

光伏建模与并网仿真

陈向宜¹, 王 彪¹, 丁理杰¹, 李 锐², 邱晓燕²

(1. 四川电力科学研究所, 四川 成都 610072; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要:在 Matlab/Simulink 仿真环境下利用 S 函数, 开发了太阳能电池板的仿真模型, 其通用性强, 仿真速度快。该模型采用扰动算法实现光伏阵列的最大功率跟踪 (MPPT), 模拟了不同太阳辐射强度、环境温度下的 $I-V$ 、 $P-V$ 特性。并且利用该模型进行并网仿真, 仿真结果表明在短时间内光照强度的变化对光伏阵列的输出特性影响比温度更为突出, 同时直流侧输出电流能有效地跟踪光照强度、环境温度的变化, 并且交流侧的电流成正弦且谐波较小, 因此证明了所建模型的合理性和实用性。

关键词: 光伏阵列特性; S 函数; 扰动算法; 最大功率点跟踪 (MPPT); 单相并网; 谐波

Abstract: The photovoltaic (PV) array simulation model with good universal property and fast simulation is established using S-function in Matlab/Simulink simulation environment. Using the perturbation calculation method, the model can achieve the maximum power point track (MPPT) and can simulate the $I-V$ and $P-V$ characteristics of the actual photovoltaic modules at different radiant intensity and ambient temperatures. The model is used for the grid-connected simulation. The results of simulation show that the influence of changes in light intensity is more prominent than the temperature for the output characteristics of PV array within a short time, the output current can effectively track the changes of light intensity and ambient temperatures, the AC current becomes sinusoidal and the harmonics are smaller, which prove the rationality and practicability of the established model.

Key words: photovoltaic array characteristics; S-function; perturbation calculation method; maximum power point track (MPPT); single-phase grid connection; harmonics

中图分类号: TM864 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)06-0001-04

0 引言

随着石化能源的消耗, 全球都在面临能源危机, 太阳能依靠其清洁、分布广泛等特点成为当今发展速度居第二位的能源^[1]。

20 世纪 90 年代末期以来, 太阳能光伏发电产品以 30% 的速度增长。中国光伏发电的地面应用始于 1973 年, 20 世纪 90 年代以来, 中国光伏电池的用量以 20% 以上的速度增长^[2]。太阳能光伏发电将是 21 世纪人类社会发展的一个重要领域。太阳能光伏电池造价昂贵, 如果在研发阶段采用真实的光伏电池阵列进行试验, 将会产生试验成本高、需要大量空旷场地和对日照、自然气候依赖性强等一系列问题, 不利于初期研究。

光伏发电系统的诸多优点, 引起国内外学者的广

基金项目: 四川省电力公司科技项目资助, 四川省科技厅支撑项目 (2011GZ0036)

泛研究。文献 [3、4] 提出了按照准稳态理论建立光伏发电系统的仿真模型, 并依此对系统的长期稳态性能进行评价。目前太阳能光伏发电的趋势已经由小型独立发电向大型并网系统发展, 由于太阳能的波动性和随机性, 光伏电站输出的电能波动很大, 随着这种分布式光伏并网电站的容量越来越大, 其输出功率的波动对电网的影响不容忽视, 这就需要在光伏并网发电系统的动态特性上进行研究。建立当太阳能辐射强度、环境温度变化时, 光伏发电系统的动态仿真模型, 改变以往按照准稳态理论对系统进行建模的方法。

在 Matlab/Simulink 仿真环境下利用 S 函数, 开发了太阳能电池板的仿真模型, 其通用性强, 仿真速度快。该模型采用扰动算法实现光伏阵列的最大功率跟踪 (maximum power point track, MPPT), 模拟了不同太阳辐射强度、环境温度下的 $I-V$ 、 $P-V$ 特性。利用该模型进行并网仿真, 仿真结果表明在短时间内光照强度的变化对光伏阵列的输出特性影响比温度更为突出, 同时直流侧输出电流能有效地跟踪光照强

