

光伏发电系统最大功率跟踪控制的仿真研究

韩世军¹, 朱菊², 毛吉贵¹, 强荣¹, 秦力¹, 韩大侠¹

(1. 国网宁夏电力公司吴忠供电公司, 宁夏 吴忠 751100;

2. 神华宁煤集团烯烃公司, 宁夏 银川 750011)

摘要: 针对光伏电池最大功率点随环境条件变化而发生漂移的问题, 建立光伏电池的等效模型, 采用 PVsyst 软件仿真光伏电池在不同光照及温度条件下的输出特性, 利用 Matlab/Simulink 软件建立基于电导增量法的最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)仿真模型。仿真结果表明: 基于电导增量法的 MPPT 控制方法, 能使光伏发电系统在环境及负载变化情况下快速实现 MPPT, 且稳态精度高。

关键词: 光伏电池; 最大功率点跟踪; 电导增量法; Matlab; PVsyst

中图分类号: TM615 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-3643(2015)04-0011-05

有效访问地址: <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1672-3643.2015.04.003>

Simulation research on maximum power point tracking for photovoltaic power generation system

HAN Shijun¹, ZHU Ju², MAO Jigui¹, QIANG Rong¹, QIN Li¹, HAN Daxia¹

(1. Wuzhong Power Supply Filiale of State Grid Ningxia Power Co., Wuzhong Ningxia 751100, China;

2. Olefin Company of Shenhua Ningxia Coal Industry Group, Yinchuan Ningxia 750011, China)

Abstract: Aiming at the problem of the maximum power point of photovoltaic cell occurring shift with the change of environmental condition, builds the equivalent model of photovoltaic cell, adopts PVsyst software to simulate the output performance of photovoltaic cell under different illumination and temperature, based on conductance increment method using Matlab/Simulink software to establish maximum power point tracking(MPPT) simulation model. The simulation result shows that MPPT control method based on conductance increment method can fleetly realize MPPT of photovoltaic power generation system under the change of environment and load, and the precision of the stability is high.

Key words: photovoltaic cell ; maximum power point tracking (MPPT); conductance increment method; Matlab; PVsyst

DOI: 10.3969/j.issn.1672-3643.2015.04.003

光伏电池是光伏发电系统的核心部分, 由于光伏电池受光照强度及温度变化的影响很大, 其输出特性呈现高度非线性化, 所以, 当外界环境发

生变化时, 光伏电池的输出功率也会随之发生改变。为了有效提高光伏发电系统的效率, 要求无论外界条件怎样变化, 光伏发电系统的输出功率应

收稿日期: 2015-05-07

作者简介: 韩世军(1983), 男, 工学硕士, 研究方向为电工理论与新技术。

始终保持最大值。为了解决这一问题,本文分析了光伏电池输出特性及等效模型,提出最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)控制算法,并基于 Matlab/Simulink 的电导增量法建立 MPPT 仿真模型对其科学性、有效性加以验证。

1 光伏电池输出特性及等效模型

光伏电池单体是实现光电转换的最小单元,将光伏电池单体进行串联、并联后分装就组成了光伏电池组件,把若干个光伏电池组件进行串联、并联后装在支架上就形成了光伏电池阵列^[1]。光伏阵列是光伏发电系统的关键部件,其输出特性受外界环境影响很大,只有深入了解其输出特性,才能为研究光伏发电系统的 MPPT 技术奠定基础。

