

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416287

基于 LTSO-VP&O 算法的光伏系统 MPPT 控制*

樊立萍^{1,2} 史斌^{1,2}

(1. 沈阳化工大学信息工程学院 沈阳 110142; 2. 工业环境-资源协同控制与优化技术辽宁省高校重点实验室 沈阳 110142)

摘要: 针对局部遮阴条件下光伏阵列功率多峰值造成的传统最大功率点跟踪算法易陷入局部最优等问题,提出一种基于莱维改进金枪鱼算法与变步长扰动观测法的混合优化算法。引入莱维飞行改进金枪鱼群优化算法的实时位置更新律,减小陷入局部最优的可能性;设计随功率特性斜率变化而变化的步长更新律对常规扰动观测法进行改进,提高最大功率跟踪速度;融合莱维改进金枪鱼算法与变步长扰动观测法构建混合优化算法,进一步提高跟踪精度与速度,并抑制扰动信号影响。仿真实验结果表明,本文所提出的算法在均匀全光照、静态局部遮阴、动态局部遮阴3种光照条件下的寻优时间和跟踪误差分别为0.036 s和0%、0.04 s和1.06%、0.05 s和1.06%,均优于其他对比算法,并且更加精准且快速的实现光伏系统的最大功率跟踪。

关键词: 光伏阵列;局部遮阴;最大功率点跟踪;金枪鱼群优化算法;莱维飞行

中图分类号: TP273;TN01 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4047

MPPT control of photovoltaic system based on LTSO-VP&O algorithm

Fan Liping^{1,2} Shi Bin^{1,2}

(1. The College of Information Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China; 2. Key Laboratory of Collaborative Control and Optimization Technology for Industrial Environment Resources in Liaoning Province, Shenyang 110142, China)

Abstract: A hybrid optimization algorithm based on Levy-flight improved tuna swarm optimization and variable step size perturbation observation method is proposed to solve the problem that the traditional maximum power point tracking algorithm is prone to local optimality due to the multi-peak power of photovoltaic arrays under local shade conditions. The real-time position update law of Levy-flight improved tuna swarm optimization algorithm is introduced to reduce the possibility of falling into local optimal. A new step change law which changes with the slope of power characteristic is designed to improve the conventional perturbation observation method and increase the maximum power tracking speed. Combining Levy-flight improved tuna swarm optimization and variable step size perturbation observation method, a hybrid optimization algorithm is constructed to further improve tracking accuracy and speed, and suppress the influence of disturbance signals. Simulation results show that the optimization time and tracking error of the proposed algorithm are 0.036 s and 0%, 0.04 s and 1.06%, and 0.05 s and 1.06%, respectively, under the three lighting conditions of uniform full illumination, static local shading and dynamic local shading, which are superior to other comparison algorithms. And more accurate and fast to achieve the maximum power tracking of photovoltaic systems.

Keywords: photovoltaic array; partial shading; MPPT; tuna swarm optimization algorithm; Levy flight

0 引言

光伏(photovoltaic, PV)系统的电能通过光伏电池产生。光伏电池产生的电能与入射的太阳光成正比,而太阳辐射的静态和动态遮阴效应影响光伏电池的性能。静态遮阴效应是由于鸟粪或坚硬的灰尘落在太阳能电池板表面而

产生的;动态遮阴是由于云层移动、鸟群飞过等条件变化引起的。地球自转导致的自遮光效应也会导致光伏电池的发电效率降低^[1]。因此,光伏发电系统所产生的电能是一种不稳定的能量,这是太阳能光伏系统的局限性之一^[2]。为提高PV系统的产电效率及供电稳定性,实施最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制方案是

收稿日期:2024-06-22

* 基金项目:国家外专项目(国科发专[2021]49号)、辽宁省重点攻关项目(LJKZZ20220057)资助

必要的^[3-4]。

传统的 MPPT 算法包括扰动观察法 (perturbation and observation, P&O)^[5], 爬坡法、电导增量法等。均匀照射条件下, PV 系统有且仅有一个最大功率峰值点, 采用传统 MPPT 算法即可获得令人满意的跟踪性能。但当光伏电池阵列出现局部阴影条件时, PV 系统的输出功率特性曲线会呈现多个峰值^[6-7]。因自身条件的限制, 传统 MPPT 算法对多峰值光伏系统的最大功率点跟踪往往容易陷入局部最优状态, 因而难以实现全局最大功率点跟踪。

二十世纪以来, 国内外科学家对多峰值 MPPT 控制算法进行了大量的创新^[8], 提出了一些基于智能算法的 MPPT 方案, 如粒子群算法、神经网络、灰狼算法等。迟耀丹等^[9]提出通过将粒子种群分为两种粒子, 加大全局搜索范围, 能准确跟踪到全局最大功率, 但收敛速度较慢, 且功率振荡较大; 张严等^[10]提出通过自适应神经网络预测最大功率点电压, 采用收缩因子优化模糊控制, 利用模糊控制直接调节 Boost 电路占空比, 但是算法的输入参数多, 运算量大; 杨永康等^[11]提出的改进灰狼算法, 结合灰狼群体之间的信息交互能力强和差分进化算法的局部强探索能力, 提升探索区域和找到全局最优解的能力, 但是其收敛速度缓慢, 具有较大的功率震荡。目前, 虽然存在大量的 MPPT 算法, 但却很难确定哪种方法是最佳的, 而且这些方法中的大多数都存在收敛速度慢、容易陷入局部最优等问题。

