

文章编号: 1006-4729(2006)02-0178-03

# 硅太阳能电池数学模型的简化<sup>\*</sup>

陈中华<sup>1</sup>, 赵敏荣<sup>2</sup>, 葛亮<sup>1</sup>, 李慧玉<sup>1</sup>

(1. 上海电力学院 数理系, 上海 200090 2. 上海太阳能科技有限公司, 上海 201108)

摘要: 为了方便太阳能光伏系统的设计与优化, 选择合适的太阳能电池的工程数学模型是十分关键的. 在理论模型的基础上, 提出了一种方便实用的简化硅太阳能电池的数学模型, 并得出了最大功率点的计算公式.

关键词: 硅太阳能电池; 数学模型; 最大功率点

中图分类号: TK514 文献标识码: A

## The Simplification of Mathematical Model of Silicon Solar Cell

CHEN Zhong-hua<sup>1</sup>, ZHAO Min-rong<sup>2</sup>, GE Liang<sup>1</sup>, LI Hu-yu<sup>1</sup>

(1. Dept of Mathematics and Physics, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China  
2. Shanghai Solar Energy Co., Ltd. Shanghai 201108, China)

**Abstract** To make the design and optimization of solar energy systems convenient, it is very essential to choose the suitable model of engineering mathematics. A convenient and practicable mathematic model of silicon solar cell is offered in this paper. Simultaneously, a formula for calculating maximum power point is also obtained.

**Key words** solar cell; mathematic model; maximum power point

人类进入 21 世纪以来, 太阳能的开发和利用已广泛受到人们的重视, 特别是太阳能光伏发电的研究、开发和应用的春天已经到来. 硅太阳能电池是使用最普遍的一种利用半导体光伏效应将太阳能直接转化为电能的光伏电源. 为实现光伏发电系统、太阳能复合光伏利用能源系统的优化设计, 对硅太阳能电池的数学模型进行简化分析处理, 可方便地对光伏系统进行研究和设计.

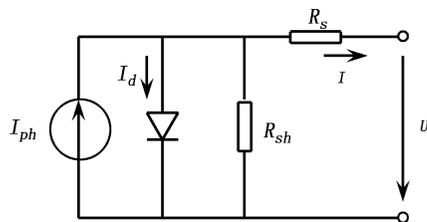


图 1 硅太阳能电池的等效电路

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(U + IR_s)}{nkT} \right] - 1 \right\} - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中:  $I_{ph}$ ——光生电流;  
 $I_0$ ——光电池反向饱和电流;  
 $n$ ——二极管因子;  
 $T$ ——绝对温度;

### 1 理论数学模型

根据电子学理论, 硅太阳能电池的等效电路如图 1 所示<sup>[1]</sup>.

太阳电池的  $IU$  方程为

$q$ ——电子电量;

$k$ ——玻尔兹曼常数;

$R_s$ ——光电池串联电阻;

$R_{sh}$ ——光电池并联电阻.

式(1)为物理原理的最基本解析表达式,但由于式中参数  $I_{ph}$ ,  $I_0$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $n$  不仅与太阳辐射强度和电池温度有关,而且确定这些参数也十分困难,因厂家提供的技术参数并不是一个适合于不同光照下的精确数据,没有多少实用价值.因此,必须建立既实用又较为精确的工程用简化数学模型.

## 2 简化数学模型

标准实验条件下太阳能电池组件的  $I_{sc}$ ,  $U_{oc}$ ,  $I_m$ ,  $U_m$ ,  $P_m$  是一般厂家提供的重要参数.

$I_{sc}$ ——短路电流;

$U_{oc}$ ——开路电压;

$I_m$ ——最大功率点处输出电流;

$U_m$ ——最大功率点处输出电压;

$P_m$ ——最大输出功率.

