

# 光伏发电系统最大功率跟踪的研究

张小平<sup>1</sup>, 唐宇<sup>1</sup>, 周玉荣<sup>1</sup>, 刘洪<sup>1</sup>, 曹太强<sup>2</sup>

(1. 攀枝花学院电气信息工程学院 四川 攀枝花 617000; 2. 西南交通大学电气工程学院 成都 610031)

**【摘要】**详细论述了断续交错双BOOST DC/DC变换器在光伏发电系统最大功率跟踪的应用。用交错BOOST电路结构能够对太阳能板萃取最多的功率和减小输出纹波,并用滑模变控制(SMC)自适应跟踪不确定光伏发电系统的最大功率点,快速达到最大功率点切面上滑动,从而使负载获得最大功率及整个控制系统在输入、输出参数扰动的情况下实现强鲁棒控制(ROBUST control)。同时通过仿真和实验验证滑模技术能在光伏交错双BOOST变换器中减小负载的纹波电流,提高光伏效率。

**关键词** DC/DC变换器; 最大功率跟踪; 滑模技术; 不确定光伏系统; 断续交错

中图分类号 TM615

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.04.019

## Study on Maximum Power Point Tacking in the Photovoltaic Generation System

ZHANG Xiao-ping<sup>1</sup>, TANG Yu<sup>1</sup>, ZHOU Yu-rong<sup>1</sup>, LIU Hong<sup>1</sup>, and CAO Tai-qiang<sup>2</sup>

(1. School of Information and Electric Engineering, Panzhihua University Panzhihua Sichuan 617000;

2. School of Electric Engineering, Southwest Jiaotong University Chengdu 610031)

**Abstract** The application of un-continue double BOOST DC/DC inverter maximum power point tracking control of the photovoltaic generate system is discussed in detail in this paper. Interleave BOOST circuit is capable of absorbing and reduce the output wave. Then sliding model control technology used in the system can track the max power of the uncertainly photovoltaic generate system adaptively and real-time go into sliding surface, consequently obtain the maximum power. The whole system is able to improve the performance of robust control in the case of input/output parameter perturbation. The simulation and the experiments show that the sliding-model control technology is capable of reducing the ripples current of the load of in the double BOOST DC/DC interleave convener and improving the efficiency.

**Key words** double BOOST DC/DC inverter; maximum power point tracking (MPPT); sliding-model control technology (SMCT); the uncertainly photovoltaic generate; un-continue interleaving

太阳能电池输出的能量不仅与环境温度、太阳日光射能量、方位、太阳能板的端电压等相关,与光伏发电系统的变换装置、控制模式以及负载类型等也紧密相关。本文提出“自适应滑模变结构控制算法”代替常用的扰动观测法和导纳微增法控制光伏发电的最大功率点跟踪<sup>[1-2]</sup>,并通过仿真和实验验证了该方法的正确性。

扰动观察法的优点是比较简单可靠,容易实现。缺点是系统必须首先引入扰动,导致系统在最大功率点附近很小范围内来回振荡;其次,难以选择合适的变化步长,步长过小,跟踪的速度缓慢,光伏阵列可能长时间工作于低功率输出区;步长过大,在最大功率点附近的振荡又会加大。另外,当外部环境变化,系统从一个稳态变换到另一个稳态的过

程中,寻优的第一步,可能会发生方向错误。

增量电导法通过设定一些很小的变化阈值 $\Delta V_1$ 、 $\Delta V_2$ 、 $\Delta V_3$ 、 $\Delta V_4$ ,使太阳能光伏阵列最后稳定在最大功率点附近的某个点,而不是来回的跳动。当从一个稳态过渡到另一个稳态时,虽然增量电导法根据电流的变化能够正确地判断,不会出现一次误判断的过程。但是增量电导法存在的问题在于,太阳能光伏阵列可能存在一个局部的功率最大点,该算法可能导致系统稳定在一个局部的最优值。

通过以上分析可知,扰动观察法和增量电导法在实现MPPT过程中,开关管的占空比调节量 $\Delta d$ 为定值,即它们的步长都是固定的。步长过小,会使光伏阵列较长时间滞留在低功率输出区,对外界环境变化的响应慢;步长过大,又会使系统振荡加剧。

