



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20230215

数字出版日期: 2024-06-21; 数字出版网址: <http://link.cnki.net/urlid/12.1355.N.20240620.1348.004>

基于自适应位置调节的飞蛾扑火 MPPT 控制方法

常振成, 肖梓跃, 张书睿, 刘锐君, 郝重企, 游国栋

(天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222)

摘要: 为了解决传统光伏阵列最大功率点追踪(maximum power point tracking, MPPT)算法易陷入局部最大功率点(local maximum power point, LMPP)的问题, 本文提出一种基于自适应位置调节的飞蛾扑火(adaptive position adjustment for moth-flame optimization algorithm, AMFO)MPPT 控制方法, 该方法在飞蛾的位置更新机制中引入自适应位置插值策略和自适应权重因子策略, 提高了算法的求解精度和优化速度, 使之不易陷入局部最大功率点。将改进后的算法应用于光伏系统 MPPT 中, 仿真实验结果表明: 改进后的算法相较于传统的飞蛾扑火优化(moth-flame optimization, MFO)算法、灰狼优化(grey wolf optimizer, GWO)算法和粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法, 在均匀光照和局部遮阴条件下的追踪速率和精度均有较大提升。

关键词: 光伏阵列; 最大功率点追踪(MPPT); 自适应位置调节; 飞蛾扑火优化算法; 局部遮阴

中图分类号: TM615 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2024)05-0049-07

MPPT Control Method for Moth-Flame Optimization Based on Adaptive Position Adjustment

CHANG Zhencheng, XIAO Ziyue, ZHANG Shurui, LIU Ruijun, XI Zhongqi, YOU Guodong

(College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: In order to solve the problem of traditional maximum power point tracking (MPPT) algorithm for photovoltaic arrays being prone to getting stuck in local maximum power point (LMPP), in this article we propose an adaptive position adjustment for moth-flame optimization algorithm (AMFO) MPPT control method based on adaptive position adjustment. This method introduces an adaptive position interpolation strategy and adaptive weight factor into the position updated mechanism of moths, thus improving the accuracy and optimization speed of the algorithm, and making it less prone to getting stuck in LMPP. The improved algorithm was applied to the photovoltaic system MPPT, and simulation results showed that compared to the traditional moth-flame optimization (MFO) algorithm, grey wolf optimizer (GWO) algorithm, and particle swarm optimization (PSO) algorithm, the improved algorithm significantly improved tracking speed and accuracy under uniform lighting and local shading conditions.

Key words: photovoltaic arrays; maximum power point tracking (MPPT); adaptive position adjustment; moth-flame optimization algorithm; local shading

引文格式:

常振成, 肖梓跃, 张书睿, 等. 基于自适应位置调节的飞蛾扑火 MPPT 控制方法[J]. 天津科技大学学报, 2024, 39(5): 49-55.

CHANG Z C, XIAO Z Y, ZHANG S R, et al. MPPT control method for moth-flame optimization based on adaptive position adjustment[J]. Journal of Tianjin university of science & technology, 2024, 39(5): 49-55.

收稿日期: 2023-11-12; 修回日期: 2024-03-23

基金项目: 天津市重点研发计划项目(17YFZCNC00230); 大学生创新创业计划项目(202310057101, 202410057167)

作者简介: 常振成(2002—), 男, 河南南阳人, 本科生; 通信作者: 游国栋, 教授, yougdong@163.com

随着全球经济的增长和社会的不断发展,各国对新型能源的需求量不断增加,以石油、煤炭为代表的化石能源不断减少^[1],且随着我国“双碳”目标的提出,提高光伏发电的效率已经逐渐成为时代所需。其中,实现光伏阵列最大功率点追踪(maximum power point tracking, MPPT)是提高光伏发电效率的重中之重;但是,传统的 MPPT 算法存在步长固定、收敛精度低、寻优速度差等问题,且在光伏阵列受到不均匀光照时,其输出曲线会出现多峰值的现象,无法区分局部最优和全局最优,使光伏系统陷入局部极值,造成光伏系统能量转换效率低下。

