

基于 PSCAD 的光伏阵列和 MPPT 控制器的仿真模型

孙自勇¹, 宇航¹, 严干贵¹, 李军徽¹, 陈葳²

(1. 东北电力大学, 吉林 吉林 132012; 2. 吉林供电公司, 吉林 吉林 132012)

摘要: 基于光伏模块直流物理模型, 在 PSCAD 仿真环境下, 开发了光伏阵列仿真模型。此外, 考虑到太阳能的波动性和随机性对光伏阵列的影响, 开发了最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)控制器仿真模型, 保证光伏阵列在任何当前日照下不断获得最大功率输出。仿真结果表明, 搭建的仿真模型能够准确的反映实际物理装置的特性与功能, 可以用于光伏发电并网及储能方面的仿真研究。

关键词: 光伏发电; 最大功率点跟踪; PSCAD 仿真

PSCAD simulation models for photovoltaic array and MPPT controller

SUN Zi-yong¹, YU Hang¹, YAN Gan-gui¹, LI Jun-hui¹, CHEN Wei²

(1. Northeast Dianli University, Jilin 132012, China; 2. Jilin Electric Power Supply Corporation, Jilin 132012, China)

Abstract: A simulation model for photovoltaic array is developed based on the DC physical model of photovoltaic module under PSCAD environment. In addition, considering the solar fluctuation and randomness, a simulation model of MPPT controller is also developed to guarantee the maximum power output of photovoltaic array under any current sunlight. The simulation results show that the simulation models can reflect characteristics and functions of the actual physical device accurately and can be used to the simulation research on paralleling in the grid and energy storage of photovoltaic power generation.

Key words: photovoltaic power generation; MPPT; PSCAD simulation

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)19-0061-04

0 引言

太阳能是资源最丰富的可再生能源, 它分布广泛, 可再生, 不污染环境, 是国际公认的理想替代能源。在长期能源战略中, 太阳能光伏发电将成为人类社会未来能源的基石, 世界能源舞台的主角。然而, 由于太阳能的波动性和随机性, 光伏电站输出的电能波动很大。随着这种分布式并网电站的容量越来越大, 其输出功率的波动对电网的影响不容忽视, 而计算机仿真技术则是研究这一内容的有效的技术手段。

光伏发电存在的问题是光伏电池输出特性受外界环境影响大, 温度和光照辐射强度的变化都可以导致输出特性发生较大的变化; 另外, 光伏电池转换效率低且价格昂贵, 初期投入较大。因此, 所有光伏系统都希望太阳能光伏电池在任何当前日照下不断获得最大功率输出, 这也就在理论上和实践上提出太阳能光伏阵的最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)问题。

PSCAD 软件因其具有大规模的计算容量、完整而准确的元件模型库、稳定高效的计算内核、友好的界面和良好的开放性等特点, 已经被世界各国的科研机构、学校和电力生产部门电气工程师广泛使用。该软件可以进行 FACTS 控制器的设计及电力电子领域的仿真计算, 用户可以通过用 FORTRAN 语言编程来自定义所需的功能模块, 体现了该软件的灵活性, 大大提高了研究人员的工作效率。由于在光伏发电系统中普遍应用电力电子器件和电路, 而且控制方法比较特殊, 因此 PSCAD 软件非常适合光伏发电领域的仿真研究。

本文介绍一种在 PSCAD 环境下的光伏系统软件设计方法。基于光伏模块直流物理模型, 开发了光伏阵列仿真模型。该模型考虑了环境温度、太阳辐射强度、光伏模块参数(如标准条件下太阳能电池的短路电流、开路电压、最大功率点电压、最大功率点电流、电压温度系数、电流温度系数等)对 I-V 特性的影响。考虑到太阳能的波动性和随机性对太阳能电池阵列的影响, 本文还同时开发了具有最大功

率点跟踪功能的 MPPT 控制器模型。仿真结果表明利用该模型,不需要精确的系统内部特性和结构参数,就可以实时模拟任何功率、电压组合的光伏阵列。

1 基于 PSCAD 的光伏阵列的仿真模型

1.1 太阳能电池工程用数学模型

如图 1 所示为光伏电池的等效电路:

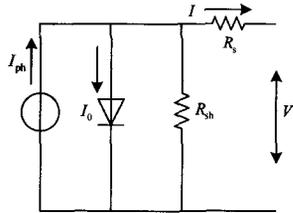


图 1 光伏电池的等效电路

Fig.1 PV cells equivalent circuit

设在参考条件下, I_{sc} 为短路电流, V_{oc} 为开路电压, I_m , V_m 为最大功率点电流和电压, 则当光伏阵列电压为 V 时, 其对应点电流为 I :

