

# 单相光伏并网逆变器固定滞环的电流控制

戴训江, 晁勤

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830008)

**摘要:** 并网型逆变器是太阳能光伏并网发电的关键部件, 以 Matlab/Simulink 为仿真平台, 建立光伏模块和最大功率跟踪控制器的数学模型和仿真模块, 分析光伏模块的电气特性, 实现最大功率点的动态跟踪, 提出集成式光伏模块和最大功率跟踪控制的并网逆变器系统模型和电流滞环跟踪控制的数学模型和控制策略, 仿真结果验证光伏模块数学模型和最大功率跟踪算法的有效性, 对光伏并网逆变器受外界环境变化影响的动态响应进行了仿真, 表明电流滞环跟踪控制应用于光伏并网逆变器能改善注入电网电流的品质, 使电网功率因数为 1。

**关键词:** 光伏; 最大功率跟踪; 并网逆变器; 滞环控制; 仿真

## Current control of constant hysteresis band for single phase photovoltaic grid-connected inverter

DAI Xun-jiang, CHAO Qin

(Electrical Engineering College, Xinjiang University, Urumqi 830008, China)

**Abstract:** grid-connected inverter is a key electrical element for solar photovoltaic grid-connected electricity generation. Based on the simulation platform of Matlab/simulink, the mathematical models and simulation modules of photovoltaic array and MPPT(maximum power point tracking) are built in this paper, the electrical characteristic of photovoltaic module is studied and the maximum power point dynamic tracking is accomplished as well, in addition, the grid-connected inverter system models with the integration of photovoltaic module and MPPT controller and the scheme of current hysteresis band control are presented. The simulation result indicates that the photovoltaic mathematical model and the algorithm of MPPT are valid, the dynamic response of grid-connected inverter which affected by climate condition change is simulated, which reveals the current hysteresis band control scheme applied in the photovoltaic grid-connected inverter can improve the grid's power quality, with the result of unity of power factor for power grid.

**Key words:** photovoltaic; MPPT; grid-connected inverter; hysteresis band control; simulation

中图分类号: TK514 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)20-0012-06

## 0 引言

太阳能光伏发电是最有发展前景的可再生能源技术之一, 是当今光伏电源应用的主要研究领域, 并网型逆变器是研究的核心和关键部件。在光伏并网系统的设计中, 对系统状态和运行模式进行仿真研究, 将有助于分析系统的动态行为。本文首先建立光伏模块的数学模型, 光伏模块电气参数是环境条件如温度和光照强度的函数, 光伏模块的输出电压和电流受环境温度、太阳辐射强度和负载变化的影响, 因此, 并网逆变器的运行特性和动态响应也需要考虑温度和光照强度变化的影响。文献[1]将逆变器直流输入部分等效为直流电源, 将无法反映逆

变器随外界环境变化的输出响应特性, 我们的研究表明光伏模块的电气特性对逆变器特别是并网型逆变器输出特性的影响非常大, 如果控制策略不当, 逆变器输出的电流将发生畸变, 在外界环境突然急剧变化时, 可能引起并网逆变器与电网解列。

本文研究的并网逆变器系统拓扑结构为光伏模块组成的串并联阵列, 单相全桥 PWM 逆变器, 三阶 T 形滤波, 无并网变压器和低压电网, 在 Matlab/Simulink 的仿真平台上对逆变器并网系统进行仿真, 结果表明光伏发电能为电网提供最大功率, 在固定滞环宽度的电流跟踪控制系统的作用下, 并网逆变器输出的正弦电流与电网电压同相, 功率因数为 1。

## 1 系统建模

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (50667002); 新疆大学青年科研基金启动项目 (QN070136)

### 1.1 光伏阵列建模

光伏阵列模块(Photovoltaic Array-PVA)的数学模型<sup>[2-4]</sup>用于描述电气参数电压, 电流和功率的特性曲线: P-V 曲线, I-V 曲线。

$$I_{\text{ref}} = I_{\text{sc}} \left\{ 1 - k_1 \cdot \left[ \exp\left(\frac{V_{\text{ref}}}{k_2 \cdot V_{\text{oc}}}\right) - 1 \right] \right\} \quad (1)$$

