

## 小功率光伏并网逆变控制系统的实现方式

张侃瑜, 张晓菊

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

**摘要:** 分析光伏并网系统的原理及结构, 系统 DC/DC 环节由 SG3525 控制, 使其输出电压稳定。而交/直流 (DC/AC) 逆变器由单片机 87C196MC 对并网电流进行实时跟踪控制, 采用双闭环控制方案实现与电网电压的同步。同时控制中加入了前馈控制, 并对并网电流进行估算, 以优化输出电流波形。给出系统并网电流跟踪控制的软件实现流程图。实验结果表明, 并网电流波形较好。

**关键词:** 光伏并网系统; 变换器; 逆变器; 双闭环控制

**中图分类号:** TM941

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1004-9649(2007)09-0042-04

## 0 引言

光伏并网发电是太阳能利用的一种形式, 它将光伏电池组件转换的直流电经逆变器逆变后向电网输送能量, 在一定程度上能缓解能源紧张的问题。目前我国的光伏产业还处于起步阶段, 还有很多问题需要解决。我国政府也高度重视光伏并网发电, 并逐步推广屋顶计划。太阳能光伏并网发电正在由补充能源向替代能源迈进。

## 1 并网系统原理与结构

光伏并网发电系统主要包括几大部分: 光伏阵列、升压变换器、带保护装置的逆变器和控制器。本

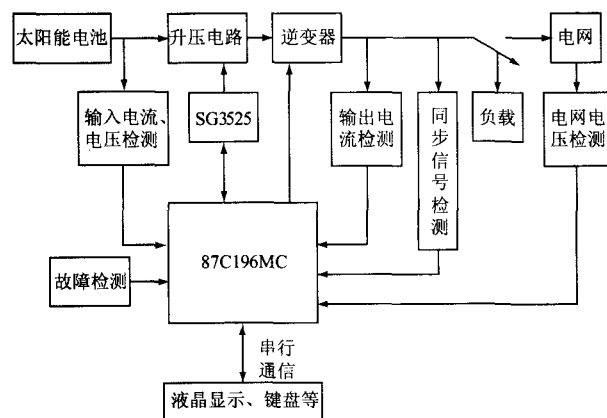


图1 并网系统整体结构

Fig.1 Structure of the whole grid-connecting system.

论文并网系统的整体结构框图如图1所示。

该系统太阳能电池阵列由12块110W的电池组件串联而成, 输出额定电压为150V, 将太阳辐射直接转化成直流电, 经过交/直流 (DC/DC) 变换器转变为300V的直流电, 再经DC/AC逆变器变成220V、50Hz与电网同频同相的交流电。DC/DC变换器完成升压的同时实现太阳能电池最大功率点跟踪的功能, 提高光伏能源的转化效率<sup>[1]</sup>。DC/AC逆变器将升压后的直流电压转化成与电网同频同相的电流输出, 同时在逆变器或电力系统发生故障时, 逆变器内置保护装置会及时启动, 将逆变器从电网中断开。

## 1.1 DC/DC变换器及控制方案

文献[2]中DC/DC变换器控制电路是以集成电路SG3525为核心, 是一种频率固定的单片集成脉宽调制型控制器, 它输出2路驱动信号, 经门极驱动电路加在升压电路开关管的门极上<sup>[2]</sup>。本文利用SG3525输出频率较高的优势, 用87C196MC内部事件处理阵列 (EPA) 产生的频率较低的脉宽调制 (PWM) 波形来控制SG3525产生实际的开关管驱动波形。为保持DC/DC变换器输出电压的稳定, 将检测到的输出电压与最大功率跟踪得到的电压进行比较, 该误差电压经比例积分 (PI) 调节后控制SG3525输出驱动信号的占空比。该控制电路还具有限制输出过流过压的保护功能。当检测到DC/DC变换器输出电流过大时, SG3525将减小门极脉冲的宽度, 降低输出电压; 当输出电压过高时, 会停止DC/DC变换器的工作。同时将这些故障综合成一个信号, 送至主控制单元, 用于封锁逆变单元SPWM控制信号输出。

收稿日期: 2007-06-07

作者简介: 张侃瑜(1952-), 男, 上海人, 教授, 博士生导师, 从事计算机自动控制和太阳能光伏并网控制的研究。

E-mail: chrysorange@163.com

### 1.2 并网电流同步控制方案

逆变器控制是光伏并网系统的重点和难点,其负载为电网,是一个可看成容量无穷大的交流电压源。这里逆变器输出采用电流控制方式,文献[3]说明了该方式的优势,它无需控制其幅值,只需要控制其频率和相位,这样可以减少一个控制变量,简化控制。为了使逆变器产生电流与电网电压同步,必须对电流进行实时跟踪控制。

