

光伏系统中一种改进 MPPT 算法的研究

郑俊观^{1,2},王硕禾²,张国驹³

- (1.北京全路通信信号研究设计院集团有限公司广州分公司,广东 广州 511495;
2.石家庄铁道大学 电气与工程学院,河北 石家庄 050043;
3.新疆金风科技股份有限公司,新疆 乌鲁木齐 830026)

摘要:针对传统扰动观察法存在功率振荡和误判的问题,提出了一种功率预测与自适应变步长相结合的扰动观察法。自适应变步长能够按照 $P-U$ 特性曲线的斜率自动改变步长,进而解决传统扰动法跟踪速度与跟踪精度不能兼顾和稳定后功率波形振荡较大的问题。当光照强度发生剧烈变化时,功率预测法能够根据 $P-U$ 输出特性曲线进行预测,进而达到消除误判的问题。在 MATLAB/Simulink 中搭建光伏系统 MPPT 仿真模型,并对改进扰动法和传统扰动法进行仿真对比,结果表明,改进的扰动法能够克服传统扰动法存在功率振荡和误判问题,可以使光伏系统快速、准确地实现最大功率点跟踪控制,并使之稳定运行在最大功率点处。

关键词:光伏组件;最大功率点跟踪控制;自适应变步长;功率预测

中图分类号:TM615 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2018)03-0010-06

在光伏发电系统中,光伏组件是光伏系统中提供能量的基本单元。光伏组件的输出特性易受外界环境的影响而发生变化,在任意工况下,光伏组件都存在唯一的最大功率点^[1]。为了提高光伏系统的发电效率,需要运用最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)控制技术使光伏电池工作在最大功率点处,而研究光伏系统 MPPT 控制方法的前提是建立光伏组件的模型,如何根据厂家提供的光伏组件的出厂参数建立仿真模型,成为光伏组件建模时需要思考的问题之一^[2]。

MPPT 的基本原理是通过在光伏电池和负载之间增加阻抗变换器,实现负载阻抗的匹配^[3-5]。阻抗变换器即 DC/DC 变换器,通过改变 DC/DC 变换电路中功率开关元件的占空比来改变等效负载阻值的大小,从而实现阻抗的匹配。MPPT 算法就是计算控制功率开关元件的占空比,实现最大功率点跟踪。传统 MPPT 算法有恒压法、扰动观察法和电导增量法,还有基于这些传统 MPPT 算法的改进算法;近年来,为了提高系统的鲁棒性和控制

精度,以神经网络控制、模糊逻辑控制为代表的智能算法也被引进到 MPPT 算法中。所有这些 MPPT 算法都有各自的优缺点及相应的适用场合^[6]。

本文针对传统扰动法存在功率振荡和误判问题,在搭建光伏组件仿真模型的基础上,重点分析了传统扰动法的工作原理及其不足,并用自适应变步长代替定步长解决功率振荡问题、跟踪速度与跟踪精度不能同时兼得的矛盾;把功率预测引入到 MPPT 中,解决当外界环境发生剧烈变化时造成误判的问题;最后,通过仿真验证功率预测与自适应变步长相结合的扰动观察法能够使光伏系统稳定、快速、准确地工作在最大功率点处。

1 光伏组件建模

光伏电池是一种直接将光能转变为电能的器件,其输出功率是光照强度、温度的非线性函数,工作机理相当于一个半导体发光二极管。光伏组件模型主要分为物理模型和工程模型^[7],物理模型能够比较精准地反映光伏电池的物理特性,但是建模时需要光伏电池的内部物理参数;工程模

收稿日期:2017-11-24

基金项目:2017 年度北京市科技计划资助项目(D17110300430000)

