

线性自抗扰在光伏发电系统 MPPT 中的应用

高志强¹, 李松¹, 周雪松¹, 马幼捷¹, 石雪琦²

(1. 天津理工大学天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室, 天津 300384;
2. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 为了保证光伏发电系统能够快速达到最大功率点并且能够稳定运行, 设计了一种基于线性自抗扰控制(LADRC)的最大功率点跟踪(MPPT)控制器。建立了光伏电池与 DC-DC 变换器相结合的数学模型。设计了 1 阶 LADRC 对其进行解耦控制, 目的是能够快速确定光伏电池阵列的最优输出电压, 减少功率振荡。分析了 MPPT 控制器的设计原理。为了验证所设计的 MPPT 控制器的实效性与普通性, 通过 Matlab/Simulink 进行了仿真研究。仿真实验表明, 加入所设计的 MPPT 控制器, 能够明显提高算法的跟踪速度, 大大降低功率振荡, 即使在外界环境变化剧烈的情况下, 也能表现出良好的控制能力, 通用性很强。

关键词: 光伏发电; 最大功率点跟踪; 线性自抗扰控制; 控制器; 功率振荡

Design of MPPT controller for photovoltaic generation system based on LADRC

GAO Zhiqiang¹, LI Song¹, ZHOU Xuesong¹, MA Youjie¹, SHI Xueqi²

(1. Tianjin Key Laboratory for Control Theory and Application in Complicated Systems, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to ensure that the photovoltaic generation system can reach the maximum power point quickly and operate stably, a Maximum Power Point Tracking (MPPT) controller based on Linear Auto-Disturbance Rejection Control (LADRC) is designed. This paper establishes a mathematical model of photovoltaic cell and DC-DC converter. The first order LADRC is designed to decouple and control, for the purpose of determining the optimal output voltage of the photovoltaic cell array and reducing power oscillation quickly. The design principle of MPPT controller is analyzed. In order to verify the effectiveness and universality of the MPPT controller designed, simulation experiments are carried out by MATLAB/Simulink. Simulation results show that the MPPT controller can improve the tracking speed of the algorithm and reduce the power oscillation significantly. Even if the external environment fluctuates violently, it can still show good control ability and universality.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50877053) and Natural Science Foundation of Tianjin (No. 09JCYBJC07100).

Key words: photovoltaic generation; MPPT; LADRC; controller; power vibration

0 引言

随着能源危机的逐日加重, 光伏发电作为可再生能源发电方式之一, 其开发和利用已经受到世界各国的重视^[1-2]。光伏发电虽然具有清洁环保、方便维护和安装简单等优点, 但也同时具有随机性、间歇性和光能利用率低等缺点。由于光伏电池输出电

压、电流会受到外界环境因素(光照强度、环境温度等)的影响, 因此 MPPT 控制就成为了光伏发电并网系统中的一个至关重要的环节。MPPT 即检测当前工况下光伏电池的最大输出功率, 通过调节当前的阻抗情况来实现最大功率输出要求, 尽可能地提高光能利用率。由此可以看出, MPPT 控制策略的研究与应用具有重要意义。

最早出现的 MPPT 跟踪方法有恒定电压法(CVT)、开路电压比例系数法和短路电流比例系数法。文献[3-4]对这三种方法进行了介绍。但从严格

意义上来讲, 这三种方法只是利用近似的线性关系来控制, 并没有真正意义上实现 MPPT。当外界环境变化剧烈时, 光伏电池阵列偏离最大功率点, 造成功率损失。文献[5-6]介绍了观测扰动法(P&O)和电导增量法(INC)。由于电压扰动量的存在, P&O 算法在追踪最大功率点时必然会出现功率振荡问题。另外, 当光照发生突变时 P&O 算法会误判, 最终导致电压崩溃。INC 算法一定程度上降低了功率振荡, 但是实际应用中传感器的精度要求比较高, 因此整个系统的造价也会很高。文献[7-11]提出了基于现代控制理论的智能控制法: 模糊逻辑控制法、神经网络法和滑模控制法。但这些控制方法算法执行难度大且需要高性能的控制器。文献[12]提出了最优电压法(OVC), OVC 算法对光伏电池阵列的非线性代数方程求解出最优电压, 然后再与当前的输出电压比较, 从而实现 MPPT, 该算法计算复杂, 跟踪速度慢。文献[13]介绍了曲线拟合法, 该方法在建立模型时需要进行大量的拟合运算, 从而加大了算法的执行难度, 误差较大, 控制电路比较复杂。综上, 我们可以概括出现有 MPPT 控制算法的几个缺点: 功率振荡、误判、跟踪速度慢、算法执行难度大、工程造价高、控制电路复杂等。

