# 基于PSCAD的太阳能电池模型与MPPT算法的仿真与实现

李禹生，李伟令，李晓辉，冯祥伟，马明乐，王红庆

（平高集团有限公司，河南 平顶山 467001）

**摘要：目前太阳能光伏产业发展迅猛，了解和掌握太阳能光伏发电系统的模型以及结构特性显得尤为重要。为此，分析了太阳能光伏电池的理论模型与工程实用模型，利用PSCAD软件对两类模型进行仿真计算并对比结果，验证了模型的正确性。在此基础上，对最大功率点跟踪（MPPT）算法进行了研究，给出了基于电导增量法的MPPT算法的仿真实现。该结果对工程应用具有一定的指导意义。**

**关键字：光伏电池模型；光伏发电；MPPT算法；PSCAD/EMTDC**

## Simulation and realization of solar photovoltaic power generation system based on PSCAD

LI Yusheng, LI Weiling, LI Xiaohui, FENG Xiangwei, MA Mingle, WANG Hongqing

(Pinggao Group Co., Ltd., Pingdingshan 467001, China)

**Abstract:** At present, the rapid development of solar photovoltaic industry, it is particularly important to understand and master the solar photovoltaic power generation system model and structural characteristics. The theoretical model and practical model of solar photovoltaic cells are analyzed. The two types of models are simulated by PSCAD software, and the correctness of the model is verified by comparing the results. On this basis, the maximum power point tracking (MPPT) algorithm is studied, and the simulation of MPPT algorithm based on conductance increment method is given. The result has certain guiding significance to engineering application.

**Key words:** photovoltaic cell model; photovoltaic power generation; MPPT algorithm; PSCAD / EMTDC

## 0 引言

光伏发电作为一种清洁、持久和适用性强的太阳能利用方式，具有巨大的发展前景，但是光电转换效率是制约其发展的重要因素，一直以来研究人员致力于提高光伏发电效率。目前市场上光伏电池转换效率能够达到15%，使用寿命可达30年。光伏电池不仅转换效率低，且输出特性受外界环境的影响，当光照强度、环境温度以及负载发生变化时，其输出特性也会产生较大的变化[1]。光伏电池由于受外界因素（如温度、日照强度等）的影响较大，其输出具有明显的非线性。温度相同时，随着日照强度的增加，太阳能光伏电池的开路电压几乎不变，短路电流有所增加，最大输出功率也增加；当日照强度相同时，随着温度的升高，太阳能光伏电池的开路电压下降，短路电流有所



10#技术版.indd 17 2019/10/11 16:31

增加，最大输出功率减小。因此，在任何温度和日照强度下，太阳能电池板总有一个最大功率点，温度（或日照强度）不同，最大功率点位置也不同。因此，在光伏发电系统中要提高系统的整体效率，一个重要的途径就是实时调整光伏阵列模块的工作点，使之始终工作在最大功率点附近[2]，这一过程即为最大功率点跟踪（Maximum Power Point Tracking，MPPT）。它通过控制光伏电池的工作点，使其在任何环境下始终保持输出最大功率，从而提高光伏发电效率。

一般地，太阳能光伏发电系统输出功率经过MPPT算法后，再通过并网逆变器接入配电系统，将其电量上网[3]。

## 1 太阳能光伏电池模型的仿真与实现

### 1.1 太阳能光伏电池模型——标准物理模型

光伏电池的基本结构是一个半导体二极管，有光照时，光伏电池的输出特性类似于一个二极管，电流随电压呈指数变化。将光生电流$I_{ph}$看作一个恒流源，材料体电阻和P-N结交界区载流子的负荷以及接触电阻等效为串联内阻$R_s$，将边缘处的漏电流等效为并联内阻$R_{sh}$，可以得到光伏电池单二极管等效电路如图1所示。

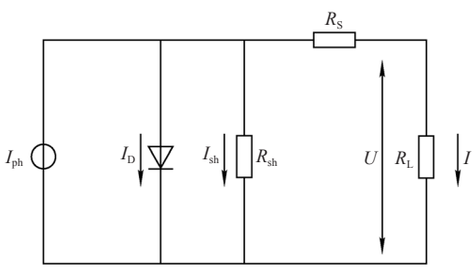


**图1 光伏电池单二极管模型**

**Fig. 1 Photovoltaic cell single diode model**

可以得到

$$I = I_{ph} - I_0\{\exp[\frac{q(U+IR_s)}{AkT}]-1\} - \frac{U+IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中，$I_{ph}$为光生电流；$I_0$为在无光照时光伏电池的饱和暗电流（反向饱和电流），A；$q$为电子电荷量，$1.6\times10^{-19}$C；$U$为光伏电池输出电压，V；$R_{sh}$为并联等效电阻，Ω；$R_s$为串联等效电阻，Ω；$k$为玻耳兹曼常数，$1.38\times10^{-23}$J/K；$T$为电池温度，K。