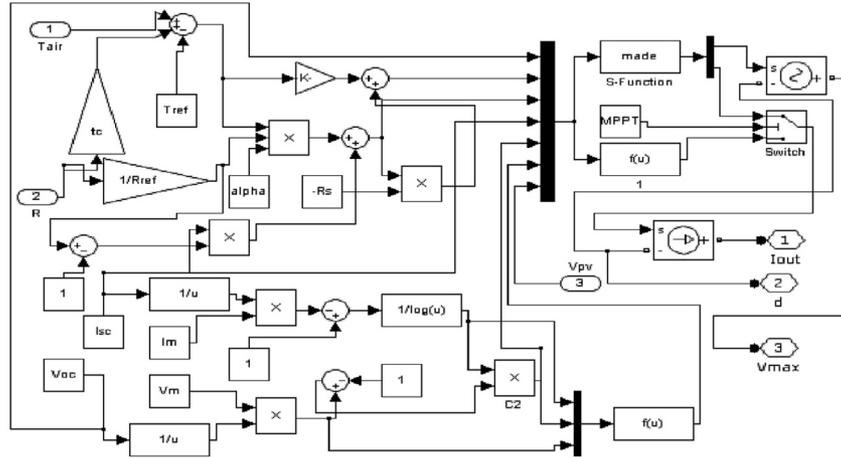


图 1 光伏阵列 Matlab 仿真模块内部结构

度、环境温度的变化,而交流侧的电流成正弦且谐波较小,因而证明了所建模型的合理性和实用性。

1 光伏阵列仿真模型

在光伏发电系统设计过程中,为了更好地分析光伏阵列的电性能,使其与光伏控制系统匹配,达到最佳的发电效果,则可为工作于各种条件的各种类型的光伏阵列建立起数学模型。通过这些数学关系反映光伏阵列各项参数的变化规律。所用的数学模型^[6]为

$$I = I_{sc} (1 - C_1 (e^{\frac{V-DV}{c_2 V_{oc}}} - 1)) + DI \quad (1)$$

$$C_1 = (1 - I_m / I_{sc}) e^{-\frac{V_M}{c_2 V_{oc}}} \quad (2)$$

$$C_2 = (V_m / V_{oc} - 1) / \ln(1 - I_m / I_{sc}) \quad (3)$$

$$DI = \alpha \cdot R / R_{ref} \cdot DT + (R / R_{ref} - 1) \cdot I_{sc} \quad (4)$$

$$DV = -\beta \cdot DT - R_s \cdot DI \quad (5)$$

$$DT = T_c - T_{ref} \quad (6)$$

其中 R_{ref} 、 T_{ref} 分别为光伏电池的太阳辐射强度和温度参考值,一般取为 1000 W/m^2 、 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在此参考条件下,各参数的含义如下。

α 为电流变化温度系数, $\mu\text{Amps}/^\circ\text{C}$; β 为电压变化温度系数, $\text{V}/^\circ\text{C}$; R_s 为光伏模块的串联电阻,它受光伏组件的串并联数影响,一般只有几欧姆; I_{sc} 为短路电流, A ; V_{oc} 为开路电压, V ; I_m 为最大功率点电流, A ; V_m 为最大功率点电压, V ; V 为光伏阵列的工作电压, V ; I 为光伏模块的工作电流, A ; R 为当前太阳辐射强度, W/m^2 。

当日射强度及电池温度 $R (\text{W/m}^2)$ 、 $T_c (^\circ\text{C})$ 不是参考日射强度和参考电池温度时,则应考虑环境温度条件对太阳电池特性的影响。根据大量数据拟

合^[11]得

$$T_c = T_{air} + t_c \cdot R \quad (7)$$

其中 T_{air} 为实时环境温度, $^\circ\text{C}$; t_c 为太阳电池模块的温度系数, $^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2/\text{W}$, 常见的太阳电池支架通常取 0.03 。

基于上述数学模型,在 Matlab 环境下,利用 Simulink 工具结合编写 S 函数,建立了光伏阵列仿真模型,见图 1; 其中右上角的 made 模块,由 S 函数编写,实时求解任意太阳辐射、环境温度下太阳电池的最大电压和最大电流。图 2 为该模块的封装外观; 其内部封装了参数 t_c 、MPPT、 T_{ref} 、 R_{ref} 、 α 、 β 、 I_{sc} 、 V_{oc} 、 I_m 、 V_m 等。

用户通过双击图 2 所示的图标设置不同的参数,从而构成不同 $I-V$ 特性的光伏阵列,而当用户选中 MPPT(最大功率跟踪)时, I_{out} 输出的就是最大功率点的电流,操作简单使用方便。

