

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211824

IBES 算法在并联 Boost 电路 MPPT 系统中的应用*

王军龙¹ 杨欢红² 沈淼¹ 钱慧银¹ 向冠霖¹ 柴磊²

(1. 国网安徽省电力有限公司宣城供电公司 宣城 242000; 2. 上海电力大学 上海 200090)

摘要: 针对光伏阵列在复杂光照条件下的多峰值特点及常规的最大功率追踪算法无法兼顾追踪精度和速度、存在振荡的问题,提出了一种改进秃鹰搜索算法;该算法在选择搜索空间时使用混沌映射对选择位置控制变化的参数进行优化,增加种群位置的多样性,提升算法的全局搜索能力;并在搜索空间猎物时,引入 Levy 飞行机制,对秃鹰新位置进行优化,增强了算法跳出局部搜索的能力;同时提出一种新型并联 Boost 电路,提高追踪的稳定性,减小振荡。通过 Simulink 建模仿真分析可知,结合改进的算法与新型并联 Boost 电路,在三种阴影情况下,追踪的成功率分别为 100%、98%、96%,均高于原始算法,能够更快、更稳定地实现最大功率跟踪。

关键词: 局部阴影;最大功率点;秃鹰搜索算法;Levy 飞行;并联 Boost 电路

中图分类号: TM615 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4031

Application of IBES algorithm in parallel Boost circuit MPPT system

Wang Junlong¹ Yang Huanhong² Shen Miao¹ Qian Huiyin¹ Xiang Guanlin¹ Chai Lei²

(1. State Grid Anhui Xuancheng Power Supply Company, Xuancheng 242000, China;

2. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Aiming at the multi-peak characteristics of photovoltaic arrays under complex illumination conditions and the problems that the conventional maximum power tracking algorithm cannot take into account the tracking accuracy and speed, and there are oscillations, an improved vulture search algorithm is proposed. In this algorithm, chaotic mapping is used to optimize the parameters of location control change when selecting search space, increase the diversity of population location and improve the global search ability of the algorithm. When searching space prey, Levy flight mechanism is introduced to optimize the new position of condor, which enhances the ability of the algorithm to jump out of local search. A new parallel Boost circuit is proposed to improve the stability of tracking and reduce the oscillation. Through Simulink modeling and simulation analysis, it can be seen that combined with the improved algorithm and the new parallel Boost circuit, the tracking success rate is 100%, 98%, 96% respectively in the three shadow cases, which are higher than the original algorithm, and can achieve the maximum power tracking faster and more stable.

Keywords: partial shading; maximum power point; bald eagle search algorithm; Levy flight; shunt Boost circuit

0 引言

“双碳”目标的推进,促使能源市场的转型加快,据国际能源署统计数据表示,2020~2050年,全球风电及光伏累计装机容量将提升14倍,太阳能作为清洁环保、取之不尽的可再生能源,近年来受到广泛应用^[1]。当光伏阵列处于理想的均匀光照情况下,输出的 $P-U$ 曲线呈现单峰状态,此时常规的扰动观察法、电导增量法等最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)算法可有效搜寻

到最大功率点(maximum power point, MPP)^[2-3];然而实际应用中,光伏阵列会因为树木或建筑物的遮挡,造成光伏阵列输出的 $P-U$ 曲线呈现多峰状态,使得传统的算法在追踪全局最大功率点时,易陷入局部最优。因此,需要引入人工智能算法解决复杂环境条件下的最大功率点追踪问题^[4]。

近年来,国内外学者受到生物行为和自然现象元启发式优化算法解决了很多现实应用问题,这为最大功率点追踪提供了许多方案,如粒子群算法、灰狼算法、鲸鱼算法等都应用于MPPT寻优当中,但是这些算法稳定性和收敛速

收稿日期:2022-10-24

* 基金项目:国家自然科学基金(52177100)、国网安徽省电力有限公司项目(B312G0220005)资助

度不高,因此,国内外学者对此展开相关的研究。文献[5]提出改进蚁狮算法追踪最大功率点,通过在位置更新公式中引入自适应权重系数,改进陷阱范围大小的措施,提高追踪精度和速度,但是存在参数设置过多导致的算法提前收敛;文献[6]提出将非线性搜索控制应用于海鸥优化算法,同时引入混沌序列,增强了算法全局搜索和跳出局部最优的能力,缺点是动态变化的阴影将导致算法收敛前会产生大幅度振荡;文献[7]提出在樽海鞘群算法的全局搜索中添加帕累托分布和混沌映射,在局部搜索中引入差分策略,较大的提高了 MPPT 的收敛速度和稳定性,缺点是算法中领导者位置的更新受混沌初始条件的取值影响较大;文献[8]提出将差分进化算法和灰狼优化算法构成一个双层结构的跟踪算法,使得光伏输出功率最大化,但是当光照条件发生突变时,算法重启条件的设置会影响到算法的收敛情况。

秃鹰搜索(bald eagle search, BES)算法是受到秃鹰捕食过程的启发而提出的一种新型智能算法,该算法具有较强的全局搜索能力,相较于其他智能算法,收敛速度更快,计算精度更准,都能够有效地解决各类复杂数值优化问题^[9]。依据没有免费午餐定理(no free lunch, NFL)的最优化理论,最优化算法的性能是等价的,没有一种算法能够解决所有领域的不同问题^[10],因此提出一种改进秃鹰搜索(improved bald eagle search, IBES)算法,在算法的选择阶段使用混沌映射对随机数进行优化改进,增强算法的全局搜索能力;然后,在算法探索阶段引入 Levy 飞行机制,对秃鹰新位置进行优化,减小了算法陷入局部最优的风险,最后将算法应用到含新型并联 Boost 电路的 MPPT 系统中,提高追踪精度和速度的同时,改善搜索的稳定性。