其中:

$$k_1 = \left(1 - \frac{I_{\text{mp}}}{I_{\text{sc}}}\right) \cdot \exp\left(\frac{-V_{\text{mp}}}{k_2 \cdot V_{\text{oc}}}\right) \quad k_2 = \frac{\left(\frac{V_{\text{mp}}}{V_{\text{oc}}} - 1\right)}{\ln\left(1 - \frac{I_{\text{mp}}}{I_{\text{sc}}}\right)}$$

式中:  $I_{\text{mp}}$  为光伏模块最大功率点电流;  $V_{\text{mp}}$  为光伏模块最大功率点电压;  $I_{\text{sc}}$  为光伏模块的短路电流;  $V_{\text{oc}}$  为光伏模块的开路电压。

对式(1)进行变形, 将 I-V 曲线上的参考点 ( $V_{\text{ref}}, I_{\text{ref}}$ ) 转移到新的运行点上 ( $V, I$ )。

$$\Delta T = T - T_{\text{ref}} \quad (2)$$

$$\Delta I = \alpha \cdot \left(\frac{R}{R_{\text{ref}}}\right) \cdot \Delta T + \left(\frac{R}{R_{\text{ref}}} - 1\right) \cdot I_{\text{sc}} \quad (3)$$

$$\Delta V = -\beta \cdot \Delta T - R_s \cdot \Delta I \quad (4)$$

$$V_{\text{new}} = V_{\text{ref}} + \Delta V \quad (5)$$

$$I_{\text{new}} = I_{\text{ref}} + \Delta I \quad (6)$$

其中:  $\alpha$ ,  $\beta$  分别为电流和电压温度系数;  $R_s$  为光伏模块等效电路的串联电阻;  $R$  为光照强度 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )。

如果光伏发电系统由  $N_s$  个光伏模块串联和  $N_p$  个光伏模块并联组成, 则光伏系统的输出电压和电流为:

$$V_{\text{PV}} = N_s \cdot V_{\text{new}}, \quad I_{\text{PV}} = N_p \cdot I_{\text{new}} \quad (7)$$

基于以上光伏模块的数学模型, 建立如图 1 所示的光伏模块的 Matlab 通用仿真模型, 通过在界面上直接修改温度和光照强度等环境参数和光伏模块的电气参数, 实现光伏模块的通用性建模。根据太阳能模块生产商提供的数据手册, 应用 Matlab 仿真模型进行电气特性分析, 结果表明基于本文数学模型的仿真分析曲线和生产商提供的特性曲线非常吻合, 从而验证光伏模块数学模型和通用仿真模型的有效性和实用性, 如图 2 所示为仿真的特性曲线和光伏生产商测试的特性曲线对比分析。

光伏模块的电压-电流曲线, 即伏安特性曲线 (V-I 曲线) 如图 2 所示, 光伏模块的功率-电压曲线 (P-V 曲线) 如图 3 所示, 图 4 为 Sharp 180W 的单晶硅光伏模块, 型号为 NU-SOE3E 电流, 功率和电

压的特性曲线 (外界环境温度为  $25^\circ\text{C}$ )。

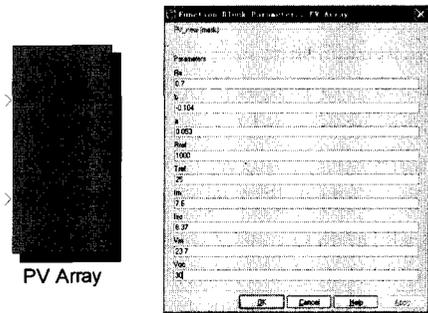


图 1 光伏模块特性曲线的通用仿真模型  
Fig.1 Simulation model of photovoltaic module for characteristic curve

