

基于 matlab 光伏发电系统的 MPPT 控制与仿真

郭海霞¹, 石明垒², 李娟²

(1. 山西农业大学 工学院, 山西 太谷 030801; 2. 山东大学 电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要:结合光伏电池常用的等效电路和太阳能电池的数学模型, 基于 Matlab/Simulink 建立了光伏电池的仿真模型, 得到光伏电池的 P-U 曲线, 并对仿真结果进行了分析。与传统的光伏电池模型相比, 本文考虑了环境温度与电池温度之间的关系, 使得光伏电池的仿真结果能反映实际环境与电池温度的变化; 提出了改进扰动观察的最大功率点跟踪(MPPT)控制方法, 并建立了带有 MPPT 控制功能的光伏发电系统仿真模型, 仿真结果表明, 该系统能较好地实现最大功率点的跟踪, 提高了光伏电池的发电效率。

关键词:光伏发电; 仿真模型; 最大功率点跟踪(MPPT)

中图分类号: TM615; TM743; TP399

文献标识码: A

文章编号: 1671-8151(2013)01-0076-06

Control and Simulation of Photovoltaic Generation System MPPT Based on Matlab

Guo Haixia¹, Shi Minglei², Li Juan²

(1. College of Engineering, Shanxi Agriculture University, Taigu Shanxi 030801, China; 2. College of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan Shandong 250061, China)

Abstract: The aim of the paper is to establish the photovoltaic cell simulation model based on Matlab/Simulink and to determine whether photovoltaic power generation system can exhibit maximum power point tracking. The mathematical models of the equivalent circuit and photovoltaic cell(PV) were set up which were generally used in photovoltaic cells and I-U and P-U curve of the photovoltaic cell were obtained with the photovoltaic simulation models based on Matlab/Simulink. Unlike the conventional models of photovoltaic cell, these models took into the consideration of the relationship between the ambient temperature and the battery temperature which could reflect temperature changes of the actual environment, as well as that of the battery. In this paper the control method of the maximum power point tracking(MPPT) was proposed under disturbance and observation and a simulation model of the photovoltaic power generation system with the MPPT control function was established. The simulation results showed that this system was able to achieve the maximum power point tracking and to improve power generation efficiency of photovoltaic cells.

Key words: Photovoltaic cell; Simulink model; Maximum Power Point Tracking(MPPT)

随着 21 世纪世界经济的迅猛发展, 世界的能源结构发生了巨大变革, 能源短缺、环境污染、温室效应等问题日益突出^[1]。因此, 人类开始将目光转向可再生能源, 开发太阳能等清洁能源无疑是有很大希望的一个领域^[2,3]。太阳能作为一种新兴的可再生能源, 与其他新能源相比, 它以其绿色、安全、环保等独特的优点越来越受到人们的重视, 成为当今发展位居第二的能源^[4], 光伏发电技术也因此得到了迅速发展。

光伏发电无噪声、无污染、安全可靠, 且没有枯

竭的危险。光伏电池是太阳能光伏发电系统中的核心部分。因此, 光伏电池成为太阳能光伏发电系统研究的重要环节。本文基于 Matlab/Simulink 仿真环境, 建立了更加贴近实际的光伏电池仿真模型, 且采用改进的扰动观察法实现光伏电池输出最大功率的跟踪控制方法, 通过带有最大功率点跟踪功能的光伏发电系统的建模仿真验证了模型建立的合理有效性。

收稿日期: 2012-10-17

修回日期: 2012-11-05

作者简介: 郭海霞(1977-), 女(汉), 山西平遥人, 讲师, 在读博士, 研究方向: 检测技术、电力系统运行与控制。

1 光伏电池的模型与输出特性分析

光伏电池组件是将太阳能电池进行串并联组合后形成的,在太阳光照射下,光伏电池组件利用光生伏特效应将太阳能转换成电能输出,向负荷直接提供直流电,或者通过电力电子 DC-AC 逆变器技术将直流电转换为负载所需的交流电。

