

# 分析太阳能电池及阵列中二极管的作用\*

陈 鸣, 毛 焱, 刘祝鸿  
(中山大学太阳能系统研究所, 广东 广州 510006)

**摘 要:** 具体分析二极管在太阳能电池、光伏组件和光伏阵列的作用。利用 Matlab 中 Simulink 仿真工具, 根据太阳能电池的仿真模型, 建立光伏组件和阵列的仿真模型, 分析计算二极管在太阳能电池、组件及阵列中的作用, 仿真分析计算具有不同导通电压的二极管对光伏组件和阵列输出功率的影响。计算结果表明正确选择二极管的导通电压对提高光伏组件和阵列输出功率是有益的。

**关键词:** 太阳能电池; 二极管; 光伏阵列; 作用

**中图分类号:** TM615    **文献标志码:** A    **文章编号:** 0529-6579(2011)04-0037-05

## Analysis of the Diode's Role in Solar Cell and Module

CHEN Ming, MAO Yan, LIU Zhuhong

(Institute of Solar Energy System, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** There is concrete analysis of the diode's role in solar cell, photovoltaic module and array. Using the Matlab and Simulink tools. According to the simulation model of solar cells, the simulation model of photovoltaic module and array is established, and the role of diodes in the solar cell, photovoltaic module and array is analysed and calculated. And then, the results from diodes which have different conduction voltage and different influence on the output power of photovoltaic module and array is simulated. Calculation results show that the correct choice of diode's conduction voltage is beneficial to improve the output power of photovoltaic module and array.

**Key words:** solar cell; diode; photovoltaic array; effect

随着全球气候变暖、污染问题日益严重, 从传统能源向可再生能源的转变势在必行。其中太阳能作为可再生能源的重要部分, 最近几年已经得到了很广泛的应用, 如何提高太阳能的利用效率成为研究热点之一。本文首先从晶体硅太阳能电池的等效电路图入手, 利用太阳能电池的内部结构、伏安特性和输出数学模型, 建立其等效电路图<sup>[1-4]</sup>, 再根据电路分析的知识求解出等效电路伏安特性的数学表达式<sup>[5-6]</sup>, 并建立太阳能电池的计算机仿真模型, 利用 Matlab 中 Simulink 仿真工具<sup>[7-8]</sup>, 建立光伏组件和阵列仿真模型, 分析二极管在太阳能电池、组件及阵列中的作用, 及其导通电压的大小对光伏应用效果的影响, 其分析结果具有较好的实践价值。

## 1 太阳能电池特性的仿真

太阳能电池发电的能量来源于太阳<sup>[9]</sup>, 当受光照射的光伏电池接上负载时, 光生电流流过负载, 并在负载的两端建立起端电压, 这时晶硅太阳能电池的等效电路图如图 1 所示, 太阳能电池通常用半导体制成的 p-n 结的光伏器件, 因而太阳能电池的基本特性和二极管相似, 它的伏安特性曲线是单调增长或单调下降的, 它同时是电流控制又是电压控制的。具有单调型非线性电阻的特性, 非线性电阻是单向性的, 当加在非线性电阻两端的电压方向不同时, 流过它的电流完全不同。

\* 收稿日期: 2010-10-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60876044)

作者简介: 陈鸣(1960年生), 男, 副教授; E-mail: chenming@mail.sysu.edu.cn

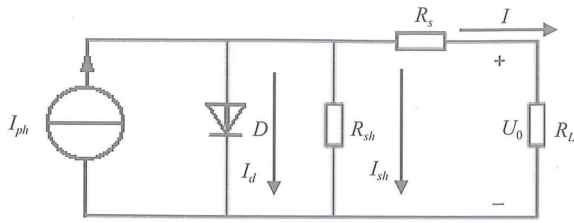


图 1 光伏电池等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit of solar cell

图 1 中太阳电池看作为稳定地光生电流  $I_{ph}$  的电流源, 与之并联的有一个处于正偏压下的二极管及一个并联电阻  $R_{sh}$ 。显然正向二极管的暗电流  $I_d$  和并联电阻的旁路电流  $I_{sh}$  都要靠  $I_{ph}$  来提供, 剩余的电流经过一个串联电阻  $R_s$  流出太阳电池而进入负载  $R_L$ 。由图 1 可得太阳电池输出电流的表达式为

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

$$I_d = I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(U_0 + IR_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} \quad (2)$$

$$I_{sh} = \frac{U_0 + IR_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

将式 (2)、(3) 代入 (1) 式有

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(U_0 + IR_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{U_0 + IR_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