一个高性能的能量变换器是在输出很小的纹波电流以及太阳光线日射率很低的情况下都有很高的转换效率。滑模技术能够在负载变化、入射光强度变化、环境温度变化的情况下,即在太阳能电池发出的电流动态范围较大的情况下,负载也能自适应动态快速跟踪并萃取光伏发电最大能量<sup>[3-4]</sup>。本文针对光伏电池、BOOST DC/DC、负载等建立光伏发电系统的动态数学模型,根据太阳能电池的输出特性曲线找出切换函数,从DC/DC的开关控制模式推导出系统从任何初始状态出发,最终能自适应稳定于切换函数面 $S=0$ 处。

### 1 太阳能电池的工作特性

光伏电池是以半导体P-N结上接受太阳光产生光伏特效应为基础,直接将光能转化为电能的能量转换器,如图1所示。要跟踪太阳能电池输出的最大功率,关键是要量化其内部工作原理。光伏电池的开路电压 $U_{oc}$ 与入射光幅照度的对数成正比,与环境温度成反比,与电池面积大小无关,光生电流 $I_{ph}$ 正比于光伏电池的面积和入射光的幅照度。负载要得到最大功率需从光伏电池萃取(extracted from)能量。从物理和数学模型出发研究,有:

$$I_L = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_D \left[ \exp\left(\frac{qU_{oc}}{AkT} - 1\right) \right] \quad (1)$$

$$U_{oc} = \frac{AkT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_D} + 1\right) \quad (2)$$

式中  $I_L$  为负载电流;  $U_{oc}$ 是光伏电池的输出电压;  $I_D$

为太阳能电池在无光照时的饱和电流;  $A$ 为二极管的理想因子;  $K$ 为玻尔兹曼常数,  $k=1.38 \times 10^{23} \text{J/K}$ ;  $T$ 为热力学温度;  $q$ 为电子电荷电量,  $q=1.6 \times 10^{-19}$  库仑; 等等。

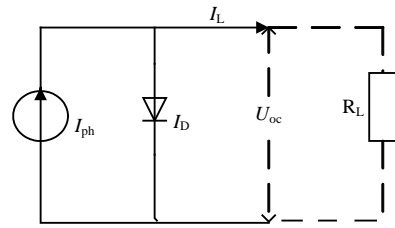


图1 光伏电池等效电路图

### 2 DC/DC数学模型

根据光伏发电系统主电路的结构和负载特性,太阳能电池阵列有不同串并联接法。为了输出大电流,用单个太阳能电池串并联,太阳能板阵列达到一定的输出电压、电流和功率。由于太阳能电池输出直流粗电,电压质量很不稳定。如果用单个的BUCK和BOOST变换器,在太阳光低辐射的情况下,变换器工作在断续模式(DCM)<sup>[5]</sup>时,造成开关态损耗高、转换效率低、负载纹波电流大。用双BOOST电路升压到负载所需的电压,能使系统稳定性和可靠性增加,同时使系统具有容错能力<sup>[3]</sup>,既能满足负载的电流,也能满足负载的电压。如图2所示,其负载可以是光伏发电系统的DC/AC逆变电路和并网电路、推挽电路、直接负载等。图中经过升压后的电压 $U_R$ 的直流电压质量比太阳能两端的端电压质量高。

