



局部阴影条件下光伏阵列 MPPT 模糊控制最优算法

摘要

针对局部阴影条件下,光伏阵列功率-电压(P - V)特性曲线呈现多个峰值,导致最大功率跟踪(MPPT)算法易陷入局部最优解问题,本文提出了基于负载电压反馈与模糊控制相结合的MPPT算法.通过负载电压闭环控制算法使系统输出功率快速稳定到最大功率点附近,再利用模糊控制算法跟踪到最大功率点.负载电压反馈算法解决了多峰场景下的局部最优解问题,模糊控制算法提高了算法收敛速度.同时,本文算法避免了粒子群算法在粒子切换过程中开关器件上过冲电压过大问题. Matlab 仿真和硬件实验验证了本文算法的可行性和实用性.

关键词

电压闭环控制;模糊控制;最大功率追踪;局部阴影

中图分类号 TK513.4

文献标志码 A

收稿日期 2017-01-06

资助项目 江苏省自然科学基金重点项目(BE2015692)

作者简介

刘建成,男,高级实验师,研究方向为仪器仪表、电路与系统.000419@nuist.edu.cn

¹ 南京信息工程大学 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心,南京,210044

0 引言

太阳能是一种清洁、高效和永不衰竭的新能源.光伏发电是将太阳能转化为电能的主要技术之一.光伏系统主要由光伏阵列、DC/DC变换电路、太阳能控制器及其负载组成.受灰尘、辐射、天气等环境因素影响,光伏阵列并非一直处于最佳工作状态.如何使光伏系统快速稳定地追踪到最大功率点,是光伏发电的重要研究方向.

局部阴影情况下光伏阵列 P - V 特性曲线呈现多峰现象^[1].传统的MPPT(Maximum Power Point Tracking)算法,如扰动观察法^[2]、电导增量法^[3]、模糊控制^[4-5]等,虽然算法复杂度低,对硬件要求不高,但会陷入局部最优值.文献[6-7]提出的粒子群算法(PSO)能够避免陷入局部最优值,但是其追踪时间长,粒子切换过程中,由于粒子的随机性导致开关管两端电压可能变化过大,引起过大振铃和过冲,损坏开关器件.

文献[8]提出了基于电压扫描的MPPT方法,为全局扫描方式,由于未采用闭环控制,当进行电压扫描时,每个扫描电压点都需要一个稳定的时间,导致算法收敛速度变慢.文献[9]提出了等功率线扫描的MPPT方法,虽然能减少电压扫描的范围,降低对局部峰值的误判,但是当从开路电压到0V切换时开关管上过冲过大,并且为了判断全局峰值点,需要知道光伏阵列二极管个数.

针对上述问题,本文提出了一种基于电压闭环控制和模糊控制的MPPT算法.该算法不仅有效解决了常规算法陷入局部最优值和粒子群算法产生过冲现象的问题,避免了局部最大电压峰值点的出现,而且相较于常见的全局扫描算法提高了MPPT的收敛速度.

1 局部阴影条件下的光伏阵列特性

单个光伏电池采用的是单二极管模型^[10],其近似等效电路如图1所示,由电流源 S 、二极管 D 、串联电阻 R_s 、并联电阻 R_p 组成.光伏阵列输出电流 I_c 和电压 V_c 表达式分别如式(1)和式(2)所示.

$$I_c = \frac{V_t}{R_s} \left(\frac{R_s(I_{ph} + I_o)}{V_t} - W \left(\frac{I_o}{V_t} \cdot R_s \cdot e^{\frac{V_c}{V_t}} \cdot e^{\frac{R_s(I_{ph} + I_o)}{V_t}} \right) \right) - \frac{V_c}{R_p}, \quad (1)$$

$$V_c = V_t \left(\frac{R_p I_o}{V_t} (I_{ph} + I_o - I_c) - W \left(\frac{R_p I_o}{V_t} \cdot e^{\frac{R_p(I_{ph} + I_o - I_c)}{V_t}} \right) \right) - R_s I_c, \quad (2)$$

