

# 光伏电池最大功率点快速定位方法

雷志勇<sup>1</sup>, 兰建军<sup>1</sup>, 黄靖<sup>2</sup>

(1. 福建水利电力职业技术学院 电力工程学院, 福建 永安 366000;

2. 福建工程学院 电子电气与物理学院, 福建 福州 350118)

**摘要:** 针对光伏电池最大功率点定位时间长的问题, 提出一种基于 SPICE 模型的光伏电池最大功率点快速定位方案。依据构建的光伏电池 SPICE 模型获取了不同光照条件下功率分布数据, 对功率分布数据进行二元样条插值后, 利用最小二乘法对功率分布曲面进行拟合, 获取了光伏电池输出功率、输出电压和环境照度的数学模型, 在给定环境照度后, 通过极值求取的方法实现最大功率点的快速定位。

**关键词:** 光伏电池; 特性曲线; SPICE 模型; 功率分布; 曲面拟合; 最大功率点

**中图分类号:** TM615

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-4348(2023)03-0284-04

## Fast positioning method of maximum power point of photovoltaic cell

LEI Zhiyong<sup>1</sup>, LAN Jianjun<sup>1</sup>, HUANG Jing<sup>2</sup>

(1. School of Electric Power Engineering, Fujian College of Water Conservancy and Electric Power, Yong'an 366000, China;

2. School of Electronic, Electrical Engineering and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of long positioning time of the maximum power point of photovoltaic cells, a fast-positioning scheme of the maximum power point of photovoltaic cells based on SPICE model was proposed. The power distribution data under different lighting conditions were obtained according to the SPICE model of photovoltaic cells constructed. After binary spline interpolation was performed on the power distribution data, the least square method was used to fit the power distribution surface, and the mathematical model of photovoltaic cell output power, output voltage and ambient illuminance was obtained. The maximum power point can be located quickly by the method of extreme value after the ambient illumination is given.

**Keywords:** photovoltaic cell; characteristic curve; SPICE model; power distribution; surface fitting; maximum power point

随着新能源的发展, 光伏发电以其绿色、环保等优点得到了广泛的重视, 成为火力发电的有效补充<sup>[1]</sup>。为了能够对光伏发电系统进行仿真分析和发电量预测, 需要了解光伏电池在不同光照条件下的  $I-U$  或者  $P-U$  特性。然而光伏电池生产厂家只提供标准测试条件下的特性曲线、短路电流、开路电压、最大功率点电流和最大功率点电压以及温度系数等主要参数。因此, 建立光伏电池模型后进行特性分析是本领域的惯用方法<sup>[2-3]</sup>。

为了提高光伏发电效率, 研究者利用构建的光伏电池模型开展了最大功率点跟踪的研究。其中, 较为常用的方法有扰动观测法、爬山法、电导增量法等<sup>[4-6]</sup>。但是这些研究方法和策略通常是利用 MATLAB 等平台构建光伏电池数学模型后依托公式推导和相应算法进行求解计算的, 当光照条件发生变化时, 计算量大、跟踪周期长且实时性差。

针对上述问题, 本研究提出一种基于 SPICE

模型的光伏电池建模和最大功率点快速定位方案,利用构建的光伏电池模型生成了大量的不同光照条件下的光伏电池  $P$ - $U$  关系数据,对数据进行二次样条插值后,利用最小二乘法对光伏电池功率分布曲面进行拟合,获取光照、最大功率和电压三者关系的曲面方程。依据拟合的曲面方程,输入实时监测的光照辐射度后,以功率为目标值,求解极值后,实现不同光照条件下的光伏电池最大功率点的快速定位。

## 1 光伏电池建模与验证

### 1.1 模型构建

光伏电池通常采用 4 种数学模型进行描述<sup>[7]</sup>,其中 5 参数等效电路模型是一种较为常用的数学模型,光伏电池单二极管结构主要由电流源、二极管、并联电阻和串联电阻构成<sup>[8]</sup>,光伏电池的输出电流  $I$  可由方程(1)描述。

$$I=I_{ph}-I_0\left\{\exp\frac{q(V+R_sI)}{aKTN_s}-1\right\}-\frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中, $I$  为光伏电池的输出电流; $I_{ph}$  为光生电流; $I_0$  为二极管反向饱和电流; $q$  为单位电荷量; $V$  为输出电压; $R_s$  为等效串联电阻; $N_s$  为二极管理想因子; $K$  为玻尔兹曼常量; $T$  为电池温度; $R_{sh}$  为等效并联电阻。