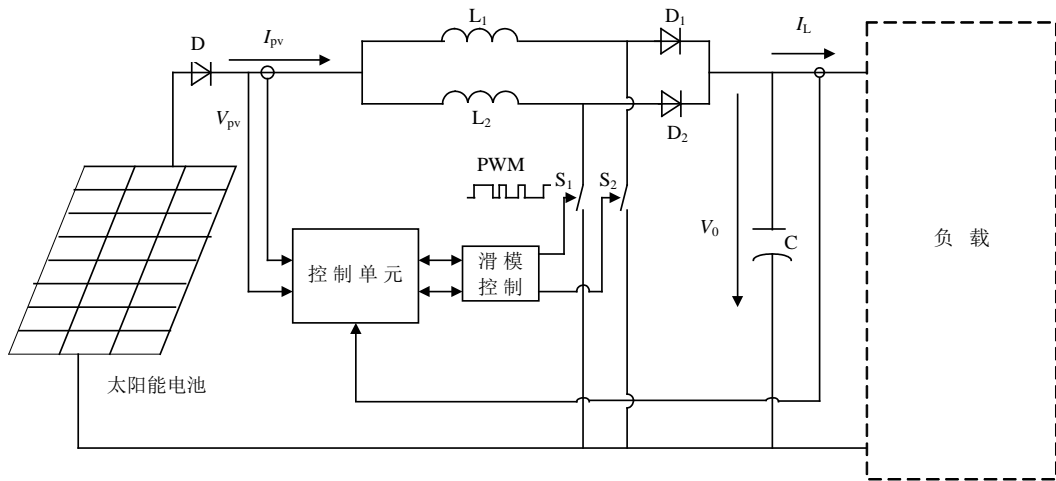


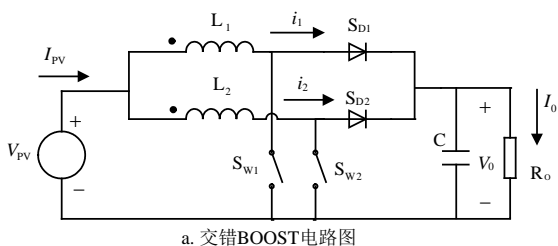
图2 光伏发电DC/DC最大功率跟踪系统电路示意图

交错BOOST电路有电感电流连续工作模式(CICM)和电感电流不连续工作模式(DICM)<sup>[4-5]</sup>两种工作模式。电感电流连续模式下的BOOST电路有传

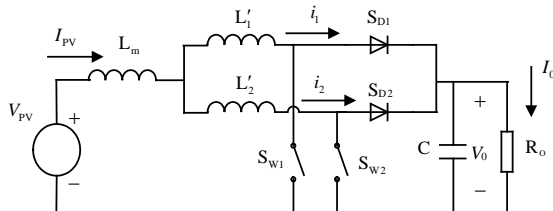
导损耗小,输入电流纹波小等优点,但电感电流连续状态下产生很大的反向恢复损耗;电感电流断续模式下的电路输入电流自动跟随输入电压,控制简

单, 开关损耗小, 减小输入电流纹波<sup>[5-8]</sup>不产生反向恢复损耗。本文用DICM电路拓扑结构转换器控制光伏发电最大功率点跟踪<sup>[7]</sup>。

在图3所示的光伏发电双BOOST DC/DC最大功率变换器示意图中, 由于同名端电感的电流比异名端电感电流大, 用交错同名端电感分析,  $V_{PV}$ 、 $I_{PV}$  为太阳能板输出的电压、电流。开关管的占空比  $D < 0.5$ , 会使负载在一个周期中从太阳能板中萃取更多的能量。图4为图3中  $S_{W1}$ 、 $S_{W2}$  在占空比小于50%的电感电流波形<sup>[6]</sup>。



a. 交错BOOST电路图



b. 图3a等效电路图

图3 光伏发电 DC/DC 双 BOOST 电路

从图4电感电流波形可知, 在  $t_0 \sim t_1$  阶段, 开关  $S_{W1}$  导通、 $S_{W2}$  关断, 漏感  $L'_1$  中电流  $i_{L1}$  以  $V_0 / (L'_1 + L'_2)$  的斜率从零开始上升, 漏感  $L'_2$  储存的能量此时还没放完, 电流  $i_{L2}$  继续以  $-V_0 / (L'_1 + L'_2)$  的斜率下降, 在  $t_1$  时刻  $L'_2$  中的电流下降到零, 此后  $t_1 \sim t_2$  阶段, 漏感  $L'_1$  中电流  $i_{L1}$  以  $V_{in} / L_1$  斜率继续上升, 在  $t_2$  时刻电感电流  $i_{L1}$  上升到最大值; 同理可分析出  $t_3 \sim t_4$ 、 $t_4 \sim t_5$  阶段中,  $L_2$  中的电流上升过程, 根据文献[6], 可计算出耦合电感中的最大电流峰值  $i_{p1}$ 、 $i_{p2}$ , 如图3所示。图中,  $D_1 = D_2 = D$ ,  $L_1 = L_2 = L$ ,  $L'_1 = L'_2 = (1 - K)L$ ,  $K$  为耦合系数,  $D$  为导通占空比,  $T_s$  为开关周期<sup>[7-10]</sup>。

对图3, 用状态空间平均技术分析其在电感电流断续模式下的稳态电压、电流<sup>[3]</sup>。设  $L_1$ 、 $L_2$  的电阻分别为  $r_1$ 、 $r_2$ , 在图5中低电平表示  $S_{w1}$ 、 $S_{w2}$  不导通, 高电平表示  $S_{w1}$ 、 $S_{w2}$  导通, 从图中可看出在  $D < 0.5$  时有4个工作模态:

$$M_1(S_{D1}, S_{D2}) \rightarrow M_2(S_{D1}, S_{W2}) \rightarrow M_3(S_{D1}, S_{D2}) \rightarrow M_4(S_{D2}, S_{W1})$$