ADRC 是一种非线性控制理论^[14], 主要由安排过渡过程(Arranging Transient Dynamics)、非线性误差反馈控制率(NLESO)和扩张状态观测器(ESO)三部分组成, 具有响应速度快、超调小和鲁棒性强等优点。本文设计了一种基于 LADRC^[15]的 MPPT 控制器(以下统称为 MPPT 控制器)。首次将 LADRC 应用到 MPPT 中, 有效地提高了跟踪速度和光能利用率。实验验证了 MPPT 控制器的有效性与普适性。

1 光伏电池特性

光伏电池的等效电路图如图 1 所示, 输出特性方程用式(1)和式(2)描述^[16-17]。

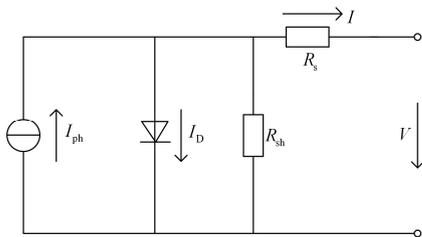


图 1 光伏电池等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of PV cell

$$I = I_{ph} - I_D - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$I_D = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q}{nkT} (V + IR_s) \right] - 1 \right\} \quad (2)$$

式中: I 为光伏电池输出电流; V 为光伏电池输出电压; I_{ph} 为光生电流; I_D 为流过二极管的电流; R_s 为等效串联电阻; R_{sh} 为等效并联电阻; I_0 为反向饱和电流; q 为电子电荷量($1.6 \times 10^{-19} \text{ C/m}^2$); n 为二极管特性因子; k 为玻尔兹曼常数($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$); T 为光伏电池热力学温度($T = 273.15 + t$, t 为摄氏度)。

不同温度不同辐照度下的光伏电池的 I-V 特性曲线如图 2 所示; P-V 特性曲线如图 3 所示。从图中可以看出, 光伏电池输出具有很强的非线性和时变性。光照强度对光伏电池短路电流影响较大; 温度对光伏电池开路电压影响较大。

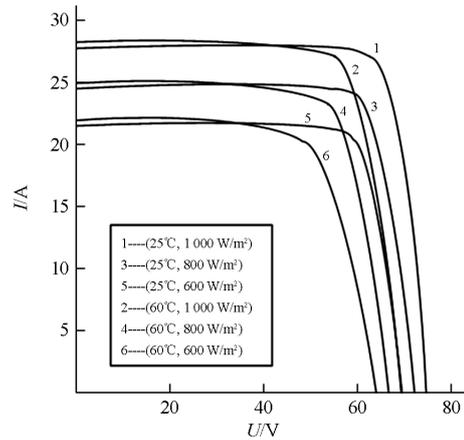


图 2 光伏电池 I-V 特性曲线

Fig. 2 I-V characteristic curve of PV cell

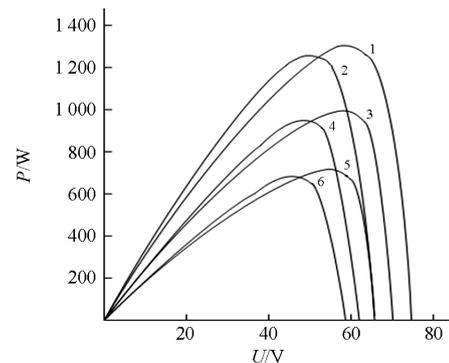


图 3 光伏电池 P-V 特性曲线

Fig. 3 P-V characteristic curve of PV cell

2 光伏系统建模与 MPPT 控制器设计

2.1 光伏系统建模

现有新能源发电系统都是采用电源转换装置 DC/DC、DC/AC 接入配电网^[18]。本文以光伏系统采用 Boost 变换器为例, 建立光伏电池与 Boost 变换器

相结合的数学模型。光伏系统电路结构如图4所示。

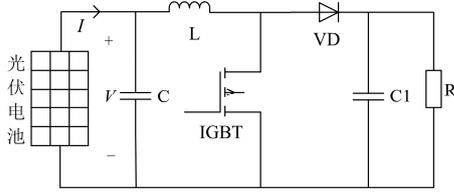


图4 光伏系统结构图(Boost 变换器)

Fig. 4 Architecture of PV system with Boost converter

利用状态平均法对系统进行建模^[19], 根据KCL、KVL定律可以得出

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{式中: } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -1/C & 0 \\ 1/L & -R/L & (d-1)/L \\ 0 & (1-d)/C_1 & -1/(RC_1) \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1/C \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{x} = \begin{bmatrix} V \\ i_L \\ V_0 \end{bmatrix}.$$

式中: V 为光伏电池输出电压; I 为光伏电池输出电流; i_L 为电感电流; V_0 为负载电压; d 为占空比; L 为电感值; C 和 C_1 为电容值; R 为负载值。