式中,  $I_0$  为二极管反向饱和电流, A;  $U_0$  为输出电压, V;  $q$  是电子电荷, 为  $1.6 \times 10^{-19}$  C;  $k$  为玻尔兹曼常数, 为  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K;  $T$  为热力学温度, K;  $A$  是 p-n 结的理想因子, 当温度  $T = 300$  K 时, 取值 2.56。

利用 Simulink 建立太阳电池模型并对  $1000 \text{ W/m}^2$  的光照强度下的太阳电池进行仿真<sup>[10]</sup>, 由此得到单元太阳电池特性曲线如图 2, 从太阳电池特性曲线中可以看出, 太阳电池是一种非线性直流电源, 从负载端看太阳电池具有电流源的特性即可以短路, 也具有电压源的特性即可以开路, 其动态电阻是电压对电流的导数, 对不同日照情况每条曲线都存在一个最大输出功率点, 这个功率点对应唯一的输出电压和电流。硅太阳电池的工作点是太阳电池  $V-I$  曲线与负载特性曲线的交点, 负载特性曲线为

$$I = U_0/R_L \quad (5)$$

最大功率跟踪就是改变负载电阻从太阳电池电源中获得最大功率<sup>[11-12]</sup>。负载电阻的改变可以通过 PWM 控制技术实现, 这样就实现了最大功率点的

跟踪控制, 从  $V-I$  曲线可得最佳工作电压和工作电流, 此时的负载电阻为

$$R_L = R_{eq} = U_{ms}/I_{ms} \quad (6)$$

式中,  $U_{ms}$  为最佳工作电压,  $I_{ms}$  为最佳工作电流,  $R_{eq}$  为太阳电池的等效匹配电阻。但是值得注意的是硅太阳电池具有非线性特性, 即使相同的太阳电池, 在不同的光强照射下, 它的等效匹配电阻也是不同的, 当光照强度改变时, 其端口的等效匹配电阻就发生变化, 为了获得最大的输出功率, 必须通过改变负载电阻以匹配。光照强度对晶硅太阳电池最大功率点处的电压  $U_{ms}$  影响不大<sup>[13]</sup>, 但是流过负载的电流却随着光强度的增加而大幅增加, 因此最佳匹配等效电阻减小。具有近似反比例函数关系。

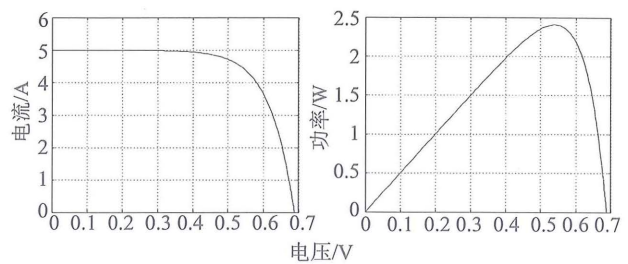


图 2 太阳电池特性曲线

Fig. 2 The characteristic curve of solar cell

因太阳电池是由 p-n 将光能转化电能, 其并联二极管  $D$  就有势垒电压, 这个电压影响二极管  $D$  的导通电压, 对其开路电压是有影响的, 同时二极管  $D$  的导通电压的大小可以确定暗电流  $I_d$  大小, 当光生电流  $I_{ph}$  的数值一定时, 也确定太阳电池的输出电流的大小, 进而影响输出功率。

## 2 太阳电池组件特性的仿真

太阳电池是光电转换的最小单元, 一般不能做电源使用, 将太阳电池单元进行串、并联并封装后就成为太阳电池组件, 由 72 个单元电池串联组成一块组件, 这时组件的并联电阻和串联电阻  $R_s$  是单元电池的 72 倍, 并联二极管  $D$  的导通电压也提高了 72 倍。图 3 是利用单元电池封装形成光伏组件的仿真模型, 仿真结果如图 4, 这时组件的等效内阻与单元太阳电池相比有所增加, 要获得最大功率, 最佳负载电阻也需相应增加。

当组件没有反向并联旁路二极管时, 假设其中有部分单元太阳电池被遮挡, 其光生电流源的数值减少, 而其他单元太阳电池的光生电流源的数值没有变化, 使整个串联支路中的短路电流下降到接近被遮挡单元太阳电池的电流, 使这条支路的总功率

