

# 基于滑模控制的光伏系统MPPT控制策略

李孝禄<sup>1</sup>, 王 鑫<sup>1</sup>, 方晓敏<sup>2</sup>, 黄建锋<sup>1</sup>, 朱俊江<sup>1</sup>

(1. 中国计量大学机电工程学院, 杭州 310018; 2. 衢州职业技术学院, 衢州 324000)

**摘 要:** 针对现有的太阳电池最大功率点跟踪方法中存在的跟踪速度慢、在最大功率点附近存在振荡、外界环境发生变化时可能产生误判等不足,提出一种基于滑模控制的太阳电池最大功率点跟踪方法。在建立DC-DC变换器模型的基础上设计滑模控制器,得出控制函数,并通过李雅普诺夫方法进行稳定性和存在性分析。利用Matlab/Simulink对太阳电池模型进行仿真,验证该滑模控制策略的可行性;建立基于扰动观察法的太阳电池最大功率点跟踪模型,与滑模控制方法进行比较。结果表明在外界环境变化的情况下,该方法可实现较快的跟踪速度和较好的稳定精度,在自适应和抗干扰上具有较大优势。

**关键词:** 最大功率点跟踪器; 滑模控制; 李雅普诺夫方法; 太阳电池

**中图分类号:** TM615

**文献标识码:** A

## 0 引 言

受太阳电池的价格、转换效率、环境因素的影响,为有效利用太阳能,对光伏发电系统进行最大功率点跟踪(MPPT)是十分必要的<sup>[1]</sup>。最大功率点跟踪实际上是一个自动寻优的过程。目前常用的最大功率点跟踪方法有固定电压法、电导增量法、扰动观察法等<sup>[2]</sup>。固定电压法控制精度较差;电导增量法控制稳定性好,但计算量大,对系统设备要求高<sup>[3]</sup>;扰动观察法由于结构简单和易于实现<sup>[4,5]</sup>,已得到广泛应用<sup>[6]</sup>,但也存在动态性能差、跟踪速度慢等缺点<sup>[7]</sup>。

滑模控制具有控制结构简单、动态响应速度快、鲁棒性强、物理实现简单等优点,滑动模式的设计与被控对象参数和扰动无关<sup>[8,9]</sup>。将滑模控制应用在环境和参数变化频繁的光伏发电系统中,具有很好的针对性<sup>[10,11]</sup>。本文在分析太阳电池输出特性的基础上,提出一种基于滑模控制的最大功率点跟踪方法,该方法可对抗扰动下的光伏发电系统最大功率点实现平滑、快速、准确跟踪。

## 1 太阳电池输出特性研究

太阳电池等效电路如图1所示。图中, $I_{ph}$ 为太

阳电池光生电流, $I_d$ 为二极管结电流, $R_{sh}$ 为并联电阻, $R_s$ 为串联电阻。

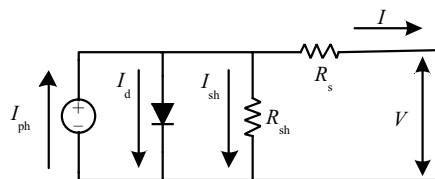


图1 太阳电池等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of photovoltaic cells

根据基尔霍夫电流定理可推出太阳电池输出电压 $V$ 、输出电流 $I$ 之间的关系<sup>[12]</sup>。太阳电池输出特性方程为:

$$\begin{aligned} I &= I_{ph} - I_d - I_{sh} \\ &= I_{ph} - I_s \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + IR_s)}{kAT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \end{aligned} \quad (1)$$

其中,

$$I_{ph} = [I_{scr} + k_f(T - T_{ref})] \frac{S}{S_{ref}} \quad (2)$$

$$I_s = I_r \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[ \frac{qE_g}{kA} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3)$$

式中, $I_s$ ——二极管反向饱和电流,A; $S$ ——光照辐照度, $W/m^2$ ; $S_{ref}$ ——标准测试条件下的辐照度,

收稿日期: 2016-07-08

基金项目: 浙江省公益技术研究工业项目(2016C31112); 衢州市科技计划(2015Y018)

通信作者: 李孝禄(1968—), 男, 博士、副教授, 主要从事新能源发电方面的研究。lixiaolujl@163.com

$S_{\text{ref}} = 1000 \text{ W/m}^2$ ;  $T$ ——太阳电池表面温度, K;  
 $T_{\text{ref}}$ ——标准测试条件下太阳电池表面温度,  $T_{\text{ref}} = 298 \text{ K}$ ;  $I_{\text{scr}}$ ——标准测试条件下太阳电池短路电流, A;  $k_I$ ——短路电流温度系数;  $E_G$ ——能带宽度(能隙);  $q$ ——电子电荷量,  $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ;  $k$ ——波尔兹曼常数,  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ;  $A$ ——二极管因子。

由于实际情况中,太阳能等效并联电阻  $R_{\text{sh}}$  的实际值很大,而等效串联电阻  $R_s$  的实际值很小<sup>[13]</sup>,故可将式(1)简化为:

$$I = I_{\text{ph}} - I_s \left[ \exp\left(\frac{q}{kAT} V\right) - 1 \right] \quad (4)$$

