

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230441

基于多分区自适应改进果蝇算法的风光燃储 微电网协调控制策略

张丽^{1,2}, 刘雨航¹, 贾晨豪¹, 张涛¹, 张宏伟³

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003; 2. 河南省煤矿装备智能检测与控制重点实验室, 河南 焦作 454003; 3. 国网山西省电力公司临汾供电公司, 山西 临汾 041000)

摘要: 为了使微电网控制系统中 PI 控制器的参数能够更好地适应可再生能源的随机性和波动性, 提出了基于自适应步长的四分区多策略果蝇优化算法(fruit fly optimization algorithm, FOA)对 PI 参数进行实时优化。首先, 以风光燃储微电网不同微源控制系统中的变换器为控制对象, 建立微电网整体控制系统模型, 基于此模型实时调整 PI 参数。然后, 根据不同果蝇个体的适应度值将果蝇种群分为 4 个区, 同时考虑 4 个区果蝇收敛性以及多样性的差异, 设计不同的自适应更新策略。最后, 采用所提算法对各微源控制过程中的 PI 参数进行寻优, 与其他 3 种智能算法进行对比, 验证了所提算法的可行性和优越性。仿真结果表明, 所提算法可以使系统变换器响应速度更快, 输出更加稳定。

关键词: 风光燃储; 微电网; PI 参数; 改进果蝇算法; 自适应更新策略

A coordinated control strategy for a wind/ photovoltaic/ gas turbine/ storage microgrid based on a multi-partition adaptive improved fruit fly algorithm

ZHANG Li^{1,2}, LIU Yuhang¹, JIA Chenhao¹, ZHANG Tao¹, ZHANG Hongwei³

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. Henan Key Laboratory of Intelligent Detection and Control of Coal Mine Equipment, Jiaozuo 454003, China;

3. Linfen Power Supply Company, State Grid Shanxi Electric Power Company, Linfen 041000, China)

Abstract: To better adapt PI controller parameters in a microgrid control system to the randomness and fluctuations of renewable energy sources, this paper proposes a four-partition multi-strategy fruit fly optimization algorithm based on adaptive step size for real-time optimization of PI parameters. First, the microgrid overall control system model is established by taking the converters in different micro-source control systems of the wind/ photovoltaic/ gas turbine/ storage energy microgrid as the control objects. The PI parameters are adjusted in real-time based on this model. Then, the fruit fly population is divided into four partitions according to the fitness values of different individuals, and different adaptive updating strategies are designed based on the differences in convergence and diversity of fruit flies in the four partitions. Finally, the algorithm proposed is used to optimize the PI parameters in the control process of each microsource, and compared with three other intelligent algorithms to verify the feasibility and superiority of the proposed algorithm. The simulation results show that the algorithm can make the response of the system converter faster and the output more stable.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U1804143).

Key words: wind/ photovoltaic/ gas turbine/ energy storage; microgrid; PI parameter; improved fruit fly algorithm; adaptive updating strategies

0 引言

《“十四五”可再生能源发展规划》提出了可再

生能源发展的任务和目标, 要求大规模开发利用可再生能源^[1]。因此, 能够整合多种可再生能源, 增加可再生能源的利用率, 减少电力系统碳排放的微电网得到越来越多的应用^[2-3]。为了保证微电网内部供电可靠性以及稳定性, 防止微电网中可再生能源随机性和波动性导致电力系统出现电压波动、电流冲击和负荷频率扰动等问题^[4-5], 优化微电网内部基

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U1804143); 河南省高校基本科研业务费专项资金资助(NSFRF210424); 河南省高等学校重点科研项目资助(21B470005)

层设备控制系统控制性能逐步成为了微电网发展的重要技术^[6-7]。文献[8]在微电网中通过控制逆变器的开关信号调节可再生能源以及储能系统的输出功率,提高了微电网的动态稳定性。文献[9]在典型并联逆变器系统中加入自适应控制方法,减小了线路阻抗对控制性能的影响。但文献[8-9]中只对逆变器这一小部分内容进行控制,若使用传统控制系统可以建立更加全面完善的控制模型,进而控制逆变器和整流器等变换器。传统微电网控制系统是由大量PI控制器串并联形成^[10],PI参数的确定是整个控制系统的关键。文献[11]研究了微电网中虚拟惯性和阻尼控制对PI参数的影响,以减小可再生能源的不利影响。文献[12]在微电网中基于混合储能荷电状态协调分配策略对PI参数进行整定,可以有效分配蓄电池瞬时输出,减小直流母线波动,但其没有充分发挥微电网整合多种可再生能源的能力。为了充分发挥分布式能源的优势和更好地利用可再生能源,有学者认为可以将风能、太阳能、燃气轮机和储能设备进行并联,从而形成风光燃储多源微电网^[13-15]。由于可再生能源自身存在不确定性,会导致风光燃储微电网系统内部参数发生变化,然而传统PI控制器难以跟随系统一起变化^[16],进而影响风光燃储微电网变换器的整体控制性能。因此,根据风光燃储微电网内部参数变化对PI参数进行实时整定,提高风光燃储微电网系统变换器动态性能和稳态精度,是该领域研究的热点问题。

目前将智能优化算法应用于风光燃储微电网控制策略的并不多,文献[17-18]都在控制算法中加入深度学习功能,对PID参数进行智能整定,提高了控制系统的安全性以及可靠性,但在控制前期都需要经过大量训练,学习训练时间较长。文献[19]采用非支配排序遗传算法对变换器PI参数以及PBC控制器参数进行在线优化,使变换器拥有更好的动态和静态性能,但算法在全局寻优方面仍略有不足。文献[20]根据果蝇觅食行为提出了果蝇优化算法(fruit fly optimization algorithm, FOA),该算法具有计算参数少、调节简单和寻优速度较强的特点^[21]。但果蝇算法也具有一定的局限性,文献[22-23]指出了果蝇算法在后期搜索能力差、容易陷入局部最优等问题。文献[24]在果蝇搜索过程中加入融合差分算子和K-means聚类,改进了果蝇局部搜索能力不强的问题。文献[25]在果蝇算法中加入了两个子种群协同搜索的概念,提升算法局部搜索能力,使算法的收敛速度和精度有了一定提高。文献[26]针对微电网逆变器恒功率控制器PI参数进行优化,提出了基于种群分区的多策略自适应果蝇算法,提高了逆变

器的响应速度以及误差精度,但是该文献为三分区,会出现使优秀粒子远离最优目标的情况,浪费算法算力。

综上,目前大部分文献都针对果蝇优化算法局部搜索能力不强的缺陷对算法进行了改进,以此提高算法的性能。因此,本文以含有风光燃储4种微源的微电网为研究对象,对文献[26]的果蝇算法进行进一步改进,使改进算法能够应用于风光燃储微电网中多个变换器PI参数的实时优化,提高变换器的控制性能,实现风光燃储微电网的稳定运行。