金枪鱼群优化算法 (tuna swarm optimization, TSO) 是一种新的元启发式算法, 灵感来源于金枪鱼的两种群体觅食行为^[12]。TSO 通过螺旋型和抛物线两种觅食策略实现开发和探索的平衡, 以更少的迭代步骤节约了寻优时间, 在解决现实世界的优化问题方面具有很大的潜力。然而, 尽管 TSO 跟其他一些智能算法相比存在很多优势, 但其仍难以避免局部优化问题。

本文在传统 TSO 算法基础上, 提出一种基于莱维飞行改进金枪鱼群优化算法 (Levy flight improved tuna swarm optimization, LTSSO) 与变步长的扰动观测法 (variable step perturb and observe, VP&O) 结合的光伏 MPPT 控制方法, 根据金枪鱼群觅食的生物特征, 以螺旋觅食和抛物线觅食为基础的迭代模型, 寻找最优个体 (食物) 即最大功率点; 并将改进金枪鱼优化算法与变步长扰动观测法结合, 进一步提高最大功率跟踪精度和速度, 实现局部阴影条件下光伏系统的高速、准确的最大功率点跟踪。

1 局部阴影条件下的光伏功率特性

1.1 光伏系统模型

光伏电池通常采用单二极管等效电路建模, 如图 1 所示。

根据图 1 所示的光伏电池的等效电路模型, 可将 PV 产电输出电流描述为^[13]:

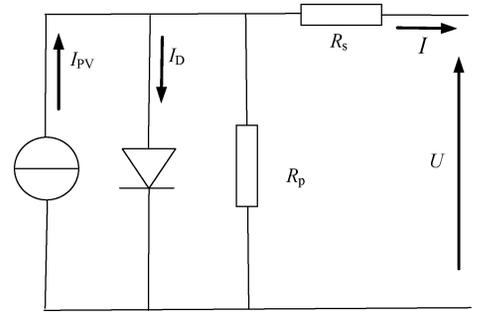


图 1 光伏电池单二极管模型等效电路

Fig. 1 Photovoltaic cell single-diode model equivalent circuit

$$I = I_{PV} - I_D - \frac{U + IR_s}{R_p} = I_{PV} - I_{SD} \left[\exp\left(\frac{U + IR_s}{\eta U_T}\right) - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_p} \quad (1)$$

式中: U 为光伏电池输出电压, 单位为 V; I 为光伏电池输出至负载端的电流, 单位为 A; I_{PV} 、 I_{SD} 、 I_D 分别为光生电流、二极管反向饱和电流及二极管电流, 单位为 A; η 为二极管理想因子; R_s 为等效串联电阻, 单位为 Ω , 取决于光伏电池的材料; R_p 为等效并联电阻, 单位为 Ω , 取决于电子-空穴对的复合能力; U_T 为热电压, 单位为 V, 可表示为:

$$U_T = \frac{K_B T}{q} \quad (2)$$

式中: K_B 为玻尔兹曼常数, 单位为 J/K; q 为电子电荷, 单位为 C; T 为电池温度, 单位为 K。 $K_B = 1.3805 \times 10^{-13}$ J/K, $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C。

将单个 PV 电池以串联或并联方式进行连接, 可形成 PV 组件 (或称光伏阵列)。串联可以提供更高的电压, 而并联可以提高输出电流。由 N_s 个串联电池和 N_p 个并联电池组成的光伏阵列的输出电流可描述为^[14]:

$$I_M = N_p \left\{ I_{PV} - I_{SD} \left[\exp\left(\frac{U + IR_{SM}}{\eta N_s U_T}\right) - 1 \right] \right\} - \frac{U_M + I_M R_{PM}}{R_{PM}} \quad (3)$$

式中: I_M 为光伏组件的输出电流; R_{SM} 和 R_{PM} 为模块的串联电阻和并联电阻; U_M 为光伏组件输出端电压。

1.2 功率特性

部分遮阴条件易诱发“热斑效应”, 对光伏组件造成破坏。通常在光伏电池两端设并联旁路二极管, 如图 2 所示。

然而, 旁路二极管的引入会导致光伏阵列功率-电压 ($P-U$) 特性的多峰值, 如图 3 所示。图 3 中, 全光照无阴影时, 四块电池板的光照强度均为 1000 W/m^2 ; 阴影条件 1 时, 四块光伏电池板的光照强度分别为 1000 、 1000 、 800 和 600 W/m^2 ; 阴影条件 2 时, 四块电池板的光照强度分别为 1000 、 800 、 600 和 300 W/m^2 。由图 3 所示光伏阵列特性曲线看出, 无遮挡时, 光伏阵列的功率特性只有一个峰值点, 峰值为 846.6 W 。遮阴条件 1 和遮阴条件 2 时, 都出现 3

