



基于 Simulink 的光伏电池组件建模和 MPPT 仿真研究

刘翼, 荆龙, 童亦斌

北京交通大学新能源研究所, 北京 100044

摘要 根据光伏电池组建的物理特性等效电路及数学模型, 基于 Simulink 仿真软件建立了光伏电池组件的仿真模型, 模型的基本参数按照 Solarex MSX60 60W 产品参数设置, 其他参数根据基本参数及数学模型计算得出。该模型可以实现不同光照强度和温度下 60W 光伏组件的输出 $U-I$ 特性, 并且可以灵活地推广到其他功率等级的电池组件及其串并联特性的模拟。根据光伏电池的输出 $U-I$ 特性, 可以分析得到组件的 $U-P$ 特性曲线为单峰曲线, 故光伏电池存在最大功率工作点 (MPP)。在此 Simulink 模型基础上研究了光伏组件最大功率追踪方法 (MPPT)。在众多最大功率追踪方法中, 电导增量法有着比较优秀的控制效果, 因此本文着重讨论了电导增量法, 对比分析了电导增量法及其两种改进方法 (两种步长电导增量法和梯度变步长电导增量法) 的最大功率追踪控制效果, 这两种改进方法均对普通电导增量法中控制步长固定的不足做了修改。按照一天中光照强度变化的近似规律设置环境条件, 仿真模拟光伏电池组件的 MPPT 控制, 仿真结果进一步验证了模型准确性以及改进后的梯度变步长最大功率控制算法的优越性。

关键词 光伏电池组件建模; Simulink; 最大功率追踪控制; 电导增量法

中图分类号 TP391.9

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)18-0094-04

Study of PV Module and MPPT Control Based on Simulink

LIU Yi, JING Long, TONG Yibin

New Energy Research Institute, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract The simulation model of PV module in this paper is based on Simulink software, PV module's physical equivalent circuit and its mathematical model. Its basic parameters are the same as those of Solarex MSX60 60W, and other parameters are calculated with basic parameters and the mathematical model. This Simulink model can be used to show the $U-I$ output characteristics of the 60W PV module under various insulations and temperatures. Meanwhile, this model can be applied to cases of other powers neatly and used to study module's parallel and serial characteristics. According to the output $U-I$ characteristics, the $U-P$ curve of the PV module is a single peak curve, which means that the PV module has a Maximum Power Point (MPP). On the basis of this Simulink model, Maximum Power Point Tracking (MPPT) methods are discussed. Among various MPPT methods, the incremental conductance method (IncCond) has an excellent control effect, so it is mainly discussed in this paper, and its control effect is compared with two of its improvements, which are two step-sizes IncCond and gradient variable step size IncCond. The two improved methods have both relaxed the restriction of the fixed step in IncCond. Setting the environmental parameters of the simulation model with the approximate variation of insulation in a day, the MPPT control of PV module is simulated. The simulation results further verify the accuracy of the model and the improved MPPT algorithm.

Keywords model of PV module; Simulink; maximum power point tracking; incremental conductance method

0 引言

随着全球对新能源技术发展的鼓励和重视, 各国对光伏技术的研究也逐渐深入和广泛。然而太阳能电池板安装地点

的环境条件难以预测, 这给光伏发电系统中其他环节的实验及研究带来了不便。因而, 对光伏组件的建模仿真可以为其他环节的深入研究提供仿真基础。此外, 由光伏组件的输出

收稿日期: 2010-06-18; 修回日期: 2010-08-23

作者简介: 刘翼, 硕士研究生, 研究方向为光伏并网发电系统, 电子信箱: liuyiala@gmail.com; 荆龙 (通信作者), 讲师, 研究方向为电力电子技术在新能源发电中的应用, 电子信箱: ljing@bjtu.edu.cn

$U-I$ 特性可以看出,在某光照强度和某温度下,光伏组件对应一个输出功率最大的工作点(MPP),因而为使光伏组件的发电效率最大,常对光伏组件进行最大功率跟踪控制(Maximum Power Point Tracking, MPPT)。

