

# 基于 PSO-ABFO 的负荷频率控制系统 控制器设计与优化

田园园<sup>1</sup>, 金国强<sup>2</sup>, 彭道刚<sup>1</sup>, 何 钧<sup>3</sup>, 孙宇贞<sup>1</sup>

(1. 上海电力大学自动化工程学院, 上海 200090; 2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710032;  
3. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

**摘要:** 负荷频率控制对于保障电网本身安全可靠运行有重要作用, 适宜的控制参数使得电网在各种随机扰动下能维持系统频率稳定和长期安全运行。针对单区域两机组电网的负荷频率控制器参数优化整定问题, 提出一种基于粒子群改进自适应细菌觅食优化算法(PSO-ABFO)的控制器参数整定设计方法。PSO-ABFO 在标准细菌觅食算法的基础上, 结合粒子群(PSO)算法思想引入全局最优、个体最优以及自适应步长, 重新定义细菌的健康度并修改细菌迁移的方式, 提高算法的寻优速度和寻优精度。最后, 建立负荷频率控制系统(LFC)模型进行仿真试验, 验证所提控制器设计与优化方法使系统动态性能显著提升。

**关键词:** 粒子群算法; 细菌觅食优化算法; PSO-ABFO; 负荷频率控制; 参数优化

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.06.014 中图分类号: TM621.6 文章编号: 1673-9140(2021)06-0120-08

## Design and optimization of load frequency control system controller based on PSO-ABFO

TIAN Yuanyuan<sup>1</sup>, JIN Guoqiang<sup>2</sup>, PENG Daogang<sup>1</sup>, HE Jun<sup>3</sup>, SUN Yuzhen<sup>1</sup>

(1. Automation Engineering of Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710032, China; 3. Electric Power Science Research Institute, State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330096, China)

**Abstract:** The load frequency control plays an important role in ensuring the security and reliable operation of the power grid. The appropriate controller parameter setting ensures frequency stability and long-term security of power systems under various random disturbances. To achieve the optimal setting of load frequency controller of a single-area two-generator power grid, this paper proposes a controller parameter tuning method based on particle swarm optimization adaptive bacterial foraging optimization (PSO-ABFO), which is based on the standard BFO and combines the idea of PSO to introduce global optimization, individual optimization and adaptive step size, etc. The speed and accuracy of the proposed algorithm is significantly improved. A load frequency control system (LFC) model is established

收稿日期: 2018-03-17; 修回日期: 2018-05-09

基金项目: 上海市“科技创新行动计划”高新技术领域项目(16111106300; 17511109400); 上海市科学技术委员会工程技术研究中心资助(14DZ2251100)

通信作者: 彭道刚(1977-), 男, 教授, 博士(后), 主要从事智能发电自动化、微电网与能源互联网等研究; E-mail: pengdaogang@126.com

to test the performance of the proposed algorithm. The results verifies that the improvement of the dynamic performance of the system.

**Key words:** particle swarm optimization; bacteria foraging optimization; PSO-ABFO; load frequency control; parameter optimization

电网频率作为电力系统最重要的性能指标之一,频率稳定是对电网运行的基本要求,近年来,许多国内外学者对如何保持电网频率的稳定、提高电能质量密切关注并对其进行深入的研究<sup>[1-2]</sup>。不同种类的分布式电源大量接入电网以及时刻存在的不规则负荷扰动,对维持电网频率稳定提出了更高的挑战。负荷频率控制(load frequency control, LFC)技术作为解决电网频率稳定问题的主要手段,一直是电力系统研究的热点问题,当电网负荷发生变化时,控制系统通过不断调整机组的有功出力大小来补偿电网中的功率不平衡,使系统频率保持在给定值附近。