传统的 MPPT 算法包括电导增量法(incremental conductance, INC)、扰动观察法(perturb and observe, P&O)和爬山法(hill climbing, HC)^[2]等。Ullah 等^[3]采用模糊逻辑控制方法提高太阳能系统的 MPPT 性能,该方法运算速度快,但运算过程相对较复杂。Yazici 等^[4]提出一种基于改进灰狼优化(grey wolf optimizer, GWO)算法的风能系统 MPPT 方法,该方法可大幅提高 MPPT 系统的效率,但只在传统升压变换器中进行运用。Mezdi 等^[5]提出一种基于神经网络优化器的光伏-蓄电池混合并网储能系统,该系统可在多种场景下使用。Paramasivam 等^[6]提出一种基于 Nelder-mead 搜索法的新型灰狼优化算法,该算法可有效降低在最大功率点附近的振幅。

传统 MPPT 算法易出现局部最优等问题,而目前智能优化算法存在收敛精度低、迭代效率低等问题。本文提出一种基于自适应位置调节的飞蛾扑火(adaptive position adjustment for moth-flame optimization algorithm, AMFO)MPPT 控制方法。将自适应位置插值策略引入飞蛾扑火优化(moth-flame optimization, MFO)算法中,提高了 MFO 算法摆脱局部最优解的能力,同时引入了自适应位置权重因子,增强了 MFO 算法的求解精度和优化速度。在 MATLAB/Simulink 中搭建 MPPT 仿真模型进行验证,并与传统的 MFO 算法和粒子群优化算法在均匀光照和局部遮阴等不同的外界条件下进行仿真对比,旨在提高光伏系统的发电功率。

1 光伏电池模型

1.1 光伏电池数学模型

光伏电池是一种将光能转化为电能的装置,其发电原理是太阳光照射半导体 P-N 结产生光伏特效

应,光伏电池的等效电路如图 1 所示^[7]。

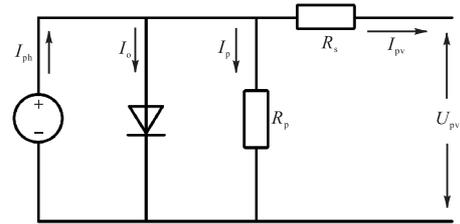


图 1 光伏电池等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of photovoltaic cell

光伏阵列由光伏电池串联和并联组成,是光伏发电并网系统的重要组成部分^[8],其输出特性方程式为

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_o \left[\exp \left(\frac{Q \left(\frac{U_{pv}}{N_s} + \frac{I_{pv} R_s}{N_p} \right)}{AKT} \right) - 1 \right] - \frac{N_p (U_{pv} + I_{pv} R_s)}{R_p} \quad (1)$$

式中: U_{pv} 、 I_{pv} 和 I_o 分别为输出电压、输出电流和反向饱和电流; R_s 、 R_p 分别为串联电阻、并联电阻; I_{ph} 为反向饱和漏电流; Q 为电子电量; K 为玻尔兹曼常量; T 为热力学温度; A 为拟合常数; N_s 和 N_p 分别为光伏电池的串联数目和并联数目。

由于 I_{ph} 和 I_o 会受到外界环境的影响,因此需要根据光伏电池所处环境的温度和辐射照度进行确定,计算公式为

$$\begin{cases} I_{ph} = I_{sco} \left[1 + h(T - T_s) \frac{E}{E_s} \right] \\ I_o = b_1 T^3 \exp \left(-\frac{a_1}{T} \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: E_s 和 E 分别为标准辐射照度和光伏电池所处环境的辐射照度; I_{sco} 为当 $T = 298.15 \text{ K}$ 、 $E = 1000 \text{ W/m}^2$ 时的短路电流; a_1 和 b_1 都为常数; T_s 为标准电池温度; h 为温度系数。

1.2 局部遮阴条件下光伏电池的输出特征

光伏阵列在均匀光照时,输出 $P-U$ 特性曲线只有 1 个峰值,但是当光伏阵列表面有局部遮阴时输出 $P-U$ 特性曲线会呈现多峰值现象,且这种条件会将系统的局部最优点误判为全局最优点,使系统陷入局部最优,降低发电效率^[9]。光伏阵列在均匀光照和局部遮阴条件下的输出特性曲线如图 2 所示。

