

文章编号:1000-582X(2010)02-0015-07

光伏电池的最大功率跟踪以及并网逆变

周雒维¹, 杨 柳²

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆市电力公司綦南供电局, 重庆 綦江 401420)

摘要:光伏并网系统成本昂贵是阻碍其市场应用的重要原因,采用无直流传感器的光伏电池最大功率跟踪,在一定程度上降低了控制系统的成本,成为目前研究的热点内容。但目前文献提出的无传感器的光伏电池输出电流、电压的估算方法在估算精度、实时性、以及动态响应能力方面都具有一定的缺陷,使光伏电池的最大跟踪难以达到满意的效果,从而影响到光伏并网系统的输出性能。针对以上问题,提出了基于自适应滑模观测器实现的光伏电池输出电压的估算。该算法对外来干扰,模型参数误差具有良好的抑制能力和对光伏电池输出电压的跟踪具有良好的实时性、精确度。仿真和实验结果均验证了的通过该自适应滑模观测器实现的光伏电池最大功率跟踪和系统的输出具有良好的性能。

关键词:自适应滑模观测器;最大功率跟踪;并网逆变器

中图分类号:

文献标志码:A

MPPT control of photovoltaic grid-connected system

ZHOU Luo-wei¹, YANG Liu²

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Qi'nian Power Supply Bureau of Chongqing Electric Power Corporation, Qijiang 401420, Chongqing, P. R. China)

Abstract: The high cost of grid-connected photovoltaic (PV) system is an important reason that hinders its market application. The control cost can be partly cut down by using sensorless Maximum Power Point Tracking (MPPT). However, the sensorless MPPT control proposed by previous literatures has drawbacks of poor estimation accuracy, bad real-time performance, and poor dynamic responses, which has great impact on the MPPT and the output performance of the whole system. Aiming at these problems, an Adaptive Sliding Mode Observer (ASMO) for estimation of photovoltaic array voltage is proposed. The external disturbance and modeling errors are suppressed while the real-time performance and the estimation accuracy are improved greatly by the proposed method. The favorable performance of the output performance and MPPT performance of the PV system based on the ASMO are validated by simulation and experimental results.

Key words: ASMO; maximum power point tracking; grid-connected inverter

收稿日期:2009-12-20

基金项目:国家自然科学基金(50677071);高等学校博士点专项科研基金(200611012)

作者简介:周雒维(1954-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力电子技术、电路理论及应用等,

(E-mail)zluwei@cqu.edu.cn.

目前,光伏并网发电已经成为研究热点^[1-3],但大规模的商业应用仍然属于起步阶段,究其原因还是光伏并网逆变系统造价昂贵。根据文献[4]记载,截至到 2003 年,在北美地区光伏并网电价仍为 3 美元每千瓦小时,如何能够降低光伏并网系统的上网电价的成本,成了光伏并网发电领域的研究热点^[4-7]。由于直流型传感器的价格昂贵,占据了控制系统的成本较大比重,越来越多的文献提出采用无传感器的光伏电池最大功率跟踪来降低光伏控制系统的成本^[8-10]。

文献[8]提出了一种针对反激逆变器的光伏电池最大功率跟踪方法,该方法通过在一个采样周期内估算流过直流侧电容上的电流和开关器件上的电流实现对光伏电池的输出电流估算;但是该方法估算得到的输出电流是在电网电压的半个周期内光伏电池输出电流平均值,不具有估算的实时性,而且仅能应用于反激变换器这样的特殊电路中。文献[9]利用光伏电池的输出功率与逆变器的输出功率平衡提出一种光伏电池输出电流的估算方法,但该方法需要估计逆变器的输出效率,因此会出现较大的估算误差。文献[10]利用滑模观测器实现了光伏电池输出电流的估算,该方法在对光伏系统建模时近似的认为光伏电池输出电流为一恒定的直流量,其微分为 0,但在实际中会出现由光照突变而引起的光伏电池输出电流的突变,因此该方法在光照突变情况下对输出电流估算存在较大误差,严重时还会出现发散振荡,使得系统无法正常工作。

本文针对单相光伏并网逆变器提出了一种基于自适应滑模观测器的光伏电池最大功率跟踪,相比于先前的方法,该方法在推导过程中避免了模型的简化,提出的自适应滑模观测器能够通过寻求模型参数的自适应规律很好的抑制外来干扰和模型参数的摄动。通过该方法实现的光伏电池最大功率跟踪具有良好的动态响应能力和跟踪精度。