1 光伏电池等效电路及其输出特性

1.1 光伏电池数学模型

多个光伏电池串并联构成光伏阵列,每个光伏电池相当于一个直流源^[11],其等效电路图如图 1 所示。

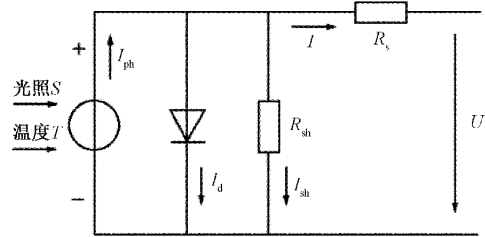


图 1 光伏电池等效电路图

光伏组件得输出电流的电气特性表示为^[12]:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(U + IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

式中: I_{ph} 为光伏电池的光生电流; I_d 为二极管的反向饱和电流; R_{sh} 为等效并联电阻; R_s 为串联等效电阻; n 为二极管特性因子; k 为波尔兹曼常数, 1.38×10^{-23} J/K; T 为光伏电池温度; q 为电子电荷; I 为光伏电池的输出电流; U 为光伏电池的输出电压。

1.2 光伏电池输出特性

本文在 Simulink 平台上建立了 4×1 光伏阵列仿真模型,每块光伏阵列中封装了 4×2 的光伏电池,如图 2 所示,利用该仿真模型对局部阴影情况下的输出特性进行研究,其中,光伏组件的具体参数如表 1 所示。

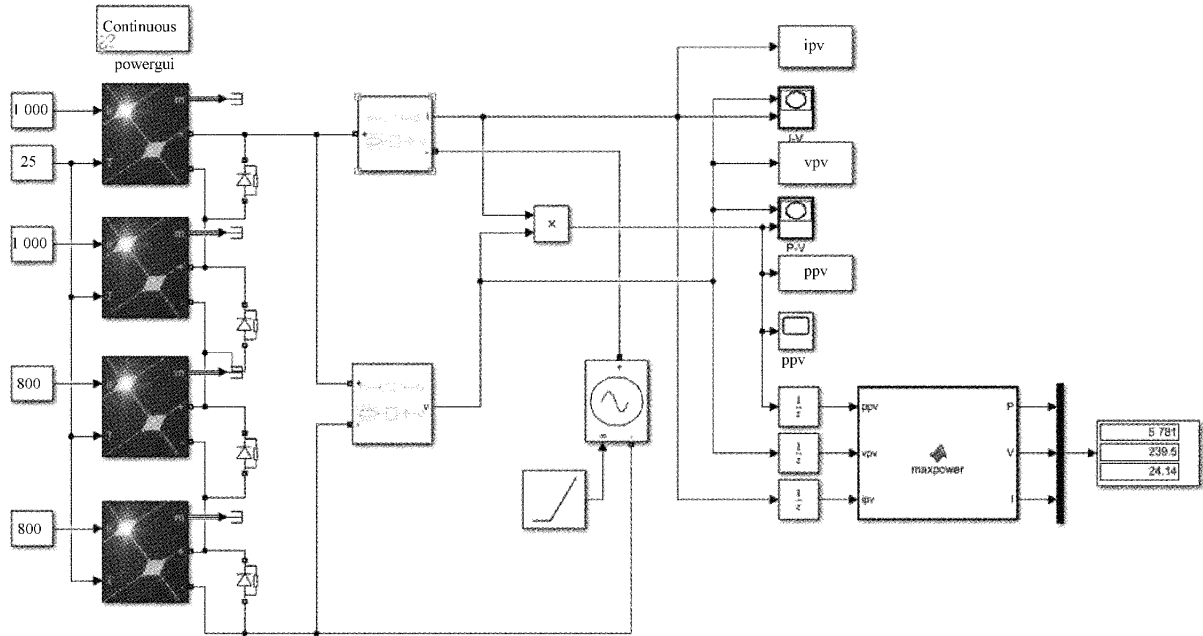


图 2 Simulink 中 4×1 光伏阵列模块

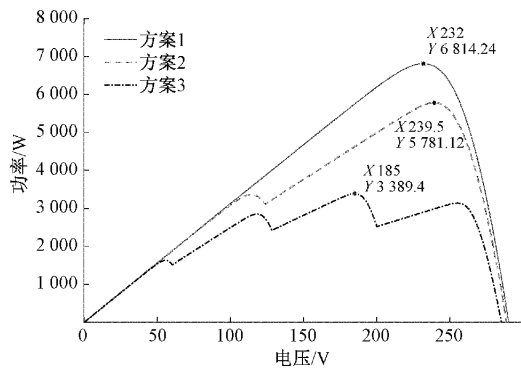
表1 光伏组件参数

| 名称 | 参数 |
|-----------|--------|
| 最大功率点/W | 213.15 |
| 最大功率点电压/V | 29 |
| 最大功率点电流/A | 7.35 |
| 开路电压/V | 36.3 |
| 短路电流/A | 7.84 |

