

太阳能电池板的输出特性与实际应用研究

薛继元¹, 冯文林^{2,3}, 赵芬², 杨晓占²

(1. 重庆理工大学 电子信息与自动化学院, 重庆 400054;

2. 重庆理工大学 光电信息学院, 重庆 400054;

3. 时栅传感及先进检测技术重庆市重点实验室, 重庆 400054)

摘要: 光伏照明系统中作为能量来源的太阳能电池板, 其输出特性关系到能量转换效率的衡量以及最大功率跟踪精确性的判断。精确模拟了电池板的等效电路, 并通过在 Matlab/Simulink 中建立其模型, 得出电池板输出功率会随着电压的不断增大, 先增大再减小; 而且随着光照强度的增强而增大和温度的升高而减小。此外, 通过对电池板模型进行改善, 得出电池板最大功率处所对应的电压值会随着并联电池板的数量增加而减小, 但当并联电池板数量超过 3 时输出曲线就基本保持不变; 最大功率峰值会随着串联电池板数量的增加先增大, 当串联电池板数量超过一定值时最大功率值开始保持不变。这为光伏照明系统的建立提供良好的理论支持。

关键词: 光伏; 太阳能电池板; Matlab/Simulink; 输出特性

中图分类号: TP337 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0176-06

Output characteristic and application for solar panel

Xue Jiyuan¹, Feng Wenlin^{2,3}, Zhao Fen², Yang Xiaozhan²

(1. College of Electronic Information and Automation, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. College of Optoelectronic Information, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

3. Chongqing Key Laboratory of Time Grating Sensing & Advanced Testing Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: The solar panel is power source in the photovoltaic lighting system, and the output characteristic is a significant factor as assessing energy transformation and maximum power point tracking (MPPT) efficiency. In this paper, the module of the solar panel was built by using Matlab/Simulink, and the equivalent circuit of solar panel was also been simulated accurately. On one hand, the output power firstly increased if the voltage grew, and then decreased if the voltage continually grew. On the other hand, the output power could increase when the temperature decreased or when the intensity of illumination increased. In addition, the voltage at the maximum power would decrease if the number of the paralleled solar panels increased, but the tendency would keep the same when the number of the solar panel was bigger than 3. And the maximum output power would increase with the number of the series' panels increasing. However, the maximum output power would remain unchanged when the number of the panels was more than a certain quantity. This present work can provide theoretical support for building the photovoltaic lighting system.

Key words: photovoltaic; solar panels; Matlab/Simulink; output characteristic

收稿日期: 2014-05-13; 修订日期: 2014-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(11104366); 重庆理工大学研究生创新基金(YCX2012310)

作者简介: 薛继元(1987-), 男, 硕士生, 研究方向为光电信息检测与处理。

导师简介: 冯文林(1976-), 男, 教授, 博士, 主要从事光电材料与器件方面的研究。Email: wenlinfeng@126.com

0 引言

化石能源即将枯竭现状的威逼和日益严峻的环境问题的压力,使得储量无限、使用清洁无污染的太阳能成为人们所青睐的能源之一。而光电转换是太阳能利用的主要手段,太阳能电池板则是实现光电转换必不可少的器件。在电量消耗中照明用电占总用电量的 14%,所以研究光伏 LED 照明系统符合绿色节能的发展理念。而其中太阳能电池板的特性是整个系统研究应用的基本出发点,掌握了电池板的输出特性就能选择合适的跟踪方法对其最大功率点准确跟踪,提高光电转换率。根据电池板的输出曲线和跟踪方法可以检验对电池板最大功率点的跟踪效果,以使整个光伏照明系统高效可靠^[1-2]。