光伏电池是利用半导体材料的电子特性直接转换成电能的一种固态器件,根据其工作原理可以建立光伏电池的数学模型^[1-2],即建立光伏电池仿真模型的基础。Matlab/Simulink 仿真软件功能强大并且有良好简洁的建模环境,许多对光伏电池仿真模型的研究都基于此软件,例如,① 根据数学模型用牛顿迭代法求解电流,并通过 Matlab 语言编写仿真模型^[1-5],该仿真思想所建模型可以模拟不同环境及电池参数下的光伏电池 $U-I$ 特性曲线,但此模型(信号模型)与 Simulink 仿真软件中提供的功率模块难以直接连接,给光伏发电系统的其他研究带来不便。② 根据数学模型及等效电路建立 Simulink 功率仿真模块,但对等效电路中串联电阻的计算模糊,导致模型的准确性下降^[7]。本文结合上述两种建模方式的优点,建立了功率输出的 Simulink 仿真模型,可以直接利用此模型研究光伏发电系统的其他环节。光伏发电系统 MPPT 经典控制方法中电导增量法的控制效果很好,但同时存在步长固定的缺点^[7-8]。本文利用提出的仿真模型对电导增量法及其两种改进方法进行仿真分析。

1 光伏组件建模仿真

1.1 光伏组件的物理及数学模型

太阳能光伏电池由许多 P-N 结组成,将光能转换为电能。光伏电池的等效电路如图 1 所示^[2]。

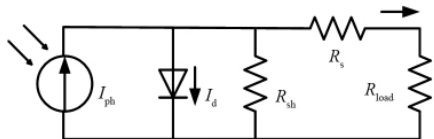


图 1 光伏组件的等效电路

Fig. 1 PV module equivalent circuit

图 1 中, I_{ph} 为光生电流,当光照恒定时,由于光生电流不随光伏电池的工作状态而变化,因此可以等效为恒流源。在光伏电池的两端接上负载后,负载端电压反作用于 P-N 结上,产生与光生电流方向相反的电流 I_d 。串联等效电阻 R_s 表示电池中电流受到的阻碍作用,其数值取决于 P-N 结深度、半导体材料的纯度和接触电阻。串联电阻越大,线路损失越大,光伏电池输出效率越低;旁路电阻 R_{sh} 与电池对地的泄漏电流呈反比。

根据太阳能电池内部结构和电路特性,可建立太阳能电池的数学模型公式^[1]表达如下:

$$I_{ph}=I_{ph(T)}[1+K_0(T-T_1)] \quad (1)$$

$$I_{ph(T)}=G \cdot I_{SC(T)} / G_{nom} \quad (2)$$

$$K_0=(I_{SC(T_2)}-I_{SC(T_1)})/(T_2-T_1) \quad (3)$$

$$I_d=I_{OS} \left\{ \exp \left[\frac{q(V+IR_s)}{A k T} \right] - 1 \right\} \quad (4)$$

其中, I_{ph} 为与光照强度呈正比的光生电流; I_{SC} 为光伏电池的短路电流; $I_{SC(T_1)}$ 为在标准光照条件 $G=1000 \text{ W/m}^2$, 温度为 T_1 条件下的短路电流, A; $I_{SC(T_2)}$ 为在标准光照条件 $G=1000 \text{ W/m}^2$, 温度为 T_2 条件下的短路电流, A; G 为光照强度; G_{nom} 为标准光照强度, 值为 1000 W/m^2 ; K_0 为短路电流温度数 $1/^\circ\text{C}$; I_d 为流过二极管的电流; I_{OS} 为光伏电池饱和电流; V 为负载端电压; I 为负载端电流; A 为 P-N 结理想因子, 取值 $1 \sim 2$; K 为玻尔兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$); T 为开氏温标。

基于电池组件 Solarex MSX60 60W 的参数(表 1)建立了本文所提出的电池组件模型,并根据式(3),计算 $K_0=0.0024/^\circ\text{C}$ 。

表 1 电池组件 Solarex MSX60 60W 的参数

Table 1 Parameters of PV module Solarex MSX60 60W

型号	开路电压	短路电流	最大功率点	25℃短路电流
Solarex MSX60 60W	21.1V	3.846A	17.1V/3.5A	3.8A
最大功率	电流温度系数	电压温度系数	功率温度系数	75℃短路电流
60W	$(0.065 \pm 0.015) \% / ^\circ\text{C}$	$-(80 \pm 10) \text{ mV} / ^\circ\text{C}$	$-(0.5 \pm 0.005) \% / ^\circ\text{C}$	3.92A

根据式(1)和式(2)推导出^[2]

$$I_{ph}=G \cdot \frac{3.8}{1000} \times [1+0.0024(T-25-273)] \quad (5)$$

对于电池组件(串联单体电池个数为 n_s , 并联单体电池个数为 n_p), 光伏组件的输出特性方程^[2]为

$$I=n_p I_{ph}-n_s I_{OS} \cdot \left\{ \exp \left[\frac{q(V+IR_s)}{A k T} \right] - 1 \right\} \quad (6)$$

