

基于 DSP 的三相逆变并网同步控制算法及实现

于 宁,何通能*,王泽锴

(浙江工业大学 信息学院,浙江 杭州 310023)

摘要:针对逆变器与电网的安全并网问题,需要在并网之前进行相位的同步控制,以确保并网过程不会产生大的环流。以 TI 公司的 DSP F28335 为例,同时采用连续增减计数模式,产生了对称的 PWM 波以减少谐波。三相逆变器采用 SVPWM 控制输出,通过过零检测电路检测了电网的零相位,并与计算得到的逆变电源相位进行了比较,根据二者得出的相位差进行了相应的算法调整,实现了相位同步。为了提高调整的精确性,把相位分为超前相位和滞后相位,根据得到的相位差情况,进行了相应的调整。研究结果表明,根据该方法实现的相位同步控制在仿真模型和实际应用中都有很好的效果,逆变器和电网可以实现安全并网。

关键词:三相逆变器;并网;同步控制;DSP;相位

中图分类号:TM615;TM73

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2013)07-0878-04

Algorithm and realization of three-phase grid-connected inverter synchronous control based on DSP

YU Ning, HE Tong-neng, WANG Ze-kai

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Aiming at the inverter and power grid-connected security, need to be in parallel before phase synchronizing control, to ensure that big circulation won't be produced during the grid process. The TI company DSP F28335 was used as an example, and the continuous increase or decrease counting mode was used to produce symmetrical PWM wave to reducing harmonic. SVPWM was adopted to control three-phase output by three-phase inverter. Through the zero-crossing detection circuit, the grid inverter zero phase was detected, and it was used for the calculation of the inverter power supply phase comparison, according to the phase difference that carries on the corresponding algorithm adjustment, the phase synchronization was realized. To improve the precision of adjustment, the phase was divided into phase lead and lag phase. According to the difference phase, the corresponding adjustment was undertaken. The results of the study show that, the phase synchronization control realized by this method in the simulation model and the practical effect is very good, inverter and grid can realize safe grid.

Key words: three-phase inverter; grid; synchronizing control; DSP; phase

0 引 言

能源是人类社会生存和进步的物质基础,是一个国家的核心战略资源。随着人类对能源需求的日益增加,能源危机已经成为 21 世纪人类面临的重大问题。太阳能是地球永恒的能源,取之不尽用之不竭^[1]。人类所需要的能量都可以来自于直接或间接地利用太阳

能,特别是以太阳能光伏发电为核心的新能源产业得到了快速发展。全球光伏发电装机容量几乎呈指数增加,其中大多数是光伏并网发电的形式,将光伏电池板的电能注入公共电网,以扩大整个电网的发电容量^[2-4]。逆变器作为光伏并网发电技术的关键设备,近年来已经成为一个十分热门的研究课题。

实现电网的跟踪控制是整个并网逆变器的关键,

收稿日期:2012-12-25

作者简介:于 宁(1988-),女,山东莱阳人,主要从事逆变电源和电力电子方面的研究. E-mail:fightingyuning@sina.com

通信联系人:何通能,男,副教授,硕士生导师. E-mail:hntn@zjut.edu.cn

它影响着输出电网的电能质量和运行效率。本研究以TI公司的TMS-320F28335为控制芯片,以SVPWM为控制方法,整个逆变模块外加少量的外围电路可以实现功率为10 kW的光伏并网逆变器。电网同步控制采用过零检测电路调整载波比的方法,与PLL锁相环同样可以起到相位调整的目的,而且控制简单。

1 光伏并网逆变器的拓扑结构

目前,并网逆变器根据与电网的不同联结方式可以分为串联型、并联型、串一并联型和混合型。其中并联型逆变器在技术上已经比较成熟,是一种应用广泛的有源滤波器拓扑结构,为此本研究采用较为常用的电压型三相并网逆变器^[5]。

三相并网逆变器的拓扑结构如图1所示。

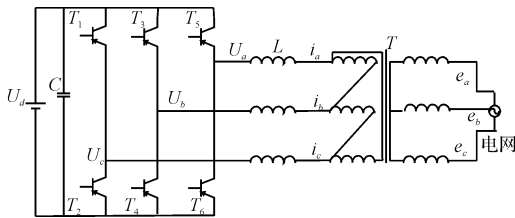


图1 光伏并网逆变拓扑结构

U_d —输入直流电压; U_a, U_b, U_c —逆变交流侧的输出电压;

e_a, e_b, e_c —电网电压; i_a, i_b, i_c —逆变并网的输出电流; C —储能电容; L —输出滤波电感; T — Δ/Y 接法的隔离变压器

