

黑寡妇算法与 P&O 相结合的光伏 MPPT 研究

安 宁

安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001

摘要:目的 在局部遮阴条件下,传统最大功率点追踪(MPPT)算法通常会跟踪到局部最优值,单个群智能优化算法在多极值的情况下能有效跟踪最大功率点,但追踪时间相对较长,为此,提出一种基于黑寡妇(BWOA)与扰动观察法相结合的 MPPT 算法。方法 将 boost 电路中开关管的占空比定义为算法中的个体位置,通过对输出占空比的调整实现 MPPT 控制。结果 相比于原 BWOA 算法和 PSO 算法,基于 BWOA 与 P&O 结合算法的 MPPT 能够更加快速地跟踪到最大功率点。结论 与扰动观察法的结合可以有效加快 BWOA 算法收敛速度,并提高算法收敛精度。

关键词:最大功率点追踪;黑寡妇算法;扰动观察法

中图分类号:TM615 文献标识码:A doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2024.0005.013

Research on Photovoltaic MPPT Combined with Black Widow Algorithm and P&O

AN Ning

School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science & Technology, Anhui Huainan 232001, China

Abstract: Objective Under local shade conditions, the traditional maximum power point tracking (MPPT) algorithm usually tracks the local optimum. A single swarm intelligence optimization algorithm can effectively track the maximum power point in the presence of multiple extreme values, but the tracking time is relatively long. Therefore, an MPPT algorithm based on the combination of the black widow optimization algorithm (BWOA) and perturbation and observation (P&O) method was proposed. **Methods** In this method, the duty cycle of the switch tube in the boost circuit was defined as the individual position in the algorithm, and the MPPT control was realized by adjusting the output duty cycle. **Results** Compared with the original BWOA algorithm and PSO algorithm, MPPT based on the combination of BWOA and P&O algorithm can track the maximum power point more quickly. **Conclusion** The combination of the P&O can effectively accelerate the convergence speed of the BWOA algorithm and improve the convergence accuracy.

Keywords: maximum power point tracking; black widow algorithm; perturbation and observation method

1 引言

太阳能光伏发电以其安全可靠、绿色清洁、较低的维修价格和能够无限获取等优点受到全世界的普遍重视^[1]。而在光伏发电系统中,如何提高光伏发电系统的利用效率与降低成本是当下研究的热门问题。对于现有的光伏发电系统,其电能的输出效率会受到其所处工作环境的光照强度和温度的影响,如果光伏阵列

表面有灰尘或者其他杂物,会导致输出的功率曲线出现多峰值现象,影响电能输出效率^[2]。

传统的最大功率点跟踪算法,如扰动观察法(Perturbation&Observation, P&O)、恒定电压法(Constant Voltage Tracking, CVT)、电导增量法(Incremental Conductance, InC)在光伏发电系统多峰值情况下存在收敛速度慢,效率低下,容易陷入局部功率极值等弊

收稿日期:2023-05-30 修回日期:2023-07-18 文章编号:1672-058X(2024)05-0104-06

作者简介:安宁(1999—),男,山东省日照市人,硕士研究生,从事新能源发电研究。

引用格式:安宁. 黑寡妇算法与 P&O 相结合的光伏 MPPT 研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2024, 41(5):104—109.

AN Ning. Research on photovoltaic MPPT combined with black widow algorithm and P&O[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2024, 41(5): 104—109.

端^[3]。针对此类问题,大量国内外学者进行了相关研究并提出了几种改进方法,如模糊控制法(Fuzzy Control, FC)^[4]、滑模控制法^[5]和变步长扰动观察法^[6]等。这些算法相比传统最大功率点跟踪算法能够快速跟踪到最大功率点,但存在震荡,使跟踪不稳定。也有一部分学者引入了群智能优化算法;文献[7]将粒子群算法运用到了最大功率点跟踪,但是跟踪局部最优值,跟踪精度不理想,并且收敛较慢;文献[8]采用细菌觅食算法,具有较好的全局搜索能力,但收敛花费的时间较长,最大功率点跟踪效率不高;文献[9]使用鲸鱼优化算法(Whale Optimization Algorithm, WOA),相比于其他群算法调节参数少,运算速度也具备一定的优势,但其在跳出局部最优的能力上有一定不足。

