

光伏电池板在阴影影响下输出特性

胡义华 陈昊 徐瑞东 咎小舒

(中国矿业大学信电学院 徐州 221008)

摘要 在光伏电池数学模型基础上,对光伏电池板在正常情况和有阴影影响情况下的输出特性进行了仿真。通过采样电路和上位机监控软件,对光伏电池板在不同阴影影响情况下的输出特性进行了采样。在仿真和实验的基础上,对比光伏电池在正常情况和不同阴影影响情况下的输出特性,总结出在有阴影影响的情况下光伏电池板的输出特性的规律。

关键词: 光伏电池板 阴影 仿真 输出特性 规律

中图分类号: TM914.4

PV Module Characteristics Effected by Shadow Problem

Hu Yihua Chen Hao Xu Ruidong Zan Xiaoshu

(China University of Mining and Technology Xuzhou 221008 China)

Abstract On the base of mathematical model, the output characteristics of photovoltaic (PV) module in normal and shadow background are simulated. With the proposed sampling circuit and PC-based monitor software, the output characteristics of PV module in different shadows are studied. Based on the analysis of simulation and experiment results, the output characteristics at normal condition with different shadow effect situations are compared. Then, the principles of PV output characters in shadow problem are summarized.

Keywords: Photovoltaic module, shadow, simulation, output characteristic, principles

1 引言

光伏电池是依靠太阳光照产生电能,在发电过程中,常常会遇到建筑物、树木、鸟的排泄物影响而形成阴影,此外随着电池板使用年份的增加,光伏电池的老化和损坏也是不可忽视的因素。以上这些情况造成了光伏电池输出特性的巨大变化,从而使光伏系统效率严重降低^[1]。因此研究光伏电池板在阴影作用下的输出特性,对研究最大功率点搜索算法和提高光伏系统效率具有重要意义。

文献[2-6]研究了光伏电池在有阴影情况下的输出特性,总结了一些规律,但都没有对输出特性的变化规律进行详细研究。文献[2]利用人工神经网络对有阴影情况时的光伏电池输出特性进行模拟;文献[3-4]利用 Matlab 仿真软件实现了阴影情况下光

伏电池输出特性的仿真;文献[5]研究了串联光伏阵列中受阴影影响时,光伏电池板输出特性以及输出功率的变化。文献[6]利用 Saber 软件对阴影情况下的光伏电池输出特性进行了仿真。文献[7-8]提出了基于短路电流法系数(最大功率点处电流和短路电流的比值)或者开路电压法系数(最大功率点处电压和开路电压的比值)的最大功率点控制策略。

本文利用 Matlab/Simulink 仿真软件对光伏电池板在多种阴影情况的输出特性进行了仿真。提出了光伏电池板输出检测电路,利用电压、电流 LEM 和上位机通信对光伏电池输出特性进行实时检测。在仿真波形和实验波形的基础上,详细分析光伏电池板在有阴影影响下输出特性的变化规律。

2 太阳能电池的特性及仿真分析

2.1 光伏电池的数学特性

光伏电池的等效电路如图 1 所示。

江苏省“六大人才高峰”资助项目(07-D-024)。

收稿日期 2009-02-10 改稿日期 2009-09-21

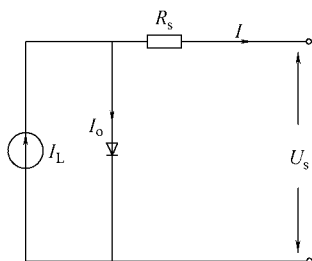


图1 光伏电池的等效电路图

Fig.1 An equivalent circuit of silicon solar cell

根据文献[9-10]光伏电池的输出特性方程为

$$I = I_L - I_o \left\{ \exp \left[\frac{q}{AKT} (U_s + IR_s) \right] - 1 \right\} \quad (1)$$

式中 I_L ——太阳能电池的输出电流;
 U_s ——太阳能电池的输出电压;
 q ——电荷常数, $q=1.6 \times 10^{-19}$;
 K ——普尔兹曼常数, $K=1.38 \times 10^{-23}$;
 A ——pn 结理想因数;
 T ——电池温度, 单位为 K;
 I_o ——电池反向饱和电流;
 R_s ——电池的串联等效电阻。