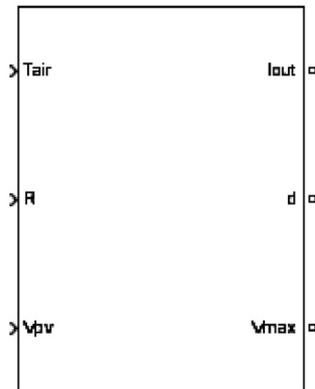


图 2 光伏阵列 Matlab 仿真模型封装外观

2 最大功率点跟踪(MPPT)的实现

目前使用的光伏阵列最大功率点跟踪(MPPT)方法主要有恒电压法、牛顿迭代算法、扰动观察法以

及其他跟踪方法^[7-9]。恒电压法(CVT控制)忽略了温度对PV阵列输出特性的影响,以及平均太阳能辐射强度随季节的变化,逐渐被各种MPPT控制算法取代;牛顿迭代算法与初始值给定有较大关系,可能产生根的跃变,并且计算时间较长;因而这里采用结构简单、被测参数少、容易实现的工程常用方法——扰动观察法。通过对PV阵列输出电压施加一个扰动变化量^[10]来完成最大功率点跟踪。其控制流程图见图3, V_n 和 P_n 分别为检测到的当前太阳能电池阵列电压值和功率值, V_b 和 P_b 分别为扰动后的光伏阵列电压值和功率值, ε 为判定精度, K_1 为扰动量, 其中

$$P(V) = VI = VI_{sc} \left(1 - c_1 \left(e^{\frac{V-DV}{c_2 V_{oc}}} - 1 \right) \right) + DI = f(V)$$

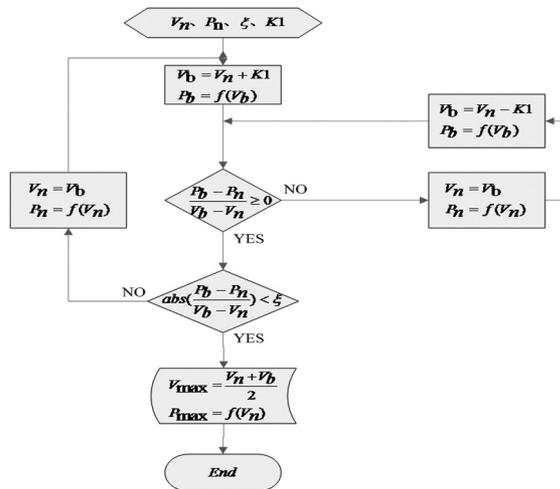


图3 扰动观察法流程图

3 光伏阵列单相并网分析

将上述仿真模型,用于单相光伏并网系统的动态仿真,参数^[12]设置如下。

$$\alpha = 0.015 \text{ Amps}/^\circ\text{C} \quad \beta = 0.7 \text{ V}/^\circ\text{C} \quad R_s = 2 \Omega \quad V_m = 300 \text{ V} \quad I_m = 10.25 \text{ A} \quad V_{oc} = 300 \text{ V} \quad I_{sc} = 10.65 \text{ A}$$

