



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104850166 A

(43) 申请公布日 2015. 08. 19

(21) 申请号 201410706647. 6

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2014. 11. 27

G05F 1/67(2006. 01)

(66) 本国优先权数据

201410438873. 0 2014. 08. 29 CN

(71) 申请人 国家电网公司

地址 100031 北京市西城区西长安街 86 号

申请人 国网辽宁省电力有限公司电力科学  
研究院

(72) 发明人 孙峰 张开 黄旭 林济铿 朱钰

邵宝珠 王刚 张钊 程绪可

禹加 董鹤楠 张潇桐 白雪

(74) 专利代理机构 辽宁沈阳国兴知识产权代理

有限公司 21100

代理人 何学军

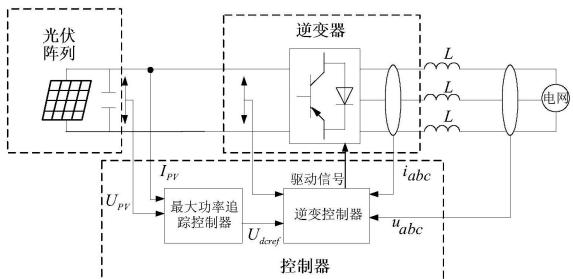
权利要求书1页 说明书8页 附图5页

(54) 发明名称

一种采用滑模层极值搜索控制的光伏发电最  
大功率追踪方法

(57) 摘要

本发明涉及一种采用滑模层极值搜索控制的  
光伏发电最大功率追踪方法，包括有滑模层极值  
搜索控制方法和参数自适应调整方法，所述的滑  
模层极值搜索控制是选用一个滑模层来代替传统  
的开关函数；所述的参数自适应调整方法，是给  
定初始参数后，自发的根据自身调整到最佳参数。  
由于该方法唯一的输入变量是光伏阵列输出的有功  
功率，输出为光伏阵列端口的参考电压，这就无需  
详细的建模就能进行控制，使许多问题简单化。在此  
基础上，选用一个滑模层来代替传统的开关函数，  
减少了开关的高频噪声和功率损耗。最后，在系统  
稳定性的基础上，对于 SM-ESC 参数调  
整的复杂性。



1. 一种采用滑模层极值搜索控制的光伏发电最大功率追踪方法。其特征在于：包括有滑模层极值搜索控制方法和参数自适应调整方法，所述的滑模层极值搜索控制是选用一个滑模层来代替传统的开关函数；所述的参数自适应调整方法，是给定初始参数后，自发的根据自身调整到最佳参数。

2. 根据权利要求书 1 所述的一种采用滑模层极值搜索控制的光伏发电最大功率追踪方法，其特征在于所述的滑模层极值搜索控制方法，是用滑模层函数  $\text{Sat}(\delta, \beta)$  代替传统的开关函数  $\text{Sgn}(\delta)$ ，实现对光伏阵列最大功率点的追踪。

3. 根据权利要求书 1 所述的一种采用滑模层极值搜索控制的光伏发电最大功率追踪方法，其特征在于所述的参数自适应调整方法是通过引进调整因子  $\gamma$ ，使在进行最大功率追踪时，自发的调整到最佳参数。

4. 根据权利要求 1 所述的一种采用滑模层极值搜索控制的光伏发电最大功率追踪方法，其特征在于所述的参数自适应调整方法包括有以下步骤：

①输入参数  $\rho, Z_0, U_0$ ；

②定义参数调整系数  $\gamma$ ：

$$\gamma = \frac{|P_{\max}(t)|}{|P_s(t)|} \quad (22)$$

③判断  $P_s$  是否已经追上  $P_{\max}$ ；；

④如果  $P_s$  已经追上  $P_{\max}$ ，则参数  $\rho, Z_0, U_0$  不变；

⑤如果  $P_s$  没有追上  $P_{\max}$ ，则通过  $\gamma$  调整  $Z_0$  和  $U_0$  从而达到调整  $P_s$  变化率的效果，直至  $P_s$  追上  $P_{\max}$ 。

# 一种采用滑模层极值搜索控制的光伏发电最大功率追踪方法

## 技术领域

[0001] 本发明属于微电网技术领域，涉及光伏发电最大功率追踪新技术方法，减少功率损耗和震荡，降低了寻找最大功率点所用的时间。

## 背景技术

[0002] 近年来，由于地球上矿石能源储量的日益枯竭，以及其大量消耗所带来的温室效应及气象灾害的频繁出现，使得大量发展及高效利用可再生绿色能源成为全世界的热点研究课题。光伏发电作为绿色可再生能源发电的典型代表，提高光能利用效率的出力追踪(MPPT)问题，一直是光伏发电研究的热点课题之一。

[0003] 当前光伏 MPPT 方法有恒定电压跟踪法、扰动观察法和电导增量法等。恒定电压法，控制方法简单，容易实现，但是该方法适应能力较差，不能根据外界环境发生变化而及时调整电压值。适应性较强的扰动观察法 (P&O)，但由于扰动存在，该方法的功率输出不可避免地存在震荡。效率较高的电导增量法，该算法过程较复杂，且对硬件要求较高，当硬件条件不满足要求时会引起较大的震荡和功率损失。基于梯度的极值搜索控制方法，该控制方法简单，容易实现，但该方法需要使用梯度传感器，而梯度传感器往往会放大噪声并且在高频时不稳定。基于摄动的极值搜索控制，由于需采用高通滤波器以滤除直流及低频分量，从而该方法不可避免地会产生时延而降低实际控制效果；同时还因引入激励信号，也不可避免地使得控制系统较复杂化。

## 发明内容

[0004] 本发明针对目前光伏发电系统的最大功率追踪问题，提供了一种采用滑模层极值搜索控制的光伏发电最大功率追踪方法。

[0005] 本发明采用的技术方案是：

[0006] 一种采用滑模层极值搜索控制的光伏发电最大功率追踪方法，包括有滑模层极值搜索控制方法和参数自适应调整方法，所述的滑模层极值搜索控制是选用一个滑模层来代替传统的开关函数；所述的参数自适应调整方法，是给定初始参数后，自发的根据自身调整到最佳参数。

[0007] 所述的滑模层极值搜索控制方法，是用滑模层函数  $\text{Sat}(\delta, \beta)$  代替传统的 开关函数  $\text{Sgn}(\delta)$ ，实现对光伏阵列最大功率点的追踪。

