

基于 TMS320LF2407 的光伏并网 逆变器的研究

原慧军¹, 王效华¹, 徐进¹, 刘伟²

(1.南京农业大学工学院, 江苏 南京 210031)

(2.南京冠亚电源设备有限公司, 江苏 南京 210032)

摘要: 在介绍光伏并网逆变器的基本原理和拓扑结构基础上, 提出基于 TMS320F2407 型 DSP 的单相电压源输入、电流输出控制方式的并网逆变器设计方案。采用电导增量法跟踪控制太阳能电池的最大功率点, 利用 TMS320F2407 芯片产生相应的 SPWM 波控制功率器件的导通与关断, 使用零电流跟踪误差控制实现并网电流无静差的跟踪电网电压, 最终实现了快速稳定追踪太阳能电池最大功率, 并以与电网电压同频、同相正弦电流波形送入电网, 提高了系统逆变效率和可靠性。

关键词: 并网逆变器; TMS320LF2407; MPPT; 光伏发电

Research of PV Incorporated Inverter Based on TMS320LF2407

YUAN Hui-jun¹, WANG Xiao-hua¹, XU Jin¹, LIU Wei²

(1.Engineering College, Nanjing Agricultural University, Nanjing Jiangsu 210031, China)

(2.Nanjing First Second Power Equipment Co. Ltd., Nanjing Jiangsu 210032, China)

Abstract: The design project of single-phase incorporated inverter based on TMS320F2407 is presented according to PV incorporated inverter basic principle and topological structure, which adopts the control method of voltage source input and current output. And then incorporated inverter tracks solar cell maximum power point by conductance incremental method is introduced. SPWM wave produced by TMS320F2407 controls power components open and close, grid current tracks net voltage without steady-state error by zero current track controller. Finally, the result shows incorporated inverter can quickly and steadily track solar battery maximum power and send sinusoidal current waveform into net, which is the same frequency and phase as net voltage. The system have high invert efficiency and reliability.

Keywords: incorporated inverter; TMS320LF2407; MPPT; PV power generation

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 0219-2713(2006)12-0018-04

0 引言

随着不可再生能源减少、电力紧张、环境污染等问题日趋严重, 太阳能光伏等可再生能源发电技术引起了人们的关注。在国外, 近年来太阳能光伏电源已开始由补充能源向替代能源过渡, 并从偏远无电地区中、小功率独立发电系统向并网发电系统的方向发展。光伏并网发电是光伏技术应

用发展的趋势, 其中的核心部件之一——并网逆变器是将太阳能电池发出的直流电能变换成正弦波交流电, 直接输送到电网, 可广泛应用于普通住宅、屋顶和别墅, 在新型光伏集成建筑的并网发电系统、大型光伏电站等场所, 其性能优劣对光伏并网发电系统影响巨大。因此, 研究并网逆变器的控制设计具有重大意义和广阔的应用前景^[1]。

1 并网逆变器工作原理

单相光伏并网逆变电源是将太阳能电池发出的

收稿日期: 2006-07-30

直流电变换为正弦波交流电, 经过交流滤波后输送到电网。其采用的是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。通过控制逆变器的输出电流频率和相位跟踪电网电压的频率和相位, 幅值保持正弦输出, 即可达到并网运行的目的。其中 u_g 是电网电压, u_i 是并网逆变器输出的高频 SPWM 电压波, 主电路逆变桥左、右桥臂分别加上相位差互为 180° 的 SPWM 脉冲, 经过交流侧 LCL 滤除高频载波信号后, 向电网馈入与其同频同相的正弦波电流。其原理图如图 1 所示。

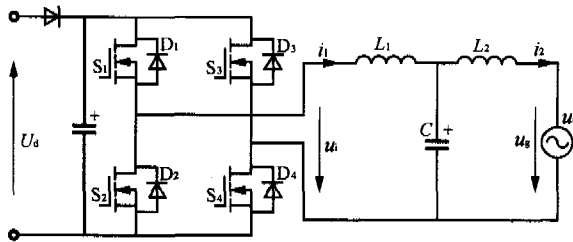


图 1 光伏并网逆变器原理图

2 光伏并网逆变器系统设计

2.1 TMS320LF2407 特点

TMS320LF2407 是美国 TI 公司推出的一种低价格、高性能的 16 位定点运算 DSP, 其性价比极高, 因其内部集成的 PWM 模块, 使其在电机控制、仪器仪表、电力电子、工业控制等领域得到了广泛应用^[2]。

