

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005569

# 级联 PD-模糊 PID 控制器的自动发电控制方法\*

范璟

(西安文理学院 机械与材料工程学院 西安 710065)

**摘要:** 为了解决传统混合电源统一电力系统的自动发电控制问题,提出了一种级联 PD-模糊 PID 控制器。采用灰狼优化和基于教与学优化算法的混合优化(GWO-TLBO)技术对该级联 PD-模糊 PID 控制器的缩放参数进行优化。在优化过程中,在区域 1 加入 0.01 pu 的突发负载干扰,并以积分时间绝对误差作为评价函数。在分析系统的动态性能时,考虑了交流联络线和交流一直流联络线。在负载随机变化和标称参数变化情况下,进一步验证了级联 PD-模糊 PID 控制器的鲁棒性和灵敏度,利用时间响应指标对系统的动态特性进行分析。通过提出方法获得的最优参数与现有成果进行比较,得出使用级联 PD-模糊 PID 控制器的  $\Delta f_1$ 、 $\Delta f_2$  及  $\Delta P_{tie}$  沉降时间相比 PID 分别提高了 93.36%、84.46%、91.13%,相比模糊 PID 分别提高了 82.59%、56.15%、65.06%。仿真结果表明,级联 PD-模糊 PID 控制器优于其他控制器,解决了传统混合电源统一电力系统的自动发电控制问题,可为电力系统自动发电控制提供借鉴。

**关键词:** 模糊控制;自动发电控制;灰狼优化;级联 PD-模糊 PID 控制器

**中图分类号:** TP273;TM33 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6060

## Automatic generation control method based on cascade PD fuzzy PID controller

Fan Jing

(School of Mechanical and Material Engineering, Xi'an University, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of automatic generation control of traditional hybrid unified power system, a cascade PD-fuzzy PID controller was proposed. The scaling parameters of the cascade PD-fuzzy PID controller were optimized by using gray wolf optimization and hybrid optimization based on teaching and learning optimization algorithm (GWO-TLBO). In the optimization process, the burst load interference of 0.01 pu was added into region 1, and the absolute error of integral time was taken as the evaluation function. In the analysis of the dynamic performance of the system, the AC link and AC-DC link are considered. The robustness and sensitivity of the cascade PD-fuzzy PID controller are further verified in the case of random load variation and nominal parameter variation. The dynamic characteristics of the system are analyzed by using the time response index. By comparing the optimal parameters obtained by the proposed method with the existing results, it is concluded that the settling time of  $\Delta f_1$ ,  $\Delta f_2$  and  $\Delta P_{tie}$  using the cascade PD-fuzzy PID controller is increased by 93.36%, 84.46% and 91.13% respectively compared with PID, and by 82.59%, 56.15% and 65.06% respectively compared with the fuzzy PID. The simulation results show that the cascade PD-fuzzy PID controller is superior to other controllers, and solves the problem of automatic generation control of traditional hybrid power system, which can provide reference for automatic generation control of power system.

**Keywords:** fuzzy control; automatic generation control; gray wolf optimization; cascade PD-fuzzy PID controller

## 0 引言

由于电力系统规模的逐步扩大,因此将联络线电力的频率和交换保持在建议的限制范围内成为必然。对于工程

师来说,保持电力系统的一致性和安全性是一个严峻挑战<sup>[1-2]</sup>。目前,世界范围内的电力系统已经实现了互联,即各个电力系统的小单元之间通过联络线连接起来,形成一个统一的区域<sup>[3]</sup>。为了保持电力系统的稳定,必须将系统

收稿日期:2020-12-19

\* 基金项目:西安文理学院课题(HL2020-65)项目资助

约束的偏差保持在规定的范围内。各个区域的自动发电控制(automatic generation control, AGC)主要通过检测频率和联络线功率来发挥作用。它根据需求平衡净发电量,通过调节 AGC 的驱动信号区域控制误差,可以消除系统误差<sup>[4]</sup>。AGC 通过控制负载的随机变化来满足指定区域的需求,以将频率和区域间功率流调节到规定值附近。

