

# 局部阴影下光伏组件的 Matlab/Simulink 仿真模拟与特性分析

赵泰祥, 廖 华, 马 逊, 李景天, 殷俊传, 刘祖明

(云南师范大学太阳能研究所, 云南省农村能源工程重点实验室, 昆明 650500)

**摘要:** 针对局部阴影遮挡条件对光伏组件输出特性的影响进行仿真分析。建立改进的双二极管太阳电池数学模型, 模型中二极管  $D_2$  的反向饱和电流  $I_{02}$  采用电池材料自身性能参数进行计算, 模型除二极管的理想因子  $n_1$ 、 $n_2$  是经验值, 无需估计任何值。仿真模型以建立的双二极管太阳电池数学模型为基础, 通过 Matlab/Simulink 对双二极管太阳电池进行建模。以双二极管太阳电池模型为基础, 建立适用于局部阴影下光伏组件的电气模型, 从而避免构建光伏组件过程中繁杂的数学建模工作。利用该模型对不同局部阴影条件下的太阳电池和光伏组件进行仿真模拟, 并对仿真数据进行对比分析。分析结果表明, 局部阴影的数量和分布均匀性不同, 对光伏组件输出特性的影响也有所不同。

**关键词:** Matlab/Simulink; 局部阴影; 光伏组件; 输出特性。

**中图分类号:** O325/TK79      **文献标识码:** A

## 0 引言

光伏发电在可再生能源的开发利用中, 得到广泛的研究和应用。光伏组件的  $I-V$  曲线和  $P-V$  曲线是由辐照度、环境温度和太阳电池参数等影响的非线性函数。因此, 在光伏发电系统中, 均需要对光伏阵列进行最大功率点跟踪控制, 使之始终保持最大功率输出。当光照均匀时, 光伏组件的输出特性曲线与太阳电池的特性曲线一致, 功率曲线存在唯一峰值。但当有高大建筑物、树木等障碍物时<sup>[1]</sup>, 光伏组件所受光照不再均匀, 从而产生局部阴影问题, 功率曲线有多个峰值<sup>[2,3]</sup>。因此, 有必要建立局部阴影条件下光伏组件模型, 仿真并分析其输出特性。目前, 国内外学者已提出太阳电池、光伏单串阵列及光伏阵列的模型<sup>[4-6]</sup>并对光伏阵列输出特性进行总结, 但现有模型在构建仿真模型的过程中需进行繁杂的数学建模。

本文以太阳电池的数学模型为基础, 结合 Matlab/Simulink 中的电力电子模块<sup>[7]</sup>, 采用模块化的方式构建光伏组件仿真模型, 避免构建光伏组

件模型过程中繁杂的数学建模工作。并构建和分析光伏组件在局部阴影下的仿真模型和输出特性。

## 1 太阳电池建模

目前, 太阳电池模型主要有单二极管模型和双二极管模型 2 种。单二极管模型有 5 个参数, 数学模型简单、计算效率较高, 但在低照度和高温的情况下在开路电压附近的输出精度较差。双二极管模型有 7 个参数, 虽然计算量较大, 但克服其他模型在高温和低辐照度的情况下精度不高的缺点<sup>[8]</sup>。因此本文选用双二极管模型, 并利用获得的参数对模型进行改进, 建立仿真模型。

### 1.1 太阳电池双二极管模型

基于双二极管的电池模型如图 1 所示。增加的二极管  $D_2$ , 用来等效半导体耗尽层中由于能量的激发可能产生电子的恢复运动, 使模型可更精确地描述太阳电池的漏电流特性。当太阳电池处于复杂光照环境下(例如阴影情况), 其漏电流特性直接影响光伏阵列输出特性, 该模型更好地描述了太阳

收稿日期: 2017-06-02

基金项目: 国家自然科学基金(51367019)

通信作者: 廖 华(1964—), 男, 博士、研究员, 主要从事光伏发电系统应用方面研究。1030911097@qq.com

电池的暗特性<sup>[9]</sup>。

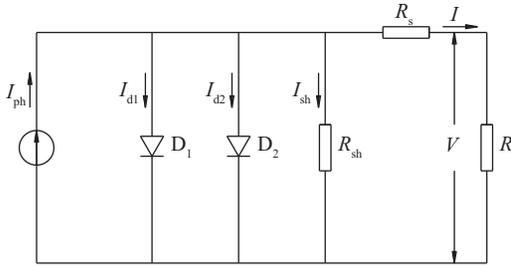


图1 太阳电池双二极管模型等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of a double diode model of a solar cell

在双二极管模型中,太阳电池的输出电流表达式为:

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{n_1 V_t}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{n_2 V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中,  $I_{ph}$  —— 太阳电池光生电流, A;  $R_s$  —— 太阳电池串联电阻,  $\Omega$ ;  $R_{sh}$  —— 太阳能电池并联电阻,  $\Omega$ ;  $I$  —— 太阳电池的输出电流, A;  $V$  —— 太阳电池的输出电压, V;  $n_1$ 、 $n_2$  —— 二极管  $D_1$ 、 $D_2$  的理想因子;  $I_{01}$ 、 $I_{02}$  —— 二极管  $D_1$ 、 $D_2$  反向饱和电流, A;  $V_t$  —— 太阳电池热电压,  $V_t = \frac{kT}{q}$ , V;  $q$  为电荷常数,  $1.602 \times 10^{-19}$  C;  $k$  为玻耳兹曼常数,  $1.381 \times 10^{-23}$  J/K;  $T$  为太阳电池温度, K。