LFC 控制器设计的主要问题可分为控制器本身的结构设计和参数整定,设计的目的是使系统拥有更好的动态响应性能,在出现扰动时能够更快速的恢复系统频率并保持稳定。目前,已经有不少学者针对电网的 LFC 中的问题进行了深入的研究<sup>[3-5]</sup>。由于电网规模的扩大和系统复杂性的不断增加,为了改善控制系统的动态性能,越来越多先进的控制策略被应用到控制器的设计中,如结合人工智能理论的模糊逻辑控制器设计方法、神经网络控制以及自抗扰控制技术。这些控制器设计方法使控制系统在一定情况下得到了很好的控制,但是同时也产生了一些新的问题,比如控制器结构更复杂,控制方法难以实现等。PID 控制器因为其结构简单、参数易于调整和实现等优点,在实际工程中仍然有较多的应用。对于负荷控制系统 PID 控制器参数优化问题,有许多学者提出了不同的解决方案。如经典的 Z-N 整定方法、临界比例带法、衰减曲线法、基于模型整定的 PID 控制器<sup>[6-7]</sup>。随着计算机水平的提高和智能算法的诞生,许多基于不同智能优化算法的 PID 控制器被不断提出,这些算法包括蚁群算法、粒子群算法、细菌觅食算法以及一些改进算法<sup>[8-10]</sup>。因为智能算法较传统优化方法具有更好的适应性和更高的收敛性能,被广泛的应用在 PID 参数优化中。

该文采用 Matlab/Simulink 搭建单区域两机负荷频率控制系统模型,在该模型的基础上,通过将细菌群体对历史数据的记忆和认知学习能力应用到细菌觅食算法(bacterial foraging optimization, BFO)中,采用粒子群算法的寻优策略和自适应步长策略相结合的方法,给出一种基于粒子群改进的自适应细菌觅食算法(particle swarm optimization-adaptive bacterial foraging optimization, PSO-ABFO)来整定 PID 控制器参数,分析此方法获得的控制器参数及参数寻优过程,通过仿真证明所提优化方法得到的 PID 控制器具有很好的控制性能以及鲁棒性。

该改进方法使细菌的趋化迁移过程更具有方向性,同时保留细菌随机趋化方向的随机部分,使菌群避免陷入局部最优;重新定义细菌的健康度,使细菌具有更高的收敛速度,也能保证细菌的优势信息不被淘汰;在进行迁移操作时,对每个随机初始化的参数与迁移前参数进行比较,适应度改善的继续进行迭代,从而更好地保留种群的较优性能。这样,一方面具有方向性的趋化和 PSO 寻优特性,保证算法能够快速收敛;另一方面,一定概率的迁移机制通过增加种群多样性保证了寻优的全局性,避免陷入局部最优值。通过此方法整定的 PID 控制器参数,使 LFC 系统具有更好的动态性能。

## 1 负荷频率控制系统模型

### 1.1 LFC 系统动态模型

由发电机的运行方程并对其进行拉普拉斯变化可得:

$$\Delta P_m - \Delta P_e = 2Hs \Delta \omega (s) \quad (1)$$

式中  $\Delta P_m$  为机械功率输入量的变化量;  $\Delta P_e$  为电磁功率输出量的变化量;  $H$  为机组惯性常数,  $\Delta \omega$  为角速度的变化量。

另外,为了使频率稳定在合理的范围内,需要机组在一定范围内使输出功率和负荷变化保持一致

性,提出单位负荷调节量  $D$ 、功率之间的关系:

$$\Delta P(s) = \Delta P_L(s) + D\Delta\omega(s) \quad (2)$$

通过分析得到单区域两机组负荷频率控制系统模型,如图 1 所示。控制系统由发电机、原动机、调

速器及各限制环节组成,图 1 中  $K(s)$  为 LFC 控制器,  $\Delta f$  为区域频率偏差,  $B$  为频率偏差系数,  $\tau_g$  为调速器时间常数,  $\tau_T$  为发电机组时间常数,  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别为 2 台发电机的分配因子。

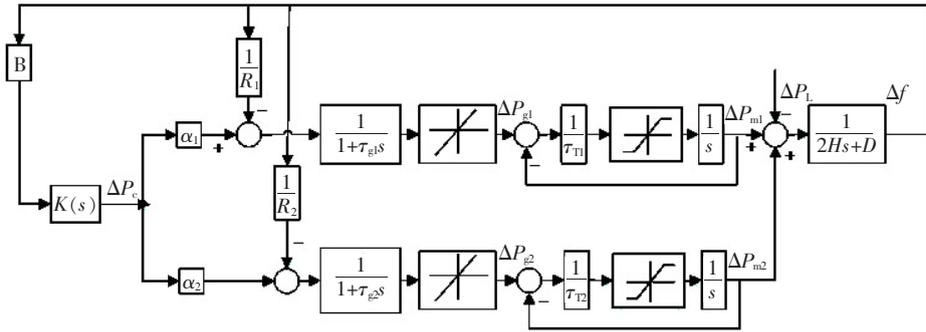


图 1 区域 2 台发电机的 LFC 模型

Figure 1 LFC model of two generators in one area

### 1.2 系统 PID 控制器设计

传统 PID 控制器完全能够实现 LFC 系统的无差调节,选择带滤波系数的 PID 控制器,其基本结构如图 2 所示,其中,  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  分别为控制器的比例、积分和微分系数,  $N$  为滤波系数。