本文所建立的光伏组件模型无并联单体电池, 串联电池个数为 36 个, 即 $n_s=36$; 在外部负载短路时, 可知 $I=0$, $V=V_{oc}$ 代入式(6), 得到

$$I_{ph}-36 I_{OS} \cdot \left\{ \exp \left[\frac{q(V+IR_s)}{A k T} \right] - 1 \right\} = 0$$

因此可得

$$I_{OS}=\frac{I_{ph}}{\exp \left[\frac{q(V+IR_s)}{A k T} \right] - 1} \quad (7)$$

1.2 光伏组件基于 Matlab 软件的建模

根据光伏组件的等效电路建立 Simulink 模型, 如图 2 所示。

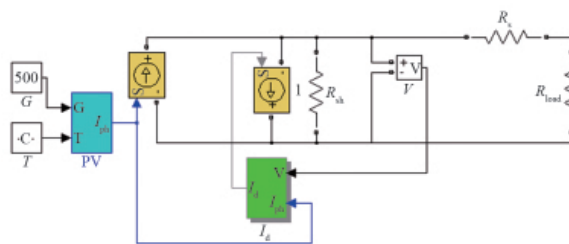


图 2 光伏组件仿真模型

Fig. 2 Simulation model of PV module

1) 模拟光生电流的可控电流源的控制信号 I_{ph} 由式(5)确定, G 、 T 作为输入控制量。

2) 模拟二极管作用的可控电流源的控制信号为 I_d , 可由式(4)和式(7)确定, 可见 I_d 需要两个输入变量: V (R_s 两端电压) 和光生电流 I_{ph} , 其可通过测量确定。

3) 串联电阻 R_s 的确定。

根据式(6), 可确定在最大功率点 (MPP) 处有

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_{OS} \cdot \left\{ \exp \left[\frac{q(V_{mpp} + I_{mpp} R_s)}{36 \cdot A k T} \right] - 1 \right\} \quad (8)$$

令 $V_t = \frac{A k T}{q}$, 则有

$$R_s = \frac{36 V_t \ln \left(\frac{I_{ph} - I_{mpp}}{I_{OS}} + 1 \right) - V_{mpp}}{I_{mpp}} \quad (9)$$

将表 1 中的相关数据代入式(9), 即可以计算出串联电阻 $R_s = 0.5062 \Omega$ 。

1.3 Matlab 模型仿真结果

调节负载电阻的大小进行采样, 得到 $U-I$ 特性曲线 (图 3), 设定环境条件 $G=1000 \text{ W/m}^2$, $T=30^\circ \text{C}$ 。

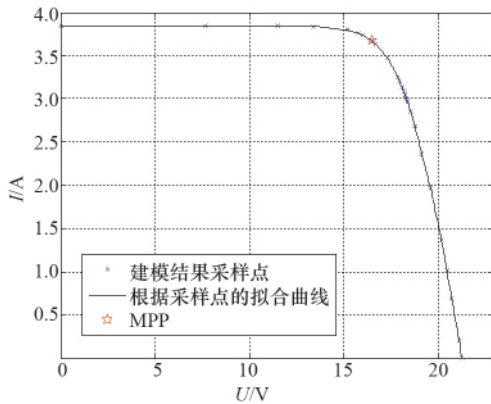


图 3 Matlab 光伏组件模型 $U-I$ 特性曲线
Fig. 3 $U-I$ characteristic curve of PV module

2 MPPT 控制建模

在双级光伏发电系统中, 采用 DC/DC 环节完成最大功率控制的任务, 即调节 DC/DC 变换器的控制脉冲占空比, 相当于调节光伏组件输出侧的等效负载的大小, 使等效负载与光伏电池组件在该环境条件下工作于最大功率点时对应的负载大小相同, 以使电池组件工作于最大功率点。常见的最大功率追踪方法中, 电导增量法具有良好的控制效果, 故本文主要仿真研究电导增量法及其改进方法。

2.1 电导增量法原理

由光伏电池的 $U-I$ 特性曲线可见, 在最大功率点处存在 $\frac{dP}{dV} = 0$, 即 $\frac{d(VI)}{dV} = 0$, 进一步推导可得

$$\frac{dI}{dV} = \frac{I}{V} \quad (10)$$

此式即作为判定光伏池板的工作点是否位于最大功率点处的依据。在 $U-I$ 曲线上最大功率点的左侧和右侧分别存在关

系: $\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}$ 和 $\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}$, 通过此关系可对光伏组件工作电压进行调节。本研究中选择使用 Boost 电路实现对光伏组件最大功率点的跟踪控制, 故实际控制量为 Boost 电路的占空比。

