

文章编号:1672-3961(2011)06-0122-06

组件质量波动对太阳能电池阵列输出特性的影响

秦敬玉¹,孙成帅^{1,2},谷廷坤³

(1. 山东大学材料科学与工程学院, 山东 济南 250061; 2. 烟台大学光电信息科学技术学院, 山东 烟台 264005;
3. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要:实验发现光伏电池组件上各单体电池的温度在空间分布是不均匀的,数值上呈正态分布;同时光伏组件的 $I-U$ 曲线出现异常。本研究认为将组件的温度正态分布作为组件电学参数波动量度是合理的,以此为基础,通过随机方式产生单体电池参数,模拟了光伏电池组件 $I-U$ 曲线异常现象。使用同样的模拟方法,发现由于光伏组件质量波动一个 5 kW 光伏阵列的最大功率可能 200 W 左右的损失,这说明构建光伏阵列时各组件质量一致性需要重视。

关键词:太阳电池;温度分布;质量波动

中图分类号:TK514 **文献标志码:**A

Influence of the fluctuation of module parameters on the output properties of photovoltaic arrays

QIN Jing-yu¹, SUN Cheng-shuai^{1,2}, GU Ting-kun³

(1. School of Materials Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. School of Opto-electronic Information Science and Technology, Yantai University, Yantai 264005, China;

3. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: By experiments, it was found that each solar cell in the photovoltaic (PV) module generally had different temperatures whose value could be well approximated by normal distribution. The abnormal behavior in the $I-U$ curve was also observed. This study showed that it was reasonable to employ the relative standard error of the temperature as that of the electrical parameters of PV modules. Based on this assumption, cell parameters were randomly generated, and then the abnormal behavior in the $I-U$ curve was well simulated by the series connection of these cells. The same method was applied to a virtual 5 kW PV array, and the power loss was estimated around 200 W due only to the electrical parameter fluctuation. The results revealed that the consistency of the electrical parameters of the PV modules should be stressed in the construction of a large PV array.

Key words: solar cell; temperature distribution; quality fluctuation

0 引言

光伏发电被众多国家列为优先发展的清洁能源技术,其市场在快速发展。现在对于单体光伏电池或者光伏电池组件的输出特性^[1-3]等已经有了较深入的认识,但是涉及到光伏电池组网时^[4-5]的系统

问题还需要更深入的研究工作。当前许多研究工作关注的是系统最大功率点追踪控制(maximum power point tracking, MPPT)^[6-9];由于光伏发电对于光照强度及温度的变化敏感,一个好的 MPPT 算法能够保持光伏阵列处于最佳工作状态,充分发挥光伏阵列发电能力,对降低发电成本是非常重要的^[10]。但是,还有一个影响光伏阵列系统性能的重要因素,

那就是光伏电池或者光伏组件的质量波动,对此还缺少较系统的分析研究。

光伏电池组件由若干单体光伏电池组成,是光伏电池厂商所提供产品的普遍形式。光伏组件的出厂信息一般都标注短路电流 I_{sc} 、开路电压 U_{oc} 、最大功率点电流 I_{max} 和对应电压 U_{max} ,以及最大功率等。这些参数是在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、光照强度 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 的标准条件下得到的,而且统一标注在批量产品上。使用者或者工程设计人员很难了解不同组件的上述几个参数的差异情况,或者说组件质量波动情况。从原材料到单体电池再到光伏组件要经过许多工艺环节,使用多种辅料,因此光伏单体电池以及光伏组件存在质量波动是必然的^[11-12]。一些光伏生产厂商也许掌握光伏组件质量波动信息,但是可能把它作为商业秘密而不公开。了解光伏组件的电参数波动,对于提高光伏阵列质量、保持运行稳定性和降低光伏阵列建造成本具有重要意义,但是在标准条件下逐一测量各个光伏阵列的参数往往是不现实的。本研究将根据某种市售光伏组件上单体电池的温度分布,结合模拟方法,给出一种光伏组件质量波动的评估方法,并初步估算一个标称 $5\ \text{kW}$ 的光伏阵列由此所导致的功率损失。

