

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190864

基于加权果蝇优化算法的多区域频率协同控制

王念¹, 张靖¹, 李博文², 何宇¹, 王乐¹

(1. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州电力科学研究院, 贵州 贵阳 550000)

摘要: 随着大规模可再生能源的开发和应用, 电网变得越来越庞大且复杂, 如何保证大量不同控制器之间的协调是最值得关注的问题之一。利用微分博弈理论可以解决协同控制的问题。然而, 传统算法难以求解带约束的微分博弈问题。此外, 现有研究建立的仿真模型几乎是线性的, 不利于实际工程应用。针对上述问题, 提出了一种基于加权果蝇优化算法(Weighting Fruit Fly Optimization Algorithm, WFOA)的协同进化算法来求解具有非线性约束的多区域频率协同控制模型。仿真结果表明, 与协同进化遗传算法和协同多目标粒子群优化算法相比, 该方法具有更好的控制效率, 同时对系统出现的外部扰动变化及内部机组参数变动具有很好的鲁棒性。

关键词: 可再生能源; 微分博弈理论; 多区域频率协同控制; 协同进化算法; 加权果蝇优化算法; 非线性约束

Load frequency control of a multi-area power system based on weighting fruit fly optimization algorithm

WANG Nian¹, ZHANG Jing¹, LI Bowen², HE Yu¹, WANG Le¹

(1. School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Guizhou Electric Power Research Institute, Guiyang 550000, China)

Abstract: With the development and application of large-scale renewable energy sources, the electric power grid is becoming ever larger and more complicated. One of the most concerning problems is how to ensure coordination between a large number of varied controllers. Differential games theory is used to solve the problem of collaborative control. However, it is difficult to solve the differential game problem with constraints using the traditional algorithm. Furthermore, simulation models established by existing research are almost linear, which is not conducive to practical engineering application. To solve the above problem, this paper proposes a co-evolutionary algorithm based on the Weighted Fruit Fly Optimization Algorithm (WFOA) to solve a multi-area frequency collaborative control model with nonlinear constraints. Simulation results show that compared with a co-evolutionary genetic algorithm and a collaborative multi-objective particle swarm optimization algorithm, the method exhibits better control efficiency and better robustness to the changes in external disturbance and the internal unit parameters of systems.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51867005).

Key words: renewable energy sources; differential games theory; a multi-area frequency collaborative control; co-evolutionary algorithm; WFOA; nonlinear constraints

0 引言

近年来, 随着大规模可再生能源的开发利用, 电力系统运行的稳定性也成为了国内外学者广泛关注的问题之一^[1]。可再生能源具有间接性、波动性

强且难以精确预测等特点, 并网后对电网稳定运行造成巨大影响, 尤其是在频率波动方面。因此, 提出有效的电力系统调频策略是实现可再生能源大规模并网的重要前提。

然而, 在电力系统中广泛使用的 PI 控制、自适应控制^[2]、模型预测控制^[3]和最优控制等都属于单个主体控制, 但是多区域间的频率控制属于协调控制, 它们之间存在各种各样的电气联系, 在制定控制策略时若不考虑其相互作用及影响, 则可能导致

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51867005); 贵州省科技计划项目资助([2018]5615); 贵州省科学技术基金项目资助([2016]1036); 贵州省科技计划项目资助([2018]5781)

控制性能达不到预期目的,甚至导致控制性能下降。因此,电力系统中多主体间的动态协调控制是维持电网稳定运行的重要举措^[4]。

文献[5]采用传统的 PI 控制,从理论上确定控制器增益的最佳值,分析研究两个互联水电系统的动态性能。然而,电力系统中有多种类型的发电机组,传统的控制策略无法同时满足多种目标的要求,文献[6-7]按照各区域在实际运行过程中的情况自行决定目标的重要性。为了解决目标之间的相互冲突问题,文献[8]提出多目标最优问题的评价函数法,并在该算法中人为地加入控制因子,得到满足特定期望目标要求的各区域频率偏差系数,但人为因素的影响使得各区域间的公平调度难以得到保证。

博弈论常用于处理多主体间的决策问题^[9],微分博弈理论是求解协调控制问题的新思路^[10]。文献[11-12]将微分博弈理论引入电力系统频率控制。文献[13]将线性二次型软抑制微分博弈理论用于对含有多电源的区域电力系统负荷频率控制。为了解决非线性的微分博弈问题,文献[14-15]建立了考虑约束的一、二次调频协同控制模型,并利用协同进化遗传算法求取其反馈纳什均衡解(Feedback Nash

Equilibrium Solutions, FNES)。但现有研究多考虑线性模型^[16],且计算量大、计算时间长,在寻优过程中容易出现过早收敛的情况。

为了解决上述问题,本文建立了多区域频率协同控制模型,并考虑了调速器死区、控制动作幅值限制、机组爬坡速率约束等实际工程因素,利用基于 WFOA 的协同进化算法求取其反馈纳什均衡解,得到各机组的控制律。在 Matlab/Simulink 平台上进行仿真验证,并与采用协同进化遗传算法和协同多目标粒子群优化算法的控制结果进行对比,结果表明,基于 WFOA 的协同进化算法具有更好的控制效率,同时对系统出现的外部扰动变化及内部机组参数变动具有很好的鲁棒性。