基于上述太阳电池的数学模型,可得出太阳电池的输出特性与辐照度、太阳电池表面温度有密切的关系。辐照度变化对太阳电池的短路电流具有明显影响,而对太阳电池的开路电压影响不大,最大输出功率变化明显;太阳电池表面温度对太阳电池的短路电流影响不大,而对开路电压有明显影响,最大输出功率也随之发生相应变化。

由于不同外部环境下,太阳电池的输出功率会有较大变化,因此光伏发电系统需采用相关电路和控制方法,使太阳电池工作在最大功率点处,实现最大功率点跟踪。

## 2 MPPT 控制器设计

滑模变结构控制与常规控制策略的根本区别在于控制的不连续性,即一种使系统“结构”随时间变化的开关特性,该控制特性可迫使系统在一定特性下沿规定的状态轨迹做小幅度、高频率的上下运动,即所谓的“滑动模态”或“滑模”运动。这种滑动模态是可以设计的,且与系统的参数及扰动无关,可使处于滑模运动的系统具有很好的鲁棒性<sup>[14]</sup>。

### 2.1 DC-DC 变换器建模

在光伏发电系统中,为使负载获得最大功率,通常需要通过 DC-DC 电路对系统进行负载匹配。本文采用 Boost 拓扑电路,拓扑结构如图 2 所示。图中,  $i_{\text{pv}}$ 、 $v_{\text{pv}}$  分别为太阳电池输出电流、电压,  $C_{\text{pv}}$  为太阳电池并联输出电容,  $i_L$  为电感电流,  $v_o$  为 Boost 电路输出电压,  $L$ 、 $C$  分别为 Boost 电路的电感、电容,  $D$  为二极管,  $\text{SW}$  为功率管,  $R$  为负载电阻。输

入电容  $C_{\text{pv}}$  主要吸收影响电感电流的开关纹波,在稳态状态条件下,电感电流不发生变化,即有  $i_{C_{\text{pv}}} = 0$ , 从而  $i_{\text{pv}} = i_L$ 。

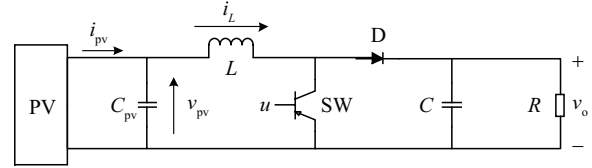


图2 Boost拓扑电路结构图

Fig. 2 Boost circuit topology diagram

Boost 拓扑电路采用开关函数建模,控制律  $u = 0$  表示开关器件导通,  $u = 1$  表示开关器件断开,其数学模型为<sup>[15]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{i}_L = \frac{v_{\text{pv}}}{L} - \frac{v_o}{L} + \frac{v_o}{L} u \\ \dot{v}_o = \frac{i_L}{C} - \frac{v_o}{RC} - \frac{i_L}{C} u \end{cases} \quad (5)$$

式(5)可改写为:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})u \quad (6)$$

其中,

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_L \\ v_o \end{bmatrix}, \mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{v_{\text{pv}}}{L} - \frac{v_o}{L} \\ \frac{i_L}{C} - \frac{v_o}{RC} \end{bmatrix}, \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{v_o}{L} \\ -\frac{i_L}{C} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中,  $\mathbf{x}$  ——状态向量;  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$  ——拓扑向量;  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$  ——开关向量。

### 2.2 滑模控制器设计

一个典型的滑模控制系统分为 2 个阶段:一是为接近运动阶段,在有限时间内,系统由任意初始状态到达切换面,即系统趋向切换面  $S(\mathbf{x}) = 0$  运动;二是滑动模态运动阶段,系统沿着切换面  $S(\mathbf{x}) = 0$  运动,并始终在切换面的某一区域内运动<sup>[14]</sup>。

由太阳电池的特性曲线可知,当  $\partial P_{\text{pv}} / \partial I_{\text{pv}} = 0$  时,太阳电池将持续产生最大功率输出。因此选择滑动表面为  $\partial P_{\text{pv}} / \partial I_{\text{pv}} = 0$ , 可得:

$$\frac{\partial P_{\text{pv}}}{\partial I_{\text{pv}}} = \frac{\partial I_{\text{pv}}^2 R_{\text{pv}}}{\partial I_{\text{pv}}} = I_{\text{pv}} \left( 2R_{\text{pv}} + I_{\text{pv}} \frac{\partial R_{\text{pv}}}{\partial I_{\text{pv}}} \right) = 0 \quad (8)$$

式中,  $P_{\text{pv}} = I_{\text{pv}}^2 R_{\text{pv}}$ ,  $R_{\text{pv}}$  表示直接与太阳电池连接的等效负载,可由  $R_{\text{pv}} = V_{\text{pv}} / I_{\text{pv}}$  得出。系统正常运行时,电感电流  $I_L$  保持续流状态,  $I_{\text{pv}} = I_L \neq 0$ 。因此,

