

局部阴影下基于 IBOA-INC 的光伏复合 MPPT 控制

罗程浩¹, 胡骅², 魏云冰¹, 杨汪洋¹

(1. 上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620; 2. 浙江省知识产权保护中心, 杭州 310012)

摘要:针对传统的最大功率点追踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 算法陷入局部极值不能找到最大功率点 (Maximum Power Point, MPP) 以及传统的蝴蝶优化算法 (Butterfly Optimization Algorithm, BOA) 存在收敛速度慢和搜索震荡较大等问题, 提出一种改进的蝴蝶优化算法 (Improved Butterfly Optimization Algorithm, IBOA) 结合电导增量法 (Conductance Increment Method, INC) 的复合 MPPT 追踪方法。在 IBOA 中, 引入自适应动态转换概率来平衡算法的全局与局部搜索, 然后在全局搜索阶段引入 Levy 飞行策略, 使蝴蝶个体广泛分布于搜索空间中, 提高全局寻优能力; 同时在局部搜索中设置新的寻优对象, 并通过贪婪算法进行筛选保留, 提高局部搜索的能力。当系统位于 MPP 附近时, 利用 INC 局部搜索能力强的优点快速、准确地收敛到 MPP 并且稳定功率的输出。仿真结果表明, 在静态和动态阴影下与 BOA、PSO 算法进行对比, 所提算法具有更快的追踪速度、更高的追踪效率和更强的鲁棒性。

关键词:蝴蝶优化算法; 电导增量法; Levy 飞行; 最大功率点追踪

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2024.05.025

中图分类号: TM615

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2024)05-0182-08

MPPT control of photovoltaic composite based on IBOA-INC under partial shading

LUO Chenghao¹, HU Hua², WEI Yunbing¹, YANG Wangyang¹

(1. School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China. 2. Zhejiang Province Intellectual Property Protection Center, Hangzhou 310012, China)

Abstract: An improved butterfly optimization algorithm (IBOA) combined with the conductance increment method (INC) is proposed to address the limitations of traditional maximum power point tracking (MPPT) algorithms, which often get trapped in local extrema and fail to find the maximum power point (MPP), as well as the slow convergence speed and large search oscillations of the traditional butterfly optimization algorithm (BOA). In IBOA, an adaptive dynamic transition probability is introduced to balance the global and local search capabilities of algorithm. The Levy flight strategy is then incorporated during the global search phase to enable the butterfly individuals to explore the search space extensively and enhance the global optimization capability. Additionally, a new optimization target is set for the local search, and a greedy algorithm is employed for selection and retention, thus improving the effectiveness of the local search. When the system is near the MPP, the strong local search capability of INC is leveraged to rapidly and accurately converge to the MPP and achieve stable power output. Simulation results demonstrate that compared to BOA and PSO algorithms under static and dynamic shading conditions, the proposed algorithm exhibits faster tracking speed, higher tracking efficiency, and stronger robustness.

Keywords: butterfly optimization algorithm, incremental conductance method, Levy flight, maximum power point tracking

0 引言

为了实现 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和的目标, 新能源发电方式正成为人们研究的热点^[1-2]。在光伏发电系统中, 由于受到外界自

然环境的影响, 光伏阵列往往处于局部阴影情况 (Partial Shading Condition, PSC), 其 $P-U$ 曲线呈现多峰值特性, 光伏发电效率不高^[3-4]。MPPT 技术能够跟踪其最大功率点, 提高光伏能源的利用效率, 是光伏发电系统中至关重要的环节。

传统的 MPPT 方法, 例如电导增量法、扰动观察

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62173222)

法(Perturb and observe, P&O),在P-U 曲线为单一峰值的情况下,拥有极佳的寻优能力。然而在实际中,PSC 会让P-U 曲线出现多个极值点,此时传统的MPPT 方法易陷入局部最大功率点。为了解决这个问题,国内外的学者提出了许多基于元启发式算法的新型 MPPT 方法。文献[5-6]使用灰狼优化算法追踪 MPP,其在 PSC 下的追踪性能优于传统的 MPPT 方法。文献[7]提出了一种改进的混沌粒子群算法,该方法能缓解粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)后期振荡较大的问题,但是并没有将算法的追踪精度进行对比。文献[8]通过改进粒子群算法的初始位置,对参数进行优化,避免粒子陷入局部最优,但是该方法并未考虑动态阴影下的追踪情况。文献[9]提出一种电导增量法与改进的粒子群算法相结合的混合控制方法,但是对比实验过少缺乏说服力。文献[10-11]将布谷鸟算法与扰动观察法相结合,同时对组合算法进行改进,与单种算法相比,组合算法能结合布谷鸟算法与扰动观察法的优点,进一步提高追踪性能,但是缺点是参数设置复杂。

与其他元启发式算法相比,BOA 具有参数少,易实现的特点,非常适合用于寻找光伏阵列的最大输出功率点,但是 BOA 作为元启发算法存在搜索过程中震荡较大、收敛较慢且易陷入局部最优的缺点^[12]。为解决此问题,文中对 BOA 算法进行了改进,首先对其切换概率进行了自适应调整,然后在全局和局部搜索阶段分别引入 Levy 飞行策略和设置新的寻优对象,提高算法的全局和局部搜索能力,最后结合电导增量法快速稳定的特点,使后期的功率追踪处于最小振幅。仿真实验表明,文中所提方法在多种局部阴影下均能实现更快的追踪响应、更高的追踪效率和更强的鲁棒性。

