

# 基于功率占空比微分曲线的光伏系统 MPPT 算法

彭会锋, 孙建平, 曹相春, 刘晓龙

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 提出一种基于功率占空比微分特性曲线的改进分段变步长最大功率点追踪(MPPT)算法。该算法利用微分曲线极值点实现追踪区域自动划分;运行点远离最大功率点(MPP)时采用较大固定步长追踪,在 MPP 附近时采用自适应变步长追踪。MATLAB 仿真结果表明,改进算法准确实现追踪区域自动划分,同时具有较好的动态响应特性和稳定性。

**关键词:** 光伏系统; 最大功率点追踪; 分段变步长; 功率占空比; 仿真

**中图分类号:** TM 615

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.06.023

## 0 引言

光伏系统的输出功率受光照强度、温度等的影响,在不同的外界条件下,光伏系统可工作在不同且唯一的最大功率点(MPP)处。为了有效提高光伏系统的工作效率,就必须实时监测光伏系统的输出状态,采用预定的控制算法,调节输出阻抗和光伏系统实现阻抗匹配,以使其保持最大功率输出,这一过程称之为最大功率点追踪 MPPT(Maximum Power Point Tracking)。

常规 MPPT 算法采用固定步长跟踪,调整步长要求严格,动态响应特性和稳态特性不能同时得到满足<sup>[1-3]</sup>。文献[4-5]采用自适应变步长算法对跟踪步长进行动态调整,同时满足了两者的要求,文献[4]基于功率电压( $P-U$ )微分曲线控制,算法具有较好的动态响应特性和稳态特性,但是  $P-U$  微分曲线右端呈现较快的上升趋势,外界环境剧烈变化时对算法的稳定性有较大影响;文献[5]基于功率占空比( $P-D$ )微分曲线控制, $P-D$  微分曲线较为平滑,因此算法稳定性较好,满足外界环境剧烈变化要求,但是  $P-D$  微分曲线值有波动,算法的动态响应特性受到影响;文献[6]引入分区控制策略,算法基于  $P-D$  微分曲线控制,系统远离 MPP 区域采用较大固定步长跟踪, MPP 附近区域采用自适应变步长跟踪,追踪速度相比传统自适应变步长算法提升明显,但是当外界环境剧烈变化时,分区方案不能准确划分跟踪区域,算法实际控制性能受到影响。

通过对自适应变步长算法和分区控制策略分析,结合 2 种控制方案,提出了基于  $P-D$  微分曲线的改进分段变步长 MPPT 算法。算法基于  $P-D$  微分曲线控制;利用  $P-D$  微分曲线极值点实现追踪区域自动划分;远离 MPP 区域时采用较大固定步长追踪, MPP 附近区域则采用自适应变步长追踪。采用

MATLAB/Simulink 模块构建光伏 MPPT 系统模型进行仿真验证,仿真结果表明:和已有控制算法相比,改进算法能够准确实现对追踪区域的自动划分,满足环境剧烈变化要求;同时追踪速度快、不易产生功率振荡,具有较好的动态响应特性和稳态特性。

## 1 光伏系统输出特性

考虑光伏电池内部串联电阻和并联电阻影响,单个光伏电池等效电路模型如图 1 所示。

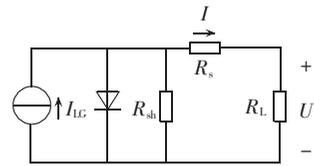


图 1 单个光伏电池等效电路模型  
Fig.1 Equivalent circuit model of single PV cell

光伏电池的输出特性易受外界环境如温度、光照强度等的影响,呈现典型的非线性特征,其  $I-U$  输出特性满足如下方程<sup>[1]</sup>:

$$I = I_{LG} - I_{os} \left\{ \exp \left[ \frac{q}{A_s k_s T_s} (U + IR_s) \right] - 1 \right\} - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