$$k_{pn} \leq K_P \leq k_{pm}$$

$$k_{in} \leq K_I \leq k_{im} \quad (4)$$

$$N_n \leq N \leq N_m$$

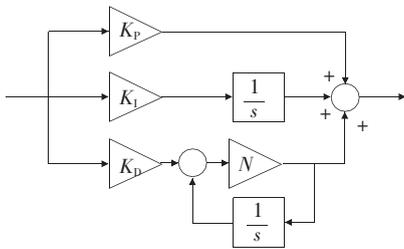


图 2 带滤波的 PID 控制器结构

Figure 2 PID controller with filter structure

负荷频率控制系统控制器参数整定是为了让系统遇扰动时能够以较快的速度使其频率恢复到给定值附近,参数优化问题被表述为在一定参数范围内寻找使目标函数达到最小值的控制器参数值。此处拟采用时间乘绝对误差的积分(integral of time multiplied absolute error, ITAE)性能指标作为控制器参数优化的目标函数,即将仿真时间与误差绝对值乘积的积分作为目标函数。

参数优化问题的数学表述形式为

$$\min J = \int t|e|dt \quad (3)$$

式(3)、(4)中  $e$  为系统仿真的频率误差;  $k_{pn}$  和  $k_{pm}$ 、 $k_{in}$  和  $k_{im}$ 、 $k_{dn}$  和  $k_{dm}$ 、 $N_n$  和  $N_m$  分别为  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$ 、 $N$  的最小和最大值。在式(4)的约束条件下,寻求使式(3)最小的控制器参数值。

## 2 基于粒子群改进自适应 BFO 算法

BFO 是 2002 年被一位名为 K. M. Passino 博士提出的一种细菌菌落优化算法<sup>[11]</sup>,其基本原理是根据大肠杆菌本身的纤毛和细菌间的相互影响来完成信息交换,通过趋化、复制和迁移操作使细菌向营养浓度较高的地方移动,达到寻找参数最优解的目的。细菌觅食算法因其原理简单、易于编程实现、收敛速度快、搜索能力强,在工程实践中得到了广泛应用。研究表明,标准 BFO 算法因为采用固定步长和随机翻转方向,降低了算法寻优的方向性,不能快速地找到最优解<sup>[12-13]</sup>,该文在结合粒子群优化策略和自适应策略的基础上,重新定义细菌的健康度和位置评价方式,提出 PSO-ABFO 算法。

### 2.1 趋化策略

用  $\theta(i, j, k, l)$  表示细菌位置坐标,  $j$ 、 $k$ 、 $l$  分别

表示细菌当前所处趋化、复制、迁移次数。种群大小用  $S$  表示,需要求解的变量维数为  $p$ ,每个细菌的位置都表示一个候选解。细菌趋化、复制、迁移操作的最大次数分别为  $N_c$ 、 $N_{re}$ 、 $N_{ed}$ ,  $J(i, j, k, l)$  为第  $i$  个细菌的适应度,其大小用来评价候选解的优劣。

1) 在细菌随机翻转方向的基础上,引入细菌对历史最优位置信息的学习系数,结合粒子群全局最优的概念提出强化学习方向,降低单纯随机翻转方式的盲目性,强化学习方向计算公式为

$$\Delta_{RL}(i) = (\theta^i - \theta^b)\theta_r R_1 \quad (5)$$

式中  $\Delta_{RL}(i)$  为细菌的强化学习方向; $\theta^i$  为当前细菌位置; $\theta^b$  为前一次趋化后最优细菌位置; $\theta_r$  为强化学习系数; $R_1$  为一个随机数。

与此同时,PSO-ABFO 算法保留了细菌随机翻转方向,保证了算法的随机搜索特性,细菌的趋化方向  $\Delta_M(i)$  计算公式为

$$\Delta_M(i) = \Delta(i) - \Delta_{RL}(i) \quad (6)$$

2) 实时记录和更新群体最优个体的位置信息,根据当前个体与群体最优个体的位置关系,相应的调整细菌游动步长,提高算法的寻优精度。细菌位置的更新方式为

$$\begin{aligned} \theta(i, j+1, k, l) = \\ \theta(i, j, k, l) + \frac{C(i)\Delta_M(i)}{\Delta_M^T(i)\Delta_M(i)} \end{aligned} \quad (7)$$