式中, I_o 和 V_t 分别为二极管的反向饱和电流和热感电压, W 为兰伯特

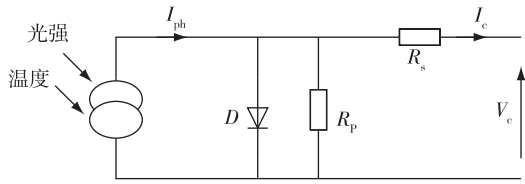


图 1 光伏电池等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of photovoltaic cell

方程.

如图 2 所示,为了模拟局部阴影条件下的光伏阵列输出,分别在两种情景下采用 3×3 光伏阵列的串并联(SP)方式^[11]搭建了仿真模型.设置光伏阵列的外部环境如表 1 所示,图 3 为光伏阵列的 $P-V$ 曲线.

表 1 两种情景下外部条件参数

Table 1 External condition parameters under two scenarios

情景	温度/($^{\circ}\text{C}$)	光强/(W/m^2)
情景 1	cond1	25
	cond2	15
情景 2	cond1	20
	cond2	15
	cond3	15

2 MPPT 系统模型

典型的光伏直流 DC/DC 变换拓扑图有 4 种:升压型电路(Boost)、降压型电路(Buck)、升/降压型电路(Boost-Buck)和库克电路(Cuk).由于 Boost 电路结构简单、易于实现,且相对于其他电路效率高,因

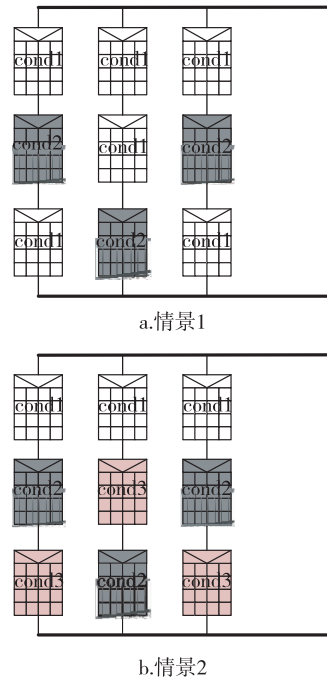


图 2 SP 连接方式示意

Fig. 2 Schematic diagram of SP connection modes

此采用 Boost 电路^[12]作为光伏系统的控制电路.系统框图如图 4 所示, U 为光伏阵列, I_{PV} 、 V_{PV} 分别为光伏阵列输出电流和电压, C_1 、 C_2 分别为 Boost 电路的输入输出电容, L 、 D 分别为电感和二极管, I_L 、 V_L 分别为负载电阻 R_L 的电流和电压.