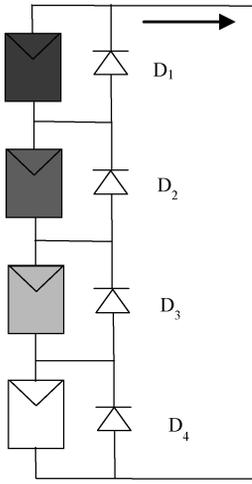


图 2 光伏阵列

Fig. 2 Photovoltaic array

个波峰,最大功率点分别为 573.9 W 和 423.6 W。功率特性多峰值点的出现,使得光伏系统的最大功率点跟踪变得更加困难。

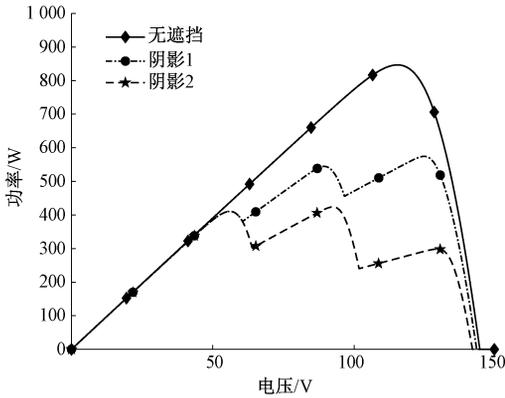


图 3 光伏阵列的 P-U 曲线

Fig. 3 P-U curve of a PV array

2 金枪鱼算法在 MPPT 中的应用

2.1 经典金枪鱼算法

TSO 算法模拟了金枪鱼群的两种觅食策略。金枪鱼群通过两种方法进行觅食,每种方法的概率为 50%。第一种策略是螺旋式觅食,即金枪鱼群以紧密的螺旋阵列进行追捕;第二种策略是抛物线觅食,每条金枪鱼都在前一条鱼尾后游动,形成一个抛物线形状进行狩猎。金枪鱼群通过以上两种觅食策略成功觅食。

1) 螺旋式觅食过程

螺旋觅食过程中,金枪鱼通过信息共享,形成螺旋形游动,将猎物驱入浅海并捕食。螺旋式觅食策略可描述为:

$$\mathbf{X}_i^{t+1} = \alpha_1 (\mathbf{X}_B + \beta |\mathbf{X}_B' - \mathbf{X}_i'|) + \alpha_2 \mathbf{X}_i' \quad (4)$$

其中, \mathbf{X}_i' 为第 t 次迭代时的第 i 个个体, $i = 1, 2, \dots, N_T$, 而 N_T 为金枪鱼群个体总数; \mathbf{X}_B' 为当前最优个体(即

食物); β 为中间变量; α_1, α_2 为调整个体向前一个个体和最优个体移动的权重系数。 α_1, α_2 及 β 可分别表示为:

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

$$\alpha_2 = (1 - a) \cdot \left(1 - \frac{t}{t_{\max}}\right) \quad (6)$$

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

其中, a 为常数,用于确定金枪鱼在初始阶段跟随最佳个体和前一个体的程度; b 为 0~1 之间的随机数; t_{\max} 为最大迭代次数; t 为中间变量,可表示为:

$$l = e^{3 \cos\left[\left(\frac{t}{t_{\max}} + \frac{1}{t}\right) - 1\right] \pi} \quad (8)$$

当金枪鱼群以螺旋式策略进食时,为了避免盲目跟随最优个体导致群体觅食不利,可以在螺旋式觅食开始时,在搜索空间中生成一个随机坐标作为搜索的参考点。

$$\mathbf{X}_\epsilon^t = rand(u_b - l_b) + l_b, i = 1, 2, \dots, N_T \quad (9)$$

其中, \mathbf{X}_ϵ^t 搜索空间中随机生成的参考点; $rand$ 为 0~1 之间的随机数; u_b 和 l_b 分别为搜索区间的上下边界,分别为 $0.9N_T U$ 和 $1.5U$, U 为常数为 36.3,最佳位置的范围在 $[u_b, l_b]$ 内,具体数值为 $[54.45, 130.68]$ 。

这样可以使每个个体都有更大的搜索空间,以帮助种群跳出局部最优位置。这个搜索过程表示为:

$$\mathbf{X}_i^{t+1} = \alpha_1 (\mathbf{X}_\epsilon^t + \beta |\mathbf{X}_\epsilon^t - \mathbf{X}_i^t|) + \alpha_2 \mathbf{X}_i^t \quad (10)$$

其中, ϵ 为随机数。

螺旋式觅食在初始阶段表现出全局搜索趋势。一旦鱼群找到了更好的位置,随后就会精确地在该位置附近进行搜索。随着迭代次数的增加,TSO 将螺旋觅食的参考点由随机个体逐渐变为最优个体^[15]。因此,螺旋觅食可表示为:

$$\mathbf{X}_i^{t+1} = \begin{cases} \alpha_1 (\mathbf{X}_\epsilon^t + \beta |\mathbf{X}_\epsilon^t - \mathbf{X}_i^t|) + \alpha_2 \mathbf{X}_i^t, & \epsilon < \frac{t}{t_{\max}} \\ \alpha_1 (\mathbf{X}_B^t + \beta |\mathbf{X}_B^t - \mathbf{X}_i^t|) + \alpha_2 \mathbf{X}_i^t, & \epsilon \geq \frac{t}{t_{\max}} \end{cases} \quad (11)$$