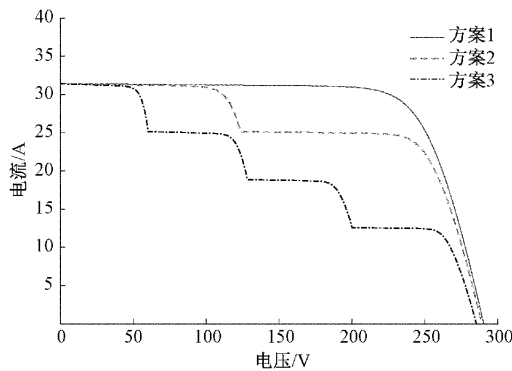
在标准环境温度 25 °C 的情况下, 设置 3 种光伏阵列光照条件方案, 如表 2 所示, 基于图 2 进行仿真, 得到的不同方案下光伏输出曲线如图 3 所示。

表2 光伏阵列光照条件 W/m²

| 方案 | PV1 | PV2 | PV3 | PV4 |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| 方案1 | 1 000 | 1 000 | 1 000 | 1 000 |
| 方案2 | 1 000 | 1 000 | 800 | 800 |
| 方案3 | 1 000 | 800 | 600 | 400 |



(a) P-U输出曲线



(b) I-U输出曲线

图3 不同光照条件下的输出曲线

由图 3(a)、(b)可知, 当光照条件为方案 1 时, 即光照均匀条件下, 光伏阵列的输出曲线呈现单峰, 此时使用传统的 MPPT 算法可以很好的追踪到最大功率点; 当光照条件为方案 2 时, 输出功率曲线有两个峰; 而当光照条件为方案 3 时, 输出功率曲线有 4 个峰。由此可见, 当光伏阵列处于局部阴影的情况下, 光伏输出曲线具有多个极值点,

且阴影分布越不均匀, 在 P-U 特性曲线上, 峰值点就越多。此时, 传统的 MPPT 算法已无法有效、快速的追踪到光伏最大功率点, 为了提高输出功率, 引入一种智能算法显得尤为重要。

2 秃鹰搜索算法

秃鹰主要生活在美洲地区, 其视力敏锐, 观察能力突出, 主要食物为鲑鱼, 秃鹰首先会基于个体和种群的浓度来选择搜索空间, 进而朝选定的区域飞行; 其次秃鹰会在选定的搜索区域内搜索水面, 直到发现合适的猎物; 最终, 秃鹰会改变飞行高度, 快速俯冲, 在水中捕获猎物^[13]。

秃鹰搜索算法模拟秃鹰在狩猎过程中的行为, 秃鹰狩猎分为 3 个阶段。在第 1 阶段, 秃鹰选择猎物数目最多的空间; 在第 2 阶段, 秃鹰在选定的空间内移动以寻找猎物; 在第 3 阶段, 秃鹰从第 2 阶段确定的最佳位置摆动, 并确定最佳狩猎点^[14]。

2.1 选择搜索空间(选择)

在选择阶段, 秃鹰选择并确定搜索空间中的最佳区域用于寻找猎物。秃鹰的位置 $P_{i,new}$ 更新方式是通过随机搜索过程中的先验信息与 α 相乘来确定的, 式(3)从数学上描述了这种行为。

$$P_{i,new} = P_{best} + \alpha \times rand(P_{mean} - P_i) \quad (3)$$

其中, α 表示控制位置变化的参数, 取值在 1.5~2 之间; $rand$ 表示一个取值在 0~1 的随机数; P_{best} 表示经过当前搜索后的最佳搜索位置; P_{mean} 表示秃鹰在经过前次搜索后所在的平均分布位置; P_i 是指第 i 只秃鹰所在的位置。

2.2 搜索空间猎物(探索)

在搜索阶段, 秃鹰从上一阶段确定的搜索空间中寻找猎物, 并在螺旋空间内朝不同的方向移动, 以加速搜索。螺旋飞行的数学模型使用极坐标方程进行位置更新, 如式(4)~(9)所示。

$$\theta(i) = a \times \pi \times rand \quad (4)$$

$$r(i) = \theta(i) + R \times rand \quad (5)$$

$$xr(i) = r(i) \times \sin(\theta(i)) \quad (6)$$

$$yr(i) = r(i) \times \cos(\theta(i)) \quad (7)$$

$$x(i) = xr(i) \times \max(|xr|) \quad (8)$$

$$y(i) = yr(i) \times \max(|yr|) \quad (9)$$

其中, $\theta(i)$ 与 $r(i)$ 分别表示螺旋方程的极角与极径; a 是值在 5~10 内的一个参数, 用于确定中心点中的点搜索之间的角; 而 R 取值在 0.5~2 之间, 用于确定搜索周期的数目; $x(i)$ 与 $y(i)$ 表示在极坐标下秃鹰的位置, 二者的取值均在 -1~1 之间; 秃鹰在选定的搜索空间内向螺旋方向移动并确定俯冲和捕获猎物的最佳位置。秃鹰位置更新如式(10)所示。

$$P_{i,new} = P_i + x(i) \times (P_i - P_{mean}) + y(i) \times (P_i - P_{i1}) \quad (10)$$

式中: P_{i+1} 表示第 i 只秃鹰下一更新的位置。

2.3 俯冲捕获猎物(利用)

