

DOI: 10.19666/j.rlfed.202401043

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

朱福宝¹, 付文龙^{1,2}, 张海荣³, 吴川锋¹, 黄玉光¹, 王仁明^{1,2}

(1.三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;

2.三峡大学梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002;

3.中国长江电力股份有限公司, 湖北 宜昌 443133)

[摘要] 光伏阵列在局部遮荫环境下的 $P-U$ 特性曲线呈现多峰特性, 导致传统最大功率点跟踪 (MPPT) 算法在跟踪最大功率时失效。为此, 提出一种基于改进金枪鱼算法的光伏 MPPT 双层控制模型, 在上层中将莱维飞行 (Levy) 策略和多项式变异策略嵌入金枪鱼算法中, 构建莱维-多项式变异金枪鱼算法 (LPTSO) 来搜索全局功率最大点; 在下层中采用扰动观察法对全局最大功率点进行局部跟踪, 以降低局部遮荫环境下的功率振荡。将该双层控制模型应用于光伏 MPPT 仿真系统中, 仿真实验结果表明, 针对多峰 MPPT 控制, 所提模型在收敛速度、跟踪效率、功率振荡等方面都有较大提升, 该光伏 MPPT 双层控制模型能够有效解决局部遮荫环境下最大功率跟踪失效的问题。

[关键词] 光伏阵列; 局部遮荫; 最大功率点跟踪; 金枪鱼算法; 扰动观察法

[引用本文格式] 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. ZHU Fubao, FU Wenlong, ZHANG Hairong, et al. Photovoltaic MPPT control under local shade based on improved TSO algorithm[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(6): 30-38.

Photovoltaic MPPT control under local shade based on improved TSO algorithm

ZHU Fubao¹, FU Wenlong^{1,2}, ZHANG Hairong³, WU Chuanfeng¹,
HUANG Yuguang¹, WANG Renming^{1,2}

(1.College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2.Hubei Key Laboratory of Cascaded Hydropower Station Operation & Control, Three Gorges University, Yichang 443002, China;

3.China Yangtze Power Company Limited, Yichang 443133, China)

Abstract: The $P-U$ characteristic curve of a photovoltaic array exhibits multi-peak characteristics in partially shaded environments, leading to the inefficiency of conventional maximum power point tracking (MPPT) algorithm in tracking the maximum power. To address this issue, this paper proposes a two-layer control model for photovoltaic MPPT based on an improved tuned swarm optimization (TSO) algorithm. In the upper layer, the Levy flight strategy and polynomial mutation strategy are embedded into tuna algorithm, creating the Levy-polynomial mutation tuna swam optimization (LPTSO) to search for the global maximum power point. In the lower layer, the perturbation observation method is employed to locally track the global maximum power point, thereby reducing power oscillations in local shading environments. The two-layer control model is applied to the photovoltaic MPPT simulation system, and the simulation experimental results show that, for multi-peak MPPT control, the proposed model achieves significant improvements in convergence speed, tracking efficiency, power oscillations, etc. In conclusion, the proposed two-layer control model for photovoltaic MPPT effectively addresses the issue of maximum power tracking failure in partially shaded environments.

收稿日期: 2024-01-24

基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目 (2022CFD170)

Supported by: Natural Science Foundation of Hubei Province (2022CFD170)

第一作者简介: 朱福宝 (1998), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电技术, 1147089743@qq.com.

通信作者简介: 付文龙 (1988), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源发电预测和新能源发电系统综合建模, ctgu_fuwenlong@126.com.

Key words: photovoltaic array; local shading; maximum power point tracking; tuna algorithm; perturbation observation method

可再生能源作为清洁和可持续的能源形式正受到越来越多的关注,太阳能是其中最具潜力和普遍性的能源之一^[1]。在太阳能众多的利用形式中,光伏发电是一种高效的能源利用方式,凭借无污染、功率扩展性强、操作和维护简单等优势得到迅速发展。为了能最大限度地提高太阳能的利用率,需要对光伏发电系统进行最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT),确保其尽可能工作在最大功率点^[2]。

光伏阵列在不同的光照模式与温度下,其功率-电压($P-U$)特性曲线呈现不同的特性。在均匀光照条件下,光伏阵列的 $P-U$ 特性曲线呈单峰特性。此时,使用扰动观察法(P&O)^[3-4]和电导增量法(INC)^[5-6]等传统 MPPT 控制方法能跟踪到最大功率点,但这些方法在最大功率点处存在振荡。而在局部遮荫环境下,光伏阵列的 $P-U$ 特性曲线呈多峰特性,传统的 MPPT 控制方法通常会陷入局部最优值^[7]。为此,一些学者对传统的 MPPT 方法和智能算法进行改进。文献[8]将改进差分进化算法(orderly modified differential evolution, OMDE)和 P&O 算法相结合的 OMDE-P&O 算法应用到 MPPT 控制中,提高了算法的收敛速度,但是在功率收敛过程中的波动较大;文献[9]对黏菌算法进行了改进,将混沌映射函数、高斯变异策略和算术优化算法(AOA)中的加减算子引入黏菌算法中,提高了算法的全局搜索能力和跳出局部最优解的概率;文献[10]提出一种自适应布谷鸟搜索算法(ACS),通过自适应地切换频率和步长系数,提高了算法初期的收敛速度,并在算法后期利用小步长的 P&O 算法继续跟踪,降低了算法后期的功率振荡幅值。随后,学者们又分别提出采用粒子群算法、樽海鞘群算法和灰狼算法来改进光伏 MPPT 控制策略^[11-13],尽管这些算法在优化收敛精度或提高收敛速度方面取得了一定的进展,然而,它们在同时兼顾两者方面仍有很大提升空间。

与上述算法相比,金枪鱼群优化算法^[14](tuna swam optimization, TSO)具有搜索范围大、收敛精度高及与其他算法耦合性好等特点。文献[15]提出一种金枪鱼和改进黏菌算法的混合优化算法,提高了光伏 MPPT 系统在不同遮光条件下的跟踪效率,但