1 实验方法与数学模型

单晶硅太阳能电池组件的尺寸规格为 $1\ 590\ \text{mm} \times 808\ \text{mm} \times 42\ \text{mm}$,由 72 片(12 行 6 列的矩阵)尺寸为 $125\ \text{mm} \times 125\ \text{mm}$ 的单体电池片串联而成,其中每 24 片单体电池片并联一个二极管;标准状况下,开路电压 $44.07\ \text{V}$,短路电流 $5.35\ \text{A}$,最大功率 $180\ \text{W}$ (最大功率点电压 $36.74\ \text{V}$,最大功率点电流 $4.9\ \text{A}$)。由两只 VICTOR 86C 数字万用表与计算机连接组成测量电路,直流电压基本准确度 $\pm 0.5\%$,直流电流基本准确度 $\pm 1.2\%$ 。测量太阳能电池组件各个电池片温度时所用仪器是 Optris LS 红外线测温仪,其温度范围为 $-35\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$,测量精度为 $\pm 0.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $\pm 0.75\%$ 读数(取大值)。将太阳能电池板正对着太阳光来源处,电流表和滑动变阻器与太阳能电池串联,电压表并联于滑动变阻器两端,调节变阻器的电阻,使变阻器两端的电压和电流发生变化,从而获得太阳能电池组件的伏安特性曲线;用红外线测温仪分别测量组成太阳能电池板的 72 片单体电池片的温度并记录下来。

利用光伏电池数学模型^[13-16]可以模拟电池组件工作特性,本研究使用公式(1)-(3)的数学模型,

它只包含四个可测量的工程参数,分别是短路电流 I_{sc} 、开路电压 U_{oc} 、最大功率点电流 I_{max} 和对应电压 U_{max} 。

$$I = I_{sc} \left(1 - C_1 \left(\exp \left(\frac{U}{C_2 U_{oc}} \right) - 1 \right) \right), \quad (1)$$

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_{max}}{I_{sc}} \right) \exp \left(- \frac{U_{max}}{C_2 U_{oc}} \right), \quad (2)$$

$$C_2 = \left(\frac{U_{max}}{U_{oc}} - 1 \right) \left[\ln \left(1 - \frac{I_{max}}{I_{sc}} \right) \right]^{-1}. \quad (3)$$

2 硅太阳能电池组件温度分布及其 $I-U$ 特性

本研究涉及到两个光伏电池组件,分别称为组件 A 和组件 B。在每一个组件中有 3 个二极管分别为 a、b 和 c,每个二极管跨接 24 片单体电池;根据整个光伏组件的电路特性,为了描述方便,以所跨接的二极管将 72 片串联的电池分为电池组 a、b 和 c,每个光伏组件可以看作是由 a、b 和 c 三个电池组串联而成。

图 1 是组件 A 的实验 $I-U$ 曲线和 $P-U$ 曲线。在大约 $7.5\ \text{V}$ 左右 $I-U$ 曲线出现异常^[17],当电压减小时电流有一个大小约为 $0.1\ \text{A}$ 的跃升台阶。最大功率是 $131.9\ \text{W}$,对应的电流和电压分别是 $4.07\ \text{A}$ 和 $32.4\ \text{V}$ 。这一实测最大功率点与组件 A 的标称值有较大差别,其原因可能有两个:一是虽然此时温度接近标准条件,但是实验光照条件和空气质量等与标准条件有较大差别,二是 $I-U$ 曲线出现了异常情况。组件 A 的 $I-U$ 曲线出现异常现象,表明电池组 a、b 和 c 的一致性差,这必然导致它们串联后整体输出性能下降。本研究在春季尝试选择空气质量和晴天系数都比较理想的时机进行测量,但是最大输出功率没有明显提高。尽管第二种情况可能不是导致最大功率显著下降的主要原因,但是必须予以重视。

