

一种基于改进羊群算法的光伏系统 最大功率跟踪策略

吴忠强, 谢宗奎, 王国勇, 卢雪琴, 何怡林
(燕山大学工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北秦皇岛 066004)

摘 要: 针对传统控制算法在局部遮蔽条件下无法持续准确地跟踪最大输出功率点, 提出一种基于改进羊群算法的光伏系统最大功率跟踪策略. 在羊群算法中引入扰动算子、反向种群和自适应放牧概率, 以增强算法的局部开发能力, 提高算法的寻优精度. 均匀光照、局部遮蔽和变照度 3 种条件下的实验结果表明, 改进羊群算法在不同环境条件下均能持续稳定地跟踪最大功率点, 在收敛时间和收敛精度上均有较大优势, 验证了该算法在最大功率点跟踪控制中的可行性.

关键词: 光伏系统; 羊群算法; 局部遮蔽; 最大功率跟踪

中图分类号: TM615 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)10-2017-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.10.020

A Maximum Power Point Tracking Strategy for Photovoltaic System Based on Improved Sheep Behaviors Optimization

WU Zhong-qiang, XIE Zong-kui, WANG Guo-yong, LU Xue-qin, HE Yi-lin
(Key Laboratory of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: Aiming at the fact that traditional control algorithm cannot continuously and accurately track the maximum power point under the condition of partial shading, a strategy for photovoltaic systems based on improved sheep behaviors optimization was proposed. Disturbance operator, reverse position and adaptive factor were introduced in sheep behaviors optimization to enhance the local development ability, and improve the optimization accuracy of the algorithm. The experimental results under the conditions of uniform illumination, partial shading and variable irradiation show that the improved sheep behaviors optimization can steadily track the maximum power point under different environmental conditions, and the algorithm has greater advantages in convergence time and convergence accuracy, verifying the feasibility of this algorithm in the maximum power point tracking control.

Key words: photovoltaic system; sheep behaviors optimization; partial shading; maximum power point tracking

1 引言

光伏发电技术是一种尊重生态平衡、促进可持续发展的可再生能源发电技术^[1-3]. 随着光伏发电系统应用的普及, 如何高质量地利用太阳能资源是目前研究者们急需解决的问题^[4,5]. 为了尽可能地提高光伏发电系统的发电效率, 需对系统的最大输出功率进行跟踪控制, 即最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT)^[6]. 传统 MPPT 控制策略有扰动观察法 (Perturb & Observe, P&O)^[7]、增量电导法 (Increases Conduct-

ance, INC)^[8]等. 在无遮蔽条件下, 传统控制方法能够有效地使系统保持在最大输出功率点上运行, 然而传统控制方法一般存在收敛时间较长的缺陷. 当光伏阵列被云层、树木等局部遮挡时, 各光伏组件的光生电流存在差异, 造成“热斑效应”^[9], 甚至使系统无法正常运行. 为避免出现“热斑效应”, 通常在光伏电池上并联一个反向二极管, 此时光伏阵列功率输出特性曲线呈多峰^[10], 此种情况下, 传统控制方法往往使系统陷入局部最大功率点上, 无法保证系统始终工作在全局最大功率点上.

近年来提出了许多基于智能算法的 MPPT 控制策略. 文献[11]将粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)引入光伏系统 MPPT 控制中, 将粒子初始位置分散定位在可能的峰值点电压处, 减小了陷入局部极值点的风险, 该算法能保证系统在最大功率点工作, 但仍存在收敛时间较长的缺陷. 文献[12]采用改进蝙蝠算法(Improved Bat Algorithm, IBA)对光伏系统进行 MPPT 控制, 在蝙蝠算法的基础上引入 Levy 飞行, 使算法能够迅速跳出局部最优值, 在光伏系统单峰值、双峰值和三峰值等三种算例情况下进行了仿真研究. 文献[13]将改进鸡群算法(Improved Chicken Swarm Optimization, ICSO)引入到光伏系统 MPPT 控制中, 通过引入自适应惯性权重和随机因子有效提高了原鸡群算法的探索能力, 能够较好地实现全局最大功率点跟踪, 且结果较为稳定. 文献[14]提出了一种基于改进樽海鞘算法(Memetic Salp Swarm Algorithm, MSSA)的 MPPT 控制策略, 将文化基因引入樽海鞘算法中, 有效提高了原算法的局部搜索能力, 并在局部遮蔽、恒温变光照、变温变光照 3 种算例下进行仿真实验, 验证了 MSSA 的有效性. 文献[15]将爬山法(Hill Climbing, HC)^[16]与细菌觅食算法(Bacteria Foraging Optimization Algorithm, BFOA)^[17]相结合, 实现了一种基于 HC-BFOA 的 MPPT 两步法控制策略, 使系统既能准确且快速地搜索全局 MPP, 又能稳定地输出最大功率, 提高了系统的输出效率.

羊群算法(Sheep behaviors Optimization, SO)是 2018 年由曲大鹏等人提出的一种新型群集智能算法^[18], 通过模拟羊群的习性和觅食行为来寻找最优值. 羊群的行为分为三种: 头羊引领, 羊群互动和牧羊犬监督. 在求解最优值的过程中, 每只羊都作为一个寻优个体. 该算法从集群算法的核心出发, 简单高效、易于实现, 但与大多数启发式算法一样, SO 也存在收敛速度较慢、寻优精度不高的不足.