式(9)的满足条件为  $2R_{pv} + I_{pv} \frac{\partial R_{pv}}{\partial I_{pv}} = 0$ , 可确定切换函数为:

$$S = 2R_{pv} + I_{pv} \frac{\partial R_{pv}}{\partial I_{pv}} \quad (9)$$

在太阳能电池输出功率曲线中, 滑模切换函数相对于占空比分布示意图, 如图 3 所示<sup>[16]</sup>。可将控制函数设置为:

$$u = \begin{cases} u + \Delta u, & S > 0 \\ u - \Delta u, & S < 0 \end{cases} \quad (10)$$

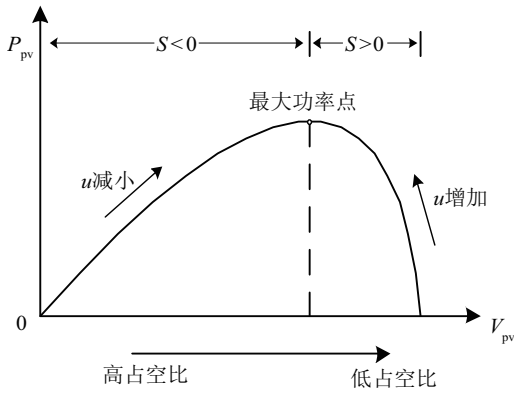


图3 占空比对滑模切换函数的影响<sup>[16]</sup>

Fig. 3 Evolution of sliding surface with respect to duty cycle<sup>[16]</sup>

滑动模态运动体现了确定系统在理想情况下沿着滑动面的切换运动, 这种运动是在无外加干扰情况下设计的, 并且开关也是理想开关, 属于理想情况。实际上系统存在各种不确定的干扰, 并且切换频率也不是无穷大。针对系统的不确定性, 滑模变结构控制率可采用等效控制  $u_{eq}$  和变结构控制  $u_{sw}$  作为控制输入<sup>[17]</sup>, 即:

$$u = u_{eq} + u_{sw} \quad (11)$$

其中, 等效控制项  $u_{eq}$  保证系统的状态在滑模面上, 变结构控制项  $u_{sw}$  的作用是为了克服各种干扰等非理想情况, 保证系统的状态不离开滑模面。根据文献[14], 等效控制可由以下条件得出:

$$\dot{S} = \left[ \frac{\partial S}{\partial x} \right]^T \dot{x} = \left[ \frac{\partial S}{\partial x} \right]^T (f(x) + g(x)u_{eq}) = 0 \quad (12)$$

$$u_{eq} = -\frac{\left[ \frac{\partial S}{\partial x} \right]^T f(x)}{\left[ \frac{\partial S}{\partial x} \right]^T g(x)} = 1 - \frac{V_{pv}}{V_o} \quad (13)$$

解出  $u_{eq}$  为系统在滑动面  $S=0$  上作用的平均量<sup>[18]</sup>。变结构控制项可设计为:

$$u_{sw} = K \operatorname{sgn}(S) \quad (14)$$

式中,  $K$ ——滑模系数, 取  $K > 0$ 。

控制律  $u$  的取值范围需要满足  $0 < u < 1$ , 控制信号  $u$  由于不能超出控制范围, 需加入饱和控制, 因此, 控制信号应为:

$$u = \begin{cases} 1, & u \geq 1 \\ u_{eq} + u_{sw}, & 0 < u < 1 \\ 0, & u \leq 0 \end{cases} \quad (15)$$

下面利用李亚普诺夫第二法证明对于式(6)所示系统, 选择切换函数为式(9), 采用式(15)所示的开关信号, 系统的滑动模态是存在的, 并且满足可达性和稳定性要求。

选取李雅普诺夫函数:

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (16)$$

切换函数  $S$  的导数为:

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \left[ \frac{\partial S}{\partial x} \right]^T \dot{x} = \left[ \frac{\partial S}{\partial I_L} \quad \frac{\partial S}{\partial V_o} \right]^T (f(x) + g(x)u) \\ &= \left[ 3 \frac{\partial R_{pv}}{\partial I_L} + i_L \frac{\partial^2 R_{pv}}{\partial I_L^2} \quad 0 \right] \begin{bmatrix} \frac{V_{pv}}{L} - \frac{V_o}{L} + \frac{V_o}{L} u \\ \frac{I_L}{C} - \frac{V_o}{RC} + \frac{-I_L}{C} u \end{bmatrix} \\ &= m_1 \begin{bmatrix} \frac{V_{pv}}{L} - \frac{V_o}{L} + \frac{V_o}{L} u \\ \frac{I_L}{C} - \frac{V_o}{RC} + \frac{-I_L}{C} u \end{bmatrix} \\ &= \left( 3 \frac{\partial R_{pv}}{\partial I_L} + i_L \frac{\partial^2 R_{pv}}{\partial I_L^2} \right) \left( \frac{V_{pv}}{L} - \frac{V_o}{L} + \frac{V_o}{L} u \right) \\ &= \left( 3 \frac{\partial R_{pv}}{\partial I_L} + i_L \frac{\partial^2 R_{pv}}{\partial I_L^2} \right) m_2 \end{aligned} \quad (17)$$