其中,  $I_{LG}$  为光生电流;  $I_{os}$  为反向饱和漏电流;  $q$  为电子电荷量,取值  $1.6 \times 10^{-19}$  eV;  $k_s$  为玻尔兹曼常数,取值  $1.38 \times 10^{-23}$ ;  $T_s$  为系统工作温度;  $A_s$  为二极管理想品质因数;  $R_s$  为串联内部电阻;  $R_{sh}$  为并联内部电阻。

## 2 MPPT 算法分析

自适应变步长 MPPT 算法控制原理如下:当系统工作点远离 MPP 区域时,采用较大跟踪步长以获得较快的动态响应特性;当系统工作点逼近 MPP 区域时,逐步减小跟踪步长以获得较好的稳态特性<sup>[7]</sup>。根据以上控制原理,文献[4-5]分别提出了基于  $P-U$  和  $P-D$  微分曲线的自适应变步长 MPPT 算法。

文献[4]算法基于  $P-U$  微分特性曲线控制,跟踪步长采用如下公式确定:

$$D(k+1)=D(k)+N\frac{|P(k)-P(k-1)|}{|U(k)-U(k-1)|} \quad (2)$$

其中,  $N$  为缩放因子 ( $0 < N < 1$ ), 用于对  $|\Delta P/\Delta U| = |P(k)-P(k-1)|/|U(k)-U(k-1)|$  值进行缩放以确定跟踪步长。

由图 2 可知,  $P-U$  微分曲线右端区域呈现很快的上升趋势, 微分曲线具有较快的增长速度, 当外界环境剧烈变化时, 微小的电压变化会使  $|dP/dU|$  值波动较大, 引起跟踪步长不恰当的大范围变化, 导致系统跟踪失调, 算法稳定性降低。

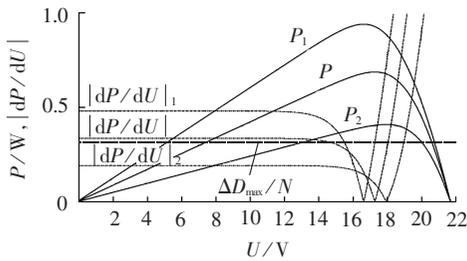


图 2 不同光照强度下光伏系统  $P-U$  与  $|dP/dU|-U$  特性曲线

Fig.2  $P-U$  and  $|dP/dU|-U$  characteristic curves of PV system for different irradiation conditions

文献[5]算法基于  $P-D$  微分特性曲线控制, 跟踪步长采用如下公式确定:

$$D(k+1)=D(k)+N\frac{|P(k)-P(k-1)|}{|D(k)-D(k-1)|} \quad (3)$$

其中,  $N$  为缩放因子 ( $0 < N < 1$ )。

由图 3 可知,  $P-D$  微分曲线两端区域都收敛, 当外界环境剧烈变化时, 跟踪步长只在一定范围内变化, 避免跟踪失稳问题, 提高了算法的稳定性, 但是  $P-D$  微分曲线不是非常平滑, 当系统工作点远离 MPP 区域时, 由式(3)可知, 跟踪步长随着  $P-D$  微分曲线会经历由小到大的调整过程, 影响系统跟踪速度<sup>[8-9]</sup>。

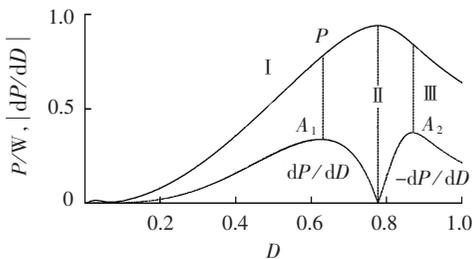


图 3 光伏系统  $P-D$  与  $|dP/dD|-D$  特性曲线

Fig.3  $P-D$  and  $|dP/dD|-D$  characteristic curves of PV system

文献[6]引入了分区控制策略, 算法基于  $P-U$  微分特性曲线控制, 根据式(4)自动划分跟踪区域:

