

基于 Simulink 的太阳能光伏电池的建模及 输出特性仿真研究^{*}

郑 意, 赵志刚, 苟向锋

(兰州交通大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要:介绍了太阳能光伏电池的工作原理,根据光伏电池的输出特性建立了数学模型,并依据数学模型在 Matlab/Simulink 中建立了光伏电池阵列的仿真模型.通过该模型来模拟不同温度和光照强度条件下光伏电池的 I-U 特性曲线,其中光伏电池的仿真参数按照 125×125 刚性光伏电池片设置.

关键词:光伏电池; Matlab/Simulink; 输出特性

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

随着世界经济的快速发展,对于能源的需求越来越大.目前世界各国大多仍然以石油、天然气和煤炭等原料作为主要能源,这必将导致能源的日益枯竭与环境污染的日益突出,因此能源的充分利用与环境保护已成为 21 世纪人类面临的两项重大难题.目前,包括太阳能、风能、水能、海洋能、地热能等在内的可再生能源的发展与应用得到广泛的关注,但是与化石燃料相比,可再生能源具有能量密度低;随着季节、昼夜与气候条件的变化而变化;难于运输等特点,因此要用可再生能源取代化石能源则需解决一系列的科学技术和经济性的问题.而太阳能作为广泛分布的“清洁能源”,有较好的应用前景.目前太阳能利用的基本方式有三种:太阳能热利用、太阳能热发电和太阳能光伏发电.而光伏电池作为太阳能光伏发电的核心部分,其输出特性具有显著的非线性,其光电转换效率迄今为止仍然很低,这些因素都说明对光伏电池输出特性的研究是该行业的一个重要课题^[1-3].

本文在了解了光伏电池原理的基础上,根据实验需要,建立了一组光伏阵列的数学模型,并在 Simulink 中建立其仿真模型,得到了光伏电池在不同光照强度和温度下的输出特性曲线,并对仿真结果进行了分析,为后续做最大功率点追踪电路设计奠定了一定基础.

1 光伏电池的原理

太阳能光伏电池发电的原理主要是半导体的光

电效应,即利用光电材料受到光照射后发生光电效应,从而实现能量转换.当太阳光照射到光伏电池上时,电池吸收光能,产生光电子和光生空穴对,在电池内电场的作用下,光生电子和光生空穴对被分离,光生电子被推向半导体的 N 区,光生空穴被推向半导体 P 区,如此便在 P-N 结两侧形成了正负电荷的积累,产生了光生电动势,这就是“光电效应”.

能产生光电效应的半导体材料有很多种,如单晶硅、多晶硅、非晶硅、砷化镓、硒铜铜等,这些半导体材料的光电转化原理基本相同.以硅基半导体做成的光伏电池为例:在其内电场的两侧引出导线并接上负载,则电路中就会有电流流过,该电流称为“光生电流”.“光生电流”从半导体的 P 区经负载流至 N 区,负载即得到功率输出,这样就完成了将光能转换为电能.其原理图如图 1 所示^[4].

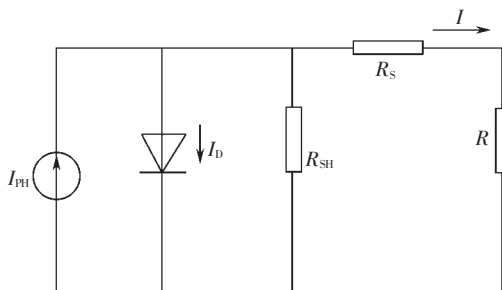


图 1 光伏电池原理图

Fig. 1 Photovoltaic cells schematic

^{*} 收稿日期:2012-06-10

作者简介:郑 意(1988-),男,甘肃白银人,硕士生,主要研究方向为光伏-蓄电池联合供电. E-mail:zhengyi0457@163.com

图1中 I_{PH} 为光生电流,当光源恒定时可以将太阳能电池看成是一理想的、能稳定产生光电流 I_{PH} 的恒流源; I_D 为半导体P-N结的结电流。 R_S 为半导体材料内部电阻和电极电阻构成的串联电阻,通常小于 $1\ \Omega$; R_{SH} 为由于半导体材料边缘不清洁或内部固有缺陷造成的电阻,一般约为几千欧姆。依据其原理图,流过负载 R 的电流为

$$I = I_{PH} - I_D - I_{SH} \quad (1)$$

而P-N结中电流和电压满足关系如下:

$$I_D = I_0 (e^{qU_I/AKT} - 1) \quad (2)$$

式中: q 为电子电荷, $1.6 \times 10^{-19}\text{C}$; A 为P-N结理想因子; K 为玻尔兹曼常数, $1.38 \times 10^{-23}\text{J/K}$; T 为绝对温度; I_0 为P-N结的反向饱和电流,当P-N结制成后该值为一个与温度有关的系数; U_I 为结电压,稳定状态下其值为负载电压。

$$I_{SH} = \frac{U_I}{R_{SH}} = \frac{U_R + IR_S}{R_{SH}} \quad (3)$$

式中: U_R 为负载两端电压。

由式(1)、式(2)、式(3)可得:

$$I = I_{PH} - I_0 \left[e^{\frac{q(U_R + IR_S)}{AKT}} - 1 \right] - \frac{U_R + IR_S}{R_{SH}} \quad (4)$$