1 光伏组件原理及特性

1.1 光伏组件数学模型

光伏组件的等效电路模型图如图 1 所示^[13-14]。

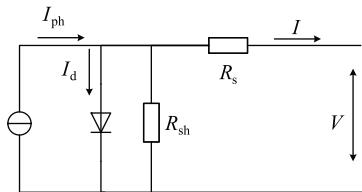


图 1 光伏电池等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of photovoltaic cells

由图 1 可以得出,流过电阻 R_s 的光伏输出电流 I 的表达式如式(1)所示:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} = I_{ph} - I_d \left[\exp\left(\frac{q(V + IR)}{AKT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中 I_{ph} 为光生电流; I_d 为二极管反向饱和电流; I 为光伏电池的输出电流; R_{sh} 为并联等效电阻; I_{sh} 为流过并联等效电阻的电流; R_s 为串联等效电阻^[15-16]; A 为二极管理想常数; q 为电子电荷常数,其值为 1.6×10^{-19} C; K 为玻尔兹曼常数,其值为 1.38×10^{-23} J/K; T 为光伏电池工作时的温度。

1.2 光伏组件输出特性

为了研究局部阴影下光伏组件的功率输出特性,文中采用 4×1 阵列的光伏系统进行仿真,每块光伏阵列并联 4 个、串联 2 个组件。光伏组件的参数设置如表 1 所示。

表 1 光伏组件参数

Tab. 1 Photovoltaic module parameters

参数	数值
开路电压 U_{oc}	36.8 V
最大功率点电压 U_{mp}	30 V
短路电流 I_{sc}	8.83 A
最大功率点电流 I_{mp}	8.3 A

改变光照强度和环境温度来模拟不同的阴影模式,具体参数如表 2 所示。

表 2 阴影模式

Tab. 2 Shadow mode

阴影模式	环境温度/℃	光照强度/(W/m ²)
模式 1	25	1000; 1000; 1000; 800
模式 2	25	1000; 1000; 800; 600
模式 3	28	1000; 800; 600; 400

在 MATLAB/Simulink 中分别对三种阴影模式进行仿真,得到由图 2 所示的光伏阵列输出特性曲线。

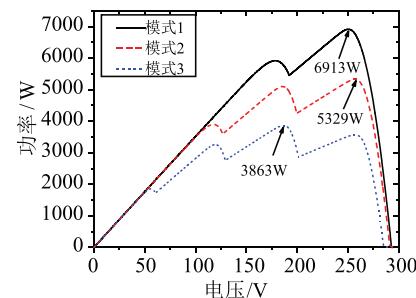


图 2 光伏阵列输出特性曲线

Fig. 2 Photovoltaic array output characteristic curve

由图 2 可知,在模式 1 的情况下,P-U 曲线呈现双峰值特点,其全局最大功率点为 6 913 W;在模式 2 中,随着光照幅度的进一步变化,P-U 曲线呈现三峰值特点,全局最大功率点也变为 5 329 W;在模式

3 中,光照强度和环境温度都发生改变,全局最大功率点变为 3 863 W, $P-U$ 曲线呈现四峰值特点。由此可得,光伏组件的整体的输出功率曲线易受光照强度和环境温度的影响,呈现多峰值的特性。

2 基于改进 BOA 的复合 MPPT 控制

2.1 传统 BOA 算法

蝴蝶优化算法假设每只蝴蝶在飞行时都会产生一定浓度的香味,这些香味会传播并被区域内的其他蝴蝶感知。每只蝴蝶释放出的香味与它的适应度有关,当一只蝴蝶移动位置时,它的适应度也随之改变。当蝴蝶感觉到另一只蝴蝶在这个区域散发出更多的香味时,就会去靠近,这个阶段被称为全局搜索。相反,当蝴蝶不能感知大于它自己的香味时,它会随机移动,这个阶段称为局部搜索阶段^[17]。两个阶段之间的切换由转换概率 p 来实现。

蝴蝶产生香味、全局搜索、局部搜索的公式分别如式(2)和式(3)所示:

$$f = cI^a \quad (2)$$

$$x_i^{t+1} = \begin{cases} x_i^t + (r^2 g^* - x_i^t) f_i, & r < p \\ x_i^t + (r^2 x_j^t - x_k^t) f_i, & r \geq p \end{cases} \quad (3)$$

其中, I 为刺激强度; a 为模态幂指数; c 为蝴蝶感官因子; f 为香味的感知强度; x_i^{t+1} 为第 $t+1$ 次迭代时第 i 只蝴蝶的空间位置; x_i^t 为第 t 次迭代时第 i 只蝴蝶的空间位置; x_j^t 和 x_k^t 为随机的第 j 和第 k 只蝴蝶在第 t 次迭代时的空间位置; r 为 $[0, 1]$ 内的随机数; f_i 为第 i 只蝴蝶的香味浓度; g^* 为第 t 次迭代时蝴蝶适应度最佳的空间位置。

2.2 改进 BOA 算法

2.2.1 自适应动态转换概率

转换概率 p 在 BOA 中控制着全局搜索与局部搜索的切换,通常等于一个定值。为了更好的找到全局的最大功率点,这就要求算法在迭代初期需要尽可能的进行全局搜索,在算法的后期需要进行精细的局部搜索,显然 p 为定值并不满足这一要求,因此文中引入一种自适应动态转换概率,如式(4)所示。该转换概率能在算法前期以较大的 p 值增加全局搜索的概率,扩大搜索范围,加速收敛;随着迭代的次数的增加, p 值逐渐减小,在后期能进行更加细致的局部搜索,提高收敛的精度。

$$p = 0.8 - 0.3 \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\left(\frac{t}{T_{\max}} \right)^2 \right) \quad (4)$$