其中

$$I_o = I_{or} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_G}{KA} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2)$$

式中 T_r ——电池参考温度;
 I_{or} ——在 T_r 处的反向饱和电流;
 E_G ——电池板中半导体禁带宽带。

光生电流 I_1 由太阳光的强度和电池温度来决定

$$I_1 = [I_{scr} + k_i(T - T_r)] \frac{S}{1000} \quad (3)$$

式中 I_{scr} ——电池在参考温度和光线强度下短路电流;
 k_i ——短路电流温度系数;
 S ——光照强度。

2.2 光伏阵列的数学特性

由光伏电池组成光伏电池板, 再由光伏电池板组成光伏电池阵列如图2所示。

光伏电池阵列的 $I-V$ 方程为

$$I = n_p I_1 - n_p I_o \left\{ \exp \left[\frac{q(v + IR_s)}{AKTn_s} \right] - 1 \right\} \quad (4)$$

式中 n_s ——电池板串联的数目;
 n_p ——电池板并联的数目。

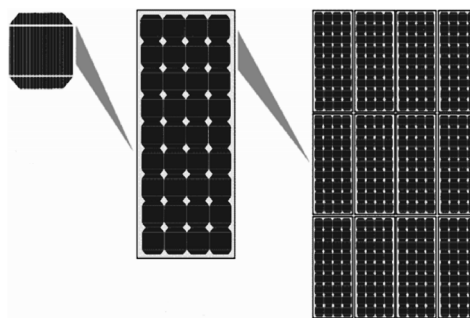


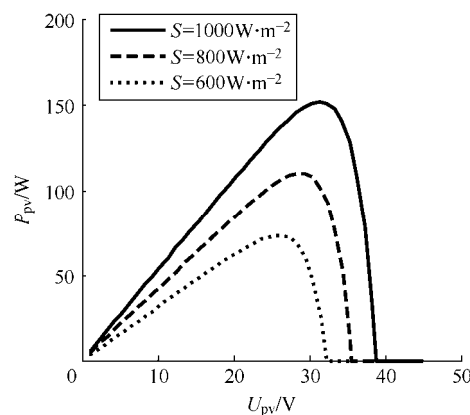
图2 光伏电池阵列的组成

Fig.2 Configuration of PV module

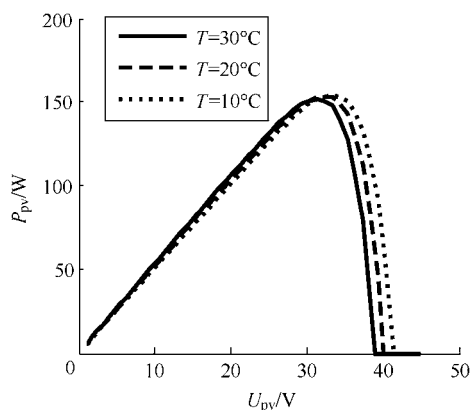
2.3 太阳能电池输出特性曲线的仿真方法

在 Matlab 环境下光伏电池的建模仿真有多种方法, 常见的有根据光伏电池的数学模型借助于 S 函数编程来实现^[11], 另一种是直接根据工程近似数学模型利用 Matlab/Simulink 里的模块直接搭建^[12]。本文根据光伏电池的数学模型采用模块直接搭建的方法, 将实验中的电池板参数代入模型, 这样建立的仿真模型具有通用性即不同类型的电池只需改变相应的参数。

图3是光伏电池板在正常情况下的输出特性曲线。图3a是在恒定温度变光照的情况下输出特性, 图3b是在恒定光照变温度的情况下输出特性。从图3可以看出太阳能电池板是一种非线性直流电源, 输出电流在大部分的工作电压下接近恒流源, 在接近开路电压时, 电流迅速下降。从图3a和图3b的特性曲线中可以看出在一定的光照和温度下, 光伏电池的输出存在单极值点, 这个极值点随光照强度和温度的变化而变化, 光照对输出功率的影响远大于温度对输出功率的影响。



