

光伏电池模型的参数灵敏度分析和参数提取方法

田 琦¹,赵争鸣¹,韩晓艳²

(1. 清华大学 电机工程与应用电子技术系 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室,北京 100084;

2. 北京东方能源科技有限公司,北京 100015)

摘要:针对光伏电池的短路和开路情况进行参数灵敏度分析,以确定光伏电池基本参数对光伏电池电气特性的影响。通过分析特定参数在局部点的参数梯度,借助符号运算软件 MAPLE 定量分析光照强度、温度以及模型中各个参数对光伏组件电气特性的影响。实现了对 5 种不同种类、不同品牌的单晶硅、多晶硅、铜铟镓硒(CIGS)光伏组件直流模型的参数提取工作,提取了对电气特性影响最大的 5 个参数。利用所提取的参数对光伏组件建模,实验结果验证了该模型具有较高的精确度。

关键词:光伏电池;灵敏度分析;参数提取;模型

中图分类号: TM 615

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.05.021

0 引言

光伏电池直流模型广泛应用于光伏电池和光伏电池阵列的分析中,经过长期实践检验证明该模型在工程应用上具有足够的准确性^[1]。因为光伏电池正向模型是一个包含多个参数的复杂非线性模型,包含多个未知参数,其中绝大部分的参数是厂家没有提供的。因此,通过已知的多组光伏电池的输出电压、输出电流提取模型参数,在工程精度下复现组件及由相应组件构成的阵列在不同光照强度、不同温度下的伏安特性非常重要^[2-3]。

由于光伏电池模型中参数数量多,电压电流强耦合,常规参数提取方法应用于光伏电池模型面临初值选取困难、优化约束条件要求精确、计算速度慢、关键参数提取准确度低的问题。对此,本文定量分析了各个参数对光伏电池电气特性的影响,进行了参数灵敏度分析,提出了一种基于关键参数的参数提取方法。该方法将对光伏电池影响不大的参数设为标准值,只对关键参数进行提取,可以极大降低参数提取的难度,提高参数提取速度,增加关键参数提取的准确度。

利用上述方法,本文对 5 种不同种类、不同品牌的单晶硅、多晶硅、铜铟镓硒(CIGS)电池进行了参数提取,并对仿真结果进行了实验验证,证明了该灵敏度分析和参数提取方法的有效性和可靠性。给出了不同种类光伏组件模型具体参数,可供相关技术科研人员查询。

收稿日期:2012-05-07;修回日期:2013-04-09

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50737002);台达环境与教育基金会电力电子科教发展计划重大项目(DREM-200902)

Project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China(50737002) and Grants from the Power Electronics Science and Education Development Program of Delta Environmental & Educational Foundation(DREM200902)

1 光伏电池正向直流模型的建立和实现

光伏电池本质上就是一片经过精心设计和制造的可以将光照能量转化为电能的半导体二极管。光伏电池正向模型的基本方程如下:

$$I = I_{ph} - I_{os} \left\{ \exp \left[\frac{q}{A k T} (U + I R_s) - 1 \right] \right\} - \frac{U + I R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$I_{os} = I_{or} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \exp \left[\frac{q E_{go}}{B k} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2)$$

$$I_{ph} = [I_{scr} + K_1 (T - T_r)] \lambda / 1000 \quad (3)$$

其中, I 为电池输出电流; U 为电池端电压; I_{ph} 为光生电流; I_{scr} 为参考温度下、光照强度为 1 000 W/m² 时的光生电流; λ 为光照强度; q 为电子电量; T_r 为参考温度; T 为电池温度; E_{go} 为能带系能量; k 为波尔兹曼常数; R_s 为串联电阻; R_{sh} 为并联电阻; A 、 B 为曲线拟合常数,二者相等; I_{os} 为光伏电池内部等效二极管 PN 结的反向电流; I_{or} 为二极管反向电流; K_1 为温度系数^[4-8]。

