

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190112

基于 RBF 神经网络的光伏系统 MPPT 研究

王志豪, 李自成, 王后能, 刘庆

(武汉工程大学电气信息学院, 湖北 武汉 430205)

摘要: 针对光伏发电最大功率点跟踪(MPPT)技术的研究和现状, 提出了一种基于径向基(Radical Basis Function, RBF)神经网络的 MPPT 算法。建立太阳能电池板的数学模型, 分析光伏发电的主要影响因素。选取电池板的电压、电流为 RBF 神经网络的输入层, 输出层直接调整 Boost 电路的占空比, 达到最大功率点跟踪的目的。与传统的扰动观察法(P&O)相比, 所提出的方法无需设定步长, 通过 RBF 神经网络, 直接调节 Boost 电路的占空比进行最大功率点跟踪。仿真和实验结果表明, 所提出的 MPPT 算法与传统的 P&O 算法相比有更好的快速性和光伏利用效率。
关键词: 光伏发电; 最大功率点跟踪; RBF 神经网络; Boost 电路

MPPT study of solar PV power system based on RBF neural network algorithm

WANG Zhihao, LI Zicheng, WANG Houneng, LIU Qing

(School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China)

Abstract: Aiming at the development and research status of the Maximum Power Point Tracking (MPPT) technology of solar photovoltaic power, a MPPT algorithm based on Radical Basis Function (RBF) neural network is proposed. Firstly, this paper establishes a parameter model of the solar cell and analyzes the main influencing factors of photovoltaic power generation, selects the voltage and current of the panel as the input layer of the RBF neural network, and directly adjusts the duty of the Boost converter to achieve the maximum power point tracking. Compared with the traditional Perturbation and Observation method (P&O), this method avoids the difficulty of setting the step size. The duty cycle of the Boost converter is adjusted directly for maximum power point tracking through the RBF neural network. Simulation and experimental results show that the provided MPPT algorithm can track quickly and more efficient than the traditional P&O algorithm.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41727801) and Graduates Innovation Fund of Wuhan University of Engineering (No. CX2018116).

Key words: photovoltaic system; maximum power point tracking; RBF neural network; Boost converter

0 引言

目前光伏发电在我国应用广泛, 但光伏发电系统仍存在光伏电池板成本高、能量转换效率低和输出特性为非线性等问题^[1]。为提高光伏发电系统的发电效率并对发电输出进行控制, 太阳能光伏发电的最大功率点跟踪(MPPT)技术得到了广泛应用^[2-3]。

常规的 MPPT 方法有恒定电压法(CVT)、扰动观察法(P&O)和增量电导法(INC)^[4]。上述传统的控制算法具有硬件电路简单、控制逻辑易于实现等优

点, 但系统在最大功率点处都有震荡, 造成功率损失^[5-9]。

由于传统算法存在很多缺陷, 许多学者提出了相应的改进算法, 如变步长扰动观察法、变步长增量电导法和分步扰动观察法等。这些改进算法在一定程度上提高了跟踪效果, 但计算量较大、算法复杂。随着智能算法的迅速发展, 许多学者将智能算法引进光伏 MPPT 中, 解决非线性问题。文献[10]提出模糊 PID 算法; 文献[11]提出 VWP 区间模糊算法, 模糊控制提高了跟踪速度和跟踪效果, 但是模糊规则选择复杂。文献[12]提出的粒子群优化扰动观察法, 提高了扰动观察法跟踪性能。文献[13]提出改进猫群算法, 解决了算法早熟问题, 跟踪精度

基金项目: 国家自然科学基金资助(41727801); 武汉工程大学研究生创新基金资助(CX2018116)

得到提高。神经网络是解决非线性问题的良好手段,文献[14]提出智能水滴优化神经网络算法,提高了收敛速度,减小了训练量,有很好的改进效果。文献[15]提出的基于遗传算法优化 BP 神经网络的 MPPT 算法,效果良好。

针对上述问题,基于太阳能电池板的数学模型分析了太阳能电池板输出的非线性特性。根据 RBF 神经网络的强非线性拟合特性和快速收敛性,本文提出了一种基于 RBF 神经网络的 MPPT 算法。

该方法采集太阳能电池板的电压与电流作为输入,通过神经网络直接调节 Boost 电路的占空比,达到最大功率点跟踪的目的。相对传统的 MPPT 方法,该方法不需要设计步长,有更快的跟踪速度。选择太阳能电池板的输出电压、电流作为输入,减少了传感器的数量,系统结构简单。