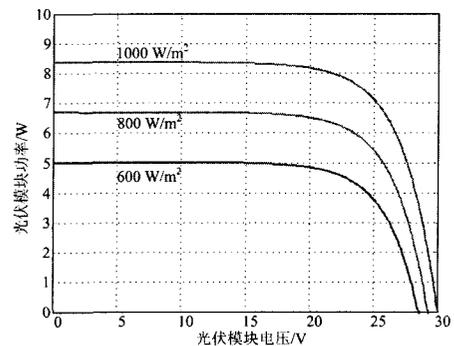


图 2 不同光照强度下光伏模块电压-电流曲线  
Fig.2 Voltage-current curve of PV module

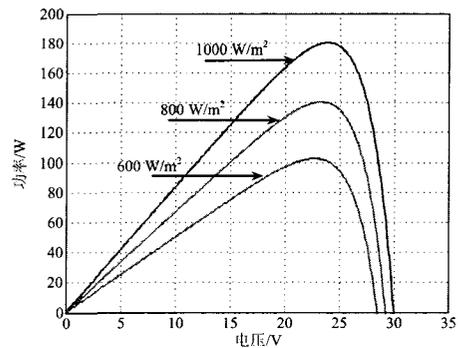


图 3 不同光照强度下光伏模块功率-电压曲线  
Fig.3 Power-voltage curve of PV module

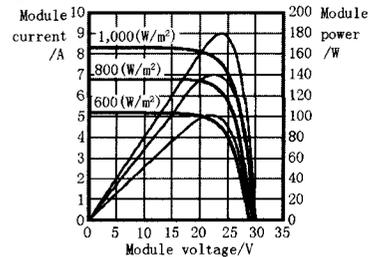


图 4 NU-SOE3E 模块电流、功率和电压特性曲线  
Fig.4 Current, power and voltage characteristic curve for NU-SOE3E module

### 1.2 最大功率点跟踪建模(MPPT: Maximum Power Point Tracking)

光伏阵列的输出具有非线性特性，并且受光照强度，环境温度和负载情况影响。在一定的光照强度和环境温度下，可以工作在不同的输出电压，但只有在输出电压为  $V_{op}$  时，光伏阵列输出的功率达到最大值，此时光伏阵列的工作点达到了输出功率电压曲线的最高点，称之为最大功率点。最大功率点跟踪控制策略是实时检测光伏阵列的输出功率，采用一定的控制算法预测当前工况下阵列可能的最大功率输出，通过改变当前的阻抗情况来满足最大功率输出的要求。现代最大功率点跟踪的方法有：干扰观测法(perturb & observe algorithm, P&O)，电导增量法<sup>[5-7]</sup>(Incremental conductance algorithm)，模糊逻辑控制算法(Fuzzy logic control algorithm)，滞环比较法(Hysteresis comparison algorithm)，神经网络控制法(Neural network algorithm)，最优梯度法(Gradient method)以及各种改进的算法。本文采用常用的电导增量算法，该算法的原理是光伏阵列的 P-V 曲线在功率最大值  $P_{max}$  处的斜率为零，通过比较光伏阵列的电导增量和瞬时电导改变控制信号。电导增量算法控制精确，响应速度快，适用于大气条件变化较快的场合。电导增量算法的流程图如图 5 所示。基于电导微增量算法的原理，在 Matlab/Simulink 环境下建立最大功率跟踪的仿真模块，其核心是内嵌两个 m 函数，其中 mppt()函数实现算法结构，Ddet()实现真正的最大功率点追踪，图 6 为采用电导增量算法追踪到的最大功率点( $V_m, I_m$ )，其值为 (314.18, 7.77)。