式中 t 、 T_{\max} 分别为当前迭代次数和最大迭代次数, p 的变化区间为 $[0.5, 0.8]$ 。

2.2.2 Levy 飞行策略

Levy 飞行是一种广泛存在于自然界中的运动方式,与随机游走的布朗运动不同的是, Levy 飞行

是采用大步长与小步长相结合的方式来运动的^[18],同时其步长的概率具有重尾分布的特点。Levy 飞行随机步长的概率密度函数如式(5)所示:

$$\text{Levy} \sim u = t^{-\beta} \quad 1 < \beta \leq 3 \quad (5)$$

式中 t 表示当前迭代次数; β 为指数参数,一般取 1.5。

由于 Levy 分布较为复杂,文献[19]于 1994 年提出了一种运用正态分布求解随机数的生成服从 Levy 分布的方法,生成服从 Levy 分布的公式如式(6)、式(7)所示:

$$S = \frac{u}{|v|^{\frac{1}{\beta}}} \quad (6)$$

$$\sigma_u = \left[\frac{\Gamma(1+\beta)\sin(\pi\beta/2)}{\Gamma((1+\beta)/2) \times \beta \times 2^{(\beta-1)/2}} \right]^{1/\beta} \quad (7)$$

式中 Γ 为标准伽马函数; u 和 v 均服从正态分布 $u \sim N(0, \sigma_u^2), v \sim N(0, 1)$ 。

大步长与小步长相间的随机行走方式使得 Levy 飞行具有良好的全局搜索能力,将其应用到蝴蝶优化算法的全局搜索阶段,能有效克服搜索过程中易陷入局部最优的不足。但是全局搜索公式中已经规定蝴蝶朝最优个体移动,为了避免引入 Levy 飞行后蝴蝶个体无效的移动,需要对结合的公式进行修改,改进后的全局搜索公式如式(8)所示:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + r(g^* - x_i^t)f_i \times \text{Levy}(\beta) \quad (8)$$

式中 $\text{Levy}(\beta)$ 表示服从 Levy 飞行的路径,并且满足式(5)。

2.2.3 改进局部搜索公式

由式(3)可知,在 BOA 进行局部搜索时,其更新蝴蝶位置时是由随机的第 j 和 k 只蝴蝶决定的,该方式虽然简单易实现,但是在搜索的过程中往往伴有较高的重复性和不确定性,无法实现局部区域内的精细搜索。为此提出一种改进的局部搜索方式,如图 3 所示。

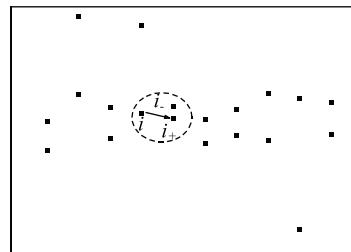


图 3 蝴蝶局部搜索示意图

Fig. 3 Schematic diagram of butterfly local search

图 3 中,黑色实心方块代表搜索空间中分布的蝴蝶种群位置,蝴蝶 i 代表局部搜索开始时当前蝴蝶的位置。蝴蝶 i_+ 和 i_- 是以蝴蝶 i 为中心,遍历整个种群后找到的离它最近相邻的两个蝴蝶个体。

为了保证下一次迭代中得到最优解,引入贪婪策略比较蝴蝶 i_+ 和蝴蝶 i_- 的气味浓度,若蝴蝶 i_+ 的气味浓度大于蝴蝶 i_- ,则蝴蝶 i 以蝴蝶 i_+ 作为局部寻优对象。

新的局部搜索方法有利于提高算法的局部搜索性能,但是在一定程度上会降低算法的收敛速度,为此需要在搜索过程中赋予蝴蝶较大的增量步长。更新后的局部搜索公式如式(9)所示:

$$x_i^{t+1} = \begin{cases} x_i^t + \alpha(x_{i_+}^t - x_i^t)f_{i_+} & f_{i_+} > f_{i_-} \\ x_i^t + \alpha(x_{i_-}^t - x_i^t)f_{i_+} & f_{i_+} < f_{i_-} \end{cases} \quad (9)$$

式中 $x_{i_+}^t, x_{i_-}^t$ 代表在第 t 次迭代中离 x_i^t 最近相邻的两个蝴蝶个体; f_{i_+}, f_{i_-} 分别代表各自的香味浓度; α 为增量步长,取值为[0,5]内的随机数。

特别的,当 x_i^t 为全局最优解时保持当前位置不变动,如式(10)所示:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + (r - 0.5)(x_{i_+}^t - x_{i_-}^t) \quad (10)$$

2.3 算法测试

为了验证改进算法的适用性,选取国际上通用的3个基准测试函数^[20]来对IBOA和BOA进行对比测试,3个基准测试函数信息如表3所示。设置函数维度为30,蝴蝶的种群数量为50,最大迭代次数为500次,为了避免单次实验造成的误差,将实验次数设置为30次,所得到寻优结果对比与迭代图如表4、图4所示。