(a) 光照强度变化的输出特性



(b) 温度变化的输出特性

图 3 光伏电池板随光照强度和温度变化的输出特性

Fig.3 PV module output characteristic varied with illumination and temperature

2.4 有阴影影响情况下光伏阵列的输出特性仿真分析

光伏电池阵列在使用过程中经常会遇到云层、灰尘、影子以及部分电池损坏和老化等情况，从而对输出特性造成影响。这些影响因素，都可以归纳为阴影影响。

在实际的情况中，遇到更多的情况是不规则的阴影。这种情况可以根据文献[3]中的方法首先确定光伏电池板中电池单体的串并联的数目；其次对电池板中受阴影遮挡的部分进行分组，把受阴影影响相同的电池单元分为一组，如图 4 中 G_1 、 G_2 、 G_3 所示，由于阴影造成光伏电池的受光照强度和温度发生明显的变化，因此各组的输出特性会有明显的变化；最后将各个分组并联输出，由于 G_1 、 G_2 、 G_3 的输出特性都各不相同，因此整个光伏电池板的输出将会出现多个极值点。将光伏电池板电池单元在 Matlab/Simulink 环境下建立仿真模型；整块电池

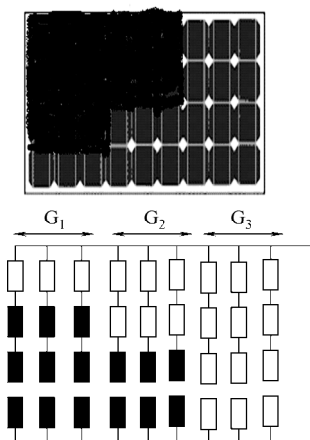
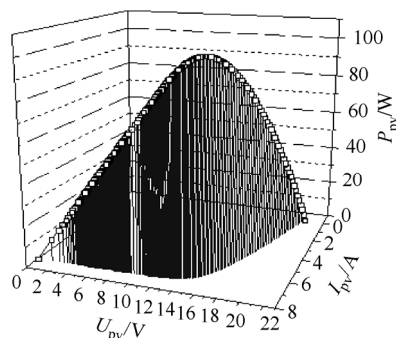


图 4 光伏电池板在阴影影响下分组

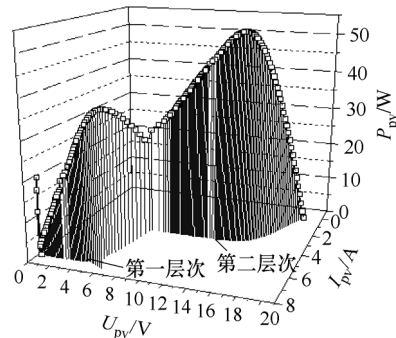
Fig.4 Groups of shadow effected PV module

板在阴影影响下的仿真模型可在单块电池仿真模型基础上按照图 4 的分组方法将光伏电池板分成三个部分，将输出特性相同的电池单元分为一组，最后将各部分并联输出。

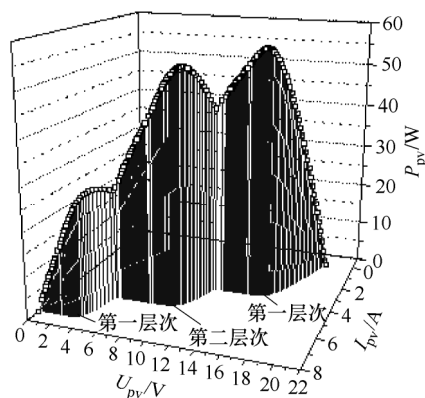
图 5 是根据图 4 中所示方法，对同一块光伏电池板在没有阴影（一组）、规则阴影覆盖（两组）、不规则阴影覆盖（三组）下的输出特性进行了仿真。



(a) 无阴影输出特性曲线（一组）



(b) 规则阴影覆盖输出特性曲线（两组）



(c) 复杂阴影覆盖输出特性（三组）

图 5 光伏电池板在不同情况下的仿真输出特性

Fig.5 Simulation results of PV module output characteristic under different situations

