

基于 HPO-IP&O 算法的光伏 MPPT 控制研究

欧阳名三, 周杰

安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001

摘要:目的 光伏电池在实际应用中接收的光照可能会被遮挡, 光伏阵列会在局部遮阴条件下运行, 造成光伏系统输出功率出现多峰值的情况。针对传统最大功率点追踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)算法全局追踪能力弱, 以及难以兼顾追踪速度和精度的问题, 提出了猎人猎物优化算法(Hunter-Prey Optimization, HPO)与变步长扰动观察法(Improved Perturbation and Observation, IP&O)的结合算法。方法 首先利用 HPO 算法, 初始化种群之后得到光伏系统的初始最大功率, 并将其定义为整个算法的全局最优值; 之后每次更新输出功率都要与最优值比较, 保留功率较大的作为全局最优值; 当满足算法切换条件时, 认为 HPO 算法已经追踪到最大功率点附近, 切换到 IP&O 算法在最大功率点附近扰动, 直至输出最优值; 当光伏系统接收到光照发生变化时, 可以通过重启条件快速重启 HPO-IP&O 算法。结果 为验证所提算法的可靠性, 在 MATLAB/Simlink 中建立光伏系统仿真模型; 在不同的光照条件下, 分别将粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)、鲸鱼算法(Whale Optimization Algorithm, WOA)和所提算法对比; 仿真结果表明: HPO-IP&O 算法不会陷入局部极值, 同时其追踪精度也优于 WOA 算法, 但是与 PSO 算法相差不大; 在追踪速度上, HPO-IP&O 算法均快于 WOA 和 PSO 算法, 且功率越大, HPO-IP&O 所用时间越短。结论 HPO-IP&O 算法解决了传统 MPPT 算法易陷入局部最优值、无法兼顾追踪速度和精度的问题, 通过仿真实验验证了所提算法在不同光照条件下的可行性和可靠性。

关键词:最大功率点追踪; 猎人猎物优化算法; 变步长扰动观察法; 光照条件

中图分类号: TM615 **文献标识码:** A **doi:** 10.16055/j.issn.1672-058X.2025.0005.011

Research on Photovoltaic MPPT Control Based on HPO-IP&O Algorithm

OUYANG Mingsan, ZHOU Jie

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

Abstract: Objective In practical applications, the sunlight received by photovoltaic cells may be obstructed, causing photovoltaic arrays to operate under partial shading conditions, resulting in the occurrence of multiple peaks in the output power of the photovoltaic system. In response to the weak global tracking ability of traditional maximum power point tracking (MPPT) algorithms and the difficulty in balancing tracking speed and accuracy, a combined algorithm of hunter-prey optimization (HPO) and improved perturbation and observation (IP&O) was proposed. **Methods** Firstly, the HPO algorithm was used to initialize the population and obtain the initial maximum power of the photovoltaic system, which was defined as the global optimum of the entire algorithm. Then, each update of the output power was compared with the optimal value, and the larger power was retained as the global optimum. When the algorithm switching conditions were

收稿日期: 2024-06-05 **修回日期:** 2024-08-14 **文章编号:** 1672-058X(2025)05-0084-08

基金项目: 国家自然科学基金(51874010); 安徽省重点研发计划攻关项目(202004A05020080)。

作者简介: 欧阳名三(1967—), 男, 江西萍乡人, 教授, 博士, 从事计算机控制技术、电力电子与电力传动研究。

通信作者: 周杰(1999—), 男, 江苏无锡人, 硕士研究生, 从事新能源发电技术研究。Email: zj1999624@163.com。

引用格式: 欧阳名三, 周杰. 基于 HPO-IP&O 算法的光伏 MPPT 控制研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2025, 42(5): 84-91.

OUYANG Mingsan, ZHOU Jie. Research on photovoltaic MPPT control based on HPO-IP&O algorithm[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2025, 42(5): 84-91.

met, the HPO algorithm was considered to have tracked near the maximum power point, and the IP&O algorithm was perturbed near the maximum power point until the optimal value was output. When the illumination received by the photovoltaic system changed, the HPO-IP&O algorithm could be quickly restarted by restarting conditions. **Results** To verify the reliability of the proposed algorithm, a photovoltaic system simulation model was established in MATLAB/Simulink. The particle swarm optimization (PSO), whale optimization algorithm (WOA), and the proposed algorithm were compared under different illumination conditions. Simulation results showed that the HPO-IP&O algorithm did not fall into local extremes, and its tracking accuracy was better than that of the WOA algorithm, but it was not significantly different from the PSO algorithm. In terms of tracking speed, the HPO-IP&O algorithm was faster than the WOA and PSO algorithms, and the larger the power, the shorter the time used by HPO-IP&O. **Conclusion** The HPO-IP&O algorithm solves the problems of traditional MPPT algorithms easily falling into local optimum and being unable to balance tracking speed and accuracy. The feasibility and reliability of the proposed algorithm under different lighting conditions are verified by simulation experiments.