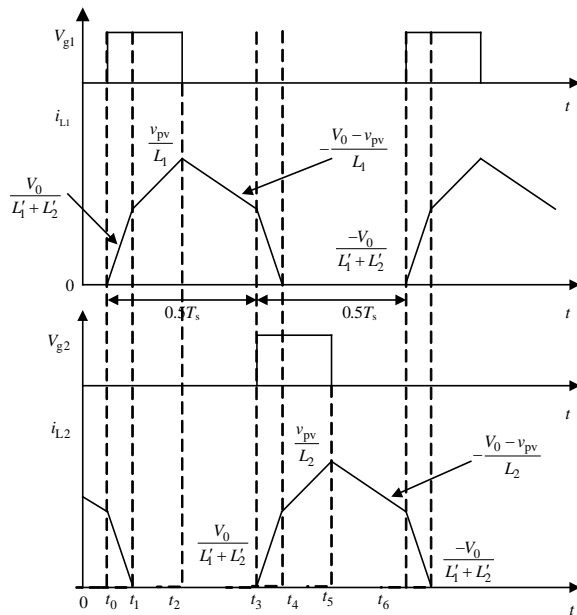


图4 采用耦合电感的电感电流波形

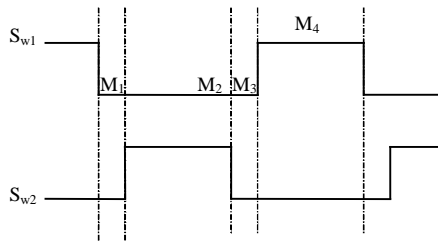


图5  $D < 0.5$  时的开关管的触发波形

在一个周期中, 每一个模态的占空比分别为  $d_{M1}$ 、 $d_{M2}$ 、 $d_{M3}$ 、 $d_{M4}$ , 假设模态1和模态3、模态2和模态4的占空比相等, 即  $d_{M1} = d_{M3}$ 、 $d_{M2} = d_{M4}$ , 则有:  $d_M = d_{M1} + d_{M2} + d_{M3} + d_{M4} = 1$ , 其4个工作状态的状态方程为:

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt} = \frac{L_2 - L_m}{L_{eq}} V_{PV} - \frac{L_2 r_1}{L_{eq}} i_1 + \frac{L_m r_2}{L_{eq}} i_2 - \frac{L_2 - L_m}{L_{eq}} V_0 \\ \frac{di_2}{dt} = \frac{L_1 - L_m}{L_{eq}} V_{PV} + \frac{L_m r_1}{L_{eq}} i_1 - \frac{L_1 r_2}{L_{eq}} i_2 - \frac{L_1 - L_m}{L_{eq}} V_0 \\ \frac{dV_0}{dt} = \frac{1}{C} (i_1 + i_2) - \frac{1}{RC} V_0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt} = \frac{L_2 - L_m}{L_{eq}} V_{PV} - \frac{L_2 r_1}{L_{eq}} i_1 + \frac{L_m r_2}{L_{eq}} i_2 - \frac{L_2 - L_m}{L_{eq}} V_0 \\ \frac{di_2}{dt} = \frac{L_1 - L_m}{L_{eq}} V_{PV} + \frac{L_m r_1}{L_{eq}} i_1 - \frac{L_1 r_2}{L_{eq}} i_2 + \frac{L_m}{L_{eq}} V_0 \\ \frac{dV_0}{dt} = \frac{1}{C} i_1 - \frac{1}{RC} V_0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt} = \frac{L_2 - L_m}{L_{eq}} V_{PV} - \frac{L_2 r_1}{L_{eq}} i_1 + \frac{L_m r_2}{L_{eq}} i_2 - \frac{L_2 - L_m}{L_{eq}} V_0 \\ \frac{di_2}{dt} = \frac{L_1 - L_m}{L_{eq}} V_{PV} + \frac{L_m r_1}{L_{eq}} i_1 - \frac{L_1 r_2}{L_{eq}} i_2 - \frac{L_1 - L_m}{L_{eq}} V_0 \\ \frac{dV_0}{dt} = \frac{1}{C} (i_1 + i_2) - \frac{1}{RC} V_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中  $L_{eq} = L_1 L_2 - L_m^2$ 。