针对传统控制方法在局部遮蔽时无法持续跟踪最大输出功率的缺陷, 提出一种基于改进羊群算法(Improved Sheep Behaviors Optimization, ISO)的光伏系统最大功率跟踪策略. 在 SO 中引入扰动算子、反向种群和自适应放牧概率, 以提高算法的寻优精度, 加快算法收敛. 为验证 ISO 算法在光伏系统 MPPT 控制中的有效性和优越性, 将 ISO 与 P&O、INC、BFOA 及标准 SO 算法在均匀光照、局部遮蔽和变照度 3 种条件下进行仿真实验.

2 光伏系统建模

光伏系统是由多个光伏组件串联和并联组成的光伏阵列, 在对其研究时, 通常是通过测量光伏阵列的输

出电流和输出电压等外部特性来研究其内部机理模型. 因此, 构建光伏组件数学模型是建立光伏系统模型的基础.

2.1 光伏电池模型

在现有的光伏电池模型中, 单二极管模型(Single-Diode Model, SDM)是最常用的数学模型, 能够精确地拟合电池输出特性, 其等效电路图如图 1 所示.

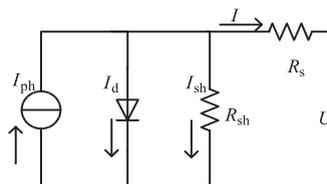


图1 光伏电池模型等效电路图

图 1 中, I_{ph} 为光生电流, I_d 为流过二极管的电流, R_s 为等效串联电阻, R_{sh} 为等效并联电阻, U 为输出电压, I 为输出电流. 根据基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's Current Law, KCL), 可得出光伏电池模型 I-V 特性关系式为

$$\begin{aligned} I &= I_{ph} - I_d - I_{sh} \\ &= I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{Q(U + IR_s)}{AkT}\right) - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: I_0 为二极管内部反向饱和电流; Q 为电荷量 ($1.60217646 \times 10^{-19}$); k 为玻尔兹曼常数 ($1.3806503 \times 10^{-23}$ J/K); A 为二极管品质因子.

由于式(1)为复杂的超越方程, 求解较困难, 并且参数 I_{ph} 、 I_0 、 R_s 和 R_{sh} 随辐照度及温度的变化而变化, 所以在实际工程中, 需在保证工程精度的前提下, 对式(1)进行适当的简化. 在通常情况下, R_{sh} 数值很大, R_s 值很小, 所以 $(U + IR_s)/R_{sh}$ 和 IR_s 项在计算时可以忽略不计; 且 R_s 值远小于二极管正向导通时阻值, 所以 I_{ph} 近似等于短路电流 I_{sc} . 为方便计算推导, 引入 C_1 和 C_2 两个变量: $C_1 I_{sc} = I_0$, $C_2 = AkT/Q$, 则式(1)可简化为

$$I = I_{sc} \cdot \left[1 - C_1 \cdot \left(\exp\left(\frac{U}{C_2 \cdot U_{oc}}\right) - 1 \right) \right] \quad (2)$$

式中: U_{oc} 为开路电压.

当光伏电池工作在最大功率点时, 其输出电流为最大功率点电流 I_m , 输出电压为最大功率点电压 U_m , 将 $I = I_m$ 和 $U = U_m$ 带入式(2)得

$$I_m = I_{sc} \cdot \left[1 - C_1 \cdot \left(\exp\left(\frac{U_m}{C_2 \cdot U_{oc}}\right) - 1 \right) \right] \quad (3)$$

式中: $\exp\left(\frac{U_m}{C_2 \cdot U_{oc}}\right)$ 值远大于 1, 故 -1 可以忽略, 整理后可得

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \cdot \exp\left(-\frac{U_m}{C_2 \cdot U_{oc}}\right) \quad (4)$$

开路状态时, $I=0, U=U_{oc}$. 将式(4)中 $I=0$ 和 $U=U_{oc}$ 带入式(2)可得

$$0 = I_{sc} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \cdot \exp\left(-\frac{U_m}{C_2 \cdot U_{oc}} \right) \cdot \left(\exp\left(\frac{1}{C_2} \right) - 1 \right) \right] \quad (5)$$

式中: $\exp\left(\frac{1}{C_2}\right)$ 的数值远大于 1, 所以 -1 可以忽略, 整理可得

$$C_2 = \left(\frac{U_m}{U_{oc}} - 1 \right) \cdot \left[\ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right]^{-1} \quad (6)$$

光伏电池厂家通常会提供标准条件下(标准温度 $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$, 标准辐照度 $S_{ref} = 1000\text{W}/\text{m}^2$) 的最大功率点电流 I_{m_ref} 、最大功率点电压 U_{m_ref} 、短路电流 I_{sc_ref} 和开路电压 U_{oc_ref} . 然而, 在不同的辐照度和温度条件下, 光伏组件的 I_{sc} 、 U_{oc} 、 U_m 和 I_m 均会发生变化, 在计算时需根据 I_{sc_ref} 、 U_{oc_ref} 、 U_{m_ref} 、 I_{m_ref} 、辐照度 (S) 和温度 (T) 进行修正.

首先根据式(7)和式(8)分别计算当前工况与标准测试条件的温度差 ΔT 和辐照度差 ΔS .