综上所述,针对目前传统算法易陷入局部极值以及群智能算法在运用到 MPPT 可能出现的收敛慢、不精确等问题,本文提出黑寡妇算法(Black Widow Optimization Algorithm, BWOA)与扰动观察法相结合的 MPPT 控制方法(BWOA-P&O)。算法前期先通过黑寡妇算法收敛到最大功率点附近,后期通过扰动观察法继续收敛,避免跟踪过程中的功率振荡,并加快收敛速度,进而准确且快速地跟踪到最大功率点。

2 基于 BWOA-P&O 的 MPPT 控制

2.1 光伏阵列输出特性分析

2.1.1 光伏电池数学模型

为了方便理解光伏电池阵列的电能产生原理,首先搭建一个等效光伏电池模型^[10],如图 1 所示。

图 1 中, I_{ph} 是光生电流, I 和 U 分别为光伏电池的输出电流与输出电压, I_d 为二极管正向导通电流, R_s 和 R_{sh} 分别为光伏电池的串联电阻和并联电阻。

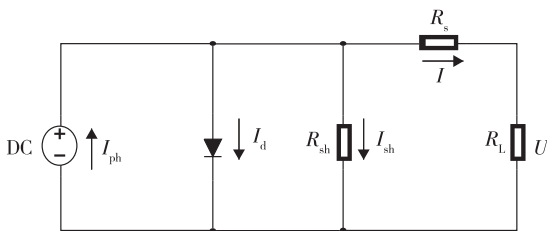


图 1 光伏电池等效模型

Fig. 1 Photovoltaic cell equivalent model

令二极管反向饱和电流为 I_0 , 根据此模型由基尔霍夫定律可得:

$$\begin{cases} I_d = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(I \cdot R_s + U)}{AKT} \right] - 1 \right\} \\ I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \\ I_{sh} = \frac{I \cdot R_s + U}{R_{sh}} \end{cases} \quad (1)$$

其中, q 为电荷常量, A 为二极管的理想系数, K 为玻尔兹曼常数, T 为光伏电池板所处的环境温度。

2.1.2 光伏电池输出特性

由于单个光伏电池在实际应用中输出功率较低,一般都是将多个光伏电池并串联后进行封装,作为一个光伏组件进行使用。

将 5 块光伏电池组件进行串联,其组成的光伏阵列模型如图 2 所示。

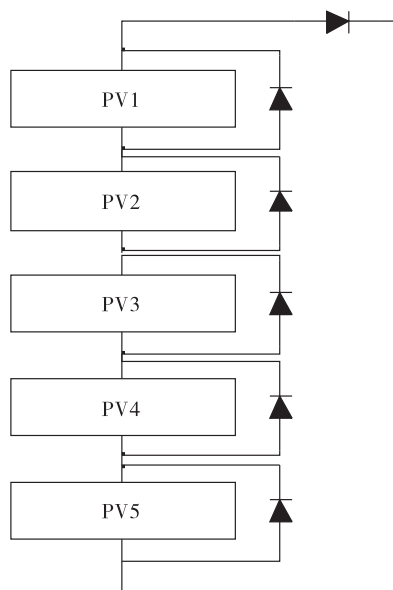


图 2 光伏阵列示意图

Fig. 2 Photovoltaic array diagram

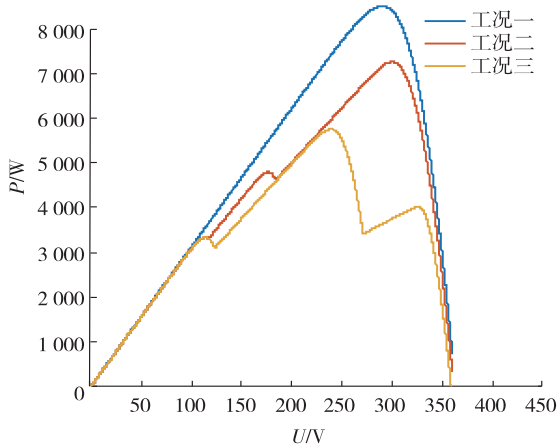
为了模拟不均匀光照情况对光伏电池发电产生的影响,将每块光伏电池设置不同的关照条件,并设置 3 种光照工况,并将电池工作温度保持 25℃ 不变。3 种光照的设置参数如表 1 所示,图 3 为每种工况下的 $P-U$ 输出特性曲线。