为了求解 Boost 变换器的小信号动态方程, 在其稳态工作点附近加入扰动, 令瞬时值为

$$\begin{cases} V = \bar{V} + \hat{V} \\ I = \bar{I} + \hat{I} \\ V_0 = \bar{V}_0 + \hat{V}_0 \\ i_L = \bar{i}_L + \hat{i}_L \\ d = \bar{d} + \hat{d} \end{cases} \quad (4)$$

式中: \hat{V} 、 \hat{I} 、 \hat{V}_0 、 \hat{i}_L 、 \hat{d} 为扰动量; \bar{V} 、 \bar{I} 、 \bar{V}_0 、 \bar{i}_L 、 \bar{d} 为稳态时的值。将式(4)代入式(3)中, 忽略变量的乘积, 便可得 Boost 变换器的小信号动态方程^[20]为

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\hat{\mathbf{u}} + \mathbf{F}\hat{\mathbf{d}} \\ \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{式中, } \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_0/L \\ -i_L/C_1 \end{bmatrix}.$$

对式(5)进行拉普拉斯变换, 可得到 $\hat{\mathbf{d}}$ 对 $\hat{\mathbf{V}}$ 的传递函数 $G(s)$ 。

$$G(s) = \frac{\hat{V}(s)}{\hat{d}(s)} = -\frac{\alpha_1 s + \alpha_2}{s^3 + \beta_3 s^2 + \beta_2 s + \beta_1} \quad (6)$$

式中: $\alpha_1 = V_0/(LC)$; $\alpha_2 = [V_0 + R(1-d)i_L]/(RLCC_1)$;

$$\beta_1 = 1/(RLCC_1); \beta_2 = \frac{C_1 + C(1-d)^2}{LCC_1} + \frac{R}{RLC_1}; \beta_3 =$$

$$1/(RC_1) + R/L.$$

2.2 MPPT 控制器的设计

LADRC 由扰动补偿、线性状态观测器、线性误差反馈控制率三部分组成。由式(3)可以得知, 状态变量 V 、 i_L 、 V_0 之间较强的耦合关系, 在自抗扰控制中, 可以将耦合部分看成系统的内扰, 从而实现解耦^[21-22]。因此, 只需要确定系统的输入和输出即可。根据上述可以将式(3)表述为

$$\dot{V} = -\frac{1}{C}i_L + \frac{1}{C}I + w \quad (7)$$

式中: V 为光伏电池输出电压; I 为光伏电池输出电流; i_L 为电感电流; w 为系统的外部扰动, 如 Boost 变换器的参数不确定性、开关损耗, 系统的估计误差和检测误差等。故式(7)可写为

$$\begin{cases} \dot{f} = -\frac{1}{C}i_L + w \\ \dot{V} = f + bu \\ \dot{f} = h = \frac{1}{L}V - \frac{R}{L}i_L + \frac{d-1}{L}V_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: f 为总扰动; V_0 为负载电压; d 为占空比; b 为扰动因子。

因此, 对于上述 1 阶系统, 本文采用 1 阶 LADRC 对其进行控制, 令 $x_1 = \dot{V}$ 、 $x_2 = f$ 、 $\dot{f} = h$, 则 2 阶 LESO 为

$$\begin{cases} \dot{Z}_1 = Z_2 - \lambda_1(Z_1 - V) + bu \\ \dot{Z}_2 = -\lambda_2(Z_1 - V) \end{cases} \quad (9)$$

式中: λ_1 、 λ_2 为误差增益; Z_1 为 LESO 中跟踪 y 的状态; Z_2 为 LESO 中跟踪扩张状态 f 的状态。线性误差反馈控制率设计为

$$u_0 = K_p(I - Z_1) + K_d(\dot{I} - Z_2) + \ddot{I} \quad (10)$$

对于上述 1 阶系统, 控制器完全可以采用比例控制, 式(10)可简化为

$$u_0 = K_p(V_m - Z_1) \quad (11)$$

式中: V_m 为 MPPT 算法得出的参考电压; K_p 为比例常数。

因此可以得到被控对象的输入控制率, 如式(12)所示。

$$u = (u_0 - Z_2) / b \quad (12)$$

文献[12]提出了简化参数的方法, 将观测器极点配置在 $-w_0$ 处, 即

$$s_2 + \lambda_1 s + \lambda_2 = [s - (-w_0)]^2 \quad (13)$$

解式(13)得

$$\begin{cases} \lambda_1 = 2w_0 \\ \lambda_2 = w_0^2 \end{cases} \quad (14)$$

将闭环极点配置在 $-w_c$ 处, 即

$$s + K_p = s - (-w_c) \quad (15)$$

解式(15)得

$$K_p = w_c \quad (16)$$

综上所述, 系统的闭环传递函数为

$$G_c = w_c / (s + w_c) \quad (17)$$

因此, 系统所需要调节的参数为 b 、 w_c 、 w_0 。

其中 b 为扰动补偿因子, w_c 为控制器带宽, 是控制器唯一可调参数; w_0 为观测器带宽, 是观测器唯一可调参数。首先利用 MPPT 算法计算出的参考电压 V_m 作为给定值; 之后通过本文设计的 MPPT 控制器实现解耦和快速高精度跟踪; 最后经过 PWM 产生占空比实现光伏系统 MPPT。控制系统结构图如图 5 所示。