自从电池板的出现,对其特性的研究就未曾间断过。只是等效电路中的并联电阻容易在简化的分析中被忽略,这对单板的特性研究影响较小,但在电池板组件的组装使用过程中,这种影响以及产生的误差就不得不被考虑。文中完善电池板等效电路模型,使其输出特性更加接近实际电池板特性^[3]。虽然在电池板特性的研究过程中,温度、光照强度等外界环境条件已被考虑到影响电池板输出特性的因素中,但电池板的连接方式却没有受到足够重视。此文在前人对变化环境下电池板输出特性研究的激发下,展开对不同串并联方式的电池板模型仿真分析,评价电池板连接方式的优缺点,选择满足实际要求的连接方式。这对太阳能照明系统的建立有指导性作用。

1 电池板模型的建立

1.1 电池板等效电路分析

在光照强度不变时,光电池产生的电流基本保持不变,等效电路中可以将其看成恒流源。光生电流通过负载产生的电压又使 p-n 结正偏,产生与光电流方向相反的暗电流 I_d 。此外,由于电池板材料本身的电阻率在光生电流的作用下会引起电池板内部的串联损耗,引入串联电阻 R_s 。而且由于工艺的必然缺陷会使电池板产生漏电流,引入并联电阻 R_{sh} ^[4-5]。由此可以得出太阳能电池板的等效电路图^[6],如图 1 所示。

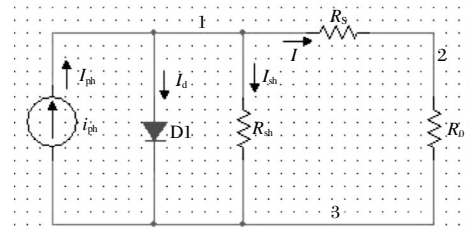


图 1 太阳能电池板的等效电路图

Fig.1 Equivalent circuit of the solar panel

由图 1 可得出:

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

式中: I 为电池板的输出电流; I_{ph} 为光生电流; I_d 为流过二极管的电流; I_{sh} 为通过并联电阻的电流。根据二极管的特性可得:

$$I_d = I_s \cdot \exp\left(\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{akT} - 1\right) \quad (2)$$

根据电路的并联支路电压相等原理,可以得出:

$$I_{sh} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

考虑到实际应用中电池板的串并联连接方式^[7],结合公式(1)~(3)可以得出:

$$I = N_{sh} \times I_{ph} - N_{sh} \times I_s \cdot \exp\left(\frac{(V + I \cdot R_s) \cdot q}{akT} - 1\right) - N_{sh} \times \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

式中: V 和 I 分别为负载两端的电压和电流; 串联电阻 R_s 一般为几欧; R_{sh} 为并联电阻, 一般取值从几百欧到几千欧; $a = A \times N_s$, A 是二极管的理想常数, 一般取值在 1~2 之间, N_s 是串联的电池板个数; k 为玻耳兹曼常数, 取值 1.38×10^{-23} J/K; q 为电荷量常数, 取值 1.6×10^{-19} ; T 为绝对温度; I_s 为二极管的饱和电流; N_{sh} 是电池板的并联个数。由二极管特性可得:

$$I_s = I_{sc} \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{akT}\right) - 1 \right] \quad (5)$$

式中: I_{sc} 为电池板短路电流; V_{oc} 为开路电压^[8-10]。

1.2 等效模型的建立

为了了解电池板输出特性, 首先在外界环境稳定的理想情况下, 对电池板模块进行仿真, 将光照强度和温度分别设置为 1000 W/m^2 和 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。为下面将要进行变化的温度、光照强度下电池板的特性曲线分析, 以及不同串并联个数电池板输出特性曲线分析做好基础。其中, A 取值为 1.5。根据 $12 \text{ V}-50 \text{ W}$ 太阳能电池板的参数, 开路电压为 22 V , 短路电流为

2.6 A, 按照公式(1)~(5)在 Simulink 中建立仿真模块如图 2 所示。仿真结果如图 3。

从图 3 中可以看出太阳能电池板的输出电流随着输出电压的增大先保持不变随后快速减小; 电池板的输出功率随着输出电压的增大先增大, 达到最大功率点后随着输出电压的增大又迅速减小^[11]。这反映的内在关系是: 在电池板负载电阻值增大的过

