

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2020.02.008

# 基于电导增量法的改进型 MPPT 控制策略

李圣清, 李富军, 陈文, 张东辉

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 光伏电池的输出特性受外界光强和温度的影响, 利用最大功率点跟踪技术可有效提高光伏发电系统的效率。针对传统电导增量法跟踪速度慢及精度不佳的问题, 提出了一种改进的最大功率点跟踪控制策略。该方法对传统电导增量法的步长进行了改进, 并采用恒定电压启动以减小追踪时间, 同时引入粒子群算法以减小稳态时的振荡。最后, 分别以光照强度和温度的改变为例, 进行了传统方法和所提方法的仿真对比, 结果证明所提方法在温度一定, 光强改变时追踪速度提高了 33%, 追踪精度随着光强增大而增大。

**关键词:** 最大功率点跟踪; 恒定电压法; 电导增量法; 粒子群算法

**中图分类号:** TM615

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2020)02-0043-06

**引文格式:** 李圣清, 李富军, 陈文, 等. 基于电导增量法的改进型 MPPT 控制策略[J]. 湖南工业大学学报, 2020, 34(2): 43-48.

## Improved MPPT Control Strategy Based on Incremental Conductance Method

LI Shengqing, LI Fujun, CHEN Wen, ZHANG Donghui

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

**Abstract:** Based on the fact that the output characteristics of photovoltaic cells can be affected by the external light intensity and temperature, an effective improvement of the efficiency of photovoltaic power generation system can be achieved by adopting the maximum power point tracking technology. In view of the slow tracking speed and poor accuracy pertaining to the traditional incremental conductance method, an improved maximum power point tracking control strategy has thus been proposed to overcome the flaws. Finally, taking the change of light intensity and temperature as an example, a simulation comparison has been made between the incremental conductance method and the proposed method. The results show that the tracking speed of the proposed method increases by 33% at a constant temperature, with the tracking accuracy increasing positively with the light intensity.

**Keywords:** maximum power point tracking; constant voltage method; incremental conductance; particle swarm optimization

## 1 研究背景

随着全球化石能源的不断减少, 全球能源危机越来越严重, 太阳能因为其清洁无污染, 分布广泛且取

之不尽、用之不竭的特点, 成为能源系统的一个重要补充部分<sup>[1]</sup>。作为光伏发电系统的基础, 光伏电池非常重要。然而, 目前的光伏电池不仅造价昂贵, 而且输出特性受环境影响较大, 为了尽量减少能源损耗,

收稿日期: 2019-06-27

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ4024), 电机及电机系统的高效节能技术国家重点研发计划基金资助项目(2018YFB0606000)

作者简介: 李圣清(1961-), 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事配电网电能质量控制, 电力电子系统控制, 新能源分布式发电及微电网控制技术方面的教学与研究, E-mail: 962787667@qq.com

节约成本,提高光伏电池的利用率至关重要<sup>[2]</sup>。目前常用的提高光伏电池利用率的方法,有利用最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)算法、提高光伏材料效率、优化光伏阵列结构及位置等。利用MPPT算法是最经济的方式,为了使能源利用率最高,MPPT算法已经成为光伏发电系统不可或缺的一部分<sup>[3]</sup>。

文献[4]采用恒定电压法进行MPPT,其优点在于追踪速度较快,控制成本较低,算法结构较简单且易于实现,追踪到MPP(maximum power point)后没有振荡,稳态曲线平稳。其缺点是跟踪的MPP值较小,误差较大,控制精度较差。文献[5]给出一种光伏MPPT变加速扰动观察法,此方法为自寻优过程,算法简单易行。然而在实际应用中若步长选取不当会在MPP处产生振荡,且若外界光强变化较大时,可能会导致误判。文献[6]给出了一种变步长电导增量法(incremental conductance, INC),其在MPP附近收敛效果较好,但步长不固定且步长始终不为零,在寻优的过程中可能会导致振荡,且跟踪时间较长,效率较低。文献[7-8]提出的粒子群(particle swarm optimization, PSO)算法,在MPP附近能够稳定收敛,稳态精度较好,但是需要多次迭代,跟踪时间较长,性能不佳。

