



基于大变异遗传算法进行参数优化整定的负荷频率自抗扰控制

陈增强, 黄朝阳, 孙明玮, 孙青林

引用本文:

陈增强, 黄朝阳, 孙明玮, 等. 基于大变异遗传算法进行参数优化整定的负荷频率自抗扰控制[J]. 智能系统学报, 2020, 15(1): 41–49.

CHEN Zengqiang, HUANG Zhaoyang, SUN Mingwei, et al. Active disturbance rejection control of load frequency based on big probability variation's genetic algorithm for parameter optimization[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2020, 15(1): 41–49.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201906026>

您可能感兴趣的其他文章

多配送中心下生鲜农产品同步取送选址-路径优化

Fresh agricultural cargoes location–routing optimization with simultaneous pickup and delivery for multiple distribution centers
智能系统学报. 2020, 15(1): 50–58 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201905042>

一种新型控制方法——自抗扰控制技术及其工程应用综述

Overview of a novel control method: active disturbance rejection control technology and its practical applications
智能系统学报. 2018, 13(6): 865–877 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201711029>

一类区间二型模糊PI控制器设计算法

An interval type 2 fuzzy PI controller design algorithm
智能系统学报. 2018, 13(5): 836–842 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201703039>

一阶惯性大时滞系统Smith预估自抗扰控制

Smith prediction and active disturbance rejection control for first–order in–ertial systems with long time–delay
智能系统学报. 2018, 13(4): 500–508 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201705031>

磁通切换型定子永磁电机的建模与线性自抗扰控制

Modeling and linear active–disturbance–rejection control of flux–switching stator permanent magnet motor
智能系统学报. 2018, 13(3): 339–345 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201707028>

基于粒子群优化的Elman神经网络无模型控制

Elman model–free control method based on particle swarm optimization algorithm
智能系统学报. 2016, 11(1): 49–54 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201507025>



关注微信公众号，获取更多资讯信息

DOI: 10.11992/tis.201906026

基于大变异遗传算法进行参数优化 整定的负荷频率自抗扰控制

陈增强^{1,2}, 黄朝阳¹, 孙明玮¹, 孙青林¹

(1. 南开大学人工智能学院, 天津 300350; 2. 天津市智能机器人重点实验室, 天津 300350)

摘 要: 本文将自抗扰控制 (active disturbance rejection control, ADRC) 应用到两区域互联电力系统的负荷频率控制 (load frequency control, LFC) 中, 从具有非再热式汽轮机机组的电力系统模型推广到具有水轮机机组的以及考虑发电速率约束和调速器死区的再热式汽轮机机组的电力系统模型, 涉及线性、非线性和非最小相位特性 3 种控制对象, 并使用大变异遗传算法对控制器的参数进行整定, 与基于大变异遗传算法的 PI 控制进行仿真比较研究, 仿真表明本文所提基于大变异遗传算法的负荷频率自抗扰控制动态响应快、偏差小、鲁棒性好、抗干扰能力强, 对于 LFC 系统更为有效。

关键词: 自抗扰控制; 负荷频率控制; 大变异遗传算法; 两区域互联电力系统; 水轮机; 发电速率约束; 调速器死区; 非线性; 非最小相位特性

中图分类号: TP272 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2020)01-0041-09

中文引用格式: 陈增强, 黄朝阳, 孙明玮, 等. 基于大变异遗传算法进行参数优化整定的负荷频率自抗扰控制 [J]. 智能系统学报, 2020, 15(1): 41-49.

英文引用格式: CHEN Zengqiang, HUANG Zhaoyang, SUN Mingwei, et al. Active disturbance rejection control of load frequency based on big probability variation's genetic algorithm for parameter optimization[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2020, 15(1): 41-49.

Active disturbance rejection control of load frequency based on big probability variation's genetic algorithm for parameter optimization

CHEN Zengqiang^{1,2}, HUANG Zhaoyang¹, SUN Mingwei¹, SUN Qinglin¹

(1. College of Artificial Intelligence, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Robotics of Tianjin, Tianjin 300350, China)

Abstract: In this paper, the active disturbance rejection control (ADRC) is applied to the load frequency control (LFC) of the two-zone interconnected power system, which is extended from a power system model with non-reheating steam turbines to other models, one with turbines, and another consists of reheating turbines with consideration of power generation rate constraints and governor dead zones, involving three control objects of linear, nonlinear and non-minimum phase characteristics. The model is used to adjust the parameters of the controller utilizing the big probability variation's genetic algorithm. The simulation is compared with the PI control based on the big probability variation's genetic algorithm. The simulation shows that ADRC based on big probability variation's genetic algorithm possesses fast dynamic response, small deviation, good robustness, strong anti-interference characteristics, which is more effective for the LFC system.

Keywords: active disturbance rejection control; load frequency control; big probability variation's genetic algorithm; two-area interconnected power system; turbine; generation rate constraint; governor's dead zone; nonlinear; non-minimum phase characteristics

收稿日期: 2019-06-14.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61973175, 61573197, 61973172).

通信作者: 陈增强. E-mail: chenzyq@nankai.edu.cn.