输入电压从0V线性增大到320V,分别在不同光照度及温度下的仿真结果如图4、5所示。

由图4、5可知光照强度在600~1000 W/m²时,最大功率点电压在288~300V,最大输出功率为1870~3040W。

下面对光强800 W/m²,温度变化范围5~25℃的情况进行仿真,结果如图6、7所示。

由上面的仿真结果可以看出在一定的温度范围内,影响光伏发电系统性能的主要因素是光照强度。考虑更大的温度变化,分别取50℃、25℃、0℃时,仿

真结果如图8、图9所示。

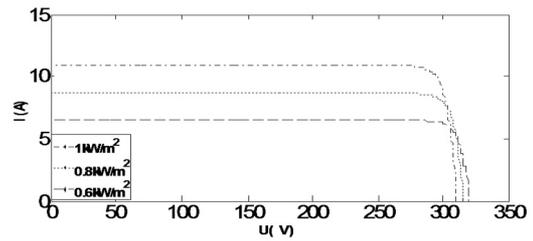


图4 $T_{air} = 25^\circ\text{C}$ 时不同光强下的 $I-V$ 特性曲线

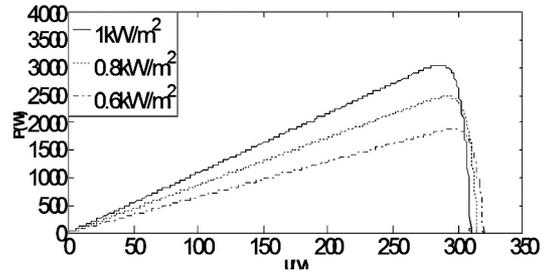


图5 $T_{air} = 25^\circ\text{C}$ 时不同光强下的 $P-V$ 特性曲线

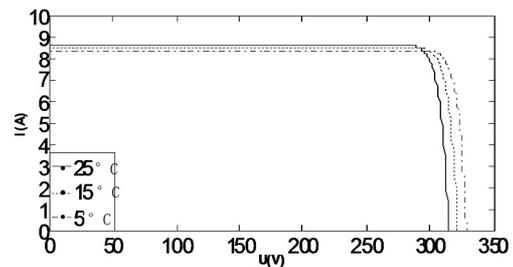


图6 $R = 800 \text{ W}/\text{m}^2$ 时不同温度下的 $I-V$ 特性曲线

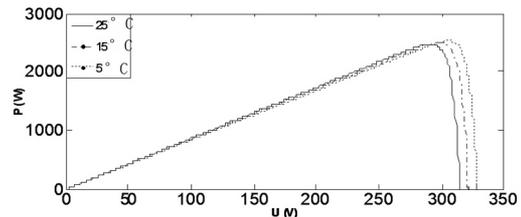


图7 $R = 800 \text{ W}/\text{m}^2$ 时不同温度下的 $P-V$ 特性曲线

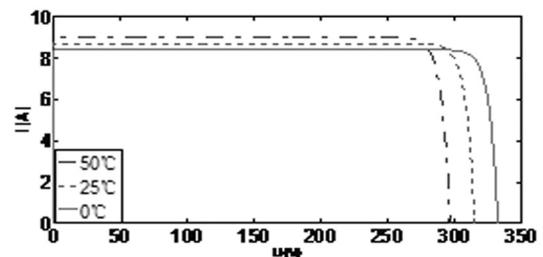


图8 $R = 800 \text{ W}/\text{m}^2$ 时不同温度下的 $I-V$ 特性曲线

由图(8、9)可知,温度变化在0~50℃时,最大功率点电压在274~312V之间,最大输出功率在2378~2533W之间。可见温度的变化相对光照强度的变化对光伏阵列的输出特性影响小得多。则原参数不变,初始光照强度设置为1000 W/m²,0.6 s 光伏强

