

The Simulation of Output Characteristics of DSSC Based on MATLAB/Simulink

Jiao Kang, Zhi-qiang Hu, Hong-ru Zhou, Qian-xin Zhan

School of Chemistry Engineering & Material, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China

Email: hzq@dlpu.edu.cn

Abstract: According to the equivalent circuit of Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC), a simulation model was created using MATLAB/Simulink tool, which was used to simulate the output characteristics and output power of DSSC, and the effect of photo current density, diode factor and initial currents of diode on the performance of DSSC were investigated. The results indicated that the density of short-circuit current, the open-circuit voltage and the maximum output power increased with increasing photo current density, and the fill factor increased firstly and then decreased. The open-circuit voltage, and the maximum output power increased with increasing diode factor, and the fill factor increased firstly and then decrease, yet the density of short-circuit current kept constant. The open-circuit voltage, and the maximum output power and the fill factor increased with increasing diode factor, yet the density of short-circuit current kept constant. The simulation results can be used as the theoretical basis for optimization DSSC.

Keywords: dye-sensitized solar cells; MATLAB/Simulink; equivalent circuit; simulation

基于 MATLAB/Simulink 的 DSSC 模拟仿真

康蛟, 胡志强, 周红茹, 詹前鑫

大连工业大学 化工与材料学院, 辽宁 大连 116034

Email: hzq@dlpu.edu.cn

摘要: 根据染料敏化太阳能电池 (DSSC) 的等效电路, 应用 MATLAB/Simulink 工具建立仿真模型, 对 DSSC 的输出伏安特性及输出功率进行仿真, 讨论光生电流密度 J_{ph} 、二极管特性因子 n 和饱和电流 I_0 对 DSSC 性能的影响。仿真结果表明, 随着光生电流密度 J_{ph} 增大, 短路电流密度、开路电压、最大输出功率均增大, 填充因子先增加后减小; 随着二极管特性因子 n 值增加, 短路电流密度不变, 开路电压、最大输出功率值增大, 填充因子先增加后减小; 随着二极管饱和电流 I_0 值增加, 短路电流密度不变, 开路电压、最大输出功率、填充因子均增大。仿真的结果可以作为 DSSC 结构优化的理论依据。

关键词: 染料敏化太阳能电池; MATLAB/Simulink; 等效电路; 仿真

1 引言

太阳能作为一种可再生能源, 具有取之不尽、安全、环保等其它能源所不可比拟的优点。在目前众多的太阳能电池中, 染料敏化太阳能电池 (Dye-Sensitized Solar Cells, 简称 DSSC), 由于具有成本较低、工艺简单、较高的光稳定性、理论光电转换率高等优点, 已在全世界范围内掀起了对这种新型太阳能电池的研究热潮^[1-2]。该电池是经染料敏化的 TiO_2 光阳极、含碘的有机溶剂液态电解液和对电极组成的夹心结构。据估算, 染料敏化太阳能电池的成本仅相当于硅电池板的 1/5~1/10。同时, 它对光照条件要求不高, 即便在阳

光不太充足的室内, 其光电转化率也不会受到太大影响^[3-4]。经过近 20 年的努力, DSSC 电池的效率已经超过了 11%, 并逐步走上了产业化道路, 逐渐成为最有希望得到应用的新型太阳能电池之一。

MATLAB/Simulink 主要的功能是对动态系统做适当的分析, 可以预先对系统进行仿真和分析, 并可以做适当的实时修正, 增强系统的性能, 减少系统研发修改时间, 提高开发系统效率^[5]。本文中 DSSC 模型计算需要较复杂的运算, 用 MATLAB/Simulink 可以方便地进行仿真计算, 输出相关的特性曲线。

本文基于光伏电池的 I-V 函数关系式, 直接利用 MATLAB/Simulink 软件包建立了光伏电池的仿真模型, 得到了模拟的 DSSC 输出特性曲线及输出功率特性

