

# 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究

姚致清<sup>1,2</sup>, 张茜<sup>3</sup>, 刘喜梅<sup>3</sup>

(1. 华中科技大学, 湖北 武汉 430074; 2. 许昌继电器研究所, 河南 许昌 461000;  
3. 青岛科技大学, 山东 青岛 266042)

**摘要:** PSCAD/EMTDC 电力系统电磁暂态仿真软件标准库中无光伏阵列电力元件, 而电力元件的开发又极其复杂, 这成为工程人员利用该软件研究分析光伏发电系统特性的瓶颈。根据光伏阵列的数学模型, 利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件开发了用户定义的光伏阵列控制元件, 并通过其输出的电流信号来驱动一恒流源元件, 以此来模拟实际的光伏阵列装置。还开发了最大功率追踪控制元件, 并搭建了一个三相光伏并网发电系统。通过所建的系统仿真模型, 分析了光强变化对系统所传输功率的影响, 并验证了所开发控制元件的正确性以及工程仿真分析的可用性。

**关键词:** PSCAD/EMTDC 仿真软件; 光伏阵列; 最大功率追踪; 三相光伏并网发电

## Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC

YAO Zhi-qing<sup>1,2</sup>, ZHANG Qian<sup>3</sup>, LIU Xi-mei<sup>3</sup>

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Xuchang Relay Research Institute, Xuchang 461000, China; 3. Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

**Abstract:** There is not a photovoltaic array (PV array) electrical model in PSCAD/EMTDC power system electromagnetic transient simulation software standard library, while it is complicated for engineers to write an electrical model in PSCAD/EMTDC. To solve this problem, a user-designed PV array control model is presented using PSCAD/EMTDC simulation software based on the mathematical models of PV array, and a constant-current source electrical model can be driven by the current output signal of the PV array control model, by which a real PV array equipment can be simulated. Meanwhile, a MPPT control model is developed and a three-phase grid-connected photovoltaic generation system (GCPS) is simulated in PSCAD/EMTDC. This paper analyzes the effects of sudden changes in solar irradiance on power transmission of the three-phase GCPS, and proves the correctness of the designed control model as well as its availability for engineering simulation analysis.

This work is supported by National Natural Science Foundation of Shandong Province (No.Y2008G14).

**Key words:** PSCAD/EMTDC simulation software; PV array; MPPT; three-phase GCPS

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)17-0076-06

## 0 引言

目前, 地球上的能源直接或间接都是来自太阳, 如水力、太阳辐射、风力等, 其中太阳能成为取代化石能源的理想能源之一, 同时也是光伏发电系统中的清洁可再生的重要动力能源。在光伏发电系统的设计中, 对整个发电系统的仿真是极其重要的一步, 国内外学者对光伏系统建模和仿真也正在广泛的研究, 其中有基于I-V和P-V特性曲线的光伏阵列的分析<sup>[1]</sup>, 最大功率点追踪方法的改进<sup>[2-3]</sup>, 以及单相逆变器的动态建模和仿真<sup>[4]</sup>等。文献[5]中利用

Matlab/Simulink仿真软件开发了具有友好界面的光伏电池元件模型; 文献[6]提出了光伏并网发电系统在孤岛现象下的DC-AC全桥开关逆变器的非线性模型, 并利用Matlab/Simulink软件对其进行了建模仿真, 同时将仿真结果与PSpice仿真及硬件试验所得结果进行了比较分析; 文献[7]应用PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真软件建立了一个简单的光伏直流发电系统, 但并没有对三相光伏并网系统进行仿真分析。

PSCAD/EMTDC 是研究电力设备和电力网络暂态行为的工业标准仿真工具, 它提供了大部分的电力设备元件模型, 并方便用户开发自己的控制元件和电力元件, 但在 PSCAD/EMTDC 标准模型库

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (Y2008G14)

