

基于灰狼优化算法的 PID 控制器 在双区域多源电力系统中的应用研究

冯严冰¹
FENG Yanbing

摘要

为解决双区域多源电力系统电力供需平衡和频率稳定等问题,改善系统动态响应性能,文章提出一种基于灰狼优化算法(GWO)的比例积分微分(PID)控制器参数优化方法,应用于双区域多源电力系统的负荷频率控制(LFC)。通过时间加权绝对误差积分(ITAE)作为目标函数,在阶跃负荷扰动下对比GWO、粒子群优化(PSO)及人工蜂群算法(ABC)的动态响应性能。仿真结果表明,相较于ABC和PSO,GWO优化后的PID控制器使ITAE值降低11.40%和18.21%,并显著缩短系统稳定时间(区域1频率偏差稳定时间分别提升18.65%和24.35%)。

关键词

灰狼优化算法;PID控制;负荷频率控制;ITAE;多源电力系统

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.05.014

0 引言

双区域多源电力系统是指两区域互联电力系统,单区有多种能源类型,经调控后达到电力供需平衡和频率稳定。各区独立运行,含水电、风电场等多类型电源,用联络线互联调配构成稳定系统,提升供电可靠性。系统需运用技术优化,构建精准的稳定控制体系,通过优化资源多级协同,由水轮发电机等旋转惯性机组提供基本频率协同,由调速机构减小频率下降速度,降低频率偏差幅度,优化降速比和负荷裕度,协调机组间功率分配。系统需要根据跨区域频率和联络线功率等,调整各自发电功率,以达到平衡各区功率的目的,此过程中的精准信息传输非常重要。为解决长期功率失衡问题,需要综合考虑旋转备用及需求端等因素,通过调度和储能等手段,优化资源配置达到均衡目标。

现代互联电力系统的稳定性依赖于负荷频率控制(LFC)对区域频率偏差和联络线功率振荡的抑制,它是维持系统频率稳定和区域间功率平衡的关键技术,其核心目标是通过调节发电机组的有功出力,补偿负荷波动引起的频率偏差,并控制联络线交换功率符合计划值。传统调速器难以快速补偿负荷突变,导致频率振荡持续时间较长,很多非线性因素,如调速器死区(GDB)和发电速率约束(GRC)会加剧系统动态特性复杂化,柔性交流输电系统(如UPFC、SVC)可快速调节有功/无功功率,有效抑制功率波动和频率振荡,还需要科学的算法优化控制器参数。

文献中提出了多种负荷频率控制方法,文献[1-2]提出了基于模糊逻辑的方法,这类方法复杂度高、需要海量数据训练。近年来,研究采用了遗传算法^[3]、人工蜂群算法^[4]、引力搜索^[5]和萤火虫算法^[6]等优化算法。传统模糊逻辑方法存在训练复杂度高的问题,而遗传算法、引力搜索算法等优化方法对控制器参数的适应性有限。比如遗传算法(GA)通过模拟自然选择和遗传机制,优化控制器参数(如PID的 K_p 、 K_i 、 K_d),以提升系统动态响应和稳定性,其优势在于全局搜索能力强,适用于非线性、多峰优化问题,但其参数设置敏感(如种群规模、变异率),可能需较长收敛时间。灰狼优化算法(GWO)是近年来出现的一种基于灰狼群体捕食行为的智能优化算法,其核心优势在于结构简单、参数少、收敛速度快,且能平衡局部寻优与全局搜索能力,适用于非线性、高维优化问题。

电力系统的稳定不仅取决于优化算法,还和控制器的结构有关。如文献[7]所述,由于PID控制器设计简单、便于实现、响应快、稳态误差低等优点,所以它仍是控制器的首选。

PID控制器通过协调不同区域的电源(如火电、水电、风电等)和联络线功率,实现频率稳定和功率平衡。其核心功能包括:比例(P)控制:快速响应偏差,但可能引入稳态误差;积分(I)控制:消除稳态误差,但可能降低响应速度;微分(D)控制:预测误差变化趋势,抑制超调和振荡。

