并网逆变器

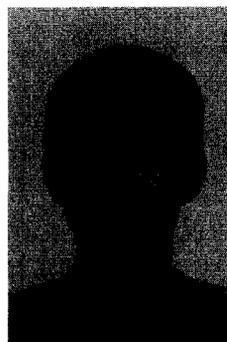
刘伟, 戴瑜兴, 文劲松

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082)

**摘要:** 在研究并网逆变器基本原理的基础上, 设计了基于无差拍控制的并网逆变器。阐述了采用无差拍控制技术实现并网电流对市电电压的跟踪和参考电流信号的控制, 同时给出了基于 TMS320LF2407A 的系统软件设计程序流程图, 并进行了样机实验。实验结果表明, 该控制策略简单、有效, 系统的并网电流波形较好。

**关键词:** 无差拍控制; 并网逆变器; 参考电流

**中图分类号:** TM 464 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-5531(2007)11-0018-03



刘伟(1984—), 男, 硕士研究生, 研究方向为数字化电源。

## Grid-Connected Inverter Based on Deadbeat Control

LIU Wei, DAI Yuxing, WEN Jinsong

(Institute of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** On the basis of researching basic principle of grid-connected inverter, grid-connected inverter was designed based on deadbeat control. The realization of grid-connected current tracking net voltage using deadbeat control and the control of reference current were presented. Simultaneously, the program flow chart of the system based on TMS320LF2407A was proposed. Sample experiments have been done and the results show that the control strategy is simple and effective, and the wave of grid-connected current is better.

**Key words:** deadbeat control; grid-connected inverter; reference current

### 0 引言

随着不可再生能源减少、电力紧张、环境污染日益严重, 可再生能源发电技术引起了人们的关注。在国外, 近年来可再生能源已开始由补充能源向替代能源发展。并网逆变器作为可再生能源发电系统与电网的接入口, 在并网发电中起到关键作用。因此, 研究用于并网逆变器的控制方法具有重大意义和广阔的应用前景。

### 1 并网逆变器工作原理

并网逆变器将可再生能源产生的直流电变换为正弦交流电, 经过滤波后输送到电网。采用输入电压源方式为主, 输出控制采用电流控制方式的全桥逆变电路。通过控制电感电流的频率和相位跟踪电网电压的频率和相位, 保持正弦输出, 从而达到并网运行的目的。其工作原理如图 1 所示, 图中:  $u_n$  为电网电压;  $u_{AB}$  为并网逆变器输

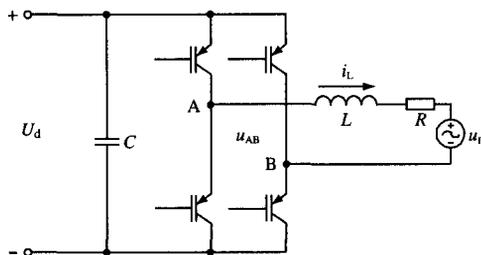


图 1 并网逆变器工作原理图

出的高频 SPWM 电压;  $R$  为滤波电感和线路的等效电阻。主电路逆变桥左右桥臂分别加上相位差互为  $180^\circ$  的 SPWM 脉冲, 经交流侧电感  $L$  滤除高频信号后, 向电网馈入同频同相的正弦波电流。

高压直流  $U_d$  一般由低压直流(如光伏系统中的蓄电池组)、电子模拟负载系统中的电源模块等经过 DC/DC 升压后得到, 幅值约为 400 V。

戴瑜兴(1956—), 男, 教授, 博士, 研究方向为数字化设计理论及应用。

文劲松(1982—), 男, 硕士研究生, 研究方向为数字信号处理及应用。

电感接在逆变器输出与电网之间,主要起滤除高频谐波电流和平衡逆变器与电网之间的 50 Hz 基波电压的作用。

## 2 并网逆变器控制策略

### 2.1 电流跟踪控制

由图 1 可知,并网逆变器以电感电流  $i_L$  为变量的电路方程为

$$u_{AB} - u_n = L \frac{di_L}{dt} + Ri_L \quad (1)$$

离散化得

$$i_L[k+1] = i_L[k] + T_s/L(\bar{u}_{AB}[k] - \bar{u}_n[k] - \bar{R}i_L[k]) \quad (2)$$