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项 (2006AA05Z417); 辽宁省教育厅重点实验室科技项目 (2008S017)。

曲线。通过调节光生电流密度 J_{ph} 、二极管特性因子 n 和饱和电流 I_0 参数值, 方便且准确地模拟了光伏电池的工作情况, 定量地分析了光生电流密度、二极管特性因子和饱和电流的变化对电池输出特性的影响。通过对电池的仿真来指导实验, 使 DSSC 结构得到进一步优化, 也为 DSSC 走向实用化奠定基础。

2 DSSC 的数学物理模型

图 1 为染料敏化太阳能电池等效电路图^[6], 由理想电流源、理想二极管、并联电阻 R_{sh} 和分流电阻 R_s 组成。当接上负载时, DSSC 受光照射产生电流, 从而获得有效功率输出^[7]。由于电池的光生电流不随负载的改变而发生变化, 因此在等效电路中可将其看作是一个恒流源(电流密度为 J_{ph})。负载的端电压反作用于电池上, 产生的电流与光生电流方向相反(即二极管电流, 电流密度为 J_d)。

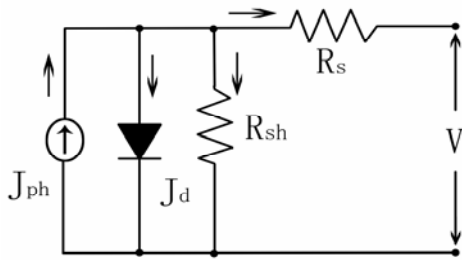


Figure 1. Equivalent circuit of dye-sensitized solar cells
图 1. 染料敏化太阳能电池的等效电路

3 DSSC 的仿真模型

由 DSSC 的等效电路图 1, 应用 Kirchhoff 电流定律可得到:

$$J = J_{ph} - J_d - J_{sh} \quad (1)$$

其中: J ——通过负载的电流密度; J_{ph} ——电池的光生电流密度; J_d ——通过二极管的电流密度; J_{sh} ——电池的漏电流密度。

对于式 (1) 中的 J_d 有

$$J_d = J_0 \{ \exp [q(V + JR_s) / nKT] - 1 \} \quad (2)$$

式中, J_0 ——二极管反向饱和电流密度(一般而言, 其数量级为 $10^{-8} A/cm^2$)^[8]; V ——电池的输出电压;

K ——玻耳兹曼常数; R_s ——分流电阻(为低阻值电阻); T ——绝对温度; n ——理想因子; q ——电子电荷。

对式(1)中的 J_{sh} 有

$$J_{sh} = (V + JR_s) / R_{sh} \quad (3)$$

式中, R_{sh} ——并联电阻(为高阻值电阻)。

将式(2)、(3)代入式(1), 可得 DSSC 输出电流表达式为

$$J = J_{ph} - J_0 \{ \exp [q(V + JR_s) / nKT] - 1 \} - (V + JR_s) / R_{sh} \quad (4)$$

通过对 DSSC 等效电路模型和数学模型的分析, 可以得出 DSSC 的输出电压和输出电流的非线性关系。但这些方程都是超越方程, 因此无法直接求出光生电流密度 J_{ph} 、二极管特性因子 n 和饱和电流 I_0 与伏安特性曲线变化的关系。

本论文依据 DSSC 的等效电路图, 利用 MATLAB/Simulink 中的电源系统工具库和 S 函数自定义模块, 建立 DSSC 仿真模型, 如图 2 所示。