上述方程的状态方程为:

$$\dot{X} = [A][X] + [B][U] \quad (7)$$

其中:

$$[X] = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ v_0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt} = \frac{L_2 - L_m}{L_{eq}} V_{PV} - \frac{L_2 r_1}{L_{eq}} i_1 + \frac{L_m r_2}{L_{eq}} i_2 + \frac{L_m}{L_{eq}} V_0 \\ \frac{di_2}{dt} = \frac{L_1 - L_m}{L_{eq}} V_{PV} + \frac{L_m r_1}{L_{eq}} i_1 - \frac{L_1 r_2}{L_{eq}} i_2 - \frac{L_1}{L_{eq}} V_0 \\ \frac{dV_0}{dt} = \frac{1}{C} i_2 - \frac{1}{RC} V_0 \end{cases} \quad (6)$$

$$[B] = \begin{pmatrix} 2d_{M1} \frac{L_2 - L_m}{L_{eq}} + 2d_{M2} \frac{L_2 - L_m}{L_{eq}} \\ d_M \frac{L_1 - L_m}{L_{eq}} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$[A] = \begin{pmatrix} -2(d_{M1} + d_{M2}) \frac{L_2 r_1}{L_{eq}} & 2(d_{M1} + d_{M2}) \frac{L_m r_2}{L_{eq}} & (2d_{M1} - d_{M2}) \frac{L_2 - L_m}{L_{eq}} \\ d_M \frac{L_m r_1}{L_{eq}} & -d_M \frac{L_1 r_2}{L_{eq}} & 2d_{M1} L_m + d_{M2} (L_m - L_1) \\ (2d_{M1} + d_{M2}) \frac{1}{C} & (2d_{M1} + d_{M2}) \frac{1}{C} & -2(d_{M1} + d_{M2}) \frac{1}{RC} \end{pmatrix}$$

$[U] = [V_{pv}]$ 。假设  $r_1 = r_2 = r$ 、 $d_{M1} = d_{M3}$ 、 $d_{M2} = d_{M4}$ 、 $d_{M1} + d_{M2} = 0.5$ 、 $L_1 = L_2 = L$ ，因此:

$$[A] = \begin{pmatrix} -\frac{Lr}{L_{eq}} & \frac{L_m r}{L_{eq}} & \frac{L - L_m}{L_{eq}} \\ \frac{L_m r}{L_{eq}} & \frac{Lr}{L_{eq}} & 2d_{M1} L_m + d_{M2} (L_m - r) \\ (2d_{M1} + d_{M2}) \frac{1}{C} & (2d_{M1} + d_{M2}) \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix}$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{L_2 - L_m}{L_{eq}} \\ \frac{L_2 - L_m}{L_{eq}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \frac{V_0}{V_{pv}} = \frac{2R(1-D)}{2R(1-D)^2 + r} \quad (8)$$

假设  $r \ll R$ ，则有:

$$V_0 = \frac{V_{pv}}{1-D} \quad (9)$$

假设其转换效率为  $\eta$ ，则负载电流为:

$$I_0 = \eta(1-D)I_{pv} \quad (10)$$

式(7)的稳态方程为:

$$[X_{ss}] = -[A]^{-1}[B][U]$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_{pv}}{2R(1-D)^2 + r} \\ \frac{V_{pv}}{2R(1-D)^2 + r} \\ \frac{2RV_{pv}(1-D)}{2R(1-D)^2 + r} \end{bmatrix}$$

则有电压增益:

从式(8)~式(9)可知，光伏发电负载终端的电压、电流和负载阻抗与占空比  $D$  有关，因此光伏发电在交错BOOST中的最大功率控制不仅与太阳光的强度和温度有关，还与DC/DC开关管的占空比有关。控制BOOST DC/DC的占空比就能使光伏发电系统始终输出最大功率<sup>[10]</sup>。

### 3 CVT的滑模控制技术

CVT控制技术可控制太阳能电池的输出电压固

定不变。传统CVT方法通过简单的模拟电路就能实现，但稳定性差，还会损失一部分光伏功率。滑模控制具有卓越的动态特性和鲁棒性，结合CVT控制技术并用交错BOOST能够快速地实现太阳能电池的最大功率跟踪。