2 光伏电池模型参数灵敏度分析基本算法

光伏电池的数学模型如式(1)~(3)所示,其中最重要的电气参数是短路电流 I_{sc} 和开路电压 U_{oc} ,一旦确定了短路电流和开路电压,光伏电池伏安特性曲线将会基本确定。所以对短路情况和开路情况进行参数灵敏度分析即可基本确定该参数对光伏电池电气特性的影响。对光伏电池的短路情况和开路情况进行灵敏度分析可以利用数学上的局部法,分析特定参数在局部点的参数梯度。因为光伏电池各个参数数量级相差极大,若要比对各个参数对光伏电池的影响程度,还需要对参数梯度进行标么化处理。求解短路情况和开路情况参数灵敏度的具体思路如下。

定义灵敏度 S :若 $y=f(p_1, p_2, p_3, \dots, p_n, x)$, 其中, $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ 为可变参数, x 为自变量。某一点处 y

对参数 p_i 在这一点局部敏感度 S 定义为^[9]:

$$S_{p_i} = \frac{\partial f(p_1, p_2, p_3, \dots, p_n, x)}{\partial p_i} \frac{p_i}{f(p_1, p_2, p_3, \dots, p_n, x)} \quad (4)$$

具体到光伏电池模型,求解步骤如图 1 所示。

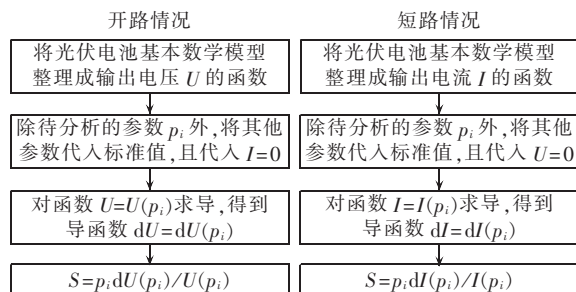


图 1 光伏电池模型参数灵敏度求解流程图

Fig.1 Flowchart of parameter sensitivity calculation for PV cell model

由于光伏电池基本模型非常复杂,本文中借助了符号运算软件 MAPLE 进行上述求解。

3 参数灵敏度分析

本节灵敏度分析以一块实际单晶硅光伏电池为参考,如非特殊说明,光伏组件参数设置为典型实际参数如下^[1]: $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\lambda=1\,000\text{ W/m}^2$, $R_s=0.346\,3\,\Omega$, $R_{sh}=193.7\,\Omega$, $A=49.53$, $I_{scr}=4.784\text{ A}$, $I_{or}=0.228\,7\,\mu\text{A}$, $K_1=0.001\,6\text{ A/K}$, $E_{go}=45.08\text{ V}$ 。由于 S 函数表达式过于复杂,本文中灵敏度求解结果用 parameter-S 图的形式给出。

3.1 光照强度灵敏度分析

光照强度在 $0\sim 1\,000\text{ W/m}^2$ 变化时,开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc} 对光照强度的灵敏度 S 取值见图 2。

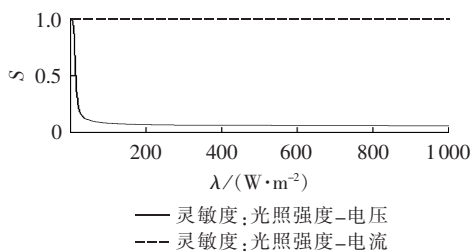


图 2 灵敏度: $\lambda-U_{oc}$ 、 $\lambda-I_{sc}$

Fig.2 Sensitivity: $\lambda-U_{oc}$, $\lambda-I_{sc}$

由图 2 可知,对开路电压, S 为正数,开路电压随着光照强度的增加而增加,常规情况下最大灵敏度不超过 0.1,说明光照强度对开路电压的影响不大;对短路电流, S 为正数,短路电流 I_{sc} 随着光照强度的增加而增加,常规情况下灵敏度等于 1,说明光照强度对短路电流的影响很大,短路电流与光照强度呈等比变化^[9]。

3.2 温度灵敏度分析

温度在 $-10\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化时,开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc} 对温度的灵敏度 S 取值如图 3 所示。