本文首先建立以光伏电池输出电压和逆变器输出电流为状态变量光伏并网系统的数学模型,然后根据系统模型建立了估算光伏电池输出电压的自适应滑模观测器,求取了模型参数的自适应规律和状态变量滑模面的可达条件;最后仿真和实验结果证明了通过该滑模观测器估算的输出电压能完全取代实际的输出电压,非常精确的实现光伏电池的最大功率跟踪以及并网逆变的功能。

1 光伏系统的建模分析

光伏电池的输出电压与输出电流之间存在着强

烈的非线性关系,直接建立光伏电池输出电压与输出电流之间的状态方程比较困难;本文结合逆变器的建模方法,将光伏电池的输出电压和逆变器输出电流作为状态变量,建立了包含光伏电池输出电压、电流的状态方程。

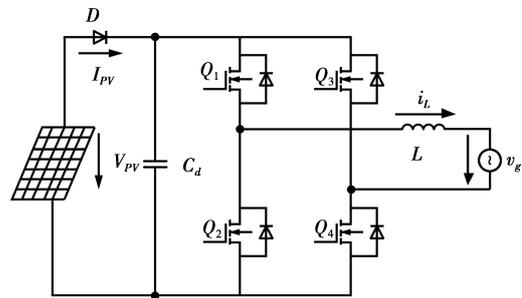


图 1 系统主电路拓扑图

单相光伏并网系统的主电路拓扑如图 1 所示,根据节点方程和回路方程可得到光伏并网系统的数学模型为

$$p \begin{bmatrix} i_L \\ v_{PV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{u}{L} \\ -\frac{u}{C_d} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_{PV} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{v_g}{L} \\ \frac{i_{PV}}{C_d} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中 p 为微分算子, u 为逆变器输入控制变量,当 $u=1$, 开关管 Q_1 、 Q_4 开通, Q_2 、 Q_3 关断, $u=-1$, 开关管 Q_2 、 Q_3 开通, Q_1 、 Q_4 关断。

式(1)中的输入量 u 为切换量,为了得到连续的状态方程,可采用状态空间平均法将其等效为线性系统^[10]。将开关变量用控制变量等效得到连续的状态变量方程为

$$p \begin{bmatrix} i_L \\ v_{PV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{u_{eq}}{L} \\ -\frac{u_{eq}}{C_d} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_{PV} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{v_g}{L} \\ \frac{i_{PV}}{C_d} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

式中 u_{eq} 的表达式为: $u_{eq} = u_{inv} / u_{tri}$, u_{inv} 为逆变器控制输入信号, u_{tri} 为三角波载波峰值。

2 自适应滑模观测器的建立

2.1 自适应滑模观测器方程

在前一节建立的数学模型中,直流侧电容的容值 C_d 和交流侧电感的感值 L 为模型的外部输入参数,可根据主电路的功率等级通过设计得到,但在实际的电路中,由于集肤效应,温度,以及其他寄生参数的影响,在实际电路参数较控制模型参数会出现较大的漂移^[10]。为了使设计的滑模观测器对模型参数的漂移具有良好的鲁棒性,可采用设计自适应滑模观测器的方式^[11];在本文中由于系统模型的状

态方程的个数有限,只能实现对电感参数的自适应估算,因此根据滑模控制理论得到的自适应观测器为:

$$p \begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{v}_{PV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{u_{eq}}{\hat{L}} \\ -\frac{u_{eq}}{C_d} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{v}_{PV} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{v_g}{\hat{L}} \\ \frac{i_{PV}}{C_d} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \text{sgn}(\hat{i}_L - i_L). \quad (3)$$

式中 \hat{i}_L 表示对实际值的估算量, k_1, k_2 为滑模观测器的增益值。符号函数 sgn 的切换规则为

$$\text{sgn}(s) = \begin{cases} 1, & s > 0; \\ -1, & s < 0. \end{cases} \quad (4)$$