### 3.1 控制器的设计

根据CVT控制技术和滑模控制原理，太阳能电池输出功率可以按照滑模运动方式快速进入最大输出功率状态，设计切换面方程为：

$$\alpha(V_{pmax} - v_{pv}) + \frac{d(V_{pmax} - v_{pv})}{dt} = 0 \tag{11}$$

式中  $\alpha$ 为滑模系数； $V_{pmsx}$ 为光伏电池最大功率输出时的电压； $v_{pv}$ 为光伏电池的实际输出电压。

由式(11)取切换函数为：

$$s = \alpha(V_{pmax} - v_{pv}) + \frac{d(V_{pmax} - v_{pv})}{dt} \tag{12}$$

根据式(12)设计滑模控制律为：

$$u = \begin{cases} 0 & s \geq 0 \\ 1 & s < 0 \end{cases} \tag{13}$$

根据式(13)控制图2的DC/DC双BOOST开关 $S_1$ 、 $S_2$ 的开或关，满足在光伏发电系统工作时，无论太阳光的入射率和温度环境如何变化，都能使太阳能电池的输出电压保持恒定不变，从而实现CVT控制<sup>[11]</sup>。

### 3.2 仿真分析

对图2电路进行仿真分析，BOOST变换器主要仿真参数为： $L_1=L_2=10\text{ mH}$ ， $L_m=5\text{ mH}$ ， $C=4\ 700\ \mu\text{F}$ ，负载电阻为 $10\ \Omega$ ，仿真结果如图5、图6所示。

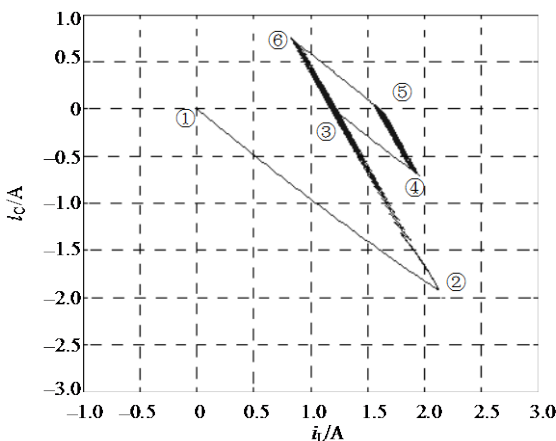


图5 DC/DC滑模控制电感、电容电流仿真波形

图5中，①→②→③是系统启动时的工作状态；③→④→⑤是太阳能电池的光线增强时的滑模工

作状态；⑤→⑥→⑦表示光线减弱的工作状态。从图6中可以看出，在外界环境因素变化时，采用滑模控制可以快速地跟踪太阳能电池的最大功率<sup>[12]</sup>。

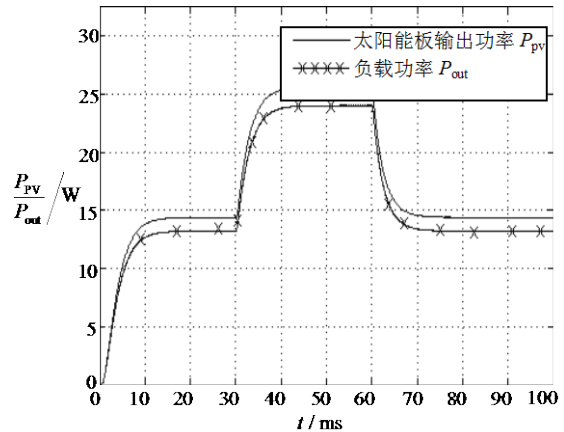


图6 滑模控制输入、输出最大功率仿真波形

## 4 结论

通过光伏发电BOOST DC/DC变换器最大功率点跟踪分析，得出以下结论：

- (1) 滑模变结构控制能快速地达到切换面，并随着光伏系统输入/输出参数(温度、光线强度、数据采集、系统内部参数等)的变化，使光伏电池输出最大的功率，并表现出其鲁棒性；
- (2) 该控制算法在光伏发电系统的逆变、并网技术中同样可以应用；
- (3) 电感电流工作在断续模式下的交错双BOOST变换器，能使转换效率高，负载谐波成分少，输入输出电流的纹波幅度降低，纹波频率高。
- (4) 以上的控制方法在实际应用中还需要根据具体情况进一步改进。