传统INC算法为定步长,跟踪速度和稳态精度间存在矛盾。基于此,为了既提高跟踪速度,又提高稳态精度,本文提出了一种改进型的INC算法,并引入了PSO算法以减小振荡,同时为了减小MPP的追踪时间,采用恒定电压启动的方法跳过非MPP区间,该方法可以有效地提高收敛时间,减小MPP附近的振荡。

## 2 光伏电池的数学模型及特性

### 2.1 光伏电池等效电路

光伏电池的等效电路模型如图1所示。

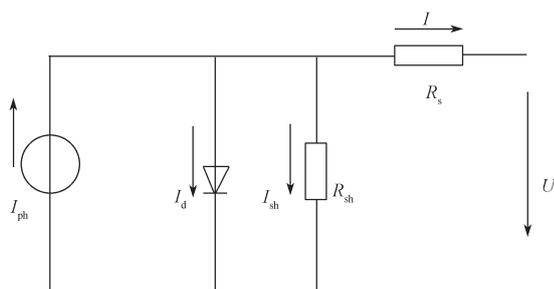


图1 光伏电池等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of photovoltaic battery

从图1获得的光伏电池输出特性如下<sup>[9]</sup>:

$$\begin{cases} I = I_{ph} - I_d - I_{sh}, \\ I_d = I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(U + IR_s)}{AkT}\right) - 1 \right], \\ I_{sh} = \frac{U + IR_s}{R_{sh}}. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U$  为光伏电池输出电压;  $I$  为光伏电池输出电流;  $I_{ph}$  为光生电流;  $I_d$  为二极管反向饱和电流;  $I_{sh}$  为流过并联电阻  $R_{sh}$  的电流;  $I_0$  为反向饱和电流;  $q$  为电子电荷;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为光伏电池工作绝对温度值;  $A$  为二极管理想因子;  $R_s$  为串联电阻;  $R_{sh}$  为并联电阻。

### 2.2 光伏电池建模与输出特性

当外界光强和温度变化时,式(1)中的参数会发生改变,增加了光伏电池建模的难度,降低了仿真速度。文献[9]提出了一种工程数学模型,该模型仅需要给定短路电流  $I_{sc}$ , 开路电压  $U_{oc}$  以及MPP处的电压  $U_m$ , 电流  $I_m$ , 这时的  $U-I$  方程如下<sup>[10]</sup>:

$$\begin{cases} I = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[ \exp\left(\frac{U}{C_2 U_{oc}}\right) - 1 \right] \right\}, \\ C_1 = \left( 1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \exp\left(-\frac{U_m}{C_2 U_{oc}}\right), \\ C_2 = \left( \frac{U_m}{U_{oc}} - 1 \right) \left[ \ln\left( 1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right]^{-1}. \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中的参数分别为厂家所提供的4个参数,需要注意的是  $U_m$ 、 $I_m$  都是在标准温度(25℃)、标准光照(1000 W/m<sup>2</sup>)下的数据,同时考虑到光强和温度的影响,引入了新的计算式(3),以得到不同条件下的对应参数,计算式如下<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} I'_{sc} = I_{sc} (1 + a\Delta t) \frac{S}{S_{ref}}, \\ I'_m = I_m (1 + a\Delta t) \frac{S}{S_{ref}}, \\ U'_{oc} = U_{oc} (1 - c\Delta t)(1 + b\Delta S), \\ U'_m = U_m (1 - c\Delta t)(1 + b\Delta S). \end{cases} \quad (3)$$