TMS320LF2407 的主要性能有:

- (1) 晶振为 30 MHz 时的指令周期为 33 ns;
- (2) 可扩展的外部存储器总共为 192K;
- (3) 丰富的片内资源;
- (4) 有两个事件管理器模块 EVA 和 EVB, 每个含两个 16 位通用定时器和 8 个 16 位的 PWM 通道;
- (5) 强大的指令集;
- (6) 遵循 IEEE1149.1 标准的片内 JTAG 仿真逻辑。

2.2 系统结构

光伏并网逆变器的系统结构框图如图 2 所示。光伏并网逆变器主要由前级 DC/DC 直流升压电路和后级 DC/AC 逆变主电路两部分组成。通过 DCLink 相连接, DCLink 的电压为 400V。在本系统中, 太阳能电池板输出的额定直流电压的范围为

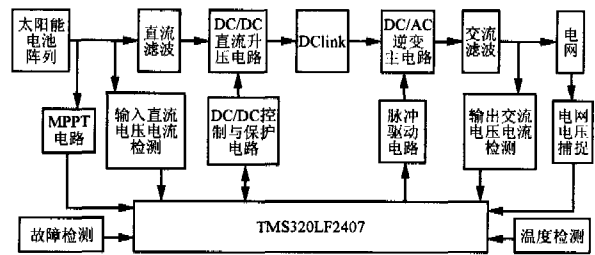


图 2 光伏并网逆变器系统结构框图

100~170 V, DC/DC 直流升压电路采用 Boost 结构, 后级 DC/AC 逆变主电路部分采用全桥逆变器, 控制电路的核心是数字信号控制器 TMS320LF2407 芯片, 其中 DC/DC 直流升压电路完成最大功率跟踪控制 (MPPT) 功能, DC/AC 逆变主电路维持 DCLink 中间电压稳定并将电能转换成 220 V/50 Hz 的正弦交流电。最终通过交流 LCL 滤波把与电网电压同频和同相的并网逆变器输出的正弦电流并入电网。

3 最大功率点跟踪控制(MPPT)

太阳能电池的最大功率点随着日照强度和表面温度的变化在不断变化, 因其存在一个最大功率点对应唯一的电池输出电压^[3], 故利用导纳微分法的太阳能电池输出功率对电压的微分在最大功率点始终为 0。通过调节太阳能电池的输出电压使其趋近最大功率点时的输出电压, 就可以实现最大功率点的跟踪。

具体的计算流程图如图 3 所示, 其中 $U_d(t_1)$ 和 $I_d(t_1)$ 分别表示太阳能电池的输出电压和电流前一周期采样值, $U_d(t_2)$ 和 $I_d(t_2)$ 分别为本次采样值。比较 dI_d/dU_d 和 I_d/U_d 的值判断出工作点在曲线的左、右哪侧, 从而对 U_{ref} 进行相应的调节。当 $dI_d/dU_d = -I_d/U_d$ 时, 说明已经工作在最大功率点了, 无须再调节 U_{ref} 。当系统在前一周已经工作在最大功率点时即 $dU_d=0$, 而光强变化时即 $dI_d \neq 0$, 系统要通过判断 dI_d 的符号来对 U_{ref} 进行相应的调节。

4 并网逆变器电流跟踪控制

在并网系统中, 电网电压可看作是稳定的电压源, 故并网时要求逆变器输出采用电流型控制方式^[4]。因通过电感的电流不能突变, 可采用电流反馈闭环控制的方法调节电流。将所要求的并网电流正弦波给定值与实际并网电流比较后得到的