电力系统频率是电能质量的一个基本指标^[1]。

电力系统的负荷是时刻变化的, 任何一处负荷的变化, 都会引起全系统功率的不平衡, 导致频率

的变化。为了减小频率的波动对用电设备和发电厂的运行产生的不利影响, 以将系统频率维持在标称值并且尽可能使控制区域之间的未计划的联络线交换功率最小为目的的负荷频率控制 (load frequency control, LFC) 系统是必要的。

自 Elgerd 和 Fosha 于 20 世纪 70 年代年提出电力系统的负荷频率稳定控制问题以来, 目前针对负荷频率控制这一问题已经有多种解决方法^[2]。传统的比例积分 (PI) 控制器是各种负载频率控制器中应用最广的控制器^[3]。在实现上简单易懂, 具有较好的动态响应能力, 但随着系统复杂度的增加, 其性能较差^[4], 且 PI 控制存在使频率稳定的时间长、反调超调现象多、暂态频率偏差大等缺点^[5]。

为了提高 LFC 的动态性能, 与先进控制算法结合的 LFC 得到广泛研究。文献 [6] 采用自适应控制、文献 [7] 采用变结构控制、文献 [8] 采用最优控制、文献 [9] 采用鲁棒控制、文献 [10] 采用预测控制, 都有利于提高系统性能, 但依赖系统模型参数, 或需要有效的在线辨识以及控制器设计过于复杂, 在实际中难以实现。

近年来, 自抗扰控制 (active disturbance rejection control, ADRC) 器依靠其良好的控制性能, 较高的控制精度和稳定性以及很强的鲁棒性, 其设计不依赖于受控对象的数学模型, 结构清晰, 算法容易实现, 有望在工业控制中取代仍占统治地位的 PID 控制^[11]。然而, 非线性自抗扰控制需要调节多个参数, 在实际应用中受到限制。

为了降低自抗扰控制器参数的整定难度, 人工智能算法被用来对 ADRC 进行参数寻优。本文利用遗传算法, 为了避免早熟, 采取大变异概率的变异操作, 即大变异遗传算法 (big probability variation's genetic algorithm, bGA), 来优化自抗扰控制器的参数。研究表明, 基于大变异遗传算法的负荷频率自抗扰控制能较好地抑制系统振荡, 动态性能良好, 能够应用于负荷频率控制系统。

1 自抗扰控制的基本原理

基于扩张状态观测器的自抗扰控制技术, 把所有不确定因素都归结到系统的总扰动而给予估计和补偿^[12]。由非线性跟踪微分器 (tracking differential, TD)、扩张状态观测器 (extended state observer, ESO) 和非线性误差反馈律 (nonlinear state error feedback, NLSEF) 构成自抗扰控制器。结构如图 1 所示^[13]。图 1 中, y 和 u 分别为系统的输出量和控制量, d 为未知的外部扰动, b_0 为模型参数, r 为参考输入。

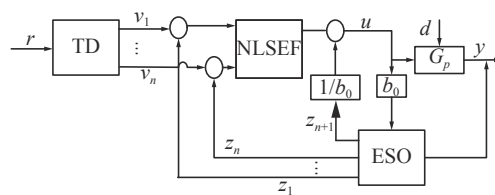


图 1 自抗扰控制原理图

Fig. 1 Principle map of ADRC

本文采用三阶自抗扰控制器数学模型如下:

TD 模型:

$$\begin{cases} v_1 = v_1 + hv_2 \\ v_2 = v_2 + hv_3 \\ v_3 = v_3 + hf \\ fh = -r_0(r_0(v_1) + 3v_2) + 3v_3 \end{cases}$$

ESO 模型:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ z_1 = z_1 + h(z_2 - \beta_{01}e) \\ z_2 = z_2 + h(z_3 - \beta_{02} \text{fal}(e, 0.5, \delta)) \\ z_3 = z_3 + h(z_4 - \beta_{03} \text{fal}(e, 0.25, \delta) + b_0u) \\ z_4 = z_4 + h(-\beta_{04} \text{fal}(e, 0.125, \delta)) \end{cases}$$

NLSEF 模型:

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1, e_2 = v_2 - z_2, e_3 = v_3 - z_3 \\ u_0 = \sum_{i=1}^3 \beta_i \text{fal}(e_i, \alpha_i, \delta_0) \\ u = \frac{u_0 - z_4}{b_0} \end{cases}$$

其中, $\text{fal}(e, \alpha, \delta)$ 为非线性函数, 表达式为

$$\text{fal}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} \frac{e}{\delta^{\alpha-1}}, & |e| \leq \delta \\ |e|^\alpha \text{sign}(e), & |e| > \delta \end{cases}$$

从自抗扰控制器的模型看, 其结构简单, 但包含了很多非线性元件, 需要整定的参数有 TD 的 r_0 , ESO 的 β_{01} 、 β_{02} 、 β_{03} 、 β_{04} 、 δ , NLSEF 的 β_1 、 β_2 、 β_3 、 δ_0 、 α_1 、 α_2 、 α_3 、 b_0 , 多达 14 个, 整定工作复杂艰巨, 为避免手工调试的繁琐过程, 本文利用遗传算法进行参数寻优, 完成控制器的参数整定。

2 基于大变异遗传算法的自抗扰控制器

遗传算法 (genetic algorithm, GA) 是一类模仿生物界的进化规律演化而来的随机化搜索方法^[14], 它处理表示不同解的二进制种群, 通过模拟自然选择和遗传中发生的选择、交叉和变异等现象, 从初始种群出发, 通过随机选择、交叉和变异操作, 产生一群更适应环境的个体, 使群体进化到搜索空间中越来越好的区域。经过这样一代又一代地不断繁衍进化, 最后收敛到一群最适合环境的个体, 求得问题的最优解。因此, 遗传算法具有隐式并行性, 增强了搜索能力, 当应用于复杂优化问题时, 可以快速找到最优解^[15]。

然而, 经典遗传算法存在“早熟”问题, 也就是

算法过早收敛于一个非全局最优解^[16], 从而降低了搜索性能, 文献 [17] 提出大变异遗传算法来改善经典遗传算法的收敛速度和稳定性, 即当某一代的最大适应度 F_{\max} 与平均适应度 F_{avr} 满足 $\alpha F_{\max} < F_{\text{avr}}$, $0 < \alpha < 1$, 就将对该代设为最大适应度的个体的形式, 除对一个个体不作操作外, 种群其他个体均采取一个比原变异概率大的概率 P_{mbig} 进行变异操作。通过调整密集因子 α 和大变异概率 P_{mbig} 使种群快速脱离“早熟”的算法弊端。

基于大变异遗传算法的自抗扰控制算法操作描述如下:

1) 初始种群选取。首先初始化种群规模和交叉及原始变异概率, 确定自抗扰控制器需要整定的参数对应的二进制编码, 选取初始染色体种群, 解码得到控制器参数, 运行系统仿真, 并计算每个染色体的适应值。其中, ADRC 参数编码描述如下: 固定参数 $r_0 = 4$, $\delta = \delta_0 = 0.05$, $\alpha_1 = 0.3$, $\alpha_2 = 0.8$, $\alpha_3 = 1.1$ 。然后剩余参数在如下范围内随机初始化取多组初值参与优化: $\beta_{01} \in [0, 400]$, $\beta_{02} \in [0, 4\ 000]$, $\beta_{03} \in [0, 40\ 000]$, $\beta_{04} \in [0, 800\ 000]$, $\beta_1 \in [0, 1\ 000]$, $\beta_2 \in [0, 1\ 500]$, $\beta_3 \in [0, 500]$, $b_0 \in [1, 500]$ 。

2) 种群进化。根据适应值选择父母染色体, 进行复制、交叉操作, 判断是否满足大变异操作条件以确定变异概率, 进行变异操作得到新的染色体种群, 解码得到控制器参数, 重新运行系统仿真, 计算新种群中每个染色体的适应值。

3) 种群优化。判断是否满足结束条件, 不满足时重复操作 2) 直到满足为止。

算法流程图表示如图 2 所示。

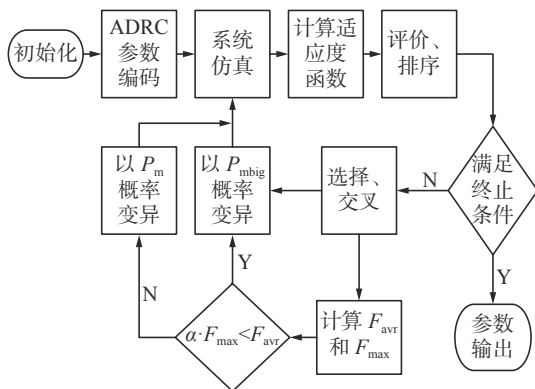


图 2 基于大变异遗传算法的自抗扰控制参数整定流程图
Fig. 2 Flow chart of active disturbance rejection control parameter tuning based on big probability variation's genetic algorithm

3 负荷频率自抗扰控制

3.1 电力系统线性模型

互联电力系统的控制对象包括调速器、汽轮

机、发电机及负荷。互联电力系统中一个区域的线性模型如图 3 所示。

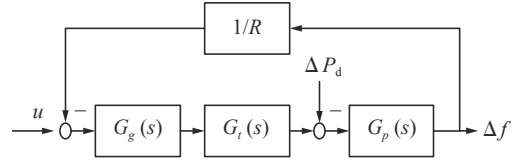


图 3 单区域电力系统

Fig. 3 Single area power system

其常见的 3 个组成部分传递函数可表示^[18] 为调速器:

$$G_g(s) = \frac{1}{T_g s + 1}$$

非再热汽轮机:

$$G_i(s) = \frac{1}{T_i s + 1}$$

非发电机:

$$G_p(s) = \frac{K_p}{T_p s + 1}$$

因此, 系统开环传递函数为

$$G(s) = \frac{K_p}{(T_g s + 1)(T_i s + 1)(T_p s + 1) + K_p/R}$$

相对阶次为 3, 故可采用三阶自抗扰控制器。

3.2 两区域频率控制系统

两个单区域电力系统通过联络线组合形成互联电力系统。互联电力系统的负荷频率控制除了要保持频率恒定 (即使 $\Delta f_i = 0, i = 1, 2$) 之外, 还要维持与联络线上的交换功率按计划运行 (即使 $\Delta P_{\text{tie}} = 0$)。LFC 系统的控制模式有 3 种: 定频率控制、定交换功率控制、联络线功率频率偏差控制。本文采用最常用的联络线功率频率偏差控制模式, 即定义区域控制偏差 $\text{ACE}_i = \Delta f_i + \Delta P_{\text{tie}}$, 区域反馈控制量 $u_i = -K_i(s)\text{ACE}_i$ 。当系统稳定时, 有 $\Delta f_i = 0$, $\Delta P_{\text{tie}} = 0$, $\text{ACE}_i = 0 (i = 1, 2)$ 。考虑如图 4 所示的两区域负荷频率控制系统。

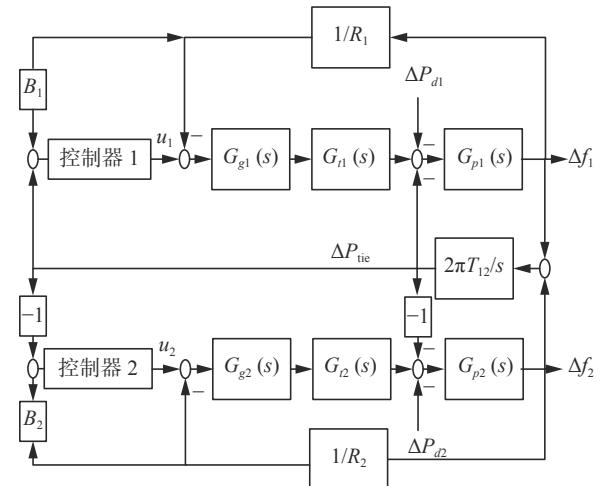


图 4 两区域互联电力系统

Fig. 4 Two-area interconnected power system

图 4 中两个区域为具有非再热汽轮机的相同电力系统, 模型参数如下^[19]:

$$K_p = 120, T_p = 20, T_t = 0.3, T_{12} = 0.3, \\ a_{12} = -1, T_g = 0.08, R = 2.4, B = 0.425$$