### 1.2 单个太阳能光伏电池模型——工程等效模型

工程等效模型与标准物理模型一样，进行两项近似，并定义如下：在开路状态下，$I$=0，$V$=$V_{oc}$；在最大功率点运行时，$I$=$I_m$，$U$=$U_m$。则得到如下简化后的伏安特性方程[4]，即

$$I = I_{sc} - C_1 I_{sc}[\exp(\frac{U}{C_2 U_{oc}})-1] \quad (2)$$

$$C_1 = (1-\frac{I_m}{I_{sc}})\exp(-\frac{U_m}{C_2 U_{oc}}) \quad (3)$$

$$C_2 = (\frac{U_m}{U_{oc}}-1)[\ln(1-\frac{I_m}{I_{sc}})]^{-1} \quad (4)$$

$$I_{sc} = I_{scr}(1+aDT)\frac{S}{S_r} \quad (5)$$

$$U_{oc} = U_{ocr}(1-cDT)\ln(e+bDS) \quad (6)$$

$$I_m = I_{mr}(1+aDT)\frac{S}{S_r} \quad (7)$$

$$U_m = U_{mr}(1-cDT)\ln(e+bDS) \quad (8)$$

$$DS = S - S_r \quad (9)$$

$$DT = T - T_r \quad (10)$$

类似地，将上述模型进行扩展，可以得到太阳能光伏电池阵列模型，即

$$I = n_p I_{sc} - n_p C_1 I_{sc}[\exp(\frac{U}{n_s C_2 U_{oc}})-1] \quad (11)$$

### 1.3 光伏电池模型仿真分析

下面分别以上述模型为基础，利用PSCAD/EMTDC软件进行仿真分析，以此验证上述模型分析的正确性。

#### 1.3.1 标准物理模型仿真

利用上述中的标准物理模型，采用如下单个光伏电池参数：$U_{ocr}$=0.606 V，$I_{scr}$=3.11 A，$U_{mr}$=0.472 V，$I_{mr}$=2.88 A；$k_i$为短路电流温度系数，取值为0.001 7（A/℃）；$S_r$=1 000 W/m$^2$；电池温度$T_r$=25 ℃。环境温度设置为30 ℃，日照强度为1 000 W/m$^2$。



10#技术版.indd 18 2019/10/11 16:31

在一定的温度和光照条件下，可以得到标准物理模型的输出电压－电流曲线、输出功率*P*的特性曲线，如图2、图3所示。

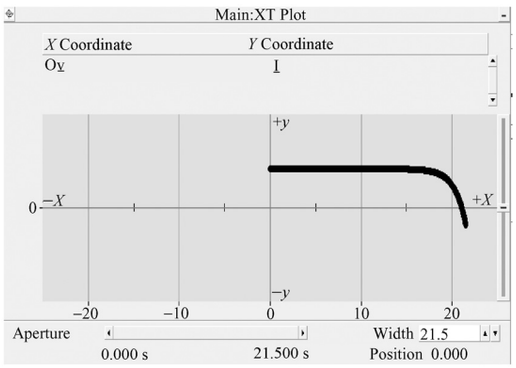


**图2　输出电压-电流曲线**

**Fig. 2 The curve of output voltage-current**

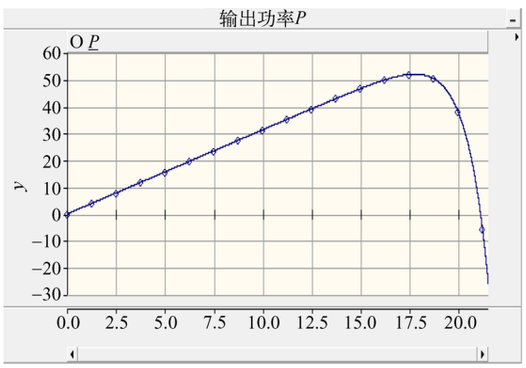


**图3　输出功率*P*的特性曲线**

**Fig. 3 The characteristic curve of the output power**

从图2、图3中可以得出，光伏电池在稳定后，当电压$U_m$=0.48 V、电流$I_m$=2.9 A时，电池输出功率达到最大，约为1.4 W。随着温度及光照强度的增加，光伏阵列的输出电压及功率呈线性上升趋势，但是当温度达到50 ℃、光照将近为20 W/m$^2$时，电压及功率开始下降。

