

基于改进模糊控制算法的光伏发电最大功率点跟踪技术研究

国珍, 叶明浩, 张腾龙, 陈爽, 能纪秋, 郭硕, 张民

(青岛理工大学 信息与控制工程学院, 青岛 266525)

摘要: 为了保证光伏发电系统具有最高的发电效率, 必须使光伏发电系统工作于全局最大功率点, 对光伏发电系统的最大功率点跟踪技术进行了研究。由于光伏电池输出特性的非线性, 采用基于改进的模糊控制算法最大功率点跟踪技术, 模糊控制器可以根据偏离平衡位置的程度产生自适应跟踪步长, 通过优化控制算法改善系统的不对称性, 提高最大功率点跟踪精度。通过 MATLAB 建立仿真模型并进行实验研究, 结果表明光伏发电系统最大功率点的跟踪精度及跟踪速度均明显优于传统算法, 可使光伏发电系统更高效地运行。

关键词: 光伏发电; 最大功率点跟踪; 模糊控制算法; MATLAB 仿真

中图分类号: TM615 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)04-0163-10

Research on photovoltaic maximum power point tracking technology based on the improvement of fuzzy control algorithm

GUO Zhen, YE Minghao, ZHANG Tenglong, CHEN Shuang, NENG Jiqiu,
GUO Shuo, ZHANG Min

(School of Information and Control Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: In order to achieve the highest power generation efficiency, the photovoltaic power generation system must always be operated at the global maximum power point. The maximum power point tracking technology of photovoltaic system is studied in this paper. Due to the nonlinearity of the output characteristics of photovoltaic cells, the maximum power point tracking technology based on the improved fuzzy control algorithm is adopted. The fuzzy controller can generate an adaptive tracking step according to the degree of the deviation from the equilibrium position. The asymmetry of the system is improved by optimizing the control algorithm, and the maximum power point tracking accuracy is improved. The simulation model is established by MATLAB and the experimental research is carried out. The simulation results and experimental results show that the tracking accuracy and tracking speed of the maximum power point of the photovoltaic power generation system are significantly better than the traditional algorithm, which can make the photovoltaic power generation system run more efficiently.

Key words: photovoltaic; maximum power point tracking; fuzzy control algorithm; MATLAB simulation

收稿日期: 2023-04-14

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2022ME214)

作者简介: 国珍 (1977—), 女, 山东青岛人。博士, 副教授, 主要从事光伏发电与电机控制方面的研究。

E-mail: qs2004b@163.com.

光伏发电最大功率点跟踪技术是当前光伏发电的热点问题之一,目前运用比较广泛的方法有扰动观察法、电导增量法和恒定电压法^[1-2]。扰动观察法对阵列输出电压在固定时间施加扰动,再根据输出功率的变化决定下一步的动作以实现最大功率点跟踪,但是此方法在光照变化大时容易产生误判^[3]。电导增量法将光伏阵列输出增量电导率和瞬时电导进行对比,以达到对光伏模块的最大功率点跟踪^[4],但其算法较为复杂,运行成本较高。恒定电压法操作方便,但其控制精度较差。本文针对光伏发电最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)技术进行了研究,采用改进的模糊控制算法,优化光伏发电系统的不对称性,在 MATLAB 中进行仿真分析,并与运用广泛的扰动观察法进行了比较,仿真结果与实验结果验证了采用基于改进模糊控制算法提供光伏发电系统功率的正确性与可行性。

1 光伏电池研究

1.1 光伏电池原理

光伏电池本质上是一个半导体 PN 结,其中有一个与光生电场反向的电场——势垒电场。太阳光照射到光伏电池上,PN 结中的一个原子得到能量后释放出电子,释放出的电子产生一个带正电荷的空穴,从而形成一个电子-空穴对。由于有势垒电场,大量带负电的电子被转移到了光伏电池的 N 区,大量带正电的空穴被转移到了光伏电池的 P 区,因此产生了足够大的电场,于是便抵消了势垒电场,这就是光生伏特效应。若此时将负载连接到半导体的两端,那么光伏电池就会向负载输出电流以提供能量。从理论上来说,如果光照越强,那么原子得到的能量越多,激发的电子-空穴对也越多,就会输出更多能量。

1.2 光伏电池等效电路

通过对光伏电池等效电路进行分析,推导出主要参数的公式并依据其搭建仿真模型。光伏电池等效电路如图 1 所示。

由图 1 可得

$$I_{PV} = I_{sc} - I_D - I_{sh} \quad (1)$$

$$I_{sh} = U_D / R_{sh} \quad (2)$$

$$U_{PV} = U_D - I_{PV} R_s \quad (3)$$

其中 I_D 可表示为

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{qU_D}{akT}} - 1 \right) \quad (4)$$

式中: U_D 为 PN 结电压,开路时 $U_D = U_{OC}$, U_{OC} 为开路电压, V; I_0 为 PN 结反向饱和电流, A; T 为环境热力学温度, K; q 为单位电荷量, $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C; a 为二极管性能理想系数,低电压时 $a = 2$; k 为玻尔兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K。

