

基于模糊控制的光伏系统最大功率点跟踪

王宝忠, 王志兵

(江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212003)

摘 要: 针对光伏发电系统的最大功率点跟踪原理进行了详细的分析和阐述,介绍了传统扰动观测法的优缺点,在此基础上提出了基于模糊控制理论的最大功率点跟踪算法. 通过 Matlab/simulink 进行系统仿真,给出了光照突变时扰动观测法和模糊控制法的最大功率点跟踪曲线. 实验结果表明,该模糊控制算法具有更优的系统响应特性和稳态特性.

关键词: 光伏; 最大功率点; 模糊控制

中图分类号: TK615; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2012)04-0013-05

Maximum Power Point Tracking by Using Fuzzy Control for Photovoltaic Power System

WANG Bao-zhong, WANG Zhi-bing

(College of Electronic Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: Based on analyzing the principle of maximum power point tracking in photovoltaic energy generation system, this paper introduces the merit and shortcomings of the disturbance observation. Then it brings up the fuzzy control theory based on the maximum power tracking algorithm. Through simulation by Matlab&simulink, it gives the maximum power point tracking curve when the illumination is changing. The experimental results show that the fuzzy control method has the better system and steady-state response characteristics.

Key words: photovoltaic; MPPT; fuzzy control

0 引 言

进入 21 世纪以来,全球范围内出现了能源供求失衡态势,新能源的开发已成为世界各国经济发展的关键问题.光伏发电技术以其独特优势得到了人们的广泛关注^[1].在光伏发电系统中,光伏电池的利用率除了与光伏电池的内部特性有关外,还受使用环境如辐照度、负载和温度等因素的影响^[2].在

不同的外界条件下,光伏电池可运行在不同且唯一的最大功率点(maximum power point, MPP)上.因此为了最大限度地将光能转化为电能,实现光伏电池的最大功率输出,光伏电池的最大功率点跟踪技术已成为本课题研究的热点.

本文在分析光伏电池特性的基础上,对传统的扰动观察法进行了介绍,提出了基于模糊控制理论的最大功率点跟踪,并与扰动观测法进行了对比和分析.

收稿日期: 2011-07-21

基金项目: 江苏省中小企业创新基金(SBC201010593)

作者简介: 王宝忠(1956—),男,硕士生导师,副教授;

王志兵(1986—),男,工程师, E-mail: jkdwzb@yahoo.cn.

1 光伏电池的特性分析

1.1 光伏电池的等效电路及数学模型

光伏电池的工作情况可用图1所示的等效电路来描述. 图中把光伏电池看成能稳定地产生光电流 I_{ph} 的电流源^[3-4]. 其中, R_s 为串联电阻, R_{sh} 为旁漏电阻, 一般情况下 R_s 较小而 R_{sh} 较大, 由于 R_s 和 R_{sh} 是分别串联和并联在电路中的, 所以在进行理想电路计算时可以忽略不计, 因此可得到理想光伏电池的特性方程:

$$I = I_{sc} \{ 1 - C_1 \{ \exp [U / (C_2 U_{oc})] - 1 \} \} \quad (1)$$

$$C_1 = (1 - U_m / U_{oc}) \exp [-U_m / C_2 U_{oc}] \quad (2)$$

$$C_2 = (U_m / U_{oc} - 1) [\ln(1 - I_m / I_{sc})]^{-1} \quad (3)$$

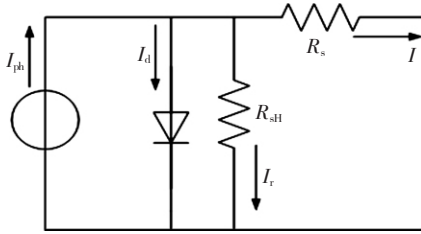


图1 光伏电池的等效电路模型

当光照强度和温度发生变化时, 由以下公式计算式(1)至式(3)中的参数:

$$T = T_{air} + KS \quad (4)$$

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (5)$$

$$\Delta S = \frac{S}{S_{ref}} - 1 \quad (6)$$

$$I'_{sc} = I_{sc} \frac{S}{S_{ref}} (1 + a \Delta T) \quad (7)$$

$$U'_{oc} = U_{oc} (1 - c \Delta T) \ln(1 + b \Delta S) \quad (8)$$

$$I'_m = I_m \frac{S}{S_{ref}} (1 + a \Delta T) \quad (9)$$

$$U'_m = U_m (1 + c \Delta T) \ln(1 + b \Delta S) \quad (10)$$

式中: S_{ref} 为参考日照强度, 一般取 1 kW/m^2 ; T_{ref} 为参考电池温度, 一般取 25°C ; T_{amb} 为环境温度(K); ΔS 为实际光照强度与参考光照强度差值(W/m^2); ΔT 为实际电池温度与参考电池温度的差值(K); K 为光照强度变化时, 光伏电池阵列的温度系数, 典型值为 0.3°C W/m^2 ; I'_{sc} 为光照强度 S 下、电池温度 T 时, 光伏电池短路电流(A); U'_{oc} 为光照强度 S 下、电池温度 T 时, 光伏电池开路电压(V); I'_m 为电池温度 T 、光照强度 S 下, 光伏电池最大功率点电流(A); U'_m 为电池温度 T 、光照强度 S 下, 光伏电池最大功率点电压(V); a, b, c 为常数, 推荐的典型值为:

$$a = 0.0025, b = 0.5, c = 0.00288.$$

1.2 光伏电池的输出特性

图2为光伏电池在相同温度而不同光照条件下的 $P-V$ 特性曲线. 它表明光伏电池的输出特性受到光照强度的影响, 随着光照强度的增强, 最大功率值逐渐提高, 并且最大功率点处的工作电压发生偏移.

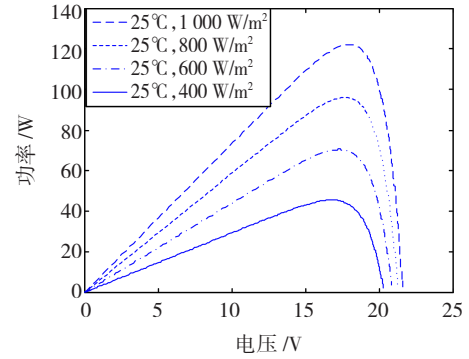


图2 不同辐照度条件下光伏电池的 $P-V$ 特性曲线

图3为不同光照条件下光伏电池的 $V-I$ 特性曲线. 它表明光伏电池既非恒流源也非恒压源. 在最大功率点左侧部分类似于恒流源, 最大功率点右侧部分类似于恒压源, 并且类似恒流源区域与类似恒压源区域范围的比例大约为 4:1^[5]. 随着光照强度的增加, 光伏电池输出的短路电流不断提高, 开路电压逐渐增大.

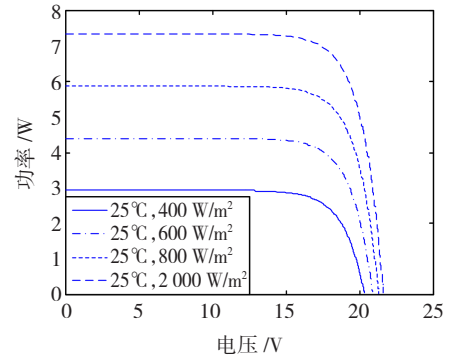


图3 不同辐照度条件下光伏电池的 $V-I$ 特性

从以上分析可以看出光伏电池的输出特性受光照强度的影响比较明显, 它是一种非线性电源, 如果采用最大功率点跟踪技术使系统输出功率稳定在当前工作特性的最大功率点附近处, 则可以提高光伏阵列的能量利用率, 减少功率损失, 提高系统的稳态性能.

2 扰动观测法

扰动观察法是目前实现最大功率点跟踪最常用

的方法之一. 其原理是周期性地扰动光伏电池的输出电压值, 判断扰动前后系统输出功率的变化情况, 并以使输出功率增加的原则来对系统进行控制. 伴随着不断地扰动输出电压值, 使电池输出功率实时调整并趋于最大, 最终来回往复稳定在最大功率点附近的一个较小范围内.