过去几年中,研究人员已经对 AGC 的各种控制策略进行了全面而广泛的研究,以使系统在正常及非正常运行情况下的偏差维持在规定的范围内。文献[5]定义了基于归一化遗传算法的 PID 控制器自适应整定,用于两区域电力系统的自动发电控制。文献[6]利用引力搜索算法对模糊 PID 控制器在统一的二区电力系统负载频率控制中进行整定。文献[7]提出了一种新颖的控制器,称为模糊增益调度控制器,用于两区域非再热系统的 AGC。文献[8]描绘了一种基于 GWO 技术的改进级联 PI-PD 控制器,用于插电式电动汽车的电力系统 AGC。文献[9]为静态同步补偿器

(STATCOM)应用了新型智能阻尼控制器,以减少混合电力系统中的功率波动。

从上述文献分析中可以明显看出,大量的研究工作都是使用单一的控制回路进行的,本文研究重点关注两个控制回路的开发。设计级联 PD-模糊 PID 控制器,并在传统混合电源系统中实现频率调节。应用混合 GWO-TLBO 算法来获得交、直流混合电源系统控制器参数的最优值。评估系统的动态性能,并将其与预先发布的结果进行比较,以确定推荐控制器的优越性。通过随机改变系统的负载以及系统参数来证明系统的鲁棒性和灵敏性。

### 1 混合电源电力系统模型

本文分析了 3 种类型的发电源在两区统一电力系统的每个区域实现。发电源包括燃气机组、带再热汽轮机的热机组和水力发电机组。图 1 所示为线性化模型。研究了仅在区施 1 加 1%(0.01 pu)的突发负载干扰时系统的动态性能。

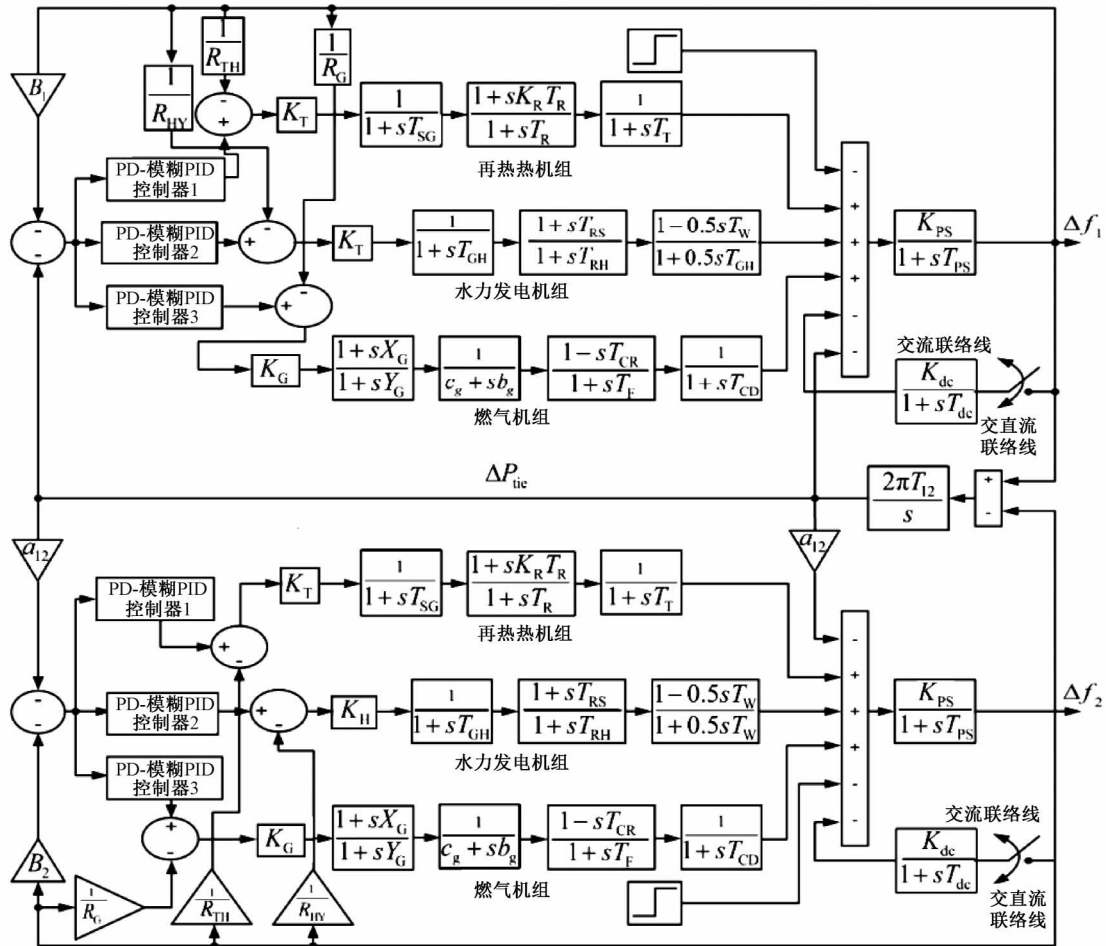


图 1 由传递函数表示的混合电源电力系统模型

首先研究了无高压直流输电线路和有高压直流输电线路两种情况下的系统性能。然后考虑了统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)对系统性能的影响。每个区域都有一个独特的级联 PD-模糊 PID 控制器,