$$|\Delta P/\Delta U| < \Delta D_{\max}/N \quad (4)$$

其中,  $\Delta D_{\max}$  为固定步长跟踪时的调整步长,  $N$  为缩放因子。

如图 2 中  $P-U$  微分特性曲线所示, 当式(4)不

成立时, 系统工作点远离 MPP 区域, 系统长时间采用较大固定步长  $\Delta D_{\max}$  进行跟踪, 而文献[5]中跟踪步长需要经历由小到大的调整过程, 因此分区控制策略可以加快系统逼近 MPP 区域; 当式(4)成立时, 系统工作点位于 MPP 区域, 采用较小自适应步长进行跟踪, 逐步逼近最大功率点, 避免 MPP 的功率振荡问题; 通过引入分区控制策略, 跟踪速度提升效果明显, 提高了算法的动态响应特性。

当外界环境剧烈变化时, 根据式(4)确定的分区方案存在不能准确划分跟踪区域的问题, 算法实际控制性能受到影响。如图 2 所示,  $P_1, P_2$  为光照强度差异较大情况下的  $P-U$  特性曲线,  $P_1 \gg P_2$ ; 由图可知缩放因子  $N$  无法同时满足 2 种光照条件, 对  $P_1$  特性曲线, 此时  $\Delta D_{\max}/N$  相对于  $|\Delta P/\Delta U|$  过小, 根据式(4)区域划分方案, 系统大部分时间进行大步长跟踪, 易产生功率波动问题; 对于  $P_2$  特性曲线,  $\Delta D_{\max}/N$  相对于  $|\Delta P/\Delta U|$  过大, 系统大部分时间进行小步长跟踪, 跟踪时间过长, 动态响应特性降低<sup>[3]</sup>。

### 3 改进分段变步长 MPPT 算法

通过对自适应步长算法和分区控制策略的分析比较, 结合 2 种方案优点, 本文提出了基于  $P-D$  微分曲线的改进分段变步长 MPPT 算法。

#### 3.1 光伏系统 $P-D$ 特性曲线

由图 3 可知,  $P-D$  微分曲线两端区域都收敛, 算法的稳定性较高; 当  $\Delta P/\Delta D > 0$  时, 系统工作在 MPP 左边, 当  $\Delta P/\Delta D < 0$  时, 系统工作在 MPP 右边, 可以据此判定系统工作状态。当  $\Delta P/\Delta D > 0$  时, 曲线上升段对应功率变化较大, 表明系统远离 MPP 区域, 曲线下落段对应功率变化值逐渐变小, 表明系统逼近 MPP 区域,  $\Delta P/\Delta D < 0$  时情况类似, 可以据此实现跟踪区域自动划分, 同时可以看出该区域划分方法不受外界环境变化的影响。

#### 3.2 改进算法

首先依据  $P-D$  微分曲线进行系统工作状态判定, 由图 3 可知在 MPP 左边微分曲线为正值, 在 MPP 右边微分曲线为负值, 当  $\Delta P/\Delta D = 0$  时可以认为达到 MPP, 可以据此进行系统工作状态判定。

$$\begin{cases} \Delta P/\Delta D > 0 & \text{MPP 左边} \\ \Delta P/\Delta D = 0 & \text{MPP} \\ \Delta P/\Delta D < 0 & \text{MPP 右边} \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $\Delta P/\Delta D = [P(k)-P(k-1)]/[D(k)-D(k-1)]$ ,  $\Delta P$  为  $k$  时刻功率变化大小,  $\Delta D$  为  $k$  时刻占空比变化大小。