式中: $i_L[k]$  为第  $k$  次采样时刻的电感电流值; $T_s$  为采样周期; $\bar{u}_{AB}[k]$ 、 $\bar{u}_n[k]$ 、 $\bar{R}i_L[k]$  分别为  $u_{AB}$ 、 $u_n$ 、 $i_L$  在第  $k$  次采样周期内的平均值。

由式(2)可知,第  $k+1$  次采样时刻的电感电流值  $i_L[k+1]$  可由  $i_L[k]$ 、 $\bar{u}_{AB}[k]$ 、 $\bar{u}_n[k]$ 、 $\bar{R}i_L[k]$  决定。 $i_L[k]$ 、 $\bar{u}_n[k]$ 、 $\bar{R}i_L[k]$  是采样或计算值,是已知的。 $u_{AB}$  实际上为脉冲波电压,其每一采样周期内的脉冲宽度为

$$D[k] = \frac{\bar{u}_{AB}[k]}{U_d} T_s \quad (3)$$

通过控制每一采样周期的脉冲宽度可控制逆变器输出电压,从而达到控制电感电流即并网电流的目的。于是系统控制的对象就间接地变为控制  $\bar{u}_{AB}[k]$ 。由式(2)可得

$$\bar{u}_{AB}[k] = \frac{L}{T_s} (i_L[k+1] - i_L[k]) + \bar{u}_n[k] + \bar{R}i_L[k] \quad (4)$$

要使电感电流在第  $k+1$  采样时刻跟踪上参考电流信号  $i_r[k+1]$ ,用  $i_r[k+1]$  代替式(4)中的  $i_L[k+1]$  即可,得

$$\bar{u}_{AB}[k] = \frac{L}{T_s} (i_r[k+1] - i_L[k]) + \bar{u}_n[k] + \bar{R}i_L[k] \quad (5)$$

将式(5)代入式(3),得

$$D[k] = \frac{L(i_r[k+1] - i_L[k]) + (\bar{u}_n[k] + \bar{R}i_L[k])T_s}{U_d} \quad (6)$$

第  $k$  次采样周期的 PWM 脉冲宽度,即功率管导通时间可由  $U_d$ 、 $i_L[k]$ 、 $\bar{u}_n[k]$ 、 $\bar{R}i_L[k]$ 、 $i_r[k+1]$  决定。于是对每一采样周期脉冲宽度的控制

就转移为对参考电流信号的控制,要求参考电流信号的频率和相位可跟踪市电电压频率和相位。

### 2.2 参考电流信号的控制

建立 1 个与所用 DSP 器件字长相等的相位指针 Index,利用该指针在采样频率下步进而周期性溢出的特点,产生与市电同频同相的参考电流信号,从而控制逆变输出,达到控制并网电流的目的。图 2 为  $n$  位相位指针周期溢出示意图。

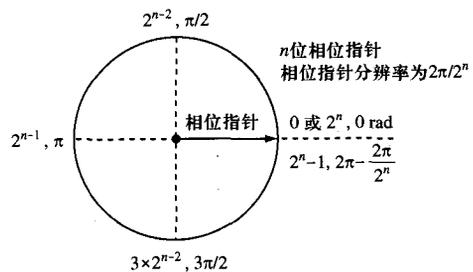


图 2  $n$  位相位指针

在每个采样周期对相位指针增加一个量值

$$\text{Index} += \text{Step} \quad (7)$$

Index 值代表了当前参考电流信号的相位值。增量值 Step 的大小决定了指针 Index 溢出的快慢,也即决定了参考电流信号的频率。如此周而复始,实现参考电流信号的发生。通过对增量值 Step 的调整,可实现对参考电流信号频率的调节;如果在一个逆变周期之后对相位指针 Index 增减一个值,则可实现对参考电流信号相位调节。通过参考电流信号对市电电压信号频率和相位的跟踪,实现了对每一采样时刻参考电流信号值的控制,从而控制了并网电流的频率和相位。