由于光伏电池的输出电流和输出电压耦合,式(1)为超越方程,通常采用朗伯 W 函数等数值分析方法进行求解<sup>[9]</sup>,但耗时长而且过程复杂。本研究提出的基于 SPICE 模型的建模方法,只需要光伏电池生产厂家提供的开路电压、短路电流、理想因子等基本参数,就可完成光伏电池 SPICE 模型构建,设计的光伏电池 SPICE 模型如图 1 所示。模型参数由 MSX-60 型太阳能电池板厂家提供,具体数据:开路电压  $V_{CO}$  为 21.1 V,短路电流  $I_{SC}$  为 3.8 A,二极管饱和电流  $I_0$  为  $2.524\ 5\text{e-}10$  A,理想因子为 0.978 4,并联电阻  $R_{sh}$  为  $153.564\ 4\ \Omega$ ,串联电阻  $R_s$  为  $0.385\ 72\ \Omega$ 。

光伏电池模型中压控电流源用于模拟光伏电池的光电流  $I_{ph}$ ,调节控制电压源  $V_1$  的电压可模拟不同的光照条件。为保证设光伏电池模型和真实光伏电池特性一致,需要对图 1 中二极管 D 参数进行改进<sup>[10]</sup>。

### 1.2 模型验证

为了验证构建的光伏电池 SPICE 模型性能,

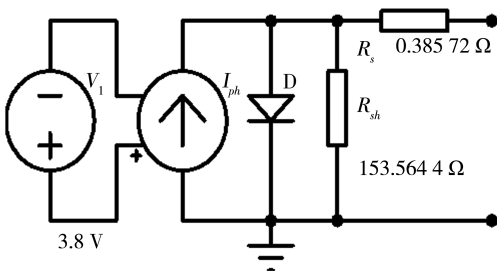


图 1 光伏电池 SPICE 模型

Fig.1 SPICE model of photovoltaic cell

在 Proteus 中利用直流扫描图表分析工具(DC SWEEP)对模型电路进行了扫描分析,获取了光伏电池 SPICE 模型的  $I$ - $U$  特性曲线。所建模型和实际光伏电池在标准测试条件下的特性对比及其相对误差如图 2 所示。由图 2 可知,模型曲线和实际电池曲线最大相对误差为 1.89%,平均相对误差小于 0.7%,对比文献[8]和[9]的模型误差,本次构建的光伏电池 SPICE 模型误差满足精度要求,能够准确反映实际光伏电池特性,可以根据本模型进行相关特性研究。

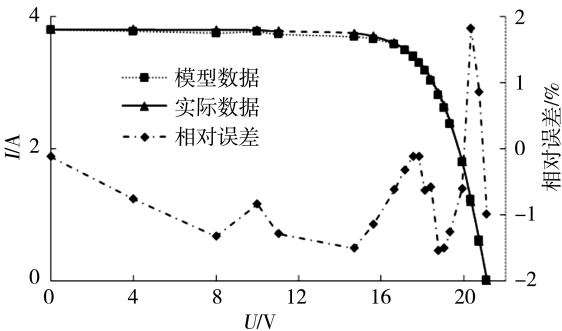


图 2  $I$ - $U$  特性曲线对比图

Fig.2 Comparison of  $I$ - $U$  characteristic curves

## 2 光伏电池功率曲面拟合

### 2.1 不同光照下功率曲线获取

不同的光照条件下光伏电池输出功率不一样,为进一步了解不同光照条件下光伏电池最大功率点变化规律,利用 Proteus 软件的转移特性图表(Transfer)进行了光伏电池模型  $P$ - $U$  特性曲线的实验测试。获取了太阳辐照度在  $100\sim1\ 000\ \text{W/m}^2$  (步进  $100\ \text{W/m}^2$ ) 间变化时的特效曲线,不同光照条件下的光伏电池  $P$ - $U$  特性曲线如图 3 所示。