表3 基准测试函数信息

Tab. 3 Benchmark function information

函数	范围	最优值
Sphere(单峰)	[-100,100]	0
Schwefel(单峰)	[-10,10]	0
Ackley(多峰)	[-32,32]	0

表4 算法性能对比

Tab. 4 Algorithm performance comparison

函数	算法	最优值	平均值	标准差
Sphere (单峰)	IBOA	1.34×10^{-206}	4.40×10^{-194}	0
	BOA	1.00×10^{-11}	1.21×10^{-11}	1.02×10^{-12}
Schwefel (单峰)	IBOA	3.84×10^{-27}	2.94×10^{-24}	4.99×10^{-24}
	BOA	1.24×10^{-99}	4.17×10^{-99}	1.17×10^{-99}
Ackley (多峰)	IBOA	8.88×10^{-16}	8.88×10^{-16}	0
	BOA	4.47×10^{-99}	5.66×10^{-99}	4.30×10^{-10}

表4从最优值、平均值和标准差三个方面来对实验数据进行记录。由表4的实验数据可得,IBOA在不同的测试函数中的寻优结果均优于BOA,其中在Sphere和Ackley函数中,IBOA的标准差都为0,说明IBOA具有较强的鲁棒性。由图4可得,在Sphere和Schwefel函数中,IBOA虽然在收敛速度上无明显加快,但在收敛精度有较大的提升;在Ackley

函数中,IBOA在170次左右便完成迭代,而BOA则在500次迭代中还未完成收敛,同时收敛精度上也远低于IBOA。综上所述,无论是在单峰还是多峰函数测试中,IBOA对比BOA均有相对的提升。

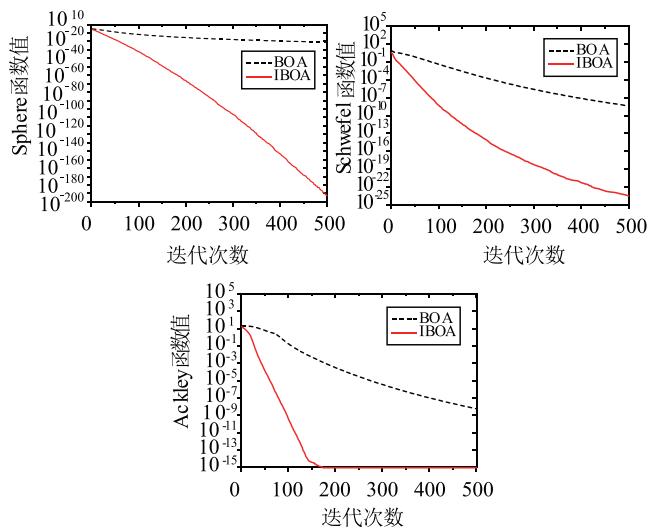


图4 基准函数对比测试图

Fig. 4 Benchmark function comparison test chart

2.4 结合 INC 算法的复合控制

INC 算法的原理是根据电池 P-U 曲线的斜率值 dP/dU 来寻优的,与 P&O 算法相比,INC 算法使用导数来判断电压的移动方向,对最大功率点的追踪更为准确。文中将 IBOA 与 INC 算法相结合,首先通过 IBOA 优秀的全局搜索能力快速收敛到 MPP 附近,然后切换为小步长的 INC 算法,利用 INC 收敛速度快和局部搜索能力强的优点来提高迭代后期的收敛速度与精度,减少功率的振荡。算法的切换条件如式(11)所示:

$$x_{\text{best}}^t - x_{\text{worst}}^t < 0.06 \quad (11)$$

式中 x_{best}^t 表示第 t 次迭代时蝴蝶适应度最佳的空间位置; x_{worst}^t 表示第 t 次迭代时蝴蝶适应度最差的空间位置。当蝴蝶群体之间的最大间距小于设定的阈值时,切换为 INC 算法。

当外部环境发生动态变化时,光伏系统的 MPP 可能会发生变化,此时如果继续使用 INC 算法进行追踪,可能会陷入局部最优,无法找到新的 MPP。为此需要重新启动 IBOA 进行追踪。当前后时刻功率跌落满足式(12)时,算法进行重启。