1.1 光伏电池的等效电路与数学模型

光伏电池的常用等效电路如图 1 所示。

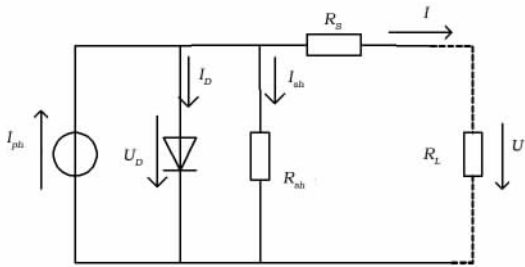


图 1 光伏电池实际等效电路

Fig 1 Actual equivalent circuit for PV

图 1 中, I_{ph} 为光生电流,其值正比于光伏电池的面积和入射光的光照强度; I_D 为流经二极管的电流; I 为光伏电池输出的负载电流; U_D 为等效二极管的端电压,无光照情况下,光伏电池的基本行为特性类似于一个普通二极管; U 为负载两端电压; R_L 为电池的负载电阻; R_s 为等效串联电阻, R_{sh} 为等效并联电阻。一般来说,质量好的硅晶片的 R_s 约为 $7.7 \sim 15.3 \text{ m}\Omega$ 之间, R_{sh} 在 $200 \sim 300 \text{ m}\Omega$ 之间。

太阳能电池的伏安特性是指图 1 中 I-U 关系曲线。由图 1 可见:

$$\begin{aligned} I &= I_{ph} - I_D - I_{sh} \\ U &= U_D - R_s I \end{aligned} \quad (\text{式 } 1)$$

通过各变量之间的关系得光伏电池的 I-U 曲线方程:

$$\begin{aligned} I &= I_{ph} - I_D - \frac{U_D}{R_{sh}} \\ &= I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(U + IR_s)}{AkT} \right] - 1 \right\} \\ &\quad - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \end{aligned}$$

$$I_s = I_{ph} - I_D - \frac{U_D}{R_{sh}} - \frac{U_D}{R_s} \quad (\text{式 } 2)$$

其中:

$$U_{oc} = \frac{AkT}{q} \ln \left(\frac{I_s}{I_0} + 1 \right)$$

式中: I_s 为光伏电池的短路电流; I_0 为光伏电池内部等效二极管 PN 结反向饱和电流; U_{oc} 为光伏电池的开路电压; q 为电荷量,值为 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$; k 为波尔兹曼常数,值为 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$; T 为绝对温度,单位为 K; A 为 PN 结的曲线常数,其值一般在 $1 \sim 2$ 之间变化。

由于光伏电池的性能指标会受工作环境多种外部因素的影响,而且环境温度和光照强度的影响经常同时存在,所以实际应用中使用的数学模型,通常采用供应商提供的光伏电池在标准工作状态下的以下参数: U_{oc} 、 I_{sc} 、 U_m 、 I_m ,其中, U_m 为最大功率点电压, I_m 为最大功率点电流。这样就可以简化构造一个近似的工程使用模型如式 3:

$$I = I_{sc} - \left\{ 1 - C_1 \left[\exp \left(\frac{U}{C_2 U_{oc}} \right) - 1 \right] \right\} \quad (\text{式 } 3)$$

其中: C_1 、 C_2 为系数,分别为:

$$\begin{aligned} C_1 &= \left[1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right] \exp \left(- \frac{U}{C_2 U_{oc}} \right) \\ C_2 &= \left[\frac{U_m}{U_{oc}} - 1 \right] / \left[\ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right] \end{aligned}$$

与传统数学模型相比,本文考虑了环境温度与光伏电池温度之间的关系。根据大量实验数据拟合后^[9],电池温度 T 和环境温度 T_{air} 、光照强度 G 的关系为: $T = T_{air} + KG$,其中 K 为比例常数,值为 $K = 0.03^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$

