

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210154

基于改进果蝇算法优化的微电网逆变器恒功率控制算法

王福忠¹, 陶新坤¹, 田广强²

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000; 2. 黄河交通学院智能工程学院, 河南 焦作 454950)

摘要: 针对微电网逆变器恒功率控制器 PI 参数优化的问题, 提出了基于种群分区的多策略自适应果蝇(ppmaFOA)优化的 PI 参数在线优化算法。根据适应度值进行排序将果蝇种群分为三个区, 因每个区果蝇性能的差异提出多策略更新模式: I 区局部精细搜索保证种群不退化, II 区根据算法所处环境自适应调节算法的多样性和收敛性, III 区引导果蝇加速收敛, 提高了算法的开发和探索能力。采用 5 种对比算法, 利用微电网恒功率控制系统进行实验, 验证了所提算法的性能和经 ppmaFOA 算法优化后逆变器的响应速度更快、误差更小、输出更稳定。

关键词: PQ 控制; PI 参数; 在线优化; 改进果蝇算法; 多策略; 自适应

Constant power control algorithm for a microgrid inverter based on an improved fruit fly algorithm

WANG Fuzhong¹, TAO Xinkun¹, TIAN Guangqiang²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;
2. School of Intelligent Engineering, Yellow River Transportation Institute, Jiaozuo 454950, China)

Abstract: To optimize PI parameters of the constant power controller of a microgrid inverter, an online optimization algorithm of PI parameters based on the multi-strategy adaptive fruit fly (ppmaFOA) optimization, which is itself based on population partition is proposed. According to the fitness value, the fruit fly population is divided into three areas, and a multi-strategy update mode is proposed because of the difference in the performance of the fruit flies in each area: local fine search in area I ensures that the population does not degenerate, area II adjusts the diversity and convergence of the algorithm adaptively according to the environment in which the algorithm is located, and area III guides fruit flies to accelerate convergence. All this improves the development and exploration capabilities of the algorithm. An experiment uses five comparison algorithms and uses the micro-grid constant power control system to perform experiments to verify the performance of the proposed algorithm. The inverter response speed after optimization by the ppmaFOA algorithm is faster, the error smaller, and the output more stable.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U1804143) and the Science and Technology Key Project of Henan Province (No. 212102210146).

Key words: PQ control; PI parameters; online optimization; improved Drosophila algorithm; multi-strategy; adaptive

0 引言

随着微电网大规模的并入电网, 对电力系统的稳定性和安全性造成了一定的影响^[1-2]。微电网恒功率(PQ)控制系统是由多个 PI 控制器串并联而形成双闭环控制系统^[3-4], PI 参数不同将会影响系统的控制效果。由于微电网是一个动态系统, 当系统参数发生较大变化时, 常规 PI 控制器难以跟随系统

参数变化^[5], 影响微电网逆变器的动态性能和稳态精度。因此, 需要在线对 PI 参数进行整定, 提高微电网逆变器恒功率(PQ)控制的自适应能力, 该研究一直是个热点问题。

文献[6-8]在孤岛微电网中使用模糊逻辑规则控制改变了原来固定 PI 参数, 以避免孤岛运行时电压和频率的振荡问题。文献[9]利用 RBF 神经网络在线优化 PI 参数降低了并网逆变器对电网的冲击。文献[10]在基于逆变器的微电网中使用人工神经网络的方法对 PI 控制器参数进行在线优化, 当微电网现由并网模式切换为孤岛模式以及三相接地故障

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U1804143); 河南省科技攻关项目资助(212102210146)

时, 该策略可以保证微网的正常运行, 并提高了系统的响应速度。文献[11]将两个并联 V/F 控制的分布式电源采用粒子群算法对串联级 PI 控制器参数进行寻优, 实现了负载变化时电压和频率的稳定。文献[12]设计了基于灰狼优化的自适应 PID 控制器, 提高了分布式发电系统的频率调节效率。文献[13]利用递归最小二乘辨识和极移控制的 PI 控制器, 实现了并网逆变器 PI 参数的在线调节。文献[14]采用神经网络对 PI 参数实时整定, 提升了微电网控制精度, 缩短了系统响应时间, 减小了总畸变率。文献[15]提出了一种模拟果蝇协同优化的仿生群体智能算法, 即果蝇优化算法(FOA)。该算法具有参数少、易调节、寻优速度快和全局寻优能力强的特点, 在解决非线性问题上表现突出^[16-17]。文献[18-20]验证了基于果蝇优化算法的 PID 控制器相比于其他智能算法具有较快的收敛速度。文献[21]设计了基于果蝇算法的 VSI 逆变器 PI 参数在线优化。但目前将优化速度快、结构参数少的果蝇优化算法应用于微电网控制策略的研究并不多。标准果蝇算法也有一些缺点, 文献[22-24]指出了标准果蝇算法前期全局寻优能力较强, 后期搜索能力较差, 在解决复杂问题时优化精度不高。文献[25]提出一种双重驱动的果蝇算法, 通过多驱逐剂和引诱剂概念引导果蝇飞行, 自适应地确定搜索半径, 提高了改进算法优化后 PID 控制器的性能。通过改进果蝇算法使其能够应用于微电网逆变器的在线优化, 并提升逆变器性能, 是本文研究的意义和价值所在。

鉴于果蝇优化算法(FOA)的特点, 以及在 PID 控制器中的应用实例, 本文提出了基于种群分区的多策略自适应果蝇优化 PI 参数在线优化算法, 通过在线优化微电网逆变器的恒功率(PQ)控制器中 4 个 PI 控制器的 PI 参数, 来提高微电网逆变器的 PQ 控制性能。

1 基于改进果蝇算法优化 PQ 控制算法总体结构

如图 1 所示, 微电网逆变器的 PQ 控制策略包含功率外环和电流内环^[26], 功率外环采集线路的电压电流并经过功率计算模块得到逆变器输出的实际功率, 与给定的参考功率作差, 经过 PI 模块计算得到 dq 轴的电流分量 i_{dref} 、 i_{qref} 。在电流内环中通过与线路中的电流作差, 经过 PI 控制模块得到 dq 轴的电压分量 V_{dref} 、 V_{qref} , 再经过 PWM 调制产生正弦波脉宽调制信号(SPWM), 通过逆变器对直流量进行逆变调节, 故 PI 控制器的参数直接影响逆变器的