当外部光强和温度发生变化时,  $I_{sc}$ 、 $I_m$ 、 $U_{oc}$ 、 $U_m$  等参数自动改变,从而提高了仿真的真实性和可靠性。式(3)中  $a=0.0025$  °C,  $b=0.5$  W/m<sup>2</sup>,  $c=0.00288$  °C,  $\Delta t$  为实际环境温度与25℃的比值,  $\Delta S$  为实际光强与1000 W/m<sup>2</sup>的比值再减去1。

当环境温度设定为25℃,光照强度分别为1000, 800, 600, 400 W/m<sup>2</sup>时,输出  $I-U$ 、 $P-U$  特性曲线如图2所示。

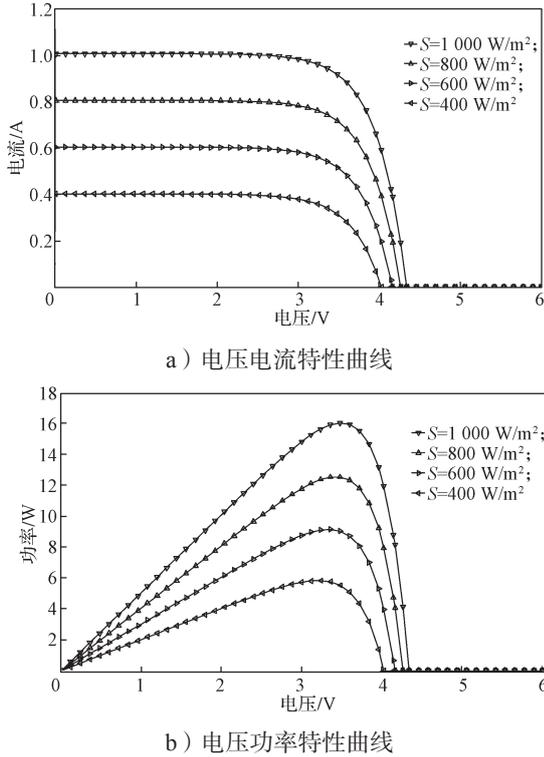


图2 恒温时不同光强下的输出特性曲线

Fig. 2 Output characteristics curves of PV cell under different light intensity at a constant temperature

由图2可以看出, 每条特性曲线的峰值均只有一个, 且在不同光强下峰值的幅值相差较大, 该峰值即为MPP, 但对应的MPP电压相近, 这也是本文可以利用恒定电压启动的原因。

### 3 改进的MPPT策略

#### 3.1 最大功率点跟踪原理

图3所示为在25℃、1000 W/m<sup>2</sup>条件下的光伏电池P-U特性曲线。图中, M点是曲线的峰值, 即MPP, 记该处的电流为I<sub>m</sub>、电压为U<sub>m</sub>。

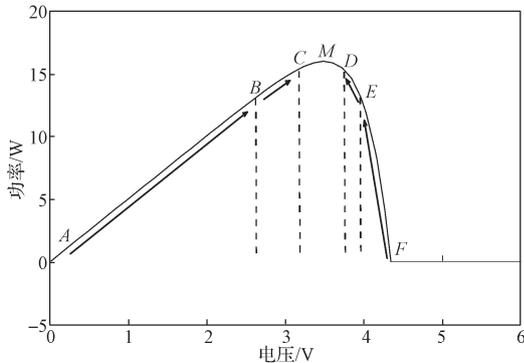


图3 光伏电池P-U特性曲线

Fig. 3 P-U characteristic curve of photovoltaic battery

由图2b中的曲线可以得知, 当光强改变时, 峰值电压的变化很小, 基本上在0.8倍的U<sub>oc</sub>处, 基于此,

分析图3A-B段和E-F段。这两段距离U<sub>m</sub>处较远, 功率随电压的变化较大, 为非最大功率点区间, 可以使用恒定电压法跳过, 以提高追踪速度。B-C段和D-E段为可疑最大功率点区间, 为了进一步提高追踪速度和追踪精确度, 采用电导增量法进行此部分的MPP追踪。在C-D段, 此时电压范围更小, 传统的INC算法易在此段产生振荡, 降低最大功率点的精确度, 在此段使用粒子群算法, 可加速收敛, 减小系统振荡, 使追踪更加准确。