设参数 C_1 、 C_2 , 其表达式分别为

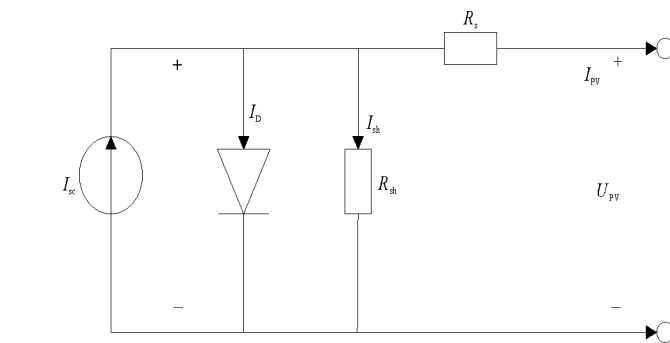


图 1 光伏电池等效电路

I_{sc} —光生电流,近似等于短路电流; I_D —PN 结在不接受光照时的电流;
 R_{sh} —等效旁漏电阻,电阻值约几千欧姆; I_{sh} —流经等效旁路电阻 R_{sh} 的电流;
 I_{PV} —光伏电池输入电流; U_{PV} —光伏电池输出电压;
 R_s —等效串联电阻,电阻值在毫欧级别

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{I_0}{I_{sc}} \\ C_2 &= \frac{1}{\ln\left(\frac{1}{C_1} + 1\right)} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由于 R_s 的电阻值在毫欧级别,在工程计算时忽略 R_s 上的压降,将式(5)代入式(4)得

$$I_D = I_{sc} C_1 \left(e^{\frac{U_{PV}}{C_2 U_{OC}}} - 1 \right) \quad (6)$$

由于 R_{sh} 很大,因此可以忽略 R_{sh} 分得的旁路电流 I_{sh} ,将式(1)化简为

$$I_{PV} = I_{sc} [1 - C_1 (e^{\frac{U_{PV}}{C_2 U_{OC}}} - 1)] \quad (7)$$

利用标准状态下最大功率点 MPP(Maximum Power Point)和开路两个状态求解 C_1 、 C_2 :

1) 处于 MPP 时, $I_{PV} = I_m$, $U_{PV} = U_m$, 将其代入式(7)得

$$I_m = I_{sc} [1 - C_1 (e^{\frac{U_m}{C_2 U_{OC}}} - 1)] \tag{8}$$

由于 $e^{\frac{U_m}{C_2 U_{OC}}} \gg 1$, 所以由式(8)可得

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right) e^{-\frac{U_m}{C_2 U_{OC}}} \tag{9}$$

2) 处于开路时, $I_{PV} = 0$, $U_{PV} = U_{OC}$, 将其代入式(7)得

$$I_{sc} [1 - C_1 (e^{\frac{1}{C_2}} - 1)] = 0 \tag{10}$$

由于 $e^{\frac{1}{C_2}} \gg 1$, 所以由式(9)(10)可得

$$C_2 = \frac{U_m - 1}{\ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right)} \tag{11}$$

以上公式均在标准条件下的关系推导所得, 如果外界条件发生改变, I_{sc} 、 U_{OC} 、 I_m 、 U_m 均会发生改变, 均需要进行修正。另外, 由于 $\Delta T = T - T_{ref}$, $\Delta S = S/S_{ref} - 1$, 其中 T 、 S 分别表示温度和光照强度, 在标准条件下分别用 T_{ref} 和 S_{ref} 表示。修正后的参数表示为

$$\left. \begin{aligned} I_{sc} &= I_{sc,ref} \frac{S}{S_{ref}} (1 + \alpha \Delta T) \\ U_{OC} &= U_{OC,ref} (1 - \gamma \Delta T) \ln(e + \beta \Delta S) \\ I_m &= I_{m,ref} \frac{S}{S_{ref}} (1 + \alpha \Delta T) \\ U_m &= U_{m,ref} (1 - \gamma \Delta T) \ln(e + \beta \Delta S) \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

式中: $\alpha = 0.0025/^\circ\text{C}$; $\beta = 0.5$; $\gamma = 0.00288/^\circ\text{C}$ 。

1.3 光伏电池输出特性分析

本文对 2 种情况进行分析, 当控制光照强度(S)不变, 改变环境温度(T)时绘制电流-电压($I_{sc}-U$)、功率-电压($P-U$)特性曲线如图 2 所示; 当控制环境温度不变, 改变光照强度时绘制 $I_{sc}-U$ 、 $P-U$ 特性曲线如图 3 所示。从图 2 可以看出, 当保持 S 不变, 升高 T 时 $I_{sc}-U$ 和 $P-U$ 曲线都向左移动, I_{sc} 和 P 稍微减少,

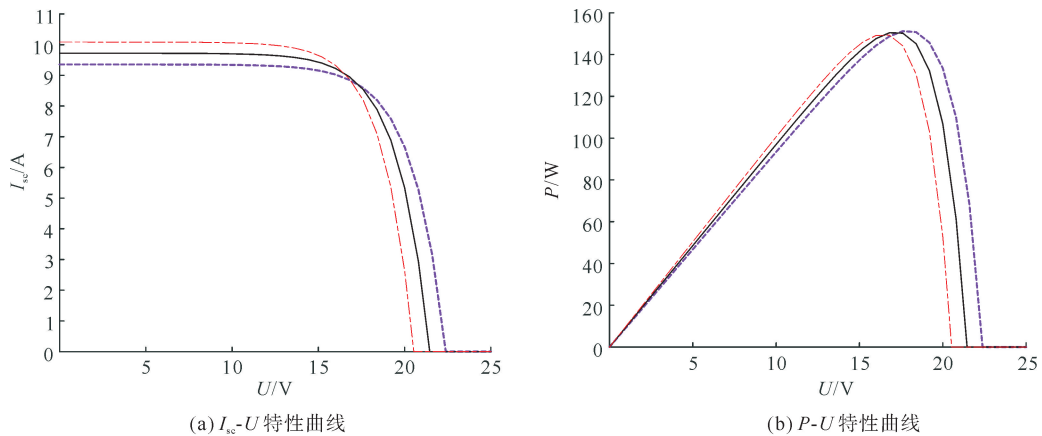


图 2 不同环境温度下的光伏电池输出特性曲线

--- $T=10^\circ\text{C}$; — $T=25^\circ\text{C}$; --- $T=40^\circ\text{C}$

变化不大,但横坐标开路电压变化较大。从图3可以看出,当保持 T 不变,升高 S 时, I_{sc} 和 P 都随之升高,变化较大,而横坐标开路电压变化不明显。因此,光照强度和环境温度的变化都会引起参数的波动,应从多方面考虑问题。