性能。为了提高微电网逆变器恒功率控制器自适应能力, 本文以典型的三相两级逆变电路组成的微电网在并网状态下进行在线优化。利用 ppmaFOA 算法在线实时整定 PI 控制参数, 以达到当拓扑结构改变时微电网能够保持稳定运行。

微电网逆变器 PQ 控制功率外环的数学模型为

$$\begin{cases} i_{dref} = (P_{ref} - P)(k_{p,1} + \frac{k_{i,1}}{s}) \\ i_{qref} = (Q_{ref} - Q)(k_{p,2} + \frac{k_{i,2}}{s}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为有功和无功的参考值; P 、 Q 分别为有功和无功的实际值; i_{dref} 、 i_{qref} 分别为经过旋转坐标下 dq 轴的电流分量。

电流内环控制 dq 轴电压, 经过 park 反变换得到逆变器的电压控制波形。其中 PQ 控制电流内环的数学模型为

$$\begin{cases} V_{dref} = (i_{ref} - i_d)(k_{p,3} + \frac{k_{i,3}}{s}) \\ V_{qref} = (i_{ref} - i_q)(k_{p,4} + \frac{k_{i,4}}{s}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: V_{dref} 、 V_{qref} 分别为 dq 轴的电压分量; i_d 、 i_q 分别为 dq 轴的电流分量。

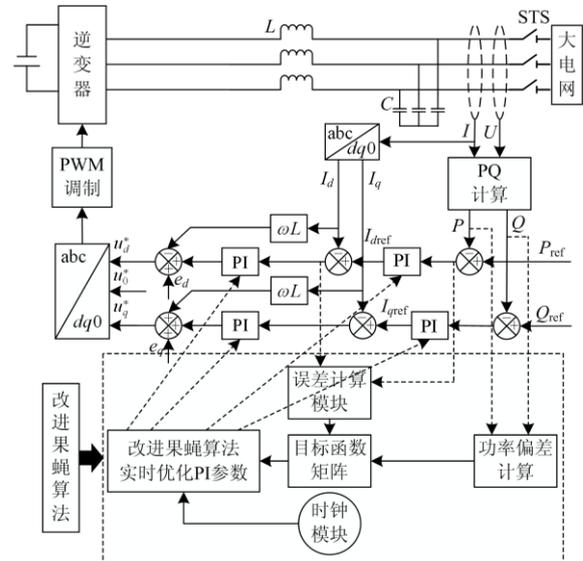


图 1 ppmaFOA 算法优化 PQ 控制的结构图

Fig. 1 Structure diagram of optimized PQ control by ppmaFOA algorithm

基于改进果蝇算法优化 PQ 控制算法的基本原理是利用 ppmaFOA 算法分别优化式(1)和式(2)中 4 个 PI 控制器的参数 $k_{p,1}$ 、 $k_{i,1}$ 、 $k_{p,2}$ 、 $k_{i,2}$ 、 $k_{p,3}$ 、 $k_{i,3}$ 、 $k_{p,4}$ 、 $k_{i,4}$ 。

2 基于改进果蝇算法的 PI 参数优化

2.1 基于标准果蝇算法的 PI 参数优化

果蝇算法是通过模仿果蝇觅食的行为而提出的一种全新算法, 把每个需要优化的问题看成 j 维空间觅食果蝇, 在 j 维空间中赋予每只果蝇当前的位置 $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ij})$ 、 $Y_i = (Y_{i1}, Y_{i2}, \dots, Y_{ij})$ 和果蝇飞行的距离 L 。通过适应度函数计算出果蝇的味道浓度。把群体中味道浓度最好的果蝇贡献给下个群体, 依次迭代至结束, 并输出最优值。当果蝇算法在第 $k+1$ 次迭代计算时, 根据式(3)来更新果蝇的位置。

$$\begin{aligned} X_{i,j}(k+1) &= X_{i,j}(k) + cL \cdot \text{rand}() \\ Y_{i,j}(k+1) &= Y_{i,j}(k) + cL \cdot \text{rand}() \end{aligned} \quad (3)$$

式中: L 为寻优步长; c 为非负的加速常数; $\text{rand}()$ 为随机生成 0 到 1 的随机数; i 为果蝇个数、 j 为维度; $X_{i,j}(k)$ 、 $Y_{i,j}(k)$ 为全局最优位置, $X_{i,j}(k)$ 和下文提到的 $Xgbest_{i,j}^t$ 为同一个数值。标准果蝇算法优化 PI 参数流程如图 2 所示。

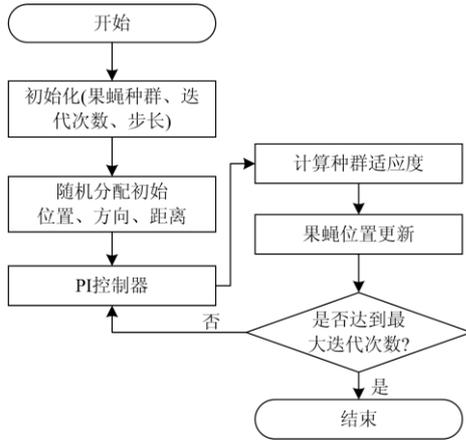


图 2 标准果蝇优化 PI 参数流程图

Fig. 2 Flow chart of PI parameters optimized for fruit fly algorithm

2.2 果蝇算法的改进

2.2.1 FOA 算法存在的问题

由于逆变器的 PQ 控制中 4 个 PI 控制器的参数之间相互影响, 形成一个复杂的高维度非线性问题, 再加上在线优化系统, 因此对算法的收敛速度和收敛精度要求极高。从更新式(3)和标准果蝇优化 PI 参数流程中可以看出标准果蝇算法存在以下问题:

1) 每次更新只考虑全局最优经验, 忽略了果蝇个体飞行经验对下一次 PI 参数更新的指导;

2) 果蝇种群在搜索目标后, 只保留全局最优个体, 进行单一 PI 参数更新策略, 忽略了整个果蝇群体的飞行经验来指导下一次的迭代更新;

3) 果蝇种群在探索 PI 参数时, 没有检测 FOA 算法的收敛性和多样性, 无法自适应调节参数;

4) 固定步长的搜索方式没有兼顾到前期的大范围搜索 PI 参数和后期小范围深度搜索 PI 参数。

2.2.2 种群分区和多策略更新模式

为解决上述问题, 本文提出了基于种群分区的多策略自适应果蝇优化 PI 算法, 按果蝇种群评价指标将果蝇种群分为 3 个区, 再综合考虑全局最优果蝇飞行经验和个体果蝇最优飞行经验, 给出不同区果蝇的 PI 参数更新策略, 并且果蝇种群在寻优过程中, 根据算法所处环境的评价指标自适应调节算法的收敛性和多样性, 指导果蝇飞行。在果蝇寻优过程中把固定步长改为根据迭代次数进行调节的变步长。提升了 ppmaFOA 优化双闭环 PI 算法的探索和开发性能。

根据微电网 PQ 控制模式下目标函数的收敛程度, 对果蝇群体进行排序, I 区果蝇群体在寻优中表现较好, II 区果蝇群体在寻优中表现一般, III 区果蝇群体在寻优中表现较差。

$$\text{region}(F(t)_i) \begin{cases} \text{I 区} & \text{rank}(F(t)_i) < \beta \cdot n \\ \text{II 区} & \alpha \cdot n \leq \text{rank}(F(t)_i) < \beta \cdot n \\ \text{III 区} & \text{rank}(F(t)_i) \geq \beta \cdot n \end{cases} \quad (4)$$

式中: $F(t)_i$ 为 t 时刻果蝇的适应度值; α 和 β 均为 0 到 1 的正常数; n 为果蝇种群个数, 通过给定 α 和 β 的值将果蝇种群划分为三个区域, 并确定每个区域中的果蝇个数。根据每个区域果蝇的表现情况, 制定多策略更新果蝇方式。

1) 对于 I 区中的果蝇表现较好, 距离最优目标最近, 表明 I 区的 PI 参数使得微电网 PQ 控制模式下输出的目标函数值最小, 逆变器输出效果最好, 应该保持其精英果蝇群体, 不发生种群退化现象, 增加局部 PI 参数搜索能力。本文通过参考粒子群公式在果蝇算法中引入历史个体最优概念, 通过果蝇全局最优和果蝇个体最优共同指导 PI 参数更新, 则 I 区的更新公式为

$$\begin{aligned} X_{i,j}^{t+1} &= X_{i,j}^t + wL \cdot (\text{rand}() \cdot (Xpbest_{i,j}^t - X_{i,j}^t) + \\ &\quad \text{rand}() \cdot (Xgbest_{i,j}^t - X_{i,j}^t)) \\ Y_{i,j}^{t+1} &= Y_{i,j}^t + wL \cdot (\text{rand}() \cdot (Ypbest_{i,j}^t - Y_{i,j}^t) + \\ &\quad \text{rand}() \cdot (Ygbest_{i,j}^t - Y_{i,j}^t)) \end{aligned} \quad (5)$$

$$w = \frac{1}{2} \times (1 + \cos(\pi \times \sqrt{\frac{t-1}{t_{\max}}}))$$

式中: L 为寻优步长; w 为权重系数, 随着迭代次

数进行递减； $Xgbest_{i,j}^t$ 、 $Ygbest_{i,j}^t$ 为 t 时刻全局果蝇最优位置； $Xpbest_{i,j}^t$ 、 $Ypbest_{i,j}^t$ 为 t 时刻个体果蝇最优位置；此公式中可以看出在 I 区中的果蝇群体，下一时刻位置的更新方向始终朝着最优位置更新，此更新策略有以下优点：①可以在果蝇最优位置进行深度 PI 参数搜索，②使精英果蝇群体不会发生退化现象。

2) 对于 II 区的果蝇群体表现一般，表明了 II 区的 PI 参数使得微电网 PQ 控制模式下输出的效果一般。但是经过较少数迭代之后果蝇可以达到最优目标附近，使得微电网输出变得较好，为了使算法兼顾多样性和收敛性，从 II 区果蝇群体中随机选择一部分果蝇进行多样性的位置更新，另一部分果蝇使其加速收敛。则更新公式为

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Xgbest_{i,j}^t + wL \cdot \text{rand}(), \text{rand}()_{i,j} > G \\ X_{i,j}^t + wL \cdot \text{rand}() \cdot (Xgbest_{i,j}^t - X_{i,j}^t), \text{rand}()_{i,j} \leq G \end{cases}$$

$$Y_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Ygbest_{i,j}^t + wL \cdot \text{rand}(), \text{rand}()_{i,j} > G \\ Y_{i,j}^t + wL \cdot \text{rand}() \cdot (Ygbest_{i,j}^t - Y_{i,j}^t), \text{rand}()_{i,j} \leq G \end{cases} \quad (6)$$

式中： G 为种群收敛性和多样性的评价指标。当随机数大于 G 时，选择第1个更新公式，此更新公式为果蝇的标准更新公式，具有全局搜索能力，保证了种群多样性。当随机数小于 G 时，选择第2个更新公式，此公式是在上一时刻位置的基础上更新，更新的方向为个体果蝇沿着全局最优方向飞行，飞行距离会因迭代次数进行递减，此更新方式会使果蝇个体加速收敛，使得 PI 参数迅速朝着增强逆变器输出性能方向发展。因此自适应 G 值可以自动调节算法的收敛性和多样性。

