

基于 S-函数光伏阵列最大功率追踪的控制策略

邓 栋, 易灵芝, 李 明, 姚哲之, 颜志刚

(湘潭大学 信息工程学院, 湖南 湘潭 411105)

摘要: 研究了光伏阵列的输出特性, 搭建了 MATLAB 环境下光伏阵列的通用仿真模型, 选用 BOOST 电路, 采用最大功率追踪控制策略, 通过 S-函数实现最大功率追踪和输出电压稳定。该系统不仅硬件设计和控制算法简单, 且通过仿真实验结果表明, 该系统能准确反映光伏阵列输出电压、电流的非线性特性, 并能较好地跟踪最大功率点。

关键词: 光伏阵列; BOOST 电路; 最大功率追踪; S-函数; 仿真

中图分类号: TM615

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2009)05-0052-03

A Control Method of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Based on S-Function

Deng Dong, Yi Lingzhi, Li Ming, Yao Zhezhi, Yan Zhigang

(College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan Hunan 411105, China)

Abstract: Studied the output features of photovoltaic(PV) array, set up a versatile PV array simulation model under Matlab environment, selected BOOST electric circuit, used maximum power point tracking control method and achieved maximum power point tracking and output voltage stability through S-function. This system was not only easy in its hardware design and control algorithm, but also the simulation result indicated that it could accurately reflect PV array output voltage and the current nonlinear features and could better track the maximum power point.

Keywords: Photovoltaic array(PV array); BOOST electric circuit; maximum power point tracking; S-function; simulation

当前, 由于全球性能源危机, 世界各国普遍重视清洁的可再生能源的研究开发与利用, 如水能、风能和太阳能等, 光伏发电已成为研究的热点^[1-2]。由于器件本身的复杂特性, 迄今为止光伏电池的转换效率仍然很低, 且光伏电池的输出特性具有非线性, 这种非线性受到外部环境(包括日照强度、温度、负载等)及本身技术指标(如输出阻抗等)的影响, 使得光伏电池的输出功率发生变化, 其实际转换效率受到进一步限制, 所以, 对光伏电池输出特性的研究成为该行业的重要课题。

1 光伏阵列的数学和仿真模型

在实际应用中, 光伏模块常通过串并联方式组合成光伏阵列^[3], 其数学模型推导如下。

任意太阳辐射强度 S_a ($\text{w} \cdot \text{m}^{-2}$) 和环境温度 T_a ($^{\circ}\text{C}$) 条件下, 太阳能电池温度(节温) T_c 为:

$$T_c = T_a + t_c \cdot S, \quad (1)$$

式中: S 为光伏阵列倾斜面上总太阳辐射强度;

t_c 为太阳能电池模块的温度系数。

设在参考条件下, I_{sc} 为短路电流, V_{oc} 为开路电压,

收稿日期: 2009-07-15

基金项目: 教育部全国工程硕士教育课题(GJW0701), 湖南省教育厅科研基金资助项目(07C760)

作者简介: 邓 栋(1985-), 男, 湖南武冈人, 湘潭大学硕士研究生, 主要研究方向为光伏并网逆变技术,

E-mail: dengdong_1985@qq.com

I_m 、 V_m 为最大功率点电流和电压^[4], 则当光伏阵列电压为 V 时, 其对应点电流 I 为:

$$I = I_{sc} \left(1 - C_1 \left(e^{\frac{V}{C_2 V_{oc}}} - 1 \right) \right), \quad (2)$$

式中: C_1 、 C_2 为中间变量, 且 $C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) e^{\frac{V_m}{C_2 V_{oc}}}$;

$$C_2 = \left(\frac{V_m}{V_{oc}} - 1 \right) / \ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right).$$

考虑到太阳辐射变化和温度影响时,

$$I = I_{sc} \left(1 - C_1 \left(e^{\frac{V \Delta h_c}{C_2 V_{oc}}} - 1 \right) \right) D_T, \quad (3)$$

式中: D_I 、 D_V 、 D_T 均为中间变量, 且

$$D_I = \alpha \frac{S}{S_{ref}} D_T - \left(\frac{S}{S_{ref}} - 1 \right) I_{sc};$$

$$D_V = -\beta D_V - R_s D_I;$$

$$D_T = T_c - T_{ref};$$

S_{ref} 、 T_{ref} 为太阳辐射和光伏电池温度的参考值^[4];

α 为参考日照下电流变化温度系数;

β 为参考日照下电压变化温度系数;

