

·测试、试验与仿真·

## 基于 Boost 电路的光伏发电 MPPT 控制系统仿真研究

胡长武, 李宝国, 王兰梦, 滕宁宁

(辽宁工业大学电气工程学院, 辽宁 锦州 121001)

**摘要:** 基于光伏电池输出特性及 MPPT 控制原理的分析, 研究了基于 Boost 电路的光伏发电 MPPT 控制系统的模型, 并分析了该模型中各子模块的工作原理, 并应用 Simulink 软件搭建了整个系统的仿真模型。以光伏阵列 STP0950S-36 为例, 仿真验证了所研究的 MPPT 控制系统能很好地实现最大功率跟踪, 并能快速响应外界环境的变化, 有效提高光伏发电的效率。

**关键词:** Boost 电路; 光伏发电; MPPT 控制; Simulink 仿真

中图分类号: TN710.6

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-01-0084-05

## Simulation Research on MPPT Control System with Photovoltaic (pv) Power Generation Based on Boost Circuit

HU Chang-wu, LI Bao-guo, WANG Lan-meng, TENG Ning-ning

(School of Electrical Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001)

**Abstract:** Based on the output characteristics of photovoltaic (pv) battery and the analysis of MPPT control theory, a model of MPPT control system with pv power generation of Boost circuit is researched. The operation principles of each sub-module in the model are analyzed. And the simulation model of the whole system is built by Simulink software. Taking photovoltaic array STP0950S-36 as an example, the simulation verifies that the maximum power tracking can be well realized by MPPT control system and the changes of exterior environment can be responded quickly and the efficiency of photovoltaic power generation can be improved effectively.

**Key words:** Boost circuit; photovoltaic (pv) power generation; MPPT control; Simulink simulation

光伏发电是开发和利用太阳能最重要的形式, 光伏电池是光伏发电的重要部分, 光伏电池的输出特性因本身参数及外界温度、照度及负载的影响而具有非线性<sup>[1-7]</sup>。为了有效提高光伏发电效率, 现在都普遍对光伏发电系统加 MPPT (maximum power point tracking, 最大功率点跟踪) 控制装置。

对于光伏发电系统来说, 典型的 MPPT 控制模型主要包括光伏阵列模块、MPPT 算法及 PWM 模块、DC/DC 变换模块<sup>[1-2]</sup>。光伏阵列是由多个光伏电池单体串、并联连接和严密封装形成的。MPPT 模块主要是控制算法, 目前国内外出现的 MPPT 算法种类繁多, 有各自的优缺点, 其中扰动观察法 (P&O) 和增量电导法 (INC) 因发展成熟、控制简单、精度高而被普遍采用<sup>[5]</sup>, PWM 模块输出用以作为后级 DC/DC 电路

的驱动信号。DC/DC 变换中 Buck 和 Boost 变换器效率是最高的<sup>[1]</sup>, Buck 作为降压型实现高压变换为低压, 通常光伏阵列输出电压等级较低, 若要并网, 网侧等级较高, 故而 Buck 电路较少用于并网系统。Boost 电路属升压型, 可以将光伏阵列输出电压抬高, 易于实现并网, 同时, Boost 电路的阻抗变换功能常用于 MPPT 控制, 驱动也相对容易。

基于对光伏发电 MPPT 控制模型的分析, 分别搭建该模型中各模 Simulink 模型, 其中光伏电池模型采用工程数学模型, MPPT 算法采用 INC 法, DC/DC 变换采用 Boost 升压变换器, 基于以上模块的分析, 研究了基于 Boost 电路 MPPT 控制系统, 并将其应用于对光伏发电系统的 MPPT 控制的分析与研究。

### 1 光伏电池特性分析

式(1)为目前诸多文献给出的光伏电池工程数学模型

$$I = I_p - I_o \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + I R_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + I R_s}{R_{SH}} \quad (1)$$