在俯冲阶段,秃鹰以搜索空间的最佳位置作为出发点,向目标猎物快速摆动,种群中其他个体也紧随着向最佳点方向移动并对猎物展开攻击,利用极坐标方式来描述运动状态,如式(11)~(16)所示。

$$\theta(i) = a \times \pi \times rand \quad (11)$$

$$r(i) = \theta(i) + R \times rand \quad (12)$$

$$xr(i) = r(i) \times \sin(\theta(i)) \quad (13)$$

$$yr(i) = r(i) \times \cos(\theta(i)) \quad (14)$$

$$x(i) = xr(i) \times \max(|xr|) \quad (15)$$

$$y(i) = yr(i) \times \max(|yr|) \quad (16)$$

秃鹰的位置更新方式如式(17)~(19)所示。

$$\delta_x = x(i) \times (P_i - c_1 \times P_{mean}) \quad (17)$$

$$\delta_y = y(i) \times (P_i - c_2 \times P_{mean}) \quad (18)$$

$$P_{i,new} = rand \times P_{best} + \delta_x + \delta_y \quad (19)$$

在式(17)和(18)中, c_1 和 c_2 均为1~2之间的参数,参数 c_1 和 c_2 会增加秃鹰向最佳中心点移动的程度。

3 改进的秃鹰搜索算法及新型并联 Boost 电路

相较于其他智能优化算法,秃鹰搜索算法在收敛速度和精度性能上略胜一筹,但算法本身仍存在容易陷入局部最优和收敛精度低的问题。因此提出了一种改进的秃鹰搜索算法。主要从两个方面对原始的秃鹰算法进行改进,首先,在算法的第一阶段使用混沌映射对随机数进行优化改进,增强算法的全局搜索能力;然后,在算法第2阶段引入Levy飞行机制,对秃鹰新位置 P_i 进行优化,减小了算法陷入局部最优的风险;最后,对Boost电路进行改进,提升电压稳定性。

3.1 Sin混沌映射

在秃鹰搜索的第1阶段,存在控制位置变化的参数和随机数,二者的随机性导致秃鹰搜索的空间是随机的,使得全局搜索能力不足。因此,在第1阶段采用混沌映射对不确定参数进行优化,提升算法的全局搜索能力^[15]。

混沌优化的主要思想是利用其具有遍历性、随机性等特点,将变量映射到混沌变量空间的取值区间内,最后将得到的解线性地转换到优化变量空间,很多学者根据这些特点将其应用于算法优化问题,既能保持种群的多样性,又能帮助算法跳出局部最优,改善算法的全局搜索能力^[16]。

正弦混沌映射如式(20)所示。

$$C_r = \left(\frac{\alpha \times m}{4} \right) \times \sin(\pi \times C_{r-1}) \quad (20)$$

$$P_{i,new} = P_{best} + C_r \times (P_{mean} - P_i) \quad (21)$$

式中: C_r 是改进后的正弦映射(Sine map), m 是范围0~4的随机数,式(21)为经过混沌映射优化之后新的选择搜索空间阶段的数学模型。

3.2 Levy飞行机制

从秃鹰搜索算法第2阶段可以看出,在迭代过程中,整个秃鹰种群都在向最优的秃鹰位置靠拢,这种位置更新方式降低了种群多样性,切当该秃鹰位置不是全局最优,则可能导致算法陷入局部最优。事实上,全局最优往往存在于局部最优的附近。因此,利用Levy飞行机制,可以很好处理算法易陷入局部最优的问题^[17]。

Levy是一种特殊的随机游走策略,它伴随着频繁短距离局部搜索和少数长距离全局搜索,短距离搜索能在最优值附近达到增强局部搜索能力,长距离搜索有利于跳出局部最优^[18]。因此在秃鹰搜索第2阶段引入Levy飞行机制,增强算法全局搜索能力,新的位置更新模型如式(22)所示。

$$P_{i,new} = P_i + x(i) \times (P_i - P_{mean}) \times Levy + y(i) \times (P_i - P_{i+1}) \quad (22)$$

Levy飞行服从Levy分布,通过傅里叶变换后可以得到其概率密度函数如式(23)所示。

$$Levy \sim u = t^{-\lambda} \quad (23)$$

式中: λ 为1~3的幂次数,但是该式在编程时难以实现,此处采用Mantegna提出的模拟Levy计算如式(24)所示。

$$s = \mu / |v|^{\frac{1}{\beta}} \quad (24)$$

式中: s 为飞行路径,参数 β 一般取1.5, μ 、 v 为正态分布随机数,服从式(25)和(26)的正态分布。

$$\begin{cases} \mu \sim N(0, \sigma_\mu^2) \\ v \sim N(0, \sigma_v^2) \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} \sigma_\mu = \left\{ \frac{\Gamma(1+\beta) \sin(\pi\beta/2)}{\Gamma[(1+\beta)/2] \beta 2^{\beta-1/2}} \right\}^{1/\beta} \\ \sigma_v = 1 \end{cases} \quad (26)$$

3.3 改进秃鹰搜索算法

改进秃鹰搜索算法的具体流程如图4所示。

3.4 新型并联 Boost 电路

光伏系统中变化电路有Buck电路和Boost电路,Boost电路更加适合光伏系统的最大功率跟踪^[19]。单一的Boost电路存在输出功率稳定性差的问题,因此提出一种新型并联Boost电路作为光伏系统最大功率追踪的主电路,虽然电路元件数量增加,却改变了单一Boost电路的输出特性,增加了电压和功率的稳定性。

对于单个负载而言,并联的Boost电路可以提高PWM脉冲信号发生器DC-DC环节的额定功率,降低电压波动,使得系统通过MPPT算法控制电路的占空比,以此连接到PWM脉冲信号进行处理,进而对并联Boost电路进行控制,使系统输出最大功率。