式中,  $m_1 = 3 \frac{\partial R_{pv}}{\partial I_L} + i_L \frac{\partial^2 R_{pv}}{\partial I_L^2}$ ,  $m_2 = \frac{V_{pv}}{L} - \frac{V_o}{L} + \frac{V_o}{L} u$ 。

根据  $R_{pv} = V_{pv}/I_{pv}$ , 可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial R_{pv}}{\partial I_L} = \frac{\partial}{\partial I_L} \left[ \frac{V_{pv}}{I_L} \right] = \frac{1}{I_L} \frac{\partial V_{pv}}{\partial I_L} - \frac{V_{pv}}{I_L^2} \\ \frac{\partial^2 R_{pv}}{\partial I_L^2} = \frac{1}{I_L} \frac{\partial^2 V_{pv}}{\partial I_L^2} - \frac{2}{I_L^2} \frac{\partial V_{pv}}{\partial I_L} + \frac{2V_{pv}}{I_L^3} \end{cases} \quad (18)$$

根据式(4)太阳能电池输出状态方程, 可得:

$$V_{pv} = \frac{kAT}{q} \ln \left( \frac{I_{ph} + I_s - I_{pv}}{I_s} \right) \quad (19)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial V_{pv}}{\partial I_L} = -\frac{kAT}{q} \frac{I_s}{I_{ph} + I_s - I_{pv}} < 0 \\ \frac{\partial^2 V_{pv}}{\partial I_L^2} = -\frac{kAT}{q} \frac{I_s}{(I_{ph} + I_s - I_{pv})^2} < 0 \end{cases} \quad (20)$$

由式(20)可判定:

$$\begin{aligned} m_1 &= 3 \frac{\partial R_{pv}}{\partial I_L} + i_L \frac{\partial^2 R_{pv}}{\partial I_L^2} \\ &= \frac{1}{I_L} \frac{\partial V_{pv}}{\partial I_L} + \frac{\partial^2 V_{pv}}{\partial I_L^2} - \frac{V_{pv}}{I_L^2} < 0 \\ m_2 &= \left[ \frac{V_{pv}}{L} - \frac{V_o}{L} + \frac{V_o}{L} \left( 1 - \frac{V_{pv}}{V_o} + k \operatorname{sgn}(S) \right) \right] = \frac{V_o}{L} K \operatorname{sgn}(S), \end{aligned} \quad (21)$$

当  $0 < u < 1$  时, 则当  $S > 0$ , 则  $m_2 > 0$ , 由式(17)、式(21)可得  $\dot{s} < 0$ , 满足  $\lim_{s \rightarrow 0} s \dot{s} \leq 0$ ; 当  $S < 0$ , 则  $m_2 < 0$ , 由式(17)、式(21)可得  $\dot{s} > 0$ , 满足  $\lim_{s \rightarrow 0} s \dot{s} \leq 0$ 。

通过讨论, 可证明所选滑模切换函数  $S$  满足广义滑动模态存在条件  $\lim_{s \rightarrow 0} s \dot{s} \leq 0$ , 存在滑动模态。

### 2.3 基于扰动观察法的 MPPT 算法

扰动观察法(P&O)因其原理简单、易于实现而成为目前最常用的 MPPT 控制方法之一。下面将通过在相同的仿真条件下, 对比滑模控制法和扰动观察法在光伏发电系统最大功率点跟踪中的效果, 分析 2 种方法的优缺点, 验证基于滑模控制的最大功率点跟踪的可行性和优势。

扰动观察法的原理在于周期性的给太阳电池的输出电压或者输出电流施加一定步长的扰动, 比较其输出功率与前一周期输出功率的大小, 若输出功率增加则在下一周期以相同的方向加以扰动, 否则改变扰动的方向<sup>[19]</sup>。流程如图 4 所示。