由图 2(a)可知,光伏阵列的开路电压和短路电流随着辐射照度的增大而增大。由图 2(b)可知,光伏阵列在局部遮阴条件下 $P-U$ 特性曲线呈现多峰值

现象。

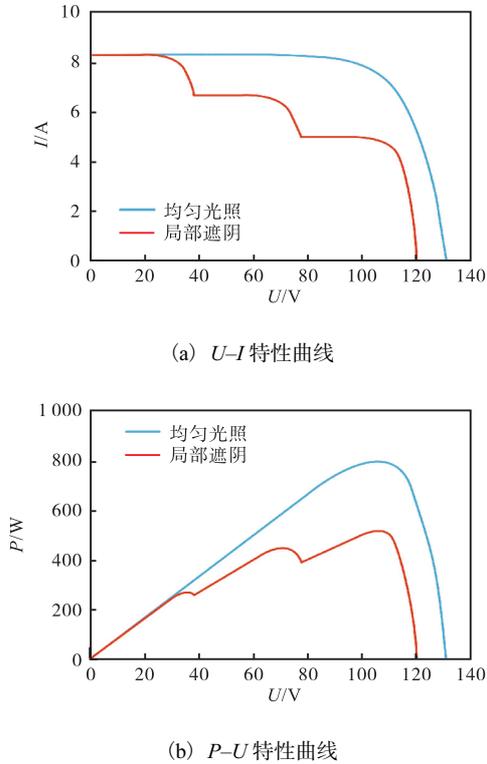


图2 光伏阵列在均匀光照和局部遮阴条件下的输出特性曲线

Fig. 2 Output characteristic curves of photovoltaic array under uniform illumination and local shading

2 基于自适应位置调节的飞蛾扑火 MPPT 控制方法

2.1 标准的飞蛾扑火优化算法

MFO 算法具有特殊的结构, 飞蛾扑火将待优化变量作为飞蛾在空间中的位置, 通过改变飞蛾的位置向量, 在多维空间中不断迭代寻优进而得到符合要求的全局最优解^[10]。飞蛾为搜寻个体, 而火焰为每只飞蛾已搜寻到的最优解, 算法中的每只飞蛾与火焰一一对应, 并不断更新其自身位置, 每次迭代后, 飞蛾扑火优化算法将重新更新火焰序列, 飞蛾则根据分配的新火焰更新其自身位置。

2.1.1 飞蛾种群初始化

在 MFO 算法中, \mathbf{M} 为飞蛾种群矩阵, $m_{i,j}$ 为第 i 只飞蛾在第 j 维空间中的位置, 其适应度矩阵为 \mathbf{O}_M , O_{Mi} 为第 i 只飞蛾的适应度; \mathbf{F} 为火焰矩阵 (即在当前迭代次数下飞蛾所搜寻到的最优解), $f_{i,j}$ 为第 i 个火焰在第 j 维空间中的位置^[11], 其对应的火焰矩阵 \mathbf{F} 适应度矩阵为 \mathbf{O}_F 。计算公式为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & \cdots & m_{1,d} \\ m_{2,1} & m_{2,2} & \cdots & m_{2,d} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ m_{n,1} & m_{n,2} & \cdots & m_{n,d} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{O}_M^T = [O_{M1} \ O_{M2} \ \cdots \ O_{Mn}] \quad (4)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_{1,1} & f_{1,2} & \cdots & f_{1,d} \\ f_{2,1} & f_{2,2} & \cdots & f_{2,d} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{n,1} & f_{n,2} & \cdots & f_{n,d} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{O}_F^T = [O_{F1} \ O_{F2} \ \cdots \ O_{Fn}] \quad (6)$$

式中: d 为样本空间变量维度, n 为飞蛾和火焰初始化的个数。

2.1.2 位置更新机制

在算法寻优过程中, 飞蛾的运动可分为飞蛾扑火和飞蛾弃焰两个过程^[12]。

(1) 飞蛾扑火: 第 i 只飞蛾寻找与其距离最近的火焰位置 \mathbf{F}_j 时做对数螺旋曲线运动, 其位置更新公式为

$$\mathbf{M}_i = \mathbf{D}_i e^{b t_0} \cos(2\pi t_0) + \mathbf{F}_j \quad (7)$$

