

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240759

# 基于改进算术优化算法的光伏多峰最大功率点跟踪控制

刘春喜, 黄远航, 周立, 李世纪, 林枝伟

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

**摘要:** 局部遮阴条件下光伏阵列的功率-电压特性曲线出现多个峰值, 传统最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)技术无法准确追踪到全局最大功率点。针对该问题提出一种基于改进算术优化算法(improved arithmetic optimization algorithm, IAOA)的MPPT控制方法。首先, 采用Sobol序列生成均匀分布的初始种群, 增加种群多样性。其次, 为了平衡算术优化算法(arithmetic optimization algorithm, AOA)的全局搜索和局部开发能力, 对AOA中数学优化器加速函数的权重进行重构。最后, 在AOA的位置更新中引入Lévy飞行策略, 并将准反向学习用于每次更新后的最佳解, 增强了算法的收敛速度和跳出局部最优的能力。仿真和实验结果表明, 将改进后的算法应用于MPPT控制中, 能够在不同的局部遮阴及光照突变条件下准确、快速地跟踪到全局最大功率点, 且功率振荡小。

**关键词:** 光伏系统; 最大功率点跟踪; 局部遮阴; 算术优化算法; Lévy飞行

## Multi-peak maximum power point tracking control of PV systems based on improved arithmetic optimization algorithm

LIU Chunxi, HUANG Yuanhang, ZHOU Li, LI Shiji, LIN Zhiwei

(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

**Abstract:** Under partial shading conditions, the power-voltage characteristic curve of a photovoltaic (PV) array exhibits multiple peaks, making it difficult for traditional maximum power point tracking (MPPT) techniques to accurately track the global maximum power point. To address this issue, an MPPT control method based on an improved arithmetic optimization algorithm (AOA) is proposed. First, the Sobol sequence is used to generate an initial population with a uniform distribution to enhance population diversity. Next, to balance the global search and local exploitation capabilities of AOA, the weight of the acceleration function in the mathematical optimizer of AOA is restructured. Finally, the Lévy flight strategy is introduced into the position update process of AOA, and quasi-oppositional learning is applied to the best solution after each update to enhance the algorithm's convergence speed and its ability to escape local optima. Simulation and experimental results show that the improved algorithm can accurately and quickly track the global maximum power point under different partial shading and sudden light change conditions, with minimal power oscillation.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177047).

**Key words:** photovoltaic systems; MPPT; partial shading; arithmetic optimization algorithm; Lévy flight

## 0 引言

光伏发电系统作为一种清洁、可再生的能源形式, 得到广泛应用<sup>[1-5]</sup>。然而, 当云层移动和灰尘沉积等原因造成光伏电池板局部遮挡后, 光伏阵列功率-电压( $P-U$ )特性曲线呈现多峰特性<sup>[6]</sup>。在此情况下, 传统的最大功率点跟踪(maximum power point

tracking, MPPT)方法如扰动观察法(perturb and observe, P&O)和电导增量法(incremental conductance, INC)等<sup>[7-8]</sup>无法区分光伏阵列的全局最大功率点(global maximum power point, GMPP)和局部最大功率点(local maximum power point, LMPP), 从而导致功率损耗过大。

为了解决在局部遮阴条件(partial shading conditions, PSC)下传统MPPT算法跟踪性能不佳的问题, 国内外许多学者进行了相关研究<sup>[9-12]</sup>。采用基于人工智能的MPPT控制技术, 如模糊逻辑控制<sup>[13]</sup>、

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52177047); 辽宁省教育厅基础研发项目资助(LJKMZ20220683)

神经网络<sup>[14]</sup>和自适应神经模糊推理系统<sup>[15]</sup>。虽然这些方法可以有效地跟踪 GMPP, 但是必须经过长时间的训练, 并且需要大量的数据集才能充分处理 PSC 下的 MPPT 问题。大量的训练数据给微处理器带来了存储和计算负担, 导致收敛速度慢。元启发式算法因具有高效的全局搜索能力, 在 MPPT 控制中得到广泛研究和应用。如粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法<sup>[16-17]</sup>、蚁狮算法<sup>[18]</sup>、萤火虫算法<sup>[19]</sup>、布谷鸟搜索算法<sup>[20]</sup>、人工蜂群算法<sup>[21]</sup>等。文献[22]提出一种 PSO-P&O 的混合算法, 该方法可以跟踪到 GMPP, 但精度较差, 而且 P&O 的固定步长使输出稳定后出现较大功率振荡。文献[23]提出一种自适应变异粒子群算法, 该算法通过将异步学习因子、自适应惯性权重及变异机制引入到算法中, 具有较好的跟踪效果。文献[24]提出一种改进灰狼优化(improve gray wolf optimization, IGWO)算法, 通过引入非线性收敛因子, 提升算法的寻优性能。文献[25]提出一种改进型鲸鱼算法并将其应用于 MPPT 控制中, 通过采用混沌映射和引入非线性收敛因子提高全局搜索能力, 避免算法陷入局部最优。

算术优化算法(arithmetic optimization algorithm, AOA)是 Laith Abualigah 等在 2021 年提出的一种基于群体的新型元启发式算法。它依赖于数学中算术算子的分布行为来解决非线性问题, 因其求解精度高、调整参数少、实现简单、能够处理局部极小值, 在风光储能<sup>[26-27]</sup>、工程优化<sup>[28]</sup>等领域均取得较好的应用效果。与大多数元启发式算法一样, AOA 也存在过早收敛而陷入局部最优值的可能, 收敛速度和精度也有待提升。因此, 本文提出一种融合 Lévy 飞行策略与准反向学习的改进算术优化算法(improved arithmetic optimization algorithm, IAOA)。首先, 通过传统 AOA 基础上利用 Sobol 序列初始化种群, 并设计新的非线性数学优化器加速函数, 平衡算法搜索能力; 然后, 引入 Lévy 飞行策略和准反向学习, 增强算法的收敛速度和跳出局部最优的能力; 最后, 将该算法应用于光伏系统 MPPT 控制, 以解决各种局部阴影条件下的最大功率点跟踪问题。仿真和实验验证了所提方法的有效性和鲁棒性。

## 1 局部遮阴下光伏阵列输出特性

### 1.1 光伏电池建模

非线性特性和变化的环境条件很容易影响光伏系统的性能, 建立精确而实用的光伏电池模型十分必要。单二极管模型因实现简单、精度高且所需的计算量低, 在光伏电池建模中被广泛采用<sup>[29]</sup>, 其结

构如图 1 所示。

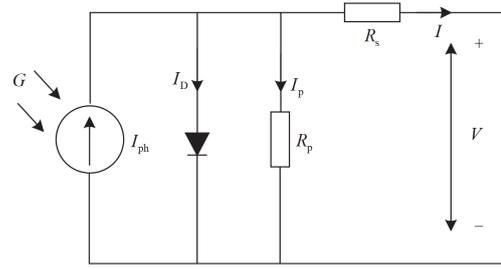


图 1 光伏电池单二极管模型

Fig. 1 Single diode model of photovoltaic cells

在图 1 中, 由基尔霍夫电流定律可得光伏电池输出电流数学表达式为

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t a}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (1)$$