4 Simulink 仿真分析

为了验证IBES算法在MPPT的有效性,在MATLAB/Simulink中搭建仿真模型,以BES算法进行对

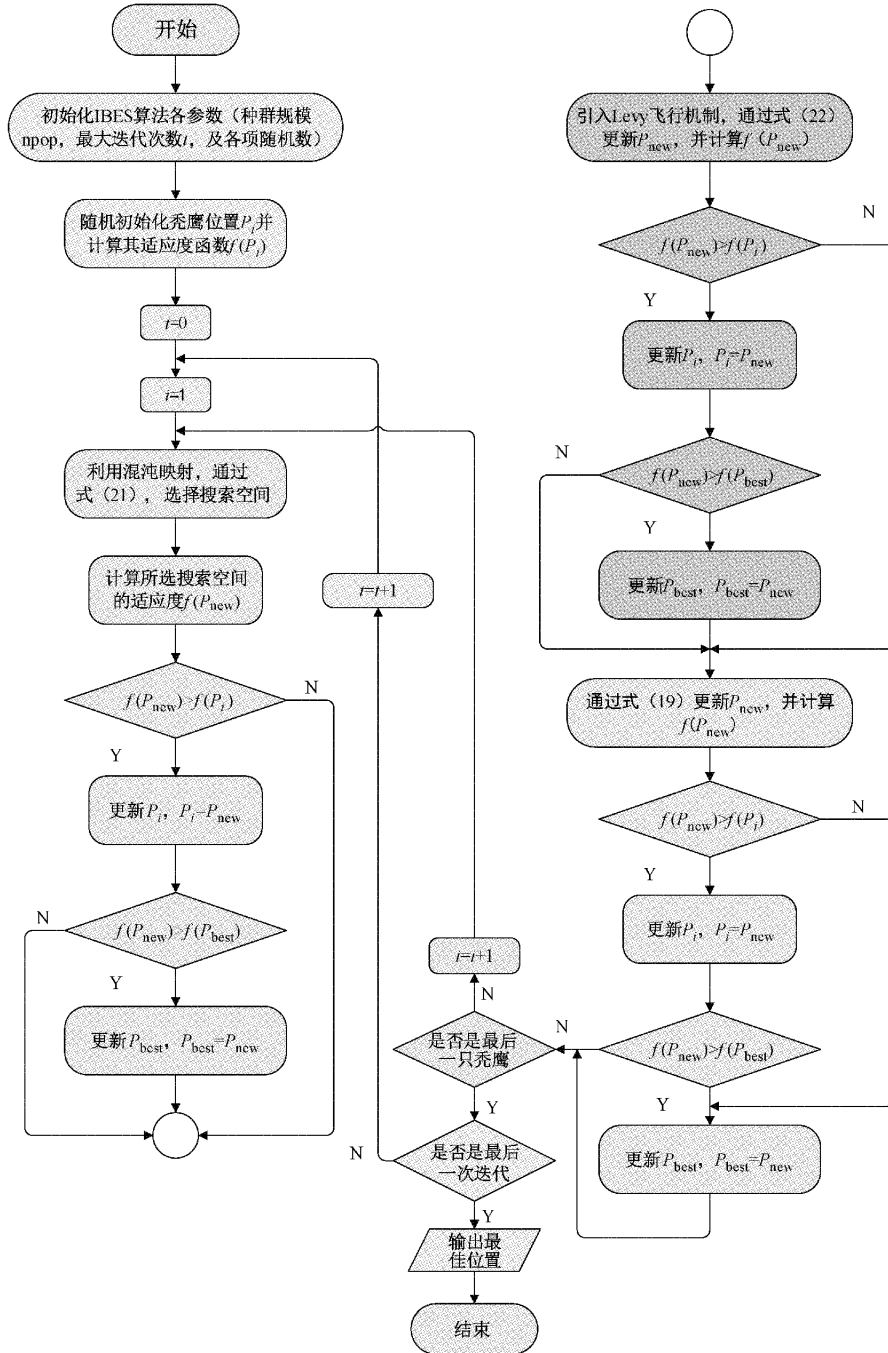


图 4 改进秃鹰搜索算法流程

比。采用如图 5 所示的仿真模型, 整个光伏系统包括光伏阵列、并联 Boost 电路、由 IBES 和 BES 算法搭建的 S-Function 控制器模块及负载电阻。

光伏组件参数如表 1 所示, 图 5 Boost 电路中电感、电容和电阻等参数如表 3 所示。

4.1 静态无阴影遮挡情况下的 MPPT

当光伏阵列处于方案 1 的光照条件时, 即光照强度均匀时, 光伏的 $P-U$ 曲线有且仅含有一个极值点, 此时的光伏系统最大功率为 6 814. 24 W。同时对基于 BES 和 IBES

及 Boost 电路和并联 Boost 电路进行 MPPT 仿真, 得到图 6 所示的 3 种仿真结果。

由图 6(a)、(b)可知, 基于 Boost 电路 BES 算法的 MPPT 在 0.099 s 跟踪到 MPP, 最大功率为 6 809. 04 W, 而 IBES 算法的 Boost 电路在 0.060 8 s 后跟踪到 MPP, 最大功率为 6 814 W, 两种算法的误差都很小。图 6(c)为采用新型并联 Boost 电路 IBES 算法的最大功率追踪, 相比 Boost 电路, 并联 Boost 电路追踪更加稳定。