3 基于电压的 MPPT 最优模糊控制算法

本文提出的 MPPT 算法包含 2 个阶段.第 1 个阶段:控制光伏阵列的输出电压(V_{PV}),使其遍历光伏

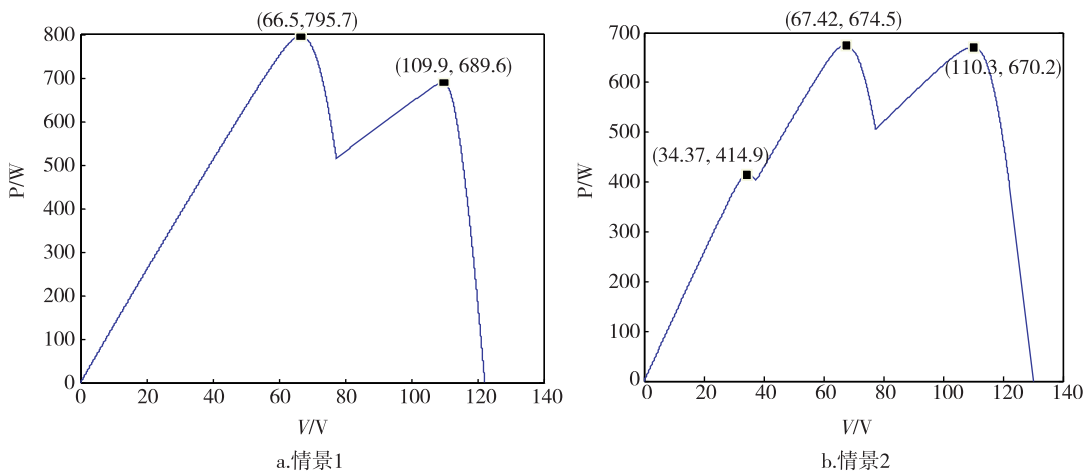
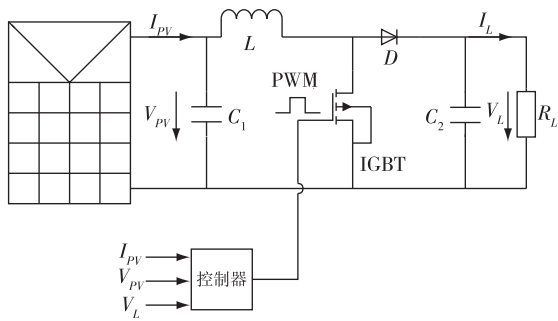


图 3 光伏阵列的 $P-V$ 曲线

Fig. 3 $P-V$ curve of photovoltaic array



4 系统结构框图

Fig. 4 System structure diagram

阵列的整个电压区间,比较得到最大功率点附近的电压值;第2阶段:利用模糊控制在最大功率点电压值附近进行最大功率跟踪,使光伏系统稳定达到最大功率点.

3.1 基于负载电压闭环控制

基于负载电压闭环控制的扫描算法流程,如图5所示.

首先初始化参考电压(V_{ref})为光伏阵列开路电

压(V_{oc})的20%^[13]、扫描方向标志位(Flag_ref)为1(1表示向电压增加的方向扫描,-1表示向电压减少的方向扫描)、扫描结束标志位 over_flag 为0(1表示扫描过程结束,0表示未结束)、扫描步进计数(i)为0以及扫描步进值 V_{large} .

初始化完成后,通过比较其差值是否小于阈值 ϵ ,判断 V_{PV} 是否达到指定电压 V_{ref} ,如果未达到指定值则通过差值的正负来判断如何更新值.如果 V_{PV} 小于 V_{ref} ,采用式(3),以步长 β 增加 V_{PV} 的值,反之采用式(4),以步长 β 减少 V_{PV} 的值.然后通过计算 $k = dp/dv$ (dp 为光伏电池输出功率变化值, dv 为光伏电池输出电压变化量)判断 V_{ref} 附近是否会出现峰值.如果向电压增加方向扫描, k 小于0时会出现峰值;如果向电压减少方向扫描, k 大于0时会出现峰值.如果检测到出现峰值则使用模糊控制进行峰值的追踪.通过比较 dp 与阈值 δ 的大小判断是否稳定在局部峰值点,当 dp 小于 δ 时,则表明稳定在 V_{ref} 附近的局部最大峰值处,保存当前峰值的电压值.如果判断到没有稳定在局部峰值处,则使用模糊控制继续进行最大功率追踪使系统稳定在局部最大功率点.