式中:  $I$  为光伏电池输出电流;  $I_{ph}$  为光生电流;  $I_s$  为二极管反向饱和电流;  $V_t$  为热电压;  $V$  为光伏电池输出电压;  $R_s$  为串联电阻;  $R_p$  为并联电阻;  $a$  为二极管理想因子。

光伏电池的热电压、光生电流和二极管反向饱和电流可分别表示为

$$V_t = kT/q \quad (2)$$

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T - T_n)] \frac{G}{G_n} \quad (3)$$

$$I_s = \frac{I_{sc} + K_i(T - T_n)}{\exp\left(\frac{V_{oc} + K_v(T - T_n)}{aV_t}\right) - 1} \quad (4)$$

式中:  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为光伏电池温度;  $q$  为电子电荷量;  $I_{sc}$  为标准测试条件下的短路电流;  $T_n$  为标准测试温度;  $K_i$  为电流温度系数;  $K_v$  为电压温度系数;  $G$  为当前太阳辐照度;  $G_n$  为标准测试辐照度;  $V_{oc}$  为开路电压。

### 1.2 光伏阵列特性分析

为了分析光伏阵列在局部遮阴下的输出特性, 建立了如图 2 所示的  $3 \times 2$  光伏阵列模型。当某些光伏组件处在阴影下, 被遮挡的电池元件会消耗电能而不是产生电能, 导致光伏电池板温度过高, 形成“热斑效应”。在每个光伏组件上并联一个旁路二极管可有效抑制热斑效应对光伏组件造成的损坏。由于二极管的导通, PSC 下光伏阵列的  $P-U$  特性曲线呈现多峰值现象。

考虑到实际环境的复杂性, 设置了 4 种不同光照条件下的场景, 每种光照情况如表 1 所示。光伏组件温度为  $25^\circ\text{C}$ , 输出特性曲线如图 3 所示。

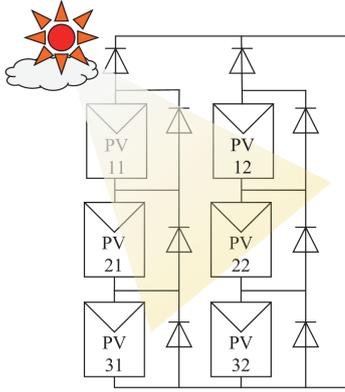


图 2 光伏阵列模型

Fig. 2 Model of photovoltaic array

表 1 4 种不同光照条件

Table 1 Four different lighting conditions

阴影模式	太阳辐照/(W/m <sup>2</sup> )	GMPP 位置	最大功率/W
无阴影(STC)	1000	1000	597
	1000	1000	
PSC1	1000	右侧	1000
	500		800
	300		600
PSC2	1000	中间	1000
	600		600
	300		300
PSC3	900	左侧	900
	300		300
	200		200

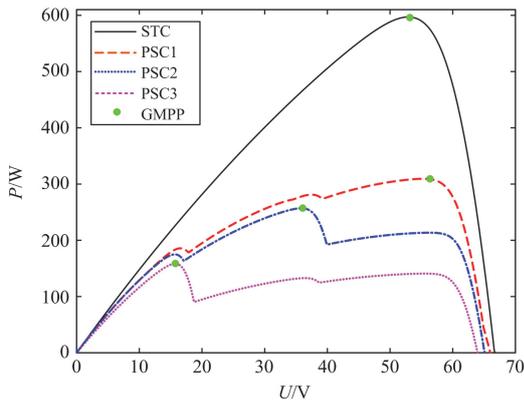


图 3 不同光照条件下的输出特性曲线

Fig. 3 Output characteristic curves under different lighting conditions

由图 3 可知，光伏阵列受光不同时，GMPP 出现的位置也会发生变化。当光伏阵列处于 PSC1 时，其最大功率点在右侧；当光伏阵列处于 PSC2 时，其最大功率点在中间；当光伏阵列处于 PSC3 时的

最大功率点在左侧。综上，不同天气条件下多变的 GMPP 位置和大小以及多个 LMPP 的特性，使得追踪最大功率变得十分困难。

## 2 改进算术优化算法及其在 MPPT 中的应用

### 2.1 算术优化算法原理

AOA 主要受到算术运算符在解决数学问题时分布行为的启发，即除法、乘法、加法和减法。AOA 基于四级层次结构，使用乘法和除法运算符进行全局勘探，局部开发阶段通过加减算子实现，具体优化过程如下所述<sup>[30]</sup>。

#### 1) 初始化阶段

AOA 从随机生成一组  $N$  个候选解  $X$  开始，如式(5)所示。

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,n} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{N,1} & x_{N,2} & \cdots & x_{N,n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中： $N$  为候选解的数量； $n$  为需要优化的变量数； $x_{N,n}$  为第  $N$  个解在第  $n$  维度中的位置。

在 AOA 开始寻优之前，需要在勘探阶段和开发阶段之间进行选择。设  $r_1$  为随机数， $r_1 \in [0,1]$ ，将数学优化器加速函数  $M_{OA}$  的大小与随机数  $r_1$  进行比较。如果  $r_1 > M_{OA}$ ，则进入勘探阶段，否则进入开发阶段。 $M_{OA}$  函数可表示为

$$M_{OA}(t) = M_{OA \min} + t \left( \frac{M_{OA \max} - M_{OA \min}}{T_{\max}} \right) \quad (6)$$

式中： $t$  为当前迭代次数； $T_{\max}$  为最大迭代次数； $M_{OA \min}$  和  $M_{OA \max}$  分别为  $M_{OA}$  的最小值和最大值，分别取 0.2 和 1。

#### 2) 勘探阶段

AOA 采用乘法和除法实现全局搜索，并逐步探索整个搜索空间以获得最佳位置。勘探阶段的位置更新公式可表示为

$$x_{i,j}(t+1) = \begin{cases} b_{\text{est}}(x_j) \div (M_{OP} + \varepsilon) \times Z_j, & r_2 < 0.5 \\ b_{\text{est}}(x_j) \times M_{OP} \times Z_j, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$Z_j = (U_j - L_j) \times \mu + L_j \quad (8)$$

式中： $x_{i,j}(t+1)$  为  $t+1$  次迭代时第  $i$  个候选解中第  $j$  维的位置； $b_{\text{est}}(x_j)$  为当前最优解在第  $j$  维的位置； $\varepsilon$  为一个小整数值，防止被除数为 0； $Z_j$  为中间变量； $U_j$  和  $L_j$  分别为第  $j$  维位置的上限和下限； $r_2$  为随机数， $r_2 \in [0,1]$ ； $\mu$  为可调参数，取值为 0.499；