[0008] 所述的参数自适应调整方法是通过引进调整因子  $\gamma$ ，使在进行最大功率追踪时，自发的调整到最佳参数。

[0009] 所述的参数自适应调整方法包括有以下步骤：

[0010] ①输入参数  $\rho$ 、 $Z_0$ 、 $U_0$ ；

[0011] ②定义参数调整系数  $\gamma$ ：

$$[0012] \quad \gamma = \frac{|P_{\max}(t)|}{|P_s(t)|} \quad (22)$$

[0013] ③判断  $P_s$  是否已经追上  $P_{\max}$ ；

[0014] ④如果  $P_s$  已经追上  $P_{\max}$ ，则参数  $\rho$ 、 $Z_0$ 、 $U_0$  不变；

[0015] ⑤如果  $P_s$  没有追上  $P_{\max}$ ，则通过  $\gamma$  调整  $Z_0$  和  $U_0$  从而达到调整  $P_s$  变化率的效果，直至  $P_s$  追上  $P_{\max}$ 。

[0016] 本发明所具有的优点与效果是：

[0017] 本发明属于微电网技术领域，由于当外界环境的温度和光照强度发生变化时，需要调节光伏阵列端口的输出电压，以便使其能一直工作在最大功率点处，即进行最大功率追踪 (MPPT)。如何能使光伏阵列快速到达最大功率点并且能稳定的运行，长期以来是光伏发电研究领域中的一个重要课题。本发明采用基于滑模的极值搜索控制 (SM-ESC) 进行光伏阵列的最大功率追踪，该方法具体过程是通过调节光伏阵列端电压  $U$ ，使得其输出功率  $P_s$  在闭环控制调节下快速地切入由参考输出功率  $P_{sref}$  与实际输出功率  $P_s$  的误差构成加厚滑模面  $\delta$ ，即滑模层  $|\beta|$ ，从而得到最大功率输出；在此基础上，为了回避人为调整控制参数的繁琐，设计了参数自适应调整方法，根据系统实际情况实现控制参数的自动选择最佳。由于该方法唯一需要的输入变量是光伏阵列输出的有功功率，输出为光伏阵列端口的参考电压，这就无需详细的建模就能进行控制，使许多问题简单化。在此基础上，选用一个滑模层来代替传统的开关函数，减少了开关的高频噪声和功率损耗。最后，在系统稳定性的基础上，对于 SM-ESC 参数调整的复杂性，本发明提出了一种自适应参数调整的方法，通过引进调整因子  $\gamma$ ，使在进行最大功率追踪时，自发的调整到最佳参数。在 RTDS 中仿真表明，采用上述方法，既能快速的追踪最大功率，同时又能减少在最大功率点的震荡，证明了本发明的有效性，拥有良好的工程应用前景。本发明首先证明了基于滑模极值 搜索的光伏出力控制策略的稳定性；并提出采用具有更低控制频率及更低控制噪声的滑模层控制函数代替简单的开关控制函数。在此基础上，又进一步提出了控制参数的自适应调整方法，使得控制系统具有较好的控制品质的同时，避免了人为调整参数的繁琐。

[0018] 基于如上综述，本发明提出了采用滑模层极值搜索控制的光伏系统最大功率追踪方法。

## 附图说明

[0019] 图 1 并网光伏发电系统模型；

[0020] 图 2 不同温度下 I-V 曲线图；

[0021] 图 3 不同温度下 P-V 曲线图；

[0022] 图 4 不同光照强度下 I-V 曲线图；

[0023] 图 5 不同光照强度下 P-V 曲线图；

[0024] 图 6 光伏电池等效模型；

[0025] 图 7 逆变器 PWM 控制框图；

[0026] 图 8 SM-ESC 控制结构图；

[0027] 图 9 滑模层函数；

[0028] 图 10 加入滑模层后 SM-ESC 结构图；

- [0029] 图 11 基于 SM-ESC 的逆变器 PWM 控制框图；
- [0030] 图 12 参数自适应调整流程图；
- [0031] 图 13 功率曲线对比图；
- [0032] 图 14  $\text{Sgn}(\delta)$  开关函数波形；
- [0033] 图 15  $\text{Sat}(\delta, \beta)$  函数波形；
- [0034] 图 16 变光照强度功率曲线对比图；
- [0035] 图 17  $U_0$  调整过程；
- [0036] 图 18  $Z_0$  调整过程。

## 具体实施方式

- [0037] 下面结合附图对本发明作进一步详述：
- [0038] 1、光伏系统等效模型实现：
  - [0039] (1) 光伏系统结构及特点：
    - [0040] 如图 1 所示, 光伏发电系统主要由光伏阵列、逆变器、控制器三部分组成, 光伏阵列产生的直流电能, 通过逆变器 (DC/AC) 变换接入电网, 控制器通过采集光伏阵列的直流电压  $U_{PV}$ 、直流电流  $I_{PV}$ 、电网的交流电压  $u_{abc}$ 、交流电流  $i_{abc}$ , 为逆变器提供驱动信号实现最大功率输出及并网。
    - [0041] 光伏发电系统的输出特性受温度和光照强度的影响, 光伏阵列在不同温度  $T_A > T_B > T_C$  条件下的 I-V 和 P-V 曲线图如图 2 和图 3 所示。
    - [0042] 光伏阵列在不同光照强度 ( $S_A < S_B < S_C$ ) 条件下的 I-V 和 P-V 曲线图如图 4 和图 5 所示。
    - [0043] 可以看出, 在某一光照强度和温度下, 只存在惟一的一个电压值使光伏电池输出的功率为最大功率。
    - [0044] (2) 光伏阵列等效模型实现
      - [0045] 太阳能光伏电池单体电压比较小, 约 1.5 伏左右, 无法达到应用要求, 一般工程实践中由光伏电池经过相应的串并联后组成的光伏阵列。
      - [0046] 如图 6 所示, 光伏电池等效模型主要由恒流源 S、二极管 D、并联等效电阻  $R_{sh}$ 、串联等效电阻  $R_s$  构成。
      - [0047] 由基尔霍夫电流定律, 可以推导出光伏电池的输出特性方程为 :
 
$$I = I_L - I_D - I_{sh} = I_L - I_o \left\{ \exp \left[ \frac{(U_{PV} + I_{PV}R_s)}{\alpha U_T} \right] - 1 \right\} - \frac{U_{PV} + I_{PV}R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$
      - [0049] 式中,  $I_L$  为光生电流,  $I_{PV}$  为光伏阵列输出电流,  $U_{PV}$  为光伏电池输出电压,  $\alpha$  为二极管理想化系数,  $U_T$  为二极管端电压,  $I_D$  为二极管正向导通电流,  $I_o$  为二极管反向饱和电流。
      - [0050] 由于 (1) 式中许多参数确定困难, 工程应用不便, 其实用的数学模型为 :
 
$$I_{PV} = I_{sc} - c_1 I_{sc} \left\{ \exp \left[ \frac{U_{PV}}{c_2 U_{oc}} \right] - 1 \right\} \quad (2)$$
      - [0052] 其中,

$$[0053] c_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right) \exp\left(\frac{-U_m}{c_2 U_{oc}}\right)$$

$$[0054] c_2 = \left(\frac{U_m}{U_{oc}} - 1\right) \left[\ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right)\right]^{-1}$$