想要稳定电力系统,必须设定合适的目标函数。文献中常用的控制系统性能指标包括:时间乘绝对误差积分(ITAE)、时间加权平方误差积分(ITSE)、绝对误差积分

1. 江苏城市职业学院 江苏常州 232001

(IAE)、平方误差积分 (ISE) 等。文献 [7-8] 指出 ITAE 最适合作为控制系统性能评估中负荷频率控制的目标函数，它通过时间与绝对误差的乘积形式，综合优化系统的响应速度与稳态精度，在特性上，ITAE 准则对系统后期误差更为敏感，能有效抑制瞬态响应阶段的超调量，其参数选择性优于平方误差积分 (ISE) 和绝对误差积分 (IAE) 准则。与时间乘平方误差积分 (ITSE) 准则相比，两者均关注动态偏差与响应时间的综合优化，但 ITAE 对大幅值误差的惩罚力度更小。

为了实现稳定的频率控制，本文采用灰狼优化算法 (GWO) 对双区域电力系统的 PID 增益参数进行优化，以 ITAE 为目标函数，得出 ITAE 值与各区域频率变化及联络线功率波动等电力系统的动态响应，并将结果与粒子群优化算法 (PSO) 和人工蜂群算法 (ABC) 算法进行对比，验证 GWO 在提升系统动态响应中的有效性。

1 系统建模

如图 1 所示，本文所研究的系统由火电和水电两个相互连接的区域组成。 B_1 和 B_2 分别是水电和火电两个区域的频率偏差； R_1 和 R_2 是调速器转速的调节参数； u_1, u_2, u_3, u_4 是控制器输出； ACE_1 和 ACE_2 是控制误差； T_g 是调速器时间常数； T_t 是汽轮机时间常数； T_w 是水力时间常数； ΔP_D 是电力需求扰动； T_{12} 是同步系数； K_{ps} 是电力系统增益； T_{ps} 是电力系统时间常数； ΔF_1 和 ΔF_2 是输入负载扰动时的系统频率偏差； ΔP_{tie} 是联络线功率变化量。

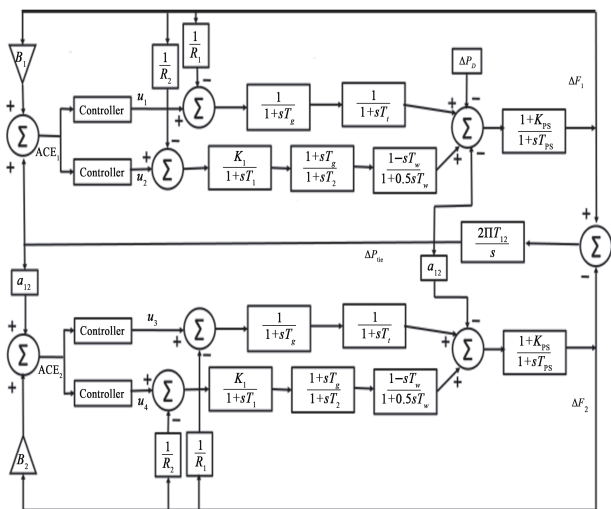


图 1 双区域水电—火电系统模型

研究基于水电-火电双区域互联系统，系统参数包括：频率 60 Hz、总功率 2 000 MW。区域控制误差 (ACE) 作为控制器输入，其表达式为：

$$\begin{cases} e_1(t) = ACE_1 = B_1 \Delta F_1 + \Delta P_{tie} \\ e_2(t) = ACE_2 = B_2 \Delta F_2 - \Delta P_{tie} \end{cases} \quad (1)$$

电力系统的输入由控制器的输出 u_1, u_2, u_3, u_4 提供，其中

PID 控制器的输入参数：

$$\begin{cases} u_1 = K_{p1} ACE_1 + K_{i1} + \int (ACE_1 + K_{D1}) \frac{dACE_1}{dt} \\ \dots \\ u_4 = K_{p4} ACE_4 + K_{i4} + \int (ACE_4 + K_{D4}) \frac{dACE_4}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