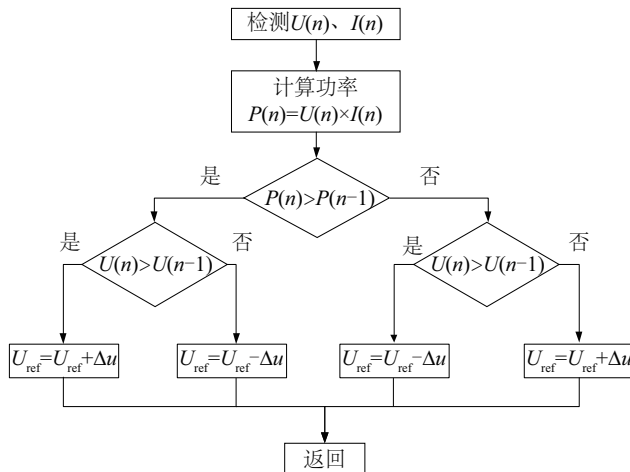


图 4 扰动观察法流程图

Fig. 4 Flow chart of P&O

### 3 仿真与分析

光伏发电系统结构图如图 5 所示。光伏发电系统主要有光伏组件、DC-DC 变换器、MPPT 控制器和负载 4 部分组成, 如果是并网系统, 则需加入逆变器。利用 Matlab/Simulink 建立基于滑模控制的光伏发电系统 MPPT 控制仿真模型。其中, 太阳电池的参数如下: 在标准测试条件下, 最大输出功率为 100 W, 最大功率点电压为  $V_m=17.6$  V, 最大功率点电流为  $I_m=5.68$  A, 开路电压为  $V_{oc}=21.1$  V, 短路电流为  $I_{sc}=6.25$  A; Boost 变换器中的主要参数有: 电感  $L=150$   $\mu$ H, 电容  $C=350$   $\mu$ F, 负载电阻  $R=10$   $\Omega$ 。由于滑模控制中的开关控制普遍存在切换频率不固定的问题, 会引起系统的抖振, 因此将控制信号与三角波进行比较产生频率固定的 PWM 脉冲, 减小系统抖振, 增加系统稳定性。

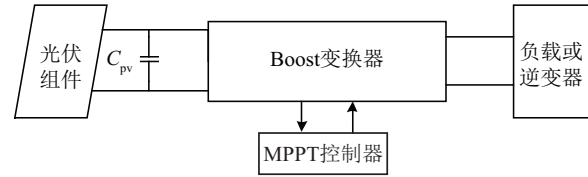


图 5 光伏发电系统结构图

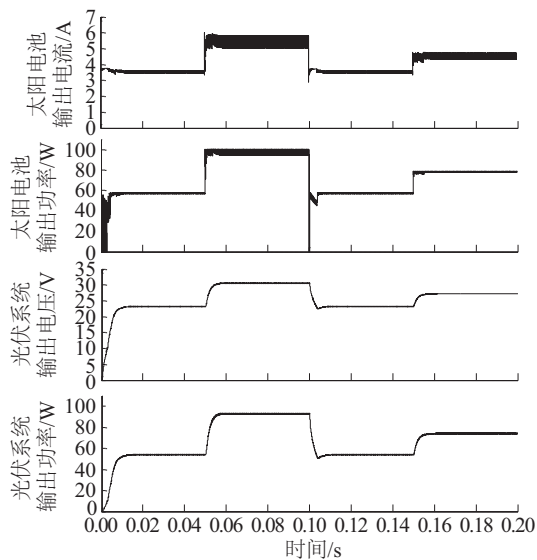
Fig. 5 Photovoltaic system structure

同时建立基于扰动观察法的光伏发电系统 MPPT 控制仿真模型, 其中太阳电池模型、Boost 变换器模型、负载均与基于滑模控制的 MPPT 控制模型相同, 在 Matlab/Simulink 中的仿真环境也相同<sup>[20]</sup>。

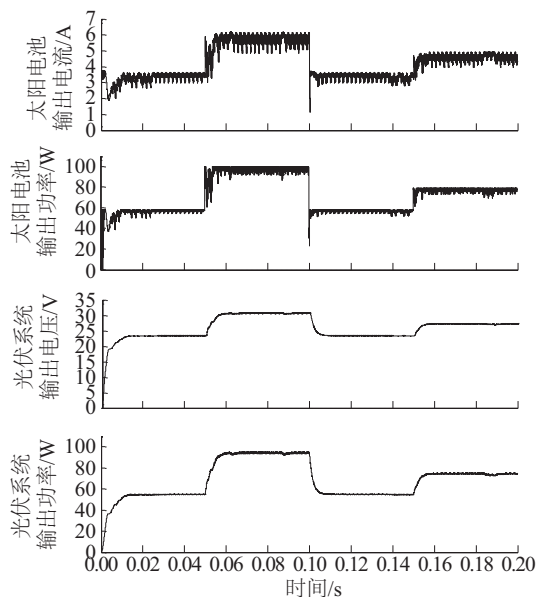
在实际环境条件下, 辐照度通常变化较为频繁, 对整个光伏发电系统的运行影响很大, 因此重点讨论辐照度变化下, 最大功率点跟踪的效果。设置的仿真条件如下: 温度保持 25  $^{\circ}$ C, 仿真时间为 0~0.5 s 时, 辐照度为 600  $\text{W}/\text{m}^2$ ; 当 0.5~1.0 s 时, 辐照度为 1000  $\text{W}/\text{m}^2$ ; 当 1.0~1.5 s 时, 辐照度为 600  $\text{W}/\text{m}^2$ ; 当 1.5~2.0 s 时, 辐照度为 800  $\text{W}/\text{m}^2$ 。在相同仿真条件下, 分别采用滑模控制法和采用扰动观察法, 得到太阳电池输出电流、太阳电池输出功率、光伏系统输出电压、光伏系统输出功率随辐照度变化曲线如图 6 所示。由图 6 可知, 当温度不变、辐照度变化时, 太阳电池输出电流变化很大, 这与太阳电池的输出特性相符。随着辐照度的增加, 太阳电池的最大功率点增加, 并且幅度很大, 这也说明辐照度