1 太阳能电池板的数学模型

光伏阵列由光伏电池串联或并联而成,光伏阵列的发电效率与光伏电池电压、电流相关^[16]。图 1 所示为太阳能电池的等效模型。

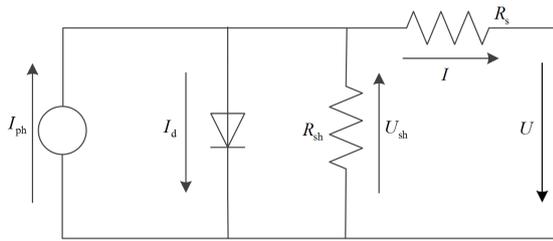


图 1 太阳能电池等效电路
Fig. 1 Solar cell equivalent circuit

文献[17]介绍了如图 1 所示的光伏等效电路,光伏等效电路方程为

$$\begin{cases} I = I_{ph} - I_d - \frac{U_{sh}}{R_{sh}} \\ U = U_{sh} + R_s I \\ I_d = I_o [\exp(\frac{qV_d}{nkT}) - 1] \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_{ph} 是光电效应产生的电流; I_o 是二极管反向饱和电流; I_d 是流过二极管的电流; R_s 是串联电阻; R_{sh} 是并联电阻; q 是电子电荷; k 是波尔兹曼常数; T 是光伏板的绝对温度; n 是二极管的品质因子。

最大功率点处 $\frac{dP}{dV} = 0$, 此时输出电流 I_{mppt} 如式(2)所示。

$$I_{mppt} = I_{ph} - I_o [\exp(\frac{qV_{mppt}}{nkT})] \quad (2)$$

式(2)表明,光伏电池板的最大功率点电流不仅与 I_{ph} 、 V_{mppt} 相关,而且与此时的电池板的温度、光照强度、二极管的品质因子 n 和反向饱和电流 I_o 有关。二极管的品质因子 n 和反向饱和电流 I_o 是电池板的固定参数,可以根据厂家给定参数推算,其中影响光伏发电的最大因素是光照强度和温度。

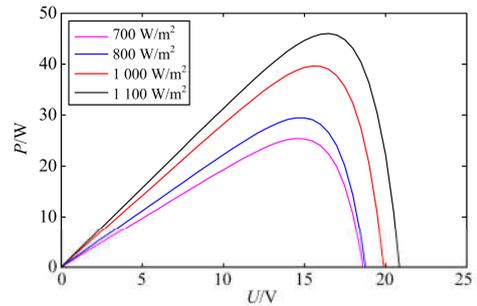
实验用的 40 W 单晶硅太阳能电池 STC(太阳能电池板标准测试条件,温度 25°C、光照强度 1 000 W/m²)的出厂数据见表 1,通过 Matlab 仿真得到太阳能电池在不同情况下的输出特性曲线。

表 1 STC 下太阳能电池板参数

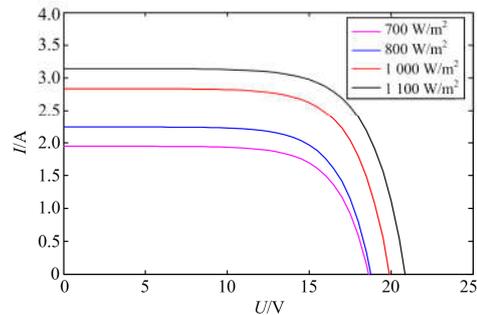
Table 1 Solar cell data under standard testing conditions

参数名称	参数值/单位
短路电流 I_{sc}	2.64 A
开路电压 V_{oc}	21.8 V
最大功率点电流 I_m	2.24 A
最大功率点电压 V_m	17.5 V

选定温度为 $T=25^\circ\text{C}$,光照强度分别为 700 W/m²、800 W/m²、1 000 W/m²、1 100 W/m²,光伏电池板的输出特性曲线如图 2 所示,其中图 2(a)为光伏电池的 P-U 曲线,图 2(b)为光伏电池的 I-U 曲线。



(a) P-U 特性曲线



(b) I-U 特性曲线

图 2 温度为 25 °C 时不同光强下光伏电池板输出特性曲线
Fig. 2 Output characteristic curve of solar cell under different light intensity at temperature 25 °C