在任意实际光照强度 G 和电池温度 T 下四个参数值 U'_{oc} 、 I'_{sc} 、 U'_m 、 I'_m 可由式 (4) ~ (7) 求得^[10]:

$$\begin{aligned} T' &= T - T_{ref} \\ G' &= G / G_{ref} \\ U'_{oc} &= U_{oc} (1 - cT') \ln(e + bG) \end{aligned} \quad (\text{式 } 4)$$

$$I'_{sc} = I_{sc}G/G_{ref}(1 + aT') \quad (\text{式 } 5)$$

$$U'_m = U_m(1 - cT')\ln(e + bG) \quad (\text{式 } 6)$$

$$I'_m = I_mG/G_{ref}(1 + aT') \quad (\text{式 } 7)$$

其中, a 、 b 、 c 是常数, $a=0.0025$, $b=0.5$, $c=0.0028$ 。本文中 $T_{ref}=25^{\circ}\text{C}$, $G_{ref}=1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

1.2 光伏电池的仿真分析

根据上述光伏电池的工程数学模型, 利用 Matlab/Simulink 的工具模块搭建光伏电池仿真模型, 如图 2 所示。对仿真模型中各个相关模块进行参数设置, 得光伏电池在任意给定的光照强度和环境温度下的 P-U 输出特性。

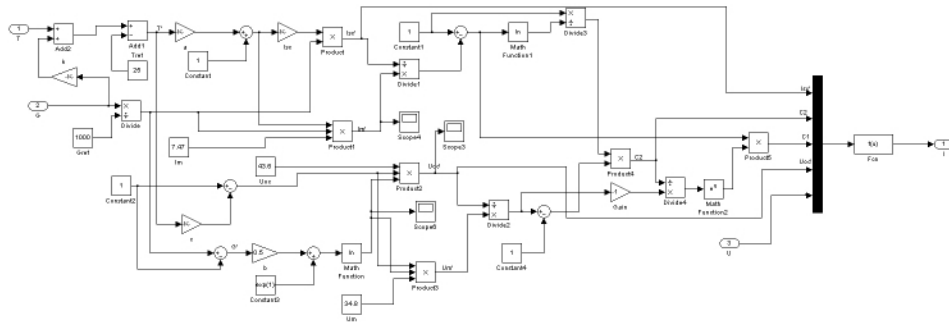


图 2 光伏电池仿真模型

Fig 2 Simulation model for PV

图 2 中, T 为环境温度, G 为光照强度, U 为光伏电池输出电压, I 为输出电流, P 为输出功率。为了便于参数的修改和仿真实验的研究, 将图 2 中 U'_{oc} 、 I'_{sc} 、 U'_m 、 I'_m 、 C_1 、 C_2 模块进行封装, 得图 3, 最后将这 6 个参数的封装模块再封装, 得图 4 所示的光伏电池封装图。

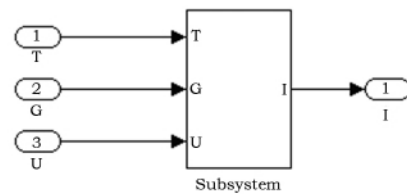


图 4 光伏电池封装图

Fig 4 Package diagram for PV

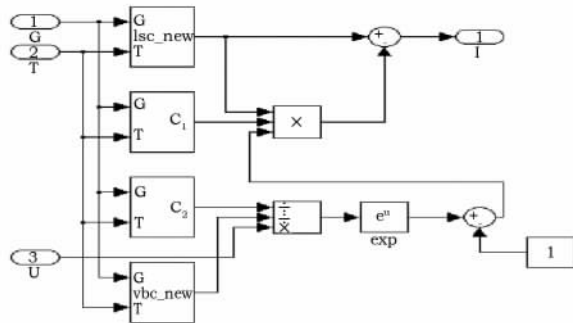


图 3 创建参数封装图

Fig 3 Package diagram for creating parameters

本文所建模型取多晶硅光伏电池, 其输出功率为 260W, 特征参数 U_{oc} 、 I_{sc} 、 U_m 、 I_m 分别为: 43.6 V、8.35 A、34.8 V、7.47 A。其理想的 P-U 输出特性曲线如图 5 所示。