对最大功率点的影响较大。对比 2 种方法的仿真结果,可看出,采用扰动观察法时,太阳电池输出功率在最大功率点附近振荡较大;光伏系统跟踪最大功率在环境处于变化时和环境处于稳定时,均出现误跟踪。而采用滑模控制方法,由于滑模控制本身具有的开关特性,会引起太阳电池输出功率产生小幅度、高频率的上下运动,但运行过程中,总体保持平滑稳定;光伏系统跟踪的最大输出功率也保持平稳快速跟踪,整体无波动、无误跟踪;在 0.1 s,



a. 滑模控制法



b. 扰动观察法

图6 温度不变,辐照度变化时光伏系统的仿真波形  
Fig. 6 Simulation waveforms of photovoltaic system in different irradiation and constant temperature

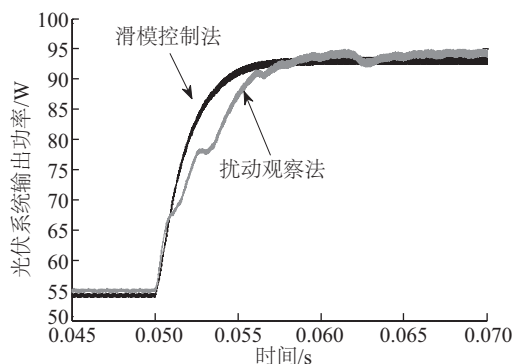
辐照度发生下降时,光伏系统输出功率出现轻微的超调,这是由于滑模控制本身性质所造成的抖振,但由于超调量较小,且光伏系统最大功率点跟踪迅速,对整个系统的影响很小。

表 1 列出采用滑模控制法和采用扰动观察法在辐照度发生变化后,最大功率点跟踪至稳定所需的时间,表明采用滑模控制的 MPPT 算法跟踪速度相对较快。

表 1 温度不变、辐照度变化时 2 种控制方法的跟踪时间

Table 1 Tracking times of the two control methods in different irradiation and constant temperature			
辐照度变化时刻/s	辐照度变化区间/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	扰动观察法追踪时间/s	滑模控制法追踪时间/s
0.00	0~600	0.015	0.009
0.05	600~1000	0.012	0.006
0.10	1000~600	0.009	0.007
0.15	600~800	0.011	0.005

为更直观比较 2 种控制方法的跟踪效果,将光伏系统输出功率、光伏系统输出电压局部放大,并将两者的仿真结果放入同一坐标中,如图 7 所示。在 0.5 s 辐照度从  $600\text{ W/m}^2$  变为  $1000\text{ W/m}^2$  时光伏系统输出功率的局部图,可看出采用扰动观察法,系统在跟踪过程中多次出现误跟踪,在到达新的最大功率点附近后,系统也会出现持续性震荡。采用滑模控制法,在功率跟踪过程中保持平滑,跟踪速度较快,并且在最大功率点处保持稳定无震荡。在辐照度保持在  $600\text{ W/m}^2$  时光伏系统输出电压的局部图,可看出采用滑模控制时,光伏系统输出电压基本保持稳定,波动范围在约  $0.1\text{ V}$  附近,而采用扰动观察法,则出现明显波动。



a. 光伏系统输出功率

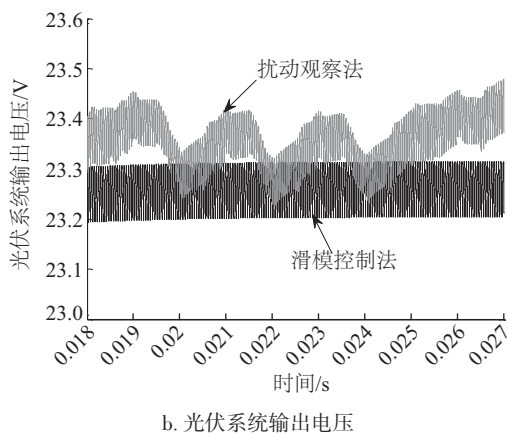


图7 温度不变,辐照度变化时光伏系统仿真波形局部放大图

Fig. 7 Simulation waveforms of local amplification of photovoltaic system in different irradiation and constant temperature

在实际环境中,辐照度经常处于连续、缓慢的变化。为使仿真更具真实性,设计辐照度在连续缓慢变化条件下的最大功率点跟踪情况。图8中,辐照度的变化为正弦函数,变化范围为  $400 \sim 1000 \text{ W/m}^2$ ,周期为  $0.0628 \text{ s}$ 。从图8可看出,采用滑模控制法,最大功率点跟踪全程保持稳定,无明显波动,形成的正弦跟踪波形基本完整;采用扰动观察法,在辐照度较低时,误跟踪现象较为严重,在辐照度较高时,输出功率有明显波动,形成的正弦跟踪波形出现畸变。可看出,滑模控制法在光照缓慢、连续变化条件下具备良好的跟踪能力。