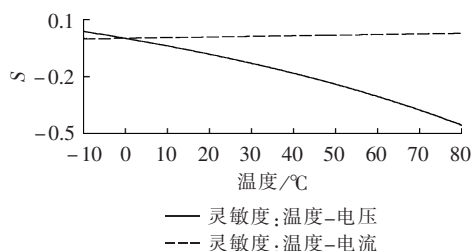


图 3 灵敏度: $T-U_{oc}$ 、 $T-I_{sc}$

Fig.3 Sensitivity: $T-U_{oc}$, $T-I_{sc}$

由图 3 可知,开路电压与温度近似反比关系变化, $S<0$,所以开路电压随着温度的增加而减小,因为 S 绝对值较大,接近 0.5,所以,正常范围变化时温度对开路电压的影响较大;短路电流与温度呈正比关系变化, S 为正数,所以短路电流随着温度的增加而增加,温度在正常范围变化时 $S<0.05$,所以温度对短路电流的影响不大。

3.3 I_{scr} 灵敏度分析

I_{scr} 在 $1\sim 20\text{ A}$ 变化时,开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc} 对 I_{scr} 的灵敏度 S 取值如图 4 所示。

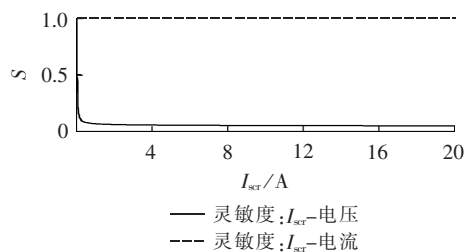


图 4 灵敏度: $I_{scr}-U_{oc}$ 、 $I_{scr}-I_{sc}$

Fig.4 Sensitivity: $I_{scr}-U_{oc}$, $I_{scr}-I_{sc}$

由图 4 可知,关于开路电压, S 为正数,开路电压随着 I_{scr} 的增加而增加。因为 I_{scr} 在正常范围内变化时, S 最大值小于 0.1, I_{scr} 对开路电压影响很小。关于短路电流,由于 S 为正数,因此短路电流 I_{sc} 随着 I_{scr} 的增加而增加。 I_{scr} 在 $0\sim 20\text{ A}$ 变化时,灵敏度等于 1,说明 I_{scr} 对短路电流的影响很大,二者呈等比例变化。

3.4 K_1 灵敏度分析

当温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, K_1 前的系数等于 0, K_1 对光伏电池电气特性没有影响,所以分析 K_1 对光伏电池电气特性影响时,此处设定温度等于 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。 K_1 在 $0\sim 0.01$ 变化时,开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc} 对 K_1 的灵敏度 S 取值如图 5 所示。

由图 5 可知,开路电压随 K_1 变化呈正比关系变化,且 S 为正数,所以随着 K_1 的增加,开路电压增加。因为当 K_1 在正常范围变化时灵敏度 $S<0.001$,所以 K_1 对开路电压的影响非常小,可以忽略。短路电流与 K_1 呈正比关系变化,且 S 为正数,所以随着 K_1 的增加,短路电流增加。因为 K_1 在正常范围变化时,灵敏度 $S<0.02$,所以 K_1 对短路电流的影响很小,几

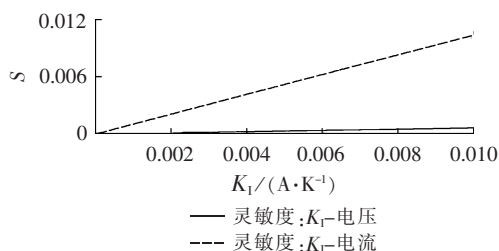


图 5 灵敏度: K_1-U_{oc} 、 K_1-I_{sc}
Fig.5 Sensitivity: K_1-U_{oc} 、 K_1-I_{sc}

乎可以忽略,但相对开路电压的影响要大。

3.5 I_{or} 灵敏度分析

I_{or} 在 $0 \sim 1 \mu A$ 变化时,开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc} 对 I_{or} 的灵敏度 S 取值如图 6 所示。

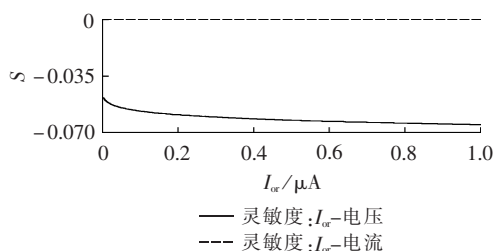


图 6 灵敏度: $I_{or}-U_{oc}$ 、 $I_{or}-I_{sc}$
Fig.6 Sensitivity: $I_{or}-U_{oc}$ 、 $I_{or}-I_{sc}$