#### 3.2 电导增量法的改进

目前, 最广泛使用的MPPT算法是INC算法。

该算法的基本原理是通过判断 $\frac{dP}{dU}$ 的正负来确定扰动步长的变化<sup>[12]</sup>。输出功率 $P=UI$ , 在最大功率点处应有 $\frac{dP}{dU}=0$ , 即 $\frac{dP}{dU}=I+U\left(\frac{dI}{dU}\right)=0$ 。当 $\frac{dP}{dU}>0$ 时,  $U<U_m$ , 应增大输出电压; 当 $\frac{dP}{dU}<0$ 时,  $U>U_m$ , 则应减小输出电压。

本研究在B-C和D-E段使用INC算法追踪MPP,

因充分考虑到B-C和D-E段 $\frac{dP}{dU}$ 的差异, 传统INC算法的固定步长被改进为可变步长。将INC算法的使用根据dU的不同分为以下几种情况:

1)  $dU=0$ 且 $dI=0$ 。此时即有 $\frac{dP}{dU}=0$ , 故在最大功率点处。

2)  $dU=0$ 但 $dI \neq 0$ 。若 $dU=0$ , 此时有 $U_k=U_m$ , 只需改变电流值使 $I_k=I_m$ , 引入步长缩放因子 $\alpha$ , 此时扰动步长为 $\alpha dI$ , 即:

$$I(k+1)=I(k)+\alpha dI. \quad (4)$$

3)  $dU \neq 0$ 。对于图3B-C段, 此时有 $\frac{dP}{dU}>0$ ,

且dI变化较小, 可以近似为零, 则有

$$\frac{dP}{dU}=I+U\frac{dI}{dU}=I. \quad (5)$$

此时, 该段 $\frac{dP}{dU}$ 值较小, 为加快其收敛速度, 引入步长缩放因子 $\beta$ , 则有扰动步长 $\beta \frac{dP}{dU}$ , 即

$$U(k+1)=U(k)+\beta \frac{dP}{dU}=U(k)+\beta I. \quad (6)$$

故只需判断电流I和设定 $\varepsilon$ 值就可以确定是否进入了C-D段。

对于图3D-E段, 此时 $\frac{dP}{dU}<0$ , 引入步长缩放因

子  $\gamma$ ，且  $\gamma$  值小于  $\beta$ ，则有扰动步长为  $\gamma \frac{dP}{dU}$ ，即

$$U(k+1) = U(k) - \gamma \left| \frac{dP}{dU} \right| \quad (7)$$

将  $\gamma$  和设定的  $\varepsilon$  值相比较，直至小于  $\varepsilon$  时，进入 C-D 段。

### 3.3 粒子群算法

本文 C-D 段采用 PSO 算法，该算法是由 Kennedy 和 Eberhart 博士观察鸟类迁徙觅食提出的，其基本思想是通过群体信息共享与协作找到最优解<sup>[13-15]</sup>。PSO 算法的更新迭代规则如下：

$$\begin{cases} v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1r_1(P_{besti} - x_i^k) + c_2r_2(G_{best} - x_i^k); \\ x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1}; \\ P_{besti} = \begin{cases} x_i, & f(x_i) \geq f(P_{besti}); \\ P_{besti}, & f(x_i) < f(P_{besti}); \end{cases} \\ G_{best} = \max \{f(P_{best1}), f(P_{best2}), \dots, f(P_{bestN_p})\} \end{cases} \quad (8)$$