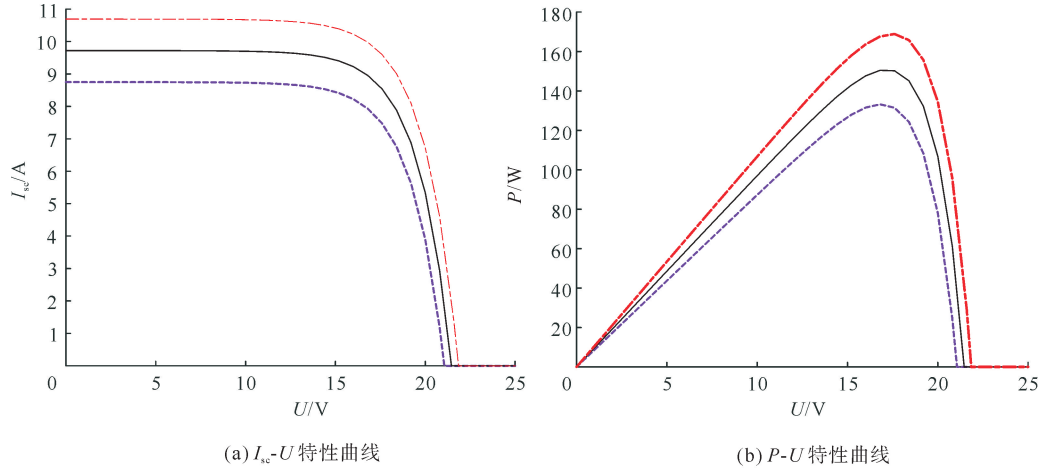


图3 不同光照强度下的光伏电池输出特性曲线

--- $S=900 \text{ W/m}^2$; — $S=1000 \text{ W/m}^2$; - - - $S=1100 \text{ W/m}^2$

2 运用模糊控制算法完成最大功率点跟踪

2.1 模糊控制器设计

以光伏电池数学模型为基础的分析法来实现MPPT技术是最准确有效的^[5],因此在使用模糊控制器来实现MPPT时^[6],使用的被控量为光伏电池的 $P-U$ 特性曲线的一阶导数,设计模糊控制器的主要步骤如下:

1) 定义模糊控制器的输入和输出变量。基于光伏发电系统的输出特性,将模糊控制器输入输出端口设置为双输入、单输出。功率对电压的一阶导数为 E , E 的增量为 E_c ,模糊控制器的输入变量分别为 E_k 和 E_{ck} ,其中 k 表示第 k 次采样;占空比的增量 ΔD 作为模糊控制器的输出变量。输入变量表达式如式(13)所示:

$$\left. \begin{aligned} E_k &= \frac{dP}{dU} = \frac{P_k - P_{k-1}}{U_k - U_{k-1}} \\ E_{ck} &= E_k - E_{k-1} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

2) 确定隶属函数。将输入、输出变量的论域表示为 $K \times \{X_{\min}, X_{\max}\}$,其中, $X_{\min} = -6, X_{\max} = 6$ 。由负大、负中、负小、零、正小、正中、正大(NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB)7个模糊语言将模糊子集划分为不同区域来表示一个参数偏离平衡位置的程度。输入、输出变量采用三角形隶属函数。将对应的模糊论域设定为

$$\left. \begin{aligned} E_k &= \{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\} \\ E_{ck} &= \{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\} \\ \Delta D &= \{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

3) 制定相应模糊规则。模糊规则是模糊控制器的核心,使用的MPPT技术规则如下:

①当 $E > 0, E_c > 0$ 时,表明当前电压低于目标电压值,且移动方向与最大功率点所在方向相反,需要以较大增幅增加输出电压;

②当 $E > 0, E_c < 0$ 时,表明当前电压低于目标电压值,且移动方向与最大功率点所在方向相同,系统即将稳定,需要以较小增幅增加输出电压;

③当 $E < 0, E_c > 0$ 时,表明当前电压高于目标电压值,且移动方向与最大功率点所在方向相同,系统

即将稳定,需要以较小的减幅减小输出电压;

④当 $E < 0$ 、 $E_c < 0$ 时,表明当前电压高于目标电压值,且移动方向与最大功率点所在方向相反,需要以较大的减幅减小输出电压。

根据上述分析制定 7×7 的模糊规则,见表 1。

4) 模糊运算。依据 E 、 E_c 在第 k 个采样周期中的隶属度函数确定其所对应的语言变量值及其隶属度,将参数模糊化,由此在表 1 中进行模糊推理,得出与之相应的语言变量值后,利用面积重心法解模糊算法,其计算公式为