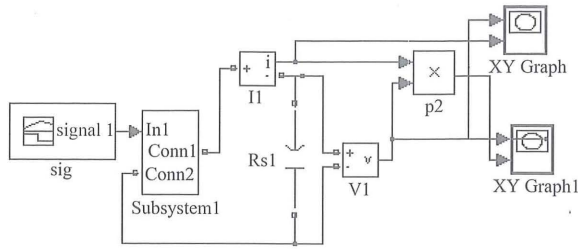


图 3 组件仿真模型

Fig. 3 Simulation model of PV module

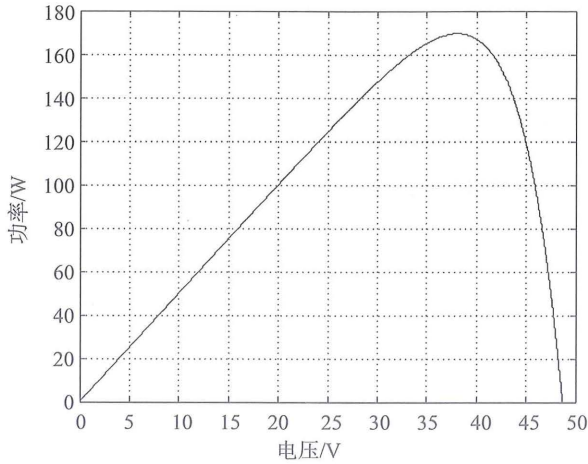


图 4 组件的 V-P 曲线

Fig. 4 The V-P curve of PV module

下降许多，不能简单认为总功率的损失只有该单元太阳能电池的电功率，这是因为短路电流是在端电压等于零时得到的，由于被遮挡单元太阳能电池的光生电流源无法提供原来的电流，在这条支路的电流就有一部分流经并联电阻，使并联电阻上的电压为负数，在整个回路中满足基尔霍夫电压定律，这样未被遮挡单元太阳能电池的并联电阻上的电压数值提高且为正数，使其并联在光生电流源边的二极管 D 导通能力增强，并联电阻的正电压数值越大，流过二极管 D 的暗电流越大，分流了未被遮挡光生电流源的电流，这条支路的电流最后达到动态平衡，接近被遮挡单元太阳能电池的光生电流源数值。单元太阳能电池被遮挡后的光强越弱，其他单元太阳能电池的二极管 D 分流能力越强。通过仿真计算，验证了上述的理论分析。

以 72 个单元太阳能电池串联组成一块组件为例进行计算，假设有 18 个单元电池被遮挡，其余光照强度不变，表 1 是没有旁路二极管时的仿真结果，表 2、表 3 是有旁路二极管时的仿真结果，不同点在于其导通门限电压分别为 0.6 和 0.2 V。

从表 1、表 2、表 3 可以看出反向并联旁路二

极管所起的作用，当出现遮挡时，其短路电流没有发生变化，而最大输出功率有点变化，特别是选择导通电压低的二极管，可以提高其输出功率；由于旁路二极管的分流作用，使一部分的电流不经过太阳能电池的并联电阻和二极管 D，不会产生功耗，太阳能电池的工作温度不会因遮挡而上升。图 5 是组件有反向并联旁路二极管的特性曲线。图 5 中的 a、b、c 分别表示光照强度为 1 000、800、600 W/m<sup>2</sup>，由于在 V-I 曲线中出现两个拐点，则在 V-P 曲线中出现两个峰值，这是因为在组件端电压接近零时，被遮挡部分太阳能电池的端电压为负，旁路二极管开始工作，为其它光生电流源提供通路，这样整个支路的电流是以未遮挡部分的太阳能电池的 V-I 曲线变化，随着组件端电压的提高，旁路二极管二端电压逐渐减小，旁路二极管的分流能力下降，由于任何种类的二极管都具有导通电压，这个电压在电路中起着钳位作用，使其它未被遮挡的太阳能电池的端电压上升，结果流经二极管 D 的暗电流增高，致使组件的输出电流减小，一旦旁路二极管端电压数值小于导通电压，电压迅速为正，旁路二极管停止工作，这时相当于没有旁路二极管时的工作状态，支