由于 R_{SH} 非常大,导致电流 I_{SH} 非常小,因此为了简化模型,通常忽略 I_{SH} ^[5],简化上述模型,最终得到单体光伏电池输出特性方程如下:

$$I = I_{PH} - I_0 \left[e^{\frac{q(U_R + IR_S)}{AKT}} - 1 \right] \quad (5)$$

2 光伏电池阵列

太阳能电池单体是光电转换的最小单元,其输出远低于实际所需的电压和功率,因此需要将若干个单体太阳能电池经过串并联组成一个新的单元,这个单元称之为光伏电池组件。光伏电池组件再经过串并联后就得到了光伏阵列。

实验采用了 $125\text{ mm} \times 125\text{ mm}$ 刚性太阳能电池组件,切割为4片,每片宽度为30 mm,并将其以22片串联为一组,再并联4组构成光伏电池组件,将构成的光伏电池组件再串联15组构成光伏电池阵列。将该阵列再以2组并联即得到实验要求的光伏电池阵列模型,其整体布置图如图2所示。

实验中为了提高光伏电池阵列的可靠度,可通过串并联一些二极管来实现^[4]。图2中1号二极管为隔离二极管,其作用是防止当某一条支路发生故障时,其它支路的电流流向发生故障的支路,影响其他支路的正常输出。2号二极管称为旁路二极管,其作用是当某个组件发生故障时,不阻碍其他组件

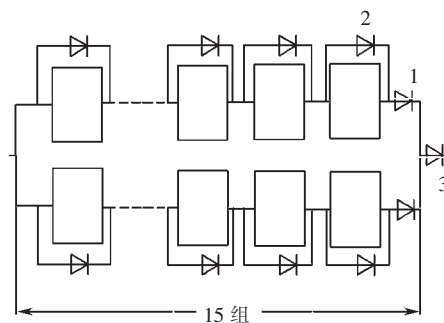


图2 光伏阵列布置

Fig. 2 PV array layout

的正常工作。3号二极管称为阻塞二极管,其作用是防止当光照不足时外部蓄电池中的电流倒流回光伏电池,使光伏组件发热,温度升高,影响其转换效率,同时浪费蓄电池中存储的能量。

如图2所示,光伏电池通过串联来提高其输出电压,通过并联来增大其输出电流。据此,依据式(5)得到光伏阵列的输出特性方程如下:

$$I = mI_{PH} - mI_0 \left[e^{\frac{q(U_R + IR_S)}{nAKT}} - 1 \right] \quad (6)$$

式中: m 为并联组数; n 为串联个数。

3 仿真参数的求解

3.1 常量参数

为了便于建模,可将上述模型等效为330片切割后光伏电池片串联,再并联这样的8组,所以式(6)中 $m=8$, $n=330$ 。在该仿真模型中常量参数如表1所示。

表1 光伏电池的仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of the photovoltaic cells

参数名称	数值	单位
I_{SC}	$1.296 \pm 5\%$	A
V_{MPP}	0.502	V
I_{MPP}	1.184	A
K_I	0.002 4	A/K
R_S	0.514 2	Ω
A	1	
K	1.38×10^{-23}	J/K
q	1.6×10^{-19}	C
m	8	
n	330	

3.2 变量参数的求解

在式(6)中未知的量有 I_{PH} 、 I_0 、 R_S ,其中 I_{PH} 、 I_0 随输入光照和温度变化而变化, R_S 是光伏电池本身固有的特性,现给出3个未知量的求解公式如下^[6]:

3.2.1 I_{PH} 的求解

$$I_{PH} = \frac{S \cdot I_{SC}}{1000} \times [1 + K_I(T - 25 - 273)] \quad (7)$$

式中: S 为光照强度, w/m^2 ; I_{SC} 为标准测试条件下光伏电池的短路电流, A ; K_I 为短路电流温度系数, A/K .