当光照强度为 $1\ 000\ \text{W/m}^2$, 温度分别为 10°C 、 20°C 、 30°C 、 40°C 时光伏电池的输出特性曲线如图 3 所示, 其中图 3(a) 是光伏电池的 P-U 曲线, 图 3(b) 是光伏电池的 I-U 曲线。

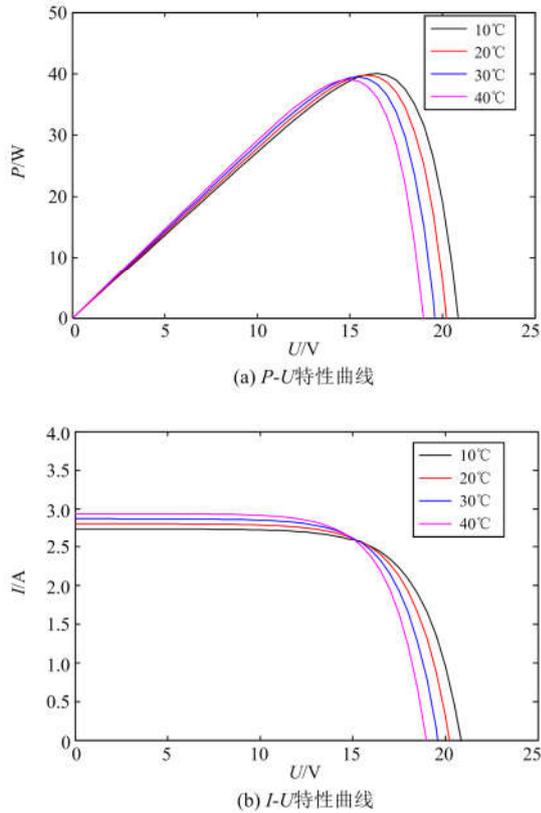


图 3 光照强度为 $1\ 000\ \text{W/m}^2$ 时不同温度下太阳能电池输出特性曲线

Fig. 3 Output characteristic curve of solar cell under different temperature intensity at light $1\ 000\ \text{W/m}^2$

结合表 1 数据和图 2、图 3 的曲线可知, 太阳能电池数学模型能准确地反映太阳能电池输出的非线性特性。

2 RBF 神经网络的光伏 MPPT 控制方法

2.1 MPPT 控制的基本原理

由图 2 和图 3 可知, 光伏电池板的输出特性呈现非线性的特征, 需要在光伏发电系统中加入控制器, 才可以使负载侧与发电侧实现最佳匹配, 从而使负载侧工作在最大功率点。光伏系统一般采用 DC/DC 变换器作为控制器, 通过改变 DC/DC 变换器的占空比, 使光伏发电系统在外部环境变化的情况下输出最大功率^[18-19]。

2.2 RBF 神经网络模型

RBF 神经网络是一种性能优良的三层前馈型神

经网络, 具有全局逼近能力, 拓扑结构紧凑, 结构参数可实现分离学习, 收敛速度快^[20-23]。由于被控对象具有非线性、多变量特性, 传统的控制方式无法满足非线性的拟合。RBF 神经网络模型能任意逼近非线性函数, 在网络结构简单的条件下, 有很好的泛化能力, 能实现最大功率点的非线性控制。

本文采用图 4 所示的 RBF 神经网络, 对 Boost 电路进行控制。其中 U 为太阳能电池板的输出电压, I 为太阳能电池板的输出电流, D 为 PWM 波对应的占空比。

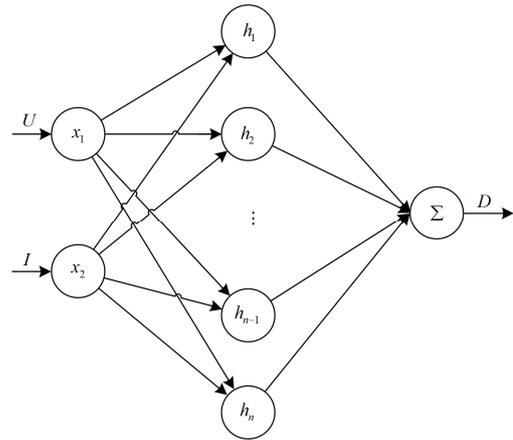


图 4 RBF 神经网络结构图

Fig. 4 Structure of RBF neural network

结合本文的控制目标, RBF 神经网络表达式为

$$D = \mathbf{W}^T \mathbf{h}(\mathbf{x}) \quad (3)$$

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{c}_j\|^2}{2b_j^2}\right) \quad (4)$$

$$\mathbf{x} = [U, I]^T \quad (5)$$

式中: D 为神经网络输出; \mathbf{W} 为权值向量; j 为神经网络隐层节点数; h_j 为高斯函数; \mathbf{c}_j 为神经网络中心向量; b_j 为高斯基函数的宽度; \mathbf{x} 为神经网络输入向量。