## 3 控制算法实现

### 3.1 主控系统结构

利用 TI 的 DSP 芯片 TMS320LF2407A 所设计的主控系统如图 3 所示。信号检测及电平转换电

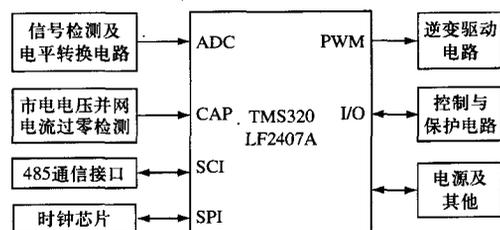
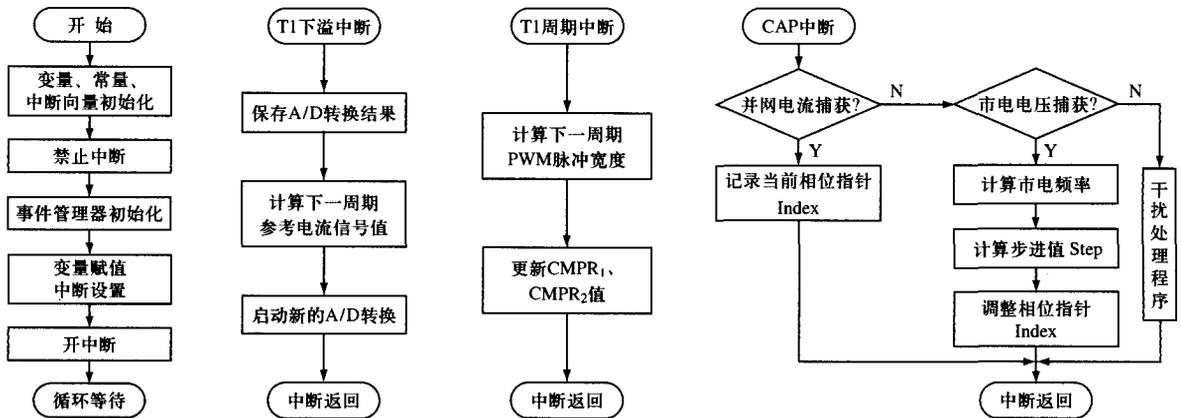


图 3 TMS320LF2407A 主控系统

路将市电电压、电感电流、直流侧电压等信号转换为 LF2407A 的 ADC 可接受的 0~3.3 V 电平;过零检测模块将市电电压和并网电流转换为同频同相的 3.3 V 电平方波信号,送入 DSP 的捕获口,捕获口在方波信号的上升沿产生捕获中断;事件管理器的 PWM 模块产生带死区控制的 PWM 信号输出,逆变驱动电路将 PWM 信号隔离放大以驱动 IGBT;SCI 模块用于 RS-485 通信;I/O 口资源用于向控制与保护电路发出电平信号。

### 3.2 软件设计

基于 DSP 的硬件设计,给出系统软件设计的



(a) 主程序 (b) T1 下溢中断子程序 (c) T1 周期中断子程序 (d) 捕获中断子程序

图 4 系统程序流程

表 1 TMS320LF2407A 关键模块资源分配

模块	设置	对应资源
EVA	T1 为所有比较器和 PWM 电路提供时基;连续增减计数模式;内部 CPU 时钟作为计数时钟,1 分频,计数周期为 100 μs;允许周期中断和下溢中断	CMPR <sub>1</sub> CMPR <sub>2</sub> ADC
	T2 为 CAP1、CAP2 提供公共时基;连续增计数模式;采用内部 CPU 时钟作为计数时钟,64 分频;禁止 T2 所有的中断	CAP <sub>1</sub> CAP <sub>2</sub>
ADC	采样时间窗口预定标位 ACQ PS3-0 为 4,转换时间预定标位 CPS 为 0;启动/停止模式,由 T1 下溢中断标志来启动模数转换;排序器为级连工作	