式中： $v_i$  是对应电压变化量  $\Delta U$  的粒子速度； $x_i$  是对应电压  $U$  的粒子位置； $f(x_i)$  是对应功率  $P$  的目标函数； $P_{besti}$  是粒子的自身最优位置； $G_{best}$  是整个群体的最优位置，即  $U_m$ ； $w$  是粒子惯性权重系数； $r_1$ 、 $r_2$  是 (0, 1) 间的随机数； $c_1$ 、 $c_2$  是学习因子； $k$  为迭代次数； $N_p$  为粒子总数。

具体的算法流程如下：

1) 在 C-D 段初始化一群粒子，包括随机位置  $U$  和速度  $\Delta U$ ，初始  $P_{besti} = G_{best} = 0.8U_{oc}$ ，计算每个粒子的适应值  $P$ ；

2) 对每个微粒，将其适应值与其经过的最好位置  $P_{besti}$  进行比较，如果较好，则将其作为当前的最好位置  $P_{besti}$ ；

3) 将每个粒子的  $P_{besti}$  与  $G_{best}$  作比较，如果较好，则将其作为当前的最好位置  $G_{best}$ ；

4) 根据公式 (8) 调整粒子速度和位置，继续整个过程，直到达到结束条件。

### 3.4 算法流程图

改进的 MPPT 控制策略流程如图 4 所示。

执行算法流程时，若采样电压在  $0.7U_{oc} \sim 0.9U_{oc}$  之间，则使用改进的 INC 算法追踪 MPP；否则，先使用恒定电压法调整电压到该范围内，再使用改进的 INC 算法。在利用改进的 INC 算法追踪 MPP 的过程中，若  $\left| \frac{dP}{dU} \right| < \varepsilon$  或者  $I < \varepsilon$ ，此时在最大功率点附近，