由于电导增量法的判断依据是光伏电池组件自身的物理特性, 故不会受外部环境影响, 且跟踪到最大功率点后可以保证稳定输出。然而, 其主要缺点是步长固定, 追踪时间难以灵活控制。

2.2 对电导增量法的改进

针对电导增量法步长固定的缺点, 提出以下改进方法。

方法 1 (两种步长电导增量法): 设计两种步长变量, 在 dI 变化较大时, 使用大步长; dI 变化较小时, 使用小步长。在实际的仿真中, 设置 $\text{abs}(dI)$ 与 0.65 比较, 以确定大小步长。

方法 2 (梯度变步长电导增量法): 根据光伏组件的 $U-I$ 特性, 在最大功率点的两侧, $|dP/dV|$ 随输出电压偏移量的增大而增大。令 MPPT 的步长 $\text{Step} = A \cdot |dP/dV|$ ($A=0.0005$), 使步长随输出电压与最大功率点处电压距离的大小而变化。梯度变步长的程序流程图如图 4 所示。

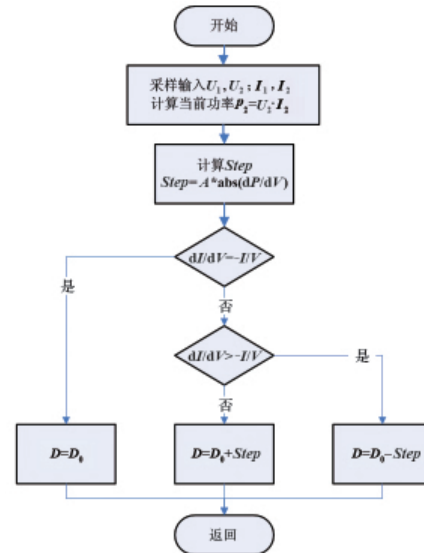


图 4 梯度变步长最大功率控制方法程序流程
Fig. 4 Program flow chart of variable step size MPPT control

3 MPPT 控制仿真结果

仿真中 Boost 电路参数 $L=65 \text{ mH}$, $C=1000 \mu\text{F}$, 开关频率 $f=2 \text{ kHz}$; 光照强度 $G=1000 \text{ W/m}^2$, 环境温度 $T=25^\circ \text{C}$ 。

3.1 3 种电导增量法的追踪效果比较

由图 5 可以看出, 电导增量法、两种步长电导增量法、梯度变步长电导增量法 3 种控制方法中, 电导增量法的调节速度最快, 但稳态波动较大; 两种步长电导增量法的稳态波动小, 但其调节速度略慢; 而梯度变步长电导增量法的稳态最理想, 其调节速度也比较快, 达到稳态前的波动也相对较小。根据图 6, 光伏电池组件的输出电压在梯度变步长电导增量法控制时, 稳态波动最小, 达到稳态前的波动也最小。

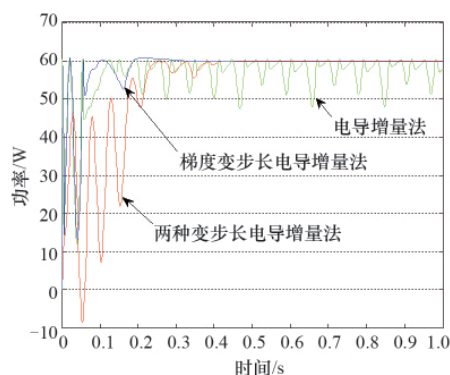


图5 不同 MPPT 控制方法下光伏
电池组件输出功率
Fig. 5 PV module's output power
under different MPPT controls

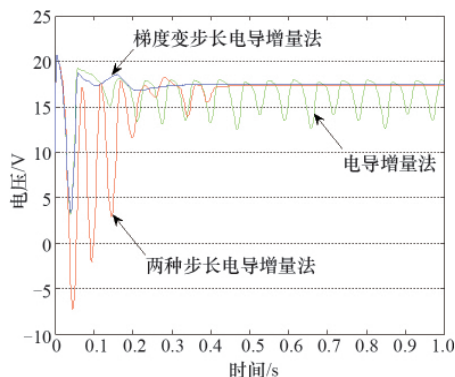


图6 不同 MPPT 控制方法下光伏
电池组件输出电压
Fig. 6 PV module's output voltage
under different MPPT controls