网络的隐藏节点线性组合输出为

$$D_m(k) = w_1 h_1 + w_2 h_2 + \cdots + w_m h_m \quad (6)$$

网络的学习指标函数为

$$E(k) = \frac{1}{2} (D(k) - D_m(k))^2 \quad (7)$$

RBF 神经网络通过梯度下降法训练, 其迭代公式如式(8)一式(10)。

$$w_j = w_j(k-1) + \rho (D(k) - D_m(k)) h_j + \eta (w_j(k-1) - w_j(k-1)) \quad (8)$$

$$\begin{cases} \Delta b_j = \rho(D(k) - D_m(k))w_j h_j \frac{\|x - c_j\|^2}{b_j^3} \\ b_j = b_j(k-1) + \rho \Delta b_j + \eta(b_j(k-1) - b_j(k-2)) \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \Delta c_{ji} = (D(k) - D_m(k))w_j \frac{(x_j - c_{ji})}{b_j^2} \\ c_{ji} = c_{ji}(k-1) + \rho \Delta c_{ji} + \eta(c_{ji}(k-1) - c_{ji}(k-2)) \end{cases} \quad (10)$$

式中： ρ 为学习速率； η 为动量因子。

2.3 RBF 神经网络 MPPT 控制策略

本文采用离线训练网络、在线控制的方式。选取太阳能电池板的输出电压、电流作为网络的输入，Boost 电路的 PWM 波的占空比为网络输出。根据实验参数，太阳能电池板输出电压范围为 5~25 V，输出电流范围为 0.1~5 A，占空比范围为 0.1~0.6，采集多组样本，剔除不合理的样本。由于输出特征单位各不相同，先将数据进行归一化处理，归一化公式为 $y_i = \frac{Y_i - \min(Y)}{\max(Y) - \min(Y)}$ ，并对数据进行处理，得

到 200 组样本，随机选取 160 个训练样本对网络进行训练，剩余 40 组样本验证训练好的神经网络。

根据控制目标 Boost 电路电压变化的时间特性，本文选择目标均方差 $\varepsilon = 0.001$ ，如图 5 所示，经过 31 代的迭代网络达到目标，训练量较小，满足控制 Boost 电路的实时性要求。

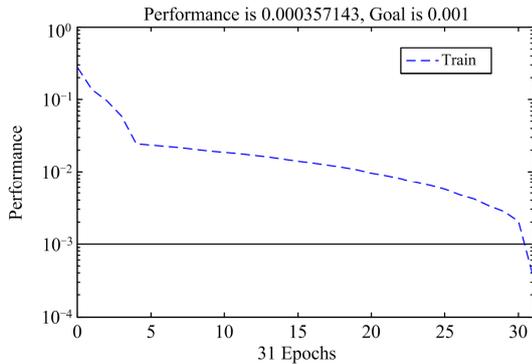


图 5 网络训练图

Fig. 5 Network training chart

3 仿真与实验研究分析

为了验证本文提出的基于 RBF 神经网络的光伏系统 MPPT 方法的可行性与优越性，根据太阳能电池板的数学模型，在 Matlab 中分别建立基于 RBF 神经网络的光伏系统 MPPT 和基于扰动观察法的 MPPT 的仿真模型。

本文提出的 MPPT 方法的 DC/DC 电路是 Boost 电路^[24]，通过调整 Boost 电路中 IGBT 的占空比，

进而调整负载侧的端电压使电源侧的等效内阻与负载侧等效内阻匹配，达到最大功率跟踪的目的^[25-26]。仿真参数如下：太阳能单晶硅电池功率为 40 W，短路电流 I_{sc} 为 2.64 A，开路电压 V_{oc} 为 21.8 V，最大功率点电流 I_m 为 2.24 A，最大功率点电压 V_m 为 17.5 V。系统的仿真结构框图如图 6 所示。