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (7)$$

$$\Delta S = S - S_{ref} \quad (8)$$

然后分别按下式对 I_{sc} 、 U_{oc} 、 U_m 和 I_m 进行修正.

$$I_{sc} = I_{sc_ref} \cdot \frac{S}{S_{ref}} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (9)$$

$$U_{oc} = U_{oc_ref} \cdot (1 - \gamma \cdot \Delta T) \cdot \ln(e + \beta \cdot \Delta S) \quad (10)$$

$$I_m = I_{m_ref} \cdot \frac{S}{S_{ref}} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (11)$$

$$U_m = U_{m_ref} \cdot (1 - \gamma \cdot \Delta T) \cdot \ln(e + \beta \cdot \Delta S) \quad (12)$$

式中: α 、 β 和 γ 为常数, 通常取 $\alpha = 0.0025$ 、 $\beta = 0.5$ 、 $\gamma = 0.00288$.

2.2 光伏系统建模

图 2(a) 为由 3 个光伏组件组成的 1×3 光伏阵列, 分别设置不同的辐照度条件: 均匀辐照度时, 光伏阵列辐照度均为 $1000\text{W}/\text{m}^2$; 局部遮蔽时, PV#1 辐照度为 $1000\text{W}/\text{m}^2$, PV#2 辐照度为 $800\text{W}/\text{m}^2$, PV#3 辐照度为 $400\text{W}/\text{m}^2$, 得到在不同工况条件下的 P-V 特性曲线, 如图 2(b) 所示.

由图 2(b) 可知, 在均匀光照下, 仅含一个全局最大功率点 GMPP; 在局部遮蔽下, P-V 特性曲线发生了变化, 出现多个局部最大功率点 LMPP. 为保证系统一直工作在 GMPP 下, 需引入算法对光伏系统进行优化控制.

3 改进羊群算法

3.1 标准羊群算法

羊群算法的主要思想如下: 从寻优空间的任意一点开始, 具有最优适应度值的羊设置为头羊, 随后羊群

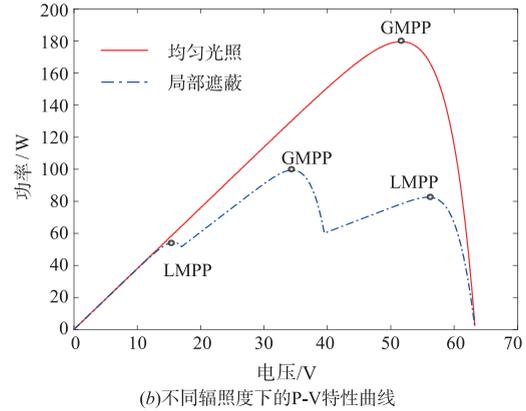
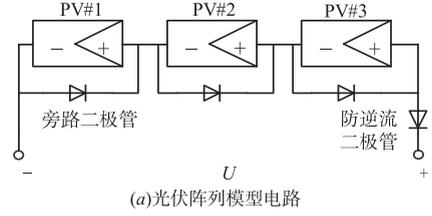


图 2 光伏系统模型及不同辐照度下的 P-V 特性曲线

跟随头羊进行移动. 每只羊会随机选择另一只进行比较, 如果后者更好, 则向其移动, 否则远离它. 当判定种群陷入局部最优时, 引入牧羊犬监督机制, 随机重置部分羊的位置以跳出局部最优. 不断重复搜索, 得到目标函数的最优值.

设有一个由 N 只羊组成的群体在 D 维的目标空间中进行搜索, 第 i 只羊的位置为 $x_i = x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}$, $1 \leq i \leq N$, 所在最优位置的羊设置为头羊.

3.1.1 头羊引领阶段

头羊引领的行为是算法的全局搜索机制, 每只羊向头羊靠近, 按式(13)调整各自的位置, 若移动后该羊的适应度值没有变好, 则放弃本次更新.

$$x_i^{k+1} = x_i^k + rand \times (g^k - x_i^k) \quad (13)$$

式中: g^k 表示第 k 代头羊所在位置; $rand$ 为 0 到 1 的随机数; x_i^k 为第 i 只羊移动前的位置; x_i^{k+1} 为第 i 只羊移动后的位置.

3.1.2 羊群互动阶段

羊群互动的行为是算法的局部开发机制, 每只羊 x_i^k 会随机选择另一只羊 x_j^k 进行互动, 如果 x_i^k 所在位置优于 x_j^k , 则 x_j^k 向 x_i^k 靠近, x_j^k 按式(14)进行移动, x_i^k 远离 x_j^k , x_i^k 按式(15)进行移动; 否则执行相反操作. 两只羊互动后, 与互动前的值进行比较, 若移动后该羊的适应度值没有变好, 则放弃更新.

$$x_j^{k+1} = x_j^k + rand \times (x_i^k - x_j^k) \quad (14)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + rand \times (x_i^k - x_j^k) \quad (15)$$

3.1.3 牧羊犬监督阶段

当本代头羊与上代头羊的差值小于一定阈值 ε 时,

则算法有可能陷入某个局部最优解,此时进入牧羊犬监督阶段.对于除头羊的每一只羊,取 $[0,1]$ 的随机数 q ,若 $q < p$, p 为重置概率,则对当前羊进行放牧,随机重置;否则,随机选择一只被放牧的羊 x_j^{k+1} ,并按式(16)向其移动,若移动后该羊的适应度值没有变好,则放弃本次更新.

$$x_i^{k+1} = x_i^k + rand \times (x_j^{k+1} - x_i^k) \quad (16)$$

当 ε 较小时,阈值不容易被满足,算法不易进入牧羊犬监督阶段,导致算法跳出局部最优的能力减弱,但同时会加强算法的局部开发能力;反之,羊群易被放牧,能有效跳出局部最优,但同时会影响局部开发能力.