[0055] 基于厂家所提供的标准测试条件下四个主要参数：开路电压  $U_{ocref}$ 、短路电流  $I_{scref}$ 、最大功率点电压  $U_{mref}$  和最大功率点电流  $I_{mref}$ ，通过引入相应的补偿系数对四个参数进行修正，就可以推算得到实际环境温度即光照强度下的开路电压  $U_{oc}$ 、短路电流  $I_{sc}$ 、最大功率点电压  $U_m$  和最大功率点电流  $I_m$ ：

$$[0056] \begin{cases} I_{sc} = I_{scref} \frac{S}{S_{ref}} (1 + \alpha \Delta T) \\ U_{oc} = U_{ocref} \ln(e + b \Delta S) (1 - c \Delta T) \\ I_m = I_{mref} \frac{S}{S_{ref}} (1 + \alpha \Delta T) \\ U_m = U_{mref} \ln(e + b \Delta S) (1 - c \Delta T) \end{cases} \quad (3)$$

[0057] 式中， $S_{ref} = 1000 \text{W/m}^2$  为标准测试条件下光照强度； $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$  为标准测试条件下电池温度； $S$  为光照强度； $T$  光伏电池温度； $\Delta S = S - S_{ref}$  为光照强度变化量； $\Delta T = T - T_{ref}$  为电池温度变化量； $e$  为自然对数的底数，其值约为 2.71828；补偿系数  $a, b, c$  为常数。根据大量实验数据拟合，其典型值推荐为  $a = 0.0025/\text{^\circ C}$ ,  $b = 0.0005/(\text{W/m}^2)$ ,  $c = 0.00288/\text{^\circ C}$ 。

[0058] 光伏阵列模块由  $N_p \times N_s$  块光伏电池封装而成， $N_s$  为串联电池个数， $N_p$  为并联组数。则光伏阵列的数学模型为：

$$[0059] I_{PV} = N_p I_{sc} - c_1 N_p I_{sc} \left\{ \exp\left[\frac{U_{PV}}{c_2 N_s U_{oc}}\right] - 1 \right\} \quad (4)$$

[0060] 光伏电池的最佳输出功率  $P_{max}$  理论计算值：

$$[0061] P_{max} = U_m \times I_m \quad (5)$$

[0062] (3) 逆变器等效模型实现

[0063] 图 1 中的逆变器，在 dq 旋转坐标系下，采用电网电压定向的控制策略，即将同步旋转 dq 坐标系 d 轴方向定在与电网电压矢量  $u_s$  相同的方向上，相应得到：

$$[0064] \begin{cases} u_d = u_s \\ u_q = 0 \end{cases} \quad (6)$$

[0065] 光伏发电系统输出电压与电流之间的数学关系为：

$$[0066] \begin{cases} \dot{u}_d = L \frac{di_d}{dt} - \omega L i_q + u_s \\ \dot{u}_q = L \frac{di_q}{dt} + \omega L i_d \end{cases} \quad (7)$$

[0067] 式中， $L$  是等效电感， $\omega$  是电网角速度， $u_d'$  为逆变器交流侧电压 d 轴分量， $u_q'$  为逆变器交流侧电压 q 轴分量。

[0068] 逆变器向电网注入功率表达式为：

$$[0069] \quad \begin{cases} P = u_d i_d + u_q i_q = u_s i_d \\ Q = u_q i_d - u_d i_q = -u_s i_q \end{cases} \quad (8)$$

[0070] 式中,  $u_d$ 、 $u_q$  分别为电压的 d、q 轴分量;  $i_d$ 、 $i_q$  分别为电流的 d、q 轴分量; 可以看出, 有功、无功功率由电流的 d、q 轴分量决定, 相应地, 若分别控制 d 轴、q 轴电流就实现了功率的解耦控制。逆变器控制结构如图 7 所示。

[0071] 图 7 中, DC/AC 逆变控制采用双闭环前馈解耦控制策略, 外环控制电压, 内环控制电流。电压外环的作用是控制直流母线电压, 将电压给定值与反馈值作差, 进行 PI 调节后输出作为 d 轴电流的给定值; 电流内环的作用是使变流器的交流电流能够跟踪给定电流, 其中 d 轴分量控制直流电压的大小, q 轴控制功率因数。在单位功率因数并网中, q 轴电流给定值应被设置为零。

[0072] 2. 滑模层极值搜索的最大功率追踪

[0073] (1) 滑模极值搜索

[0074] 已知在某一光照强度和温度下, 只存在惟一的一个光伏阵列输出电压使输出的功率为最大功率。因此, 最大功率点追踪可以转化为追踪光伏阵列输出电压 U 的最优值  $U^*$  使得输出的功率  $P_s$  最大, 即

$$[0075] \quad U^* = \text{Argmax}_{P_s}(U) \quad (9)$$

[0076] 传统的自适应控制方法, 需要预先给定参考轨迹, 而极值搜索控制 (Extremum Seeking Control – ESC) 无需对系统进行详细的建模, 只需监测某些状态量, 通过反馈给控制系统就能实现对系统的精准控制。本发明采用基于滑模的极值搜索控制策略 (SM-ESC)。

[0077] SM-ESC 应用于光伏发电系统 MPPT 时, 其输入量为光伏系统输出的功率  $P_s$ , 输出量为光伏系统直流侧的参考电压值  $U_{dcref}$ , 其控制结构图如图 8 所示。

