

基于 DSP 的光伏并网逆变器的设计

罗隆福, 赵剑松, 邓建国, 莫旭杰

湖南大学, 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:介绍并网逆变器的设计方法,采用 TMS320F2812 作为控制器,通过改进型 SPWM 电流跟踪控制实现输出电流与电网电压同频同相,从而使电流跟踪误差显著减少。同时阐述了最大功率跟踪及孤岛检测的原理,给出了具体的解决方案。最后给出了基于 TMS320F2812 的软件设计,并进行了样机实验,结果表明并网电流波形良好,所设计的逆变装置具有良好的稳定性和可靠的控制策略。

关键词:逆变器; 光伏并网; 最大功率跟踪; 孤岛检测

中图分类号:TM464

文献标识码:A

文章编号:1000-100X (2010)11-0019-03

The Design of Grid-connected Photovoltaic Inverter Based on DSP

LUO Long-fu, ZHAO Jian-song, DENG Jian-guo, MO Xu-jie

Hunan University, Hunan 410082, China)

Abstract:This paper introduces a design of grid-connected inverter.The TMS320F2812 is used as controller,it is realize that the output current have the same frequency and phase with utility grid voltage by improving SPWM current tracking.The error of current track decrease evidently by this method.Simultaneously,the principle of the maximum power point tracking and island detection is elaborated,and techniques of islanding protecting and MPPT strategy are discussed.Finally,the program flow chart of the system based on TMS320F2812 is proposed.Sample experiments are done and the results show that the wave of grid-connected current is better,the inversion device has good stability and reliable control strategy.

Keywords:inverter; photovoltaic grid-connected; maximum power point tracking; island detection

1 引言

随着世界能源危机的日益严重,全球环境的不断恶化,大规模开发清洁可再生能源成为当前能源战略的主要方向。太阳能作为当前世界上最清洁、最现实、最有大规模开发利用前景的可再生能源,得到了各界的广泛关注。在太阳能的利用中,光伏发电并网是其主要发展方向之一,而光伏并网逆变器是光伏并网发电系统的核心部件,所以逆变器控制和关键技术成为主要研究对象。这里对这两方面进行了重要阐述,并设计了 200 W 的并网逆变器。

2 逆变器的设计要求

首先逆变器将光伏阵列输出的直流电压转换为 220 V/50 Hz 的交流电压,采用电压源输入电流源输出的控制方式,所以要求输出电流与电网电压同频同相,且满足谐波含量小的电能质量要

求;其次能使光伏阵列工作在最大功率点从而提高输出效率;最后,具有先进的防孤岛检测及各种故障保护功能,避免造成不必要的损失。关键技术:额定功率为 200 W;输入电压为 30~40 V;输出电压为 $(220 \pm 5\%)$ V;输出电流为正弦波,输出波形失真度小于 5%;输出频率为 $(50 \pm 2\%)$ Hz;输出功率因数大于 0.98。

3 光伏并网系统的工作原理

逆变器控制方式可分为电压源电压控制、电压源电流控制、电流源电压控制和电流源电流控制。在此采用逆变器电压源输入、电流源输出的控制方式。整个主电路的拓扑方式采用两级级联,前级 DC/DC 变换器与后级 DC/AC 逆变器,通过中间直流电压相连。图 1 示出整个系统的结构图。

前级 DC/DC 电路采用 Boost 电路,通过 MPPT 算法控制实现最大功率输出,提高太阳能电池的转换效率;后级 DC/AC 电路实现输出电流与电网电压同频同相。当系统发生故障时,逆变器保护装置会及时起动,将逆变器从电网中断开。整个控制部分由 TMS320F2812 协调完成,工作原理如图 2 所示。

定稿日期:2010-07-09

作者简介:罗隆福(1962-),男,湖南常德人,教授,博士生导师,研究方向为现代电器设备的设计和优化等。

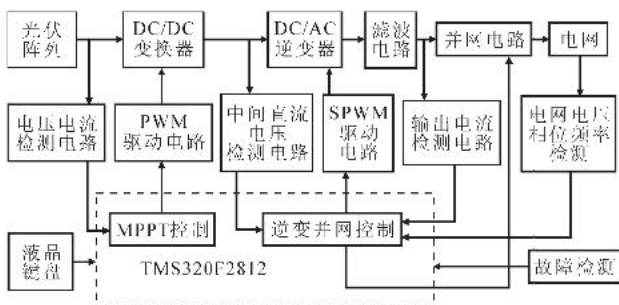


图 1 系统结构图

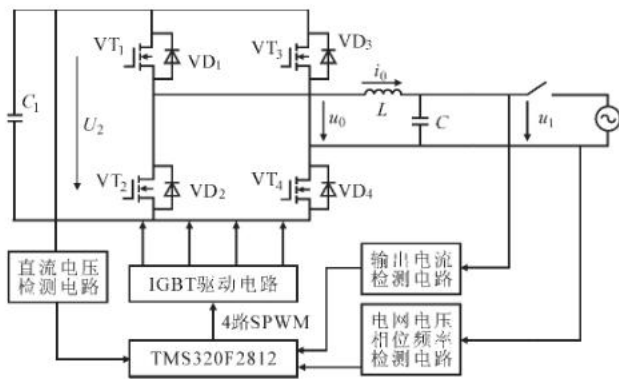


图 2 逆变器的工作原理图

4 并网逆变器的控制分析

4.1 逆变器输出电流控制

单相并网逆变的控制目标：控制逆变电路输出的交流电流 u_0 为稳定的高质量的正弦波，且与电网电压 u_1 同频、同相。并网工作方式下的等效电路和电流电压矢量如图 3 所示。