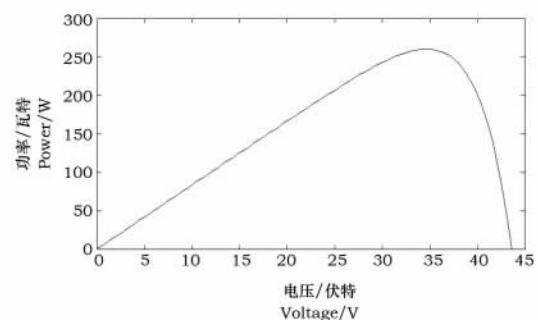


图 5 理想的 P-U 特性曲线

Fig 5 Ideal P-U Characteristic curve

利用上述仿真模型仿真, 得仿真 P-U 输出特性曲线如图 6 所示。仿真短路电流比理想短路电流偏大, 仿真开路电压比理想开路电压偏小, 而输

出最大功率基本相同,满足工程所要求的精度。

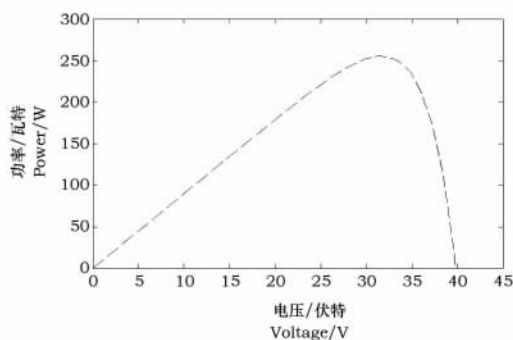


图 6 P-U 特性曲线

Fig 6 P-U Characteristic curve

由仿真模型得光伏电池的光照特性和温度特性,如图 7、图 8 所示。

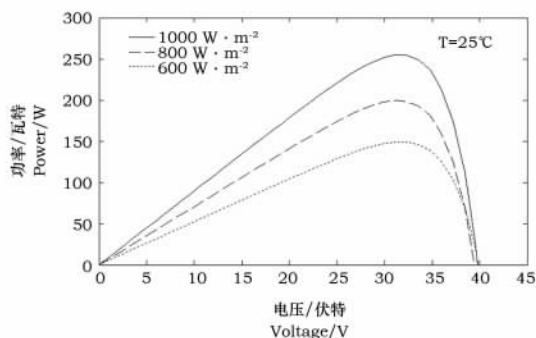


图 7 不同光照下的 P-U 特性曲线

Fig 7 P-U Characteristic curve under different lights

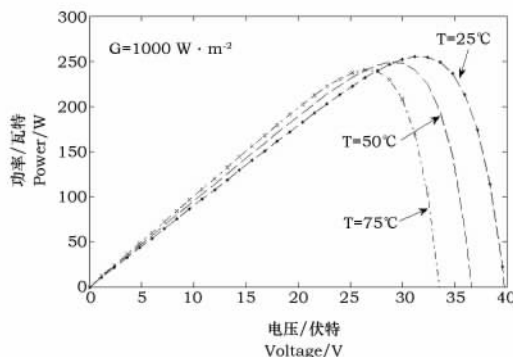


图 8 不同温度下的 P-U 特性曲线

Fig 8 P-U Characteristic curve at different temperatures

由图 7 可见,当温度不变、光照强度发生变化

时,最大功率($P_m = U_m I_m$)与光照强度大致成正比。由图 8 可见,当光照强度不变,温度上升时,最大输出功率也随之下降。

为了与下文中光伏发电系统的 MTT 跟踪仿真结果相对照,利用此模型得出在($T=25^\circ\text{C}$, $G=1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)、($T=50^\circ\text{C}$, $G=800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)、($T=75^\circ\text{C}$, $G=600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)3 种情况下的 P-U 特性曲线,如图 9 所示。

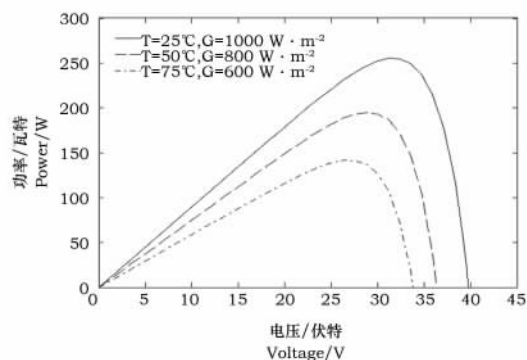


图 9 温度和光照同时突变的 P-U 特性曲线

Fig 9 P-U Characteristic curve under concurrent mutation of temperature and light