1.1 光伏电池输出特性

光伏电池受外界环境如光照强度、温度的影响很大,其输出特性具有高度非线性。图 1、图 2

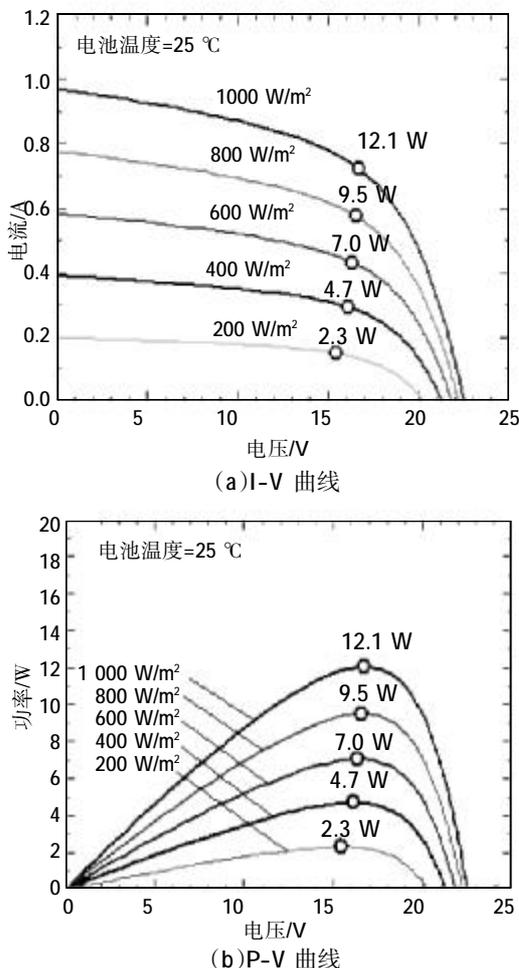


图 1 光伏电池在相同温度、不同光照下的 I-V 及 P-V 曲线

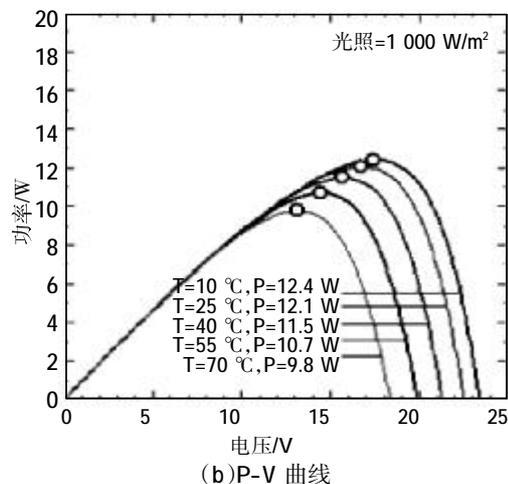
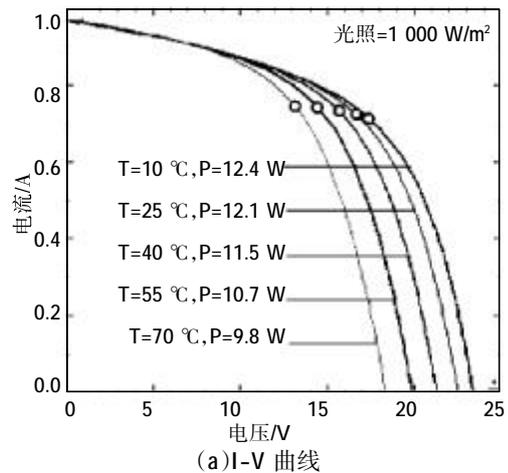


图 2 光伏电池在相同光照、不同温度下的 I-V 及 P-V 曲线

分别是利用 PVsyst 软件^[2]仿真的光伏电池在不同光照及温度条件下的输出特性。从图中可以看出,随着光照的增强输出功率增大,随着温度的升高输出功率减小,但在某一特定光照及温度下存在一个最大功率点。

1.2 光伏电池等效模型

光伏电池本身就是一个 P-N 结,其基本特性与二极管相似。当光伏电池受到阳光照射时,在 PN 结两端便产生电动势,即电压。这时如果在 P 型层和 N 型层焊接上金属导线,接通负载,则外电路便有电流通过,把这样的光伏电池单体串联、并联起来,就能产生一定的电压和电流,并输出功率。光伏电池等效电路可由 1 个电流源并联 1 个理想二极管及一系列电阻组成,如图 3 所示。

