

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.01.014

# 基于 S 函数的 inc 算法在光伏发电 MPPT 上的应用

张 振, 张发明, 谭会生

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 传统的变步长 inc 算法虽然在控制性能上有优势, 但是不仅计算量较大, 影响跟踪速度; 且稳定步长较大, 系统稳定性有待提高。因此, 基于 Matlab/Simulink 平台搭建了光伏发电最大功率点跟踪技术控制模型, 利用 Simulink 中 S 函数编程, 实现了新型变步长 inc 算法仿真, 并得出了相关结论。仿真实验结果表明, 基于 S 函数的新型变步长 inc 算法不仅跟踪速度较快, 而且在最大功率点处的跟踪也准确稳定。

**关键词:** 光伏发电; MPPT; 变步长 inc 算法; S 函数

中图分类号: TM615

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)01-0076-05

## Application of Inc Algorithm Based on S-Function to Photovoltaic Power Generation MPPT

ZHANG Zhen, ZHANG Faming, TAN Huisheng

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** Though with the advantages in its control performance, the traditional variable step length Inc algorithm has its own disadvantage as well: a large amount of computation which affects the tracking speed and a large stable step length which fails to keep the system stable. In view of this, based on Matlab/Simulink platform, a control model of photovoltaic maximum power point tracking has thus been established. By using S-function programming in Simulink, the simulation of a new variable step size Inc algorithm can be realized, thus helping to obtain relevant conclusions. The simulation results show that the improved variable step length Inc algorithm, which is based on S-function, is characterized with a faster tracking speed, accurate and stable in its tracking at the maximum power point.

**Keywords:** photovoltaic power generation; maximum power point tracking (MPPT); variable step size inc algorithm; S-function

## 0 引言

21 世纪的今天, 能源问题已经成为一个全球性问题, 而太阳能作为一种清洁且可以无限被开发利用的能源, 也成为世界各国研究开发的重点。最大功率点跟踪 (maximum power point tracking, MPPT) 技术, 旨在提高光电能量的转化率, 该技术在确保系统稳定性的同时, 使系统以更大的效率工作。然而光伏

电池工作时, 它的输出特性会受到各种因素的影响, 比如温度、光照环境等, 因而研究 MPPT 技术是很有必要的<sup>[1-2]</sup>。

MPPT 技术应用中较为广泛的方法有电导增量法 (incremental conductance)、干扰观测法 (perturb and observe algorithms)、神经网络控制法 (neural network control)、模糊逻辑控制法 (fuzzy logic control) 等。其中, 神经网络控制法和模糊逻辑控

收稿日期: 2017-06-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (6167224), 湖南省自然科学基金资助项目 (2016JJ6036)

作者简介: 张 振 (1994-), 男, 河南商丘人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为基于 FPGA 的光伏并网控制系统算法设计与实现, E-mail: 791468948@qq.com

制法是目前研究比较多的智能化控制方法, 但是它们的控制过程极其复杂, 而且对硬件配置的要求非常高, 成本也比较大。扰动观察法和导纳增量法是目前比较常用的自寻优方法。采用扰动观察法时必须要在系统中引入扰动项, 因而在最大功率点附近会有小范围的振荡而导致功率损失, 并且跟踪步长的选择对响应速度和跟踪精度无法兼顾。此外, 当外界环境参数变化较快时, 如光照发生突变, 扰动观察法可能会发生电压崩溃。

为解决上述问题, 本文提出一种基于 S 函数的 inc 算法 (导纳增量法)。它是将 inc 算法程序写进 S 函数, 并采用新型变步长算法, 比传统的变步长算法在追踪速度和跟踪速度上有极大的优势, 并且新型算法的稳定步长较小, 系统的稳定性更好。