综合以上分析可知,依据供应商所提供的光伏电池的 4 个标准性能参数(U_{OC} 、 I_{SC} 、 U_m 、 I_m),本文所建的光伏电池模型可以很好的反映光伏电池特性,与光伏电池理论分析的曲线比较吻合,由此模型可以模拟出任意实际环境温度和实际光照条件下光伏电池的特性曲线,因此该模型可以作为光伏发电系统分析的有效使用模型。

2 最大功率点跟踪(MPPT)的控制方法

依据上面的仿真结果和分析可知,光伏电池是一种很不稳定的非线性直流电源,其输出电压和电流受光照强度和环境温度的影响,具有明显的非线性特征。在一定光照强度和环境温度下,光伏电池输出的电压、电流变化时,输出功率 P 也随之变化,但总有唯一的最大功率点(Maximum Power Point, MPP),在此点工作时,光伏电池能实现最大功率输出。通过一定的控制算法寻找光伏电池输出最大功率点的过程称为最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)。

如何提高光伏电池的发电效率,使光伏电池达到最大转换效率,保证输出功率最大,对提高光伏

发电系统的整体效率及光伏并网起着至关重要的作用。最大功率点位置随着光照强度和环境温度的变化而改变,最大功率点所对应的电压值也相应发生变化,因此,需要对光伏电池进行 MPPT 控制研究。目前 MPPT 控制的实现方法主要有:恒定电压跟踪法、电导增量法、“上山法”、定电压跟踪法、电导增量法和扰动观察法等^[11]。这些方法的控制都要通过控制电力电子 DC-DC 变换器的占空比来调节光伏电池的输出电压,达到跟踪最大功率点,但每种方法均有各自的优缺点^[12,13]。

传统的扰动观察法是通过不断的外加扰动电压来观察光伏电池的输出功率的变化,从而寻找最大功率点。本文利用改进的扰动观察法,通过改变光伏阵列的输出电压,观察其输出功率的变化,若扰动后的输出功率大于原输出功率,则表明此刻的扰动方向是正确的,应继续向该方向扰动;若扰动后的输出功率小于原输出功率,则表明当前扰动方向错误,应往反方向进行扰动。图 10 为其算法实现的流程图。