式中,  $I_p$  为光生电流;  $I_o$  为二极管饱和电流;  $A$  为二极管品质因子;  $q$  为电荷常量;  $K$  为 Boltzman 常数;  $T$  为光伏电池温度;  $R_s$ 、 $R_{SH}$  分别是光伏电池的串、并联内电阻。图1为光伏电池的输出特性曲线。由图1知, 光伏电池的输出具有非线性, 系统不同的运行工况对应不同的输出电压和电流, 在  $V$ - $P$  曲线中存在唯一的输出功率最大值  $M$  点 (MPP, maximum power point)。就光伏发电 MPPT 控制来说, 就是根据外界光照温度的变化, 采用相应的控制算法实时调整工作点  $M$ , 使得光伏阵列时刻输出最大功率, 这即是光伏发电最大功率跟踪原理。由图1中  $V$ - $I$  曲线可知, 在光伏电池 MPP 点左侧  $AB$  范围内光伏电池输出具有恒流源特性。

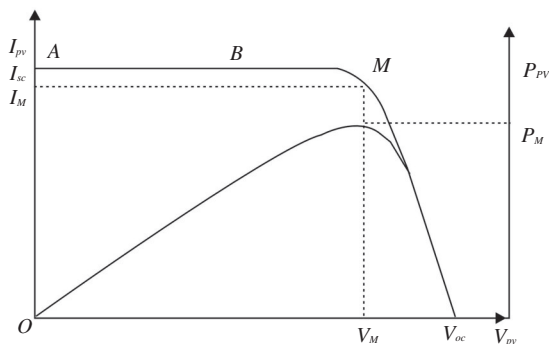


图1 光伏电池输出特性

### 2 MPPT控制系统建模

MPPT控制利用在光伏阵列与负载之间加上具有MPPT功能DC/DC变换器, 并结合相应的MPPT算法来完成最大功率跟踪, 如图2所示为光伏电池MPPT控制系统原理图<sup>[2]</sup>。

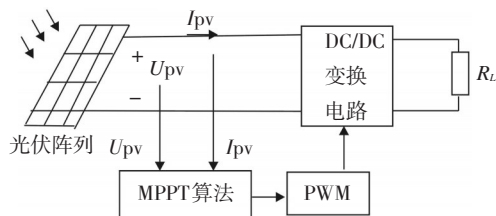


图2 MPPT控制原理图

由图2可知, MPPT控制模型包括光伏阵列、MPPT算法、PWM及DC/DC变换电路四个环节, 下面就各模块的原理及分别进行说明。

#### 2.1 光伏阵列

单体太阳能电池大约只产生0.5V的电压, 因此不能直接作为电源使用。在实际应用中必须将若干单体电池串、并联连接和严密封装形成阵列。光伏阵列 (Photovoltaic (pv) array) 是太阳能发电系统中的核心部分, 其作用是将太阳能转化为电能, 或送往蓄电池中存储起来, 或推动负载工作。结合式(1)可得出光伏阵列的数学模型

$$I = N_p \cdot I_p - N_p \cdot I_o \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + I R_s)}{N_s \cdot AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + I R_s}{R_{SH}} \quad (2)$$

式中,  $N_s$ 、 $N_p$  为光伏阵列串、并联单体太阳能电池的个数, 该式为超越方程, 实际应用较少。实际分析光伏阵列的工作特性普遍采用光伏电池工程数学模型<sup>[5-6]</sup>, 如式(3)所示

$$I = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[ \exp \left( \frac{V}{C_2 V_{oc}} \right) - 1 \right] \right\} \quad (3)$$

式中,  $C_1 = \left( 1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \exp \left( -\frac{V_m}{C_2 V_{oc}} \right)$

$$C_2 = \left( \frac{V_m}{V_{oc}} - 1 \right) \left[ \ln \left( 1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right]^{-1}, I_{sc}、V_{oc}、I_m、$$

$V_m$  为光伏阵列生产厂家在标准条件下提供的技术参数: 短路电流、在开路电压、最大功率点处电流、电压, 式(3)相对于式(2)的简单实用性已在相关文献中得到了验证<sup>[5,6,8]</sup>, 其Simulink模型也相对易实现<sup>[8]</sup>。