式中: \mathbf{D}_i 为第 q 个火焰距离第 i 只飞蛾的距离; b 为常数; \mathbf{M}_i 为飞蛾的最新位置; t_0 为 $[-1, 1]$ 间的随机数, 表示飞蛾与火焰位置的远近程度。飞蛾运动轨迹如图 3 所示。

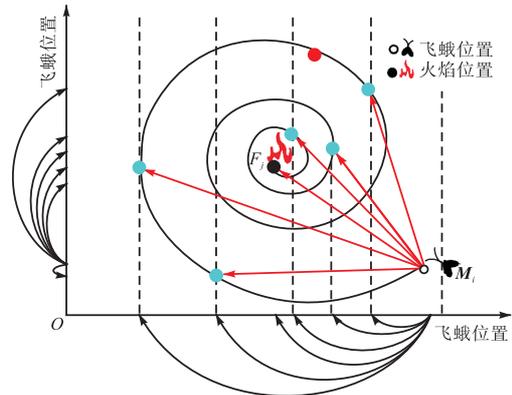


图3 飞蛾运动轨迹

Fig. 3 Moth movement trajectory

(2) 飞蛾弃焰: 在迭代后期, 在空间中火焰数量较多, 易使飞蛾陷入局部最优并造成算法收敛速度降低。因此, 火焰数应在迭代过程中自适应减少, 以提高算法寻优的收敛速度。

$$N_F = f_{\text{round}} \left(N - l \frac{N-1}{l_{\text{max}}} \right) \quad (8)$$

式中: N 、 N_F 分别为飞蛾种群数量和当前火焰数量, l 、

l_{\max} 分别为当前迭代数和最大迭代数, f_{round} 为向上取整函数。

2.2 自适应位置调节的飞蛾扑火优化算法

传统的飞蛾扑火优化算法寻优速度慢、寻优精度低,且在有限的迭代次数内, MFO 算法难以在所有已获得较优解的附近进行充分寻优,无法最终求得更精确的最优解。为此,本文提出基于自适应位置调节的飞蛾扑火优化(AMFO)算法。

2.2.1 自适应位置插值策略

在飞蛾扑火优化算法中,飞蛾寻找距离自己最近的火焰,并做对数螺旋曲线运动,飞蛾及火焰位置的更新有较大的随机性^[13]。考虑到火焰历史位置的影响,在原有的飞蛾扑火优化算法中引入自适应位置插值策略。AMFO 算法根据火焰的历史位置,引入样条插值法将火焰的历史位置拟合为一条曲线,通过曲线方程预测下一代火焰的位置^[14]。

F_j^x 为第 j 个火焰在第 $x(x \geq 0)$ 次迭代时的位置,保存近 g 代火焰 j 的位置并对第 $x+g+1$ 代火焰 j 的位置进行插值预测。将第 $g+1$ 代插值预测得到的火焰 j 的位置和原火焰 j 的位置进行比较,取较好的位置作为火焰 j 的最终位置 F_j^{x+g+1} , 公式为

$$F_j^{x+g+1} = \begin{cases} F_j^{x+g+1}, & O'_F > O''_F \\ F_j^{x+g+1}, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中: O'_F 和 O''_F 分别为火焰 F_j^{x+g+1} 和火焰 F_j^{x+g+1} 的适应度。

对于不同类型的光伏发电序列,在 $g=3$ 时插值预测的效果最好,因此每迭代 3 次进行一次插值预测。

2.2.2 自适应权重因子策略

为了使 MFO 算法在迭代初期具有较好的全局搜索能力,在迭代后期具有较好的局部搜索能力,将自适应权重因子添加到飞蛾的位置更新公式中,此时飞蛾的位置更新公式为

$$M_i = D_i e^{bt_0} \cos(2\pi t_0) + W_0 F_j \quad (10)$$

$$W_0 = 1 + \sin\left(\pi + \frac{\pi l_i}{2l_{\max}}\right) \quad (11)$$

式中: W_0 为自适应权重因子, l_i, l_{\max} 分别为当前迭代数和最大迭代数。

在传统 MFO 算法的位置更新机制中引入自适应权重因子策略,在迭代前期降低算法收敛速度,以防止飞蛾陷入局部最优解之中;在迭代中后期,自适应权重因子逐渐变小,飞蛾拥有更强的搜索局部最优解的能力,提高了算法的寻优精度。基于自适应位置调节的飞蛾扑火优化算法的流程如图 4 所示。