作者简介:郑俊观(1992—),男,河北邢台人,硕士生,主要研究方向为新能源发电与控制技术。

型是对光伏电池输出特性进行简化和变换,并与生产厂家提供的光伏组件参数对应,因模型简单而在研究中被广泛使用。

1.1 工程模型

光伏电池元典型等效模型^[8]如图1所示。

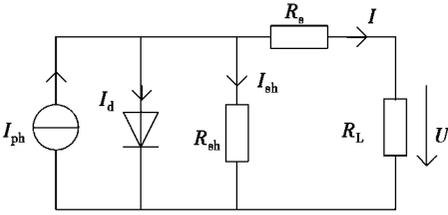


图1 光伏电池元等效电路图

Fig.1 Equivalent circuit diagram of photovoltaic cell

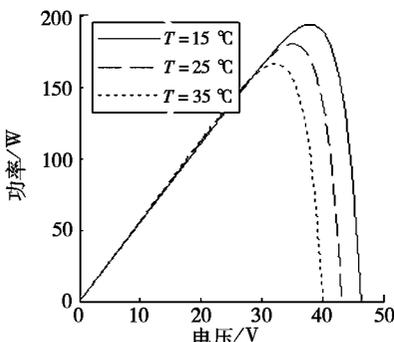
从图1可以得到光伏电池元的输出特性方程

$$\begin{cases} I = I_{sc} [1 - C_1 (e^{\frac{U}{C_2 U_{oc}}} - 1)] \\ C_1 = (1 - \frac{I_m}{I_{sc}}) e^{-\frac{U_m}{C_2 U_{oc}}} \\ C_2 = (\frac{U_m}{U_{oc}} - 1) / \ln(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_{ph} 为光生电流,A; I_0 为反向饱和电流,A; q 为电子电荷,C; K 为玻尔兹曼常数; T 为温度,℃; A 为曲线常数; R_{sh} 为等效并联电阻,Ω; R_s 为等效串联电阻,Ω。

公式(1)虽然能够较好地描述光伏电池的内部原理,但涉及的一些内部物理参数难以确定,不太适合工程应用。在式(1)基础上,文献[9]对其进行了简化处理,推导出标准条件下光伏组件的工程模型。

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



a 不同温度下 P-U 特性曲线(光照强度 1 000 W/m²)

式中: U_m 为标准条件下光伏组件最大功率点电压,V; I_m 为标准条件下光伏组件最大功率点电流,A; U_{oc} 为标准条件下光伏组件开路电压,V; I_{sc} 为标准条件下光伏组件短路电流,A。

当外界环境发生变化时,通过直接对组件的4个性能参数修正,可以得到新的条件下光伏组件4个性能参数的计算公式^[9],如式(3)所示。

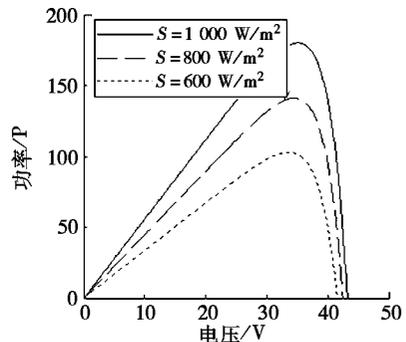
$$\begin{cases} I_{sc}' = I_{sc} (1 + \Delta S) (1 + a \Delta T) \\ U_{oc}' = U_{oc} \ln(e + b \Delta S) (1 - c \Delta T) \\ I_m' = I_m (1 + \Delta S) (1 + a \Delta T) \\ U_m = U_m \ln(e + b \Delta S) (1 - c \Delta T) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\Delta S = S / (S_{ref} - 1)$, $\Delta T = T - T_{ref}$,其中 S 为光照强度, $S_{ref} = 1\,000\text{ W/m}^2$, $T_{ref} = 25\text{ }^\circ\text{C}$ 为标准条件下的光照强度和参考温度; a 为电流温度系数,取值为 $0.002\,5/^\circ\text{C}$; c 为电压温度系数,取值为 $0.002\,88/^\circ\text{C}$; e 为自然对数的底数; $b = 0.5$ 。

由式(2)和式(3)可以描述任意工况下光伏组件的输出特性,而不需要物理模型中复杂的内部参数,因此该模型较适合工程应用。

1.2 输出特性曲线研究

根据式(2)、(3),搭建光伏组件仿真模型,该模型可以模拟任何型号的光伏组件,实现模型的通用性。选用光伏组件的参数为 $U_{oc} = 43.2\text{ V}$ 、 $U_m = 35.9\text{ V}$ 、 $I_{sc} = 5.6\text{ A}$ 、 $I_m = 5\text{ A}$,该光伏组件在光照强度 $1\,000\text{ W/m}^2$ 、温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 时的功率仿真特性曲线如图2所示。由图2可知,光伏组件的功率特性曲线随光照强度或温度的变化而发生变化,对应的最大功率点的位置也发生相应的变化。因此,为了提高光伏系统发电效率,需要运用 MPPT 控制算法使光伏系统始终工作在最大功率点处。



b 不同光照强度下 P-U 特性曲线(温度 25 °C)