1 多区域频率协同控制模型

本文采用带约束的多区域互联系统小扰动模型^[15],将各区域的控制器集合作为独立的博弈参与方,每个区域单独追求本区域的调频指标最优化。设区域 i 的二次调频控制量为 u_i ,考虑调速器死区、控制动作幅值限制、机组爬坡速率约束因素后,可建立多区域频率协同控制模型,如图 1 所示。

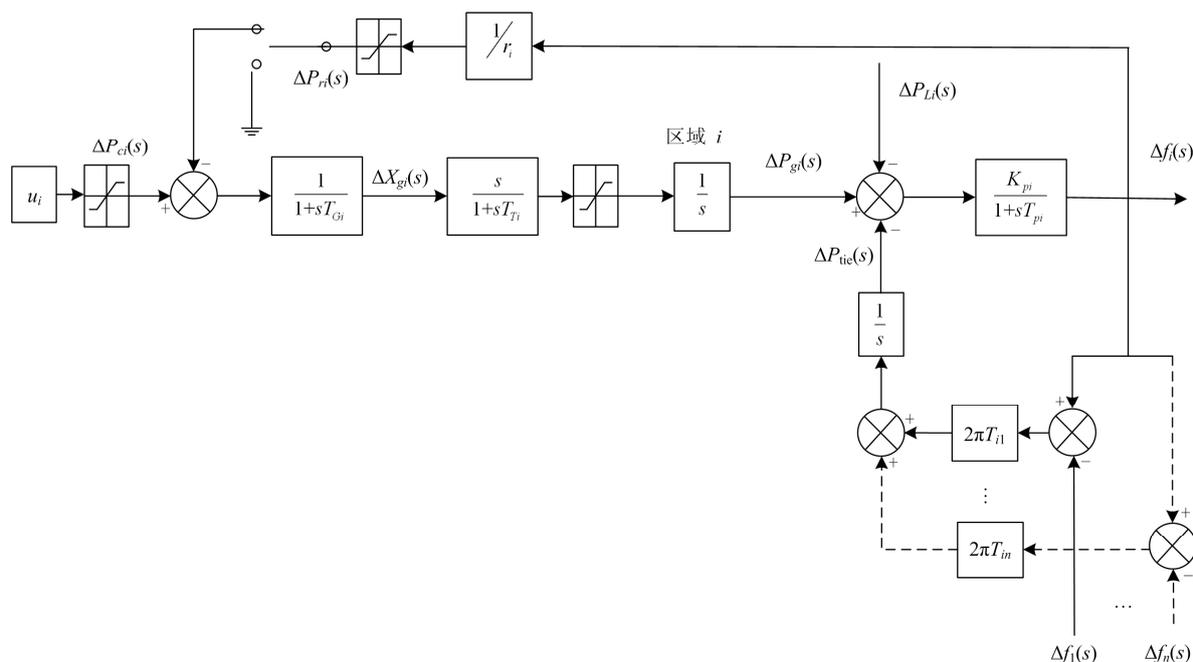


图 1 多区域频率协同控制模型

Fig. 1 Multi-area frequency cooperative control model

其中,区域 i 包含风电。由于风电具有随机波动的特点,无法像常规发电机组一样进行调度,可以把风电功率看作负的负荷功率,总的功率变化量

ΔP_{Li} 即为负荷功率与风电功率之差^[17]。 u_i 是区域 i 的二次调频控制量。 ΔP_{ci} 是区域 i 原动机的功率调节量, r_i 是区域 i 一次调频的调差系数, ΔP_{ri} 是区域

i 的一次调频控制量, T_{Gi} 是区域 i 的调速器的时间常数, ΔX_{gi} 是区域 i 的调速器阀门位置的改变量, T_{Ti} 是区域 i 的原动机的时间常数, ΔP_{gi} 是区域 i 的机组出力的变化量, Δf_i 是区域 i 的频率偏差, T_{pi} 是惯性时间常数, ΔP_{icij} 是区域 i 与外区域 $j(i \neq j)$ 联络线上的交换功率偏差. T_{ij} 是区域 i 与外区域 $j(i \neq j)$ 的功率同步系数. 由图 1 可得到多区域频率协同控制模型的状态方程^[18]为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \sum_{i=1}^n \mathbf{B}_i \mathbf{u}_i + \mathbf{A}\Delta\mathbf{P}_L \quad (1)$$

式中, $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1 \ \cdots \ \mathbf{x}_i \ \cdots \ \mathbf{x}_n]^T$

$$\Delta\mathbf{P}_L = [\Delta P_{L1} \ \cdots \ \Delta P_{Li} \ \cdots \ \Delta P_{Ln}]^T$$