$$\frac{|P_{\text{New}} - P_{\text{Old}}|}{P_{\text{Old}}} > 0.05 \quad (12)$$

式中 P_{New} 表示光伏系统的实时功率值;设定当功率变化量大于 0.05 时重启 MPPT 算法。

基于 IBOA-INC 的复合 MPPT 方法流程图如图 5 所示。

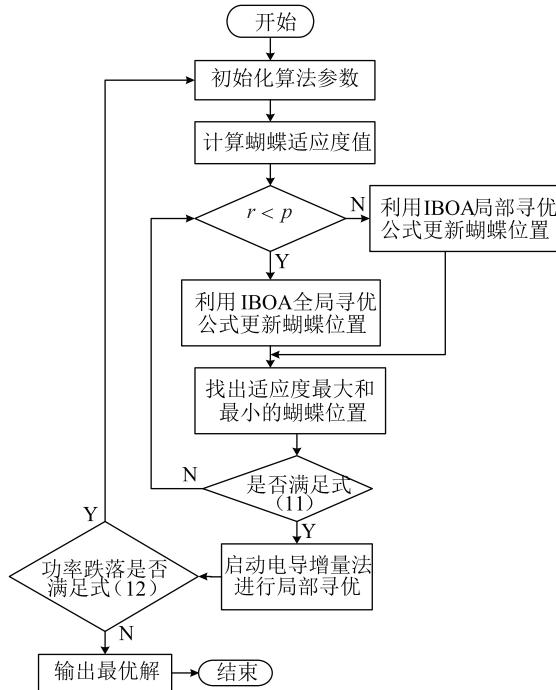


图 5 基于复合控制的 MPPT 流程图

Fig. 5 MPPT flow chart based on compound control

具体步骤为：

步骤 1：初始化 IBOA 中的参数。包括蝴蝶种群数量 n 、迭代次数 T_{\max} 等参数。

步骤 2：根据式(2)计算每只蝴蝶的适应度值。

步骤 3：生成随机数 r 与切换概率 p 进行比较。若 $r < p$ 则根据式(8)进行全局寻优，反之根据式(9)、式(10)进行局部寻优。

步骤 4：根据步骤 3 找到适应度最大和最小的蝴蝶位置。判断蝴蝶群体之间的最大间距是否满足式(11)，不满足转回步骤 3。

步骤 5：当蝴蝶群体之间的最大间距满足式(11)时，切换为小步长的电导增量法进行局部寻优。

步骤 6：电导增量法进行局部寻优时，判断电压跌落是否满足式(12)。若符合重启条件则转回步骤 1，否则输出当前蝴蝶的最优解，结束算法的迭代。

3 仿真结果及分析

3.1 仿真模型

为了验证基于 IBOA-INC 的复合 MPPT 方法的有效性与可行性，文中在 MATLAB/Simulink 上搭建了如图 6 所示的光伏系统模型进行研究。BOOST 电路的部分参数为： $C_1 = 500 \mu\text{F}$ 、 $C_2 = 20 \mu\text{F}$ 、 $L = 8 \text{ mH}$ 、 $R = 30 \Omega$ 。MPPT 控制器采集输入端的电压与电流信号，通过 S 函数编写的算法程序输出占空比 D ，然后传入到脉冲发生器中，接着脉冲发生器输出的信号控制晶闸管的关断，使得光伏阵列工作在最大功率点处。

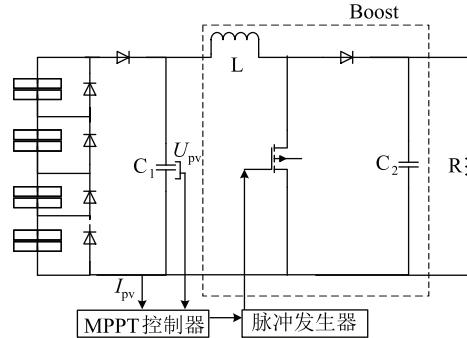


图 6 光伏系统模拟图

Fig. 6 Photovoltaic system simulation diagram

将文中算法与 BOA、PSO 算法进行对比，分别测试在静态阴影与动态阴影下光伏功率的追踪效果。三种算法的具体参数设置为：IBOA-INC、BOA 参数 $c = 1, \alpha = 0.5$ ；PSO 参数： $w = 0.4, c_1 = 1.2, c_2 = 2$ ，其中 c_1 和 c_2 为学习因子， w 为惯性因子。所有算法的种群数量 $n = 10$ ，最大迭代次数 $T_{\max} = 20$ ，光伏组件参数和阴影模式光照设置具体见表 1 和表 2。

3.2 仿真

3.2.1 静态阴影下的功率追踪

将三种算法分别在阴影模式 1 ~ 模式 3 的工况下进行仿真对比，得到的追踪对比图如图 7 所示。

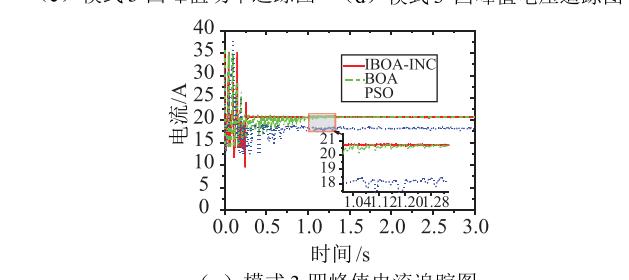
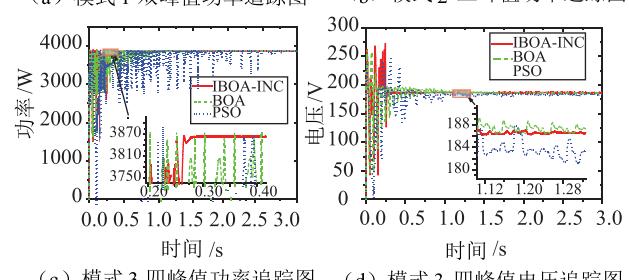
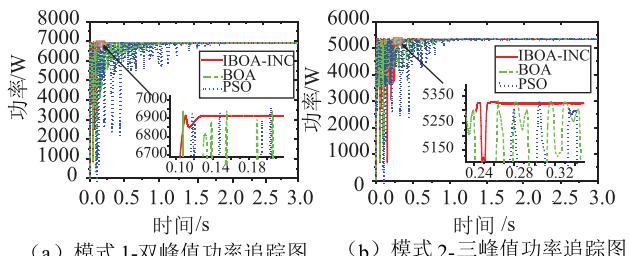


图 7 静态阴影下的追踪图

Fig. 7 Tracing diagram with static shading

为了更加直观的对比分析各个算法的性能指标,文中将从收敛时间、系统稳定后的功率追踪值、追踪效率和功率震荡情况四个方面进行数据的统计,如表 5 所示。

表 5 静态阴影性能对比

Tab. 5 Static shadow performance comparison

阴影模式	性能指标	IBOA-INC	BOA	PSO
模式 1	收敛时间/s	0.13	0.94	1.52
	功率追踪值/W	6 912.46	6 907.26	6 896.97
	理论值/W	6 913		
	追踪效率/%	99.99	99.91	99.77
模式 2	收敛时间/s	0.26	0.96	1.01
	功率追踪值/W	5 328.72	5 311.65	5 304.85
	理论值/W	5329		
	追踪效率/%	99.99	99.67	99.55
模式 3	收敛时间/S	0.28	0.99	2.27
	功率追踪值/W	3 862.94	3 845.28	3 839.29
	理论值/W	3863		
	追踪效率/%	99.99	99.54	99.39
	功率震荡	小	大	大