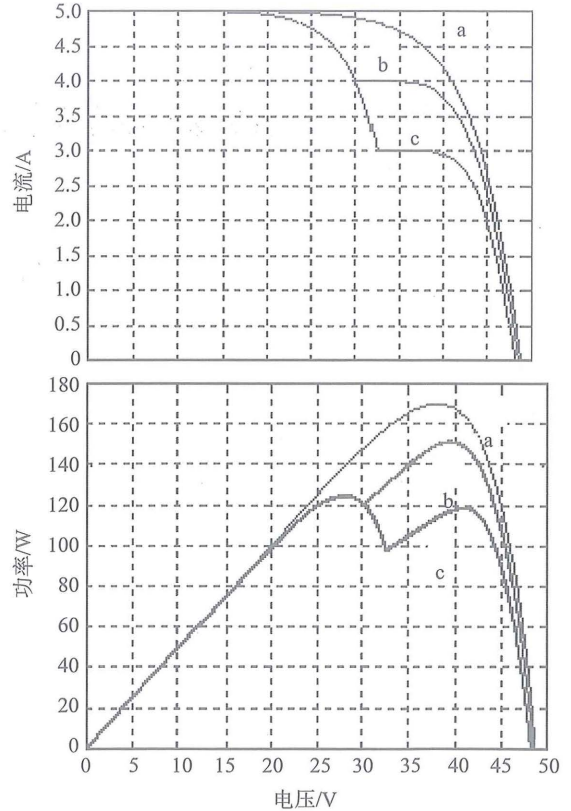


图 5 组件的 V-I, V-P 曲线

Fig. 5 The V-I and V-P curve of PV module with different light intensity

路电流就移到以遮挡部分的太阳能电池的  $V-I$  曲线, 所以在  $V-I$  曲线中出现两个拐点。在遮挡严重的情况下, 如果旁路二极管的导通电压低, 引起旁路二

极管工作时间较长, 使组件输出电流大, 从而形成组件输出功率比导通电压的高旁路二极管组件输出功率略大一些。

表 1 无二极管仿真计算结果

Table 1 Simulation results without diode

光照强度/ $(W \cdot m^{-2})$	短路电流/A	并联电阻端电压/V		组件端电压/V	组件功率/W	
		被遮挡	未遮挡		仿真值	计算值
1 000	5	0.098	0.285	0.3	169.7	169.7
800	4.001	-30.61	30.93	0.017	151.1	161.2
600	3.001	-33.06	33.35	0.06	118.75	152.73

表 2 有二极管仿真计算结果 (导通电压 0.6 V)

Table 2 Simulation results with diodes ( $V_{on} = 0.6 V$ )

光照强度/ $(W/m^{-2})$	短路电流/A	并联电阻端电压/V		组件端电压/V	组件功率/W	
		被遮挡	未遮挡		仿真值	计算值
1 000	5	0.098	0.285	0.3	169.7	169.7
800	5	-0.54	0.98	0.093	151.1	161.2
600	5	-0.54	0.95	0.057	124.58	152.73

表 3 有二极管仿真计算结果 (导通电压 0.2 V)

Table 3 Simulation results with diodes ( $V_{on} = 0.2 V$ )

光照强度/ $(W/m^{-2})$	短路电流/A	并联电阻端电压/V		组件端电压/V	组件功率/W	
		被遮挡	未遮挡		仿真值	计算值
1 000	5	0.116	0.345	0.078	169.7	169.7
800	5	-0.124	0.49	0.063	151.1	161.2
600	5	-0.124	0.57	0.079	126.36	152.73

### 3 光伏阵列的仿真

每块组件中都反向并联二个二极管, 二极管将组件中单元电池均匀分成二部分, 每部分串联的单元电池的正负极反向并接一个二极管, 再串联组成组件, 二极管反向串联桥式并接在这个组件中, 用这些组件串联可以组成适合逆变器端口电压的光伏阵列, 如果在这条支路中有一个二极管不能正常工作, 这时的现象等同与没有反向并联旁路二极管的单体电池串联情况, 当二极管都可以正常工作时, 二极管不影响组件的端电压和电流; 如出现热斑现

象<sup>[14]</sup>, 并联旁路二极管可以为一部分电流提供通路, 使支路电流没有降低太多, 保证组件的输出功率降低不大。由于每个光伏阵列的功率一般有几千瓦到几百千瓦, 一个串联支路满足不了, 有几个或十几个支路并联, 每个支路串联一个二极管或没有串联二极管并联送至逆变器的输入端口, 以二条支路为例进行仿真计算, 每条支路串联 9 块组件, 组件特性同上, 并考虑支路 II 中的一块组件被遮挡, 其余的没被遮挡, 表 4、表 5 是阵列输出功率最大时的仿真结果。

表 4 支路中串联二极管 (导通电压为 0.2 V)

Table 4 The results with by-pass diodes ( $V_{on} = 0.2 V$ )

光照强度/ $(W \cdot m^{-2})$	支路 I 二极管 损耗/W	支路 II 二极管 损耗/W	支路 I 电流/A	支路 II 电流/A	工作电压/V	工作电流/A	最大功率/W
800	0.874 6	0.808 4	4.281	3.963	354.0	8.245	2 919
600	0.961 9	0.862 8	4.699	4.225	317.3	8.924	2 832