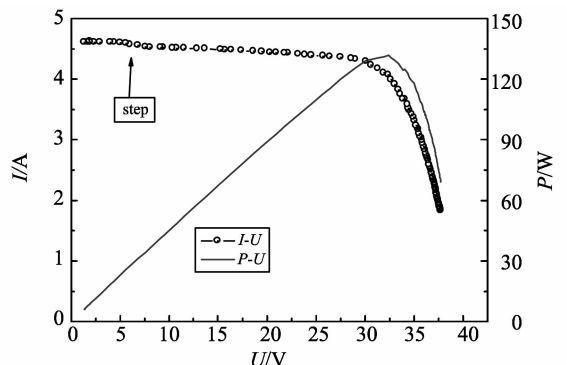


图 1 光伏组件 A 的实验 $I-U$ 和 $P-U$ 曲线
Fig. 1 The experimental $I-U$ and $P-U$ curves of PV module A

由于光伏组件都经过了较好的封装,难以通过直接测量每个单体电池或各个电池组的特性,从而找出电池质量的不一致性。两片质量不一致的电池与负载组成串联电路时,它们功率输出和自身消耗都不同,发热量也就不同,一个直接的表现就是电池温度出现差异。在电池面积接近时,电池质量差别越大则温度也差别越大。由于组件前后两面的封装都是绝缘材料,可以认为它们不是良好的导热体(与铜等相比),所以相邻电池之间即使有几度的温差,它也不会由于热传导而消失。基于这种分析,本研究测量了组件 A 上 72 个单体电池的温度,所得结果的示意图如图 2 所示。测量时组件 A 已经在最大功率点附近工作了约 1 h。

二极管a		二极管b		二极管c	
1.1	1.7	1.7	0.6	0.0	0.1
1.8	2.0	1.2	1.5	1.0	0.3
2.2	2.6	2.2	1.9	3.1	0.7
2.2	2.5	1.9	2.1	3.9	0.8
2.7	2.3	2.1	1.8	1.8	0.9
1.4	2.1	1.8	1.5	0.6	0.5
1.9	2.7	1.9	1.4	1.1	0.2
2.0	4.1	2.0	1.8	1.3	0.6
2.2	3.9	2.1	1.7	0.8	0.4
4.3	2.2	1.4	1.6	1.0	1.3
1.8	1.7	1.6	1.6	1.0	1.1
1.0	0.7	1.5	0.8	1.4	0.8

图2 光伏组件 A 的温度分布

Fig.2 The temperature distribution of PV module A

图 2 中每一个小方格代表一个单体电池,共计 72 片(6×12)。3 个二极管的跨接方式也表示在组件的上方。将最低温度 21.4℃作为参考点,标识为 0.0,单位是℃。单体电池最高温度是 25.7℃,标识为 4.3。环境温度为 19.5℃,平均值为 23.0℃。为了更直观表示温度的差别,图 2 中使用了灰度阶梯法。自 0.0 到 5.0 温度每升高 0.5℃,则灰度增加 5%;最暗的电池代表温度最高。图 2 表明,温度较高的区域有两个,分别在电池组 a 和 c 中,电池组 b 的各单体电池温度都较低且均匀。

为了验证上述温度分布的客观性,本研究又测量了组件 B 中单体电池温度分布情况,如图 3 所示。除环境温度外,其它测试条件与图 2 基本相同。将最低温度 17.6℃作为参考点,标识为 0.0;单体电池最高温度是 22.7℃,标识为 5.1。环境温度为 16.0℃,平均值为 19.9℃。每个单体电池的灰阶与温度差的比例与图 2 相同。温度最低点与组件 A 的电池位置相同,这可能只是巧合。组件 B 的高温

区域分布与组件 A 明显不同,高温区域在左上角成片分布,跨过了电池组 a 和 b,相对而言电池组 c 温度分布更均匀且温度较低。

二极管a		二极管b		二极管c	
4.8	3.1	3.0	1.2	0.0	1.2
5.1	3.2	2.8	1.9	0.7	1.8
3.8	3.4	3.6	2.2	1.5	2.0
2.7	3.1	2.9	1.9	1.7	2.0
2.3	2.5	3.0	2.0	1.8	1.9
1.8	2.0	2.7	1.6	1.5	1.9
1.5	1.9	2.3	1.8	1.7	1.5
1.7	2.3	2.5	2.0	2.0	1.5
2.5	2.7	2.9	1.9	2.1	1.4
2.6	2.6	3.0	2.1	2.1	1.2
2.3	3.7	2.9	2.7	2.6	1.4
1.1	2.6	2.5	2.4	2.2	1.5

