

光伏电池板输出特性的仿真及检验

史清风, 刘辛国, 吴杰
(北京建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 依据太阳能电池的工程数学模型, 使用 Matlab 软件包中的 Simulation 标准模块直接建立太阳能电池的仿真模型。在仿真中对模型本身的参数变化条件下的输出特性进行了研究, 得出了太阳能电池输出特性变化的一般规律曲线。最后根据实际搭建的实验平台对所用的京瓷电池板的输出特性进行仿真, 给出了测量曲线和分析。

关键词: Matlab 仿真; 仿真模型; 太阳能电池; 输出特性

中图分类号: TK519

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2012)23-0078-03

The simulation of solar panel output features and verification

Shi Qingfeng, Liu Xinguo, Wu Jie
(Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on the mathematical model of the solar cell engineering, the simulation with Matlab software package standard module established the simulation models of solar cells directly and the function relation between solar cells voltage. In this paper, the output characteristics of solar are researched when the inside parameters are changed respectively in the simulation and the general rule of the output characteristic of solar cells are received. Finally the kyocera panels output characteristic are simulated according to the actual experimental platform, giving the measuring curve and analysis.

Key words: Matlab simulation; the simulation model; solar battery; output characteristics

在能源危机和环境问题的形势日益严峻的今天, 清洁能源的发展已经迫在眉睫。太阳能资源以普遍、无害、巨大、长久的优势成为新能源研发中的热点, 但是太阳能电池高昂的生产成本和较低的转换效率却限制了其商业价值。所以如何提高太阳能电池的转换效率成了专业人士研究中的一个重点所在。参考文献[1]虽然简化了太阳能电池输出特性的数学模型, 给出了光伏电池在环境温度变化时的输出特性, 但只是分析了环境温度和日照强度变化的情况, 并没有考虑太阳能电池负载条件以及其本身参数变化时的输出特性。

本文在参考了文献[3]中的方法的基础上, 使用 Matlab 软件包中的 Simulation 标准模块直接建立太阳能电池的仿真模型。这样可以准确方便地模拟出太阳能电池的实际工作状况。在仿真中对太阳能电池在日照强度变化的条件下以及模型本身的参数变化条件下的输出特性进行了研究和验证, 所用参数在仿真中都可以很方便地进行调节。最后利用北京建筑工程学院的一套小型太阳能

发电系统的实测数据对太阳能电池的基本性能参数和输出特性进行了检验, 给出了测量曲线, 分析出结果。

1 太阳能电池的输出特性

太阳能电池是利用光生伏打效应制成的, 即电池吸收光能产生的光生电子——空穴对在内建电场的作用下分离, 产生“光生电压”的现象^[2]。太阳能电池的 $I-U$ 特性符合函数 $I=f(U, S, t)$, 即 $I-U$ 随日照强度 S 和电池温度 t 的变化而变化。为了方便地仿真出太阳能电池的输出特性曲线, 根据电子学理论, 以纯电阻 R 为负载, 给出太阳能电池和负载的实际等效电路, 如图 1 所示。

在一定光照下, 一个太阳能电池产生的光电流为 I_L , 电流的一部分流经负载 R , 并在 R 两端产生端电压 U 。从图中可以看出, U 又是正向偏置于 p-n 结二极管, 这就产生了一个与光电流反向的电流 I_d , 同时考虑到电池的实际情况, 电池的生产材料本身具有电阻率, 电流经过时必然会引起损耗, 在图中的等效电路里可以将电

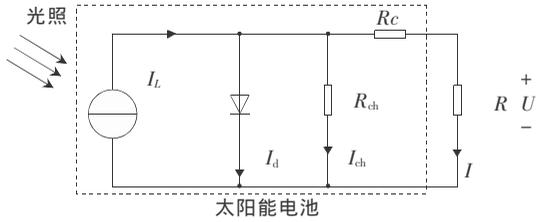


图1 负载为纯电阻的 p-n 同质结太阳能电池等效图

池的总效果用串联电阻 R_c 表示。另外制造电池的金属化电极时会在电池的划痕、微裂纹等处形成金属漏电以及电池边缘的漏电等,使本该通过负载的电流一部分短路,这种作用可以用图中的并联电阻 R_{ch} 表示。图 1 所对应的 $I-U$ 函数如下:

$$I = I_L - I_d - I_{ch}$$

$$I = I_L - I_0 - \left[\exp\left\{ \frac{q(U + IR_c)}{AKT} \right\} - 1 \right] - \frac{U + IR_c}{R_{ch}} \quad (1)$$

其中, I 为太阳能电池板输出电流 (单位: A), I_L 为一定照度下电池板产生的电流, I_d 为二极管结电流; 且 I_0 为电池板反向饱和电流 (单位: 10^{-4} A), q 为一个电子带的电荷量 (1.6×10^{-19} C), K 为波尔兹曼常数 (1.38×10^{-23} J/K), $T = t + 273$ K (电池板表面绝对温度), A 为电池板理想品质因子 ($n = 1 \sim 5$, 文中取 2.8), R_c 为串联低电阻 ($< 1 \Omega$), R_{ch} 为并联高电阻 ($K \Omega$ 级, 使 $R_{ch} \gg R_c$)。