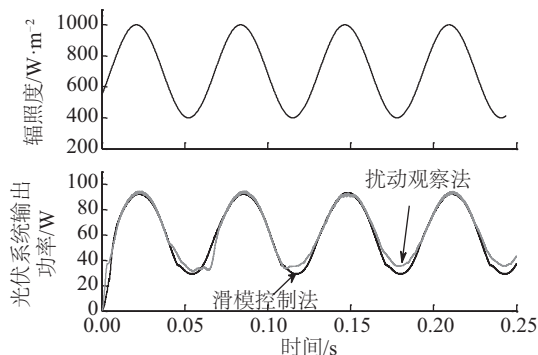


图8 温度不变,辐照度连续变化时光伏系统仿真图

Fig. 8 Simulation waveforms of photovoltaic system as changeable irradiation and constant temperature

为了更清楚说明图8中2种方法对最大功率点跟踪的效果,采用回归统计方法对图8中的数据进行分析。对于一个确定的光伏发电系统,辐

照度固定时,对应的最大功率点也是确定的,因此辐照度和输出最大功率存在相互依赖的定量关系,其统计分析结果见表2。表2中的复相关系数是变量之间线性相关程度,复测定系数用来说明用自变量解释因变量变化的程度,以及同因变量的拟合效果,标准误差用来衡量拟合程度的大小,此值越小,拟合程度越好。根据表中数据可得出,采用滑模控制法,光伏系统输出功率对辐照度变化解释明显,两者相关程度更高,拟合程度更好,说明采用滑模控制法的最大功率点跟踪迅速、稳定性更好。

表2 回归分析结果

Table 2 Results of regression analysis

项目	滑模控制法	扰动观察法
复相关系数	0.9886	0.9727
复测定系数	0.9774	0.9462
调整复测定系数	0.9774	0.9462
标准误差	3.4634	5.0553

由于实际环境运行中,温度因素对光伏系统的整体影响有限。下面通过模拟辐照度不变、温度变化的情况下,采用滑模控制法的MPPT控制系统跟踪太阳电池最大功率点的情况。仿真条件为:辐照度保持  $1000 \text{ W/m}^2$  不变,温度初始设置为  $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $0.05 \text{ s}$  时刻,温度升至  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $0.1 \text{ s}$  时刻,温度降至  $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $0.15 \text{ s}$  时刻,温度升至  $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。光伏发电系统的输出电压、输出功率随温度变化曲线如图9所示。由图9可知,在辐照度不变的情况下,太阳电池表面温度升高时,光伏系统输出电压系降低,光伏系统输出功率同样降低,这与太阳电池的输

出特性相符。对图9中仿真结果分析可得,稳定时的光伏系统输出功率波动约  $1 \text{ W}$ ,光伏系统输出电压波动约  $0.2 \text{ V}$ ,在温度由  $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$  升至  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时最大功率点跟踪的稳定时间为  $0.007 \text{ s}$ ,温度由  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  降至  $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时最大功率点跟踪的稳定时间为  $0.008 \text{ s}$ 。可得出,基于滑模控制的MPPT算法在外界环境温度变化时,系统可快速跟踪到最大功率点,并且稳定工作在该工作点,系统所需的调节时间较少,精度较高,达到较好的控制效果,因此系统也可在辐照度不变、温度变化的条件下实现较好的控制品质。

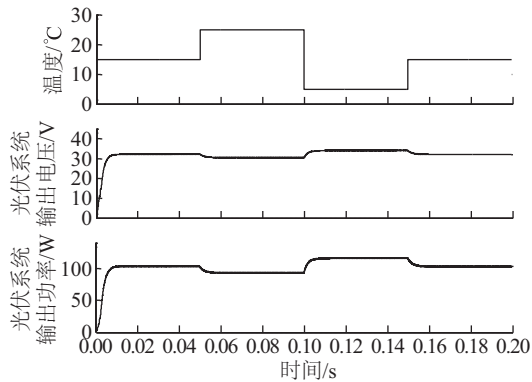


图9 辐照度不变,温度变化时光伏系统的仿真图

Fig. 9 Simulation waveforms of photovoltaic system in different temperature and constant irradiation

## 4 结 论

针对太阳电池最大功率点跟踪技术的研究和应用现状,提出一种基于滑模控制的太阳电池最大功率点跟踪方法,根据太阳电池输出特性,设计滑模面函数,采用等效滑模控制,求解控制函数,并通过李雅普诺夫稳定性分析,证明所设计的滑模状态是存在的。在此基础上对设计的滑模控制方法进行仿真,并通过与现在常用的扰动观察法对比分析表明,该控制方法在外界环境变化的情况下,可实现太阳电池快速、精确的跟踪到最大功率点,且在最大功率点附近保持稳定,稳态精度较高。