从图 5 中可以看出光伏电池板中受到阴影的影响后输出特性发生明显的变化，具体分析如下：

(1) 在阴影影响下光伏电池板的输出功率明显降低。

(2) 对三种情况下 $U_{pv}-I_{pv}$ 特性曲线比较, 当出现阴影时电压电流特性曲线呈现多层次性。由于阴影的影响, 光伏电池板被分为输出特性不同的组如图 5 所示, 相互叠加后形成多层次。图 5a 中没有阴影影响时即只分成一组, 输出就只有一个层次; 图 5b 中规则阴影影响时即只分成二组, 输出有两个层次; 图 5c 中受复杂阴影影响分成三组时, 输出有三个层次。依此规律阴影形状越不规则, 电压电流输出特性曲线中有更多层次的趋势。

(3) 对三种情况下 $P_{pv}-U_{pv}$ 特性曲线比较, 极值点的数目随着分组数的变化而变化。无阴影影响只有一个最大功率点, 有阴影影响时存在局部最大功率点, 局部最大功率点的数目随着分组数的增加而增加; 每个层次的拐点都对应着一个局部最大功率点。因此传统的最大功率控制策略(扰动观测法、增量电导法)在遇到阴影的情况下无法辨别局部最大功率点和全局最大功率点。

(4) 图 5a 中短路电流法系数参考值为 0.9, 开路电压法系数参考值为 0.75。但是图 5b 和图 5c 中的短路电流法系数分别为 0.483、0.704; 图 5b 和图 5c 中的开路电压法系数分别为 0.793、0.531。从两个系数的变化可以看出在阴影的影响下两个系数是变化的并且变化无规律, 但是都偏离了正常情况下的参考值。

3 实验验证及分析

本文用于实验验证的太阳能电池板参数见表 1。

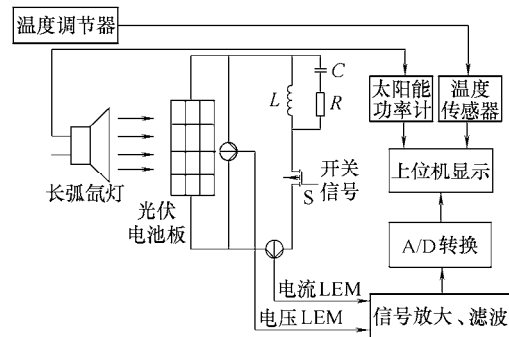
表 1 光伏电池板参数

Tab.1 PV module parameter

参 数	数 值
开路电压/V	21
短路电流/A	7.2
最大功率点处电流/A	6.18
最大功率点处电压/V	17
电流温度系数/(%/K)	0.06 ± 0.01
电压温度系数/(mV/K)	155 ± 10
功率温度系数/(%/K)	0.5 ± 0.05
正常工作温度/℃	48 ± 2

利用长弧氙灯发出的光来模拟太阳光照, 通过 TS1333R 光照仪来测量光伏电池板中每个电池单体处的光照强度。具体实验电路如图 6a 所示, 通过给开关 S 一个开通信号, 由于电感对电流的作用, 使得光伏电池板输出的电流缓慢上升至短路电流。利用从开通到电流短路的时间, 电压和电流 LEM 可

以对光伏电池板的输出电压和电流进行充分采样。然后通过信号调理电路将采样值输入 A/D 转换器, 最后将 A/D 转换的输出通过 RS232 直接输入上位机进行显示, 图 6b 是实验平台。