## 1.2 模型参数提取

二极管的理想因子  $n_1$ 、 $n_2$  通常是经验值。基于肖克利的扩散电流理论,  $n_1$  必须是统一的整数,  $n_2$  的值则可灵活选择。但在实际情况下,为减少计算的复杂性,理想因子通常近似取  $n_1 = 1$ ,  $n_2 = 2$  进行计算<sup>[10]</sup>。

将开路点  $I = 0$ ,  $V = V_{oc}$  代入式(1)得:

$$I_{ph} = I_{01} \left[ \exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right) - 1 \right] + I_{02} \left[ \exp\left(\frac{V_{oc}}{2V_t}\right) - 1 \right] + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (2)$$

将短路点  $I = I_{sc}$ ,  $V = 0$  代入式(1)得:

$$I_{sc} = I_{ph} - I_{01} \left[ \exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{V_t}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[ \exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{2V_t}\right) - 1 \right] - \frac{I_{sc} R_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

将最大功率点  $I = I_m$ ,  $V = V_m$  代入式(1)得:

$$I_m = I_{ph} - I_{01} \left[ \exp\left(\frac{V_m + I_m R_s}{V_t}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[ \exp\left(\frac{V_m + I_m R_s}{2V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V_m + I_m R_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

将式(2)代入式(3)和式(4)得:

$$I_{sc} \left( 1 - \frac{R_s}{R_{sh}} \right) = I_{01} \left[ \exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right) - \exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{V_t}\right) \right] + I_{02} \left[ \exp\left(\frac{V_{oc}}{2V_t}\right) - \exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{2V_t}\right) \right] + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (5)$$

$$I_m \left( 1 - \frac{R_s}{R_{sh}} \right) = I_{01} \left[ \exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right) - \exp\left(\frac{V_m + I_m R_s}{V_t}\right) \right] + I_{02} \left[ \exp\left(\frac{V_{oc}}{2V_t}\right) - \exp\left(\frac{V_m + I_m R_s}{2V_t}\right) \right] + \frac{V_{oc} - V_m}{R_{sh}} \quad (6)$$

因  $R_s \ll R_{sh}$ ,  $\exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right) \gg \exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{V_t}\right)$  且  $\exp\left(\frac{V_{oc}}{2V_t}\right) \gg \exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{2V_t}\right)$ <sup>[11]</sup>, 所以式(5)和式(6)可整理为:

$$I_{sc} = I_{01} \exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right) + I_{02} \exp\left(\frac{V_{oc}}{2V_t}\right) + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (7)$$

$$I_m = I_{01} \left[ \exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right) - \exp\left(\frac{V_m + I_m R_s}{V_t}\right) \right] + I_{02} \left[ \exp\left(\frac{V_{oc}}{2V_t}\right) - \exp\left(\frac{V_m + I_m R_s}{2V_t}\right) \right] + \frac{V_{oc} - V_m}{R_{sh}} \quad (8)$$

通过式(7)和式(8),可得到  $I_{01}$ 、 $I_{02}$  的表达式:

$$I_{01} = \frac{\left( I_{sc} - \frac{V_m}{R_{sh}} \right) - I_m - \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}{\exp\left(\frac{V_m + I_m R_s}{2V_t}\right) - \exp\left(\frac{V_{oc}}{2V_t}\right)}}{\exp\left(\frac{V_m + I_m R_s}{2V_t}\right) - \exp\left(\frac{V_{oc}}{2V_t}\right)} \quad (9)$$

$$I_{02} = \frac{\left( I_{sc} - \frac{V_m}{R_{sh}} \right) - I_m - \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}{\exp\left(\frac{V_m + I_m R_s}{V_t}\right) - \exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right)}}{\exp\left(\frac{V_m + I_m R_s}{V_t}\right) - \exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right)} \quad (10)$$

因为  $I_{sc} \gg \frac{V_m}{R_{sh}}$ ,  $I_{sc} \gg \frac{V_{oc}}{R_{sh}}$ <sup>[12]</sup>, 所以式(9)和式(10)可

写为:

$$I_{01} = \frac{(I_{sc} - I_m) \exp\left(-\frac{V_m + I_m R_s}{2V_t}\right) - I_{sc} \exp\left(-\frac{V_{oc}}{2V_t}\right)}{\exp\left(\frac{V_m + I_m R_s}{2V_t}\right) - \exp\left(\frac{V_{oc}}{2V_t}\right)} \quad (11)$$

$$I_{02} = \frac{(I_{sc} - I_m) \exp\left(-\frac{V_m + I_m R_s}{V_t}\right) - I_{sc} \exp\left(-\frac{V_{oc}}{V_t}\right)}{\exp\left(-\frac{V_m + I_m R_s}{2V_t}\right) - \exp\left(-\frac{V_{oc}}{2V_t}\right)} \quad (12)$$