## 1 光伏电池工作特性

### 1.1 光伏电池电路模型

根据光伏电池的工作原理, 可将其工作状态等化为一个简单的电路模型。P-N 结是光伏电池工作的核心器件, 其不同的结构形式决定了不同的电路模型。本研究采用单二极管形式的电路模型, 即让正向二极管与恒流电源并联, 然后与负载混接, 实际等效电路如图 1 所示。图 1 中  $I_{mh}$  为光电流,  $I_{os}$  为暗饱和电流,  $I$  为光伏电池的输出电流,  $R_s$  为电源的串联电阻,  $R_h$  为电源的并联电阻,  $U$  为开路电压。

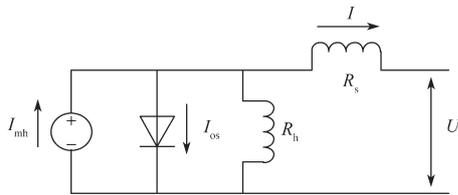


图 1 光伏电池电路模型

Fig. 1 Photovoltaic cell circuit model

### 1.2 光伏电池的数学模型

光伏电池的数学模型方程如下:

$$I = I_{mh} - I_{os} \left\{ \exp \left[ \frac{q}{AKT} (U + IR_s) - 1 \right] \right\} - \frac{U + IR_s}{R_h} \quad (1)$$

$$I_{mh} = [I_{sc} + K_1(T - 25)\lambda] / 1000; \quad (2)$$

$$I_{os} = I_{oh} \left[ \frac{T}{T_r} \right]^3 \exp \left[ \frac{qE_{on}}{BK} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3)$$

式 (1) ~ (3) 中:

$q$  为电子电荷量;

$A$ 、 $B$  为二极管排放系数;

$K$  为波尔兹曼常数;

$T$  为电池板温度;

$I_{sc}$  为电池短路电流;

$K_1$  为温度系数;

$\lambda$  为热吸收系数;

$I_{oh}$  为温度  $T_r$  下的暗饱和电流;

$T_r$  为绝对温度;

$E_{on}$  为硅的带宽长度。

理想情况下  $R_s$  远小于  $R_h$ , 在通常情况下二极管正向导通电阻远比  $R_s$  大, 故设定  $I_{sc} = I_{mh}$ , 则式 (1) 可以简化为

$$I = I_{sc} - I_{os} \left[ \exp \left( \frac{q}{AKT} U \right) - 1 \right] \quad (4)$$

由式 (4) 可得光伏电池的输出功率  $P$ , 为

$$P = I_{sc} U - I_{os} U \left[ \exp \left( \frac{q}{AKT} U \right) - 1 \right] \quad (5)$$

由式 (4) (5) 可以得知光伏电池的输出电压和输出电流的大小与光照强度和环境温度的关系。通过仿真可以直观地说明这一点, 搭建光伏电池的 Simulink 模型, 通过软件设置光照强度为  $1000 \text{ W/m}^2$ , 然后阶梯性地设置不同温度, 从仿真图中可以看出输出功率和温度的关系。同理, 设置相同温度, 让光照强度以阶梯型取值, 可以从仿真曲线中看出光照强度对功率输出大小的影响。但是功率输出大小绝非仅受光照强度 (insolation) 和温度 (temperature) 两种因素的影响, 如负载的变化也会明显影响功率的变化。因为负载决定了电池的工作点, 所以要实时调整负载大小以改变电池的工作点, 保证在任意的外界环境条件下仍然能使电池在最大功率点工作。图 2 是光伏电池模型的 Simulink 仿真图, 图中  $U_{pv}$  为光伏电压。