以保持频率和联络线路功率的变化。在调节系统偏差的同时,区域控制误差(area control error, ACE)也被最小化,每个区域的 ACE 可表示为:

$$ACE_1 = \Delta P_{tie1-2} + B_1 \Delta f_1 \tag{1}$$

$$ACE_2 = \Delta P_{tie2-1} + B_2 \Delta f_2 \quad (2)$$

式中:  $\Delta P_{tie}$  是两个区域的线间功率变化;  $B_1$  和  $B_2$  是各自区域的频率偏差系数;  $\Delta f_1$  和  $\Delta f_2$  是各自区域的频率变化。

## 2 优化算法

### 2.1 灰狼优化算法

灰狼优化(grey wolf optimization, GWO)算法的灵感来自灰狼的社交行为。灰狼属于食物循环的最高层,被称为顶级掠食者。灰狼主要喜欢群居生存,平均每群成员的数量为 5~12 只。每个这样的狼群都有一个社会统治等级制度<sup>[10]</sup>。每一狼群中各有一雄一雌为首领,称为 Alpha( $\alpha$ )。Alpha 主要负责在小组中做出重要决策。狼群中的下一个层次是 Beta( $\beta$ ),最后一层是 Omegas( $\Omega$ )。除此之外,狼群中还有一些狼不属于以上三层,称之为 Delta( $\delta$ )。

狼的特性可以用数学方法来表达,则:

$$\vec{D} = |\vec{C}\vec{X}_p(t) - \vec{X}| \quad (3)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (4)$$

式中:  $t$  表示当前迭代;系数向量用  $\vec{A}$  和  $\vec{C}$  表示;  $\vec{A} = 2\vec{ar}_1 - \vec{a}$ ,  $\vec{C} = 2\vec{r}_2$ ,  $\vec{X}$  是当前狼的位置。灰狼以其独特的捕食能力而闻名。Alpha 主要指导狩猎行为,其他狼对猎物的位置会根据 Alpha、Beta、Delta 的位置进行更新。Alpha、Beta、Delta 的狩猎特性及其位置更新的数学表达式为:

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \vec{X}_\alpha(t) - \vec{X}| \quad (5)$$

$$\vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \vec{X}_\beta(t) - \vec{X}| \quad (6)$$

$$\vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \vec{X}_\delta(t) - \vec{X}| \quad (7)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \vec{D}_\alpha \quad (8)$$

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \vec{D}_\beta \quad (9)$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \vec{D}_\delta \quad (10)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1(t) + \vec{X}_2(t) + \vec{X}_3(t)}{3} \quad (11)$$

GWO 算法的步骤如下:

1)初始化:根据变量的上限和下限,将狼的种群随机初始化为  $x_i(i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 。参数  $\alpha$ 、 $A$  和  $C$  也被初始化。

2)目标函数:适当选择目标函数  $f(x)$ , 计算出每只狼对应的目标值或适应度值。

3)最佳搜索代理的选择:对前 3 只狼进行适当的选择,保存为  $X_\alpha$ 、 $X_\beta$ 、 $X_\delta$ 。

4)迭代:选择停止标准( $t <$  最大迭代次数)。

5)根据式(11)更新每个搜索代理的位置。

6)更新  $X_\alpha$ 、 $X_\beta$ 、 $X_\delta$ 。

7)更新参数  $\alpha$ 、 $A$  和  $C$ 。

8)将  $X_\alpha$  的值作为最佳值返回。

9)继续上述过程,直到达到停止标准。

### 2.2 基于教与学的优化算法

基于教与学的优化(teaching and learning based optimization, TLBO)技术是近年来根据教室内部的教学过程开发的<sup>[11-12]</sup>。算法主要通过教学阶段和学习阶段两个层次来实现。社会上受过良好教育的人群被确定为教师。通过从老师那里获得知识,学习者试图提高自己的才能。在此优化过程中,老师将为学生提供最佳解决方案。