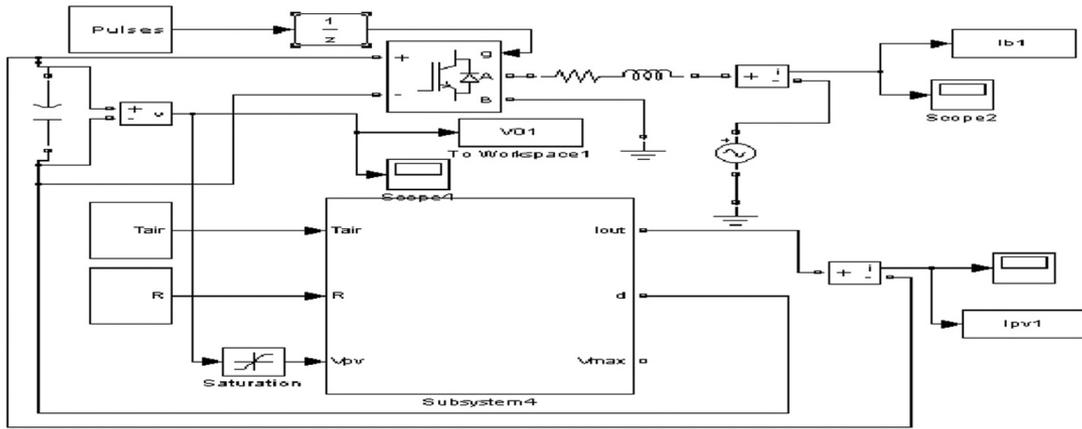


图 10 单相光伏并网 Matlab 仿真模型

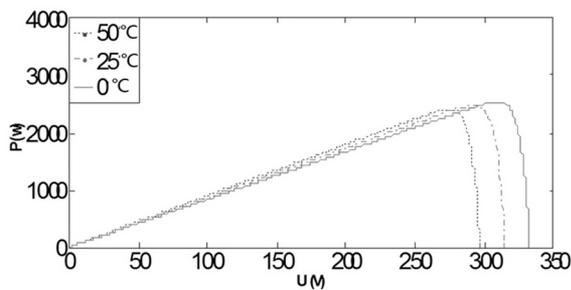


图 9 $R = 800 \text{ W/m}^2$ 时不同温度下的 $P - V$ 特性曲线
温度下降到 800 W/m^2 ,1.2 s 下降到 600 W/m^2 ,初始温度设置为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$,1.34 s 时温度开始下降。该系统的 Matlab 仿真模型如图 10 所示。

系统输入电源为所建立的光伏阵列模块。DC - AC 逆变模块为 Matlab 自带的通用逆变桥。得系统仿真如图 11 至图 13 所示。

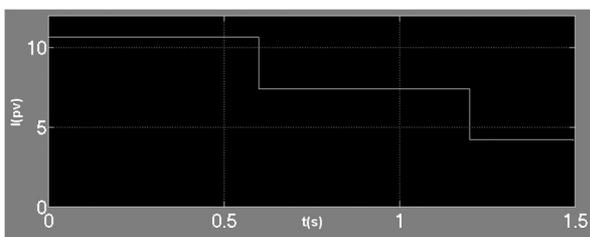


图 11 光伏阵列输出电流随外界条件的变化

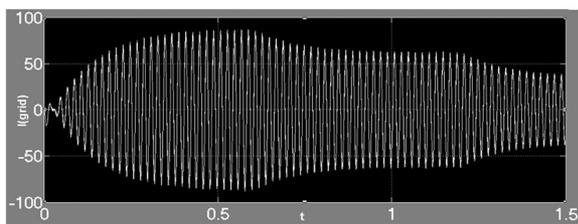


图 12 并网电流随光照强度、环境温度的变化

图 11 为光伏阵列输出电流随光照强度的变化情况。其输出电流从 10.65 A 分别降至 7.411 A 和 4.209 A 。图 12 可以明显看到并网电流随太阳强度

的减小而减小,而小范围的温度变化对其影响并不明显,图 13 的 FFT 分析显示电流总的畸变率只有 0.47% ,小于并网标准 5% 。

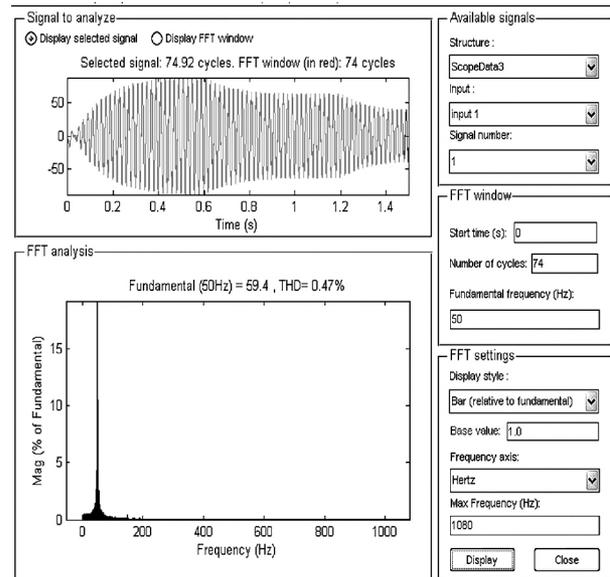


图 13 并网电流的快速傅里叶分析

4 结 论

前面给出了光伏模块的数学模型,并且明确地将环境温度与太阳电池温度有效地区分开来,并在此基础上利用 Matlab 的 S 函数建立了实用的光伏模块仿真模型。S 函数的运用可以发挥 Matlab 强大的运算体系,自身也具有一些独特的优点,同时,友好的参数输入界面、简洁的外观也是该模块的特点。且并网仿真结果表明在短时间内光照强度的变化对光伏阵列的输出特性影响比温度更为突出,同时直流侧输出电 (下转第 20 页)