Keywords: maximum power point tracking; hunter-prey optimization algorithm; improved perturbation and observation; illumination condition

1 引言

在“碳中和”的背景下,我国新能源产业前景广阔。光伏发电技术是我国可再生能源发电技术中比较成熟的技术,未来有望得到进一步发展^[1]。

光伏输出功率呈非线性特征,需要进行最大功率点追踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT),使光伏工作在最大功率点(Maximum Power Point, MPP)处。传统 MPPT 方法包括恒定电压法(Constant Voltage Test, CVT)、扰动观察法(Perturbation and Observation, P&O)、电导增量法(Incremental Conductance, INC)等,但是上述算法由于自身缺陷,难以同时满足追踪精度和响应速度等要求^[2]。在局部遮阴条件(Partial Shading Condition, PSC)下,这些方法容易陷入局部最大功率点,难以追踪到全局最大功率点。

为解决这个问题,许多学者开始对智能算法进行研究^[3],比较常见的一类方法是智能 MPPT 算法,将全局搜索能力强的优化算法与传统 MPPT 算法相结合。例如,赵帅旗等^[4]提出了一种改进的布谷鸟算法结合变步长的扰动观察法,解决了 IP&O 陷于局部最优的情况,同时提高了追踪精度,但是该算法的跟踪速度不够快;刘文峰等^[5]提出了一种改进天牛算法结合变步长的扰动观察法,该结合算法既提高了收敛速度同时又减小了功率振荡,但是该算法步骤有些复杂;王航宇^[6]提出了一种粒子群结合模糊算法的结合算法,该算法提高了全局搜索能力,但是模糊子集较少、规则简单、收敛速度较慢、效果不太理想。这类方法的有效性取决于智能 MPPT 算法处理多峰值问题的能力和算法本身的复杂程度。

猎人猎物优化算法(Hunter-Prey Optimization, HPO)

是最近几年提出的一种新型智能优化算法。该算法结构简单,并且在处理单峰或多峰问题上优于其他智能算法^[7]。但是 HPO 算法由于其自身的递减机制,在 MPPT 应用中无法稳定地追踪 MPP。

针对上述问题,提出了一种基于猎人猎物优化和变步长扰动观察法(Improved Perturbation and Observation, IP&O)结合的 MPPT 算法。该算法将 HPO 收敛速度快,全局寻优能力强的特点,以及 IP&O 局部搜索能力较强的特点融合到一起。在 MPPT 控制中, HPO 先利用自身优势,跳出局部最优,在全局中搜索 MPP,当 HPO 搜寻到 MPP 附近时就切换到 IP&O 算法在小范围内继续搜寻 MPP。通过在 MATLAB/Simlink 中将本文算法与粒子群算法和鲸鱼算法进行对比,验证所提出的算法在收敛速度和追踪精度上更有优势。

2 光伏电池的输出特性

2.1 光伏电池等效模型

在光伏发电系统中,发电部分由数个光伏电池串联或并联组成。单个光伏电池等效模型^[8]如图 1 所示。

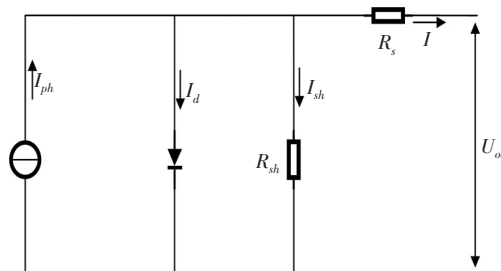


图 1 光伏电池等效模型

Fig. 1 Equivalent model of photovoltaic cells

由图 1 可知太阳能电池的 I-U 输出特性:

$$I = I_{ph} - \left\{ I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U_{oc} + IR_s)}{AKT} \right) - 1 \right] - \frac{U_{oc} + IR_s}{R_{sh}} \right\} \quad (1)$$

式(1)中, I 、 I_{ph} 、 I_0 分别为太阳能电池输出电流、光生电流以及反向饱和电流; U_{oc} 为太阳能电池输出电压; R_s 、 R_{sh} 分别为串、并联电阻; q 为电子电荷; A 为二极管理想因子; K 为玻尔兹曼常数; T 为太阳能电池工作温度。

2.2 光伏电池模型

赵培仁^[9] 对光伏电池建模。在光照和温度变化下,在温度 $T_{ref}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、光照强度 $S_{ref}=1\ 000\text{ W/m}^2$ 的条件下,对开路电压 U_{oc} 、短路电流 I_{sc} 、最大功率点电压 U_m 和最大功率点电流 I_m 进行修正。

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (2)$$

$$\Delta S = \frac{S}{S_{ref}} - 1 \quad (3)$$

$$I'_{sc} = I_{sc} \frac{S}{S_{ref}} (1 + \alpha \Delta T) \quad (4)$$

$$U'_{oc} = U_{oc} (1 + c \Delta T \ln(1 + b \Delta S)) \quad (5)$$

$$I'_m = I_m \frac{S}{S_{ref}} (1 + \alpha \Delta T) \quad (6)$$

$$U'_m = U_m (1 + c \Delta T \ln(1 + b \Delta S)) \quad (7)$$

式(4)一式(7)中, α 、 b 、 c 均为校正系数,取值为 $\alpha = 0.002\ 5/^{\circ}\text{C}$ 、 $b = 0.5$ 、 $c = 0.002\ 88/^{\circ}\text{C}$ 。在标准条件下,光伏电池的开路电压为 21.7 V ,短路电流为 3.45 A ,最大功率点为 54.81 W ,最大功率点处电压为 17.4 V ,最大功率点处电流为 3.15 A ^[10]。