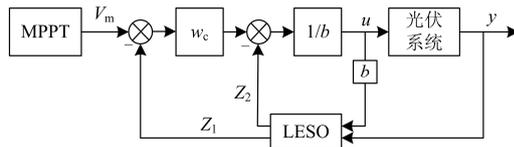


图 5 LADRC 控制结构图

Fig. 5 Structure of LADRC model

3 对比仿真实验分析

为了验证本文设计 MPPT 控制器的有效性与普适性, 特地选取 P&O、INC、OVC 算法分别进行仿真分析。首先光伏系统采用 Boost 变换器进行仿真分析。利用 Matlab/Simulink 平台对本文系统进行仿真实验。选取的光伏电池参数如表 1 所示; Boost 变换器的参数如表 2 所示。

3.1 将 MPPT 控制器应用到 OVC 算法的仿真实验分析

文献[9]提出了 OVC 算法, 根据光伏电池的 I-V 特性, 求解出最优电压, 是近年来最新的、控制性

表 1 光伏电池参数

Table 1 Parameters of the PV cell

参数名称	参数数值
最大功率点电压	$V_m=54.2$ V
最大功率点电流	$I_m=23.25$ A
开路电压	$V_{oc}=66$ V
短路电流	$I_{sc}=25.44$ A
开路电压温度系数	$K_v=-123$ mV/°C
短路电流温度系数	$K_i=3.18$ mA/°C

表 2 Boost 变换器参数

Table 2 Parameters of Boost converter

参数名称	参数数值
电容	$C=2$ mF
电容	$C_1=2$ mF
电感	$L=0.01$ H
开关频率	50 kHz

能较为良好的控制算法之一, 本文将设计的 MPPT 控制器应用到 OVC 算法中, 大大提高了跟踪速度。MPPT 控制器参数设定为: $w_0=700$ 、 $w_c=280$ 、 $b=10$ 。首先进行标况下(电池温度 $t=25$ °C, 光辐照度 $S=1000$ W/m²)的仿真, 结果如图 6 所示。

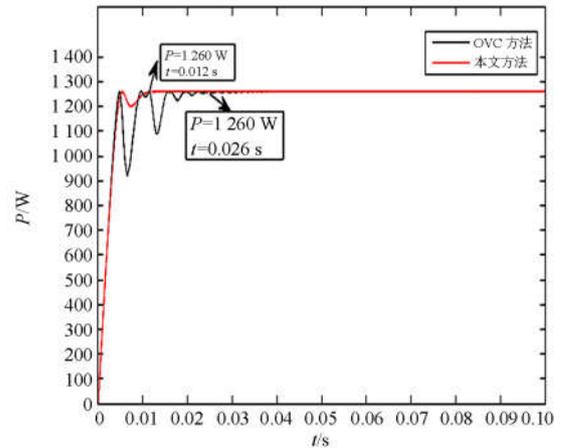
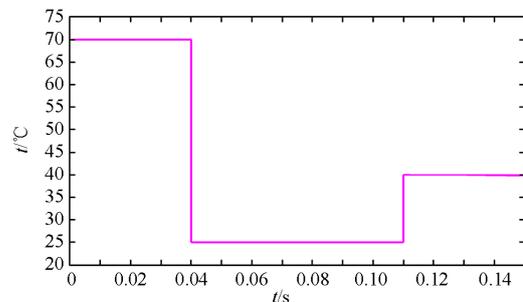


图 6 标况下仿真图

Fig. 6 Simulation result in normal operating conditions

通常情况下, t 和 S 会变化或者是发生剧烈变化, 因此系统在不同环境下的适应能力及动态响应能力也至关重要。图 7 是 t 和 S 变化情况; 图 8 所示的是 t 和 S 发生剧烈变化的仿真结果。

图 6 仿真结果显示, 只采用 OVC 算法, 光伏电池阵列达到最大功率 1260 W 所用的时间为 0.026 s, 而加入本文设计的 MPPT 控制器后, 响应时间缩短到 0.012 s; 图 8 仿真结果显示, 即使在 t 和 S 发生剧烈变化的情况下, 加入 MPPT 控制器后, 同样能大大地降低跟踪时间, 减少功率振荡, 提高光能利用率。