则下一步使用 PSO 算法以提高系统稳定度，否则仍使用改进的 INC 算法。在 PSO 算法中，根据设定的

初始条件，计算采样功率并且将其作为种群个体的适应度，通过比较该值的大小，并根据等式 (8) 进行调整以找到最大功率点，当迭代次数达到结束条件时，结束控制过程。

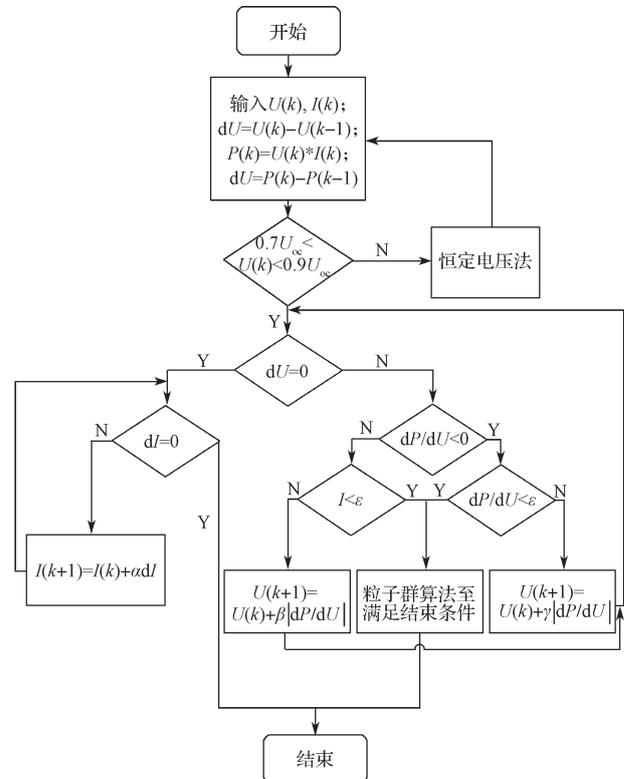


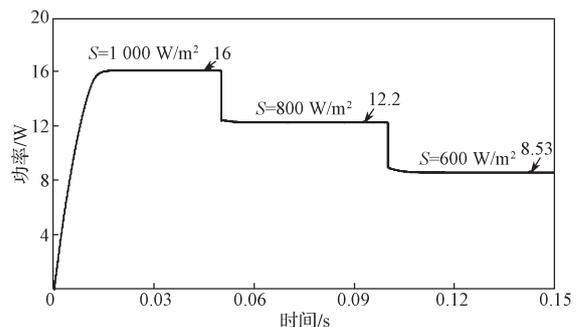
图 4 基于 INC 的改进型 MPPT 流程图

Fig. 4 An improved MPPT flowchart based on incremental conductance method

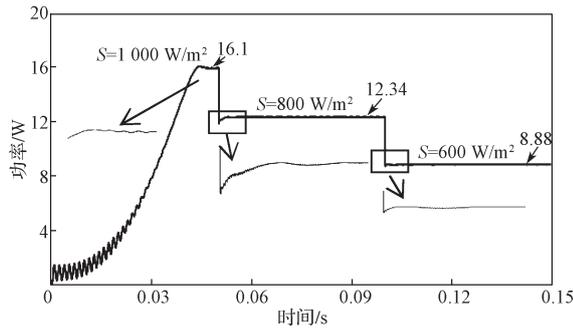
## 4 仿真

在 Matlab 中建立仿真模型，并在 Simulink 中构建 MPPT 模块。光伏电池模型设定为 25℃、1 000 W/m<sup>2</sup> 下的  $U_{oc}$  为 21.7 V， $I_{sc}$  为 1.01 A， $U_m$  为 17.6 V， $I_m$  为 0.91 A。

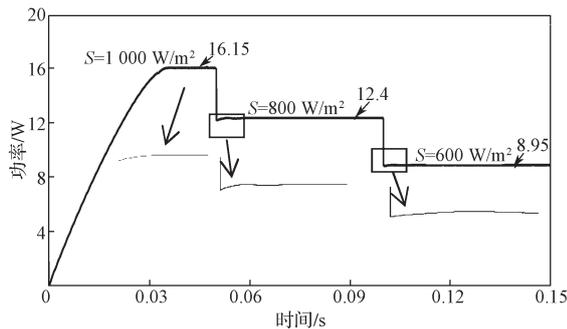
图 5 所示为保持温度为 25℃，而光照强度分别为 1 000, 800, 600 W/m<sup>2</sup> 时，几种不同的 MPPT 方法输出的功率仿真结果。



a) 恒定电压法 MPPT



b) 电导增量法 MPPT



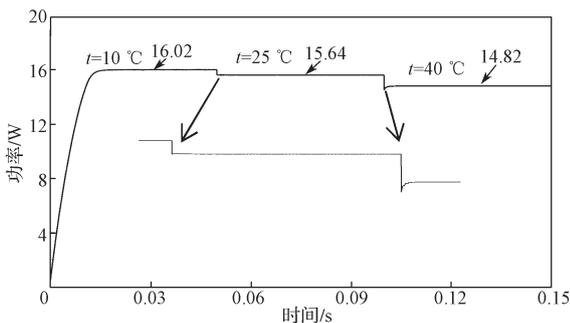
c) 基于改进电导增量法的 MPPT

图5 不同光照强度下 MPPT 仿真输出功率

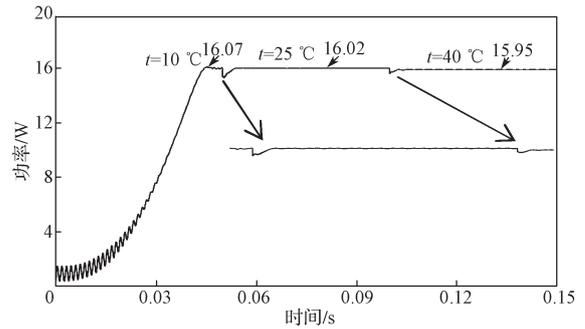
Fig. 5 Output powers under different light intensities