现定义

$$s = e_1 = \hat{i}_L - i_L = 0, \quad (5)$$

为滑模切换平面。

根据式(2)的系统状态方程和式(3)的滑模观测器模型可得到估算误差的状态方程为

$$p \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{u_{eq}}{L} \\ -\frac{u_{eq}}{C_d} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \text{sgn}(\hat{i}_L - i_L) + \begin{bmatrix} \frac{u_{eq}}{\hat{L}} - \frac{u_{eq}}{L} & \frac{1}{L} - \frac{1}{\hat{L}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_{PV} \\ v_g \end{bmatrix}. \quad (6)$$

式中 e_2 的表达式为

$$e_2 = \hat{v}_{pv} - v_{pv}. \quad (7)$$

式中 e_1, e_2 分别为光伏电池输出电压的估算误差和逆变器输出电流估算误差。

当滑模增益参数 k_1, k_2 满足以下条件:

$$p e_1 \cdot e_1 < 0. \quad (8)$$

$$p e_2 \cdot e_2 < 0. \quad (9)$$

状态变量 i_L 在滑模面做动态切换,滑模观测器中的估算值将收敛于模型中的实际值^[11],从而实现了通过滑模观测器对光伏电池输出电压的估算,提出的自适应滑模观测器的控制框图如图 2 所示。

2.2 模型参数的自适应规律

为了获得模型参数 L 的自适应规律和滑模可达条件,现定义 Lyapunov 函数为

$$v = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\hat{L}} - \frac{1}{L} \right)^2. \quad (10)$$

则 Lyapunov 函数的对时间变量的导数为

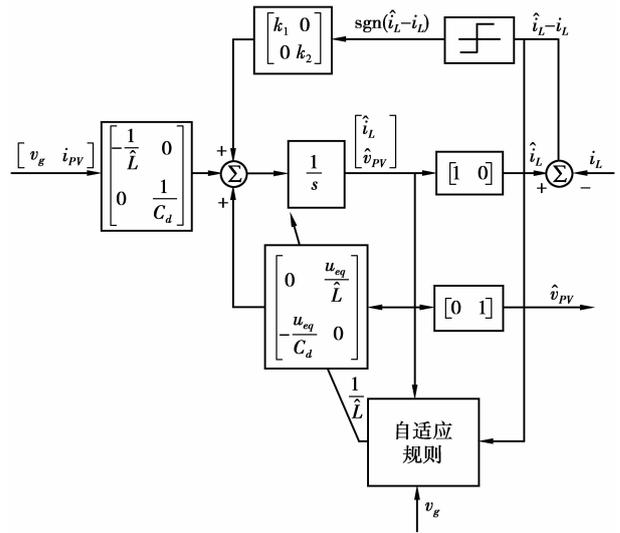


图 2 提出的自适应滑模观测器

$$p v = p e_1 \cdot e_1 + p e_2 \cdot e_2 + p \frac{1}{\hat{L}} \cdot \left(\frac{1}{\hat{L}} - \frac{1}{L} \right). \quad (11)$$

对式(11)的处理包含两部分目的,一方面需要求取模型参数的自适应规律;另一方面需要确定 k_1, k_2 的取值以达到通过切换控制迫使系统的状态变量在滑模面上进行滑动。根据以上要求对式(11)进行等效变换,将误差中状态方程带入到式(11)可得到

$$p v = e_1 \left[\frac{u_{eq}}{L} e_2 + k_1 \text{sgn}(e_1) + \left(\frac{u_{eq}}{\hat{L}} - \frac{u_{eq}}{L} \right) \hat{v}_{PV} + \left(\frac{1}{L} - \frac{1}{\hat{L}} \right) v_g \right] + e_2 \left[-\frac{u_{eq}}{C_d} e_1 + k_2 \text{sgn}(e_1) \right] + p \frac{1}{\hat{L}} \cdot \left(\frac{1}{\hat{L}} - \frac{1}{L} \right). \quad (12)$$

根据 Lyapunov 的稳定性理论,式(12)的取值必须小于 0 才能满足滑模观测器的收敛原则,根据前面的分析,现将式(12)分解为 2 部分,其等效表达式为

$$e_1 \left[\frac{u_{eq}}{L_1} e_2 + k_2 \text{sgn}(e_1) \right] + e_2 \left[-\frac{u_{eq}}{C_d} e_1 + k_2 \text{sgn}(e_1) \right] < 0. \quad (13)$$

$$e_1 \left[\left(\frac{u_{eq}}{\hat{L}} - \frac{u_{eq}}{L} \right) \hat{v}_{PV} + \left(\frac{1}{L} - \frac{1}{\hat{L}} \right) v_g \right] + p \frac{1}{\hat{L}} \cdot \left(\frac{1}{\hat{L}} - \frac{1}{L} \right) = 0. \quad (14)$$

