

# 太阳能光伏电池建模与动态特性仿真

易桂平, 胡仁杰

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 光伏电池是太阳能光伏发电系统中的核心部分, 因此成为太阳能光伏发电系统研究的主要环节。分析了光伏电池的工作特性, 应用仿真软件 PSCAD/EMTDC 工具, 建立了光伏电池及最大功率点跟踪 (MPPT) 仿真模型。仿真结果证明了光伏电池的输出功率在光照强度变化的条件下能够始终追踪最大功率点, 使得光伏电池在不同光照条件下均输出最大功率。

**关键词:** 光伏电池; PSCAD 仿真; 最大功率点

**中图分类号:** TM615

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-0665(2014)05-0032-04

在构建光伏系统时, 由于其在不同的光照强度和温度下的输出功率有较大的变化, 如果采用真实的光伏电池的阵列, 则成本会很高。尤其是当光伏系统的功率在数百瓦甚至更大级别时, 为了降低投资, 提高系统的可行性, 建立光伏电池阵列模型就显得十分重要。光伏电池阵列模型可以模拟出在不同的光照强度、环境温度以及不同组合下的光伏电池阵列的特性、负载能力与系统的性能, 可大大缩短光伏系统的研究周期, 提高研究效率和研究结果的可信度。因此建立光伏电池阵列模型在实际工作中是非常必要的。文中介绍了一种在 PSCAD/EMTDC 环境下, 模拟一个实用的光伏电池阵列模型的方法<sup>[1]</sup>。

## 1 光伏电池工作特性

### 1.1 光伏电池组的数学模型

光伏电池是利用某些材料组成的半导体 PN 结在受到太阳光照时产生光伏效应, 直接将太阳辐射能转换成电能的装置。图 1 为光伏电池的等效电路<sup>[2,3]</sup>。

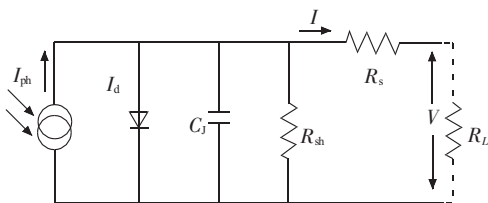


图 1 光伏电池的等效电路

在建立光伏电池的实用数学表达式时, 需要进行一些近似处理, 简化后的  $I-V$  特性方程为:

$$I = I_{sc} \times [1 - B_1 \times (e^{V/(B_2 V_{oc})} - 1)] \quad (1)$$

式中:  $I$  为光伏电池的输出电流;  $I_{sc}$  为光伏电池短路电流;  $V$  为光伏电池的输出电压;  $V_{oc}$  为光伏电池开路电压;  $B_1, B_2$  为待定系数。

在最大功率点处近似满足下式:

$$e^{V_m/B_2 V_{oc}} - 1 \approx e^{V_m/B_1 V_{oc}} \quad (2)$$

在最大功率点有  $I = I_m, V = V_m$ , 则由式(1)和式(2)

可解得:

$$B_1 = (1 - \frac{I_m}{I_{sc}}) \times e^{V_m/B_2 V_{oc}} \quad (3)$$

$$B_2 = (\frac{V_m}{V_{oc}} - 1) \times [\ln(1 - \frac{I_m}{I_{sc}})]^{-1} \quad (4)$$

式中:  $I_m$  为光伏电池最大功率点电流;  $V_m$  为光伏电池最大功率点电压。

由式(3)、(4)可知, 在电池参数  $I_{sc}, I_m, V_{oc}, V_m$  给定的条件下,  $B_1, B_2$  为常数, 代入式(1)得到光伏电池的  $I-V$  特性。

当光照强度、温度变化时, 电池的参数也会发生变化, 当光伏电池当前光照强度为  $S$ , 温度为  $T$ , 就会得到当前的电池参数  $I_{sc-new}, I_m-new, V_{oc-new}, V_m-new$ , 进而得出  $B_{1-new}, B_{2-new}$ 。则当前的电池参数可通过下列式子得到:

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (5)$$

$$\Delta S = \frac{S}{S_{ref}} - 1 \quad (6)$$

$$I_{sc-new} = I_{sc} \left( \frac{S}{S_{ref}} \right) (1 + a \Delta T) \quad (7)$$

$$I_m-new = I_m \left( \frac{S}{S_{ref}} \right) (1 + a \Delta T) \quad (8)$$

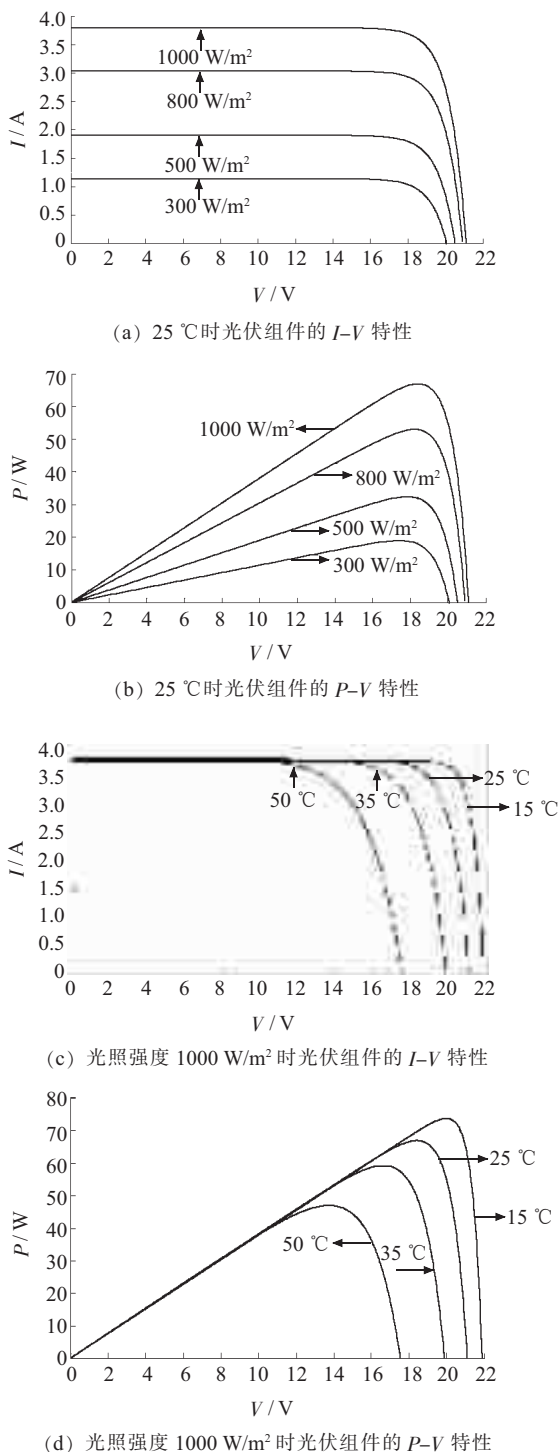
$$V_{oc-new} = V_{oc} [(1 - c \Delta T) \ln(e + b \Delta S)] \quad (9)$$

$$V_m-new = V_m [(1 - c \Delta T) \ln(e + b \Delta S)] \quad (10)$$

式中:  $T_{ref}$  为光伏电池参考温度;  $S_{ref}$  为光伏电池参考日照强度;  $a, b, c$  为光伏电池内部系数。

### 1.2 光伏电池的输出特性

太阳能光伏电池受外界很多因素(光照强度、温度等)影响, 因此其输出具有明显的非线性。仿真得到的不同光照强度下、不同温度下, 光伏组件的  $I-V, P-V$  特性曲线如图 2 所示<sup>[5]</sup>。