1 风光燃储各系统建模与整体控制模型

1.1 各微源系统控制结构及建模

1.1.1 风力系统控制结构及建模

风力系统控制如图1所示,系统首先将电压外环采集到的直流母线电压与参考电压做差,把差值输入PI模块后得到 i_{dref} ,为了能够对有功分量和无功分量分别进行控制,将系统运行在单位功率因数情况下,此时 i_{qref} 为零,其中 i_{dref} 、 i_{qref} 分别为实际电流 d 、 q 轴分量的参考值。在电流内环中,将 i_{dref} 、 i_{qref} 与线路中的实际电流做对比,把差值输入PI模块后得到电压在 d 、 q 轴的分量 u_d^{WT} 、 u_q^{WT} ,然后将电压分量输入SPWM模块后产生的正弦波脉宽调制信号SPWM输入整流器对交流量进行整流调节。

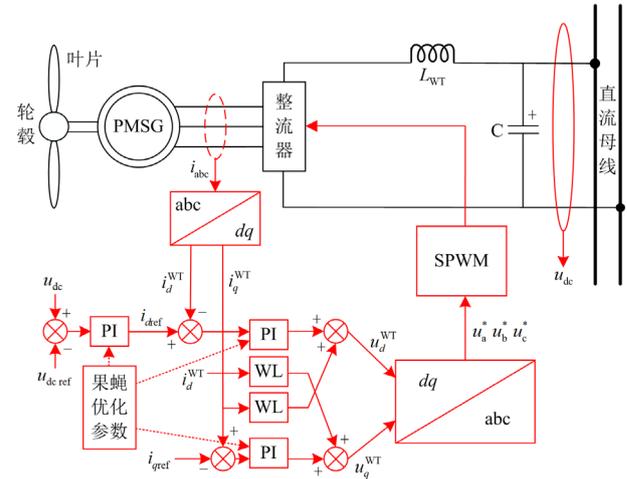


图1 风力系统控制图

Fig. 1 Wind system control diagram

微电网风力发电控制电压外环的数学模型为

$$\begin{cases} i_{dref} = (u_{dc\ ref} - u_{dc}) \left(k_{p,c} + \frac{k_{i,c}}{s} \right) \\ i_{qref} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u_{dc\text{ref}}$ 为直流母线电压参考值; u_{dc} 为直流母线电压; $k_{p,c}$ 为第 c 个 PI 控制器中的比例控制参数, $k_{i,c}$ 为第 c 个 PI 控制器中的积分控制参数, $c = 1, 2, \dots, 14$ 。

微电网风力发电控制电流内环的数学模型为

$$\begin{cases} u_d^{\text{WT}} = (i_{d\text{ref}} - i_d^{\text{WT}}) \left(k_{p,c} + \frac{k_{i,c}}{s} \right) \\ u_q^{\text{WT}} = (i_{q\text{ref}} - i_q^{\text{WT}}) \left(k_{p,c} + \frac{k_{i,c}}{s} \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_d^{WT} 、 u_q^{WT} 分别为风力系统电压 d 、 q 轴分量; i_d^{WT} 、 i_q^{WT} 分别为风力系统实际电流在旋转坐标下的 d 、 q 轴分量。

1.1.2 光伏系统控制结构及建模

光伏系统控制结构如图 2 所示, 为了增加太阳能资源的利用率, 使光伏系统尽可能多输出功率, 图中采用了最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)模块。常用的光伏 MPPT 有扰动观察法和电导增量法, 扰动观察法会在最大功率点出现反复波动的情况, 而电导增量法则可以有效避免此情况, 故在本文采用电导增量法进行光伏最大功率点追踪。图 2 中, 系统首先从输出端采集实际的直流电压、电流值, 输入 MPPT 模块中得到光伏电压参考值 $u_{pv\text{ref}}$, $u_{pv\text{ref}}$ 输入电压外环的 PI 模块计算得到光伏电流参考值 $i_{pv\text{ref}}$, 在电流内环中, 将 $i_{pv\text{ref}}$ 与实际电流作差, 经过 PI 模块计算得到光伏电压输入 SPWM 的指令值 u_{pv}^* , 再经过 SPWM 模块产生 SPWM, 最后通过 Boost 变换器对直流量进行升压调节。

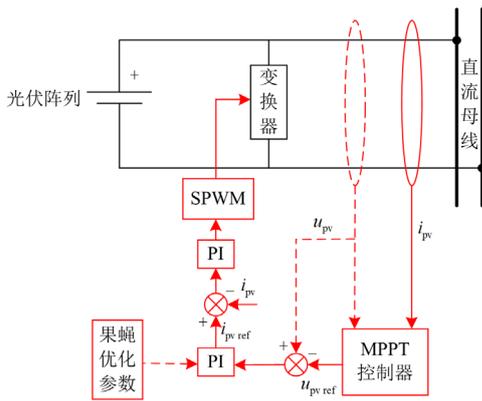


图 2 光伏系统控制图

Fig. 2 Photovoltaic system control diagram

微电网光伏发电控制电压外环的数学模型为

$$i_{pv\text{ref}} = (u_{pv\text{ref}} - u_{pv}) \left(k_{p,c} + \frac{k_{i,c}}{s} \right) \quad (3)$$

式中, u_{pv} 为实际光伏直流电压值。

微电网光伏发电控制电流内环的数学模型为

$$u_{pv}^* = (i_{pv\text{ref}} - i_{pv}) \left(k_{p,c} + \frac{k_{i,c}}{s} \right) \quad (4)$$

式中, i_{pv} 为光伏实际电流值。

1.1.3 燃机系统控制结构及建模

本文提及的燃机系统为单轴结构燃气轮机, 可将其等效为永磁同步发电机进行控制, 控制结构与图 1 对风力系统的控制相同, 不再重复描述。

微电网燃气轮机控制电压外环的数学模型为

$$\begin{cases} i_{d\text{ref}} = (u_{dc\text{ref}} - u_{dc}) \left(k_{p,c} + \frac{k_{i,c}}{s} \right) \\ i_{q\text{ref}} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

微电网燃气轮机控制电流内环的数学模型为

$$\begin{cases} u_d^{\text{MT}} = (i_{d\text{ref}} - i_d^{\text{MT}}) \left(k_{p,c} + \frac{k_{i,c}}{s} \right) \\ u_q^{\text{MT}} = (i_{q\text{ref}} - i_q^{\text{MT}}) \left(k_{p,c} + \frac{k_{i,c}}{s} \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中: u_d^{MT} 、 u_q^{MT} 分别为燃机系统电压 d 、 q 轴分量输入 SPWM 模块的指令值; i_d^{MT} 、 i_q^{MT} 分别为燃机系统实际电流在旋转坐标下的 d 、 q 轴分量。

1.1.4 储能系统控制结构及建模

储能系统控制框图如图 3 所示, 控制结构包括电压外环和电流内环, 电压外环采集实际储能电压值, 与给定的参考电压作差, 差值输入 PI 模块得到储能电流参考值 $i_{b\text{ref}}$, 在电流内环中, 将 $i_{b\text{ref}}$ 与线路中的电流作差, 把差值输入 PI 模块计算得到储能电压输入 SPWM 的指令值 u_b^* , 再经过调制产生 SPWM, 通过双向 Buck/Boost 变换器, 当可再生能源不足时, 储能电池放电, 将本身直流量经升压变