图3 组件 B 的温度分布

Fig.3 The temperature distribution of PV module B

把组件 A 和 B 串联,实验得到的 I-U 曲线如图 4 所示。在最大功率点左面部分,可以观察到 2 个较大不规则的台阶,这表明组件之间的质量差别在串联后明显影响到系统的特性。

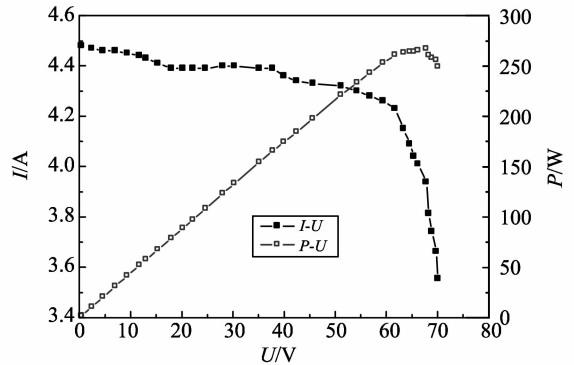


图4 光伏组件 A 和 B 串联的实验 I-U 和 P-U 曲线
Fig.4 The experimental I-U and P-U curves of the modules A and B in series

3 实验结果与讨论

为了定量讨论组件 A 和 B 中单体电池温度分布,本研究对这些温度差别做了随机样本统计分析。直方图中间隔总数是 10,随机变量等间隔长度值分别是图 2 或图 3 中最大值与最小值之差再除以间隔总数。图 5 是组件 A 中单体电池的温度统计分布(直方图)与具有相同方差的正态分布(实线)的对比,可以看出这些温度波动接近正态分布。组件 A 的温度分布标准差是 0.89℃,相对标准差是 3.8%。对于组件 B 来说,温度分布也接近正态分布,标准差是 0.83℃,相对标准差是 4.2%。

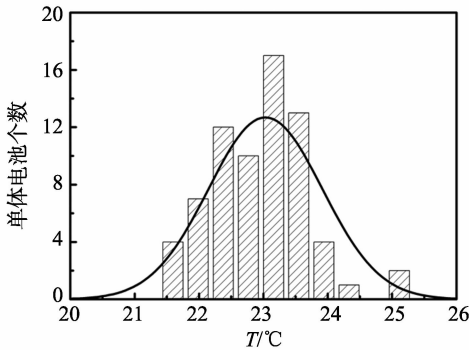


图5 组件A中单体电池的温度统计分布(直方图)与具有相同方差的正态分布(实线)

Fig. 5 The temperature distribution of PV module A (histogram) and the normal distribution with the same standard mean square deviation (line)

尽管温度的不均匀性是电池组件质量不一致性的反映^[18-19],但是温度分布的相对标准差与质量参数分布的相对标准差之间的确切关系并不清楚,还需要更多研究工作。根据文献[17]可知,光伏电池厂商已经在组装组件时考虑到单体电池质量一致性问题,但是对于电池组件的一致性并没有说明。文献[17]还提供了56片单体电池的开路电压、短路电流、最大功率点电压和电流等参数。本研究对于这些数据的统计分析发现,独立测量时(不是连接在电池组件中)单体电池的各个参数都具有很好一致性,具体数值列于表1中。

表1 单体电池(56片)工程参数统计

Table 1 Statistics on the engineering parameters of solar cells (56 pieces)

项目	I_{sc}/A	U_{oc}/V	I_{max}/A	U_{max}/V	P_{max}/W
平均值	5.124 7	0.622 16	4.717 0	0.520 20	2.453 8
标准差	0.007 8	0.001 5	0.023	0.002 4	0.007 8
相对标准差/%	0.15	0.20	0.49	0.40	0.32

表1中各个参数相对标准差与温度分布相对标准差相比差大约一个数量级。本研究假设24片单体电池串联组成电池组,而且24个单体电池的每个电参数作为独立的随机样本集合具有表1所给出的相对标准差;三个独立电池组再串联组成一个电池组件。使用公式(1)、(2)、(3)的数学模型,模拟了组件的I-U曲线,发现各个电池组的I-U曲线十分接近,没有得到图1所示的组件的I-U曲线异常现象。