通过在一定范围内优化 K_p, K_i 和 K_D 取值，使目标函数 ITAE (J) 的值最小，目标函数 ITAE 定义为：

$$J = ITAE = \int_0^{t_{min}} (|\Delta F_1| + |\Delta F_2| + |\Delta P_{tie}|) dt \quad (3)$$

式中： ΔF_1 和 ΔF_2 是输入负载扰动时的系统频率偏差； ΔP_{tie} 是联络线功率的变化量。 ΔF_1 和 ΔF_2 需在最短时间内稳定，且超调量和欠调量最小。

2 灰狼优化算法

灰狼算法是一种现代提出的群体启发式算法，是一种通过模仿灰狼群体狩猎行为而建模的数学算法。该模型中将狼群分为四个等级： α 狼、 β 狼、 γ 狼和 ω 狼。其中， α 狼等级最高，类似头狼，负责群体决策； β 狼次之，类似成年次级狼，是狼群的生力军； γ 狼再次之，类似外围狼，起辅助作用，其职责可细化为侦察狼、哨兵狼和狐狸狼等； ω 狼在狼群中地位最低，在最边缘跟随。

GWO 算法模拟灰狼群体狩猎过程， α 狼在狼群顶端占据主导地位，算法中代表着最优的解决方案。 β 狼与 γ 狼辅助全局探索，在行动中动态搜寻替代性方案，是算法的次优解； ω 狼执行跟随策略，渐次包围猎物。

设置搜索域半径向量的初始值，即 $r^e = [r_1^e, r_2^e, \dots, r_p^e]^T$ 和 $r^s = [r_1^s, r_2^s, \dots, r_p^s]^T$ ， $j = 1, 2, \dots, p$ 。 p 是拟度函数的维数。设置迭代计数器的当前值 $\omega = 1$ 。通过公式生成一组解向量 $x^i = [x_1^i, x_2^i, \dots, x_p^i]^T$ ，其中 $i = 1, 2, \dots, H$ 。

$$x_j^i = \zeta (x_j^+ - x_j^-) + x_j^-, j = 1, 2, \dots, p \quad (4)$$

式中： x_j^+ 和 x_j^- 是搜索域的上界和下界； ζ 是一个随机数， $\zeta \in [0, 1]$ 。

计算每个初始向量的适应度函数 $F(x^i)$ 的值。设置迭代计数器的当前值 $\omega = 0$ ，最大迭代次数 $W = 0$ ，并开始搜索迭代。在当前可能的解中选择三个最佳解 x^a, x^b, x^c ：

$$F(x^a) = \min_i \{F(x^i) : i = 1, 2, \dots, H\} \quad (5)$$

$$F(x^b) = \min_i \{F(x^i) : \forall i \in \{1, 2, \dots, H\} \setminus \{a\}\} \quad (6)$$

$$F(x^c) = \min_i \{F(x^i) : \forall i \in \{1, 2, \dots, H\} \setminus \{a, b\}\} \quad (7)$$

计算线性参数 a 的值：

$$a = 2 - \frac{2\omega}{W} \quad (8)$$

对于当前可能解集中的每个解向量 x^i ，计算 α 、 β 和 γ 分量，然后修正解向量 x^i ， $i = 1, 2, \dots, H$ 。计算 α 分量的值：

$$\alpha_j = x_j^a - d_j^a |g_j^a x_j^a - x_j^i|, j = 1, 2, \dots, p \quad (9)$$

式中： $d_j^a = 2a\zeta - a$ ， $g_j^a = 2\zeta$ ； ζ 是一个随机数， $\zeta \in [0, 1]$ 。

计算 β 分量的值:

$$\beta_j = \mathbf{x}_j^\beta - d_j^\beta \left[g_j^\beta \mathbf{x}_j^\beta - \mathbf{x}_j^i \right], j = 1, 2, \dots, p \quad (10)$$

式中: $d_j^\beta = 2a\zeta - a$, $g_j^\beta = 2\zeta$; ζ 是一个随机数, $\zeta \in [0, 1]$ 。