对该系统设计三阶自抗扰控制器, 并采用大变异遗传算法整定控制器参数, 目标函数值取为^[20]

$$J = \text{ITAE} = \int_0^{\infty} (|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + |\Delta P_{\text{tie}}|) \cdot t \, dt$$

优化后的自抗扰控制器参数如表 1 所示。

表 1 两区域负荷频率控制系统自抗扰控制器参数优化结果

Table 1 Parameter optimization results of ADRC controllers for two-area load frequency control system

模块	参数值
TD	$r_0 = 4$
ESO	$\beta_{01} = 60, \beta_{02} = 3\,010, \beta_{03} = 38\,710, \\ \beta_{04} = 186\,580, \delta = 0.05$
NLSEF	$\beta_1 = 620, \beta_2 = 1\,070, \beta_3 = 90, \delta_0 = 0.05, \\ \alpha_1 = 0.3, \alpha_2 = 0.8, \alpha_3 = 1.1, b_0 = 190$

在区域 1 加入阶跃负荷扰动 $\Delta P_{d1} = 0.01$, 自抗扰控制器的闭环系统响应如图 5 中实线所示。图 5 中点折线代表基于大变异遗传算法优化后的 PI 闭环响应 ($K_p = -0.295\,1, K_i = 0.375\,3$)。表 2 显示了各区域频率偏差及联络线交换功率偏差调节时间、最大偏差以及 ITAE 性能指标的量化比较结果 (本文调节时间定义为输出稳定在 $\pm 0.005\%$ 以内的开始时间)。

从图 5 和表 2 可以看出, 基于大变异遗传算法的负荷频率自抗扰控制闭环响应具有远小于参数优化后的 PI 控制器对应的响应调节时间和频率偏差, 性能指标 ITAE 也缩小至 1/6 000, 且不同于 PI 控制出现明显的振荡, 自抗扰控制器的响应

几乎没有振荡, 其效果远比优化参数后的 PI 控制的响应效果好, 跟踪精度高。

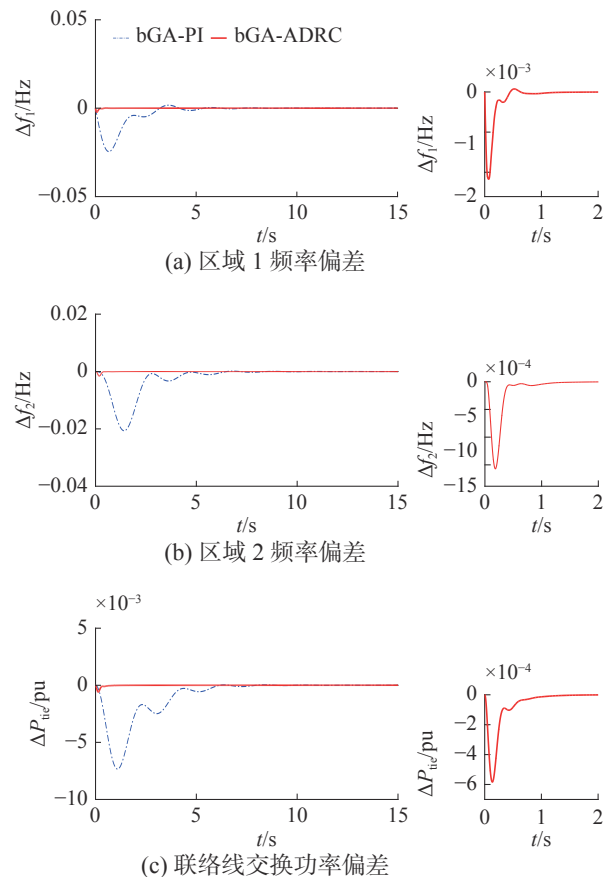


图 5 非再热式两区域响应

Fig. 5 Response of non-reheated two-connected area with turbine

为验证 ADRC 的鲁棒性, 假设系统模型参数在标称值的基础上做 $\pm 50\%$ 的摄动。在控制器参数不变的情况下, 进行 300 次蒙特卡洛实验, 检验控制器的性能鲁棒性。

蒙特卡洛实验下基于 3 种算法的区域 1 输出频率偏差 Δf_1 的调节时间、最大偏差和 ITAE 的分布如图 6 所示。

表 2 非再热式两区域响应性能指标

Table 2 Performance index for response of non-reheated two-connected area with turbines

算法	调节时间/s			最大偏差/Hz			ITAE
	Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}	Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}	
bGA-ADRC	0.572	0.965	0.576	-0.002 17	-0.001 57	-0.000 58	0.000 2
bGA-PI	9.226	10.075	7.722	-0.024 55	-0.020 64	-0.007 34	1.191 7

表 3 给出了图 6 的量化结果。各种算法在参数变化上、下界时的响应比较如图 7 所示。观察图 6 和表 3 所示蒙特卡洛实验结果, 在模型参数摄动时, 基于大变异遗传算法的 ADRC 控制下的

系统 ITAE 值远基于大变异遗传算法的 PI 控制, 且三维点集分布更集中。图 6 和表 3 表明基于大变异遗传算法的 ADRC 控制下的系统性能更优且鲁棒性较强。