对于  $I_{02}$ , 可通过式(13)求得:

$$I_{02} = \frac{qn_i X_D}{2\tau} \quad (13)$$

式中,  $q$ ——电荷常数,  $q = 1.602 \times 10^{-19}$  C;  $n_i$ ——本征载流子浓度, 以硅为例,  $n_i = 1.02 \times 10^{10}$  cm<sup>-3</sup>;  $X_D$ ——势垒区宽度,  $X_D = 0.5$  mm;  $\tau$ ——载流子的平均自由时间<sup>[13]</sup>,  $\tau = 10$  ms。

令  $x = \exp\left(-\frac{V_m + I_m R_s}{2V_t}\right)$ , 则可得  $\exp\left(-\frac{V_m + I_m R_s}{V_t}\right) = x^2$ 。将上述条件代入到式(12)并整理得:

$$(I_{sc} - I_m)x^2 - I_{02}x + I_{02} \exp\left(-\frac{V_{oc}}{2V_t}\right) - I_{sc} \exp\left(-\frac{V_{oc}}{V_t}\right) = 0 \quad (14)$$

式(14)可看作二元一次方程, 因此, 可用求根公式求得  $x$  的解:

$$x = \frac{I_{02} + \sqrt{I_{02}^2 - 4(I_{sc} - I_m) \left[ I_{02} \exp\left(-\frac{V_{oc}}{2V_t}\right) - I_{sc} \exp\left(-\frac{V_{oc}}{V_t}\right) \right]}}{2(I_{sc} - I_m)} \quad (15)$$

因  $x = \exp\left(-\frac{V_m + I_m R_s}{2V_t}\right)$ , 所以可求  $R_s$ :

$$R_s = -\frac{V_m + 2V_t \ln x}{I_m} \quad (16)$$

将公式(16)的结果代入式(11), 可求得  $I_{01}$  的值。

由式(7)可得式(17):

$$R_{sh} = \frac{V_{oc}}{I_{sc} - I_{01} \exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right) - I_{02} \exp\left(\frac{V_{oc}}{2V_t}\right)} \quad (17)$$

得到在标准条件下的全部未知参数  $I_{ph}$ 、 $I_{01}$ 、 $I_{02}$ 、 $R_s$ 、 $R_{sh}$  的表达式。

### 1.3 全工况条件下参数的修正

当光伏阵列所处工况发生变化时, 所求解的 7 个参数也会相应发生变化, 文献[14]中的单二极管五参数模型在不同光强和温度下的参数修正, 提出了对参数  $I_{ph}$ 、 $I_{01}$ 、 $I_{02}$ 、 $R_s$ 、 $R_{sh}$ 、 $V_t$  的修正模型:

$$V_t = V_{t,ref} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right) \quad (18)$$

$$I_{ph} = \frac{S}{S_{ref}} [I_{ph,ref} - \alpha(T - T_{ref})] \quad (19)$$

$$I_{01,2} = I_{01,2,ref} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp\left[ \frac{E_g}{V_{t,ref}} \left( 1 - \frac{T_{ref}}{T} \right) \right] \quad (20)$$

$$R_{sh} = R_{sh,ref} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right) \quad (21)$$

$$R_s = R_{s,ref} \quad (22)$$

式中,  $\alpha$ ——短路电流温度系数, A/K;  $E_g$ ——材料的能带间隙; 标准测试温度  $T_{ref} = 298$  K, 标准辐照度  $S_{ref} = 1000$  W/m<sup>2</sup>, 可表达为<sup>[15]</sup>:

$$E_g = E_{g,ref} [1 - 0.0002677(T - T_{ref})] \quad (23)$$

对于硅电池标准条件下的能带间隙  $E_{g,ref} = 1.121$  eV。

将修正之后的参数代入式(1)中, 可求解不同负载电压  $V$  下所对应的输出电流  $I$ 。

## 2 光伏组件的建模分析

### 2.1 太阳电池仿真模型

基于上述数学模型, 本文在 Matlab 的 Simulink 环境中建立双二极管太阳电池模型的仿真模块。电池的参数  $I_{sc} = 8.02$  A,  $V_{oc} = 0.61$  V,  $I_m = 7.39$  A,  $V_m = 0.49$  V。其仿真模型如图 2 所示。

该太阳电池仿真模型具有较强的使用价值, 为了验证该模型的精度优于其他模型, 本文在相同条件下用单二极管模型<sup>[16]</sup>和实验测试数据为参照, 与双二极管模型的太阳电池输出特性曲线进行对比, 如图 3 和图 4 所示。

图 3 为辐照度为 1000 W/m<sup>2</sup> 恒定时, 改变太阳电池的结温得到的  $I$ - $V$  曲线。从图 3 可得, 太阳电池的短路电流受温度的影响较小, 但仍随着温度的增加而增大; 开路电压受温度的影响较大, 随着温度的增加而减小。

对比单二极管曲线、双二极管曲线和实验测试曲线清晰地看到, 随着电池温度的升高, 双二极管曲线和实验测试曲线一直具有较高的吻合程度, 但是单二极管曲线与实验测试曲线在开路电压附近的误差越来越大。由此可得出, 在高温的情况下, 本文构建的双二极管模型在开路电压附近比单二极管模型的精度更高, 更接近实测值。