其中,  $C(i)$  为细菌  $i$  的游动步长,其值会根据实际情况进行适当的变化,计算公式为

$$C(i) = \frac{(D_{ib} + \beta)^2}{1 + \beta(D_{ib} + \nu)^2} = \frac{1}{\frac{1}{(D_{ib} + \beta)^2} + \nu} \quad (8)$$

$$D_{ib} = \sqrt{\sum_{m=1}^i (\theta_m^i - \theta_m^b)^2} \quad (9)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{C_{\min} C_{\max}}{C_{\max} - C_{\min}}} \quad (10)$$

$$\nu = \frac{1}{C_{\max}} \quad (11)$$

式(8)~(11)中  $D_{ib}$  为细菌  $i$  与最优位置细菌的位置距离; $\theta_m^i$ 、 $\theta_m^b$  分别为所对应细菌位置向量的第  $m$  维分量; $C_{\max}$ 、 $C_{\min}$  分别为细菌的最大和最小步长。

从细菌的步长计算公式可以看出,随着细菌当前位置与最优位置距离的缩小,游动步长也会变小,细菌与最优位置越接近,  $C(i)$  越趋于  $C_{\min}$ ;相反,与最优位置距离较远时,步长会相对增大,趋于  $C_{\max}$ 。

## 2.2 复制策略

1) 为了改善收敛速度,在更新细菌的适应度时,加入细菌彼此之间的影响因子,其计算公式根据细菌与其他细菌的位置关系确定,即

$$J_{cc}^{i,b} = -h_a e^{-w_a D_{i,b}^2} + h_r e^{-w_r D_{i,b}^2} \quad (12)$$

式中  $J_{cc}^{i,b}$  为当前细菌与其他细菌的影响因子; $h_a$ 、 $w_a$ 、 $h_r$ 、 $w_r$  分别为吸引剂数量、吸引剂释放速度、排斥剂数量和排斥剂释放速度,反映了细菌间的消息互通。

2) 在每次趋化周期之后,标准 BFO 将细菌历次适应度之和作为细菌活性(健康度),并以此为依据进行细菌的复制和淘汰,但是这样容易掩盖和丢失细菌的历史最优信息,使算法的收敛速度不够快。为了提高算法的快速性,这里直接将细菌历史最优适应度作为细菌的健康度,并按健康度对细菌进行排序,对细菌进行复制和淘汰操作,保持细菌总数不变。健康度的计算公式为

$$J_{\text{health}}^i = \min(J(i, 1 : N_c, k, l)) \quad (13)$$

## 2.3 迁移策略

经过若干步趋化、复制操作之后,细菌所在位置的食物部分被消耗,细菌可以选择继续在原地或者寻找新的食物源。细菌觅食算法设计了一个迁移率,对于每一个细菌,产生一个  $0 \sim 1$  的随机数,当该随机数小于预先设定好的迁移概率时,便将该细菌随机迁移到其他位置,否则,细菌以当前位置继续接下来的操作。

为了让种群不因迁移操作而失去较优解,可以在迁移位置代替原本位置前,将每个随机初始化的参数与原参数的目标函数值进行比较,只有性能较好的细菌才进行下一次迭代<sup>[12]</sup>。

