

# 基于 DSP 的单级式光伏并网逆变器研究

李 琮, 杨志坚

(山东大学, 电气工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要:**提出一种适用于单级式光伏并网逆变系统的设计方案。通过理论推导、仿真拟合和实验测试,分析了单级能量变换理论,采用含有功率前馈与电压前馈环节的并网电流控制策略,完成了对光伏电池的增量电导法 MPPT 控制。孤岛效应检测采用了基于电网非特征次谐波阻抗的主被动相结合的检测方法。并在此基础上以 TMS320F2808 和 IPM 为硬件核心,研制出了 5 kW 实用化的产品样机,具有良好的性能。

**关键词:**逆变器; 光伏并网; 孤岛效应

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2011)01-0036-03

## Research of the Single-stage Photovoltaic Grid-connected Inverter Based on DSP

LI Cong, YANG Zhi-jian

(Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** A design project of the single-stage photovoltaic grid-connected inverter is introduced. The theory of single stage energy transformation is analyzed based on theory deduction, emulate affirmation and trial adjustment methods. The control strategy of grid-connected current include power feedforward and voltage feedforward control, the incremental conductance algorithm MPPT control of photovoltaic cell is accomplished. The islanding effect is detected by the active and passive detect methods based on the test of grid impedance, then, focus on TMS320F2808 and IPM, the 5 kW practical product prototype is developed successfully and the performs satisfactorily.

**Keywords:** inverter; photovoltaic grid-connected; islanding effect

### 1 引言

自 2000 年以来,并网光伏发电年平均增长率超过 60%,是可再生能源技术中增长最快的技术。太阳能发电作为一种新的电能生产方式,以其无污染、安全、资源丰富、分布广泛等特点显示出广阔的发展空间和应用前景。但与此同时,由于并网逆变系统涉及诸多关键技术,控制系统较复杂,控制难度较大,国内目前研究和应用还不成熟,因此对并网逆变电源及其控制技术的研究成为了当前一个重要的研究领域和发展方向。这里通过分析原理,提出一种适用于单级式光伏并网逆变系统的设计方案,并研制出 5 kW 实用化的产品样机,实验结果显示其具有良好的动态和静态响应。

### 2 单级能量变换的理论分析

目前并网型逆变器的研究主要集中于 DC/DC

和 DC/AC 两级能量变换结构。由于 DC/DC 变换环节和 DC/AC<sup>[1]</sup>逆变环节具有独立的控制目标和手段,因此系统的控制环节比较容易设计和实现,可具有比较宽的电压输入范围;设置最大功率跟踪环节可使逆变环节的输入相对稳定,且输入的电压较高,这样均有利于提高逆变环节的转换效率。然而,由于系统具有两个独立的能量变换环节,故整个系统的效率低、体积大、造价高。

在此设计了并网光伏发电系统用单级并网型逆变器,可通过一级能量变换实现最大功率跟踪和并网逆变两个功能,这样可提高系统的效率、减小系统的体积和重量、降低系统的造价,从而可减少并网光伏发电系统的造价,有利于并网光伏发电系统的推广。

单级式并网光伏能量变换环节的结构如图 1 所示。假设滤波电感、滤波电容、逆变电路损耗以及滤波电感的等效串联电阻忽略不计。光伏阵列向本地负载和电网供电为:

$$P = P_1 + P_s = P_1 + \frac{U_{sm} I_{sm}}{2} \cos \theta \quad (1)$$

式中:  $P$  为光伏阵列的输出功率;  $P_1$  为负载消耗的功率;  $P_s$

定稿日期: 2010-06-25

作者简介: 李 琮 (1985-), 男, 山东济南人, 硕士, 研究方向为光伏并网发电技术。

为向电网输出的功率;  $U_{sm}$  为电网电压  $u_s$  的幅值;  $I_{sm}$  为并网电流  $i_s$  的幅值;  $\theta$  为  $u_s$  与  $i_s$  之间的相位差。

