

基于改进黏菌算法的遮阴条件下光伏 MPPT 控制研究

杜峰¹, 郑森财²

(1. 福建理工大学 建筑与城乡规划学院, 福建 福州 350118;

2. 福建理工大学 电子电气与物理学院, 福建 福州 350118)

摘要: 为了更好处理遮阴条件下光伏阵列的多峰 P-U 特性曲线, 提出一种基于改进黏菌算法的 MPPT 控制方法。首先引入混沌映射函数初始化黏菌个体, 增加种群的多样性; 其次, 在黏菌算法中引入螺旋搜索策略, 提高算法全局搜索能力; 最后引入动态透镜对立学习策略, 提高寻优精度和对局部最优解的逃逸能力。仿真结果表明, 所提算法相较于 PSO 和 SMA 算法, 在跟踪速度、收敛精度等方面有更显著的效果, 能够有效提高光伏系统的发电效率。

关键词: 光伏阵列; 最大功率点跟踪; 局部遮阴; 改进黏菌算法

中图分类号: TM615

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)01-0095-08

Study of PV MPPT control under shading conditions based on improved slime mould algorithm

DU Feng¹, ZHENG Sencai²

(1. School of Architecture and Urban Rural Planning, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. School of Electronic, Electrical Engineering and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: In order to better handle the multi-peak P-U characteristic curves of PV arrays under shading conditions, an MPPT control method based on the improved slime mould algorithm is proposed. Firstly, a chaotic mapping function is introduced to initialize the individual slime moulds to increase the diversity of the population; secondly, a spiral search strategy is introduced into the slime mould algorithm to improve the global search capability of the algorithm; and finally, a dynamic lenticular opposition learning strategy is introduced to improve the accuracy of the optimization search and the ability of escaping the local optimal solution. Simulation results show that the proposed algorithm has more significant effects in tracking speed and convergence accuracy compared with PSO and SMA algorithms, and can effectively improve the power generation efficiency of PV system.

Keywords: photovoltaic array; maximum power point tracking; partial shading; improved slime mould algorithm

太阳能作为可再生能源, 因其储量丰富、无污染、分布广等优点, 相关的应用得到了迅猛发展^[1]。然而, 光伏阵列易受外部因素影响导致输出功率低下。使用最大功率点跟踪技术 (maximum power point tracking, MPPT) 能有效减少功率损失, 提高光伏系统的输出效率。

在现有的研究中, MPPT 方法主要分为传统算法和元启发算法两大类。传统 MPPT 算法, 如

扰动观察法^[2]、电导增量法, 在均匀光照条件下均能有效跟踪到最大功率点, 但在局部遮阴 (partial shading condition, PSC) 条件下易陷入局部最大功率点而损失大量能量。元启发算法在处理非线性寻优、多峰值问题时效果良好, 已被广泛运用于 MPPT 控制中, 如粒子群算法^[3-4]、灰狼算法^[5]、免疫萤火虫算法^[6]、布谷鸟算法^[7]等。文献^[8]在金枪鱼算法中引入莱维飞行策略和多项

式变异略,既增强了算法的全局搜索能力,又提高了算法跳出局部最优解的能力;文献[9]将黄金正弦算法引入黏菌算法以增强算法局部搜索能力,并融入贪婪策略以提高算法收敛速度;文献[10]将自适应切换概率策略、平衡权重策略、种群变异策略3种混合策略引入蝴蝶优化算法,平衡算法的全局搜索与局部搜索能力,减少了算法的寻优时间;文献[11]将鲸鱼算法与粒子群算法进行融合,既提高了鲸鱼算法后期收敛速度,又避免了粒子群算法易陷入局部最优的缺陷。

综上,本研究对黏菌优化算法进行了3个改进,在生成初始种群上使用 Tent 混沌映射取代原来的随机策略,增加种群的多样性;将螺旋搜索引入黏菌位置更新,增强算法的全局搜索能力;最后使用动态透镜对立学习,改进局部最优解,并用贪婪机制保存适应度较高的个体,提高寻优精度以及对局部最优解的逃逸能力。本研究提出了基于改进黏菌算法(improved slime mould algorithm, IS-MA)的 MPPT 新控制策略,以更好处理遮阴条件下光伏阵列的多峰 P-U 特性曲线。