图2 光伏组件的  $I$ - $V$  和  $P$ - $V$  特性曲线

## 2 基于阈值电压的最大功率点跟踪(MPPT)控制

光伏电池在一定的温度和光照条件下其输出特性曲线为单凸峰形曲线, 当光伏电池的端电压  $V$  为  $V_m$  时, 其输出功率  $P$  达到最大功率点功率  $P_m$ , 同时电流  $I$  为  $I_m$ ; 当光伏电池的端电压小于  $V_m$  时, 其输出功率随电池端电压上升而增加; 当光伏电池的端电压大于  $V_m$  时, 其输出功率随端电压上升而减小。可通过控制端电压, 使光伏电池工作在最大功率点<sup>[6]</sup>。

文中采用改进扰动观察法实现 MPPT, 在传统的

扰动观察法的基础上加一个电压检测判断部分, 在检测到达最大功率点附近时就减小扰动步长。这样可在最大功率点外取较大的扰动步长, 以提高响应速度, 又可在最大功率点附近取较小的扰动步长, 以提高跟踪精度, 减少摇摆造成的能量损失。

先让光伏电池按某一电压值输出, 计算扰动前光伏电池的输出功率, 测得输出功率; 然后在此电压基础上给一个扰动再计算输出功率, 比较前后测得的 2 个功率值。若功率值增加了, 则继续给相同方向的扰动; 若功率值减少了, 则给反方向的扰动。如图 3 所示,  $P_k$  为当前的采样值,  $P_{k-1}$  为上一次的采样值。在整个扰动过程中不断比较  $V$  与  $V_m$ , 若  $|V - V_m| \leq th$ , 即在最大功率点附近, 则减小扰动步长。  $th$  为阈值, 要适当选取。

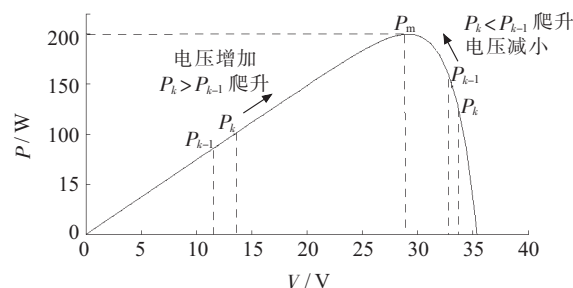


图3 扰动观察法示意图

## 3 光伏电池并网的基本模型

光伏并网装置分单相和三相光伏并网装置, 单相光伏并网装置输出电压为 50 Hz 交流 220 V, 多用于小型的用户系统, 其运行功率因素和波形由控制器性能决定; 三相光伏并网装置输出电压为线电压 50/60 Hz 交流 380 V 或者更高的电压等级, 其中 60 Hz 为美国和日本标准, 50 Hz 为中国和欧洲标准。三相并网装置多用于容量较大的并网系统, 输出波形采用正弦波方式, 功率因素接近 1<sup>[7]</sup>。

光伏电池发出的是直流电能, 需要逆变器将其变换为交流电提供给用户。此外, 逆变器还能对光伏电能进行自动稳压, 可以改善光伏发电系统的供电质量, 联网型光伏发电系统也需要通过交流逆变器来并网。

为典型的三相光伏并网发电系统(GCPS)如图 4 所示, 该系统由光伏电池、直流母线、电压源型逆变器(VSC)、滤波器及电力系统组成。

光伏并网系统采用电压型逆变器时, 其连接的电感是必不可少的。光伏逆变器本身是电压源型逆变器, 它与电网连接, 由于电网本身也是电压源, 2 个电压源不能直接相连接, 否则会造成逆变器损坏。逆变器向电网输送有功和无功功率分别为<sup>[8]</sup>:

$$P = U_g \times U_s \times \sin \delta / X_L \quad (11)$$

$$Q = U_g \times (U_c \times \cos \delta - U_s) / X_L \quad (12)$$

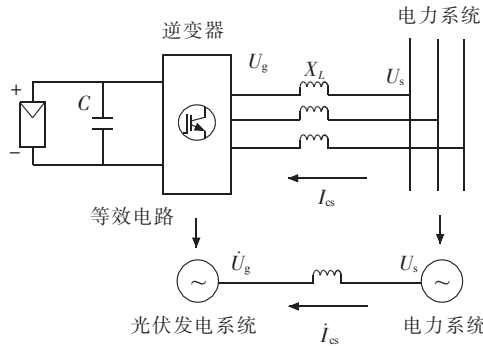


图 4 GCPS 结构

式中： $\delta$  为逆变器输出电压超前系统电压的角度(弧度单位)，当  $\delta < 5^\circ$  时，上述公式可以近似为

$$P = U_g \times U_s \times \delta / X_L \quad (13)$$

$$Q = U_g \times (U_c - U_s) / X_L \quad (14)$$

在 PSCAD/EMTDC 中建立了光伏电池并网的仿真模型，如图 5 所示。模型包括光伏电池阵列，MPPT 控制模块，空间矢量调制(SVPWM)的 VSC，三相 LC 滤波器，阻性负荷，大电网用接地电源来表示<sup>[9]</sup>。

为了实现有功功率和无功功率的解耦控制，引入同步旋转  $dq$  坐标系。光伏电池的  $P/Q$  控制包括外环功率控制和内环电流控制，功率控制提供电流控制环节的参考值，电流控制提供 SVPWM 的参考电压  $dq$  分量信号。逆变器控制的数学模型为：

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} + Ri_d = v_{sd} - v_d - \omega Li_q \\ L \frac{di_q}{dt} + Ri_q = v_{sq} - v_q - \omega Li_d \end{cases} \quad (15)$$

由式(15)可得：

$$\begin{cases} v_d = v_{sd} - \omega Li_d - (k_p + \frac{k_i}{s})(i_{dref} - i_d) \\ v_q = v_{sq} - \omega Li_q - (k_p + \frac{k_i}{s})(i_{qref} - i_q) \end{cases} \quad (16)$$

### 4 动态特性仿真分析

在 PSCAD 中对光伏电池并网模型进行仿真分析。用 C 语言对 MPPT 算法编程，建立 MPPT 控制模块，用指针储存上 1 s 的  $V$  和  $I$  数值，与下 1 s 的数值进行比较，循环计算得到  $V_{ref}$  的数值。由图(6—9)可以发现，GCPS 在光照强度突然变化时的响应迅速且准确。

图 6 是光照强度变化曲线，在  $t = 4$  s 时，光照强度从  $300 \text{ W/m}^2$  增大到  $1000 \text{ W/m}^2$ ，经过 3 s 后在  $t = 7$  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，其输出功率能迅速跟随光照强度的变化，而逆变器的功率控制使得逆变器输出的功率与光伏阵列输出功率相比有短暂的滞后。光伏电池输出的电压能在光照变化时追踪  $V_{ref}$ ，由于  $V_{ref}$  一直有小幅度波动， $V_{pv}$  也一直有微小波动，但基本维持平稳。输出电流跟随电压变化。从图 9 中可以看出， $300 \text{ W/m}^2$  光强下的最大功率约为 170 W， $500 \text{ W/m}^2$  光强下的最大功率约为 260 W， $1000 \text{ W/m}^2$  光强下的最大功率约为 560 W。此光伏系统在光照强度突然变化时，其输出有功功率能快速跟踪相应光照强度下的最大功率，无功功率仅在光照变化时有小幅波动。