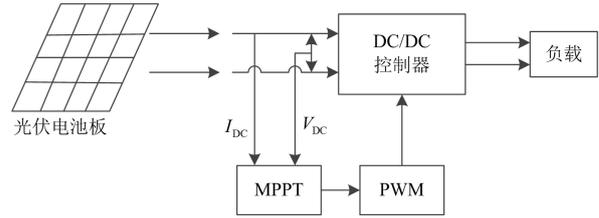
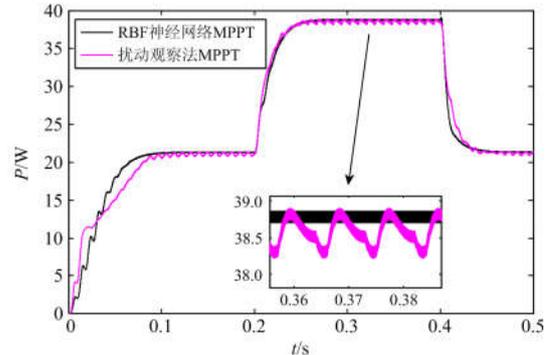


图 6 光伏系统 MPPT 仿真结构图

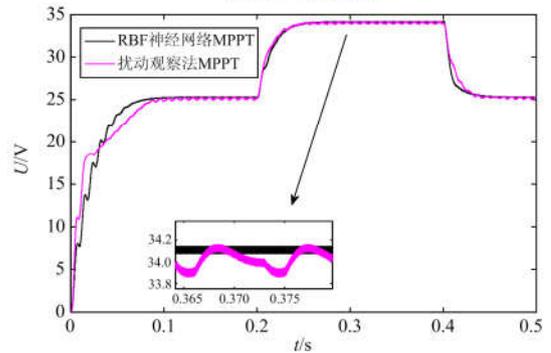
Fig. 6 MPPT simulation architecture of photovoltaic system

3.1 光强变化条件的仿真分析

参考温度 25°C 不变，光照强度设为变化量，初始光强为 600 W/m²，在 0.2 s 光照强度由 600 W/m² 变化为 1 000 W/m²，在 0.4 s 光照强度由 1 000 W/m² 变化为 600 W/m²。图 7 为扰动观察法 MPPT 与本文所述的 RBF 神经网络 MPPT 的 Boost 控制器输出的功率和电压仿真对比曲线。



(a) 功率对比曲线



(b) 电压对比曲线

图 7 温度为 25 °C 时不同光强下 Boost 电路输出曲线

Fig. 7 Output curve of Boost circuit under different light intensity at temperature 25 °C

从图 7 可以看出, 基于 RBF 神经网络的 MPPT 算法, 由于神经网络良好的非线性逼近能力, 无需引入扰动量, 而扰动观察法由于扰动的引入, 震荡明显。在启动阶段, 基于 RBF 神经网络的 MPPT 算法以更大的占空比启动, 在 0.06 s 处跟踪到最大功率点, 而扰动观察法在 0.09 s 才跟踪到最大功率点。本文提出的控制方法在光强突变时有更好的实时性和鲁棒性。

3.2 光强变化条件的仿真分析

当光照强度为 1000 W/m^2 时, 初始温度为 10°C , 在 0.3 s 温度变化为 50°C , 图 8 为扰动观察法 MPPT 与 RBF 神经网络 MPPT 的 DC/DC 控制器输出仿真对比曲线。

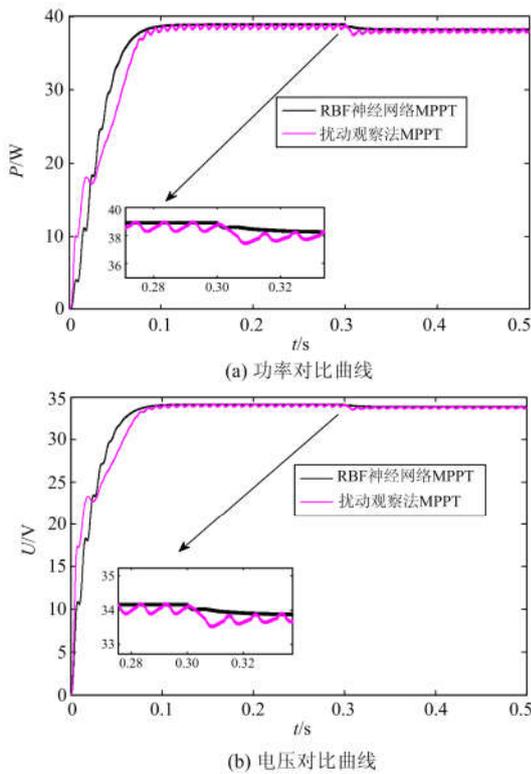


图 8 光照强度为 1000 W/m^2 时不同温度下 Boost 电路输出曲线

Fig. 8 Output curve of Boost circuit under different temperature intensity at light 1000 W/m^2