由图 3 可知,在均匀光照也就是工况一的情况下, $P-U$ 曲线呈现单峰值,在出现光照不均匀的情况下(工况二、三), $P-U$ 曲线会呈现出多峰值。

表 1 光伏阵列的光照设置

Table 1 Lighting settings for photovoltaic arrays

光照条件	光照强度/(W/m ²)				
	光伏组 件 1	光伏组 件 2	光伏组 件 3	光伏组 件 4	光伏组 件 5
工况一	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000
工况二	1 000	1 000	900	800	800
工况三	1 000	1 000	800	800	400

图 3 不同工况下的 $P-U$ 曲线Fig. 3 $P-U$ curves under different working conditions

2.2 黑寡妇算法

黑寡妇优化算法 (Black Widow Optimization Algorithm, BWOA) 是 Hayyolalam 等^[11]于 2020 年观察黑寡妇蜘蛛独特的交配方式所研究出的一种智能算法。BWOA 的创作灵感来源于黑寡妇^[13]的生活方式。包含唯一的阶段同类相食是一个关键特征,因此,具有不适当适合度的物种被排除在圆圈之外,从而发生早期趋同的特点。

该算法从一个初始种群开始,其中每个蜘蛛都由一个潜在的解表示。根据黑寡妇蜘蛛在交配活动中的移动方式,在数学建模中将蜘蛛的运动描述为线性和螺旋形两种情况,这两种情况都有一定概率发生。该算法模拟了黑寡妇蜘蛛在求偶时的不同行动方式,对搜索空间进行探索和开发。

BWOA 的整个算法的数学模型主要包含移动和信息素两部分。

2.2.1 移动

将蜘蛛个体在蜘蛛网上的运动归类为线性移动和螺旋移动两种方式,其模型如式(2)所示:

$$X_i(t+1) = \begin{cases} X_{\text{best}} - mX_{r_1}(t), & R \leq 0.3 \\ X_{\text{best}} - \cos(2\pi\beta)X_i(t), & R > 0.3 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $X_i(t+1)$ 为迭代更新后个体的位置, X_{best} 为目前个体所处的最优位置, m 为 $[0.4, 0.9]$ 内随机生成的数字, β 为 $[-1, 1]$ 中随机产生的浮点数, R 是 $[0, 1]$ 内的随机概率, $X_{r_1}(t)$ 为随机选择的 r_1 个个体的位置, $X_i(t)$ 为当前个体所在的位置。

2.2.2 信息素

信息素作为一种蜘蛛间交流的方式,在蜘蛛交配

行为的进行过程中有着关键的作用,也是找出全局最优解的关键之一。

在这个算法中,黑寡妇的信息素表示如式(3)所示。

$$p(i) = \frac{f_{\text{max}} - f(i)}{f_{\text{max}} - f_{\text{min}}} \quad (3)$$

式(3)中, f_{max} 和 f_{min} 为目前种群中的最优和最差适应度值, $f(i)$ 为第 i 个个体的适应度值。

当信息素值等于或小于 0.3 时,代表该雌性黑寡妇蜘蛛是饥饿的蜘蛛,所以饥饿的雌性蜘蛛会被雄性蜘蛛筛掉,然后下一个新的雌性蜘蛛取缔这个位置,此时新蜘蛛的位置更新如式(4)所示。

$$X_i(t) = X_{\text{best}}(t) + 0.5 [X_{r_1}(t) - (-1)^\sigma X_{r_2}(t)] \quad (4)$$