TLBO 算法的操作分为以下几个阶段:

1)初始化:在此阶段完成参数的初始化,例如随机种群、种群大小、学生数量(解决方案)、终止过程所需的迭代次数、其他设计变量以及其各自范围。

2)正确确定目标函数:每个成员都获得固定的适应度值,表示学生获得的等级或分数。

3)教师阶段:根据适应度函数的最佳值完成现有解决方案的更新。解决方案更新通过以下公式完成。

$$X_{new,i} = X_i + difference\_mean \quad (12)$$

其中,  $difference\_mean$  的值定义为:

$$difference\_mean = rand(0,1) | X_{best} - T_F M_d | \quad (13)$$

教学因子  $T_F$  计算为:

$$T_F = round[1 + rand(0,1)\{2 - 1\}] \quad (14)$$

如果  $f(X_{new,i}) < f(X_i)$ , 则  $X_i = X_{new,i}$ 。

4)学习者阶段:执行以下过程来更新解决方案,由此获得的适应度函数值有助于更新现有解决方案。过程如下:

随机选择两个学习者  $X^i$  和  $X^j$ , 使  $j \neq i$ 。

如果  $f(X^i) < f(X^j)$ , 则:

$$X_{new}^i = X^i + rand(0,1)(X^i - X^j) \quad (15)$$

否则:

$$X_{new}^i = X^i + rand(0,1)(X^j - X^i) \quad (16)$$

此时,如果  $f(X_{new}^i) < f(X^i)$ , 则  $X^i = X_{new}^i$ 。

5)检查停止条件:如果满足,则返回最佳结果,否则返回继续迭代。

### 2.3 混合 GWO-TLBO 算法

从 GWO 算法的解释可以看出,GWO 中搜索代理的更新受 Alpha、Beta 和 Delta 狼的位置控制。因此,包围、搜寻和攻击是 GWO 算法中最基本、最简单的算子,用于求解最优解。但是,对于这些算子,GWO 算法陷入了局部最优解。因此,GWO 算法的一个主要缺点是搜索量少,可以通过加入更多的算子来改善<sup>[13]</sup>。另一方面,TLBO 是一种基于种群的优化方法,它能够通过教师和学习者阶段生成全局最优解。因此,TLBO 提供了更多的勘探和开发能力。为了从 GWO 和 TLBO 算法中选取最佳算法,本文使用混合 GWO-TLBO 算法。下面列出了开发上述混合算法的基本步骤。

1)根据搜索空间的限制初始化随机种群  $X_1$ 。

2)应用 GWO 算子,得到更新种群  $X_2$ 。

3)以 GWO 的最终种群  $X_2$  作为 TLBO 的初始种群。

4)应用 TLBO 操作符,得到更新种群  $X_3$ 。种群  $X_3$  优于之前的种群  $X_2$ 。

5)检查停止条件。如果满足,则返回最后一步的最佳结果,否则转到下一个迭代步骤 2)。

### 3 控制方法

本文采用 PD-模糊 PID 级联控制器。在每个区域中,针对 3 个不同的源实现了 3 个这样的控制器。图 2 为所提出控制器的配置。为了优化标度参数,采用了 GWO-TLBO 混合优化技术,使频率偏差和联络线功率偏差最小化。引入级联控制器的主要目的是在很短的时间范围内

减轻干扰,并防止其穿越到系统的其他部分。每个级联控制器由两个回路组成:

1)外环:也称为主回路,它包含比例微分控制器。该控制器的输入为区域控制误差,用  $r(t)$  表示。

2)内环:也称为辅助回路或从回路,它包含模糊 PID 控制器。外部 PD 控制器将其输出反馈给内部模糊 PID 控制器,对于这种内部模糊 PID 控制器,输出频率的变化 ( $\Delta f_i$ ) 为反馈信号。内环的主要目的是限制增益变化对系统性能的影响。增益变化通常可能是由工作点的偏移而引起的,这可以通过设定点变化或持续干扰来解决。