3) 对于 III 区中的果蝇群体表现较差，几乎没有对整个果蝇种群做出贡献，距离最优目标较远，表明了 III 区的 PI 参数使得微电网 PQ 控制模式下输出的效果较差。此区域的果蝇群体应该加速收敛，使得 PI 参数快速更新至较好的情况，使微电网逆变器输出性能迅速增强。则更新公式如下：

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{i,j}^t + wL \cdot \text{rand}() \cdot (Xgbest_{i,j}^t - X_{i,j}^t) \quad (7)$$

$$Y_{i,j}^{t+1} = Y_{i,j}^t + wL \cdot \text{rand}() \cdot (Ygbest_{i,j}^t - Y_{i,j}^t)$$

通过上述种群分区的多策略 PI 参数更新模式，使算法对表现不同的 PI 参数进行分区，根据不同区域果蝇个体的性能和寻优时的算法环境，进行分区多策略更新方式，优化时指导 PI 参数的更新，增强果蝇种群的探索和开发能力。改进后的果蝇算法流程图如图 5 所示。

2.3 算法收敛性和多样性评价指标

在算法中收敛性和多样性在一定程度上会相互矛盾，但是在寻优过程中根据算法环境自适应调节收敛性和多样性，为了极大地提升算法的综合性能，提出了一种果蝇种群平均个体增量(Average Individual Increment, AII)的收敛程度评价指标。

$$\begin{cases} DI(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\text{dim}} ((X(t)_i^j - Xpbest_i^j) + (Y(t)_i^j - Ypbest_i^j)) \\ DI(t-1) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\text{dim}} \left[((Y(t-1)_i^j - Ypbest_i^j) + (Y(t-1)_i^j - Ypbest_i^j)) \right] \\ AII(t) = DI(t) - DI(t-1) \\ G(t) = \eta \cdot AII(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中： $DI(t-1)$ 为上一时刻果蝇位置与历史最优位置的维度差； $DI(t)$ 为当前时刻果蝇位置与历史最优位置的维度差； AII 为当前时刻与上一时刻的数值差； η 为权重系数； G 为自适应调节参数。果蝇个体在迭代中更新个体位置，距离最优位置越近，会使得果蝇种群 DI 越小，反之亦然。当 $AII(G)$ 越小说明当前时刻与上一个时刻相比果蝇群体越靠近果蝇个体最优位置，此时应增加果蝇群体多样性，增强果蝇群体的开发能力。当 $AII(G)$ 越大说明当前时刻与上一个时刻相比果蝇群体越偏离果蝇个体最优位置，此时应该使果蝇群体加速收敛，增加果蝇群体的探索能力。

在同一时刻采用位置的维度差，此方法优点如下：在同一果蝇中，一部分维度使得优化目标表现较差，另一部分维度却表现较好，但果蝇的整体评价会使得优化目标表现较好，采用直接求和的方法在一定程度上可以抵消维度的极端现象。在 PQ 控制的 4 个 PI 控制器中，有的参数使得微电网逆变器输出比较稳定且误差较小，有的参数使得逆变器输出效果较差误差较大，采用维度加权的方法可以抵消极端情况的出现，可以对含参果蝇进行综合评价。

2.4 分区参数 α 和 β 的确定

如何确定分区参数 α 和 β 将影响算法的综合性能，图 3 给出了所提算法在解决 Ackley 和 Griewank 典型测试函数时， α 和 β 的三种取值方案下 AII 评价指标的下降趋势，取值方案分别为：Case1, $\alpha = 0.1n$ 和 $\beta = 0.9n$ ；Case2, $\alpha = 0.2n$ 和 $\beta = 0.8n$ ；Case3, $\alpha = 0.3n$ 和 $\beta = 0.7n$ 。典型测试函数如表 1 所示。

从图 3 中两个测试函数评价指标的变化来看，随着 II 区种群数量的增加，算法收敛速度在逐渐减慢，减少 II 区种群数量会加快算法收敛速度。当 II

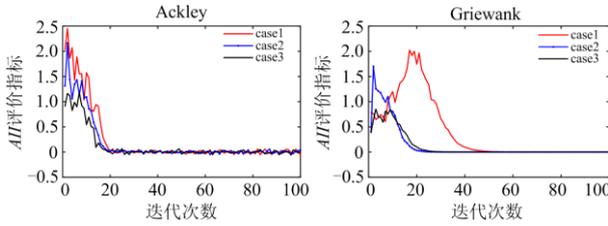
区果蝇群体数量较多时, AII 评价指标变化范围较大, 并且波动比较明显, 说明算法有较大的多样性。当 II 区果蝇数量较少时, AII 评价指标变化范围较小, 而且无明显波动, 说明算法有较小的多样性。在测试函数 Ackley 时, Case3 情况下 II 区果蝇数量较少, AII 评价指标波动较小, 下降陡峭, 说明算法在开发能力上明显不足, 这样会使算法较容易陷入局部

最优。Case2 情况下果蝇数量增加, AII 评价指标变化范围增大, 算法性能得到提升。从测试函数 Griewank 中也能看出, 当 II 区果蝇数量减少到一定程度时, 算法的收敛速度变化并不明显。但增加过多会导致算法收敛速度较慢。为了保证算法探索和开发的性能, 应使 II 区果蝇群体保持较高数量, 故本文分区参数 α 和 β 分别为 0.2 和 0.8, 即 Case2 的情形。

表 1 典型测试函数

Table 1 Typical test functions

函数	公式表示	极值
Ackley	$f(x) = -20 \exp(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(i)^2}) - \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x(i))\right) + 20 + e$	0
Griewank	$f(x) = \sum_{i=1}^D \frac{x_i^2}{4000} - \prod_{i=1}^D \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	0

图 3 不同分区参数取值方案下 AII 指标变化Fig. 3 Changes of AII index under different partitioning parameter value schemes