其中, $X_i(t)$ 为雌性体内低信息素水平的黑寡妇位置, r_1 和 r_2 为 1 到最大种群数量之间不相等的随机整数, $X_{r_1}(t)$ 和 $X_{r_2}(t)$ 为第 r_1 和 r_2 个黑寡妇的位置, σ 为 0 或 1 的随机数。

2.3 基于 BWOA 的 MPPT 控制

将黑寡妇算法运用到 MPPT 控制中,个体位置对应开关管的占空比大小。其基本流程:

步骤 1 初始化。确定种群的各项参数以及算法迭代次数。

步骤 2 位置更新。将光伏电池的输出功率作为黑寡妇算法的目标函数,并根据当前适应度函数寻找最优个体位置,即寻找最优占空比并按照式(2)更新位置。

步骤 3 计算信息素,并对所得到的信息素值进行判断。若大于 0.3,则直接到步骤 4;若小于或等于 0.3,则按照式(4)重新进行位置更新。

步骤 4 重新对适应段数的值进行评估,更新并记录最优个体的位置和最优适应度的函数值。

步骤 5 重复步骤 2 到步骤 4 进行迭代,满足停止的条件是输出最优个体位置和最优适应度函数值。

2.4 结合 P&O 算法

智能算法在跟踪最大功率点的过程中,种群全部个体会在算法迭代过程中逐渐缩小到一定范围,种群逐渐集中。如果此时继续进行算法的迭代收敛,最终所有个体的位置都会集中于同一个最优值,但这个过程需要耗费一定的时间,这会导致算法整体的搜索速度变慢。为此,当算法运行到一定程度,即个体收敛到

一定范围时,切换到小补偿扰动观察法继续完成最大功率点的跟踪。

为了能够实现两种算法之间的切换,本文将会在两个算法中加入一个判断条件,即将种群中适应度最优和最差的两个个体间的位置大小作为算法切换条件,若切换条件成立,则停止运行黑寡妇算法,由扰动观察法继续进行搜索,进而快速跟踪到最大功率点。切换条件如式(5)所示:

$$|P_{\max} - P_{\min}| < S \quad (5)$$

其中, P_{\max} 和 P_{\min} 分别为种群中适应度最优和最差的两个个体间的位置, S 为切换条件的判断阈值。

2.5 算法重启条件

为了保证在外界光照环境发生变化时也能够跟踪到最大功率点,在算法中加入重启条件,算法在外界光照发生变化时进行初始化操作,重新跟踪最大功率点。

用 P_a 和 P_b 代表光照改变前后的功率,若 P_a 和 P_b 满足式(6),算法将会重置到初始状态,对新的最大功率点进行跟踪。

$$\left| \frac{P_a - P_b}{P_b} \right| > \eta, \eta = 0.09 \quad (6)$$

综上,BWO-P&O 算法的完整流程如图 4 所示。

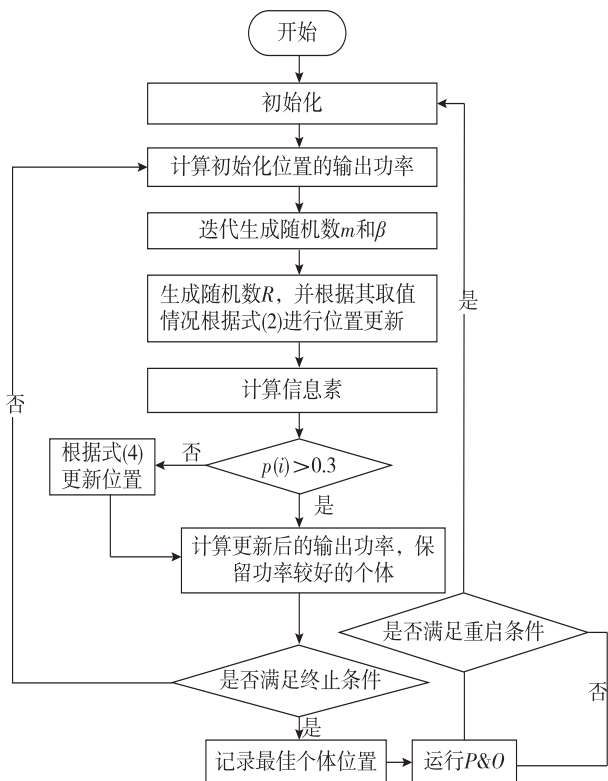


图 4 BWOA-P&O 算法的流程

Fig. 4 The flow of BWOA-P&O algorithm

3 仿真实验与结果分析

3.1 仿真模型及参数设置

依据上文所提到的光伏电池数学模型以及光伏阵列组成,在 Matlab/Simulink 中搭建最大功率点仿真模型^[12],如图 5 所示,其中光伏阵列由 5 块光伏组件串联组成,其内部元器件参数如表 2 所示。

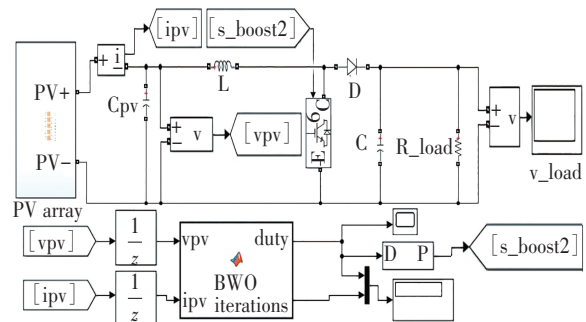


图 5 光伏阵列 MPPT 控制系统结构

Fig. 5 Structure of photovoltaic array MPPT control system

表 2 光伏板内部参数

Table 2 Internal parameters of photovoltaic panel

参 数	取 值
开路电压 U_{oc}/V	72.5
最大功率点电压 U_{mp}/V	31
短路电流 I_{sc}/A	29
最大功率点电流 I_{mp}/A	58

Boost 电路中, $C_{pv} = 500 \mu F$, $L = 8.58 \text{ mH}$, $C = 20 \mu F$, 负载电阻 $R_{load} = 20 \Omega$ 。为了验证本文所提出的结合算法在最大功率跟踪时的效率,将所提到的原黑寡妇算法、与扰动观察法相结合的黑寡妇算法以及粒子群算法在 3 种不同的工况下进行仿真验证并观察实验结果,最后验证基于新算法的 MPPT 控制在动态光照情况下的效果。其中,粒子群算法中的相关参数设置为 $\omega = 0.5$, $c_1 = 1.2$, $c_2 = 1.5$ 。

3.2 不同光照下的 MPPT 控制

当光伏阵列处于工况一的工作环境时, $P-U$ 曲线呈现单一峰值,并在电压 290 V 处取得最大值 8 517 W。仿真结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出:3 种算法在均匀光照的情况下都能跟踪到最大功率点,分别在 0.234 s、0.058 s、0.303 s

时到达稳定。

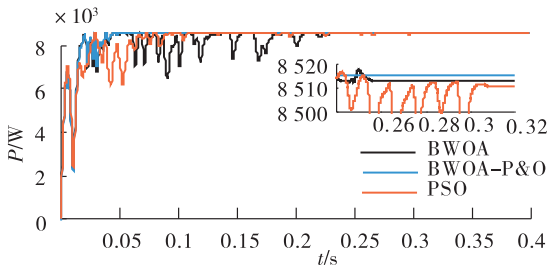


图 6 均匀光照下 MPPT 仿真

Fig. 6 MPPT simulation under uniform lighting

为了模拟光伏电池在工作时因各种情况造成的局部遮阴情况,接下来让这 3 种算法下的系统工作在工况二、三,并观察最后的最大功率点跟踪结果。根据图 2 所示,此时的 $P-U$ 曲线出现多峰值情况,并且分别在 300 V 和 239 V 处取得最大值 7 267 W 和 5 761 W。3 种算法情况在两种工况下的 $P-U$ 曲线如图 7、图 8 所示。