当单体电池组装成组件时,还要经过焊接等工艺,因此影响组件质量的因素还可能来自焊接等后续加工环节^[11,17],如果将这些因素都归结到单体电池中,实际上电池组件中各个单体电池每个电参数的相对标准差应该大于表1中数值。但是,形成组件后每个单体电池电参数的相对标准差并没有实验数据,所以,本研究将组件中各个单体电池工作时温

度分布的相对标准差作为每个单体电池电参数的相对标准差,这是因为单体电池温度波动与电参数波动所导致的焦耳热起伏有关。在以下模拟中,取各个电参数的相对标准差为3%左右,与图2和图3的温度分布相对标准差接近,远大于表1各个单体电池独立测量时的0.3%左右。

将实验组件的温度分布相对标准差作为电池组质量波动的相对标准差,当三个电池组参数按照这个相对标准差呈正态分布时,模拟所得到的组件的I-U曲线如图6所示。参考某厂商所公开的电气参数,图6中模拟所得曲线的具体参数为:开路电压、短路电流、最大功率点电流和电压平均值分别是39.66 V、4.815 A、4.410 A和33.07 V。在模拟中分别取单体电池各参数的1%作为方差产生正态分布随机数,由此得到这四个参数的相对标准差分别为1.6%、4.6%、4.8%和1.7%。这组参数的相对标准差接近于温度分布的相对标准差,取这样的相对标准差很容易得到图1所示的I-U曲线异常,而且异常处电流台阶接近于0.1 A。在图5统计分析程序和模拟图6时正态分布随机数产生程序都是来自于文献[20],具体程序流程见图7。

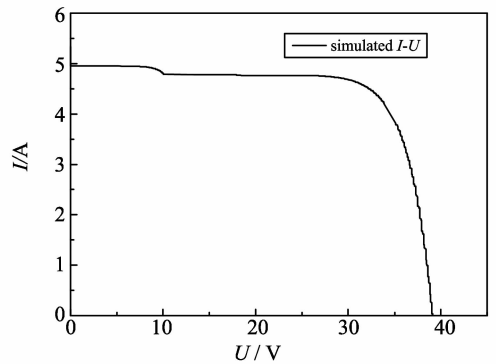


图6 方差为各参数1%时三个电池组串联的模拟I-U曲线
Fig. 6 The simulated I-U curve of a module with 1% of the four parameters as their standard mean square deviations

由模拟还发现,电池组a、b和c串联时,电池组质量两好一坏或者两坏一好的组合都能给出图1中的I-U曲线异常。根据图2电池温度分布,本研究认为图1所出现的I-U曲线异常源自于组件A中电池组a和c质量较差,而b较好。

在模拟中假设各个参数的产生是独立不相关的,这也许与真实情况有偏差。对于单体电池,这四个参数可能会随电池片材质和制造工艺呈现相干而不是独立波动,但是当单体电池再通过一些复杂工艺连接成电池组件时,会对单体电池产生一些复杂的附加影响。这些附加影响是随机的,所以在模拟中认为各参数的波动是随机的应该是一个较好近似。尽管缺乏明确的理论基础,通过图6的模拟发

现将温度分布的相对标准差作为电池组质量波动的相对标准差是比较合理的。

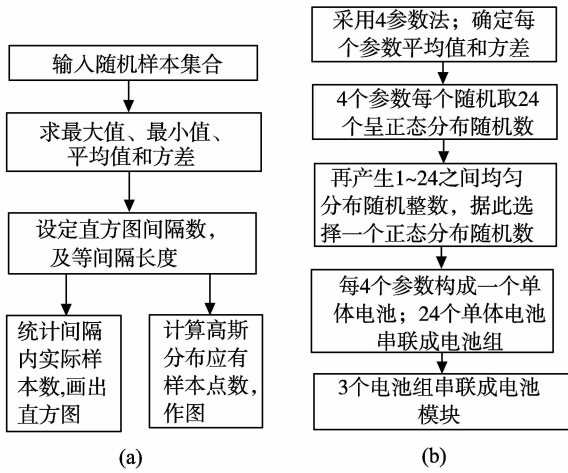


图7 分析图2和图3温度随机分布特征程序流程(a)和模拟图6时随机数产生流程(b)