由图 7 可知,在搜索的初期,三种算法均产生了剧烈的抖动,这是因为元启发式算法通常会从一个随机生成的初始解开始搜索,由于解的随机性,算法可能会在解空间中发生剧烈波动,导致搜索路径出现抖动;由图 7(a)~图 7(c) 和表 5 可知,三种算法在不同的静态阴影模式下,均能追踪到 MPP 附近,其中 IBOA-INC 算法在追踪速度、精度和鲁棒性方面均优于其余两种算法。BOA 算法虽然能追踪到全局最大功率点,但是其收敛速度较慢而且在收敛之前一直伴随着较大的功率震荡,与 BOA 算法相比,IBOA-INC 算法在不同的静态阴影下追踪到 MPP 的时间分别为 0.13 s、0.26 s 和 0.28 s,收敛速度分别提升了 86.17%、72.92% 和 71.72%,并且减少了功率的震荡;PSO 算法虽然能追踪到 MPP 附近,但是收敛速度过于缓慢。如图 7(c) 所示,在 1.62 s 时 PSO 算法追踪到 MPP 附近,但是持续一段时间后功率曲线便陷入震荡,直到 2.27 s 时曲线才完全收敛。图 7(d)~图 7(e) 为系统工作在模式 3 下的电压、电流追踪对比图。在模式 3 下,理论上追踪到的最佳电压值与电流值分别为 186.6 V 和 20.7 A,由图 7(d)~图 7(e) 可知,在迭代后期,PSO 算法并没有追踪到最佳的电压、电流值,IBOA-INC 算法由于在迭代的后期切换为小步长的电导增量法,其电压、电流值的波动小于 BOA 算法,减小了功率的震荡。综上所述,在不同的静态阴影下,IBOA-INC 算法均优于其他两种算法。

3.2.2 动态阴影下的功率追踪

为了研究工作环境发生突变时算法的性能鲁棒性,文中设置了两种不同的动态阴影模式,分别为恒温变光照和变温变光照。恒温变光照设置为 1.5 s 时由模式 1 突变为模式 2,变温变光照设置为 1.5 s 时由模式 2 突变为模式 3。图 8~图 9 和表 6 分别为三种算法的追踪对比图和算法重启后的性能指标。

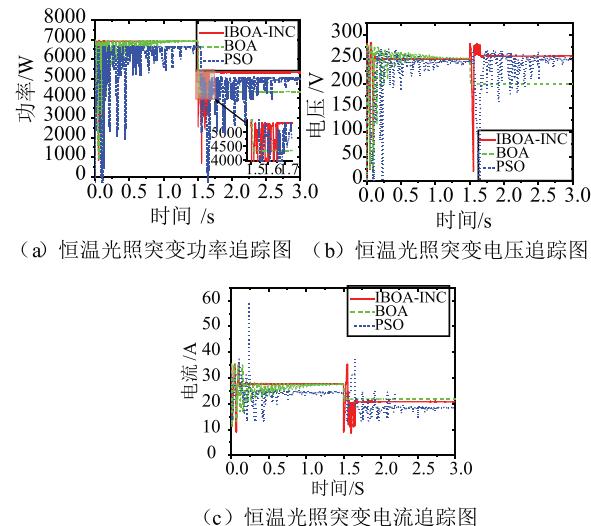


Fig. 8 Constant temperature and light mutation

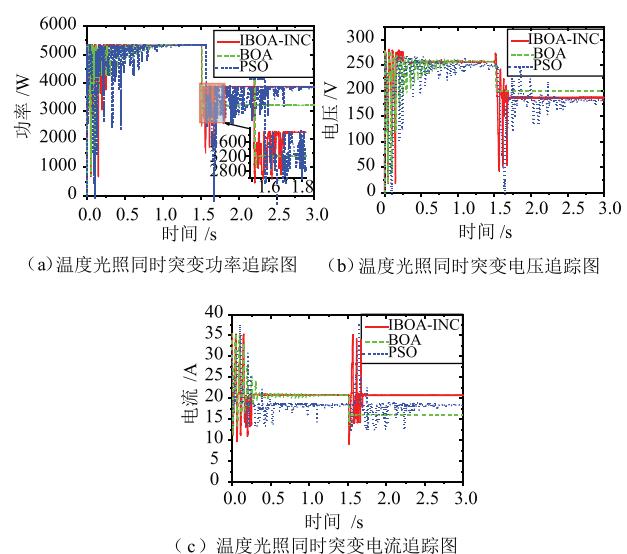


Fig. 9 Simultaneous mutation of temperature and light

由图 8~图 9 可知,IBOA-INC 算法在电压、电流与功率的追踪中均优于其余两种算法。结合图 8(a)、图 9(a) 和表 6 可知,不同的动态阴影下虽然 BOA 算法在算法重启之后能快速收敛,但是却陷入了局部最优值,说明在动态环境下,BOA 算法的鲁棒性不强,没有保持良好的控制性能。IBOA-INC

算法在两种不同的动态阴影下,重启后的追踪效率均为 99.6%,相对于 BOA 算法,追踪效率分别提升了 18.53% 和 17.58%;PSO 算法虽然追踪到 MPP 附近,但是却有不同程度的功率损失,且伴随着功率震荡。与 PSO 算法相比,IBOA-INC 算法在收敛速度方面分别提升了 85.15% 和 84.40%,并且收敛的后期功率曲线保持稳定。