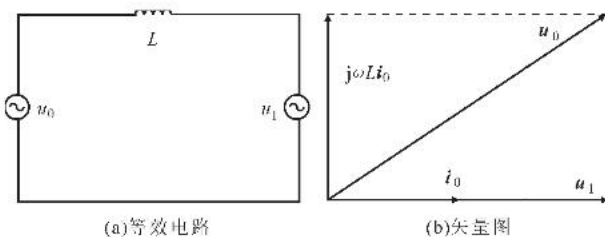


图 3 并网工作方式逆变器电路与矢量图

因为电感的存在，所以 u_0 与 u_1 间有相位差。只要在实际控制中满足这种相位关系，就可成功实现 u_0 与 u_1 同频同相。采用正弦脉宽调制 (SPWM) 方式，通过控制开关管 $VT_1 \sim VT_4$ 的导通或关断的时间，实现能量从逆变器向电网传送，且交流侧功率因数 1。对矢量三角形进行下列变换：

$$u_0 \hat{\delta} = u_1 \hat{\delta} + L \frac{di_0 \hat{\delta}}{dt} \quad (1)$$

在一个开关周期内对上式进行周期平均：

$$u_0^* \hat{\delta} = u_1 + \frac{1}{T_c} \int_k^{k+1} L di_0 \hat{\delta} = u_1 + \frac{1}{T_c} [i_0(k_{k+1}) - i_0(k_k)] \quad (2)$$

$$u_0^* \hat{\delta} = u_1 \hat{\delta} + K_p [i_0^* \hat{\delta} - i_0 \hat{\delta}] \quad (3)$$

式中： $K_p = L/T_c$ 。

式 (3) 称为改进周期平均模型。由该模型可得如图 4 所示的改进型固定开关频率电流控制图。该控制策略不仅保留了原来控制策略的优点，同时电流的跟踪误差显著减小，通过调整电源电压的比例系数来减小直至消除电源电压对电流跟踪偏差的影响，从而显著改善了逆变器中电流跟踪控制的性能。

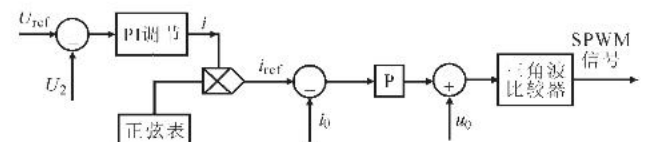


图 4 改进型 SPWM 输出电流跟踪

由图 4 可知，参考电压 U_{ref} 与中间直流电压 U_2 相比较，其误差经 PI 调节得到电流指令 I ， I 与正弦波形相乘得到正弦指令电流 i_{ref} ，再与 i_0 相比较后得出误差。该误差经 P 调节后得到的值与 u_1 相加，最后与三角波比较，便产生了 4 路 SPWM 信号，用以控制逆变器开关管的通断时间，这样便实现了光伏电池输出电压基本工作在 U_{ref} 附近，且使逆变器输出正弦电流波形幅值为 I 。

该控制方案中对并网电流采用了改进型固定开关频率的控制方法，即在固定开关频率控制的基础上作了进一步改进，加入了交流侧网压的计算， i_{ref} 与实际逆变器输出电流相比较得到误差 Δi 。 Δi 在物理意义上相当于逆变器输出侧电感上产生的电压。 $\Delta i P$ 与 u_1 之和相当于逆变器输出的脉冲电压，这样构成的矢量图与逆变器输出向量图一致。改进的固定开关频率控制策略保持了原有优点，同时显著减小了电流跟踪误差，改善了 SPWM 整流器电流跟踪性能。

4.2 并网同步控制

由于系统用于逆变并网，这就要求逆变器输出电流与电网电压同频同相。此系统采用检测电网同步信号的方式实现输出交流与电网同步。具体作法是：通过电网电压检测电路将电网电压信号变为同步方波信号，该同步方波信号的上跳沿与电网电压过零点时刻相对应，将同步方波信号输入 DSP 的捕获端口，捕捉电网电压的零点，这样可计算电网电压的频率；当 DSP 检测到同步信号上跳沿就产生同步中断；在同步中断程序中正弦指针复位到零，该正弦指针与 I 相乘产生 i_{ref} 。这样便实现了输出电流与电网电压同步。由于采集