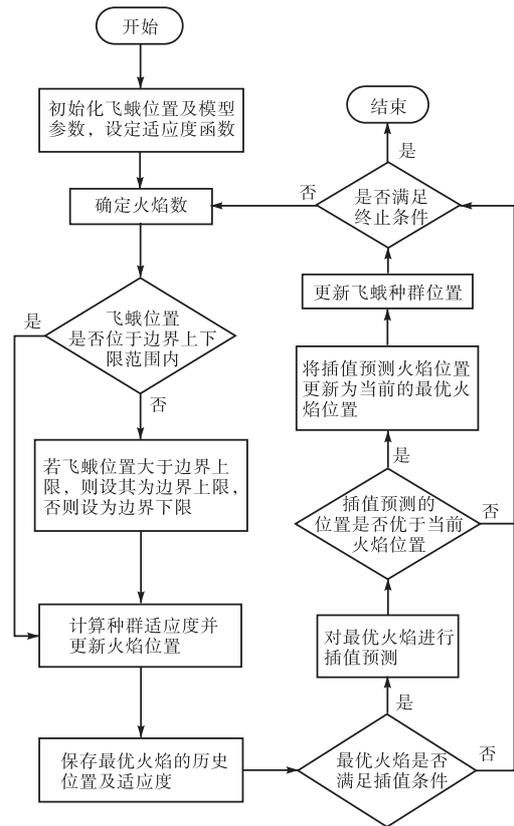


图 4 AMFO 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of AMFO algorithm

3 仿真分析

为了验证自适应位置调节的飞蛾扑火优化算法的优化性能,在 MATLAB/Simulink 中搭建基于 Boost 系统的 MPPT 仿真模型,如图 5 所示。

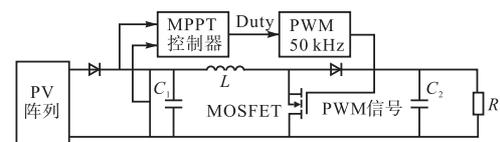


图 5 基于 AMFO 算法的光伏 MPPT 仿真模型

Fig. 5 Simulation model of photovoltaic MPPT based on AMFO algorithm

光伏阵列由 3 块光伏电池元件串联而成, Boost 电路元件参数为: 开关频率 $f = 50 \text{ kHz}$, $C_1 = 100 \mu\text{F}$, $C_2 = 100 \mu\text{F}$, $L = 0.5 \text{ mH}$, $R = 50 \Omega$ 。将自适应位置调节的飞蛾扑火优化(AMFO)算法分别在均匀光照、局部遮阴条件下与飞蛾扑火优化(MFO)算法、灰狼优化(GWO)算法和粒子群优化(PSO)算法进行对比分析。PSO 算法参数设置为: 粒子数 $N = 30$, 最大迭代次数为 100, 加速因子 $D_1 = D_2 = 0.2$, 惯性权重 $\omega = 0.7$ 。AMFO 算法与 MFO 算法参数设置为: 飞蛾群个