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

$$C_1 = (1 - I_m / I_{sc}) \exp[-V_m / (C_2 V_{oc})] \quad (2)$$

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

式中: C_1 , C_2 为常数, I_{sc} 、 V_{oc} 、 I_m 、 V_m 供应商提供参数。

1.2 考虑太阳辐射变化和温度影响时的数学模型

考虑太阳辐射变化和温度影响时:

$$I = I_{sc}(1 - C_1 \{ \exp[(V - \Delta V) / (C_2 V_{oc})] - 1 \}) \quad (4)$$

$$P = VI \quad (5)$$

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (6)$$

$$\Delta I = \alpha (S / S_{ref}) \Delta T + (S / S_{ref} - 1) I_{sc} \quad (7)$$

$$\Delta V = -\beta \Delta T - R_s \Delta I \quad (8)$$

式中: S_{ref} , T_{ref} 为太阳辐射和光伏电池温度参考值, 一般取为 1 kW/m^2 , 25°C ; α 为参考日照强度下的电流温度系数, $\text{A}/^\circ\text{C}$; β 为参考日照强度下的电压温度系数, $\text{V}/^\circ\text{C}$ 。

对于单晶硅及多晶硅太阳能电池其实测值为:

$$\alpha = 0.0012 I_{sc} (\text{A}/^\circ\text{C}) \quad (9)$$

$$\beta = 0.005 V_{oc} (\text{V}/^\circ\text{C}) \quad (10)$$

根据以上各式在 PSCAD 中建立太阳能电池模型。首先自定义模型外观, 该模块有三个输入量分别为: V_{in} 输入电压, S 光照强度, T 电池温度; 两个输出量: I_{out} 输出电流, P_{out} 输出功率。如图 2 所示。

这些输入量与输出量的关系由以上 (2)~(10) 式给出。根据这些数学表达式用 FORTRAN 语言编程从而实现光伏阵列模型的建立。

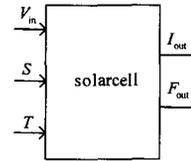


图 2 光伏阵列模块

Fig.2 Model of photovoltaic array

2 MPPT 功能模块的仿真模型

光伏阵列的开路电压和短路电流在很大程度上受日照强度和温度的影响, 系统工作点也会因此飘忽不定, 这必然导致系统效率的降低。为此, 光伏阵列必须实现最大功率点跟踪控制, 以便阵列在任何当前日照下不断获得最大功率输出。常用的 MPPT 实现方法有: ① 恒定电压控制法 CVT (Constant Voltage Tracking); ② 扰动观测法 P&O (Perturbation and Observation method); ③ 导纳增量法 IncCond (Incremental conductance method)。本文选择采用导纳增量法, 因为该方法在光照强度发生变化时, 光伏阵列输出电压能以平稳的方式跟踪其变化, 而且在最大功率点的振荡幅度也比其他两种方法小, 功率损失也相对较少。导纳增量法控制流程如图 3 所示。

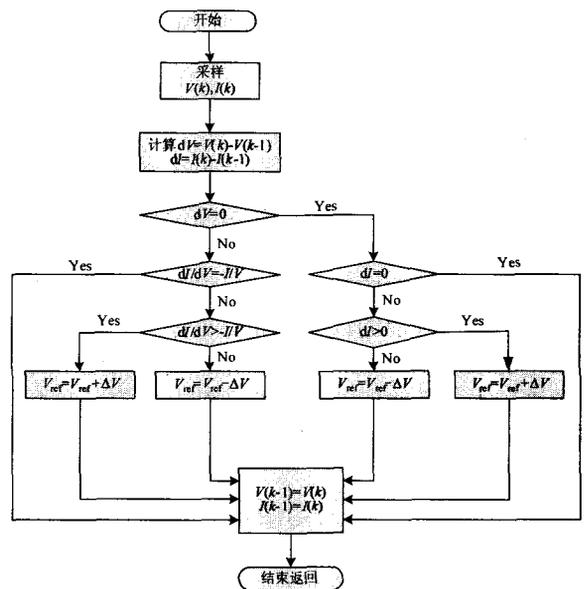


图 3 导纳增量法控制流程图

Fig.3 Flow chart of IncCond control

其中: $V(k)$ 和 $I(k)$ 分别为第 k 个采样点的光伏电池输出电压和电流, $V(k-1)$ 和 $I(k-1)$ 分别为前一个采样点的光伏电池输出电压和电流, V_{ref} 和 ΔV 分别为

参考电压和电压增量步长。当光伏电池上的日照强度和温度变化时,其输出电压能平稳的追踪其变化,且与太阳能电池组件的特性及参数无关;但这种控制算法实现起来相对复杂,电压增量步长的选取也比较讲究,若步长太大,则跟踪的误差会比较大,若步长较小,则跟踪的速度会较慢。