3.2 改进羊群算法

文献[18]将SO与PSO进行比较,在解的质量、收敛速度、稳定性等方面均进行了性能分析,证明了SO优于PSO,但从收敛图和寻优结果中可以看出,该算法在寻优迭代次数为1000时,解依然没有很高的精度,需要极大的迭代次数才能获得精度较高的解.因此,SO算法在收敛速度和寻优精度上仍存在一定缺陷.针对SO算法的不足,本文主要从以下三个方面对该算法进行改进.

3.2.1 扰动算子

羊群互动阶段时,每只羊随机选择另一只羊进行比较,相互比较后进行靠近或背离移动.其中,背离移动可能使该个体原本较优的适应度值变差,对算法收敛过程产生不利影响,故取消背离移动,并引入扰动算子增强算法的局部寻优能力.改进后的羊群互动阶段,第 i 只羊 x_i^k 会随机选择另一只羊 x_j^k 进行互动,如果 x_i^k 所在位置优于 x_j^k ,则 x_j^k 向 x_i^k 靠近, x_j^k 按式(17)进行移动, x_i^k 按式(18)在自身周围小步搜索;否则执行相反操作.两只羊互动后,与互动前进行比较,若移动后该羊的适应度值没有变好,则放弃更新.

$$x_j^{k+1} = x_j^k + rand \times (x_i^k - x_j^k) \quad (17)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + c \cdot (rand - 0.5) \cdot (rand \cdot g^k - x_i^k) \quad (18)$$

式中, $c \cdot (rand - 0.5) \cdot (rand \cdot g^k - x_i^k)$ 为扰动算子, g^k 为执行羊群互动前头羊所在位置, c 为 $[0,2]$ 区间上的可调参数.由式(18)可知,第 i 只羊在自己周围小步移动,其中扰动算子增加了头羊的影响,能够增强算法的局部搜索能力,加快种群向最优位置靠近.

3.2.2 反向种群

当算法进入牧羊犬监督机制时,对于除头羊的每一只羊,若其满足被放牧的条件,则该个体位置被随机重置.随机重置的个体能够对增强种群多样性、跳出局部最优起到一定的作用,但重置后的位置通常差于被放牧前的位置,对算法收敛速度有一定影响.研究表明^[19],较差个体的反向解通常具有很好的适应性,故在羊群重置时引入反向种群.

改进后,若当前第 i 只羊满足被放牧条件,则该个体按式(19)更新自己的位置.

$$x_i^{k+1} = ub + lb - x_i^k \quad (19)$$

式中: ub 和 lb 分别为搜索空间的上限和下限.

3.2.3 自适应放牧概率

当羊群陷入局部最优时,牧羊犬监督机制引导种群跳出局部最优,本阶段有两个参数需合理设置.文献[18]已验证 ε 的大小对算法的性能影响较小,只需分析 p 值的大小.当 p 较大时,算法跳出局部最优解的能力增强,但同时局部开发能力减弱;当 p 值较小时,算法局部开发能力较强,但有可能陷入局部最优解.为权衡羊群算法的全局搜索与局部搜索能力,引入自适应参数

$$p = \omega_{\max} - \frac{t}{M} \cdot (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \quad (20)$$

式中, t 为当前迭代次数, M 为最大迭代次数, ω_{\max} 和 ω_{\min} 分别为最大放牧概率和最小放牧概率.

改进后,在迭代初期, p 较大,能有效对全局进行搜索,加快算法的收敛速度;迭代后期, p 较小,对局部精细搜索的能力增强,有效提高算法的求解精度.

综合以上三部分改进,ISO的步骤如下:

步骤1 初始化种群和算法参数.初始设置的参数主要有:种群数 M ,最大迭代次数 T ,维度 D ,常数 c ,求解空间的上限 ub 和下限 lb ,生成初始种群 x_0 .

步骤2 按式(13)进行头羊引领,若移动后适应度值没有变好则不更新.

步骤3 按式(17)和式(18)进行羊群互动,若移动后适应度值没有变好则不更新.

步骤4 判断是否陷入局部最优,若陷入局部最优,转至步骤5,执行牧羊犬监督机制;否则转至步骤6.

步骤5 执行牧羊犬监督机制,若当前个体满足被放牧条件($q < p$),按式(19)更新位置;若不满足条件,则按式(16)调整位置.若移动后适应度值没有变好,则不更新.

步骤6 若达到最大迭代次数,转至步骤8;否则转至步骤7.

步骤7 每隔一定迭代次数,重新排序,确定羊群的位置,转至步骤2.

步骤8 输出当前最优解,算法结束.