对比分析图 8 的曲线可知, 在启动阶段, 基于 RBF 神经网络的 MPPT 算法在 0.06 s 时追踪到最大功率点, 而扰动观察法在 0.09 s 时才追踪到最大功率点。在 0.3 s 时温度由 10°C 变化为 50°C , 由于没有扰动的引入, 基于 RBF 神经网络的 MPPT 算法能以更快的速度在 0.31 s 时再次跟踪到最大功率点, 而扰动观察法在 0.33 s 时再次跟踪到最大功率点。

对比在最大功率点处的电压震荡和功率震荡, 基于 RBF 神经网络的 MPPT 算法在最大功率点处的震荡更小。本文提出的控制方法在温度突变时同样有更好的实时性和鲁棒性。

由图 7 和图 8 可以看出, 本文设计的 RBF 神经网络 MPPT 和传统的扰动观察法 MPPT 相比, 在外部条件变化时, 跟踪速度都更快, 跟踪得到的最大功率点的震荡更小, 仿真结果表明 RBF 神经网络 MPPT 策略有更好的实时性和鲁棒性。

3.3 实验结果及分析

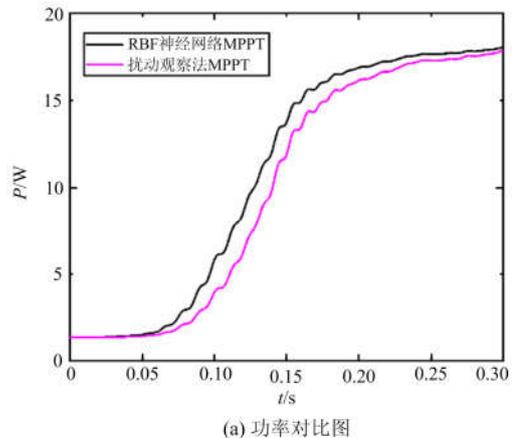
为了验证 RBF 神经网络 MPPT 控制策略的可行性, 设计如图 9 所示的实验平台。实验参数与仿真参数相同。调压电路为 BOOST 电路, 选用宏晶 STC12C5A60S2 作为主控芯片, 12 V 开关电源为辅助电源, 滑动变阻器为负载, 调压射灯为光源。



图 9 实验平台

Fig. 9 Experiment platform

在环境温度为 35°C 、自然光光照强度为 104 W/m^2 的条件下, 利用调压射灯作为补充光源产生光强突变, 比较两种控制算法的性能。图 10 是 RBF 神经网络 MPPT 与扰动观察法 MPPT 实验波形图。在 0.06 s 时光照强度由 104 W/m^2 变化为 778 W/m^2 , 扰动观察法 MPPT 在 0.21 s 跟踪到最大功率点, RBF 神经网络 MPPT 在 0.16 s 跟踪到最大功率点, RBF 神经网络 MPPT 与扰动观察法比较, 由于没有引入扰动, 跟踪速度更快, 输出功率更大, 在最大功率点处的震荡也 smaller。本文算法的实时性和鲁棒性更好。



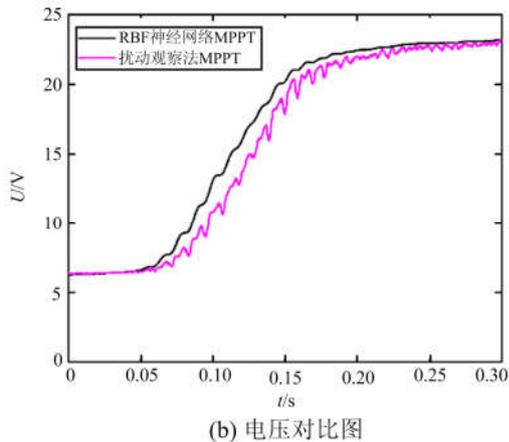


图 10 温度为 35 °C 时不同光强下 Boost 电路输出曲线
Fig. 10 Output curve of Boost circuit under different light intensity at temperature 35 °C