计算 γ 分量的值:

$$\gamma_j = \mathbf{x}_j^\gamma - d_j^\gamma \left[g_j^\gamma \mathbf{x}_j^\gamma - \mathbf{x}_j^i \right], j = 1, 2, \dots, p \quad (11)$$

式中: $d_j^\gamma = 2a\zeta - a$, $g_j^\gamma = 2\zeta$, ζ 是一个随机数, $\zeta \in [0, 1]$ 。

计算解向量 $\mathbf{x}^i$ 的新值:

$$g_j^i = \begin{cases} \mathbf{x}_j^-, & \text{若 } (a_j + \beta_j + \gamma_j)/3 < \mathbf{x}_j^- \\ \mathbf{x}_j^+, & \text{若 } (a_j + \beta_j + \gamma_j)/3 > \mathbf{x}_j^+ \\ (a_j + \beta_j + \gamma_j)/3, & \text{其余情况} \end{cases} \quad (12)$$

增加迭代计数器的值并重复上述步骤, 直到达到最大迭代次数 W 。

狩猎时狼群包围猎物, 式 (13) 和式 (14) 描述了狼群的位置更新行为:

$$\mathbf{D} = |\mathbf{C} \cdot \mathbf{X}_p(t) - \mathbf{X}(t)| \quad (13)$$

$$\mathbf{X}(t+1) = |\mathbf{X}_p(t) - \mathbf{A} \cdot \mathbf{D}| \quad (14)$$

$\mathbf{C} \in [0, 2]$ 随机生成。在迭代中, $\mathbf{X}_p$ 表示当前猎物位置, $\mathbf{X}$ 是灰狼的位置, 系数向量 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{C}$ 通过式 (15) 和 (16) 计算得出。

$$\mathbf{A} = 2a \cdot r_1 - a \quad (15)$$

$$\mathbf{C} = 2r_2 \quad (16)$$

式中: r_1 和 r_2 是控制参数, 介于 $[0, 1]$ 间; 变量 a 介于 $[0, 2]$ 间, 从大到小线性递减寻优。

α 狼主导狼群的狩猎方向, β 狼与 γ 狼起辅助决策作用, 其他狼的位置将根据前三者位置进行计算, 实现群体最优定位。当猎物被包围后停止运动时, 狼群发起攻击。灰狼的位置更新由式 (17) ~ (18) 得出。

$$\begin{cases} \mathbf{D}_\alpha = |\mathbf{C}_1 \cdot \mathbf{X}_\alpha(t) - \mathbf{X}| \\ \mathbf{D}_\beta = |\mathbf{C}_2 \cdot \mathbf{X}_\beta(t) - \mathbf{X}| \\ \mathbf{D}_\gamma = |\mathbf{C}_3 \cdot \mathbf{X}_\gamma(t) - \mathbf{X}| \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \mathbf{X}_1 = \mathbf{X}_\alpha(t) - \mathbf{A}_1 \cdot (\mathbf{D}_\alpha) \\ \mathbf{X}_2 = \mathbf{X}_\beta(t) - \mathbf{A}_1 \cdot (\mathbf{D}_\beta) \\ \mathbf{X}_3 = \mathbf{X}_\gamma(t) - \mathbf{A}_1 \cdot (\mathbf{D}_\gamma) \end{cases} \quad (18)$$

$$\mathbf{X}(t+1) = \frac{\mathbf{X}_1 + \mathbf{X}_2 + \mathbf{X}_3}{3} \quad (19)$$

动态拓扑转换是算法高效搜索的关键, 双模态行为使算法兼具探索与开发能力。该过程由 A 控制, 如式 (15) 所示, 其值随 a 从 2 线变至 0, 狼群位置波动幅度也会随之降低。随机生成的 C 调节狼群与猎物的相对距离, 提高了搜索效率。当 $A > 1$ 时, 狼群会拉大个体间距, 以扩大搜索范围; 当 $A < 1$ 时, 个体间距不断缩小, 包围圈越来越小直到猎物静止不动, 狼群发动攻击。