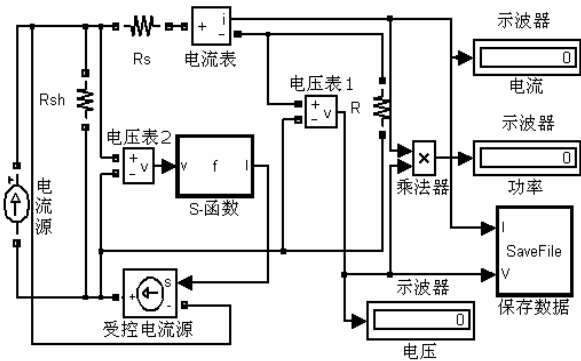


Figure 2. Simulation model of dye-sensitized solar cells
图 2. 染料敏化太阳能电池的仿真模型

当光照强度恒定时, 光生电流密度 J_{ph} 可以用一个恒定的电流源来模拟。信号发生器 Signal 模块作为受控电流源, 电压表 1 的数值为负载 R 的电压 (V); 电压表 2 的读数为 $(V + JR_s)$ 。因此可用 S 函数模块来表示公式(2), 其表达式为

$$f(u) = J_0 [\exp (qu / nKT) - 1] \quad (5)$$

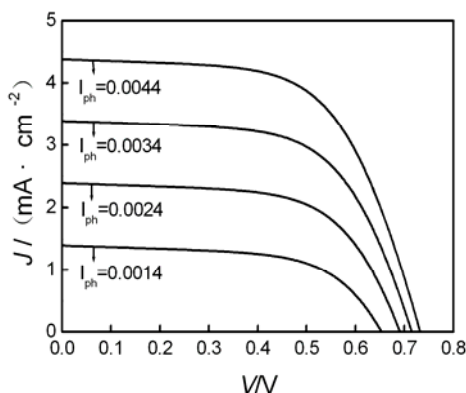
输入值为 $u = V + JR_s$ 时, 可得到通过二极管的电流密度 J_d 。

Display 示波器分别显示光伏电池的输出电流密度、输出电压和输出功率值, 为了对这些数据进行保存, 在该模型中建立了 SaveFile 模块, 该模块可以在每次运行模拟后将自动保存数据。仿真步长由 Simulink 自动设

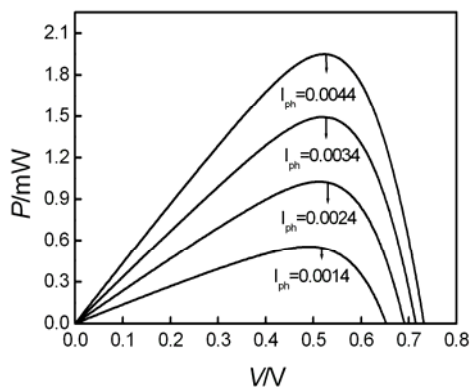
定, 仿真结果可以通过示波器显示出来。在仿真过程中, 将数据输出到 MATLAB 的工作空间中。

4 光生电流密度对 DSSC 的影响

在等效电路图中, 光生电流密度约等于短路电流密度, 其大小可通过估算的方法得到, 为了使模拟的数据具有代表性, 依据参考文献^[9], 选取光生电流密度 J_{ph} 分别为 $1.4\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $2.4\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $3.4\text{mA}/\text{cm}^2$ 和 $4.4\text{mA}/\text{cm}^2$ 进行仿真。将其它仿真参数设为 $I_0=5.05 \times 10^{-8}\text{A}/\text{cm}^2$, $T=300\text{K}$, $R_{sh}=5000\Omega$, $R_s=20\Omega$, $n=2.5$ 。通过仿真得到输出电流、电压和功率值, 利用 MATLAB 曲线拟合工具仿真出如图 3 中(a)、(b)所示的 DSSC 的输出伏安特性曲线和输出功率曲线。



(a) 输出伏安特性曲线



(b) 输出功率曲线

Figure 3. Effect of photo current density on output characteristic of DSSC

图 3. 光生电流密度对 DSSC 输出特性的影响

Table 1. Performance parameters of DSSC in various J_{ph}

表 1. 不同 J_{ph} 值的 DSSC 性能参数

$J_{ph}/(\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$	V_{oc}/V	$J_{sc}/(\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$	$P_{max}/(\text{mW})$	FF
1.4	0.652	1.39	0.554	0.611
2.4	0.690	2.39	1.025	0.621
3.4	0.714	3.39	1.493	0.616
4.4	0.732	4.38	1.949	0.607