2.3 不同光照条件下光伏阵列的输出特性

在实际生活中,由于云层、树叶等遮挡物的存在,光伏电池接收到的光照强度不均匀,光伏阵列出现局部遮阴现象。这种现象会使光伏阵列的最大功率点发生改变。选用3块前文所述的光伏电池串联且每个电池并联一个二极管组成一个 3×1 的光伏阵列,保持 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境温度不变,按照光伏组件接收到的光照强度不同,将光伏阵列分为4种工作模式:模式一,光伏阵列处于均匀光照条件下,用于测试算法对单峰值的追踪能力;模式二、三和四,光伏阵列处于局部遮阴条件下,用于测试算法对多峰值的追踪能力。分类详细情况如表1所示。通过 MATLAB/simlink 仿真,得到4种模式对应的 P-U 特性曲线如图2所示。

表1 光伏阵列运行模式

Table 1 Operation modes of photovoltaic arrays W/m^2			
模 式	S_1	S_2	S_3
一	1 000	1 000	1 000
二	1 000	800	200
三	800	400	400
四	600	100	100

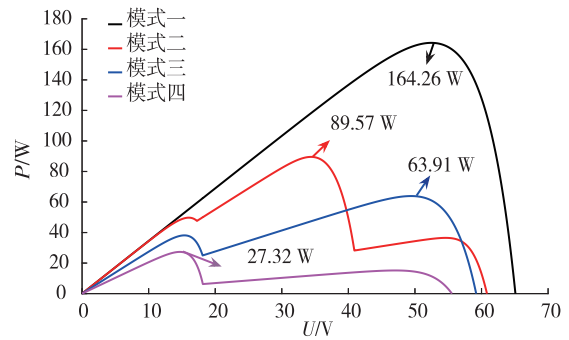


图2 光伏阵列 P-U 特性曲线

Fig. 2 P-U characteristic curves of photovoltaic arrays

由图2可知,在均匀光照下光伏阵列的 P-U 曲线只有一个峰值,而局部遮阴情况下光伏阵列的 P-U 曲线呈现多峰值。

3 HPO-IP&O 在 MPPT 中的应用

3.1 HPO 算法

该算法的灵感源于食肉动物和食草动物之间的捕猎行为。食肉动物作为猎人,攻击远离猎物群体的个体目标,并基于猎物群体的平均位置不断调整自身的位置;而猎物也在同时调整自己的位置,向更为安全的地带移动。以下是算法的实现过程^[7]:

首先将所有个体随机设置为 $X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$, 目标函数设置为 $Y = \{Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n\}$, 其中 n 表示种群数量。根据算法的规则和策略在搜索空间中控制和引导种群,通过不断迭代更新群体中每个个体的位置,利用目标函数评估新的位置。在不断迭代中,问题的解决方案也在不断优化。每个成员通过以下方式随机生成:

$$X = \text{rand}(1, d) \times (u - l) + l \quad (8)$$

式(8)中, X 表示猎人或猎物的位置, d 表示问题中的变量, u 表示变量的最大值, l 表示变量的最小值。

当初始值都生成之后,使用目标函数 Y 求解每个个体的适应度值。首先通过搜索机制的运行让代理寻找最佳区域,然后通过开发机制,在希望区域减小随机行为来搜寻最优位置。以下是猎人的搜索机制数学模型:

$$x_{i,j}(k+1) = x_{i,j}(k) + 0.5 \left[(2CZP_{pos(j)} - x_{i,j}(k)) + 2(1-C)Z\mu(j) - x_{i,j}(k) \right] \quad (9)$$

$$C = 1 - \ln \left(\frac{0.98}{\text{MaxIt}} \right) \quad (10)$$

$$P = R_1 < C \quad (11)$$

$$IDX = (P = 0) \quad (12)$$

$$Z = R_2 \otimes IDX + R_3 \otimes (\sim IDX) \quad (13)$$

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (14)$$

$$D_{\text{euc}}(i) = \left(\sum_{j=1}^d (x_{i,j} - \mu_j)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

式(9)中, $x(k)$ 是猎人的当前位置, $x(k+1)$ 是猎人下一位置, P_{pos} 是猎物的位置, 根据式(14)计算之后排序选择离猎人最远的个体。式(10)中, C 是探索与开发机制之间的平衡参数, 在运行过程中从 1 减小到 0.02; It 是当前迭代次数; Max_{it} 是最大迭代次数。式(11)中, 向量 R_1 是 $[0, 1]$ 内的随机向量。式(12)中, P 和 IDX 均为满足条件的索引值。式(13)中, Z 是自适应参数, R_2 是在 $[0, 1]$ 内的随机值, 向量 R_3 是 $[0, 1]$ 内的随机向量。式(14)中, μ 是种群中所有个体位置的平均值。式(15)中, D_{euc} 表示猎人或猎物与种群中所有个体位置的欧几里得距离。

在算法运行过程中, 如果每次迭代都要考虑搜索代理与平均位置之间的最大距离, 则该算法将具有延迟收敛性。根据算法模拟捕猎行为, 猎物可能会死亡, 因此猎人需要选择新的猎物, 为此加入了递减机制来解决这个问题。猎物位置计算方式更新为式(17):

$$k_{\text{best}} = \text{round}(C \times N) \quad (16)$$

$$P_{\text{pos}} = x_i \mid i \text{ is sorted } D_{\text{euc}}(k_{\text{best}}) \quad (17)$$