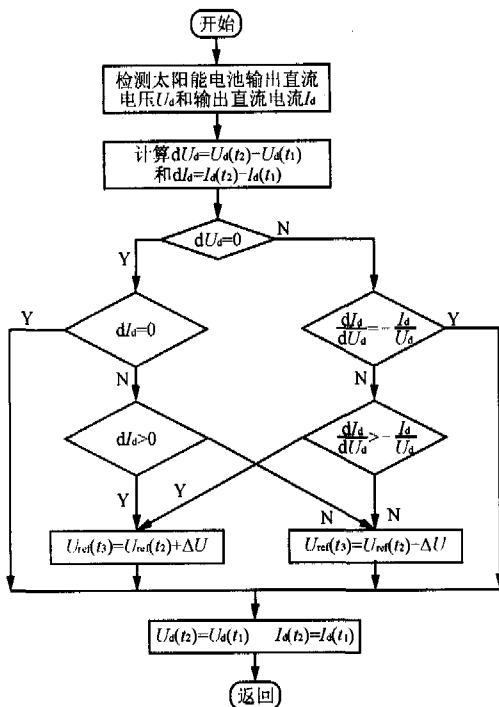


图3 MPPT的控制流程图

误差信号经过控制器处理后，产生相应的SPWM信号控制功率器件的导通与关断，实现并网电流波形是与电网电压同频同相的正弦波。图4是电流控制结构框图。

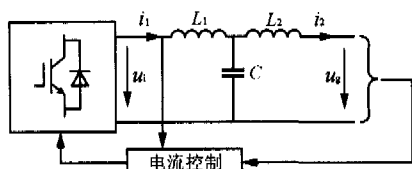


图4 电流控制结构框图

电流比例积分控制虽然可以改善系统的稳态性能，但由于给定电流是一个正弦波信号，不能消除系统的稳态误差。要实现并网电流无静差跟踪正弦波给定值，就要使其包含在稳定的闭环控制系统中，即把作用于系统外部信号的动力学模型移入控制器构成反馈控制系统，产生一个周期性的激励信号来消除给定输入信号或干扰引起的周期性误差。图5是零误差电流跟踪控制框图，其中E(s)是误差信号，i*(s)是并网给定电流信号，i1(s)是实际的并网电流，ω1是给定信号的频率。ug(s)是电网电压。

电流PI控制环节的传递函数为

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (1)$$

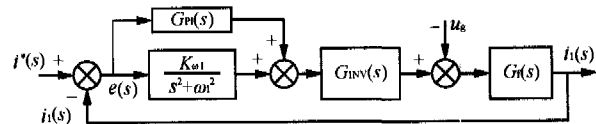


图5 零误差电流跟踪控制框图

式中：Kp为比例增益系数；

KI为积分增益系数。

滤波环节的传递函数为

$$G_g(s) = \frac{1}{L_1 L_2 C s^3 + L_1 s + L_2 s} \quad (2)$$

电流控制环节的传递函数为

$$G_{con}(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + \frac{K_{\omega 1}}{s^2 + \omega_1^2} \quad (3)$$

GINV(s)是逆变环节，SPWM控制方式下的桥式逆变环节可视为一个高增益的小惯性环节，即

$$G_{INV}(s) = \frac{K_{INV}}{T_s s + 1} \quad (4)$$

式中：KINV为逆变器放大倍数；

电网电压对系统输出的影响为

$$\frac{i_1(s)}{u_g(s)} = \frac{G_g(s)}{1 + G_{con}(s)G_{INV}(s)G_g(s)} \quad (5)$$

令 $s = j\omega_1$ ，则可得到：

$$\frac{i_1(j\omega_1)}{u_g(j\omega_1)} = 0$$

当输出信号频率在 $\omega_1 = 2\pi f$ 处，电流调节器的增益变得无穷大，促使受控逆变电源输出的稳态误差为零，即实现系统对正弦参考信号的零误差跟踪。上述并联结构控制，双环PI控制器的输入为电压误差信号和电感电流信号，PI控制器的输出和重复控制器的输出叠加后经过三角波调制，产生逆变桥的驱动脉冲信号。当系统处于稳态时，重复控制器起主要的调节作用，使稳态下的输出电压可以很好地跟踪参考正弦波。当系统出现较大的瞬态干扰时，双环PI控制会起到较大的作用，它控制输出电压，使输出跟踪误差迅速减小。

5 软件设计

基于DSP的硬件设计，给出系统软件设计的程序流程图。该系统程序主要由主程序、PWM中断子程序和捕获中断子程序组成。主程序主要完成特殊寄存器以及外部事件管理器中寄存器的初始化，并对变量和常量进行定义，在主循环里完成