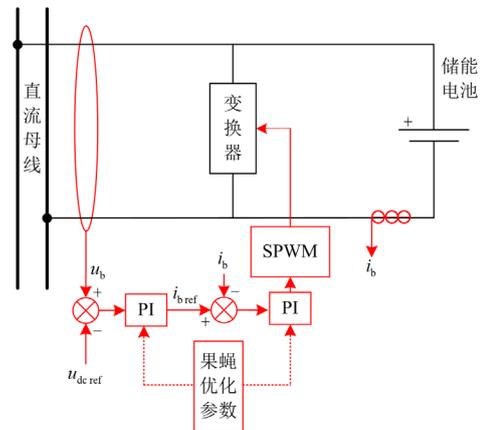


图 3 储能系统控制图

Fig. 3 Energy storage system control diagram

换后输出,当可再生能源过量时,储能电池充电,将多余直流量经降压变换后进行储存。

微电网储能系统控制电压外环的数学模型为

$$i_{b\text{ref}} = (u_{b\text{ref}} - u_b) \left(k_{p,c} + \frac{k_{i,c}}{s} \right) \quad (7)$$

式中: $u_{b\text{ref}}$ 为储能电压参考值; u_b 为实际储能电压值。

微电网储能系统控制电流内环的数学模型为

$$u_b^* = (i_{b\text{ref}} - i_b) \left(k_{p,c} + \frac{k_{i,c}}{s} \right) \quad (8)$$

式中, i_b 为实际储能电流值。

1.2 风光燃储微电网整体控制模型

如图4所示,风光燃储微电网的整体控制结构包含风力、光伏、燃气轮机以及储能电池等发电模型。风力发电模型和燃气轮机发电模型以经典的双闭环控制进行AC/DC变换,光伏发电模型利用最大功率跟踪控制进行DC/DC变换,储能模型利用双闭环控制双向Buck/Boost变换器进行DC/DC变换,风光燃储4个系统模块都与直流母线进行连接,最后在逆变电路部分对逆变器进行恒功率(PQ)控制,实现直流量到交流量的逆变,达到为交流负载提供稳定功率的目的。

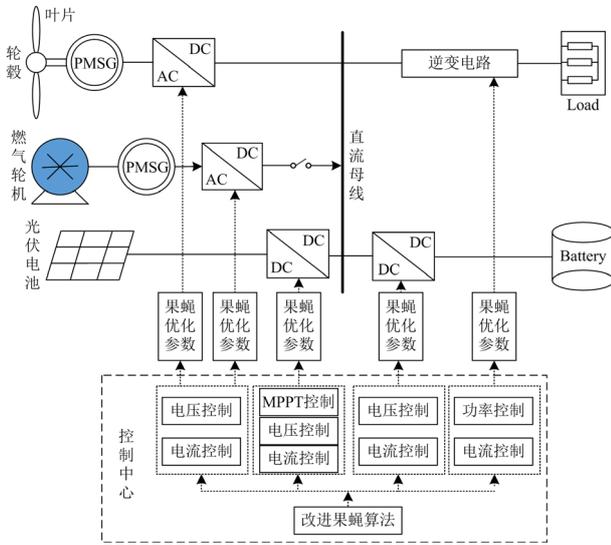


图4 风光燃储微电网控制结构图

Fig. 4 Control system diagram of wind/ photovoltaic/ gas turbine/ storage microgrid

如图5所示,逆变电路部分采用PQ控制策略,控制结构内包含功率外环和电流内环,功率外环收集线路的电压电流,输入PQ计算模块后得到实际的有功和无功,再与参考功率比较得出差值后输入PI模块,计算出电流分量 $i_{d\text{ref}}$ 、 $i_{q\text{ref}}$,在电流内环中与实际电流比较得出差值,输入PI模块得到新的电

压 d 、 q 轴分量 u_d^* 、 u_q^* ,再通过SPWM模块产生SPWM,最后输入逆变器完成直流量的逆变调节。

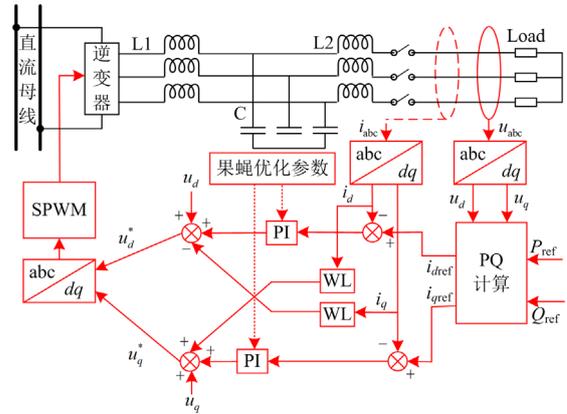


图5 逆变系统控制图

Fig. 5 Inverter control system diagram

微电网逆变器PQ控制电压外环的数学模型为

$$\begin{cases} i_{d\text{ref}} = (P_{\text{ref}} - P) \left(k_{p,c} + \frac{k_{i,c}}{s} \right) \\ i_{q\text{ref}} = (Q_{\text{ref}} - Q) \left(k_{p,c} + \frac{k_{i,c}}{s} \right) \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为有功功率和无功功率的参考值; P 、 Q 分别为线路中实际的有功功率和无功功率。

微电网逆变器PQ控制电流内环的数学模型为

$$\begin{cases} u_d^* = (i_{d\text{ref}} - i_d) \left(k_{p,c} + \frac{k_{i,c}}{s} \right) \\ u_q^* = (i_{q\text{ref}} - i_q) \left(k_{p,c} + \frac{k_{i,c}}{s} \right) \end{cases} \quad (10)$$

式中, i_d 、 i_q 分别为实际电流在旋转坐标下的 d 、 q 轴分量。

在微电网传统控制系统中,最常见的是PI控制器以及PR控制器,但PR控制器仅在基频处控制效果好,并且抑制谐波能力有限。考虑到一定条件下PI控制器和PR控制器是等价的,并且能够实时动态调整PI参数的PI控制器可以有效提高系统的鲁棒性,故控制系统中全部采用PI控制实现无静差跟踪。风光燃储微电网的整体控制中各个控制环节都涉及到PI控制模块,控制模块进行控制调节时,内部PI参数会相互影响,故PI控制器的参数将会直接影响整个风光燃储微电网的稳定性。为了提高风光燃储微电网的供电稳定性以及电能质量,本文由图4所示的控制结构图在孤岛状态下利用改进的果蝇算法对多个PI参数进行在线优化,以保证风光燃储

微电网的稳定运行。

基于改进果蝇算法优化的风光燃储微电网控制策略主要是分别优化式(1)一式(10)中PI控制模块的参数, 式中PI参数如表1所示。在可再生能源出现随机性以及波动性时, 对PI参数进行实时整定, 以此来稳定微电网中变换器的性能, 达到微电网快速稳定运行的目的。