式(13)为滑模可达性的充分条件, k_1, k_2 的具体取值范围将在下一小节中讨论。现根据式(14)可以得到电感参数的自适应规律为

$$p \frac{1}{\hat{L}} = (i_L - \hat{i}_L) u_{eq} \hat{v}_{PV} + (\hat{i}_L - i_L) v_g \quad (15)$$

3.3 滑模观测器增益函数 k_1, k_2 的求取

式(13)为状态变量滑模可达的充分条件,其等效条件为

$$e_1 \left[\frac{u_{eq}}{L_1} e_2 + k_1 \operatorname{sgn}(e_1) \right] < 0. \quad (16)$$

$$e_2 \left[-\frac{u_{eq}}{C_d} e_1 + k_2 \operatorname{sgn}(e_1) \right] < 0. \quad (17)$$

式(16)、(17)为根据 Lyapunov 稳定理论求取的 k_1, k_2 的取值范围的不等式,只有 k_1, k_2 的取值满足上述条件后,滑模观测器通过不断切换观测器的输入,使状态变量在滑模面上做滑模运动,实现对状态变量的估算。

不等式(16)可以等效为:

$$e_1 \left[\frac{u_{eq}}{L_1} e_2 + k_1 \operatorname{sgn}(e_1) \right] < |e_1| \left(\left| \frac{u_{eq}}{L_1} e_2 \right| + k_1 \right) < 0. \quad (18)$$

综合可得到 k_1 的取值范围为

$$k_1 < - \left| \frac{u_{eq}}{L_1} v_{pv} \right|. \quad (19)$$

当 k_1 的取值满足式(19)的滑模条件后,状态变量 i_L 便收敛于滑模面 $s=0$;当状态变量在滑模面上滑动时,根据等效控制的概念, $pe_1 = e_1 = 0$,自适应估算参数趋于实际值^[10],这时根据式(6)误差状态方程可得

$$\frac{u_{eq}}{L_1} e_2 + k_1 \operatorname{sgn}(e_1) = 0. \quad (20)$$

联立式(20)、(17),可得到

$$-\frac{k_2 u_{eq} e_2^2}{k_1 L} < 0. \quad (21)$$

可得到 k_2 的取值范围为

$$k_2 < 0. \quad (22)$$

根据滑模控制理论知,滑模观测器中出现的抖振现象跟滑模增益的取值有关^[11],在这里 k_1, k_2 的取值越小,抖振现象越严重,造成的估算误差也就越大。具体选择 k_1, k_2 的值应综合考虑这两方面的因素。

3 仿真实验验证

3.1 最大功率跟踪算法及系统控制框图

光伏电池的输出功率与光照和温度等环境因数有关,由于光伏电池特性曲线具有非线性特征,在外部环境一定的情况下,光伏电池存在唯一的最大功率输出点,因此特定的控制方法用来实现光伏电池的最大功率跟踪。最常用的方法有扰动观测法^[12]和增量电导法^[13],考虑到扰动观测法控制的光伏电

池输出功率存在在最大功率点振荡的问题^[14],结合本文的实际情况,选用增量电导法作为本系统的控制算法^[9,13],逆变器的输出控制采用直接电流控制的方式,控制系统的原理框图如图 3 所示。

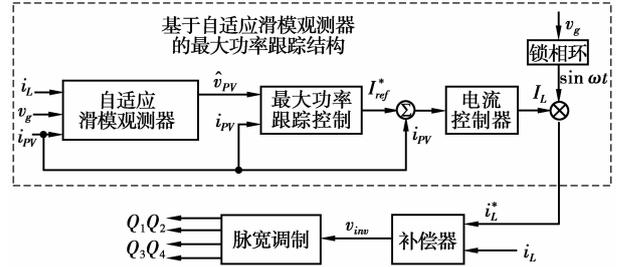


图 3 提出的控制框图

3.2 仿真分析

为了研究提出的自适应滑模观测器的正确性,运用 Matlab/Simulink 仿真软件建立其仿真模型^[15]。模拟光照强度从 1000 W/m^2 突变到 800 W/m^2 时系统的输出性能。具体的仿真参数为:光伏电池开路电压 $V_{oc} = 216 \text{ V}$;短路电流 $I_{sc} = 6.4 \text{ A}$,峰值功率 $P_M = 1000 \text{ W}$,开关频率 $f_s = 10 \text{ kHz}$,直流侧电容 $C_d = 2 \text{ mF}$,滤波电感 $L = 2.2 \text{ mH}$,网侧电压 $v_g = 110 \text{ V}$,频率 $f = 50 \text{ Hz}$, $k_1 = -7500, k_2 = -1.5$ 。