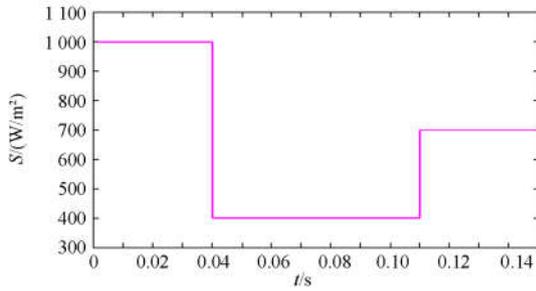


图 7 t 和 S 变化图

Fig. 7 Fast variations of t and S

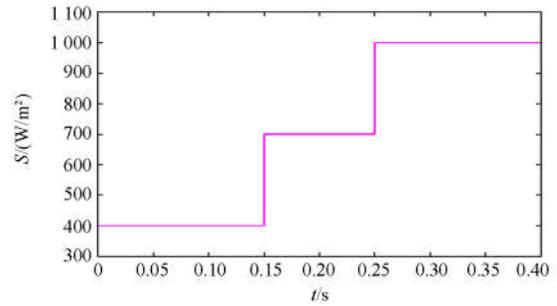


图 9 t 和 S 变化图

Fig. 9 Fast variations of t and S

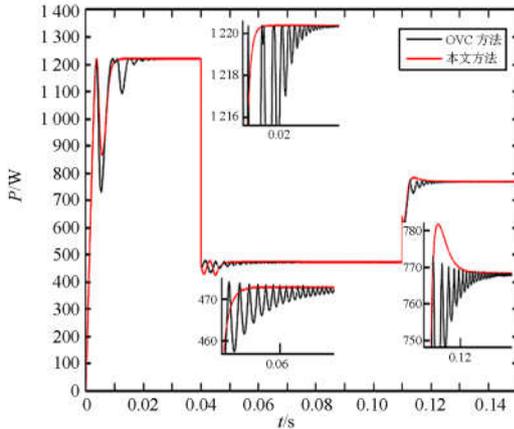


图 8 t 和 S 发生突变情况下的仿真图

Fig. 8 Simulation result in fast variations of t and S

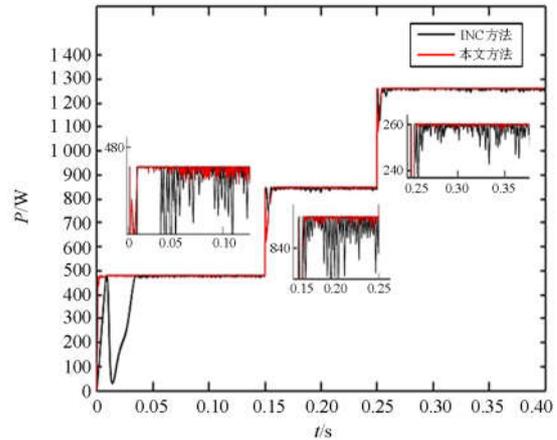
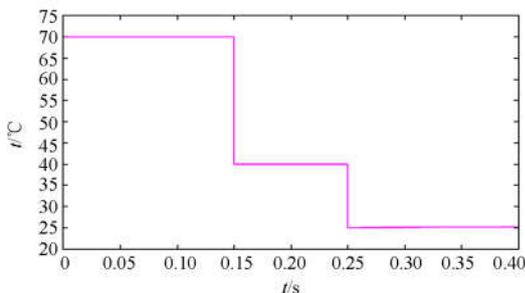


图 10 t 和 S 发生突变情况下的仿真图

Fig. 10 Simulation result in fast variations of t and S

3.2 将 MPPT 控制器应用到 INC 算法的仿真实验分析

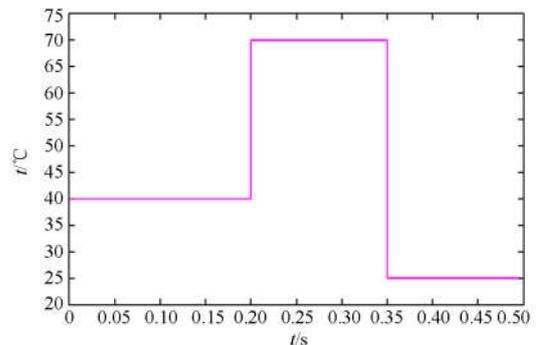
光伏发电系统在采用 INC 算法追踪光伏电池阵列最大功率点时，依然会出现功率振荡的问题且算法本身对传感器的精度要求较高。本文设计的 MPPT 控制器可以很好地解决这些问题。ESO 会对系统的内扰和外扰进行准确的估计，即使传感器存在误差的情况下，也能快速跟踪最优电压。既减少了功率振荡又降低了工程造价。图 9 是 t 和 S 随时间的变化情况；图 10 是仿真结果。可以明显地看出，加入 MPPT 控制器后，功率振荡明显下降。在低辐照度时，大大提高了系统的响应能力，控制效果更为良好。MPPT 控制参数设定为： $w_0=0.001$ 、 $w_c=2$ 、 $b=1$ 。