根据式 (1), 在 Matlab 中建立太阳能电池的仿真模型, 如图 2 所示。图中左边的一个电压检测模块 u 的输出等于 $U + IR_c$, U/I 函数转换模块的输出就是 I_d , 图中信号发生器均是受控电流源, 这三个模块共同说明了式 (1) 中 I_d 的函数关系。在图 2 所示的仿真模型中, 各个相应的模块设置不同的参数, 并在 U/I 转换模块中建立不同的 U/I 输入输出关系式, 分别模拟太阳能电池和光伏组件的工作特性。

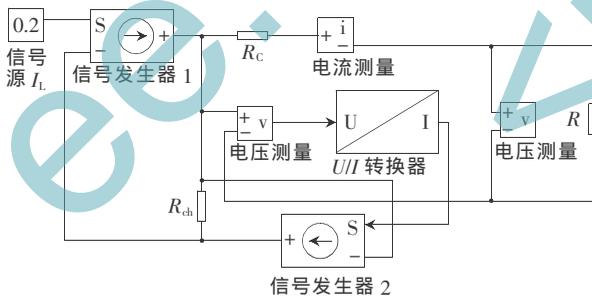
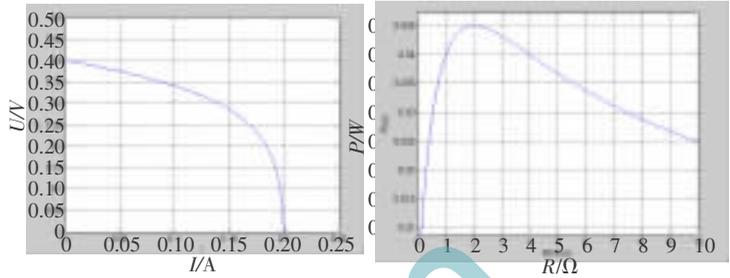


图2 太阳能电池的 Matlab 仿真模型

太阳能电池单元模型根据式 (1) 来建立, 其部分参数设定值为: $R_c = 0.1 \Omega$, $R_{ch} = 10 \text{ k}\Omega$, $A = 2.8$, $T = 300 \text{ K}$; 设置参数后的仿真图如图 3 所示。

从图 3(a) 中可以看出, 随着负载阻抗的不断变化, 太阳能电池的输出电压和电流也在做非线性变化, 而且其开路电压约为 0.4 V, 与实际电池开路电压 0.45 V 相近, 短路电流为 0.2 A, 太阳能电池的输出阻抗为 2Ω ; 从图 3(b) 中可以看出, 当负载阻抗处于极值点, 约为 1.



(a) 太阳能电池 U/I 特性曲线图 (b) 太阳能电池输出功率 P 与负载阻抗 R 的特性曲线图

图3 太阳能电池输出特性曲线图

8 Ω 时, 太阳能电池的输出功率最大, 与太阳能电池的输出阻抗非常相近, 证明了最大功率输出的阻抗匹配原则。

2 模型参数对太阳能电池 U/I 输出特性的影响

在本文的仿真实验中, 对太阳能电池仿真模型中的串联电阻 R_c 和反向饱和电流 I_0 进行了分析。通过仿真结果可以发现, R_c 越小, 仿真时得出的短路输出电流就越接近于给定短路电流, 而开路电压变化则十分微小, 可以忽略。体现在曲线图中则是曲线的平缓线段 (接近于短路电流那一段) 越长, 曲线的弯度则越大 (靠近开路电压那一段)。另外太阳能电池的最大输出功率 P 也越大, 效率也越高。但是最大功率点所对应的负载阻抗却是基本不变的, 这是因为串联电阻 R_c 本身阻值很小, 所以对开路电压的影响也很小。反向饱和电流 I_0 对太阳能电池的 U/I 输出影响也是不容忽视的, I_0 越小, 则太阳能电池的输出功率就越大。导致最大功率输出点对应的负载阻抗造成了影响, 使其不再相同。但是太阳能电池的最大功率输出与负载阻抗相匹配的原则却没有改变。表 1 和表 2 分别给出了 R_c 和 I_0 这两个参数变化时对太阳能电池输出产生影响的部分采样数据。

表 1 R_c 变化时太阳能电池的部分 U/I 输出数据 (短路电流 I_L 设定为 0.2 A)