算法在前期的功率收敛过程中波动较大,在变化阴影下的跟踪精度提升并不显著。因此本文对 TSO 算法进行改进,提出一种双层控制模型。首先,将莱维飞行(Levy)和多项式变异策略引入 TSO 算法中,构建 Levy-多项式变异金枪鱼算法(LPTSO),从而提高算法后期的收敛速度。接着,将 LPTSO 与 P&O 算法融合,建立基于改进金枪鱼算法的光伏 MPPT 双层控制模型。在顶层采用 LPTSO 算法跟踪局部遮荫下的全局最大功率点,而在底层采用 P&O 算法对全局最大功率点进行小幅度扰动,使其一直维持在最大功率点。本文所提的双层控制模型 LPTSO-P&O 在高效跟踪最大功率点的同时,也能成功抑制收敛过程中振荡波动较大的问题。

1 局部遮荫下光伏阵列输出特性

1.1 光伏电池建模

光伏电池是光伏发电系统的重要组成部分,光伏阵列的光电转化效率与光伏电池密切相关,光伏电池的等效模型^[16]如图 1 所示,其电流-电压特性可表示为:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{U + IR_{sh}}{nkTN_{cell}/q}\right) - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中: I 为太阳能电池板的输出电流; I_{ph} 为光生电流; I_0 为二极管饱和电流; U 为太阳能电池板的电压; n 为二极管理想因子,其大小约为 1.0; R_{sh} 为分流电阻; k 为玻尔兹曼常数, $k=1.381 \times 10^{-23}$ J/K; T 为电池温度; N_{cell} 为模块中串联的电池板的数量; q 为电子电荷, $q=1.602 \times 10^{-19}$ C; R_s 为串联电阻。

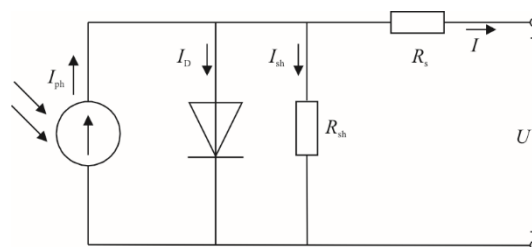


图 1 光伏电池等效模型

Fig.1 Equivalent model of the photovoltaic cell

I_{ph} 与光照强度和温度相关^[17]:

$$I_{ph} = [I_{ph_STC} + K_i(T - T_{ref})] \frac{G}{G_{STC}} \quad (2)$$

式中: I_{ph_STC} 为标准温度和光照下太阳能电池板的

短路电流; K_i 为温度系数, $K_i=0.003$; $T_{ref}=25\text{ }^\circ\text{C}$; G 为当前光照强度; G_{src} 为标准光照强度, $G_{src}=1\ 000\ \text{W/m}^2$ 。

1.2 光伏阵列的输出特性

光伏组件通过串并联组成光伏阵列, 在局部遮荫环境下, 光伏阵列的某一部分可能被遮挡, 从而产生热效应, 造成光伏组件的损坏。为解决这一问题, 通常会将旁路二极管并联在光伏组件上^[18]。图 2 为本文搭建的 5×1 局部遮荫光伏阵列模型, 其中每个光伏组件内串并联着 8 个光伏电池, 光伏阵列的输出电压为 $10U$, 输出电流为 $4I$ 。

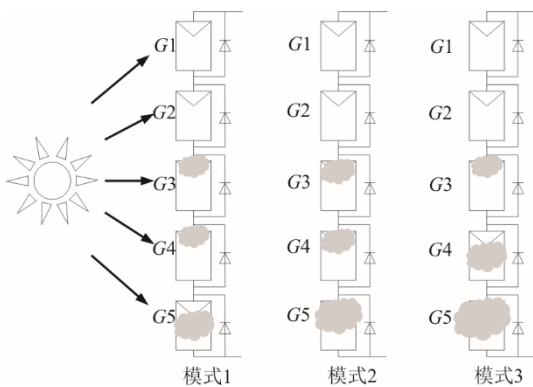


图 2 局部遮荫光伏阵列

Fig.2 Localized shade photovoltaic arrays

本文采用 3 种光照模式, 各光照模式对应光照强度见表 1。首先, 在恒定光照模式下评估模式 1 和模式 3 的功率跟踪效果; 接着, 在光照突变模式下评估模式 1 突变到模式 2 和模式 3 功率跟踪效果。

表 1 各模式的光照强度 单位: W/m^2
Tab.1 Light intensity for each mode

光照模式	G1	G2	G3	G4	G5
模式 1	1 000	1 000	800	800	500
模式 2	1 000	1 000	600	600	400
模式 3	1 000	1 000	800	500	300

在局部遮荫环境下, 光伏阵列输出的 $P-U$ 特性曲线呈现多峰特性, 并且在不同光照模式下的全局最大功率点各不相同^[19]。参照上述光伏阵列模型, 在 MATLAB/Simulink 上搭建 5×1 局部遮荫光伏阵列模型, 设置标准温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$, 光照强度为 3 种光照模式对应的光照强度, 得到光伏阵列输出的 $P-U$ 特性曲线如图 3 所示。当使用常规算法进行 MPPT 控制时, 如 P&O 算法、INC 算法, 这些算法

只能跟踪到不同光照模式下的局部最大功率点, 从而导致光伏阵列的输出功率下降^[20]。为此本文提出一种双层控制模型 LPTSO-P&O 进行 MPPT 控制, 以实现不同光照模式下最大功率点的精确跟踪。

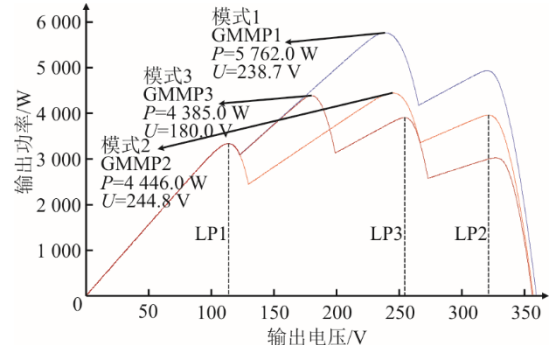


图 3 不同光照模式下光伏阵列的 $P-U$ 特性曲线
Fig.3 $P-U$ characteristic curves of photovoltaic arrays in different light modes