(a) 实验电路



(b) 实验平台

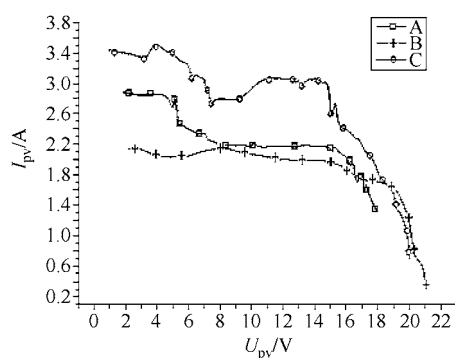
图 6 光伏电池板输出采样电路

Fig.6 PV module output characteristic sample circuit

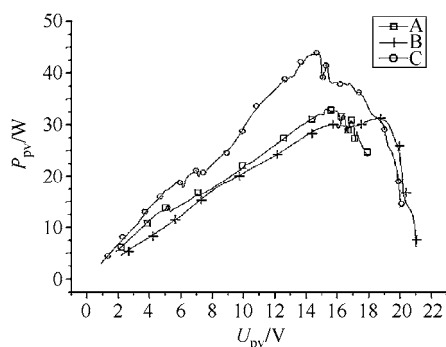
图 7 是光伏电池板在有阴影影响情况下的实测输出特性。图 7a 和图 7b 是光伏电池板在不同阴影形状下输出特性曲线。表 2 是对图 7a 和图 7b 中三种情况以及标准情况下输出特性的分析。从图 7 中可以看出, 在不同阴影影响下光伏电池输出特性变化明显, 短路电流法系数和开路电压法系数变化无规律可循, 局部最大功率点数目及其落点位置和阴影的形状有关。仿真波形图 5b 和实测波形图 7a、图 7b 中曲线 C 波形基本吻合, 但在最大功率点存在 8% 左右的误差, 这是由于实验中的长弧氙灯和实际太阳能光谱存在微小差别造成的; 而图 5c 和图 7a、图 7b 中曲线 A 相差较大, 这是由于实验中不规则阴影及其阴影处的光照不容易控制所以偏差较大, 但实验结果和仿真得出的结论是一致的。因此在阴影的影响下扰动观测法、增量电导法、短路电流法和开路电压法等传统最大功率点跟踪策略因无法辨别全局最大功率点而失去作用。此外, 电池板受到阴影影响后开路电压法系数和短路电流法系数

都出现了剧烈的波动,例如图 7a、图 7b 中曲线 A 的两个系数波动都分别达到了 10.5%和 17.7%,可以在最大功率点跟踪策略中加入开路电压法系数和短路电流法系数波动的变化,来判别光伏电池板是否受到阴影的影响。

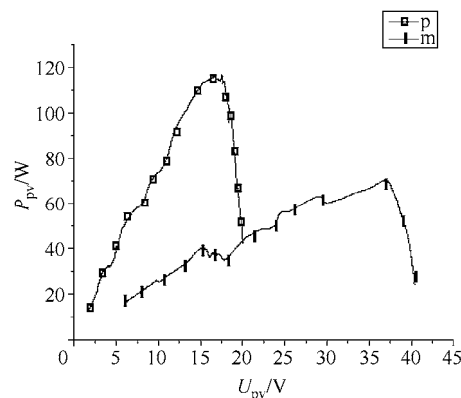
图 7c 是两个同型号光伏电池板串、并联后在阴影情况下输出特性的比较。图中曲线 p 是两块电池板并联后的输出特性,曲线 m 是串联输出特性。图 7d 是两个同型号的光伏电池板在阴影的情况下各自输出特性和串联后输出特性的对比。两块同型号



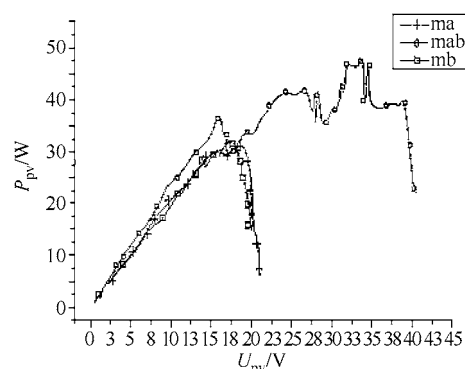
(a) 电压-电流特性



(b) 功率-电压特性



(c) 串并联特性



(d) 串联特性

图 7 光伏电池板在有阴影影响下实测输出特性曲线

Fig.7 Experimental results of PV module under shadow effect

的光伏电池板分别受到不同形状阴影影响如图 7d 中的 ma 和 mb 所示, mab 是将两块板子串联后的输出特性,通过表 3 分析表明把两块板子串联后系统的效率降低了 23%,局部最大功率点数比单块电池板增加。

表 2 阴影影响下输出特性分析

Tab.2 Shadow effected output characteristic analysis

对应 曲线	光照强度 $I/(W \cdot m^{-2})$	温度 $t/^{\circ}C$	局部最大 功率点数	短路电流 I/A	开路电压 V/V	最大功率点 电压/V	最大功率点 电流/A	K_i	K_v	K_i 波动 (%)	K_v 波动 (%)
A	572	18	3	3.1	21.1	15.3	2.19	0.706	0.725	17.7	10.5
B	469	15	2	2.4	21.3	18.8	1.67	0.696	0.883	18.9	7.3
C	690	12	2	3.6	21.8	14.4	3.04	0.844	0.661	1.6	18.4
标准情况	1000	25	1	7.2	21	17	6.18	0.858	0.81	—	—