[0078] 图 8 中,  $P_s$  为光伏发电系统发出的有功功率;  $P_{sref}$  为递增函数 (中间变量);  $U_{dcref}$  为逆变器直流电容侧参考电压;  $\text{Sgn}(\delta)$  为符号函数。图 8 各个框图的输入和输出之间的函数关系分别为:

$$[0079] \quad \delta = P_{sref} - P_s \quad (10)$$

$$[0080] \quad u = \frac{1}{U_0} \frac{dU_{dcref}}{dt} \quad (11)$$

$$[0081] \quad \text{Sgn}(\delta) = \begin{cases} 1, \delta > 0 \\ 0, \delta = 0 \\ -1, \delta < 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$[0082] \quad \frac{dP_{sref}}{dt} = \rho - Z_0 \text{Sgn}(\delta) \quad (13)$$

[0083] 其中:  $\rho$ 、 $Z_0$ 、 $U_0$  是正的常数, 应满足约束条件

$$[0084] \quad \begin{cases} Z_0 >> U_0 \\ Z_0 >> \rho \end{cases} \quad (14)$$

[0085] 命题: 图 8 所示的光伏发电系统出力追踪控制系统是稳定的。

[0086] 证明: 由式 (10),  $\delta$  对时间 t 求一阶导数得到:

[0087]  $\frac{d\delta}{dt} = \frac{dP_{sref}}{dt} - \frac{dP_s}{dt} = \rho - Z_0 \operatorname{Sgn}(\delta) - U_0 \frac{dP_s}{dU_{dcref}} \operatorname{Sgn}(\delta) \quad (15)$

[0088] 为了证明系统的稳定性,选定 Lyapunov 方程为 :

[0089]  $V(t) = \frac{1}{2}\delta^2 \quad (16)$

[0090] 则  $V(t)$  对时间的一阶导数为 :

[0091] 
$$\begin{aligned} \frac{dV(t)}{dt} &= \delta \frac{d\delta}{dt} = \delta \left[ \rho - Z_0 \operatorname{Sgn}(\delta) - U_0 \frac{dP_s}{dU_{dcref}} \operatorname{Sgn}(\delta) \right] \\ &= \delta \rho - Z_0 |\delta| - U_0 \frac{dP_s}{dU_{dcref}} |\delta| \leq \left[ \rho - Z_0 - U_0 \frac{dP_s}{dU_{dcref}} \right] |\delta| \end{aligned} \quad (17)$$

[0092]  $P_s$  为光伏阵列的输出功率,当光伏阵列工作在最大功率点附近时,  $dP_s/dU_{dcref} \approx 0$ ,再结合式 (14),选择合适的  $Z_0, U_0$  不难推得 :

[0093]  $\rho - Z_0 - U_0 \frac{dP_s}{dU_{dcref}} < 0 \quad (18)$

[0094] 即  $dV(t)/dt < 0$ ,表明在该控制策略下系统是稳定的。

[0095] 命题得证。

[0096] 式 (18) 表明基于图 8 的控制策略是单调稳定的,且稳定于  $\delta = 0$  即  $P_s = P_{sref}$ 。当  $P_s < P_{sref}$  时,  $U_{dcref}$  在  $U^*$  左边,  $\operatorname{Sgn}(\delta) = 1$ ,  $U_{dcref}$  增大, 相应的  $P_s$  增大趋向其最大值; 当  $P_s > P_{sref}$  时,  $U_{dcref}$  在  $U^*$  右边,  $\operatorname{Sgn}(\delta) = 1$ ,  $U_{dcref}$  减小, 相应的  $P_s$  增大趋向其最大值。当  $P_s$  为其最大值时,光伏阵列输出电压为最佳值  $U^*$ 。

[0097] (2) 滑模层

[0098] 上述控制过程可以知道,在整个调节过程中,具有很高控制频率的  $\operatorname{Sgn}(\delta)$  开关函数控制是其关键,而很大的开关频率控制的实际实现是比较困难的;且进行大的开关频率控制除了会引入开关噪声外,还会引起额外的功率损耗。为了克服这个缺点,引入滑模层函数来代替开关函数  $\operatorname{Sgn}(\delta)$  的功能,其函数关系如图 9 所示:

[0099]  $\operatorname{Sat}(\delta, \beta) = \begin{cases} 1, & \delta > \beta \\ \frac{\delta}{\beta}, & \delta \leq |\beta| \\ -1, & \delta < -\beta \end{cases} \quad (19)$

[0100] 该函数将空间区域分成了三个部分,分别是  $\delta > \beta$ ,  $\delta < -\beta$  和  $\delta \leq |\beta|$ ,这里  $\delta \leq |\beta|$  叫做滑模层。可以看出相当于加厚了滑模面,选定合适的  $\beta$  可以使系统快速的进入稳定,并相应的减少震荡。应用滑模层后的 SM-ESC 控制框图和应用 SM-ESC 的逆变器 PWM 控制框图分别如图 10 及图 11 所示。

[0101] 3、参数自适应调整

[0102] 由于参数  $\rho, Z_0, U_0$  的取值直接决定了该控制方法的控制效果,而满足式 (14) 及式 (18) 的参数仅能够保证控制系统最终是稳定的,从控制系统的控制品质而言,却并不一定是最优参数。因此如何在满足式 (14) 及式 (18) 的基础上,最优地选择这三个参数使系统具有很好的控制品质,通常方法是针对既定光照强度和温度,采用仿真的方法,进行反复

地人为参数调整,而得到具有比较好的控制品质的参数;而当系统结构及光照强度和温度发生变化时,又要进行相应的调整,因此非常繁琐。

[0103] 为此,进一步提出了对  $\rho$ 、 $Z_0$ 、 $U_0$ 三个参数进行自适应调整的策略。

[0104] 由图 8 可得:

$$[0105] \frac{dP_s}{dt} = U_0 \frac{dP_s}{dU_{dcref}} \text{Sgn}(\delta) \quad (20)$$

[0106] 相应地,  $dP_s/dt \propto U_0$ , 即  $U_0$  越大则  $dP_s/dt$  也越大, 相应  $P_s$  变化越快; 当  $U_0$  越小, 则  $P_s$  变化越慢。再由式 (13) 及式 (14) 可知,

$$[0107] dP_{sref}/dt = \rho - Z_0 \text{Sgn}(\delta) \approx -Z_0 \text{Sgn}(\delta) \quad (21)$$

