

自适应神经模糊算法在光伏 MPPT 中的仿真分析

荣德生, 刘 凤

(辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

摘 要: 针对神经网络算法和模糊控制算法在光伏发电最大功率点跟踪应用中存在的不足, 提出一种自适应神经模糊控制算法, 它是模糊控制与神经网络控制相结合的产物, 无须专家经验, 依赖数据建模, 能自动产生模糊控制规则和调整隶属度函数. 利用 MATLAB/SIMULINK 软件和 MATLAB 专用工具箱搭建了仿真模型. 在相同环境条件下, 分别对自适应神经模糊控制法、模糊控制法和传统扰动观察法进行仿真实验, 仿真结果表明了所设计控制器在光伏 MPPT 中具有很好的动态特性和稳态精度, 提高了工作效率.

关键词: 光伏发电; 最大功率点跟踪; 模糊控制算法; 神经网络算法; 扰动观察法

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)05-0092-05

Simulation Analysis of Adaptive Neural-fuzzy Algorithm in Photovoltaic MPPT

RONG De-sheng, LIU Feng

(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: In view of the shortcomings of neural network algorithm and fuzzy control algorithm in the application of maximum power point tracking of photovoltaic power generation, An adaptive neural-fuzzy controller is proposed, It is a combination of fuzzy control and neural network control, And it can produce fuzzy rules and adjust membership functions automatically based on data without experience of experts. The simulation model is built by using MATLAB/SIMULINK software and MATLAB toolbox. Under the same environmental conditions, adaptive neural fuzzy control method, fuzzy control method and perturbation and observation method, they are conducted to simulation experiments Respectively. The results of simulation show that the controller has good dynamic performance and steady state accuracy in photovoltaic MPPT, which improves the working efficiency.

Key words: photovoltaic power generation; maximum power point tracking; fuzzy control algorithm; neural network algorithm; perturbation and observation method

1 引言

现今, 太阳能光伏发电存在成本高、光电转换效率低等缺点, 极大地阻碍了光伏发电规模的扩大, 所以总是希望尽可能地达到最大输出功率, 即实现最大功率点跟踪 (maximum power point tracking, MPPT)^[1]. 目前 MPPT 算法主要分为三大类: 基于参数选择方式的间接控制法、基于采样数据的直接控制法、基于现代控制理论的人工智能控制法. 其中常用的 MPPT 算法有恒定电压法、电导增量法、扰

动观察法、模糊控制法^[2]、粒子群算法、神经网络法等等. 随着智能控制方法的完善, 模糊控制算法和神经网络算法显现其优势, 但模糊控制法缺乏在线自学习能力, 而神经网络法无法用人类的自然语言准确的表达. 针对以上问题, 设计出一种自适应神经模糊控制器, 这种方法将模糊控制法和神经网络法相融合, 提高了工作效率.

根据光伏电池的公式, 搭建了光伏电池的仿真模型, 通过仿真, 可以看出光伏电池容易受到环境温度、光照强度和负载大小的影响, 得出光伏电池的 I-

V 特性是非线性的. 本文介绍了 MATLAB 中的自适应神经模糊系统工具箱建立 FIS 的过程,搭建了基于自适应神经模糊算法在光伏 MPPT 中的仿真模型,并且给出了扰动观察法、模糊控制法的 MPPT 仿真模块,对这三种算法分别进行仿真分析,仿真实验结果表明了所提算法具有较好的鲁棒性和有效性.

2 光伏电池特性

2.1 光伏电池数学模型

光伏电池是利用光生伏特效应原理制成的,一般可看成一个恒流源与一个二极管的并联回路. 其等效电路拓扑图如图 1 所示.