3 仿真结果与讨论

对两个相互连接的区域多源电力系统进行仿真, 分别采用灰狼优化算法 GWO、人工蜂群算法 ABC 和粒子群优化算法 PSO 对 PID 控制器参数进行优化, 以实现 ITAE 数值最小。其中 ABC 的种群大小参数设为 100。PSO 的惯性权重因子设定为 0.6, 加速常数分别取 1.1 和 1.6。GWO 的搜索群体设定为 30。当 $t=0.0$ s 时, 在区域 1 施加 1.5% 的阶跃负荷扰动, 迭代次数设定为 50 次, 控制器参数取值范围为 $[-2, 2]$, 为获得可靠的结果, 优化过程重复运行 30 次。仿真过程通过 MATLAB 软件的 SIMULINK 工具箱来实现。PID 控制器的最优增益系数及系统输出响应结果如表 1 所示。

表 1 各算法得出的控制器参数与电力系统输出结果

控制器参数	ABC	PSO	GWO
K_{p1}	0.636 3	1.057 6	0.750 9
K_{p2}	-0.296 8	1.976 4	1.326 0
K_{p3}	2	0.876 6	2
K_{p4}	-1.312 4	0.832 0	-0.208 3
K_{I1}	2	1.988 4	2
K_{I2}	0.016 3	0.050 3	0.046 7
K_{I3}	2	0.355 2	2
K_{I4}	-0.804 1	-0.355 2	0.322 2
K_{D1}	0.314 2	0.523 8	0.467 5
K_{D2}	-0.101 58	0.791 2	0.962 3
K_{D3}	0.608 3	0.520 6	0.615 0
K_{D4}	0.183 8	0.928 2	-1.033 7
ΔF_1	2.52	2.71	2.05
稳定时间 ΔF_2	3.43	4.28	3.61
ΔP_{tie}	2.74	4.31	3.37
ΔF_1	0.004 2	0.002 1	0.003 3
超调量 ΔF_2	0.009 8	0.008 1	0.008 8
ΔP_{tie}	0.003 5	0.003 0	0.003 3
ITAE	0.013 68	0.014 82	0.012 12

在区域 1 中, 采用 ABC、PSO 和 GWO 三种算法, 频率偏差的稳定时间分别为 2.52 s、2.71 s 和 2.05 s。与 ABC 和 PSO 相比, GWO 使区域 1 频率偏差的稳定时间分别提升了 18.65% 和 24.35%。在区域 2 中, 三种算法的频率偏差稳定时间分别为 3.43 s、4.28 s 和 3.61 s, GWO 较 PSO 提升了 15.65%。联络线功率偏差的稳定时间分别为 2.74 s、4.31 s 和 3.37 s, 相较于 PSO, GWO 使联络线功率偏差稳定时间降低了 21.80%。

另一方面, 在区域 1 中 ABC、PSO 和 GWO 频率偏差的超调量分别为 0.004 2、0.002 1 和 0.003 3。区域 2 中频率偏差的超调量分别为 0.009 8、0.008 1 和 0.008 8。这三种算法的联络线功率变化超调量分别为 0.003 5、0.003 0 和 0.003 3。PSO 的超调量最小, GWO 次之, 但频率偏差稳定时间和联

络线功率偏差稳定时间两项指标 GWO 更加优秀。

从仿真结果可见, 对比 ABC 和 PSO, GWO 得到的 ITAE 值最低, 为 0.012 12, 比 ABC 降低了 11.40%, 比 PSO 降低了 18.21%。测试系统的动态性能曲线如图 2~4 所示。

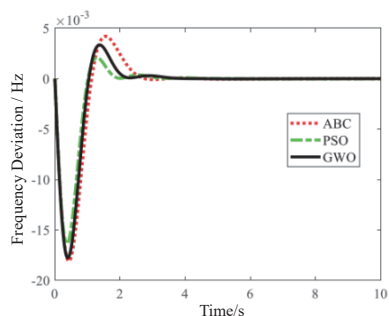


图 2 区域 1 的频率偏差变化曲线
(随区域 1 的 1.5% 阶跃负荷增加)