直流侧由电容 C 储存能量,经过三相可控逆变桥拓扑结构,输出电流经过电感 L 滤波后,通过隔离变压器与电网实现并网。隔离变压器实现了系统和电网的电气隔离,增强了系统的安全性和可靠性。逆变器正常工作时,要求单位功率因数,逆变器输出电压为与电网电压同频、同相的正弦波。

2 三相逆变器的控制

由图1可知,逆变器交流侧输出电压为交流量,直接对其进行PI控制会产生稳态误差,无法做到无静态跟踪,难以控制。因此,本研究通过等量坐标变换,将三相静止 a, b, c 静止坐标转换为动态旋转的 d, q 坐标上。采用SVPWM技术控制逆变器输出,这样既提高了直流电压利用率又提高了功率因数。

SVPWM的理论基础是平均值等效原理。在某个时刻,电压矢量旋转到某个区域中,可由组成这个区域的两个相邻的非零矢量和零矢量在时间上的不同组合得到。两个矢量的作用时间在一个采样周期内分多次施加,从而控制各个电压矢量的作用时间,使电压空间

矢量接近按圆轨迹旋转,通过选择逆变器的不同开关模式,使电动机的实际磁链尽可能逼近理想磁链圆,从而产生SVPWM波^[6]。

为了研究各相上下桥臂不同开关组合时逆变器输出的空间电压矢量,特定义开关函数 $S_x(x=a, b, c)$ 为:

$$S_x \begin{cases} 1, & 1 \text{ 代表上桥臂导通,} \\ 0, & 0 \text{ 代表下桥臂导通.} \end{cases}$$

(S_a, S_b, S_c) 的全部组合有8种,分别为: $U_0(000)$ 、 $U_1(001)$ 、 $U_2(010)$ 、 $U_3(011)$ 、 $U_4(100)$ 、 $U_5(101)$ 、 $U_6(110)$ 、 $U_7(111)$ 。可以证明有效矢量的幅值均为 $2U_{dc}/3$ 。SVPWM就是通过这8个空间矢量实时控制给定输出向量 U_{out} 的大小和方向,使其在该坐标平面内以原点为圆心,按固定的角速度旋转。开关量组合与对应的 $\alpha\beta$ 平面向量如图2所示。

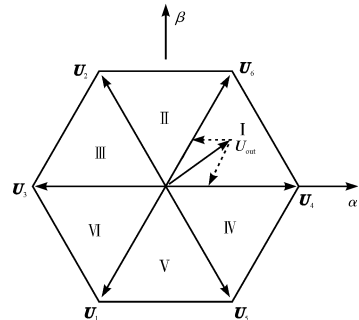


图2 开关量组合与对应的 $\alpha\beta$ 平面向量

SVPWM是将电动机磁链的控制原理运用到三相电压上,所以并不能对三相中的一相单独进行控制。但是它可以通过坐标变换,将三相电压的控制对象变为两个直流量,减小了输出的静态控制误差。此外,本研究采用TMS320F28335 DSP,它的EPWM使用软件生成SVPWM信号更为简洁方便。通常选用CMPA设置触发时刻和触发信号占空比,TBPRD设置开关频率,CMPCTL设置计数模式^[7]。研究者通过采用连续增减计数模式,产生对称的PWM波以减少谐波。DBFED和DBRED用以设置死区时间,避免上、下两个开关管导通。这样可以更方便地配置死区时间,更好地满足功率器件对驱动信号的不同要求。

采用SVPWM同样也提高了直流电压的利用率。SVPWM情况下,逆变器输出电压在不失真情况下的最大电压幅值为 $\sqrt{3}U_{dc}/3$,若采用三相SPWM调制,逆变器输出的不失真最大电压幅值为 $U_{dc}/2$ 。显然SVPWM调制模式比SPWM调制模式直流利用率更高,计算公式如下:

$$\frac{\sqrt{3}}{3}U_{dc} \div \frac{1}{2}U_{dc} - 1 = 0.1547 \quad (1)$$

即,电压利用率提高了 15.47%。

3 三相逆变并网同步控制算法

为了避免并网过程中出现大环流,并网之前先要进行同步控制。一般国内的标准市电是 50 Hz,系统设计产生 50 Hz 的 SVPWM 波,实现同步控制需要捕获市电的频率和相位,然后调整相应的 SVPWM 的三角载波频率,从而完成对市电的跟踪。同步主要是通过通过对三相逆变电源相位的调整跟踪电网的相位。

