

# 基于 PSIM 的光伏模块建模与电气特性仿真

刘俊杰, 张新燕

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** 光伏模块依靠光伏逆变器将产生的直流电转变为交流电用于负载供电, 光伏逆变器的设计需要考虑光伏模块的电气特性。根据光伏电池物理机制的数学模型, 采用 PSM 软件中已有的器件搭建光伏模块仿真模型。利用该仿真模型, 通过 PSM 软件模拟实际光伏模块在不同太阳光照强度、环境温度下的  $I-V$  和  $P-V$  特性。通过仿真分析串联电阻  $R_s$  和并联电阻  $R_{sh}$  变化对模块输出特性的影响, 更加深入地了解光伏模块的电气特性。模型为将来光伏逆变器设计时的动态仿真研究提供了一个准确的仿真电源。

**关键词:** 光伏模块; 数学模型; PSM; 电气特性

**Abstract:** DC from photovoltaic (PV) module is converted into AC to supply load through the PV inverter. The electrical characteristics of PV module need to be considered in the design of PV inverter. According to the mathematic model based on physics mechanism of PV cell, the simulation model of PV module is constructed with the element in the PSM library. Using the simulation model,  $I-V$  and  $P-V$  characteristics of actual PV module are simulated in different light intensity and ambient temperature by PSM. Through the simulation, the effect of the series and parallel resistances on the output characteristics of PV module is analyzed, and the electrical characteristics of PV module are acquired more clearly. The model has provided an accurate simulation power source for dynamic simulation study of PV inverter design.

**Key words:** photovoltaic module; mathematic model; PSM; electrical characteristic

**中图分类号:** TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0006-03

一般说来, 在光伏发电系统的研究设计过程中, 对整个系统进行仿真是一个必不可少的环节, 而建立一个能准确反映光伏模块输出特性的仿真模型是完成系统动态仿真的关键<sup>[1]</sup>。用于研究光伏发电系统的仿真软件主要有 MATLAB、PSPICE、PSM 等。光伏模块的电气特性对逆变器设计非常重要, 对光伏模块的电气特性进行计算和仿真分析, 以提供最优的控制策略, 使逆变器提供最大的转换效率。对于 PSPICE 来说, 其主要应用于电子电路的仿真, 虽然人们在 PSPICE 下实现了电力电子器件模型, 但是在将这些模型用于电路的仿真并采用比较灵活的控制策略时仍有很大的局限性。然而, MATLAB/Simulink 虽然在实现控制策略方面有很大的优势, 但是功率器件模型过于简单。PSM 是专门为电力电子控制设计的一款仿真软件。它可以快速地仿真和便利地与用户接触。另外, PSM 软件具有 C 语言和 MATLAB/Simulink 接口, 充分扩展了控制策略的实现方式, 集合了几个仿真软件的优势<sup>[2]</sup>。在 PSM 软件下搭建模型和进行光伏模块电气特性的仿真分析, 为以后进一步研究光

光伏发电系统和进行光伏逆变器的设计和研究提供了一个良好的仿真平台。

## 1 光伏电池物理机制的数学模型<sup>[3]</sup>

光伏电池就是利用半导体光伏效应制成, 它是一种直接将光能转换成电能的转换器件。根据电池的实际特性, 为达到工程精度要求, 光伏电池的等效电路模型选择既考虑串联电阻, 又考虑并联电阻较精确的仿真模型, 其等效电路模型如图 1 所示。

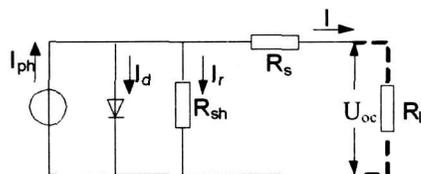


图 1 光伏电池的等效电路图

根据图 1 所示的光伏电池等效电路模型, 应用基尔霍夫电流电压定律, 可得流过负载的电流  $I$  与其端口电压  $U$  之间的关系。

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

其中

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50767003)