图2 光伏组件输出特性曲线
Fig.2 Output characteristic curve of PV module

2 传统扰动法

传统扰动法是在电池工作的每个周期内,通过对电压施加扰动来改变输出功率,从而实现功率的寻优。传统扰动法具有步骤少、采样精度要求低、算法比较简单等优点,其不足之处主要表现为跟踪速度和跟踪精度不可兼得,且当外界环境发生剧烈变化时可能会出现误判现象^[10-11]。

图 3 为外界环境剧烈变化时传统扰动法产生的误判示意图。图 3 中,假设光伏系统工作在最大功率点左侧,此时光伏系统输出功率记为 P_a ,工作电压记为 U_a ,当电压向右扰动到 U_b 时,若此时光照强度没有变化,则 $P_b > P_a$,扰动法工作正确;若此时光照强度变小,对应 P_b 的功率变成 P_c ,由于 $P_c < P_a$,则扰动法误认为最大功率点在其左侧,使光伏系统工作点向左移动,从而发生了误判,误判严重时还会造成电压、功率崩溃,系统出现严重的振荡现象^[9]。

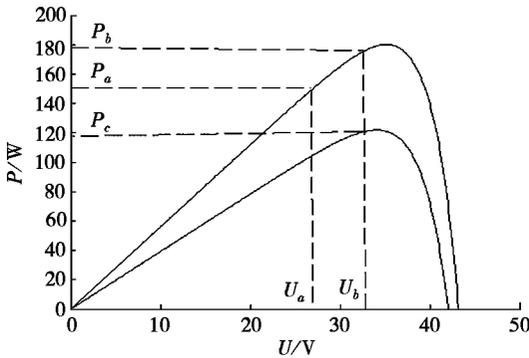


图 3 误判现象示意图

Fig. 3 Schematic diagram of misjudgement

3 改进扰动法

针对传统扰动法存在的不足,本文提出了一种基于功率预测与自适应变步长相结合的扰动法。该方法利用自适应变步长解决跟踪速度和跟踪精度的问题,利用功率预测有效解决扰动法误判的问题。

自适应变步长的工作原理为:当光伏系统的工作点在最大功率点附近时,采用较小的步长以提高跟踪精度;反之,采用较大的扰动步长以提高跟踪速度。自适应变步长实际上是按照功率特性曲线的斜率自动变化扰动步长^[12]。

设电压的扰动步长为 $k|\Delta P/\Delta U|$,其中 $\Delta P/\Delta U = (P(K) - P(K-1))/(U(K) - U(K-$

$1))$, ΔP 为功率增量, ΔU 为电压增量, k 为常数系数。由于步长的大小与 $|\Delta P/\Delta U|$ 的值成正比,在刚开始跟踪时,因 $|\Delta P/\Delta U|$ 值较大,可以采用较大的步长满足 MPPT 的快速性;在最大功率点附近时,由于 dP/dU 变化小,可以采用较小的步长满足 MPPT 的跟踪精度要求。

虽然变步长解决了功率振荡的问题,但是仍然无法解决扰动法的误判问题。误判发生的原因是在光照强度突变的情况下,前后两次采样点没有在同一输出特性曲线上,因此克服误判的关键在于确保扰动前、后两次采样功率值在同一输出特性曲线上。

功率预测的基本思路如下:通过功率预测获得在同一光照强度下扰动前的工作点功率,并与扰动后的工作点检测功率进行比较,以达到消除误判的现象^[13]。功率预测示意图如图 4 所示、流程图如图 5 所示。图 4 中,当采样频率足够高时,每个采样周期内光照强度的变化速率是不变的,假设 kt 时刻电压 $U(k)$ 处工作点测得的功率为 $P(k)$,此时,并不对电压施加扰动,而在 $(k+1/2)t$ 时刻增加一次功率采样,测得功率为 $P(k+1/2)$,则一个采样周期末的预测功率 $P'(k)$ 可以表示为:

$$P'(k) = 2P(k+1/2) - P(k) \quad (4)$$

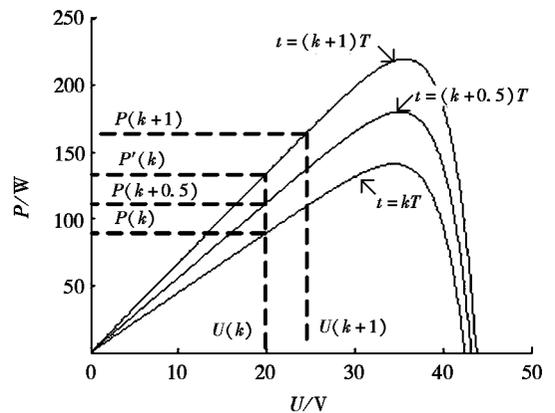


图 4 功率预测示意图

Fig. 4 Schematic diagram of power prediction

采样周期末的预测功率 $P'(k)$ 与测得功率 $P(k+1)$ 理论上是同一光照强度下功率特性曲线上电压扰动前后的两个工作点,由图 5 可知:若预测功率与测得功率相同,则光伏系统工作点不发生变化;若测得功率大于预测功率,且 $u(k+1) - u(k) > 0$,说明此时光伏系统工作点位于最大功率点左侧,需要增加工作点电压使其趋向最大功率点;若测得功率大于预测功率,且 $u(k+1) -$