表1 PI参数

Table 1 PI parameters

比例参数	积分参数	比例参数	积分参数
$k_{p,1}$	$k_{i,1}$	$k_{p,8}$	$k_{i,8}$
$k_{p,2}$	$k_{i,2}$	$k_{p,9}$	$k_{i,9}$
$k_{p,3}$	$k_{i,3}$	$k_{p,10}$	$k_{i,10}$
$k_{p,4}$	$k_{i,4}$	$k_{p,11}$	$k_{i,11}$
$k_{p,5}$	$k_{i,5}$	$k_{p,12}$	$k_{i,12}$
$k_{p,6}$	$k_{i,6}$	$k_{p,13}$	$k_{i,13}$
$k_{p,7}$	$k_{i,7}$	$k_{p,14}$	$k_{i,14}$

2 果蝇算法的改进

2.1 果蝇算法存在的问题

文献[26]针对果蝇算法的不足提出的ppmaFOA算法对果蝇种群进行了三分区处理, 并在不同分区中赋予果蝇种群不同的更新策略, 提升了ppmaFOA算法优化双闭环PI参数的探索和开发性能。但是该算法还存在下列问题: 1) 对种群分区不够彻底, II区中果蝇种群数太多, 占据了整体果蝇数量的一半以上, 降低了I区优秀更新策略对整体果蝇搜索的影响力; 2) 分区中的果蝇更新策略采用了随机选择果蝇个体进行更新的方式, 导致II区中会出现收敛性或者多样性优异的果蝇个体产生退化的现象; 3) 更新果蝇种群时采用固定搜索步长, 不能满足最佳的搜索要求。

本文基于上述问题对ppmaFOA算法进一步改进, 提出了基于自适应步长的四分区多策略果蝇优化算法(adaptive step four partitions multi strategy fruit fly optimization algorithm, ASMSFOA), 下面对算法改进的主要过程进行说明。

2.2 改进过程

2.2.1 种群多分区及多策略更新方式

根据改进算法中果蝇个体的收敛程度, 将全部果蝇个体分为4个分区, 分区公式如式(11)所示。

$$P(t) \begin{cases} \text{I区} & P(t) < \alpha \cdot n \\ \text{II区} & \alpha \cdot n \leq P(t) < \beta \cdot n \\ \text{III区} & \beta \cdot n \leq P(t) < \gamma \cdot n \\ \text{IV区} & P(t) \geq \gamma \cdot n \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P(t)$ 为 t 时刻果蝇的收敛程度; α 、 β 和 γ 均为0到1的值; n 为所有果蝇个体数量。

4个分区的果蝇种群采用不同策略进行更新, 实时指导果蝇个体寻优, 自适应调整算法本身的收敛性和多样性, 提升算法的整体性能。

1) I区中的果蝇表现最好, 最接近全局最优值, 为维持I区果蝇性能, 该区域的果蝇个体通过全局最优值和个体最优值共同指导果蝇个体更新, 其更新公式为

$$\begin{cases} X^{t+1} = X^t + R \cdot \omega(t)L(t)((X_p^t - X^t) + (X_g^t - X^t)) \\ Y^{t+1} = Y^t + R \cdot \omega(t)L(t)((Y_p^t - Y^t) + (Y_g^t - Y^t)) \\ \omega(t) = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left(\pi \sqrt{\frac{t-1}{t_{\max}}} \right) \right) \end{cases} \quad (12)$$

式中: X^t 、 Y^t 为果蝇个体 t 时刻的位置坐标; X^{t+1} 、 Y^{t+1} 为果蝇个体 $t+1$ 时刻的位置坐标; R 为函数生成的随机数; $\omega(t)$ 为更新公式中的权重系数; $L(t)$ 为果蝇自适应更新步长; X_p^t 、 Y_p^t 为 t 时刻个体果蝇最优位置; X_g^t 、 Y_g^t 为 t 时刻全局果蝇最优位置; t_{\max} 为果蝇最大运行时刻。

2) II区中的果蝇群体在寻优过程中收敛性较好, 多样性表现较差, 容易陷入局部最优。为了使算法兼顾多样性和收敛性, 在II区果蝇群体中更加注重多样性的位置更新, 其更新公式为

$$\begin{cases} X^{t+1} = X_g^t + R \cdot \omega(t)L(t) \\ Y^{t+1} = Y_g^t + R \cdot \omega(t)L(t) \end{cases} \quad (13)$$

3) III区中的果蝇群体在寻优过程中收敛性较差, 但多样性表现较好。为了加快果蝇个体收敛速度, 在III区果蝇群体迭代时加入上一时刻果蝇位置, 更加注重群体的收敛性, 其更新公式为

$$\begin{cases} X^{t+1} = X^t + R \cdot \omega(t)L(t)(X_g^t - X^t) \\ Y^{t+1} = Y^t + R \cdot \omega(t)L(t)(Y_g^t - Y^t) \end{cases} \quad (14)$$

4) IV区中的果蝇群体寻优效果最差, 几乎没有对果蝇种群做出贡献。为降低微电网输出误差, 该区域的果蝇群体应该快速收敛, 其更新公式为

$$\begin{cases} X^{t+1} = X^t + R \cdot \omega(t)L(t)(X_g^t - X^t) \\ Y^{t+1} = Y^t + R \cdot \omega(t)L(t)(Y_g^t - Y^t) \end{cases} \quad (15)$$

2.2.2 自适应步长的确定

果蝇算法以及文献[26]在更新果蝇位置时都是以固定迭代步长对目标区域进行搜索, 不能满足前期快速搜索和后期深度搜索的需求。为解决这个问题, 本文根据果蝇位置变化量更新搜索步长, 对果蝇种群信息进行自适应更新。自适应步长更新策略

如式(16)所示。

$$L(t) = \eta \cdot F(t) \quad (16)$$

式中: $L(t)$ 为自适应寻优步长; η 为权重系数; $F(t)$ 为当前时刻果蝇种群的位置评价指标。

为了避免自适应步长导致算法过于收敛或发散, 本文对自适应步长的大小进行了限定, 图 6 为算法优化各模型 PI 参数时自适应步长 L 的变化曲线, L 的最大值为 0.75, 最小值为 0.25。

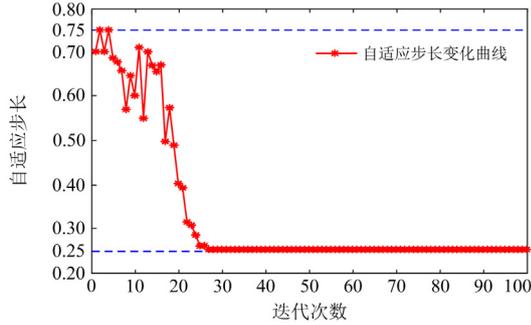


图 6 自适应变化曲线

Fig. 6 Self-adaption change curve

从图 6 中可以看出: 1) 在算法迭代前期, 自适应步长 L 的适应范围都在 0.5 以上, 此时的果蝇位置距离最优位置较远, 采用大步长快速收敛符合算法根据位置评价指标自适应调节收敛性的情况; 2) 在算法迭代后期 L 的适应范围在 0.5 以下, 此时果蝇个体已经到达最优目标附近, 果蝇种群缩小寻优步长, 增加搜索的精度, 符合算法收敛变化情况。