4 基于ISO算法的MPPT设计

4.1 SIMULINK下的MPPT模型

由式(2)可知,在给定温度和辐照度条件下,输出电流随输出电压变化而变化,而输出功率由电流和电压共同决定,所以输出电压 U 可作为优化变量.在一定条件下,使系统时刻工作在最佳电压上以得到系统最大的输出功率,故优化函数可定义为

$$f(U) = \max P(U) = \max(U \cdot I(U)) \quad (21)$$

式中: $P = U \cdot I$ 为输出功率。

为实现 ISO 算法对光伏系统的最大功率跟踪控制,在 SIMULINK 中搭建如图 3 所示的基于 ISO 算法的光伏系统 MPPT 结构。

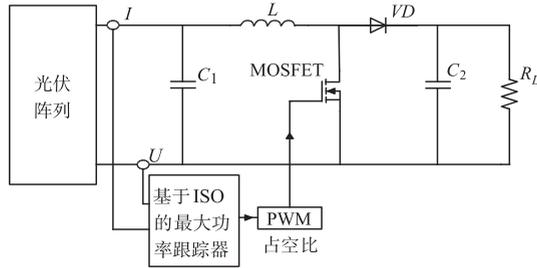


图3 基于ISO算法的光伏系统MPPT结构图

如图 3 所示,系统的主要工作原理为:首先将光伏系统的输出电压和输出电流读入到最大功率控制器中,利用 ISO 算法以电压 U 作为变量进行寻优,以占空比的形式输出控制指令控制 MOSFET,从而动态地调节电压,并将电压反馈到跟踪器中,直到电压达到稳定。

4.2 参数设置

图 3 中的系统参数设置如表 1 所示。

表 1 系统参数设置

| 参数名称 | 参数值 |
|---------------------|----------------------|
| 短路电流 | 3.8A |
| 开路电压 | 21.1V |
| 最大功率点电流 | 3.5A |
| 最大功率点电压 | 17.1V |
| 标准辐照度 | 1000W/m ² |
| 标准温度 | 25℃ |
| 电感(L) | 10mH |
| 电阻(R) | 3Ω |
| 电容(C ₁) | 440 μF |
| 电容(C ₂) | 220 μF |

5 不同光照情况下的算例研究

为验证 ISO 算法在光伏系统 MPPT 控制中的有效性,在均匀光照强度、局部遮蔽和变光照 3 种条件下,分别对 ISO 与 SO、BFOA、P&O、INC 的 MPPT 控制效果进行对比。参数设置:ISO、SO、BFOA 中,种群数目均为 5,最大迭代次数为 20;ISO 与 SO 中,阈值 $\varepsilon = 10^{-4}$; $\omega_{\max} = 0.5$, $\omega_{\min} = 0.01$; BFOA 中,全局学习因子 $c_g = 1.2$,最大趋化次数 $N_c = 4$,最大繁殖次数 $N_{re} = 3$,迁移操作次数 $N_{ed} = 3$,迁移概率 $P_{ed} = 0.005$ 。

5.1 均匀光照

在 2.2 节所示光伏系统中,PV#1、PV#2、PV#3 三个

光伏组件均接受辐照度为 1000W/m² 的均匀光照,温度 25℃,系统理论最大输出功率为 179.6W,运行得到如图 4 所示的系统响应图。

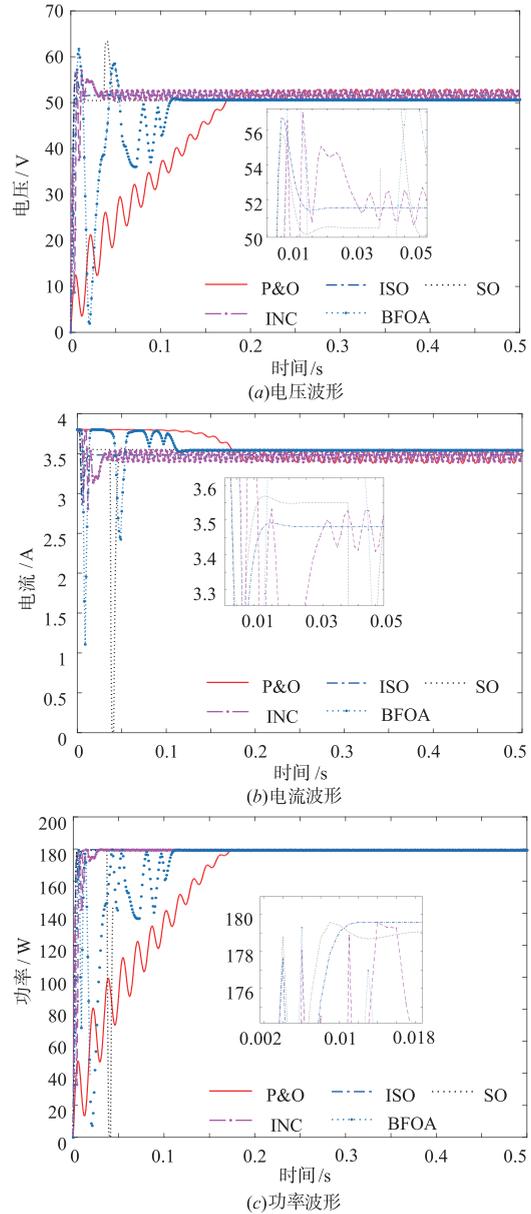


图4 均匀光照下不同算法的系统响应示意图

由图 4 可见,5 种算法均能收敛到最大功率点附近,误差小于 0.5W。ISO 在 0.012s 时就收敛到理论最大输出功率,且与其他算法相比震荡最小。P&O 收敛最慢,在 0.176s 时才收敛到 179.4W,存在 0.2W 的功率损失。

5.2 恒定阴影条件

为模拟局部遮蔽下光伏系统的运行情况,PV#1、PV#2、PV#3 分别施加 1000W/m²、800W/m²、400W/m² 的辐照度,在 25℃ 条件下,系统理论最大输出功率为 99.4W,系