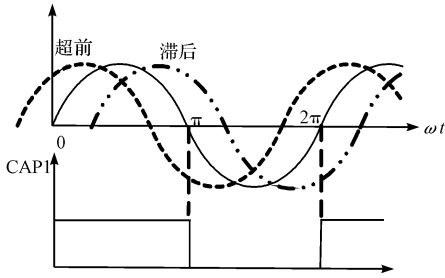


图 4 超前滞后电压示意图

相位差分为两方面:一是相位超前;二是相位滞后。超前滞后电压示意图如图 4 所示,采用 CAP1 作为上升沿捕获。根据上述产生 SVPWM 的方法,设置开关频率为 3.6 kHz,即载波比 N 为 120,则一个周期中载波和角度的关系如下:

$$\varphi = 360^\circ / N = 3^\circ \quad (2)$$

式中: φ —转过角度, N —载波比。

假设 N_k 为转过的三角载波数 ($0 \leq N_k \leq 120$)。 N_k 每增加 1,角度 φ 就增加 3° 。如果 $\Delta\theta > 0$,说明三相逆变电源相位超前电网,相反,则说明三相逆变电源相位滞后电网。相位超前时,可以将超前波形向电网输出波形方向移动一个周期,即变为滞后调整,这样相位超前和相位滞后都按照相位滞后来调整。则其需要调整角度计算方式如下式:

$$n_k = \Delta\theta / 3^\circ \quad (3)$$

式中: n_k —需要调整的三角载波数目, $\Delta\theta$ —三相逆变

电源与电网角度差。

实际 SVPWM 计算需要的三角载波数表示为:

$$N_k = N_k + n_k \quad (4)$$

这样就可以达到三相逆变电源与电网相位同步的效果。如果 $360^\circ \geq \Delta\theta > 180^\circ$,则变换 $\Delta\theta$ 为 $180^\circ \geq \Delta\theta > 0^\circ$ 。相位差控制图如图 7 所示,使相位差始终控制在 $0^\circ \sim 180^\circ$,便于按照上述控制方法控制相位。实际系统中相位调整在 $-1^\circ \sim 1^\circ$ 时,确认为相位调整结束。如果在 $-1^\circ \sim 1^\circ$ 范围内保持 5 s 以上,则说明相位可靠的调整结束。反之,则相位重新调整。实际应用中,电压检测部分、A/D 采样和滤波电路等都会使输入电压产生相位延迟,因此在做相位调整时进行相位补偿,可以提高相位调整的精度。

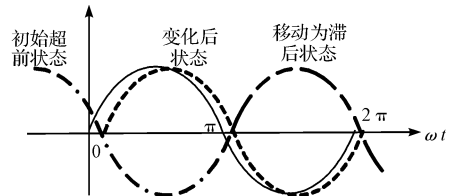


图 7 相位差控制图

4 过零检测电路设计

在相位的同步调整中,需要由过零检测电路检测电网电压的过零点。实际过零检测电路如图 8 所示。U8ATL072 为电压跟随器,U8BTL072 作为电压比较器,当输入大于 0 时,经过光耦 PC817 最终输出为高电平,反之输出为低电平。过零检测电路输出的是幅值为 3 V 的方波,这样便于 DSP 捕获。捕获器的作用是捕获输入引脚上电平的变化并记录器变化发生的时间。一个 F28335 芯片有 4 个 32 位时间标签捕捉寄存器 (CAP1 ~ CAP4)^[8]。本研究采用 CAP1 捕获寄存器,用于捕获电网的上升沿,以此确定电网的频率,方便以电网相位为基准调整逆变电源的相位,实现电网与逆变电源的同步控制。

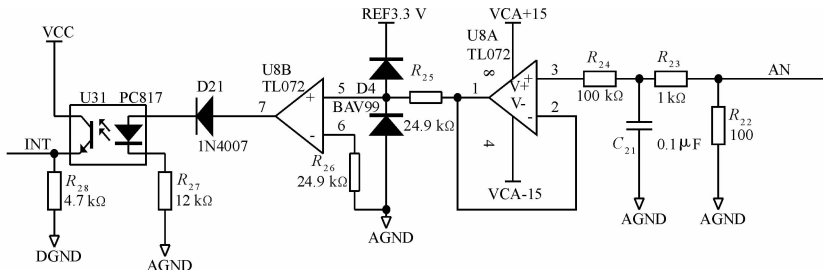


图 8 过零检测电路

5 实验结果

系统控制采用 TMS320F28335 DSP,它是 TI 公司最

新推出的 32 位浮点 DSP 控制器,使得用户不仅可以使
用高级语言实现系统软件控制,而且可以用 C/C++ 语
言实现复杂的数学算法^[9],可显著提高控制系统的控