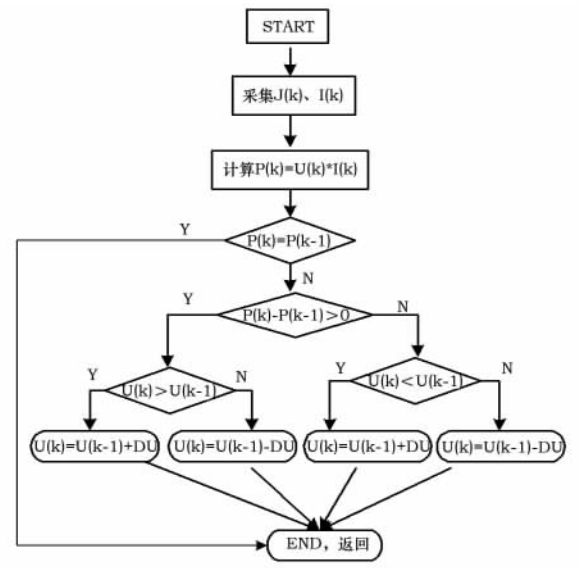


图 10 扰动观察的流程图

Fig 10 Flowchart under disturbance observation

依据图 10 所示扰动观察流程图,用 Matlab/Simulink 建立其仿真模块,如图 11 所示。

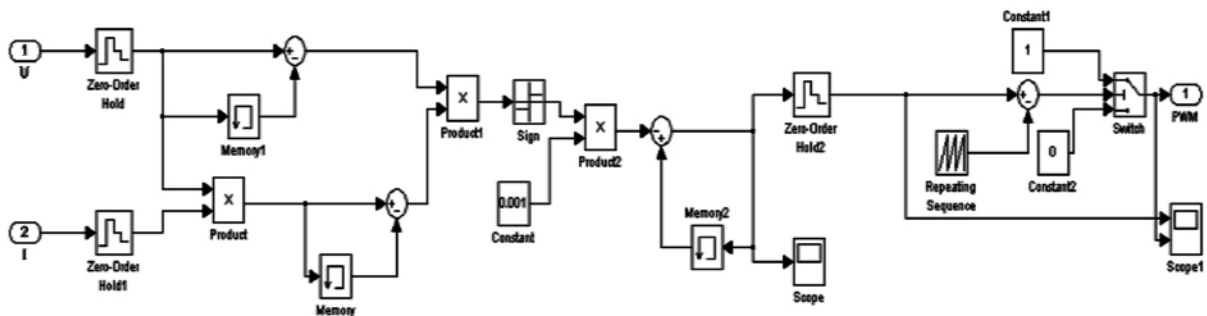


图 11 扰动观察法仿真模块

Fig 11 Simulation model under disturbance observation

3 光伏发电系统的 MPPT 仿真分析

光伏发电系统主要包括光伏电池模块、DC-DC 模块和带有 MPPT 控制的最大功率输出模块。由于光伏电池输出的电能是很不稳定的直流电,且它的输出功率会受环境温度和光照强度等的影响,因此不能供给负载直接使用,通过 DC-DC 模块将光伏电池发出的直流电变换为稳定可调的直流电,使之工作在最大功率点处。

图 12 为利用 Matlab/Simulink 仿真软件建立的光伏发电系统仿真模型,在此基础上进行带有 MPPT 控制功能的仿真分析。

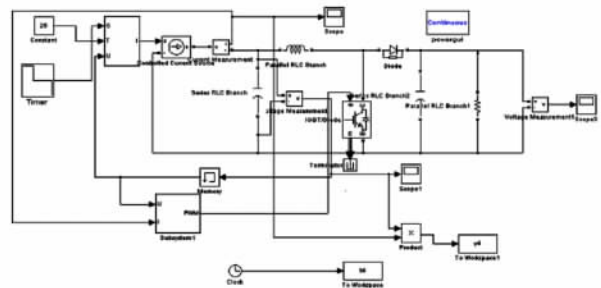


图 12 光伏发电系统的仿真模型

Fig 12 Simulation model for photovoltaic power system

为了与前文光伏电池仿真结果相对照,在图 12 的仿真模型中,光伏电池所采用的特征参数与前文相同,仿真结果如图 13。

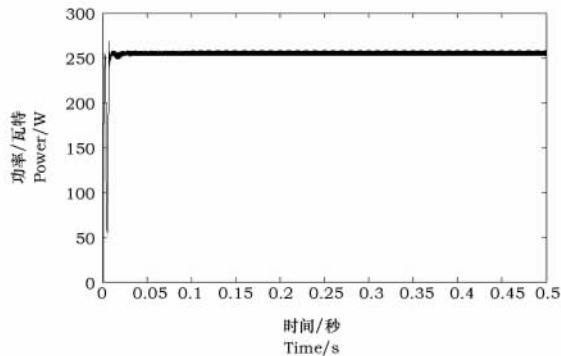


图 13 $T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时 MPP 跟随图

Fig 13 Mpp tracking diagram under $T=25^{\circ}\text{C}$ and $G=1000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

由图 13 可见,系统在不到 0.05 s 已经达到最大功率点,所建立的系统模型能较快较好地对光伏电池的最大功率实现跟踪。由此模型,得以下 3 种条件下最大功率点跟踪图,如图 14~图 16 所示。