由图 3 可见, 在局部遮荫环境下, 光伏阵列的 $P-U$ 特性呈现多峰特性。3 种光照模式对应下的 $P-U$ 特性曲线均存在多个局部最大值, 而在实际情况中, 光照强度的变化更加复杂, 为保证光伏发电系统能准确跟踪到最大功率点, 研究适用于局部遮荫环境下 MPPT 控制方法具有重要的实际意义。

2 金枪鱼群优化算法

金枪鱼群优化 (tuna swam optimization, TSO) 算法是通过模拟金枪鱼群的觅食行为来对搜索范围大、求解精度高的问题进行寻优。TSO 算法主要包含螺旋觅食和抛物线觅食 2 种觅食策略: 采用螺旋觅食时, 金枪鱼群以螺旋状来追捕猎物, 在此期间, 每条金枪鱼通过跟随前一条金枪鱼进行信息共享, 实现群体协同效能; 而采用抛物线觅食时, 金枪鱼群以食物为中心呈抛物线状, 并在周边区域搜捕猎物^[21]。假设 2 种觅食方式的选择概率都是 50%。

螺旋觅食的数学模型如式(3)、式(4), 其中式(3)是金枪鱼群跟着最优个体进行觅食的位置更新, 式(4)是金枪鱼群跟着随机个体进行觅食的位置更新。当 $\text{rand} \geq (t/T)$ 时, 金枪鱼群选择式(3)进行位置更新; 当 $\text{rand} < (t/T)$ 时, 金枪鱼群选择式(4)进行位置更新。

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} \alpha_1 \cdot (X_{\text{best}}^t + \beta \cdot |X_{\text{best}}^t - X_i^t|) + \alpha_2 \cdot X_i^t, & i=1 \\ \alpha_1 \cdot (X_{\text{best}}^t + \beta \cdot |X_{\text{best}}^t - X_i^t|) + \alpha_2 \cdot X_{i-1}^t, & i=2,3,\dots, NP \end{cases} \quad (3)$$

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} \alpha_1 \cdot (X_{\text{rand}}^t + \beta \cdot |X_{\text{rand}}^t - X_i^t|) + \alpha_2 \cdot X_i^t, & i=1 \\ \alpha_1 \cdot (X_{\text{rand}}^t + \beta \cdot |X_{\text{rand}}^t - X_i^t|) + \alpha_2 \cdot X_{i-1}^t, & i=2,3,\dots,\text{NP} \end{cases} \quad (4)$$

式中: rand 为 $[0, 1]$ 内的一个随机数; t 为当前迭代次数; T 为最大迭代次数; X_i^{t+1} 为第 $t+1$ 次迭代的第 i 个个体; α_1 和 α_2 为控制个体向最佳个体和前一个个体移动趋势的权重系数; X_i^t 为第 t 次迭代的第 i 个个体; X_{best}^t 为当前最佳个体; X_{rand}^t 为搜索空间中的随机个体; NP 为金枪鱼种群数量。

α_1 、 α_2 、 β 的表达式为:

$$\alpha_1 = a + (1-a) \cdot \frac{t}{T} \quad (5)$$

$$\alpha_2 = (1-a) - (1-a) \cdot \frac{t}{T} \quad (6)$$

$$\beta = e^{bl} \cdot \cos(2\pi b) \quad (7)$$

$$l = e^{3\cos(\frac{T-1}{t}\pi)} \quad (8)$$

式中: a 为常数, 其作用是确定金枪鱼在起始阶段对最优个体及前一个个体的跟随程度; b 为 $[0, 1]$ 内的随机数; β 和 l 为中间变量。

抛物线觅食数学模型为:

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_{\text{best}}^t + \text{rand} \cdot (X_{\text{best}}^t - X_i^t) + \\ \text{TF} \cdot p^2 \cdot (X_{\text{best}}^t - X_i^t), & \text{if } \text{rand} < 0.5 \\ \text{TF} \cdot p^2 \cdot X_i^t, & \text{if } \text{rand} \geq 0.5 \end{cases} \quad (9)$$

$$p = (1 - \frac{t}{T})^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

式中: p 为中间变量; TF 为 $[-1, 1]$ 内的一个随机数。

3 基于改进金枪鱼算法的 MPPT 控制方法

针对 TSO 算法后期收敛速度慢、易陷入局部最优、收敛后期功率波动较大的问题, 本节对金枪鱼算法进行改进, 提出一种基于改进金枪鱼算法的光伏 MPPT 双层控制模型。首先, 将莱维飞行策略和多项式变异策略引入 TSO 算法中构建莱维-多项式变异金枪鱼算法 (Levy-polynomial mutation tuna swam optimization, LPTSO), 既提升算法的全局搜索能力, 也增大算法跳出局部最优解的概率; 随后, 将 LPTSO 算法与 P&O 算法融合构建双层控制模型 LPTSO-P&O, 有效降低了收敛过程中的功率波动,

使输出的功率更加稳定。

3.1 莱维飞行策略

莱维飞行 (Levy) 的原理基于莱维分布, 其特点是在小步长的更替过程中可能出现随机的大步长, 这种步长的不确定性赋予莱维飞行策略更显著的随机性。对于智能算法, 在求解最优值的过程中容易陷入局部最优值。由于莱维飞行在高频短距离和低频长距离探索之间交替进行, 引入莱维飞行可以在局部搜索和全局搜索阶段采用不同长度的步长展开搜索。这种策略在搜索接近最优值时, 能够选择合理的步长进行搜索, 从而有效提高算法的收敛精度与收敛速度, 解决智能算法陷入局部最优的问题。