表 1 模糊规则

E_c	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	ZO
NS	PB	PM	PS	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PM	PS	ZO	NS	NS	NM	NB
PM	ZO	ZO	NS	NS	NM	NB	NB
PB	ZO	ZO	NS	NM	NM	NB	NB

$$\Delta D = \frac{\sum_{k=1}^n \mu(Z_k) Z_k}{\sum_{k=1}^n \mu(Z_k)} \tag{15}$$

式中: ΔD 为占空比增量的精确值; Z_k 为模糊化得出的语言变量值; $\mu(Z_k)$ 为语言变量对应的隶属度。

2.2 改进的模糊控制器

光伏电池 $P-U$ 特性的一阶导数曲线如图 4 所示。

由图 4 可知,最大功率点右侧的斜率明显比左侧要大,导致右侧的数值比左侧大,使模糊控制器的输入参数左右严重不对称,由于模糊论域是对称的,将出现最大功率点跟踪精度变差的问题。文献[4]中对模糊控制最大功率点研究采用了非对称模糊控制器,但如果采用非对称模糊控制器,模糊论域将较难确定,本文将输入变量映射到反正切函数中,可以在不改变输入函数本身的数学性质的前提下使其关于最大功率点近似对称。

设输入函数为 $f(u)$,映射后的表达式为 $g(f(u))$,函数曲线如图 5 所示。

优化后的模糊控制不仅没有改变输入函数本身数学性质,还改善了原函数的不对称性,因此优化后的模糊控制更适合于普通模糊控制器。

3 仿真模块设计

根据光伏电池等效电路(图 1)搭建光伏电池模块仿真模型,如图 6 所示。

采用双输入、单输出的模糊控制器实现 MPPT 技术^[7],输入变量为光伏电池的输出

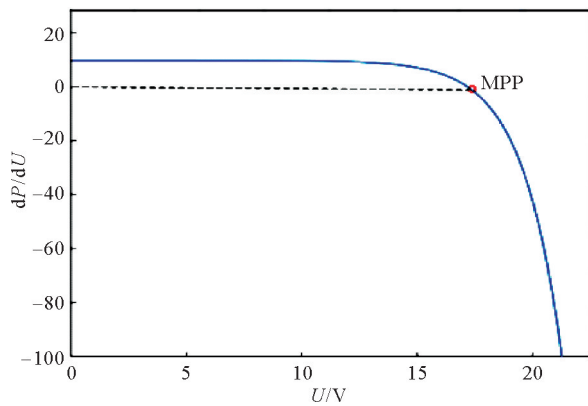


图 4 光伏电池 $P-U$ 特性的一阶导数曲线

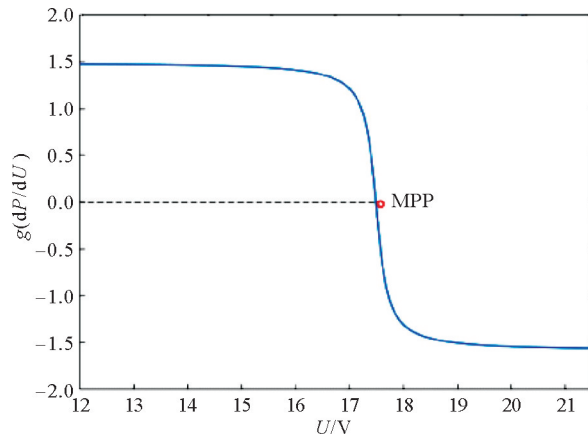


图 5 反正切函数映射曲线

功率 P 对电压 U 的一阶导数和其一阶导数的增量,输出变量为 PWM 信号占空比的增量 ΔD 。采用面积

重心法解模糊算法以保证控制器的平稳输出。采用三角形隶属度函数对输入和输出参数进行优化,以减小光伏电池输出功率在最大功率点处的振幅,输入、输出变量隶属函数曲线如图 7 所示。