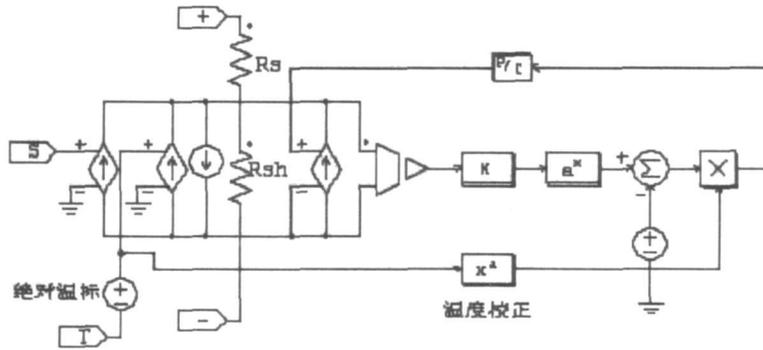


图 2 光伏模块的电路模型

$$\begin{aligned}
 I_{ph} &= I_c \left( \frac{S}{1000} \right) + C_T (T - T_{ref}) \\
 I_i &= I \left[ e^{\frac{q(U+R_s I)}{AKT}} - 1 \right] \\
 I_0 &= I_{i0} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 e^{\left[ \frac{qE_g}{Ak} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right]} \\
 I &= \frac{U + R_s I}{R_{sh}} \quad (2)
 \end{aligned}$$

式中,  $I_{ph}$  为光生电流;  $I_c$  为短路电流;  $I$  为负载电流;  $U$  为端口电压;  $E_g$  为禁带宽度电压 ( $1.12e$ );  $S$  为光照强度 ( $W/m^2$ );  $k$  为玻尔兹曼常数 ( $1.38 \times 10^{-23}$ );  $T$  为电池温度 (K);  $T_{ref}$  为参考温度;  $q$  为电子电量 ( $1.6 \times 10^{-19}$ );  $R_s$  为串联电阻 ( $\Omega$ );  $R_{sh}$  为并联电阻 ( $\Omega$ );  $C_T$  为温度系数;  $A$  为 PN 结理想因子 ( $1.2$ );  $I_{i0}$  为  $T_{ref}$  下电池饱和电流。

## 2 光伏模块的 PSM 仿真模型

在实际应用中,按照所需要的功率等级和电压等级将若干光伏电池串并联组成光伏模块,以光伏模块方式进行输电。在考虑整个光伏模块的模型时,通常要用一些假设后对实际情况加以简化。此时,光伏模块的输出将满足以下方程组。

$$\begin{aligned}
 U_a &= N_s U_c \\
 I_a &= N_p I_c \\
 P_a &= N_s N_p P_c \quad (3)
 \end{aligned}$$

其中,  $U_a$ 、 $I_a$ 、 $P_a$  分别为整个光伏模块的输出电压、电流及功率;  $N_s$ 、 $N_p$  分别为光伏模块中串联和并联电池个数;  $U_c$ 、 $I_c$ 、 $P_c$  分别为单个光伏电池的输出电压、电流及功率。则根据上一节的光伏电池数学模型,可以得到如下光伏模块表达式。

$$I_a = I_c - I \left[ e^{\frac{q(U+R_s I)}{AKT}} - 1 \right] - \frac{U + R_s I}{R_{sh}} \quad (4)$$