2.5 ppmaFOA 算法步骤

步骤 1: 初始化最大迭代次数、分区参数、种群规模等相关参数。

步骤 2: 计算每个果蝇的适应度值, 按照式(9)更新全局最优位置 $Xgbest_{i,j}^t$ 、 $Ygbest_{i,j}^t$ 和历史个体最优位置 $Xpbest_{i,j}^t$ 、 $Ypbest_{i,j}^t$ 。

$$\begin{cases} \text{IF } bestSmell_t < smellbest \begin{cases} Xgbest = X_t(bestIndex) \\ Ygbest = Y_t(bestIndex) \end{cases} \\ \text{IF } pbest_t^i < smell^i \begin{cases} Xpbest_t^i = X_t^i \\ Ypbest_t^i = Y_t^i \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

步骤 3: 计算果蝇种群平均个体增量的收敛程度评价指标 AII , 根据适应度值进行排序, 按照式(4)进行种群分区。

步骤 4: 按照式(5)~式(7)的策略来更新果蝇位置。

步骤 5: 算法是否达到最大迭代次数。是, 则输出最优结果; 否, 则继续执行步骤 2—步骤 4。

式(9)中 $smellbest$ 为全局最优气味浓度、 $bestSmell_t$ 为当前最优气味浓度。 $pbest_t^i$ 为当前个体气味浓度、 $smell^i$ 为历史个体最优气味浓度。 $bestIndex$ 为返回的位置坐标。

3 基于 ppmaFOA 的微电网逆变器 PQ 控制 PI 参数在线优化

3.1 优化的目标函数

在传统的 PI 控制器优化中常以 PI 误差进行评价, 以性能指标 $I_{TAE} = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$ 为目标函数, 然

而在微电网复杂的系统中, 当 I_{TAE} 足够小时, PI 控制器输出的误差可能会出现持续振荡或偏移的现象, 此现象会造成逆变器输出功率的小幅度振荡和偏移, 极不利于微电网的稳定运行, 如图 4 所示。因此本文引入了误差求导绝对值积分项 $\int \left| \frac{derror}{dt} \right| dt$,

当 PI 误差出现振荡或偏移现象, 会持续增大目标函数值, 在优化过程中除去此种情况, 此作用是为了使逆变器输出更加平稳。考虑到 PQ 控制的输出功率为参考功率, 在目标函数中引入有功偏差 ΔP 和无功偏差 ΔQ 的百分比。 $\Delta P = P - P_{ref}$ 、 $\Delta Q = Q - Q_{ref}$ 。其中 P_{ref} 和 Q_{ref} 为系统参考值。则目标函数矩阵为

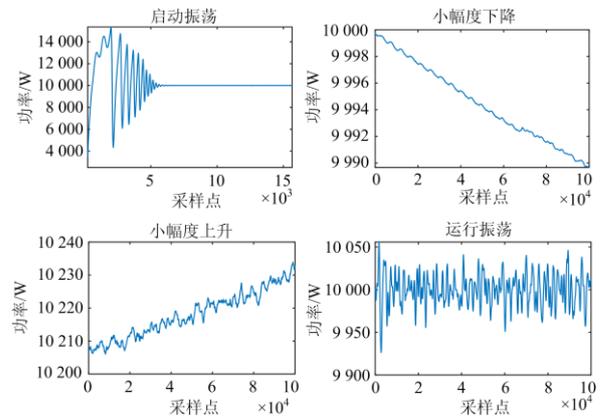


图 4 功率振荡和偏移图

Fig. 4 Power oscillations and offsets

$$\begin{cases} E(t) = \left[\int |error| dt, \int \left| \frac{derror}{dt} \right| dt, \int \left| \frac{P - P_{ref}}{P_{ref}} \right| dt, \int \left| \frac{Q - Q_{ref}}{Q_{ref}} \right| dt \right] \\ W = [1, 1, 1, 1]^T \end{cases} \quad (10)$$

式中： $error$ 为 PI 控制器误差； W 为目标函数的权重矩阵。

3.2 在线优化的流程

优化的思路是通过求解目标函数的非负最小值，将在线优化转化为数学求解问题，即当系统参数变化时寻找出高维度非线性函数的最优解。将上述所提算法应用到微电网 PQ 控制中，算法优化流程如图 5 所示。在微电网并网运行过程中微电网参数发生改变，控制模块将偏差信息送到 ppmaFOA 算法模块，ppmaFOA 模块与控制模块进行实时交互，将果蝇参数送到控制模块中的 PI 控制器中。

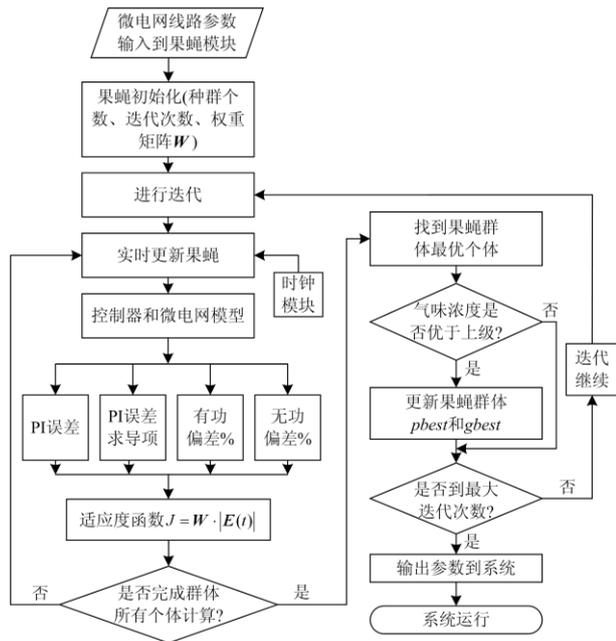


图 5 基于改进果蝇算法优化的恒功率控制算法流程图

Fig. 5 Flow chart of constant power control algorithm optimized based on improved fruit fly algorithm

4 ppmaFOA 优化微电网的实验仿真分析

为了验证本文所提控制策略的有效性，基于 Matlab/Simulink 软件搭建仿真，微源电源用直流电源代替，通过逆变器控制其输出功率，仿真参数如表 2。仿真中采用 800 V 的直流电压源，线路阻抗忽略不计，并网情况下运行，ppmaFOA 在线优化微电网框架如图 6 所示。表 3 为不同时刻经过不同算法优化的 PI 参数，实验对比结果如图 9 和表 4 所示，实验要求如下。