为了提高 TSO 算法的收敛精度和收敛速度, 本文对 TSO 算法进行改进, 将莱维飞行策略嵌入 TSO 算法中, 改进后群体中金枪鱼下一次迭代位置 X_i^{t+1} 根据莱维飞行策略进行更新, 提升了 TSO 算法的空间搜索能力和跳出局部最优能力, 有助于算法找到全局最优解^[22]。改进后的 TSO 算法下一次迭代计算为:

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} k_1 \times X_i^t \times \text{Levy}(D) + k_2 \times X_i^t, & i=1 \\ k_1 \times X_i^t \times \text{Levy}(D) + k_2 \times X_{i-1}^t, & i=2,3,\dots,\text{NP} \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{Levy}(x) \sim u = 0.01 \times \frac{u}{|v|^{\frac{1}{2}}} \quad (12)$$

式中: k_1 和 k_2 分别为控制个体向莱维飞行个体和前一个个体移动的权重系数, k_1 和 k_2 的值与式(3)中 α_1 和 α_2 的值保持一致; D 为位置向量的维度, 本文 D 取 1.5; λ 的取值范围为 $[1, 3]$; u 和 v 服从正态分布, 其计算公式为:

$$\begin{cases} u \sim N(0, \sigma_u^2) \\ v \sim N(0, \sigma_v^2) \end{cases} \quad (13)$$

$$\sigma_u = \left\{ \frac{\Gamma(1+\lambda) \sin(\frac{\pi\lambda}{2})}{\lambda \times \Gamma(\frac{1+\lambda}{2}) \times 2^{\frac{(\lambda-1)}{2}}} \right\}^{\frac{1}{\lambda}}, \quad \sigma_v = 1 \quad (14)$$

$$\Gamma = \int_0^{+\infty} e^{-t} t^{x-1} dt \quad (15)$$

式中: Γ 为标准伽马函数。

3.2 多项式变异策略

智能算法在迭代过程中容易陷入局部最优, 解

决陷入局部最优的有效办法就是引入变异。在优化算法中加入变异,在迭代后期将提升算法的收敛速度,使解更具多样性。多项式变异一般用于多目标优化的情况,而单目标优化可以当作一种特殊的多目标优化。为此本文引入多项式变异对 TSO 算法中最佳个体的位置进行变异,使最佳个体的位置更加多样化,以提高算法的全局搜索能力。其表达式为:

$$X_{\text{best}}^{t+1} = X_{\text{best}}^t + \zeta(u-l) \quad (16)$$

$$\zeta = \begin{cases} [2s + (1-2s)(1-\zeta_1)^{\frac{1}{\eta+1}} - 1, \\ s \leq 0.5 \\ 1 - [2(1-s) + 2(s-0.5)(1-\zeta_2)^{\frac{1}{\eta+1}}]^{-1}, \\ s > 0.5 \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \zeta_1 = (X_{\text{best}}^t - l) / (u - l) \\ \zeta_2 = (u - X_{\text{best}}^t) / (u - l) \end{cases} \quad (18)$$

式中: s 为 $[0, 1]$ 内的随机数; η 为分布指数; X_{best}^t 为多项式变异前最佳个体位置; X_{best}^{t+1} 为多项式变异后最佳个体位置; u 为位置上界; l 为位置下界。

将嵌入莱维飞行策略和多项式变异策略的 LPTSO 算法作为双层控制模型 LPTSO-P&O 的上层模型。上层模型通过在 TSO 算法中嵌入莱维飞行策略和多项式变异策略来提升算法的全局搜索能力以及跳出局部最优解的概率,以此来完成对全局最大功率点的跟踪。

3.3 扰动观察法

扰动观察法 (P&O) 是目前常用的最大功率跟踪算法,在单峰情况下, P&O 算法的最大功率跟踪效果很好;而在多峰情况下, P&O 算法容易陷入局部最优解。P&O 算法的原理是通过对光伏阵列的工作点进行小幅度扰动,观察扰动后的输出功率变化,并根据变化方向调整工作点以跟踪光伏阵列的最大功率。变换器占空比的扰动公式为:

$$d_{\text{new}} = \begin{cases} d_{\text{old}} + \varphi & \text{if } P_{\text{pv}} \geq P_{\text{pv}(\text{old})} \\ d_{\text{old}} - \varphi & \text{if } P_{\text{pv}} < P_{\text{pv}(\text{old})} \end{cases} \quad (19)$$

式中: d_{old} 、 d_{new} 分别为扰动前、后的占空比; φ 为扰动占空比,本文取 0.005; $P_{\text{pv}(\text{old})}$ 、 P_{pv} 分别为扰动前、后的输出功率。

P&O 算法作为一种简单而且有效的局部搜索方法,对光照条件的变化具有快速的响应速度,将其作为双层控制模型的下层模型,可以确保局部最大功率点的准确跟踪,有效减小收敛过程的功率波

动,维持输出功率的稳定性。

3.4 改进金枪鱼算法的双层控制模型

改进金枪鱼算法的双层控制模型 LPTSO-P&O 分为 2 个阶段:第 1 阶段,在上层模型中将 Levy 飞行策略和多项式变异策略嵌入金枪鱼算法中,构建莱维-多项式变异金枪鱼算法 (Levy-polynomial mutation tuna swam optimization, LPTSO) 实现对局部遮荫环境下最大功率点的跟踪;第 2 阶段,在下层模型中采用扰动观察法对全局最大功率点进行局部跟踪,有效降低局部遮荫环境下的功率振荡。LPTSO-P&O 双层控制模型的流程如图 4 所示。