由图 6 可知,在 I_{or} 常规的取值范围内, $S < 0$, 随着 I_{or} 增加,开路电压降低,并且 I_{or} 越大, I_{or} 对开路电压的影响越大。针对开路电压, S 的绝对值小于 0.1, I_{or} 对开路电压的影响较小。对于短路电流,因为 S 约等于 0,因此 I_{or} 对短路电流的影响非常小,几乎可以忽略不计。

3.6 E_{go} 灵敏度分析

当温度为 $25^\circ C$ 时, E_{go} 前的系数为 0,此时 E_{go} 对光伏电池的电气特性没有影响,因此此处设定温度为 $30^\circ C$ 。 E_{go} 在正常范围变化时,开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc} 对 E_{go} 的灵敏度 S 取值如图 7 所示。

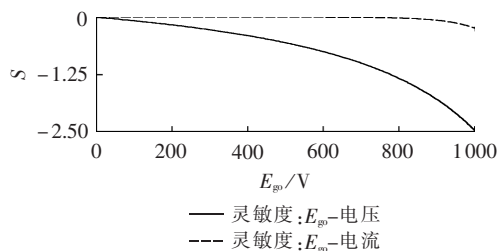


图 7 灵敏度: $E_{go}-U_{oc}$ 、 $E_{go}-I_{sc}$
Fig.7 Sensitivity: $E_{go}-U_{oc}$ 、 $E_{go}-I_{sc}$

由图 7 可知,对于开路电压, $S < 0$, 所以随着 E_{go} 的增加,开路电压减小,开路电压与 E_{go} 呈对数关系变化,随着 E_{go} 增大, E_{go} 对开路电压的影响也变大。因为 S 绝对值较大,所以 E_{go} 对于开路电压有较大的影响。对于短路电流,因为 $S < 0$,所以随着 E_{go} 的增大,短路电流减小,短路电流与 E_{go} 呈对数关系变化,

E_{go} 越大,对短路电流的影响越大。因为在 E_{go} 的常规取值范围内, S 的绝对值很小,所以 E_{go} 对短路电流的影响很小。

3.7 A 灵敏度分析

A 在 $0 \sim 200$ 变化时,开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc} 对 A 的灵敏度 S 取值如图 8 所示。

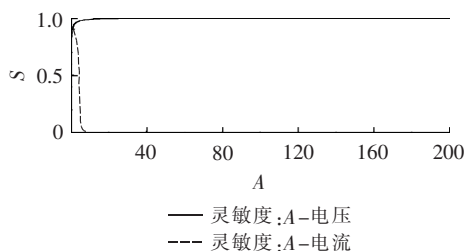


图 8 灵敏度: $A-U_{oc}$ 、 $A-I_{sc}$
Fig.8 Sensitivity: $A-U_{oc}$ 、 $A-I_{sc}$

由图 8 可知,对于开路电压,因为 S 为正数,所以随着系数 A 的增加,开路电压增加。正常范围 A 变化时,灵敏度恒等于 1,说明开路电压与系数 A 呈正比例变化。对于短路电流,因为 $S > 0$,所以随着 A 的增加,短路电流增加。 A 正常取值范围内, S 约等于 0,短路电流几乎不受 A 的影响。

3.8 R_s 灵敏度分析

开路时,因为 R_s 前的系数 $I=0$,所以 R_s 对开路电压没有影响。 R_s 在 $0 \sim 10 \Omega$ 变化时,开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc} 对 R_s 的灵敏度 S 取值如图 9 所示。