式(16)中, N 表示搜索代理的数量。

根据式(16)和式(17)可知, 当算法开始时, k_{best} 的值等于 N 值, 因此种群中最后一个距离猎人的平均位置最远的代理被视为猎物。假设猎物此时的位置就是全局最优位置, 那么猎人就会选择新的猎物, 式(18)用于更新猎物的位置:

$$x_{i,j}(k+1) = T_{\text{pos}(j)} + CZ \cos(2\pi R_4) \times (T_{\text{pos}(j)} - x_{i,j}(k)) \quad (18)$$

式(18)中, $x(k)$ 是猎物当前位置, $x(k+1)$ 是指猎物下一位置, T_{pos} 是全局最优位置, R_4 是在 $[-1, 1]$ 内的随机数, $\cos$ 函数可以提高开发阶段的性能。

综合式(9)和式(18), 公式更新为:

$$x_i(k+1) = \begin{cases} x_i(k) + 0.5[(2CZP_{\text{pos}(j)} - x_i(k)) + 2(1-C)Z\mu(j) - x_i(k)] & R_5 < B \\ T_{\text{pos}} + CZ \cos(2\pi R_4) \times (T_{\text{pos}} - x_i(k)) & R_5 \geq B \end{cases} \quad (19)$$

式(19)中, R_5 是 $[0, 1]$ 内的随机数; B 是一个调节参数, 设置为 0.1。

若 $R_5 < B$ 则搜索代理被视为猎人, 反之则被视为猎物, 均使用式(19)更新下一个位置。

HPO 算法的具体寻优步骤如下:

(1) 对 HPO 算法初始化参数, 包括种群个数 n 、最大迭代次数 Max_{it} 等。

(2) 根据目标函数计算初始种群中每个个体位置

的适应度值, 对所有个体的适应度评估选取最大的适应度 T 作为初始全局最优值, 初始全局最优值对应个体的位置作为初始全局最优位置 T_{pos} 。

(3) 每次迭代开始后, 先用式(10)和式(13)计算 C 和 Z 的值, 然后根据式(19)更新搜索代理的位置, 更新完成后计算该位置的适应度。将适应度与初始全局最优值对比, 保留适应度值较大的作为新的全局最优值 T' , 新的全局最优值对应的位置作为新的全局最优位置 T'_{pos} 。当种群中所有个体的位置完成更新并计算之后, 一次迭代结束。

(4) 重复步骤(3), 直至输出目标函数的全局最优值。

3.2 IP&O 算法

P&O 步长是固定的, 但应用于 MPPT 控制中, 步长的大小影响光伏系统输出功率的收敛速度和追踪精度。当步长较小时, 收敛速度慢但追踪精度高; 当步长较大时, 收敛速度快但追踪精度低。基于 P&O 改进步长得到 IP&O 作为 P&O 的替代之一被广泛使用。以下是 IP&O 变步长的计算方式^[11]:

$$\lambda = \varepsilon |\Delta P| \quad (20)$$

式(20)中, λ 是步长, ε 是步长系数。

3.3 HPO-IP&O 在 MPPT 中的实现

HPO 算法是模拟动物捕食行为的算法, 在前文的公式(16)中, 递减机制会使猎人在捕捉到猎物之后再寻找新的猎物, 因此当 HPO 算法应用于 MPPT 时, 输出的占空比会出现稳定-震荡-再稳定的循环周期, 直至迭代完成。而 MPPT 控制系统输出的功率也会出现收敛-震荡-再收敛的循环周期, 因此只靠 HPO 算法不能稳定追踪最大功率。为了解决这个问题, 将 HPO 算法与 IP&O 算法相结合, 让 HPO 算法在寻找到全局最优功率附近切换至 IP&O 算法继续寻优。

3.3.1 算法切换判定策略

为加快结合算法的收敛速度, 在 HPO 算法中设置切换条件。当更新前后的功率满足一个判定式就终止 HPO 算法, 转为执行 IP&O 算法继续寻优。

算法切换条件的判定式如下所示^[4]:

$$\frac{P_{\text{max}} - P}{P} < 0.05 \quad (21)$$

式(21)中, P 是 HPO 算法每次更新之后得到的功率; P_{max} 是 P 中的最大值。

3.3.2 重启条件

光伏在实际运行过程中, 一些因素会使光伏的光照强度和温度发生变化, 这些变化会让光伏的输出功率出现波动, 影响光伏发电的效率。为提高光伏发电效率, 采取重启 MPPT 的方法来提高效率。

通过检测功率的变化控制算法重启^[12],判别式如下:

$$\frac{P_t - P_{t_{\max}}}{P_{t_{\max}}} > 0.1 \quad (22)$$

式(22)中, P_t 是 t 时刻输出的功率, $P_{t_{\max}}$ 是算法追踪到的最大输出功率。

3.3.3 组合算法在 MPPT 中实现过程

(1) HPO 算法初始化, 设置占空比的个数和上下界限。

(2) 根据输出的初始占空比计算每个占空比对应的功率, 选择最大的输出功率作为初始最优功率, 对应的占空比作为初始最优占空比。

(3) HPO 算法开始迭代更新占空比, 得到占空比更新后的功率。将占空比更新后的功率与最优功率比较, 保留较大的功率作为新的最优功率, 对应的占空比作为新的最优占空比。