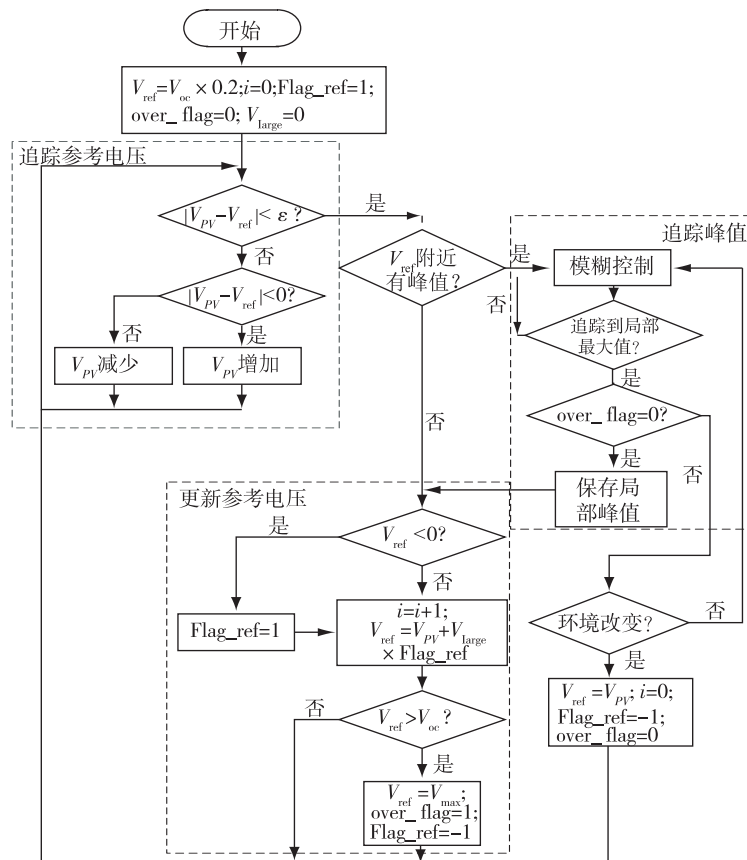


图5 MPPT算法流程

Fig. 5 Flow chart of MPPT algorithm

当 V_{PV} 达到 V_{ref} 或者 V_{ref} 附近局部峰值对应的电压值后,根据当前电压扫描方向,以 V_{large} 继续更新 V_{ref} 进行电压扫描, V_{large} 为更新 V_{ref} 的步进值,该值越小扫描越精确,但扫描时间也越长.扫描过程中如果 V_{ref} 小于 0,则改变扫描方向,如果大于 V_{oc} ,则表明扫描过程结束,将 $over_flag$ 置为 1.

全局电压扫描结束后将 V_{ref} 更新为保存的最大功率处的电压值.稳定到最大功率点后,通过比较 dp 与阈值 ε 的大小来判断环境是否变化,当 dp 大于 ε 时,则表明环境发生了变化,重新初始化进行下次扫描.

如果 $V_{PV} < V_{ref}$:

$$D = 1 - (V_{PV} + \beta) / (V_L + \Delta V_L), \quad (3)$$

如果 $V_{PV} > V_{ref}$:

$$D = 1 - (V_{PV} - \beta) / (V_L + \Delta V_L), \quad (4)$$

式中, D 为占空比, ΔV_L 为负载电压的变化量.

3.2 模糊控制

电压扫描时系统只能扫描到指定电压附近.为了提高追踪精度,在电压扫描之后,采用模糊控制算法使光伏阵列快速地稳定在最大功率点.本文采用双输入单输出的模糊控制器.选取光伏阵列相邻时刻

输出功率差值 ΔP 与电压差值 ΔV_p 的比值 $E(k)$ 的变化率 $\Delta E(k)$ 作为输入,如式(5)所示:

$$\begin{cases} \Delta P = P(k) - P(k - 1), \\ \Delta V_p = V_p(k) - V_p(k - 1), \\ E(k) = \Delta P / \Delta V_p, \\ \Delta E(k) = E(k) - E(k - 1). \end{cases} \quad (5)$$

使用 Mamdani 方法作为模糊控制器的模型,解模糊方法为重心法.将模糊控制器的输入和输出定义为 5 个模糊子集,分别是负大(NB)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)和正大(PB).输入/输出量的隶属度函数如图 6 所示,横坐标表示输入/输出量的论域,纵坐标表示隶属度的范围.模糊规则如表 2 所示.