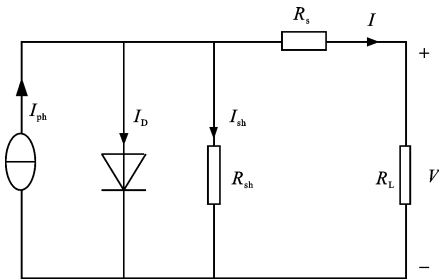


图 1 光伏电池等效电路拓扑图

基于物理特性,光伏电池输出 $I-V$ 表达式为

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$
(1)

式中, I_{ph} 为光生电流; I 为输出负载电流; R_s 为等效串联电阻; R_{sh} 为等效并联电阻; K 为玻耳兹曼常数, $K = 1.38 \times 10^{-18} \text{ J/K}$; q 为电子电荷,其中 $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$; T 为环境的绝对温度; A 为 P-N 结的曲线常数.

2.2 光伏电池的仿真模型和输出特性曲线

考虑到外界环境对太阳能的影响,可得出如下公式.

$$I_{ph} = [I_{SC} + k_t(T - 298)] \frac{S}{1\,000}$$
(2)

$$U_{OC} = U_{OCS} + k_T(T - 298)$$
(3)

利用上述公式,在 MATLAB/SIMULINK 中搭建光伏电池仿真模型,如图 2 所示. 本文采用的光伏阵列 为 STP0950,在标准测试条件下各个参数分别为 $U_m = 21.7 \text{ V}$, $I_{SC} = 4.8 \text{ A}$, $U_{OC} = 24.2 \text{ V}$, $I_m = 4.5 \text{ A}$, $k_t = 2.06 \text{ mA/}^\circ\text{C}$, $k_T = -0.77 \text{ V/}^\circ\text{C}$.

在不同光照强度和环境温度下对光伏电池进行仿真特性,得到光伏电池特性曲线曲线如图 3 所示.

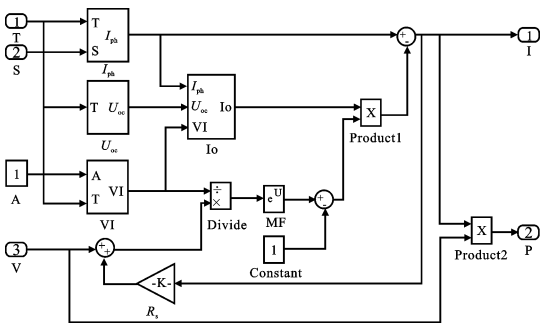
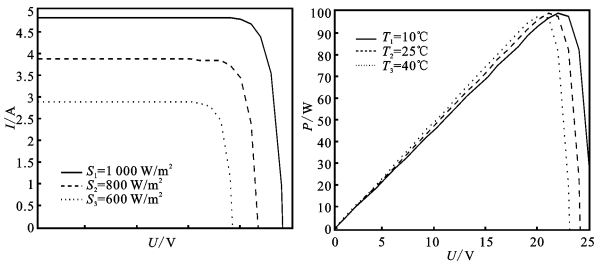


图 2 光伏电池仿真模型

图 3(a)所示为 $T = 25^\circ\text{C}$,不同光照强度下光伏电池 $I-V$ 特性曲线,图 3(b)所示为 $S = 1\,000 \text{ W/m}^2$,不同温度下光伏电池 $P-V$ 特性曲线.



(a)光伏电池 $I-V$ 特性曲线 (b)光伏电池 $P-V$ 特性曲线

图 3 光伏电池特性曲线图

3 自适应神经模糊算法

模糊控制是一种依赖专家的经验 and 知识来进行逻辑推理,不依赖数学模型,缺乏自学习能力的仿人思维方式的控制算法^[2]. 神经网络算法具有很强的自学习能力,具备黑箱建模学习模式的特点,但它的输入输出得出的关系不能用人们易于接受的方式表达出来,是一种模拟人脑的思维和组织结构而形成的数学模型. 如果将神经网络引入模糊系统,就能提高整个系统的表达能力和对知识的学习能力.

3.1 确定输入输出变量及模糊子集

本文选取双输入单输出形式的模型,以输出功率 P 为目标函数,控制开关管的 PWM 信号的占空比 D 为控制量. 模糊寻优控制器的输入量为第 $n-1$ 时刻的占空比和第 n 时刻功率变化量,输出量为第 n 时刻的占空比. 控制框图如图 4 所示.