串联电阻 R_s 包括电池栅极电阻、基体材料电阻和上下电基与基体材料的接触电阻、扩散层横向电阻。其中,扩散层横向电阻是 R_s 的主要组成,

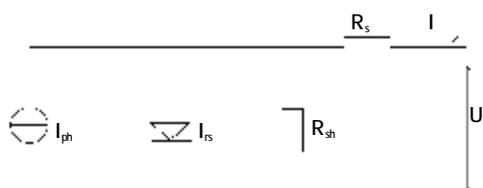


图 3 光伏电池等效电路

R_s 阻值比较低,一般小于 1Ω 。并联电阻 R_{sh} 包括电池边缘漏电阻、P-N 结内的漏电阻及 P 型区和 N 型区中各种导电膜电阻等, R_{sh} 的阻值较高,一般小于 $10 \text{ k}\Omega$ 。

光伏电池阵列输出 I-U 函数^[3]用式(1)表示:

$$I = N_p \cdot I_{ph} - N_p \cdot I_{rs} \cdot \left[\exp\left(\frac{q}{KTA} \cdot \frac{U}{N_s}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

式中: I、U—光伏电池阵列输出电流与电压;

N_s 、 N_p —光伏电池阵列模块串联、并联个数;

I_{ph} —光生电流;

I_{rs} —二极管饱和电流(跟温度有关);

K—波耳兹曼常数($1.38 \times 10^{23} \text{ J/K}$);

q—电荷数($1.69 \times 10^{-19} \text{ C}$);

T—工作温度;

A—P-N 结的理想因子。

2 MPPT 控制算法

由图 1、图 2 可以看出,光伏阵列的输出特性受电池表面温度和光照强度的影响很大,不同的光照及电池温度都可导致输出特性发生较大的变化,其输出功率也发生相应的变化,但是只有在某一输出电压值时,光伏阵列的输出功率才能达到最大值。因此,在光伏发电系统中,要提高系统的整体效率,一个重要的途径就是实时调整光伏阵列的工作点,使之始终工作在最大功率点附近^[4]。在 MPPT 系统中,确定优良的算法是关键,本文采用电导增量算法。

电导增量法是根据光伏阵列 P-U 曲线一阶连续可导单峰曲线的特点,利用一阶导数求极值的方法,即对 $P = UI$ 求全导数。从光伏电池的 P-U 曲线可以看出,在某一特定光照及温度下存在唯一最大功率点,且在该最大功率点处,功率对电压的导数为零,即 $dP/dU = 0$ 。因此,在最大功率点处

有^[5-6]:

$$\frac{dP}{dU} = I + U \frac{dI}{dU} = 0 \quad (2)$$

即 $\frac{dI}{dU} = -\frac{I}{U}$, 此式即为达到最大功率点的条件。

如果 $\frac{dI}{dU} < -\frac{I}{U}$, 则光伏电池工作点在最大功率点的右边,这时应减小输出电压;如果 $\frac{dI}{dU} > -\frac{I}{U}$, 则光伏电池工作点在最大功率点的左边,这时应增大输出电压。这样根据 $\frac{dI}{dU}$ 和 $-\frac{I}{U}$ 之间的关系就可以调整工作点的电压,从而实现 MPPT。引入一个参考电压 U_{ref} , 则该控制算法的流程如图 4 所示。