表 2 中

$$K_i = \frac{I_{mpp}}{I_{sc}} \quad K_v = \frac{V_{mpp}}{V_{oc}} \quad (5)$$

式中 K_i ——短路电流法系数;

I_{mpp} ——最大功率点处电流;

I_{sc} ——短路电流;

K_v ——开路电压法系数;

V_{mpp} ——最大功率点处电压;

V_{oc} ——开路电压。

表 3 阴影影响下光伏电池板串联输出特性分析
Tab.3 Shadow effected series connected PV module
output characteristic analysis

对应曲线	光照、温度	局部最大 功率点数	最大输出 功率/W	最大功率点处 电压、电流
p	$S=520\text{W/m}^2$ $T=11^\circ\text{C}$	2	111.4	$V_{\text{mpp}}=16.7\text{V}$ $I_{\text{mpp}}=6.65\text{A}$
m	$S=520\text{W/m}^2$ $T=11^\circ\text{C}$	3	70.7	$V_{\text{mpp}}=37.0\text{V}$ $I_{\text{mpp}}=1.91\text{A}$
ma	$S=469\text{W/m}^2$ $T=15^\circ\text{C}$	2	33.06	$V_{\text{mpp}}=15.5\text{V}$ $I_{\text{mpp}}=2.13\text{A}$
mb	$S=469\text{W/m}^2$ $T=15^\circ\text{C}$	2	30.8	$V_{\text{mpp}}=18.8\text{V}$ $I_{\text{mpp}}=1.67\text{A}$
mab	$S=469\text{W/m}^2$ $T=15^\circ\text{C}$	3	49.24	$V_{\text{mpp}}=33.9\text{V}$ $I_{\text{mpp}}=1.455\text{A}$

4 结论

(1) 光伏电池板在受阴影影响时存在局部最大功率点, 局部最大功率点的个数和落点随阴影形状的变化而变化。

(2) 多块电池板受到阴影影响时串联比并联功率输出下降严重。

(3) 短路电流法系数和开路电压法系数也随着阴影形状的不同出现无规律的变化, 但是两个常数都不同程度地偏离了参考值, 这也使得基于这两个常数的最大功率跟踪策略将失去作用。

通过上述结论, 为提高有阴影影响光伏系统效率本文提出以下策略:

(1) 在有阴影影响的情况下必须对光伏电池板的输出特性进行全局扫描才能确定真正最大功率点。

(2) 在设计光伏系统时, 应避免大规模地对光伏电池板进行串联, 如果遇到阴影的影响将会使系统效率严重下降。

(3) 在相同型号光伏电池板的光伏系统中, 可以通过考察短路电流法系数和开路电压法系数的变化来判断光伏电池板是否受到阴影影响, 这为光伏系统的故障诊断提供新思路。

参考文献

[1] Ward T Jewell, Timothy D Unruh. Limits on cloud-induced fluctuation in photovoltaic generation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1990, 5(1): 8-14.

[2] Francois Giraud, Ziyad M Salameh. Analysis of the effects of a passing cloud on a grid-interactive photovoltaic system with battery storage using neural networks[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(4): 1572-1577.

[3] Hiren Patel, Vivek Agarwal. Matlab-based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 302-310.

[4] Hiren Patel, Vivek Agarwal. Maximum power point tracking scheme for PV systems operating under partially shaded conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(4): 1689-1698.

[5] Weidong Xiao, Nathan Ozog, William G Duford. Topology study of photovoltaic interface for maximum power point tracking[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(3): 1696-1704.

[6] 刘邦银, 段善旭, 康勇. 局部阴影条件下光伏模组特性的建模与分析[J]. 太阳能学报, 2008, 29(2): 188-192.

Liu Bangyin, Duan Shanxu, Kang Yong. Modeling and analysis of characteristics of PV module with partial shading[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2008, 29(2): 188-192.