\mathbf{x}_i 、 \mathbf{u}_i 、 ΔP_{Li} 分别是第 i 个子系统的状态变量矢量、控制变量矢量和负荷扰动矢量.

$$\mathbf{x}_i = [\Delta f_i \ \Delta P_{gi} \ \Delta X_{gi} \ \Delta P_{icij}]^T$$

式中: $i=1,2,\dots,n$; $j=1,2,\dots,n$; $i \neq j$. 状态转移矩阵 \mathbf{A} 为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} & \cdots & \mathbf{A}_{1n} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} & \cdots & \mathbf{A}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}_{n1} & \mathbf{A}_{n2} & \cdots & \mathbf{A}_{nn} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{ii} = \begin{bmatrix} -1 & K_{pi} & 0 & -K_{pi} \\ T_{pi} & T_{pi} & 0 & T_{pi} \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ T_{Ti} & T_{Ti} & T_{Ti} & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 0 \\ r_i T_{Gi} & 0 & T_{Gi} & 0 \\ \pm 2\pi \sum_{j=1, j \neq i}^n T_{ij} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{ij} = 0$$

输入矩阵 \mathbf{B}_i , 负荷扰动项系数矩阵 \mathbf{A} 的形式为

$$\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{T_{Gi}} & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{A} = [\mathbf{A}_1 \ \mathbf{A}_2 \ \cdots \ \mathbf{A}_n]^T, \mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} -K_{pi} & 0 & 0 & 0 \\ T_{pi} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

式中: $i=1,2,\dots,n$; $j=1,2,\dots,n$; $i \neq j$. 每个区域的二次调频的指标皆设为线性二次型, 即

$$J_i = \int_0^{t_f} \frac{1}{2} [\mathbf{x}(t)^T \mathbf{Q}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{u}_i(t)^T \mathbf{R}_i \mathbf{u}_i(t)] dt \quad (2)$$

式中: $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_i, \dots, \mathbf{x}_n]^T$; $i=1,2,\dots,n$.

式(2)中, 被积分量的第 1 项追求频率偏差和联络线功率偏差最小, 第 2 项间接地表征了控制代价.

\mathbf{Q}_i 为状态变量的权系数矩阵, 决定了对频率偏差和联络线功率偏差的惩罚力度, \mathbf{R}_i 为控制变量的权系数矩阵, 决定了对控制代价的惩罚力度, 两者均为对称正定矩阵, 其具体取值将在仿真部分作详细说明^[12].

为了消除扰动项 $\mathbf{A}\Delta\mathbf{P}_L$, 以扰动后的稳态值作为参考点重新定义系统状态^[19].

$$\mathbf{x}'(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_{ss}(t) \quad (3)$$

$$\mathbf{u}'(t) = \mathbf{u}(t) - \mathbf{u}_{ss}(t) \quad (4)$$

$$\Delta\mathbf{P}'_L(t) = \Delta\mathbf{P}_L(t) - \Delta\mathbf{P}_{ssL}(t) = 0 \quad (5)$$

式中, $\mathbf{x}_{ss}(t)$ 、 $\mathbf{u}_{ss}(t)$ 、 $\Delta\mathbf{P}_{ssL}(t)$ 分别是 $\mathbf{x}(t)$ 、 $\mathbf{u}(t)$ 、 $\Delta\mathbf{P}_L(t)$ 的稳态值.

各子系统博弈收益函数为

$$J_i = \int_0^{t_f} \frac{1}{2} [\mathbf{x}'(t)^T \mathbf{Q}_i \mathbf{x}'(t) + \mathbf{u}'(t)^T \mathbf{R}_i \mathbf{u}'(t)] dt \quad (6)$$

$$\dot{\mathbf{x}}'(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}'(t) + \sum_{i=1}^n \mathbf{B}_i \mathbf{u}'_i(t) \quad (7)$$

式中, $i=1,2,\dots,n$.

未考虑系统中各种复杂约束时, 由哈密顿-雅可比方程可得该问题的最优博弈控制策略为^[20-21]

$$\mathbf{u}_i^* = -\mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{B}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{x}'(t) \quad i=1,2,\dots,n \quad (8)$$

式中, \mathbf{P}_i 为代数 Riccati 方程组的解.

以上控制器能够在系统运行点附近得到最优的控制效果, 但对于实际系统, 由于存在多种非线性约束影响, 使得该控制器往往不能达到预想的控制目标, 常见的非线性约束如下^[15].