制精度和控制算法速度,是目前最先进的控制器之一。它具有 150 MHz 的高速处理能力,可以在非常小的延时下处理多个同步事件,同时它具有 18 路 PWM 输出,16 通道的 12 位 A/D 转换器。与 TMS320F2812 相比,TMS320F28335 增加了单精度浮点运算单元(FPU),高精度 PWM 以及 DMA 功能,Flash 增加了一倍,可将 ADC 转换结果直接存入 DSP 任意寄存空间,增加了 1 个 CAN 通讯模块、1 个 SCI 接口和 1 个 SPI 接口^[10]。系统直流输入电压为 500 V,逆变器采用西门康 IGBT,逆变后交流输出为 380 V,频率为 50 Hz,电网输入幅值为 380 V,频率为 50 Hz。根据上述算法得出的仿真结果如图 9、图 10 所示。其中实线代表电网 A 相电压,虚线代表逆变电源 A 相电压。实际系统结果如图 11、图 12 所示。其中实线代表电网,虚线代表逆变电源。根据图形显示,同步后相位差控制在 287.5 m° 。由图分析可证明该方案切实可行。

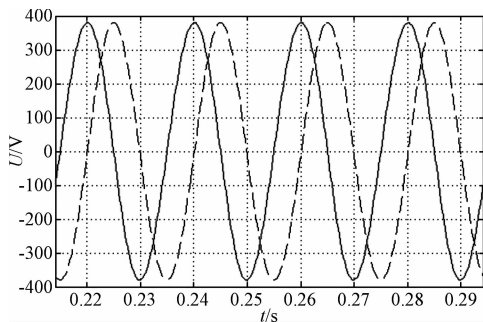


图9 仿真同步调整前相位状态

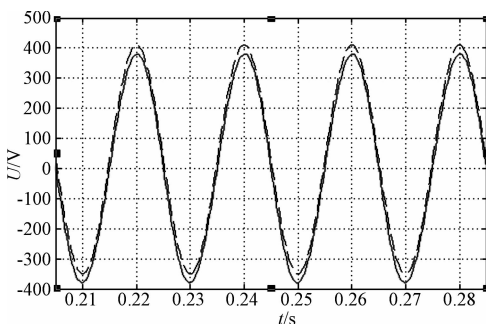


图10 仿真同步调整后相位状态

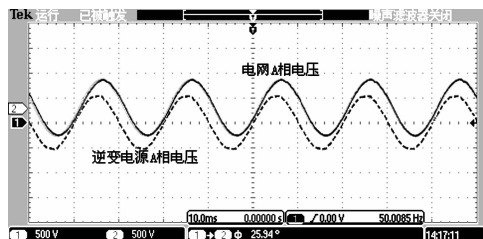


图11 系统相位调整之前

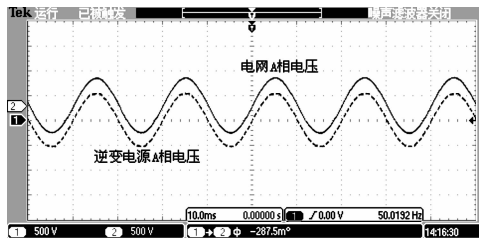


图12 系统相位调整之后

6 结束语

本研究通过采用先进的控制器 TMS320F28335 实现系统的各项控制。在同步检测和实现 SVPWM 方面较 TMS320F2812 控制器有很明显的优势。同时三相逆变电源采用的 SVPWM 实现三相电压输出,提高了直流电压利用率,减少谐波。三相逆变电源并网同步控制和实现,通过仿真和实验验证本研究所采用的相位同步调控方法有效可行,可以很好满足并网要求。

参考文献(References):

- [1] 田清华,陈建斌,张建平. 太阳能热水器自动控制系统的的设计[J]. 计算机测量与控制,2002,10(12):799-800.
- [2] ARANEO R, LAMMENS S, GROSSI M, et al. EMC issues in high-power grid-connected photovoltaic plants [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2009, 51(3):639-648.
- [3] 王斯成,余世杰,王德林,等. 3 kW 可调型并网逆变器的研制[J]. 太阳能学报,2001,22(1):17-20.
- [4] TSUMOTO S. Induction of Expert Decision Rules using Rough Sets and Set-induction, Fuzzy and Rough Set [M]. [S. l.]:Spring-Verlag,2000.
- [5] 彭海应,陈柏超,彭 泚. 一种新型谐波抑制以及无功补偿装置[J]. 电力电子技术,2004,38(6):34-36.
- [6] 苏奎峰,吕 强,狄庆峰. TMS320F2812 原理与开发 [M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [7] 刘陵顺,高艳丽,张树团,等. TMS320F28335 DSP 原理及开发编程 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2011.
- [8] 苏奎峰,吕 强,邓志东,等. TMS320x28xxx 原理与开发 [M]. 北京:电子工业出版社,2009.
- [9] 王忠勇,陈恩庆. TMS320F2812 DSP 原理与应用技术 [M]. 北京:电子工业出版社,2012.
- [10] 宋 莹,高 强,徐殿国,等. 新型浮点型 DSP 芯片 TMS320F283xx [J]. 微处理机,2010,31(1):20-22.

[编辑:李 辉]