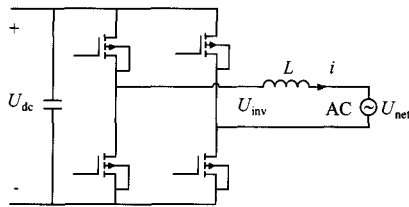


图 2 单相并网结构

Fig.2 Structure of grid-connecting system in single-phase

取并网电流为状态变量,可以得到:

$$L \frac{di}{dt} = U_{inv} - U_{net} - iR \quad (1)$$

式中:  $R$  为电路等效电阻。

其频域形式为:

$$I(s) = \frac{1}{Ls + R} [U_{inv}(s) - U_{net}(s)] \quad (2)$$

忽略功率开关死区时间的非线性影响,正弦脉宽调制(SPWM)控制方式的逆变环节可以看成是一个惯性环节,其传递函数为:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad (3)$$

对逆变器采用 PI 调节进行闭环控制(见图 3)。

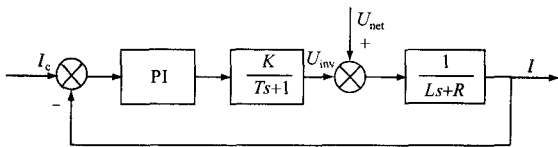


图 3 电流跟踪反馈控制原理

Fig.3 Feedback control schematic of current tracking

前向通道电网电压对并网电流产生了较大影响,使其波形发生畸变。为了抑制这个扰动,加入前馈控制,其补偿函数为:

$$G_c(s) = \frac{1}{G(s)} = \frac{Ts + 1}{K} \quad (4)$$

前馈控制信号使系统在没有反馈的情况下,产生一个输出去抵消电网电压扰动的影响,获得比较理想的正弦并网电流。

### 1.3 并网输出电流重构

由于主控制芯片采用 87C196MC 单片机,此次波形发生器中断(WG-INT)产生的控制脉冲要到下

次中断时才会起作用,这样就引入了滞后量,同时电路中 RC 滤波电路,同样使结果产生误差。这相当于在控制系统中增加了一个纯滞后环节,给系统响应带来了不良影响,反映在系统特性中会造成电流谐波加大、系统稳定性降低及超调增加等问题<sup>[4]</sup>。为解决上述问题,必须在软件处理上加入电流预估环节,补偿滞后所带来的不良影响。本系统预测采用 1/2 采样周期的计算方法,在 WG-INT 中断服务中对并网电流测取 2 次采样值,并从可擦除可编程只读存储器(EPROM)中取出前几次采样值,预估出下一次 A/D 采样值。

根据  $I(t_{n+1})=I(t_n+\Delta t)$  的泰勒展开式,

$$I(t_n + \Delta t) = I(t_n) + I'(t_n) \times \Delta t + \frac{1}{2} I''(t_n) \times \Delta t^2 + \frac{1}{6} I'''(t_n) \times \Delta t^3 + O(\Delta t^4) \quad (5)$$

并对展开式(5)进行线性简化可得到预测公式:

$$I(t_{n+1}) = I(t_n) + \frac{1}{6} [I(t_n) - I(t_{n-3})] + \frac{13}{16} [I(t_n) - I(t_{n-1})] + \frac{3}{16} [I(t_{n-2}) - I(t_{n-3})] \quad (6)$$

根据当前采样值以及前 3 次采样值即可由预测公式计算出下次载波周期的并网电流的值。采用这种方案使得系统动态响应和稳定性都具有良好的性能,可以克服由于电网电压的谐波、毛刺以及其他干扰因素等带来的系统不稳定。

系统逆变部分加了前馈控制和预测控制算法后,是一个双闭环控制方案,内环为电流跟踪环,包括电压同步环节、交流电压和电流检测环节及 PWM 调制环节等。将与电网电压同步的从 EPROM 中取出的离散正弦表值,与反馈的实际并网电流瞬时值进行比较,差值经过比例积分调节后与引入的电网电压值相加后,输出经三角波调制后,输出正弦波脉宽调制信号。内环控制对并网电流进行实时控制,实现相位跟踪。外环控制的主要目的是消除内环控制存在的相位误差,同时控制其幅值,使太阳能电池组件工作在最大功率点。将最大功率跟踪控制输出得到的最佳工作电压,与太阳能电池实际的工作电压相比较后,其误差经过 PI 调节,产生辅助参考电流,它与由内环产生的主参考电流相加。这样可以抑制稳态误差,改善 SPWM 电流跟踪控制的性能。