提取转移特性图表生成的功率曲线数据后,就可以功率分布曲面的拟合。由于获取的功率分布数据量较少,为了保证曲面拟合效果,需要对数

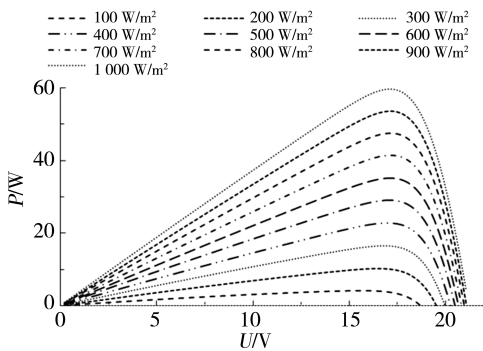


图 3 不同光照下  $P$ - $U$  特性曲线

Fig.3  $P$ - $U$  characteristic curves under different illumination

据进行插值后才能进行曲面拟合。

2.2 数据插值和曲面拟合

设定光伏电池在三维空间上最大功率点列  $P_1, P_2, P_3, \dots, P_m$ , 其对应坐标为  $(u_1, v_1, z_1), (u_2, v_2, z_2), \dots, (u_m, v_m, z_m)$ 。若取  $\varphi(x, y)$  为张量积插值样条函数, 如果采用最小二乘法进行曲面拟合, 需要满足  $\sum \omega_\mu [\varphi(u_\mu, v_\mu) - z_\mu]^2$  达到最小, 其中  $\omega_\mu$  为给定权函数<sup>[11]</sup>。

先构造矩形区域  $D = [a, b] \times [c, d]$ , 使  $xoy$  平面上的离散点  $(u_1, v_1, z_1), (u_2, v_2, z_2), \dots, (u_m, v_m, z_m)$  在此矩形区域上。因此, 可取:

$$\begin{cases} a = \min\{u_i\}, b = \max\{u_i\} \\ c = \min\{v_i\}, d = \max\{v_i\} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

再采用与上一段的划分  $\Delta = \Delta_x \times \Delta_y$ , 则:

$$\begin{cases} \Delta_x: a = x_0 < x_1 < \dots < x_{N+1} = b \\ \Delta_y: c = y_0 < y_1 < \dots < y_{M+1} = d \end{cases} \quad (2)$$

区域  $D$  分成  $(N+1) \times (M+1)$  个矩形, 则有:

$$D_{ij} = \{(x, y) | x \in [x_i, x_{i+1}], y \in [y_j, y_{j+1}]\} \quad (3)$$

增加一些新的节点, 扩充分划如下:

$$\begin{cases} x_{-l} \leq \dots \leq x_0 \leq \dots \leq x_{N+1} \leq \dots \leq x_{M+l+1} \\ y_{-k} \leq \dots \leq y_0 \leq \dots \leq y_{M+1} \leq \dots \leq y_{M+K+1} \end{cases} \quad (4)$$

对于上述节点分别做  $B$  样条函数:

$$B_{i,j}(x), \bar{B}_{j,k}(y) = (i = -l \sim N), j = -k \sim M \quad (5)$$

样条函数分别是关于  $x$  的  $l$  次多项式和关于  $y$  的  $k$  次多项式, 故关于分划  $\Delta$  的二元张量积样条函数可以唯一表示成:

$$S(x, y) = \sum_{i=-l}^N \sum_{j=-k}^M C_{i,j} B_{i,j}(x) \bar{B}_{j,k}(y) \quad (6)$$

使最小二乘逼近目标表达式(7)达到最小:

$$F(C) = \sum_{\mu=1}^m \omega_\mu \left[ z_\mu - \sum_{i=-l}^N \sum_{j=-k}^M C_{ij} B_i(u_\mu) \bar{B}_j(v_\mu) \right]^2 \quad (7)$$

其中,  $C = (C_{i,j})$ ,  $i, j$  取值范围同上,  $\omega_\mu (\mu = 1 \sim m)$  为给定常数数组, 一般取值为 1。

依据上述原理, 在 MATLAB 中完成了样条插值, 得到如图 4 所示功率分布曲面图。

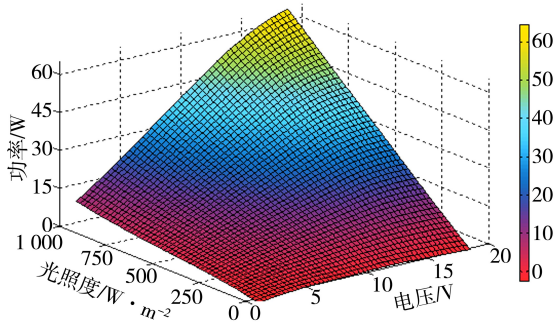


图 4 功率分布曲面图

Fig.4 Power distribution surface diagram

根据功率曲面分布情况, 拟合生成如式(8)所示的功率曲面方程:

$$\varphi(x, y) = y * (a * x^4 + b * x^3 + c * x^2 + d * x) + e \quad (8)$$

其中,  $\varphi(x, y)$  为光伏电池输出功率,  $y$  为光伏电池输出电压,  $x$  为环境照度, 拟合系数  $a = -0.000\ 3$ ,  $b = 0.009\ 71$ ,  $c = -0.108\ 8$ ,  $d = 1.422$ ,  $e = -1.148$ 。