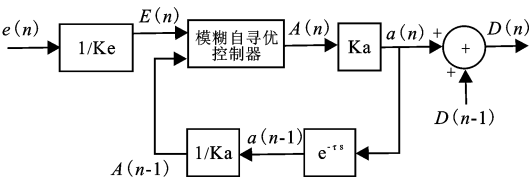


图 4 模糊控制原理框图

输入: $E(n)$ 为这个变化量对应的模糊论域中的值; $e(n)$ 为第 n 时刻输出功率变化量的实际值。 $A(n-1)$ 为这个步长值对应的模糊论域中的值; $a(n-1)$ 为第 $n-1$ 时刻占空比步长的实际值。

输出: $A(n)$ 为这个步长值对应的模糊论域中的值; $a(n)$ 为第 n 时刻占空比步长的实际值。Ke、Ka 为量化因子。

将 $E(n)$ 、 $A(n-1)$ 分别定义为 5 个、3 个模糊子集,即

$$E(n) = \{NB, NS, ZE, PS, PB\}$$

$$A(n-1) = \{N, Z, P\}$$

其中 NB、NS、ZE、PS、PB 分别表示为负大、负小、零、正小、正大;N、Z、P 分别表示为负、零、正。 $E(n)$ 的论域为 $[-1\ 1]$; $A(n-1)$ 的论域为 $[-0.5\ 0.5]$ 。

3.2 模糊控制规则的确定

模糊控制规则作为模糊控制器的核心部分,直接影响到控制效果的好坏。传统模糊控制需要利用专家的经验 and 知识来进行推理,缺乏自学习的能力^[3]。自动生成、调整隶属函数已经成为模糊控制的一大难题。本文采用 MATLAB 中的自适应神经模糊系统(Adaptive Neural-Fuzzy Inference System, ANFIS)建立模糊推理系统编辑器(FIS),是把 T-S 模糊推理和神经网络理论结合在一起的一个系统,它由实测数据自动产生模糊控制规则。具体步骤如下^[4]所示。

(1)启动 Anfis

在 MATLAB 主窗口中输入“anfisedit”,启动 Anfis。

(2)将数据载入到 anfis 编辑器

模糊规则产生的依据是专家的实测数据,将数据加载到 MATLAB 工作空间。部分训练、测试数据如表 1、2 所示。

表 1 训练样本数据

序号	$E(n)$	$A(n-1)$	$A(n)$
1	-0.900 0	0	-0.600 0
2	-0.780 0	-0.500 0	0.960 0
3	-0.665 0	-0.350 0	0.940 0
4	-0.588 0	-0.243 0	-0.220 0
5	-0.504 0	-0.180 0	-0.220 0
6	-0.422 0	-0.315 0	0.580 0
7	-0.377 0	-0.318 0	0.580 0
8	-0.302 0	0.442 0	0.600 0
9	-0.250 0	-0.116 0	-0.210 0

其中上表的第一列为功率差 $E(n)$,第二列为第 $n-1$ 时刻占空比 $A(n-1)$,第三列为为 n 时刻占空

比 $A(n)$ 。单击 Anfis 界面左下方 Load data 区的操作按钮,依次将工作空间的训练数据、测试数据载入编辑器。

表 2 测试样本数据

序号	$E(n)$	$A(n-1)$	$A(n)$
1	-0.850 0	0	-0.590 0
2	-0.700 0	-0.400 0	0.950 0
3	-0.612 0	-0.250 0	-0.004 8
4	-0.514 0	-0.188 0	-0.220 0
5	-0.496 0	-0.184 0	-0.220 0
6	-0.399 0	-0.337 0	0.590 0
7	-0.347 0	0.401 0	0.590 0
8	-0.280 0	-0.251 0	0.570 0
9	-0.153 0	-0.086 1	-0.210 0

(3)生成初始 FIS^[5]

在生成 FIS 之前,设置模糊逻辑算法,“And method(和取)”为“prod(乘积)”,“Or method(析取)”为“probor(蕴含)”,“Defuzzification(清晰化)”为“wtaver(加权平均)”。在 Anfis 编辑器的“Generate FIS”编辑区,选择“Grid partition(网格法)”作为生成算法,设置输入量的模糊子集分别为 $[5\ 3]$,隶属函数类型为“gaussmf(高斯型)”,输出函数类型为“constant(常数型)”。单击“structure”,可观察到 Anfis 的模型结构图。