中没有光伏阵列电力元件, 而电力元件的开发又极其复杂, 这成为工程人员利用该软件研究分析光伏发电系统特性的瓶颈。因此本文根据光伏阵列的数学模型, 利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件开发了用户定义的光伏阵列控制元件, 并通过其输出的电流信号来驱动一恒流源元件, 以此来模拟实际的光伏阵列装置。同时搭建了一个光伏并网发电系统, 并验证了光伏阵列的 I-V/P-V 的关系曲线。通过所建的系统仿真模型, 分析了外界环境光强及温度变化时对系统所传输功率的影响, 并验证了所开发元件的正确性以及工程仿真分析的可用性。

## 1 光伏阵列的数学模型

光伏组件的等效电路<sup>[1-2]</sup>如图 1 所示。

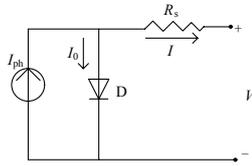


图 1 光伏组件的等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of a PV module

由图 1 可得:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{AV_T}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

$$\text{式 (1) 中: } V_T = m(kT/q) \quad (2)$$

$$I_{ph} = I_{sc} \frac{G}{G_{ref}} [1 + \alpha_T(T - T_{ref})] \quad (3)$$

$$I_0 = I_{RS} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[ qE_g \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) / kA \right] \quad (4)$$

$$I_{RS} = I_{sc} / \left[ \exp\left(\frac{V_{OC}}{AV_T}\right) - 1 \right] \quad (5)$$

上述各式中  $I_{sc}$  为标准测试条件  $T_{ref}=25^\circ\text{C}$ ; 光照强度  $G_{ref}=1\ 000\ \text{W/m}^2$  下的短路电流;  $V_{oc}$  为标准测试条件下的开路电压;  $I$  为电池组件输出电流;  $V$  为电池组件终端电压;  $I_{ph}$  为给定光强下的短路电流;  $I_0$  为二极管饱和电流;  $G$  为光照强度;  $V_T$  为组件热势能, 其中  $m$  为光伏组件中串联的光伏电池数, 玻尔兹曼常数  $k=1.38\text{e-}23\ \text{J/K}$ , 库仑常数  $q=1.6\text{e-}19\text{C}$ ;  $\alpha_T$  为短路电流温度系数;  $E_g$  为禁带宽度;  $A$  为二极管理想常数;  $R_s$  为固有电阻, 可通过式 (1) 由光

伏组件最大功率点处的电压和电流求得。

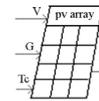
光伏阵列是由多个光伏组件串并联组成, 从而提高了系统的电压和电流, 以此增加系统传输的功率。由  $N_s$  个组件串联,  $N_p$  个组件并联组成的光伏阵列的输出电流可描述为:

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{AN_s V_T}\right) - 1 \right] \quad (6)$$

$$P = VI \quad (7)$$

从式 (6)、式 (7) 中可以看出: 光伏阵列的输出电流  $I$  与输出功率  $P$  随光伏阵列输出电压  $V$  的变化而变化。

根据式 (1) ~ (7), 利用 PSCAD/EMTDC 软件编写的光伏阵列控制元件及其参数如图 2 所示。



short circuit current	3.8 [A]
open circuit voltage	21.1 [V]
reference temperature	25 [°C]
Temperature coefficient at short circuit	0.00063 [°C]
band gap energy	1.1 [eV]
ideal factor	1.5
Number of cells in a PV module	36
Number of modulus in series	10
Number of modulus in parallel	9
Voltage at Pmax,ref	17.1 [V]
Current at Pmax,ref	3.5 [A]

图 2 光伏阵列模型及参数

Fig.2 Model and parameter of PV array

## 2 最大功率追踪控制 (MPPT)

电导增量法是 MPPT 控制方法中最常用的方法之一, 该方法在光照强度发生变化时, 光伏阵列输出电压能以平稳的方式跟踪其变化, 而且在最大功率点的振荡幅度和功率损失也较少<sup>[8]</sup>。电导增量法的控制流程如图 3 所示。