### 参考文献

- [1] KIM T Y, AHN H G, PARK E K, et al. A novel maximum power point tracking control for photovoltaic power system under rapidly changing solar radiation[C]//Pro of IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Pusan: IEEE, 2001: 1011-1014.
- [2] MUTOH N, OHNO M, INOUE T. A method for MPPT control while searching for parameters corresponding to weather conditions for PV generation systems[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1055-1065.
- [3] SIRI K, LEE C Q, WU T F. Current distribution control for parallel connected converters-part I and II[J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 1992, 28(3): 829-851.
- [4] GHASARI J, HABIBI M, BAKHSHAI A. An MPPT controller design for photovoltaic (PV) systems based on the optimal voltage factor tracking[C]//IEEE Electrical Power Conference on Canada 2007. [S.l.]: IEEE, 2007.

- [5] WONG P L, WU Q, XU P, et al. Investigating coupling inductors in the interleaving QSW VRM[C]//Proceedings of the Power Electronics Specialist Conference (PESC) IEEE PESC01. New Orleans, Louisiana: IEEE, 2000: 1172-1181.
- [6] SERA D, KEREKES T, TEODORESCU R, et al. Improved MPPT algorithms for rapidly changing environmental conditions[C]//Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC. Portoro, Slovenia: [s.n.], 2006.
- [7] CHAN C H, PONG M H. Interleaved BOOST power factor corrector operating in discontinuous-inductor-current mode[C]//Power Conversion Conference, IEEE PCCON. Nagaoka, Japan: IEEE, 1997: 1405-1410.
- [8] CHENG D K W, LIU X C, LEE Y S. A new modified boost converter with ripple free input current by using coupled inductors[C]//Conf Power Electronics and Variable Speed Drives. London, U K: [s.n.], 1998: 592-599.
- [9] LIU F, DUAN S, LIU F, et al. A variable step size INC MPPT method for PV systems[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2008, 55(7): 2622-2628.
- [10] LEE P W, LEE Y S, LIU X C. Steady-state analysis of an interleaved boost converter with coupled inductors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 4(47): 787-795.
- [11] GIRAL R, MARTINEZ-SALAMERO L, LEYVA R, et al. Sliding-mode control of Interleave boost converters[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 2000, 47(9): 1330-1339.
- [12] FERMIAN N, GRANOZIO D, PETRONE G, et al. Predictive & adaptive MPPT perturb and observe method[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(3): 934-950.

编辑 漆蓉

---

 (上接第545页)

- [9] O'NEIL S D, PAO L Y. Multisensor fusion algorithm for tracking[C]//Proc 1993 American Control Conf. San Francisco: IEEE, 1993.
- [10] BAR-SHALOM Y. Multitarget multisensor tracking: Principles and techniques[M]. Storrs C T: YBS Publishing, 1995.
- [11] BAR-SHALOM Y. Multitarget multisensor tracking: applications and advances[M]. Boston: Artech House, 1992.
- [12] DEB S, YEDDANAPUDI M, PATTIPATI K, et al. An generalized S-D assignment algorithm for multisensor-multitarget state estimation[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1997, 33(2): 523-527.
- [13] DEB S, PATTIPATI K, BAR-SHALOM Y. A multisensor-multitarget data association algorithm for heterogeneous sensors[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(2): 560-568.
- [14] JULIER S J, UHLMANN J K. A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems[C]//Proceedings of Aero Sense: the 11th International Symposium on Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Controls. Orlando: SPIE, 1997.
- [15] JULIER S J. A new method for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2000, 45(3): 477-482.
- [16] JULIER S J, UHLMANN J K. Unscented filtering and nonlinear estimation[J]. Proceedings of the IEEE 2004, 92(3): 401-422.
- [17] 易旭, 李立萍. 一种新的单站被动跟踪方案[J]. 电子科技大学学报, 2005, 34(3): 304-307.  
YI Xu, LI Li-ping. A new method for single observer passive tracking[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2005, 34(3): 304-307.
- [18] LI Wang-chun, WEI Ping, XIAO Xian-ci. Novel simplex unscented transform and filter[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2008, 6(1): 61-65.
- [19] 张晶炜, 熊伟, 何友. 几种简化联合概率数据互联算法性能分析[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(10): 1807-1810.  
ZHANG Jing-wei, XIONG Wei, He You. Analysis to a few simplified algorithms based on joint probabilistic data association[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(10): 1807-1810.

编辑 税红