#### 2.2 Boost电路

DC/DC变换采用Boost电路, 在光伏发电系统中光伏阵列输出电压  $U_{pv}$  即是Boost电路的电源, 设Boost电路输出电压  $U_o$ 。图3为Boost电路, 电路工作时开关元件  $V$  处于通态, 二极管  $VD$  关断, 随着  $L$  的增加, 电源  $U_{pv}$  开始向大电感  $L$  储存能量, 同时大电容  $C$  向负载  $R_L$  供电, 此时  $U_o = U_{pv}$ 。当  $V$  关断时, 由于电感中电流无法突变, 迫使  $VD$  导通, 并与电容一起经二极管向负载供电, 同时向电容  $C$  充电, 此时  $U_k = U_{pv} - U_o$ 。

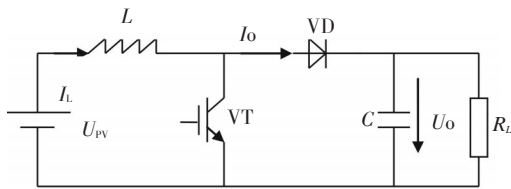


图3 Boost升压变换器原理图

由上述分析,得到Boost电路输出电压 $U_{pv}$ 与输出电压 $U_o$ 的关系式

$$U_{pv} \cdot D \cdot T + (U_{pv} - U_o) \cdot (1 - D \cdot T) = 0 \quad (4)$$

式中, $T$ 为开关管的开关周期; $D$ 为占空比数值在0~1; $D \cdot T$ 为开关管的导通时间; $(1 - D \cdot T)$ 为开关管的截止时间。整理后得: $U_o = \frac{1}{1-D} U_{pv}$  (5)

如图4所示,设Boost电路所带负载 $R_L$ (负载为RLC负载),设变换器效率为100%,忽略其内阻抗,则Boost电路可实现对负载 $R_L$ 的阻抗变换<sup>[4]</sup>。

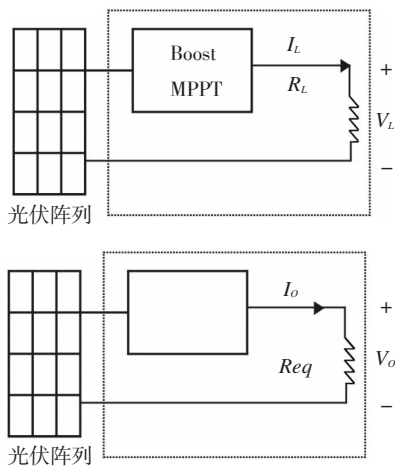


图4 Boost电路实现阻抗变换

由Boost电路输入电压和输出电压关系可得:

$V_o = V_L \cdot (1 - D)$ , 又因变换前后的功率相等,所以  $I_o = I_L / (1 - D)$ , 则等效电阻  $Req$  为

$$Req = \frac{V_o}{I_o} = \frac{V_L \cdot (1 - D)}{I_L / (1 - D)} = R_L \cdot (1 - D)^2 \quad (6)$$

由上式可知,当调节Boost电路开关占空比 $D$ ,就可以改变其输入阻抗的大小。当改调节占空比 $D$ ,使得Boost电路等效输入阻抗 $Req$ 与光伏阵列输出阻抗相匹配时,则光伏电池将输出最大功率。

### 2.3 MPPT控制模块

MPPT控制模块是光伏发电系统实现MPPT的核心部件,该模块主要实现的功能是利用相关的MPPT算法控制Boost电路的占空比,从而实现PWM脉宽调制输出信号对Boost电路的驱动。因此,这一模块应包含MPPT算法和PWM的实现两部分。

图5为其仿真模型,该模型采用INC法实现PWM控制。INC法作为MPPT控制算法,该算法精度高易实现,其原理为:由图1光伏电池的 $V-P$ 曲线知,在MPP处有 $dP/dU=0$ ,通过数学推导可以得出在MPP处有式 $dI/dU = -I/U$ 成立,即当光伏电池输出电导的变化量( $dG=dI/dU$ )等于输出电导( $G=I/U$ )的负值时,太阳能电池工作于最大功率点,这即是INC法的实现原理。因此,可以根据式 $(G+dG)$ 的符号情况来辨别光伏发电系统是否工作于MPP处,如 $G+dG < 0$ 时,判断系统位于MPP右侧,此时应减小输出电压;当 $G+dG > 0$ 时,可知系统位于MPP左侧,此时应增加输出电压;恰如其符号为零时,系统工作在MPP处。