2) 抛物线觅食过程

金枪鱼在抛物线觅食过程中以食物为参照点形成抛物线形,搜索过程可描述为:

$$\mathbf{X}_i^{t+1} = \mathbf{X}_B^t + \zeta (\mathbf{X}_B^t - \mathbf{X}_i^t) + \rho \psi^2 (\mathbf{X}_B^t - \mathbf{X}_i^t) \quad (12)$$

式中: ζ 为 0~1 之间的随机数; ρ 为 -1~1 之间的随机数; ψ 为调整因子,随迭代次数的变化而变化,可表示为:

$$\psi = \left(1 - \frac{t}{t_{\max}}\right)^{\frac{t}{t_{\max}}} \quad (13)$$

综上,根据捕食条件的不同,金枪鱼群觅食过程可采用不同的数学模型进行描述。设 ϕ 为两种觅食策略的随机切换概率。当随机数 $\epsilon \geq t/t_{\max}$ 时,可通过式(4)所示模型进行描述;当 $\epsilon < t/t_{\max}$ 且切换概率 $\phi > 0.5$ 时,采用式(9)进行描述;而当切换概率 $\phi \leq 0.5$ 时,则通过式(11)进行描述。

2.2 改进金枪鱼算法

金枪鱼优化算法仍存在局部优化及收敛速度等问题^[16-18]。因而,在构建 MPPT 算法前,首先对金枪鱼优化算法进行改进。

1) 莱维飞行改进 TSO 算法

莱维飞行(Levy flight)是一种跳跃步长随概率密度函数衰减而分布的马尔代夫过程^[19],其飞行轨迹是随机漫步的,由小步长的跳跃和偶尔的大步长跳跃交替而成。莱维飞行可以显著提高元启发式优化器的性能^[20]。将莱维飞行引入到 TSO 算法中,可以在前期搜索中采用大步长进行全局搜索,保证种群多样性,减小陷入局部最优的可能性;在后期搜索中采用小步长,使得算法更容易寻找到最优解^[21]。

将莱维飞行引入 TSO 算法中,对金枪鱼觅食的当前最优解进行扰动,以加强全局搜索能力,避免金枪鱼个体陷入局部最优。假定金枪鱼群螺旋式觅食和抛物线觅食的出现概率是随机的,则莱维飞行改进 TSO 算法(LTSO)的位置更新律可表示为式(13)。

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} \alpha_1 (X_i^t + \beta |X_i^t - X_i^t|) L_\lambda + \alpha_2 X_i^t & \varepsilon < \frac{t}{t_{max}}, \varphi > 0.5 \\ \alpha_1 (X_B^t + \beta |X_B^t - X_i^t|) L_\lambda + \alpha_2 X_i^t & \varepsilon \geq \frac{t}{t_{max}} \\ X_B^t + \zeta (X_B^t - X_i^t) + \rho\phi^2 (X_B^t - X_i^t) L_\lambda & \varphi \leq 0.5 \end{cases} \quad (14)$$

式中: ϕ 为两种觅食策略的随机切换概率; L_λ 为莱维飞行的随机搜索路径,且 $L_\lambda = \mu \sim s^{-\lambda}$; s 为莱维飞行的随机步长; μ 为服从正态分布的系数,即 $\mu \sim N(0, \sigma\mu)$,表示为公式(14)。

$$\sigma_\mu = \left(\frac{\int (1+\chi) \sin\left(\frac{\chi}{2}\pi\right)}{2^{\frac{(\chi-1)}{2}} \chi \int \frac{(1+\chi)}{2}} \right)^{\frac{1}{\chi}} \quad (15)$$

其中, \int 表示积分运算; χ 为常数,文中取 $\chi=1.5$ 。

对于每条金枪鱼而言,其连续的随机跳跃步长分布规则为:

$$s = \frac{\sigma_\mu \mu}{|\nu|^{1/\chi}} \quad (16)$$

其中, ν 服从随机正态分布,即 $\nu \sim N(0, \sigma\nu)$,且 $\sigma_\nu=1$ 。

2) LTSO-VP&O 算法

为进一步提高阴影条件下光伏系统的最大功率跟踪效果,在金枪鱼优化算法基础上,将 VP&O 与 TSO 算法相结合,设计 LTSO 混合 VP&O 的 MPPT(LTSO-VP&O)算法,互补解决 MPPT 算法追踪速度慢、容易陷入局部最优等问题。

VP&O 算法的步长设计为 $0.3 |dP/dU|$,即使其随着 $P-U$ 特性斜率的变化而变化,因而可以更加精准地搜索到最大功率点。

基于 LTSO-VP&O 算法的光伏系统局部遮阴条件下

的 MPPT 流程如图 4 所示。第一阶段引入莱维飞行策略使 TSO 具有更大的搜索范围和跳出局部最大功率的能力。第二阶段用 VP&O 进行精确跟踪,用于小范围的小步跟踪,可以有效防止算法陷入持续震荡,提高了后期的跟踪精度和搜索效率。设置算法重启条件,避免收敛至局部最优解,能够有效跟踪辐照度变化。