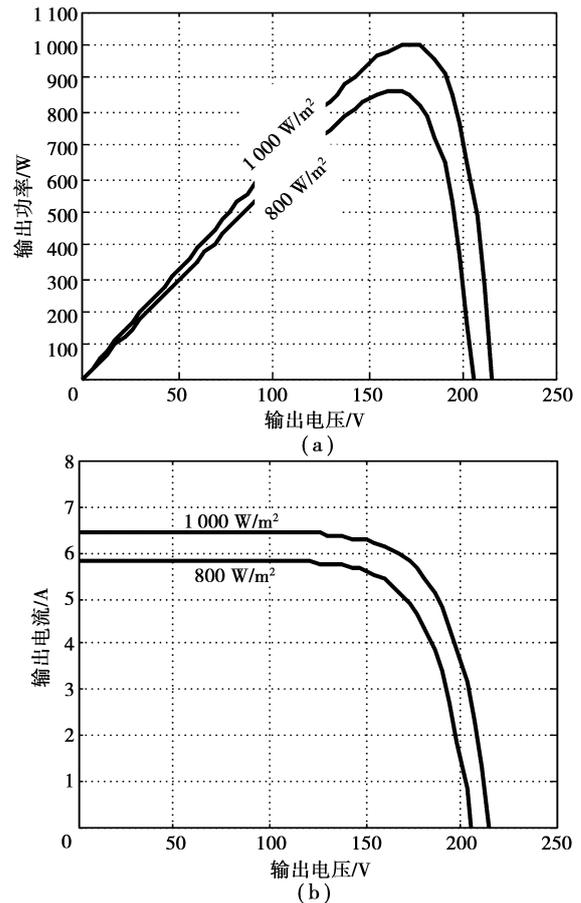


图 4 给定光照曲线下光伏阵列的输出特性

从图 6 仿真结果知,在外部环境相对稳定的情况下,通过自适应滑模观测器估算的电压能够稳定的跟踪光伏电池输出电压,控制光伏电池稳定工作在最大功率点;当外部光照发生突变的时,通过自适应滑模观测器估算的输出电压能够准确迅速的跟踪光伏电池输出电压的变化,具有良好的动态响应能力,整个过程中的估算误差的绝对值都控制在 10 V 以内。通过提出的自适应滑模观测器实现光伏并网逆变功能也具有良好的效果,输出并网逆变电流具有较高的质量。图 4-7 的仿真结果证明了自适应滑模观测器的估算电压在稳态和动态的情况下都能够很好的跟踪光伏电池的输出电压,具有较高的精度,自适应滑模观测器能够很好的融入到控制系统中,完成系统的并网逆变功能,因此用自适应滑模观测器能够取代光伏电池电压传感器后系统的输出性能将不受影响。

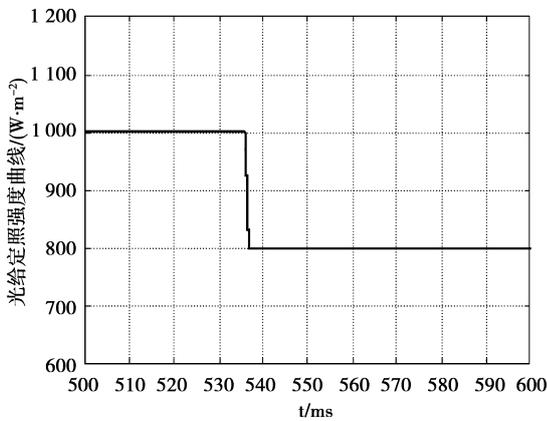
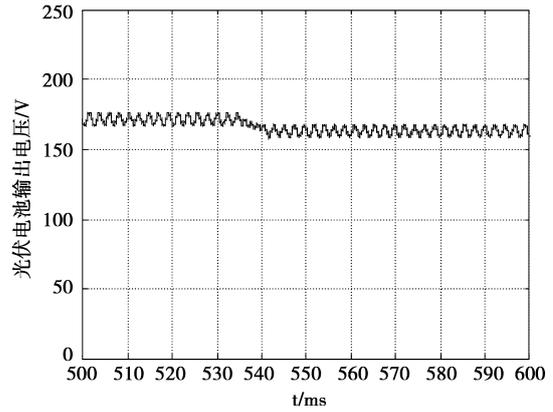