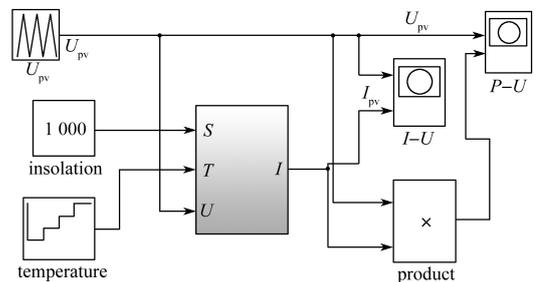


图 2 光伏电池模型的 Simulink 仿真图

Fig. 2 Simulink simulation diagram of photovoltaic cell model

将光照强度设定为  $1000 \text{ W/m}^2$ , 温度的大小设定从  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  开始, 依次增加  $20, 25, 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , 得到如图 3 所示的  $P-U$  曲线; 将温度设定为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , 然后设定光照强度的大小, 从  $400 \text{ W/m}^2$  开始阶梯型增加, 每次增加  $200 \text{ W/m}^2$ , 得到如图 4 所示的  $P-U$  曲线。

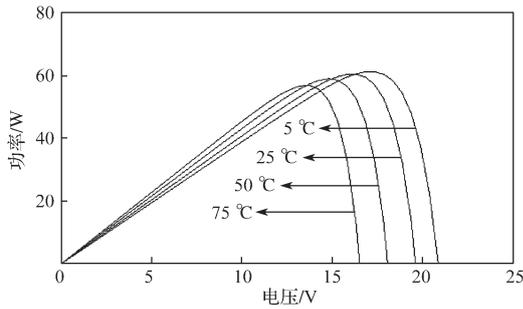


图3 1000 W/m<sup>2</sup>光照强度下不同温度条件的P-U曲线  
Fig. 3 P-U curves under different temperature conditions with a light intensity of 1000 W/m<sup>2</sup>

由图3可以得知,温度越低,达到最大功率时对应的输出电压越大,并且最大功率点工作时的功率越大。在达到最大功率点之后,功率开始下降,这时较低温度下尚没达到最大功率点的输出功率要高于较高温度下的输出功率。

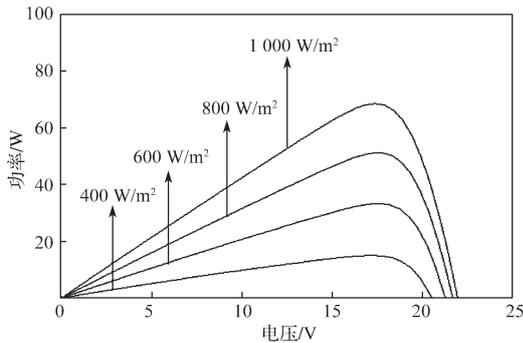


图4 25°C温度下不同光照强度的P-U曲线  
Fig. 4 P-U curves under different light intensities with a temperature of 25°C

如图4所示,在恒温条件下,光照强度对输出功率起着正向激励作用,并且从曲线的倾斜度可以看出,光照强度越大,输出电流越大。

通过算法控制MPPT模块的工作,已成为研究提高光伏电池工作效率的主要手段之一。下面介绍基于S函数的新型变步长inc算法在MPPT上的运用<sup>[3]</sup>。

## 2 基于S函数的新型inc算法

### 2.1 新型inc算法

传统电导增量追踪法通过改变Buck电路中的电阻,影响其输出有功功率,进而对最大功率点进行调节,并对光伏电池的输出功率进行周期性检测。其根据确定的跟踪方向,并以固定步长进行调节,从而改变输出电压的设定值,以达到准确跟踪的目的<sup>[4]</sup>。传统的电导增量追踪法在控制性能方面具有一定的优势,如稳态精度较高、动态响应速度较快等,仿真效果较为理想。但在实际应用中,因为算法本身

需要的计算量可能非常大,而庞大的计算量对传感器精确度和灵敏度有极高要求,硬件成本自然较高。当硬件条件无法满足电导增量追踪法的算法实现条件时,就会严重影响算法的运行速度。所以推出一种新型inc算法,该算法可以很好地解决这个问题,并且可以明显提高MPPT控制的整体性能。