统运行得到如图 5 所示的系统响应图。

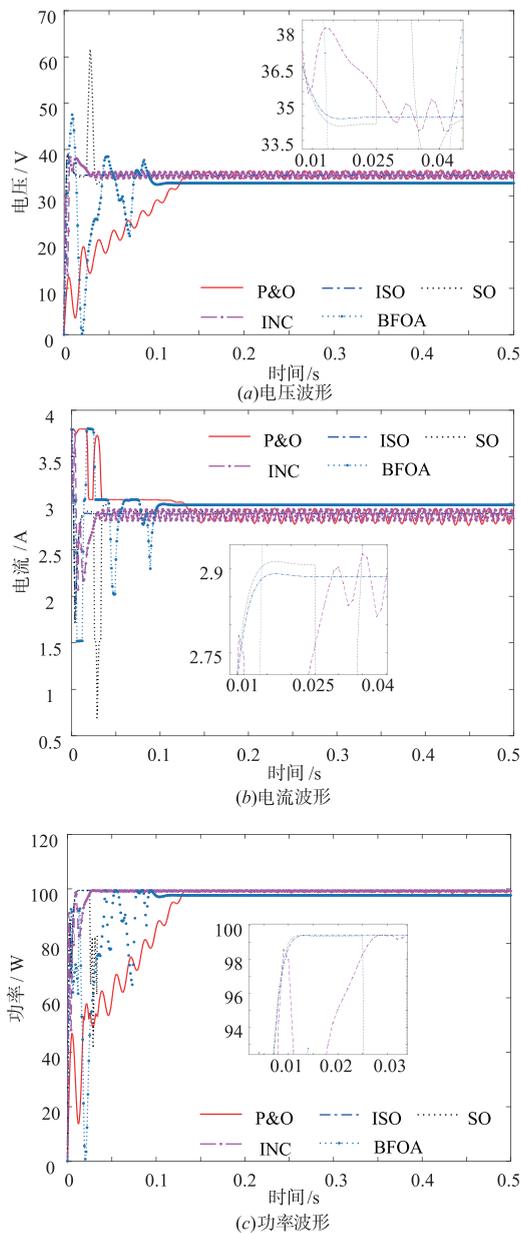


图5 局部遮蔽下不同算法的系统响应示意图

由图 5 可见, BFOA 的输出功率与理论最大输出功率偏差较大, 偏差为 1.7W, 其他四种算法均能收敛到理论最大输出功率附近, 偏差在 0.1W 以内; ISO 算法收敛速度最快, 在 0.013s 时收敛到 99.4W, 展现了出色的寻优能力; 其他三种算法寻优结果误差虽然较小, 但收敛过程中震荡较大。

5.3 变光照强度

为模拟实际运行中辐照度时刻变化的情况, 对系统施加如图 6(a) 所示的阶跃变化辐照度, 得到 P-V 特性曲线如图 6(b) 所示。

图 6 中, Step1、Step2、Step3 分别为 $[0, 0.4]$, $[0.4,$

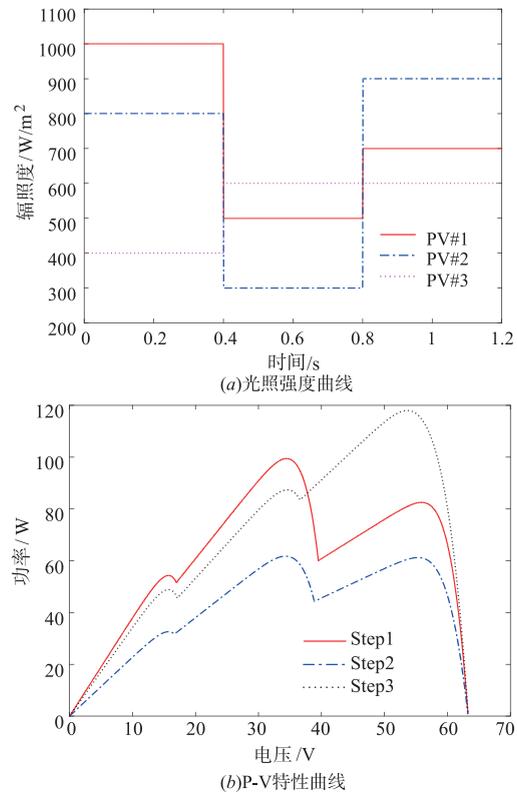


图6 光照强度变化曲线及P-V特性曲线

0.8] 和 $[0.8, 1.2]$ 时间区间在光伏阵列上施加的辐照度。Step1 区间, 光伏阵列的理论最大输出功率为 99.4W; Step2 区间, 理论最大输出功率为 61.7W; Step3 区间, 光伏阵列的理论最大输出功率为 118W; 同时, 三个阶段的 P-V 特性曲线中均含有两个局部最大输出功率。在上述条件下, 系统运行得到如图 7 所示的系统响应图。

由图 7 可见, ISO 在辐照度变化的三个阶段均快速收敛到了全局最优值, 震荡较小; P&O 收敛到稳定状态所需时间较长, 收敛总时长为 0.343s, 且每当辐照度发生变化时, 该算法跟踪到最大功率所需的时间最长; INC 在 Step1 和 Step2 阶段能够快速收敛到最大输出功率, 但收敛过程存在较大震荡, 且收敛时间长于 ISO, 而在 Step3 阶段 INC 未能收敛到理论最大输出功率; BFOA 在 Step1 阶段能够收敛到全局最优值附近, 偏差为 1.8W, 在后两个阶段中稳定值与理论值误差较大, 很明显陷入了局部最优值。