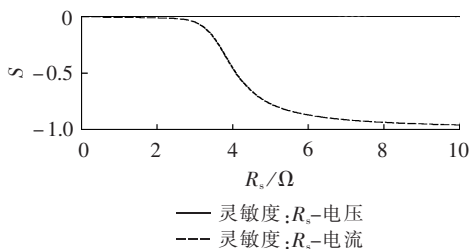


图 9 灵敏度: R_s-U_{oc} 、 R_s-I_{sc}
Fig.9 Sensitivity: R_s-U_{oc} 、 R_s-I_{sc}

由图 9 可知,对于开路电压, R_s 无影响;对于短路电流, $S < 0$,所以短路电流随着 R_s 的增大而减小。在 R_s 较小时,对短路电流的影响很小,超过一定范围后, R_s 对短路电流的影响迅速增加, R_s 越大,其对短路电流的影响也越大, R_s 对短路电流的灵敏度 S 趋于 -1, R_s 与短路电流在 R_s 较大时呈等比例变化。通常 $R_s < 0.1 \Omega$, 相对应的 S 的绝对值小于 0.02,说明在通常的取值范围内, R_s 对短路电流影响很小。

3.9 R_{sh} 灵敏度分析

R_{sh} 在 $0 \sim 100 \Omega$ 变化时,开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc} 对 R_{sh} 的灵敏度 S 取值如图 10 所示。

由图 10 可知,对于开路电压, $S > 0$,开路电压随着 R_{sh} 增加而增加,影响大小随着 R_{sh} 增加而减小。

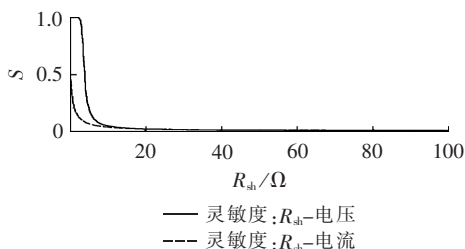


图 10 灵敏度： $R_{sh}-U_{oc}$ 、 $R_{sh}-I_{sc}$

Fig.10 Sensitivity: $R_{sh}-U_{oc}$, $R_{sh}-I_{sc}$

R_{sh} 较小时, $S=1$, 开路电压与 R_{sh} 等比例变化, 正常范围内, R_{sh} 较大, 取值为几千欧姆, 对开路电压的影响很小, 可以忽略不计。对于短路电流 $S>0$, 短路电流随着 R_{sh} 增加而增加, 影响大小随着 R_{sh} 增加而减小。在正常取值范围 R_{sh} 对短路电流的影响很小, 几乎为 0。

3.10 各参数灵敏度分析总结

对以上灵敏度分析总结如表 1 所示。

表 1 光伏电池模型中各个参数的灵敏度分析

Tab.1 Parameter sensitivity analysis of PV cell model

参数	取值范围	电压灵敏度绝对值	电流灵敏度绝对值
λ	$<10^3 \text{ W/m}^2$	<0.1	≈ 1
T	$-10 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$	<0.5	<0.05
R_s	$0.1 \sim 1 \text{ } \Omega$	0	<0.02
R_{sh}	$10^2 \sim 10^3 \text{ } \Omega$	<0.01	<0.01
I_{scr}	$1 \sim 10 \text{ A}$	<0.1	≈ 1
I_{or}	$0.1 \sim 500 \text{ } \mu\text{A}$	<0.1	<0.001
K_1	$10^{-4} \sim 10^{-3}$	<0.0005	<0.002
A	$2 \sim 100$	1	<1
E_{gp}	$10 \sim 100 \text{ V}$	<0.2	≈ 0

从表 1 可以看到 λ 、 T 、 A 、 I_{scr} 这 4 个参数对光伏电池电气特性影响最大; R_s 、 R_{sh} 、 E_{gp} 、 I_{or} 对电气特性有一定影响; K_1 对光伏电池的电气特性影响很小, 工程条件下可以忽略。在上述参数中, T 、 A 、 I_{scr} 、 I_{or} 、 E_{gp} 对开路电压有较大的影响; λ 、 A 、 I_{scr} 对短路电流有较大的影响^[10-15]。

4 基于灵敏度分析的参数提取方法的实现

从上述灵敏度分析中可以得到光伏电池模型中 A 、 I_{scr} 、 R_s 、 R_{sh} 、 E_{gp} 5 个参数对于模型特性具有较大影响, 其余参数为常数或影响不大。为了提高参数提取效率, 降低初值选取难度, 放松优化约束条件并提高关键参数提取精度, 将这 5 个参数设为待提取参数, 其余参数设定为标准常数。光伏电池正向模型基本方程如式(1)—(3)所示。