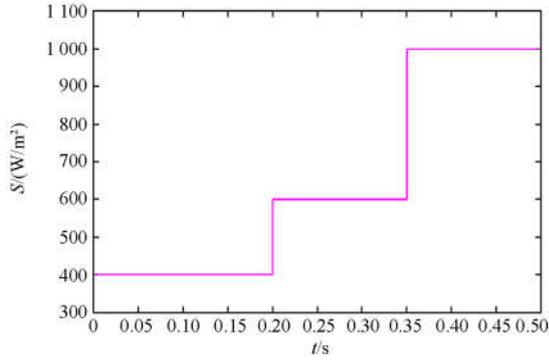
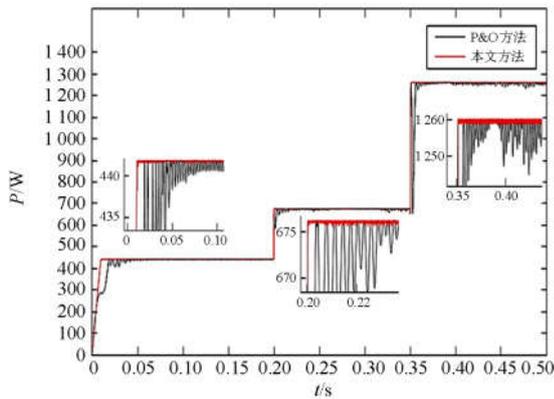


3.3 将 MPPT 控制器应用到 P&O 算法的仿真实验分析

P&O 算法的原理就是通过对光伏电池阵列的输出电压加入扰动量来判断输出功率走向。由于扰动量的存在，必然会产生功率振荡，因而无法兼顾控制精度和响应速度。当光照强度剧烈变化时，会出现误判现象。图 11 为本例仿真实验 t 和 S 的变化情况，控制器参数设定为： $w_0=0.01$ 、 $w_c=2$ 、 $b=1$ 。图 12 为仿真结果。

从图 12 可以看出，加入 MPPT 控制器后跟踪速度明显提高；稳定了由于加入电压扰动后引起的



图 11 t 和 S 变化图Fig. 11 Fast variations of t and S 图 12 t 和 S 发生突变情况下的仿真图Fig. 12 Simulation result in fast variations of t and S

功率波动, 使得功率振荡大大地减小, 光能利用率明显提升。即使光照强度突变也不会出现误判现象。

4 系统采用 Buck/Boost 变换器仿真实验分析

第三部分的实验仿真, 系统都采用了 Boost 变换器。为了更进一步地证明 MPPT 控制器的普适性, 将 Boost 变换器更换为 Buck/Boost 变换器。MPPT 算法依然是 P&O 算法。系统结构图如图 13 所示。

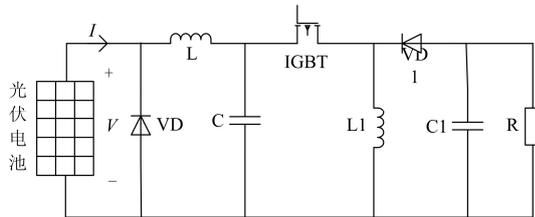


图 13 光伏系统结构图(Buck/Boost 变换器)

Fig. 13 Architecture of PV system with Buck/Boost converter

由系统结构图可以看出, 采用 Buck/Boost 变换器后系统增加了一个储能元件 L_1 , 非线性特性更加明显。在 MPPT 控制器的设计上, 依然采用第二部