## 2.4 算法流程

PSO-ABFO 算法流程如图 3 所示,主要是由迁移、复制、趋化操作三级嵌套而成。

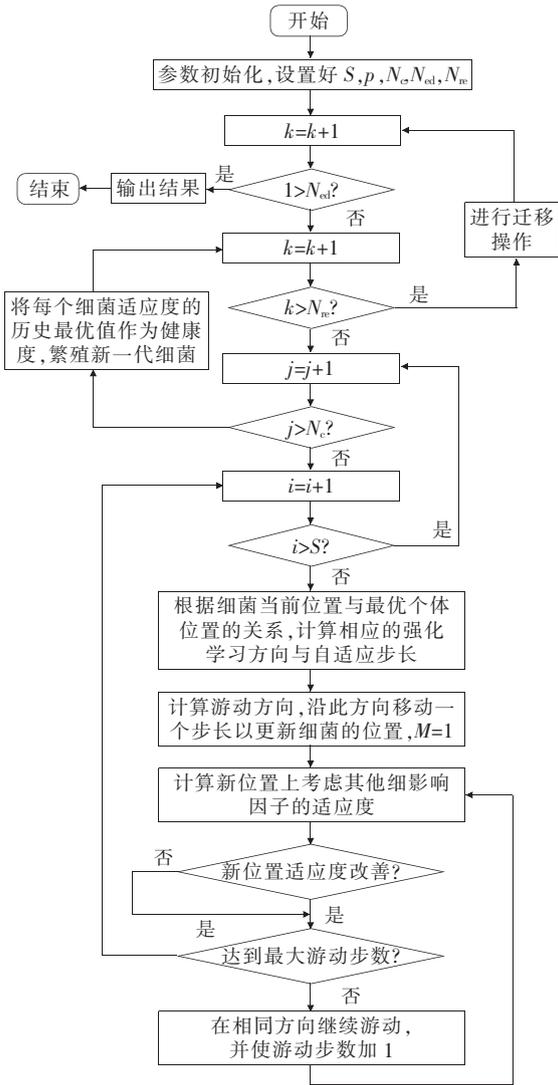


图 3 PSO-ABFO 算法流程

Figure 3 PSO-ABFO algorithm flow chart

算法的主要步骤如下。

1) 参数初始化。设定如  $S$ 、 $p$ 、 $N_c$ 、 $N_{ed}$ 、 $N_{re}$  等参数, 初始化细菌位置, 并计算适应度, 找出初始最优位置。

2) 当  $l = 1 : N_{ed}$  时, 执行步骤 3; 当  $k = 1 : N_{re}$  时, 执行步骤 4; 当  $j = 1 : N_c$  时, 执行步骤 5。

3) 计算种群的初始适应度。对于不同的细菌, 计算叠加影响因子的最终适应度:

$$J_{ca}(i, j, k, l) = J(i, j, k, l) + J_{cc}^{i,b}(i, j, k, l) \quad (14)$$

4) 分别按照相应公式计算细菌的趋化方向及游动步长。

5) 按照式(4)更新细菌位置, 并计算新位置下的适应度  $J_{ca}(i, j, k, l)$ 。

6) 判断新位置下适应度是否得到改善, 若是, 则沿相同的方向继续向前游动, 更新位置和适应度; 若适应度更差或者达到设置好的最大游动步数, 该细菌停止继续游动, 保留当前细菌的位置信息, 接着进入下一细菌的趋化。

7) 所有细菌趋化操作一轮结束, 判断最优位置细菌信息, 趋化循环结束。

8) 对于种群中每个细菌, 将趋化过程中适应度最优值作为该细菌的健康度, 以健康度进行排序, 将适应度较好的一半细菌复制, 适应度差的细菌淘汰。

9) 复制操作结束, 进入迁移操作。

10) 对于每个细菌, 在  $0 \sim 1$  之间产生一个随机数, 采用这个随机数与特定的概率(一般取 0.25)进行比较, 当随机数小于  $P_{ed}$  时, 将该细菌进行迁移操作, 否则, 该细菌保持自己的位置。

### 3 仿真实验验证

#### 3.1 仿真模型搭建

利用 Matlab/Simulink 进行系统的仿真分析, 其中 LFC 模型参数设定如表 1 所示。在该次系统仿真过程中, 将 0.05% 设为调速器的最大死区值, 10% 设为发电机变化率, 由 2 台机组组成的仿真模型如图 4 所示, 图中 Step 为系统干扰, 系统设定值为 0, 其他参数见图 4。

研究表明, BFO 参数设置一般规则<sup>[14]</sup>为  $N_s = 3 \sim 8$ ,  $P_{ed} = 0.05 \sim 0.3$ ,  $N_{ed} = (0.15 \sim 0.25) N_{re}$ ,  $d_a = 0.01 \sim 0.1$ ,  $\omega_a = 0.001 \sim 0.2$ ,  $h_r = d_a$ ,  $\omega_r = 2 \sim 10$ 。结合具体对象, 仿真过程中 PSO-ABFO 算法的主要参数设置如表 2 所示。