图5中用零阶保持器来实现对光伏阵列输出电压和电压的采样,采样周期设为0.001,用有记忆延迟功能的“memory”来保存本周期采样值,同时作为下一个周期的比较值输入。“Repeating Sequence”是三

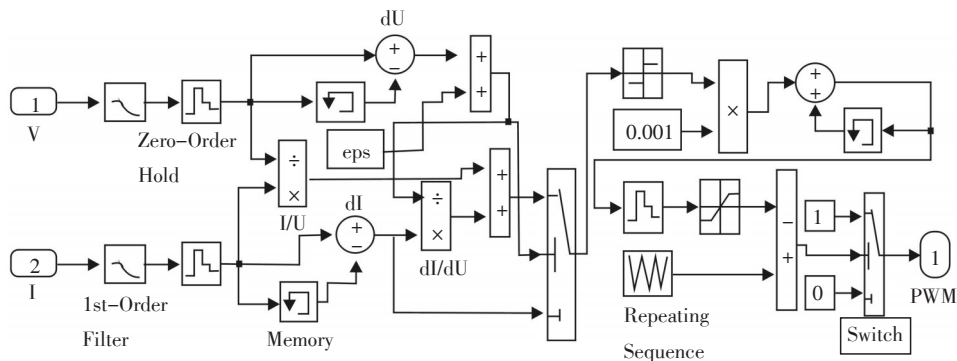


图5 MPPT算法仿真模型

角载波发生信号,与MPPT算法控制信号相比较后,输入“Switch”,“Switch”输出PWM信号驱动DC-DC电路。

### 3 仿真研究

由前节叙述,图6为搭建的MPPT控制系统的仿真模型。图中采用阶跃信号模块来模拟光照 $S$ 和温

度 $T$ 的变化,用电流、电压测量模块来采集光伏阵列的输出电流 $I_{pv}$ 和输出电压 $V_{pv}$ 及MPPT完成后系统的输出电流 $I_o$ 和电压 $V_o$ ,Boost电路所带 $R$ 为纯电阻负载。仿真时光伏阵列采用文献[3]中的STP0950S-36型号,其标准条件下参数: $V_{oc}=24.2\text{ V}$ , $I_{sc}=4.8\text{ A}$ , $V_{mpp}=21.7\text{ V}$ , $I_{mpp}=4.5\text{ A}$ , $P_{mpp}=94\text{ W}$ , $R=10\ \Omega$ 。图中Scope模块输出 $P_{pv}$ 代表光伏阵列输出功率、 $P_{out}$ 表示应用MPPT控制后Boost电路输出功率。