参数提取的主要思路是利用非线性最小二乘法拟合理论进行优化。因为各个参数的取值范围比较固定, 所以本文利用 MATLAB 中自带的有约束非线性规划函数 fmincon 进行求解^[16]。为保证在不同温度和

光照下模型均有较高的精度, 采样点至少要来自于 2 条温度、光照有显著差异的光伏组件伏安特性曲线。本文中采样点来自北京地区 2011 年 4 月 18 日 08:17 和 12:20 测量到的实验数据。测量条件如表 2 所示, 光伏组件参数提取结果如表 3 所示。

表 2 不同种类单片光伏组件测试条件

Tab.2 Test conditions for different types of PV module

品牌	08:17			12:20		
	垂直光照/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	天气 温度/ $^\circ\text{C}$	组件 温度/ $^\circ\text{C}$	垂直光照/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	天气 温度/ $^\circ\text{C}$	组件 温度/ $^\circ\text{C}$
P-Si 1	511.2	13.1	27.750	1031.6	18.8	43.891
P-Si 2	511.2	13.1	28.492	1031.6	18.8	44.817
P-Si 3	511.2	13.1	30.278	1031.6	18.8	51.223
m-Si	511.2	13.1	30.679	1031.6	18.8	52.637
CIGS	511.2	13.1	30.940	1031.6	18.8	51.739

表 3 不同种类单片光伏组件等效电路参数

Tab.3 Equivalent circuit parameters for different types of PV module

品牌	E_{gp}/V	I_{scr}/A	R_s/Ω	R_{sh}/Ω	A
P-Si 1	10.04178	8.454173	0.697705	795.371	60.64734
P-Si 2	10.03033	8.468264	0.660588	498.5826	60.75875
P-Si 3	68.946197	8.4867509	0.6491438	417.99168	86.232357
m-Si	19.10070	5.762012	0.708471	226.2184	95.78663
CIGS	164.4536	2.414104	1.364729	312.9279	128.1597

将表 3 中根据实验数据提取的参数结果代入光伏电池模型中, 在不同光照和温度条件下进行实验和仿真结果的对比验证。实验平台包含有不同品牌的多晶硅光伏组件 3 块, 单晶硅光伏组件 1 块, CIGS 光伏组件 1 块。

以 2011 年 4 月 18 日测试为例, 实验测试条件如表 4 所示, 仿真和实验对比结果如图 11 所示。

表 4 实验测试条件

Tab.4 Experiment conditions

参数	品牌	07:27	08:17	09:09	10:12	12:46
光照/($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)		273.3	511.2	697.4	863	1022.7
温度/ $^\circ\text{C}$	P-Si 1	23.5	27.7	33.5	38.8	46.3
	P-Si 2	23.8	28.5	34.1	39.6	48.1
	P-Si 3	24.4	30.3	37.3	44.8	52.6
	m-Si	24.6	30.7	37.5	45.6	53.6
	CIGS	25.6	30.9	38.0	44.5	52.8

可以看到利用非线性最小二乘法所提取的参数可以很好地拟合实际光伏电池在不同温度不同光照下的电气特性曲线, 该模型对晶体硅电池、CIGS 电池不同光照不同温度下电气特性的拟合较为理想。

对比 2011 年 4 月 18 日一天当中不同时刻不同种类光伏电池的最大输出功率。随着光照和温度的变化, 5 种光伏电池板一天当中每一时刻所能输出的最大功率的仿真和实验曲线如图 12 所示。