$M_{OP}$  为数学优化器概率, 数学表达式为

$$M_{OP}(t) = 1 - \frac{(t)^{1/\alpha}}{(T_{\max})^{1/\alpha}} \quad (9)$$

式中:  $\alpha$  为敏感参数, 取值为 5。

### 3) 开发阶段

AOA 采用加减算子来实现局部搜索。加减算子虽然离散性较差, 但精度高, 在局部区域周围搜索最优值。开发阶段的位置更新公式为

$$x_{i,j}(t+1) = \begin{cases} b_{\text{est}}(x_j) - M_{OP} \times Z_j, & r_3 < 0.5 \\ b_{\text{est}}(x_j) + M_{OP} \times Z_j, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $r_3$  是随机数,  $r_3 \in [0, 1]$ 。

## 2.2 改进算术优化算法

### 2.2.1 Sobol 序列初始化种群

初始解的分布在一定程度上影响元启发式算法的寻优精度和收敛速度。均匀分布的初始解能覆盖整个搜索空间, 使算法寻优速度更快。标准 AOA 通过随机数方式初始化种群, 这种方法导致种群初始位置分布不均, 进而影响算法的优化性能。本文采用 Sobol 序列初始化 AOA 种群, Sobol 序列可以在整个空间生成分布更加均匀的随机数且不受种群规模的影响, 提高种群的多样性和遍历性。

设 Sobol 序列产生的随机数  $S_i$  的取值范围为  $[0, 1]$ , 全局最优解的取值范围为  $[L, U]$ , 种群初始化位置  $X_n$  可表示为

$$X_n = L + S_i \times (U - L) \quad (11)$$

假设随机数范围为  $[0, 1]$ , 在二维空间中, Sobol 序列初始化和随机初始化的种群位置分布对比如图 4 所示。

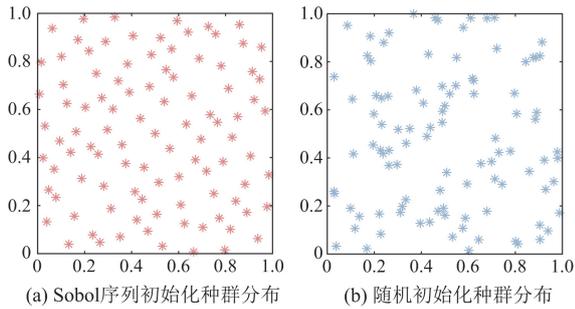


图 4 种群初始化分布图

Fig. 4 Distribution map of population initialization

从图 4 可以看出, Sobol 序列初始化相比于随机初始化种群分布更加均匀, 有效避免了个体重叠现象, 产生的候选解质量更高, 因此在解决多峰值优化问题时可以提升算法的搜索效率。

### 2.2.2 非线性数学优化器加速函数

数学优化器加速函数  $M_{OA}$  的值控制 AOA 是处

于勘探阶段还是开发阶段, 保持这两个阶段的动态平衡对于搜寻全局最优解至关重要。由式(6)可知,  $M_{OA}$  是一种线性控制方法, 随着迭代次数的增加而线性增长, 难以完全拟合算法复杂的非线性搜索过程, 从而导致算法过早收敛。在迭代初期, 递增过快的  $M_{OA}$  使 AOA 不能搜索更多候选解区域, 从而影响算法的全局搜索能力, 迭代后期的收敛速度也较慢。为了解决这个问题, 本文提出了一种可调节非线性数学优化器加速函数  $M_{NMOA}$ , 其数学模型可表示为

$$M_{NMOA}(t) = M_{\min} + \frac{(M_{\max} - M_{\min}) \times (e^{k \times \frac{t}{T_{\max}}} - 1)}{e^k - 1} \quad (12)$$

式中:  $k$  为  $M_{NMOA}$  的非线性调节因子, 经过测试, 本文取  $k$  为 2.8 时, 效果较好;  $M_{\min}$  和  $M_{\max}$  分别为  $M_{NMOA}$  的最小值和最大值, 分别取 0.2 和 1。

图 5 为  $M_{NMOA}$  与  $M_{OA}$  的对比曲线。从图 5 中可以看出, 本文设计的  $M_{NMOA}$  在迭代初期增长平缓, 使算法尽可能多地搜索整个空间, 增强算法全局搜索能力, 有助于算法跳出局部最优。在迭代后期增长迅速, 使算法快速收敛到全局最优值, 增强算法的局部寻优能力, 提高求解精度。

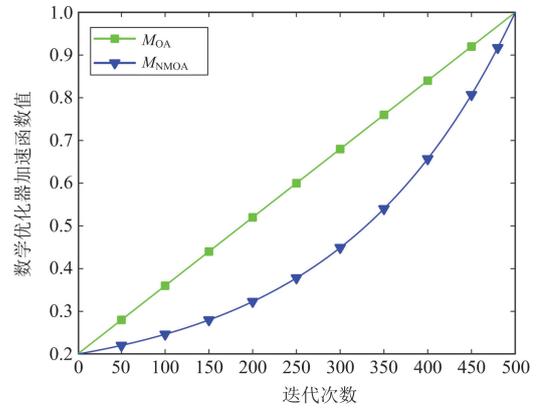


图 5  $M_{NMOA}$  与  $M_{OA}$  曲线对比图

Fig. 5 Comparison of  $M_{NMOA}$  and  $M_{OA}$  curves

### 2.2.3 Lévy 飞行策略和准反向学习

Lévy 飞行是一种随机游走在过程, 其移动步长符合重尾分布, 在多数短距离移动中穿插长距离移动, 可有效提高算法的全局搜索能力<sup>[31]</sup>。随机步长来自 Lévy 分布, 采用 Mantegna 算法计算随机步长, 如式(13)所示。

$$S = \delta \times \frac{u}{|v|^{1/\beta}} \quad (13)$$

式中:  $\delta$  为步长限定系数;  $u$ 、 $v$  服从正态分布,

$u \sim N(0, \sigma_u^2)$ ,  $v \sim N(0, \sigma_v^2)$ , 其中  $\sigma_u$ 、 $\sigma_v$  如式(14)所示;  $\beta$  为参数, 取 1.5。

$$\begin{cases} \sigma_u = \left[ \frac{\Gamma(1+\beta)\sin(\pi\beta/2)}{\Gamma(1+\beta/2) \times \beta \times 2^{(\beta-1)/2}} \right]^{1/\beta} \\ \sigma_v = 1 \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\Gamma$  为标准的伽马函数。

AOA 通过式(7)和式(10)进行位置更新, 在处理多数优化问题时都具有很好的性能, 但是面对多峰等复杂问题时, 仍存在陷入局部最优的可能。一个原因是  $\mu$  作为算法勘探和开发的重要参数, 其值被固定为 0.499。其次,  $M_{OP}$  在每次迭代时发生变化, 但是变化趋势几乎是线性的。AOA 位置更新主要靠当前最优解引导, 在陷入局部最优后难以跳出。为改善这些问题, 将 Lévy 随机步长融入到 AOA 的位置更新中, 候选解可以偶尔进行大的跳跃, 探索搜索空间中的新区域并有可能找到新的最优解。使用式(13)将式(7)和式(10)所示的位置更新公式修改为

$$x_{i,j}(t+1) = \begin{cases} b_{est}(x_j) \div S \times (M_{OP} + \varepsilon) \times Z_j, & r_2 < 0.5 \\ b_{est}(x_j) \times M_{OP} \times S \times Z_j, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

$$x_{i,j}(t+1) = \begin{cases} b_{est}(x_j) - S \times M_{OP} \times Z_j, & r_2 < 0.5 \\ b_{est}(x_j) + S \times M_{OP} \times Z_j, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