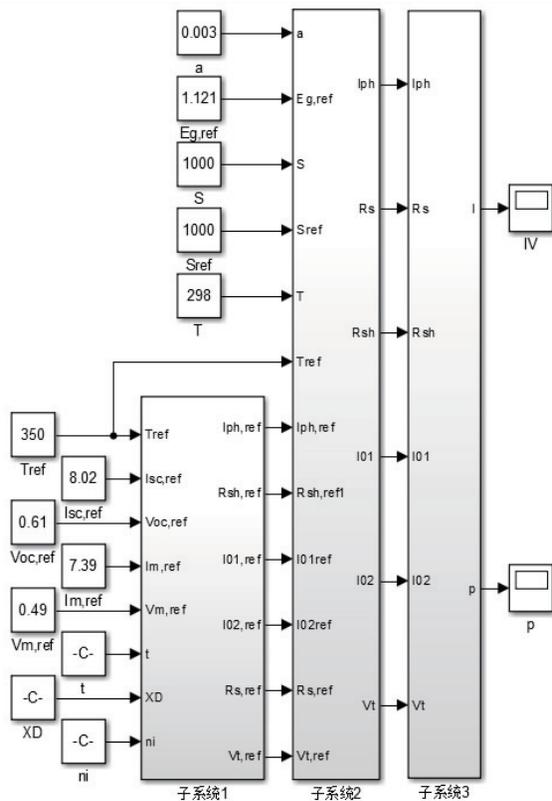


图2 太阳能电池仿真模型结构

Fig. 2 Simulation model structure of a solar cell

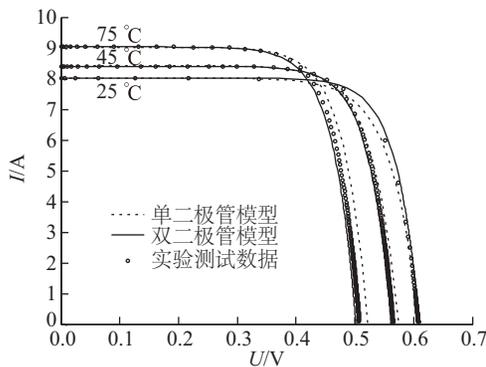


图3 温度改变,辐照度恒定的太阳能电池输出特性曲线

Fig. 3 Solar cell output characteristic curve, under change of temperature and constant irradiance

图4为温度为25℃恒定时,改变辐照度的大小而得到的I-V曲线。由图4可得太阳能电池的短路电流受辐照度的影响较大,随着辐照度的增加而增大;开路电压受辐照度的影响较小,但仍随辐照度的增加而减小。

对比单二极管曲线、双二极管曲线和实验测试曲线清晰地看到,随着辐照度的下降,双二极管曲

线和实验测试曲线一直具有较高的吻合程度,但是单二极管曲线与实验测试曲线在开路电压附近的误差越来越大。由此可得,在低辐照度的情况下,本文构建的双二极管模型在开路电压附近比单二极管模型的精度更高,更接近实测值。

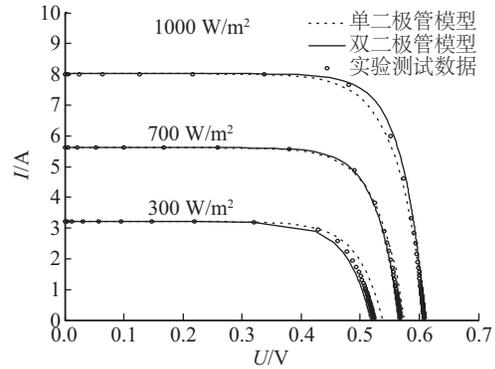


图4 辐照度改变,温度恒定的太阳能电池输出特性曲线

Fig. 4 Solar cell output characteristic curve, under change of irradiance and constant temperature

由图3和图4可知,在不同的测试条件下,改进的双二极管模型的I-V仿真曲线与实际的测量数据几乎吻合,通过计算可得,它与实验数据的误差明显小于单二极管模型的误差。由此可知改进的双二极管模型的精度明显优于单二极管模型,特别是低照度和高温度的情况下,优越性明显。主要是因为该模型除了二极管的理想因子 $n_1$ 、 $n_2$ 为经验值外,无需假设或估计任何值即可得出一个直接和有效的模型。

### 2.2 光伏组件的仿真模型

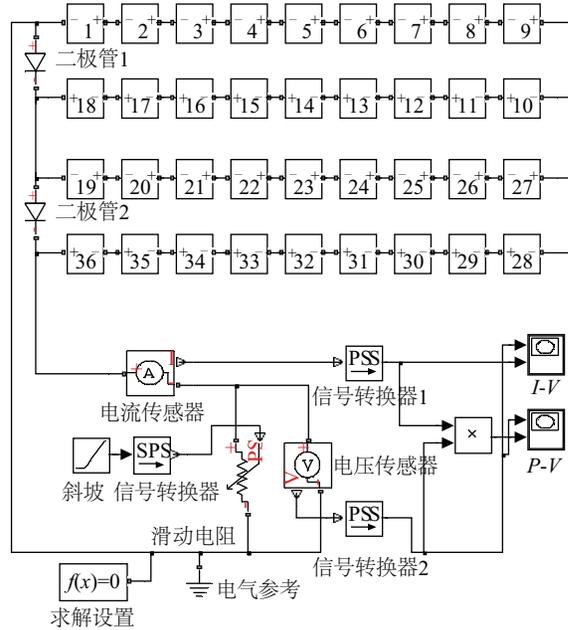
目前的光伏组件都是由一定数量的电池片进行串联组成的。如KYOCERA公司的KC130GHT-2组件是由36片电池片串联组成的,并对每18片电池片并联1个旁路二极管。本模型根据KC130GHT-2组件,通过Matlab/Simulink对光伏组件建立电气信号的仿真模型。组件的参数 $P=130\text{ W}$ ,  $I_{sc}=8.02\text{ A}$ ,  $V_{oc}=21.9\text{ V}$ ,  $I_m=7.39\text{ A}$ ,  $V_m=17.6\text{ V}$ ,其仿真模型如图5所示。