Fig. 7 The flow chart for the data analysis of the random data collections from Figure 2 and Figure 3 (a) and the random number generation in the simulation of Figure 6 (b)

在串联模式下,更多组件组成光伏阵列时,由于跨接二极管的存在,相当于若干个类似于a、b和c的电池组串联。进一步研究了当光伏阵列总功率是5 kW时由于各电池组质量波动而带来的最大功率损失情况。按照光伏组件标称功率180 W计算,大约30个组件串联组成5 kW光伏阵列,在此没有考虑串联后光伏阵列的耐压情况。按照与图6所使用的相同条件,模拟5 kW光伏阵列*I-U*曲线,见图8。

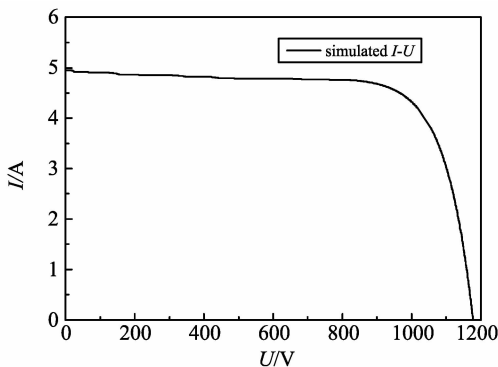


图8 方差为各参数1%时30个组件(5 kW)的阵列模拟*I-U*曲线

Fig. 8 The simulated *I-U* curve of the 30 modules with 1% of the four parameters as their standard mean square deviations

由图8可知,当较多的电池组或组件串联起来,即使组件之间存在一定的不一致性,总的*I-U*曲线也不会同少数几个组件串联时那样,在低电压区域有明显的电流台阶,而是*I-U*曲线在该区域变大;这是数量较多光伏组件*I-U*曲线叠加的结果。此时光伏阵列总的最大功率与最理想情况相比损失约为

3.5% (175 W),最大可达4.3% (215 W)。这样的损失在设计大功率光伏阵列时已经不可忽视了。这也提醒工程人员,发展光伏发电技术首先要保证光伏组件质量的一致性,有时高质量的组件所带来的功率收益比MPPT算法等技术发展还要重要。

4 结论

实验发现光伏组件*I-U*曲线异常,在小电压大电流处存在台阶,而且各单体电池温度数值呈正态分布。本研究认为电池组件质量波动即电参数不一致,导致焦耳热不同,表现为电池温度波动。将温度分布的相对误差,作为组件质量波动的量度具有一定合理性。如果单体电池的电参数数值在某个平均值附近一个不大范围内呈现正态分布,当它们串联组成电池组件时,可以较容易模拟光伏组件*I-U*曲线异常。如果以本研究使用的组件组成5 kW光伏阵列,模拟发现由组件质量波动所带来的损失将达到200 W左右。研究结果表明,光伏电池组件质量波动对光伏阵列性能影响,在设计光伏阵列工程时是一个不可忽略的因素。

参考文献:

- [1] 翟载腾. 任意条件下光伏阵列的输出性能预测[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2008.
ZHAI Zaiteng. The output characteristic predicting of PV array in arbitrary condition [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008.
- [2] 胡义华,陈昊,徐瑞东,等. 光伏电池板在阴影影响下输出特性[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1):123-128.
HU Yihua, CHEN Hao, XU Ruidong, et al. PV module characteristics effected by shadow problem [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 123-128.
- [3] 翟载腾,程晓舫,丁金磊,等. 被部分遮挡的串联光伏组件输出特性[J]. 中国科学技术大学学报:热科学与能源工程, 2009, 39(04):398-402.
ZHAI Zaiteng, CHENG Xiaofang, DING Jinlei, et al. Characteristics of partially shadowed serial PV module output [J]. Journal of University of Science and Technology of China: Thermal Science and Energy Project, 2009, 39(04):398-402.
- [4] 赵为. 太阳能光伏并网发电系统的研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2003.
ZHAO Wei. Research on grid-connected photovoltaic system [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2003.
- [5] 余涛,余婕. 光伏并网发电的研究进展[J]. 上海电力