## 2 软件实现

为保证并网电流与电网电压严格同步,必须使用锁相环技术。本文采用软件锁相算法,具体做法是由输入信号硬件采样和锁相软件配合实现。通过电压传感器检测电网电压信号,经过过零比较电路后,

送入单片机的捕获口,捕捉其上升沿,则 2 个上升沿之间的时间间隔即为电网电压周期<sup>[5]</sup>。同样,通过电流传感器检测并网电流信号,经过过零比较送入捕获口,并计算出 2 次捕获的时间间隔,即为并网电流的周期值。比较 2 个周期值,并做相应的调整。假设在 3 个中断周期内实现同步,图 4 是同步的实现过程。

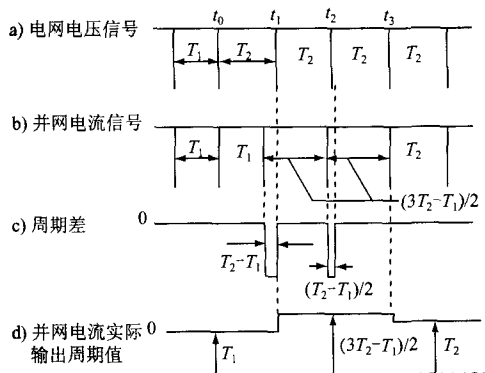


图 4 同步示意

Fig.4 Synchronization sketch map

假设电网电压周期在  $t_0$  时刻由  $T_1$  变化到  $T_2$ , 系统可能在 1 个周期后即  $t_1$  时刻才检测到变化,并开始跟踪。假定并网电流在 3 个中断周期内实现同步,则下 2 个周期内并网电流周期的变化量应为  $(3T_2-T_1)/2$ , 这样在  $t_3$  时刻实现同步。图 4 d) 反映的是锁相调节器最终输出的信号波形,即并网电流实际输出周期,它是通过补偿图 4 c) 表示的调整量后得到的。如果电网电压周期变化比较大,则可以适当增加跟踪周期,以避免系统过大变化带来的不稳定。

本系统软件功能包括:各设定量和实时量的测取、同步电压的测定、内外环调节器的调节、PWM 模式发生及控制脉冲产生等功能。根据功能的不同,系统软件分为主循环程序和中断服务程序 2 部分。主程序适于处理实时性要求低的功能,如对系统进行初始化、给波形发生器重新装载(WG-RELOAD)寄存器设置一个初始值等,当其定时时间到时,响应波形发生器中断。中断服务程序为 WG-INT 中断程序,主要实现对并网输出电流的跟踪控制,包括前馈控制计算和并网电流预测计算,最后产生 SPWM 脉冲(见图 5)。

系统主要参数配置及试验结果指标如表 1 所示。

系统试验结果如图 6 所示,并网电流不仅与电网电压同步,而且进线电流实现了正弦化,谐波含量小。

本算法使得系统在 6 个周期即 120 ms 内,电流能够比较平稳地跟踪电网的电压。

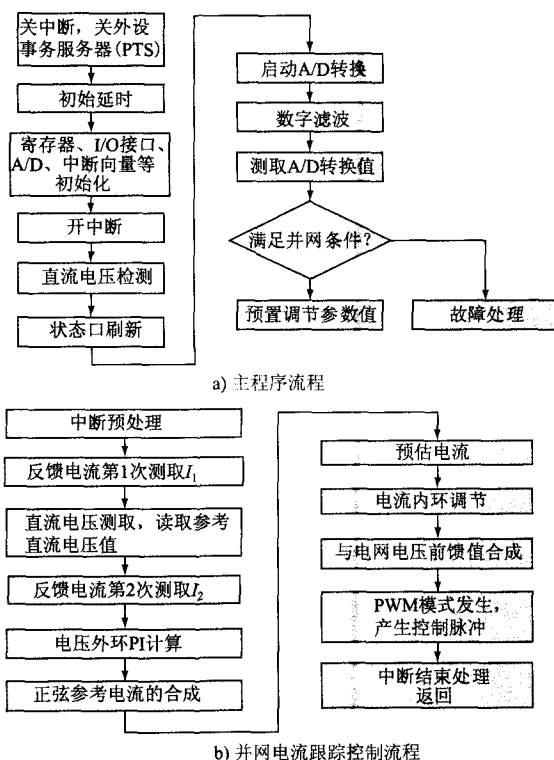


图 5 主程序流程和并网电流跟踪控制

Fig.5 Flow chart of main program and tracking control program of the grid-connecting current

表 1 系统参数配置及试验结果指标

Tab. 1 System parameters and test results

参数	数值
进线电压/V	150
输出直流电压/V	300
输出功率/W	1 320
进线电感/mL	1
直流储能电容/ $\mu$ F	470
开关频率/kHz	10
系统效率/%	92
逆变输出的总谐波失真(THD)/%	<5