通过该模型可以实现对组件进行不同局部阴影下的仿真实验,并对输出数据进行处理分析。

### 2.3 局部阴影条件下光伏组件特性分析

局部阴影遮挡会影响组件的最大功率点,建立的仿真模型以并联2个旁路二极管的组件为参考模型。进行STC(标准测试条件)下的仿真实

验,分析局部阴影对光伏组件的特性曲线影响的规律。



注:图中的阿拉伯数字代表第1~第36块电池。

图5 光伏组件仿真模型结构

Fig. 5 Simulation model structure of photovoltaic module

### 2.3.1 单片太阳能电池局部阴影下的组件特性分析

单片太阳能电池局部阴影的仿真实验,对比分析太阳能电池在无遮挡、50%遮挡、80%遮挡以及100%遮挡条件下的光伏组件的P-V特性曲线。模拟的组件P-V特性曲线如图6所示。

图6中单二极管、双二极管模型与实验数据对比的误差,以及具体采样数据如表1所示。

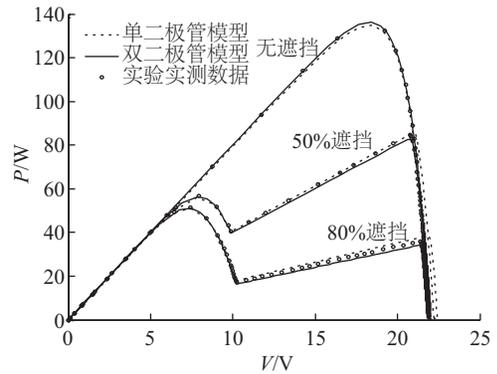


图6 单片电池不同比例阴影遮挡下的组件功率曲线

Fig. 6 Power curve of module with different proportions shadow of single solar cell

表1 图6的部分数据

Table 1 Part of data in figure 6

| 遮挡情况  | U/V  | 实测值 P/W | 单二极管 P/W | 单二极管与实测值误差/% | 双二极管 P/W | 双二极管与实测值误差/% |
|-------|------|---------|----------|--------------|----------|--------------|
| 无遮挡   | 5.0  | 40.12   | 39.99    | 0.32         | 40.03    | 0.22         |
| 无遮挡   | 10.0 | 81.11   | 80.63    | 0.59         | 80.66    | 0.55         |
| 无遮挡   | 15.0 | 119.13  | 117.53   | 1.34         | 118.04   | 0.91         |
| 无遮挡   | 17.6 | 133.23  | 131.67   | 1.17         | 131.87   | 1.02         |
| 无遮挡   | 20.0 | 120.12  | 118.07   | 1.71         | 120.47   | -0.29        |
| 无遮挡   | 21.9 | 4.19    | 4.68     | -11.69       | 4.29     | -2.39        |
| 50%遮挡 | 5.0  | 40.22   | 39.98    | 0.60         | 39.99    | 0.57         |
| 50%遮挡 | 10.0 | 40.43   | 40.67    | -0.59        | 40.15    | 0.69         |
| 50%遮挡 | 15.0 | 61.07   | 61.96    | -1.46        | 60.45    | 1.02         |
| 50%遮挡 | 17.6 | 71.23   | 72.16    | -1.31        | 70.43    | 1.12         |
| 50%遮挡 | 20.0 | 82.28   | 83.58    | -1.58        | 81.36    | 1.12         |
| 50%遮挡 | 21.9 | 4.62    | 15.63    | -238.31      | 4.93     | -6.71        |
| 80%遮挡 | 5.0  | 40.12   | 39.89    | 0.57         | 39.98    | 0.35         |
| 80%遮挡 | 10.0 | 22.39   | 22.59    | -0.89        | 22.29    | 0.45         |
| 80%遮挡 | 15.0 | 25.51   | 26.34    | -3.25        | 25.19    | 1.25         |
| 80%遮挡 | 17.6 | 30.19   | 32.22    | -6.72        | 29.58    | 2.02         |
| 80%遮挡 | 20.0 | 33.94   | 36.63    | -7.93        | 32.96    | 2.89         |
| 80%遮挡 | 21.9 | 4.67    | 20.36    | -335.97      | 5.02     | -7.49        |