程中, 它的输出电流刚开始基本保持不变, 然后快速减小。只有当负载电阻值达到与电池板内阻相匹配的时候, 电池板输出最大功率。

实际应用中, 太阳能电池板的相互连接会对其输出特性的产生影响, 而且在不稳定的外界环境中, 光照强度和温度总是不停地变化, 所以分析实际应用和自然环境中太阳能电池的输出特性是非常有必要的。

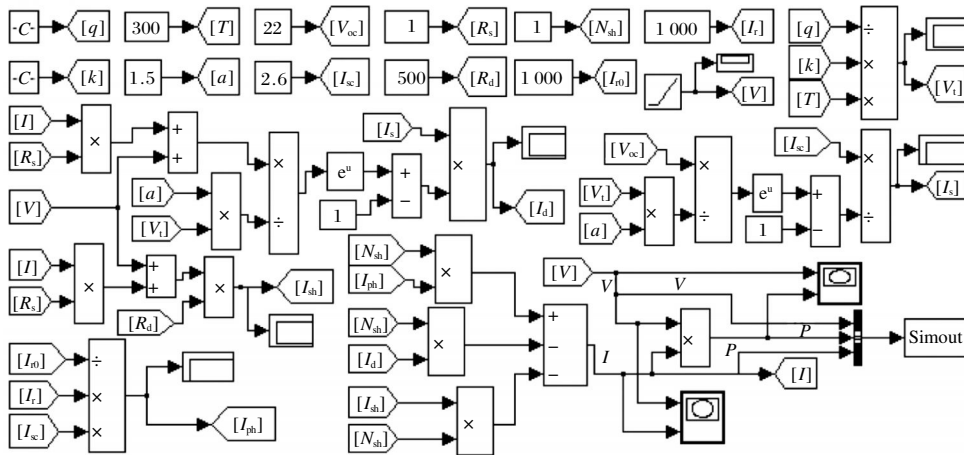


图 2 建立于 Simulink 中的太阳能电池板模块
Fig.2 Module of the solar panel in Simulink

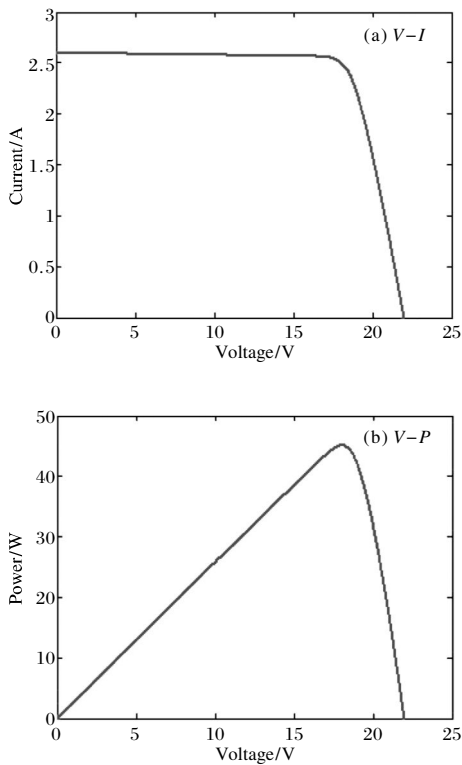


图 3 电池板的电压-电流、电压-功率关系曲线
Fig.3 $V-I$ curve and $P-V$ curve of the solar panel

2 实际环境下电池板的输出特性

2.1 不同串并联方式下太阳能电池板的输出特性

由于光伏照明系统中照明设备的额定工作电压和电流一般比单个太阳能电池板的输出电压和电流大, 所以在光伏照明系统中将许多块电池板进行串并联连接后使用。下面分别对不同并联电池板个数和不同串联电池板个数的模型进行仿真, 其电压-功率仿真结果曲线如图 4 所示。