本研究中所提方法与恒定电压法比较可以得出, 在标准工作条件下, 恒定电压法的稳态值是 16 W, 本文方法是 16.15 W, 约提高了 1%; 且光照强度变化越大, 稳态差值越明显, 当光照强度为 600 W/m<sup>2</sup> 时, 其差值达到了 4%。且光照强度变化时本文方法仅需要 0.001 s 即重新回到稳态, 而恒定电压法需要 0.005 s 才重新回到稳态, 恢复能力提高了 80%。INC 算法需要 0.045 s 才达稳态, 本文方法仅需要 0.03 s, 追踪时间提高了 33%。加之各种光照强度条件下, 由于 INC 算法有震荡, 而本文所提方法的稳态值较高。

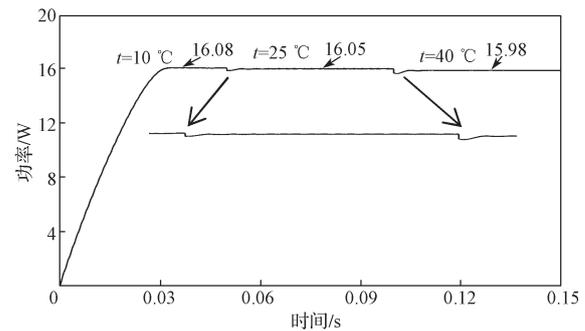
当保持光照强度为标准光照强度不变, 而温度由 10 °C 升至 25 °C 再升至 40 °C 时, MPPT 输出仿真结果如图 6 所示。



a) 恒定电压法 MPPT



b) 电导增量法 MPPT



c) 文中所提方法 MPPT

图6 不同温度下的 MPPT 仿真输出功率

Fig. 6 Output powers under different temperatures

从图 6 中可以看出, 温度变化时, 恒定电压法稳态值变化较大, 温度为 40 °C 时, 本文所提方法的追踪功率值提高了 9%, 且有随着温度增大而增大的趋势。与 INC 算法相比, 本文所提方法, 在保持温度变化时超调量以及恢复时间的前提下, 将初次追踪到 MPP 的时间提高了 33%。

## 5 结论

化石能源有限, 能源危机日趋严重。太阳能清洁无污染, 是能源系统的重要补充。目前太阳能利用率较低, 而光伏电池造价昂贵, 利用 MPPT 算法提高其利用率迫在眉睫。在分析各种 MPPT 算法优缺点的基础上, 针对传统 INC 算法对于 MPP 追踪速度和稳态精度两者间存在矛盾的情况, 提出一种基于电导增量法的改进型 MPPT 策略, 通过理论分析与建模仿真, 得到以下结论:

- 1) 提高系统稳态精度, 加快其跟踪速度, 可解决追踪速度与稳态精度间的矛盾。
- 2) 跟踪速度变快, 会导致振荡减少, 可提高系统的稳态性能。
- 3) 外界温度、光强变化时, 所提策略的适应能力较好, 可以快速准确地追踪到 MPP。