当光照较强时,光电流远远大于

$$\frac{U + IR_s}{R_{sh}}$$

故式(1)中该项可忽略,可简化为

$$I = I_{ph} - k \left\{ \exp \left[ \frac{q(U + IR_s)}{nkT} \right] - 1 \right\} \quad (2)$$

设在某光照条件下,太阳电池的开路电压和短路电流分别为  $U_{oc}$ ,  $I_{sc}$  将式(2)简化为

$$I = I_{sc} \left\{ 1 - A \left[ \exp \frac{BU}{U_{oc}} - 1 \right] \right\} \quad (3)$$

式中,  $A$ ,  $B$  为待定常数,可由下面方法确定.

将式(3)变为电压表达式:

$$U = \frac{U_{oc}}{B} \ln \frac{(1+A)I_{sc} - I}{AI_{sc}} \quad (4)$$

则太阳电池的输出功率为

$$P = IU = \frac{U_{oc}}{B} \ln \frac{(1+A)I_{sc} - I}{AI_{sc}} \quad (5)$$

在最大功率点处,  $I = I_m$ ,  $U = U_m$ , 代入式(4)整理后得

$$B = \frac{U_{oc}}{U_m} \ln \frac{(1+A)I_{sc} - I_m}{AI_{sc}} \quad (6)$$

又因为在开路状态下,  $I = 0$  时,  $U = U_{oc}$ , 则式(4)变为

$$B = \ln \frac{1+A}{A} \quad (7)$$

联立式(6)和式(7)得

$$\ln \frac{1+A}{A} = \frac{U_{oc}}{U_m} \ln \frac{(1+A)I_{sc} - I_m}{AI_{sc}} \quad (8)$$

在常温状态下,常数  $A \ll 1$ , 由式(8)得  $A$  的近似解:

$$A = \left[ \frac{I_{sc} - I_m}{I_{sc}} \right]^{\frac{U_{oc}}{U_{oc} - U_m}} \quad (9)$$

由此可计算出常数  $A$ ,  $B$ .

可见,根据此模型只需输入太阳能电池通常的技术参数  $I_{sc}$ ,  $U_{oc}$ ,  $I_m$ ,  $U_m$ , 由式(7)和式(9)求出  $A$ ,  $B$  后,再经实验测定不同光照下的  $I_{sc}$ ,  $U_{oc}$ , 最后由式(3)就可确定太阳电池在不同光照下的伏安特性.

## 3 不同光照下的硅太阳能电池的最大功率点的计算

利用式(5)对  $I$  求导数得

$$\frac{dP}{dI} = \frac{U_{oc}}{B} \left[ \ln \frac{(1+A)I_{sc} - I}{AI_{sc}} - \frac{I}{(1+A)I_{sc} - I} \right] \quad (10)$$

当  $I = I_m$  时,  $\frac{dP}{dI} = 0$  即

$$\frac{U_{oc}}{B} \left[ \ln \frac{(1+A)I_{sc} - I_m}{AI_{sc}} - \frac{I_m}{(1+A)I_{sc} - I_m} \right] = 0 \quad (11)$$

得

$$\ln \frac{(1+A)I_{sc} - I_m}{AI_{sc}} = \frac{I_m}{(1+A)I_{sc} - I_m} \quad (12)$$

将  $U = U_m$  代入式(4)得

$$\frac{U_m}{U_{oc}} B = \ln \frac{(1+A)I_{sc} - I_m}{AI_{sc}} \quad \text{代入式(12)得}$$

$$U_m = \frac{U_{oc}}{B} \frac{I_m}{(1+A)I_{sc} - I_m} \quad (13)$$

由于常数  $A$  很小,式(12)和式(13)可简化为

$$\ln \frac{I_{sc} - I_m}{AI_{sc}} = \frac{I_m}{I_{sc} - I_m} \quad (14)$$

$$U_m = \frac{I_m U_{oc}}{B(I_{sc} - I_m)} \quad (15)$$

利用计算机 matlab 软件可较方便地从式(14)中求出最大功率点电流  $I_m$ , 然后代入式(15)即可得到最大功率点电压  $U_m$ <sup>[2]</sup>.

## 4 实验与理论计算结果的比较

实验中我们选择了上海太阳能科技有限公司

生产的4种不同型号的单晶硅太阳能电池组件(S-15G, S-20G, S-42G, S-53C)的技术参数代入模型(3)进行计算,并通过实验比较分析,结果令人满意.因篇幅原因,这里仅介绍其中一种型号样品的理论计算与实验情况.