用于体现拟合效果的相关参数分别为: 和方差  $SSE = 5.471$ , 确定系数  $R\text{-square} = 1$ , 自由度调整系数  $Adjusted\ R\text{-square} = 1$ , 均方根  $RMSE = 0$ , 拟合效果良好。

3 最大功率点定位

3.1 定位原理

依据拟合的功率分布曲面方程, 可以获取光伏电池输出功率、光伏电池输出电压和环境光照度三者关系。由于  $\varphi(x, y)$  在最大功率点  $(x_0, y_0)$  的邻域内连续, 存在一阶和二阶连续偏导数, 因此可以根据二阶偏导数情况求取目标函数的极值, 具体的极值求解流程为: 求一阶偏导数→计算驻点→求二阶偏导数→计算判断条件→求解极值。

3.2 仿真测试

为验证本方案的效果, 在 Proteus 中设计了如图 5 所示的仿真测试电路。电路主要包括光伏电池 SPICE 模型、DC/DC 变换、参数采样、信号调理、

A/D 转换、参数显示和主控电路等模块构成。调节电路图中的电位器 RV1 可模拟不同的光照度。分别进行了光照度从  $1\,000\text{ W/m}^2$  到  $800\text{ W/m}^2$ ,再到  $500\text{ W/m}^2$  3 种不同光照度的切换模拟,获取了

如图 6 所示的功率输出仿真曲线。仿真结果表明,本方案可以完成光照条件变化时的光伏电池最大功率点快速定位。

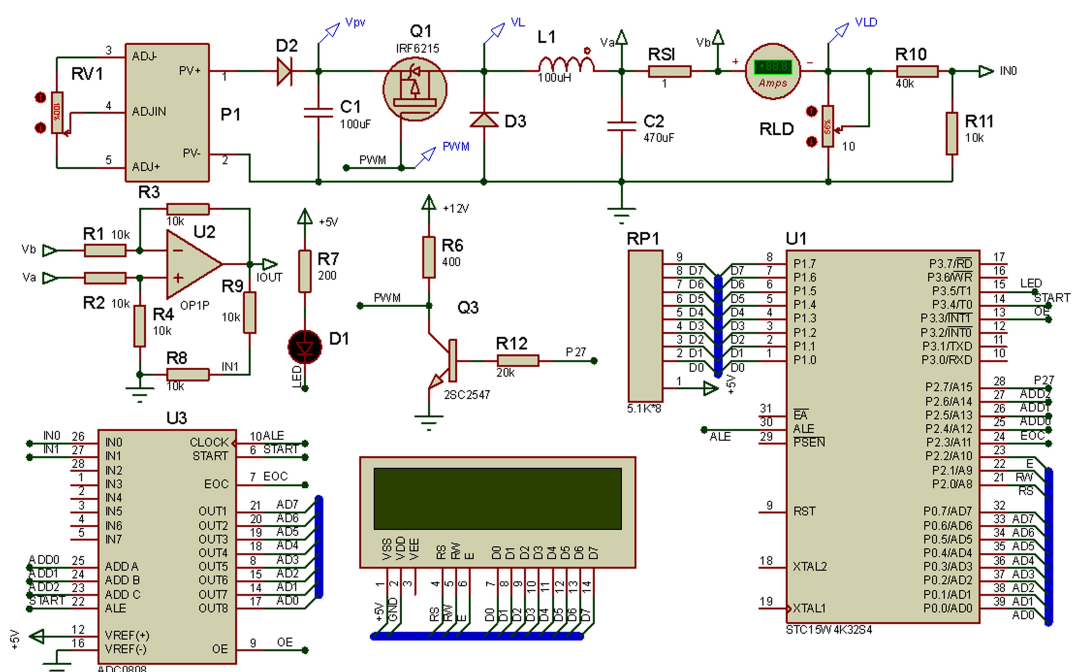


图 5 仿真测试电路  
Fig.5 Simulation test circuit

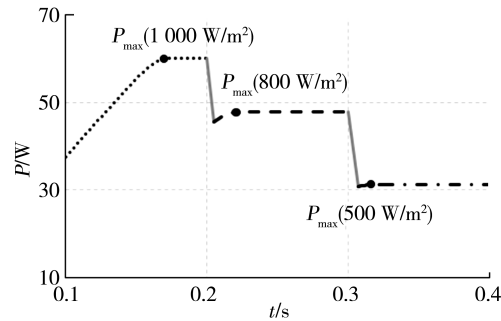


图 6 功率输出仿真曲线  
Fig.6 Power output simulation curve

4 结论

本研究利用光伏电池等效电路和光伏电池生产厂家提供的数据参数建立光伏电池 SPICE 模型。和现有的模型相比,该模型精度较高,平均相对误差小于 0.7%。依据构建的光伏电池 SPICE 模型可快速获取光伏电池不同光照条件下的功率分布数据,对功率分布数据进行二元样条插值和最小二乘法拟合后可以获取任意光照条件下的光伏功率曲面方程,通过对曲面方程的极值求解可以快速实现光伏电池最大功率点的定位。