一次调频、二次调频的控制动作幅值约束为

$$\Delta P_{ri} = \begin{cases} \Delta P_{ri \max} & \Delta P_{ri} > \Delta P_{ri \max} \\ \Delta P_{ri} & \Delta P_{ri \min} \leq \Delta P_{ri} \leq \Delta P_{ri \max} \\ \Delta P_{ri \min} & \Delta P_{ri} < \Delta P_{ri \min} \end{cases} \quad (9)$$

$$\mathbf{u}_i = \begin{cases} u_{i \max} & u_i > u_{i \max} \\ u_i & u_{i \min} \leq u_i \leq u_{i \max} \\ u_{i \min} & u_i < u_{i \min} \end{cases} \quad (10)$$

一次调频考虑调速器死区后, 控制量为

$$\Delta P_{ri} = \begin{cases} 0 & |\Delta f_i| < \Delta f_{i \min} \\ \Delta P_{ri} & |\Delta f_i| \geq \Delta f_{i \min} \end{cases} \quad (11)$$

机组爬坡速率为机组在单位时间内出力的变化量, 由于本文考虑的是连续的系统, 因此机组爬坡速率用机组出力的导数来近似表示, 约束为

$$\dot{\Delta P}_{gi} = \begin{cases} \dot{\Delta P}_{gi \max} & \dot{\Delta P}_{gi} > \dot{\Delta P}_{gi \max} \\ \dot{\Delta P}_{gi} & \dot{\Delta P}_{gi \min} \leq \dot{\Delta P}_{gi} \leq \dot{\Delta P}_{gi \max} \\ \dot{\Delta P}_{gi \min} & \dot{\Delta P}_{gi} < \dot{\Delta P}_{gi \min} \end{cases} \quad (12)$$

式中, $i=1,2,\dots,n$.

微分博弈的求解涉及到难以求解的微分方程问题, 当系统考虑各种复杂约束后, 系统是一个非线性系统, 依据该系统建立的微分博弈模型难以利用耦合 Riccati 方程组求取其纳什均衡解。因此, 本文提出一种基于 WFOA 的协同进化算法, 以求取非线性的微分博弈模型, 该算法在第 2 节作详细介绍。

2 基于加权果蝇算法的协同进化策略

2.1 加权果蝇优化算法

果蝇优化算法(Fruit Fly Optimization Algorithm, FOA)是根据果蝇的嗅觉与视觉演化出的一种全局寻优的优化算法。与遗传、粒子群等算法相比 FOA 简单、调节参数少且收敛速度快^[22]。但是传统的 FOA 容易陷入局部最优, 且传统果蝇个体味道浓度判定值要求必须是非负数。为了解决以上问题, 文献[23-24]对传统的 FOA 进行了改进, 本文在此基础上提出了一种改进的加权果蝇优化算法。根据果蝇种群的特性, 改进的 WFOA 算法如下。

1) 传统的 FOA 仅考虑了果蝇在平面上的运动状态, 降低了果蝇算法收敛精度和收敛速度。因此, 增加一个 Z 轴变量 Z_{axis} , 使之成为三维坐标系。假设最大迭代次数为 M_{axgen} 、种群规模为 S_{izepop} , 并随机分配果蝇种群初始状态下的坐标 X_{axis} 、 Y_{axis} 和 Z_{axis} , 定义如下:

$$\begin{aligned} X_{axis} &= rands() \\ Y_{axis} &= rands() \\ Z_{axis} &= rands() \end{aligned} \quad (13)$$

2) 当群体中的每一只果蝇利用其嗅觉搜索时, 赋予它一个随机的飞行方向和距离。为了增加种群的多样性, 避免 FOA 陷入局部最优, 在迭代位置更新公式中引入加权因子 ω , 果蝇个体 i 新的位置由式(14)给出。

$$\begin{aligned} X_i &= \omega X_{axis} + rands() \\ Y_i &= \omega Y_{axis} + rands() \\ Z_i &= \omega Z_{axis} + rands() \end{aligned} \quad (14)$$

在迭代寻优过程中, 前期需要较大的 ω 值, 使果蝇个体搜索区域范围变大, 全局搜索能力增强; 迭代后期需要较小的 ω 值, 使果蝇个体在最优解附近的搜索区域范围变小, 局部搜索能力变强^[23]。

$$\omega = W_{max} - (W_{max} - W_{min}) / M_{axgen} \times g \quad (15)$$

式中: g 为当前迭代次数; M_{axgen} 为最大迭代次数; W_{max} 为最大加权因子; W_{min} 为最小加权因子。

3) 计算果蝇群体中每个个体的位置距离 D_i 为

$$D_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2} \quad (16)$$

设味道浓度判断值 S_i 为距离的倒数。

$$S_i = 1/D_i \quad (17)$$

由于距离 $D_i > 0$, 则味道浓度判定值 $S_i > 0$, 所以 S_i 只能在 0 的右侧逼近, 无法在 0 的左侧领域逼近, 因此将 S_i 改为^[24]

$$S_i = \text{sign}(2 \times \text{rand}() - 1) / D_i \quad (18)$$

4) 计算当前群体中每个果蝇个体的味道浓度值 S_{melli} 。

$$S_{melli} = \text{fitness}(S_i) \quad (19)$$

5) 选择当前群体中具有最佳味道浓度值的果蝇, 记录其味道浓度值和相应位置。

$$[bestSmell, bestIndex] = \min(S_{melli}) \quad (20)$$

6) 保持最佳味道浓度值和对对应果蝇位置信息, 群体中的其他果蝇均利用视觉飞向他位置, 即

$$\begin{cases} Smellbest = bestSmell \\ X_{axis} = X(bestIndex) \\ Y_{axis} = Y(bestIndex) \\ Z_{axis} = Z(bestIndex) \end{cases} \quad (21)$$