表 1 单区域电力系统参数

Table 1 Parameters and data of one area power system

$D/p.u.$	$2H/p.u.$	$R/p.u.$	$\tau_g/s$	$\tau_T/s$
0.015	0.1667	3.00	0.08	0.4

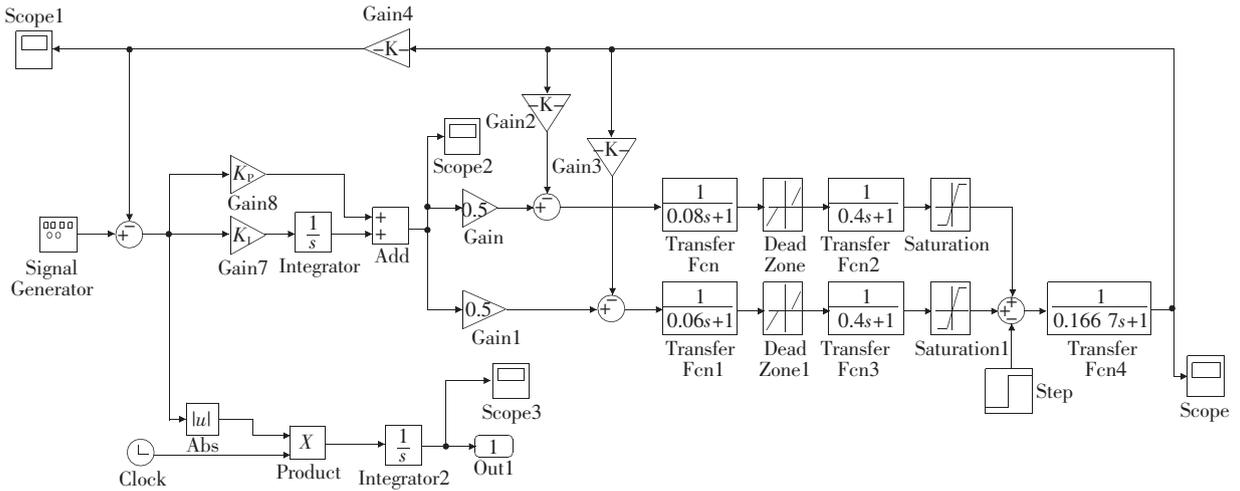


图 4 基于 PID 控制器的电力系统负荷频率控制系统仿真模型

Figure 4 Power system LFC simulation model based on PID controller

表 2 PSO-ABFO 算法参数设置

Table 2 PSO-ABFO algorithm parameter setting

S	$p$	$N_c$	$N_s$	$N_{re}$	$N_{ed}$	$C_{max}$
20	2	10	6	5	2	0.1
$C_{min}$	$P_{ed}$	$d_a$	$\omega_a$	$h_r$	$\omega_r$	$C_r$
0.000 1	0.25	0.1	0.05	0.01	5	2

### 3.2 仿真研究

为了验证所设计控制器和提出算法的有效性,将标准 BFO、PSO 算法的控制器参数优化过程作为对比,标准 BFO 算法的参数按照表 2 中给出的参数进行设置。在 MatlabR2014a 中分别采用 3 种算法对图 4 中的 PID 控制器参数进行优化<sup>[13,15-16]</sup>,当所受扰动为 0.1 p. u. 时,3 种算法寻优过程中最优 ITAE 值收敛曲线如图 5 所示,可以看出,在控制器参数寻优过程中,与标准 PSO 和标准 BFO 算法相比,PSO-ABFO 的收敛速度更快、寻优精度也更高,

能获得更小的优化目标值。PSO 算法寻优的最小适应度值为 0.008 9,标准 BFO 算法寻优的最小适应度值为 0.013 6,PSO-ABFO 算法得到的最小适应度值为 0.005 6。由此可见,PSO-ABFO 算法在 2 种算法的基础上,通过自适应调整步长和强化学习方向,提高了算法的搜索能力。