扰动观察法实现 MPPT 过程如图 4 所示. 设测得 P_k 值为当前光伏电池输出功率, 与前一时刻的功率值 P_{k-1} 作比较, 若 $P_k > P_{k-1}$, 即功率值增加, 则扰动方向正确, 可朝同一 (ΔU) 方向继续扰动; 反之, 若 $P_k < P_{k-1}$, 即功率值减少, 则扰动方向错误, 则朝相反 ($-\Delta U$) 方向扰动, 在实际应用中, 光伏电池输出电压可以通过占空比来调节.

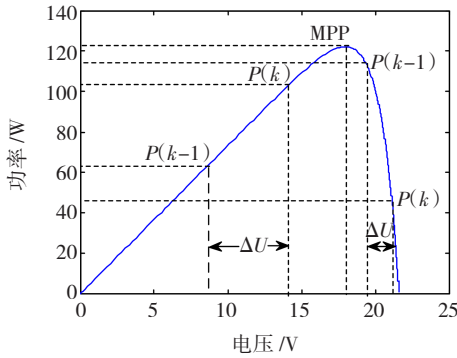


图4 扰动观察法的 MPPT 控制规则示意

从以上分析可以看出: 跟踪方法简单、对传感器精确度要求不高、易于实现是扰动观察法的优点. 在光伏电池 MPP 附近振荡运行, 会导致一定功率损失是该法的主要缺点^[4]. 此外, 当外部环境温度和辐照度发生变化时, 系统从一个稳态变换到另一个稳态的过程中, 可能在寻优的第一步发生方向的判断错误, 出现误判现象, 进而导致跟踪失效.

3 模糊控制法

模糊逻辑控制的 MPPT 是基于光伏电池温度与负载特性的变化、辐照度的不确定性以及光伏电池输出特性的非线性特征而提出的. 为实现 MPPT 控制, 模糊控制系统将采样得到的数据经过运算, 判断出工作点与最大功率点之间的位置关系, 自动校正工作点电压值, 使工作点趋于最大功率点^[5].

3.1 模糊控制器的输入和输出变量

定义模糊逻辑控制器的输出变量为工作点电压的校正量 dU , 输入变量则分别为光伏电池 $P-V$ 特性曲线上连续采样的两点连线的斜率值 E 以及单位时间斜率的变化值 CE , 即

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{U(k) - U(k-1)} \quad (11)$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (12)$$

其中, $P(k)$ 和 $U(k)$ 分别为光伏电池的输出功率及输出电压的第 k 次采样值. 显然, 若 $E(k) = 0$, 则表明光伏电池已经工作在最大功率输出状态^[6].

3.2 模糊化

将模糊集合论域 E 和 CE 分别定义为 5 个模糊子集, 即

$$E = \{NB, NS, ZE, PS, PB\};$$

$$CE = \{NB, NS, ZE, PS, PB\}$$

其中, NB, NS, ZE, PS, PB 分别表示负大, 负小, 零, 正小, 正大. 根据光伏系统特征, 采用均匀分布的三角形隶属度函数来确定输入变量 (E 和 CE) 和输出变量 (dU) 不同取值与相应语言变量之间的隶属度. 如图 5 所示, E 、 CE 、 dU 中任一变量的隶属度函数图相同.

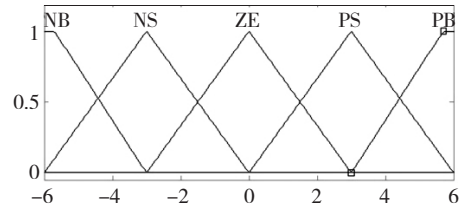


图5 隶属度函数示意图

3.3 模糊推理运算

模糊逻辑控制器的作用是调节控制信号 dU 使光伏系统工作在最大功率输出状态. 对图 6 所示的光伏电池 $P-V$ 特性曲线进行分析, 可以得出 MPPT 的逻辑控制规则, 即当 $E(k) > 0, CE(k) < 0$ 时, P 由左侧向 P_{mpp} 靠近; 则 dU 应为正, 以继续靠近最大功率点; 当 $E(k) > 0, CE(k) \geq 0$ 时, P 由左侧远离 P_{mpp} ; 则 dU 应为正, 以靠近最大功率点; 当 $E(k) < 0, CE(k) \geq 0$ 时, P 由右侧向 P_{mpp} 靠近; 则 dU 应为负, 以继续靠近最大功率点; 当 $E(k) < 0, CE(k) < 0$ 时, P 由右侧远离 P_{mpp} ; 则 dU 应为负, 以靠近最大功率点.