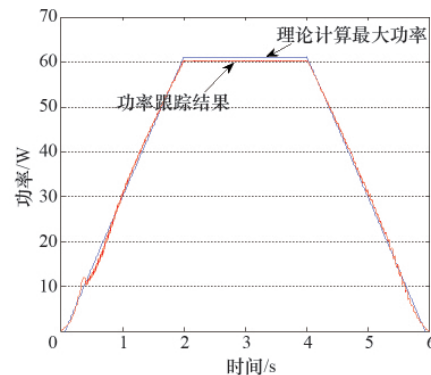


图7 最大功率跟踪结果比较
Fig. 7 Comparison of max
power tracking results

3.2 光照条件变化时光伏组件最大功率跟踪效果

为模拟一天内的光照强度变化,并且考虑到仿真速度,设计 0~2s 内光照强度按照固定斜率由 0 增加到 $1000\text{W}/\text{m}^2$; 2~4s,维持 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 不变;4~6s 按固定斜率下降至零。仿真波形如图 7,光伏电池组件的输出功率可以比较理想地跟随上光伏电池组件的最大输出功率,控制效果理想。

4 结论

本文根据光伏电池组件的数学模型,基于 Simulink 仿真工具建立了光伏组件的仿真模型,该模型可以灵活设定环境条件(光照强度和温度),模型 $U-I$ 曲线的仿真结果与理论结果一致。以此模型为基础,进行了 MPPT 控制的研究,其中梯度变步长方法具有出色的控制效果,并且 MPPT 控制结果也进一步验证了光伏电池组件模型的准确性。本文提出的光伏电池组件模型可以为研究光伏电池组件热斑现象、光伏发电系统并网控制等研究提供可靠方便的仿真研究手段。

参考文献 (References)

- [1] Walker G. Evaluating MPPT converter topologies using a Matlab PV model [J]. *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, 2001, 21(1): 49-55.
- [2] 杜慧. 太阳能发电控制系统的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
Du Hui. Research on the control system of solar energy photovoltaic generation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008.
- [3] 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.
Mao Meiqin, Yu Shijie, Su Jianhui. *Journal of System Simulation*, 2005, 17(5): 1248-1251.
- [4] 崔岩, 蔡炳煌, 李大勇, 等. 太阳能光伏模板仿真模型的研究 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18(4): 829-834.
Cui Yan, Cai Binghuang, Li Dayong, et al. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(4): 829-834.
- [5] 任驹, 郭文阁, 郑建邦. 基于 P-N 结的太阳能电池伏安特性的分析与模拟[J]. 光子学报, 2006, 35(2): 171-175.

Ren Ju, Guo Wenge, Zheng Jianbang. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35 (2): 171-175.

- [6] 禹华军, 潘俊民. 光伏电池输出特性与最大功率跟踪的仿真研究[J]. 计算机仿真, 2005, 26(2): 248-252.

Yu Huajun, Pan Junmin. *Computer Simulation*, 2005, 26(2): 248-252.

- [7] 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. *Power Electronics*, 2007, 41(5): 3-5.

- [8] 陈兴峰, 曹志峰, 许洪华, 等. 光伏发电的最大功率跟踪算法研究[J]. 可再生能源, 2005, 119(1): 8-11.

Chen Xingfeng, Cao Zhifeng, Xu Honghua, et al. *Renewable Energy*, 2005, 119(1): 8-11.

- [9] 罗明, 杨金明. 双级式光伏系统最大功率点跟踪研究 [J]. 电力电子技术, 2009, 43(5): 20-21.

Luo Ming, Yang Jinming. *Power Electronics*, 2009, 43(5): 20-21.

- [10] 张志涌. 精通 Matlab[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.

Zhang Zhiyong. *Proficient in Matlab* [M]. Beijing: Beihang University Press, 2009.

(责任编辑 王芷)

《科技导报》“研究论文”栏目征稿

《科技导报》以发表国内外科学技术各学科专业原创性学术论文为主,同时刊登阶段性最新科研成果报告,以及国内外重大科技新闻,快速、全方位、高密度、大容量提供科技信息。“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。本栏目欢迎广大一线科技工作者投稿。投稿网址: www.kjdb.org; 投稿邮箱: kjdbbjb@cast.org.cn。