在大多数情况下,变换器的迭代步长可根据实际情况调整。设 $D(m)$ 为占空比,step为步长, $k$ 为步长调节系数,则步长的变化量为

$$D(m) - D(m-1) = \pm k \left| \frac{dP}{dU} \right| \quad (6)$$

步长调节系数 $k$ 实质上决定了调节过程的幅度和速度,所以 $k$ 的选取非常重要。在步长取到极值时应满足:

$$D(m) - D(m-1) > k \left| \frac{dP}{dU} \right| \quad (7)$$

即可得到如下关系式:

$$k < \left[ D(m) - D(m-1) \right] / \left| \frac{dP}{dU} \right| \quad (8)$$

可通过上式确定步长调节系数 $k$ 的值,并且 $k$ 值越大,系统的动态响应速度越快;但是当 $k$ 的取值超过一定范围后,算法将以最大步长进行追踪。这是因为 $k$ 值过大,步长将不可控制,这也是为了保证系统的输出功率更加稳定<sup>[5-6]</sup>。图5所示是inc算法的具体流程图。

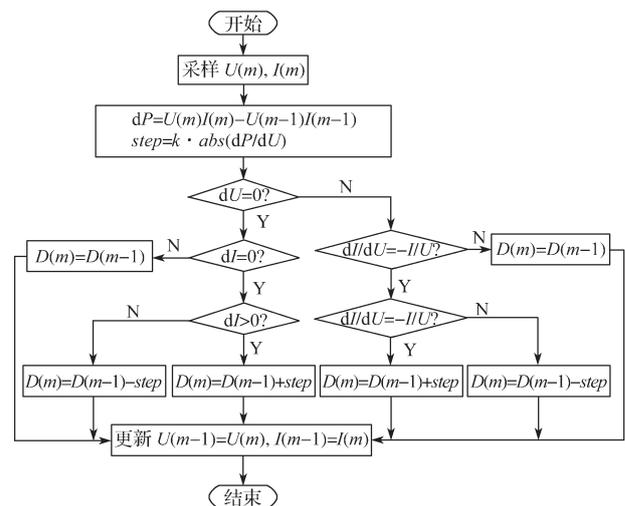


图5 inc算法流程

Fig. 5 Inc algorithm flow chart

### 2.2 基于S函数的算法仿真

S函数(system function)是当要实现模块的具体功能而Simulink模块中又没有现成模块时,用户根据需求自行定义的模块接口,可用C语言或者M语言对算法进行编程,然后将整个程序打包,得到的

算法可以和 Simulink 库模块等同调用<sup>[7]</sup>。在运用的时候应标明 S 函数里的各种状态量、连续变量、非连续变量的个数。S 函数在 Simulink 中被调用的时候, 各模块之间端口关系如图 6 所示。

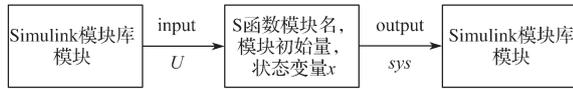


图 6 S-函数模块关联图

Fig. 6 S-function module association diagram

由于 S 函数具有用户可自行编程、封装打包后的模块可直接调用等优势, 在很多复杂算法的仿真上都可以通过 S 函数来解决仿真难的问题。在很多经典的 MPPT 控制算法中, 都可以将算法以 S 函数的形式去仿真以检验算法的合理性<sup>[8-10]</sup>。在此将已经编程好的新型 inc 算法程序写进 S 函数, 封装打包后将其嵌入光伏发电仿真模型中, 其结构如图 7 所示。