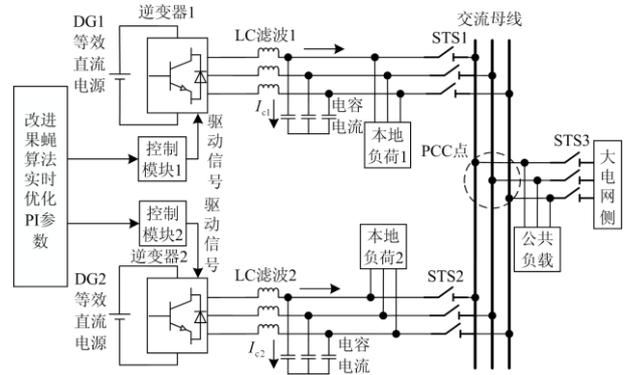


图 6 基于 ppmaFOA 的微电网在线优化框架图

Fig. 6 Online optimization framework of microgrid based on ppmaFOA

表 2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

参数名称	数值
直流侧电压/V	800
滤波电感/H	1.35×10^{-3}
滤波电容/F	5×10^{-5}
额定频率/Hz	50
微源 DG1 负荷	2 000 W, 1 500 var
微源 DG2 负荷	4 000 W, 1 000 var

表 3 不同算法优化的 PI 参数

Table 3 PI parameters optimized by different algorithms

对比算法	微源	0—1 s	1—2 s
本文算法	微源 1	(10.535, 1 691.364)	(14.853, 2 282.416)
	微源 2	—	(2.738, 39 634.809)
FOA	微源 1	(75.526, 10.998)	(4.463, 1 413.612)
	微源 2	—	(14.3, 93.283)
PSO	微源 1	(2.280, 1 675.589)	(2.141, 896.282)
	微源 2	(1.079, 3.457)	(3.586, 1 883.265)
传统方式	微源 1	(40, 400)	(40, 400)
	微源 2	(4.5, 120)	(4.5, 120)
NSGA	微源 1	(1.355, 2 373.774)	(33.38, 268.47)
	微源 2	—	(2.585, 2 282.416)

1) 0 s: 微源 DG1 独立工作，采用恒功率(PQ)控制策略，额定有功功率为 3 000 W，额定无功功率为 1 000 var。

2) 1 s 后: 微源 DG1 采用恒功率(PQ)控制策略, 额定有功功率为 2 500 W, 额定无功功率为 1 500 var; 微源 DG2 采用恒功率(PQ)控制策略, 额定有功功率为 2 000 W, 额定无功功率为 1 500 var; 公共负荷为 1 000 W、1 000 var。

为了防止 ppmaFOA 算法的过度发散和收敛, 需要限定自适应 G 的变化范围, 在实验中自适应 G 值最低为 0.2、最高为 0.8。图 7 为优化 PQ 控制时自适应 G 的波动曲线。算法在迭代前期应该保持 ppmaFOA 算法的多样性, 后期保持算法的收敛性。从图 7 中可以看出, 前期自适应 G 的波动范围大部分都在大于 0.5 的范围波动, 波动的情况是算法根据所处环境自适应调节算法的多样性和收敛性。随着迭代次数到达一定程度, 果蝇种群已经收敛至最优目标附近, 此时自适应 G 调节 2 区果蝇种群个体加速收敛, 减少种群多样性。在迭代后期波动范围在 0.5 以下, 符合算法收敛变化情况。

通过实验对比算法的收敛速度和收敛精度。测试结果如图 8 所示。从图 8(a)可以看出本文所提算法收敛速度最快。从图 8(b)中可以看出本文所提算法收敛精度最高。综合来看, 本文所提算法一直在均匀收敛直至不变, 没有出现 PSO 算法前期下降陡