[0108] 从而,  $dP_{sref}/dt \propto Z_0$ , 即  $Z_0$  越大, 则  $P_{sref}$  变化越快, 相反则  $P_{sref}$  变化越慢。由于系统稳定条件是  $P_s = P_{sref}$ , 且在此时  $P_s = P_{max}$ , 即意味着  $P_{sref}$  诱导  $P_s$  追踪  $P_{max}$  的变化, 因此可以得到以下结论:

[0109] 1) 由  $dP_{sref}/dt \propto Z_0 \Rightarrow dP_s/dt \propto Z_0$ ;

[0110] 2)  $P_s$ 、 $P_{max}$  之间的相对变化率, 即决定了  $P_s$  追踪  $P_{max}$  过程的动态品质

[0111] 因此,  $P_s$  和  $P_{max}$  之间的比值即可作为参数调整的一个因子, 使得在  $P_s$  追踪  $P_{max}$  的过程中, 快速稳定在最大功率处, 而得到比较好的系统控制品质。本文进而提出了如下的参数自适应调整策略:

[0112] 定义参数调整系数  $\gamma$ :

$$[0113] \gamma = \frac{|P_{max}(t)|}{|P_s(t)|} \quad (22)$$

[0114] 其中  $P_s(t)$  为时刻  $t$  光伏发电系统实际输出功率,  $P_{max}(t)$  为在光照强度和温度一定的情况下根据式 (5) 计算出额最大功率输出时候的功率;

[0115] 在功率追踪过程中, 参数  $Z_0$  和  $U_0$  的调整规则是:

$$[0116] \begin{cases} Z_0 = Z_0 \times \gamma, U_0 = U_0 \times \gamma \\ Z_0, U_0, \rho \end{cases} \quad (23)$$

[0117] 式中  $\rho$ 、 $Z_0$ 、 $U_0$  满足式 (14) 和式 (18)。当  $P_s(t)$  的变化快于  $P_{max}(t)$  时, 由式 (22) 可知,  $\gamma < 1$ , 通过式 (23) 使得  $U_0$ 、 $Z_0$  变小, 相应减小  $P_s(t)$  的变化率; 当  $P_s$  变化慢于  $P_{max}$  时, 由式 (22) 可知  $\gamma > 1$ , 通过式 (23) 使得  $U_0$ 、 $Z_0$  增大, 相应增大  $P_s(t)$  的变化率。当  $P_s$  与  $P_{max}$  同步变化时,  $\gamma = 1$ , 参数保持不变。

[0118] 参数具体调节流程图如图 12。

[0119] 上图中,  $\xi$  为比较小的槛值, 若  $P_s$  已经追上  $P_{max}$ , 此时应锁住相应参数, 否则, 由于此时系统状态已经接近滑模面  $\delta = P_s - P_{sref}$ , 若再对参数进行调整, 叠加额外的扰动, 而放大其扰动相应延长过度到平稳状态的时间。

[0120] 4、仿真应用

[0121] 将该方法应用于 RTDS 仿真实验平台上搭建光伏发电系统, 系统控制原理如图 11 所示, 光伏电池板的参数如表 1 所示, 实验采用 50 个光伏板的串联为一组, 一共 20 组进行并联。初始参数  $\rho$ 、 $Z_0$ 、 $U_0$  分别为: 0.052、1.75、0.03, 光照强度和温度, 分别为  $T = 25^\circ\text{C}$ ,  $S = 1000\text{W/m}^2$ , 进行仿真实验。

[0122] 表 1 光伏电池板的参数

[0123]

参 数	开路电压 $U_{oc}/(V)$	短路电 流 $I_{sc}/(A)$ )	最大功率 点电压 $U_{mref}/(V)$	最大功率 点电流 $I_{mref}/(A)$
	21.7	3.35	17.4	3.05

[0124] 分别采用电导增量法 (INC)、无参数调整的 SM-ESC 和有参数调整的 SM-ESC 方法，光伏系统输出功率曲线如图 13 所示。

[0125] 从图 13 中可以看出电导增量法 (INC) 波动虽然能够快速的到达最大功率点，但是在最大功率点处震荡大，不能较好的稳定在最大功率点处。本发明提出的有参数调整的 SM-ESC 相对于无参数调整的 SM-ESC 能够较快速的稳定在最大功率点，并且有较小的超调，震荡也小，当在稳态时，局部放大图如上，可以看出本发明采取的方法稳态震荡损失比其他两种方法要小很多。

[0126] 图 14 和图 15 分别是采用开关函数  $Sgn(\delta)$  和本文采用的滑模层函数  $Sat(\delta, \beta)$  的开关输出信号。可以看出，开关函数  $Sgn(\delta)$  在整个调节过程中一直在 -1 和 1 之间高频率的震荡，而采用  $Sat(\delta, \beta)$  函数，在调节过程中在 -1 和 1 之间震荡，当达到稳态时，开关函数输出信号只在 0 周围进行小幅度的波动。这是因为采用滑模层函数，相当于加厚了滑模面，以至于当接近滑模面时，不至于使其穿过滑模面而引起开关函数的改变。这就减少了开关损耗和高频噪声。

[0127] 图 16 是在改变光照条件下有参数调整和无参数调整的功率时间图，当  $T = 25^{\circ}C$ ， $S = 1000W/m^2$  稳定时，在  $t = 1s$  的时候突然光照强度从  $S = 1000W/m^2$  变化到  $S = 600W/m^2$ ，持续时间 800ms，然后又变化到  $S = 1000W/m^2$ ，在这个变化过程中，温度始终保持不变。可以看出，当环境发生变化时，两种方法都能找到最大功率点并稳定在最大功率点处，但是，本发明所提出的方法震荡更小一些，超调量也更小一些。

[0128] 图 17 和图 18 是采用参数自适应调整的 SM-ESC 中  $Z_0$  和  $U_0$  的变化，通过参数的自适应调整， $Z_0$ 、 $U_0$  从初始值 0.03、1.75 调整为 0.02 和 1.25。