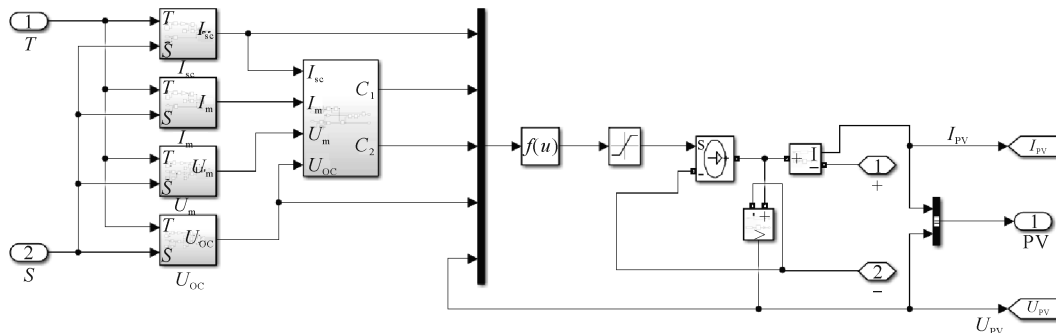


图 6 光伏电池模块仿真模型

I—电流表;V—电压表

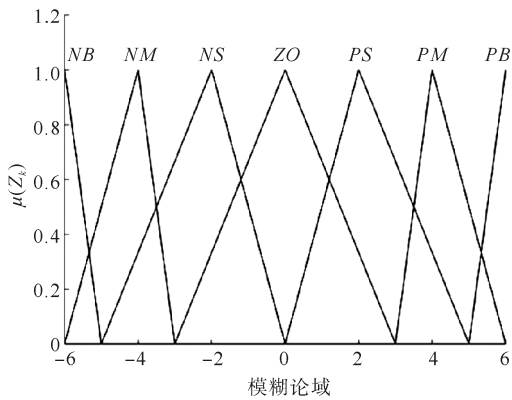


图 7 输入、输出变量隶属函数曲线

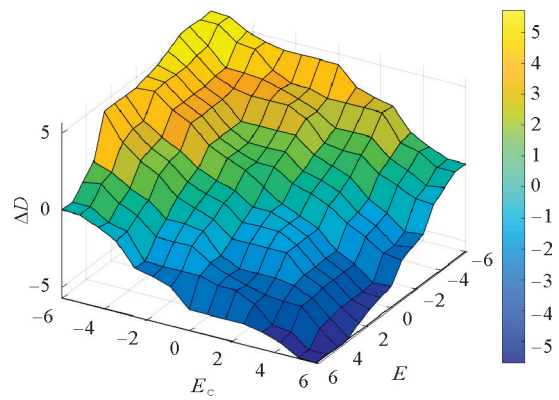


图 8 模糊控制器函数图像

利用 MATLAB 中的模糊工具箱,以其中的 if-and-then 条件语句为基础制定模糊规则。根据表 1 所示模糊规则,运用模糊控制器能够实现 MPPT 调节步长的自适应,在三维坐标系上绘制 $\Delta D(E, E_c)$ 函数,如图 8 所示,曲面颜色的变化快慢与输入量大小有关,颜色变化越慢说明 2 个输入量越小,表明控制器输出变化小,有利于提高系统稳定时的跟踪精度;颜色变化越快说明 2 个输入量较大,表明控制器输出变化大,有利于提高系统动态时的跟踪速度。

使用优化模糊控制器搭建的 MPPT 仿真模块如图 9 所示。图 9 中电流的最大值为 9.52 A,电压的最大值为 19.66 V。该仿真模块实时更新输出功率 P 的变化值和输出电压 U 的变化值,将 2 个变化值的比值相除(即功率对电压的一阶导数 E)后和其一阶导数的增量经过处理后作为模糊控制器的 2 个输入变量,模糊控制器输出变量 ΔD 。

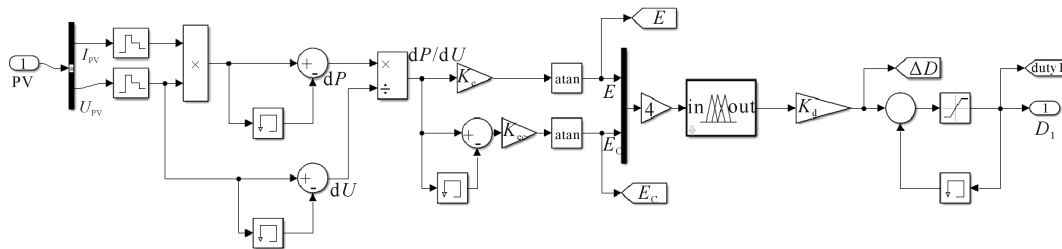


图 9 优化模糊控制器仿真模块

4 仿真结果及分析

将环境温度设置为 25 °C,在 0.3 s 时加入阶跃信号模拟光照强度从 500 W/m² 突然增大到 1000 W/m² 的情况。分别使用传统的扰动观察法和改进的模糊控制器实现 MPPT,经过实验,本文模糊控制器的量化因子 K_e 取 0.01, K_{ec} 取 1, K_d 取 0.001。将改进后的算法与传统扰动观察法的波形进行比较,并将二者系统稳定时的输出波形放大后,绘制光伏电池输出功率曲线如图 10 所示。

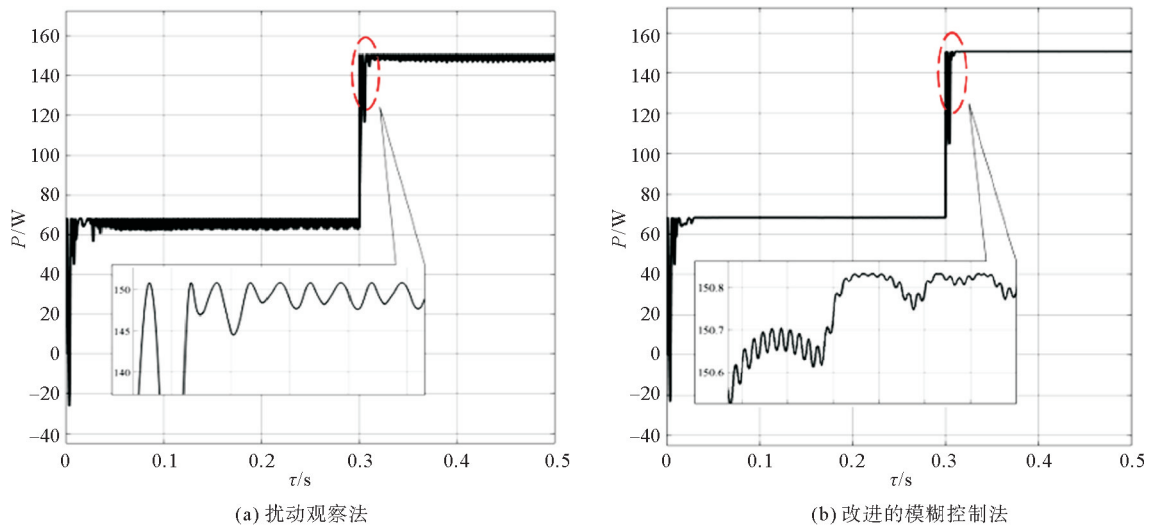


图 10 2 种 MPPT 仿真结果对比

扰动观察法与改进的模糊控制在系统稳定时的输出功率见表 2。

表 2 2 种 MPPT 在系统稳定时输出功率

方法	时间 τ/s				
	0.322	0.324	0.326	0.328	0.330
扰动观察法输出功率 P/W	147.67	151.43	144.75	150.31	148.28
改进的模糊控制法输出功率 P/W	150.93	151.17	150.76	150.94	151.23