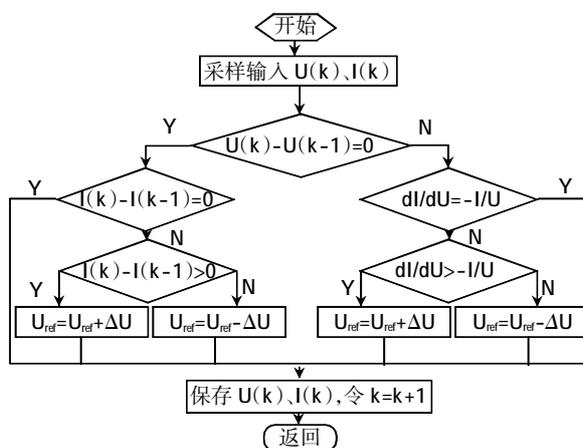


图 4 电导增量法流程

其中, $U(k)$ 、 $I(k)$ 分别为光伏电池当前电压和电流, $U(k-1)$ 、 $I(k-1)$ 为前一周期的采样值。为了使光伏电池输出发生任何变化时, 算法能够涵盖所有可能出现的状况, 需要用 $U(k-1)$ 、 $I(k-1)$ 的值进行判断。如果 $U(k) - U(k-1) = 0$, 则相比于前一周期, 该时刻的电压是恒定的, 输出没有发生变化。在这种情况下, 需要对输出电流做进一步判断, 如果 $I(k) - I(k-1) = 0$, 则光伏电池的输出也没有发生改变, 不需要调整 Boost DC/DC (升压) 变换器的占空比; 若 $I(k) - I(k-1) < 0$, 表明工作点是向最大功率点方向靠近, 需要对 Boost DC/DC 变换器的占空比加一个正的调节量 ΔU , 使输出达到最大功率点; 若 $I(k) - I(k-1) > 0$, 需对 Boost DC/DC 变换器的占空比加一个负的调节量 $-\Delta U$, 使输出朝向最大功率点靠近。

如果 $U(k) - U(k-1) \neq 0$, 需要判断 $\frac{dI}{dU}$ 与 $-\frac{I}{U}$

的值,确定工作点位于最大功率点左边还是右边,再去改变 Boost DC/DC 变换器的占空比。当前周期完成后,系统会自动保存 $U(k)$ 、 $I(k)$ 的值,并令 $k=k+1$,通过循环算法,在下一个周期内自动跟踪最大功率点。

3 MPPT 控制仿真研究

3.1 带有 MPPT 功能的光伏发电系统基本组成

由于光伏电池的电气特性受光照、温度的影响很大,当环境条件稳定时,存在唯一的最大功率点;当环境条件发生变化时,即使负载保持不变,最大功率点仍将发生漂移。为了使负载在任何环境条件下都能获得最大功率,本文在光伏阵列与负载之间加入 MPPT 控制装置,带有 MPPT 功能的光伏系统如图 5 所示。该系统主要由光伏电池阵列、MPPT 控制装置、Boost DC/DC 变换器组成,通过脉冲宽度调制模块 (Pulse Width Modulation, PWM) 控制,调整 Boost DC/DC 变换器的占空比来实现 MPPT^[7]。

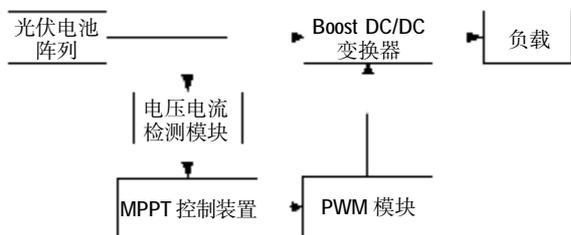


图 5 带有 MPPT 功能的光伏发电系统

3.2 MPPT 控制仿真研究

3.2.1 带 MPPT 的系统仿真模型

根据带有 MPPT 功能的光伏发电系统建立

matlab/simulink 仿真模型如图 6 所示。仿真模型主要由光伏电池阵列模型、MPPT、PWM、Boost DC/DC 变换器以及负载等组成。图 6 中,Subsystem 是光伏电池阵列模型,L 为储能电感,Diode 为快恢复二极管,C1 为滤波电容,R 为负载,IGBT 为绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)。

Subsystem 内部封装的参数有电压、电流温度系数、串联电阻、参考温度(25 °C)、参考太阳辐射(1000 W/m²)、最大功率点电压、最大功率点电流、开路电压、短路电流。输入参数有光照 S、温度 T、光伏电池工作电压 U, 输出参数有光伏电池工作电流 I、输出功率 P。其中,输入端可以输入任意光照和温度,输出端 P 即显示 MPPT 输出。