从图 4(a)中可以看出, 随着并联电池板个数的增加, 最大功率值也增加, 但最大功率所对应的电压在减小, 即当并联的电池板数量较多时电池板工作在较小的电压即可达到最大功率。而这种变化在并联电池板个数增加到 3 个后就基本停止, 输出曲线基本不变。图 4(a)中曲线由下到上表示电池板并联个数分别为 1、2、3、4、5、6。图 4(b)中横轴的分度值比较大使得左边的第一条曲线看起来很小, 而且也使曲线下降看起来很陡直。从图 4(b)可以看出, 电池板的输出功率仍然是随着输出电压的增大先增大后减小。但是随着串联电

池板个数的增加,最大功率峰值先逐渐增大,超过一定值后输出曲线中最大功率峰值保持不变。图 4(b)中的曲线从左到右表示电池板串联个数分别为 1、12、23、34、45、56。

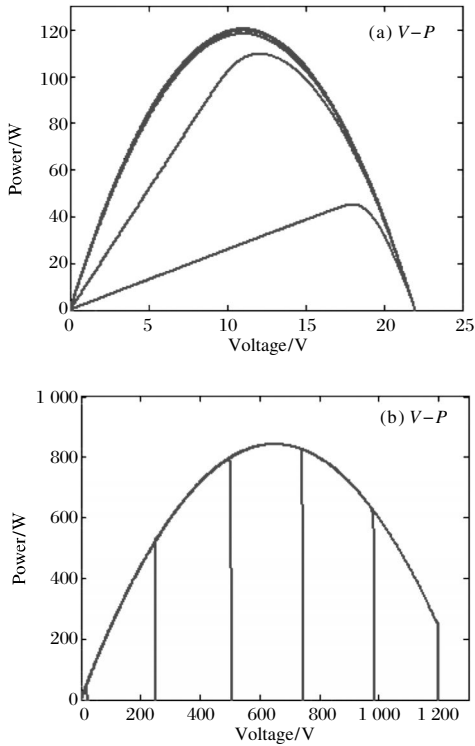


图 4 不同并联、串联电池板个数的电压-功率曲线
Fig.4 P-V curve with different parallel and series solar panels

2.2 不同光照强度下太阳能电池板的输出特性

在研究光照强度对电池板的影响时,为了消除温度的影响,在参考温度 T_0 为 300 K 时设定当前温度为恒定值 300 K。取 I_{t0} 为 $1\ 000\ \text{W/m}^2$ 为标准光照强度,根据公式:

$$I_{ph} = I_{sc} \cdot [1 + m(T - T_0)] \frac{I_t}{I_{t0}} \quad (6)$$

来判断其他各光照强度下的光生电流值。式中 I_t 为当前光照强度。

建立变化光照强度下的电池板仿真模块,其中光照强度的变化过程是以单位延迟模块产生的。为了与光照强度变化的频率相一致,电压信号设置为周期 2 s 的锯齿波。在 Simulink 建立的光照强度变化时电池板仿真模型中,光照强度和输出电压变化的仿真模块如图 5 所示。

设定仿真时间为 5 s,可以得出在光照强度为 $200、400、600、800、1\ 000\ \text{W/m}^2$ 下太阳能电池板的输

出特性曲线。仿真结果如图 6 所示。图中,(a)、(b)中的曲线从下到上光照强度依次分别为 $200、400、600、800、1\ 000\ \text{W/m}^2$ 。

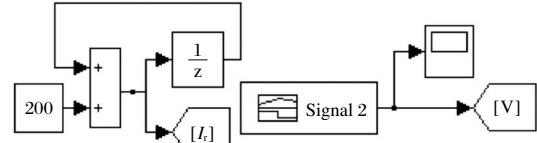


图 5 光照强度与输出电压变化的仿真模块
Fig.5 Intensity of illumination and the variable voltage modules