为了体现本文提出算法的收敛速度和稳定性, 对仿真

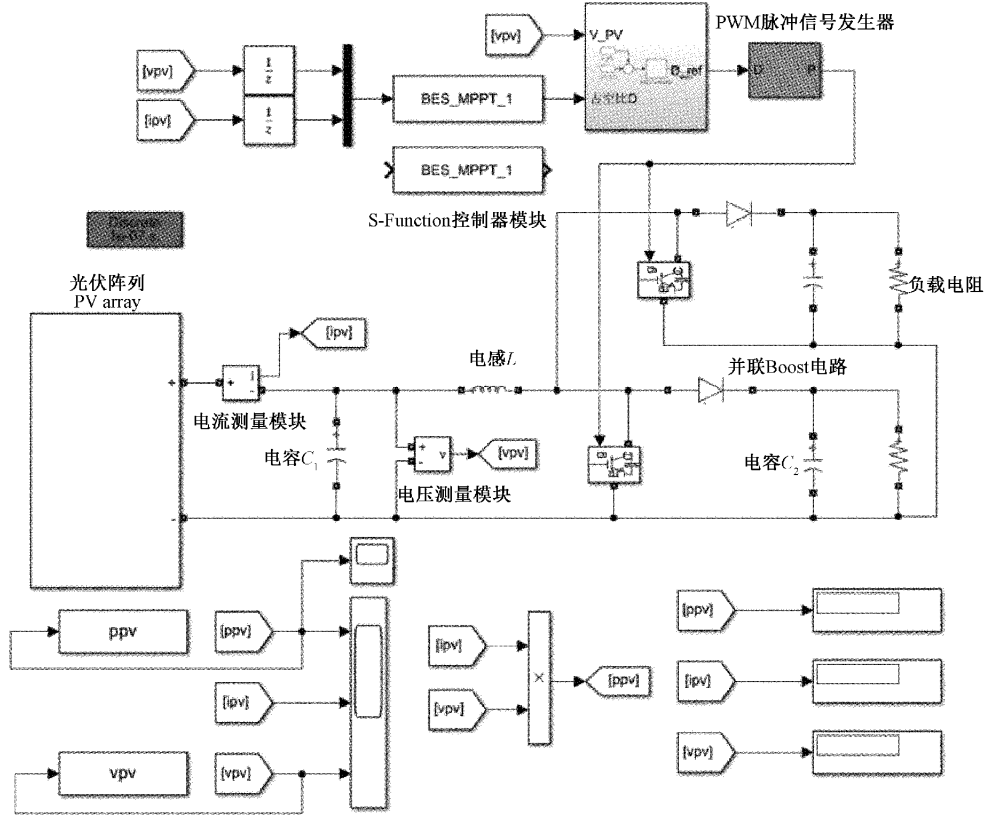


图 5 新型并联 Boost 仿真电路模型

表 3 Boost 电路参数

| 名称 | 参数 |
|---------------|------|
| 电感 L /mH | 1.3 |
| 电容 C_1 /mF | 0.5 |
| 电容 C_2 /mF | 0.02 |
| 电阻 R /Ω | 20 |
| 开关频率 f /kHz | 50 |

结果进行 Plot 图分析,结果如图 7 所示,可以很清晰的看到,IBES 算法绘制出的 Plot 曲线更快的追踪到 MPP,且其追踪过程更加稳定。

4.2 静态有阴影遮挡情况下的 MPPT

当光伏阵列处于方案 2 的光照条件时,光伏的 $P-U$ 曲线含有两个极值点,此时的光伏系统最大功率 $P_{max} = 5781.12\text{ W}$ 。同时对基于 BES 和 IBES 及 Boost 电路和并联 Boost 电路进行 MPPT 仿真,得到图 8 所示的 3 种仿真结果。

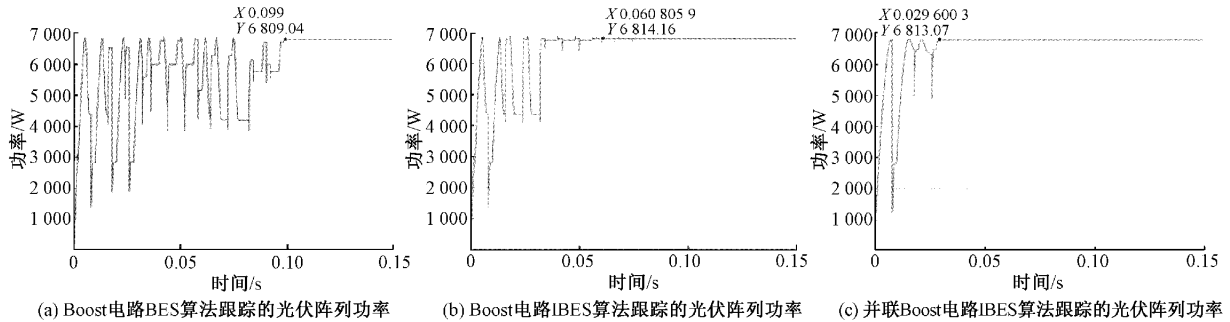


图 6 静态无阴影情况下 3 种仿真结果

由图 8(a)、(b)可知,基于 BES 算法的 MPPT 在 0.0985 s 追踪到 MPP,最大功率为 5705.36 W,而 IBES 算法在 0.053 s 就追踪到 MPP,最大功率为 5780.22 W,与实际最大功率之间的误差分别为 75.76 和 0.9 W,在静态有阴影遮挡的情况下,MPP 误差相差很大,从

图 9 的 Plot 曲线对比中也可以看出,改进后的 IBES 算法收敛速度与收敛精度更高。而图 8(c)中可以得到,对于静态有阴影遮挡情况下的 MPPT,新型并联 Boost 电路对于算法的收敛速度和稳定性都起到一定程度的提升作用。