根据表 1 中的数据,以及对比图 6 的单二极管模型曲线、双二极管模型曲线和实验测试曲线,随着遮挡的增加,双二极管曲线在开路电压附近比单二极管模型精度更高,更接近实验测试曲线。从图 6 中的曲线变化规律可以看到,组件的 1 个旁路二极管下的太阳能电池出现阴影遮挡时,组件的  $P-V$  曲线最多会出现 2 个峰,仅在无遮挡和 100% 遮挡的条件下出现 1 个峰。对比 4 条曲线可看出,随着遮挡的增加,第 2 个峰值点不断减小,第 1 个峰值点只有较小的变化。因此,可知在 1 个旁路二极管下存在局部阴影遮挡时,最大功率点跟踪到的最大功率点一定是第 1 个峰值点。

### 2.3.2 2 片太阳能电池局部阴影下的组件特性分析

2 片太阳能电池局部阴影的仿真实验,对比分析 2 片太阳能电池分别在无遮挡、50% 遮挡分布在同一旁路二极管和 50% 遮挡分布在 2 个旁路二极管条

件下的光伏组件的  $P-V$  特性曲线。模拟的组件  $P-V$  特性曲线如图 7 所示。

图 7 中单二极管、双二极管模型与实验数据对比的误差,以及具体采样数据如表 2 所示。

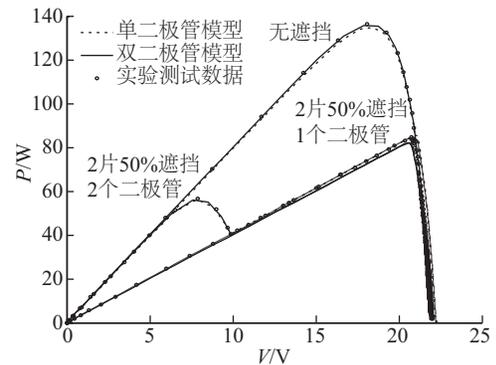


图7 2片电池不同比例阴影遮挡下的组件功率曲线  
Fig. 7 Power curve of module with different proportions shadow of two solar cells

表2 图7的部分数据

Table 2 Part of data in figure 7

| 遮挡情况     | $U/V$ | 实测值<br>$P/W$ | 单二极管<br>$P/W$ | 单二极管与<br>实测值误差/% | 双二极管<br>$P/W$ | 双二极管与<br>实测值误差/% |
|----------|-------|--------------|---------------|------------------|---------------|------------------|
| 遮挡在2个二极管 | 5.0   | 40.22        | 39.98         | 0.60             | 39.99         | 0.57             |
| 遮挡在2个二极管 | 10.0  | 40.43        | 40.67         | -0.59            | 40.15         | 0.69             |
| 遮挡在2个二极管 | 15.0  | 61.07        | 61.96         | -1.46            | 60.45         | 1.02             |
| 遮挡在2个二极管 | 17.6  | 71.23        | 72.16         | -1.31            | 70.43         | 1.12             |
| 遮挡在2个二极管 | 20.0  | 82.28        | 83.58         | -1.58            | 81.36         | 1.12             |
| 遮挡在2个二极管 | 21.9  | 4.61         | 15.63         | -239.05          | 4.93          | -6.94            |
| 遮挡在1个二极管 | 5.0   | 20.53        | 20.49         | 0.19             | 20.48         | 0.24             |
| 遮挡在1个二极管 | 10.0  | 40.63        | 40.77         | -0.34            | 40.25         | 0.94             |
| 遮挡在1个二极管 | 15.0  | 61.17        | 61.93         | -1.24            | 60.53         | 1.05             |
| 遮挡在1个二极管 | 17.6  | 71.23        | 72.16         | -1.31            | 70.43         | 1.12             |
| 遮挡在1个二极管 | 20.0  | 82.26        | 83.58         | -1.60            | 81.31         | 1.15             |
| 遮挡在1个二极管 | 21.9  | 4.61         | 15.63         | -239.05          | 4.93          | -6.94            |
| 遮挡在2个二极管 | 5.0   | 40.22        | 39.98         | 0.60             | 39.99         | 0.57             |
| 遮挡在2个二极管 | 10.0  | 40.43        | 40.67         | -0.59            | 40.15         | 0.69             |
| 遮挡在2个二极管 | 15.0  | 61.07        | 61.96         | -1.46            | 60.45         | 1.02             |
| 遮挡在2个二极管 | 17.6  | 71.23        | 72.16         | -1.31            | 70.43         | 1.12             |
| 遮挡在2个二极管 | 20.0  | 82.28        | 83.58         | -1.58            | 81.36         | 1.12             |
| 遮挡在2个二极管 | 21.9  | 4.61         | 15.63         | -239.05          | 4.93          | -6.94            |

根据表 2 中的数据,以及对比图 7 的单二极管模型曲线、双二极管模型曲线和实验测试曲线,在遮挡相同大小阴影,分布旁路二极管不同的情

况下,双二极管曲线在开路电压附近比单二极管模型精度更高,更接近实验测试曲线。从图 7 中的曲线变化规律可知,在遮挡电池片相同大小阴

影的条件下,2片电池分布在同1个旁路二极管下和分布在2个旁路二极管下的最大功率点的大小相同。因此可得,存在局部阴影遮挡的组件,组件的损失与阴影遮挡的位置分布无关,与阴影遮挡的面积有关。