- 学院学报:电力工程,2011,27(2):110-114.
- YU Tao, YU Jie. Progress of grid-connected photovoltaic research [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power; Power Engineering, 2011, 27(2):110-114.
- [6] 徐鹏威,刘飞,刘邦银,等. 几种光伏系统 MPPT 方法的分析比较及改进[J]. 电力电子技术,2007,41(5):3-5.
- XU Pengwei, LIU Fei, LIU Bangyin, et al. Analysis, comparison and improvement of several MPPT methods for PV system [J]. Power Electronic Technology, 2007, 41(5):3-5.
- [7] 李玲,谢建,杨祚宝. 光伏系统最大功率点跟踪方法[J]. 可再生能源,2007,25(2):85-87.
- LI Ling, XIE Jian, YANG Zuobao. Maximum power point tracing in photovoltaic system [J]. Renewable Energy Resources, 2007, 25(2):85-87.
- [8] HUA Chichang, SHEN Chihming. Comparative study of peak power tracking techniques for solar storage system [C]// IEEE Applied Power Conference and Exposition (APEC9'8). [S. L.]:[s. n.], 1998:679-685.
- [9] Nicola Femia, Giovanni Petrone, Giovanni Spagnuolo, et al. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2005, 20(4):963-973.
- [10] 刘广玲,蒋钦林,肖志斌,等. 提高太阳能电池转换效率研究的最新进展[J]. 电源技术,2011,35(8):1025-1027.
- LIU Guangling, JIANG Qinlin, XIAO Zhibin, et al. Research achievements on solar cells conversion efficiency improvement [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2011, 35(8):1025-1027.
- [11] 郑军. 光伏组件加工工艺与质量控制[J]. 新技术新工艺,2010,3:85-87.
- ZHENG Jun. Processing technology and quality control of PV modules [J]. New Technology and New Process, 2010, 3:85-87.
- [12] 王瑶. 单晶硅太阳能电池生产工艺的研究[D]. 长沙:湖南大学,2010.
- WANG Yao. Investigation on production technology of monocrystalline silicon solar cell [D]. Changsha: Hunan University, 2010.
- [13] 孙园园,肖华锋,谢少军. 太阳能电池工程简化模型的参数求取和验证[J]. 电力电子技术,2009,43(6):44-46.
- SUN Yuanyuan, XIAO Huafeng, XIE Shaojun. Parameter solution and verification of solar cells engineering simplified model [J]. Power Electronics, 2009, 43(6):44-46.
- [14] 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 Energetica Solaris Sinica, 2001, 22(4):409-412.
- [15] SINGER S, BOZENSSTEIN B, SURAZI S. Characterization of PV array output using a small number of measured parameters [J]. Solar Energy, 1984, 32(5):603-607.
- [16] 江小涛,吴麒章,王远,等. 硅太阳能电池数学模型[J]. 武汉科技学院学报,2005,18(8):5-8.
- JIANG Xiaotao, WU Linzhang, WANG Yuan, et al. Mathematical model of silicon solar cells [J]. Journal of Wuhan University of Science and Engineering, 2005, 18(8):5-8.
- [17] 孔凡建. 太阳能电池组件 $I-V$ 特性曲线异常[J]. 电源技术,2010,34(2):181-185.
- KONG Fanjian. Analysis of $I-V$ curve abnormality of solar module [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2010, 34(2):181-185.
- [18] 王建军. 太阳能光伏发电应用中的温度影响[J]. 青海师范大学学报:自然科学版,2005(1):28-30.
- WANG Jianjun. The temperature influence on solar PV generation [J]. Journal of Qinghai Normal University: Natural Science Edition, 2005(1):28-30.
- [19] SINGH P, SINGH S N, LAI M. Temperature dependence of $I-V$ characteristics and performance parameters of silicon solar cell [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2008, 92(12):1611-1616.
- [20] 徐士良. FORTRAN 常用算法程序集[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,1997.

(编辑:胡春霞)