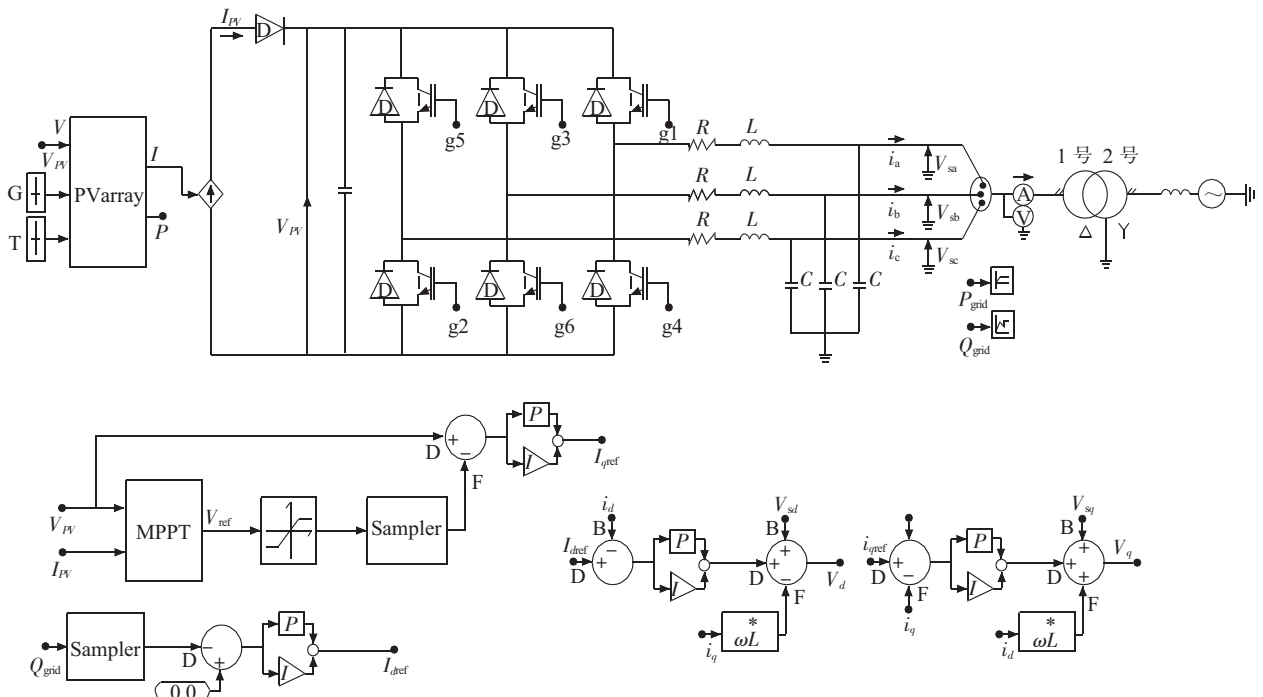


图 5 GCPS 仿真模型

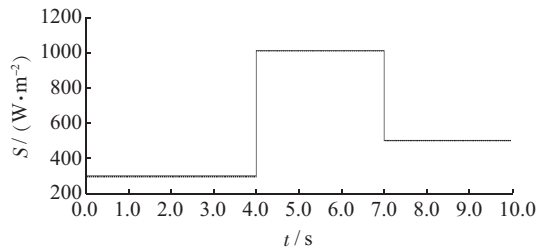


图6 光照强度

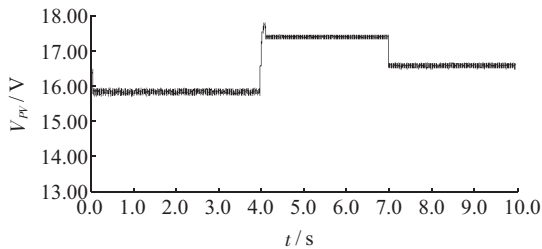


图7 电池输出电压

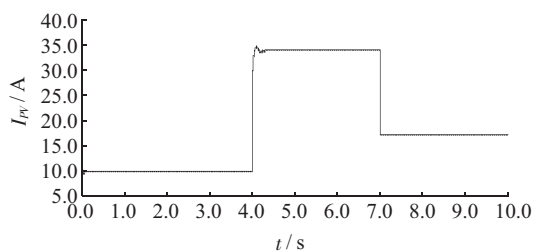


图8 电池输出电流

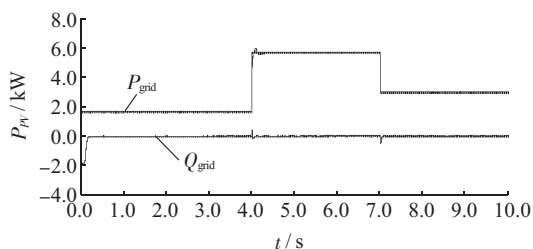


图9 电池输出功率

## 5 结束语

通过分析光伏电池内部原理及其等效电路, 建立其数学模型, 分析了光伏电池的输出特性, 应用 PSCAD 构建光伏电池并网的基本模型进行动态特性仿真分析。仿真结果表明: 光伏电池阵列模型输出基本与实际输出相似。输出电压及电流受光照强度和温度变化的影响, 但在任意温度和光照强度下都存在一个

最大功率输出点。应尽量使光伏电池阵列工作在该点, 这样才能提高光伏电池阵列的利用率。模型参数的设置方便快捷、仿真速度快、收敛性好。该模型的建立为光伏发电系统的仿真及各种控制方法的验证提供了较好的仿真激励源。

### 参考文献:

- [1] ARDESHNA NIKHIL K, CHOWDHURY BADRUL H. Supporting Islanded Microgrid Operations in the Presence of Intermittent Wind Generation [C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2010; 1-8.
- [2] LASSETER R, AKHIL A, MARNAY C, et al. The CERTS MicroGrid Concept [EB/OL]. [2009-04-10]. [http://www.pserc.org/cgi-pserc/getbig/researchdo/certsdocum0/certspubli/certsmicro\\_grid-whitepaper.pdf](http://www.pserc.org/cgi-pserc/getbig/researchdo/certsdocum0/certspubli/certsmicro_grid-whitepaper.pdf).
- [3] ZOKA Y, SASAKI H. An Interaction Problem of Distributed Generators Installed in a MicroGrid [C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, Hong Kong, China, 2004: 795-799.
- [4] HUSSEIN K H, MUTA I, HOSHINO T, et al. Maximum Photovoltaic Power Tracking: an Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric Conditions [J]. IEEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 1995, 142(1): 59-64.