1 光伏组件模型与输出特性

1.1 光伏电池数学模型

由于光伏系统的性能受天气影响较大,需对光伏阵列精确建模以准确模拟天气变化对光伏系统输出的影响。在众多模型中,工程上常用的是单二极管模型,该模型在准确性和复杂度之间取得一定的平衡,其等效电路如图1所示。

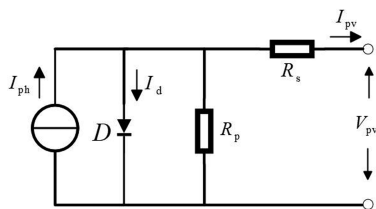


图1 光伏电池等效模型

Fig.1 Equivalent model of photovoltaic cell

由图1的等效模型可得输出电流 I_{pv} 满足式(1)。

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{R_p} \quad (1)$$

式中, I_{ph} 为光生电流; I_0 为二极管的反向饱和电

流; q 为电荷量; V_{pv} 为光伏电池输出电压; R_s 为等效串联电阻; A 为 P-N 理想因子; K 为波尔兹曼常数 (1.38×10^{-23} J/K); T 为绝对温度; R_p 为等效并联电阻。

在实际应用中,式(1)中部分参数是很难获取的,因此需要根据工程经验对其进行简化,得到光伏电池的工程模型^[12],满足式(2)。

$$\begin{cases} I_{pv} = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[\exp \left(\frac{V_{pv}}{C_2 U_{oc}} \right) - 1 \right] \right\} \\ C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \exp \left(\frac{-U_m}{C_2 U_{oc}} \right) \\ C_2 = \left(\frac{U_m}{U_{oc}} - 1 \right) \left[\ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right] - 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中, I_{pv} 为光伏电池输出电流; I_{sc} 为光伏电池短路电流; U_{oc} 为光伏电池开路电压; C_1 、 C_2 为光伏电池的特征参数; I_m 为最大功率点的电流; U_m 为最大功率点电压。

1.2 光伏阵列输出特性分析

由于单个光伏电池输出电压较低,通常需要将几个光伏电池按照一定的方式进行串并联得到光伏组件,以提高其端口输出电压^[1],再根据工程需求将一定数量的光伏组件串并联得到光伏阵列。光伏阵列在实际运行中通常会受到障碍物的影响而暴露在不同的光照强度下,如植被、经过的云层或建筑物等。此时,受到遮挡的光伏电池不再是作为电源产生能量,而是等同于一个负载消耗能量,并因电压反向而发热,产生“热斑效应”。为此,通常需要在光伏电池的两端并联旁路二极管。为了防止电流在各并联支路间倒流,通常还需要防逆二极管。当发生局部遮阴时,受遮蔽光伏板对应的旁路二极管导通,进而保护设备。但旁路二极管的引入会造成整个光伏阵列的 P-U 特性曲线呈多峰值特性^[1]。光伏阵列的结构如图2所示。

根据光伏组件的工程模型,在 Matlab/Simulink 中搭建由5个光伏组件串联组成的光伏阵列,光伏组件中光伏电池的串并联数量分别为4和2。在标准温度 25℃ 的情况下,分别对表1中的3种不同光照条件进行仿真,其中 $S_1 \sim S_5$ 分别表示5个串联的光伏组件受到的太阳辐照度。得到光伏阵列在均匀光照以及2种遮阴情况不同的 PSC 下的 P-U 特性曲线如图3所示。

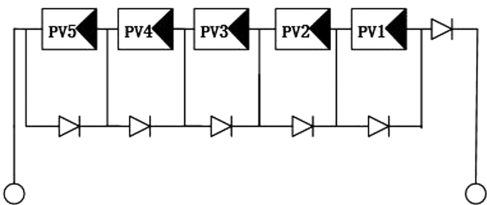


图 2 光伏阵列结构

Fig.2 Photovoltaic array structure

表 1 光伏系统的 3 种光照条件

Tab.1 Three lighting conditions for photovoltaic systems

光照 条件	$S_1、S_2/$ ($W \cdot m^{-2}$)	$S_3、S_4/$ ($W \cdot m^{-2}$)	$S_5/$ ($W \cdot m^{-2}$)	最大 功率/ W
1	1 000	1 000	1 000	8 518
2	1 000	800	600	5 805
3	1 000	700	500	5 122