(4)训练初始 FIS

在 Anfis 编辑器的“Train FIS”区域,选择“hybrid(混合法)”作为训练算法,“Error Tolerance(误差精度)”设为 0,“Epochs(误差训练次数)”设为 50 次。单击“Train Now”,开始训练。训练结果如图 5 所示,可看到训练 50 次后,误差为 0.034 56。

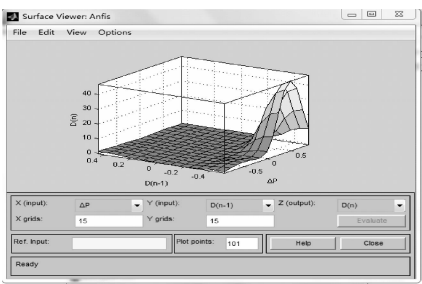


图 5 ANFIS 生成 FIS

4 自适应神经模糊算法仿真结果分析

将自适应神经模糊控制算法应用到光伏系统 MPPT 中,利用 MATLAB/SIMULINK 搭建仿真模型图^[6],仿真模型由光伏电池模块、BOOST 变换器模块、MPPT 控制器模块组成。其中光伏电池参数为 $U_{oc}=22\text{ V}$ 、 $I_{sc}=2.52\text{ A}$ 、 $U_m=17.3\text{ V}$ 、 $I_m=$

2.31 A;BOOST 电路中电感 $L=25\ \mu\text{H}$,电容 $C_1=680\ \mu\text{F}$,负载电阻 $R_1=120\ \text{hms}$,直流电容 $C=250\ \mu\text{F}$.其仿真模型图如图 6 所示.

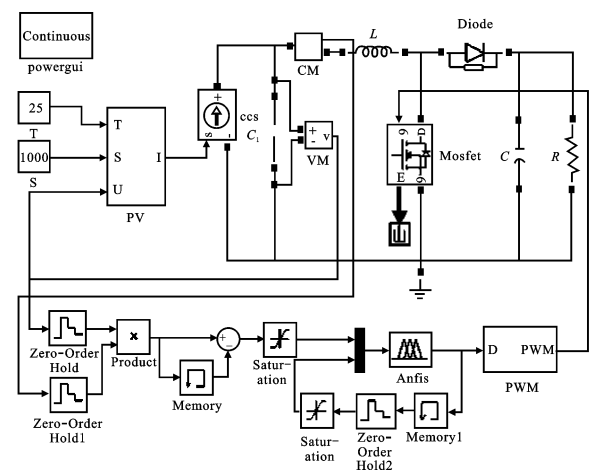
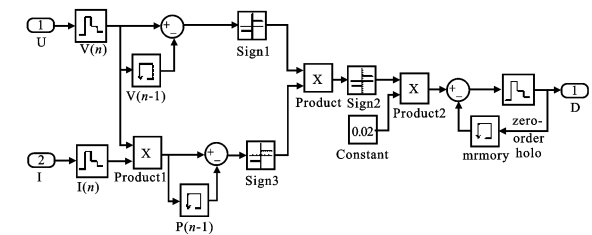
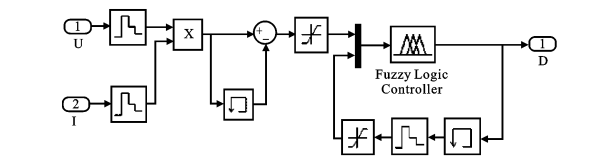


图 6 自适应神经模糊控制实现 MPPT 仿真模型

将仿真的时间分别设为 0.05 s 和 0.1 s,使用变步长 ode23tb 进行仿真,把每种步长和绝对误差都设为 auto,相对误差设为 $1\text{e}-3$.为了观测到自适应神经模糊算法的控制效果,本文分别搭建了传动扰动观察法^[6]的仿真模型和模糊控制算法的仿真模型,它们的控制器结构如图 7 所示.