仿真结果表明, DSSC 的输出伏安特性呈非线性, 并且每条输出功率曲线有且仅有一个最大输出功率点。随着光生电流的增大, 短路电流和开路电压同时增大。光生电流的增大, 可以使光伏电池的最大输出功率也不断增大; 光生电流越大, 光伏电池的输出电能就越大。

不同 J_{ph} 值的 DSSC 性能参数列于表 1。当 $J_{ph}=1.4\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $2.4\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $3.4\text{mA}/\text{cm}^2$ 和 $4.4\text{mA}/\text{cm}^2$ 时, DSSC 的填充因子 FF 分别为 0.611, 0.621, 0.616 和 0.607, 数值先增加后减小。填充因子可从电池的输出伏安特征曲线中得出, 它表示电池中的欧姆损失, 内阻越大, 填充因子越小。

光生电流密度的大小约等于短路电流密度。由于短路光电流密度的大小与电子注入效率、吸收光的效率以及电子收集效率有关。因此吸收可见光谱范围较宽的染料、选择最佳膜厚吸附适量的染料、并抑制暗电流的产生以及提高光生电子在电极材料中和电极表面的传输速度可以增大短路光电流, 从而提高染料敏化纳晶 TiO_2 薄膜太阳能电池的光电转换效率。

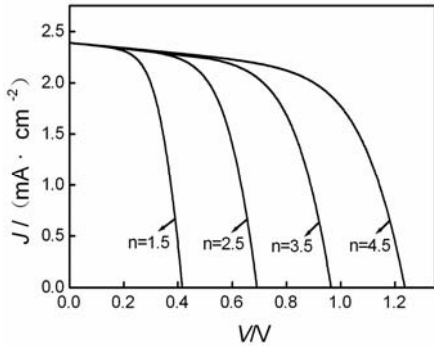
5 二极管特性因子和饱和电流对 DSSC 的影响

对于电池而言, 二极管特性因子 n 和饱和电流 I_0 会对电池的输出功率以及效率造成影响。本文在 MATLAB/Simulink 的环境下, 通过改变二极管特性因子 n 和饱和电流 I_0 的大小, 来定量分析其对 DSSC 的影响。

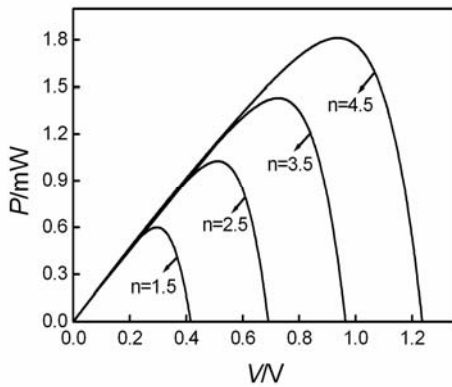
依据参考文献, 选取二极管特性因子 n 分别为 1.5, 2.5, 3.5 和 4.5 进行仿真。将其它仿真参数设为 $I_{ph}=2.4\text{mA}/\text{cm}^2$, $I_0=5.05 \times 10^{-8}\text{A}/\text{cm}^2$, $T=300\text{K}$, $R_{sh}=5000\Omega$, $R_s=20\Omega$, 通过仿真得到输出电流、电压和功率值, 利用 MATLAB 曲线拟合工具仿真出如图 4 (a)、(b)所示的 DSSC 的输出伏安特性曲线和输出功率曲线。

依据参考文献, 选取二极管饱和电流 I_0 分别为 $5.05 \times 10^{-7}\text{A}/\text{cm}^2$, $5.05 \times 10^{-8}\text{A}/\text{cm}^2$, $5.05 \times 10^{-9}\text{A}/\text{cm}^2$, $5.05 \times 10^{-10}\text{A}/\text{cm}^2$ 进行仿真。将其它仿真参数设为