### 3.3 捕获中断分析

由于 TMS320LF2407A 是 16 位定点 DSP,故取 16 位无符号整型变量 Index 为相位指针。利用 DSP 的 2 个捕获端口 CAP<sub>1</sub>、CAP<sub>2</sub>,对市电电压与并网电流的过零点进行相位捕获。通过捕获可以很方便地得到市电电压频率  $f_{\text{市电}}$ ,参考电流信号的步进值为

$$\text{Step} = 2^{16} \times (f_{\text{市电}}/f_{\text{sample}}) \quad (8)$$

式中  $f_{\text{市电}}$  为市电电压频率; $f_{\text{sample}}$  为系统信号采样频率。这样就可实现参考电流信号对市电电压频率的跟踪。

如图 4(d) 所示,捕获并网电流过零点时,记录当前的相位指针 Index 值,该值为并网电流的

(下转第 24 页)

### 3 结 语

本文设计的信号检测电路利用 PIC18F458 内置的 10 位 ADC, 简化了电路。选用的电压提升电路还具有低通滤波作用, 提高了抗干扰性。利用 PIC18F458 内置 CCP 模块的输入捕捉功能, 可准确捕捉输入信号的沿跳变脉冲信号, 所检测的频率信号能满足自动转换开关信号检测输入精度的要求。该电路具有成本低、易维护的优点。

### 【参考文献】

- [1] 曲德刚. 自动转换开关电器(ATSE)的选择与应用[J]. 低压电器, 2003(1): 56-58.
- [2] 童诗白, 华成英. 模拟电子技术基础[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [3] 陈国先. PIC 单片机原理与接口技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.

收稿日期: 2007-03-26

(上接第 20 页)

相位滞后情况。在市电过零相位捕获中, 让 Index 增减一个合适值, 使其向并网电流过零相位值趋近, 这样就可实现参考电流与市电的相位一致。

### 4 实验结果分析

设计了以 TMS320LF2407A 为主控芯片的单相并网逆变器实验样机, 样机参数设计为: 逆变器输出功率 3 kVA, 直流母线输入电压 400 V, 开关频率 10 kHz。电网电压和并网电流波形如图 5 所示。由实验结果可知, 并网电流顺利跟踪了电网电压, 谐波含量小, 系统具有较好的工作稳定性。

### 5 结 语

并网逆变器是可再生能源并网发电系统中的核心部件之一, 其性能优劣对并网发电系统影响重大。本文基于无差拍控制技术, 采用 TMS320LF2407A 作为控制芯片, 设计了电压源输入、电流输出控制的单相并网逆变器, 其输出功率因数接近 1, 并网电流波形较好, 谐波含量小, 具有一定的应用前景。

### 【参考文献】

- [1] 刘志刚, 汪至中, 范瑜, 等. 新型可再生能源发电并网系统研究[J]. 电工技术学报, 2003, 18(4): 108-113.
- [2] 马振国, 李鹏, 赵保利, 等. DVR 电压波形跟踪无差拍控制方法[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(3): 13-17.
- [3] 张振宇, 夏超英, 赵栋利. 基于 DSP 的同步锁相技术[J]. 仪器仪表学报, 2002, 32(3): 374-375.
- [4] TI Instruments. TMS320LF/LC240xA DSP Controllers System and Peripherals Reference Guide (Rev. B) [R]. Texas Instruments Literature Number SP-RU357B, 2001.

收稿日期: 2007-03-15

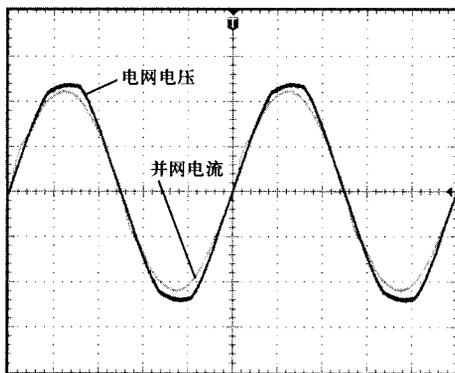


图 5 电网电压和并网电流波形