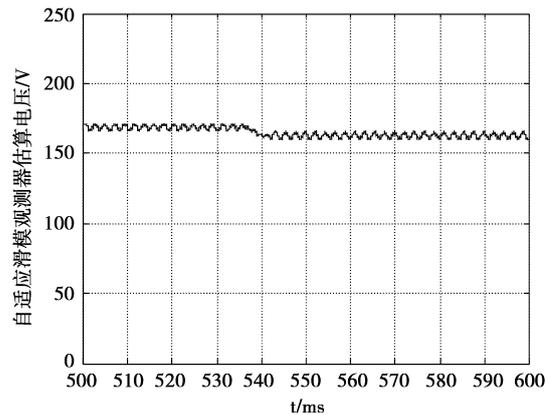
图 5 给定光照变化曲线

3.3 实验分析

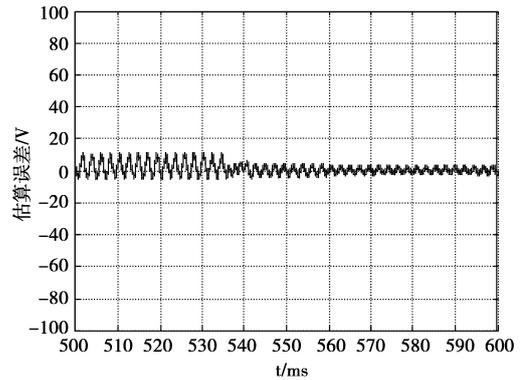
为了进一步的研究自适应滑模观测器的正确性和实用性,通过实验样机对提出的基于自适应控制算法的光伏并网系统的性能进行实验验证。实验样机的控制系统由 dspace 控制平台完成,其硬件框图如图 9 所示。实验主要参数为:光伏阵列开路电压 $V_{oc} = 86.4 \text{ V}$,短路电流 $I_{sc} = 6.4 \text{ A}$;峰值功率 $P_M = 400 \text{ W}$,交流侧电压 $v_g = 22 \text{ V}$,频率 $f = 50 \text{ Hz}$, $k_1 = -3 \ 000$, $k_2 = -2.5$ 。通过实验系统验证光照强度突变前后 ASMO 对光伏电池输出电流的估算性能以及并网输出性能。