R_s 为光伏模块的串联电阻。

根据上述数学模型, 在 MATLAB 仿真平台上构建了光伏阵列的仿真模型, 其结构见图 1。

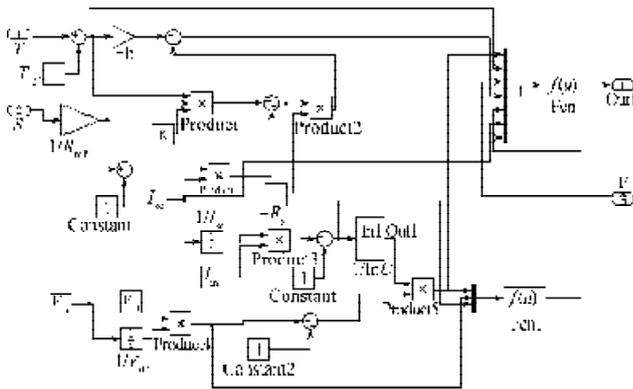


图 1 光伏阵列仿真模型结构图

Fig. 1 PV array simulation model structure

2 DC-DC 模块及最大功率追踪

光伏电池有 2 种工作方式, 一种是不与电网直接相连的独立工作方式, 另一种是与电网直接相连的并网工作方式。无论是哪种工作方式, 都必须有一个 DC-DC 的变换环节, 该环节不仅要使输出电压稳定, 而且要实现最大功率追踪。本文采用升压斩波电路 (也称 BOOST 电路^[5]) 实现 DC-DC 变换。

2.1 BOOST 电路原理

BOOST 电路的输出电压平均值将在大于电源电压 U_d 的区域变化, 其电路如图 2 所示。

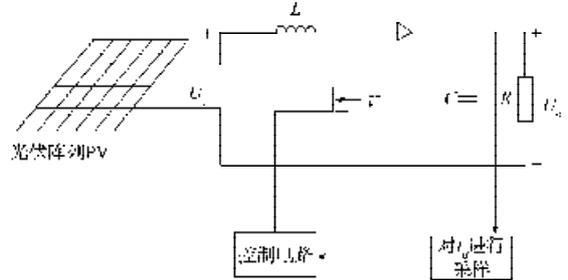


图 2 BOOST 电路原理图

Fig. 2 BOOST circuit diagram

为简化分析, 假设电感 L 和电容 C 足够大。

$t=0$ 时刻, 驱动 V 使其导通, 因忽略 V 的导通压降,

则 $U_d - L \frac{di}{dt}$, 所以电流 i 按直线规律上升, 有:

$$U_d - L \frac{di}{dt} = I_2 \frac{L}{t_{on}} - L \frac{\Delta I}{t_{on}},$$

$$t_{on} = I_2 \frac{\Delta I}{U_d}. \quad (4)$$

$t=t_1$ 时刻, 撤去 V 的驱动使其关断, 因电感 L 足够大, 电流 i 由 I_2 近似按线性规律下降, 到 $t=t_2$ 时刻下降至 I_1 , 因电容 C 足够大, U_0 近似不变, 则:

$$U_0 - U_{d1} = I_1 \frac{L}{t_{off}} - L \frac{\Delta I}{t_{off}},$$

$$t_{off} = I_1 \frac{\Delta I}{U_0 - U_d}, \quad (5)$$

由式 (4) 和式 (5) 可得:

$$\Delta I = \frac{U_d t_{on}}{L} = \frac{(U_0 - U_d) t_{off}}{L}, \quad (6)$$

将 $t_{on} = DT$ 、 $t_{off} = (1-D)T$ 代入式 (6) 得:

$$U_0 = \frac{U_d}{1-D}, \quad (7)$$

式中 D 为占空比。

2.2 最大功率追踪

传统的最大功率追踪法需检测太阳能电池的输出电压和电流 (即 BOOST 电路的输入电压 U_d 和电流 I_d), 此跟踪法硬件设计复杂, 控制算法繁琐^[6]。本文拟采用新的跟踪法, 由于太阳能电池的输出电压曲线是单峰值的, 当太阳能电池的输出功率达最大时, BOOST 电路的输出功率也达到最大, 又因 BOOST 电路的平均输出电压在短时间内保持不变, 所以只要跟踪 BOOST 电路的输出电流 I_0 , 当 I_0 达到最大时, 则光伏阵列的输出功率就达到最大值。

图 3 是光伏阵列输出电压 - 功率曲线, 其中 P_m 就是最大功率点。

本文中最大功率追踪软件控制流程通过 S- 函数

编程实现。S-函数是 Simulink 的扩展工具，它较完美地结合了 Simulink 框图简洁明快的特点和编程灵活方便的优点，S-函数的实现主要分为 6 步：1) 初始化，在仿真开始前，Simulink 在这个阶段初始化 S-函数；2) 数值积分，用于连续状态的求解和非采样过 0 点；3) 更新离散状态，此子函数在每个步长处都要执行 1 次，可以在这个子函数中添加每 1 个仿真步都需要更新的内容，如离散状态的更新；4) 计算输出，计算所有输出端口的输出值；5) 计算下一个采样点，只有在使用变步长求解器进行仿真时，才需要计算下一个采样时间点，即计算下一步的仿真步长；6) 仿真结束。改进的爬山法实现流程见图 4。