$$\text{其中, } I_i = C_D T^3 e^{\left( -\frac{qE_g}{AKT} \right)} \quad (5)$$

根据以上光伏模块的数学表达式及确定公式中的各个参数,在 PSM 软件中采用已有的器件模块直接搭建实现该模型,光伏模块的电路模型如图 2 所示。

其中,端口 S、T、+和 - 分别为用于设置光照强度、温度以及光伏模块的输出电压与外围主电路相连接的端口。

## 3 光伏模块 PSM 模型的仿真分析

采用了 MSX-60 的光伏模块,模型所需的电池结构参数如表 1 所示。

表 1 光伏电池模型参数表

$R_s$	$R_{sh}$	$E_g / q$	$C_T$	$A$
0.008	1.000	1.12	0.0024	1.2

建立如图 3 所示仿真电路,用 PSM 软件进行仿真验证<sup>[4]</sup>。

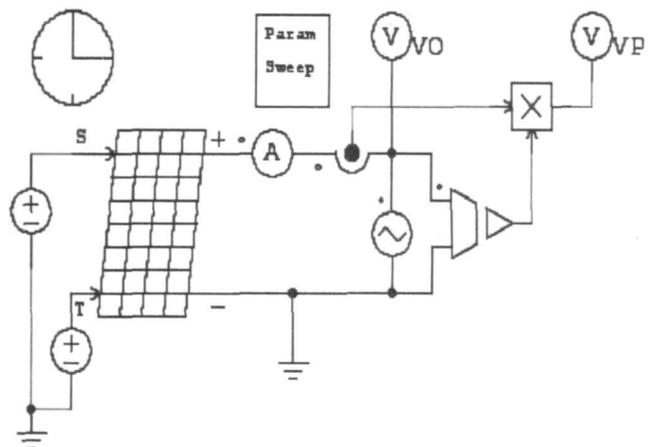


图 3 光伏模块 PSM 仿真电路

图中 S、T 分别模拟光照强度与电池温度;用电流表 A 检测光伏模块的输出电流。用表  $V_0$  测量模块端口输出电压;然后分别引电压和电流进乘法器用

表  $V_p$  显示模块功率。仿真时,通过对 S、T 输入端的电压分别进行参数扫描,来模拟光照强度和温度的变化,从而得到不同光照强度和环境温度条件下,光伏模块的输出电流、输出功率随端口电压变化的关系。

首先,设置 T 端口的电压为 25 V,对 S 输入端的电压进行参数扫描,使其电压分别从 400 V 增加到 1 000 V,步长为 200 V。分别可以得到光伏模块在相同环境温度 (25 °C) 不同光照强度 S 条件下的模块输出电流 I 输出功率 P 对应输出电压 V 关系的 I-V 和 P-V 输出特性曲线,如图 4、图 5 所示。

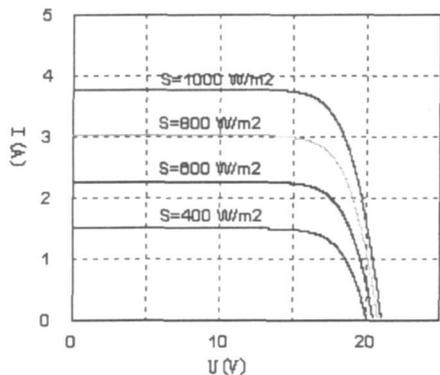


图 4 不同光照强度下 I-V 特性曲线 (T=25 °C)

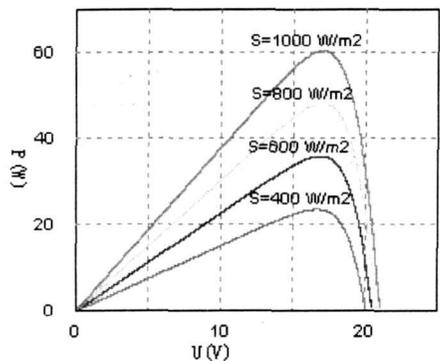


图 5 不同光照强度下 P-V 特性曲线 (T=25 °C)

从上图可知,随着光照增强,输出电流和输出功率增大,最大功率点的值也越大。输出电压从零逐渐开始增大,输出电流基本不变;而输出功率随着电压线性增大,当输出电压增大到一定值,输出电流和输出功率迅速减小,即光伏模块存在最大功率点。