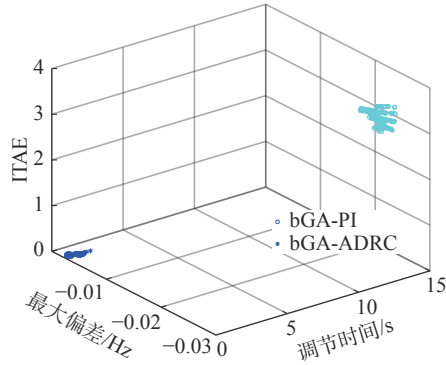


图 6 模型参数的蒙特卡洛实验

Fig. 6 Monte Carlo test of model parameters

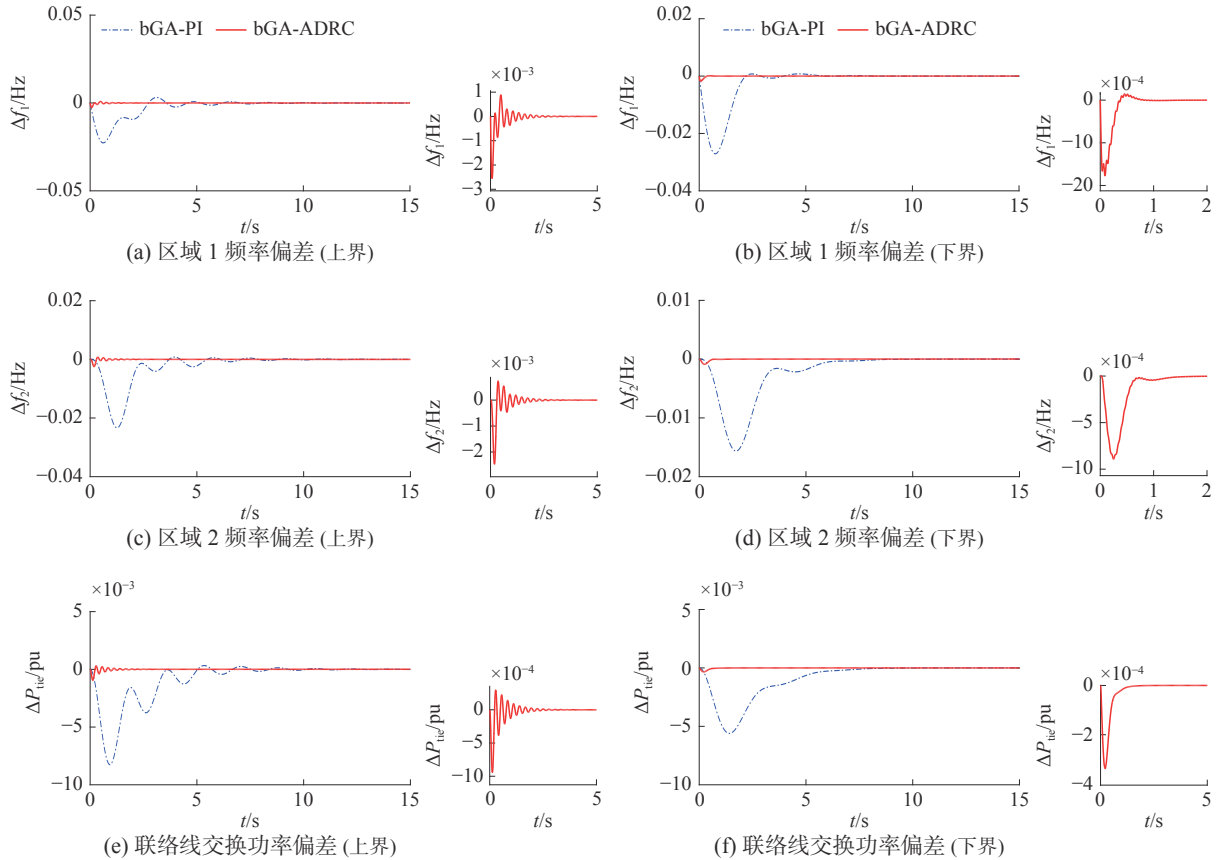


图 7 模型参数扰动时闭环系统响应

Fig. 7 Response of the closed-loop systems under parametric perturbations

4 推广模型

在实际电力系统模型中,有时采用再热汽轮机或水轮机来替代非再热汽轮机,本章设计基于大变异遗传算法的 ADRC 对具有再热汽轮机或水轮机的两区域互联电力系统进行控制,并考虑发电速率约束 (GRC)、调速器死区。

4.1 水轮机

水轮机动态为

$$G_t(s) = \frac{a_{23} + (a_{23}a_{11} - a_{21}a_{12})T_w s}{1 + a_{11}s}$$

水体惯性的存在使得具有水轮机的负荷频率

表 3 Δf_1 的蒙特卡洛实验量化结果Table 3 Monte Carlo test results of Δf_1

性能指标	bGA-ADRC	bGA-PI
调节时间/s	0.265~1.750	12.161~14.975
最大偏差/-Hz	-0.002 9~-0.001 6	-0.002 84~-0.021 7
ITAE	0.000 2~0.000 8	1.18~1.20

图 7 所示临界参数扰动下的响应也体现了自抗扰控制器的快速性、稳定性和鲁棒性。

控制系统对象出现了非最小相位特性,在控制时会出现超调,增加了控制难度。

在图 4 所示的两区域互联电力系统模型中,假设区域 1, 2 均为具有水轮机的相同电力系统,参数为^[22]

$$\begin{aligned} K_p &= 120, T_{p1} = 20, T_w = 1.5, \\ T_g &= 0.1, R_1 = R_2 = 2.4, T_{12} = 0.545, \\ B_1 &= B_2 = 0.425, a_{11} = 0.491, \\ a_{12} &= 0.789, a_{21} = 1.46, a_{23} = 0.74 \end{aligned}$$

针对该互联电力系统,设计相应的自抗扰控制和 PI 控制器,使用大变异遗传算法优化控制器参数,整定结果如表 4 所示。

表4 含水轮机两区域负荷频率控制系统自抗扰控制器参数优化结果

Table 4 Parameter optimization results of ADRC controllers for two-area load frequency control system with hydro turbines

模块	参数值
TD	$r_0 = 4$
ESO	$\beta_{01} = 170, \beta_{02} = 2\ 010, \beta_{03} = 23\ 820, \beta_{04} = 508\ 050, \delta = 0.05$
NLSEF	$\beta_1 = 470, \beta_2 = 1\ 230, \beta_3 = 180, \delta_0 = 0.05, \alpha_1 = 0.3, \alpha_2 = 0.8, \alpha_3 = 1.1, b_0 = 90$