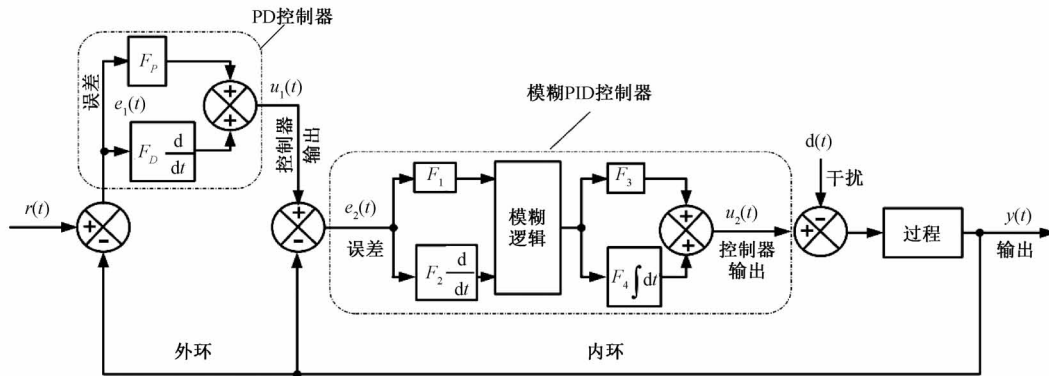


图 2 级联 PD-模糊 PID 控制器结构

级联控制器比普通控制器具有更大的优势,它可以提高响应速度,并通过在系统内进行校正来最大程度地减少系统干扰。在此工作中,控制方案被设计为一个内部模糊 PID 回路和一个外部 PD 控制回路。模糊 PID 控制器的重要部分是模糊逻辑。模糊规则与隶属函数的分布是模糊逻辑控制器的主要障碍。模糊逻辑控制器的精度主要取决于专家提供的模糊规则的选择。本文借助 Mamdani 模糊系统来产生控制输出。推理系统的输出是模糊的,因此需要通过各种解模糊处理将其转换为实值数据。

在这里使用重心(center of gravity, COG)方法获得去模糊化输出。为了简化和有效计算,在推理系统中使用三角隶属函数来输入和输出模糊变量。

### 4 结果分析

为了验证基于级联 PD-模糊 PID 控制器的自动发电控制方法的性能,以及说明控制器在互联系统中的必要性,本文在不使用任何控制器的情况下对系统进行了初始 MATLAB 算法仿真。采用 GWO-TLBO 混合算法设计了最优 PD-模糊 PID 控制器。多源系统在 MATLAB/Simulink 环境中建模,在 MATLAB 脚本文件中编写 GWO-TLBO 混合算法,对系统参数进行优化。种群的大小和最大迭代次数在优化过程中均取为 100。

#### 4.1 MATLAB 算法仿真

积分时间绝对误差 (integral time absolute error,

ITAE) 被视为一个时间相关的目标函数。该 ITAE 目标函数表示为:

$$ITAE = \int_0^t (|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + |\Delta P_{tie}|) t dt \quad (17)$$

利用 MATLAB 对该算法进行仿真,PD-模糊 PID 控制器的增益已针对有交直流链路和无交直流链路的两种不同情况进行了优化。通过将系统的动态响应与 DE 优化 PID 控制器<sup>[14]</sup>和 LUS-TLBO 优化模糊 PID 控制器<sup>[15-16]</sup>等预先发布的结果进行比较,可以确定系统的优势。TLBO 方法、GWO 方法和混合 GWO-TLBO 方法的收敛特性如图 3 所示。

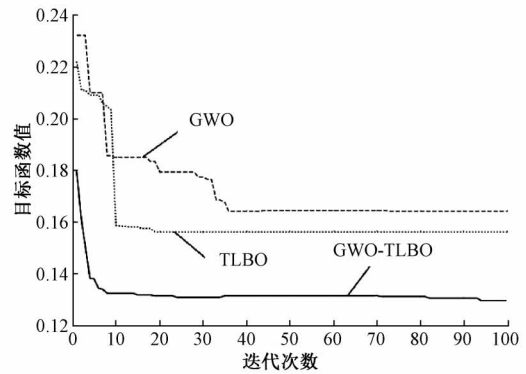


图 3 不同优化技术的收敛特性

为了说明控制器在互联系统中的必要性,在不使用任何控制器的情况下对系统进行初始仿真,并观察到各区域

的频率偏差,如图 4 所示。从图 4 可以清楚地看出,系统的频率变化永远不会达到稳态值(“0”级),这对于系统来说是非常危险的。因此,为了克服这些与不稳定性有关的问题、提高系统的性能,并将偏差定为“0”级(恒定值),需要考虑使用控制器。