2.2.3 算法分区参数 α 、 β 和 γ 的确定

为平衡算法在迭代过程中的收敛性和多样性,

表 2 测试函数

Table 2 Test functions

函数	公式表示	极值
Ackley	$f(x) = -20 \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(i)^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x(i))\right) + 20 + e$	0
Rosenbrock	$f(x_1, x_2) = (1 - x_1)^2 + 100(x_2 - x_1)^2$	0

从图 7(a)中可以看出: 随着分区参数的改变, Ackley 函数位置评价指标的收敛速度也会发生改变。方案 1 中的 α 数值最小, 测试函数位置评价指标收敛速度较快。方案 3 中的 α 数值最大, 算法收敛速度最慢。方案 2 中的 α 数值比方案 1 中的稍微增加但又低于方案 3 的, 此时评价指标收敛速度最快。

从图 7(b)中可以看出: 随着分区参数的改变, Rosenbrock 函数位置评价指标波动性也会发生变化。方案 1 中的 α 数值最小, 评价指标波动范围

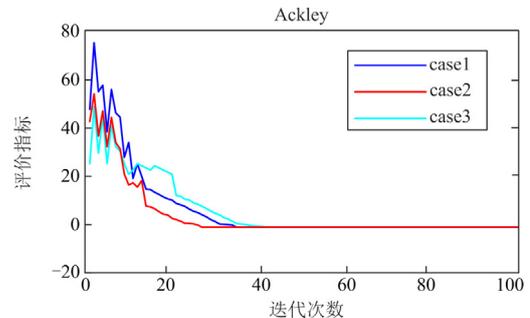
本文采用一种果蝇种群位置评价指标^[26](flock index)来对果蝇性能进行评估, 评价指标计算公式如式(17)所示。

$$\begin{cases} D(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m ((X_{i,j}^t - X_{p,i,j}^t) + (Y_{i,j}^t - Y_{p,i,j}^t)) \\ D(t-1) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m ((X_{i,j}^{t-1} - X_{p,i,j}^{t-1}) + (Y_{i,j}^{t-1} - Y_{p,i,j}^{t-1})) \\ F(t) = D(t) - D(t-1) \end{cases} \quad (17)$$

式中: $D(t)$ 为当前时刻果蝇与历史最优位置的维度差; $D(t-1)$ 为上一时刻果蝇与历史最优位置的维度差; $F(t)$ 为当前时刻果蝇种群的位置评价指标; i 为果蝇个数; j 为果蝇维度; m 为果蝇维度最大值; $X_{i,j}^t$ 、 $Y_{i,j}^t$ 为 t 时刻第 i 个果蝇 j 维的位置坐标; $X_{p,i,j}^t$ 、 $Y_{p,i,j}^t$ 为 t 时刻第 i 个果蝇 j 维的个体最优位置坐标。

当 F 值较小时, 表明当前时刻的果蝇群体比上一时刻更接近全局最优值, 因此需要减小果蝇的搜索步长。当 F 值较大时, 表明当前时刻的果蝇群体离全局最优位置较远, 因此需要增大果蝇的搜索步长, 提高果蝇种群的全局探索能力。

在对果蝇种群分区时, 如何确定 α 、 β 和 γ 将影响算法的综合性能, 本文采用式(17)对种群位置评价指标在不同的分区参数方案和不同的测试函数下进行评定。典型测试函数如表 2 所示。 α 、 β 和 γ 的取值经过多次分区实验, 文中只列写出 3 种方案。方案 1: $\alpha = 0.15$ 、 $\beta = 0.4$ 、 $\gamma = 0.65$; 方案 2: $\alpha = 0.25$ 、 $\beta = 0.5$ 、 $\gamma = 0.75$; 方案 3: $\alpha = 0.35$ 、 $\beta = 0.6$ 、 $\gamma = 0.85$ 。



(a) Ackley 函数评价指标

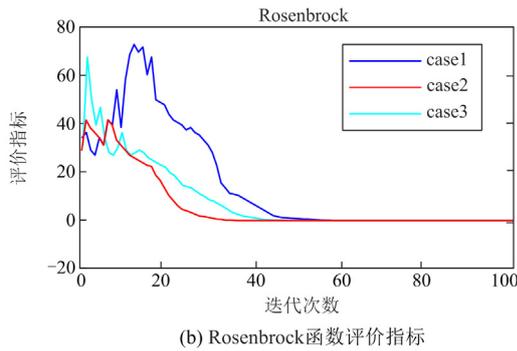


图7 不同分区参数评价指标变化情况

Fig. 7 Changes of evaluation indexes of different partition parameters

最大。方案3中的 α 数值最大, 算法波动范围同样较大。只有方案2的评价指标波动性最小。

以上情况说明方案2的分区参数可以使得本文算法具有良好的收敛速度和开发性能, 故本文选择 $\alpha = 0.25$ 、 $\beta = 0.5$ 、 $\gamma = 0.75$ 作为最终的分区参数。

3 基于ASMSFOA的微电网PI参数在线优化

3.1 目标函数

传统的PI控制器优化微电网时, 常以PI误差作为优化目标, 但是PI控制器的误差值可能会出现持续振荡或者偏移, 对微电网的安全稳定运行产生冲击。因此, 通过式(1)一式(10)获取到误差值后, 本文采用对误差求导、求绝对值之后积分来避免上述问题, 具体的目标函数如式(18)所示。

$$E(t) = \int |e| dt + \int \left| \frac{de}{dt} \right| dt \quad (18)$$

式中: $E(t)$ 为目标函数值; e 为PI控制器输出的误差值。

3.2 改进果蝇算法优化PI参数的步骤

改进果蝇算法在线优化PI参数的思路是, 当系统参数发生变化时, 通过ASMSFOA算法优化PI参数, 使PI参数能够适应风光燃储微电网的变化。将本文算法应用到风光燃储微电网各个控制模型中的流程如图8所示, 具体的优化步骤如下。

1) 根据第1节搭建的控制模型获取风光燃储微电网线路电压、电流和功率等参数, 初始化果蝇种群参数;

2) 根据式(18)计算果蝇个体位置浓度, 更新果蝇全局最优位置和历史个体最优位置;

3) 按照式(11)对果蝇种群进行分区, 按照式(12)一式(15)的策略对果蝇进行更新;

4) 将当前最优的PI参数输入不同控制模型的

PI控制器;