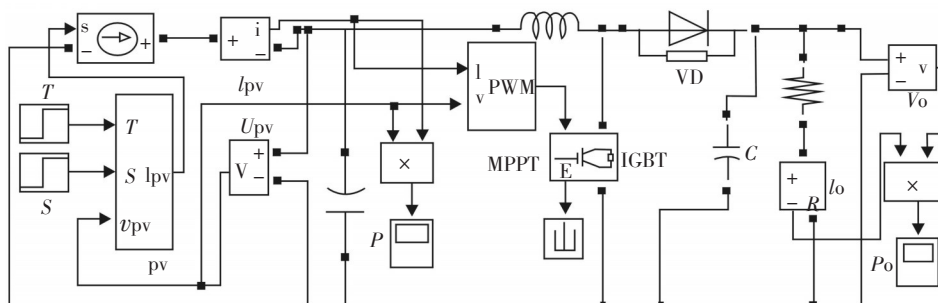


图6 MPPT控制系统仿真模型

首先模拟系统在标准条件的MPPT控制,仿真时 $S=1\text{ kW/m}^2$ 、 $T=25\text{ }^\circ\text{C}$ ,仿真结果如图7所示。其中图7a为光伏阵列输出功率 $P_{vp}$ 的仿真曲线,结果表明 $P_{vp}$ 曲线存在很大的波动,输出 $P_{vp}$ 的值在90W附近振荡十分剧烈,这势必会造成系统能量的损失。图7b为经MPPT控制后系统的输出功率。结果显示 $P_{out}$ 曲线光滑较理想、跟踪迅速,系统大约在0.06s时实现了MPPT并稳定工作于90W左右,这与已知给定的参数 $P_{mpp}$ 仅差4W,误差为4.26%。经仿真分析表明,文中搭建的MPPT控制系统可行且有较高的准确性,可以用于光伏发电MPPT控制。

光伏发电的效率深受外界环境如光照温度的影响,为进一步探究外界环境对光伏发电MPPT的影响,可以对光照和温度发生突变的情况进行仿真,仿

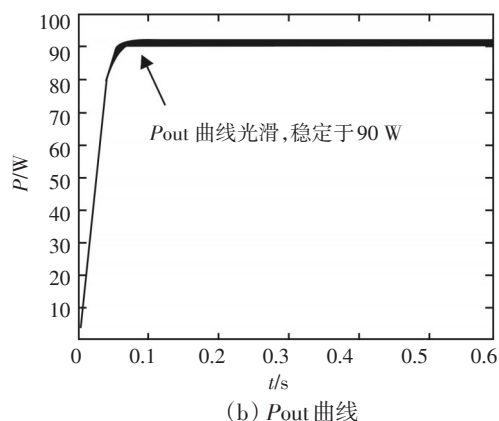
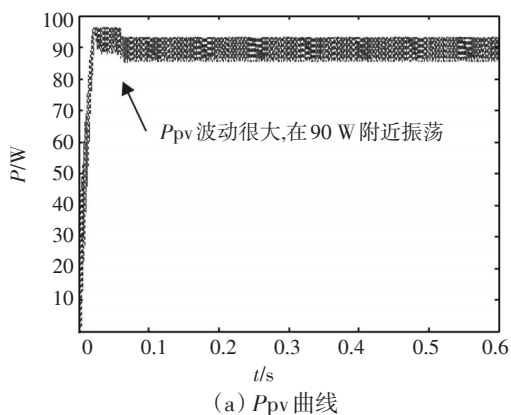


图7 标准条件下MPPT控制系统仿真结果

真时设置仿真时间为0.6s,光照从 $750\text{ W/m}^2$ 突变为 $300\text{ W/m}^2$ ,温度从 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 突变为 $60\text{ }^\circ\text{C}$ ,光照和温度突变时间均发生在0.3s,仿真结果如图8所示。

由图8a、图8b的功率输出曲线对比分析可知,光照和温度对功率产生很大的影响,同时采用MPPT控制对光伏发电系统也重要意义。图8a中的 $P_{pv}$ 曲线为未采用MPPT控制的功率输出曲线,图8b可知曲线在反应起始阶段和外界环境突变时均存在很大的波动,而经MPPT控制后系统输出功率如图8b中的 $P_{out}$ 曲线十分光滑无波动,在外界环境突变时也能平滑过渡最终稳定于MPP。同时对图8c、图8d曲线可知,采用MPPT控制后系统的输出电压 $U_{out}$ 、