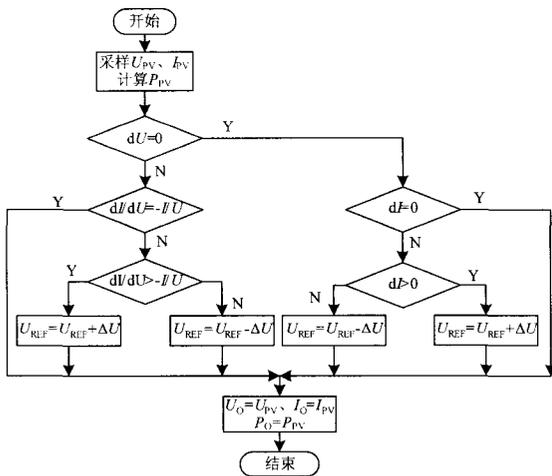


图 5 电导增量算法流程图

Fig.5 Flowchart of incremental conductance algorithm

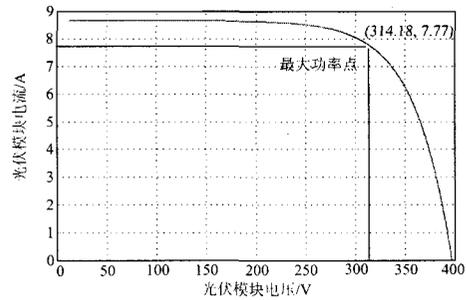


图 6 电导增量算法追踪到的最大功率点

Fig.6 The maximum power point tracked by incremental conductance algorithm

## 2 固定滞环宽度的电流跟踪控制器

### 2.1 并网逆变器拓扑结构

光伏发电模块和电网之间的接口并网型逆变器，具有多种拓扑结构和控制策略<sup>[8-10]</sup>，一般有三种逆变器配置模式：中间逆变器，串联逆变器和集成式逆变器；两种拓扑结构：带有变压器并网和无变压器并网。如果考虑纹波影响，可采用三态滞环控制，使并网逆变器在同一平均开关频率下具有较小的电感纹波电流<sup>[11]</sup>。图 7 为本文设计的并网型逆变器拓扑结构和控制方案，采用三阶 LCL 滤波器，光伏并网逆变器通过公共耦合点 PCC (point of common coupling)接入电网。

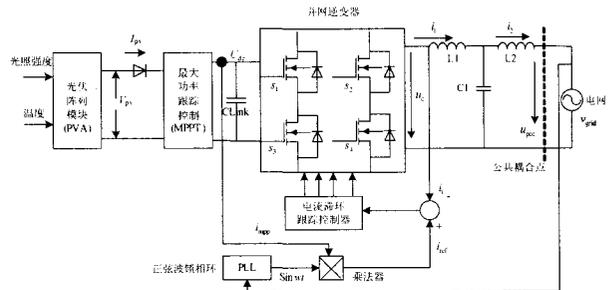


图 7 并网型逆变器拓扑结构和控制方案

Fig.7 Topology and control scheme of grid-connected inverter

### 2.2 固定滞环宽度控制器策略

图 8 所示为固定滞环宽度控制器的原理框图。当电流误差信号向上超过滞环宽度时，产生的脉冲信号触发  $S_1$  和  $S_4$  导通， $S_2$  和  $S_3$  截止，电感  $L_1$  电流开始增加；当电流误差信号向下超过滞环宽度时，产生的脉冲信号触发  $S_2$  和  $S_3$  导通， $S_1$  和  $S_4$  截止，电感电流开始减小，这样逆变器电流始终在滞环宽度的范围内变化，从而同步跟踪正弦参考电流。固定滞环宽度控制是在逆变器电流上升和下降的变化

过程中, 始终保持滞环宽度不变, 但逆变器开关频率瞬时变化, 将导致滤波器设计困难。国外有学者提出自适应动态调整滞环宽度的控制策略<sup>[12]</sup>, 能保持开关频率不变, 文献<sup>[13]</sup>提出一种在滞环控制中引入频率反馈的准固定频率的滞环跟踪控制, 也能解决固定滞环跟踪开关频率变化的问题。

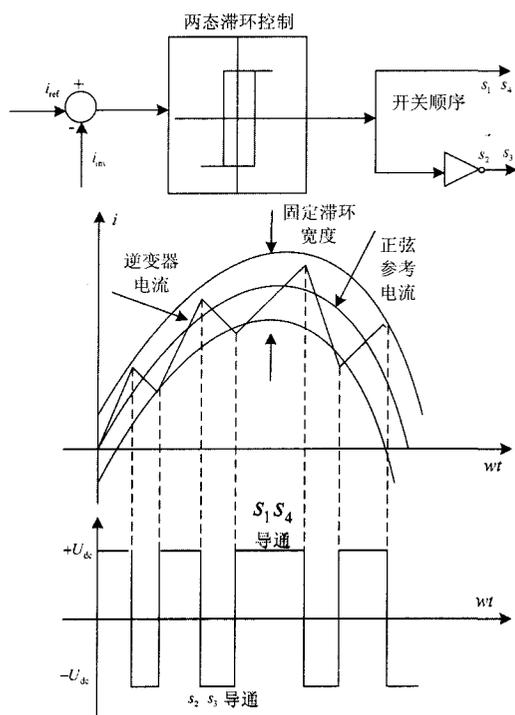


图 8 固定滞环宽度的电流控制原理

Fig.8 Constant hysteresis band current control scheme

### 2.3 并网逆变器数学模型

根据图 7 所示的并网逆变器主电路拓扑结构和电流滞环跟踪控制算法, 采用 LCL 滤波的主要目的与只用一个电感  $L$  进行滤波相比, LCL 滤波能有效地滤除逆变器电流的高次谐波分量, 并能减小电感量, 从而减小电感体积和重量<sup>[14]</sup>。设逆变器输出电流  $i_{inv}$ , 光伏模块输出的稳定电压为  $V_{pv}$ ,  $s$  为开关函数, 且  $s$  满足