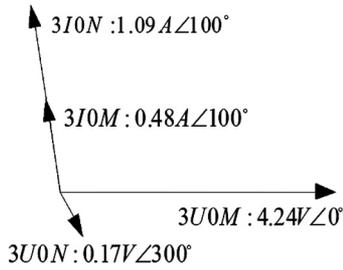


图4 零序向量图

结合图3、图4可分析出,在两侧零序电流均达到门槛值的前提条件下, M 侧零序电压大于门槛值1V,比较 M 侧零序电压电流相位,通过常规零序功率方向元件可判断为正方向,而 N 侧的零序电压约为0.17V,低于常规零序电压判断,必须使用无死区零序功率方向判断。将 N 侧故障量以及线路参数根据式(2)来验证,可知该判据满足,故障为正方向,在两侧均判断为正方向时,可通过纵联零序逻辑保证两侧可靠跳闸。本仿真试验表明了零序电压低于常规零序功率方向门槛时式(2)的正确性。

4 结论

在介绍常规纵联零序方向的基础上,针对某些故

(上接第4页)

流能有效地跟踪光照强度、环境温度的变化,且交流侧的电流成正弦且谐波较小,证明了所建模型的合理性和实用性。

参考文献

[1] OMANH. Space Solar Power Development [J]. IEEE AES Systems Magazine, 2000, 15(2): 3-8.

[2] 崔容强,赵春江,吴达成. 并网太阳能光伏发电系统[M]. 北京:化学工业出版社,2007:7.

[3] J. G. McGowan and J. F. Manwell. Hybrid Wind/PV/Diesel Power Systems Modeling and South American Applications [C]. WREC 1996.

[4] 茆美琴,余世杰,苏建徽. 风/光复合发电系统变结构仿真建模研究[J]. 系统仿真学报,2003,15(3): 361-364.

[5] 王长贵,王斯成. 太阳能光伏发电使用技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005:4.

[6] Platon Baltas. The Arizona University Photovoltaic Designer Program(ASUPVD) [Z]. Department of Electrical and Computer Engineering, Arizona State University,1996.

障情况下零序电压低于门槛值时,常规零序功率方向不适用的条件下,提出一种通过判断补偿点零序电压的与保护安装处的零序电压大小的方式,能有效判断出正反方向故障。仿真实验表明,该方案简单、可靠,并已经充分考虑运行时不平衡零序电压的影响,成为常规零序功率方向元件的重要补充,提高了纵联零序方向保护动作的可靠性。

参考文献

[1] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术(第3版) [M]. 北京:中国电力出版社,2005.

[2] 许正亚. 输电线路新型距离保护[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002.

[3] DL/T 478-92 静态继电保护及安全自动装置通用技术条件[S].

[4] 丁晓兵,赵曼勇,徐振宇. 接地故障零序方向元件拒动改进方案[J]. 电力系统自动,2006,30(9): 88-90.

作者简介:
习伟(1980)男,工程师,从事电力系统继电保护的研究;
李天华(1948)男,教授级高级工程师,从事电力系统继电保护的研究。

(收稿日期:2011-09-13)

[7] 余世杰,何慧若,曹仁贤. 光伏水泵系统中CVT及MPPT的控制比较[J]. 太阳能学报,1998,19(4): 394-398.

[8] 苑进社,余世杰,何慧若. CVT光伏水泵系统瞬态工作点特性分析[J]. 太阳能学报,2002,23(5): 554-556.

[9] Masoum M A, Dehbonei H, Fuchs E F. Theoretical and Experimental Analyses of Photovoltaic System with Voltage and Current-based Maximum Power Point Tracking [J]. Power Engineering Review, IEEE 2002, 22(8): 62-62.

[10] 叶满园,宫二勇. 以电导增量法实现MPPT的单级光伏并网逆变器[J]. 电力电子技术,2004,40(2): 30-32.

[11] 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.

[12] 茆美琴,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.

作者简介:

陈向宜(1976)男,工学博士,四川电力科学研究院,长期从事电力系统稳定分析及直流输电技术研究。

李锐(1988)男,硕士研究生,研究方向为光伏并网及孤岛检测。

(收稿日期:2011-08-22)