然后,设置 S 端口的电压为 1 000 V,对 T 输入端的电压进行参数扫描,使其电压分别从 0 V 增加到 75 V,步长为 25 V。分别可以得到光伏模块在相同光照强度 (1 000 W /m<sup>2</sup>) 不同环境温度 T 条件下的模块输出电流 I 输出功率 P 对应输出电压 V 关系的 I-V 和 P-V 输出特性曲线,如图 6、图 7 所示。

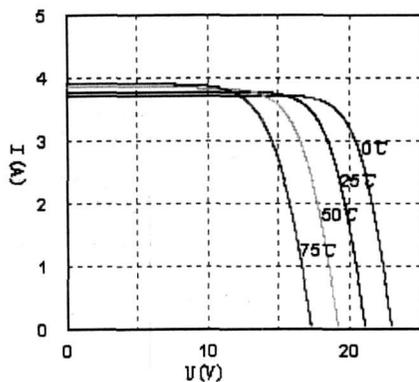


图 6 不同温度下 I-V 特性曲线 (S=1 000 W /m<sup>2</sup>)

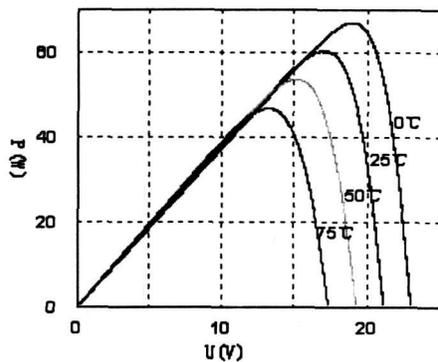


图 7 不同温度下 P-V 特性曲线 (S=1 000 W /m<sup>2</sup>)

从上图同样可知,光伏模块的输出电流随着环境温度的增大而略有减小,而短路电压有所增大。输出功率由环境温度的增大而减小。

用以上仿真结果与文献 [5] 数据手册的输出特性相比具有极好的一致,体现了模型的合理、有效性。

#### 4 串联电阻 $R_s$ 和并联电阻 $R_{sh}$ 对模块输出特性的影响分析

理想光伏电池的转换效率为

$$\eta = \frac{I_m V_m}{P_{in}} = \frac{FF I_{sc} V_{oc}}{P_{in}} \quad (6)$$

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (7)$$

式中,  $P_{in}$  为太阳辐射功率; FF 为填充因子,填充因子是最大功率矩形对  $I_{sc} \times V_{oc}$  矩形的比例,若要得到最大效率,  $P_{in}$  不变时,要使式中分子  $I_m V_m$  最大。但是,对于实际光伏电池,有各种因素影响转换效率。还对串联电阻  $R_s$  和并联电阻  $R_{sh}$  对转换效率的影响进行了分析。

(下转第 50 页)

分类方法 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 1-6.

[6] GANG Z L. Wavelet-based Neural Network for Power Disturbance Recognition and Classification [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(4): 1560-1568.

[7] 李天云, 陈晓东, 赵为红, 等. 几种短时电能质量扰动分类和检测的双小波分析法 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 26-30.

[8] 严居斌, 刘晓川, 杨洪耕, 等. 基于小波变换模极大值原理和能量分布曲线的电力系统短期扰动分析 [J]. 电网技术, 2002, 26(4): 16-18.

[9] 王晶, 束洪春, 陈学允. 动态电能质量的分形指数小波分析方法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 40-45.

[10] Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the Complex Spectrum; the S Transform. IEEE Trans On Signal Process 1996, (44): 998-1001.

[11] I W. C. Lee P. K. Dash. S-transform-based Intelligent System for Classification of Power Quality Disturbance Sig-

nals [J]. IEEE Trans Industrial Electronics 2003, 50(4).

[12] M. V. Chikuri P. K. Dash. Multiresolution S-transform-based Fuzzy Recognition System for Power Quality Events [J]. IEEE Trans Power Delivery, 2004, 19(1).