由图 10 及表 2 可以看出,传统的扰动观察法在系统稳定时的输出功率在 148 W 附近波动,采用改进的模糊控制法的光伏电池在系统稳定时的输出功率在 151 W 附近波动,高于传统的扰动观察法,且传统的扰动观察法的输出功率波形振幅较大而改进的模糊控制法的光伏电池输出功率波形的振幅较小。施加扰动后传统的扰动观察法需要 0.2 s 使系统达到稳定状态,而改进的模糊控制法只需要 0.1 s 使系统达到稳定状态,可知其追踪最大功率点的速度更快。

5 实验结果及分析

针对所提出的改进的 MPPT 技术,设计了实验电路,由三端口变换器主电路、驱动电路、检测电路以及单片机控制电路组成^[7-10],通过 PID 闭环控制维持输出电压恒定^[11],实验样机主控选用 32 位微控制器 MM32SPIN27PS,电路中 MOS 驱动信号由非隔离型半桥驱动芯片 IR2104 提供^[12-13],通常非隔离芯片功耗比隔离芯片小得多^[14-15],因此该方案相比于隔离方案能够提高电路功率。光伏三端口实验样机如图 11 所示。

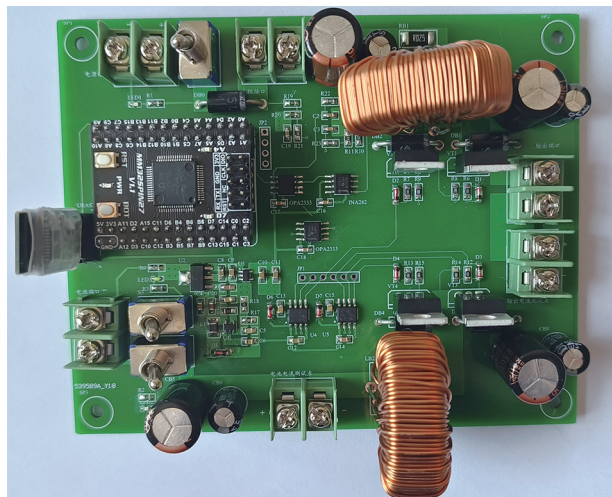


图 11 实验样机实物照片

开关管驱动信号,信号波形如图 12 所示,由 IR2104 芯片输出的两路 PWM 波形为互补信号,高电平幅值约为 15 V,频率约为 15 kHz,死区时间为 0.42 μs 。

三端口变换器输出端电压波形及其局部放大效果如图 13 所示,输出电压稳定在 20 V,纹波约为 0.1 V,静态性能良好,达到了预期控制效果。

为了测试系统的动态性能,利用单片机通过电压、电流检测得到实时电压、电流、功率,并通过无线串口将数据传输到上位机。利用实时数据绘制光伏电池功率、输出端口电压波形,如图 14 所示。

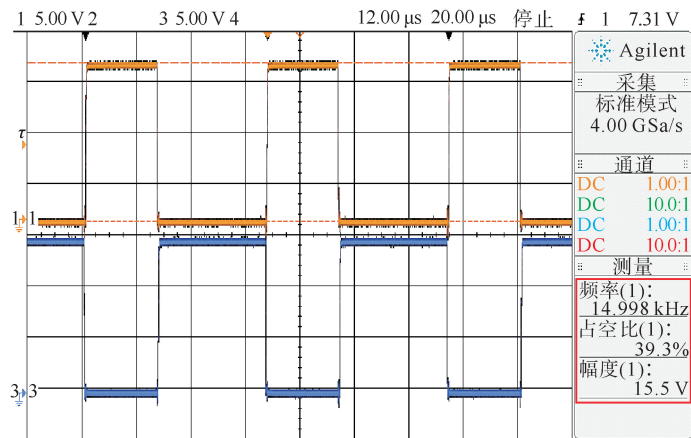
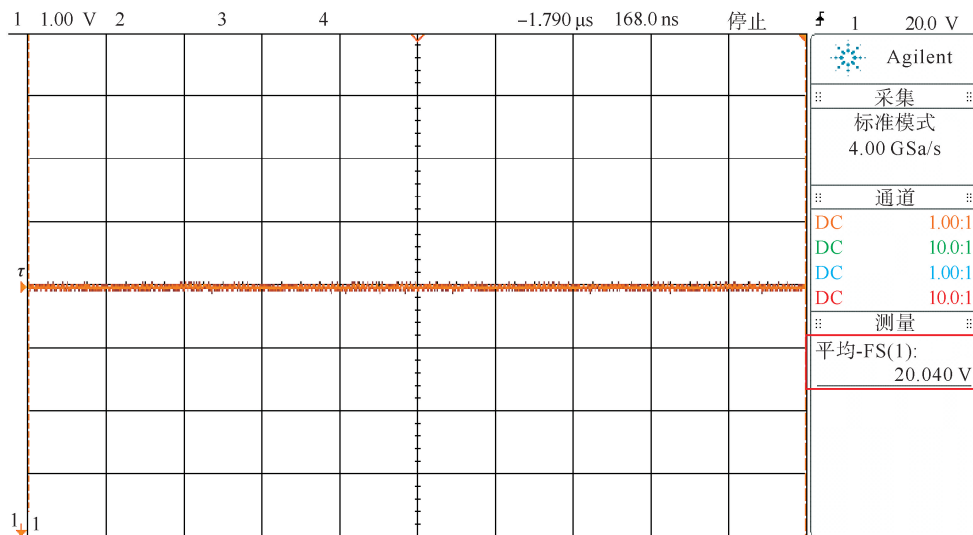
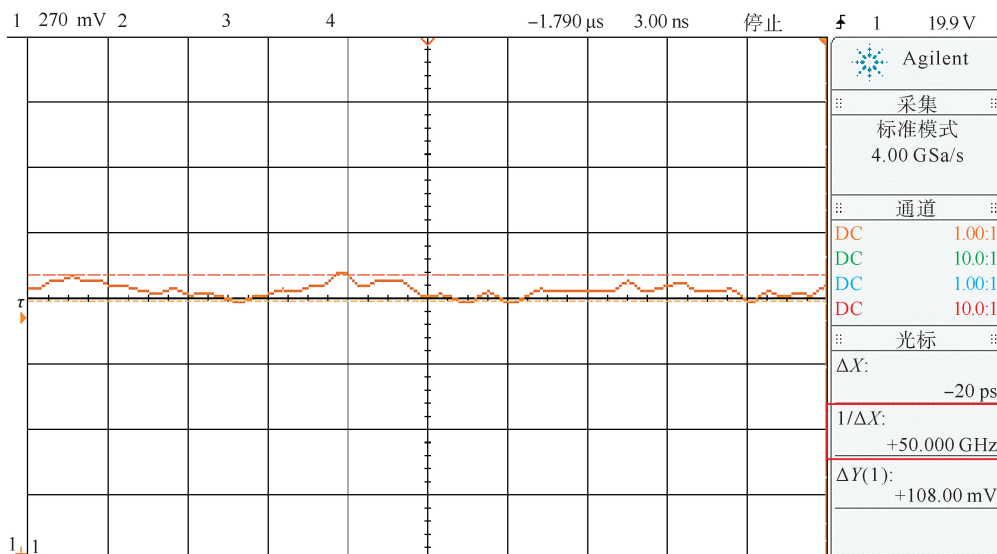