#### 4.1 伏安特性曲线

实验样品:单晶硅太阳能电池组件,型号 S-42C.

生产商:上海太阳能科技有限公司.

技术参数:  $U_{oc}=22.232\text{ V}$

$I_c=2.6104\text{ A}$

$P_{max}=40.152\text{ W}$

$U_m=17.616\text{ V}$

$I_m=2.2793\text{ A}$

由式(7)和式(9)计算出 A, B 常数为

$A=4.797 \times 10^{-5}$   $B=9.945$

则该电池的简化数学模型为

$$I=I_c \left\{ 1 - 4.797 \times 10^{-5} \left[ \exp \frac{9.945U}{U_{oc}} - 1 \right] \right\}$$

实验与理论计算比较见图 2

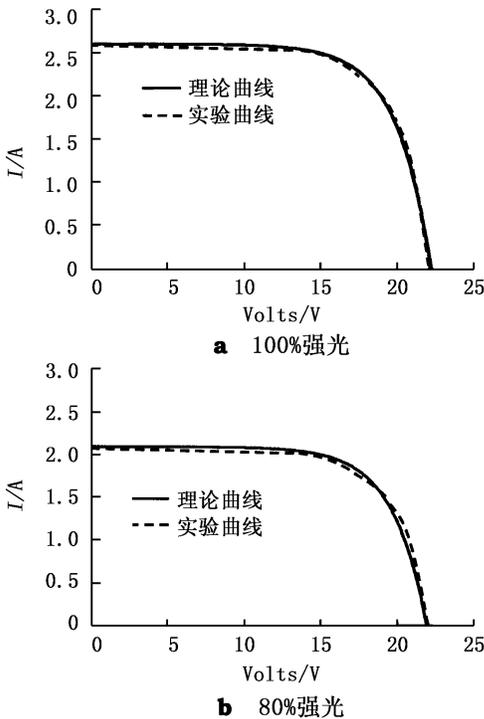


图 2 单晶硅太阳能电池组件 S-42C 在不同光强下的实验与理论计算结果

#### 4.2 最大功率点

实验结果为  $U_m=17.4530\text{ V}$ ,  $I_m=1.8152\text{ A}$ ,  $P_m=31.618\text{ W}$ . 将  $A=4.797 \times 10^{-5}$  和  $B=9.945$  代入式(14)和式(15),同时代入 80%光照下的实验值  $I_{sc}=2.0969\text{ A}$  和  $U_{oc}=21.960\text{ V}$  得

$$h \frac{2.0969 - I_m}{1.0059 \times 10^{-4}} = \frac{I_m}{2.0969 - I_m} \quad (16)$$

$$U_m = \frac{21.960 I_m}{9.945 (2.0969 - I_m)} \quad (17)$$

计算结果为  $U_m=17.1644\text{ V}$ ,  $I_m=1.8579\text{ A}$ ,  $P_m=31.889\text{ W}$ . 最大功率点电流误差 2.35%; 最大功率点电压误差 1.65%; 最大功率误差 0.86%.

#### 5 结束语

实验结果与简化模型的计算比较,我们可以得出结论:硅太阳能电池简化数学模型(3)完全可以替代原数学模型(1),将其作为工程实用模型使用.同时,由于模型(3)简便,且计算机编程方便,特别是解决了原数学模型最大功率点理论计算较为复杂的问题,因此,十分有利于太阳能光伏系统的优化设计.

#### 参考文献:

- [1] 李安定. 太阳能光伏发电系统工程[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2001.
- [2] 杨金焕, 陈中华, 陆 钧, 等. 转换式太阳能光电水泵性能的分析[J]. 上海: 上海电力学院学报, 1996, 12(1): 25-30.
- [3] Ziyad Salem, Arun K. Mupur, Fouad Dagher. Two-Stage Electrical Array Reconfiguration Controller for PV-Powered Water Pump[J]. Solar Energy, 1990, 44(1): 51-56.
- [4] 赵福鑫, 魏彦章. 太阳能电池及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.