5) 判断当前算法迭代次数是否达到最大值, 若达到最大值, 则结束循环; 否则, 重新执行步骤2)一步骤5)。

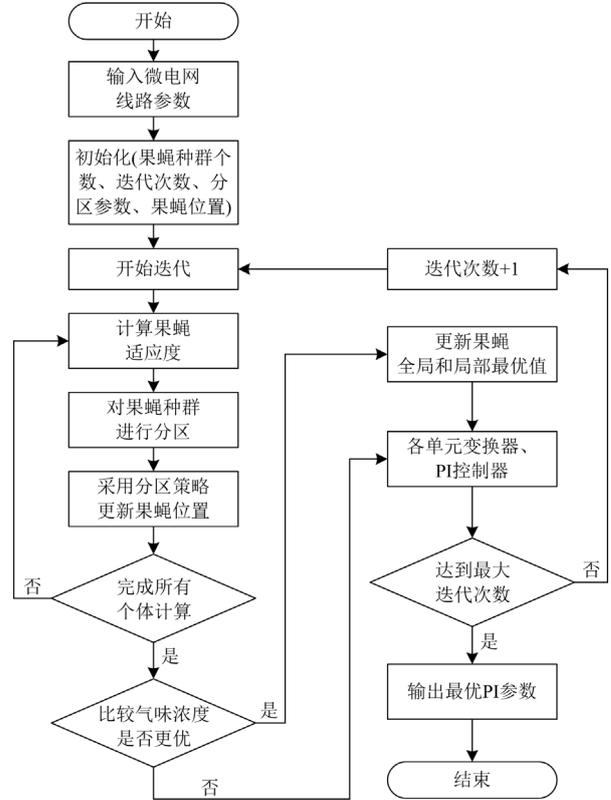


图8 改进果蝇算法优化PI参数流程图

Fig. 8 Flow chart of PI parameters optimization by using improved fruit fly algorithm

4 仿真算例与结果分析

4.1 仿真算例

为了验证本文所提控制策略的性能, 采用Simulink搭建了仿真模型, 对风光储以及风光燃储微源运行时的状态进行仿真分析。模型中, 光伏发电用直流电源代替, 风力发电以及燃气轮机以永磁同步发电机代替, 仿真参数如表3所示。仿真实验设置两种场景: (1) 场景1: “风+光+储”微电网系统仿真。(2) 场景2: “风+光+燃+储”微电网系统仿真。上述场景的仿真实验结果如图9、图10和表4所示, 下面对结果进行详细分析与说明。

4.2 结果分析

从图9中可以看出:

1) 在场景1中的0~1s, 直流母线电压在本文算法的优化下响应时间最快, 上升时间最短, 并且没有超调量, FOA和PSO两个算法对模型中PI参

数进行优化时母线电压也非常接近 800 V，但是达到稳态的时间比本文算法要慢，误差也比较大。

表 3 仿真参数

Table 3 Simulation parameters

参数类型	参数名称	数值
公共参数	风力发电系统电压/V	380
	燃气轮机发电系统电压/V	380
	光伏发电系统电压/V	400
	交流母线电压/V	800
	储能容量/kWh	4000
	交流负荷有功功率/W	4000
	交流负荷无功功率/var	1500
	额定频率/Hz	50
场景 1 参数	可再生微源有功功率/W	4000
	可再生微源无功功率/var	1000
	储能充放电功率/W	-1000/1500
场景 2 参数	可再生微源有功功率/W	4000
	可再生微源无功功率/var	1500
	燃气轮机有功功率/W	1500
	燃气轮机无功功率/var	1000
	储能充放电功率/W	0

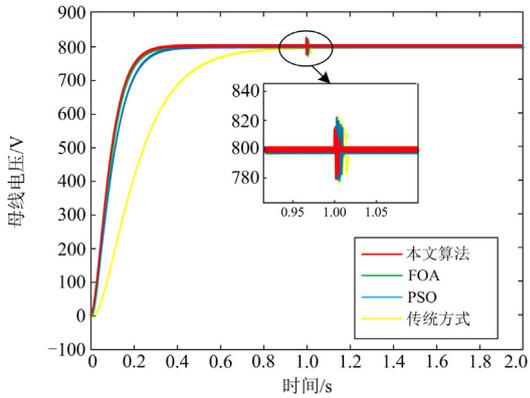
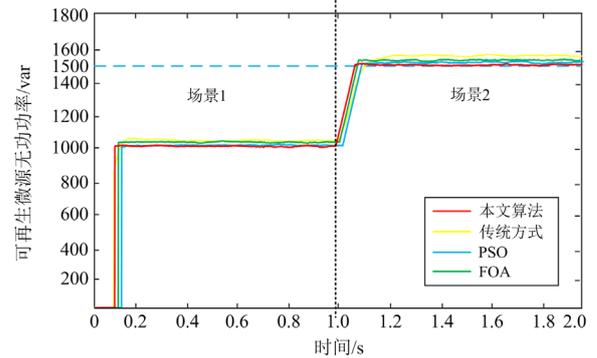
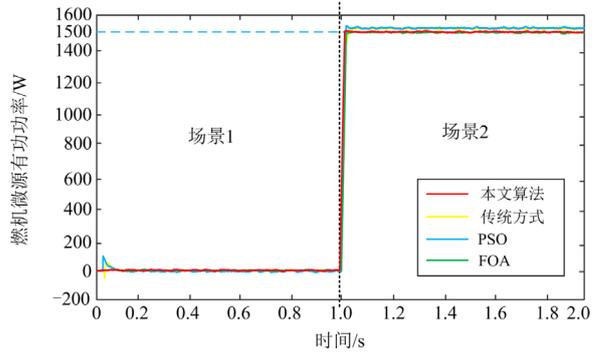