图 12 三端口变换器驱动信号波形



(a) 整体波形



(b) 放大波形

图 13 三端口变换器输出电压波形

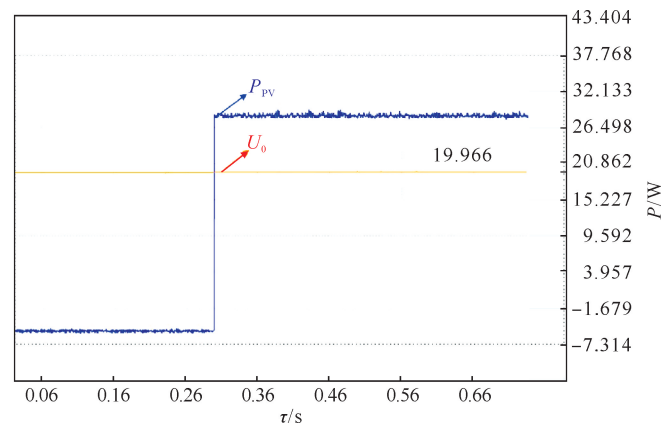


图14 实验样机上位机检测数据波形

由图14可知,当光照强度增大时,光伏电池输出功率 P_{PV} 随之增大,实现了最大功率点跟踪,且跟踪速度和精度均达到预期效果;由于输出电压目标值不变, U_0 在PID调节器的作用下仍能够保持稳定。

6 结论

随着国家对用电需求量的增大和传统发电污染气体排放量的增多,利用太阳能这种清洁能源发电慢慢得到了普及。针对当前太阳能利用率低且广泛使用的扰动观察法存在跟踪速度慢及精度较低的问题,本文提出了一种改进的基于模糊控制算法的最大功率点跟踪方法,相比于传统的扰动观察法,系统在稳定时,光伏电池的输出功率波形的振幅明显平缓许多,且跟踪速度也更快于扰动观察法。仿真结果和实验结果表明,使用基于改进的模糊控制算法的最大功率点跟踪技术可以增加光伏发电系统的稳定性,验证了优化控制策略的可行性。

采用改进的基于模糊控制算法的最大功率点跟踪方法能够提高光伏发电系统的能量利用功率,在很大程度上改善光伏发电系统最大功率点跟踪效果,为非线性、不对称系统的控制问题提供有效的解决方法,有利于对太阳能的利用,对我国光伏发电领域的可持续发展将会有推动意义。

参考文献(References):