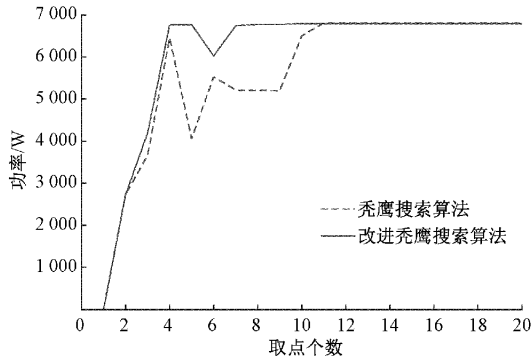


图 7 静态无阴影情况下两种算法的对比

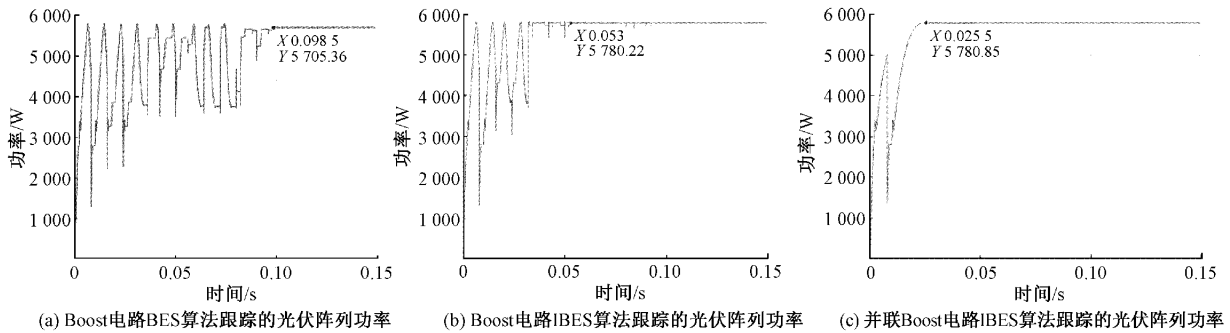


图 8 静态有阴影情况下 3 种的仿真结果

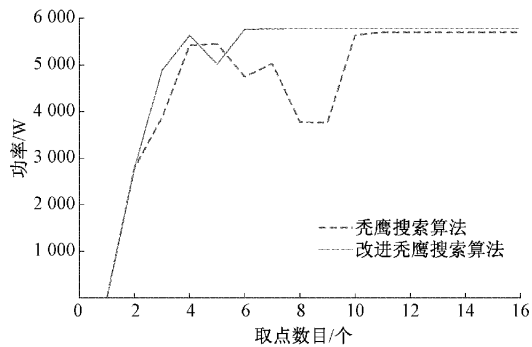


图 9 静态有阴影情况下两种算法的对比

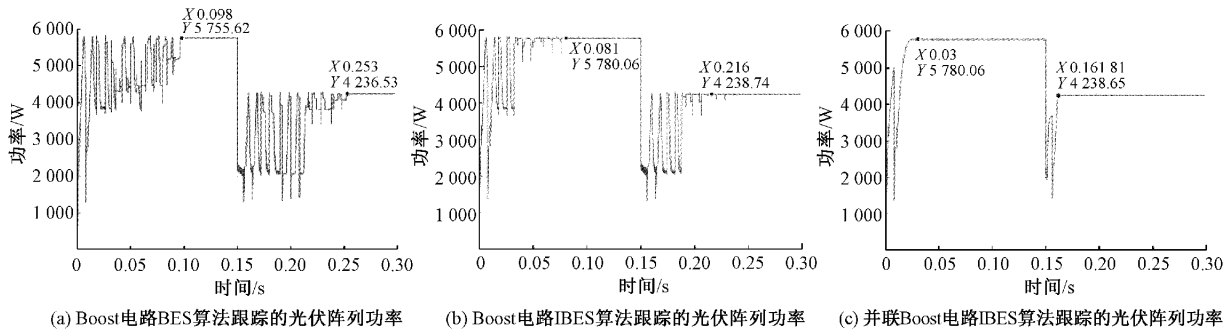


图 10 动态有阴影情况下 3 种的仿真结果

4.3 动态有阴影遮挡情况下的 MPPT

设置阴影动态变化的 MPPT 仿真, $t=0$ s 时,光照强度分别为 $1\ 000$ 、 $1\ 000$ 、 800 、 800 W/m^2 ,最大功率为 $5\ 781.12$ W,在两种算法均追踪到 MPP 的情况下, $t=0.15$ s 时,改变光照条件为 $1\ 000$ 、 300 、 800 、 800 W/m^2 ,新的最大功率为 $4\ 239$ W。同时对基于 BES 和 IBES 的 MPPT 进行仿真,得到图 10 所示的 3 种仿真结果。

由图 10(a)、(b)可以看出,在光伏阵列光照条件改变之前,两种算法都很好的追踪到 MPP,在 0.15 s 光照条件改变后,基于 BES 算法在 0.253 s 追踪到新的最大功率为 $4\ 235.65$ W;而 IBES 算法在 0.216 s 追踪到最大功率为

$4\ 238.74$ W,两种算法的误差分别为 3.35 和 0.26 W,图 10(c)表现了并联 Boost 电路在动态有阴影情况下具有较大优势。各项数据表明,基于新型并联 Boost 电路 IBES 的 MPPT 系统在动态阴影情况下,具有较高的收敛精度、收敛速度和稳定性。