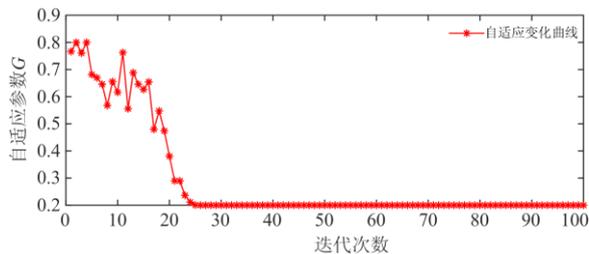


图 7 自适应变化曲线

Fig. 7 Adaptive change curve

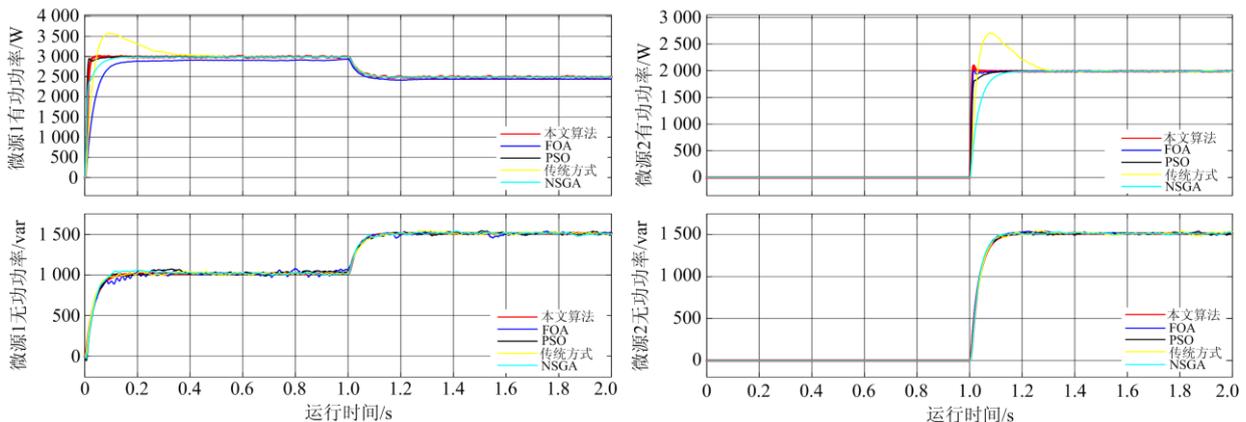


图 9 不同算法优化下微电网输出的功率

Fig. 9 Output power of microgrid under different algorithm optimization

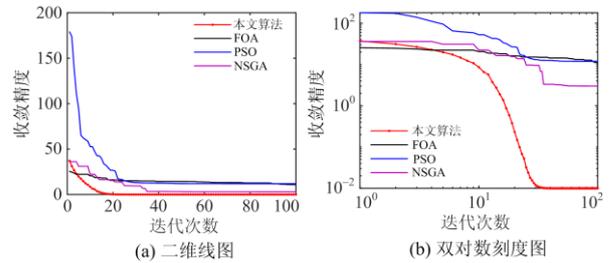


图 8 算法优化时收敛速度和精度的对比图

Fig. 8 Comparison of convergence speed and accuracy during algorithm optimization

峭, 后期不再进行收敛, 这是算法种群分区多策略更新和根据算法所处环境自适应调节算法的收敛性、多样性所导致的。使 I 区种群不发生退化保留精英策略进行局部深度搜索, II 区根据算法所处环境自适应调节收敛性和多样性, III 区加速收敛。提高了算法的探索和开发性能。

由图 9 可以看出, 本文所提 ppmaFOA 算法与传统方式相比在优化之后使得恒功率输出更加稳定, 并且很明显减少了逆变器输出时的超调量, 使逆变器响应速度更快, 从表 4 可以看出从超调量被大大降低, 经过本文算法优化的系统从启动到稳定输出时所用的时间比传统方式快 9 倍, 极大地提高了 PQ 控制模式下逆变器的性能。本文算法与其余算法的对比情况以微源 1 有功功率输出来说明: 本文算法优化之后逆变器响应最快, 并且没有超调量, 输出稳定, 虽然 PSO 优化之后逆变器反应也很快, 但是其系统在上升之后发生了波动, 导致系统的稳态时间较长。FOA 优化虽然没有出现超调量, 但是其稳定输出值与参考功率偏差较大, 逆变器响应速度与本文所提算法优化相比慢了 0.26 s。NSGA 优化在稳定输出时表现良好, 但其逆变器响应速度很慢。

表 4 为不同算法优化下的结果对比, 微源 1 为运行 2 s 的统计结果, 微源 2 为运行 1 s 的统计结果。在算法对比过程中仅有微源 2 的无功误差效果不是最好, 但仅次于最小误差, 其余表现均比其他算法要好。经过改进算法优化之后逆变器的响应速度均远高于其余四种算法, 虽然在微源 2 有超调量的出现, 经 0.015 5 s 后超调就进行减弱,

在 0.035 s 时系统进入稳定状态, 整个系统的反应时间在 5 种算法中依然是最好的, 并且超调量远远低于传统方式, 在误差允许范围内。综上所述, 本文所提的种群分区多策略自适应果蝇优化算法表现出了良好的性能, 在微电网恒功率控制模式下 PI 参数优化应用中得到验证。

表 4 算法稳定裕度对比

Table 4 Comparison of stability margin of the algorithm

对比算法	微源	有功误差/%	无功误差/%	PII 误差	PI2 误差	超调量	上升时间	稳定时间
本文算法	微源 1	2.368	6.934	3.226	4.571	0	0.04	0.04
	微源 2	1.079	4.2	1.672	2.225	95	0.0155	0.035
FOA	微源 1	9.497	8.07	7.100	11.768	0	0.3	0.3
	微源 2	1.196	4.347	2.6808	3.122	0	0.1	0.1
PSO	微源 1	2.042	8.232	6.243	4.851	0	0.16	0.16
	微源 2	1.645	4.249	3.535	2.226	0	0.192	0.192
传统方式	微源 1	6.323	7.152	7.004	4.692	580	0.09	0.36
	微源 2	6.456	4.614	3.471	3.041	760	0.09	0.33
NSGA	微源 1	2.836	7.632	3.471	6.090	0	0.18	0.18
	微源 2	3.928	4.109	1.705	3.097	0	0.2	0.2

5 结论

提出基于种群分区的多策略自适应果蝇优化 PI 参数算法, 并且应用于微电网恒功率控制模式下 PI 参数的在线优化。

1) 根据种群中果蝇表现不同, 提出种群分区多策略更新模式, I 区局部深度搜索保证种群不退化、II 区根据算法所处环境自适应调节算法的多样性和收敛性、III 区引导果蝇加速收敛。在标准果蝇更新策略中引入历史果蝇最优个体, 引导果蝇飞行, 保证种群不发生退化现象, 保留精英策略。

2) 为了平衡算法的收敛性和多样性, 提出果蝇种群平均个体增量评价指标, 使算法根据所处环境自适应调节算法的收敛性和多样性, 提升算法的探索和开发能力。

3) 将所提算法应用到微电网的在线优化, 并在目标函数中引入误差求导绝对值积分项, 避免了微电网逆变器输出功率随着运行时间的增加会出现小幅度的振荡和偏移现象。并在微电网中对 5 种控制策略进行对比分析, 验证了 ppmaFOA 算法的性能优于其他算法, 经过本文所提策略优化 PI 参数之后, 使得微电网恒功率控制模式下逆变器响应更快、误差更小、输出更加稳定。

参考文献

[1] 李欣悦, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 1-8.

LI Xinyue, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Calculation method of transient overvoltage of transmission system under DC bipolar block fault[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 1-8.

[2] 陆立民, 褚国伟, 张涛, 等. 基于改进多目标粒子群算法的微电网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 116-124.

LU Limin, ZHU Guowei, ZHANG Tao, et al. Optimal configuration of microgrid energy storage based on improved multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 116-124.

[3] KHULE S S, UGALE P D, MOHOD S W. Microgrid stability issues and PI control technique[C] // International Conference on Information, Communication, Engineering and Technology, August 1, 2018, Pune(IN): 1-4.