$I_{ph}=2.4\text{mA}/\text{cm}^2$, $T=300\text{K}$, $R_{sh}=5000\Omega$, $R_s=20\Omega$, $n=2.5$, 通过仿真得到输出电流、电压和功率值, 利用 MATLAB 曲线拟合工具仿真出如图 5 中(a)、(b)所示的 DSSC 的输出伏安特性曲线和输出功率曲线。



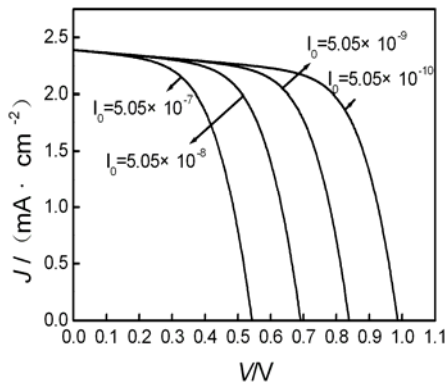
(a) 输出伏安特性曲线



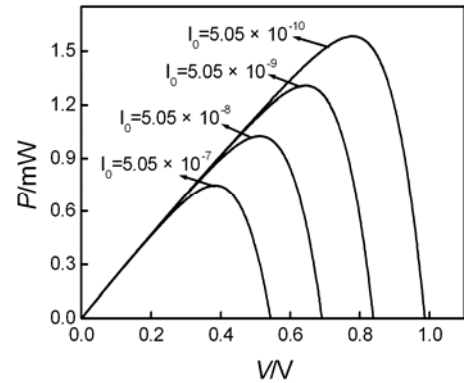
(b) 输出功率曲线

Figure 4. Effect of diode factor on output characteristic of DSSC

图 4. 二极管特性因子对 DSSC 输出特性的影响



(a) 输出伏安特性曲线



(b) 输出功率曲线

Figure 5. Effect of initial currents of diode on output characteristic of DSSC

图 5. 二极管饱和电流对 DSSC 输出特性的影响

仿真结果表明, 当 DSSC 的输出电压较小时, 电压改变, 输出电流变化很小, 产生的电流密度类似为一个恒流源。当输出电压超过一定的临界值继续上升, 电流急剧下降, 此时为一个恒压源。随着二极管特性因子 n 和饱和电流 I_0 值增加, 短路电流密度不受影响, 开路电压增加, 电池的最大输出功率值增大。二极管特性因子 n 和饱和电流 I_0 值越大, DSSC 的输出特性曲线中平缓线段越长、弯度越大; 极管特性因子 n 和饱和电流 I_0 值减小, 平缓线段缩短、弯度减, 最大输出功率也随之减小。

Table 2. Performance parameters of DSSC in various n

表 2. 不同 n 值的 DSSC 性能参数

n	V_{oc}/V	$J_{sc}/(\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$	$P_{max}/(\text{mW})$	FF
1.5	0.415	2.38	0.597	0.604
2.5	0.690	2.38	1.025	0.624
3.5	0.964	2.38	1.430	0.623
4.5	1.236	2.38	1.812	0.615

Table 3. Performance parameters of DSSC in various I_0

表 3. 不同 I_0 值的 DSSC 性能参数

$I_0/(\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$	V_{oc}/V	$J_{sc}/(\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$	$P_{max}/(\text{mW})$	FF
5.05×10^{-7}	0.543	2.38	0.746	0.577
5.05×10^{-8}	0.690	2.38	1.025	0.624
5.05×10^{-9}	0.838	2.38	1.305	0.654

5.05×10^{-10}	0.986	2.38	1.583	0.674
------------------------	-------	------	-------	-------