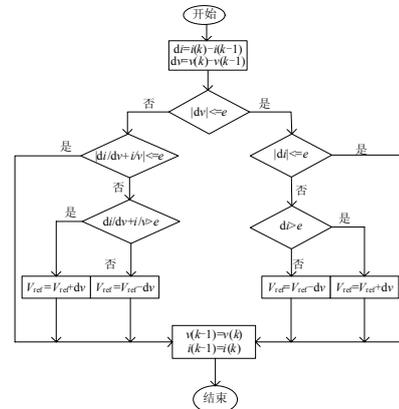


图 3 电导增量法的控制流程图

Fig.3 Flow chart of IncCond method

按照上述流程图, 利用PSCAD/EMTDC软件编写的MPPT控制元件如图4所示。

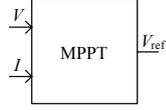


图4 最大功率追踪控制模块  
Fig.4 Control model of MPPT

### 3 三相光伏并网系统

#### 3.1 光伏并网系统结构

图5给出了一典型的三相光伏并网发电系统(GCPS)结构, 该系统由光伏阵列、直流母线、三相电压源型逆变器(VSC)、滤波器、三相升压变压器、三相电源组成。光伏阵列产生的直流电给直流电容充电, 并通过逆变器和滤波器后转换为50 Hz或60 Hz基波频率的交流电传输给电网, 我国电网工频规定为50 Hz, 很多国外的电网频率为60 Hz, 本文选择的电网频率为50 Hz。

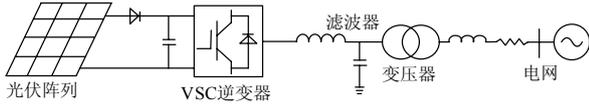


图5 光伏并网系统结构  
Fig.5 Structure of GCPS

#### 3.2 光伏并网系统的控制策略

为了实现光伏逆变器有功功率与无功功率的解耦控制, 同步旋转坐标d-q变换被引入, 变换矩阵为:

$$\begin{pmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos \omega t & \cos \left( \omega t - \frac{2}{3} \pi \right) & \cos \left( \omega t + \frac{2}{3} \pi \right) \\ \sin \omega t & \sin \left( \omega t - \frac{2}{3} \pi \right) & \sin \left( \omega t + \frac{2}{3} \pi \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t & 1 \\ \cos \left( \omega t - \frac{2}{3} \pi \right) & \sin \left( \omega t - \frac{2}{3} \pi \right) & 1 \\ \cos \left( \omega t + \frac{2}{3} \pi \right) & \sin \left( \omega t + \frac{2}{3} \pi \right) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{pmatrix}$$

功率控制器作为上层控制器, 调节光伏并网发电系统的有功与无功功率, 并产生电流控制器需要的d, q轴电流参考值 $I_d^*, I_q^*$ ; 内环电流控制器产生光伏逆变器所需的d, q轴电压期望值 $v_d^*, v_q^*$ ; PWM产生逆变器的触发脉冲。功率控制器与电流控制器的控制结构如图6、图7所示, 具体控制理论请参考文献[9]。

参考文献[9]。

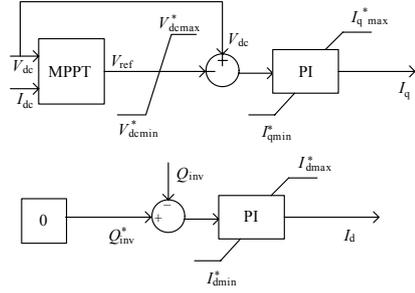


图6 功率控制器

Fig.6 Power controller

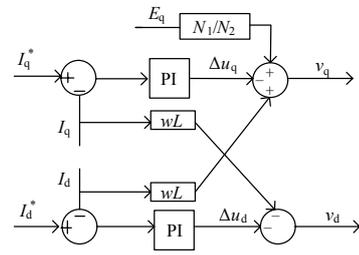


图7 内环电流控制器

Fig.7 Inner current controller

d,q 坐标系下, 并考虑变压器的变比影响, 本文中变压器一次侧电压超前二次侧 $30^\circ$ , 因此逆变器的数学模型为:

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} + Ri_d = \frac{N_1}{N_2} E_d - v_d - wLi_q \\ L \frac{di_q}{dt} + Ri_q = \frac{N_1}{N_2} E_q - v_q + wLi_d \end{cases}$$