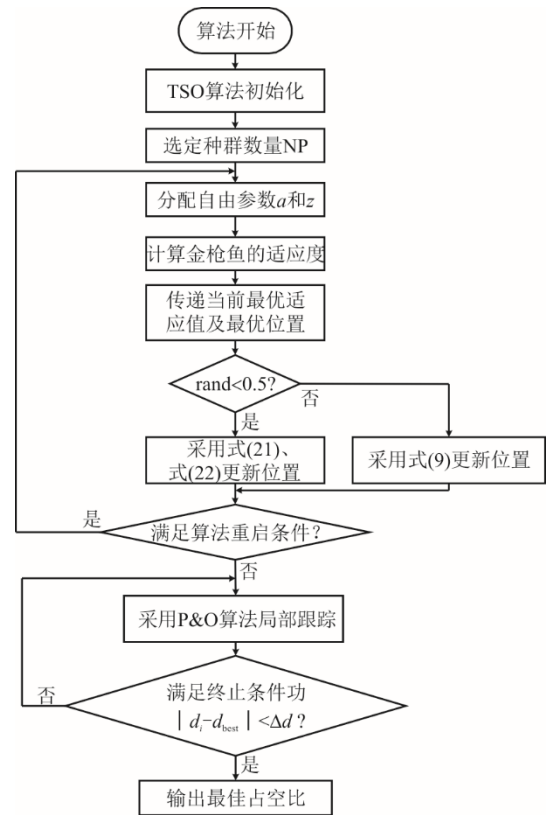


图 4 双层控制模型流程

Fig.4 Flowchart of the two-layer control model

为了使光伏 MPPT 控制系统在寻优后期能够减小输出功率的波动并及时终止算法的迭代,需要给双层控制模型 LPTSO-P&O 的 MPPT 控制策略设置终止判定条件。在迭代过程中当前占空比和最优占空比之差的绝对值小于某个特定值时,表明此时光伏 MPPT 仿真系统已经跟踪到最大功率,可以终止迭代。判定条件为:

$$|d_i - d_{\text{best}}| < \Delta d \quad (20)$$

式中: d_i 为迭代过程中当前的占空比; d_{best} 为迭代

过程中的最优占空比； Δd 取 1%。

3.5 基于改进金枪鱼算法的 MPPT 仿真系统

为了验证改进金枪鱼算法的双层控制模型 LPTSO-P&O 的 MPPT 寻优性能，在局部遮荫环境下采用光伏 MPPT 仿真控制系统进行仿真。图 5 为基于 LPTSO-P&O 算法的光伏 MPPT 仿真系统。根据文献[23]中对光伏 MPPT 仿真系统光伏组件参数的设定，本文的光伏组件参数设置见表 2。在基于 LPTSO-P&O 算法的 MPPT 仿真控制系统中，占空比为升压电路中 IGBT 在 1 个周期内导通时间与周期的比值，占空比的调整可以通过改变 PWM 信号的脉冲宽度来实现。本文将金枪鱼的位置作为控制系统中 DC-DC 变换器的占空比，并把光伏阵列输出的电压 v_{pv} 和电流 i_{pv} 引入控制系统中作为 LPTSO-P&O 算法的输入，以输出功率 P_{pv} 作为 LPTSO-P&O 算法的目标函数。LPTSO-P&O 算法通过搜索和更新最优金枪鱼个体的位置，动态调整 PWM 控制的占空比，使得光伏系统找到最优占空比，从而精确跟踪到对应的最大功率值。为了减轻控制器增益时的计算负担，需要对控制器进行简化。此外，当金枪鱼的数量变多时，随着峰值功率的提高，控制器的计算负担也在不断增大。根据文献[24-25]对算法种群数量、迭代次数及初始化位置的设置，本文将优化算法中金枪鱼数量设为 5，迭代次数设为 15，占空比初始位置设为 0.14。

此时式(3)、式(4)、式(11)、式(16)修正为：

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} \alpha_1 \cdot (X_{best}^t + \beta \cdot |X_{best}^t - X_i^t|) + \alpha_2 \cdot X_i^t, & i = 1 \\ i = 1 \\ \alpha_1 \cdot (X_{best}^t + \beta \cdot |X_{best}^t - X_i^t|) + \alpha_2 \cdot X_{i-1}^t, & i = 2, 3, \dots, 5 \end{cases} \quad (21)$$

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} \alpha_1 \cdot (X_{rand}^t + \beta \cdot |X_{rand}^t - X_i^t|) + \alpha_2 \cdot X_i^t, & i = 1 \\ i = 1 \\ \alpha_1 \cdot (X_{rand}^t + \beta \cdot |X_{rand}^t - X_i^t|) + \alpha_2 \cdot X_{i-1}^t, & i = 2, 3, \dots, 5 \end{cases} \quad (22)$$

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} k_1 \times X_i^t \times Levy(D) + k_2 \times X_i^t, & i = 1 \\ i = 1 \\ k_1 \times X_i^t \times Levy(D) + k_2 \times X_{i-1}^t, & i = 2, 3, \dots, 5 \end{cases} \quad (23)$$

$$X_{best}^{t+1} = X_{best}^t + \zeta(u_t - l_t) \quad (24)$$

当光伏组件的光照强度发生变化时，光伏阵列的输出功率也会发生变化，将式(25)作为算法重启条件，若光伏阵列输出功率的波动 $\geq 5\%$ 时，则需要重启 LPTSO-P&O 算法。为了确保在金枪鱼群的位置相对集中时输出功率维持在最大值，需要将算法迭代至最大次数，然后终止算法，以保持在寻优过程中的最佳占空比。

$$\left| \frac{P^t - P^{t-1}}{P^t} \right| \geq 0.05 \quad (25)$$

式中： P^t 和 P^{t-1} 为本次迭代和上次迭代所对应的功率值。

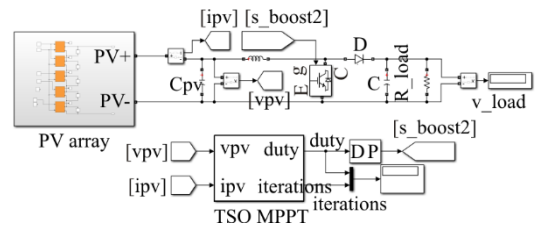


图 5 基于 LPTSO-P&O 算法的光伏 MPPT 仿真系统
Fig.5 Photovoltaic MPPT simulation system based on LPTSO-P&O algorithm