根据图 3 用 FORTRAN 语言编程实现 MPPT 功能,其模块外形如下图 4,该模块有两个输入量: V 输入电压, I 输入电流;一个输出量: V_{ref} PWM 控制信号的占空比。

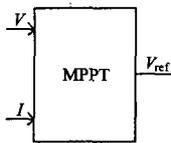


图 4 MPPT 控制器模块

Fig.4 Model of MPPT controller

3 光伏阵列以最大功率向负载供电的仿真系统

应用前面所建立的两大模块,搭建了一个完整的仿真系统来验证这两个模块的有效性。如图 5 所示,该系统是以光伏阵列为电源,通过 boost 电路向直流负载供电。其中 MPPT 模块实时的计算并输出 PWM(脉宽调制)控制信号的占空比,再与载波瞬时值进行比较生成 PWM 控制信号,该 PWM 控制信号通过控制开关管动作,来调节光伏阵列的输出电压,使其工作在最大功率点电压,从而使光伏阵列输出功率达到最大值。

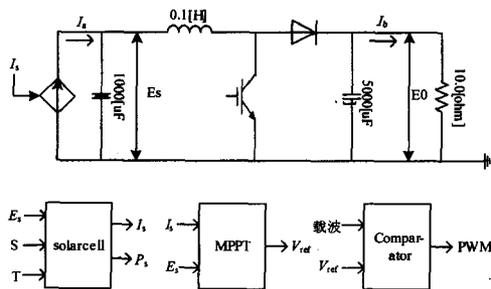


图 5 仿真系统图

Fig.5 Figure of simulation system

1) 最大功率点跟踪控制仿真

设 $S=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$, V_{ref} 的初值为 0.5, 仿真时间为 1 s。导纳增量控制算法实现起来相对复杂,电压增量步长的选取也比较讲究,若步长太大,则跟踪的误差会比较大,若步长较小,则跟踪的速

度会较慢。综合考虑以上因素本算例的电压增量步长 ΔV 为 0.0001。

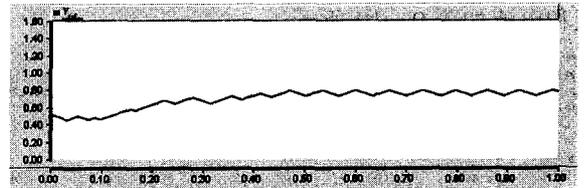


图 6 V_{ref} 的变化

Fig.6 Changes of V_{ref}

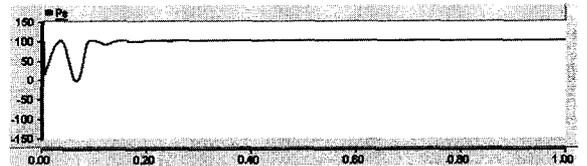


图 7 光伏阵列输出功率

Fig.7 Output power of photovoltaic array

图 6 所示是 MPPT 控制器模块按照导纳增量法控制规律输出的 PWM 控制信号占空比 V_{ref} 。 V_{ref} 从初值 0.5 开始,经过一系列的变化最后在 0.7 上下小幅波动。光伏阵列的输出功率随着 V_{ref} 的变化,从初始值经过 0.2 s 左右的波动到达最大功率点,如图 7 所示。光伏阵列的输出功率在最大功率点附近存在幅值 1 W 左右的震荡,这是由 V_{ref} 的小幅波动引起的,而 V_{ref} 的小幅波动与电压增量步长的选取有关,是不可避免的。

经以上分析可知 MPPT 控制器模块通过改变其输出值 V_{ref} 可以使光伏阵列快速地达到最大功率输出,这说明 MPPT 控制器模块实现了其最大功率点跟踪控制功能。

2) 光照强度变化条件下的光伏发电系统运行仿真

典型的光伏电池(电流 I —电压 V)、(功率 P —电压 V) 如图 8 所示。图 8 表示出 $I-V$ 、 $P-V$ 特性曲线随光照强度变化而变化的规律。当光照强度降低时,最大功率点电压变化很小,光照强度在极大程度上影响光伏阵列的输出电流。