表 2 模糊规则表
Table 2 Fuzzy rule table

	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	PB	PS	PB	NS	NB
NS	PB	PS	PS	NS	NB
ZO	PB	PS	ZO	NS	NB
PS	PB	PS	NS	NS	NB
PB	PB	PS	NB	NS	NB

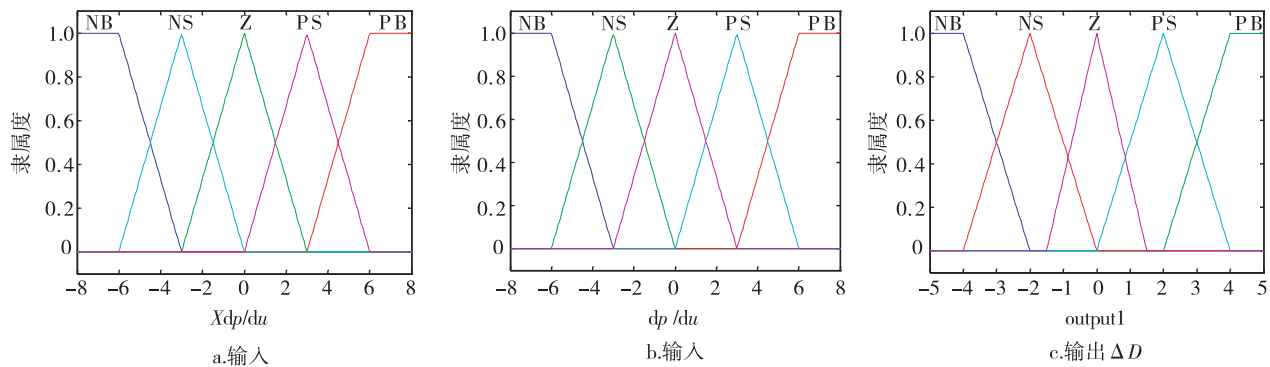


图 6 隶属度函数

Fig. 6 Membership functions

4 仿真实验结果分析

为验证电压闭环控制的电压追踪效果,在情景 1 下设置仿真参数如表 3 所示,每当 V_{PV} 追踪到 V_{ref} ,停留 0.01 s 后 V_{ref} 步进 V_{large} ,继续追踪直到扫描到 V_{max} ,结束扫描.由图 7 可以看出, V_{PV} 能够快速地追踪到 V_{ref} 附近.

图 8 为所述算法仿真,仿真参数如表 4 所示.环境初始为情景 1,0.1 s 后环境变化为情景 2.红线为基于电压闭环控制和扰动观察法的跟踪曲线,黑线

表 3 验证步骤 2 仿真参数

Table 3 Simulation parameters for validation step 2

参数	参数取值
V_{ref} 初始值/V	56
β	2
V_{large} /V	10
ε /V	1
V_{max} /V	116

为基于电压闭环控制和模糊控制的跟踪曲线.从图 8

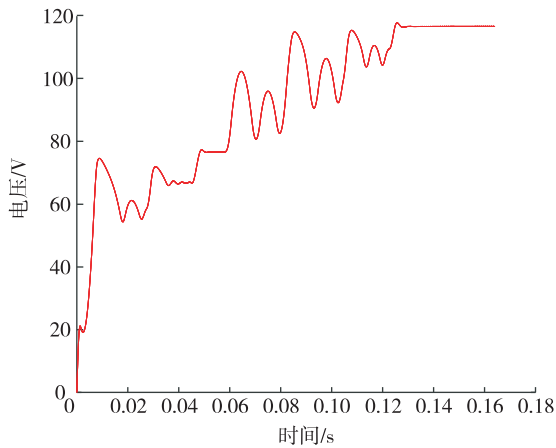


图7 电压扫描
Fig.7 Voltage scan

和稳定性上都有很大提高.