表 2 光伏组件参数
Tab.2 Photovoltaic module parameters

项目	数值
光伏电池最大功率 P_{MPP}/W	213.15
开路电压 U_{oc}/V	36.30
短路电流 I_{sc}/A	7.84
最大功率处电压 U_{MPP}/V	29.00
最大功率处电流 I_{MPP}/A	7.35

4 仿真结果及分析

为了评估本文所提的双层控制模型 LPTSO-P&O 在光伏最大功率点跟踪方面的性能，将原始 TSO 算法、双层模型上层算法 LPTSO、原始 TSO 与 P&O 算法融合的 TSO-P&O 算法以及本文所提的双层控制模型 LPTSO-P&O 在同一光照模式下的最大功率点跟踪结果进行对比，使用图 5 的光伏 MPPT 仿真系统进行仿真测试，光伏 MPPT 仿真系统的相关参数见表 2。双层控制模型中 LPTSO 和 P&O 算法的边界参数见表 3。表 3 中： i 为金枪鱼的数量； t 为算法的迭代次数； u 和 l 分别为飞行边界的上、下界； d_i 为初始化位置占空比； T_{LPTSO} 为 LPTSO 算法的采样周期； $T_{P\&O}$ 为 P&O 算法的采样周期； Δd 为波峰间距。

表 3 边界参数
Tab.3 Boundary parameters

项目	数值	项目	数值	项目	数值
i	5	l	0.1	$T_{P\&O}$	0.001
t	15	d_i	0.14	T_{LPTSO}	0.001
u	0.7	φ	0.005	Δd	1%

图 6 为 LPTSO-P&O 算法的光伏 MPPT 仿真曲线。在模式 3 情况下，LPTSO-P&O 算法在 0.318 s 时成功跟踪到最大功率 4 385.0 W，电压 180.0 V；当模式 1 在 1.5 s 突变到模式 3 时，LPTSO-P&O 算法在 0.233 s 跟踪到模式 1 的最大功率 5 762.0 W，电压 238.7 V，并在 1.786 s 时跟踪到突变之后模式 3 的最大功率值 4 385.0 W，电压 180.0 V。由仿真结果得，LPTSO-P&O 算法在最大功率跟踪方面，不仅能够准确无误的跟踪到最大功率，而且具有良好的全局搜索能力，能够在更短的时间追踪到最大功率并输出稳定的功率。

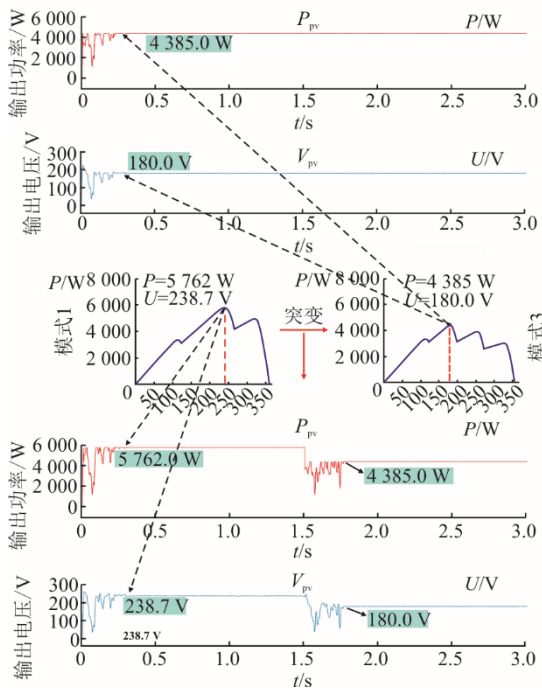


图 6 LPTSO-P&O 算法的仿真曲线
Fig.6 Simulation curves with LPTSO-P&O algorithm

图 7 为 LPTSO 算法的光伏 MPPT 仿真曲线。在模式 3 情况下，LPTSO 算法在 0.504 s 跟踪到最大功率 4 384.5 W，电压 180.0 V，与 LPTSO-P&O 算法相比，LPTSO 算法跟踪到的最大功率降低了 0.5 W，而且跟踪到最大功率的时间增加了 0.186 s；当模式 1 在 1.5 s 突变到模式 3 时，LPTSO 算法在 1.805 s 时跟踪到突变之后的最大功率，相

较于 LPTSO-P&O 算法，LPTSO 算法在突变后收敛到最大功率的时间增加了 0.019 s，而且在达到最大功率后出现了轻微的波动，输出的最大功率没有 LPTSO-P&O 算法输出的最大功率稳定。

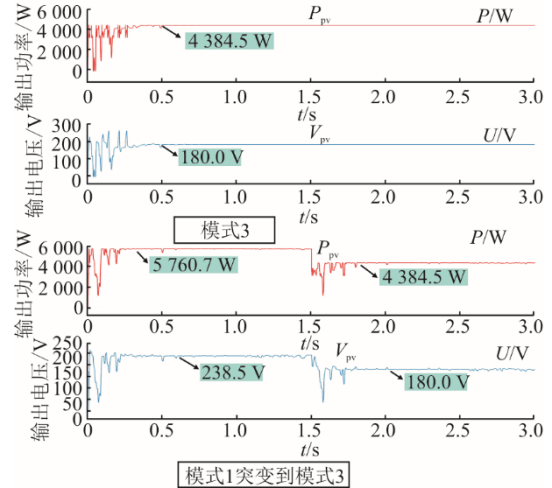


图 7 LPTSO 算法的仿真曲线
Fig.7 Simulation curves with LPTSO algorithm

图 8 为 TSO-P&O 算法的光伏 MPPT 仿真曲线。在模式 3 情况下，TSO-P&O 算法在 0.526 s 时跟踪到最大功率 4 380.2 W，电压 179.7 V，与 LPTSO-P&O 算法相比，TSO-P&O 算法跟踪到的最大功率减少了 4.8 W，跟踪到最大功率所用的时间增加了 0.208 s，而且功率收敛前期出现了短时间的周期性波动，使得跟踪到最大功率的时间变长；当模式 1 在 1.5 s 突变到模式 3 时，虽然突变以后 TSO-P&O 算法很快追踪到最大功率，但其追踪到的最大功率只有 4 380.2 W，电压为 181.4 V，与 LPTSO-P&O 算法相比，追踪到的最大功率减少了 4.8 W。