数为 30, 最大迭代次数为 100, $b = 1$ 。

3.1 算法寻优迭代收敛对比

在均匀光照和局部遮阴条件下, 分别对 PSO、MFO、GWO 和 AMFO 4 种算法进行适应度收敛对比, 适应度收敛曲线如图 6 和图 7 所示。

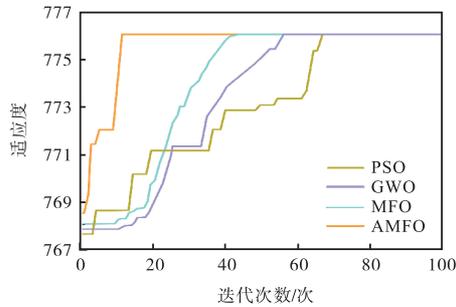


图 6 均匀光照下适应度收敛曲线

Fig. 6 Fitness convergence curve under uniform illumination

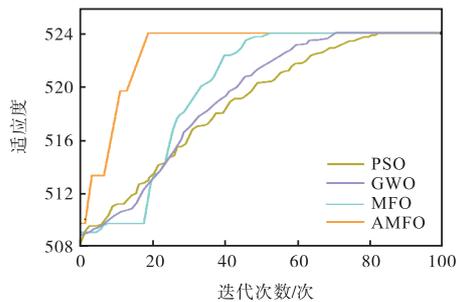


图 7 局部遮阴下适应度收敛曲线

Fig. 7 Fitness convergence curve under local shading

由图 6 和图 7 可知: 在均匀光照和局部遮阴的条件下, PSO 算法分别经过 67 次和 81 次迭代收敛至最优解, GWO 算法分别经过 54 次和 68 次迭代收敛至最优解, MFO 算法分别经过 43 次和 52 次迭代收敛至最优解, 而 AMFO 算法只需要分别经过 11 次和 17 次迭代就可以收敛到最优解, 其迭代次数更少, 寻优能力远高于其他算法。

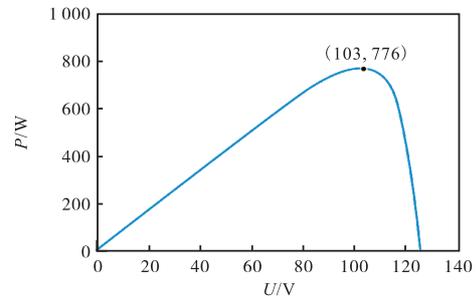
3.2 MPPT 光伏系统仿真模拟

3.2.1 均匀光照条件下

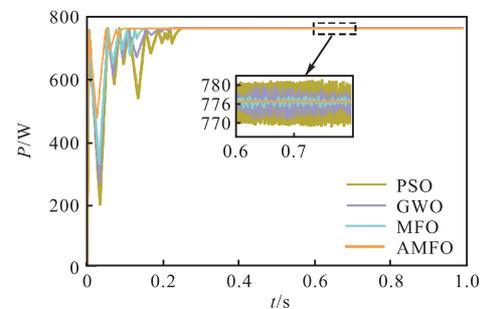
在均匀光照条件下, MPPT 仿真模型中 3 块光伏电池的辐射照度均为 1000 W/m^2 , 系统仿真时间为 1 s, 温度为 25°C 。均匀光照下光伏阵列 $P-U$ 特性曲线和功率追踪曲线如图 8 所示。

由图 8(a) 可知: $P-U$ 特性曲线上有一个全局最大功率点, 其功率为 776 W。由图 8(b) 可知: PSO 算法、GWO 算法、MFO 算法和 AMFO 算法均能追踪到最大功率点附近并稳定下来, 这 4 种算法追踪到的

平均功率分别为 513.7、518.9、522.3、523.7 W, 所需时间分别为 0.25、0.22、0.18、0.11 s; 相比其他 3 种算法, AMFO 算法的寻优速度更快。均匀光照条件下仿真结果对比见表 1。



(a) $P-U$ 特性曲线



(b) 功率追踪曲线

图 8 均匀光照条件下光伏阵列 $P-U$ 特性曲线和功率追踪曲线

Fig. 8 $P-U$ characteristic curve and power tracking curve of PV array under uniform light condition

表 1 均匀光照条件下仿真结果对比

Tab. 1 Comparison of simulation results under uniform illumination conditions

算法	收敛时间/s	功率/W	误差上限/W	误差下限/W
PSO	0.25	771.31 ~ 781.32	5.32	4.69
GWO	0.22	772.03 ~ 780.53	4.53	3.97
MFO	0.18	774.58 ~ 778.12	1.12	1.42
AMFO	0.11	775.73 ~ 775.94	0.06	0.27

注: 误差上限 = 功率波动上限 - 最大功率点处功率, 误差下限 = 最大功率点处功率 - 功率波动下限。

3.2.2 局部遮阴条件下

在局部遮阴条件下, 光伏阵列的 $P-U$ 特性曲线为多峰, 且 MPPT 仿真模型中 3 块光伏电池的辐射照度分别为 1000 、 800 、 600 W/m^2 , 系统仿真时间为 1 s, 温度为 25°C 。局部遮阴下 $P-U$ 特性曲线和功率追踪曲线如图 9 所示。