(a) 扰动观察法控制器

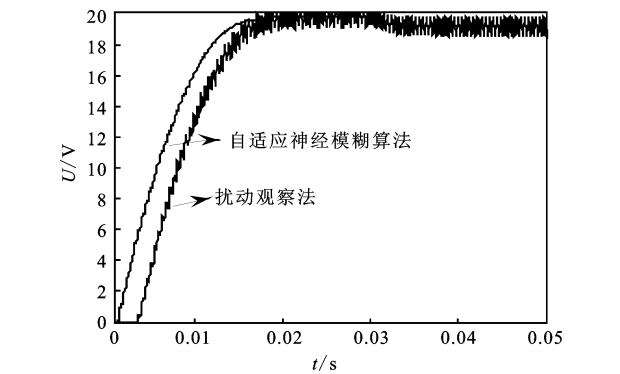


(b) 模糊控制法控制器

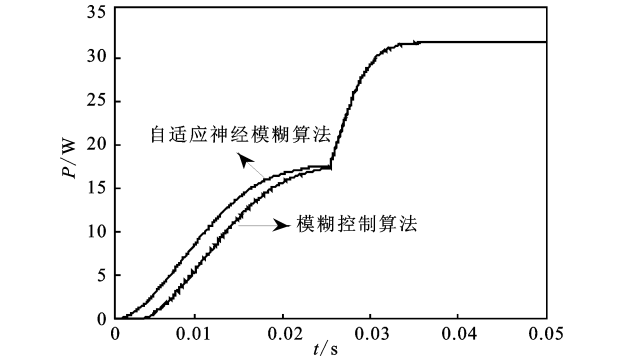
图 7 扰动观察法和模糊控制法控制器仿真模块

在不同的环境温度和光照强度条件下分别对传统扰动观察法、模糊控制法、自适应神经模糊算法进行仿真,得到的仿真波形图如图 8 所示.图 8 (a)为自适应神经模糊算法^[7]和扰动观察法的电压波形图,其中光照强度为 $S=1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 不变,在 0.03 s 时环境温度由 $T=15\ ^\circ\text{C}$ 突变到 $T=30$

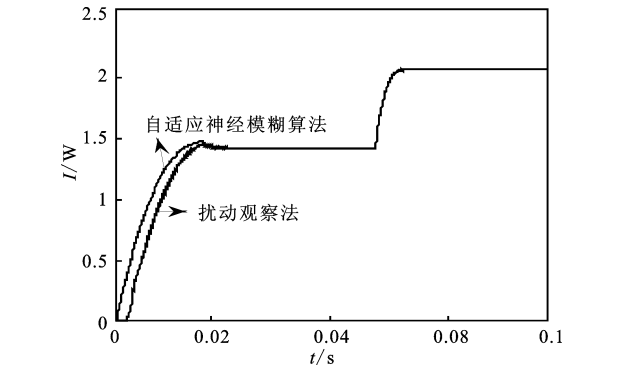
$^\circ\text{C}$,可以看到自适应神经模糊算法更快速地做出响应,整个过程平滑,明显较扰动观察法波动小.图 8(b)为自适应神经模糊算法和模糊控制算法的功率波形图,其中环境温度 $T=25\ ^\circ\text{C}$ 不变,在 0.025 s 时光照强度由 $S=600\ \text{W}/\text{m}^2$ 突变到 $S=1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$,可以看到自适应神经模糊算法功率值较模糊控制算法大些,效率高些.图 8(c)为自适应神经模糊算法和扰动观察法的电流波形图,在 0.02 s 时温度从 $T=10\ ^\circ\text{C}$ 突变到 $T=35\ ^\circ\text{C}$,在 0.06 s 时光照强度由 $S=800\ \text{W}/\text{m}^2$ 突变到 $S=1\ 500\ \text{W}/\text{m}^2$,可看到自适应神经模糊算法响应速度较快些,电流也相对高些.