(a) 光伏电池实际输出电压



(b) 自适应滑模观测器估算电压



(c) 估算误差

图 6 自适应滑模观测器估算效果

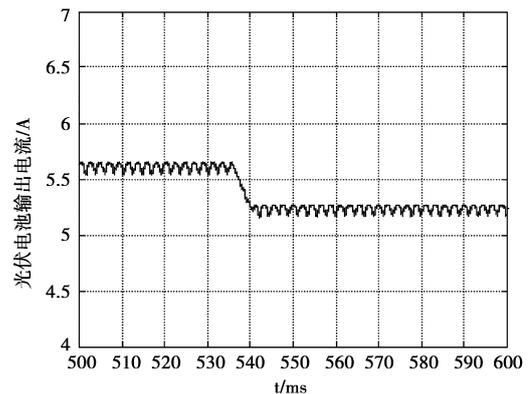


图 7 光伏电池输出电流

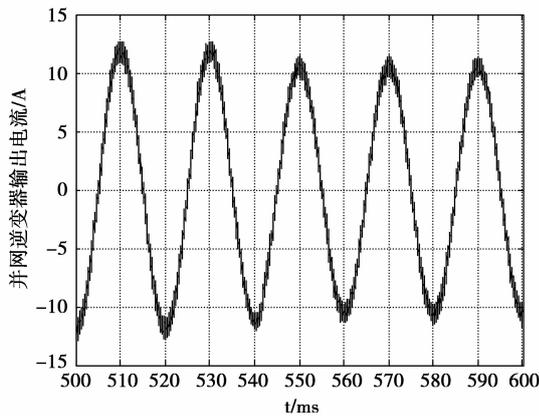


图 8 逆变器并网电流

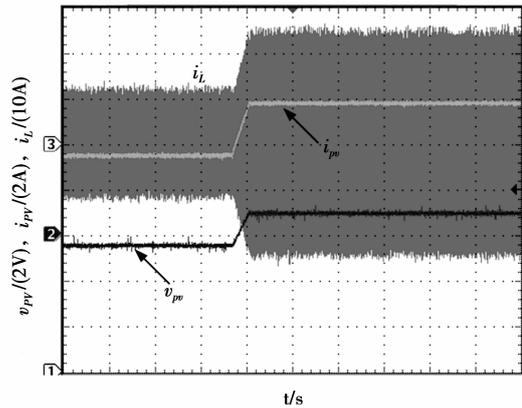


图 10 光伏电池输出电压、电流及并网电流

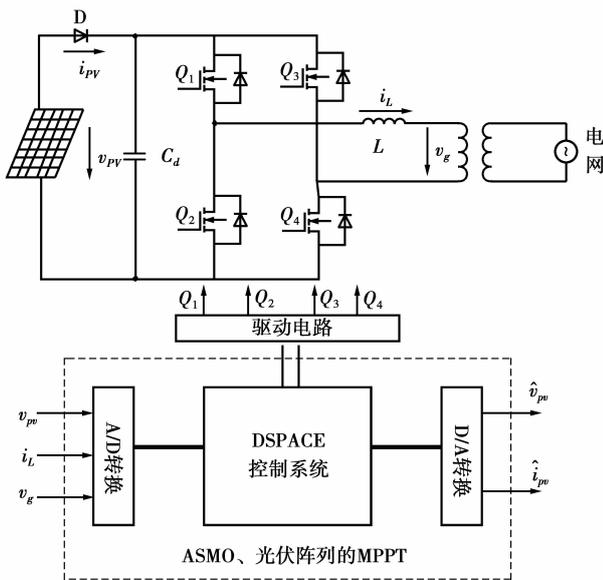


图 9 系统的实验硬件平台结构

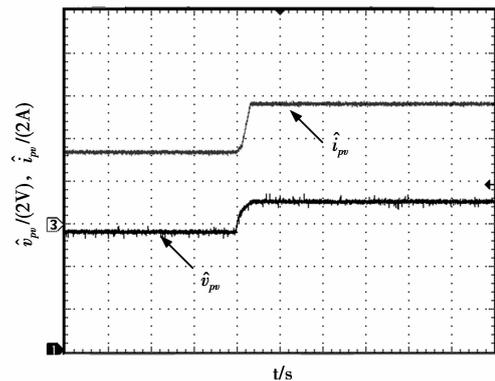
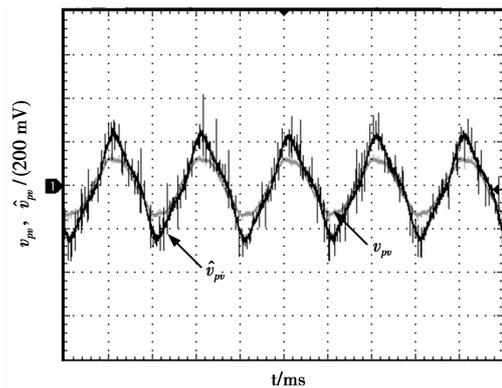


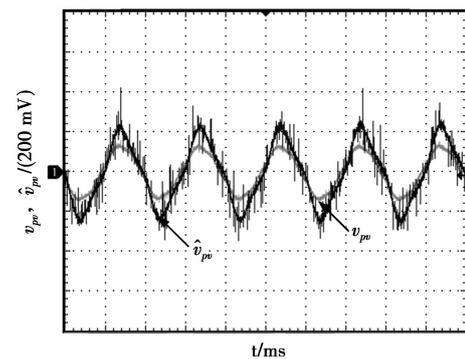
图 11 滑模观测器估算电压、电流

图 10 为光照突变前后经传感器检测到的光伏电池输出电压和输出电流波形以及并网电流波形；图 11 为通过滑模观测器估算得到的光伏电池输出电压、电流波形；图 12 为 ASMO 在光照突变前后对光伏电池输出电压的估算的局部放大图，图 13 为光照突变后并网电流稳态波形。从图 10-12 的实验波形可以看出：通过 ASMO 估算的光伏电池输出电压能够实时的跟踪实际的输出电压，具有较好的跟随性，并且稳态误差控制在较小的范围内。从图 13 的实验波形可以看出并网波形未发生畸变具有良好的并网效果，证明了该自适应滑模观测器能够代替电压传感器，实现光伏系统的并网输出。