在 10% 的负荷扰动下,将不同优化算法得到的控制器参数应用到仿真系统中,得到系统的阶跃响应输出和控制器变化,如图 6 所示。

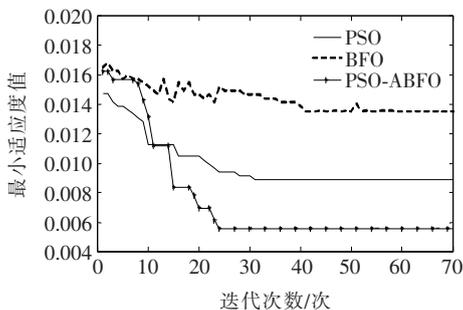
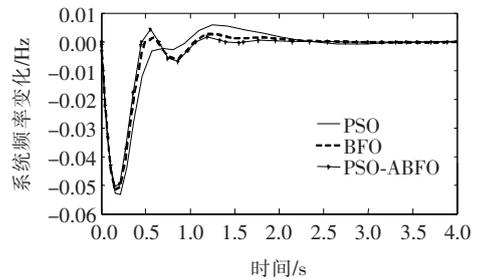
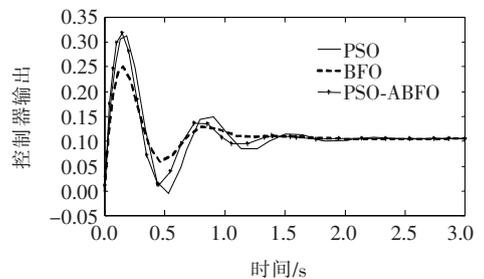


图 5 最小适应度曲线

Figure 5 Minimmun fitness curve



(a) 系统输出频率曲线



(b) 控制器变化曲线

图 6 单区域 LFC 系统阶跃响应

Figure 6 Step response of single area LFC system

由图 6(a)可以看出,与 PSO 和 BFO 算法得到的控制器参数仿真结果相比,该文所提方案使系统频率超调量较小,并且频率能够在 2.5 s 内回到给定值,使单区域 2 机组系统具有更好的动态性能;由图 6(b)也可以看出,在系统受到扰动时,该文所提改进算法得到的控制器具有较好的动态时域响应,能更快地做出反应并趋于稳定。

为了充分显示 PSO-ABFO 算法的有效性,给出 0.03 p. u. 小扰动下的系统阶跃响应输出,当控制器参数寻优时,在 3 种算法的优化结果中,PSO-ABFO 的适应度值仅有 0.002 0,仍是 3 种方法中的最小值,且算法收敛最快,改进算法在收敛速度和收敛精度上都得到了明显改善,其仿真结果如图 7 所示,提升了系统的抗扰能力,加快了频率的收敛速度。

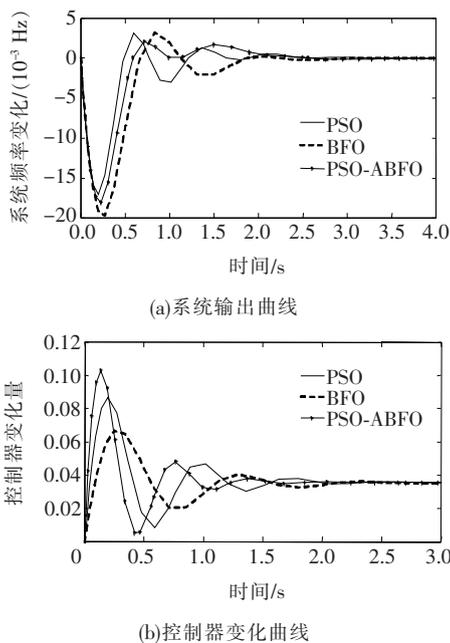


图 7 小扰动下 LFC 系统阶跃响应

Figure 7 Step response of LFC system under small disturbance

## 4 结语

设计性能优良的负荷频率控制系统控制器对保障电力系统安全稳定性具有重要意义。该文针对实际工程中单区域 LFC 系统中传统的 PID 控制器,提出了一种基于粒子群改进的自适应 BFO 算法的

PID 控制器参数优化整定方法。PSO-ABFO 算法在原有的随机翻转方向的基础上引入了最优位置细菌对当前细菌的方向性指导因子,使趋化过程具有更强的方向性;直接将细菌历史最优适应度当作细菌的健康度,避免了优势细菌被不慎淘汰;在迁移操作中,将随机初始化位置与当前位置进行比较,确定适应度不比当前细菌差时才接受迁移,在增加种群多样性的同时保留了细菌的优势信息。通过在 Matlab/Simulink 中仿真结果表明:PSO-ABFO 算法在寻找负荷控制系统控制器最优参数时,比一般标准 BFO 和 PSO 算法具有更好高的精确度和更快的寻优速度;用所提算法设计的控制器使系统的 ITAE 值更低、动态性能显著改善;该文所提 PID 控制器参数整定方法,对实际工程中的控制器参数优化具有一定的应用价值。