参考文献:

[1] 左明乐,李培强. 考虑碳排放的综合能源系统经济优化调度[J]. 福建工程学院学报,2022,20(1):83-88.  
[2] 马帅旗. 太阳能光伏电池建模及 V-I 特性研究[J]. 电源技术,2013,37(8):1396-1398,1405.  
[3] 刘建晓,任洪波. 基于 Lambert W 函数的太阳能电池特性仿真[J]. 衡水学院学报,2014,16(4):109-111.  
[4] 王丰,孔鹏举,Fred C.Lee,等. 基于分布式最大功率跟踪的光伏系统输出特性分析[J]. 电工技术学报,2015,30(24):127-134.  
[5] 吕盛华,王磊,任春光,等. 复杂光照条件下串联光伏阵列特性研究及最大功率跟踪[J]. 太阳能学报,2017,38(9):2329-2336.



## 参考文献:

- [1] 廖圣俊,周立娟,尹凯俐,等. 高导热氮化硅陶瓷基板研究现状[J]. 材料导报,2020,34(21):21105-21114.
- [2] HAGGERTY J S,LIGHTFOOT A. Opportunities for enhancing the thermal conductivities of SiC and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics through improved processing[M] // Ceramic Engineering and Science Proceedings. Hoboken,NJ,USA: John Wiley & Sons, Inc., 2008:475-487.
- [3] 张景贤,段于森,江东亮,等. 高导热 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷基片材料的制备研究[J]. 真空电子技术,2016(5):7-10.
- [4] LEE H M,LEE E B,KIM D L,et al. Comparative study of oxide and non-oxide additives in high thermal conductive and high strength Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics[J]. Ceramics International,2016,42(15):17466-17471.
- [5] 王为得,陈寰贝,李世帅,等. 以 YbH<sub>2</sub>-MgO 体系为烧结助剂制备高热导率高强度氮化硅陶瓷[J]. 无机材料学报,2021,36(9):959-966.
- [6] 赵明亮,陈松,孙峰,等. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷材料晶界特征分布研究[J]. 物理学报,2021,70(22):254-265.
- [7] BELADI H,GHADERI A,ROHRER G S. Five-parameter grain boundary characterisation of randomly textured AZ31 Mg alloy[J]. Philosophical Magazine,2020,100(4):456-466.
- [8] WANG WG,CAI C H,ROHRER G S,et al. Grain boundary inter-connections in polycrystalline aluminum with random orientation[J]. Materials Characterization,2018,144:411-423.
- [9] HIROSAKI N, OGATA S, KOCER C, et al. Molecular dynamics calculation of the ideal thermal conductivity of single-crystal  $\alpha$ - and  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>[J]. Physical Review B, 2002, 65(13): 134110.

(责任编辑:陈雯)

(上接第 287 页)

- [6] 刘文涛,张容畅,董雨欣,等. 一种新型算法在光伏最大功率跟踪中应用[J]. 电测与仪表,2018,55(1):72-77.
- [7] 孙以泽,彭乐乐,孟焯,等. 基于 Lambert W 函数的太阳能电池组件参数提取及优化[J]. 太阳能学报,2014,35(8):1429-1434.
- [8] 王明达,赵瑞杰. 基于数据手册的光伏电池特性及参数实用估算方法[J]. 可再生能源,2012,30(3):102-107.
- [9] 师楠,周苏荃,李一丹,等. 基于 Bezier 函数的光伏电池建模[J]. 电网技术,2015,39(8):2195-2200.
- [10] MOTAHHIR S,CHALH A,EL GHIZAL A,et al. Modeling of photovoltaic panel by using proteus[J]. Journal of Engineering Science and Technology Review,2017,10(2):8-13.
- [11] 梁聚盛,朱育权,董蓉,等. 准双曲面齿轮齿面数字化重构及误差分析[J]. 西安工业大学学报,2017,37(5):421-425.

(责任编辑:方素华)