$t=0$ 时在区域 1 加入阶跃负荷扰动 $\Delta P_{d1} = 0.01$, 性能指标数值比较见表 5。自抗扰控制器下的系统响应如图 8 实线所示。

结合表 5 和图 8, 与大变异遗传算法下的 PI 控制相比, 加入阶跃负荷扰动后, ADRC 下的

闭环系统波动很小 (10^{-5} 数量级), 频率偏差和调节时间远比 PI 下的系统响应小, 这表明自抗扰负荷频率控制具有更好的抗干扰性能, 对具有水轮机的两区域负荷频率控制系统控制效果极好。

表5 具有水轮机的两区域响应性能指标

Table 5 Performance index for response of two-connected area with hydro turbines

算法	调节时间/s			最大偏差/Hz			ITAE
	Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}	Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}	
bGA-ADRC	0.001	0.001	0.001	-0.000 036	-0.000 028	-0.000 012	0.000 9
bGA-PI	24.710	24.469	19.781	-0.001 527	-0.001 581	-0.002 093	0.351 8

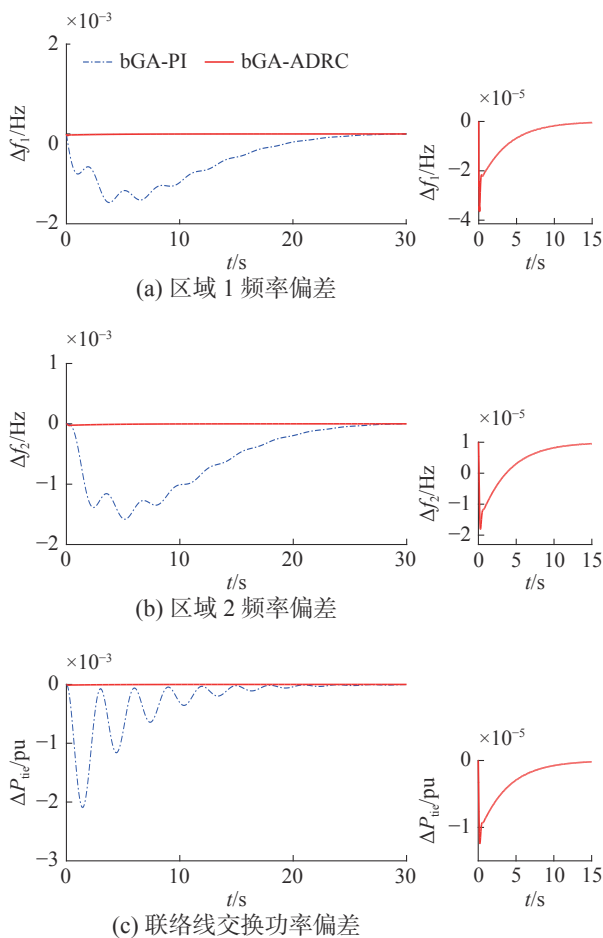


图8 具有水轮机的两区域响应

Fig. 8 Response of two-connected area with turbine

4.2 再热汽轮机、发电速率约束与调速器死区 再热汽轮机的动态为

$$G_i(s) = \frac{K_r T_r s + 1}{(T_i s + 1)(T_r s + 1)}$$

微分环节的引入会引起系统的震荡, 而发电机组的发电速率约束 (generation rate constraint, GRC) 则是严重的非线性, 调速器死区的存在更是加剧了这种非线性, 发电速率约束和调速器死区的存在对系统的动态响应具有不可忽略的影响^[21], 严重时将直接导致电力系统的崩溃。图 9 表示考虑了发电速率约束和调速器死区的再热式两区域互联电力系统模型, 参数在式 (1) 的基础上取 $T_r = 10, K_r = 0.5$, 并考虑 3% 的发电速率限制和调速器死区界限。

针对该非线性的引入, 设计三阶自抗扰控制器, 使用大变异遗传算法整定控制器参数, 优化后的参数如表 6。

在区域 1 加入阶跃负荷扰动 $\Delta P_{d1} = 0.01$, 考虑 GRC 和死区的闭环系统负荷频率和联络线交换功率动态响应曲线如图 10 所示, 性能指标见表 7 ($K_p = -0.389\ 6, K_i = 0.218\ 4$)。

由图 10 中曲线和表 7 中量化数据, 加入扰动负荷后, 两种控制算法均实现了无静差的输出, 在一致使用大变异遗传算法的前提下, 与 PI 控制相比, 电力系统在 ADRC 的负荷频率偏差及联络线功率偏差均更快稳定到零且最大偏差更小, 震荡少, 性能指标更不及千分之一, 可见基于大变异遗传算法的自抗扰控制性能较优, 控制效果极好。

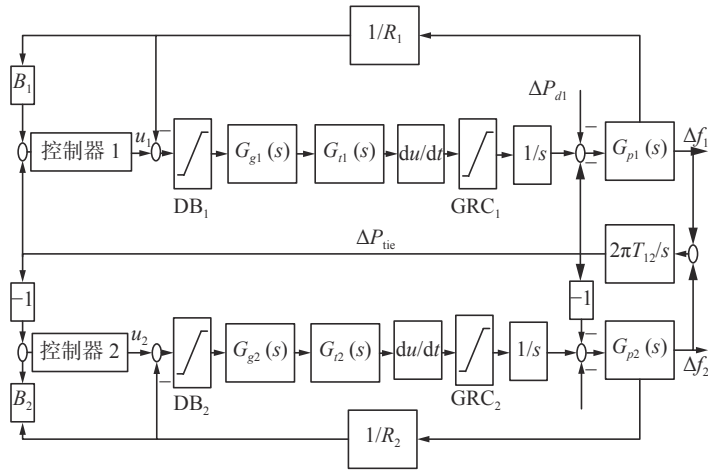


图 9 具有 GRC 和死区的再热式两区域电力系统

Fig. 9 Reheated two-zone power system with GRC and dead zone

表 6 具有 GRC 和死区的再热式两区域负荷频率控制系统自抗扰控制器参数优化结果

Table 6 Parameter optimization results of ADRC controllers for two-area reheat load frequency control system with GRC and DB