实验平台每 2 min 测量一次。由图 12 可见, 仿真曲线与实验曲线吻合良好, 说明在不同温度和光照强度下, 仿真模型均能较准确地模拟实际情况, 进

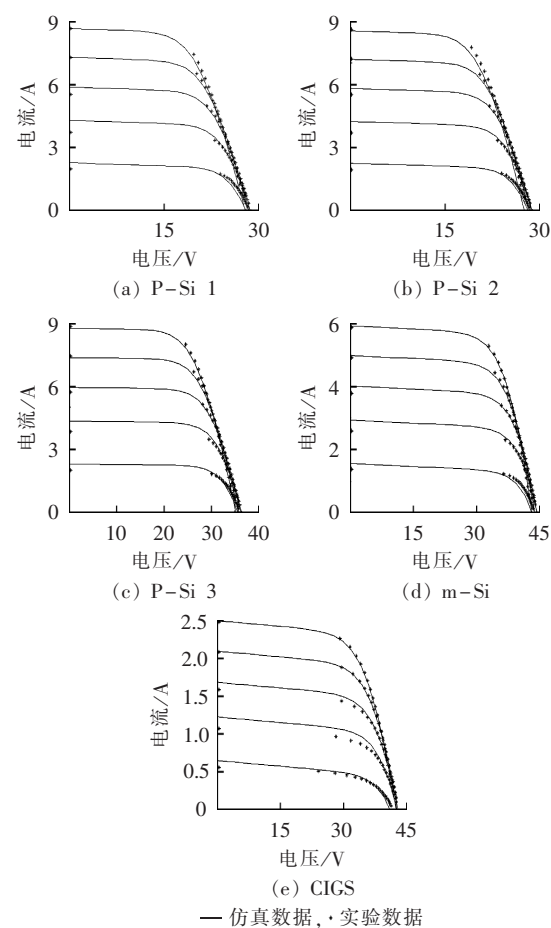


图 11 参数提取效果

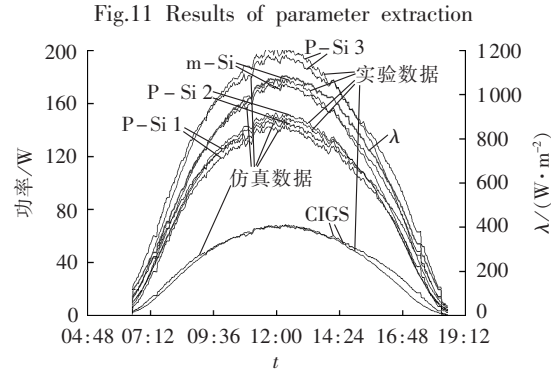


图 12 光伏组件最大输出功率在一天中的变化

Fig.12 Maximum output power of PV module during a day
一步验证了模型参数的有效性。

5 结论

本文利用符号运算软件 MAPLE 对光伏电池直流模型中各个参数对开路电压和短路电流的灵敏度进行了定量分析。其中 λ 、 T 、 A 、 I_{scr} 4 个参数对光伏电池电气特性影响最大; T 、 A 、 I_{scr} 、 I_{or} 、 E_{go} 对开路电压有较大的影响; λ 、 A 、 I_{scr} 对短路电流有较大的影响。本文利用 MATLAB 优化工具箱,根据非线性最小二乘法原理,实现了光伏电池正向直流模型中各参数的提取,所提取的参数可以较好地拟合实际光伏电池

电气特性曲线。

参考文献:

[1] 赵争鸣,刘建政,孙晓瑛,等. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京:科学出版社,2005:27-31.

[2] 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.

[3] JUKKA V P,PETER D L. Effects of large-scale photovoltaic power integration on electricity distribution[J]. Renewable Energy,2007,32(2):216-234.

[4] JABOORI M G,SAIED M M,HANAFY A A R. A contribution to the simulation and design optimization of photovoltaic systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,1991,6(3):401-406.

[5] KOUTROULIS E,KALAITZAKIS K,VOULGARIS N C. Development of a microcontroller-based,photovoltaic maximum power point tracking control system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2001,16(1):46-54.

[6] CHIHCHIANG H,JONGRONG L,CHIHMING S. Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,1998,45(1): 99-107.

[7] BOSE B K,SZCZESNY P M,STEIGERWALD R L. Microcomputer control of a residential photovoltaic power conditioning system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1985,IA-21(5):1182-1191.

[8] MEYER E L,van DYK E E. Assessing the reliability and degradation of photovoltaic module performance parameters [J]. IEEE Transactions on Reliability,2004,53(1):83-92.