1.3.2 工程等效模型仿真

利用工程等效模型，标准条件采用：$S_r$=1 000 W/m$^2$，$T_r$=25 ℃，e=2.718 28，补偿系数典型推荐值为：$a$=0.002 5/℃，$b$=0.000 5/(W/m$^2$)，$c$=0.002 88/℃。

初值：$n_s$=36，$n_p$=1，$U_{ocr}$=21.8/36=0.606 V，$I_{scr}$=3.11 A，$U_{mr}$=17/36=0.472 V，$I_{mr}$=2.88 A。

给定初始温度及光照条件，可以得到工程等效模型的输出电压－电流曲线、输出功率*P*的特性曲线，如图4、图5所示。

从图4、图5中可以得出，光伏电池在稳定

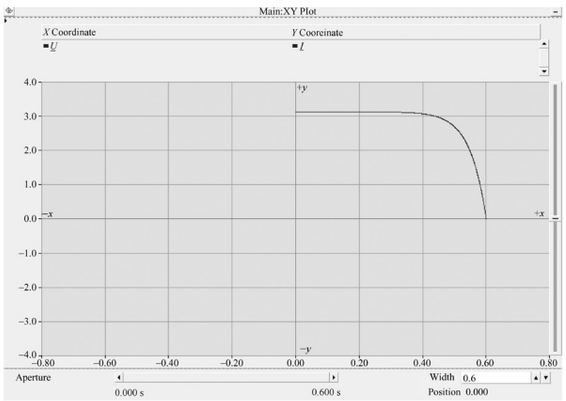


**图4　输出电压-电流曲线**

**Fig. 4 The curve of output voltage-current**

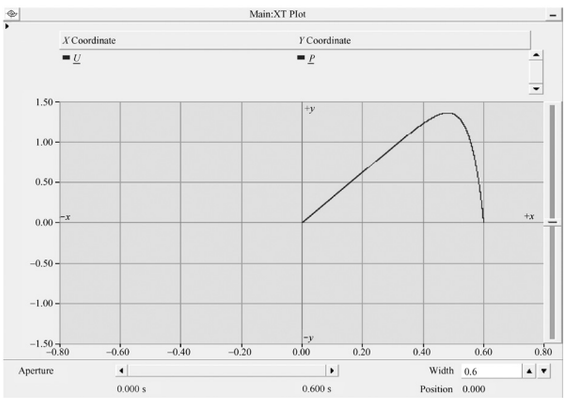


**图5　输出功率*P*的特性曲线**

**Fig. 5 The characteristic curve of the output power**

后，当电压$U_m$=0.46 V、电流$I_m$=3.15 A时，电池输出功率达到最大，约为1.45 W。随着温度及光照强度的增加，光伏阵列的输出电压及功率呈线性上升趋势；但是当温度达到50 ℃、光照将近为18 W/m$^2$时，电压及功率开始下降。

### 1.4　结论对比

对比两种模型仿真分析的结果可以看出，其光伏电池输出特性曲线类似，即随着温度及光照强度的增加，光伏阵列的输出电压及功率呈线性上升趋势，但是当达到一定程度时，电压及功率开始下降。两种模型彼此验证各自的正确性。



10#技术版.indd 19　　2019/10/11 16:31

## 2 MPPT算法的仿真与实现

### 2.1 MPPT算法理论分析

MPPT算法包括定电压法、扰动观察法、梯度法和电导增量法（PSCAD实现）等。其中，电导增量法的原理如图6所示。

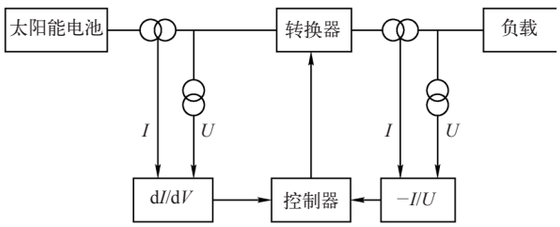


图6 电导增量法示意图

Fig. 6 Conducted incremental method diagram

该方法的基本出发点是由于$P=IU$，则在最大功率点处有$\mathrm{d}P/\mathrm{d}U=0$，可将其改写为

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}U}=\frac{\mathrm{d}(IU)}{\mathrm{d}U}=I+V\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}U}=0 \tag{12}$$