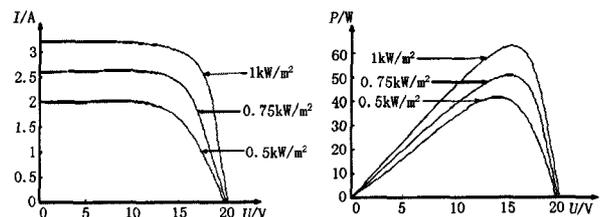


图 8 不同光照强度下的 $I-V$ 和 $P-V$ 关系曲线

Fig.8 The $I-V$ and $P-V$ curves of different sunlight intensity

在本仿真算例中,光照强度从 1000 W/m^2 分别降至 750 W/m^2 和 500 W/m^2 时,光伏阵列的输出电压和电流如图 9、10 所示。

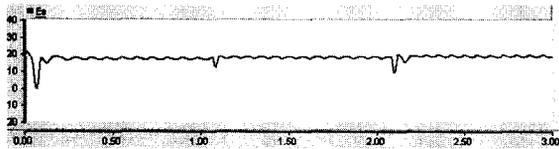


图 9 光伏阵列输出电压随光照强度的变化

Fig.9 Changes of the PV output voltage with sunlight intensity

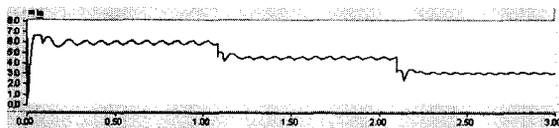


图 10 光伏阵列输出电流随光照强度的变化

Fig.10 Changes of the PV output electric current with sunlight intensity

本文搭建的光伏阵列仿真模型在 MPPT 控制器的控制作用下,其输出电压保持在最大功率点电压附近。当输入量 S (光照强度)从 1000 W/m^2 分别降至 750 W/m^2 和 500 W/m^2 时,光伏阵列的输出电压几乎没有变化,如图 9 所示,但输出电流明显变小,其差值在 1 A 左右,如图 10 所示。这与图 8 中所显示 $I-V$ 、 $P-V$ 特性曲线随光照强度变化而变化的规律完全吻合。由此说明该光伏阵列仿真模型能够反映实际光伏阵列在不同光照强度下的 $I-V$ 和 $P-V$ 特性。

图中所示电压和电流波形存在小幅震荡,这与 MPPT 控制器的作用有关。前面已对输出功率波形存在微小震荡的原因进行了分析说明,由于输出电流发生震荡的机理与输出功率的类似,这里不再赘述。

4 结论

1) 本文根据光伏电池的物理数学模型,开发了光伏阵列的 PSCAD 仿真模型。实例计算表明,该模型可以模拟任意光照强度下光伏阵列的 $I-V$ 特性。

2) MPPT 控制器仿真模型能够实现最大功率点跟踪功能。虽然光伏阵列的输出功率在极短的时间内达到最大值,但在最大功率点处会出现一定的震荡,造成少量的功率损失。

3) 上述仿真模型是动态的、完整的系统模型,不但可以描述光伏阵列在工作环境变化时的工作情

况,而且可以保证光伏阵列的最大功率输出,可以用于光伏发电并网及储能方面的仿真研究。

参考文献

- [1] 苏建徽,余世杰,赵为,等.硅太阳能电池工程用数学模型[J].太阳能学报,2001,22(4):409-412.
SU Jian-hui,YU Shi-jie,ZHAO Wei,et al. Investigation on Engineering Analytical Model of Silicon Solar Cells[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2001,22(4):409-412.
- [2] 赵宏,潘俊民.基于 boost 电路的光伏电池最大功率点跟踪系统[J].电力电子技术,2004,38(3):55-57.
ZHAO Hong,PAN Jun-min.Photovoltaic Maximum Power Point Tracking System using Boost Converter[J]. Power Electronics,2004,38(3):55-57.
- [3] Glasner I, Appelbaum J. Advantage of Boost vs Buck Topology for Maximum Power Point Tracker in Photovoltaic Systems[A]. in: Proceedings of the 1996 19th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, Jeru salem,Isr:IEEE,Piscataway[C]. NJ, USA: 1996.355-358.
- [4] 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):1248-1251.
MAO Mei-qin,YU Shi-jie,SU Jian-hui. Versatile Matlab Simulation Model for Photovoltaic Array with MPPT Function[J].System Simulation,2005,17(5):1248-1251.
- [5] Baltas P, Tortoleli M, Russel P E. Photovoltaic Designer ASPVD[Z]. Arizona State University, 1988.
- [6] 李炜,朱新坚.光伏系统最大功率点跟踪控制仿真模型[J].计算机仿真,2006,23(6):239-243.
LI Wei,ZHU Xin-jian. The Maximum Power Point Tracking Control of a Photovoltaic Power System[J]. Computer Simulation,2006,23(6):239-243.
- [7] 李广凯,李庚银.电力系统仿真软件综述[J].电气电子教学学报,2005,27(3):61-65.
LI Guang-kai,LI Geng-yin. The Summary of Power System Simulation Software[J]. Journal of IEEE, 2005,27(3):61-65.

收稿日期:2008-10-27; 修回日期:2008-11-10

作者简介:

孙自勇(1971-),男,工程师,研究方向为可再生能源分布式发电技术;E-mail:jjinwuzhao@xjgc.com

宇航(1984-),男,硕士研究生,研究方向为可再生能源分布式发电技术。