其次引入控制参数  $A$  将跟踪区域划分为 3 段,  $A$  的计算方式如下:

$$A = \Delta P/\Delta D \quad (6)$$

具体区域划分如图 3 所示。

由图 3 可知, 控制参数  $A$  有 2 个极值点  $A_1$  和  $A_2$ ,

根据对  $P-D$  微分曲线的分析,可以利用这 2 个极值点将追踪区域自动划分为 3 段,分别采取不同步长进行追踪:极值点  $A_1$  左边 I 区域远离 MPP,可以采用固定大步长追踪逼近 II 区域;最大功率点位于极值点  $A_1$  和  $A_2$  之间 II 区域,所以采用较小自适应步长,逐步逼近 MPP;极值点  $A_2$  右边 III 区域远离 MPP,同样采用大步长追踪逼近 II 区域。具体控制方法如下:

$$\begin{cases} \Delta P / \Delta D \geq 0 \\ \Delta A / \Delta D \geq 0 \end{cases} \quad \text{固定大步长追踪 (I 区域)} \quad (7)$$

$$\Delta A / \Delta D < 0 \quad \text{固定大步长追踪 (II 区域)}$$

$$\begin{cases} \Delta P / \Delta D < 0 \\ \Delta A / \Delta D > 0 \end{cases} \quad \text{变步长追踪 (II 区域)} \quad (8)$$

$$\Delta A / \Delta D \leq 0 \quad \text{固定大步长追踪 (III 区域)}$$

最后根据式(3),可以得到  $k+1$  时刻改进算法的跟踪步长,具体计算公式如下:

$$D(k) = \begin{cases} D(k-1) \pm \Delta D_{\max} & \text{I 区域、III 区域} \\ D(k-1) \pm N \left| \frac{\Delta P}{\Delta D} \right| & \text{II 区域} \end{cases} \quad (9)$$

## 4 仿真分析

### 4.1 仿真原理图

根据式(1)和 MATLAB/Simulink 工具箱构建光伏系统模型,采用 Buck 电路连接负载实现阻抗匹配,采用 S 函数实现 MPPT 控制<sup>[6]</sup>,仿真系统见图 4。

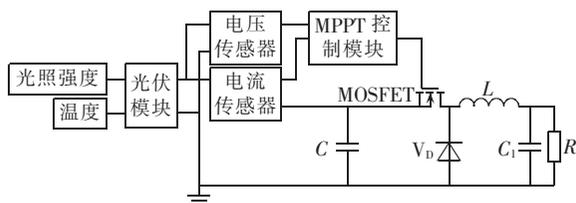


图 4 带有 MPPT 控制的光伏仿真系统

Fig.4 Simulation system of PV with MPPT control

### 4.2 仿真结果及分析

初始条件为标准光照强度  $1000 \text{ W/m}^2$ , 温度  $25^\circ\text{C}$ , 仿真步长  $0.01 \text{ s}$ ,  $0.3 \text{ s}$  时光照强度由  $1000 \text{ W/m}^2$  突变到  $400 \text{ W/m}^2$ ,  $0.7 \text{ s}$  时由  $400 \text{ W/m}^2$  恢复到  $1000 \text{ W/m}^2$ , 仿真外界环境剧烈变化的情况,对比自适应步长算法、分区控制算法和改进算法以验证追踪效果。

由图 5 可知,当外界环境突变时,改进算法利用控制参数  $A$  实现了跟踪区域的准确划分。光照强度下降时,  $\Delta A / \Delta D < 0$ , 系统工作在远离 MPP 的右边区域,此时,系统采用固定大步长跟踪;当  $\Delta A / \Delta D > 0$  时,系统工作点逼近 MPP 区域,采用自适应步长跟踪,光照强度上升时效果相同。