由式(15)和式(16)可知, 改进后的算法位置更新依靠当前最优解和 Lévy 飞行共同引导, 使其可以探索搜索空间的新区域, 并有可能在每次迭代中找到传统 AOA 找不到的新解, 避免光伏系统运行时陷入局部最大功率点, 从而减小功率损失。

此外, 基于准反向学习(quasi opposition-based learning, QOBL)<sup>[32]</sup> 是反向学习 (opposition-based learning, OBL) 的一种变体, 以往研究证明了在寻找全局最优解时, 使用准反向解比随机解和反向解更易接近全局最优解。因此, 为了增强 IAOA 的收敛速度, 将 QOBL 应用于每次迭代结束时的最佳解, 以便有更高的几率接近全局最优解。最佳解的准反向解计算公式为

$$\hat{x}_{best} = L + U - x_{best} \quad (17)$$

$$\hat{x}_{best}^q = \text{rand} \left( \frac{L+U}{2}, \hat{x}_{best} \right) \quad (18)$$

式中:  $x_{best}$  为最佳解;  $\hat{x}_{best}$  为最佳解的反向解;  $\hat{x}_{best}^q$  为最佳解的准反向解。

准反向解的示意图如图 6 所示。将 QOBL 生成的准反向解  $\hat{x}_{best}^q$  与最佳解  $x_{best}$  的适应度进行比较, 选出最优个体进入下一次迭代。通过这种方式使算法不断获得更优解, 提高收敛速度。

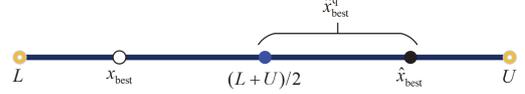


图 6 准反向解示意图

Fig. 6 Quasi opposition-based learning solution diagram

### 2.3 IAOA 在光伏 MPPT 控制中的应用

PSC 下的光伏 MPPT 是一个一维非线性问题, 将所提出的 IAOA 应用于 MPPT 控制, 采用直接控制占空比的方法, IAOA 中的除法、乘法、加法和减法搜索策略被指定为决策变量, 用于更新 DC-DC 变换器的占空比。适应度函数被定义为光伏阵列的输出功率, 则 MPPT 的优化模型可表述为

$$\max f(d_i) = P_{pv} = V_{pv} \times I_{pv} \quad (19)$$

式中:  $d_i$  为第  $i$  个粒子的占空比;  $P_{pv}$  为光伏阵列的输出功率;  $V_{pv}$ 、 $I_{pv}$  分别为光伏阵列的输入电压和电流。

此时, 式(15)和式(16)可变为

$$d_{ci}(t+1) = \begin{cases} b_{est}(d_i) \div S \times (M_{OP} + \varepsilon) \times Z, & r_2 < 0.5 \\ b_{est}(d_i) \times M_{OP} \times S \times Z, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (20)$$

$$d_{ci}(t+1) = \begin{cases} b_{est}(d_i) - S \times M_{OP} \times Z, & r_2 < 0.5 \\ b_{est}(d_i) + M_{OP} \times S \times Z, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (21)$$

$$Z = (U - L) \times \mu + L \quad (22)$$

式中:  $d_{ci}(t+1)$  为  $t+1$  次迭代时第  $i$  个粒子的占空比。

光伏阵列在辐照度变化下, 由于 GMPP 位置随之移动, 输出功率会发生急剧变化。为保证所提出的 MPPT 算法能够准确地找到新的 GMPP, 设置算法重启条件为

$$\frac{|P_{new} - P_{last}|}{P_{last}} \geq 2\% \quad (23)$$

式中:  $P_{new}$  为当前输出功率;  $P_{last}$  为上一采样周期的输出功率。

基于 IAOA 的光伏 MPPT 控制流程如图 7 所示。分步过程如下:

步骤 1 初始化 IAOA 中的参数, 包括候选解数量  $N$ , 最大迭代次数  $T_{max}$  等。

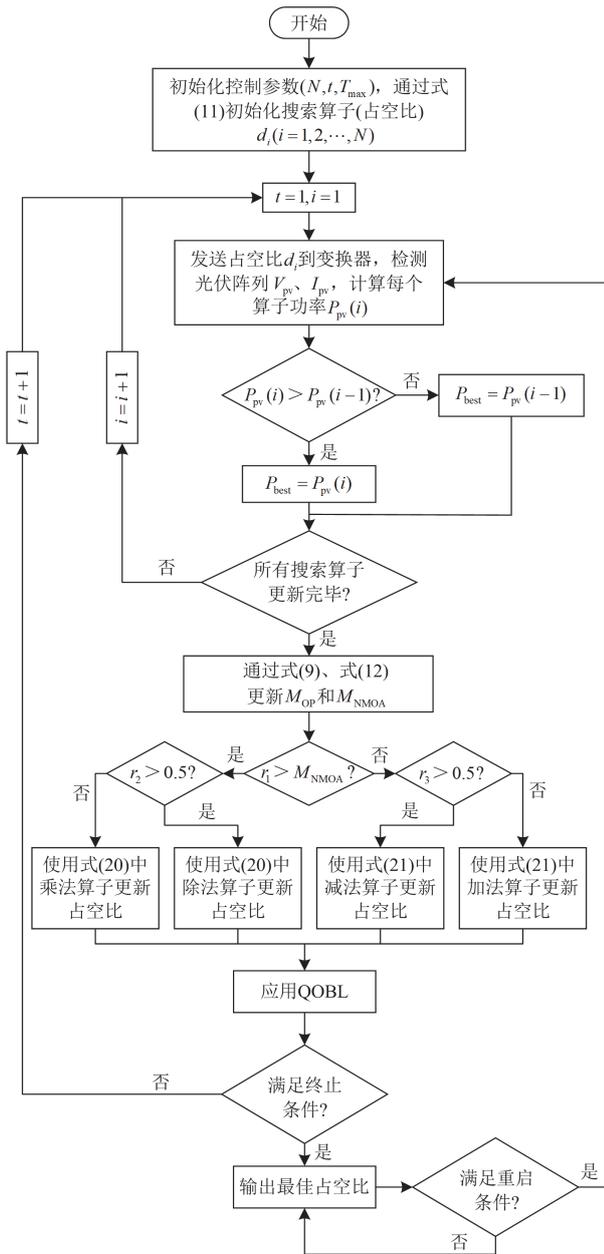


图7 基于IAOA的MPPT流程图

Fig. 7 Flowchart of MPPT based on IAOA

步骤2 采用 Sobol 序列生成均匀分布的初始种群, 即占空比参数。

步骤3 检测电压、电流, 并计算每个占空比对应的适应度函数值, 记录最佳占空比和适应度值。

步骤4 通过式(9)与式(12)更新  $M_{OP}$  和  $M_{NMOA}$ 。

步骤5 更新占空比  $d_i$ 。将随机数  $r_1$  与  $M_{NMOA}$  进行比较, 若  $r_1 > M_{NMOA}$ , 则根据式(20)更新, 否则根据式(21)更新。