7) 开始迭代搜索, 重复执行步骤 2)——步骤 6), 判断新的味道浓度是否优于历史味道浓度, 若更优则再次执行步骤 7), 否则返回继续迭代。迭代循环的终止条件为达到设定的 M_{axgen} 值。

2.2 改进欧拉法求解常微分方程

对于任意给定的时间区间 $[0, t_f]$, 将其 m 等分, $0 = t_0 < t_1 < t_2 \dots < t_k < \dots < t_m = t_f$ 为时间节点, 记每个小区间的长度, 即步长为 h , $x_k = x(t_k)$, 则系统(7)基于改进欧拉法的数值解法为^[25]

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + \frac{h}{2} \left[Ax_k + BKx_k + (A(x_k + h(Ax_k + BKx_k)) + \right. \\ &\quad \left. BK(x_k + h(Ax_k + BKx_k))) \right] \end{aligned} \quad (22)$$

2.3 基于 WFOA 的协同进化算法

本文采用基于 WFOA 的协同进化算法^[26]求解带约束的非线性微分博弈模型, 算法具体过程描述如下。

步骤 1: 以图 1 多区域互联控制系统为例, 每一个区域作为一个博弈方。假设所有的博弈参与者都能够观察到系统的状态, 由式(8)可知微分博弈的反馈纳什均衡控制策略是线性组合形式, 每个区域以状态变量 x 的线性反馈系数 k_i 为变量, 即区域 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 的控制策略为 $u_i = k_i x$, 且每个区域对应一个独立种群 pop_i 。

步骤 2: 以种群 i 为例, 设 L 为系统的进化代数, 并对其他种群 i 的最优代表策略集赋予初值。

步骤 3: 设当前系统进化至 L 代, 则 $\mathbf{k}_{-i}^{\text{best}}(L) = \{\mathbf{k}_1^{\text{best}}(L-1), \dots, \mathbf{k}_{i-1}^{\text{best}}(L-1), \mathbf{k}_{i+1}^{\text{best}}(L-1), \mathbf{k}_n^{\text{best}}(L-1)\}$ 。

步骤 4: 利用 WFOA 单独对种群 i 的状态变量 $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n]^T$ 反馈系数 \mathbf{k}_i 进行寻优。

(1) 初始化参数, 设 g 为迭代次数, p 为种群 i 中果蝇个体数, 随机分配种群 i 初始状态下的坐标 X_{axis} 、 Y_{axis} 和 Z_{axis} 。

(2) 当群体中的每一只果蝇利用其嗅觉搜索时, 赋予它一个随机的飞行方向和距离。

(3) 计算果蝇群体中每个个体的位置距离 D_i 及味道浓度判断值 S_i , $\mathbf{k}_i^L = [S_i(p,1), S_i(p,2), \dots, S_i(p,n)]$ 。

(4) 计算当前群体中每个果蝇个体的味道浓度值 S_{melli} , 将 \mathbf{k}_i^L 和 $\mathbf{k}_{-i}^{\text{best}}(L)$ 代入式(7)描述的系统状态微分方程中, 利用改进欧拉法对其进行求解, 并根据式(9)一式(12)对其进行约束判断, 从而得到区域 i 的控制变量 $\mathbf{u}_i = \mathbf{k}_i^L \mathbf{x}$ 和其他区域 $-i$ 的控制变量 $\mathbf{u}_{-i} = \mathbf{k}_{-i}^{\text{best}}(L) \mathbf{x}$ 。将式(6)描述的支付函数 J_i 作为种群 i 的适应度评价函数, 根据 \mathbf{x} 、 \mathbf{u}_i 、 \mathbf{u}_{-i} 得到适应度函数 J_i 的值, 即 $S_{\text{melli}} = J_i$ 。

(5) 选取当前群体中具有最佳味道浓度值 $\min(S_{\text{melli}})$ 的果蝇个体 $\mathbf{S}_i^{\text{best}}(L)$ 作为该种群的策略, 即 $\mathbf{k}_i^{\text{best}}(L) = \mathbf{S}_i^{\text{best}}(L)$ 。