### 2.3.3 局部阴影分布的均匀性对光伏组件的影响

局部阴影分布均匀性的仿真实验,对比分析相同阴影遮挡面积,不同阴影遮挡分布下的光伏组件的 $P-V$ 特性曲线。分别仿真无遮挡、4片太阳能电池20%遮挡、2片太阳能电池40%遮挡、1片太阳能电池80%遮挡的组件功率输出曲线,具体模拟的组件 $P-V$ 特性曲线如图8所示。图8中单二极管、双二极管模型与实验数据对比的误差,以及具体采样数据

如表3所示。

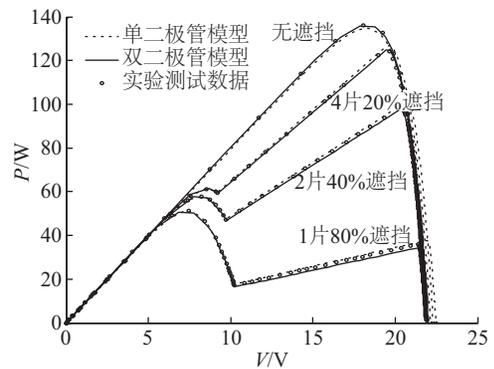


图8 局部阴影不均匀分布的组件功率曲线

Fig. 8 Power curve of module with partial shadow uneven distribution

表3 图8的部分数据

Table 3 Part of date in figure 8

| 遮挡情况    | $U/V$ | 实测值<br>$P/W$ | 单二极管<br>$P/W$ | 单二极管与<br>实测值误差/% | 双二极管<br>$P/W$ | 双二极管与<br>实测值误差/% |
|---------|-------|--------------|---------------|------------------|---------------|------------------|
| 4片20%遮挡 | 5.0   | 39.87        | 39.72         | 0.38             | 39.74         | 0.33             |
| 4片20%遮挡 | 10.0  | 65.39        | 65.95         | -0.86            | 65.12         | 0.41             |
| 4片20%遮挡 | 15.0  | 96.77        | 97.63         | -0.89            | 96.23         | 0.56             |
| 4片20%遮挡 | 17.6  | 115.87       | 117.14        | -1.10            | 115.04        | 0.72             |
| 4片20%遮挡 | 20.0  | 122.83       | 124.79        | -1.60            | 121.63        | 0.98             |
| 4片20%遮挡 | 21.9  | 4.37         | 10.52         | -140.73          | 4.56          | -4.35            |
| 2片40%遮挡 | 5.0   | 38.26        | 38.33         | -0.18            | 38.21         | 0.13             |
| 2片40%遮挡 | 10.0  | 49.22        | 49.58         | -0.73            | 49.13         | 0.18             |
| 2片40%遮挡 | 15.0  | 72.29        | 73.35         | -1.47            | 71.82         | 0.65             |
| 2片40%遮挡 | 17.6  | 86.25        | 87.94         | -1.96            | 85.33         | 1.07             |
| 2片40%遮挡 | 20.0  | 98.52        | 100.45        | -1.96            | 97.35         | 1.19             |
| 2片40%遮挡 | 21.9  | 4.57         | 13.25         | -189.93          | 4.85          | -6.13            |
| 1片80%遮挡 | 5.0   | 40.12        | 39.89         | 0.57             | 39.98         | 0.35             |
| 1片80%遮挡 | 10.0  | 22.39        | 22.59         | -0.89            | 22.29         | 0.45             |
| 1片80%遮挡 | 15.0  | 25.51        | 26.34         | -3.25            | 25.19         | 1.25             |
| 1片80%遮挡 | 17.6  | 30.19        | 32.22         | -6.72            | 29.58         | 2.02             |
| 1片80%遮挡 | 20.0  | 33.94        | 36.63         | -7.93            | 32.96         | 2.89             |
| 1片80%遮挡 | 21.9  | 4.67         | 20.36         | -335.97          | 5.02          | -7.49            |

根据表3中的数据,以及对比图8的单二极管模型曲线、双二极管模型曲线和实验测试曲线,在遮挡面积相同,阴影分布不同的情况下,双二极管曲线在开路电压附近比单二极管模型精度更高,更

接近实验测试曲线。从图8中的曲线变化规律可得,相同阴影遮挡面积的情况下,阴影分布越不均匀的,组件的功率损失就越大。因此可得,组件的功率损失由遮挡最严重的电池片决定。

### 3 结 论

本文建立的双二极管太阳能电池数学模型通过实验和仿真结果表明该模型在不同光照和温度下与实际输出特性相吻合,性能明显优于目前广泛使用的单二极管模型,且能更好的描述太阳能电池的暗特性,具有高精度。因此可将此模型应用于复杂的光照环境中。以建立的双二极管太阳能电池数学模型为基础,通过 Matlab/Simulink 对双二极管太阳能电池进行建模,利用电池模型建立更加简洁、直观的光伏组件电气模型。并通过上述仿真模拟和数据分析,得到如下结论:

1)在局部阴影遮挡条件下,单片太阳能电池的  $P$ - $V$  特性曲线仅存在唯一峰值点,光伏组件的  $P$ - $V$  特性曲线存在多个峰值点。

2)在局部阴影遮挡的组件中,组件的功率损失与阴影遮挡的位置分布无关,与阴影遮挡的面积有关。

3)在相同阴影遮挡面积条件下,阴影分布越不均匀,组件的功率损失越大。组件的功率损失由遮挡最严重的电池片决定。

#### [参考文献]

- [1] 周元贵,陈启卷,何昌炎,等.局部阴影下光伏阵列建模及多峰值MPPT控制[J].太阳能学报,2016,37(10):2484—2490.
- [1] Zhou Yuanguai, Chen Qijuan, He Changyan, et al. Model of PV array partial shading and MPPT control of multi-peak characteristics [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2016, 37(10): 2484—2490.
- [2] Reinoso C R S, Milone D H, Buitrago R H. Simulation of photovoltaic centrals with dynamic shading [J]. Applied Energy, 2013, 103(1): 27—289.
- [3] Yang Y, Ji S L, Gu H Q, et al. Simulation study on characteristics of photovoltaic array under partial shading [A]. Control Conference [C], Chicago, IEEE, 2014: 6992—6997.
- [4] 张 臻,沈 辉,李 达.局部阴影遮挡的太阳能电池组件输出特性实验研究[J].太阳能学报,2012,33(1):5—12.
- [4] Zhang Zhen, Shen Hui, Li Da. Experimental study on characteristics of partial shaded solar module [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2012, 33(1): 5—12.
- [5] Patel H, Agarwal V. MATLAB-based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 302—310.
- [6] 但扬清,刘文颖,朱艳伟.局部阴影条件下光伏阵列 Matlab 仿真及输出效率分析[J].太阳能学报,2013,34(6):997—1001.
- [6] Dan Yangqing, Liu Wenyong, Zhu Yanwei. Matlab Simulation of PV array and analysis of output efficiency under partial shading [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2013, 34(6): 997—1001.
- [7] 张俊红,魏学业,祝天龙.光伏阵列建模和仿真特性研究[J].计算机仿真,2014,31(3):134—138.
- [7] Zhang Junhong, Wei Xueye, Zhu Tianlong. Research on modeling and characteristic simulation of photovoltaic array [J]. Computer Simulation, 2014, 31(3): 134—138.
- [8] 刘邦银,段善旭.局部阴影条件下光伏模组特性的建模与分析[J].太阳能学报,2008,29(2):188—192.
- [8] Liu Bangyin, Duan Shanxu. Modeling and analysis of characteristics of PV module with partial shading [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2008, 29(2): 188—192.
- [9] Rathee R, Das B K, Khanna V. Spice based modelling and simulation to study the effects of partial shading on PV array characteristics [J]. Ijesi Org, 2013, (5): 68—73.
- [10] Chan D S H, Phang J C H. Analytical methods for the extraction of solar-cell single and double-diode model parameters from  $I$ - $V$  characteristics [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1987, 34(2): 286—293.
- [11] Kollimalla S K, Mishra M K. A novel adaptive P&O MPPT algorithm considering sudden changes in the irradiance [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(29): 602—610.
- [12] 刘恩科,朱秉升,罗晋生.半导体物理学[M].北京:电子工业出版社,2011,384—390.
- [12] Liu Enke, Zhu Bingsheng, Luo Jinsheng. Semiconductor physics [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2011, 384—390.
- [13] Chouder A, Silvestre S, Sadaoui N, et al. Modeling and simulation of a grid connected PV system based on the evaluation of main PV module parameters [J]. Simulation Modelling Practice & Theory, 2012, 20(1): 46—58.

- [14] Soto W D, Klein S A, Beckman W A. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance [J]. *Solar Energy*, 2006, 80(1): 78—88.
- [15] 卢 喆, 郑 松. 局部阴影条件下光伏阵列建模方法 [J]. *电气技术*, 2016, 17(9): 17—20.
- [15] Lu Zhe, Zheng Song. Study on modeling of photovoltaic array with partial shading [J]. *Electrical Engineering*, 2016, 17(9): 17—20.
- [16] Villalva M G, Gazoli J R, Filho E R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, 24(5): 1198—1208.

## MATLAB/SIMULINK SIMULATION MODEL AND CHARACTERISTIC ANALYSIS OF PV MODULE UNDER PARTIAL SHADOW

Zhao Taixiang, Liao Hua, Ma Xun, Li Jingtian, Yin Junchuan, Liu Zuming

(*Solar Energy Research Institute, Yunnan Provincial Key Laboratory of Rural Energy Engineering, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China*)

**Abstract:** The influence of partial shadow conditions on the output characteristics of PV modules has been simulated and analyzed. The mathematical model of the improved double diode solar cell model has been established. The inverse saturation current  $I_{02}$  of the diode  $D_2$  in the model is calculated using the performance parameters of silicon material. Except the value of the ideal factor  $n_1$ ,  $n_2$  of the diode is the empirical value, any another parameters of the model are not estimate value. Based on the mathematical model of the double diode solar cell and the simulation model of the double diode solar cell has been established by Matlab/Simulink. Based on the model of double diode solar cell, the electrical model for PV module under partial shadow has been established. The complicated mathematical modeling work of building PV modules has been avoided. The model has been used to simulate the output performance the solar cells and PV modules under different partial shadows, and the simulation data were compared and analyzed. The results show that the output characteristics of PV modules are effected by the number and distribution uniformity of shadows.

**Keywords:** Matlab/Simulink; partial shadow; PV modules; output characteristic