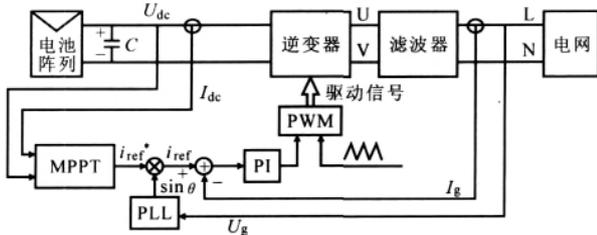


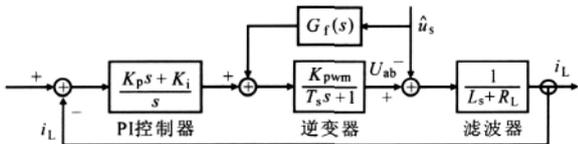
图 1 单级能量变换框图

假设  $P_1$  和  $U_{sm}$  不变, 由式(1)可知,  $i_s$  可被调制成正弦波且与  $u_s$  同相, 因此系统的功率因数近似为 -1; 同时由式(1)还可知, 通过调制  $I_{sm}$  可控制  $P$ , 故单级能量变换能实现最大功率跟踪功能。

### 3 单级逆变器的控制系统设计

图 2 示出 SPWM 并网逆变电流控制方式的控制系统框图。PI 控制器的传递函数  $G_{pi}(s) = (K_p s + K_i) / s$ 。由图 2 可见, 不考虑电压前馈时, 在  $i_{ref}$  和电网电压扰动  $\hat{u}_s$  共同控制作用下,  $i_L$  的传递函数为:

$$i_L(s) = \frac{\frac{K_{pwm}}{T_s s + 1} (K_p s + K_i)}{s^2 L + \left( R + \frac{K_{pwm}}{T_s s + 1} K_p \right) s + \frac{K_{pwm}}{T_s s + 1} K_i} i_{ref}(s) - \frac{s}{s^2 L + \left( R + \frac{K_{pwm}}{T_s s + 1} K_p \right) s + \frac{K_{pwm}}{T_s s + 1} K_i} u_s(s) \quad (2)$$



$i_{ref}$  为电流给定信号;  $i_L$  为实际并网电流

图 2 电网电压前馈控制框图

由于逆变器工作频率一般约为 10 kHz, 远高于电网频率, 为便于分析, 忽略开关延迟后, 将逆变器传递函数简化为:  $G_1(s) = K_{PWM}$ , 则式(2)为:

$$i_L(s) = \frac{K_{pwm} (K_p s + K_i)}{s^2 L + (R + K_{pwm} K_p) s + K_{pwm} K_i} i_{ref}(s) - \frac{s}{s^2 L + (R + K_{pwm} K_p) s + K_{pwm} K_i} u_s(s) \quad (3)$$

由式(3)可见, 由  $u_s$  造成  $i_s$  的误差量为:

$$\Delta i_L(s) = \frac{s}{s^2 L + (R + K_{pwm} K_p) s + K_{pwm} K_i} u_s(s) \quad (4)$$

由上式可知, 随着频率升高,  $i_s$  对  $u_s$  的增益逐渐增大, 由于  $u_s$  也含有一定量的高次谐波, 故  $i_s$  会受到这些谐波影响而导致谐波畸变率升高, 为消除  $u_s$  对  $i_s$  的影响, 可考虑加入电压前馈补偿。

由图 2 可知此时  $u_s$  对  $i_s$  的影响为:

$$\Delta i_L(s) = \frac{s[1 + K_{pwm} G_f(s)]}{s^2 L + (R + K_{pwm} K_p) s + K_{pwm} K_i} u_s(s) \quad (5)$$

若令  $G_f(s) = -1/K_{pwm}$ , 则有  $\Delta i_L(s) = 0$ , 由此可见, 通过电压前馈补偿控制, 可以使  $u_s$  对于  $i_s$  的影响减小到零, 即实现了理论的全补偿。

单级式光伏逆变系统由于没有前级 DC/DC 调节电路, 故需通过对输入功率  $P_{pv}$  进行控制以弥补前级 DC/DC 电路缺失所带来的影响。设计采用新型基于功率前馈控制的输入输出功率控制方法<sup>[2]</sup>, 其控制框图如图 3 所示。