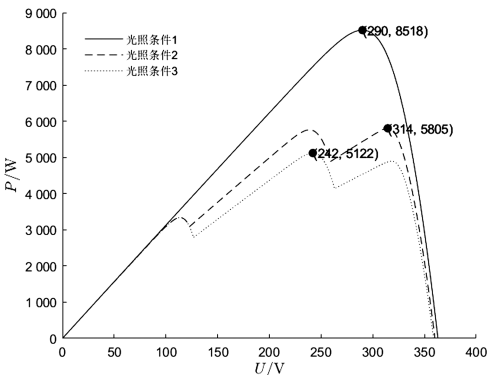


图 3 光伏阵列在 3 种不同光照条件下的 $P-U$ 特性曲线

Fig.3 $P-U$ characteristic curves of photovoltaic arrays under three different lighting conditions

由图 3 得出,在光照条件 1 下,光伏阵列 $P-U$ 特性曲线仅有一个峰值,但在光照条件 2 和 3 下 $P-U$ 特性曲线会出现多个峰值。因此,为保证光伏阵列的发电效率,MPPT 算法应该能够适应不同光照条件下的 $P-U$ 特性曲线,从而使光伏阵列一直工作在最优工作点。

2 基于改进黏菌算法的 MPPT 控制策略

2.1 黏菌优化算法 (SMA)

SMA 算法是通过模拟黏菌的行为得到,觅食过程可以分为发现食物、接近食物和包围食物^[1]。根据食物浓度的高低,生成不同粗细的静

脉网络。粗的静脉网络能更快抓取优质食物,细的静脉网络将调整搜索方向,换种方式靠近食物。其位置更新满足式(3)。

$$X(t+1)=\begin{cases}r \cdot (U_B-L_B)+L_B, & r<z \\ X_b(t)+v_b[W X_A(t)-X_B(t)], & r<p \\ v_c \times X(t), & r \geq p\end{cases}\quad (3)$$

式中, t 为当前迭代次数; r 为 $[0,1]$ 内的随机数; $U_B、L_B$ 分别为寻优区间的上界和下界; z 为自定义参数,通常取 0.03; $X_b(t)$ 为第 t 次迭代中最高浓度的食物; W 为黏菌自身的质量; $X_A(t)、X_B(t)$ 分别为随机从父代黏菌位置中选取的两个黏菌个体位置。

控制参数 p 的更新如式(4)。

$$p=\tanh|S(i)-F_D|\quad (4)$$

式中, $S(i)$ 为黏菌适应度; F_D 为所有迭代次数中最佳适应度。

参数 V_b 表示在范围 $[-a,a]$ 中的随机数,参数 V_c 表示在范围 $[-b,b]$ 中的随机数,参数 $a、b$ 的更新公式为:

$$\begin{cases}a=\operatorname{arctanh}\left(1-\left(\frac{t-1}{T_{\max}}\right)\right) \\ b=1-\frac{t}{T_{\max}}\end{cases}\quad (5)$$

式中, t 为当前迭代次数, $T_{\max}$ 为最大迭代次数。

适应度权重系数 W 的更新公式为:

$$W(\text{SIndex}(i))=\begin{cases}1+r\log\left(\frac{F_B-S(i)}{F_B-F_W}+1\right), & i<\frac{N}{2} \\ 1-r\log\left(\frac{F_B-S(i)}{F_B-F_W}+1\right), & i\geq\frac{N}{2}\end{cases}\quad (6)$$

$$\text{SIndex}=\text{sort}(S)\quad (7)$$

式中,SIndex 为对适应度排序的函数; $F_B、F_W$ 为当前迭代次数中最佳与最差适应度值, r 为 $[0,1]$ 内的随机数; N 为种群数量。

2.2 改进的黏菌优化算法 (ISMA)

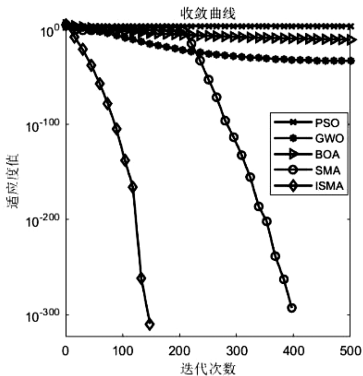
2.2.1 Tent 映射初始化

标准 SMA 算法使用随机策略对种群进行初始化,但随机策略生成的种群通常分布不均,导致算法搜索速度变慢、对空间的遍历性变差等。混沌运动具有随机性、不重复性以及遍历性等特点。因此,本研究在初始化黏菌位置时使用 Tent 混沌