(4) 在 HPO 算法满足切换条件后切换到 IP&O 算法继续寻优, 在追踪到全局最优功率后, 输出最优。

(5) 如果在 IP&O 算法工作中, 光伏的输出功率出现波动, 在满足重启条件之后, IP&O 算法会立刻停止并重新启动 HPO 算法, 然后重复步骤(1)~步骤(4)。

HPO-IP&O 算法的具体流程图如图 3 所示:

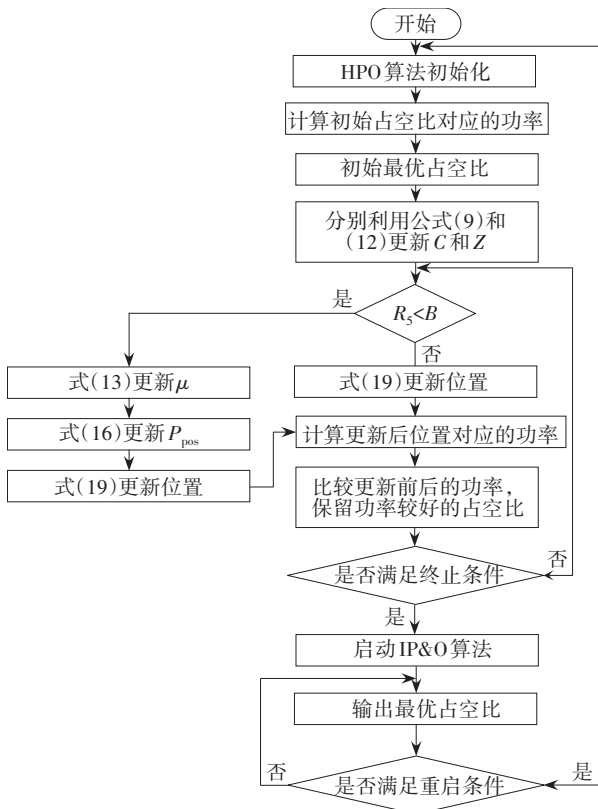


图 3 算法流程图

Fig. 3 Algorithm flowchart

4 仿真分析

在 MATLAB/Simlink 中搭建了如图 4 所示的光伏 MPPT 控制系统模型。该系统由光伏阵列、算法控制器以及 Boost 电路组成, 其中光伏阵列采用前文所述的 4 种运行模式。Boost 电路参数为 $C_1 = 10 \mu\text{F}$; $L = 10 \text{ mH}$; $C_2 = 50 \mu\text{F}$ 。

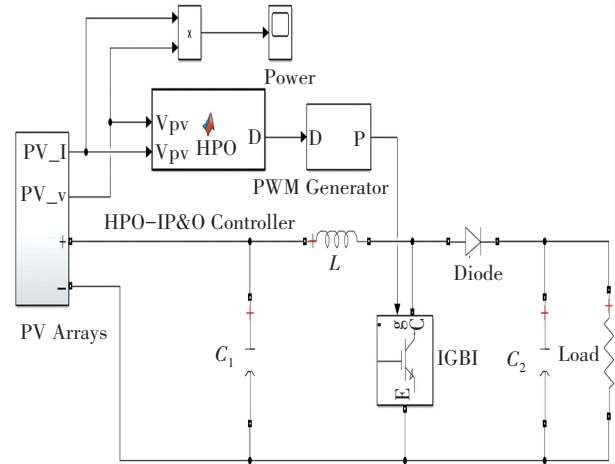


图 4 光伏 MPPT 系统模型

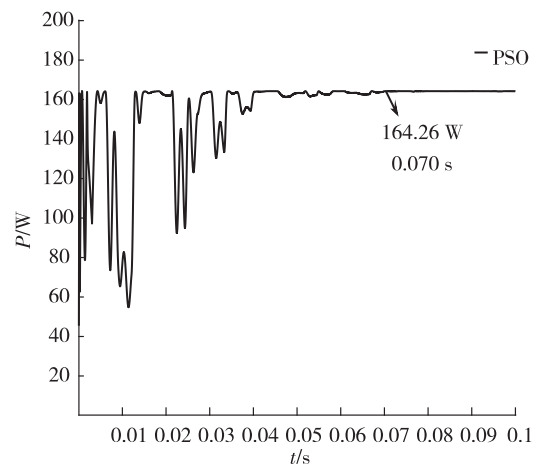
Fig. 4 Photovoltaic MPPT system model

为验证 HPO-IP&O 算法在 MPPT 系统中的性能, 在不同光照条件下将 HPO-IP&O 与 PSO^[10] 和 WOA^[13-15] 进行对比测试。其中, HPO-IP&O 算法参数设置如下: 种群个数 $n=5$, 变步长系数 $\varepsilon=0.005$ 。