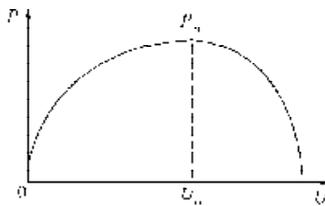


图 3 光伏阵列输出电压—功率曲线

Fig. 3 PV array output voltage - power curve

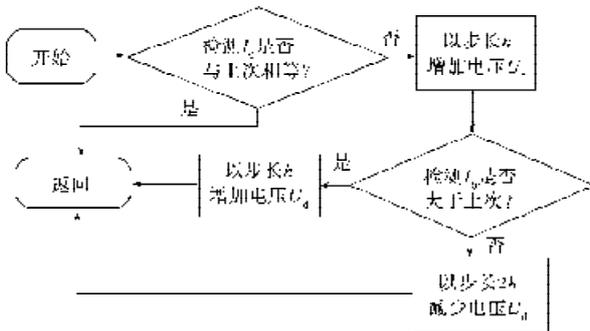


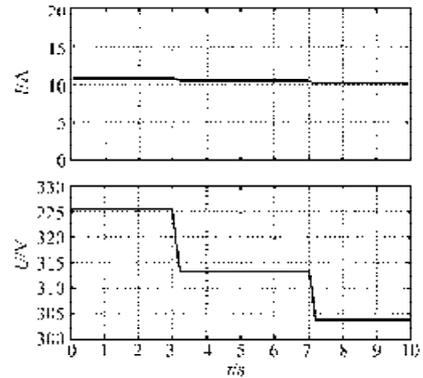
图 4 最大功率追踪法软件流程图

Fig. 4 Maximum power-tracking software flow chart

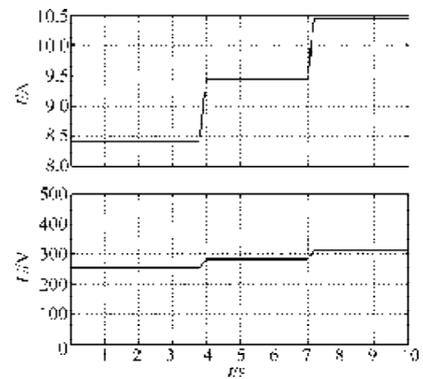
3 仿真结果与分析

在 MATLAB^[7-9] 仿真平台上采用上述理论进行仿真。图 5 中 a) 是假设光强不变，节温变化时，光伏阵列的输出电流、电压曲线，上面为电流曲线，下面为电压曲线，很明显节温变化对短路电流影响不大，开路电压随着温度升高而降低。图 5 中 b) 是假设节温不变，光强变化时，光伏阵列的输出电流、电压曲线，上面是电流曲线，下面是电压曲线，很明显光强变化时对开路电压影响不大，短路电流随着光强升高而升高。为了方便观察，图 5 中 a) 和 b) 的输入信号（即光强和节温信号）都用阶梯信号代替，而实际中光强和节温是不可以突变的。图 5 中 c) 和 d) 是光伏阵列在采用本文控制策略条件下的输出电流、电压变化曲线，功率的计算公式 $P=UI$ ，由图 5 中 c) 和 d) 可看出，当电流、电压稳定时，功率最大，即跟踪到了最大功

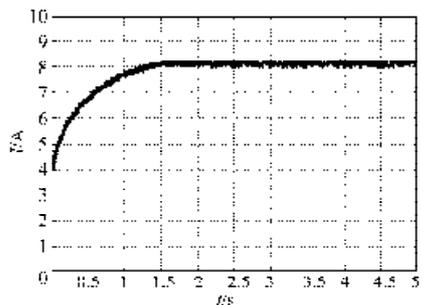
率点 P_m 。可见，仿真结果与理论分析是一致的，从而验证了跟踪输出电流的最大功率追踪控制策略的可行性和正确性。



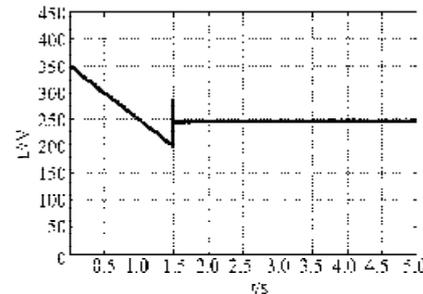
a) 光强不变、节温升高时电流、电压曲线



b) 节温不变、光强增大时电流、电压曲线



c) 光伏阵列输出电流曲线



d) 光伏阵列输出电压曲线

图 5 仿真波形图

Fig. 5 Simulation waveforms