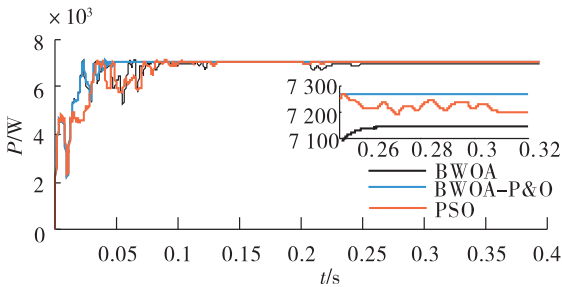


图 7 工况二下 MPPT 仿真

Fig. 7 MPPT simulation under the second working condition

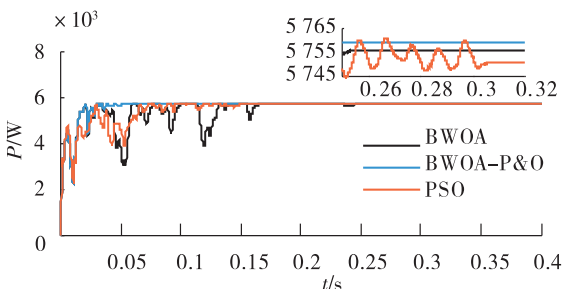


图 8 工况三下 MPPT 仿真

Fig. 8 MPPT simulation under third working condition

将 3 种工况仿真后得到的数据结果汇总到表 3。通过表 3 可以看出:外界工作温度维持在 25 °C 的情况下,3 种算法在能够稳定跟踪到最大功率点时,基于 BWOA-P&O 算法的 MPPT 相比于原算法和 PSO 速度更快,跟踪到最大,并且在跟踪精度上也更加优越。

表 3 3 种算法在阴影模式下的输出特性

Table 3 The output characteristics of three algorithms in shadow modes

工况类型	实际最大功率 /W	MPPT 算法	追踪到的稳定功率 /W	稳定时间/s	追踪效率/%
工况一	8 517	BWOA	8 513	0.257	99.95%
		BWOA-P&O	8515	0.056	99.97%
		PSO	8 511	0.308	99.92%
工况二	7 267	BWOA	7 147	0.277	98.34%
		BWOA-P&O	7 266	0.054	99.98%
		PSO	7 197	0.317	99.04%
工况三	5 761	BWOA	5 753	0.248	99.86%
		BWOA-P&O	5 759	0.055	99.96%
		PSO	5 751	0.315	99.82%

3.3 动态环境下光伏阵列的 MPPT 控制

为了进一步验证本文所提出的结合算法在动态环境下的工作状况,从第 0 s 开始使光伏阵列处于工况一的环境下进行工作;0.2 s 时进入工况三工作状态;0.4 s 时进入工况二工作状态。这个过程中,整个光伏系统经历两次光照改变。图 9 为黑寡妇结合算法的 MPPT 功率跟踪情况。

通过图 9 可以看出:在每次工况变化后,基于黑寡妇与 P&Q 结合算法的 MPPT 能够很快重新寻找到最大功率点,基本在 0.07 s 内就完成新工况下最大功率点的跟踪。

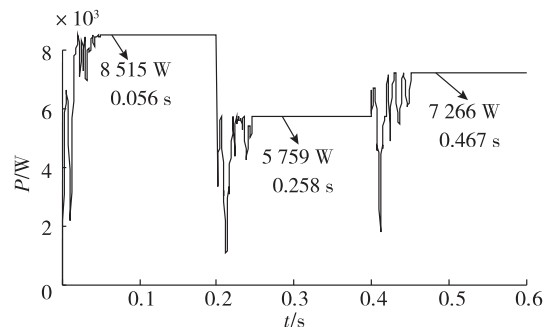


图 9 动态环境下 BWOA-P&O 仿真

Fig. 9 BWOA-P&O simulation in dynamic environment

4 结 论

针对传统算法在不均匀光照情况下无法精确快速跟踪最大功率点的情况以及群智能算法在跟踪速度和精度上的问题,提出一种黑寡妇算法与P&O相结合的MPPT控制算法。经过实验表明:与扰动观察法的结合可以有效加快BWOA算法的收敛速度,并提高算法的收敛精度,使MPPT在恒温条件下可以快速且精准地进行最大功率值的追踪;同时在动态变化光照环境下,结合BWOA-P&O算法的MPPT依然可以精确快速地跟踪到最大功率点。