图 6 是 3 种算法的占空比调整步长和功率输出仿真结果。对比图 6(a)和图 6(c)可知,当光照强度下降时,自适应步长算法跟踪步长需逐步调整,需要

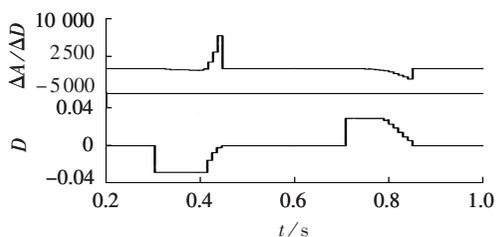
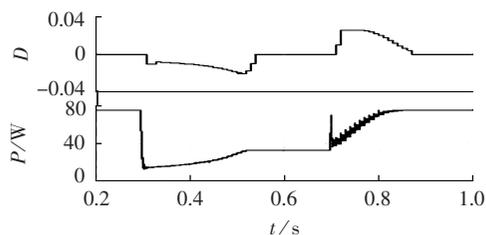
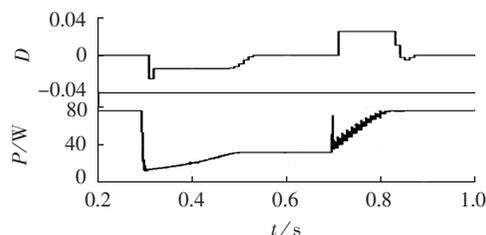


图 5 改进 MPPT 算法分区控制仿真结果

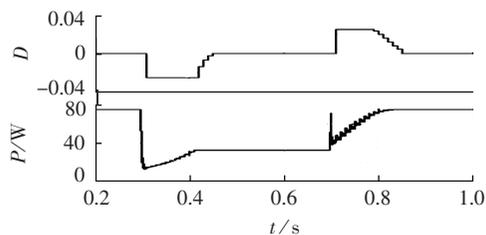
Fig.5 Simulative results of divisional control with improved MPPT algorithm



(a) 自适应步长算法仿真结果



(b) 分区控制算法仿真结果



(c) 改进分段变步长算法仿真结果

图 6 3 种算法的仿真结果

Fig.6 Simulative results of three algorithms

$0.23 \text{ s}$  达到 MPP,改进算法只需要  $0.14 \text{ s}$ ,跟踪速度提升效果明显,同时在 MPP 附近没有发生功率振荡,因此改进算法具有较好的动态响应特性和稳态特性。

对比图 6(b)和图 6(c)知,由于传统分区控制算法不能准确划分跟踪区域,在光照强度由  $1000 \text{ W/m}^2$  跳变至  $400 \text{ W/m}^2$  时,系统较长时间以小于  $0.02$  的步长进行跟踪,需要  $0.22 \text{ s}$  达到 MPP;当光照强度从  $400 \text{ W/m}^2$  跳变至  $1000 \text{ W/m}^2$  时,改进系统长时间以大步长进行跟踪,发生了功率振荡,改进算法通过控制参数  $A$  实现了对跟踪区域的准确划分,可以适应外界环境剧烈变化要求。

## 5 结语

为了提高光伏系统 MPPT 速度,同时适应外界环境剧烈变化要求,本文在分析传统自适应步长算法和分区控制策略的基础上,结合 2 种算法的优点,提出

了基于  $P-D$  微分曲线的改进分段变步长 MPPT 算法。通过 MATLAB 构建光伏系统模型,仿真结果验证了改进分段变步长算法自动区域划分方法的有效性,能够适应剧烈变化环境下的运行,同时算法具有较好的动态响应特性和稳态特性,达到了较好的控制效果。