由图 9(a) 可知: $P-U$ 特性曲线上有两个局部最大功率点, 一个全局最大功率点; 两个局部最大功率点的功率分别为 253.33、447.24 W, 全局最大功率点

的功率为 524.01 W。由图 9(b)可知: PSO 算法、GWO 算法、MFO 算法和 AMFO 算法均能追踪到最大功率点附近并稳定下来,这 4 种算法追踪到的平均功率分别为 513.7、518.9、522.3、523.7 W,所需时间分别为 0.33、0.30、0.24、0.16 s;相比其他 3 种算法,AMFO 算法的收敛速度更快。局部遮阴条件下仿真结果对比见表 2。

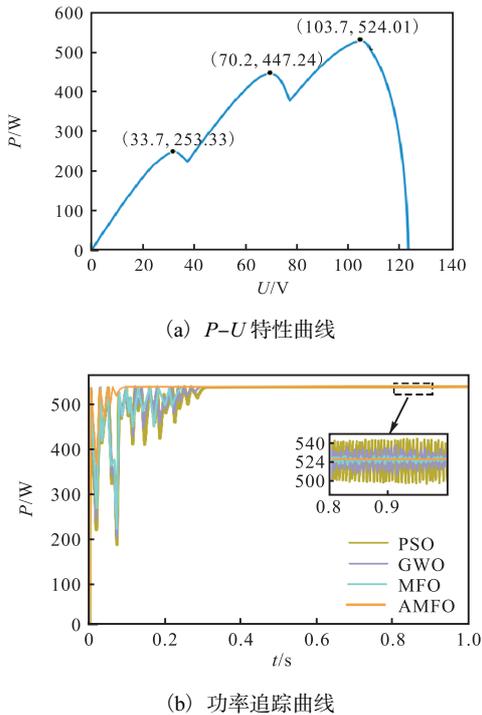


图 9 局部遮阴条件下光伏阵列 P-U 特性曲线和功率追踪曲线

Fig. 9 P-U characteristic curve and power tracking curve of PV array under local shading conditions

表 2 局部遮阴条件下仿真结果对比

Tab. 2 Comparison of simulation results under local shading conditions

算法	收敛时间/s	功率/W	误差上限/W	误差下限/W
PSO	0.33	503.22 ~ 532.54	8.53	20.79
GWO	0.30	515.31 ~ 530.29	6.28	8.70
MFO	0.24	518.38 ~ 526.29	2.28	5.63
AMFO	0.16	523.34 ~ 523.92	0.09	0.67

由图 9 可知: PSO 算法和 GWO 算法在追踪全局最大功率点的过程中存在着较大的功率振荡,且追踪到全局最大功率点时功率波动范围较大;MFO 算法产生的功率振荡相比于 GWO 算法有明显减小,但仍存在小幅度的功率波动,且在波形稳定后功率波动范围明显减小;AMFO 算法在追踪过程中功率波动进一步减小,更加稳定,追踪过程更加平滑,功率振荡基本消除。

4 结论

针对传统光伏系统 MPPT 中存在的多峰值以及波动范围大等问题,本文提出一种自适应位置调节的飞蛾扑火优化算法,并通过仿真实验进行验证。结果表明:通过将自适应位置插值策略和自适应权重因子引入 MFO 算法中得到 AMFO 算法,增强了飞蛾摆脱局部最优的能力,且在迭代寻优过程中,可同步调整自适应权重因子,加快了算法的收敛速度。在均匀光照和局部遮阴条件下,AMFO 算法在前期的收敛速度、追踪精度及后期的功率振荡方面均优于 PSO 算法、GWO 算法和 MFO 算法,有利于提高光伏系统的能量利用率。

参考文献:

- [1] NANCY M J S, MALA K. Optimized PV fed zeta converter integrated with MPPT algorithm for islanding mode operation[J]. Electric power components and systems, 2023, 51 (13) : 1240-1250.
- [2] JAISWAL V, WADEHRA A, BHALLA S, et al. Comment on “Deep reinforcement learning approach for MPPT control of partially shaded PV systems in smart grids”[J]. Applied soft computing, 2023, 146: 110577.
- [3] ULLAH K, ISHAQ M, TCHIER F, et al. Fuzzy-based maximum power point tracking (MPPT) control system for photovoltaic power generation system[J]. Results in engineering, 2023, 20: 101466.
- [4] YAZICI İ, YAYLACI E K. Modified grey wolf optimizer based MPPT design and experimentally performance evaluations for wind energy systems[J]. Engineering science and technology, an international journal, 2023, 46: 101520.
- [5] MEZDI K E, MAGRI A E, WATIL A, et al. Nonlinear control design and stability analysis of hybrid grid-connected photovoltaic-battery energy storage system with ANN-MPPT method[J]. Journal of energy storage, 2023, 72: 108747.
- [6] PARAMASIVAM M, SUBRAMANIAM S. Emperor penguin optimization based MPPT for PV system under different irradiation condition[J]. Electric power components and systems, 2023, 51 (15) : 1546-1561.
- [7] 游国栋, 李兴韞, 马元, 等. 基于自适应位置调节的粒子群 MPPT 控制方法[J]. 天津科技大学学报, 2022, 37 (3) : 49-53.

- [8] SWETHA K T, REDDY V, ROBINSON A. An innovative grey wolf optimizer with Nelder-Mead search method based MPPT technique for fast convergence under partial shading conditions[J]. Sustainable energy technologies and assessments, 2023, 59: 103412.
- [9] KORANY E, YOUSRI D, ATTIA H A, et al. A novel optimized dynamic fractional-order MPPT controller using hunter pray optimizer for alleviating the tracking oscillation with changing environmental conditions[J]. Energy reports, 2023, 10: 1819–1832.
- [10] LI H T, ZHANG C X, WANG R. Modeling and simulation of marine PV inverter system based on MPPT algorithm[J]. Journal of physics: conference series, 2023, 2584(1): 012123.
- [11] 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.
- [12] REZK H, ALY M, GHONIEM R M. Robust fuzzy logic MPPT using gradient-based optimization for PEMFC power system[J]. Sustainability, 2023, 15(18): 13368.
- [13] ŞEHIRLI E. Comparison of the input filter effect to PV panel by SEPIC MPPT converter[J]. Energy reports, 2023, 9: 34–50.
- [14] RAJ R D A, NAIK K A. Priority queue-based switching matrix algorithm for adaptive neuro-fuzzy inference system assisted MPPT controlled PV system[J]. Energy conversion and management, 2023, 293: 117519.

责任编辑:周建军

(上接第 30 页)

- 机质的测定: NY/T 1121.6—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [26] 中华人民共和国农业部. 土壤速效钾和缓效钾含量的测定: NY/T 889—2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [27] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第 7 部分: 土壤有效磷的测定: NY/T 1121.7—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [28] 中华人民共和国农业部. 土壤 pH 的测定: NY/T 1377—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [29] 马欣雨. 秸秆降解菌的筛选及其降解效果研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2019.
- [30] 杨艳铭. 秸秆降解多功能复合菌剂筛选、降解效果研究及 *Catellatospora tritici* 多相分类鉴定[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022.
- [31] 李娜, 滕培基, 雷琬莹, 等. 外源有机物添加种类对农田黑土有机碳激发效应的影响及作用机理[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(10): 1588–1601.
- [32] 宋志伟, 陈露露, 潘宇, 等. 3 种菌剂对水稻秸秆降解性能的影响[J]. 生态环境学报, 2018, 27(11): 2134–2141.
- [33] 魏蔚, 宋时丽, 吴昊, 等. 复合菌剂对玉米秸秆的降解及土壤生态特性的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(2): 323–332.
- [34] VAN KUIJK S J A, SONNENBERG A S M, BAARS J J P, et al. Fungal treated lignocellulosic biomass as ruminant feed ingredient: a review[J]. Biotechnology advances, 2015, 33(1): 191–202.
- [35] 李鹤. 低温秸秆降解菌的酶活、降解效果及对土壤养分、酶活的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2015.
- [36] 陆水凤, 王呈玉, 王天野, 等. 玉米秸秆配施菌剂还田对土壤养分及腐殖质组成的影响[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(4): 834–840.

责任编辑:郎婧