参考文献(References):

- [1] 余运俊,张翔,王时胜,等.电导增量法光伏发电MPPT研究综述[J].电源技术,2014,38(12):2440—2444.
YU Yun-jun, ZHANG Xiang, WANG Shi-sheng, et al. Review of MPPT for photovoltaic power generation by incremental conductivity method[J]. Power Sources Technology, 2014, 38(12): 2440—2444.
- [2] 郑旭彬,李梦达,梁智超,等.局部遮荫下改进蝴蝶算法的MPPT控制仿真研究[J].计算机仿真,2022,39(1):96—101.
ZHENG Xu-bin, LI Meng-da, LIANG Zhi-chao, et al. Simulation of MPPT control based on improved butterfly algorithm under local shade[J]. Computer Simulation, 2022, 39(1): 96—101.
- [3] HAMZA ZAFAR M, KHAN N M, FERAZ MIRZA A, et al. A novel meta-heuristic optimization algorithm based MPPT control technique for PV systems under complex partial shading condition [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 47: 101367—101377.
- [4] 巩瑞春,王瑞虹.基于模糊控制的光伏发电系统最大功率点跟踪算法研究[J].河南科技,2018(31):109—111.
GONG Rui-chun, WANG Rui-hong. Research on maximum power point tracking algorithm of photovoltaic power generation system based on fuzzy control [J]. Henan Science and Technology, 2018(31): 109—111.
- [5] 黄勤,石国飞,凌睿,等.基于滑模控制的光伏系统MPPT控制方案[J].计算机工程,2012,38(6):253—256.
HUANG Qin, SHI Guo-fei, LING Rui, et al. MPPT control scheme for photovoltaic system based on sliding mode control[J]. Computer Engineering, 2012, 38(6): 253—256.
- [6] 张志敏,彭红义,潘若妍,等.基于MPPT的光伏并网逆变器研究[J].电源技术,2023,47(1):108—111.
ZHANG Zhi-min, PENG Hong-yi, PAN Ruo-yan, et al. Research on grid-connected photovoltaic inverter based on MPPT[J]. Power Sources Technology, 2023, 47(1): 108—111.
- [7] 王红艳,毛祥,程仕睿,等.基于PSO算法的光伏阵列MPPT控制研究[J].许昌学院学报,2022,41(2):119—123.
WANG Hong-yan, MAO Xiang, CHENG Shi-rui, et al. Research on MPPT control of photovoltaic array based on PSO algorithm[J]. Journal of Xuchang University, 2022, 41(2): 119—123.
- [8] FU CH X, ZHANG L X, DONG W CH. Research and application of MPPT control strategy based on improved slime mold algorithm in shaded conditions[J]. Electronics, 2022, 11(14): 21—22.
- [9] 周元贵,陈启卷,何昌炎,等.局部阴影下光伏阵列建模及多峰值MPPT控制[J].太阳能学报,2016,37(10):2484—2490.
ZHOU Yuan-gui, CHEN Qi-juan, HE Chang-yan, et al. Photovoltaic array modeling and multi-peak MPPT control under local shadow[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2016, 37(10): 2484—2490.
- [10] HASANIEN H M. Performance improvement of photovoltaic power systems using an optimal control strategy based on whale optimization algorithm[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 157: 168—176.
- [11] HAYYOLALAM V, KAZEM A. Black widow optimization algorithm: A novel meta-heuristic approach for solving engineering optimization problems[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2020, 87(7): 1—28.
- [12] ALMUTERI A, ABO-KHALIL A G, SAYED K. Effectiveness of MPPT for a PV grid-connected system to improve efficiency under partial shading conditions [J]. Sustainability, 2020, 12(24): 612—622.

责任编辑:李翠薇