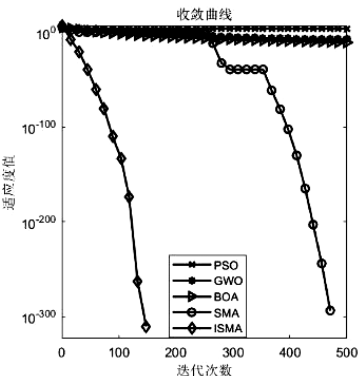
右就收敛到最优值,而 SMA 和 GWO 分别需要 200 次和 150 次左右才能收敛到最优值,收敛速度明显低于 ISMA。综上,ISMA 在收敛速度、收敛精度以及稳定性方面都比 SMA、PSO、GWO、BOA 算法更加出色。

表 2 基准测试函数

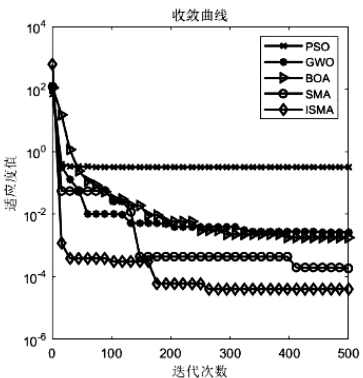
函数	取值范围	理论最优值
$F_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	$[-100,100]$	0
$F_3(x) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^i x_j^2 \right)^2$	$[-100,100]$	0
$F_7(x) = \sum_{i=1}^n ix_i^4 + \text{rand}[0,1]$	$[-1.28,1.28]$	0
$F_{11}(x) = 1 + \frac{1}{4\,000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right)$	$[-600,600]$	0



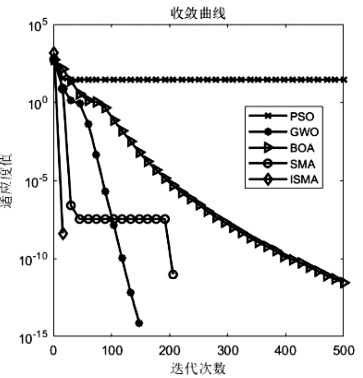
(a) F_1



(b) F_3



(c) F_7



(d) F_{11}

图 5 适应度变化曲线

Fig.5 Adaptation change curves

2.3 改进黏菌算法在 MPPT 中的应用

2.3.1 算法终止

为了降低追踪到最大功率点后输出功率的波动,在寻找到最大功率点后停止迭代,使光伏系统能够在该条件下最优工作点处稳定工作。当迭代次数到达设定的最大迭代次数时或黏菌位置密集低于设定阈值时,算法终止。

当迭代次数到达设定的最大迭代次数时,即满足式(15)时停止迭代。

$$t > T_{\max} \tag{15}$$

该条件表示,若算法在迭代次数达到设定的最大值时依旧没有追踪到最大功率点,为避免算法无限进行迭代,直接终止算法。

当黏菌位置已经非常密集,低于设定阈值时,即满足式(16)时停止迭代。

$$\max(\text{pos}) < \eta \tag{16}$$

式中,pos 为黏菌位置; η 为终止阈值, $\eta = 0.001$ 。该条件表示,黏菌个体经过若干次迭代后,聚集在一个足够小的区间,可以停止迭代终止算法。

2.3.2 算法重启

为了减少由于天气变化导致的功率损失,例

如乌云的出现导致辐照强度的变化,为提高光伏系统的输出效率,需重启算法以改变光伏系统工作状态至新的最大功率点。该算法重启条件如式(17)所示。

$$\Delta P = \frac{|P_t - P_m|}{P_m} > 0.05 \tag{17}$$

式中, P_t 为光伏系统当前的输出功率; P_m 为稳定工作时的输出功率。当算法满足(17)式时,可以判断出当前时刻的外部环境发生了变化,光伏系统的输出特性也随之发生改变,为了重新迭代寻找新的最优工作点需要将算法进行重启。