5.4 结果统计

为更直观地说明各算法在 MPPT 控制中的性能, 对上述 5 种算法在各算例情况下的稳定值和收敛时间进行统计, 如表 2 所示。

由表 2 可知, ISO 在三种算例下均达到了理论最大输出功率, 收敛时间远小于其他四种算法。与标准 SO

算法相比,改进后的 ISO 在均匀光照时收敛时间为 SO 的 21%,在局部遮蔽时收敛时间为 SO 的 29.5%,变照度时收敛时间分别为 SO 的 22%、63.6%、57.9%,表明

ISO 中 3 个改进策略有效地提升了原算法的收敛速度和寻优精度,相比 P&O、INC、BFOA 更适合应用到光伏系统 MPPT 控制中。

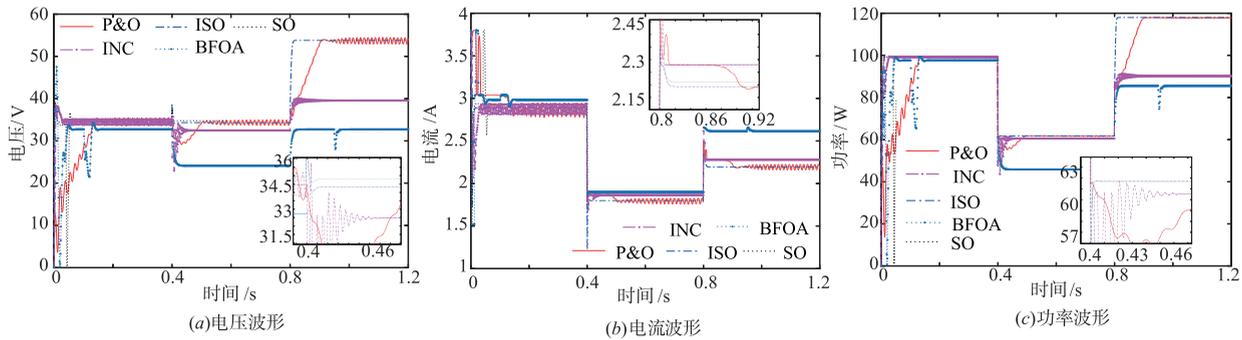


图7 变辐照度下不同算法的系统响应图

表 2 5 种算法在各算例下的稳定值和收敛时间统计结果

| 算例 | 统计量 | ISO | SO | P&O | INC | BFOA |
|------|---------|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 均匀光照 | 收敛时间(s) | 0.012 | 0.056 | 0.176 | 0.029 | 0.114 |
| | 稳定值(W) | 179.6 | 179.1 | 179.4 | 179.5 | 179.4 |
| | 理论值(W) | 179.6 | | | | |
| 局部遮蔽 | 收敛时间(s) | 0.013 | 0.044 | 0.134 | 0.028 | 0.115 |
| | 稳定值(W) | 99.4 | 99.4 | 99.3 | 99.4 | 97.7 |
| | 理论值(W) | 99.4 | | | | |
| 变照度 | 收敛时间(s) | 0.013/0.007/0.011 | 0.059/0.011/0.019 | 0.141/0.099/0.103 | 0.028/0.072/0.159 | 0.157/0.048/0.176 |
| | 稳定值(W) | 99.4/61.7/118 | 99.4/61.6/179.9 | 99.4/61.7/118 | 99.4/60.5/90.2 | 97.6/45.8/85.5 |
| | 理论值(W) | 99.4/61.7/118 | | | | |

6 结论

本文提出了一种基于 ISO 算法的光伏系统最大功率跟踪控制方法. 针对 SO 算法存在的缺陷,在羊群互动阶段引入扰动算子,增强算法的局部开发能力,有效提高了算法的收敛速度;牧羊犬监督机制中引入反向种群,提升了被放牧个体的质量,改善了算法的寻优效率;自适应放牧概率的引入,使算法能够动态地调节迭代过程中羊群被放牧的概率,满足了 ISO 在不同时期的寻优要求. 将 ISO 算法应用到光伏系统的 MPPT 中,三种算例的仿真结果表明,ISO 算法能够使系统快速达到最大功率且稳定运行,显著减小了光伏系统输出电压、输出电流和输出功率的震荡,并且在寻优精度和收敛速度均优于 P&O、INC、BFOA 和标准 SO 算法。

参考文献

[1] HULTMANN A H V, Coelho L D S, Mariani V C, et al. An improved free search differential evolution algorithm: a case study on parameters identification of one diode equivalent circuit of a solar cell module [J]. Energy, 2015, 93:

1515 - 1522.

[2] 宁勇,戴瑜兴,王镇道,等. 不同 MPPT 架构光伏系统发电效率的比较研究[J]. 电子学报, 2016, 44(9): 2134 - 2140.

NING Yong, DAI Yu-xing, WANG Zhen-dao, et al. A comparative study of central and grouped and distributed MPPT architectures for power generation efficiency of photovoltaic system[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(9): 2134 - 2140. (in Chinese)

[3] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893 - 1904.