上式可整理得:

$$\begin{cases} v_d = \frac{N_1}{N_2} E_d - wLi_d - \Delta u_d \\ v_q = \frac{N_1}{N_2} E_q + wLi_d - \Delta u_q \end{cases}$$

式中

$$\begin{cases} \Delta u_d = \left( k_p + \frac{k_i}{s} \right) (i_d^* - i_d) \\ \Delta u_q = \left( k_p + \frac{k_i}{s} \right) (i_q^* - i_q) \end{cases}$$

### 4 仿真结果与分析

本文根据图5所示的光伏并网发电系统结构图, 利用PSCAD/EMTDC仿真软件搭建了相应的仿真系统如图8, 系统的仿真参数见表1。

表 1 仿真系统参数

Tab.1 Parameter simulation system

光伏阵列最大功率	5.38 kW
逆变器线电压有效值	100 V
交流电网线电压有效值	380 V
变压器变比	100/380
直流电容	10 000 $\mu$ F
PWM 开关频率	7 050 kHz
滤波电感	0.003 H
滤波电容	30 $\mu$ F
功率调节器比例增益	110
功率调节器积分时间常数	0.2
电流调节器比例增益	15
电流调节器积分时间常数	0.000 2

本文选择的 SOLAREX SX-60 太阳能光伏电池组件电气规格见表 2, 实际测量的光伏组件的 I-V, P-V 特性曲线与理想特性曲线的对比如图 9 所示。从图中可以看出根据实测数据所拟合出的特性曲线与通过等效电路建模仿真所得的特性曲线基本一致, 从而证明了通过等效电路建模仿真来进行光伏并网系统研究的可行性。