(6) 开始迭代搜索, 重复步骤(1)一步骤(5), 直到 g 达到最大迭代次数, 即 $g_{\text{max}} = 50$, 循环终止。

步骤 5: 重复步骤 4, 直到 n 个区域代表策略的种群都实现进化。

步骤 6: $L = L + 1$ 。

步骤 7: 如果 $J_{i+1} - J_i \leq 10^{-6}$ 或 $L \geq 100$, 计算结束, 输出结果, 否则重复步骤 3一步骤 6。

3 算例分析

3.1 系统参数

本文基于 Matlab 平台对三区域系统进行仿真研究。设三区域功率均发生阶跃扰动: $\Delta P_{L1} = 0 \text{ p.u.}$, $\Delta P_{L2} = 0.2 \text{ p.u.}$, $\Delta P_{L3} = 0 \text{ p.u.}$ 。系统额定频率 50 Hz, 系统各参数具体数值见文献[14-15,27]。 \mathbf{Q}_i 和 \mathbf{R}_i 的取值为

$$\begin{cases} \mathbf{Q}_1(1,1) = \mathbf{Q}_1(10,10) = \mathbf{Q}_1(12,12) = 1 \\ \mathbf{Q}_2(4,4) = 1 \\ \mathbf{Q}_3(7,7) = \mathbf{Q}_3(11,11) = \mathbf{Q}_3(12,12) = 1 \\ \mathbf{R}_1 = 5, \mathbf{R}_2 = 10, \mathbf{R}_3 = 5 \end{cases}$$

$$\text{即 } J_1 = \int_0^{t_f} [5\mathbf{u}_1^2 + \Delta f_1^2 + \Delta P_{\text{tie12}}^2 + \Delta P_{\text{tie31}}^2] dt$$

$$J_2 = \int_0^{t_f} [10\mathbf{u}_2^2 + \Delta f_2^2] dt$$

$$J_3 = \int_0^{t_f} [5\mathbf{u}_3^2 + \Delta f_3^2 + \Delta P_{\text{tie23}}^2 + \Delta P_{\text{tie31}}^2] dt$$

以上取值的意义是: 每个区域作为一个具有单独利益的个体, 只关注本区域的调频任务, 且假定大部分时间里, 区域 2 的功率扰动比其他两区域频繁, 通常是区域 2 接受功率支援。因此区域 1 和区域 3 关心频率偏差和联络线功率偏差, 而区域 2 仅关心自身频率偏差。

3.2 考虑复杂约束的情况

对三区域互联系统, 考虑调速器死区、控制动作幅值限制、机组爬坡速率, 各约束如表 1 所示。

表 1 约束参数

Table 1 Constrained parameters

参数	值	参数	值
$\Delta P_{r1\text{max}}/\text{p.u.}$	0.02	$\Delta P_{r1\text{min}}/\text{p.u.}$	-0.02
$\Delta P_{r2\text{max}}/\text{p.u.}$	0.02	$\Delta P_{r2\text{min}}/\text{p.u.}$	-0.02
$\Delta P_{r3\text{max}}/\text{p.u.}$	0.02	$\Delta P_{r3\text{min}}/\text{p.u.}$	-0.02
$u_{1\text{max}}/\text{p.u.}$	0.001 5	$u_{1\text{min}}/\text{p.u.}$	-0.001 5
$u_{2\text{max}}/\text{p.u.}$	0.001 5	$u_{2\text{min}}/\text{p.u.}$	-0.001 5
$u_{3\text{max}}/\text{p.u.}$	0.001 5	$u_{3\text{min}}/\text{p.u.}$	-0.001 5
$\Delta P_{g1\text{max}}/\text{p.u.}$	0.5	$\Delta P_{g1\text{min}}/\text{p.u.}$	-0.5
$\Delta P_{g2\text{max}}/\text{p.u.}$	0.5	$\Delta P_{g2\text{min}}/\text{p.u.}$	-0.5
$\Delta P_{g3\text{max}}/\text{p.u.}$	0.5	$\Delta P_{g3\text{min}}/\text{p.u.}$	-0.5
$\Delta f_{1\text{min}}/\text{Hz}$	0.001	$\Delta f_{2\text{min}}/\text{Hz}$	0.001
$\Delta f_{3\text{min}}/\text{Hz}$	0.001		

3.2.1 仿真结果及分析

对考虑复杂约束的情况, 本文采用以下 3 种方法进行求解。

方法一: 协同进化遗传算法^[15]。

方法二: 协同多目标粒子群优化算法^[28-29]。

方法三: 基于 WFOA 的协同进化算法。

由图 2 可以看出, 3 种控制方法在 200 s 的仿真时间内都能平衡区域内的频率波动, 其中协同多目标粒子群优化算法对扰动造成的频率偏差 Δf_1 、 Δf_2 、 Δf_3 和联络线功率偏差 ΔP_{tie12} 、 ΔP_{tie13} 、 ΔP_{tie23} 的抑制效果较差, 调节时间较长, 到 80 s 时系统才能恢复稳定, 平稳性和快速性都较差。协同进化遗传算法和协同进化果蝇算法的调节时间差不多, 40 s 内系统就能恢复稳定运行, 但可以明显看出, 协同进化果蝇算法对扰动造成的频率偏差 Δf_3 和联络线功率偏差 ΔP_{tie13} 、 ΔP_{tie23} 的抑制效果更好, Δf_3 和 ΔP_{tie23} 曲线的最大偏差量是协同进化遗传算法的 2/3, ΔP_{tie13} 曲线的最大偏差量仅是协同进化遗传算法的 1/20, 平稳性更好。综上所述, 与协同多目标粒子群优化算法和协同进化遗传算法相比, 本文所提出的协同进化果蝇算法具有更好的控制效率。