[4] 董润楠, 刘石, 梁庚, 等. 基于模型预测控制的微电网逆变器控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 11-20.

DONG Runnan, LIU Shi, LIANG Geng, et al. Research on control method of special inverter in micro-grid based on model predictive control[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 11-20.

[5] 李鑫, 孟亨, 杨楨, 等. 基于 BP 神经网络递推积分 PI-重复控制在微电网 APF 中的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 132-140.

LI Xin, MENG Heng, YANG Zhen, et al. Research on recursive integral PI-repetitive control based on BP neural network in micro-grid APF[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 132-140.

[6] LEE H S, PARK J H, KOO B G, et al. Control of islanded microgrid using fuzzy logic[J]. Transactions of the Korean

- Institute of Electrical Engineers, 2014, 63(6): 727-737.
- [7] 杨志淳, 刘开培, 乐健, 等. 孤岛运行微电网中模糊 PID 下垂控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 19-23.
YANG Zhichun, LIU Kaipei, LE Jian, et al. Design of fuzzy PID droop controller in isolated micro-grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 19-23.
- [8] KIM J Y, KIM H M, KIM S K, et al. Designing an energy storage system fuzzy PID controller for microgrid islanded operation[J]. Energies, 2011, 4(9): 1443-1460.
- [9] 阳同光, 桂卫华. 电网不平衡情况下并网逆变器多目标协调控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 148-157.
YANG Tongguang, GUI Weihua. Research on multi-objective coordinated control strategy of grid-connected inverter under grid unbalance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 148-157.
- [10] ZAKI D A, HASANIEN H M, EL-AMARY N H, et al. Tuning PI controllers for optimal microgrid operation based on artificial neural network[C] // IEEE Conference on Power Electronics and Renewable Energy, October 23, 2019, Aswan City(EG): 371-387.
- [11] AL-SAEDI W, LACHOWICZ S W, HABIBI D, et al. Power quality enhancement in autonomous microgrid operation using particle swarm optimization[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 42(1): 139-149.
- [12] PADHY S, PANDA S. Application of a simplified grey wolf optimization technique for adaptive fuzzy PID controller design for frequency regulation of a distributed power generation system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 21-36. DOI: 10.1186/s41601-021-00180-4.
- [13] SHAKEEL F M, MALIK O P. On-line self-tuning adaptive control of an inverter in a grid-tied micro-grid[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 178.
- [14] 李鑫, 孟亨, 杨桢, 等. 基于 BP 神经网络递推积分 PI-重复控制在微电网 APF 中的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 138-146.
LI Xin, MENG Heng, YANG Zhen, et al. Research on recursive integral PI-repetition control in microgrid APF based on BP neural network[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 138-146.
- [15] TSAO P W. A new fruit fly optimization algorithm: taking the financial distress model as an example[J]. Knowledge-Based Systems, 2012, 26: 69-74.
- [16] LI H Z, GUO S, LI C J, et al. A hybrid annual power load forecasting model based on generalized regression neural network with fruit fly optimization algorithm[J]. Knowledge Based Systems, 2013, 37: 378-387.
- [17] SHENG W, BAO Y. Fruit fly optimization algorithm based fractional order fuzzy-PID controller for electronic throttle[J]. Nonlinear Dynamics, 2013, 73(1-2): 611-619.
- [18] HAN J, WANG P, YANG X. Tuning of PID controller based on fruit fly optimization algorithm[C] // 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), August 5-8, 2012, Chengdu, China: 409-413.
- [19] 赵晓军, 刘成忠, 胡小兵. 基于果蝇优化算法的 PID 控制器设计与应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2016, 47(11): 3729-3734.
ZHAO Xiaojun, LIU Chengzhong, HU Xiaobing. Design and application of PID controller based on fruit fly optimization algorithm[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2016, 47(11): 3729-3734.
- [20] ACHARYULU B V S, SWAMY S K, MOHANTY B, et al. Performance comparison of FOA optimized several classical controllers for multi-area multi-sources power system[M] // Soft Computing in Data Analytics, 2019, 758: 417-426.
- [21] DONG R, LIU S, LIANG G. Research on control parameters for voltage source inverter output controllers of micro-grids based on the fruit fly optimization algorithm[J]. Applied Sciences, 2019, 9(7): 13-27.
- [22] XIONG C, LIAN S. Structural damage identification based on improved fruit fly optimization algorithm[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(3): 985-1007.
- [23] LI Y, HAN M. Improved fruit fly algorithm on structural optimization[J]. Brain Informatics, 2020, 7(1).
- [24] YANG X, LI W, SU L, et al. An improved evolution fruit fly optimization algorithm and its application[J]. Neural Computing & Applications, 2020, 32(14): 9897-9914.
- [25] 凤丽洲, 王友卫, 韩琳琳, 等. 双重驱动的果蝇优化算法及其在 PID 控制器中的应用[J]. 控制与决策, 2021, 36(9): 2225-2233.
FENG Lizhou, WANG Youwei, HAN Linlin, et al. Dual driven drosophila optimization algorithm and its application in PID controller[J]. Control and Decision, 2021, 36(9): 2225-2233.
- [26] 魏传芝, 施啸寒, 张恒旭, 等. 考虑电流指令跟踪能力的 PQ 控制逆变型分布式电源故障模型[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 59-65, 72.
WEI Chuazhi, SHI Xiaohan, ZHANG Hengxu, et al. Fault model of PQ control inverter distributed power supply considering current instruction tracking ability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 59-65, 72.

收稿日期: 2021-02-05; 修回日期: 2021-05-31

作者简介:

王福忠(1961—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统优化与控制、人工智能控制、智能信息处理与故障诊断; E-mail: wangfzh@hpu.edu.cn

陶新坤(1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为微电网运行控制; E-mail: 891262173@qq.com

田广强(1975—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为人工智能应用技术、网络工程、大数据分析及系统。E-mail: tectian@zjtu.edu.cn

(编辑 许威)