[13] 占勇, 程浩忠, 丁屹峰, 等. 基于 S 变换的电能质量扰动支持向量机分类识别 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 24(4): 51-56.

[14] 刘守亮, 肖先勇, 杨洪耕. 基于 S 变换模时频矩阵相识度的短时电能质量扰动分类 [J]. 电网技术, 2006, 30(5): 67-71.

[15] 边肇祺, 等. 模式识别 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.

作者简介:

张中全 (1974), 男, 大学本科, 电力工程师, 成都电业局青白江供电局调控中心主任, 从事多年调度运行管理工作;

赵俊 (1984), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量与电力市场。  
(收稿日期: 2009-11-19)

(上接第 8 页)

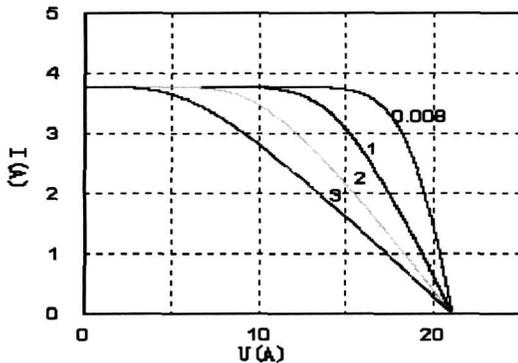


图 8 不同串联电阻  $R_s$  下 I-V 特性曲线

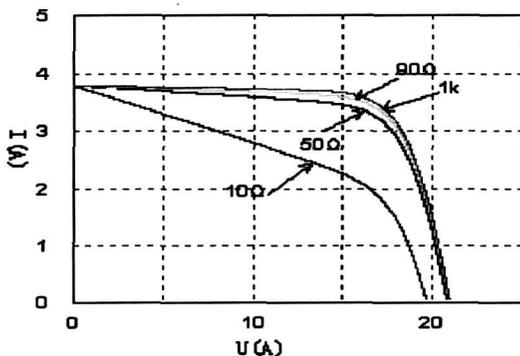


图 9 不同并联电阻  $R_p$  下 I-V 特性曲线

图 8、图 9 为不同串并联电阻下的 I-V 特性曲线, 曲线表明光伏模块的等效串并联电阻对输出特性都有影响。但是, 串联电阻对输出特性的影响较大, 并联电阻影响较小。而且, 随着等效串联电阻越大, 并联电阻越小, 填充因子下降越快, 进而影响模块转换效率。

5 结束语

根据物理机制的光伏电池数学表达式, 在满足工程精度条件下简化处理光伏模块模型。同时建立了基于 PSM 软件的仿真模型。对其模拟仿真结果和数据手册进行对比分析, 发现仿真结果和数据手册信息具有极好的相关性, 同时也证明了该仿真模型正确性和可行性。在 PSM 软件下建立的光伏模块仿真模型, 为下一步研究光伏并网逆变器受温度和光照强度影响的特性提供有效的仿真模型和依据<sup>[6]</sup>。

参考文献

[1] 王章权, 张超, 何湘宁. 基于 Pspice 模拟行为模型的光伏阵列建模 [J]. 计算机仿真, 2007, 24(8): 225-240.

[2] 赵争鸣, 刘建政. 太阳能光伏发电及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 233-243.

[3] 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: 34-36.

[4] Powersim Inc. PSM User's Guide [Z]. USA: Powersim Inc, 2003.

[5] Sharp. NU-SOE3E Single-Crystalline Silicon Photovoltaic Module with 180W Maximum Power Datasheet [Z]. 2005.

[6] 戴训江, 晁勤. 太阳能光伏模块电气特性的数学建模与仿真 [J]. 半导体光电, 2009, 30(1): 47-49.

作者简介:

刘俊杰 (1986) 男, 汉族, 在读硕士研究生, 研究方向为光伏发电及其并网技术。  
(收稿日期: 2010-10-12)