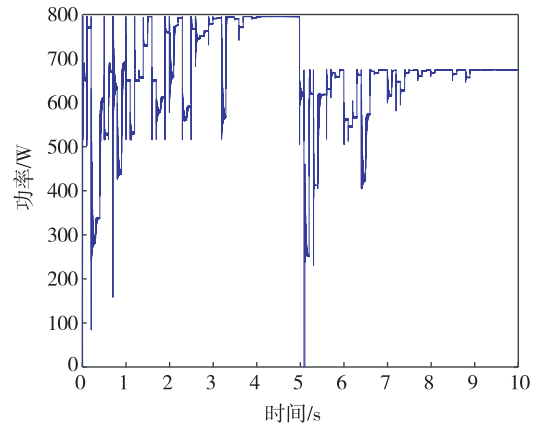


图9 粒子群算法仿真结果
Fig.9 Simulation results of PSO algorithm

中可以看出,无论收敛速度还是最后的稳定性黑线都优于红线.

表4 本文算法仿真参数

Table 4 Simulation parameters of the proposed algorithm

参数	参数取值
V_{ref} 初始值/V	26
β	2
V_{large} /V	10
ε /V	1
V_{max} /V	120
V_{min} /V	20

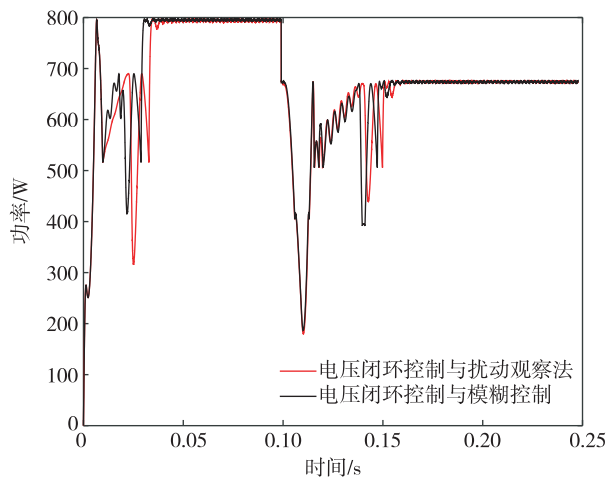


图8 本文算法仿真结果
Fig.8 Simulation results of the proposed algorithm

5 硬件实验结果分析

本文搭建了硬件实验系统,验证了所提算法.控制电路采用 Boost 电路,控制器采用 TI 公司的 DSP28335,PWM 模块采用 DSP 内部高精度脉宽调制模块(HRPWM),A/D 模块采用 DSP 内部 AD,电流采集采用直流/交流霍尔传感器 ACS758LCB-050B,电流取样范围为 $-50 \sim 50$ A,电压采样采用霍尔电压传感器 WHV-AS5S6,电压测量范围为 $0 \sim 500$ V,IGBT 驱动器选用落木源 KD101.

图 10 为本文硬件实物平台,图 11 为光伏模拟器输出特性曲线.模拟器实验参数如表 5 所示.图 12 为实验结果,黄线为光伏模拟器输出电压,蓝线为电流传感器输出,电流传感器输出值为光伏模拟器实际电流输出的 25%.如图 12a 所示电压扫描算法设置初始扫描电压 V_{ref} 为 5 V,使 V_{PV} 先稳定在 5 V,50 ms 后开始执行算法,最终 V_{PV} 稳定在 24 V 附近.从图中可以看出实验结果跟仿真算法基本一致.相较