步骤6 将更新后的最佳解与生成的准反向解的适应度函数值进行比较, 保留最优个体进入下一

次迭代。

步骤7 检查是否满足终止条件, 如果是, 则输出当前最佳占空比并终止搜索, 否则转至步骤3。若满足重启条件, 则转至步骤1, 反之, 继续输出最佳占空比。

### 3 仿真分析

为验证所提出的 MPPT 方法的可行性和有效性, 在 Matlab/Simulink 中建立了如图8所示的仿真模型。光伏阵列由  $3 \times 2$  个串并联组件组成, 其中单个光伏组件参数为: 开路电压  $V_{oc} = 22.49 \text{ V}$ , 短路电流  $I_{sc} = 7.78 \text{ A}$ , 最大功率点电压  $V_m = 17.88 \text{ V}$ , 最大功率点电流  $I_m = 5.65 \text{ A}$ 。Boost 升压电路参数为: 输入电容  $C_1 = 470 \mu\text{F}$ , 输出电容  $C_2 = 47 \mu\text{F}$ , 电感  $L = 1 \text{ mH}$ , 负载  $R = 10 \Omega$ , 开关频率  $f_s = 20 \text{ kHz}$ 。

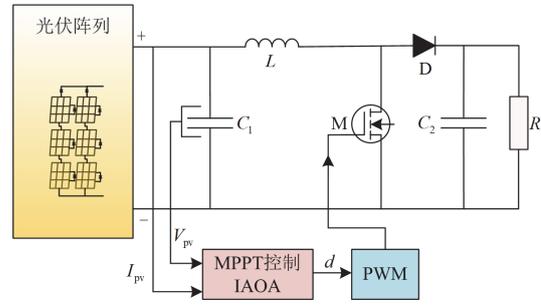


图8 光伏系统 MPPT 仿真模型

Fig. 8 MPPT simulation model of photovoltaic system

将所提 IAOA 与 AOA、IGWO<sup>[21]</sup>算法、PSO-P&O<sup>[19]</sup>算法在不同天气条件下的跟踪性能进行比较, 所有算法的种群规模为4, 最大迭代次数为30, 采用的光伏阵列辐照度和输出特性曲线如表1和图3所示。第一个场景测试了所有算法在 STC 和 PSC 下的性能, 阴影条件下又分为3种情况, 以测试不同 GMPP 位置下算法的性能。第二个场景是测试所提 IAOA 在辐照度快速变化时的性能。

#### 3.1 静态环境下的功率跟踪

在此环境下, 光伏阵列天气情况分为 STC 和3种 PSC 光照模式, 用来模拟实际天气情况。3种 PSC 光照模式模拟了光伏系统 GMPPs 可能出现的任何位置。仿真结果如图9所示。

STC 模式下光伏阵列最大功率为  $597 \text{ W}$ , 由图9(a)和表2可知, 4种算法均能收敛到近似 GMPP, PSO-P&O、IGWO、AOA 和所提 IAOA 达到 GMPP 的时间分别约为  $0.24 \text{ s}$ 、 $0.165 \text{ s}$ 、 $0.075 \text{ s}$  和  $0.05 \text{ s}$ 。相比之下, 所提算法收敛速度最快, 功率波动较小, 从而显著降低了功率损耗。

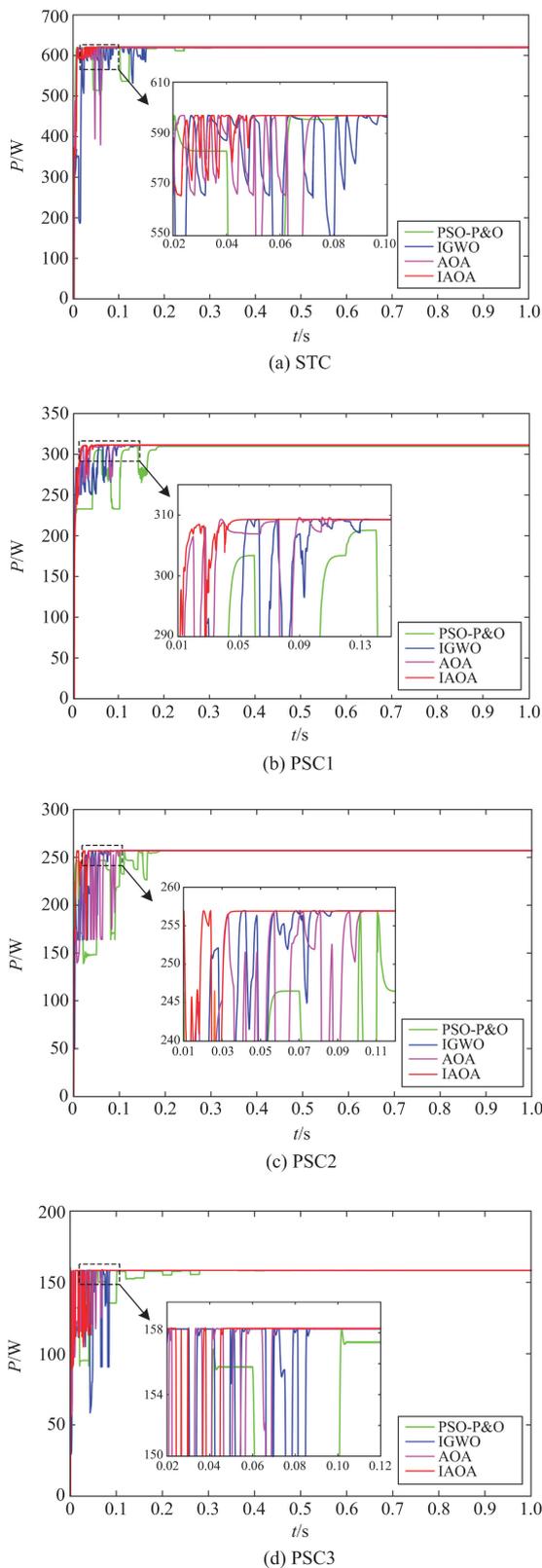


图 9 不同光照条件下光伏阵列输出功率波形  
Fig. 9 PV array output power waveforms under different lighting conditions

PSC1 下光伏阵列的 GMPP 位于  $P-U$  特性曲线的右侧，最大功率为 309.3 W。由图 9(b)可知，PSO-P&O、IGWO、AOA 和所提 IAOA 跟踪的功率分别约为 307.5 W、308.96 W、308.55 W 和 309.15 W，跟踪时间分别约为 0.19 s、0.141 s、0.124 s 和 0.057 s。从图 9(b)可以看出，PSO-P&O 跟踪时间最长，并且在 LMPP 处频繁波动。AOA 比 IGWO 算法跟踪速度稍快一点，但跟踪精度上略差。IAOA 跟踪时间最短，跟踪精度也最高。