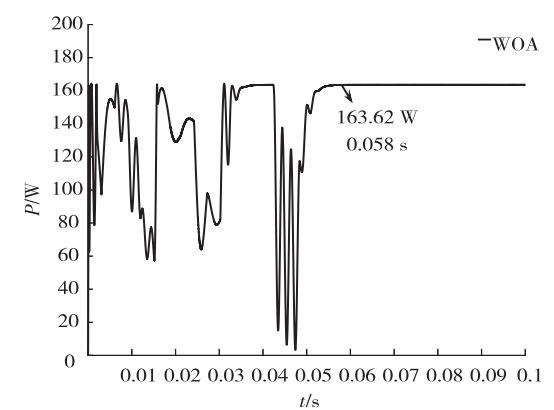
4.1 静态条件下的功率追踪

4.1.1 均匀光照条件下的功率追踪

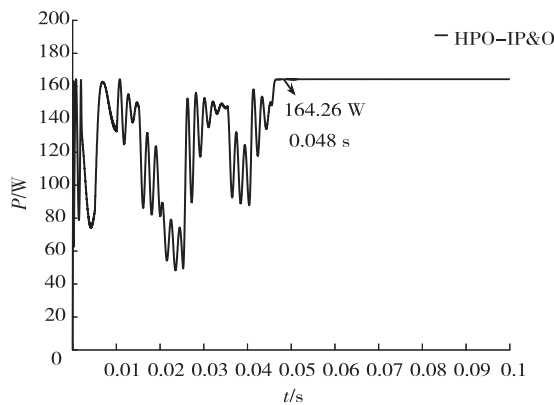
当光伏阵列工作在模式一时, 光伏系统输出的最大功率为 $P_{\max} = 164.26 \text{ W}$ 。在这种情况下, 将 3 种算法应用在光伏系统中, 通过仿真之后, 得到结果如图 5 所示。



(a) 均匀光照下的 PSO 算法



(b) 均匀光照下的 WOA 算法



(c) 均匀光照下的 HPO-IP&O 算法

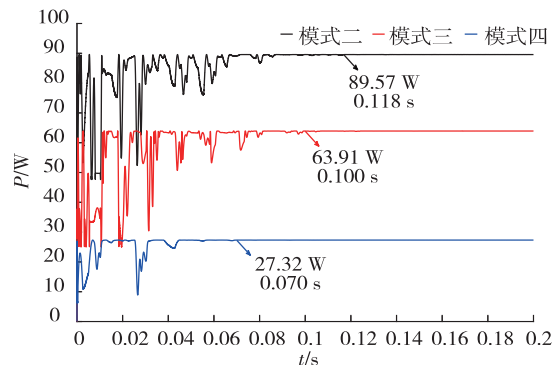
图 5 均匀光照条件下三种算法的输出功率

Fig. 5 Output power of three algorithms under uniform illumination

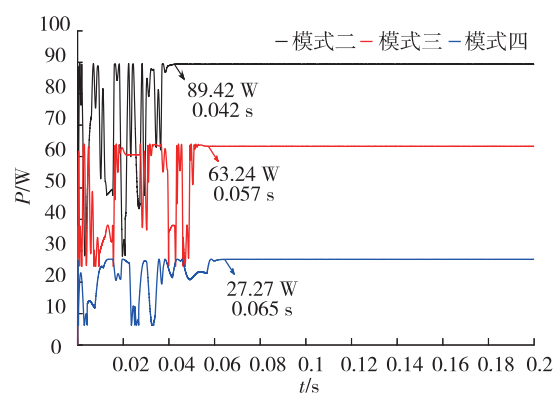
由图 5 的输出功率曲线可知, PSO、WOA、HPO-IP&O 分别在 0.08 s、0.06 s、0.054 s 追踪到 MPP, 在 MPP 处对应的功率分别为 164.26 W、163.63 W、164.26 W, 追踪效率分别为 99.99%、99.61%、99.99%。由此可见 HPO-IP&O 在标准情况下收敛速度快, 但在追踪精度上相差不大。

4.1.2 局部遮阴条件下的功率追踪

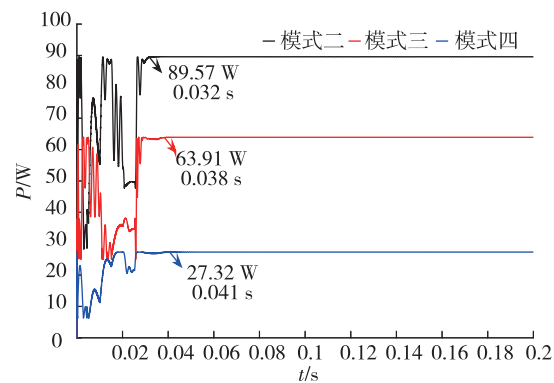
在部分遮阴条件(PSC)下, 光伏系统输出的 P-U 曲线会出现多峰值情况。保持环境温度为 25 ℃, 让光伏阵列分别运行于模式二、模式三和模式四, 最大功率分别为 89.57 W、63.91 W 和 27.32 W。将 3 种算法应用于光伏系统中, 仿真之后, 得到的结果如图 6 所示。



(a) 局部阴影下的 PSO 算法



(b) 局部阴影下的 WOA 算法



(c) 局部阴影下的 HPO-IP&O 算法

图 6 局部遮阴光照条件下 3 种算法的输出功率

Fig. 6 Output power of three algorithms under local shading lighting conditions

将图 6 中的数据整理后列于表 2, 方便后续对数据进行分析。

表 2 不同遮阴条件下 3 种算法对比
Table 2 Comparison of three algorithms under different shade conditions