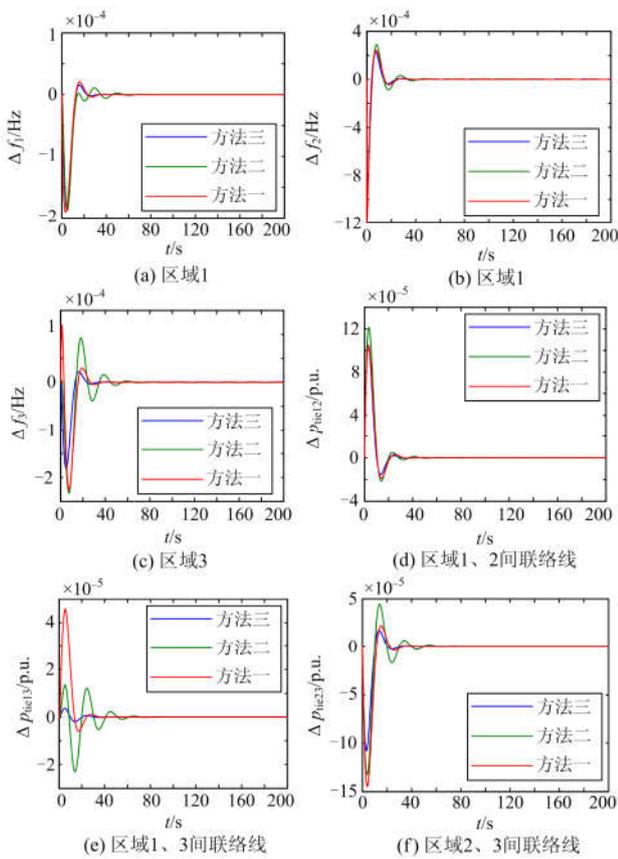


图 2 考虑约束结果对比图

Fig. 2 Results contrast curve under constrained

3.2.2 系统参数变化对机组控制效果的影响

在实际电力系统中发电机组运行条件的变化及扰动状态的变化均可能导致系统参数的变化, 从而抑制控制策略的效果^[30]。

(1) 对区域 1、区域 2 和区域 3 中所有机组标称参数分别减小 50%、增大 50%、控制策略保持不变。

仿真结果如图 3 所示, 随着机组参数的增大, 控制策略对扰动造成的区域频率偏差 Δf_1 、 Δf_2 、 Δf_3 和联络线功率偏差 ΔP_{tie12} 、 ΔP_{tie13} 、 ΔP_{tie23} 的抑制效果有所减弱, 调节时间稍有增加, 但仍能保证系统稳定运行。

(2) 区域 2 的负荷扰动分别减小 50%、增大 50%、控制策略保持不变。

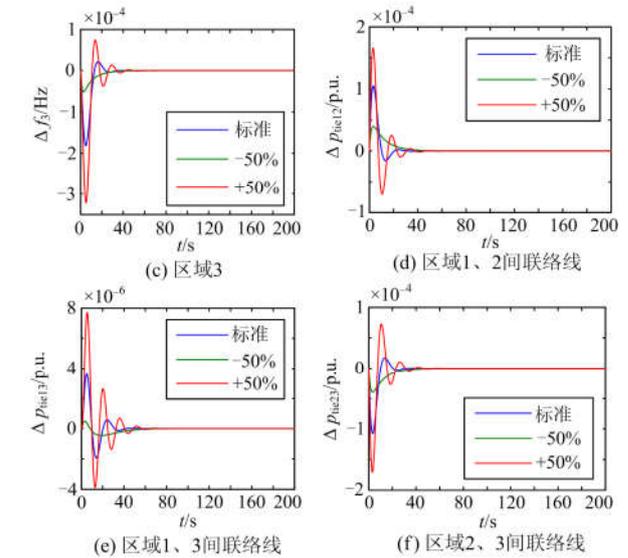
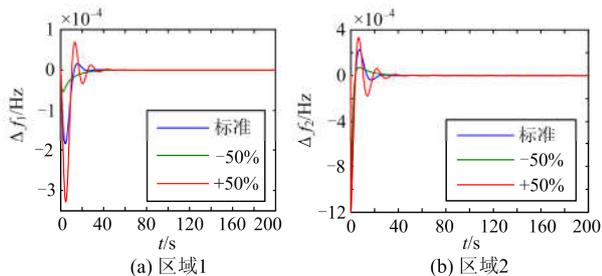