PSC2 下光伏阵列的 GMPP 位于  $P-U$  特性曲线的中间，最大功率为 257 W，由图 9(c)可知，IAOA 在 0.04 s 达到约 256.88 W 的稳定输出功率，PSO-P&O 算法性能表现最差，在 0.19 s 时稳定输出功率约 255.64 W。PSO-P&O、IGWO、AOA 在跟踪 GMPP 时存在相对较大的功率振荡，而 IAOA 只是在算法开始时存在一些振荡，然后迅速收敛到 GMPP。

PSC3 下光伏阵列的 GMPP 位于  $P-U$  特性曲线的左侧，最大功率为 158.3 W，由图 9(d)可知，PSO-P&O、IGWO、AOA 和所提 IAOA 跟踪的功率分别约为 157.13 W、157.95 W、157.89 W 和 158.16 W。与其他算法相比，IAOA 达到 GMPP 的速度更快。IAOA 的跟踪时间约为 0.046 s，AOA 的跟踪时间约为 0.072 s，IGWO 的跟踪时间约为 0.087 s，而 PSO-P&O 的跟踪时间约为 0.283 s。这意味着 IAOA 的跟踪时间与 AOA 相比减少了约 36%，与 IGWO 相比减少了约 47%，与 PSO-P&O 相比减少了约 84%。

表 2 给出了静态环境下 4 种算法的 MPPT 仿真测试结果。除了输出功率外，还通过跟踪时间和跟踪效率来评估 MPPT 算法的性能。与 AOA 以及其

表 2 静态环境下 MPPT 仿真测试结果

阴影模式	算法	跟踪时间/s	最大功率/W	跟踪功率/W	跟踪效率/%
STC	PSO-P&O	0.240	597	596.78	99.96
	IGWO	0.165		596.85	99.97
	AOA	0.075		596.83	99.97
	IAOA	0.050		596.92	99.98
PSC1	PSO-P&O	0.190	309.3	307.50	99.42
	IGWO	0.141		308.96	99.89
	AOA	0.124		308.55	99.76
	IAOA	0.057		309.15	99.95
PSC2	PSO-P&O	0.190	257	255.64	99.47
	IGWO	0.085		256.48	99.80
	AOA	0.100		256.41	99.77
	IAOA	0.040		256.88	99.95
PSC3	PSO-P&O	0.283	158.3	157.13	99.26
	IGWO	0.087		157.95	99.78
	AOA	0.072		157.89	99.74
	IAOA	0.046		158.16	99.91

他 MPPT 算法相比, IAOA 利用 Sobol 序列生成分布均匀的初始解, 并且对每次迭代后的最优解应用 QOBL, 提升算法的收敛速度。因此, 所提 IAOA 在 STC 和 PSC 下跟踪到 GMPP 的时间更短。此外, IAOA 通过非线性加速函数平衡算法全局搜索和局部寻优能力, 并融入随机步长的位置更新, 有效减小了功率振荡, 避免陷入 LMPP, 提高了跟踪精度和效率。

### 3.2 动态环境下的功率跟踪

为了测试所提算法在光照突变时的跟踪性能, 光伏系统的光照模式从 PSC1 到无阴影, 再到 PSC3, 最后到 PSC2 连续变化, 每次光照变化持续 1 s, 仿真结果如图 10 所示。

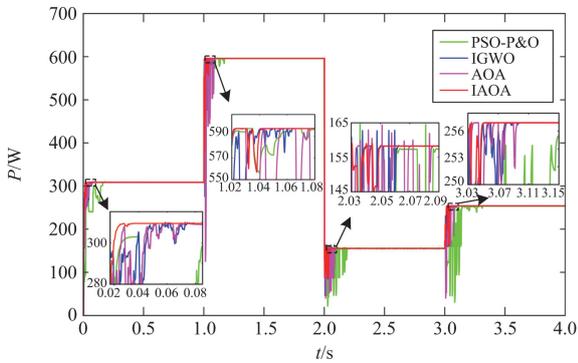


图 10 动态环境下光伏阵列输出功率波形

Fig. 10 PV array output power waveforms in a dynamic environment

从图 10 可以看出, 所提算法在连续 4 个时间间隔内跟踪 GMPP 速度均为最快, 精度最高, 功率振荡也为最小。在 PSC1 下, IAOA 在 0.042 s 跟踪到的功率达到 309.25 W, 其次是 AOA, 在 0.075 s 跟踪到的功率达到 308.35 W, IGWO 算法在 0.082 s 跟踪到的功率达到 308.79 W, PSO-P&O 算法在 0.165 s 跟踪到的功率达到 307.14 W。在 1 s 时光照突变为无阴影, IAOA 仅仅耗时 0.045 s 就重新跟踪到新的 GMPP, AOA、IGWO、PSO-P&O 算法的跟踪时间分别为 0.087 s、0.066 s 和 0.174 s。在 PSC2 和 PSC3 跟踪开始时, PSO-P&O 算法出现长时间的功率振荡, 并且稳态时功率在最大功率点周围持续振荡, 导致相当大的功率损耗。AOA 和 IGWO 算法显示出短暂的较高振荡后成功跟踪到 GMPP, 但在跟踪精度和收敛速度上不足。而 IAOA 在经过几次较小的功率振荡后快速跟踪到 GMPP, 使系统更快地输出最大功率, 极大地降低了功率损失, 同时可以看出所提算法在光照突变时依然可以准确、快速地跟踪到 GMPP, 并且具有非常高的鲁棒性。

## 4 实验分析

为了进一步验证所提基于 IAOA 的 MPPT 控制方法的可行性, 搭建了 MPPT 实验平台, 如图 11 所示。实验装置主要由光伏组件、Boost 变换器和电阻负载组成, 光伏组件参数为: 开路电压  $V_{oc} = 21.6$  V, 短路电流  $I_{sc} = 3.1$  A, 最大功率点电压  $V_m = 18$  V, 最大功率点电流  $I_m = 2.78$  A。TMS320F28335 DSP 控制器用于实现 MPPT 算法, 该控制器通过向驱动电路发送 PWM 信号, 使光伏阵列输出最大功率。使用电压和电流探头感测光伏阵列的输出电压和电流信号。

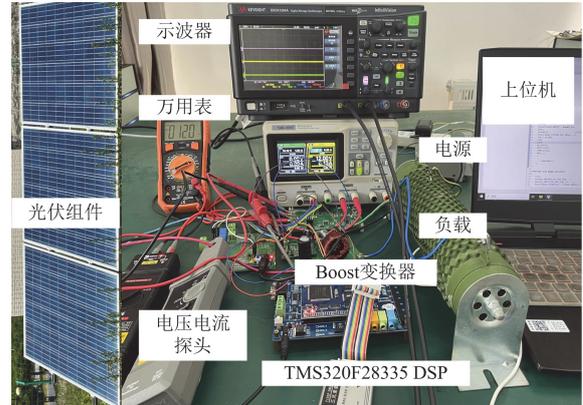


图 11 MPPT 实验平台

Fig. 11 MPPT experimental platform

实验采用  $3 \times 1$  的光伏阵列放置于室外空地, 分别在无阴影(STC)和 PSC 下进行测试, 通过不透明白板对光伏组件进行部分遮挡, 用于模拟局部遮阴情况。两种情况下的光伏阵列  $P-U$  特性曲线如图 12 所示。