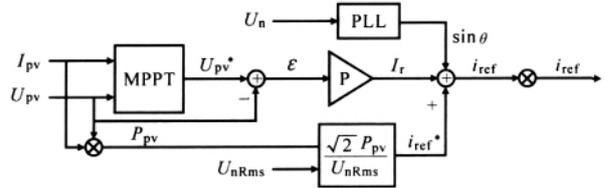


图 3 功率前馈的控制框图

$P_{pv}$  控制为逆变器并网的电流控制提供基准电流幅值  $i_{ref}$ , 由两部分组成: 主要部分由  $P_{pv}$  与网侧电压的均方根值依据  $i_{ref}^* = \sqrt{2} P_{pv} / U_{nms}$  算出;  $i_{ref}$  的校正值得由基于 MPPT 模块与比例环节构成的直流电压控制器产生。图 4 示出 Matlab/Simulink 对整个控制系统的仿真结果。

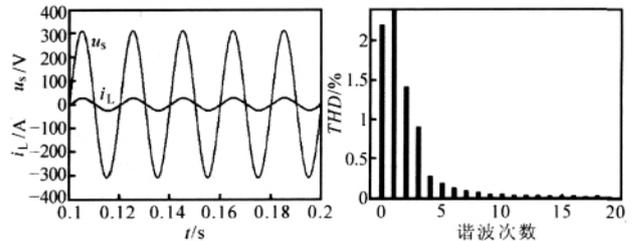


图 4 输出电压电流波形以及谐波分析

### 4 孤岛检测

太阳能光伏并网逆变器孤岛检测方案最终采用被动式与主动式<sup>[3]</sup>两种检测方式相结合的方案, 这样可将检测盲区降到最低, 达到孤岛检测的标准。整个程序流程如图 5 所示。

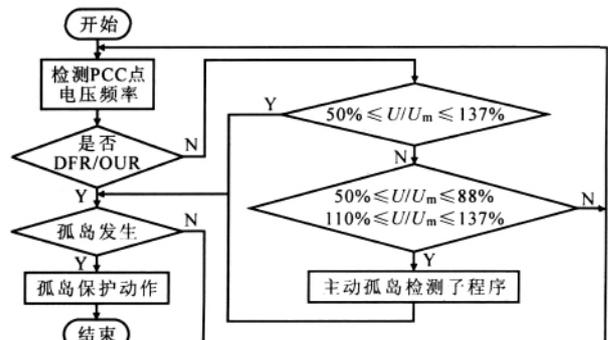


图 5 主动式和被动式相结合孤岛检测子程序流程

在基于谐波注入的电网阻抗检测法中, 向  $i_s$  中注入非特征频率谐波电流, 在仿真分析中, 取注入谐波电流频率  $f=75\text{ Hz}$ , 由于谐波电流的注入, 使得逆变器并网电流产生了扰动, 为了避免添加谐波的扰动产生谐波污染, 对电网质量产生不良影响, 故在实际应用中也可选择周期性注入谐波电流的方式来减小对电网质量的影响, 这里选择每 13 个周期注入 2 个周期谐波的方式, 输出电流如图 6a 所示。在正常并网情况下, 电网对于 75 Hz 的谐波阻抗会很小。当孤岛发生后, 逆变器输出电流完全流入本地负载支路, 因此非特征次谐波的阻抗与孤岛发生前相比会产生跃升, 如图 6b 所示。此时并网处所反映出的电网阻抗的突变信号就可作为孤岛发生时的触发信号。

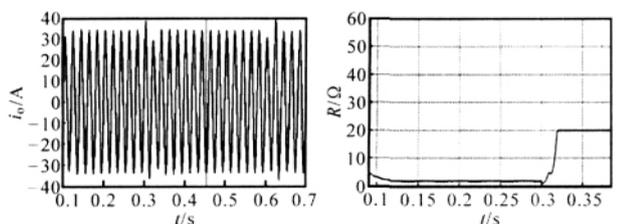


图 6 逆变器输出电流和电网阻抗

## 5 最大功率点跟踪 (MPPT)

逆变器设计的 MPPT 通过增量电导法实现<sup>[4]</sup>。该方法通过比较光伏阵列的电导增量和瞬时电导来改变控制信号。该跟踪法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, 其电压晃动较功率扰动观察法小; 且电导增量法控制精确, 响应速度快, 适用于大气条件变化较快的场合。图 7 示出程序流程。