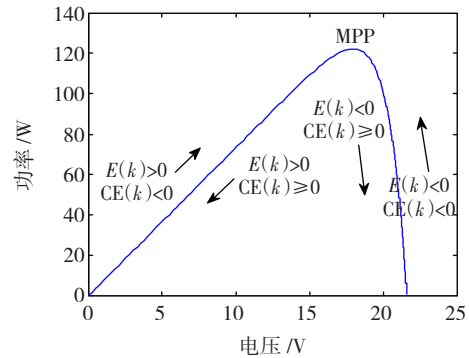


图6 MPPT 的逻辑控制规则示意

由 MPPT 逻辑控制规则,可以得到表 1 所示的模糊控制规则推理表,该表反映了当输入变量 E 和 CE 发生变化时,相应输出变量 dU 的变化规则. 由此即得出 dU 对应的语言变量.

表 1 模糊规则推理表

E	CE				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	PB	PS	PS	ZE	ZE
NS	PB	PS	PS	ZE	ZE
ZE	PB	PS	ZE	NS	NB
PS	ZE	ZE	NS	NS	NB
PB	ZE	ZE	NB	NB	NB

3.4 清晰化

清晰化是指根据输出模糊子集的隶属度计算出确定的输出变量的数值. 本文清晰化采用面积重心法^[8]. 面积重心法的计算公式如下:

$$dU = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(U_i) * U_i}{\sum_{i=1}^n \mu(U_i)} \quad (13)$$

式中, dU 为模糊逻辑控制器输出的电压校正. 根据给出的隶属度函数, E 、 CE 按照其取值对应于相应的语言变量,依据表 1 可以判断出输出变量 dU 对应的语言变量,该语言变量在隶属度函数中对应的数值区间的中心值即为 U_i , $\mu(U_i)$ 是对应于 U_i 权值,由隶属度函数决定 E 、 CE 对应于相应的语言变量的权值根据 MAX - MIN 方法计算得到^[8].

4 仿真实验

4.1 仿真模型

本文中的逆变器拓扑结构为单相全桥,采用电流内环、直流电压中环以及 MPPT 功率外环的三闭环控制. 电流内环主要由电网电压和电流采样环节、电压同步环节、电流调节器、PWM 调制和驱动环节等组成,以此实现直流到交流的逆变以及网侧单位功率因数正弦波电流控制; 直流电压中环主要由直流母线电压检测、电压调节器等组成,以调节直流母线电压; MPPT 功率外环主要由输入功率采样环节和功率点控制环节等组成,MPPT 功率外环的输出作为直流电压中环的直流电压指令,通过直流电压中环的电压调节来搜索光伏电池的 MPP,从而使并网光伏系统实现 MPPT 运行. 图 7 为并网光伏发电

系统的仿真模型,根据光伏电池的数学模型,通过 Matlab/simulink 对光伏电池进行建模并封装,光伏电池的光照强度和环境温度的变化由 signal builder 模拟,系统中的算法和传递函数采用 S - funtion builder 编写实现,PWM 模块采用 DDS 算法来实现逆变器输出电流对电网电压的相位跟踪.

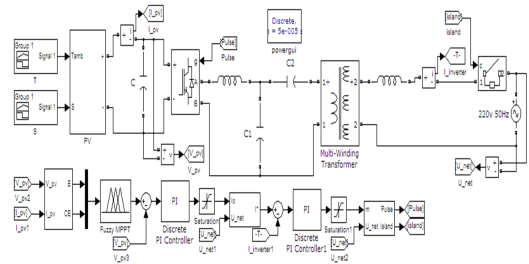


图 7 并网光伏发电系统的仿真模型

4.2 仿真结果

仿真实验中,采用 ode23tb 算法,仿真时间为 4 s,采样周期为 $5e-7$ s. 图 8 为外界光照强度从 1000 W/m^2 突变到 800 W/m^2 ,在 3 s 处由 800 W/m^2 突变到 600 W/m^2 条件下的最大功率点跟踪曲线. 从图中可以明显看出,模糊控制法在 0.15 s 处基本已经跟踪到最大功率点,并且比较稳定;而扰动观测法则在 0.45 s 处才能跟踪到最大功率点,并且由于存在一定的扰动步长而未真正达到最大功率点,使得输出功率稳定在最大功率点附近的某功率值处.