图 9 DC 母线电压

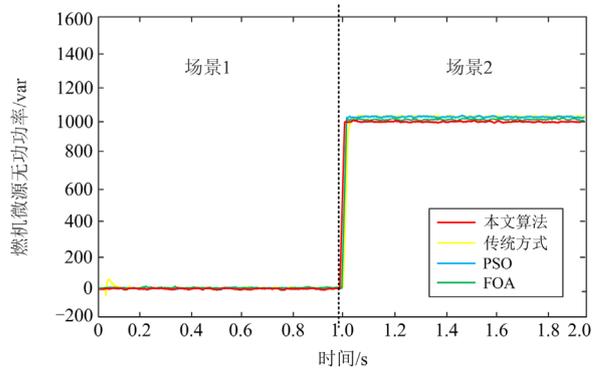
Fig. 9 DC bus voltage



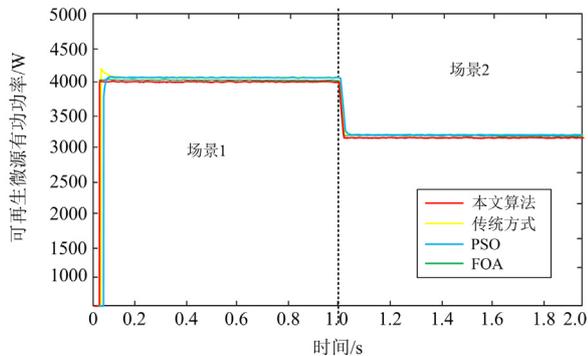
(b) 可再生微源无功功率



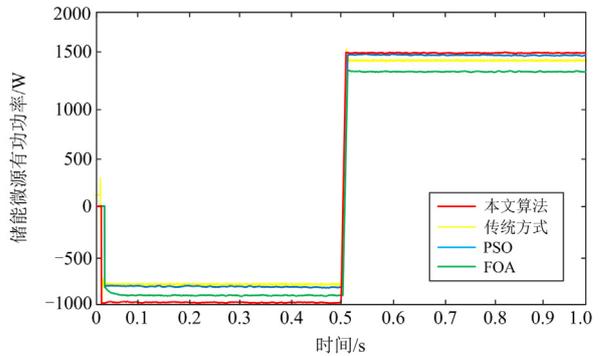
(c) 燃机微源有功功率



(d) 燃机微源无功功率



(a) 可再生微源有功功率



(e) 储能微源有功功率

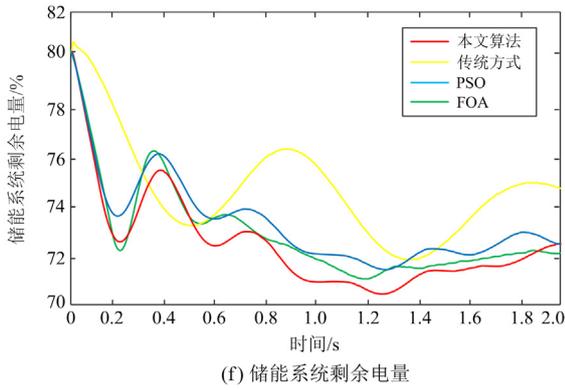


图 10 不同算法优化微电网的输出功率

Fig. 10 Output power of the microgrid optimized by different algorithms

2) 在场景 2 中的 1~2 s, 启动燃机微源后, 本文算法对风光燃储 4 个微源进行优化时, 直流母线电压的波动时间是最短的, 误差波动量也是最小的, 说明本文算法在风光燃储微电网控制中同样适用, 并且控制效果优于其他 3 种算法。

3) 在所有的场景中, 采用传统方式控制仿真模型效果是最差的, 但是在传统方式控制下, 微电网启动储能和燃机微源后微电网直流母线电压依旧能够达到稳定, 说明在微电网中加入储能和燃机微源可以降低可再生微源随机波动对微电网母线电压的影响。

从图 10 可以看出:

1) 在场景 1 中的 0~1 s, 风力、光伏和储能微源工作, 当可再生能源出力大于负荷需求时, 储能系统 Buck 电路工作, 系统处于充电状态; 当可再生能源出力小于负荷需求时, 储能系统 Boost 电路工作, 系统处于放电状态。在传统方式优化下, 功率曲线的响应速度和恢复稳定的时间都很慢, 超调量也是 4 种算法中最大的, FOA 和 PSO 对仿真模型进行优化时, 相较于传统方式响应速度和恢复稳定的时间都有了一定的提升, 超调量也相应减弱, 但是在微源功率到达稳态之前都出现了小幅的波动, 增大了整个系统的响应时间以及稳态时间, 采用本文算法对模型进行优化时, 可再生能源输出功率的响应时间是传统方式的 10 倍, 储能系统的充放电功率也是与期望值最接近的, 证明了本文算法的优越性以及控制策略的有效性。

2) 在场景 2 中的 1~2 s, 微电网内风力、光伏、燃气轮机和储能微源工作, 考虑可再生能源的不确定性以及储能系统的额定容量, 当储能系统达到最大充放电电量时, 启动燃气轮机来维持风光燃储微电网输出功率稳定, 满足交流负载需求。在加入燃机微源后重新恢复稳定的时间是 4 种智能算法中最快的, 并且超调量几乎为零, 证明在微电网中加入燃机微源可以降低风光不确定性对微电网稳定性的影响, 并且说明本文控制策略在 3 种微源和 4 种微源的情况下都适用。

表 4 为不同场景下系统运行的结果对比, 从表 4 中可以看出:

表 4 系统运行结果对比

Table 4 Comparison of system running results

算法类型	微源类型	有功误差/%	无功误差/%	母线电压误差/%	超调量/%	上升时间/s	稳定时间/s
本文算法	风力微源	1.151	1.761	1.175	9.208	0.051	0.051
	光伏微源	1.117	3.212	1.027	8.216	0.027	0.027
	储能微源	1.205	—	0.856	6.848	0.023	0.023
	燃机微源	1.076	2.418	1.743	18.68	0.012	0.033
传统方式	风力微源	2.325	3.185	2.659	41.85	0.183	0.500
	光伏微源	4.198	3.981	3.032	167.9	0.129	0.480
	储能微源	3.573	—	4.810	19.37	0.064	0.075
	燃机微源	6.675	3.974	6.593	267.7	0.084	0.503
FOA	风力微源	2.415	2.937	2.381	19.32	0.083	0.250
	光伏微源	3.052	3.459	3.062	27.67	0.079	0.220
	储能微源	2.619	—	3.813	20.50	0.033	0.038
	燃机微源	2.086	3.937	3.674	21.00	0.015	0.237
PSO	风力微源	1.952	1.469	2.464	15.61	0.095	0.190
	光伏微源	1.107	3.601	1.951	28.81	0.052	0.153
	储能微源	1.389	—	3.117	18.93	0.064	0.091
	燃机微源	1.456	3.875	2.973	15.00	0.032	0.302

1) 在不同场景下, 经过 ASMSFOA 优化后风光燃储微电网中变换器的性能均远高于其他 3 种算法, 整个系统的有功误差、无功误差、母线电压误差、上升时间和稳定时间在 4 种算法中是最小的;

2) 在场景 2 运行燃机微源后, 本文算法对模型进行优化时产生了较大超调量, 但误差在可接受范围内, 并且在发生超调后的 0.0035 s 内, 超调就逐渐消失。

综上所述, 本文提出的 ASMSFOA 展现出了良好的控制性能, 并在风光燃储微电网控制模型的在线 PI 参数优化中得到验证。

5 结论

本文提出加入自适应步长的四分多策略果蝇优化算法, 并且应用于风光燃储微电网各个系统控制模型 PI 参数的实时整定。

1) 根据种群中果蝇个体收敛程度, 对 4 个分区内的果蝇个体进行不同策略更新, I 区增强种群局部搜索能力, II 区根据位置评价指标自适应调节果蝇种群的多样性, III 区根据位置评价指标自适应调节果蝇种群收敛性, IV 区加快果蝇种群全局寻优能力, 为种群迭代做出贡献。

2) 根据果蝇位置变化量自适应调节搜索步长。采用满足前期快速搜索, 后期深度搜索的自适应步长对果蝇种群进行更新。自适应调整算法搜索目标空间的精度, 提升算法的整体性能。