本文所开发的光伏阵列元件为 10 个光伏组件串联、9 个光伏组件并联组成的阵列元件, 考虑到现有的研究条件本文只限于仿真研究。

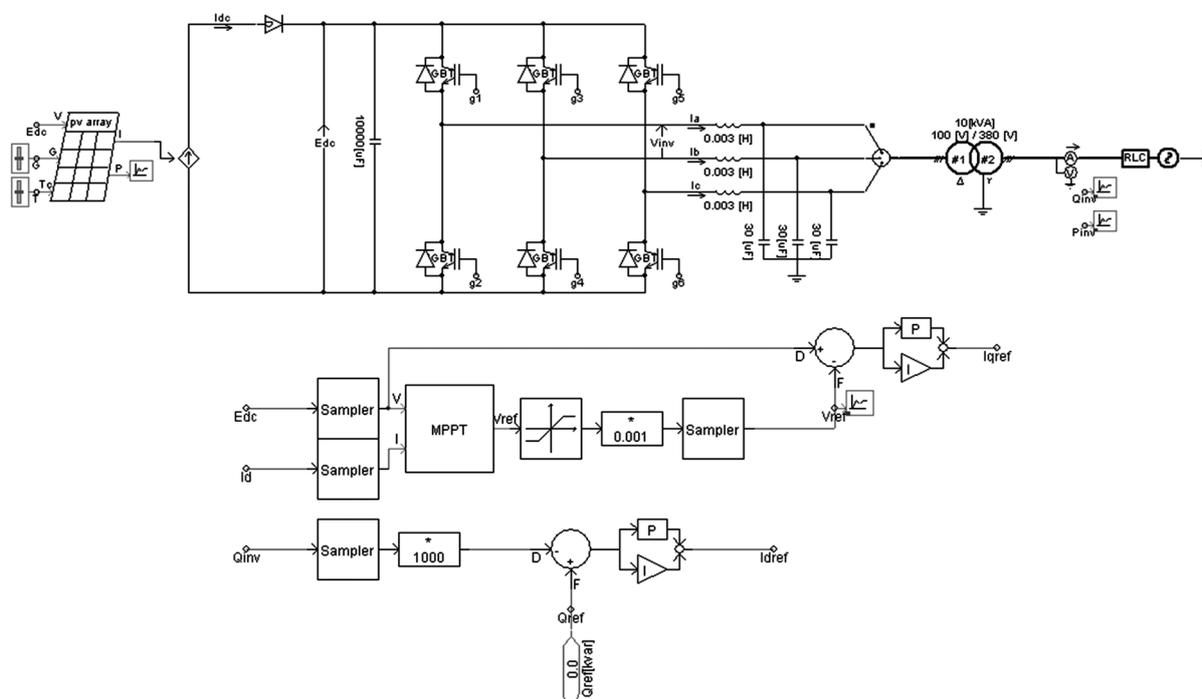


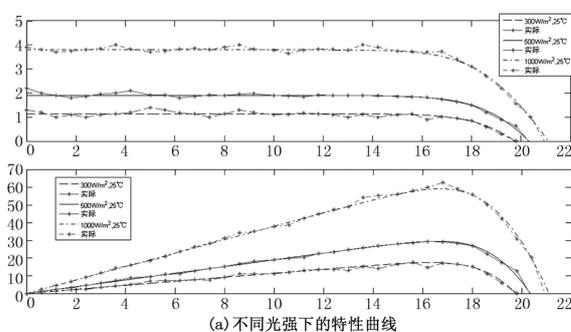
图 8 三相光伏并网系统仿真图

Fig.8 Simulation picture of the three-phase GCPS

表 2 SOLAREX SX-60 太阳能光伏电池组件电气规格

Tab.2 SOLAREX SX-60 PV module electrical rating

电气特性	规格
额定最大输出功率	60 W
额定电压	17.1 V
额定电流	3.5 A
短路电流	3.8 A
开路电压	21.1 V
开路电压温度系数	-73 mV/ $^{\circ}$ C
短路电流温度系数	3 mA/ $^{\circ}$ C



(a) 不同光强下的特性曲线

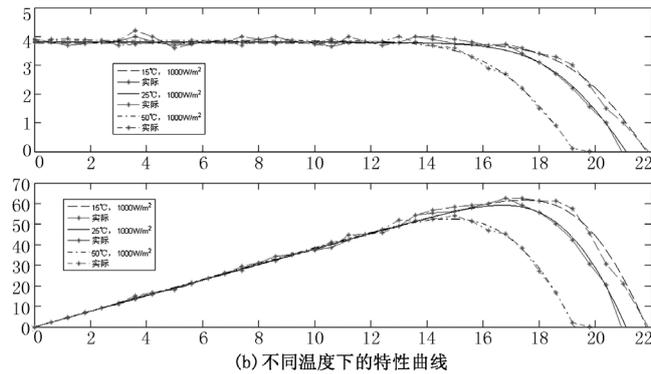


图 9 实测光伏组 I-V 和 P-V 特性曲线与理想特性曲线的对比

Fig.9 Comparison of I-V and P-V curve of PV module measured with that of ideality

本文图 10 给出了本文所开发的光伏阵列元件在参考温度  $T_{ref}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，不同光照强度条件下 P-V、I-V 的关系曲线；图 11 给出了参考光照强度  $G_{ref}=1000\text{ W/m}^2$ ，不同温度条件下的 P-V、I-V 的关系曲线。从图中可以看出仿真结果满足本文所提供的光伏阵列数学模型的数学关系，并与图 9 光伏特性曲线相近似，从而证明了所开发的光伏阵列控制元件的正确性。