[9] RAUSCHENBACH H S. 太阳能电池阵设计手册[M]. 张金熹,廖春发,傅德棣,等,译. 北京:宇航出版社,1987:142-143.

[10] 周德佳,赵争鸣,吴理博,等. 基于仿真模型的太阳能光伏电池阵列特性的分析[J]. 清华大学学报:自然科学版,2007,47(7): 1109-1112,1117.

ZHOU Dejia,ZHAO Zhengming,WU Libo,et al. Analysis characteristics of photovoltaic arrays using simulation[J]. Journal of Tsinghua University:Science and Technology,2007,47(7): 1109-1112,1117.

[11] KING D L. PVSIMC:a simulation program for photovoltaic cells, modules,and arrays[C]//Conference Record of the Twenty-fifth IEEE Photovoltaic Specialists Conference,1996. Washington DC, USA:IEEE,1996:1295-1297.

[12] del CUETO J A. Comparison of energy production and performance from flat-plate photovoltaic module technologies deployed at fixed tilt[C]//Conference Record of the Twenty-ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference,2002. New York,USA:IEEE, 2002:1523-1526.

[13] HWANG J J,CHANG W R,SU A. Dynamic modeling of a solar hydrogen system under leakage conditions [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2008,33(14):3615-3624.

[14] JOHANSSON A,GOTTSCHALG R,INFELD D G. Modeling shading on amorphous silicon single and double junction mo-

dules[C]//Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Osaka, Japan: [s.n.], 2003: 1934-1937.

[15] YOSHIOKA H, NISHIKAWA S, NAKAJIMA S, et al. Non hot-spot PV module using solar cells with bypass diode function [C]//Conference Record of the Twenty-fifth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1996. Washington DC, USA: IEEE, 1996: 1271-1274.

[16] 姜启源, 邢文训, 谢金星, 等. 大学数学实验[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 144-145.

作者简介:



田 琦

田 琦(1988-), 女, 山西太原人, 硕士研究生, 主要从事光伏发电系统研究(E-mail: tqtianqi.thu@gmail.com);

赵争鸣(1959-), 男, 湖南邵阳人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为大容量电力电子变换器、光伏发电系统。

Sensitivity analysis and parameter extraction of photovoltaic cell model

TIAN Qi¹, ZHAO Zhengming¹, HAN Xiaoyan²

(1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System & Generation Equipment, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Beijing BOE Energy Technology Co., Ltd., Beijing 100015, China)

Abstract: The parameter sensitivity of photovoltaic cell is analyzed under short circuit and open circuit conditions to determine the influence of its basic parameters on its electric characteristics. Software MAPLE is applied to quantitatively calculate the influence of irradiation, temperature and model parameters on the electric characteristics of photovoltaic module by analyzing the local parameter gradient of particular parameter. The parameters of DC model are extracted for five types of photovoltaic module: mono-crystalline silicon, poly-silicon photovoltaic module and CIGS. Five most influencing parameters are selected in the photovoltaic module modeling and the experimental results demonstrate the high accuracy of the designed model.

Key words: photovoltaic cells; sensitivity analysis; parameter extraction; models

(上接第 118 页 continued from page 118)

Reliability evaluation for distribution system considering supplying ability of photovoltaic DG

WU Yan^{1,2}, LIU Junyong^{1,2}, XIANG Yue^{1,2}, LIU Youbo^{1,2}, YANG Jiashi³, WANG Zhuo³

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. Sichuan Smart Grid Key Laboratory, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
3. Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610061, China)

Abstract: The power output model of photovoltaic DG affected by weather and time is established and the supporting ability of islanded DG to load is analyzed. An optimal scheme of distribution network islanding is proposed according to the influencing factors of islanded system reliability. The traditional minimal path method is improved for calculating the reliability index of distribution network containing photovoltaic DG. Case analysis verifies that, photovoltaic DG improves the reliability of distribution network and the improvement degree varies with the season. An optimal scheme of island operation is proposed, which adjusts the island range according to the season. Case results verify that, the efficiency of photovoltaic DG is fully utilized and the reliability of distribution network is enhanced.

Key words: photovoltaic power generation; distributed power generation; island; distribution network; reliability; seasonal characteristic