不同 n 和 I_0 值的 DSSC 性能参数分别列于表 2 和表 3。通过表中显示的数据, 可以定量的分析不同 n 和 I_0 值对电池的影响。随着二极管特性因子 n 的增加, 填充因子的数值先增加后减小; 随着二极管饱和电流 I_0 的增加, 填充因子的数值一直增加。由于二极管饱和电流 I_0 的值受电池材料本身控制, 所以在制作 DSSC 电池时, 应增加二极管饱和电流 I_0 的值, 使电池的性能达到最佳。

6 结论

本文在 MATLAB/Simulink 仿真环境下, 依据 DSSC 的等效电路图建立仿真模型。在光生电流密度 J_{ph} 、二极管特性因子 n 和饱和电流 I_0 变化的条件下, 得到 DSSC 的输出特性曲线及输出功率曲线, 并定量分析了光生电流密度 J_{ph} 、二极管特性因子 n 和饱和电流 I_0 对电池开路电压、短路电流密度、输出功率和填充因子的影响。仿真结果表明, 光伏电池的输出特性呈非线性, 每条曲线有且仅有一个最大输出功率点, 并且 DSSC 的性能受光生电流密度 J_{ph} 、二极管特性因子 n 和饱和电流 I_0 的影响。仿真结果与理论上的分析相一致: 随着光生电流密度 J_{ph} 值增大, 短路电流、开路电压、最大输出功率均增大, 填充因子先增加后减小; 随着二极管特性因子 n 值增加, 短路电流密度不受影响, 开路电压、最大输出功率值增大, 填充因子先增加后减小; 随着二极管饱和电流 I_0 值增加, 短路电流密度不受影响, 开路电压、最大输出功率、填充因子均增大。

由于实际太阳能电池影响因素众多, 故模拟太阳光伏电池需要大量的数据源, 进而得到更为精确的结果。

因此, 需要在以后的研究中继续加深研究, 对给出的模型进行进一步完善。

References (参考文献)

- [1] O'regan B, Gratzel M. A low-cost high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 film [J]. *Nature*, 1991, 353:737-740.
- [2] Yuxiang Zhang and Songyuan Dai. Recent R &D in dye-sensitized solar cells [J]. *Sun Technology*, 2009, 83. 张玉香, 戴松元. 染料敏化太阳电池的研究进展 [J]. *阳光能源*, 2009, 83.
- [3] Yasuo C, Ashraful I, Yuki W, et al. Dye-sensitized solar cells with conversion efficiency of 11.1% [J]. *Japanese journal of applied physics*, 2006, 45(60):638-640.
- [4] Shengjun Li, Yuan Li and Shiwei Yang. Preparation and properties of nano-crystalline TiO_2 porous film electrode [J]. *Journal of Functional Materials*, 2008, 39(3): 95-97. 李胜军, 林原, 杨世伟. 纳晶 TiO_2 多孔薄膜电极的制备及其性能研究 [J]. *功能材料*, 2008, 39(3): 95-97.
- [5] Dingyu Xue, Yangquan Chen. System simulation technology and application based on MATLAB/Simulink [M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2006. 薛定宇, 陈阳泉. 基于 MATLAB/Simulink 的系统仿真技术与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
- [6] Shuiku Zhong, Changqing Liu and Xiaoming Shen. Experiment and analysis on the model parameters of solar cells [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, 28(4), 498-500. 钟水库, 刘长青, 沈晓明. 太阳电池基本参数的实验与分析[J]. *半导体光学*, 2007, 28(4), 498-500.
- [7] Nanki K, Ashraful I, et al. Improvement of efficiency of dye-sensitized solar cells based on analysis of equivalent circuit [J]. *Journal of photochemistry and photobiology*, 2006, 128:296-305.
- [8] Tian H, Zhang X, et al. An improved method to estimate the equivalent circuit parameters in DSSCs [J]. *Solar energy*, 2009, 83:715-720.
- [9] Masaki M, Tatsuo M. Evaluation of treatment effects for high-performance dye-sensitized solar cells using equivalent circuit analysis [J]. *Thin solid films*, 2006, 509:123-126.