$$s_1, s_4 \text{ 导通}, s = 1, \quad v_{inv} = V_{PV}$$

$$s_2, s_3 \text{ 导通}, s = 0, \quad v_{inv} = -V_{PV}$$

$$\text{有: } v_{inv} = (2s - 1) \cdot V_{PV} \quad (8)$$

并网逆变器主电路状态空间的数学模型如式 (9):

$$\begin{cases} L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} = v_{inv} - v_c \\ L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} = v_c - v_g \\ C_1 \cdot \frac{dv_{c1}}{dt} = i_1 - i_2 \end{cases} \quad (9)$$

基于状态空间平均化和线性技术, 则状态方程可表示为式 (10):

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \\ \dot{v}_{c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{L_1} \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_2} \\ \frac{1}{C_1} & -\frac{1}{C_1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ v_{c1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{inv} \\ v_g \end{bmatrix} \quad (10)$$

则并网逆变器主电路的传递函数:

$$I_2(s) = \frac{1}{L_1 L_2 C_1 s^3 + (L_1 + L_2)s} \cdot V_{inv}(s) + \frac{L_1 C_1 s^2 + 1}{L_1 L_2 C_1 s^3 + (L_1 + L_2)s} \cdot V_g(s) \quad (11)$$

这是一个两输入单输出的三阶线性系统, 逆变器输出电压, 电网电压作为输入状态变量, 电感  $L_1$  和  $L_2$  电流、电容  $C_1$  电压作为状态反馈变量,  $V_g$  可被视为系统扰动变量。因此, 并网逆变器主电路的传递函数框图如图 9 所示。

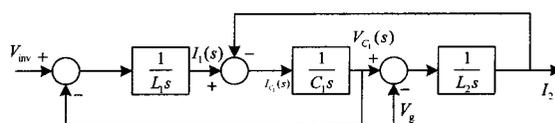


图 9 并网逆变器主电路传递函数框图

Fig.9 Transfer function block diagram of main circuit for photovoltaic grid-connected inverter

当以  $V_g$  作为扰动输入,  $I_2$  和  $V_{inv}$  之间的传递函数为:

$$\frac{I_2}{V_{inv}} = \frac{1}{L_1 L_2 C_1 s^3 + (L_1 + L_2)s} \quad (12)$$

当以  $V_{inv}$  作为扰动输入,  $I_2$  和  $V_g$  之间的传递函数为:

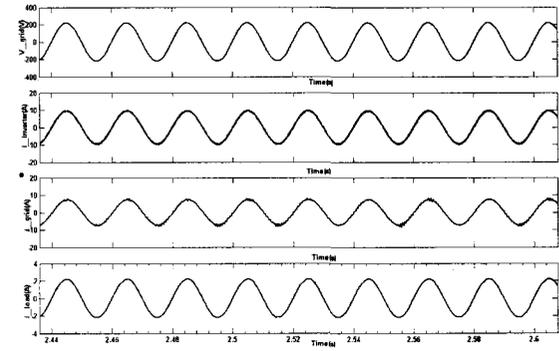
$$\frac{I_2}{V_g} = \frac{L_1 C_1 s^2 + 1}{L_1 L_2 C_1 s^3 + (L_1 + L_2)s} \quad (13)$$

### 3 仿真分析

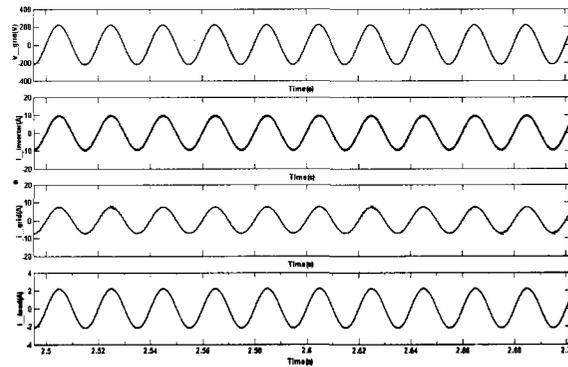
光伏模块的电气参数，是在标准测试条件下测量的。标准测试条件是环境温度为 25°C，太阳光照强度为 1 000 w/m<sup>2</sup>，空气质量为 1.5。仿真分析选用的光伏模块的电气参数分别为： $I_{sc}=2.41$  A， $I_{mp}=2.2$  A， $V_{mp}=17.45$ ， $\alpha=0.06\%$ ， $\beta=4\%$ ， $V_{oc}=22.4$  V；直流连接电容  $C_{Link}=300$   $\mu$ F；滤波器元件参数为  $L_1=5$  mH， $C_1=3$   $\mu$ F， $L_2=5$  mH；电网参数：电网电压  $v_g$  有效值  $V_{grms}=220$  V/50 Hz。