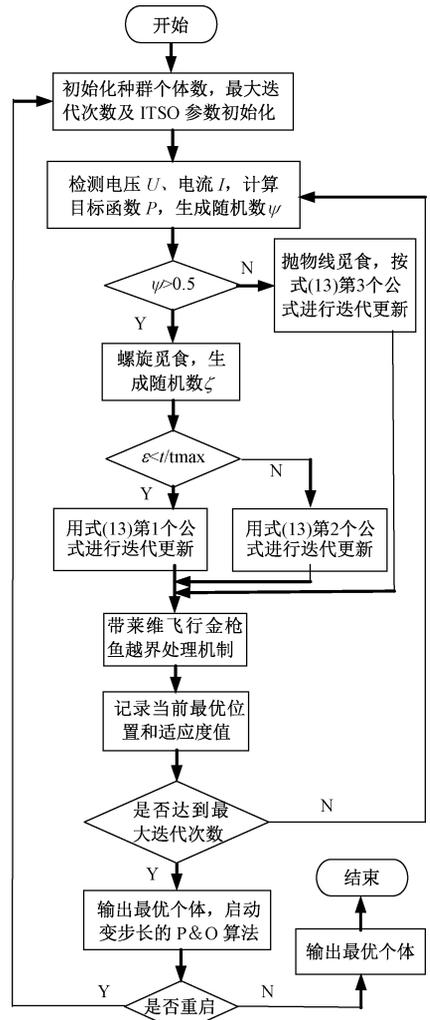


图 4 LTSO-P&O 算法流程

Fig. 4 Flow chart of LTSO-P&O algorithm

为保证变光照条件下亦可追踪到最大功率点,将 LTSO-VP&O 算法的重启条件设计为:

$$\frac{P_i - P_{i-1}}{P_{i-1}} > \gamma_P \quad (17)$$

式中: P_i, P_{i-1} 分别为当前及前一时刻光伏阵列的输出功率; γ_P 为预先设定的阈值。

3 仿真运行与结果分析

3.1 仿真建模与参数选择

在 Matlab/Simulink 中建立图 5 所示的基于 Boost 电路的光伏 MPPT 控制系统仿真模型。

如图 5 所示, U 、 I 分别为光伏阵列的产电电压和电流, U_L 、 I_L 分别为负载端得到的电压和电流。光伏阵列由 4 块型号为 1Soltech 1STH-215-P 的光伏电池板串联而成。其中 Boost 电路参数设置为: 电容为 20×10^{-6} F, 电感为 3×10^{-6} H, 负载为 15Ω 。

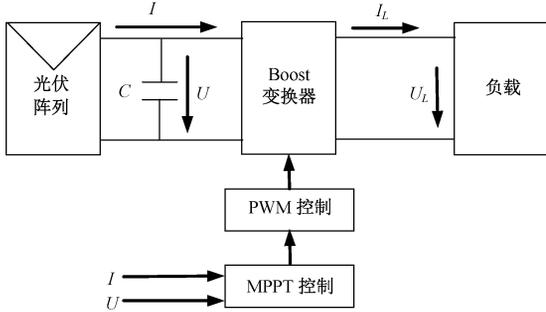


图 5 光伏阵列控制系统

Fig. 5 Photovoltaic array control system

为验证文中所提出的 MPPT 改进方案的有效性, 将 LTSSO-VP&O 算法用于光伏 MPPT 控制系统, 并将其与 VP&O、TSO 及 GWO^[11] 算法进行对比分析。设置 LTSSO-VP&O 算法和 TSO 算法两种觅食方式的切换概率为 $\phi = 0.5$, 重启阈值 $\gamma_P = 0.05$, 最大迭代次数 $t_{max} = 4$, 初始种群数 4 个; 设置 VP&O 算法步长为 $0.3|dP/dU|$; 设置 GWO 算法重启阈值 $\gamma_P = 0.05$, 最大迭代次数 $t_{max} = 4$, 初始种群数 4 个。

仿真实验在均匀全光照、静态局部遮阴、动态局部遮阴 3 种光照条件下进行, 除作为对比项的 MPPT 算法和光照条件外, 其余实验运行条件均保持一致。

3.2 均匀光照条件

均匀光照条件下, 光伏阵列 4 块光伏电池板所受的太阳辐照度均为 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$, 环境温度均为 $25\ ^\circ\text{C}$ 。根据图 3 所示的光伏系统运行特性可知, 此条件下的实际最大功率点为 $846.6\ \text{W}$ 。四种不同 MPPT 算法作用下光伏阵列的输出功率曲线如图 6 所示。