需要指出的是, 本文所提方法是针对单个光伏电池提出来的。在此基础上, 后续的研究将继续对

MPPT 算法进行改进,使其可以被应用于大型光伏发电系统的光伏阵列以及局部阴影、光照不均匀等各种复杂情况。

#### 参考文献:

- [1] 陈亚爱,周京华,李津,等.梯度式变步长 MPPT 算法在光伏系统中的应用[J].中国电机工程学报,2014,34(19):3156-3161.  
CHEN Ya'ai, ZHOU Jinghua, LI Jin, et al. Application of Gradient Variable Step Size MPPT Algorithm in Photovoltaic System[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3156-3161.
- [2] 高长伟,刘晓明,陈海,等.光伏市电互补系统建模及其运行特性[J].电工技术学报,2017,32(5):200-207.  
GAO Changwei, LIU Xiaoming, CHEN Hai, et al. Modelling and Operation Characteristics of Photovoltaic-Grid Complementary System[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(5): 200-207.
- [3] PANDEY A, DASGUPTA N, MUKERJEE A K. Design Issues in Implementing MPPT for Improved Tracking and Dynamic Performance[C]//Processing of IEEE IECON. Paris: IEEE, 2006: 4387-4391.
- [4] 朱健.一种改进的基于恒定电压法的光伏电池最大功率点跟踪方法[J].电子技术与软件工程,2016(3):248-249.  
ZHU Jian. An Improved PV Cell Maximum Power Point Tracking Method Based on Constant Voltage Method[J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2016(3): 248-249.
- [5] 李圣清,吴文凤,张煜文,等.基于GA的光伏MPPT变加速扰动法的研究[J].电测与仪表,2018,55(8):7-11.  
LI Shengqing, WU Wenfeng, ZHANG Yuwen, et al. Research on Variable Acceleration Disturbance Method of PV MPPT Based on GA[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(8): 7-11.
- [6] 高嵩,罗浩,何宁,等.基于MPPT的新型变步长增量电导法的研究[J].电气传动,2015,45(2):16-19,49.  
GAO Song, LUO Hao, HE Ning, et al. Research on a New Method for Variable Step Size INC Based on Maximum Power Point Tracking[J]. Electric Drive, 2015, 45(2): 16-19, 49.
- [7] 李善寿,张兴,张鸿恺,等.基于功率闭环控制与PSO算法的全局MPPT方法[J].中国电机工程学报,2014,34(28):4809-4816.  
LI Shanshou, ZHANG Xing, ZHANG Hongkai, et al. Global MPPT Method Based on Power Closed-Loop Control and PSO Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4809-4816.
- [8] MEI Qiang, SHAN Mingwei, LIU Liying, et al. A Novel Improved Variable Step-Size Incremental-Resistance MPPT Method for PV Systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(6): 2427-2434.
- [9] 荣德生,刘凤.改进型扰动观察法在光伏MPPT中的研究[J].电力系统及其自动化学报,2017,29(3):104-109.  
RONG Desheng, LIU Feng. Application of Improved Perturbation and Observation Method to Photovoltaic MPPT[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(3): 104-109.
- [10] 周东宝,陈渊睿.基于改进型变步长电导增量法的最大功率点跟踪策略[J].电网技术,2015,39(6):1491-1498.  
ZHOU Dongbao, CHEN Yuanrui. Maximum Power Point Tracking Strategy Based on Modified Variable Step-Size Incremental Conductance Method[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1491-1498.
- [11] 刘明亮,张逸,范元亮,等.一种基于变步长电导增量法的自适应MPPT控制策略[J].可再生能源,2017,35(5):681-688.  
LIU Mingliang, ZHANG Yi, FAN Yuanliang, et al. An Type of MPPT Control Strategy Based on Variable Step-Size Incremental Conductance Algorithm[J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(5): 681-688.
- [12] 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.
- [13] 韩鹏,李银红,何璇,等.结合量子粒子群算法的光伏多峰最大功率点跟踪改进方法[J].电力系统自动化,2016,40(23):101-108.  
HAN Peng, LI Yinhong, HE Xuan, et al. Improved Maximum Power Point Tracking Method for Photovoltaic Multi-Peak Based on Quantum-Behaved Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 101-108.
- [14] 祝青,张兴,李善寿,等.一种基于功率闭环的动态多峰值最大功率点跟踪算法研究与测试[J].中国电机工程学报,2016,36(5):1218-1227.  
ZHU Qing, ZHANG Xing, LI Shanshou, et al. Researches and Tests of a Dynamic Multi-Peak Maximum Power Point Tracking Algorithm Based on Power Loop[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1218-1227.
- [15] MEI Q, SHAN M W, LIU L Y, et al. A Novel Improved Variable Step-Size Incremental-Resistance MPPT Method for PV Systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(6): 2427-2434.

(责任编辑:廖友媛)