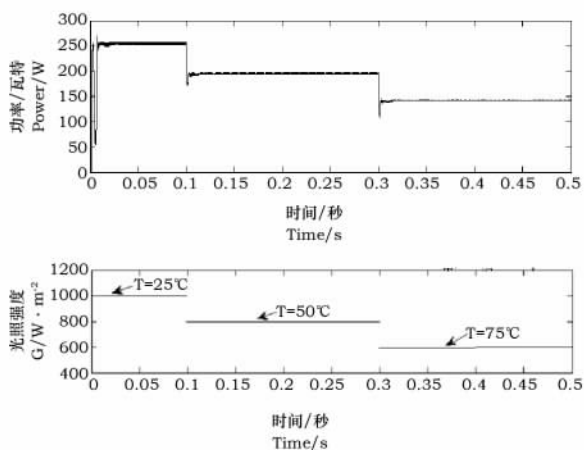


图 14 温度和光照同时变化时的 MPP 跟随图

Fig 14 MPP tracking diagram under concurrent mutation of temperature and light

由图 14 可见,系统在 0.1 s 时温度和光照强度由($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$)突降为($T=50^{\circ}\text{C}$, $G=800\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$),然后在 0.3 s 降为($T=75^{\circ}\text{C}$, $G=600\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$),温度和光照同时突变,与图 9 对照可见,系统在温度和光照同时突变时能较

快对光伏电池输出的最大功率实现跟踪。

由图 15 可见,温度 $T=25^{\circ}\text{C}$,光照强度 G 在 0.1 s 时从 $1000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 突降到 $800\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,然后在 0.3 s 降到 $600\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,与图 7 对照,两次突降过后,系统均能很快地实现最大功率点的跟踪。

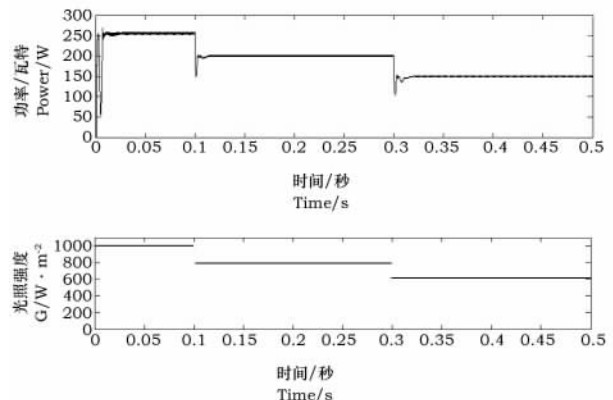


图 15 $T=25^{\circ}\text{C}$ 时光照强度变化的 MPP 跟随图

Fig 15 MPP tracking diagram as lights changing at $T=25^{\circ}\text{C}$

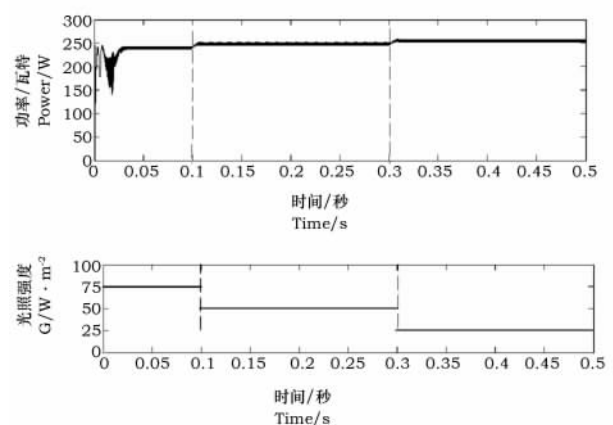


图 16 $G=1000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时温度变化的 MPP 跟随图

Fig 16 MPP tracking diagram as temperatures changing at $G=1000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

由图 14 可见,光照强度 $G=1000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,温度在 0.1 s 从 75°C 突降到 50°C ,在 0.3 s 降到 25°C ,与图 8 对照可见,系统在温度突变后可以很快地实现最大功率点的跟踪。

4 结论

文中考虑了环境温度与光伏电池温度之间的关系,

(下转第 92 页)