从图 12 中看出, STC 下最大功率点电压接近 53.6 V, 最大功率约为 137.2 W, PSC 下最大功率点电压接近 34 V, 最大功率约为 78.92 W。

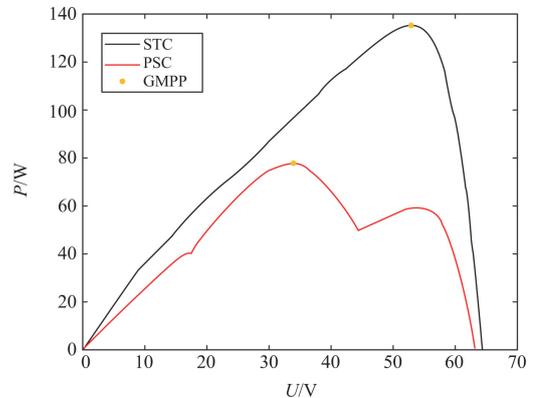
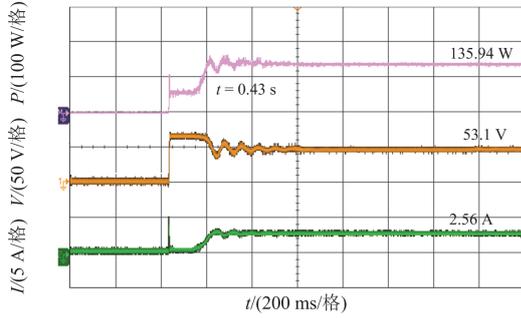


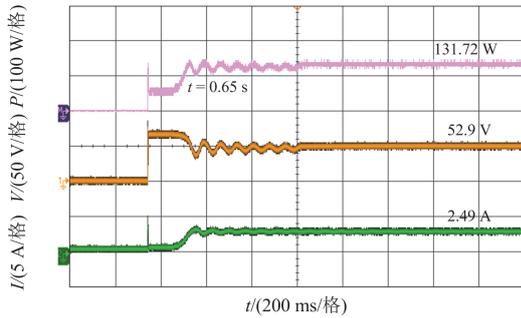
图 12  $P-U$  特性曲线

Fig. 12  $P-U$  characteristic curves

基于 IAOA 和 AOA 的光伏系统输出波形如图 13 和图 14 所示。



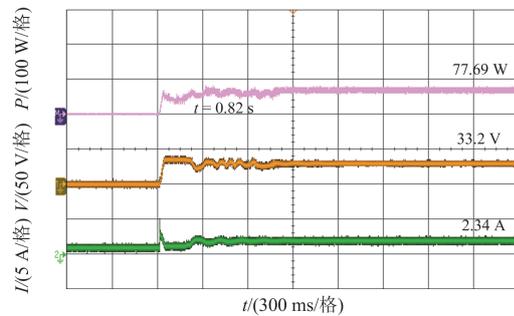
(a) IAOA的输出波形



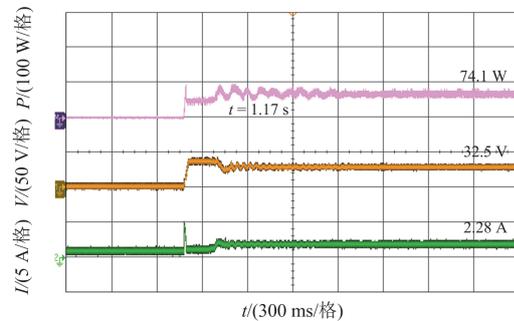
(b) AOA的输出波形

图 13 无阴影条件下的实验结果

Fig. 13 Experimental results under unshaded conditions



(a) IAOA的输出波形



(b) AOA的输出波形

图 14 局部遮阴条件下的实验结果

Fig. 14 Experimental results under partial shading conditions

从图 13 可以看出, 在无阴影条件下, IAOA 仅用约 0.43 s 便跟踪到约 135.94 W 的最大输出功率, 跟踪效率为 99.08 %; AOA 需要约 0.65 s 跟踪到约 131.72 W 的输出功率, 跟踪效率为 96%。与 AOA 相比, 所提算法的跟踪速度提升了 33.84%, 发电效率更高。

从图 14 可以看出, 在局部遮阴条件下, IAOA 和 AOA 跟踪的最大功率分别约为 77.69 W、74.1 W, 跟踪时间分别约为 0.82 s、1.17 s, 功率损耗分别为 1.56%和 6.11%。相比之下, 所提算法功率损耗更低, 性能表现更好。

综上, 所提基于 IAOA 的 MPPT 算法在实际环境下也具有出色的性能, 能够适应不同的天气, 具有极大的可行性。

### 5 结论

本文提出一种基于改进算术优化算法的光伏多峰 MPPT 方法。通过仿真和实验结果分析, 得出以下主要结论:

- 1) 基于 IAOA 的 MPPT 算法在无阴影、局部遮阴和变化阴影条件下都具有较好的跟踪性能, 可以应对各种复杂环境。
- 2) 所提算法相比于 AOA、IGWO 和 PSO-P&O 的 MPPT 算法, 在静态环境下收敛速度和跟踪精度均为最优, 且功率波动更小。
- 3) 所提算法在动态环境下能够快速准确地追踪到新的最大功率点, 且追踪过程中功率振荡最小, 表现出较高的鲁棒性。

### 参考文献

[1] 郝文斌, 孟志高, 张勇, 等. 新型电力系统下多分布式电源接入配电网承载力评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 23-33.  
HAO Wenbin, MENG Zhigao, ZHANG Yong, et al. Carrying capacity evaluation of multiple distributed power supply access to the distribution network with the background of a new power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 23-33.

[2] 宁可儿, 刘俊杉, 张超逸, 等. 考虑光伏消纳的配电网储能能与直流选址定容协同规划[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(1):45-53.  
NING Keer, LIU Junshan, ZHANG Chaoyi, et al. Coordinated planning of distribution grid energy storage and DC siting and sizing considering photovoltaic consumption[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(1): 45-53.