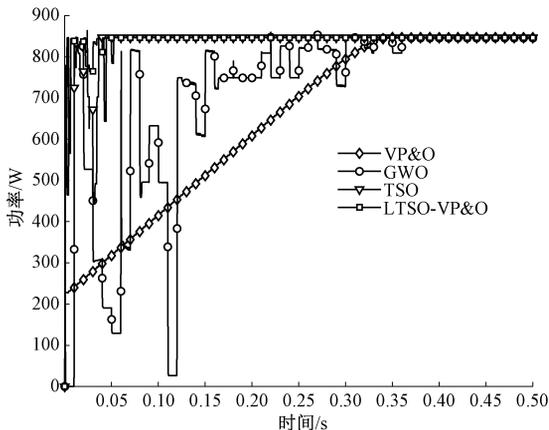


图 6 均匀光照下的输出功率

Fig. 6 The output power under uniform light

由图 6 所示的运行结果可以看出: VP&O、TSO、GWO 及 LTSSO-VP&O 这 4 种 MPPT 算法最终均能追踪到光伏阵列的最大功率点, 稳态误差相差不大, 但追踪过程有较大差异。VP&O 和 GWO 算法的追踪速度极慢, 而 LTSSO-VP&O 的跟踪速度最快。启动阶段, TSO 算法的振荡比较严重, 而 LTSSO-VP&O 算法已基本消除振荡。VP&O 算法使光伏功率以缓慢的速度逐渐上升并逼近最大功率点, 而 LTSSO-VP&O 算法则使光伏功率以最小的振荡、最快的速度达到最大功率点并稳定下来, LTSSO-VP&O 算法的动、静态性能都是最好的。

均匀光照条件下四种 MPPT 控制方法的主要性能指标如表 1 所示。表中, t_d 为调节时间, 即 MPPT 算法从启动至跟踪到最大功率点并稳定下来所需时间; P_{max} 为 MPPT 算法跟踪到的最大功率值; e_{ss} 为稳态跟踪的百分误差, 即:

$$e_{ss} = \frac{P_m - P_{max}}{P_m} \times 100\% \quad (18)$$

其中, P_m 为光伏阵列的实际最大输出功率; P_{max} 为 MPPT 算法跟踪到的最大功率。

表 1 均匀光照条件下四种 MPPT 方法的主要性能指标

Table 1 The main performance indexes of four MPPT methods under uniform lighting conditions

| MPPT 算法 | t_d/s | P_{max}/W | $e_{ss}/\%$ |
|------------|---------|-------------|-------------|
| GWO | 0.36 | 846.4 | 0.02 |
| VP&O | 0.35 | 846.5 | 0.01 |
| TSO | 0.05 | 846.5 | 0.01 |
| LTSSO-VP&O | 0.036 | 846.6 | 0.00 |

如表 1 所示, LTSSO-VP&O 算法的调整时间分别较 GWO 和 VP&O、TSO 方法缩短了 90%、89.7% 和 28%, 最大功率跟踪速度得到显著提高; 追踪最大功率的百分误差为零, 较其他 3 种方法有明显降低, 实现了对实际最大功率点的无差跟踪。

3.3 静态局部遮阴条件

在静态局部遮阴条件下, 保持光伏阵列中 4 块光伏电池板的温度均为 $25\ ^\circ\text{C}$, 太阳辐照度分别变成 $1\ 000$ 、 800 、 600 和 $300\ \text{W}/\text{m}^2$ 。由前文图 3 可知, 静态局部遮阴条件下的实际最大功率点为 $423.6\ \text{W}$ 。仿真运行结果如图 7 所示。分析结果可知, VP&O 算法完全追踪不到实际最大功率点, 而是稳定于 $347.8\ \text{W}$, 说明 VP&O 算法面对部分遮阴造成的多峰值问题陷入了局部最优。GWO 算法虽然能追踪到最大功率点, 但是不能稳态运行, 说明 GWO 算法面对部分遮阴造成的多峰值问题陷入了局部最优。TSO 和 LTSSO-VP&O 算法均能追踪到最大功率点, 但 TSO 算法引起的启动阶段的功率振荡比较严重, LTSSO-VP&O 算法所引起的功率振荡最小。

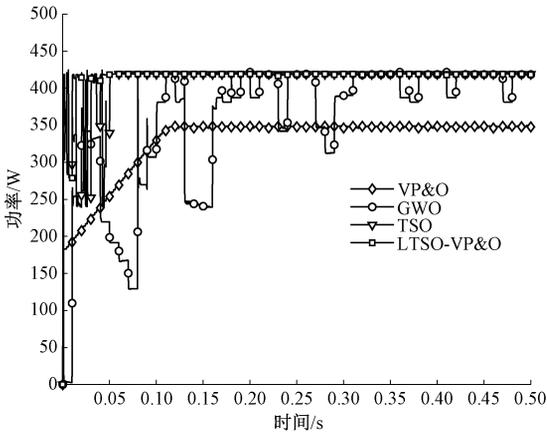


图 7 静态局部阴影条件下的输出功率

Fig. 7 Output power under static partial shading

静态遮阴条件下四种 MPPT 算法的主要性能指标如表 2 所示。可以看出,尽管对扰动观测法做了变步长改进,但 VP&O 算法仍产生了约 17.9% 的稳态误差,且调节时间也较长。LTSO-VP&O 算法的跟踪误差约为 1.06%,在可接受的理想误差范围内,且调节时间较小,很好地克服了静态局部遮阴下多峰值引起的局部最优问题,获得了良好的最大功率跟踪性能。