3.2.2 I_0 的求解

当电路开路时, 令式(6) 等于 0, 得

$$I_0 = \frac{I_{PH}}{\exp\left[\frac{q(U_R + IR_S)}{22AKT}\right] - 1} \quad (8)$$

3.2.3 R_S 的求解

对于已经加工好的光伏电池, 电阻 R_S 基本保持不变, 因此可将 R_S 看成一个恒定的值, 其大小可由式(9) 求得, 其中最大输出电压 V_{MPP} 和最大输出电流 I_{MPP} 的值由电池参数手册获得, 其值见表 1, 光生

电流 I_{PH} 的值为根据式(7) 求的标准测试条件 $S = 1000 \text{ w/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$, 下的值.

$$R_S = \frac{\frac{22AKT}{q} \ln\left(\frac{I_{PH} - I_{MPP}}{I_0} + 1\right) - V_{MPP}}{I_{MPP}} \quad (9)$$

将选用的光伏电池的参数带入式(9) 中求得

$$R_S = 0.514 \text{ } \Omega$$

4 仿真结果分析

在建立光伏电池阵列的输出特性数学模型, 并完成仿真参数的求解后, 根据公式(6) 在 Simulink 中建立太阳能光伏电池输出特性仿真模型如图 3 所示. 该模型采用以光照强度 S 和温度 T 作为输入, 以流过负载的电流 I 和负载两端的电压 U_R 作为输出来进行仿真. 模型中用一个 S 函数模块来模拟流过二极管的电流 I_D , 其表达式为

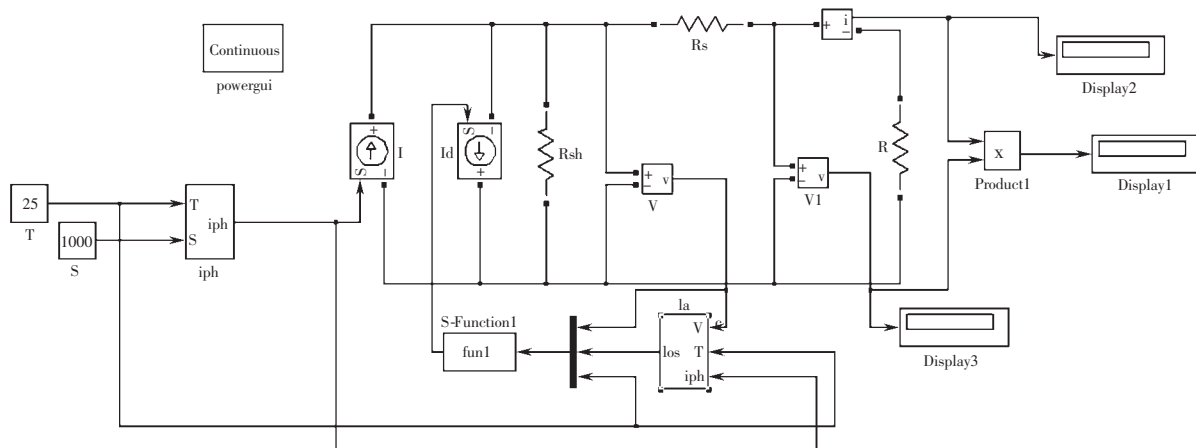


图 3 光伏电池 Simulink 仿真模型

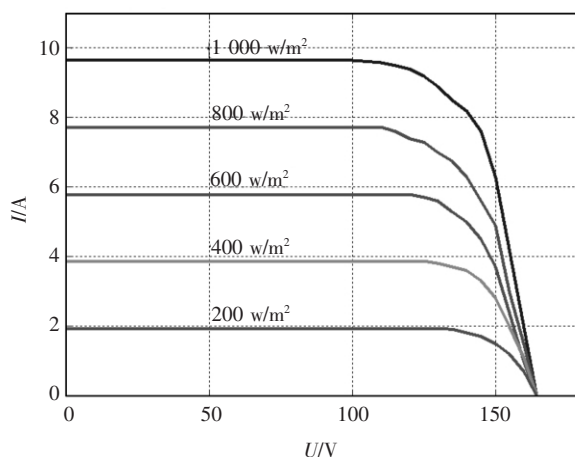
Fig. 3 Simulink model of photovoltaic cells

在 S 函数对话框中需输入常量参数 A, K, q, m, n 的值, 其值见表 1. 完成仿真模型的建立后, 做如下两种仿真分析.

4.1 不同光照条件下光伏电池的输出特性.

按表 1 设置仿真参数, 设置温度 T 等于 25°C 恒定不变, 光照强度 S 依次选取 $1000 \text{ w/m}^2, 800 \text{ w/m}^2, 600 \text{ w/m}^2, 400 \text{ w/m}^2, 200 \text{ w/m}^2$. 改变负载电阻的大小对仿真模型进行采样, 通过曲线拟合得到在不同光照强度下光伏电池的输出特性 $I-U$ 曲线如图 4 所示.