整理后得到

$$\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}U}=-\frac{I}{U} \tag{13}$$

式中，$\mathrm{d}I$为扰动前后测量到的电流差值；$\mathrm{d}V$为扰动前后测量到的电压差值。

因此，通过对光伏电池交流电导$\mathrm{d}I/\mathrm{d}V$和直流电导$I/V$的比较，就可以决定下一次变化的方向，当二者满足式（13）要求时，表示已经达到最大功率点，不再进行下一次扰动。电导增量法流程如图7所示。

### 2.2 MPPT算法仿真实现

通过上述理论分析搭建MPPT算法模型，对比模型的输入与输出可以看出前后光伏电池功率输出最大点的位置。采用光伏电池模型参数为：每个阵列中串联的组件数为22，每个阵列中并联的组件数为250，每个组件中串联的电池数为36，每个组件中并联的电池数为1。注意：每个电池的电压约为0.83 V，根据负载$R$的变化，电流为2.4~2.5 A。由此对阵列进行计算得出：$U_{oc}$=0.66 kV，$I_{sc}$=0.628 6 kA。算法仿真实现如图8所示，输出电压－电流－功率特性曲线如图9所示， 各个参量的变化曲线如图10所示。

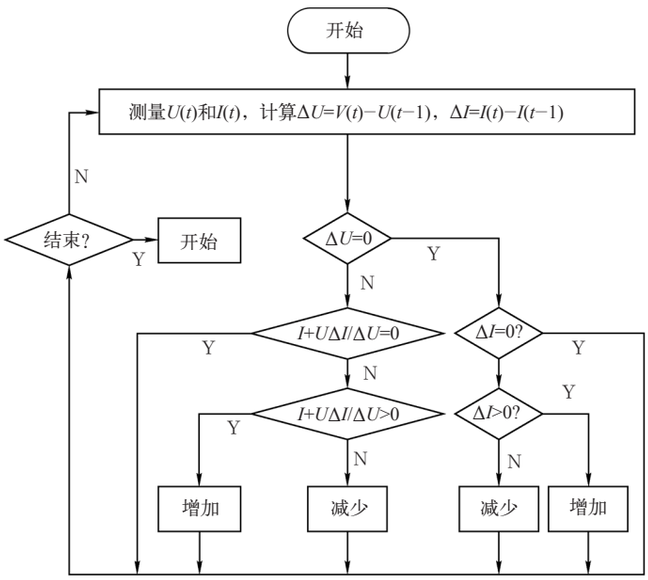


图7 电导增量法流程图

Fig. 7 Conductance increment method flow chart

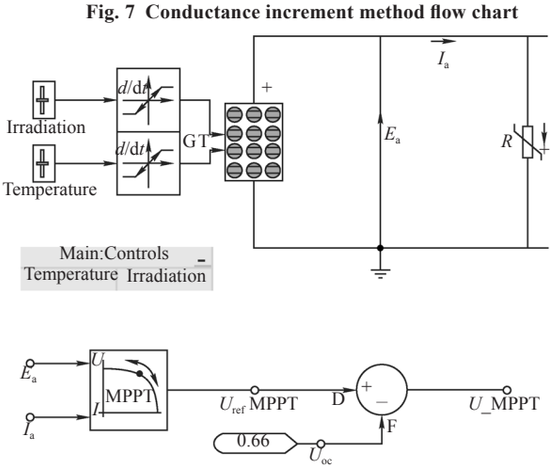


图8 MPPT算法实现

Fig. 8 Simulation of MPPT algorithm

从图10中可以看出，电压、电流仿真结果为：$U$=0.50~0.55 kV，$I$=0.626 9 kA，结果与理论分析的数值基本上是一致的。

## 3 结束语

本文针对光伏并网系统进行仿真研究，得出以下结论。

1）采用外特性等效方法模拟光伏电源，并进行理论与仿真研究，能正确反映光伏电源的工作状况，即随着温度及光照强度的增加，光伏阵列的输出电压及功率呈线性上升趋势，但



10#技术版.indd 20 2019/10/11 16:31

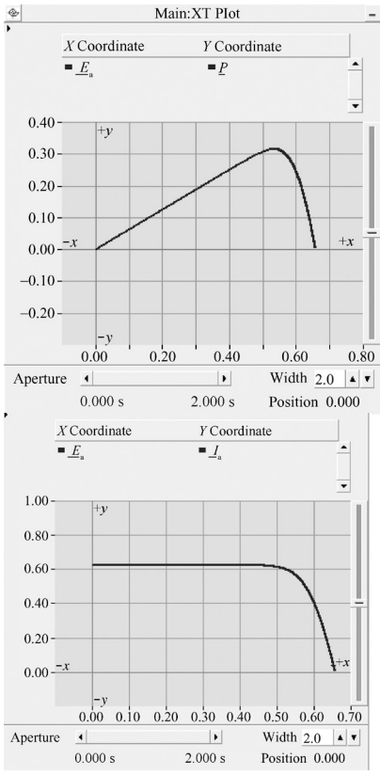


图9　输出电压-电流-功率特性曲线

**Fig. 9 The characteristic curve of output voltage - current - power**

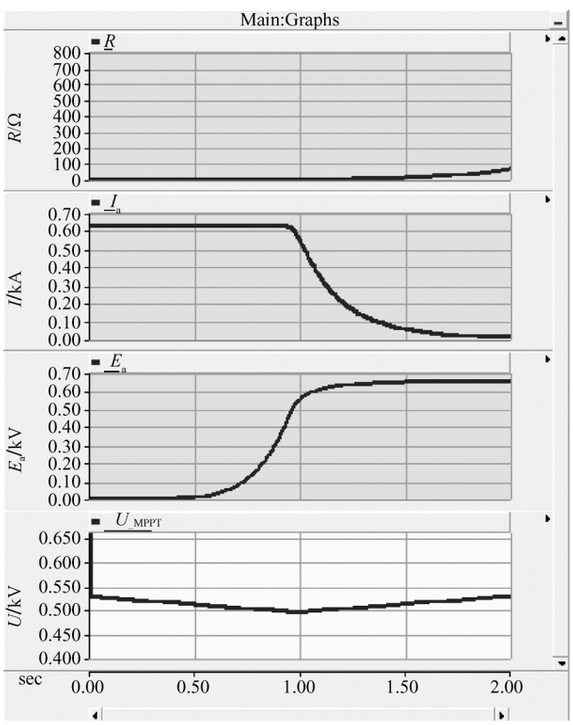