PWM 的输入信号为带有 MPPT 功能的光伏模块的输出电压,即最大功率点对应的电压值,将该电压作为指令信号,与光伏模块的实际输出电压共同作用在 Boost DC/DC 变换器的 IGBT 上,通过改变 IGBT 的占空比,从而使光伏模块的实际输出电压很好地跟踪指令信号,即最大功率点对应的电压值。Boost DC/DC 变换器利用储能电感储存的能量和电源一起向负载供电,达到升压的目的^[8]。

选择 HAMC 制造的太阳能电池板进行仿真实验,其技术指标为: $U_m=16.5\text{ V}$, $I_m=0.73\text{ A}$, $U_{ov}=22.50\text{ V}$, $I_{sc}=0.97\text{ A}$, $P_m=12\text{ W}$ 。仿真时采用的步长为 0.01,系统采样时间为 0.5 μs 。图 7 是电池温度不变,光照强度 $t=0.05\text{ s}$ 时,突然由 1 kW/m² 增加到 1.5 kW/m² 时的仿真结果,图 8 是光照强度不变,电池温度 $t=0.05\text{ s}$ 时,突然由 25 °C 变为 60 °C 时

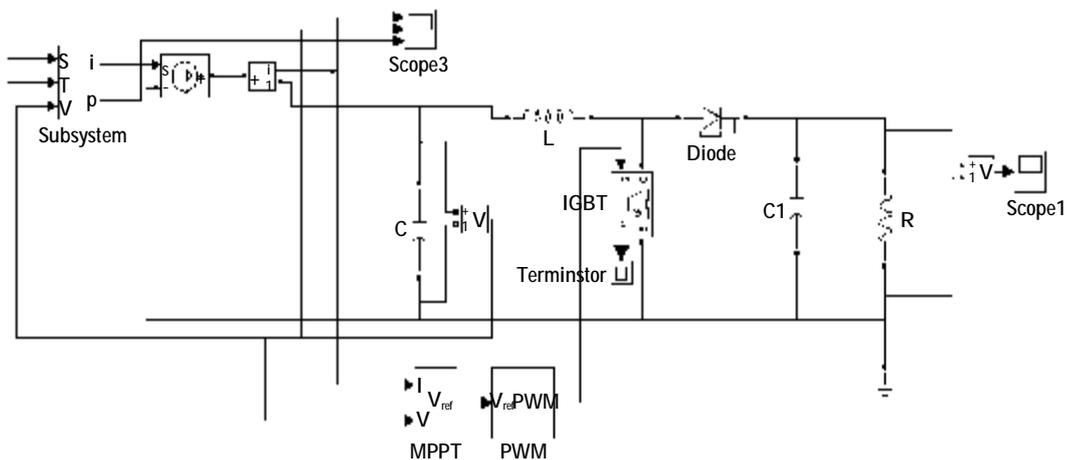


图 6 带 MPPT 的系统仿真模型

的仿真结果。

3.2.2 仿真结果分析

从图7仿真结果可以看出,当电池温度不变,光照由 1 kW/m^2 增加到 1.5 kW/m^2 ,在 $t=0.05 \text{ s}$ 时,光伏阵列输出功率也随之由 12 kW 增加到 15 kW ,增加幅度为 $+3 \text{ kW}$,光伏阵列输出功率曲线会发生较小的突变,但是在新的功率点能快速趋于平稳,使光伏阵列工作在最大功率点。从图8仿真结果可以看出,当光照强度不变,电池温度由 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 变为 $60 \text{ }^\circ\text{C}$,在 $t=0.05 \text{ s}$ 时,光伏阵列输出功率也随之由 12 kW 降低到 10 kW ,降低幅度为 -2 kW ,经过较小的突变后,系统也能及时地跟踪到最大功率点,使光伏阵列输出功率达到最大值。