从图中可以看出在温度相同时电流 I 随着光照强度的增加明显增加, 电压 U 随着光照强度的变化几乎没有发生变化, 而在最大功率点处也满足这种变化, 即随着光照强度增加最大输出电流 I_{MPP} 明显增大, 而最大输出电压 U_{MPP} 变化不大, 因此最大功

图 4 不同光照条件下光伏阵列的输出 $I-U$ 曲线Fig. 4 The output $I-U$ curve of PV array under different light conditions

率 $P_{MPP} = I_{MPP} \times U_{MPP}$ 也随着光照强度的增大而增大。

4.2 不同温度条件下光伏电池的输出特性

保持光照强度 S 在 $1\,000\text{ w/m}^2$ 恒定不变, 温度 T 依次选取 45°C , 30°C , 25°C , -5°C , -15°C . 改变负载电阻的大小对仿真模型进行采样, 通过曲线拟合得到光伏电池在不同温度条件下光伏电池的输出特性 $I-U$ 曲线如图 5 所示。

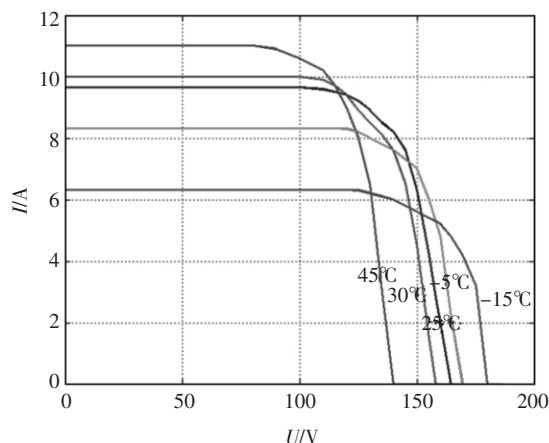


图 5 不同温度条件下光伏阵列的输出 $I-U$ 曲线

Fig. 5 The output $I-U$ curve of PV array under different temperature conditions

图中曲线从左至右依次为温度在 45°C , 30°C , 25°C , -5°C , -15°C 条件下得到的仿真曲线。从图中可以看出, 在光照强度相同时, 随着温度升高电流 I 有所增加, 电压 U 随着温度的升高而急剧下降。虽然温度从零下升至零上时电流增大比较明显, 但是随着温度的升高电压 U 降低的幅度明显要大于电流 I 升高的幅度, 最大功率点处也满足这种关系, 所以

最大功率 $P_{MPP} = I_{MPP} \times U_{MPP}$ 随着温度的升高而降低。

5 总结

光伏电池的输出特性不仅与自身参数有关, 还与外界光照强度和环境温度有关。本文在分析了光伏电池数学模型的基础上, 利用 Matlab/Simulink 仿真软件建立了光伏电池的仿真模型。仿真结果能够反映光伏电池输出特性随着外界光照强度和周围环境温度的变化规律, 同时从建模的整体过程来看, 本文建立的模型与完全采用 Simulink 数学模块建立的模型相比, 具有结构简单, 易于理解, 方便参数设置等特点。在仿真时只需要厂家提供的相关产品参数就可以模拟出与实际情况接近的特性曲线, 这对光伏系统的理论分析提供了很大的方便。

参考文献:

- [1] Omanh. Space solar power development[J]. IEEE AES Systems Magazine, 2000, 15(2): 3-8.
- [2] 沈辉, 曾祖勤. 太阳能光伏发电技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [3] 赵书利, 叶烽. 太阳能电池技术应用与发展[J]. 船电技术|化学电源, 2010, 30(4): 47.
- [4] 张贵恒, 强生泽. 太阳能光伏发电系统及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 41-49.
- [5] 王长江. 基于 MATLAB 的光伏电池通用数学模型[J]. 电力科学与工程, 2009, 25(4): 11-14.
- [6] 杜慧. 太阳能光伏发电控制系统的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.

Modeling and the Analysis of Output Feature of Solar Energy Photovoltaic Cell Based on Simulink

ZHENG Yi, ZHAO Zhi-gang, GOU Xiang-feng

(School of Mechatronic Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The working principle of PV cells is introduced in this paper. Based on the mathematical function formula, the simulation model of PV array is built in MATLAB/ Simulink environment. $U-I$ features of PV cells are simulated according to the different temperature and light intensity conditions. Among them the photovoltaic cells simulation parameters are set according to 125×125 rigid PV films.

Key words: photovoltaic cell; Matlab/Simulink; output feature