$u(k) < 0$,说明此时光伏系统工作点位于最大功率点右侧,需要降低工作点电压使其趋向最大功率点。测得功率小于预测功率时,其分析情况同上。

上述流程执行完毕后,需重新返回到采样光伏电池输出的电压值和电流值,以保证当外界环境发生变化时,系统可以重新跟踪到新的最大功率点,提高光伏电池的发电效率。

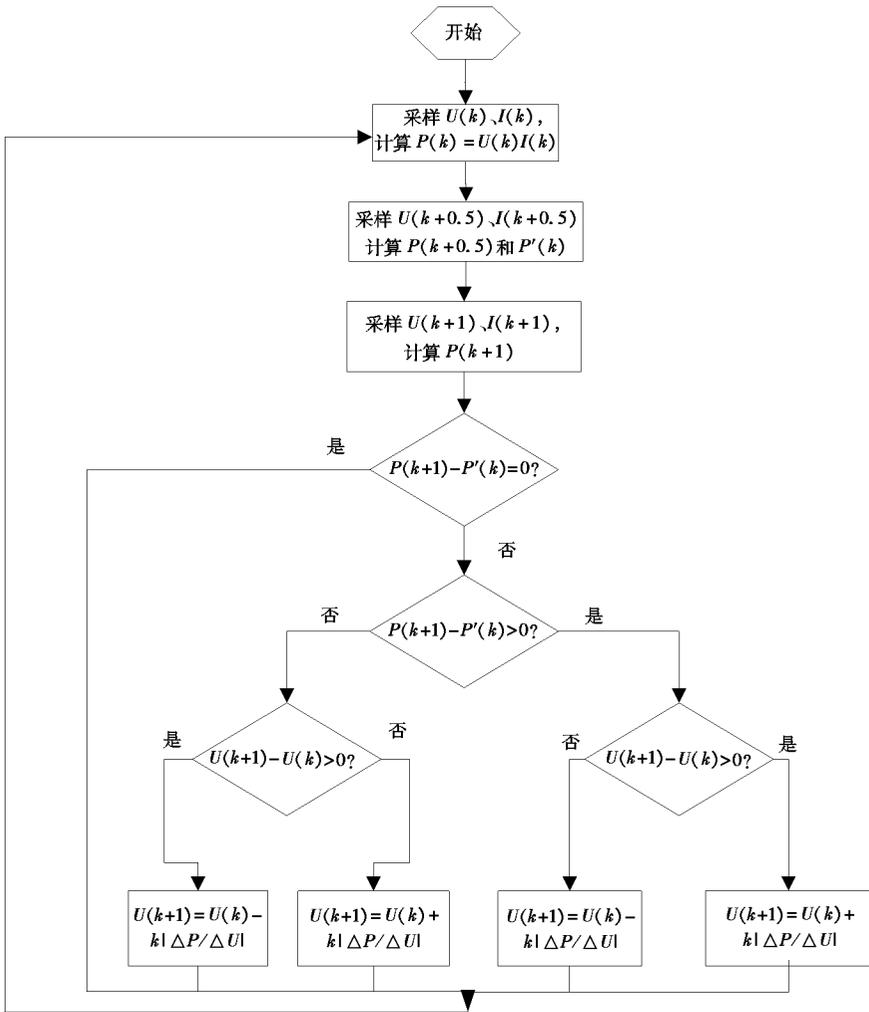


图5 改进扰动观察法的流程图

Fig. 5 Flow chart of the improved P&Q method

4 仿真分析

为了验证功率预测与自适应步长相结合的扰动法,在 MATLAB/Simulink 中搭建基于 Boost 电路的光伏系统 MPPT 仿真模型,如图 6 所示。图 6 中,该仿真模型由光伏组件模块、Boost 电路、MPPT 模块和 PWM 模块构成,其工作原理是根据 MPPT 算法调节输出占空比来控制功率开关管的通断,进而实现光伏系统的最大功率点跟踪。图 7、图 8 分别为仿真时间 0.2 s,温度 25 °C,初始光照强度 1 000 W/m²,0.1 s 时光照强度变为 700

W/m²,传统扰动法和改进扰动法的仿真结果。

由图 7、图 8 可以知道:(1)在 0.1 s 时光照发生突变,传统扰动法发生的误判现象造成响应时间变长,而改进的扰动法显著提高了系统动态响应的速度,最终使光伏系统稳定地工作在最大功率点处;(2)改进的扰动法跟踪过程相对光滑,功率波形几乎没有振荡,同时避免了光照强度发生突变时误判现象的发生,且能量损失较小。所以,改进的扰动法可以快速、准确地实现最大功率点跟踪控制,并使之稳定运行在最大功率点处。

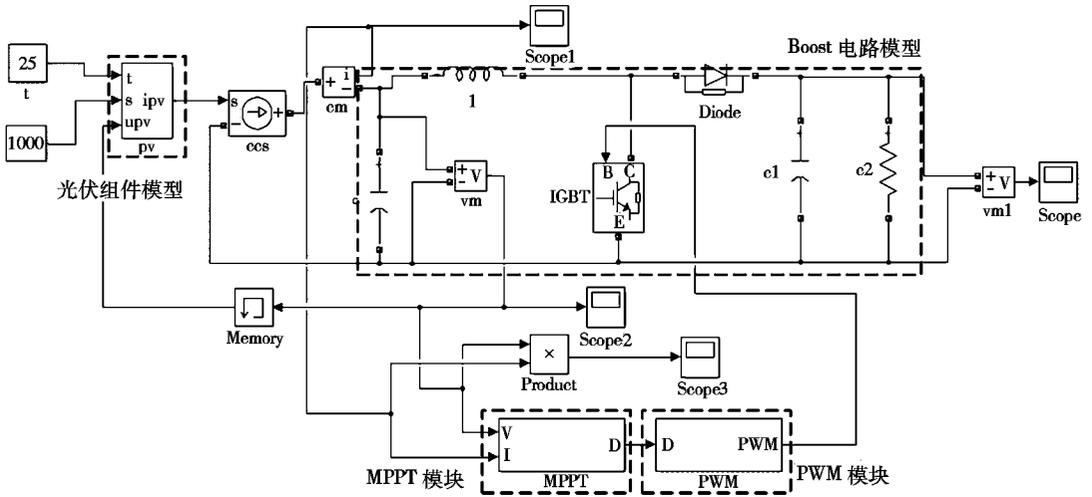


图 6 光伏系统 MPPT 仿真模型

Fig. 6 PV system MPPT simulation model

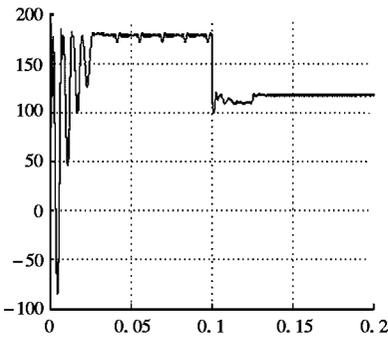


图 7 扰动观察法跟踪功率波形

Fig. 7 P&Q tracking power waveform

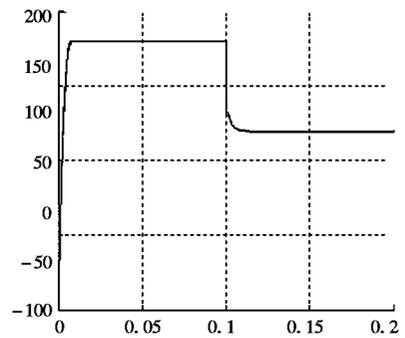


图 8 改进扰动观察法跟踪功率波形

Fig. 8 Improved P&Q tracking power waveform

5 结论

通过对光伏发电系统中光伏组件的输出特性、最大功率点跟踪控制技术的研究与分析,得到以下结论:

(1)根据光伏电池的物理数学模型,简化推导得到其工程模型,在此基础上建立光伏组件的通用仿真模型。仿真结果表明光伏组件输出特性曲线具有明显非线性,且在任何工况下存在唯一的最大功率点。

(2)针对传统扰动法存在功率振荡、跟踪速度和跟踪精度难以兼顾等问题,按照 $P-U$ 特性曲线的斜率自动改变步长,从而解决传统扰动法存

在的问题。

(3)当外界环境因素尤其是光照强度发生剧烈变化时,传统扰动法可能会发生误判。克服误判的关键在于保证扰动前、后对应的两个功率点在同一输出特性曲线上,而功率预测法能够获得在同一输出特性曲线上扰动前的工作点功率,从而避免了误判现象的发生。

(4)为了解决传统扰动法存在的不足,提出了一种基于功率预测与自适应变步长相结合的扰动观察法。仿真结果表明,改进的扰动法能够克服传统扰动法存在功率振荡和误判问题,可以使光伏系统快速、准确地实现最大功率点跟踪控制,并使之稳定运行在最大功率点处。

参考文献:

- [1] ESRAM T, CHAPMAN P L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(2): 439-449.
- [2] 杨永恒, 周克亮. 光伏电池建模及 MPPT 控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(S1): 229-234.
- [3] 薛阳, 汪莎. 基于扰动观察法的模糊控制应用于光伏发电最大功率跟踪[J]. 太阳能学报, 2014, 35(9): 1622-1626.
- [4] 高金辉, 邢倩, 马高峰. 光伏电池新型仿真模型及 MPPT 控制器的研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(17): 107-111.
- [5] 王宝忠, 王志兵. 基于模糊控制的光伏系统最大功率点跟踪[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2012, 17(4): 13-17.
- [6] 郑必伟, 蔡逢煌, 王武. 一种单级光伏并网系统 MPPT 算法的分析[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 90-96.
- [7] 吴春华, 黄建明, 陈卫民, 等. 单相光伏并网与有源滤波的统一控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 103-109.
- [8] 张纯杰, 赵志刚, 桑虎堂. 光伏电池的建模综述[J]. 电源技术, 2016, 40(4): 927-930.
- [9] WOLF P, BENDA V. Identification of PV solar cells and modules parameters by combining statistical and analytical methods[J]. Solar Energy. 2013, 93: 151-157.
- [10] 李会平. 光伏发电系统建模及并网控制策略研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2014.
- [11] 刘士剑. 基于 GA-BPNN 的光伏最大功率点跟踪控制研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [12] 赵争鸣, 陈剑, 孙晓瑛. 太阳能光伏发电最大功率点跟踪技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [13] 张兴, 曹仁贵. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.

Research on an Improved Maximum Power Point Tracking Method in Photovoltaic System

ZHENG Junguan^{1,2}, WANG Shuohe², ZHANG Guojun³

- | |
|--|
| 1. Beijing National Railway Research & Design Institute of Signal & Communication Ltd. Guangzhou Branch,
Guangzhou Guangdong 511495, China; |
| 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang Hebei 050043, China; |
| 3. Xinjiang Goldwind Sci & Tech Co., Ltd., Urumqi Xinjiang 830026, China |

Abstract: Aiming at the problems of power oscillation and misjudgment in traditional disturbance observation method, a disturbance observation method combining power prediction with adaptive variable step size is proposed. Adaptive variable step size can automatically change the step size according to the slope of $P-U$ characteristic curve, thus solving the problem that the traditional perturbation method can not take into account the tracking speed and tracking accuracy, and the power waveform oscillates greatly after stabilization. When the illumination intensity changes sharply, the power prediction method can predict according to the $P-U$ output characteristic curve, and then eliminate the problem of misjudgment. MPPT simulation model of photovoltaic system was built in MATLAB/Simulink, and simulation comparison was made between improved disturbance method and traditional disturbance method. The results show that the improved disturbance method can overcome the problem of power oscillation and misjudgment existing in the traditional disturbance method, and can enable the photovoltaic system to realize the tracking control of the maximum power point quickly and accurately, and make it run steadily at the maximum power point.

Keywords: Photovoltaic module; Maximum Power Point Tracking; Adaptive variable step-size; Power prediction

(责任编辑:李华云)