表 2 静态遮阴条件下四种 MPPT 方法的主要性能指标

Table 2 The main performance indexes of four MPPT methods under static shade condition

| MPPT 算法 | t_d/s | P_{max}/W | $e_{ss}/\%$ |
|-----------|---------|-------------|-------------|
| GWO | 0.48 | 419.1 | 1.06 |
| VP&O | 0.13 | 347.8 | 17.9 |
| TSO | 0.05 | 419.1 | 1.06 |
| LTSO-VP&O | 0.04 | 419.1 | 1.06 |

3.4 动态局部阴影条件

在动态局部遮阴条件下,在初始运行阶段(0~0.5 s)的光照强度均为 $1\ 000\ W/m^2$;在运行至 $t=0.5\ s$ 时,太阳辐照度突变为 $1\ 000$ 、 800 、 600 和 $300\ W/m^2$,对应图 3 的遮阴条件 2,其实际最大功率为 $423.6\ W$ 。光伏阵列的温度均为 $25\ ^\circ C$ 。仿真运行结果如图 8 所示。

动态遮阴条件下,VP&O 算法完全无法适应光照条件的突变,而是彻底偏离新的最大功率点,陷入了局部最优状态。TSO 和 GWO 算法虽然最终也能跟踪到新的最大功率点,但跟踪过程较长,调整过程波动较大,尤其是采用常规 TSO 算法时,达到稳态前的跟踪过程存在非常明显的功率波动,追踪到并稳定在最大功率点所需时间也相对较长,说明莱维飞行的引入对提高 TSO 跟踪速度和抑制功率波动是有效的。而 LTSO-VP&O 算法能够以最快的速度、最小的波动跟踪到新的最大功率点,跟踪速度、稳态精度等指标均为最佳。

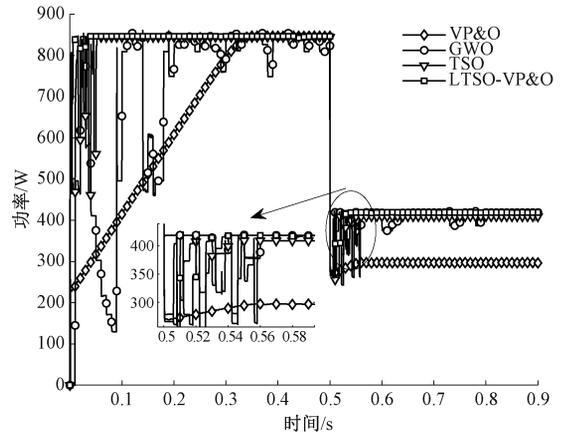


图 8 动态局部阴影下的输出功率

Fig. 8 Output power under dynamic partial shading

动态局部遮阴条件下四种 MPPT 算法的主要性能指标如表 3 所示。LTSO-VP&O 算法获得了最快的跟踪速度、最小的稳态误差,对光照条件变化具有自适应性,达到了良好的 MPPT 动静态性能。

表 3 动态遮阴条件下四种 MPPT 方法的主要性能指标

Table 3 The main performance indexes of four MPPT methods under dynamic shading conditions

| MPPT 算法 | t_d/s | P_{max}/W | $e_{ss}/\%$ |
|-----------|---------|-------------|-------------|
| GWO | 0.29 | 419 | 1.09 |
| VP&O | 0.06 | 297.4 | 29.8 |
| TSO | 0.06 | 409.3 | 3.38 |
| LTSO-VP&O | 0.05 | 419.1 | 1.06 |

4 结 论

本文针对光伏系统能效低、运行不稳定等问题,提出了基于 LTSO-VP&O 的 MPPT 算法,实现光伏系统在不同遮阴条件下的最大功率点跟踪。在算法前期将莱维飞行引入 TSO 算法中,加强了全局搜索能力,有效解决了常规 TSO 算法存在的局部优化及收敛速度慢等问题;设计变步长 P&O 算法,增加搜索的多样性,提高 MPPT 算法的搜索精度;将莱维改进 TSO 与变步长 P&O 算法结合,构建基于 LTSO-VP&O 的光伏系统 MPPT 算法,能够适应新的条件,以综合算法的优势提高泛化能力和鲁棒性,进一步提高了光伏 MPPT 的跟踪速度和跟踪精度。LTSO-VP&O 算法相对于对比算法,有更快的收敛速度、更高的稳态精度以及更小的输出振荡。

本文提出的基于 LTSO-VP&O 的 MPPT 算法,在均匀光照、静态局部遮阴和动态局部遮光条件下,均可快速、准确地追踪到光伏阵列的最大功率点,且对光照幅度等扰动信号具有良好的自适应性。后续工作将对 MPPT 方案做进一步改进,并将其应用于实际光伏系统。