### 参考文献:

- [1] 董密,杨建,彭可,等. 光伏系统的零均值电导增量最大功率点跟踪控制[J]. 中国电机工程学报,2010,30(21):48-53.  
DONG Mi,YANG Jian,PENG Ke,et al. Zero average incremental conductance maximum power point tracking control for photovoltaic system[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(21):48-53.
- [2] 周德佳,赵争鸣,袁立强,等. 具有改进最大功率跟踪算法的光伏并网控制系统及其实现[J]. 中国电机工程学报,2008,28(31):94-100.  
ZHOU Dejia,ZHAO Zhengming,YUAN Liqiang,et al. Implementation of a photovoltaic grid-connected system based on improved maximum power point tracking[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(31):94-100.
- [3] 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.
- [4] PANDEY A,DASGUPTA N,MUKERJEE A K. Design issues in implementing MPPT for improved tracking and dynamic performance [C]//IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics. Paris,France:IEEE,2006:4387-4391.
- [5] 栗秋华,周林,刘强,等. 光伏并网发电系统最大功率跟踪新算法及其仿真[J]. 电力自动化设备,2008,28(7):21-25.  
LI Qiuhua,ZHOU Lin,LIU Qiang,et al. Simulative research of MPPT for photovoltaic power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(7):21-25.
- [6] LIU Fangrui,DUAN Shanxu,LIU Fei. A variable step size INC MPPT method for PV systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2008,55(7):2622-2628.
- [7] 黄舒予,牟龙华,石林. 自适应变步长 MPPT 算法[J]. 电力系统及其自动化学报,2011,23(5):26-30.  
HUANG Shuyu,MU Longhua,SHI Lin. Adaptive variable step size MPPT algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2011,23(5):26-30.
- [8] XIAO Weidong,DUNFORD W G. A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems[C]//2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, 2004. Adchen,German:[s.n.],2004:1957-1963.
- [9] KOUTROULIS E K,VOULGARIS N C. Development of a micro-controller-based photovoltaic maximum power point tracking control system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2001,16(1):46-54.
- [10] 熊远生,俞立,徐建明. 固定电压法结合扰动观察法在光伏发电最大功率点跟踪控制中应用[J]. 电力自动化设备,2009,29(6):85-88.  
XIONG Yuansheng,YU Li,XU Jianming. MPPT control of photovoltaic generation system combining constant voltage method with perturb-observe method[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(6):85-88.
- [11] 焦阳,宋强,刘文华. 基于改进 MPPT 算法的光伏并网系统控制策略[J]. 电力自动化设备,2010,30(12):92-96.  
JIAO Yang,SONG Qiang,LIU Wenhua. Control strategy grid connected photovoltaic generation system based on modified MPPT method[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(12):92-96.
- [12] 温嘉斌,刘密富. 光伏系统最大功率点跟踪方法的改进[J]. 电力自动化设备,2009,29(6):81-84.  
WEN Jiabin,LIU Mifu. Improvement of maximum power point tracking for photovoltaic system[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(6):81-84.
- [13] 刘邦银,段善旭,刘飞. 基于改进扰动观察法的光伏阵列最大功率点跟踪[J]. 电工技术学报,2009,24(6):91-94.  
LIU Bangyin,DUAN Shanxu,LIU Fei. Photovoltaic array maximum power point tracking based on improved perturbation and observation method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(6):91-94.

### 作者简介:

彭会锋(1988-),男,河南南阳人,硕士研究生,主要研究方向为新能源发电技术(E-mail:651513029@qq.com);

孙建平(1974-),男,河南南阳人,副教授,主要研究方向为新能源发电技术与先进传感检测技术(E-mail:sunjip@ncepu.edu.cn)。

## MPPT algorithm based on power duty cycle differential characteristic curve for photovoltaic system

PENG Huifeng,SUN Jianping,CAO Xiangchun,LIU Xiaolong

(School of Electrical and Electronic Engineering,North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

**Abstract:** An improved segmentation and variable step-size MPPT (Maximum Power Point Tracking) algorithm is proposed based on power duty cycle differential characteristic curve,which carries out the divisional control by automatically dividing the tracking areas according to the extremum of power duty cycle differential characteristic curve. A large fixed tracking step is adopted when the operating point is far away from MPP(Maximum Power Point),while an adaptive variable step size is adopted when the operating point is near MPP. Simulative results by MATLAB show that,the improved MPPT algorithm realizes the automatic and accurate division of tracking areas and shows better static and dynamic performances.

**Key words:** photovoltaic system; MPPT; segmentation and variable step-size; power duty cycle; computer simulation