模块	参数值
TD	$r_0 = 4$
ESO	$\beta_{01} = 92, \beta_{02} = 2\ 037, \beta_{03} = 32\ 009, \beta_{04} = 26\ 769, \delta = 0.05$
NLSEF	$\beta_1 = 617, \beta_2 = 397, \beta_3 = 73, \delta_0 = 0.05, \alpha_1 = 0.3, \alpha_2 = 0.8, \alpha_3 = 1.1, b_0 = 76$

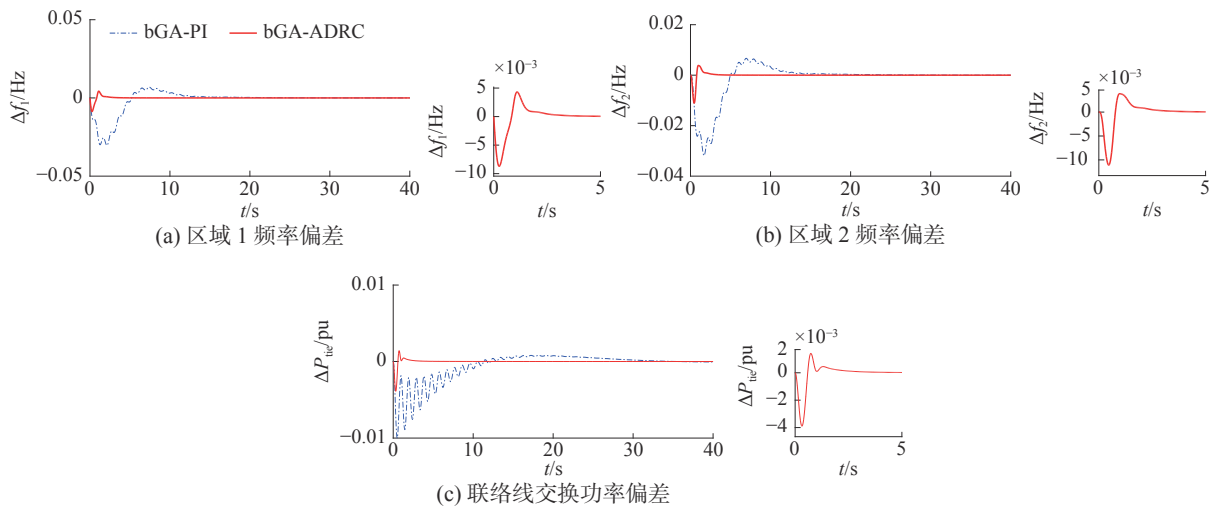


图 10 具有 GRC 和死区的再热式两区域响应

Fig. 10 Response of reheated two-connected area with GRC and dead-zone

表 7 具有 GRC 和死区的再热式两区域响应性能指标

Table 7 Performance index for response of reheated two-connected area with GRC and DB

算法	调节时间/s			最大偏差/Hz			ITAE
	Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}	Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}	
bGA-ADRC	4.991	5.084	3.601	-0.008 70	-0.011 07	-0.003 89	0.019 1
bGA-PI	28.708	30.204	46.838	-0.030 37	-0.031 90	-0.010 02	93.550 6

5 结束语

本文研究了负荷频率控制系统的非线性自抗扰控制方法,并加入大变异遗传算法解决了自抗扰控制器参数繁多、不易整定的问题,针对三种两区域电力系统模型,通过与大变异遗传算法优化参数后的PI控制仿真比较,发现对线性系统、非线性系统以及非最小相位系统,自抗扰控制具有良好的控制性能,且响应快、偏差小、鲁棒性好、抗干扰能力强等优点,从而体现了基于大变异遗传算法的负荷频率自抗扰控制的有效性与优越性。

参考文献:

- [1] 陶顺. 现代电力系统电能质量评估体系的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2008: 14.
TAO Shun. Study on the power quality assessment system of modern power systems[D]. Beijing: North China Electric power University, 2008: 14.
- [2] ELGERD O I, FOSHA C E. Optimum megawatt-frequency control of multiarea electric energy systems[J]. IEEE transactions on power apparatus and systems, 1970(4): 556–563.
- [3] SHAYEGHI H, SHAYANFAR H A, JALILI A. Load frequency control strategies: A state-of-the-art survey for the researcher[J]. *Energy conversion and management*, 2009, 50(2): 344–353.
- [4] CHATTERJEE K. Design of dual mode PI controller for load frequency control[J]. International journal of emerging electric power systems, 2011, 11(4): 24–31.
- [5] 鲁尔洁, 陈峦, 李坚, 等. 基于改进模糊控制的发电系统频率调节研究 [J]. *电力系统保护与控制*, 2017(8): 46–52.
LU Erjie, CHEN Luan, LI Jian, et al. Research on power system frequency regulation based on improved fuzzy control[J]. *Power system protection and control*, 2017(8): 46–52.
- [6] 王亚刚, 许晓鸣. 自适应鲁棒最优 PI 控制器 [J]. *自动化学报*, 2009, 35(10): 1352–1356.
WANG Yagang, XU Xiaoming. Adaptive and optimal PI controller with robustness[J]. *Acta automatica sinica*, 2009, 35(10): 1352–1356.
- [7] 孟光伟, 姚琼荟, 李槐树. 电力系统负载频率控制器的离散变结构控制设计 [J]. *电力自动化设备*, 2008, 28(10): 46–49.
MENG Guangwei, YAO Qionghui, LI Huaishu. Load-frequency controller based on discrete variable structure control theory[J]. *Electric power automation equipment*, 2008, 28(10): 46–49.
- [8] DONDE V, PAI M A, HISKENS I A. Simulation and optimization in an AGC system after deregulation[J]. *IEEE power engineering review*, 2007, 21(8): 58–58.
- [9] BEVRANI H. Robust power system frequency control[M]. Springer US, 2009.
- [10] QUDAIH Y S, BERNARD M, MITANI Y, et al. Model predictive based load frequency control design in the presence of DFIG wind turbine[C]//International conference on electric power & energy conversion systems. 2012.
- [11] 李杰, 齐晓慧, 万慧, 等. 自抗扰控制: 研究成果总结与展望 [J]. *控制理论与应用*, 2017, 34(3): 281–295.
LI Jie, QI Xiaohui, WAN Hui, et al. Active disturbance rejection control: theoretical results summary and future researches[J]. *Control theory and applications*, 2017, 34(3): 281–295.
- [12] 韩京清. 自抗扰控制技术 [J]. *前沿科学*, 2017, 34(3): 281–295.
HAN Jingqing. Active disturbances rejection control technique[J]. *Frontier science*, 2017, 34(3): 281–295.
- [13] 陈增强, 刘俊杰, 孙明玮. 一种新型控制方法——自抗扰控制技术及其工程应用综述 [J]. *智能系统学报*, 2018, 13(6): 865–877.
CHEN Zengqiang, LIU Junjie, SUN Mingwei. Overview of a novel control method: active disturbance rejection control technology and its practical applications[J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2018, 13(6): 865–877.
- [14] 李素, 袁志高, 王聪, 等. 群智能算法优化支持向量机参数综述 [J]. *智能系统学报*, 2018, 13(1): 70–84.
LI Su, YUAN Zhigao, WANG Cong, et al. Optimization of support vector machine parameters based on group intelligence algorithm[J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2018, 13(1): 70–84.
- [15] THOMAS B. Evolutionary computation: Toward a new philosophy of machine intelligence[J]. *Complexity*, 1997, 2(4): 239–251.
- [16] PASSINO K M. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control[J]. *IEEE control systems*, 2002, 22(3): 52–67.
- [17] 马钧水. 改进遗传算法搜索性能的大变异操作 [J]. *控制理论与应用*, 2016, 15(3): 404–408.
MA Junshui. Big mutation operation for improving search performance of genetic algorithm[J]. *Control theory and applications*, 2016, 15(3): 404–408.
- [18] WANG Y, ZHOU R, WEN C. Robust load-frequency controller design for power systems[C]//IEEE proceedings

C (Generation, Transmission and Distribution). IET Digital Library, 1993, 140(1): 11–16.

[19] TAN W. Tuning of PID load frequency controller for power systems[J]. *Energy conversion and management*, 2009, 50(6): 1465–1472.

[20] ALI E S, ABD-ELAZIM S M. Bacteria foraging optimization algorithm based load frequency controller for interconnected power system[J]. *International journal of electrical power & energy systems*, 2011, 33(3): 633–638.

[21] 刘永娟, 米阳, 吴晓. 单域时滞电力系统的滑模负荷频率控制[J]. *上海电力学院学报*, 2015, 31(3): 293–298.

LIU Yongjuan, MI Yang, WU Xiao. The sliding mode load frequency control of single area time delay power system[J]. *Journal of Shanghai University of Electric Power*, 2015, 31(3): 293–298.

[22] 张彬文, 谭文, 李健. 水轮机负荷频率控制系统的线性自抗扰整定[J]. *电机与控制学报*, 2019(1): 117–124.

ZHANG Binwen, TAN Wen, LI Jian. Tuning of linear active disturbance rejection control for load frequency control systems with hydro turbines[J]. *Electric machines and control*, 2019(1): 117–124.

作者简介:



陈增强, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能控制、预测控制、自抗扰控制。曾获得天津市自然科学二等奖。发表学术论文 200 余篇。



黄朝阳, 硕士研究生, 主要研究方向为自抗扰控制、智能控制、预测控制。



孙明玮, 教授, 主要研究方向为飞行器制导与控制、自抗扰控制。曾获得国防科工委科技进步二等奖。

第8届中国数据挖掘会议 China Conference on Data Mining

中国数据挖掘会议(China Conference on Data Mining, CCDM)是由中国计算机学会和中国人工智能学会主办,是由中国计算机学会和中国人工智能学会主办,中国计算机学会人工智能与模式识别专业委员会和中国人工智能学会机器学习专业委员会协办的数据挖掘领域盛会。会议旨在为数据挖掘领域从业者提供一个互动交流平台,使参会者了解最前沿的学术动态,分享数据挖掘领域的最新研究成果、创新思想和科学方法,提高国内数据挖掘领域的研究水平。前七届会议分别在北京、郑州、烟台、广州、金华、桂林和济南成功举行,现已成为国内数据挖掘领域最主要的学术活动之一。

第8届中国数据挖掘会议(CCDM 2020)将于2020年8月1—3日在湖南长沙举行,由湖南大学承办,CCF YOCSEF长沙学术委员会联合承办。本次会议议程除包含传统的大会特邀报告、录用论文报告外,还将组织学术专题论坛、产业界高峰论坛等活动,为与会者奉献一场精彩的学术盛宴。

征文范围(包括但不限于):

- 1)数据挖掘理论与算法
- 2)特定数据类型的挖掘
- 3)人工智能与智能信息处理
- 4)人工智能与数据挖掘技术应用
- 5)机器学习理论及其应用

合作期刊:

《中国科学》《计算机研究与发展》《智能系统学报》《计算机科学与探索》《湖南大学学报(自然科学版)》《计算机科学》《计算机应用》《南京大学学报(自然科学版)》《中国科学技术大学学报》《山东大学学报(工学版)》《陕西师范大学学报(自然科学版)》。

联系方式

联系人: 许莹(手机: 15874954096)、曾凡仔(手机: 13317315717)

网址: <http://csee.hnu.edu.cn/ccdm2020/index.html>