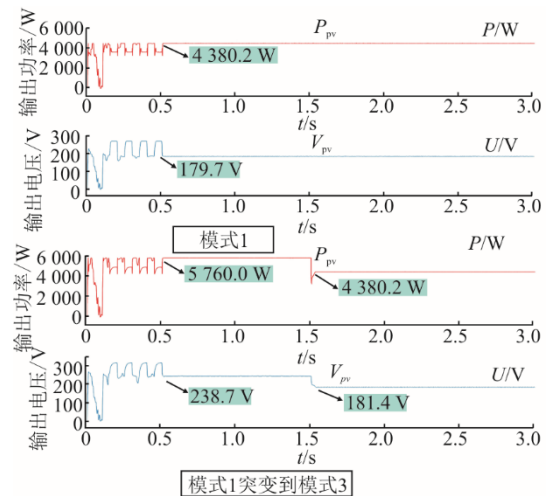


图 8 TSO-P&O 算法的仿真曲线
Fig.8 Simulation curves with TSO-P&O algorithm

图 9 为 TSO 算法的光伏 MPPT 仿真曲线。在模式 3 情况下，TSO 算法在 0.505 s 时跟踪到最大功率 4 373.5 W，电压 183.2 V，与 LPTSO-P&O 算法相比，TSO 算法跟踪到的最大功率减少 11.5 W，跟踪到最大功率所用的时间增加了 0.187 s，而且功率收敛过程中出现了较大的波动，使得跟踪到最大功率的时间变长；当模式 1 在 1.5 s 突变到模式 3 时，TSO 算法在 2.012 s 时跟踪到突变之后的最大功率，相比于 LPTSO-P&O 算法，TSO 算法在突变之后跟踪到的最大功率减少了 11.5 W，跟踪到最大功率所用的时间增加了 0.226 s，而且在突变之后，TSO 算法功率收敛过程的波动很大。

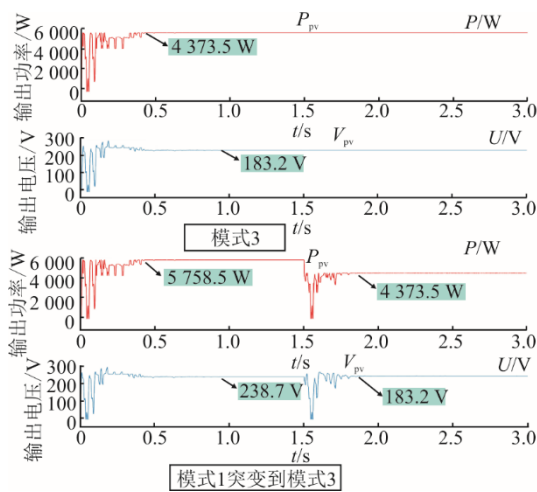


图 9 TSO 算法的仿真曲线
Fig.9 Simulation curves with TSO algorithm

由上述 4 种算法对比可知：在局部遮荫环境下，本文所提的双层控制模型 LPTSO-P&O 能够更快地跟踪到单一光照模式下的最大功率，并且其跟踪到的最大功率误差更小更稳定；而在光照发生突变的环境下，也能够快速跟踪到最大功率，并且在跟踪过程中功率的振荡较小，输出的功率也更稳定。表 4 为 4 种算法在不同模式下仿真对比。

表 4 4 种算法不同模式下仿真对比
Tab.4 Simulation comparison of four algorithms in different modes

阴影模式	算法	最大功率/ W	收敛时间/ s	跟踪效率/ %
模式 1	TSO	5 758.5	0.439	99.94
	LPTSO	5 760.7	0.363	99.97
	TSO-P&O	5 760.0	0.519	99.96
	LPTSO-P&O	5 762.0	0.233	100.00
模式 3	TSO	4 373.5	0.505	99.74
	LPTSO	4 384.5	0.504	99.97
	TSO-P&O	4 380.2	0.526	99.89
	LPTSO-P&O	4 385.0	0.318	100.00

由表 4 可知，不管是收敛时间还是跟踪效率，本文所提双层控制模型 LPTSO-P&O 的整体性能均最好。

5 结 语

针对金枪鱼算法 (TSO) 后期收敛速度慢、振荡波动较大的问题，本文提出一种基于改进金枪鱼算法的光伏 MPPT 双层控制模型。首先，将莱维飞行策略和多项式变异策略引入 TSO 算法中构建 LPTSO 算法，既提升了算法的全局搜索能力，又增大了算法跳出局部最优解的概率；随后，将 LPTSO 算法与 P&O 算法融合构建双层控制模型 LPTSO-P&O，光伏 MPPT 仿真结果表明：与 LPTSO 算法、TSO-P&O 算法、TSO 算法相比，本文所提双层控制模型 LPTSO-P&O 的收敛速度更快，收敛精度更高，而且在功率收敛过程中的波动更小，输出的最大功率更稳定。

面对未来能源系统的需求和挑战，可以探索将光伏发电 MPPT 控制与储能、智能配电网等领域相结合，构建更加灵活、智能的综合能源系统，为实现清洁能源的可持续发展做出贡献。

[参 考 文 献]

- [1] 王立乔, 鲍利斌, 孙孝峰. 基于变异粒子群算法的光伏系统最大功率点跟踪研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(3): 743-751.
WANG Liqiao, BAO Libin, SUN Xiaofeng. Research on maximum power point tracking of photovoltaic system based on variational particle swarm algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2016, 37(3): 743-751.
- [2] 聂晓华, 王薇. 混沌改进猫群算法及其在光伏 MPPT 中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6103-6110.
NIE Xiaohua, WANG Wei. Chaos improved cat swarm optimization and its application in the PV MPPT[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6103-6110.
- [3] ALI Z M, QUYNH N V, 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.
- [4] KAVYA M, JAYALALITHA S. Developments in perturb and observe algorithm for maximum power point tracking in photo voltaic panel: a review[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2021, 28: 2447-2457.
- [5] 梅润杰, 张经纬. 基于 Z 源逆变器的粒子群和模糊变步长电导增量 MPPT 算法[J]. 太阳能学报, 2020, 41(1): 137-145.
MEI Runjie, ZHANG Jingwei. MPPT algorithm of particle swarm optimization and fuzzy variable step incremental conductance method based on Z-source inverter[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(1): 137-145.