- [5] 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.
- [6] XUE J H, YIN Z D, WU B B, et al. Design of PV Array Model Based On EMTDC/PSCAD [C]//Power and Energy Engineering Conference, APPEEC 2009, 2009: 1-5.
- [7] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
- [8] 蔡先武. 光伏并网系统中的最大功率点追踪控制 [J]. 电子工业专用设备, 2008(11): 48-52.
- [9] 董密, 罗安. 光伏并网发电系统中逆变器的设计与控制方法 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(20): 97-102.

### 作者简介

易桂平(1981), 男, 江西吉安人, 博士研究生, 从事电力电子技术在电力系统中的应用、微网电能质量方面的研究工作;  
胡仁杰(1962), 男, 江苏苏州人, 教授, 博士生导师, 从事光伏发电、电能质量管理及超级电容器储能方面的研究工作。

## Solar Photovoltaic Battery Modeling and Dynamic Characteristics Simulation

YI Guiping, HU Renjie

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The solar energy battery is the core part of photovoltaic generating system, so the photovoltaic battery attracts lots of researchers' attention. This paper analyzed operational characteristic of solar energy battery plate. Simulation models of photovoltaic cells and MPPT are built in PSCAD/EMTDC software. Simulation results show that the output power of photovoltaic cells can track maximum power point well in the condition of light intensity changes and can produce maximum power in different light conditions

**Key words:** photovoltaic array; PSCAD simulation; maximum power point