参数 R_c	负载阻抗 / Ω	太阳能电池的输出 U, I, P			备注
		电流/A	电压/V	功率/W	
$R_c = 1 \Omega$	0.001	0.179 5	1.794e-5	0.000 0	相当于短路
	1	0.149 9	0.150 0	0.022 5	最大功率点
	2	0.113 1	0.226 1	0.025 6	
	3	0.087 5	0.271 1	0.023 7	
$R_c = 0.5 \Omega$	1000	8.9e-5	0.401 0	0.000 0	相当于开路
	0.001	0.189 6	1.884e-5	0.000 0	相当于短路
	1	0.171 2	0.172 3	0.029 5	最大功率点
	2	0.128 9	0.260 3	0.033 5	
3	0.103 2	0.299 6	0.030 9		
	1000	8.9e-5	0.401 0	0.000 0	相当于开路

表 2 I_0 变化时太阳能电池的部分 U/I 输出数据 (短路电流 I_L 设定为 4 A)

参数 R_c	负载阻抗	太阳能电池的输出 U, I, P			备注
		电流/A	电压/V	功率/W	
$I_0=1e-50$ A	设定值	/Ω			
	0.001	3.999 6	13.495e-4	0.001 4	相当于短路
	3	3.999 3	11.865	47.45 2	
	4	3.598 3	15.126	54.42 8	最大功率点
	5	3.015 2	15.416	46.48 2	
	10 000	3.12e-5	15.981	0.000 5	相当于开路
$I_0=1e-10$ A	0.001	3.198 9	3.196e-4	0.001 0	相当于短路
	0.2	2.418 9	0.479 3	1.159 4	
	0.5	1.736 7	0.866 3	1.504 5	最大功率点
	0.7	1.438 9	0.998 7	1.437 1	
	1 000	2.54e-5	1.891 6	0.000 0	相当于开路

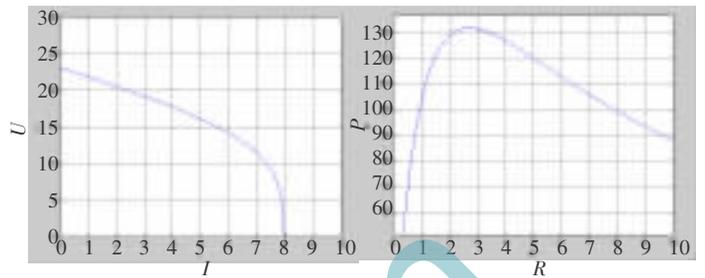
3 U/I 输出特性仿真及相关规律

在仿真中一个太阳能电池产生的电压很低,只有 0.45 V 左右。因此根据实际应用的要求,需把太阳能电池连接成组件。一个太阳能电池组件往往是由多个太阳能电池串联或并联组成的,还有的则是由太阳能电池串并混联而成,因此一个太阳能电池组件的等效的数学模型一般表示为:

$$I \left(1 + \frac{R_c}{R_{ch}} \right) = n_p I_L - n_p I_0 \left[\exp \left\{ \frac{q(U + IR_c)}{AKT} \right\} - 1 \right] - \frac{(U/n_s + IR_c)}{R_{ch}} \quad (2)$$

其中, n_s 为太阳能电池串联的数目, n_p 为太阳能电池并联的数目。

需要注意的是,在式(2)中, I_L 和 U 是表示太阳能电池组件的光生电流和输出电压。考虑到各个太阳能电池的连接和等效问题, Γ 的取值要远小于在进行太阳能电池仿真时所用的计算值。在仿真中,部分参数的设置如下: Γ 为 0.1, R_c 为 0.9 Ω, R_{ch} 为 10 kΩ, T 为 300 K; 而所用的一块太阳能电池组件(京瓷电池板)的参数为:最大输出为 130 W,开路电压为 21.9 V,短路电流为 8.02 A,最大输出电压为 17.6 V,最大输出电流为 7.39 A。仿真曲线如图 4 所示。



(a) U/I 特性曲线图 (b) 输出功率 P 与负载阻抗 R 的特性曲线图

图 4 京瓷电池板输出特性曲线图

在图 4(a)中,可以看出仿真的开路电压与实际电压稍微有点偏差,说明不同的太阳能电池组件由于生产工艺的不同,导致在对其仿真时需要灵活的参数设置。

在本文太阳能电池的仿真中,对数学模型中的内部参数变化条件下太阳能电池 U/I 输出特性进行了研究。从仿真结果可以看出,太阳能电池模型中的串联电阻 R_c 对最大功率输出值的影响比较大,但是对短路电流 I_L 和开路电压的影响却很小;而逆向饱和电流 I_0 则是影响了开路电压,也就是说改变了太阳能电池的输出阻抗。在最后,使用建立的仿真模型,对实验所用的实际京瓷电池板进行仿真,给出了仿真曲线。

参考文献

- [1] 苏建徽. 硅太阳能电池工程用数学模型 [J]. 太阳能学报, 2001, 22(4): 409-412.
- [2] 禹华军, 潘俊民. 光伏电池输出特性与最大功率跟踪的仿真分析[J]. 计算机仿真, 2005, 22(6)
- [3] 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. (收稿日期: 2012-09-14)

作者简介:

史清风, 男, 1985 年生, 在读研究生, 主要研究方向: 光伏发电技术。