图10　各个参量的变化曲线

**Fig. 10 The variation curve of each parameter**

是当温度达到50℃、光照为18~20 W/m$^2$时，电压及功率开始下降。

2）基于电导增量法仿真模型的搭建与分析，能够克服测量和计算误差影响，使光伏电源稳定地工作在最大功率点（$U$=0.50~0.55 kV，$I$=0.6 kA）。

3）本文搭建的光伏发电并网系统，为研究大容量光伏对电网的影响及其相应的控制策略提供了有效的研究平台。

## 参考文献

[1] HUSSEIN K H，MUTA I，HOSHINO T，et al. Maximum photovoltaic power tracking：an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions[J]. IET Proceedings-Generation，Transmission and Distribution，1995，142(1)：59-64.

[2] 张兴，曹仁贤．太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M]．北京：机械工业出版社，2013.

[3] 孙自勇，宇航，严干贵．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 Ziyong，YU Hang，YAN Gangui．PSCAD simulation models for photovoltaic array and MPPT controller[J]．Power System Protection and Control，2009，37(19)：61-64.

[4] 丁明，刘盛，徐志成．光伏阵列改进优化设计方法与应用[J]．中国电机工程学报，2013，33(34)：2-8.
DING Ming， LIU Sheng，XU Zhicheng．An improved optimization design method for solar photovoltaic arrays and engineering application[J]．Proceedings of the CSEE，2013，33(34)：2-8.

## 作者简介

李禹生（1977－），男，硕士研究生，高级工程师，主要从事高压开关产品的研发工作。

(收稿日期：2019－03－25)EA

李禹生



10#技术版.indd 21　　2019/10/11 16:31