- [6] SINGH P, SHUKLA N, GAUR P. Modified variable step incremental-conductance MPPT technique for photovoltaic system[J]. International Journal of Information Technology, 2021, 13: 2483-2490.
- [7] LI L L, LIN G Q, TSENG M L, et al. A maximum power point tracking method for PV system with improved gravitational search algorithm[J]. Applied Soft Computing, 2018, 65: 333-348.
- [8] 刘宜罡, 邹应全, 张晓强, 等. 基于差分进化的光伏 MPPT 算法改进[J]. 太阳能学报, 2020, 41(6): 264-271.
LIU Yigang, ZOU Yingquan, ZHANG Xiaoqiang, et al. An improved photovoltaic MPPT algorithm based on differential evolution algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(6): 264-271.
- [9] 李红岩, 王磊, 安平娟, 等. 基于改进黏菌算法的局部遮阴下光伏 MPPT 研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(10): 129-134.
LI Hongyan, WANG Lei, AN Pingjuan, et al. Study on photovoltaic MPPT under local shade based on improved slime mold algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(10): 129-134.
- [10] 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.
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.
- [11] 徐建国, 王海新, 沈建新. 基于电导增量法与改进粒子群算法混合控制的最大功率点跟踪策略[J]. 可再生能源, 2019, 37(6): 824-831.
XU Jianguo, WANG Haixin, SHEN Jianxin. The hybrid control Maximum Power Point Tracking(MPPT) strategy based on incremental conductance method and improved particle swarm optimization algorithm[J]. Renewable Energy, 2019, 37(6): 824-831.
- [12] 王加健, 帕孜来·马合木提, 孔博龙. 基于改进樽海鞘群算法的光伏系统 MPPT 研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(4): 191-197.
WANG Jiajian, MAHEMUTI Pazilai, KONG Bolong. Research on MPPT of photovoltaic system based on improved salp swarm algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(4): 191-197.
- [13] 石季英, 张登雨, 薛飞, 等. 基于改进灰狼优化-黄金分割混合算法的光伏阵列 MPPT 方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(5): 21-26.
SHI Jiying, ZHANG Dengyu, XUE Fei, et al. Maximum power point tracking method for photovoltaic array based on modified hybrid method of grey wolf optimization and golden-section optimization[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(5): 21-26.
- [14] XIE L, HAN T, ZHOU H, et al. Tuna swarm optimization: a novel swarm-based metaheuristic algorithm for global optimization[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2021, 2021: 1-22.
- [15] 李艳波, 李林宜, 刘维宇, 等. 基于 TSO-MSMA 算法在光伏系统 MPPT 中的研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(8): 324-330.
LI Yanbo, LI Linyi, LIU Weiyu, et al. Research on photovoltaic system MPPT based on TSO-MSMA algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(8): 324-330.
- [16] IBRAHIM I A, HOSSAIN M J, DUCK B C. An optimized offline random forests-based model for ultra-short-term prediction of PV characteristics[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 16(1): 202-214.
- [17] 秦智恒, 任磊, 秦岭, 等. 基于 IPSO-IP&O 混合算法的光伏最大功率点跟踪[J]. 热力发电, 2023, 52(12): 90-97.
QIN Zhiheng, REN Lei, QIN Ling, et al. Photovoltaic maximum power point tracking based on IPSO-IP&O hybrid algorithm[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(12): 90-97.
- [18] 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 array based on modified gray wolf optimization algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(3): 450-456.
- [19] 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-EPSA, 2023, 35(2): 19-26.
- [20] 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 Wenfeng, LI Ang. Three-step composite photovoltaic MPPT algorithm based on IP&O-IBSO[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(10): 138-144.
- [21] 孙淑琴, 李丞, 李再华, 等. 基于金枪鱼群优化算法的光伏 MPPT 控制策略研究[J]. 电源技术, 2023, 47(9): 1202-1206.
SUN Shuqin, LI Cheng, LI Zaihua, et al. Research on photovoltaic MPPT control strategy based on tuna swarm optimization algorithm[J]. Power Technology, 2023, 47(9): 1202-1206.
- [22] 姚天棋, 柴琳, 肖凡, 等. 基于改进天鹰优化算法的光伏阵列多峰最大功率跟踪控制[J]. 热力发电, 2023, 52(12): 98-105.
YAO Tianqi, CHAI Lin, XIAO Fan, et al. Multi peak MPPT control of photovoltaic array based on improved aquila optimizer[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(12): 98-105.
- [23] FU C, ZHANG L. A novel method based on tuna swarm algorithm under complex partial shading conditions in PV system[J]. Solar Energy, 2022, 248: 28-40.
- [24] 付文龙, 孟嘉鑫, 张赞宁, 等. 复杂遮阴下基于改进 GWO 的光伏多峰 MPPT 控制[J]. 太阳能学报, 2023, 44(3): 435-442.
FU Wenlong, MENG Jiaxin, ZHANG Yunying, et al. Photovoltaic multi-peak MPPT control based on improved GWO under complex shade[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(3): 435-442.
- [25] 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.

(责任编辑 杜亚勤)