光伏逆变器并网是光伏模块通过最大功率跟踪控制实现与负载匹配，逆变器电流通过 LCL 滤波后为负载供电，与电网并联运行。在 Matlab/Simulink 的仿真平台，分别建立光伏模块和最大功率跟踪的仿真模型，单相全桥 PWM 逆变器模型，LCL 滤波器模型，RLC 负载模型和电网模型，构建一个光伏逆变器并网运行的主电路模型<sup>[15,16]</sup>，采用固定滞环宽度的电流跟踪控制系统，滞环宽度设为 0.05。

图 10 所示为并网系统参数不变，而光照强度和温度发生变化时的电压和电流波形：从上到下依次为电网电压  $v_{grid}$ ，逆变器输出电流  $i_{inverter}$ ，电网电流  $i_{grid}$  和负载电流  $i_{load}$ 。为模拟太阳能光伏模块的实际运行情况，选取了三种太阳光照的情况：低光照情况，一般光照情况和高强度光照。图 10(a)为在温度为 0°C，光照强度为 100 W/m<sup>2</sup> 的各电压电流波形；图 10(b)为在温度为 25 °C，光照强度为 600 W/m<sup>2</sup> 的各电压电流波形；图 10(c)为温度为 50 °C，光照强度为 1000 W/m<sup>2</sup> 的各电压电流波形。由图 10(a)可见，逆变器电流和电网电流在光伏模块稳定运行时发生畸变，是由于外界环境温度降低和光照减小影响光伏模块的输出特性；而图 10(b)和图 10(c)显示并网逆变器在正常和光照充分的情况下具有良好的输出电流波形。



(b)  $v_{grid}$ ,  $i_{inverter}$ ,  $i_{grid}$ ,  $i_{load}$  (光照强度为 600 W/m<sup>2</sup>，温度为 25 °C)



(c)  $v_{grid}$ ,  $i_{inverter}$ ,  $i_{grid}$ ,  $i_{load}$  (光照强度为 1 000 W/m<sup>2</sup>，温度为 50 °C)

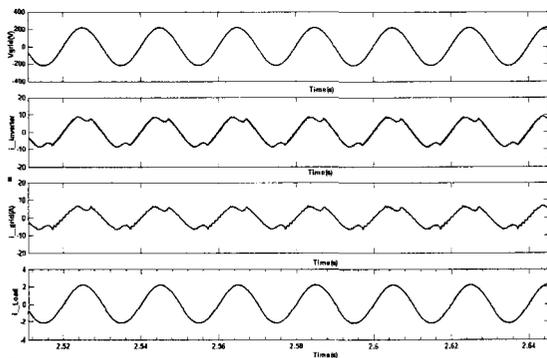
Fig.10  $v_{grid}$ ,  $i_{inverter}$ ,  $i_{grid}$ ,  $i_{load}$  at three different radiance intensities and climatic temperatures

### 4 结论

太阳能光伏并网逆变器研究的关键是建立基于数学模型的光伏阵列模型，采用改进的电导增量算法实现最大功率跟踪，以电流滞环跟踪控制实现并网逆变器输出的电流能跟踪参考正弦电流的变化，使注入电网的电流与电网电压同相，保持功率因数始终为 1。集成光伏模块、最大功率跟踪和电流滞环跟踪控制和电网的仿真系统，改变了在研究并网逆变器时将光伏模块等效为简单直流电源的传统方法，能实时改变外界环境参数如温度和太阳光辐射强度，也能根据太阳能模块生产商提供的数据手册资料，修改光伏模块的电气参数，从而能最大限度地真实模拟光伏并网系统在外界环境变化时的动态响应，为逆变器控制器的设计、滤波器参数设计以及逆变器并网输出的电能质量分析提供非常重要的依据。

### 参考文献

[1] 顾和荣, 杨子龙, 郭伟扬. 并网逆变器输出电流滞环跟踪控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9):108-112.