#### 4.2 无高压直流输电系统的性能评估

在第 1 种情况下,在两个区域之间放置交流联络线,以检查区域 1 中突发负载干扰为 0.01 pu 时混合源系统的动态特性。在这种情况下,采用 GWO-TLBO 混合算法优化 PD-模糊 PID 控制器的增益,利用最佳控制器增益绘制系统的频率和线间功率变化曲线。图 5(a)和(b)分别说明了第 1 个区域( $\Delta f_1$ )和第 2 个区域( $\Delta f_2$ )的频率变化。

图 5(c)显示了两个区域间的线间功率变化( $\Delta P_{tie}$ )。

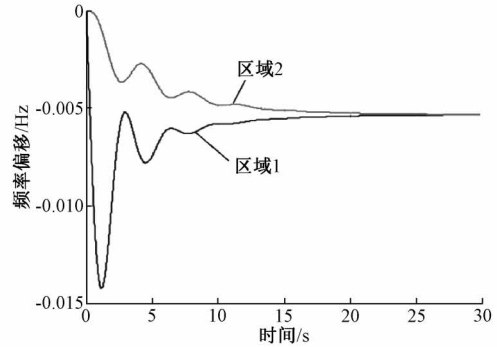


图 4 无任何控制器情况下区域 1 和区域 2 中频率偏差

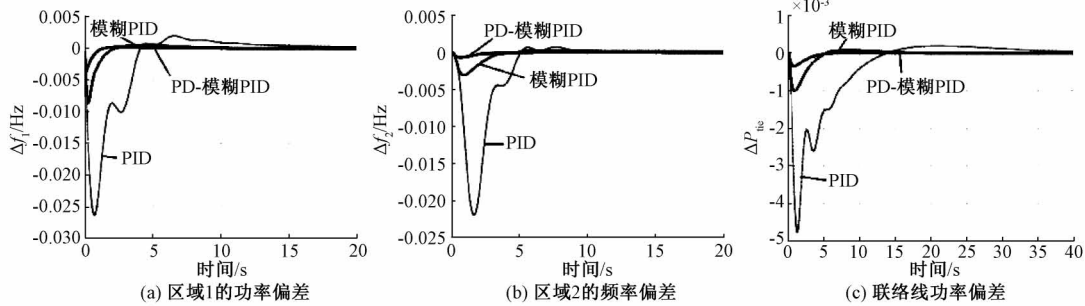


图 5 交流线路中 1% 突发负载干扰引起的偏差

将频率和线间功率变化曲线与之前发表的结果进行比较,以证明推荐方法的优越性。表 1 所示为最小下冲时间、沉降时间(0.05%频带)和峰值超调时间。表 2 所示为系统动态响应特性的改进。表 2 可清楚地表明,使用级联 PD-模糊 PID 控制器的  $\Delta f_1$ 、 $\Delta f_2$  及  $\Delta P_{tie}$  沉降时间相比 DE

优化 PID 控制器<sup>[14]</sup> 分别提高了 93.36%、84.46%、91.13%,相比 LUS-TLBO 优化模糊 PID 控制器<sup>[15]</sup> 分别提高了 82.59%、56.15%、65.06%。此外,在沉降时间、峰值超调时间以及最小下冲时间方面均有明显的提升,因此所建议的方法具有更好的效果。

表 1 最小下冲时间、沉降时间(0.05%频带)和峰值超调时间

控制器	$\Delta f_1$			$\Delta f_2$			$\Delta P_{tie}$		
	沉降时间/s	峰值超调/ms	最小下冲/ms	沉降时间/s	峰值超调/ms	最小下冲/ms	沉降时间/s	峰值超调/ms	最小下冲/ms
PD-模糊 PID	0.915 5	0.200 7	-3.600 0	1.297 8	0.010 5	-0.700 0	0.824 5	0.007 0	-0.300 0
PID	13.804 8	2.000 0	-26.400 0	8.356 0	0.737 9	-22.000 0	9.303 2	0.193 8	-4.800 0
模糊 PID	5.260 0	0.551 0	-8.957 9	2.960 0	0.211 9	-3.011 9	2.360 0	0.082 6	-0.965 3