4 结论

本文通过建立太阳能电池的数学模型, 针对基于扰动观察法 MPPT 算法的不足, 提出一种基于 RBF 神经网络的 MPPT 算法。通过 RBF 神经网络调节 Boost 电路的占空比实现电源侧与负载侧匹配, 进而达到最大功率点跟踪的目的。通过 Matlab 仿真实验验证和实物实验验证, 结果表明, 与扰动观察法 MPPT 算法相比, 本文提出的算法最大功率追踪速度快, 在最大功率点附近的震荡更小, 具有更好的工程实用性。

参考文献

- [1] 苗淼, 刘赛, 施涛, 等. 光伏光热联合发电基地并网优化调度模型[J]. 中国电力, 2019, 52(4): 51-58.
MIAO Miao, LIU Sai, SHI Tao, et al. Optimal dispatch model of grid-connected power base considering Photovoltaic power and concentrating solar power[J]. Electric Power, 2019, 52(4): 51-58.
- [2] 李正明, 单晓晨, 徐鹏坤. 基于超螺旋滑模控制光伏 MPPT 的实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 32-37.
LI Zhengming, SHAN Xiaochen, XU Pengkun. Super-twisting sliding mode controller used in photovoltaic system MPPT[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 32-37.
- [3] 王立舒, 蒋赛加, 王君, 等. 基于混合策略的光伏 MPPT 算法优化控制[J]. 太阳能学报, 2016, 37(6): 1396-1402.
WANG Lishu, JIANG Saijia, WANG Jun, et al. Optimization control of PV MPPT algorithm based on mixed strategy[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2016, 37(6): 1396-1402.
- [4] 周东宝, 陈渊睿. 基于改进型变步长电导增量法的最大功率点跟踪策略[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1491-1498.
ZHOU Dongbao, CHEN Yuanrui. Maximum power point tracking strategy based on modified variable step-size incremental conductance algorithm[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1491-1498.
- [5] 费米亚·尼古拉. 光伏发电最大功率点跟踪控制技术[M]. 杨波, 译. 北京: 机械工业出版社, 2016.
FEMIA N. Power electronics and control techniques for maximum energy harvesting in photovoltaic systems[M]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [6] SALMAN S, AI Xin, WU Zhouyang. Design of a P-&O algorithm based MPPT charge controller for a stand-alone 200 W PV system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 259-266. DOI: 10.1186/s41601-018-0099-8.
- [7] 李瑞珂, 陈棋, 高文. 微型逆变 MPPT 跟踪策略的应用研究[J]. 电源技术, 2014, 38(12): 2356-2358.
LI Ruike, CHEN Qi, GAO Wen. Application research of micro inverter MPPT tracking strategy[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2014, 38(12): 2356-2358.
- [8] 刘洁, 刘莉, 米焱. 基于 MPPT 的两级单相光伏并网发电系统控制策略研究[J]. 可再生能源, 2018, 36(3): 385-390.
LIU Jie, LIU Li, MI Yan. Research on control strategy of two-stage single-phase photovoltaic grid-connected generation system controlled by MPPT[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(3): 385-390.
- [9] 高志强, 李松, 周雪松, 等. 线性自抗扰在光伏发电系统 MPPT 中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 52-59.
GAO Zhiqiang, LI Song, ZHOU Xuesong, et al. Design of MPPT controller for photovoltaic generation system based on LADRC[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 52-59.
- [10] 郑必伟, 蔡逢煌, 王武. 一种单级光伏并网系统 MPPT 算法的分析[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 90-96.
ZHENG Biwei, CAI Fenghuang, WANG Wu. Analysis and research of MPPT algorithm for a single-stage PV connected-grid power generation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 90-96.
- [11] 李绍武, 高宪文. 光伏系统的一种 VWP 区间模糊 MPPT 控制策略[J]. 太阳能学报, 2016, 37(5): 1167-1173.
LI Shaowu, GAO Xianwen. A VWP-interval fuzzy MPPT control strategy for PV systems[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2016, 37(5): 1167-1173.
- [12] ISHAQUE K, SALAM Z, AMAD M, et al. An improved