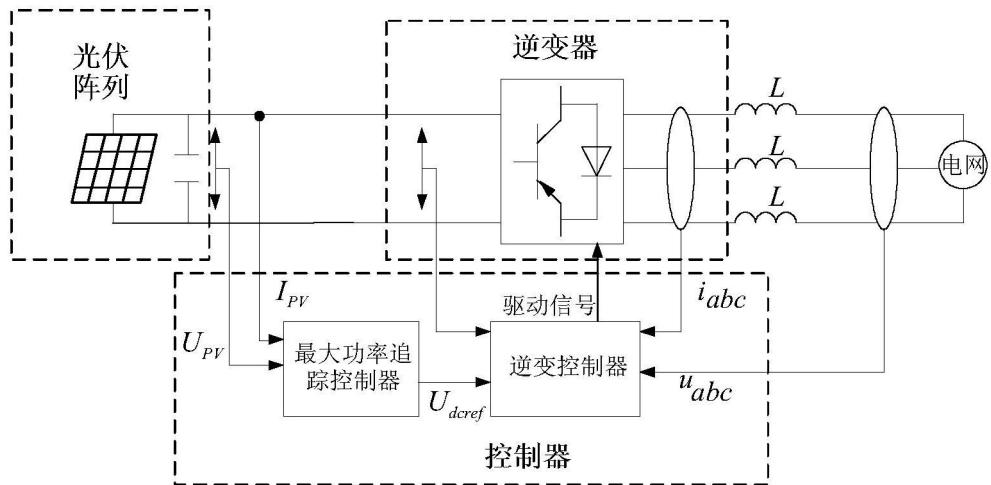


图 1

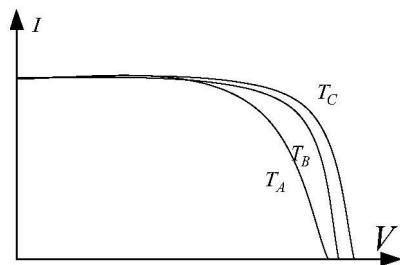


图 2

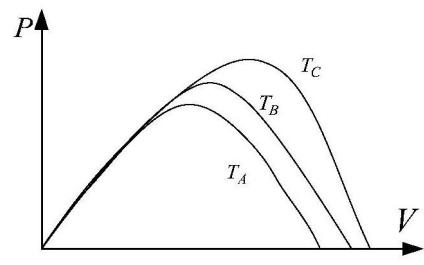


图 3

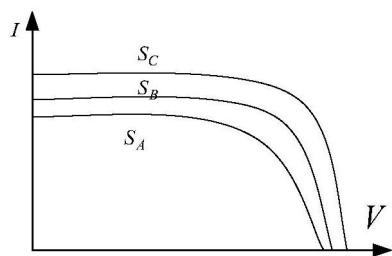


图 4

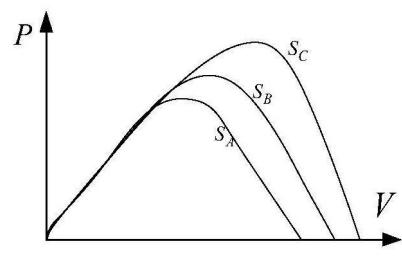


图 5

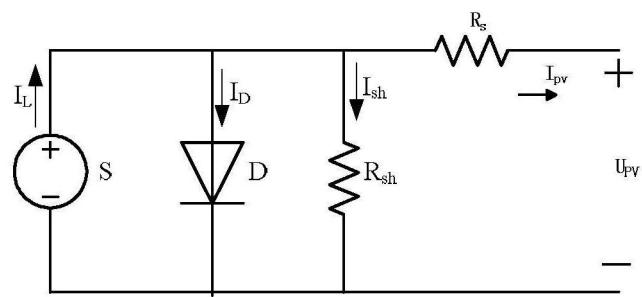