表5 支路中无串联二极管  
Table 5 The results without by-pass diodes

光照强度/ ( $W \cdot m^{-2}$ )	支路 I 二极管 损耗/W	支路 II 二极管 损耗/W	支路 I 电流/A	支路 II 电流/A	工作电压/V	工作电流/A	最大功率/W
1 000	0	0	4.470	4.470	341.4	8.939	3 052
800	0	0	4.283	3.964	354.1	8.247	2 920
600	0	0	4.697	4.218	317.8	8.915	2 833

从表4可以看出在支路中串联二极管引起附加损耗,并且当二极管的导通电压提高损耗会随之增加,但会对支路的工作电压起到钳位作用,当出现光线遮挡时,支路I、支路II的工作电流不同,互不影响。从表5得到由于没有二极管的损耗,阵列总输出功率比阵列中串联二极管的总输出功率高,由于光强度对硅太阳能电池最大功率点处的电压影响不大,因而对阵列的最佳工作电压影响较小,支路I、支路II的工作电流也是不同的,在最大输出功率工作点处,支路I、支路II联合向负载提供功率,但需要说明的是,在阵列的端电压接近开路电压时,支路II的电流为负,等于支路I的电流,在两条支路中形成了回路,也就是说,支路II分流了支路I的电流,减小了向负载提供电流,引起回路中的附加损耗,并且这种现象随着光强度的减弱而加重。

#### 4 结 论

通过仿真计算和分析可知,在太阳能电池模型中的二极管D是起到分流光生电流的作用,二极管的导通电压的大小可以影响太阳能电池输出电流,提高二极管D的导通电压,可以减小太阳能电池的暗电流,提高太阳能电池的输出功率,而在光伏组件中反向并联旁路二极管作用是可以减小热斑现象对光伏组件影响,选择导通电压低的旁路二极管可以提高组件或光伏阵列的输出功率。在组成光伏阵列的支路中串联二极管可以起到电压钳位作用,但能引起附加损耗;而在阵列支路中没有串联二极管,在出现光斑现象严重时,可能出现支路间的回路电流,增加了电路的附加损耗。由于二极管导通时有损耗,建议使用导通电压低的二极管。

#### 参考文献:

- [1] KAJIHARA A, HARAKAWA T. Model of photovoltaic cell circuits under partial shading[C]//IEEE International Conference on Industrial Technology. [S. l.]: [s. n.], 2005: 866 - 870.
- [2] MEHMET A, MOHAMMED A A A. A new model for I-V characteristic of solar cell generators and its applications [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1995, 37(2): 123 - 132.
- [3] 陈维,沈辉.影响平板式光伏系统跟踪效果因素研究[J].中山大学学报:自然科学版,2007,46(6):34 - 38
- [4] NGUYEN D D, LEHMAN B. Modeling and simulation of solar PV arrays under changing illumination conditions [C]//IEEE Workshops on Computer in Power Electronics. [S. l.]: [s. n.], 2006: 295 - 299.
- [5] 吴海涛,孔娟,夏东伟.基 MATLAB/Simulink 的光伏电池建模与仿真[J].青岛大学学报:工程技术版,2006, 21(4):74 - 77.
- [6] 邱关源.电路[M].北京:高等教育出版社,2004,94 - 403.
- [7] 黄忠霖,黄京.电力电子技术的 MATLAB 实践[M].北京:国防工业出版社,2009,133 - 191.
- [8] 洪乃刚.电力电子和电力拖动控制系统的 MATLAB 仿真[M].北京:机械工业出版社,2006,58 - 109.
- [9] 杨刚,陈鸣,陈卓武.固定式光伏阵列最佳倾角的 CAD 计算方法[J].中山大学学报:自然科学版,2008,47 (S2):165 - 169
- [10] 沈辉,曾祖勤.太阳能光伏发电技术[M].北京:化学工业出版社,2008:21 - 104.
- [11] 杨刚,陈鸣.硅太阳能电池特性及其最大功率点跟踪的仿真[J].山东大学学报:工学版,2008,39(1):122 - 126.
- [12] MUTOH N, OHNO M, INOUE T. A method for MPPT control while searching for parameters corresponding to weather conditions for PV generation systems[J]. Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1055 - 1065.
- [13] 王长贵,王斯成.太阳能光伏发电实用技术[M].北京:化学工业出版社,2005:35 - 40.
- [14] 李大勇,陈如亮,崔岩,等.基于 Pspice 的光伏组件热斑现象仿真[J].哈尔滨工业大学学报,2006,38 (11):1888 - 1892.