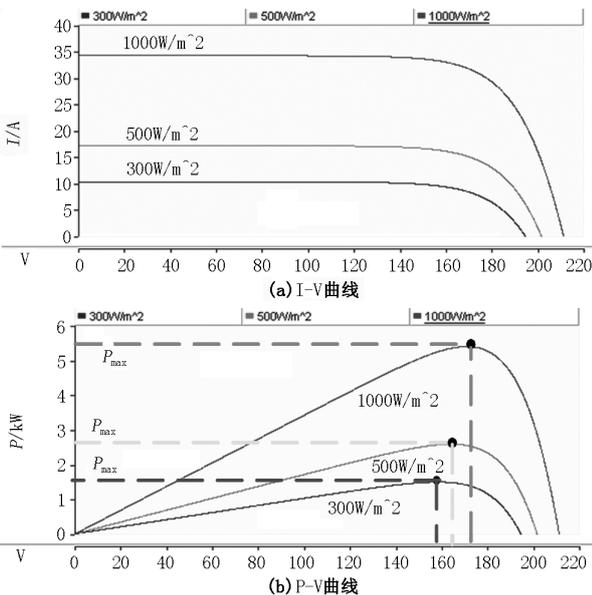


图 10 不同光照强度下 I-V 和 P-V 曲线

Fig.10 I-V and P-V curve under different solar irradiance

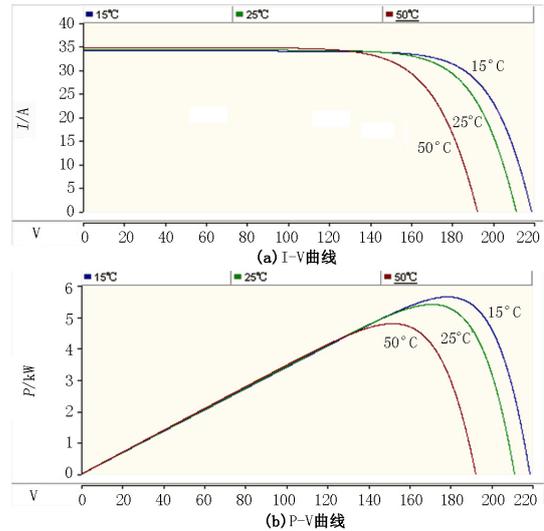


图 11 不同温度下 I-V 和 P-V 曲线

Fig.11 I-V and P-V curve under different temperature

图 12 给出了参考温度和参考光照强度下的光伏并网系统三相电流波形。从图中可以看出运用本文的控制策略可以得到近似完美的正弦三相电流。

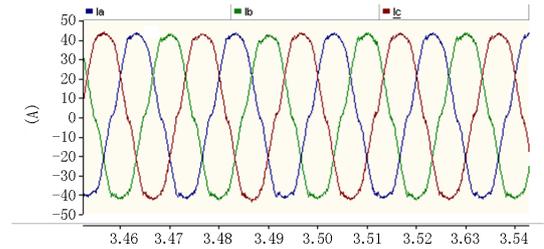


图 12 三相光伏并网系统电流

Fig.12 Current of the three-phase GCPS

图 13 给出了参考温度下，光照强度突然变化时三相光伏并网系统的响应。从图中可以看出光照强度在 2 s 时刻从  $300\text{ W/m}^2$  增大到  $1000\text{ W/m}^2$ ，经过 2 s 钟后在 4 s 时刻光照强度从  $1000\text{ W/m}^2$  下降为  $500\text{ W/m}^2$ ，由于光伏阵列固有的二极管输出特性，光伏阵列的输出功率随光照强度的变化迅速发生变化，而由于逆变器的功率控制，其逆变输出功率大约延迟了 0.08 s。直流电压维持在相应的最大功率点电压处，并存在小幅震荡。从图 10 (b) 中可以看出  $300\text{ W/m}^2$  光强下的最大功率约为 1.5 kW， $500\text{ W/m}^2$  光强下的最大功率约为 2.6 kW， $1000\text{ W/m}^2$  光强下的最大功率约为 5.38 kW，与图 13 中的功率相对应，因此从仿真结果图 13 中可以看出：此光伏系统在光照强度突然变化时，其输出功率可以快速跟踪相应光照强度下的最大功率。从而验证了本文所开发 MPPT 控制元件的正确性。