### [参考文献]

- [1] 闫云飞, 张智恩, 张 力, 等. 太阳能利用技术及其应用[J]. 太阳能学报, 2012(Sup1): 47—56.
- [1] Yan Yunfei, Zhang Zhien, Zhang Li, et al. Application and utilization technology of solar energy[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2012(Sup1): 47—56.
- [2] Verma D, Nema S, Shandilya A M, et al. Maximum power point tracking (MPPT) techniques: Recapitulation in solar photovoltaic systems[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 54 (9): 1018—1034.
- [3] Zakzouk N E, Elsaharty M A, Abdelsalam A K, et al. Improved performance low-cost incremental conductance PV MPPT technique[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(4): 561—574.
- [4] 吴俊娟, 姜一达, 王 强, 等. 一种改进的光伏系统 MPPT 控制算法[J]. 太阳能学报, 2012, 33(3): 478—484.
- [4] Wu Junjuan, Jiang Yida, Wang Qiang, et al. An improved MPPT control algorithm of PV system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2012, 33(3): 478—484.
- [5] Elbaset A A, Ali H, Sattar A E, et al. Implementation of a modified perturb and observe maximum power point tracking algorithm for photovoltaic system using an embedded microcontroller [J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(4): 551—560.
- [5] 李孝禄, 黄建锋, 王东平, 等. 采用交错并联技术的电动三轮车光伏充电控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 2909—2917.
- [6] Li Xiaolu, Huang Jianfeng, Wang Dongping, et al. Photovoltaic charging control system for electric tricycle by interleaving parallel technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 2909—2917.
- [7] 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.
- [7] Chen Yaai, 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.
- [8] Costabeber A, Carraro M, Zigliotto M. Convergence analysis and tuning of a sliding-mode ripple-correlation MPPT [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 30(2): 1—11.
- [9] Koofgar H R. Adaptive robust maximum power point tracking control for perturbed photovoltaic systems with output voltage estimation [J]. ISA Transactions, 2015, 60: 285—293.
- [10] 徐红伟, 张立彬, 胥 芳, 等. 模糊滑模控制在光伏电池 MPPT 中的应用[J]. 太阳能学报, 2012, 33(5): 789—794.
- [10] Xu Hongwei, Zhang Libin, Xu Fang, et al. Application of fuzzy-sliding control in PV MPPT system [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2012, 33(5): 789—794.
- [11] Bianconi E, Calvente J, Giral R, et al. A fast current-based MPPT technique employing sliding mode control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(3): 1168—1178.
- [12] Shongwe S, Hanif M. Comparative analysis of different single-diode PV modeling methods [J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2015, 5(3): 938—946.
- [13] 何俊强. 基于滑模变结构的光伏并网发电系统 MPPT 算法研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.

- [13] He Junqiang. Study on control algorithm of maximum power point tracking for photovoltaic grid-connected power system based on sliding mode theory[D]. Ji'nan: Shandong University, 2012.
- [14] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [14] Liu Jinkun. Matlab Simulation for sliding mode control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [15] Kolluru V R, Mahapatra K, Subudhi B. Real-time digital simulation and analysis of sliding mode and P&O MPPT algorithms for a PV system[J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2015, 16 (4): 313—322.
- [16] Chu C C, Chen C L. Robust maximum power point tracking method for photovoltaic cells: A sliding mode control approach[J]. Solar Energy, 2009, 83 (8): 1370—1378.
- [17] 贺昱曜. 非线性控制理论及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.
- [17] He Yuyao. Nonlinear control theory and its application [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2007.
- [18] Khemiri N, Khedher A, Mimouni M F. A sliding mode control approach applied to a photovoltaic system operated in MPPT [A]. International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices [C], Hammamet, Tunisia, 2013.
- [19] 李孝禄, 王东平, 李 娟, 等. 利用太阳能实现电动自行车供电的研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(4): 884—890.
- [19] Li Xiaolu, Wang Dongping, Li Juan, et al. Research of supplying electricity for electric bicycle by solar PV [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2016, 37 (4): 884—890.
- [20] 吴 拓, 马海川, 许端平. 滑模变结构控制的功率点跟踪方法及实验[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2015, 34(1): 62—67.
- [20] Wu Tuo, Ma Haichuan, Xu Duanping. Maximum power point tracking method and test for sliding mode variable structure control[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2015, 34(1): 62—67.

## MPPT CONTROL STRATEGY FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEM BASED ON SLIDING MODE CONTROL

Li Xiaolu<sup>1</sup>, Wang Xin<sup>1</sup>, Fang Xiaomin<sup>2</sup>, Huang Jianfeng<sup>1</sup>, Zhu Junjiang<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Mechanical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Quzhou College of Technology, Quzhou 324000, China)

**Abstract:** The existing strategies of maximum power point tracking (MPPT) control for solar cells have some shortages, such as the slow tracking speed, oscillation near the maximum power point, misjudgment when the external environment changes, etc. insufficient, the MPPT control strategy of solar cells based on the sliding mode control is proposed. The sliding mode controller is designed based on the establishment of the DC-DC converter model and the control function is gotten, and the stability and existence are analyzed by the Lyapunov method. The Matlab/Simulink is used to simulate the model of solar cells and verify the feasibility of the sliding mode control strategy. The MPPT model of solar cells is set up based on the perturbation and observation method and then it is compared with the sliding mode control method. The results show that the method has faster tracking speed and more stable tracking precision in the case of the external environment changes, and its self-adaptation and anti-interference are also better.

**Keywords:** maximum power point trackers; sliding mode control; Lyapunov method; solar cells