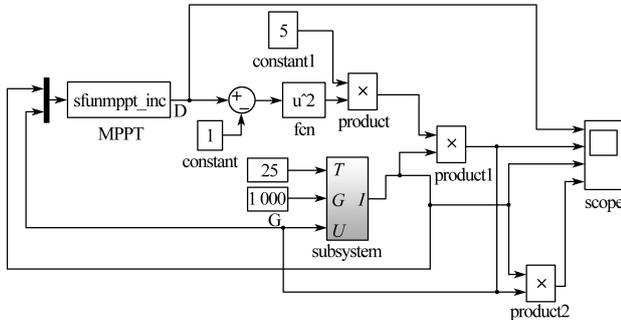


图 7 光伏发电仿真模型

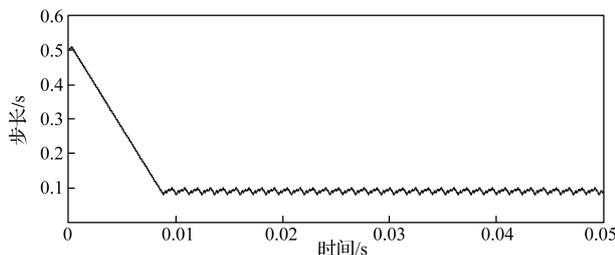
Fig. 7 Photovoltaic (pv) power generation simulation model

S 函数的使用步骤如下:

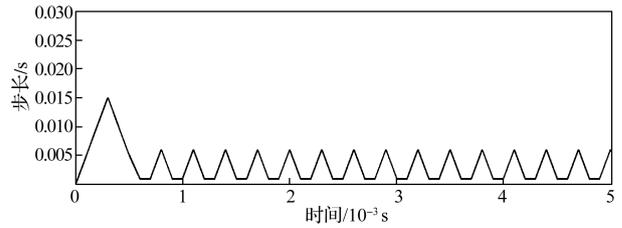
1) 在仿真开始之前对 S 函数 (sfunmppt\_inc) 进行初始化, 包括对 sys、初始状态变量  $x_0$ 、说明变量  $t$  的设置, 并将  $k$  初始值设为 0.005。

2) 因为 S 函数没有连续状态而只有非采样过零点, 因而对 Num Disc States 过零点进行采样, 并且计算 S 函数的输出和过零点部分。算法每完成一个周期, 需要根据算法中步长的判断条件, 对步长进行  $\pm k$  操作。

3) 根据逻辑功能连接各模块端口, 并对端口进行计算。所得各算法的步长调节和最大功率点追踪仿真结果如图 8 和 9 所示。



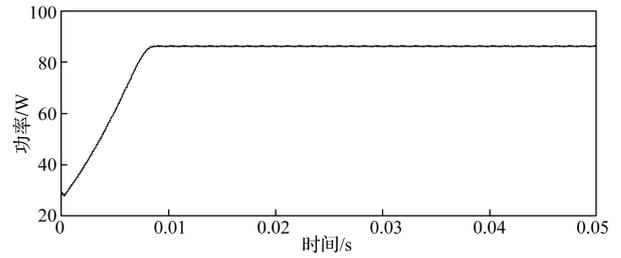
a) 传统算法



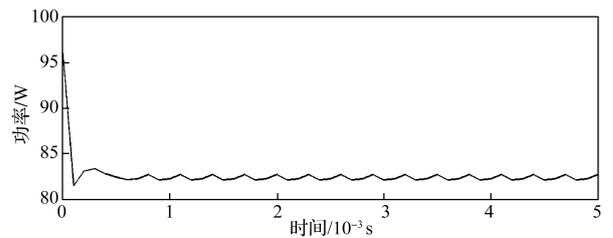
b) 新型算法

图 8 不同算法步长调节仿真结果

Fig. 8 Simulation results of step length adjustment under different algorithms



a) 传统算法



b) 新型算法

图 9 不同算法最大功率点追踪仿真结果

Fig. 9 Simulation results of maximum power point tracking under different algorithms

从图 8a 和 9a 中可以清晰地看到, 传统变步长算法, 步长从设定的最大步长 0.5 s 起步, 但是随着算法的调节作用, 步长逐渐变小, 光伏电池的输出功率急剧变化, 历时约为 0.01 s 时达到最大功率点处, 步长也稳定在 0.1 s 左右不停地微小振动, 而功率趋于平稳。

从图 8b 和 9b 可以看出, 新型变步长算法中, 步长从 0 s 起步, 先是在 0.000 3 s 时达到步长最大值, 然后在接近于 0.001 s 时达到步长稳定值 0.005 s, 此时输出功率也达到稳定状态。