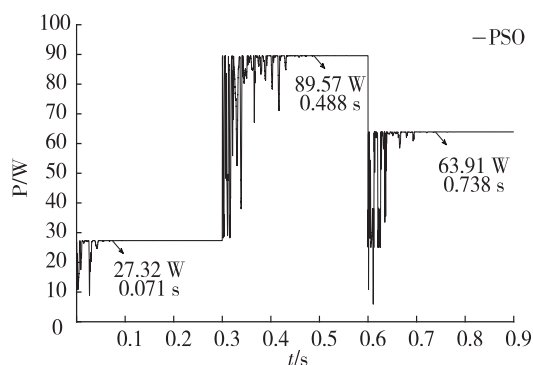
模 式	算 法	收敛速度/s	追踪精度/W
二	PSO	0.118	89.57
	WOA	0.042	89.42
	HPO-IP&O	0.033	89.57
三	PSO	0.100	63.91
	WOA	0.057	63.24
	HPO-IP&O	0.038	63.91
四	PSO	0.070	27.32
	WOA	0.065	27.27
	HPO-IP&O	0.041	27.32

分析表 2 中的数据, 可以得到 PSO、WOA 和 HPO-IP&O 在 3 种模式运行下的平均效率分别为 99.99%、99.53 和 99.99%。

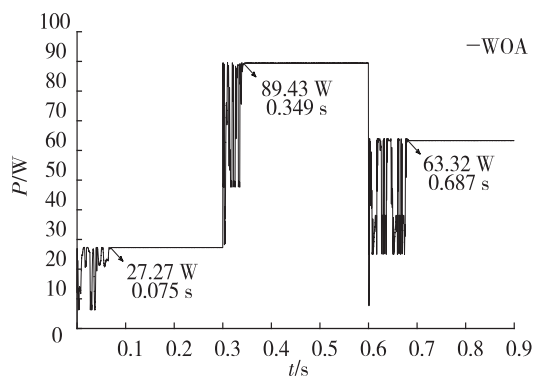
通过数据可以看出, PSO 算法追踪精度好, 但是收敛速度较慢; WOA 算法收敛速度较快, 但是追踪精度略差; 而 HPO-IP&O 算法同时兼具较快的收敛速度和较高的追踪精度。

4.2 动态条件下的功率追踪

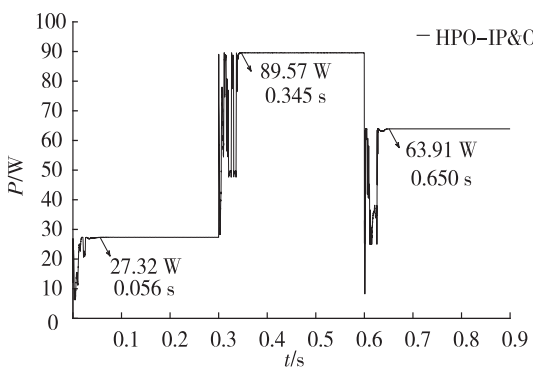
光伏组件在实际工作中接收到的光照是时刻变化的,因此光伏系统的 P-U 曲线也是时刻发生变化的。在仿真中改变光伏组件接收的光照强度来验证 HPO-IP&O 算法的动态追踪能力^[16]。将仿真分为 3 个阶段,每个阶段间隔 0.3 s。3 个阶段分别对应前文所述的光伏阵列的工作模式四、模式二和模式三。将 HPO-IP&O、PSO 和 WOA 3 种算法在动态光照条件下进行比较,经过仿真之后得到的结果如图 7 所示。为方便后续分析,将图 7 中数据详细列于表 3 中。



(a) 动态条件下的 PSO 算法



(b) 动态条件下的 WOA 算法



(c) 动态条件下的 HPO-IP&O 算法

图 7 动态条件下 3 种算法的输出功率

Fig. 7 Output power of three algorithms under dynamic conditions

表 3 动态条件下 3 种算法对比

Table 3 Comparison of three algorithms under dynamic conditions

阶 段	算 法	收敛速度/s	追踪精度/W
一	PSO	0.071	27.32
	WOA	0.075	27.27
	HPO-IP&O	0.056	27.32
二	PSO	0.188	89.57
	WOA	0.049	89.43
	HPO-IP&O	0.045	89.57
三	PSO	0.138	63.91
	WOA	0.087	63.32
	HPO-IP&O	0.050	63.91

分析表 3 中的数据,得到 PSO、WOA 和 HPO-IP&O 3 种算法的平均效率分别为 99.99%、99.57% 和 99.99%。从数据中可以看出,相较于 PSO 和 WOA, HPO-IP&O 的动态追踪能力更好。

5 结 论

HPO 算法具有较好的全局寻优能力和收敛速度, IP&O 有着良好的局部寻优能力。结合两种算法的优势,提出一种基于 HPO-IP&O 的 MPPT 算法,该算法在前期可以快速寻优,后期可以准确找到并稳定跟踪最大功率点。通过仿真分析得到以下结论:

(1) HPO-IP&O 算法解决了 IP&O 陷入局部最优的缺点,提高了算法的收敛速度和追踪精度。

(2) 相较于 PSO 和 WOA, HPO-IP&O 在追踪精度上相差不大,但在收敛速度上有显著的提高。

(3) 无论是在均匀、静态还是动态光照条件下, HPO-IP&O 均能快速且准确地追踪到最大功率点。对于光照变化剧烈的地区, HPO-IP&O 算法可以为该地区的光伏设计提供参考。

参考文献(References):