[7] Toshihiko Noguchi, Shigenori Togashi. Short-current pulse-based maximum-power-point tracking method for multiple photovoltaic-and-converter module system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(1): 217-223.

[8] 张超, 何湘宁. 短路电流结合扰动观察法在光伏发电最大功率点跟踪控制中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 98-102.

Zhang Chao, He Xiangning. Short-current combined with perturbation and observation maximum-power-point tracking method for photovoltaic power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 98-102.

[9] 苏建徽, 余世杰, 赵为, 等. 硅太阳能电池工程用数学模型[J]. 太阳能学报, 2001, 22(4): 409-412.

Su Jianhui, Yu Shijie, Zhao Wei, et al. Investigation on engineering analytical model of silicon solar cells[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2001, 22(4): 409-412.

(下转第 134 页)

能较为准确地描述电弧的动态和静态特性, 为电弧加热器电源系统的深入研究打下基础。

参考文献

- [1] 李兴文, 陈德桂. 空气开关电弧的磁流体动力学建模及特性仿真[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(21), 31-37.
Li Xinwen, Chen Degui. Magnetohydrodynamics modeling and characteristics simulation of air switching arc[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(21): 31-37.
 - [2] Blais A, Proulx P, Boulos M I. Three-dimensional numerical modelling of a magnetically deflected dc transferred arc in argon[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2003, 36(5): 488-496.
 - [3] 吴建全. 直流电弧负载模拟及其控制方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2004.
 - [4] Amato F, Mattei M, Pironti A. Robust control of a power supply system for an arc heater[C]. Proceeding of the 1996 IEEE International Conference on Control Applications, 1996: 882-887.
 - [5] Guardado J L, Maximov S G, Melgoza E, et al. An improved arc model before current zero based on the combined Mayr and Cassie arc models[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 138-142.
 - [6] 臧春艳. 航天继电器稳态电弧等离子体电离过程与电弧特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
 - [7] Tseng K J, Wang Y, Vilathgamuwa D M. Development of a dynamic model of electric arc for power electronics simulations[C]. Proceeding of IEEE 31th IAS Annual Meeting on Industry Applications, 1996, 4: 2173-2180.
 - [8] 李德元, 赵文珍, 董小强, 等. 等离子技术在材料加工中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
 - [9] Suh Y, Lee Y, Kheir J, et al. A study on medium voltage power conversion system for plasma torch[C]. Proceedings of IEEE Power Electron. Spec. Conf., 2008: 437-443.
 - [10] 郭文杰. 航天器大气环境模拟用高压大功率电弧加热器电源系统研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
 - [11] Zhilinskii O V, Laktyushina T V, Laktyushin A N. Multicriterial optimization of the operation and design parameters of electric-arc plasmatrons of linear circuits[J]. Engineering Physics and Thermophysics, 2002, 75(6): 1278-1282.
 - [12] Suh Y, Lee Y, Lee Yongjoong, et al. A comparative study of medium-voltage power converter topologies for plasma torch under dynamic operating conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6): 2150-2161.
-
- 作者简介
- 戴隽文 女, 1984 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子与电力传动。
- 郝瑞祥 男, 1975 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力电子与电力传动, 大功率开关电源, 电力有源滤波与电能质量控制, 数字化控制技术。
-
- (上接第 128 页)
- [10] 陈中华, 赵敏荣, 葛亮, 等. 硅太阳能电池数学模型的简化[J]. 上海电力学院学报, 2006, 22(2): 178-180.
Chen Zhonghua, Zhao Minrong, Ge Liang, et al. The simplification of mathematic model of silicon solar cell[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2006, 22(2): 178-180.
 - [11] Walker G. Evaluating MPPT converter topologies using a Matlab PV model [J]. Electr. Electron. Eng., 2001, 21(1): 49-56.
 - [12] 邝美琴, 余世杰, 苏建徽. 带有 MPPT 功能的光伏阵列 Matlab 通用仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(5): 1248-1251.
Mao Meiqin, Yu Shijie, Su Jianhui. Versatile matlab simulation model for photovoltaic array with MPPT function[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(5): 1248-1251.
-
- 作者简介
- 胡义华 男, 1981 年生, 博士研究生, 研究方向为电力电子技术及光伏系统。
- 陈 昊 男, 1969 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子与电力传动。