4.4 算法的性能

由于算法中存在 m 、 c_1 、 c_2 等随机参数,增加了两种算法的随机性,因此对两种算法基于并联 Boost 电路在 3 种情况下的追踪成功率、最大输出功率、追踪成功下的平均输出功率及平均追踪时间进行 50 次的仿真实验,并记录比较。其统计结果如表 4 所示。

由表 4 结果可知,IBES 在 3 种情况下的追踪成功率均高于 BES 算法,证明对算法改进的有效性,在帮助秃鹰搜索算法应用于 MPPT 问题上,改善了传统算法陷入局部最

大值的情况,有效快速跳出局部最优及更高的追踪精度和更短的追踪时间。

表 4 两种算法的性能比较

| 情境 | 算法 | 追踪成功率/% | 最大输出功率/W | 平均输出功率/W | 平均追踪时间/s |
|-------|------|---------|----------|----------|----------|
| 静态无阴影 | BES | 100 | 6 809.04 | 6 715.34 | 0.120 |
| | IBES | 100 | 6 813.71 | 6 810.55 | 0.070 |
| 静态有阴影 | BES | 76 | 5 705.36 | 5 598.47 | 0.140 |
| | IBES | 98 | 5 780.22 | 5 776.39 | 0.060 |
| 动态有阴影 | BES | 68 | 4 235.65 | 4 233.27 | 0.268 |
| | IBES | 96 | 4 238.74 | 4 237.62 | 0.221 |

5 结 论

为了解决复杂环境条件下光伏输出曲线多峰问题,提出一种改进的秃鹰搜索算法,通过混沌映射增强全局搜索能力,引入 Levy 飞行机制跳出局部最优,最后提出新型 Boost 电路提升追踪时的稳定性。通过 Simulink 仿真表明,在复杂的环境条件下,改进的秃鹰搜索算法及新型 Boost 电路能够更快、更准确、更稳定地追踪到最大功率点。

本文应用改进的秃鹰搜索算法可以很好地追踪到最大功率点,下一步的研究方向拟考虑将 MPPT 算法与储能控制策略相结合,研究储能策略对光伏最大功率影响,进一步提升电能质量和稳定性。

参 考 文 献

- [1] 杨经纬,张宁,王毅,等.面向可再生能源消纳的多能源系统:述评与展望[J].电力系统自动化,2018,42(4):11-24.
- [2] 庞清乐,郑杨,马兆兴,等.基于 sigmoid 函数的改进功率预测变步长光伏 MPPT 算法[J].电源技术,2023,47(4):523-527.
- [3] 张东宁.基于改进电导增量法的光伏最大功率点跟踪策略研究[J].太阳能学报,2022,43(8):82-90.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 李大华,聂前,田禾,等.改进海鸥优化算法在光伏系统 MPPT 中的应用[J].电源技术,2022,46(5):556-559.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 贾鹤鸣,姜子超,李瑶.基于改进秃鹰搜索算法的同步优化特征选择[J].控制与决策,2022,37(2):445-454.
- [10] ALABERT A, BERTI A, CABALLERO R, et al. No-free-lunch theorems in the continuum [J]. Theoretical Computer Science, 2015, 600: 98-106.
- [11] 李晶,窦伟,徐正国,等.光伏发电系统中最大功率点跟踪算法的研究[J].太阳能学报,2007(3):268-273.
- [12] 刘晓东,肖晶,周恒俊,等.基于改进型光伏系统 MPPT 控制策略的研究[J].电子测量技术,2020,43(22):50-54.
- [13] ALSATTAR H A, ZAIDAN A A, ZAIDAN B B. Novel metaheuristic bald eagle search optimization algorithm [J]. Artificial Intelligence Review: An International Science and Engineering Journal, 2020, 53(3): 2237-2264.
- [14] 吴浩天,孙荣富,廖思阳,等.基于改进气象聚类模型的短期风电功率概率预测方法[J].电力系统自动化,2022,46(15):56-65.
- [15] 孙凤山,范孟豹,曹丙花,等.基于混沌映射与差分进化自适应教与学优化算法的太赫兹图像增强模型[J].仪器仪表学报,2021,42(4):92-101.
- [16] 刘卓,韩凯越,聂彬,等.基于混沌粒子群优化算法的 NOMA 功率分配研究[J].电子测量技术,2022,45(16):159-163.
- [17] 曹梦龙,马俊林.改进蝗虫优化算法在模糊神经网络 PID 控制中的研究[J].电子测量技术,2022,45(20):74-80.
- [18] 唐朝国.基于改进 Levy 飞行的 PSO 湿度传感器补偿算法[J].电子测量与仪器学报,2020,34(3):119-125.
- [19] 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.

作者简介

王军龙,高级工程师,主要研究方向为智能数字化营销及新能源能效服务管理。

E-mail: xcgdwjl@163.com

杨欢红(通信作者),副教授,主要研究方向为电力系统优化调度与控制、可再生能源发电技术。

E-mail: yanghuanhong0907@163.com

沈淼,高级工程师,主要研究方向为综合能源系统源网荷储优化运行研究。

E-mail:13956605080@163.com

钱慧银,高级工程师,主要研究方向为新时代构筑数字化智能用电、新能源应用对配电网的冲击。

E-mail:1419813170@qq.com

向冠霖,工程师,主要研究方向为电力需求侧管理在新

形势下的应用。

E-mail:409492947@qq.com

柴磊,硕士研究生,主要研究方向为可再生能源发电技术及其应用。

E-mail:1483763245@qq.com