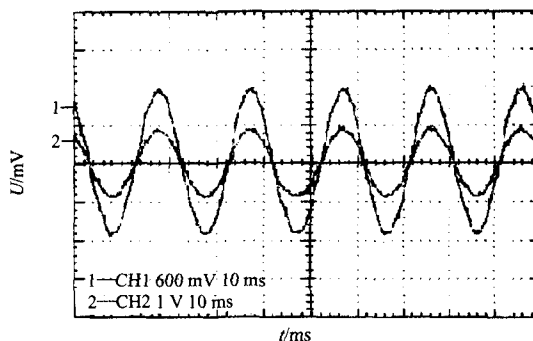


图 6 电网电压波形与并网电流转换为电压形式的波形  
Fig.6 Waveforms of grid voltage and connecting current in voltage form

### 3 结语

本文阐述了整个并网系统的结构框图,并详细分析了升压和逆变2个部分中的关键设计。升压变频器控制部分的设计使得输出电压稳定,减少了逆变器保护电路误动作的发生。逆变器中电流重构算法及跟踪控制方案使其比较好地与电网电压同步。

### 参考文献:

- [1] 孙本新. 太阳能光伏发电并网逆变装置[D]. 大连:大连理工大学,2002.  
SUN Ben-xin. Inverter applications of solar photovoltaic generation grid system [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2002.
- [2] 李进国,金新民. 小功率光伏并网逆变器控制系统的设计[J]. 北方交通大学学报,2003,27(2):57-61.
- [3] LI Jin-guo, JIN Xin-min. Design for control system of a low-power photovoltaic inverter interconnected with electric utility lines [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2003,27(2):57-61.
- [4] PEI Xue-jun, LIN Xin-chun. Analysis and design of the DSP-based fully digital-controlled UPS [J]. IEEE Power Electronics and Drive Systems, 2001,1(10):296-300.
- [5] 赵为,余世杰,沈玉梁,等. 基于TMS320F240芯片的光伏并网发电系统的控制方法[J]. 继电器,2002,30(7):31-33.  
ZHAO Wei, YU Shi-jie, SHEN Yu-liang, et al. The control way in the grid-connected PV system based on the DSP(TMS320F240)[J]. Relay, 2002, 30(7):31-33.
- [6] 孙涵芳. Intel 16位单片机[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2002.
- [7] SUN Han-fang. Intel 16-bit micro-controller [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2002.

(责任编辑 李新捷)

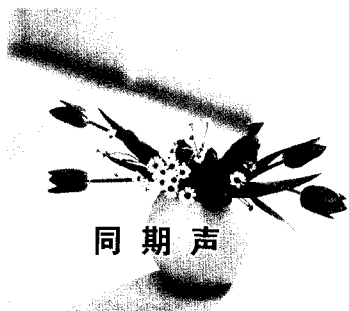
## Realization of low power PV grid-connected control systems

ZHANG Kan-yu, ZHANG Xiao-ju

(Mechanical & Electronic Engineering and Automation Dept., Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** The operation principle and structure of a photovoltaic grid-connected system were presented. The DC/DC converter is controlled by SG3525 to keep the output voltage steady. While the DC/AC inverter is controlled by micro-controller 87C196MC. The inverter output current is tracked, in real-time, by utilizing double closed-loop control scheme to have the same frequency and phase with utility grid voltage. Meanwhile, feed forward and forecast controls were adopted to optimize the output current waveform. Finally, the flow chart of the trace process of the inverter current was given in this paper. The result shows that the wave of grid-connected is good.

**Key words:** PV grid-connection; converter; inverter; double closed-loop control



同期声

## 《电力系统负荷预测》出版发行

在电力科技专著出版基金的资助下,由清华大学电机系康重庆、

夏清、刘梅撰写的《电力系统负荷预测》一书,2007年7月由中国电力出版社出版。该书是清华大学电机系近10余年以来在负荷预测方面研究成果的总结,主要探讨电力系统负荷预测的概念、原理、模型、方法及其应用效果,并着重分析了做好负荷预测工作的理念和各种理论与方法的应用方式。全书分为负荷预测总论、中长期负荷预测、短期负荷预测3篇,共20章,44万字,可供电力规划、计划、调度、市场交易、营销(用电)等专业技术人员和管理人员、高等院校有关专业教师、研究生和高年级本科生阅读参考。

作者联系方式:cqkang@tsinghua.edu.cn。

订购该书可联系:

责任编辑:王春娟

电话:010-63416215

E-mail:wang\_chunjuan@cepp.com.cn