表 2 仅使用交流联络线时,系统动态响应特性的改进

控制器	$\Delta f_1$			$\Delta f_2$			$\Delta P_{tie}$			%
	沉降时间	峰值超调	最小下冲	沉降时间	峰值超调	最小下冲	沉降时间	峰值超调	最小下冲	
PD-模糊 PID 相比 PID	93.36	89.96	86.36	84.46	97.57	96.81	91.13	96.38	93.75	
PD-模糊 PID 相比模糊 PID	82.59	63.57	59.81	56.15	95.04	76.75	65.06	91.52	68.92	

## 5 结 论

本文采用了混合 GWO-TLBO 技术,以获取新型 PD-模糊 PID 级联控制器的最佳因子,该控制器可用于传统混合电源统一电力系统的自动发电控制。混合 GWO-TLBO

算法充分利用了 GWO 和 TLBO 技术的优势,以获取最小适应度值。将改进的 GWO-TLBO 混合技术应用于无高压直流电系统和有高压直流电系统中 PD-模糊 PID 级联控制器的整定。通过考虑先前发布的结果(如 DE 优化 PID 控制器和 LUS-TLBO 优化模糊-PID 控制器)来检查系统

响应,参照诸如沉降时间、峰值超调时间和下冲时间的响应指标,确定了该方法的优越性,证明了级联 PD-模糊 PID 控制器优于其他控制器,可为电力系统自动发电控制提供借鉴。本文仅在无高压直流输电系统中评估了控制器的性能,下一步的工作是改变频带宽度,在具有高压直流(HVDC)链路和统一潮流控制器(UPFC)的多源系统上验证所提方法的适用性。

### 参考文献

- [1] 谢俊,陈凯旋,岳东,等.基于多智能体系统一致性算法的电力系统分布式经济调度策略[J].电力自动化设备,2016,36(2):112-117.
- [2] 蔡永智,陈皓勇,郭曼兰.采用有限时间平均一致性协议的电力系统分布式状态估计[J].控制理论与应用,2016,33(8):1007-1014.
- [3] 孙乔.考虑 ACE 约束的区域间联络线功率控制策略研究[D].大连:大连理工大学,2016.
- [4] 蓝海波,刘海涛,李亦龙,等.考虑大规模间歇式能源接入的电网调频方式仿真研究[J].水电能源科学,2014(12):203-206.
- [5] 刘文瑞,赵磊,颜子荔.基于归一化遗传算法的 PID 控制器自适应整定[J].科学技术创新,2019(19):61-62.
- [6] 谭守国.基于改进引力搜索算法的配电网多目标优化重构[J].四川电力技术,2014(6):87-90.
- [7] ARYA Y, KUMAR N. Optimal AGC with redox flow batteries in multi-area restructured power systems[J]. Engineering Science & Technology an International Journal, 2016, 19(3):1145-1159.
- [8] PADHY S, PANDA S, MAHAPATRA S. A modified GWO technique based cascade PI-PD controller for AGC of power systems in presence of plug in electric vehicles[J]. Engineering Science and Technology an International Journal, 2017, 20(2):427-442.
- [9] 卓华.基于静止同步补偿器的次同步振荡阻尼控制策略的研究[J].中国煤炭,2014(z1):285-291,300.
- [10] 牛成玉,傅仲文.基于灰狼优化算法的微电网并网控制器参数优化设计[J].低压电器,2017(20):51-55,62.
- [11] 何学明,苗燕楠,罗再磊.基于教与学优化算法的 PID 控制器参数寻优[J].计算机工程,2015,41(8):313-316.
- [12] 仇梦林,胡志坚,王小飞,等.水火电力系统短期实用化调度模型及求解方法[J].电力自动化设备,2016,36(12):115-122.
- [13] 金星,邵珠超,王盛慧.一种基于差分进化和灰狼算法的混合优化算法[J].科学技术与工程,2017,17(16):266-269.
- [14] 汤伟,白志雄,高祥.基于自适应变异 DE 算法的 PID 参数整定优化[J].组合机床与自动化加工技术,2018(3):124-127.
- [15] PRADHAN P C, SAHU R K, PANDA S. Firefly algorithm optimized fuzzy PID controller for AGC of multi-area multi-source power systems with UPFC and SMES[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2016, 19(1):338-354.
- [16] 于振中,周枫.粒子群优化模糊 PID 的电动负载模拟器研究[J].电子测量技术,2019,42(10):16-21.

### 作者简介

范璟,硕士,讲师,主要从事控制系统及其自动化教学与研究工作。

E-mail:fanxiaodiu912@163.com