[3] 刘星宇, 朱金荣, 盘瑶, 等. 基于 Fourier 拟合的光伏

- 跟踪系统设计[J]. 南方能源建设, 2024, 11(1): 54-63.
- LIU Xingyu, ZHU Jinrong, PAN Yao, et al. Design of photovoltaic tracking system based on fourier fitting[J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(1): 54-63.
- [4] KOH J S, TAN R H G, LIM W H, et al. A modified particle swarm optimization for efficient maximum power point tracking under partial shading condition[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(3): 1822-1834.
- [5] 李靖, 徐天奇, 李琰, 等. 基于多市场耦合的新能源综合发电项目的盈利能力研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 65-76.
- LI Jing, XU Tianqi, LI Yan, et al. Profitability study of multi-market coupled integrated renewable energy generation projects[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 65-76.
- [6] 董密, 胡佳盛, 杨建, 等. 基于改进黏菌优化算法的光伏多峰 MPPT 控制策略[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(8): 1440-1448.
- DONG Mi, HU Jiasheng, YANG Jian, et al. An improved slime mould algorithm based MPPT strategy for multi-peak photovoltaic system[J]. Control Theory & Applications, 2023, 40(8): 1440-1448.
- [7] ABDEL-SALAM M, EI-MOHANDES MT, GODA M. An improved perturb-and-observe based MPPT method for PV systems under varying irradiation levels[J]. Solar Energy, 2018, 171: 547-561.
- [8] 盛四清, 陈玉良. 基于功率预测的新型变步长电导增量法最大功率点跟踪策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 42-48.
- SHENG Siqing, CHEN Yuliang. Maximum power point tracking strategy based on power predication for a novel variable step-size incremental conductance algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 42-48.
- [9] YANG B, ZHU T, WANG J, et al. Comprehensive overview of maximum power point tracking algorithms of PV systems under partial shading condition[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 268.
- [10] 罗茜, 陈卓, 郝正航, 等. 基于新型趋近律的光伏 MPPT 控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 139-153.
- LUO Qian, CHEN Zhuo, HAO Zhenghang, et al. MPPT control strategy based on a new reaching law for a photovoltaic power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 139-153.
- [11] SAIBAL M, ASHOK K A, DEEPAK K S. Novel Lyapunov-based rapid and ripple-free MPPT using a robust model reference adaptive controller for solar PV system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 1-25.
- [12] YANG B, XIE R, DUAN J, et al. State-of-the-art review of MPPT techniques for hybrid PV-TEG systems: modeling, methodologies, and perspectives[J]. Global Energy Interconnection, 2023, 6(5): 567-591.
- [13] VERMA P, GARG R, MAHAJAN P. Asymmetrical interval type-2 fuzzy logic control based MPPT tuning for PV system under partial shading condition[J]. ISA Transactions, 2020, 100: 251-263.
- [14] ALLAHABADI S, IMAN-EINI H, FARHANGI S. Fast artificial neural network based method for estimation of the global maximum power point in photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(6): 5879-5888.
- [15] ENANY M, FARAHAT M, NASR, A. Modeling and evaluation of main maximum power point tracking algorithms for photovoltaics systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 58: 1578-1586.
- [16] KOAD R B A, ZOBAA A F, EI-SHAHAT A. A novel MPPT algorithm based on particle swarm optimization for photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 8(2): 468-476.
- [17] REFAAT A, KHALIFA A E, ELSAKKA M M, et al. A novel metaheuristic MPPT technique based on enhanced autonomous group particle swarm optimization algorithm to track the GMPP under partial shading conditions-experimental validation[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 287.
- [18] 赵斌, 袁清, 王力, 等. 基于改进蚁狮算法的光伏多峰值 MPPT 控制[J]. 太阳能学报, 2021, 42(9): 132-139.
- ZHAO Bin, YUAN Qing, WANG Li, et al. Multi-peak MPPT control of PV array based on improved ALO algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(9): 132-139.
- [19] 张明锐, 陈喆旸, 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.
- ZHANG Mingrui, CHEN Zheyang, WEI Li. Application of immune firefly algorithms in photovoltaic array maximum power point tracking[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(7): 1553-1562.
- [20] 赵升旗, 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 Shuaiqi, XIAO Hui, LIU Zhongbing, et al. Photovoltaic maximum power point tracking under partial shading based on CSA-IP&O[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 26-32.

- [21] 盛四清, 陈玉良, 张晶晶. 基于差分进化人工蜂群算法的光伏最大功率跟踪策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 23-29.  
SHENG Siqing, CHEN Yuliang, ZHANG Jingjing. Research on maximum power point tracking strategy based on differential evolution artificial bee colony algorithm of photovoltaic system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 23-29.
- [22] FIGUEIREDO S, AQUINO R N A L E S. Hybrid MPPT technique PSO-P&O applied to photovoltaic systems under uniform and partial shading conditions[J]. IEEE Latin America Transactions, 2021, 19(10): 1610-1617.
- [23] 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.  
HUA Yunhao, ZHU Wu, JIN Yiqi, et al. Research on photovoltaic MPPT control based on adaptive mutation particle swarm optimization algorithm[J]. Acta Energiac Solaris Sinica, 2022, 43(4): 219-225.
- [24] 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 Mingxuan, XU Zhao, CUI Lichuang, et al. Research on multi-peak MPPT of photovoltaic arrays based on modified gray wolf optimization algorithm[J]. Acta Energiac Solaris Sinica, 2023, 44(3): 450-456.
- [25] 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 Junjiang, ZHAO Mingyin, et al. Research on MPPT control of photovoltaic power generation system based on improved whale optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2023, 35(2): 19-26.
- [26] 余洋, 陈东阳, 吴玉威, 等. 风电波动平抑下考虑 SOC 均衡及收益的电池储能功率分配策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(4): 1714-1723.  
YU Yang, CHEN Dongyang, WU Yuwei, et al. Power allocation strategy considering SOC balance and income for battery energy storage in smoothing wind power fluctuations[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1714-1723.
- [27] CHTITA S, DEROUICH A, MOTAHHIR S, et al. A new MPPT design using arithmetic optimization algorithm for PV energy storage systems operating under partial shading conditions[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 289.
- [28] 兰周新, 何庆. 多策略融合算术优化算法及其工程优化[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(3): 758-763.  
LAN Zhouxin, HE Qing. Multi-strategy fusion arithmetic optimization algorithm and its application of project optimization[J]. Application Research of Computers, 2022, 39(3): 758-763.
- [29] 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跟踪[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 99-107.  
SHANG Liqun, LI Fan. PV power point tracking based on adaptive cuckoo search and perturbation observation method[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 99-107.
- [30] ABUALIGAH L, DIABAT A, MIRJALILI S, et al. The arithmetic optimization algorithm[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2021, 376.
- [31] HOUSSEIN E H, SAAD M R, HASHIM F A, et al. Lévy flight distribution: a new metaheuristic algorithm for solving engineering optimization problems[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2020, 94.
- [32] LUO W, YU X. Reinforcement learning-based modified cuckoo search algorithm for economic dispatch problems[J]. Knowledge-Based Systems, 2022, 257.

收稿日期: 2024-06-18; 修回日期: 2024-12-18

作者简介:

刘春喜(1977—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为双向变流器拓扑结构及其控制技术; E-mail: Intulcx@163.com

黄远航(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光伏发电及并网技术; E-mail: 1316634411@qq.com

周立(1963—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为节能型电力电子技术及应用。E-mail: 834661681@qq.com

(编辑 魏小丽)