综上,基于 ISMA 的光伏 MPPT 控制流程图如图 6 所示。

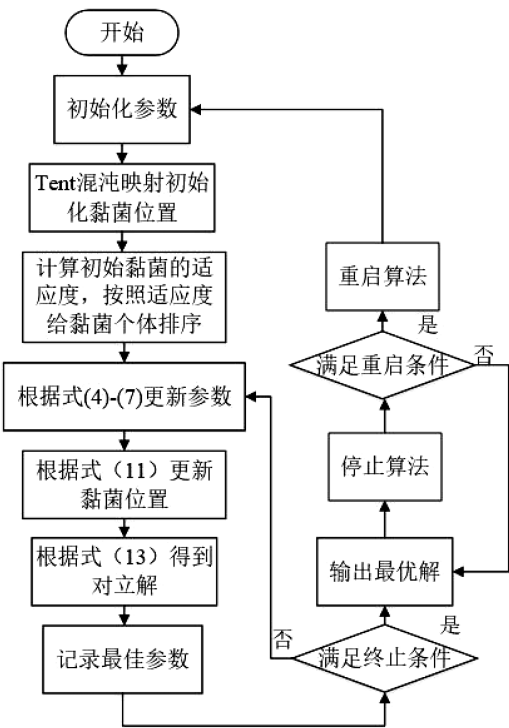


图 6 基于 ISMA 的 MPPT 控制流程图
Fig.6 ISMA-based MPPT control flowchart

3 系统仿真与结果分析

为了验证该基于 ISMA 的 MPPT 控制策略的可行性,在仿真平台中搭建如图 7 所示的光伏系统模型进行研究,该光伏系统主要由光伏阵列、Boost 升压电路、负载以及控制升压电路的 MPPT 控制电路 4 大部分组成。单个光伏电池的参数包括:开路电压 $U_{oc}=36.30\text{ V}$,短路电流 $I_{sc}=7.84\text{ A}$,峰值电压 $U_m=29.00\text{ V}$,峰值电流 $I_m=7.35\text{ A}$;算法最大迭次数都设为 15 次,ISMA 和 SMA 种群数

量为 10;PSO 算法粒子数为 5,惯性权重 $w=0.4$,学习因子 $C_1=1.2$ 、 $C_2=1.5$ 。将基于以上 3 种算法的 MPPT 控制策略分别在标准环境温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、不同光照条件下进行仿真比较。

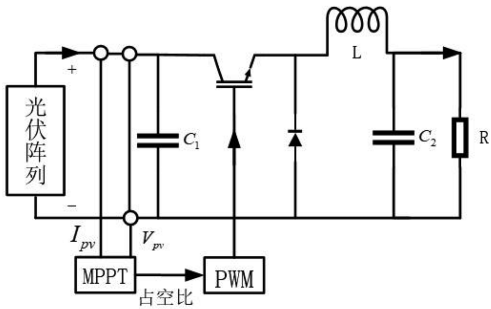


图 7 光伏系统结构图
Fig.7 Photovoltaic system structure

3.1 静态阴影下的功率追踪

光伏阵列在光照条件 3 下时,采用基于 3 种算法的 MPPT 控制策略的输出功率与输出电压仿真波形如图 8 所示。

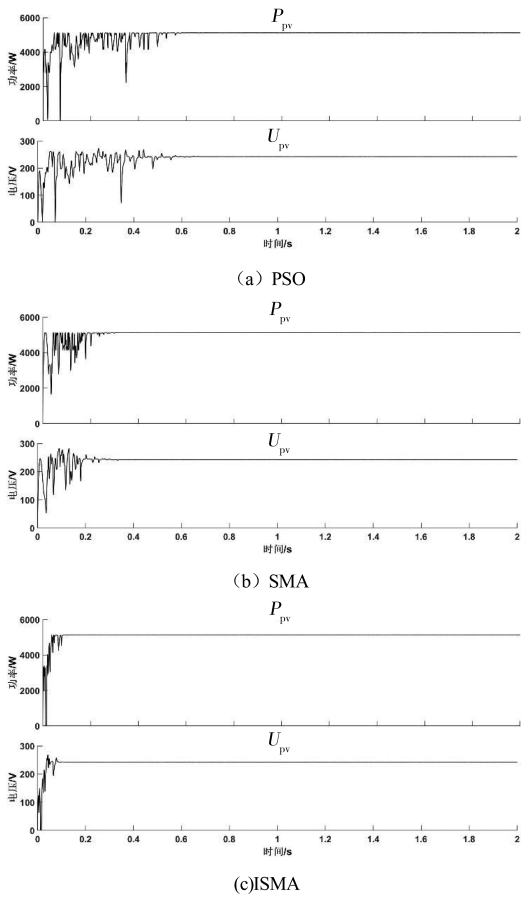


图 8 静态阴影下光伏系统输出功率和输出电压波形
Fig.8 Output power and output voltage waveforms of a PV system under static shading