对比两算法的仿真曲线可知, 整个调节过程中, 新型变步长算法比传统变步长算法在追踪速度上有极大优势, 并且新型算法的稳定步长较小, 表明系统的稳定性更好。

### 3 结论

变步长算法可在稳态精度和动态响应上实现较好的折中, 步长变化规则的选择是决定 MPPT 控制

算法是否先进、合理的关键,而S函数的使用,将Simulink库模块里实现不了的功能通过简单的算法编程予以实现。这种方法既简单又有效,并且相比传统算法,改进的算法在达到最大功率点后几乎立刻就稳定在最大功率点处工作,整个过程准确又迅速,且较小的稳定步长使得系统的稳定性更好。

#### 参考文献:

- [1] 王琪,杨立权,韩东全.我国太阳能光伏发电发展现状及前景[J].农业与技术,2015,35(23):168-170.  
WANG Qi, YANG Liqun, HAN Dongquan. Current Development Situation and Prospects of Solar Photovoltaic Power in China[J]. Agriculture and Technology, 2015, 35(23): 168-170.
- [2] 王玲,盛超,徐柏榆,等.光伏发电系统的运行特性及其等效描述[J].广东电力,2012,25(3):57-64.  
WANG Ling, SHENG Chao, XU Baiyu, et al. Operating Characteristics of Photovoltaic Power Generation System and Its Equivalent Description[J]. Guangdong Electric Power, 2012, 25(3): 57-64.
- [3] 明瑞,周少武.20 MW光伏发电系统与电气一次设计[J].湖南工业大学学报,2016,30(2):26-31.  
MING Rui, ZHOU Shaowu. Design of 20 MW Photovoltaic Power Generation System and Electric Primary System[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2016, 30(2): 26-31.
- [4] 雷敏,孔令倩,邓昭俊,等.基于双侧扰动变步长的光伏电池阵列MPPT[J].湖南工业大学学报,2015,29(2):44-49.  
LEI Min, KONG Lingqian, DENG Zhaojun, et al. MPPT of PV Battery Array Based on Bilateral Disturbance Variable Step Size[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(2): 44-49.
- [5] 赵争鸣,陈剑,孙晓璞.太阳能光伏发电最大功率点追踪技术[M].北京:电子工业出版社,2012:12-26.  
ZHAO Zhengming, CHEN Jian, SUN Xiaoying. Maximum Power Point Tracking Technology for Photovoltaic Power Generation[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012: 12-26.
- [6] 刘泓锴.基于增量电导法的光伏MPPT控制[J].通信电源技术,2016,33(2):72-75.  
LIU Hongkai. Photovoltaic MPPT Control Based on Incremental Conductance Method[J]. Telecom Power Technology, 2016, 33(2): 72-75.
- [7] 赵靖.基于变步长增量电导法的光伏发电系统MPPT控制[D].重庆:重庆大学,2014.  
ZHAO Jing. MPPT of PV Generation System Based on Variable Step-Size INC Method[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [8] 李月芳,周皓.一种基于全局最优MPPT算法的研究[J].电气传动,2015,45(12):31-34.  
LI Yuefang, ZHOU Hao. Research on a New Algorithm Based on Global Optimal MPPT[J]. Electric Drive, 2015, 45(12): 31-34.
- [9] 邓栋,易灵芝,李明,等.基于S-函数光伏阵列最大功率追踪的控制策略[J].湖南工业大学学报,2009,23(5):52-54.  
DENG Dong, YI Lingzhi, LI Ming, et al. A Control Method of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Based on S-function[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2009, 23(5): 52-54.
- [10] 王沫然.MATLAB与科学计算[M].3版.北京:电子工业出版社,2012:38-42.  
WANG Moran. MATLAB and Scientific Computing[M]. 3rd ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2012: 38-42.

(责任编辑:廖友媛)