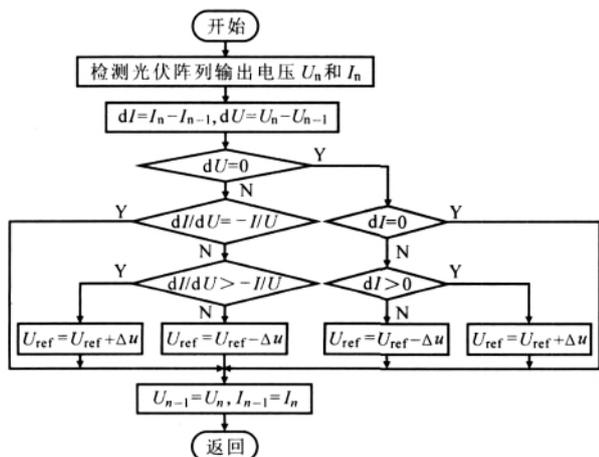


图 7 电导增量法的控制子程序流程图

## 6 硬件电路和实验结果

基于软件仿真, 搭建了以 TMS320F2808 和

IGBT-IPM PM50B4LA060 为核心的硬件实验电路。通过理论计算得出主电路各元件参数, 直流侧电容采用  $1\ 000\ \mu\text{F}$  电容 2 串 6 并形式, 输出滤波电感采用  $1.5\ \text{mH}$ 。整个硬件电路如图 8 所示。

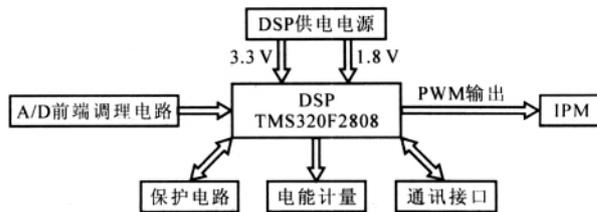


图 8 硬件电路框图

实验达到了预期设计目标。完成了对逆变器的数字控制及外围保护、通讯、显示等功能的设计, 取得了良好效果。图 9 示出并网电压电流波形。可见电流失真较小, 功率因数得到有效控制。

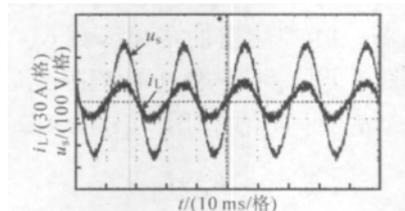


图 9 实验波形

## 7 结论

提出一种适用于单级式光伏并网逆变系统的设计方案。采用了含有功率前馈与电压前馈环节的并网电流控制策略, 完成了对光伏电池的最大功率点跟踪控制以及孤岛效应检测, 大幅简化了电路结构, 实现了对高效并网逆变器的数字控制。并在此基础上以 TMS320F2808 和 IPM 为核心, 研制出  $5\ \text{kW}$  实用化的产品样机, 具有良好的性能, 为单级式光伏并网逆变器的实现提供了一种切实可行的设计方案。

## 参考文献

- [1] 杨金焕, 于化丛, 葛亮. 太阳能光伏发电应用技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [2] Mihai Ciobotaru, Remus Teodorescu, Frede Blaabjerg. Control of Single-stage Single-phase PV Inverter[A]. Power Electronics and Applications[C]. Dresden, 2005: 1-10.
- [3] Lucian Asiminoaei, Remus Teodorescu, Frede Blaabjerg, et al. A Digital Controlled PV-inverter With Grid Impedance Estimation for ENS Detection[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2005, 20(6): 1480-1489.
- [4] 王飞. 单相光伏并网系统的分析与研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2005.