表 6 动态阴影性能对比

Tab. 6 Dynamic shadow performance comparison

阴影模式	性能指标	IBOA-INC	BOA	PSO
恒温变光照	收敛时间/s	0.15	0.01	1.01
	功率追踪值/W	5 326.74	4 339.36	5 124.27
	理论值/W		5329	
	追踪效率/%	99.96	81.43	96.16
变温变光照	功率震荡	较小	小	大
	收敛时间/s	0.17	0.02	1.09
	功率追踪值/W	3 861.53	3 182.53	3 713.86
	理论值/W		3863	
	追踪效率/%	99.96	82.38	96.14
	功率震荡	较小	小	大

4 结束语

在标准环境下,光伏阵列的输出特性曲线呈现单一峰值,传统的 MPPT 方法能快速准确的追踪到全局最大功率点。然而在实际的工作环境中,光伏阵列的输出特性曲线容易受到外部环境的变化而呈现出多峰值的特性,此时传统的 MPPT 方法难以跳出局部极值点。为了提高光伏能源的利用率,文中提出了基于 IBOA-INC 的复合 MPPT 方法,通过仿真实验结果得到如下结论:

(1) 在标准测试函数中,IBOA 算法与 BOA 算法相比收敛精度更高、迭代次数更少,验证了改进算法的可行性;

(2) 对比 BOA 算法、PSO 算法,IBOA-INC 算法在不同的静态局部阴影下,能够快速准确的收敛到 MPP,且全程保持较小的功率震荡;

(3) 在复杂动态阴影下,BOA 算法易陷入局部最优,IBOA-INC 算法能够保持较高的追踪效率,具有较强的鲁棒性;

(4) 对于大规模集群式光伏电站来说,提高光伏系统的追踪效率具有重要的意义。因此,在未来的工作中还需进一步研究和探索。

参 考 文 献

- [1] MOHAPATRA A, NAYAK B, DAS P, et al. A review on MPPT techniques of PV system under partial shading condition [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 80: 854-867.
- [2] 李博彤, 李明睿, 刘梦晴. 基于通径分析和相空间重构的光伏发电预测模型 [J]. 电测与仪表, 2022, 59(11): 79-87.
LI Botong, LI Mingrui, LIU Mengqing. PV power generation forecast model based on path analysis and phase space reconstruction [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(11): 79-87.
- [3] 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: 121983.
- [4] 郭威, 张凯, 魏新杰, 等. 高渗透率分布式光伏接入的新型电力系统净功率预测 [J]. 电测与仪表, 2022, 59(12): 48-55.
GUO Wei, ZHANG Kai, WEI Xinjie, et al. Net power prediction for a novel power system with high permeability distributed photovoltaic access [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(12): 48-55.
- [5] 郭成, 谢浩, 孟贤, 等. 基于灰狼优化算法的负荷模型参数辨识 [J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(2): 30-37.
GUO Cheng, XIE Hao, MENG Xian, et al. Research on parameter identification of load model based on GWO algorithm [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(2): 30-37.
- [6] MOHANTY S, SUBUDHI B, RAY P K. A new MPPT design using grey wolf optimization technique for photovoltaic system under partial shading conditions [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 7(1): 181-188.
- [7] 何廷一, 孙领, 王晨光, 等. 避免频率二次跌落的风电场一次调频功率分配方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 12-20.
HE Tingyi, SUN Ling, WANG Chenguang, et al. A method of primary frequency regulation power distribution in a wind farm to avoid secondary frequency drop [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 12-20.
- [8] 姜萍, 栾艳军, 张伟, 等. 局部遮阴下基于改进 PSO 的多峰值 MPPT 研究 [J]. 太阳能学报, 2021, 42(8): 140-145.
JIANG Ping, LUAN Yanjun, ZHANG Wei, et al. Multi-peak MPPT research based on improved PSO under local shading [J]. Acta Solaris Sinica, 2021, 42(8): 140-145.
- [9] 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. Maximum power point tracking strategy based on hybrid control of incremental conductance method and improved particle swarm algorithm [J]. Renewable Energy, 2019, 37(6): 824-831.
- [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. Photovoltaic maximum power point tracking based on adaptive cuckoo search and perturbation and observation method [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 99-107.
- [11] 解振学, 林帆, 王若谷, 等. 基于时序动态回归的超短期光伏发电功率预测方法 [J]. 智慧电力, 2022, 50(7): 45-51.
XIE Zhenxue, LIN Fan, WANG Ruogu, et al. Very short-term photovoltaic power forecasting method based on time series dynamic regression [J]. Smart Power, 2022, 50(7): 45-51.
- [12] 吴华宁, 柳超, 谢旭. 基于入侵性野草优化算法的平面天线阵列的方向图综合 [J]. 海军工程大学学报, 2015, 27(1): 16-19.
WU Huaning, LIU Chao, XIE Xu. Pattern synthesis of planar antenna array based on optimization algorithm of invasive weeds [J]. Journal of Naval Engineering University, 2015, 27(1): 16-19.
- [13] 郑旭彬, 李梦达, 梁智超, 等. 局部遮荫下改进蝴蝶算法的 MPPT 控制仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2022, 39(1): 96-101.