图 6

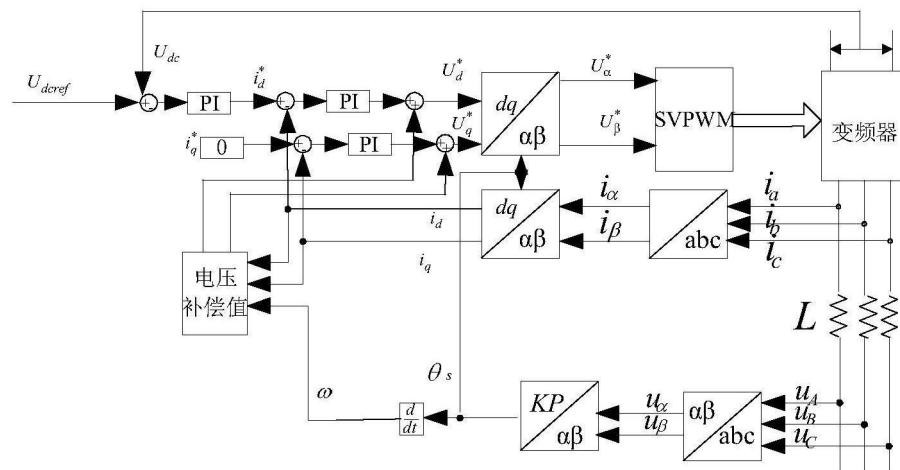


图 7

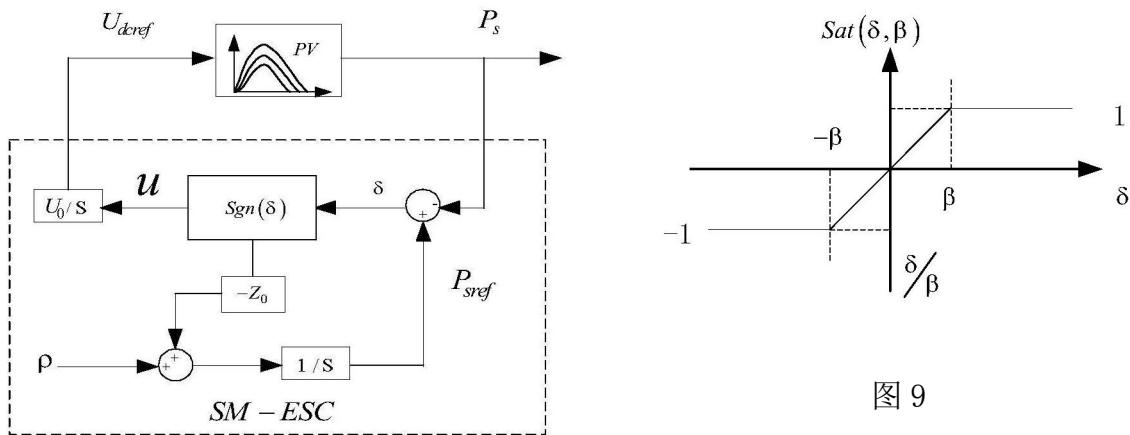


图 9

图 8

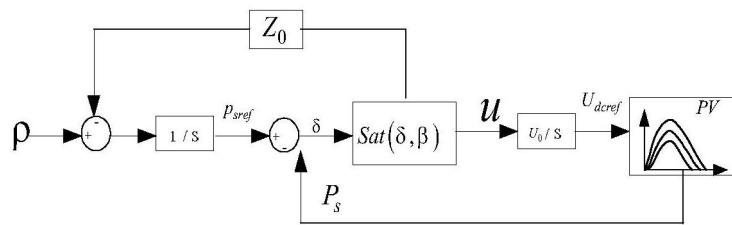


图 10

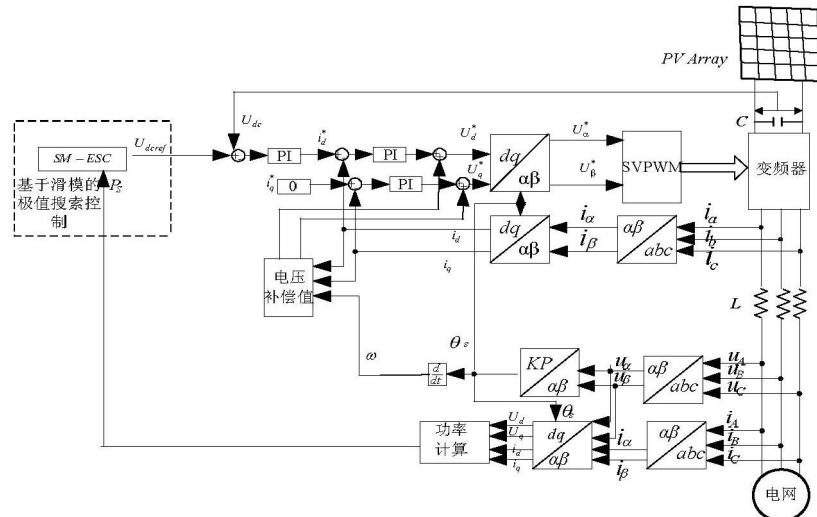


图 11

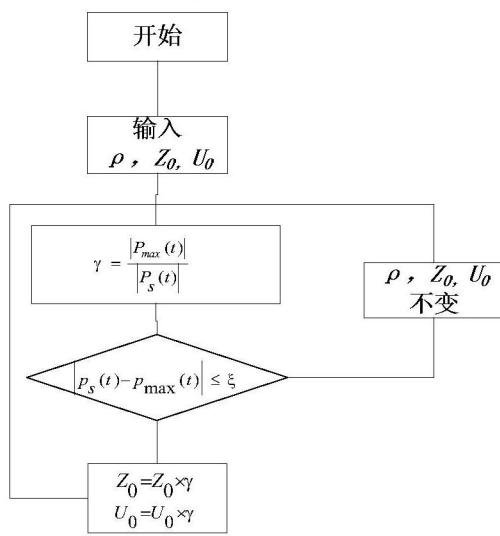


图 12