由图 8 可知,基于 3 种算法的 MPPT 控制策略都能够成功跟踪到静态 PSC 条件下的最大功率点附近,PSO、SMA 以及 ISMA 算法稳态电压分别为 236.9、237.2、237.7 V,均在理论最大功率点处电压 242V 附近。3 种算法在静态 PSC 下的工作情况见表 3。PSO 和 SMA 算法的寻优时间分别为 0.588、0.314 s,寻优精度分别达到 99.23% 和 99.46%;而 ISMA 仅用时 0.133 s,寻优精度高达 99.52%;相较于 PSO 和 SMA 算法分别提高了 77.38% 和 57.64% 的追踪速度。

表 3 静态阴影下 3 种 MPPT 控制策略的工作情况
Tab.3 Operation of three MPPT control strategies under static shading

算法	寻优时间/s	稳态功率/W	寻优精度/%
PSO	0.588	509 0	99.37
SMA	0.314	509 5	99.47
ISMA	0.133	509 7	99.52

3.2 动态阴影下的功率追踪

为了模拟动态阴影,设置光伏阵列在 0~1 s 处于光照条件 3,1 s 时突变为光照条件 2,采用基于 3 种算法的 MPPT 控制策略的输出功率和输出电压仿真波形如图 9 所示。

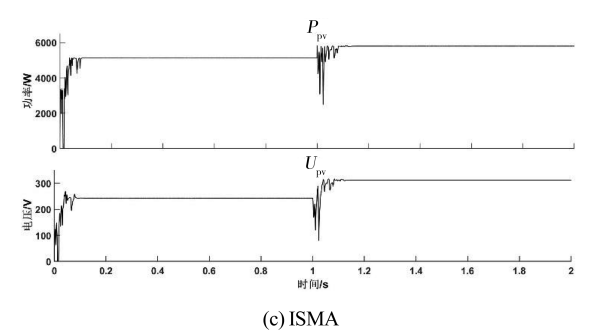
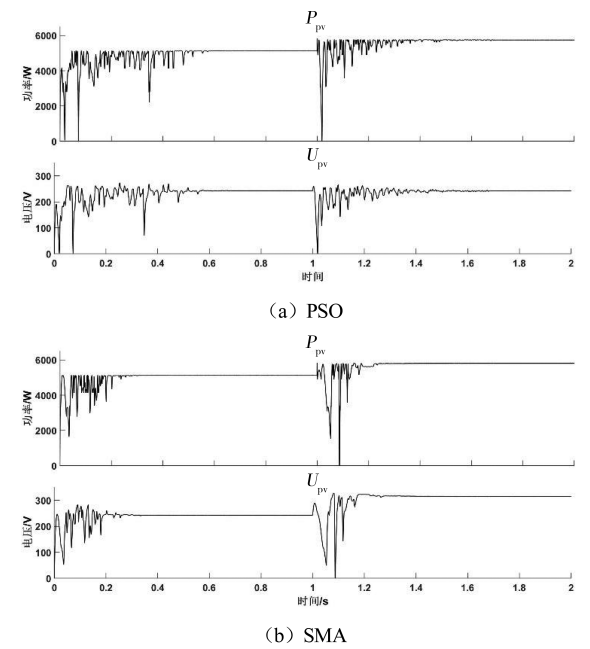


图 9 动态阴影下光伏系统输出功率和输出电压波形
Fig.9 Output power and output voltage waveforms of photovoltaic systems under dynamic shading

由图 9 可知,基于 3 种算法的 MPPT 控制策略都能够 在 1 s 时环境变化时及时重启算法, SMA 和 ISMA 都能重新跟踪到最大功率点附近,稳定工作在电压 314 V 附近,而 PSO 算法重启后稳定工作在最大功率 5 745 W,电压 242.1 V 处,陷入局部最优点。3 种算法在动态阴影条件下的工作情况见表 4。算法重启后,PSO 和 SMA 算法寻优时间较长,造成的功率震荡较大,ISMA 算法在寻优时间、寻优精度和稳定性方面都是最优的;环境变化算法重启后,SMA 和 ISMA 寻优时间都有一定的缩短,且寻优精度略有上升,PSO 算法反而需要更长的寻优时间,且容易陷入局部最优造成更低的寻优精度。