- ZHENG Xubin, LI Mengda, LIANG Zhichao, et al. MPPT control simulation research of improved butterfly algorithm under partial shading[J]. Computer Simulation, 2022, 39(1): 96-101.
- [14] 张增辉, 邓宇豪, 李春卫, 等. 基于改进灰狼优化算法的光伏 MPPT 方法[J]. 电测与仪表, 2022, 59(7): 100-105.
- ZHANG Zenghui, DENG Yuhao, LI Chunwei, et al. Photovoltaic MPPT method based on improved grey wolf optimization algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(7): 100-105.
- [15] 邹佳朴, 翟涵, 吴子华, 等. 不同阴影条件对光伏电池串联模组输出性能的影响[J]. 上海第二工业大学学报, 2021, 38(1): 1-7.
- [16] 何昊, 崔成, 贾希浩, 等. 基于暂态响应轨迹的光伏逆变器参数辨识方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(4): 51-58.
- HE Hao, CUI Cheng, JIA Xihao, et al. Photovoltaic inverter parameter identification method based on transient response trajectory [J]. Smart Power, 2022, 50(4): 51-58.
- [17] 李田来, 刘方爱. 带混沌映射的 WSN 蝴蝶优化定位算法[J]. 计算机工程与设计, 2019, 40(6): 1729-1733.
- LI Tianlai, LIU Fangai. WSN butterfly optimization positioning algorithm with chaotic map[J]. Computer Engineering and Design, 2019, 40(6): 1729-1733.
- [18] 王艺博. 基于莱维飞行蜉蝣优化算法的光伏阵列最大功率点跟踪研究[J]. 电气技术, 2022, 23(1): 64-69.
- WANG Yibo. Research on maximum power point tracking of photovoltaic array based on levi's flying ephemera optimization algorithm [J]. Electrical Technology, 2022, 23(1): 64-69.
- [19] 崔鸣, 鞫其兵. 基于 Levy 飞行策略的灰狼优化算法[J]. 计算

机与数字工程, 2022, 50(5): 948-952, 958.

CUI Ming, JIN Qibing. Gray wolf optimization algorithm based on Levy flight strategy[J]. Computer and Digital Engineering, 2022, 50(5): 948-952, 958.

- [20] 刘成汉, 何庆. 融合振荡禁忌搜索的自适应均衡优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(10): 68-75.
- LIU Chenghan, HE Qing. An adaptive equalization optimization algorithm fused with oscillating tabu search[J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(10): 68-75.

作者简介:



罗程浩(1999—),男,硕士研究生,研究方向为光伏发电与并网技术。

Email:luochenghao2022@163.com

胡骅(1971—),男,通信作者,副研究员,研究方向为可再生能源发电在电网中的应用。

魏云冰(1970—),男,硕士生导师,教授,研究方向为电机及其控制、电力系统自动化。

杨汪洋(1997—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统短期负荷预测。

收稿日期:2023-07-23; 修回日期:2023-11-25

(王克祥 编发)

(上接第 151 页)

- [12] 祝婧, 刘见, 王金鑫, 等. 基于 CP-FDTD 算法的山体坡度对多相配电线路耦合雷电过电压的影响[J]. 陶瓷避雷器, 2022(2): 53-58.
- ZHU Jing, LIU Jian, WANG Jinxin, et al. Effect of Mountain Slope on Coupled Lightning Overvoltage of Multiphase Distribution Lines Based on CP-FDTD Algorithm[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(2): 53-58.
- [13] 刘玉洁, 袁旭峰, 邹晓松, 等. 基于柔性多状态开关的分布式电源消纳技术评述[J]. 电测与仪表, 2022, 59(7): 1-8.
- LIU Yujie, YUAN Xufeng, ZOU Xiaosong, et al. Review of distributed power supply dissipation technology based on soft open point[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(7): 1-8.
- [14] 李琦, 乔颖, 张宇精. 配电网持续无功优化的深度强化学习方法[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1473-1480.
- [15] 赵冬梅, 宋原, 王云龙, 等. 考虑柔性负荷响应不确定性的多时间尺度协调调度模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(22): 21-30.
- ZHAO Dongmei, SONG Yuan, WANG Yunlong, et al. Multi-time scale coordinated dispatching model considering flexible load response uncertainty[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(22): 21-30.
- [16] 杨楠, 王波, 刘涤尘, 等. 计及大规模风电和柔性负荷的电力系统供需侧联合随机调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 63-69.
- YANG Nan, WANG Bo, LIU Dichen, et al. Joint stochastic scheduling method of power system supply and demand side considering large-scale wind power and flexible load[J]. Proceedings of the

CSEE, 2013, 33(16): 63-69.

- [17] 孙功伟, 周克楠, 马皓非, 等. 考虑柔性负荷的智能电网调度策略研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(3): 40-46.

SUN Gongwei, ZHOU Kenan, MA Jifei, et al. Research on smart grid dispatching strategy considering flexible load[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(3): 40-46.

- [18] 黄培东, 詹红霞, 彭光斌, 等. 分时电价下考虑源网荷各侧收益的风电消纳模型[J]. 电测与仪表, 2017, 54(7): 53-58.

HUANG Peidong, ZHAN Hongxia, PENG Guangbin, et al. Wind power consumption model considering the benefits of each side of source network load under TOU price[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(7): 53-58.

作者简介:



乔立同(1979—),男,通信作者,硕士,高级工程师,从事电力系统运行与控制、电力系统规划工作。

Email:153976127@qq.com

汪挺(1988—),男,硕士,高级工程师,从事电力系统运行与控制、综合能源系统方面的研究和工作。

刘剑宁(1969—),男,本科,工程师,从事电力系统运行与控制。

收稿日期:2021-10-12; 修回日期:2022-12-02

(杜景飞 编发)