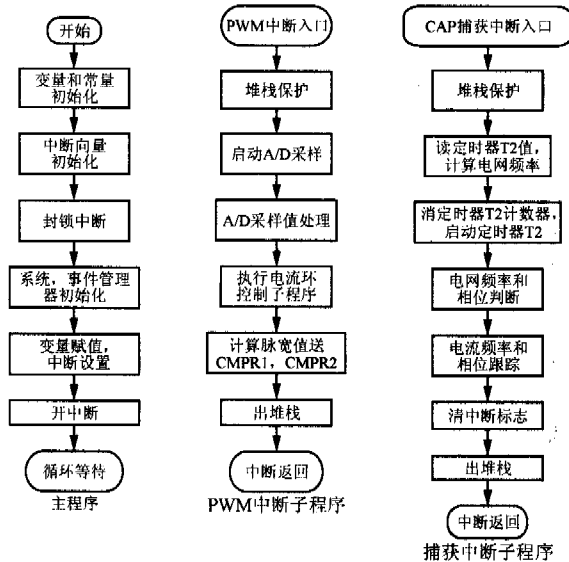


图6 主程序、PWM 中断子程序和捕获中断子程序

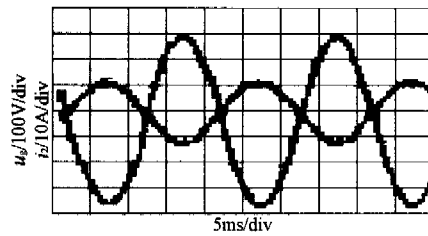
多个非中断的功能,一旦中断来临,程序就跳到相应的中断服务子程序;即主要完成系统的启动、监控、故障检测保护,最大功率点跟踪及通信等功能;PWM 中断子程序主要实现并网逆变电流环调节,A/D 检测及 SPWM 波的输出功能;捕获中断子程序的主要功能是实现并网逆变电流同频、同相跟踪电网电压。

6 实验结果分析

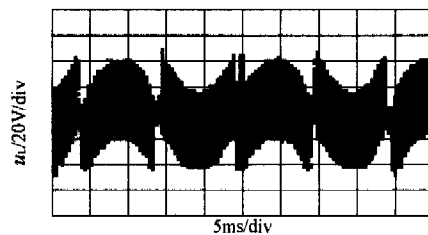
设计了以 TMS320LF2407 为控制核心的单相并网逆变器试验样机,样机参数设计为:逆变器输出功率 2 kVA,直流母线输入电压 400 V,输出交流电压有效值 220 V/50 Hz。图 7 示出了电网电压与并网电流波形(便于观看,并网电流与电网电压反相)及交流侧电感电压波形。可见逆变器输出功率因数接近 1,并网电流顺利跟踪了电网电压,谐波含量小,系统具有较好工作稳定性,动态响应快,工作效率高。

7 结语

基于 TMS320LF2407 的电压源输入、电流输出控制的光伏并网逆变电源,其输出功率因数接近 1。该系统结构的选择避免了工频变压器的使用,缩小了装置的体积,经过交流滤波后直接并入电网。它采用 TMS320LF2407 数字信号控制器作为主要控制芯片,该控制芯片提供了功能强大的控制功能,其事件管理器模块可以很方便地通过软



(a) 电网电压与并网电流波形



(b) 交流侧电感电压波形

图7 并网逆变器波形

件编程实现对外围设备进行控制。该系统具有很好的动态响应并利用先进的 MPPT 控制方式,具有跟踪光伏电池最大功率点的功能,提高了系统效率。采用数字化 SPWM 控制方式,实现自动同步并网,减小了谐波含量对电网干扰,把太阳能电池的直流电高效率转换为 50 Hz 的正弦交流电馈入电网,最终提高了系统的响应速度,降低了成本,减少了功耗,简化了硬件电路,得到稳定可靠的波形。

参考文献

- [1] Mario Cucumo, Alessandro De Rosa, Vittorio Ferraro, *et al.* Performance Analysis of a 3kW Grid-connected Photovoltaic Plant [J]. *Renewable Energy*, 2006, 31 (8): 1129-1138.
- [2] 刘和平, 严利平, 张学锋, 等. TMS320LF240X DSP 结构、原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
- [3] Noguchi T, Togashi S, Nakamoto R. Short-current Pulse-based Maximum Power Point Tracking Method for Multiple Photovoltaic and Converter Module System[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2002, 49(1): 217-223.
- [4] Zmood D N, Holmes D G. Stationary Frame Current Regulation of PWM Inverters with Zero Steady-State Error[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2003, 18(3): 814-822.

作者简介

原慧军(1980-),男,硕士研究生,从事光伏并网逆变电源研究。