3) 证明了本文所提算法可以应用于风光燃储微电网 PI 参数的实时整定, 并在风光燃储微电网仿真模型中, 对不同优化算法进行对比分析, 相对来说本文改进算法性能优于另外 3 种算法, 证明了本文算法的有效性以及优越性, 提高了变换器的控制性能, 实现了风光燃储微电网稳定运行。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 关于印发十四五可再生能源发展规划的通知[EB/OL]. [2022-06-01]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202206/t20220601_1326719_ext.html.
- [2] 赵军, 张敏, 张世锋, 等. 计及碳交易和新能源不确定性的多微电网合作运行优化策略[J]. 中国电力, 2023, 56(5): 62-71.
ZHAO Jun, ZHANG Min, ZHANG Shifeng, et al. Optimization strategy of multi-microgrid cooperative operation considering carbon trading and renewable energy uncertainties[J]. Electric Power, 2023, 56(5): 62-71.
- [3] 胡铭洋, 高红均, 王程, 等. 面向多微网协调交易的多方共治决策方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(13): 30-42.
- [4] 陈钦泽, 王文, 岳雨霏, 等. 基于功率补偿量及下垂系数衰减的直流微电网并网转离网无缝切换控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 14-22.
CHEN Qinze, WANG Wen, YUE Yufei, et al. Seamless switching control strategy of a DC microgrid from grid to off grid based on power compensation and droop coefficient attenuation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 14-22.
- [5] 徐敏, 康哲, 刘早富. 基于观测器的混沌电力系统 PI 固定时间自适应滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 146-157.
XU Min, KANG Zhe, LIU Zaofu. Observer-based PI fixed time adaptive sliding mode control for chaotic power systems[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 146-157.
- [6] ANAS A, MD H U. Multi-agent system based plug and play energy management system for DC microgrids[C] // 2020 52nd North American Power Symposium (NAPS), April 11-14, 2021, Tempe, AZ, USA: 1-6.
- [7] 刘海南, 蔺红, 樊国旗, 等. 基于风荷耦合特性的源荷储的优化调度[J]. 智慧电力, 2021, 49(1): 42-47.
LIU Hainan, LIN Hong, FAN Guoqi, et al. Optimal scheduling of source-load-storage based on wind-load coupling characteristics[J]. Smart Power, 2021, 49(1): 42-47.
- [8] ROY T K, GHOSH S K, SAHA S. Robust backstepping global integral terminal sliding mode controller to enhance dynamic stability of hybrid AC/DC microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 139-151.
- [9] 吴中东, 丁石川, 郭小璇, 等. 一种并联逆变器自适应下垂控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(7): 84-94.
WU Zhongdong, DING Shichuan, GUO Xiaoxuan, et al. An adaptive droop control method for parallel inverters[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 84-94.
- [10] 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.
- [11] HASEN S A, SONMEZ S, AYASUN S, et al. Enhancement of stability region by virtual inertia and damping control for micro-grids with communication time delay[J]. Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Electrical Engineering, 2023, 47(1): 177-191.

- [12] 任鹏, 李春兰, 王长云, 等. 混合微电网的功率分配策略及 PI 参数整定[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 325-331.
REN Peng, LI Chunlan, WANG Changyun, et al. Power distribution strategy and PI parameter regulation of hybrid microgrid[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2022, 43(3): 325-331.
- [13] 张程, 匡宇, 刘佳静, 等. 考虑需求侧管理的风光燃储微电网两阶段优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 13-22.
ZHANG Cheng, KUANG Yu, LIU Jiajing, et al. Two-stage optimal scheduling of a wind, photovoltaic, gas turbine, fuel cell and storage energy microgrid considering demand-side management[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 13-22.
- [14] 李雄威, 王昕, 顾佳伟, 等. 考虑火电深度调峰的风光火储系统日前优化调度[J]. 中国电力, 2023, 56(1): 1-7, 48.
LI Xiongwei, WANG Xin, GU Jiawei, et al. Day-ahead optimal dispatching of wind-solar-thermal power storage system considering deep peak shaving of thermal power[J]. Electric Power, 2023, 56(1): 1-7, 48.
- [15] 郭永强, 张靖, 何宇, 等. 考虑电动汽车充放电响应的微电网混合储能配置[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(8): 82-93.
GUO Yongqiang, ZHANG Jing, HE Yu, et al. Hybrid energy storage configuration of micro-grid considering charge-discharge response of EVs[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(8): 82-93.
- [16] 符占元, 专祥涛. 基于神经网络和遗传算法的 PID 参数自整定算法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(3): 379-386.
FU Zhanyuan, ZHUAN Xiangtao. PID parameter self-tuning algorithm based on neural network and genetic algorithm[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(3): 379-386.
- [17] 毛亚哲, 何柏娜, 王德顺, 等. 基于改进深度强化学习的智能微电网群控制优化方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(3): 19-25, 58.
MAO Yazhe, HE Baina, WANG Deshun, et al. Optimization method for smart multi-microgrid control based on improved deep reinforcement learning[J]. Smart Power, 2021, 49(3): 19-25, 58.
- [18] 柴天佑, 周正, 郑锐, 等. 端边云协同的 PID 整定智能系统[J]. 自动化学报, 2023, 49(3): 514-527.
CHAI Tianyou, ZHOU Zheng, ZHENG Rui, et al. PID tuning intelligent system based on end-edge-cloud collaboration[J]. Acta Automatica Sinica, 2023, 49(3): 514-527.
- [19] 王路, 王久和, 赵燕, 等. Buck-Boost 变换器 PI+PBC 控制器参数的多目标优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(11): 84-91, 99.
WANG Lu, WANG Jiuhé, ZHAO Yan, et al. Multi-objective optimization of PI+PBC controller parameters for Buck-Boost converter[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2022, 34(11): 84-91, 99.
- [20] 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.
- [21] 闫俊伢, 裴娅男, 姚宏, 等. 虚拟现实基于果蝇优化算法的碰撞检测[J]. 南京理工大学学报, 2023, 47(1): 74-80.
YAN Junya, PEI Yanan, YAO Hong, et al. Collision detection based on fruit fly optimization algorithm in virtual reality[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2023, 47(1): 74-80.
- [22] LI Y, HAN M. Improved fruit fly algorithm on structural optimization[J]. Brain Informatics, 2020, 7(1).
- [23] 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.
- [24] 周佳伟, 杜欣, 倪友聪, 等. 基于果蝇算法的约束区域均匀实验设计方法[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(1): 110-122.
ZHOU Jiawei, DU Xin, NI Youcong, et al. Uniform experimental design with constrained region based on fruit fly algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(1): 110-122.
- [25] XIONG C, LIAN S. Structural damage identification based on improved fruit fly optimization algorithm[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021: 1-23.
- [26] 王福忠, 陶新坤, 田广强. 基于改进果蝇算法优化的微电网逆变器恒功率控制算法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 71-79.
WANG Fuzhong, TAO Xinkun, TIAN Guangqiang. Constant power control algorithm for a microgrid inverter based on an improved fruit fly algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 71-79.

收稿日期: 2023-04-20; 修回日期: 2023-07-26

作者简介:

张丽(1982—), 女, 博士, 副教授, 从事电网需求侧响应、智能用电信息技术研究; E-mail: dqzhangli@hpu.edu.cn

刘雨航(1998—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 从事电力系统及其自动化研究。E-mail: 212107020044@home.hpu.edu.cn

(编辑 周金梅)