- particle swarm optimization (PSO)-based MPPT for PV with reduced steady-state oscillation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(8): 3627-3638.
- [13] 聂晓华, 王薇. 混沌改进猫群算法及其在光伏 MPPT 中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6103-6110.
- NIE Xiaohua, WANG Wei. Chaos improved cat swarm optimization and its application in the PV MPPT[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6103-6110.
- [14] 赵文清, 李瑶. 利用智能水滴算法优化神经网络的 MPPT[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 8-12.
- ZHAO Wenqing, LI Yao. MPPT based on neural network optimized by intelligent water drop algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 8-12.
- [15] 林虹江, 周步祥, 冉伊, 等. 基于遗传优化 BP 神经网络算法的光伏系统最大功率点跟踪研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(5): 35-40.
- LIN Hongjiang, ZHOU Buxiang, RAN Yi, et al. Research on maximum power point tracking of photovoltaic system based on genetic algorithm BP neural network algorithm[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2015, 52(5): 35-40.
- [16] 孙航, 杜海江, 季迎旭, 等. 适用不同尺度光伏阵列的数值建模方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 35-40.
- SUN Hang, DU Haijiang, JI Yingxu, et al. A numerical modeling suitable for photovoltaic arrays with different scales[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 35-40.
- [17] 杨永恒, 周克亮. 光伏电池建模及 MPPT 控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(增刊 1): 229-234.
- YANG Yongheng, ZHOU Keliang. Photovoltaic cell modeling and MPPT control strategies[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(S1): 229-234.
- [18] 张芳, 陈嘉. 部分遮挡条件下光伏阵列全局最大功率点追踪控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(11): 64-72.
- ZHANG Fang, CHEN Jia. Maximum power point tracking control for photovoltaic array under shaded conditions[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2015, 27(11): 64-72.
- [19] 吴志程, 江智军, 杨晓辉. 一种基于功率闭环控制的改进全局 MPPT 方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 57-62.
- WU Zhicheng, JIANG Zhijun, YANG Xiaohui. An improved global MPPT method based on power closed-loop control[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 57-62.
- [20] ZHOU Z H, ZHANG M L. Adapting RBF neural network to multi-instance learning[J]. Neural Processing Letters, 2006, 23(1): 1-26.
- [21] 单馨, 王宝华, 仲振. 用于双馈风电场次同步振荡抑制的 RBF 神经网络控制器设计[J]. 可再生能源, 2017, 35(10): 1506-1513.
- SHAN Xin, WANG Baohua, ZHONG Zhen. Design of RBF neural network controller for depressing sub-synchronous oscillation of DFIG-based wind farms[J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(10): 1506-1513.
- [22] 杨剑锋, 姜爽, 石戈戈. 基于分段改进 S 变换的复合电能质量扰动识别[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 64-71.
- YANG Jianfeng, JIANG Shuang, SHI Gege. Classification of composite power quality disturbances based on piecewise-modified S transform[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 64-71.
- [23] 杨一, 高社生, 胡高歌. 基于敏感度方差重要性的 RBF 神经网络结构优化算法[J]. 控制与决策, 2015, 30(8): 1393-1398.
- YANG Yi, GAO Shesheng, HU Gaoge. Optimal algorithm for RBF neural network structure based on variance significance in output sensitivity[J]. Control and Decision, 2015, 30(8): 1393-1398.
- [24] 刘利红, 陈启正. 基于 BOOST 电路光伏电池的 MPPT 仿真研究[J]. 电气技术, 2011(9): 10-13.
- LIU Lihong, CHEN Qizheng. MPPT simulation research for PV module based on Boost circuit[J]. Electrical Engineering, 2011(9): 10-13.
- [25] MARCELO G V, JONAS R G, ERNESTO R F. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(5): 1198-1208.
- [26] 屠亚南, 于艾清, 薛花, 等. 基于指数变步长电导增量法的光伏最大功率点跟踪[J]. 中国电力, 2018, 51(11): 132-138.
- TU Yanan, YU Aiqing, XUE Hua, et al. Maximum power point tracking for Photovoltaic systems based on exponential variable step size incremental conductance algorithm[J]. Electric Power, 2018, 51(11): 132-138.

收稿日期: 2019-05-24; 修回日期: 2019-11-13

作者简介:

王志豪(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电技术; E-mail: 2416760704@qq.com

李自成(1977—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力电子及驱动, 计算机集成控制。E-mail: zcli@wit.edu.cn

(编辑 魏小丽)