(a)  $v_{grid}$ ,  $i_{inverter}$ ,  $i_{grid}$ ,  $i_{load}$  (光照强度为 100 W/m<sup>2</sup>，温度为 0 °C)

- GU He-rong, YANG Zi-long, ZOU Wei-yang. Research on Hysteresis-band Current Tracking Control of Grid-connected Inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9):108-112(in Chinese).
- [2] Ortiz-Rivera E I, Peng F Z. Analytical Model for a Photovoltaic Module using the Electrical Characteristics provided by the Manufacturer Data Sheet[J]. IEEE, 2005.
- [3] 赵争鸣, 刘建政, 等. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2005.  
ZHAO Zheng-ming, LIU Jian-zheng, et al. PV Power Generation and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [4] Altas I H, Sharaf A M. A Photovoltaic Array Simulation Model for Matlab-Simulink GUI Environment[J]. IEEE, 2007.
- [5] Lee J H, Bae H S, Cho B H. Advanced Incremental Conductance MPPT Algorithm with a Variable Step Size[J]. EPE-PEMC, 2006:603-607.
- [6] Pandey A. Design Issues in Implementing MPPT for Improved Tracking and Dynamic Performance[J]. IEEE, 2006: 4387-4391.
- [7] Sera D, Kerekes T. Improved MPPT Algorithms for Rapidly Changing Environmental Conditions[J]. EPE-PEMC, 2006: 1614-1619.
- [8] Soeren Baekhoej Kjaer. A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005, 4(5):1292-1306.
- [9] Sachin Jain. A Single-Stage Grid Connected Inverter Topology for Solar PV Systems with Maximum Power Point Tracking[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(5):1928-1940.
- [10] Soeren Baekhoej Kjaer. Power Inverter Topologies for Photovoltaic Modules – a Review[J]. IEEE, 2002:782-788.
- [11] Bode G H, Holmes D G. Implementation of Three Level Hysteresis Current Control for a Single Phase Voltage Source Inverter[J]. IEEE, 2000:33-38.
- [12] Jog A N, Apte N G. An Adaptive Hysteresis Band Current Controlled Shunt Active Power Filter[J]. IEEE, 2007.
- [13] 杨旭. 一种新的准固定频率滞环PWM电流控制方法[J]. 电工技术学报, 2003, (3):25-29.  
YANG Xu. A New Quasi-constant Frequency Hysteresis PWM Current Control Method[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2003, (3):25-29.
- [14] Karshenas H R. Basic Criteria in Designing LCL Filters for Grid Connected Converters[J]. IEEE ISIE, 2006:1996-2000.
- [15] Ciobotaru M, Kerekes T. PV Inverter Simulation Using MATLAB/Simulink Graphical Environment and PLECS Blockset[J]. IEEE, 2006: 5313-5318.
- [16] Aslain Ovono Zué. Simulation and Stability Analysis of a 100 kW Grid Connected LCL Photovoltaic Inverter for Industry[J]. IEEE, 2006:1-6.

收稿日期: 2008-11-02; 修回日期: 2009-01-13

作者简介:

戴训江(1974-), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为分布式发电技术的研究; E-mail: xinjiang\_wolf@yahoo.com.cn

晁勤(1959-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事并网型风力发电系统的研究与控制。

(上接第 11 页 continued from page 11)

- [10] Wijnia Y C, Herder P M, Neufville R D. Options for Real Options: Dealing with Uncertainty in Investment Decisions for Electricity Networks[A]. in: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics[C]. 2005.3682-3688.
- [11] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6): 15-20.  
LI De-yi, MENG Hai-jun, SHI Xue-mei. Membership Clouds and Membership Cloud Generators[J]. Journal of Computer Research and Development, 1995, 32(6):15-20.
- [12] 李德毅, 刘常显. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28-34.  
LI De-yi, LIU Chang-yu. Study on the Universality of the

Normal Cloud Model[J]. Engineering Science, 2004, 6(8):28-34.

- [13] Vazquez C, Rivier M, Perez-Arriaga I J. A Market Approach to Long-term Security of Supply[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2): 349-357.

收稿日期: 2008-11-23; 修回日期: 2009-02-12

作者简介:

曾鸣(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力技术经济; E-mail: zengmingbj@vip.sina.com

甘德一(1954-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力市场交易机制设计与评价;

崔拓伟(1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力技术经济。