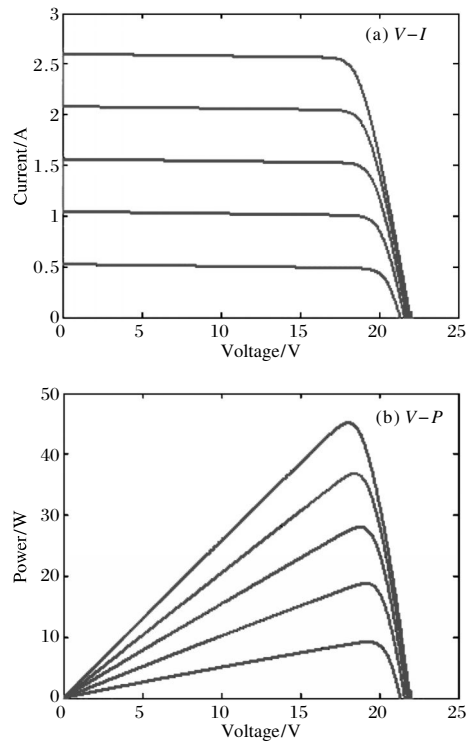


图 6 不同光照强度下电池板输出电压-电流曲线及输出电压-功率曲线

Fig.6 V-I and P-V curves in different intensity of illumination

从图中可以看出太阳能电池板的输出电压随着光照强度的增大基本保持不变,而输出电流随着光照强度的增强而增大。

2.3 不同温度下太阳能电池板的输出特性

从公式(6)可以看出,光生电流也是温度的函数。为消除光照强度的影响,标准光照强度 I_t 和当前光照强度 I_0 都取值为 $1\ 000\ \text{W/m}^2$ 。在电池板的短路电流温度系数 m 取值 $0.003\ \text{A/K}$ 的情况下可计算出不同温度下的光生电流大小。此外,温度也会对开路电压产生影响,由公式

$$V_{oc} = V_{ocref} [1 + n(T - T_0)] \quad (7)$$

可以得出不同温度下开路电压值的大小^[12]。 V_{ocref} 为参考开路电压,取值 22 V; T 为当前温度,分别取值 280 K、290 K、300 K; n 为太阳能电池板的开路电压温度系数,取值 -0.04 V/K。建立温度变化下电池板