- (6): 947-953.
- [18]杨久仙, 张荣飞, 马秋刚, 等. 葡萄糖氧化酶对断奶仔猪生产性能的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2011(2): 56-57.
- [19]赵晓芳, 张宏福. 葡萄糖氧化酶的功能及在畜牧业中的应用[J]. 广东饲料, 2007, 16(1): 34-35.
- [20]张广栋, 罗仓学. 生物传感器及其在食品工业中的应用[J]. 食品研究与开发, 2005, 26(1): 133-134.
- [21]Wu B, Zhang G, Shuang S. A biosensor with myrosinase and glucose oxidase bienzyme system for determination of glucosinolates in seeds of commonly consumed vegetables[J]. Sens Actuat Chem, 2005, 106(2): 700-707.
- [22]于洋, 赵林, 闫博, 等. 基于有机—无机杂化材料和铂电极的葡萄糖氧化酶电极的研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20(2): 258-261.
- [23]汤琳, 曾光明, 沈国励, 等. 基于抑制作用的新型葡萄糖氧化酶传感器测定环境污染物汞离子的研究[J]. 分析科学学报, 2005, 21(2): 123-126.
- [24]Changsheng Shan, Huafeng Yang, Jiangfeng Song, et al. Direct Electrochemistry of Glucose Oxidase and Biosensing for Glucose Based on Graphene[J]. Analytical Chemistry, 2009, 81(6): 2378-2382.
- [25]Wu B, Zhang G, Shuang S, et al. Biosensors for determination of glucose with glucose oxidase immobilized on an eggshell membrane [J]. Talanta, 2004, 64(2): 546-553.
- [26]Strasser A, Dietrich R, Usleber E, et al. Immunochemical rapid test for multiresidue analysis of antimicrobial drugs in milk using monoclonal antibodies and hapten • glucose oxidase conjugates[J]. Anal Chim Acta, 2003, 495(1): 11-19.
- [27]Ping Wu, Qian Shao, Yaojuan Hu, et al. Direct electrochemistry of glucose oxidase assembled on graphene and application to glucose detection[J]. Electrochimica Acta, 2010, 55(28): 8606-8614.

(上接第 81 页)

建立了光伏电池的仿真模型, 通过仿真结果分析了光照强度和环境温度对光伏电池输出特性的影响, 验证了此模型的合理有效性。采用改进的扰动观察法, 基于 DC-DC 变换器实现最大功率点跟踪, 并利用 Matlab/Simulink 建立带有最大功率点跟踪功能的光伏发电系统仿真模型, 仿真结果表明在一

定温度和光照强度下, 系统模型能较好地实现最大功率点跟踪, 且验证了该模型在温度和光照强度变化的情况下也能对最大功率点实现较好的跟踪, 提高了系统的响应速度。

在温度或光照强度突变的瞬间, 输出功率会发生短时的剧烈震荡, 如何消除震荡有待于进一步研究。

参 考 文 献

- [1]Bose B K. Energy, Environment, and Advances in Power [J]. IEEE Trans Power Electron, 2000, 15(4): 688-701.
- [2]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: 1-18.
- [3]王效华, 张东风. 户用风光互补发电系统设计与经济评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 214-216.
- [4]OMANH. Space Solar Power Development[J]. IEEE AES Systems Magazine, 2000, 15(2): 3-8.
- [5]李志敏, 甘家梁, 徐翠琴, 等. 光伏并网的控制策略与最大功率点跟踪的仿真分析[J]. 变频器世界, 2012(5): 58-63.
- [6]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): 1248-1249.
- [7]海涛, 孔娟, 夏东伟. 基于 MATLAB/Simulink 的光伏电池建模与仿真[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2006, 21(4): 74-75.
- [8]杨金孝, 朱琳. 基于 Matlab/Simulink 光伏电池模型的研究[J]. 现代电子技术, 2011, 34(24): 192-193.
- [9]苏建徽, 余世杰, 赵为, 等. 硅太阳能工程数学模型[J]. 太阳能学报, 2001, 22(4): 409-412.
- [10]杨文杰. 光伏发电并网与微电网运行控制仿真研究[D]. 四川: 西南交通大学, 硕士学位论文, 2010.
- [11]程启明, 程尹曼, 汪明娟, 等. 光伏电池最大功率点跟踪方法的发展研究[J]. 华东电力, 2009, 37(8): 1301-1305.
- [12]杨玉林. 光伏并网逆变器的研究[D]. 武汉理工大学, 硕士学位论文, 2012: 22-31.
- [13]冒波波. 微电网运行与控制的建模与仿真[D]. 四川: 西南交通大学, 硕士学位论文, 2012: 21-24.