## 参考文献:

- [1] 张磊,罗毅,肖雅元,等. 大规模风电并网条件下 AGC 机组跨区分布式最优协调控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(9):42-49.  
ZHANG Lei, LUO Yi, XIAO Yayuan, et al. Trans-regional and distributed optimal coordination control of AGC units under large-scale wind power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(9): 42-49.
- [2] 舒凡娣,谢嘉晟,廖晓娇,等. 结合粒子群算法和穷举法的配电网故障诊断方法[J]. 智慧电力, 2019, 47(1):94-99.  
SHU Fandí, XIE Jiasheng, LIAO Xiaojiao, et al. Distribution network fault diagnosis method combining particle swarm optimization and exhaustive method[J]. Smart Power, 2019, 47(1):94-99.
- [3] 王博,马莉,王国东. 基于改进 PSO-GSA 算法的快速开关型电网故障限流器优化配置[J]. 高压电器, 2020, 56(6):189-196.  
WANG Bo, MA Li, WANG Guodong. Optimal configuration of fast switching grid fault current limiter based on improved PSO-GSA[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6):189-196.
- [4] 左剑,王子琪,李银红,等. 计及时滞的互联电网负荷频率控制最优分数阶 PID 控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(9):1151-1160.  
ZUO Jian, WANG Ziqi, LI Yinhong, et al. Optimal frac-

- tional-order PID controller design for interconnected power grid load frequency control considering time-delay [J]. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(9): 1151-1160.
- [5] Ibraheem A, Kumar P, Kothari D P. Recent philosophies of automatic generation control strategies in power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005, 20(1): 346-357.
- [6] Pandey S K, Mohanty S R, Kishor N. A literature survey on load - frequency control for conventional and distribution generation power systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 25(5): 318-334.
- [7] Chatterjee A N, Munshi S. An adaptive bacterial foraging algorithm for fuzzy entropy based image segmentation[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(12): 15489-15498.
- [8] 胡林静, 刘凯, 杨明文. 基于粒子群遗传算法的光伏MPPT控制研究[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(14): 23-27.  
HU Linjing, LIU Kai, YANG Mingwen, et al. Research on PV MPPT control based on particle swarm genetic algorithm[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(14): 23-27.
- [9] 宋娟, 李萍. 基于免疫果蝇优化算法的PID控制参数优化[J]. *控制工程*, 2017, 24(12): 2502-2507.  
SONG Juan, LI Ping. Optimization of PID control parameters based on immune fly optimization algorithm [J]. *Control Engineering of China*, 2017, 24(12): 2502-2507.
- [10] 吕磊, 章国宝, 黄永明. 基于蝙蝠算法的PID参数整定[J]. *控制工程*, 2017, 24(3): 548-553.  
LV Lei, ZHANG Guobao, HUANG Yongming. PID parameter tuning based on bat algorithm[J]. *Control Engineering of China*, 2017, 24(3): 548-553.
- [11] Passino K M. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2002, 22(3): 52-67.
- [12] Dasgupta S, Das S, Abraham A, et al. Adaptive computational chemotaxis in bacterial foraging optimization: an analysis[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2009, 13(4): 919-941.
- [13] 杨蕾, 李胜男, 黄伟, 等. 永磁同步发电机自适应分数阶PID控制设计[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(9): 49-58.  
YANG Lei, LI Shengnan, HUANG Wei, et al. Adaptive fractional-order PID control design of permanent magnetic synchronous generator[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(9): 49-58.
- [14] Das S, Dasgupta S, Biswas A, et al. On stability of the chemotactic dynamics in bacterial foraging optimization algorithm[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: systems and humans*, 2009, 39(3): 670-679.
- [15] 郝思鹏, 吴清, 李佳伟, 等. 基于人工蜂群算法优化RBF神经网络光伏组件故障诊断定位方法[J]. *供用电*, 2019, 36(10): 87-92.  
HAO Sipeng, WU Qing, LI Jiawei, et al. Optimizing RBF neural network fault diagnosis and location method for PV module based on ABC algorithm[J]. *Distribution & Utilization*, 2019, 36(10): 87-92.
- [16] 于国强, 崔晓波, 史毅越, 等. 基于改进群优化算法的深度调峰机组一次调频建模[J]. *中国电力*, 2020, 53(6): 147-152.  
YU Guoqiang, CUI Xiaobo, SHI Yiyue, et al. Primary frequency regulation modeling of deep peak regulation unit based on improved group optimization algorithm [J]. *Electric Power*, 2020, 53(6): 147-152.