(a)  $P_{pv}$  曲线

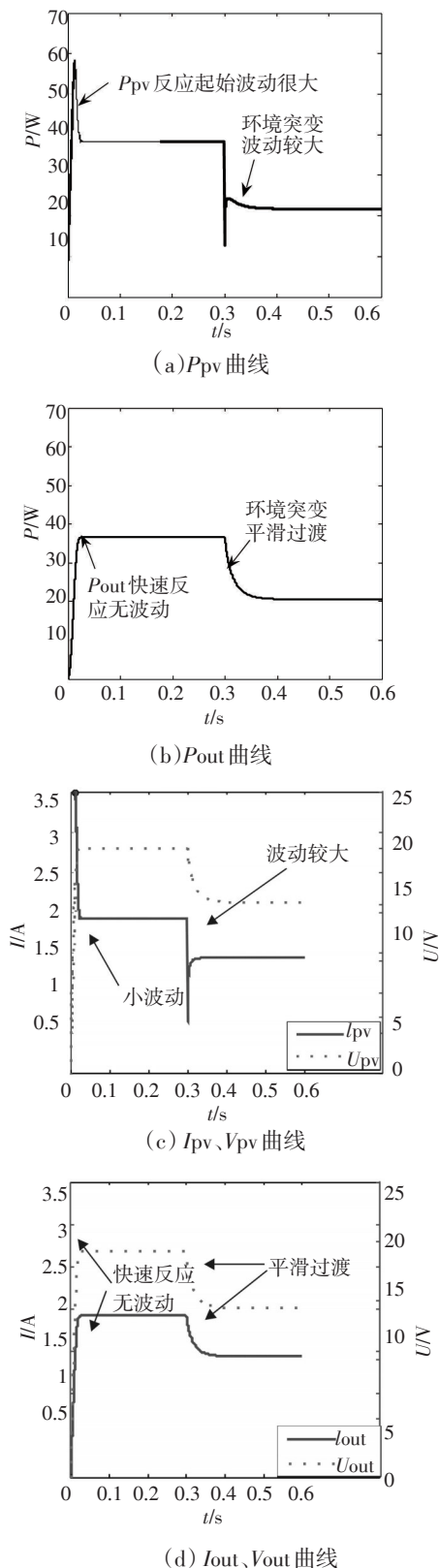


图8 环境突变时光伏发电MPPT控制仿真结果

输出电流  $I_{out}$  曲线相比于光伏阵列输出电流  $I_{pv}$ 、输出电压  $U_{pv}$  曲线能快速反应外界环境突变并能平滑过渡及不会产生波动的特点。

## 4 结 论

在分析光伏电池特性及MPPT的工作原理的基础上,以基于Boost电路的MPPT控制系统为研究对象,应用Simulink模块搭建了整个控制系统的仿真模型。并对其在标准条件及外界温度、光照变化时做了详细的仿真。结果表明,研究的MPPT控制系统可以用于对光伏发电系统的MPPT及仿真研究,这对研究外界环境对光伏发电MPPT控制的影响有重要意义。同时在仿真时Boost电路负载取纯感性负载,至于容抗性负载是否对MPPT控制系统存在影响,还需进一步做深入研究。

## 参考文献

- [1] 孙志松. 光伏并网发电系统的 MATLAB 仿真研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.
- [2] 闫亮. 改进的光伏发电系统最大功率点跟踪方法[J]. 现代建筑电气, 2012, 3(3): 33-37.
- [3] 王厦楠. 独立光伏发电系统及其 MPPT 的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [4] 刘军, 张成林. 光伏发电系统最大功率点跟踪算法的研究[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2012, 33(1): 78-81.
- [5] 苏建徽, 余世杰, 赵为, 等. 硅太阳能电池工程数学模型[J]. 太阳能学报, 2011(22): 409-412.
- [6] 茆美琴, 余世杰, 苏建徽. 带有 MPPT 功能的光伏阵列 Matlab 通用仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(5): 1245-1252.
- [7] 唐静. 光伏发电系统及其最大功率跟踪控制策略的研究[D]. 河南: 河南师范大学, 2012.
- [8] 基于 Simulink 的光伏电池组件建模和 MPPT 仿真研究[J]. 科技导报, 2010, 28(18): 94-97.
- [9] 戴哲, 田颖, 石岩. 光电模拟器的设计及在半实物仿真试验中的应用[J]. 光电技术应用, 25(2): 68-70.
- [10] 李春鑫. 基于变换观测模型的粒子滤波跟踪算法[J]. 光电技术应用, 26(3): 78-82.
- [11] 张正茂, 胡心. 基于 PSpice 的光电探测电路仿真分析[J]. 光电技术应用, 27(5): 69-72.