仿真模块,如图 7 所示。

其余参数模块和图 2 中的相同。仿真后结果如图 8 所示。由图 8 可知,温度越高,电池板的输出电压越小,而输出电流略有增大。

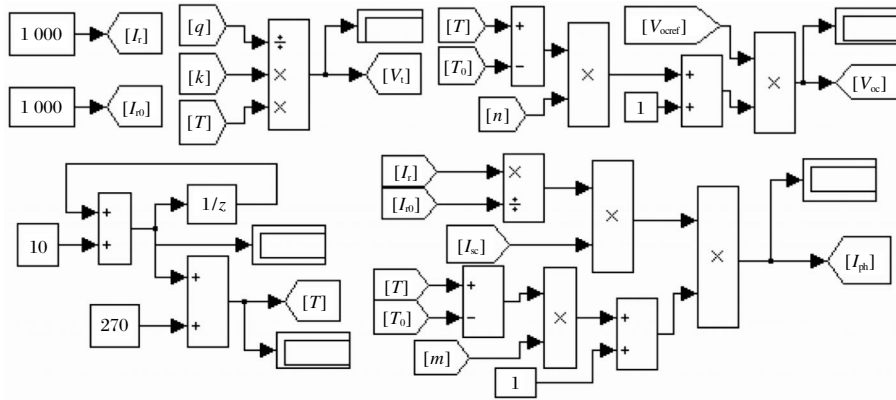


图 7 Simulink 中温度变化下的模块

Fig.7 Variable temperature module in Simulink

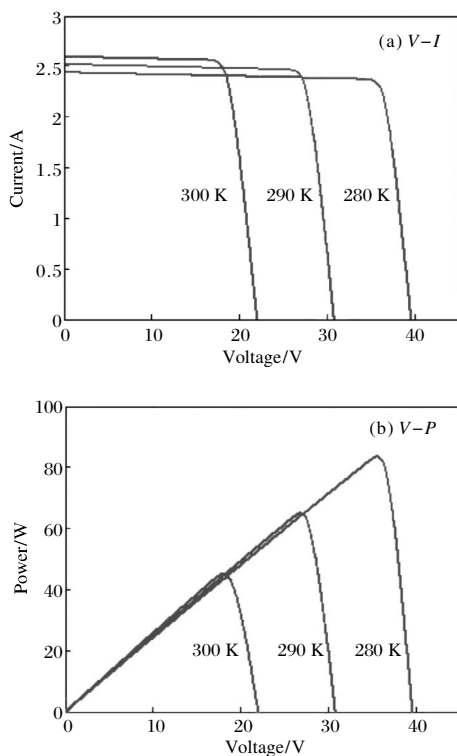


图 8 不同温度下电池板输出电压-电流曲线及输出电压-功率曲线

Fig.8 $V-I$ curve and $P-V$ curve in different temperature

3 总结

考虑太阳能电池板等效电路中的并联电阻,在 Matlab/Simulink 中建立模型可以得到光伏电池板的

输出特性曲线。从输出曲线可以看出,电池板的输出电流随着输出电压的增大先基本保持不变,然后快速减小;输出功率随着电压的不断增大,先增大再减小。此外,电池板最大功率处所对应的电压值会随着并联电池板的数量增加而减小,但当并联电池板数量超过 3 时输出曲线就基本保持不变;最大功率峰值会随着串联电池板数量的增加先增大,当串联电池板数量超过一定值时最大功率值开始保持不变。而且太阳能电池板的输出功率随着光照强度的增强而增大,随着温度的升高而减小,所以光伏照明系统中,电池板应尽可能在低温的条件下增强光照强度。

参考文献:

- [1] Yan Liyang, Xu Di, Ge Aiming. Novel maximum power point tracking method under non-uniform insolation conditions [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8):2173-2180. (in Chinese)
- [2] Wang Hao. A discussion about the relation about solar LED and the development of the city [J]. *China Illuminating Journal*, 2012, 23(2): 33-36.
- [3] Li Jingang, Li Guohua. A study of photovoltaic road lamp system[J]. *China Illuminating Journal*, 2008, 19(2): 54-57.
- [4] Sun Yingbo. A study of the independent solar LED illumination system[D]. Jinan: Shandong University, 2010: 7-8.

- [5] Wang Yue, Wang Nianchun, Shi Bin. A study of the solar panel model [J]. *Electrical & Electronics*, 2009, 142(10): 20–22.
- [6] Liu Zhuo. Solar LED illumination system [D]. Shanghai: Fudan University, 2010: 32–34.
- [7] Li Jiyong, Gong Renxi, Feng Zhaohu. A novel MPPT intelligent multiple method based on constant voltage and fuzzy control applied in photovoltaic power system [J]. *Advanced Science Letters*, 2012, 11(1): 184–188.
- [8] Miao Hongli. The design and realization of photovoltaic road lamp [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007: 10–12.
- [9] Sojoudi M, Madatov R, Sojoudi T. Optimization of efficiency of solar cells by accelerated electron ray to have an optimal and constant energy [J]. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, 2011, 3(9): 68–71.
- [10] Nema S, Nema R K, Agnihotri G. Matlab/Simulink based study of photovoltaic cells/modules/array and their experimental verification [J]. *International Journal of Energy and Environment*, 2010, 1(3): 487–500.
- [11] Qiu Dongdong, Wang Rui, Cheng Xiangai, et al. The effect of the ultrashort laser pulse to the monocrystal silicon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 112–115. (in Chinese)
- [12] Gao Zhigang, Li Yongdong, Sun Min. Compare and analysis several solar panel models [J]. *Power Supply Technologies and Applications*, 2012, 41(1): 112–115.