表 4 动态 PSC 下 3 种 MPPT 控制策略的工作情况
Tab.4 Working of 3 MPPT control strategies under dynamic PSC

算法	寻优时间/s	稳态功率/W	寻优精度/%
PSO	1.694	5 745	98.96
SMA	1.276	5 790	99.74
ISMA	1.130	5 796	99.84

4 结论

本研究针对 PSC 条件下传统 MPPT 容易陷入局部最大功率点,提出了一种基于 ISMA 的 MPPT 控制策略。通过 Matlab/Simulink 仿真验证所提算法的可行性,可以得出如下结论:

- 1)引入混沌映射初始化种群位置有利于提高种群多样性;加入螺旋搜索策略,更好地提高算

法的全局探索能力;引入的动态边界透镜对立学习策略,提高寻优精度和对局部最优解的逃逸能力。

2)所提算法在静态阴影下寻优时间更短,寻

优精度更高,稳定性更强。

3)所提算法在动态阴影条件下适应性更强,能有效减小处于环境多变条件下的光伏阵列的能量损耗。

参考文献:

[1] 杨博,钟林恩,朱德娜,等. 部分遮蔽下改进樽海鞘群算法的光伏系统最大功率跟踪[J]. 控制理论与应用,2019,36(3):339-352.

[2] ALI Z M, VU QUYNH N, DADFAR S, et al. Variable step size perturb and observe MPPT controller by applying θ -modified krill herd algorithm-sliding mode controller under partially shaded conditions[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 271:122243.

[3] 花赞昊,朱武,靳一奇,等. 基于自适应变异粒子群算法的光伏 MPPT 控制研究[J]. 太阳能学报,2022,43(4):219-225.

[4] BAATIAH A O, ELTAMALY A M, ALOTAIBI M A. Improving photovoltaic MPPT performance through PSO dynamic swarm size reduction[J]. Energies, 2023, 16(18):6433.

[5] 付文龙,孟嘉鑫,张赞宁,等. 复杂遮荫下基于改进 GWO 的光伏多峰 MPPT 控制[J]. 太阳能学报,2023,44(3):435-442.

[6] 张明锐,陈喆昕,韦莉. 免疫萤火虫算法在光伏阵列最大功率点跟踪中的应用[J]. 电工技术学报,2020,35(7):1553-1562.

[7] 商立群,李帆. 基于自适应布谷鸟搜索和扰动观察法的光伏最大功率点跟踪[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(8):99-107.

[8] 朱福宝,付文龙,张海荣,等. 局部遮荫下基于改进金枪鱼算法的光伏最大功率点跟踪控制[J]. 热力发电,2024,53(6):30-38.

[9] XIAO Y P, ZHAO Y F, SHEN Z T, et al. SMGSA algorithm-based MPPT control strategy[J]. Journal of Power Electronics, 2024, 24(5):789-798.

[10] 李红岩,王磊,刘宝,等. 基于改进蝴蝶优化算法的光伏 MPPT 方法[J]. 计算机仿真,2023,40(12):108-112.

[11] 负武超. 基于鲸鱼粒子群融合算法的 MPPT 研究[J]. 电源技术,2023,47(10):1351-1354.

[12] 刘晓宇,朱杰,郭浩,等.光照突变下基于改进花朵授粉算法的光伏阵列 MPPT 控制[J/OL].武汉大学学报(工学版),1-9[2025-02-25].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1675.T.20240403.1324.002.html>.

[13] 李崎勇,张伟斌,赵新哲,等. 改进鲸鱼算法优化支持向量回归的光伏最大功率点跟踪[J]. 电工技术学报,2021,36(9):1771-1781.

[14] 任志玲,毛奕栋. 基于改进黏菌算法的光伏多峰值 MPPT 控制[J]. 太阳能学报,2024,45(2):421-428.

[15] RIZK-ALLAH R M, HASSANIEN A E, SLOWIK A. Multi-objective orthogonal opposition-based crow search algorithm for large-scale multi-objective optimization[J]. Neural Computing and Applications, 2020, 32(17):13715-13746..

[16] 李得恺,张长胜,杨雪松. 融合多策略改进的黏菌优化算法[J]. 模式识别与人工智能,2023,36(7):647-660.

(责任编辑:方素华)