的方波信号易受干扰，因此在程序中要加入数字滤波。同步信号使正弦表指针与电网电压同步。将PI调节后得到的 I 与正弦表指针所对应的数据相乘形成幅值可调的 i_{ref} ，通过闭环控制使输出的电流跟踪 i_{ref} 实现电流跟踪控制。

5 最大功率跟踪和反孤岛效应检测

为提高太阳能光伏阵列的输出效率，应尽可能使之工作在最大功率点。最大功率点跟踪 (MPPT) 实质上是一个动态寻优的过程，目前能实现 MPPT 的方法有恒定电压跟踪法、扰动观察法、电导增量法、最优梯度法、间歇扫描法、模糊控制法和滞环比较法等。在此采用增量电导法实现最大功率输出，通过控制 U_{ref} 来跟踪光伏电池最大功率点。假设太阳能电池的输出功率 $P=UI$ ，对 U 求导：

$$\frac{dP}{dU} = I + U \frac{dI}{dU} \quad (4)$$

假设最大功率点电压为 U_{max} ，当 $U < U_{max}$ 时， $dP/dU > -IU$ ；当 $U > U_{max}$ 时， $dP/dU < -IU$ ；当 $U = U_{max}$ 时， $dP/dU = -IU$ 。

若 $dU=0, dI=0$ ，则认为找到最大功率点，无需调整；若 $dU=0, dI \neq 0$ ，则依据 dI 的正负来调整参考电压；若 $dU \neq 0$ ，则根据上述 dP/dU 与 $-IU$ 之间的关系来调整工作点电压，从而实现 MPPT。此控制算法的最大优点是当日照强度变化时，太阳能电池的输出端电压能以平稳的方式追随其变化，电压晃动较扰动观察法小。

孤岛效应是指在电网失电情况下，发电设备仍作为孤立电源对负载供电。逆变器可采用两种孤岛效应检测方法，包括被动式和主动式两种。被动式检测方法指当电网失电时，实时检测电网电压会在电网电压的幅值、频率和相位参数上产生跳变信号，通过检测跳变信号来判断电网是否失电；主动式检测方法指对电网参数产生小干扰信号，通过检测反馈信号来判断电网是否失电。这里采用主动频率偏移法。

具体实现思想是：通过过零检测电路周期性的检测电网电压相邻两次的过零点，即可计算出电网电压的频率 f 。引入频率偏移量 Δf ，将 $f \pm \Delta f$ 作为并网电流的给定频率，并且在过零时刻使并网电流复位。当电网正常运行时，其负载电压频率 f 应基本不变。当市电脱网时，由于输出电流频率随周期偏移，所以检测到的负载电压频率也会发生

相应地变化，因此就形成了并网电流频率的正反馈，使得负载电压频率很快超出频率保护的上下限值，从而使系统有效检测出市电脱网。

6 实验结果

根据上述设计方案，搭建实验电路，设计了软硬件，并进行了实验，波形如图 5 所示。实验参数如下：输入电压为 36 V，并网电压为 220.5 V，输出电流有效值约为 0.9 A，逆变电流频率为 49.98 Hz，功率因数 0.98，输出功率为 200 W。

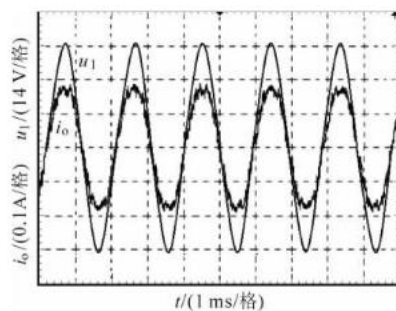


图 5 实验波形

实验结果表明，输出电流 i_o 与电网电压 u_1 同频同相，所采用的控制策略能可靠并网。

7 结论

采用 TMS320F2812 作为控制芯片，采用改进型 SPWM 电流跟踪控制实现输出电流与网压同频同相，软件设计具有最大功率输出和反孤岛效应功能。由实验波形可知，输出电流波形良好，所采用的控制策略稳定可靠，所采用的方案能可靠并网，运行稳定，为小型太阳能电源的并网发电提供有力的技术支撑，也为我国太阳能利用开辟了一条新的路径。

参考文献

- [1] 俞志根. 小功率太阳能电源逆变装置的设计[J]. 电力电子技术, 2009, 42 (8): 55-57.
- [2] 王章权. 瞬时电流跟踪控制光伏并网技术[J]. 电源技术, 2007, 20 (8): 648-650.
- [3] 刘家恒, 文励洪, 钟宇明. 基于 DSP 的新型并网逆变器的研制[J]. 电力电子技术, 2009, 42 (6): 50-52.
- [4] 王 环, 金新民. 小功率光伏并网逆变系统的研制[J]. 电子设计应用, 2003, 26 (7): 75-78.
- [5] Chaniago, J. Selvaraj. Implementation of Single-phase Grid Connected Inverter Using TMS320F2812 [J]. Industrial Electronics and Applications, 2008: 1498-1502.