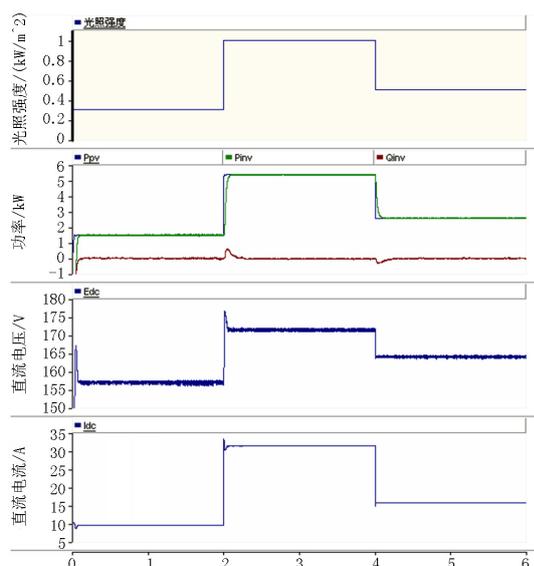


图 13 光照强度变化时光伏并网系统的响应

Fig.13 Responses of GCPS for changes in solar irradiance

## 5 结论

仿真结果表明本文所开发的光伏阵列控制元件可以模拟各个温度和光强下的 I-V, P-V 关系特性曲线, 用该控制元件去触发一恒流源可以很好地模拟光伏阵列装置, 该方法可以用来进行三相光伏并网发电系统的仿真研究。本文所开发的 MPPT 控制元件可以准确地跟踪系统最大输出功率。因此本文所建立的三相光伏并网仿真系统为光伏并网发电的进一步研究提供了有利基础。

## 参考文献

- [1] Park M, Yu I. A novel real-time simulation technique of photovoltaic generation systems using RTDS[J]. IEEE T Energy Conver, 2004, 19 (1): 164-169.
- [2] Masom M, Dehbonei H, Fuchs E F. Theoretical and explanation analysis of photovoltaic systems with voltage and current based maximum power point tracking[J]. IEEE T Energy Conver, 2002, 17 (4): 514-522.
- [3] Zhang L, Al-Amoudi A, Bai Y. Real-time maximum power point tracking for grid-connected photovoltaic systems[C]. //Power Electronics and Variable Speed Drives. 2000.

- [4] Aris T I, Kourtesi S, Ekonomou L, et al. Modeling of a shingle-phase photo voltaic inverter[J]. Sol Energy Mat Sol C, 2007, 91: 1713-1725.
- [5] Tsai Huan-Liang, Tu Ci-Siang, Su Yi-Jie, et al. Development of generalized photovoltaic model using Matlab/Simulink[C]. //Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science. 2008.
- [6] Nattapong Chauyawatto, Krissanapong Kirtikara, Veerapol Monyakul, et al. DC-AC switching converter modelings of a PV grid-connected system under islanding phenomena[J]. Renewable Energy, 2009, 34: 2536-2544.
- [7] 孙自勇, 宇航, 严干贵, 等. 基于 PSCAD 的光伏阵列和 MPPT 控制器的仿真模型[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (19): 61-64.  
SUN Zi-yong, YU Hang, YAN Gan-gui, et al. PSCAD simulation models for photovoltaic array and MPPT controller[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (19): 61-64.
- [8] Hussein K H, Muta I, Hoshino T, et al. Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions[J]. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 1995, 142 (1): 59-64.
- [9] CHEN Hai-rong, WANG Chao. Transient model for VSC-HVDC and its control design[C]. //The 7th IEE International Conference on Advantage in Power System Control, Operation and Management. 2006: 1-5.

收稿日期: 2010-01-02; 修回日期: 2010-05-25

作者简介:

姚致清 (1960-), 男, 博士研究生, 教授级高工, 从事电力电子与智能控制研究;

张茜 (1984-), 女, 硕士研究生, 从事多端直流输电系统、新型电力拖动系统及智能控制研究; E-mail: zq0407310118@@163.com

刘喜梅 (1961-), 女, 教授, 博士, 硕士研究生导师, 从事智能控制、复杂系统的建模及优化控制、软测量技术等研究。

(上接第 75 页 continued from page 75)

- [15] 李长勋. AutoCAD ObjectARX 程序开发技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.

收稿日期: 2009-11-08; 修回日期: 2009-12-15

作者简介:

黄宇峰 (1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系

统规划及可靠性; E-mail: huangyufeng12@sina.com

刘文霞 (1967-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统通信、电力系统智能规划; E-mail: liuwenxia001@163.com

盛洁 (1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统通信。