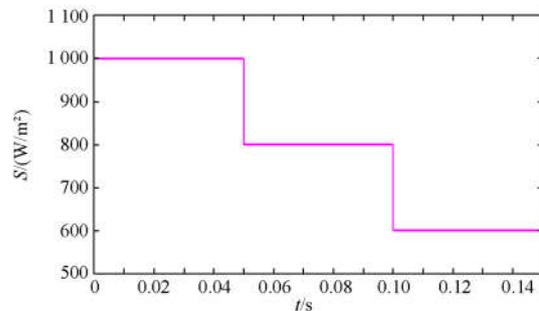
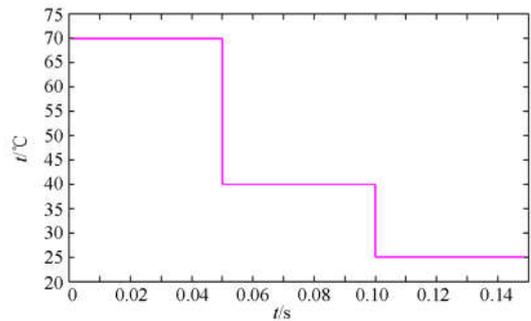
分的思路: 利用状态平均法对系统进行数学建模^[23-24], 求解出 Buck/Boost 变换器的小信号动态方程; 设计 1 阶 LADRC 进行控制, 将耦合部分与系统外扰等效为总扰动用 ESO 估计出来。对于这种非线性特性很强的系统来讲, MPPT 控制器的效果会更加显著。Buck/Boost 变换器的参数设置如表 3 所示, 光伏电池参数如表 1 所示。

表 3 Buck/Boost 变换器参数

Table 3 Parameters of Buck/Boost converter

参数名称	参数数值
电感	$L=0.001$ H
电容	$C=2$ mF
电感	$L_1=0.001$ H
电容	$C_1=2$ mF
开关频率	50 kHz

MPPT 控制器的参数设定为: $w_0=470$, $w_c=150$, $b=50$ 。如前 3 例仿真实验一样, t 和 S 均会随时间发生变化, 如图 14 所示。图 15 是仿真结果。从仿真结果得知 3 个时间段加入 MPPT 控制器后光伏电池阵列的输出功率分别增加了 24 W、16 W、10 W。由此可见, MPPT 控制器对这类非线性系统具有良好的控制效果, 对其外扰及对对象模型参数的变化具有良好的适应性和鲁棒性, 极大地改善了 P&O 算法的适用范围和控制品质。

图 14 t 和 S 变化图Fig. 14 Fast variations of t and S

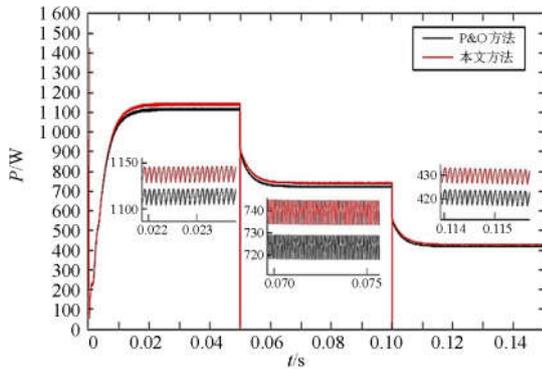


图 15 t 和 S 发生突变情况下的仿真图

Fig. 15 Simulation result in fast variations of t and S

5 结论

针对现有 MPPT 算法的不足, 本文设计了基于 LADRC 的 MPPT 控制器。首次将 LADRC 应用到光伏发电系统最大功率点跟踪中并起到了良好的控制效果。仿真实验证明, 加入 MPPT 控制器后能大大地提高系统响应速度, 减小功率振荡, 提高光能利用率。而将 MPPT 控制器分别应用到不同算法、不同系统结构中, 也充分证明了此控制器的实效性、与普适性。由实验分析可以得证, 将 MPPT 控制器应用到不同算法中, 只需要调节 3 个参数: w_0 、 w_c 、 b , 就可以大大改善原算法的控制效果, 简单而实用。本文设计的 1 阶 LADRC(2 阶 ESO)MPPT 控制器为无 DC/DC 变换器的最大功率点跟踪提供了思路; 同时, 本文将进一步研究将 MPPT 控制器应用到多峰值最大功率点跟踪策略上, 使光伏发电系统能更高效、更稳定地运行。

参考文献

[1] 薛峰, 蔡云峰, 徐宁, 等. 基于功率解耦控制的并网光伏发电系统机电暂态模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 63-70.
XUE Feng, CAI Yunfeng, XU Ning, et al. Mechanical and magnetic transient model of grid-connected photovoltaic system based on power decoupling control[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 63-70.

[2] 任洪波, 吴琼, 邱留良, 等. 分布式能源系统可靠性评价[J]. 热力发电, 2016, 45(4): 65-69.
REN Hongbo, WU Qiong, QIU Liuliang, et al. Reliability assessment of distributed energy system[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(4): 65-69.

[3] 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.

[4] 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: 67-82.

[5] LIU F, DUAN S, LIU F, et al. A variable step size INC MPPT method for PV systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55: 2622-2628.

[6] FEMIA N, PETRONE G, SPAGNUOLO G, et al. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 20(4): 963-973.

[7] LIU Y H, LIU C L, HUANG J W, et al. Neural-network based maximum power point tracking methods for photovoltaic systems operating under fast changing environments[J]. Solar Energy, 2013, 89: 42-53.