ZHOU Xiao-xin, CHEN Shu-yong, LU Zong-xiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893 - 1904. (in Chinese)

[4] 刘宿城,汤运泽,刘晓东,等. 不同负载条件下光伏接口 MPPT 变换器的小信号建模及实验验证[J]. 电子学报, 2019, 47(2): 454 - 461.

LIU Su-cheng, TANG Yun-ze, LIU Xiao-dong, et al. Small-signal modeling and experimental verification of PV-

- interfacing MPPT converter under different load conditions [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2019, 47(2): 454 – 461. (in Chinese)
- [5] WU Z Q, JIA W J, ZHAO L R, et al. Maximum wind power tracking based on cloud RBF neural network [J]. *Renewable Energy*, 2016, 86: 466 – 472.
- [6] 周元贵, 陈启卷, 何昌炎, 等. 局部阴影下光伏阵列建模及多峰值 MPPT 控制 [J]. *太阳能学报*, 2016, 37(10): 2484 – 2490.
ZHOU Yuan-gui, CHEN Qi-juan, HE Chang-yan, et al. Model of PV array under partial shading and MPPT control of multi-peak characteristics [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2016, 37(10): 2484 – 2490. (in Chinese)
- [7] 倪雨, 郝帅翔. 扰动观测法控制 MPPT 系统运动特性分析 [J]. *电子学报*, 2015, 43(7): 1388 – 1394.
NI Yu, HAO Shuai-xiang. Motion characteristics analysis of P&O control MPPT system [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(7): 1388 – 1394. (in Chinese)
- [8] TEY K S, MEKHILEF S. Modified incremental conductance MPPT algorithm to mitigate inaccurate responses under fast-changing solar irradiation level [J]. *Solar Energy*, 2014, 101(1): 333 – 342.
- [9] AO W, YIMIN X. Multiscale prediction of localized hot-spot phenomena in solar cells [J]. *Renewable Energy*, 2020, 146: 1292 – 1300.
- [10] 贾林壮, 陈侃, 李国杰, 等. 局部阴影条件下光伏阵列 MPPT 算法研究 [J]. *太阳能学报*, 2014, 35(9): 1614 – 1621.
JIA Lin-zhuang, CHEN Kan, LI Guo-jie, et al. The MPPT method research for PV array under partially shaded conditions [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2014, 35(9): 1614 – 1621. (in Chinese)
- [11] 朱艳伟, 石新春, 但扬清, 等. 粒子群优化算法在光伏阵列多峰最大功率点跟踪中的应用 [J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(4): 42 – 48.
ZHU Yan-wei, SHI Xin-chun, DAN Yang-qing, et al. Application of PSO algorithm in global MPPT for PV array [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(4): 42 – 48. (in Chinese)
- [12] WU Z Q, YU D Q. Application of improved bat algorithm for solar PV maximum power point tracking under partially shaded condition [J]. *Applied Soft Computing*, 2018, 62: 101 – 109.
- [13] WU Z Q, YU D Q, KANG X H. Application of improved chicken swarm optimization for MPPT in photovoltaic system [J]. *Optimal Control Applications and Methods*, 2018, 39(2): 1029 – 1042.
- [14] YANG B, ZHONG L N, ZHANG X S, et al. Novel bio-inspired memetic salp swarm algorithm and application to MPPT for PV systems considering partial shading condition [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 215: 1203 – 1222.
- [15] 商立群, 朱伟伟. 基于全局学习自适应细菌觅食算法的光伏系统全局最大功率点跟踪方法 [J]. *电工技术学报*, 2019, 34(12): 2606 – 2614.
SHANG Li-qun, ZHU Wei-wei. Photovoltaic system global maximum power point tracking method based on the global learning adaptive bacteria foraging algorithm [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(12): 2606 – 2614. (in Chinese)
- [16] KJAR S B. Evaluation of the “hill climbing” and the “incremental conductance” maximum power point trackers for photovoltaic power systems [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2012, 27(4): 922 – 929.
- [17] PASSINO K M. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control [J]. *IEEE Control Systems*, 2002, 22(3): 52 – 67.
- [18] 曲大鹏, 许伦祥, 鲁壹光, 等. 一种模拟羊群行为的新颖群集智能算法 [J]. *电子学报*, 2018, 46(6): 1300 – 1305.
QU Da-peng, XU Lun-xiang, LU Yao-guang, et al. A new swarm intelligence algorithm by simulating sheep behaviors [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(6): 1300 – 1305. (in Chinese)
- [19] TIZHOOSH H R. Opposition-based learning: A new scheme for machine intelligence [A]. *Proceedings of International Conference on Computational Intelligence for Modeling Control and Automation* [C]. USA: IEEE, 2005. 695 – 701.

作者简介



吴忠强 男, 1966 年 9 月出生, 黑龙江齐齐哈尔人. 1989 年、1992 年和 2003 年分别在东北重型机械学院、燕山大学和中国矿业大学获工学学士、工学硕士和工学博士学位. 现为燕山大学教授、博士生导师, 主要从事新能源发电系统的状态监测与控制、参数测量与辨识、能量管理与优化等方面的研究.
E-mail: mewzq@163.com



谢宗奎 男, 1995 年 11 月出生, 河北保定人. 现为燕山大学电气工程学院硕士生, 主要从事光伏发电系统的状态监测与控制、参数测量与辨识等方面的研究.
E-mail: 991908082@qq.com