图 9 为相同情景下粒子群算法的仿真.初始环境为情景 1,5 s 后环境变化为情景 2.可以看出本文提出的算法相较于粒子群算法(PSO),在收敛速度



10 硬件实验平台
Fig.10 Hardware experiment platform

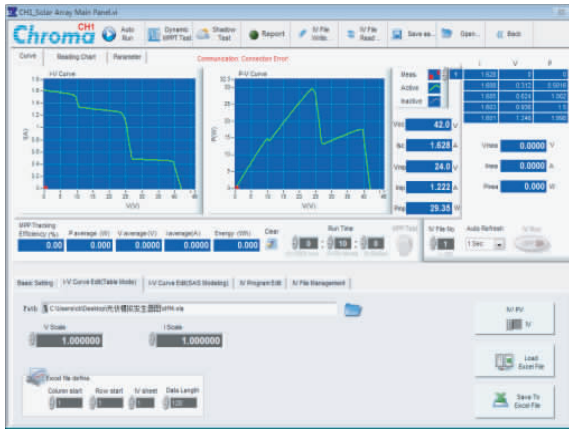
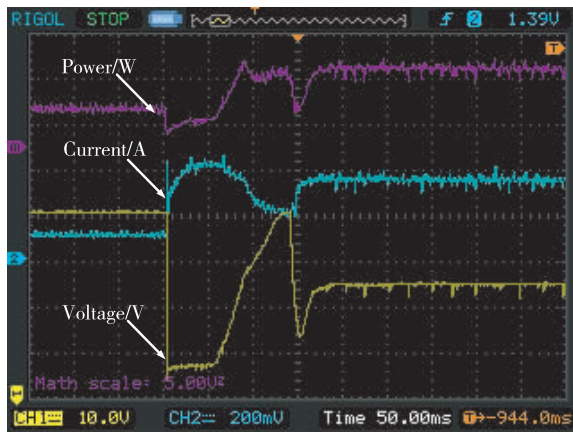
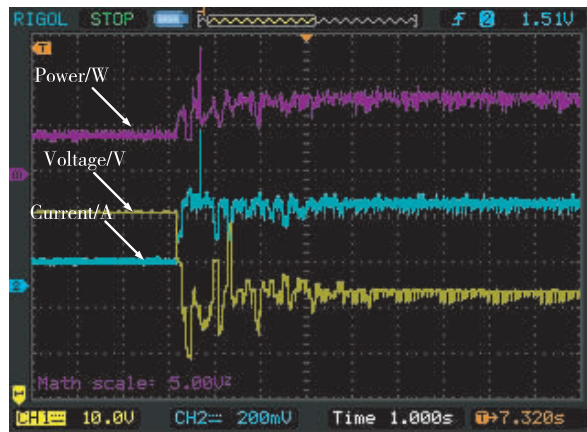


图 11 光伏模拟器控制界面
Fig. 11 Interface for photovoltaic simulator control

图 12b 的粒子群算法,可以看出无论是收敛速度,还是稳定性,本文算法都有较大提升.



a. 本文算法



b. 粒子群算法

图 12 硬件平台实现光伏 MPPT

Fig. 12 Implementation of photovoltaic MPPT on the hardware platform

参考文献

References

[1] 邵伟明,程树英,林培杰,等.局部阴影下光伏阵列 MPPT 算法及实现[J].电源学报,2016,14(1):27-34
SHAO Weiming, CHENG Shuying, LIN Peijie, et al. MPPT algorithm and realization for photovoltaic array under partial shadow[J].Journal of Power Supply,2016,14(1):27-34

[2] Esram T,Chapman P L.Comparison of photovoltaic array-maximum power point tracking techniques [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22 (2): 439-449

[3] 侯文宝,张刚,田国华.一种改进自适应电导增量法在光伏系统的应用[J].电气传动,2017,47(9):64-69
HOU Wenbao, ZHANG Gang, TIAN Guohua. Improved

表 5 光伏模拟器实验参数

Table 5 Experimental parameters of photovoltaic simulator

参数	参数取值
开路电压/V	42
短路电流/A	1.628
最大功率/W	29.35
最大功率点电压/V	24
最大功率点电流/A	1.222

6 结论

针对粒子群算法搜索时间长、算法稳定性差的问题,本文提出了一种基于负载电压反馈扫描的最大功率跟踪算法.首先用电压闭环控制粗略地到达指定电压位置,然后用模糊控制快速追踪并稳定到峰值,该方式不仅算法复杂度低,追踪速度快,稳定性高,而且对于硬件的精度要求不高,易于硬件实现.