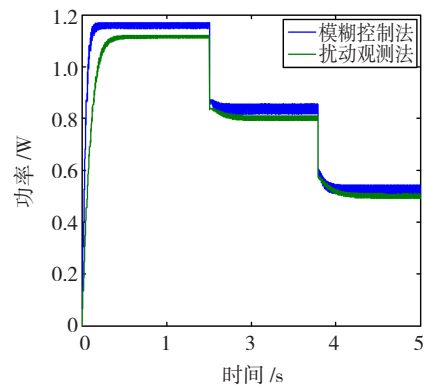


图 8 光照突变条件下的最大功率点跟踪曲线

图 9 为采用模糊控制的光伏系统逆变器输出电流跟踪电网电压的过程. 从图中可以看出逆变器输出电流在 0.14 s 内基本达到与电网电压同频同相,实现单位功率因数并网.

综上分析可知,采用模糊控制的光伏并网发电系统具有良好的系统响应特性和系统稳态特性,使输出功率稳定在最大功率点处,并能安全并网.

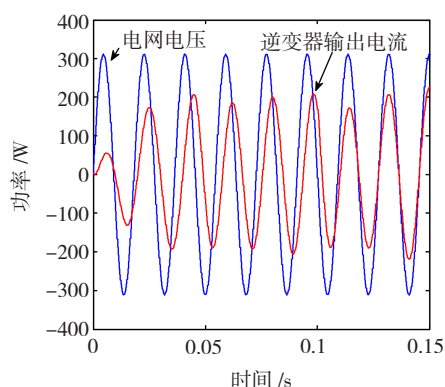


图9 相位跟踪曲线

5 结 语

本文对光伏电池的工作特性进行了详细的介绍,在分析扰动观察法的基础上,提出了基于模糊控制的最大功率点算法。模糊控制法的最大优势在于针对非线性对象进行控制,使系统具有良好的响应特性和稳态特性。仿真结果表明:模糊控制法可以有效提高光伏电池的能量利用率,当外界光照强度变化时,系统能迅速稳定在最大功率点处,提高系统的动态特性和稳态性能。

参 考 文 献:

[1] 王宝忠,刘卫法,宋东峰,等. 光伏并网发电系统 MPPT 算法研

究[J]. 科学技术与工程,2010(34):8432-8438.

[2] 王立乔,孙孝峰. 分布式发电系统中的光伏发电技术[M]. 北京:机械工业出版社,2010:56-71.

[3] 苏建徽,余世杰. 硅太阳能电池工程用数学模型[J]. 太阳能学报,2001(4):52-54.

[4] 茆美琴,余世杰. 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(5):1248-1251.

[5] 张兴,曹仁贤. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M]. 北京:机械工业出版社,2010:192-198.

[6] 刘邦银,段善旭,刘飞,等. 基于改进扰动观察法的光伏阵列最大功率点跟踪[J]. 电工技术学报,2009(6):91-94.

[7] 叶秋香. 光伏电池最大功率跟踪器的模糊控制及其应用研究[D]. 上海:东华大学电气学院,2006:57-63.

[8] 乔兴宏,吴必军. 基于模糊控制的光伏发电系统 MPPT[J]. 可再生能源,2008,26(5):13-16.

[9] 张超,何湘宁. 非对称模糊 PID 控制在光伏发电 MPPT 中的应用[J]. 电工技术学报,2005(20):72-75.

[10] HASSAINE L, OLIAS E, QUINTERO J, et al. Digital Power Factor Control and Reactive Power Regulation for Grid-connected Photovoltaic inverter[J]. Renewable Energy, 2011, 34: 315-321.

[11] DASGUPTA N, PANDEY A, ASHOK K. Voltage-sensing-based Photovoltaic MPPT with Improved Tracking and Drift Avoidance Capabilities[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2011, 92: 1552-1558.

[12] KIM Seulki, JEON Jinhong, CHO Changhee, et al. Modeling and Simulation of a Grid-connected PV Generation System for Electromagnetic Transient Analysis[J]. Solar Energy, 2010, 10: 1-15.

(编辑:付长缨)