实验结果证明了提出的自适应滑模观测器能够很好的跟踪光伏电池输出电压的变化，具有良好的估算精度和动态响应能力；同时实现光照突变情况下光伏电池的最大功率跟踪。实验结果表明基于该滑模观测器的光伏并网系统能够取得良好的输出效果。



(a)光照突变前的稳态估算效果



(b)光照突变后的稳态估算效果

图 12 光照突变前后 ASMO 的估算效果

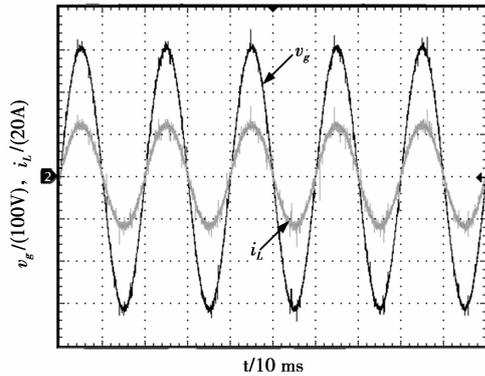


图13 稳态并网电流

4 结 论

本文通过对单相光伏并网逆变器建立合适的数学的模型,建立了用于估算光伏电池的输出电压的自适应滑模观测器,实现了光伏电池无电压传感器的最大功率跟踪,降低了控制系统的成本。该方法较先前的估算算法在跟踪精度、动态响应能力有较大提高。仿真和实验结果证明通过该算法实现的光伏电池最大功率跟踪和并网逆变性能并不会因为使用了自适应滑模观测器而变差。

参考文献

- [1] KJAER S B, PEDERSEN J K, BLAABJERQ F. A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules [J]. IEEE Transactions on Industry Applications 2005, 41(5):1292-1306.
- [2] GOMES BARBOSA P, BARGA H A C, RODRIGUES M D C B, et al. Boost current multilevel Inverter and its application on single-phase grid-connected photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(4):1116-1124.
- [3] LI Q, WOLFS P. A current fed two-inductor boost converter with an integrated magnetic structure and passive lossless snubbers for photovoltaic module integrated converter applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(1):309-321.
- [4] CHEN Y, MA-SMEDLEY K. A cost-effective single-stage inverter with maximum power point tracking[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5):1289-1294.
- [5] HO B M T, CHUNG H S H. An integrated inverter with maximum power tracking for grid-connected PV systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(4):953-962.
- [6] JAIN S, AGARWAL V. A single-stage grid connected inverter topology for solar PV systems with maximum power point tracking[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(5):1928-1940.
- [7] SHIMIZU T, WADA K, NAKAMURA N. Flyback-type single-phase utility interactive inverter with power pulsation decoupling on the DC input for an AC photovoltaic module system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(5):1264-1272.
- [8] KASA N, LIDA T, CHEN L. Flyback inverter controlled by sensorless current MPPT for photovoltaic power system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(4):1145-1152.
- [9] KWON J M, NAM K H, KWON B H. Photovoltaic power conditioning system with line connection [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(4):1048-1054.
- [10] KIM I S, KIM M B, YOUN M J. New maximum power point tracker using sliding-mode observer for estimation of solar array current in the grid-connected photovoltaic system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(4):1027-1035.
- [11] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [12] FEMIA N, PETRONE G, SPAGNUOLO G, et al. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(4):963-973.
- [13] KUO Y C, LIANG T J, CHEN J F. A high-efficiency single-phase three-wire photovoltaic energy conversion system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 50(1):116-122.
- [14] RODRIQUEZ C, AMARATUNQA G A J. Analytic solution to the photovoltaic maximum power point problem [J]. IEEE Transactions on circuits and systems, 2007, 54(9):2054-2060.
- [15] ROPP M E, GONZALEZ S. Development of a MATLAB/Simulink model of a single-phase grid-connected photovoltaic system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(1):1-8.

(编辑 张小强)