adaptive incremental conductance algorithm for photovoltaic system [J]. Electric Drive, 2017, 47 (9): 64-69

[4] Chin C S,Tan M K,Neelakantan P, et al.Optimization of partially shaded PV array using fuzzy MPPT[C]//IEEE Colloquium on Humanities, Science and Engineering, 2011:481-486

[5] Zhou L, Wu Z X, Wang G S, et al.An intelligent fuzzy controller for maximum power point tracking in partially shaded photovoltaic systems[C]//2015 7th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics,2015:345-348

[6] 季亚鹏,孙万鹏.粒子群算法在光伏阵列多峰 MPPT 中的应用[J].电工电气,2013(4):33-35
JI Yapeng, SUN Wanpeng. Application of particle swarm optimization algorithm in global maximum power point

- tracking for photovoltaic array [J]. Electrotechnics Electric, 2013 (4):33-35
- [7] 朱艳伟,石新春,但扬清,等.粒子群优化算法在光伏阵列多峰最大功率点跟踪中的应用[J].中国电机工程学报,2012,32(4):42-48
ZHU Yanwei, SHI Xinchun, DAN Yangqing, et al. Application of PSO algorithm in global MPPT for PV array [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4):42-48
- [8] 李月芳,周皓.一种基于全局最优 MPPT 算法的研究[J].电气传动,2015,45(12):31-34
LI Yuefang, ZHOU Hao. Research on a new algorithm based on global optimal MPPT[J]. Electric Drive, 2015, 45(12):31-34
- [9] 朱啸行,袁越,傅质馨.考虑多点局部阴影的光伏阵列建模及复合型最大功率跟踪算法研究[J].电网与清洁能源,2012,28(9):56-61
ZHU Xiaoxing, YUAN Yue, FU Zhixin. Modeling of photovoltaic array with multi-partial shadows and study of the hybrid maximum power point tracking algorithm [J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(9):56-61
- [10] Jain A, Sharma S, Kapoor A. Solar cell array parameters using Lambert W-function [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2006, 90(1):25-31
- [11] Syafaruddin, Karatepe E, Hiyama T. Artificial neural network-polar coordinated fuzzy controller based maximum power point tracking control under partially shaded conditions [J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(2):239-253
- [12] 高任龙,谢桦,陈宁,等.Boost 电路在光伏发电系统中的应用[J].电源技术,2012,36(3):377-379
GAO Renlong, XIE Hua, CHEN Ning, et al. Application of boost circuits in photovoltaic power generation [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2012, 36(3):377-379
- [13] Patel H, Agarwal V. Maximum power point tracking scheme for PV systems operating under partially shaded conditions [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(4):1689-1698

Optimal fuzzy control for MPPT of photovoltaic array under partial shadow conditions

LIU Jiancheng¹

¹ Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology (CICAEET),
Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract Under the condition of partial shadow, the power-voltage (P - V) characteristic curve of photovoltaic array presents multiple peaks. In the multi-peak case, the conventional maximum power point tracking (MPPT) algorithm is prone to fall into local optimal solution, which affects the solar energy conversion efficiency. This paper presents an MPPT algorithm based on fuzzy control with load voltage scan. At first, the voltage scanning method is used to quickly reach the maximum power point, and then the fuzzy control algorithm is used to stabilize the maximum power point. The algorithm improves the convergence speed of MPPT under multi-peak condition, which can solve the problem of voltage spike produced on the switch tube during the particle switching. The feasibility and practicability of the algorithm are verified by Matlab simulation and hardware experiments.

Key words voltage scan; fuzzy control; maximum power point tracking; partial shading