[8] 张开, 石季英, 林济铿, 等. 基于自适应滑模层极值搜索的光伏发电最大功率点跟踪方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 33-37.
ZHANG Kai, SHI Jiying, LIN Jikeng, et al. Maximum power point tracking method for photovoltaic systems using adaptive extremum seeking control based on sliding layer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 33-37.

[9] 吴大中, 王晓伟. 一种光伏 MPPT 模糊控制算法研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(6): 808-813.
WU Dazhong, WANG Xiaowei. A photovoltaic MPPT controlling algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2011, 32(6): 808-813.

[10] 刘瑞阳, 薛云灿, 冯宝玥, 等. 光伏发电系统模糊分段变步长算法最大功率点跟踪策略[J]. 热力发电, 2016, 45(5): 48-53.
LIU Ruiyang, XUE Yunfan, FENG Baoyue, et al. A new control strategy for MPPT in photovoltaic system based on fuzzy and variable step size algorithm[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(5): 48-53.

[11] 党克, 陆雯雯, 严干贵. 基于改进滑模控制技术的光伏阵列最大功率跟踪控制研究[J]. 广东电力, 2016, 29(10): 12-16.
DANG Ke, LU Wenwen, YAN Gangui. Maximum power point tracking of photovoltaic array based on improved sliding mode control technology[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(10): 12-16.

[12] ZHAO J, ZHOU X S, MA Y J, et al. A novel maximum power point tracking strategy based on optimal voltage

- control for photovoltaic systems under variable environmental conditions[J]. Original Research Article Solar Energy, 2015, 122: 640-649.
- [13] 孙向东, 任碧莹, 张琦, 等. 太阳能光伏并网发电技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 45-61.
- [14] 高志强. 自抗扰控制思想探究[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1498-1510.
GAO Zhiqiang. On the foundation of active disturbance rejection control[J]. Control Theory and Application, 2013, 30(12): 1498-1510.
- [15] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller-tuning[C] // Proceedings of the 2003 American Control Conference, June 4-6, 2003, Denver, USA: 4989-4996.
- [16] 李善寿, 张兴. 改进的光伏组件工程数学模型建模方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 108-112.
LI Shanshou, ZHANG Xing. Improved method to build mathematic engineering model of photovoltaic module[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 108-112.
- [17] 张乐乐, 赵巧娥, 石慧. 基于微元面积的光伏最大功率跟踪研究[J]. 广东电力, 2016, 29(4): 29-33.
ZHANG Lele, ZHAO Qiaoe, SHI Hui. Research on maximum power point tracking of photovoltaic system based on infinitesimal element[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(4): 29-33.
- [18] 李瑞生, 徐军, 翟登辉, 等. 三电平 DC/DC 电源转换技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 74-80.
LI Ruisheng, XU Jun, ZHAI Denghui, et al. Research of three-level DC/DC conversion technology[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 74-80.
- [19] 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 algorithm[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1491-1498.
- [20] 尤鋈, 郑建勇. 基于模糊 PI 调节 Boost 电路的光伏系统最大功率点跟踪控制[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(6): 94-98.
YOU Jun, ZHENG Jianyong. MPPT of photovoltaic system with Boost circuit based on fuzzy PI control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6): 94-98.
- [21] 周雪松, 刘伟, 马幼捷, 等. 基于 LADRC 的三相四线制并联型有源电力滤波器系统分析[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1290-1299.
ZHOU Xuesong, LIU Wei, MA Youjie, et al. Analysis of three-phase four-wire shunt active power filter system based on LADRC[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1290-1299.
- [22] 徐晓宁, 周雪松, 马幼捷, 等. 基于自抗扰控制技术的微网运行控制器[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3336-3346.
XU Xiaoning, ZHOU Xuesong, MA Youjie, et al. Micro grid operation controller based on ADRC[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3336-3346.
- [23] 李乔, 吴捷. 自抗扰控制及其在 DC-DC 变换器中的应用[J]. 电工技术学报, 2005, 20(1): 83-88.
LI Qiao, WU Jie. Auto-disturbance rejection control and its application to DC-DC converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(1): 83-88.
- [24] 姬伟超, 殷时蓉, 刘朝涛. 基于 Buck-Boost 拓扑的新量子遗传算法在 MPPT 技术中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 92-96.
JI Weichao, YIN Shirong, LIU Chaotao. Maximum power point tracking based on Buck-Boost topology with new quantum genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 92-96.

收稿日期: 2017-07-27; 修回日期: 2017-08-18

作者简介:

高志强(1960—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为自抗扰控制技术应用研究;

李松(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为光伏发电系统最大功率点跟踪技术及并网控制策略; E-mail: songsong9692@163.com

周雪松(1964—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统及其自动化、新能源发电等。

(编辑 魏小丽)