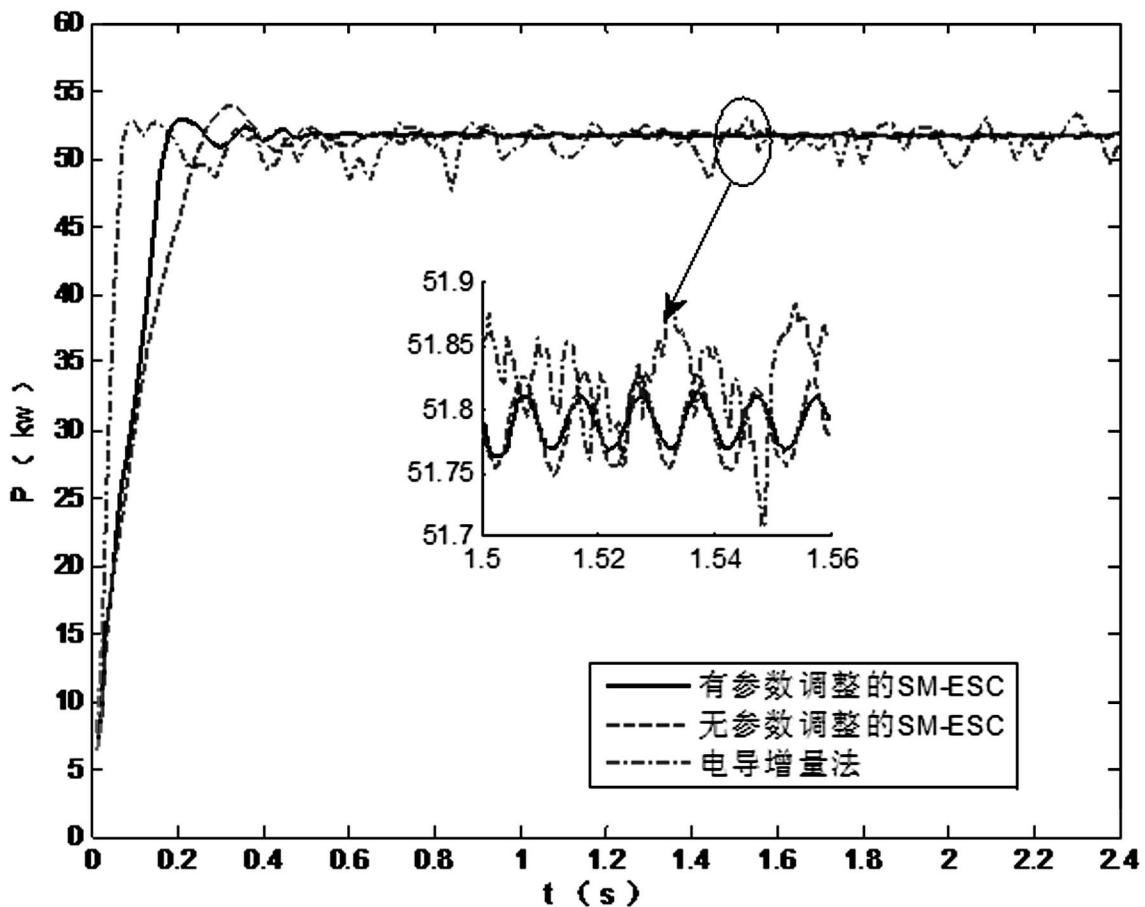


图 13

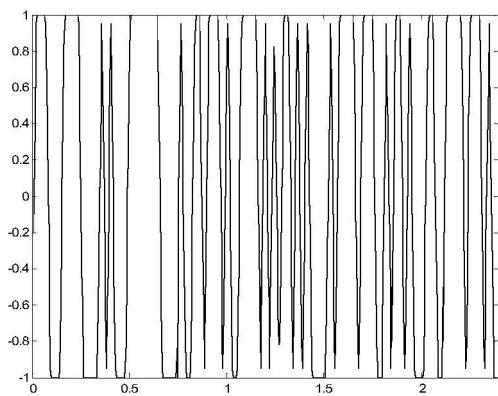


图 14

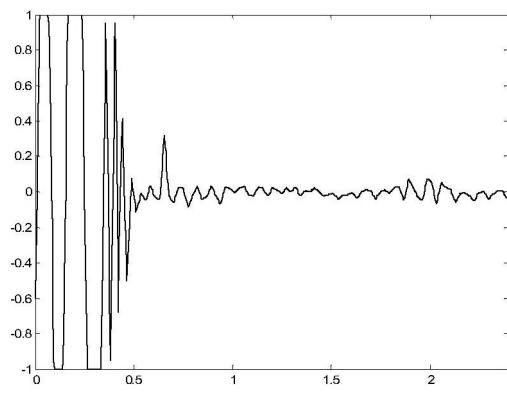


图 15

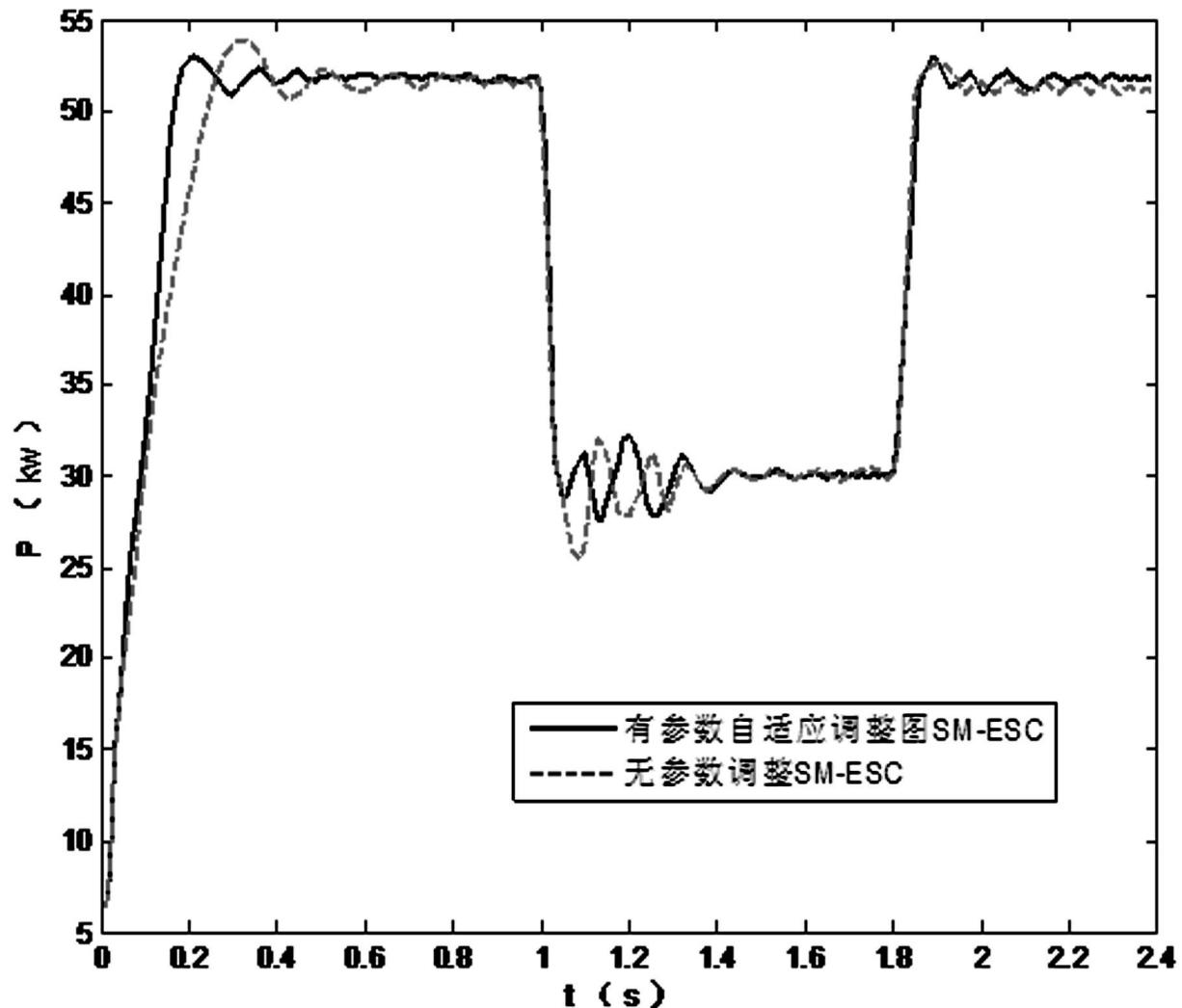


图 16

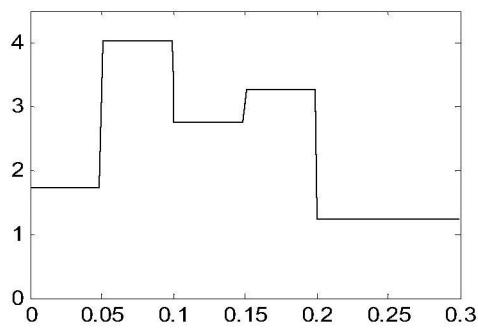


图 17

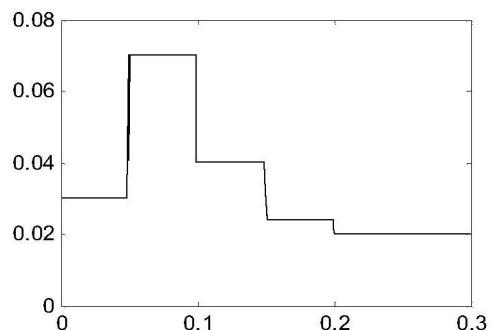


图 18