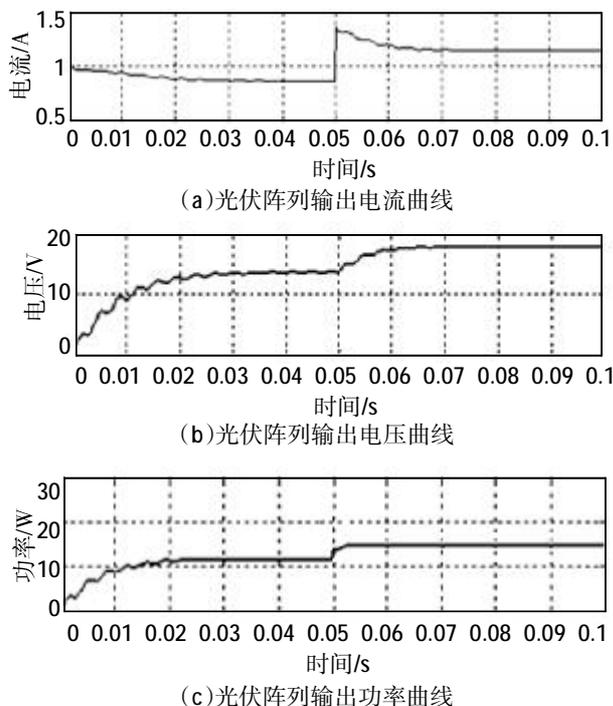


图7 温度不变、光照增强时光伏阵列输出曲线

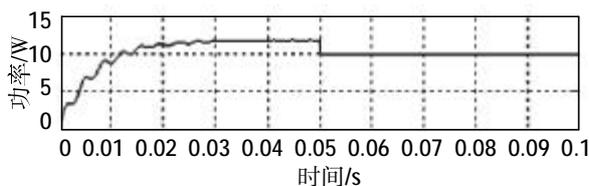
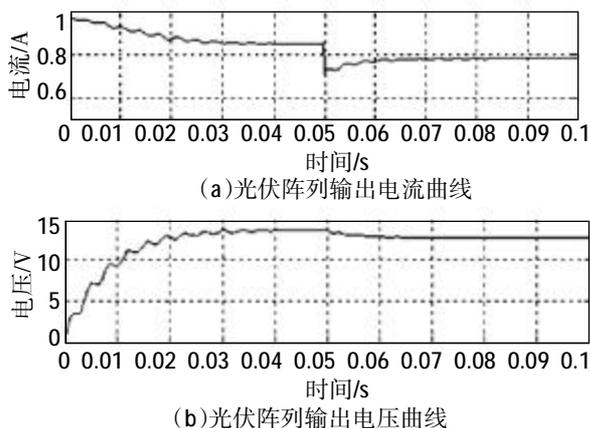


图8 光照不变、温度升高时光伏阵列输出曲线

从图1、图2中得出,光伏电池在某一特定光照及温度条件下,存在一个最大功率点,并且在最大功率点以后,光伏电池输出功率急剧下降,最后下降为0。本文在光伏阵列与负载之间加入基于电导增量法的MPPT控制装置以后,从图7、图8的仿真结果可以看出,在光照、温度其中任何一个环境条件发生变化时,系统都能够实时地跟踪其变化,能使系统始终工作在最大功率点的范围内,稳定性高,从而有效提高了太阳能的转换效率。

4 实用化应用探讨

在实际光伏发电系统中,在输出参数实时变化的光伏阵列与负载之间接入MPPT控制装置时,需要进一步做以下工作:

(1)采用单片机或数字信号处理器(Digital Signal Processors, DSP)实现对电导增量算法的编程,并进行MPPT控制系统的软、硬件设计。通过检测光伏阵列的输出电压、输出电流变化,利用软件的精确算法来控制Boost DC/DC变换器的占空比,实现MPPT。

(2)从光伏发电系统的整体出发,综合考虑安全性、实用性、经济性等方面的要求,设计MPPT控制系统的输入、输出接口电路,对其可靠性、稳定性做并网测试。

(3)综合考虑光伏阵列的光电转化效率、温度范围、电气参数(输出功率、峰值电压、峰值电流、短路电流、开路电压、系统电压)等技术参数,对光伏电池充放电策略及充放电控制器做进一步研究。

5 结论

(1)本文提出的基于电导增量法MPPT控制方
(下转第21页)