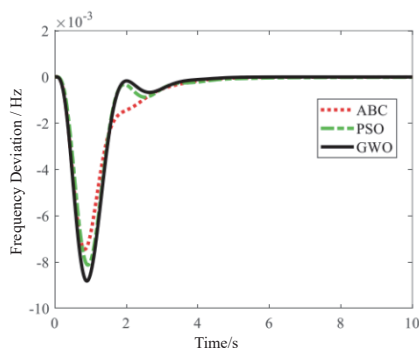


图 3 区域 2 的频率偏差变化曲线
(随区域 1 的 1.5% 阶跃负荷增加)

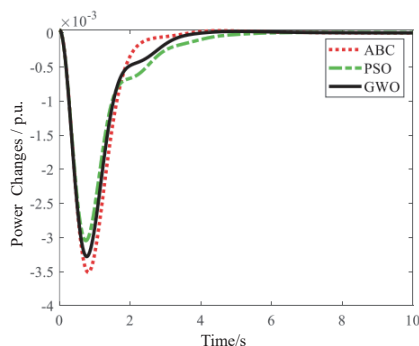


图 4 联络线功率变化曲线 (区域 1 负荷阶跃增加 1.5% 时)

4 结论

本研究采用灰狼优化算法, 优化双区域多电源电力系统负荷频率控制问题中的 PID 控制器参数。为验证优化效果, 通过仿真实验构建了该电力系统模型, 以改善系统的动态响应性能为目标, 分别采用 GWO、ABC 和 PSO 对 PID 控制器参数进行优化, 计算频率偏差和联络线功率变化的积分时间绝对误差 (ITAE) 目标函数, 经 30 次重复试验后得出实验结果。对比实验表明, 与传统算法 (ABC 和 PSO) 相比, GWO 算

法能显著降低 ITAE 值, 优化效果更佳。

本文研究的创新性在于首次将 GWO 算法应用于 LFC-PID 参数优化, 提出多目标函数适应性框架, 支持多种性能指标优化, 并通过实验验证了该算法在非线性电力系统、多区域协同控制等复杂场景中的优化效果显著高于传统算法。

参考文献:

- [1]Cam E, Kocaarslan I. A fuzzy gain scheduling PI controller application for an interconnected electrical power system[J]. Electric Power Systems Research,2005,73(3):267-274.
- [2]Juang C F, Lu C F.Power system load frequency control by evolutionary fuzzy PI controller in [C]// 2004 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (IEEE Cat. No.04CH37542).Piscataway:IEEE, 2004:715-719.
- [3]Li Pingkang, Zhu Hengjun, Li Yuyun. Genetic algorithm optimization for AGC of multi-area power systems in [C] //2002 IEEE Region 10 Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering. TENCUM'02. Proceedings. Piscataway: IEEE, 2002:1818-1821.
- [4]Gozde H, Cengiz Taplamacioglu M, Kocaarslan I. Comparative performance analysis of artificial Bee Colony Algorithm in automatic generation control for interconnected reheat thermal power system[J].International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2012,42(1): 167-178.
- [5]Sahu P K, Panda S, Padhan S. Optimal gravitational search algorithm for automatic generation control of interconnected power systems[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2014, 5(3): 721-733.
- [6]Sahu R K, Panda S, Padhan S. A hybrid firefly algorithm and pattern search technique for automatic generation control of multiarea power systems[J].International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 64: 9-23.
- [7]Barisal A K. Comparative performance analysis of teaching learning based optimization for automatic load frequency control of multi-sources power systems[J].International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2015(66):67-77.
- [8]Guha D, Roy P K, Banerjee S. Load frequency control of interconnected power system using grey wolf optimization[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2016, 27: 97-115.

【作者简介】

冯严冰 (1982—), 女, 安徽淮北人, 硕士研究生, 讲师, 研究方向: 智能算法、智能控制。

(收稿日期: 2025-11-11 修回日期: 2026-05-14)