- [1] TIWARI A, KUMAR A. Comparison of fuzzy logic based MPPT of grid-connected solar PV system with different MPPT[C]// SINGH T G, CHAUDHARI N S, BARBOSA J L V, et al. International Conference on Intelligent Computing and Smart Communication 2019. Singapore: Springer, 2020.
- [2] RAMLIM A M, TWAHA S, ISHAQUE K, et al. A review on maximum power point tracking for photovoltaic systems with and without shading conditions[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 67:144-159.
- [3] 赵博. 基于扰动-模糊双模式的光伏 MPPT 优化控制[D]. 石家庄:河北科技大学, 2020.
ZHAO Bo. MPPT optimal control based on disturbance fuzzy dual mode[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2020.
- [4] 于学志. 非对称模糊控制算法在 MPPT 中的应用[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2020.
YU Xuezhi. Application of asymmetric fuzzy control algorithm in MPPT[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020.
- [5] 朱作滨, 黄绍平, 李振兴. 基于模糊理论占空比扰动法光伏发电 MPPT 的研究[J]. 控制工程, 2020, 27(7):1299-1304.
ZHU Zuobin, HUANG Shaoping, LI Zhenxing. Research on photovoltaic power generation MPPT based on fuzzy theory duty cycle disturbance method[J]. Control Engineering of China, 2020, 27(7):1299-1304.
- [6] 李悟早, 郭术义, 任思杰. 模糊控制理论综述[J]. 河南科技, 2019(11):12-15.
LI Wuzao, GUO Shuyi, REN Sijie. Summary of fuzzy control theory[J]. Henan Science and Technology, 2019(11):12-15.
- [7] 吴修权, 刘伟丽, 姜明明. 光伏电池最大功率跟踪系统设计[J]. 电池工业, 2021, 25(3):119-121.
WU Xiuquan, LIU Weili, JIANG Mingming. Design of maximum power tracking system for PV cells[J]. Chinese Battery Industry, 2021, 25(3):119-121.
- [8] 毛金枝, 杨俊华, 王秋晶, 等. 光伏发电最大功率跟踪的非对称模糊控制[J]. 电测与仪表, 2015, 52(18):57-62.
MAO Jinzhi, YANG Junhua, WANG Qiujing, et al. Asymmetric fuzzy control of MPPT for photovoltaic system[J]. Electrical Meas-

- urement Instrumentation, 2015, 52(18):57-62.
- [9] 陈倩, 张正江, 胡桂廷, 等. 基于相关熵的光伏电池模型鲁棒参数辨识法[J]. 控制工程, 2019, 26(1):137-143.
CHEN Qian, ZHANG Zhengjiang, HU Guiting, et al. Correntropy based robust parameter identification for photovoltaic cell model[J]. Control Engineering of China, 2019, 26(1):137-143.
- [10] QING X, SUN H, FENG X, et al. Submodule-based modeling and simulation of a series-parallel photovoltaic array under mismatch conditions[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2017, 7(6): 1731-1739.
- [11] 吴硕. 光伏发电系统功率预测方法研究综述[J]. 热能动力工程, 2021, 36(8):1-7.
WU Shuo. Review of power forecasting methods of photovoltaic power generation system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(8):1-7.
- [12] MASOUM M A S, DEHBONEI H, FUCHS E F. Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltage and current-based maximum power-point tracking[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(4): 514-522.
- [13] BOUNECHBA H, BOUZID A, SNANI H, et al. Real-time simulation of MPPT algorithms for PV energy system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 83: 67-78.
- [14] 王庆磊, 徐红城, 张强, 等. 基于变步长电导增量法改进型 MPPT 的研究[J]. 电器与能效管理技术, 2017(21):10-15.
WANG Qinglei, XU Hongcheng, ZHANG Qiang, et al. Research of improved MPPT based on variable step incremental conductance method[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(21):10-15.
- [15] 姚钢, 王旭, 周荔丹. 基于模糊控制的光储微网实时电价能量管理策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(2):1-8.
YAO Gang, WANG Xu, ZHOU Lidan. Real-time electricity price energy management strategy for photovoltaic storage microgrid based on fuzzy control[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(2):1-8.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)

(上接第 138 页)

- [13] 李光, 梁国星, 沈兴全, 等. 窄深槽磨削用风冷式砂轮设计及气流场特性[J]. 机械设计, 2022, 39(4):34-41.
LI Guang, LIANG Guoxing, SHEN Xingquan, et al. Design of the air-cooled grinding wheel for narrow-deep-groove grinding and experimental study on its airflow field characteristics[J]. Journal of Machine Design, 2022, 39(4):34-41.
- [14] 郭兵, 金钱余, 赵清亮, 等. 表面结构化砂轮磨削加工技术研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(7):1-13.
GUO Bing, JIN Qianyu, ZHAO Qingliang, et al. Research progress of grinding technology with surface structured wheels[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(7):1-13.
- [15] 孙建, 钱炜, 丁子珊. 基于 FLUENT 的微量润滑磨削液流场仿真研究[J]. 机电工程, 2021, 38(7):865-872.
SUN Jian, QIAN Wei, DING Zishan. Minimal quantities lubricant grinding based on FLUENT flow field simulation[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38(7):865-872.
- [16] 王新争. 磨粒有序化砂轮磨削的表面粗糙度及磨削液流场的若干研究[D]. 沈阳:沈阳理工大学, 2016.
WANG Xinzheng. Several studies on surface roughness and the flow field of grinding fluid for the engineered grinding wheel[D]. Shenyang:Shenyang Ligong University, 2016.
- [17] LI Changhe, HOU Yali, LI Jingyao, et al. Mathematical modeling and simulation of fluid velocity field in grinding zone with smooth grinding wheel[J]. Advanced Science Letters, 2011, (6/7):4.
- [18] 韩振鲁, 李长河, 王胜, 等. 高速磨削楔形区气流场建模与仿真[J]. 制造技术与机床, 2013(5):110-115.
HAN Zhenlu, LI Changhe, WANG Sheng, et al. Modeling and simulation of air flow field in high-speed grinding[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2013(5):110-115.
- [19] 王春玉. 磨削弧区磨削液有效供给和对流换热研究[D]. 济南:山东大学, 2016.
WANG Chunyu. Study on effective supply of grinding fluid and convective heat transfer in grinding zone[D]. Jinan:Shandong University, 2016.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)