- [1] 王捷,林余杰,吴成坚,等.碳中和背景下太阳能光伏产业现状及发展[J].储能科学与技术,2022,11(2):731-732.
WANG Jie, LIN Yu-jie, WU Cheng-jian, et al. Current situation and development of solar photovoltaic industry under the background of carbon neutrality[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(2): 731-732.
- [2] 邱革非,张春刚,仲泽坤,等.基于扰动观察法和电导增量法的光伏发电系统 MPPT 算法研究综述[J].中国电力,

- 2017, 50(3): 154–160.
- QIU Ge-fei, ZHANG Chun-gang, ZHONG Ze-kun, et al. Review of MPPT algorithm of photovoltaic power generation system based on disturbance observation method and conductance increment method[J]. Electric Power, 2017, 50(3): 154–160.
- [3] 花赞昊, 朱武, 郭启明. 光伏发电系统 MPPT 算法研究综述[J]. 电源技术, 2020, 44(12): 1855–1858.
- HUA Yun-hao, ZHU Wu, GUO Qi-ming. Review of MPPT algorithm of photovoltaic power generation system[J]. Power Sources, 2020, 44(12): 1855–1858.
- [4] 赵帅旗, 肖辉, 刘忠兵, 等. 基于 CSA-IP&O 的局部遮阴下光伏最大功率点追踪[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 26–32.
- ZHAO Shuai-qi, XIAO Hui, LIU Zhong-bing, et al. Tracking of PV maximum power point under local shade based on CSA-IP&O[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 26–32.
- [5] 刘文锋, 李昂. 基于变步长扰动观察法结合改进天牛群优化算法的三步复合光伏最大功率跟踪算法[J]. 热力发电, 2022, 51(10): 138–144.
- LIU Wen-feng, LI Ang. Three-step composite photovoltaic maximum power tracking algorithm based on variable step disturbance observation method combined with improved optimization algorithm of longhorn herd[J]. Thermoelectric Power Generation, 2022, 51(10): 138–144.
- [6] 王航宇. 粒子群和模糊算法相结合的 MPPT 算法[J]. 探测与控制学报, 2021, 43(4): 112–116. 27.
- WANG Hang-yu. MPPT algorithm combining particle swarm and fuzzy algorithm[J]. Journal of Detection and Control, 2021, 43(4): 112–116. 27.
- [7] NARUEI I, KEYNIA F, SABBAGH MOLAHOSSEINI A. Hunter-prey optimization: Algorithm and applications[J]. Soft Comput, 2022, 26(3): 1279–1314.
- [8] 张严, 王亚君, 余佳琪. 基于神经网络-自适应模糊的光伏 MPPT 算法[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(4): 62–69.
- ZHANG Yan, WANG Ya-jun, YU Jia-qi. Photovoltaic MPPT algorithm based on neural network-adaptive fuzz[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(4): 62–69.
- [9] 赵培仁. 光伏发电最大功率点跟踪的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- ZHAO Pei-ren. Research on the tracking of the maximum power point of photovoltaic power generation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [10] 白雪冰, 武云鹏, 林鑫. 基于 ACPSO 算法在光伏 MPPT 控制中的应用[J]. 电源技术, 2020, 44(12): 1804–1808.
- BAI Xue-bing, WU Yun-peng, LIN Xin. Application of ACPSO algorithm in photovoltaic MPPT control[J]. Power Sources, 2020, 44(12): 1804–1808.
- [11] 李昂, 刘文锋, 李音柯, 等. 基于 IP&O-ICS 算法的光伏系统 MPPT 控制研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(5): 203–209.
- LI Ang, LIU Wen-feng, LI Yin-ke, et al. Research on MPPT control of photovoltaic system based on IP&O-ICS algorithm[J]. Journal of Solar Energy, 2023, 44(5): 203–209.
- [12] 毛明轩, 许钊, 崔立闯, 等. 基于改进灰狼优化算法的光伏阵列多峰 MPPT 研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(3): 450–456.
- MAO Ming-xuan, XU Zhao, CUI Li-chuang, et al. Research on multimodal MPPT of photovoltaic array based on improved gray wolf optimization algorithm[J]. Journal of Solar Energy, 2023, 44(3): 450–456.
- [13] 陈斌, 王俊江, 赵明胤, 等. 基于改进鲸鱼优化算法的光伏发电系统 MPPT 控制研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(2): 19–26.
- CHEN Bin, WANG Jun-jiang, ZHAO Ming-yin, et al. Research on MPPT control of photovoltaic power generation system based on improved whale optimization algorithm[J]. Transactions of Electric Power System and Automation, 2023, 35(2): 19–26.
- [14] 吴飞凡. 基于改进鲸鱼优化算法的光伏发电系统 MPPT 控制研究[D]. 辽宁: 辽宁工程技术大学, 2022.
- WU Fei-fan. Research on MPPT control of photovoltaic power generation system based on improved whale optimization algorithm[D]. Liaoning: Liaoning Technical University, 2022.
- [15] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95(5): 51–67.
- [16] 葛传九, 武鹏, 董祥祥, 等. 基于布谷鸟算法的光伏 MPPT 改进[J]. 太阳能学报, 2022, 43(10): 59–64.
- GE Chuan-jiu, WU Peng, DONG Xiang-xiang, et al. Improvement of photovoltaic MPPT based on cuckoo algorithm[J]. Journal of Solar Energy, 2022, 43(10): 59–64.

责任编辑: 吴倩