参考文献

- [1] PADMAVATHI N, CHILAMBUHELVAN A, SHANKER N R. Maximum power point tracking during partial shading effect in PV system using machine learning regression controller[J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2021, 16: 737-748.
- [2] HAI H, ZHOU J H, FURUKAWA N. Performance enhancement of fuzzy-PID controller for MPPT of PV system to extract maximum power under different conditions[J]. *Soft Computing*, 2024, 28:2035-2054.
- [3] ARON M B, LOUIS J R. A novel intelligent optimization-based maximum power point tracking control of photovoltaic system under partial shading conditions[J]. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2024, 118: 489-503.
- [4] AI-DHAIFALLAH M, ALKHALAF S, OIKAWA H. Performance enhancement of MPPT controller to tune optimal voltage for PV-BES system using converged barnacles mating optimizer algorithm based ANFIS[J]. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2024, 26(2):625-644.
- [5] 郭昆丽, 闫东, 付建哲. 基于改进扰动观察法的光伏系统 MPPT 研究[J]. *电源技术*, 2021, 45(1): 56-59.
- GUO K L, YAN D, FU J ZH. MPPT research of photovoltaic system based on improved perturbation and observation method[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2021, 45(1): 56-59.
- [6] ANJUM S, MUKHERJEE V. Irregular SuDoKu modeling of solar photovoltaic arrays for partial shading optimization[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2023, 48(11): 14977-15002.
- [7] 付文龙, 孟嘉鑫, 张赞宁, 等. 复杂遮荫下基于改进 GWO 的光伏多峰 MPPT 控制[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(3): 435-442.
- FU W L, MENG J X, ZHANG Y N, et al. Photovoltaic multi-peak MPPT control based on improved gwo under complex shade [J]. *ACTA Energiae Solaris Sinica*, 2023, 44(3): 435-442.
- [8] WU ZH Q, CAO B L, HOU L CH, et al. Maximum power point tracking for photovoltaic system based on IMVO algorithm[J]. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2022, 17(5): 2985-2993.
- [9] 迟耀丹, 陈兵, 徐红伟, 等. 改进粒子群算法在光伏 MPPT 中的应用[J]. *电源技术*, 2022, 46(4): 441-444.
- CHI Y D, CHEN B, XU H W, et al. Application of improved particle swarm optimization in photovoltaic MPPT[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2022, 46(4): 441-444.
- [10] 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 Y, WANG Y J, YU J Q. Photovoltaic MPPT algorithm based on ANN-adaptive FLC[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2022, 41(4): 62-69.
- [11] 杨永康, 缪书唯. 基于 DE-GWO 算法的光伏系统 MPPT 仿真研究[J]. *电子测量技术*, 2022, 45(7): 75-81.
- YANG Y K, MIAO SH W. MPPT simulation of photovoltaic system based on DE-GWO algorithm[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(7): 75-81.
- [12] 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(1): 9210050.
- [13] 王军龙, 杨欢红, 沈森, 等. IBES 算法在并联 Boost 电路 MPPT 系统中的应用[J]. *电子测量技术*, 2023, 46(15):1-9.
- WANG J L, YANG H H, SHEN M, et al. Application of IBES algorithm in parallel Boost circuit MPPT system [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(15): 1-9.
- [14] MERCHAOUI M, HAMOUDA M, SAKLY A, et al. Fuzzy logic adaptive particle swarm optimisation based MPPT controller for photovoltaic systems[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2020, 14(15): 2933-2945.
- [15] 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 SH Q, LI CH, LI Z H, et al. Research on photovoltaic MPPT control strategy based on tuna

- swarm optimization algorithm[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2023, 47(9): 1202-1206.
- [16] YAN ZH P, YA J Y, WU Y F, et al. A novel reinforcement learning based tuna swarm optimization algorithm for autonomous underwater vehicle path planning [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2023, 209: 55-86.
- [17] RAJAGOPAL M, GHATE S N, RAJESWARI P, et al. Multi-class segmentation skin diseases using improved tuna swarm-based U-EfficientNet [J]. Journal of Engineering and Applied Science, 2024, 71(1): 1-24.
- [18] BUCHIBABU P, SOMLAL J. Green energy management in DC microgrids enhanced with robust model predictive control and muddled tuna swarm MPPT[J]. Electrical Engineering, 2024, 106(3): 2799-2819.
- [19] WU L, WU J W, WANG T B. Enhancing grasshopper optimization algorithm (GOA) with levy flight for engineering applications [J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 124.
- [20] BALAKRISHNAN K, DHANALAKSHMI R, KHAIRE U M. Improved salp swarm algorithm based on the levy flight for feature selection[J]. The Journal of Supercomputing, 2021, 77: 12399-12419.
- [21] CHEN Y H, XI J F, WANG H B, et al. Grey wolf optimization algorithm based on dynamically adjusting inertial weight and levy flight strategy [J]. Evolutionary Intelligence, 2023, 16(3): 917-927.

作者简介

樊立萍(通信作者),博士,教授,主要研究方向为人工智能与优化算法等。

E-mail: flpsd@163.com

史斌,硕士研究生,主要研究方向为光伏发电系统 MPPT 控制与光伏并网控制。

E-mail: 2987706480@qq.com