(a) 电压仿真波形



(b) 功率仿真波形



(c) 电流仿真波形

图 8 三种算法仿真波形图

5 结束语

本文提出了一种自适应神经模糊控制算法,它的核心思想是根据实测数据生成模糊控制规则,降低了传统模糊控制法设计模糊规则和调整隶属函数的难度,提高了工作效率^[10]. 通过仿真实验的对比分析可以看出,自适应神经模糊算法具有良好的动态响应速度和稳态控制精度,输出曲线平滑,波动较小,能快速的对外界环境变化做出反应,具有较强的鲁棒性和有效性.

参考文献:

- [1] 赵争鸣,陈剑,孙晓瑛,等. 太阳能光伏发电最大功率点跟踪技术[M]. 北京:电子工业出版社,2012.
- [2] 程琼,余露,付波,等. 基于改进模糊控制的光伏 MPPT 策略研究[J]. 湖北工业大学学报,2012,27(5):36-39.
- [3] 张忠政,程晓航. 太阳电池最大功率恒压跟踪研究

[J]. 中国电机工程学报,2014,34(26):21-27.

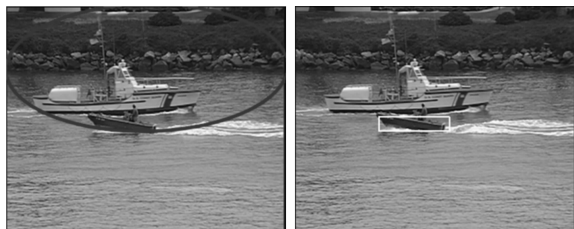
- [4] JOE A, TSONG L, YING T. Maximum Power Tracking for Photovoltaic Power Systems [J]. Tam kang Journal of Science and Engineering, 2005, 8(2):147-153.
- [5] 张超,何湘宁. 非对称模糊 PID 控制在光伏发电 MPPT 中的应用[J]. 电工技术学报,2005,20(10):72-75.
- [6] 江帆,吴晓波. 一种新颖的基于扰动观察法的 MPPT 控制芯片设计[J]. 微电子学与计算机,2008,25(12):197-202.
- [7] 郑蕾,黄克亚. 模糊控制技术与神经网络法相结合实现光伏发电系统最大功率点跟踪[J]. 制造业自动化,2011,33(8):41-48.

作者简介:

荣德生 男,(1975-),副教授. 研究方向为节能型电力电子技术及应用的研究. E-mail:345178299@qq.com

刘凤 女,(1990-),硕士. 研究方向为光伏发电最大功率点跟踪.

(上接第 91 页)



(a)camshift 的跟踪结果 (b)本文的跟踪结果

图 4 第 63 帧图像

6 结束语

本文提出的融合颜色信息和边缘信息的改进 Mean Shift 算法可以提高在复杂背景下目标跟踪的可靠度,同时由于计算量低,满足实时跟踪要求,非常适合于灵巧弹药末制导部分的工程应用.

参考文献:

- [1] 刘汉忠,顾晓辉. 灵巧弹药半实物仿真系统及模型[J]. 火力与指挥控制,2005,30(1):55-58.
- [2] DComaniciu, P Meer, Mean shift. A robust approach toward feature space analysis[J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 23(5):

603-619.

- [3] Yizong Cheng. Mean Shift, mode seeking, and clustering [J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995,17(8):790-799.
- [4] Gary R Bradski. Computer vision face tracking for use in a perceptual user interface [J]. Intel Technology Journal, 1998,18(3):231-247.
- [5] Jordan J, Angelopoulou E. Mean-shift clustering for interactive multispectral image analysis[C]// proceedings of 2013 IEEE International Conference on Image Processing. Melbourne:IEEE,2013:3790-3794.
- [6] Demetri N, Zoubir A M. A robust kernel density estimator based mean-shift algorithm [C]// proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal. Florence:IEEE, 2014:7964-7968.
- [7] Xiao An, Jaedo Kim, Youngjoon Han. Optimal colour-based mean shift algorithm for tracking objects [J]. Computer Vision, 2014, 8(3):235-244.

作者简介:

聂振钢(通讯作者) 男,(1979-),博士后,讲师. 研究方向为计算机视觉、视频、压缩及其学习.

E-mail:zhengang.nie@bit.edu.cn