图 3 不同机组参数结果对比图

Fig. 3 Results contrast curve under different generator parameters

仿真结果如图 4 所示, 随着扰动量的增大, 系统的波动幅值也增大, 但系统仍能稳定运行。

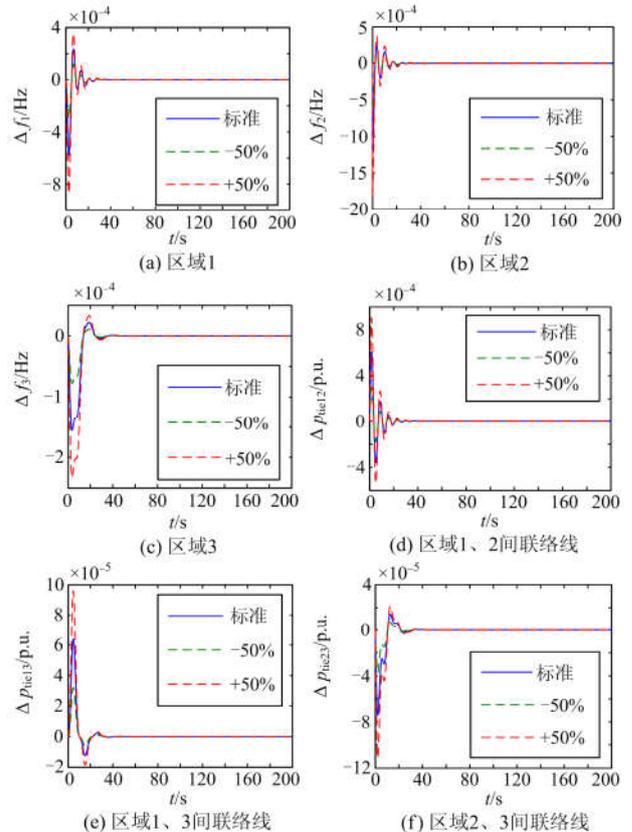


图 4 不同机组参数结果对比图

Fig. 4 Results contrast curve under different load parameters

4 结论

本文采用微分博弈理论, 提出了基于 WFOA 的

协同进化算法,能有效解决非线性的微分博弈问题。与采用协同进化遗传算法和协同多目标粒子群优化算法的控制结果相比,该方法具有更好的控制效率,同时对系统出现的外部扰动变化及内部机组参数变动具有很好的鲁棒性。

参考文献

- [1] 欧阳波, 易灵芝, 何巨龙, 等. 风电接入的电力系统电能质量扰动的检测与定位[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 143-150.
OUYANG Bo, YI Lingzhi, HE Julong, et al. Detection and localization of power quality disturbance for power system connected with wind energy generation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 143-150.
- [2] ANNAMRAJU A, NANDIRAJU S. Robust frequency control in a renewable penetrated power system: an adaptive fractional order-fuzzy approach[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 181-195. DOI: 10.1186/s41601-019-0130-8.
- [3] 张靖, 李博文, 余珮嘉, 等. 基于状态空间的双馈风力发电机模型预测控制研究[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2904-2909.
ZHANG Jing, LI Bowen, YU Peijia, et al. Model prediction control based on state space for doubly-fed induction generator[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2904-2909.
- [4] 王昊昊, 徐泰山, 马彦宏, 等. 计及多类型电源协调的有功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 167-175.
WANG Haohao, XU Taishan, MA Yanhong, et al. A novel active power control strategy considering multi-resource coordination[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 167-175.
- [5] CONCORDIA C, KIRCHMAYER L K. Tie-line power and frequency control of electric power systems[J]. Trans Am Inst Elec Eng III Power Appar Syst, 1953, 73(2): 1764-1780.
- [6] JALEELI N, VANSLYCK L S, EWART D, et al. Understanding automatic generation control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(3): 1106-1122.
- [7] COHN N. Discussion of "non-linear tie-line frequency bias for interconnected systems control"[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(3): 1244-1253.
- [8] 刘乐, 刘娆, 李卫东, 等. 目标可控的超前频率偏差系数确定方法设计[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(5): 40-45.
LIU Le, LIU Rao, LI Weidong, et al. Design of object controllable and ahead frequency bias coefficient setting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(5): 40-45.
- [9] 石帮松, 张靖, 何宇, 等. 基于动态博弈的配电网单相电力用户用电行为分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 87-91.
SHI Bangsong, ZHANG Jing, HE Yu, et al. Dynamic state estimation for generators based on unscented particle filtering algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 87-91.
- [10] ISAACS R. Differential games: a mathematical theory with applications to warfare and pursuit, control and optimization[M]. New York: John Wiley & Sons, 1965.
- [11] YE Rong, CHEN Haoyong, LOU Erjun, et al. The coordination between primary and secondary frequency control based on differential games[C] // Proc 7th International Power Electronics and Motion Control Conference, June 2-5, 2012, Harbin, China: 2687-2693.
- [12] 叶荣, 陈皓勇, 卢润戈. 基于微分博弈理论的两区域自动发电控制协调方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 48-54.
YE Rong, CHEN Haoyong, LU Runge. A differential games theory based method for coordinating two-area automatic generation control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18): 48-54.
- [13] 伍亮, 杨金明. 基于微分博弈理论的含多电源区域电力系统负荷频率控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2676-2683.
WU Liang, YANG Jinming. Load frequency control of area power system with multi-source power generation based on differential games theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2676-2683.
- [14] 卢润戈, 陈皓勇, 叶荣, 等. 电力系统二次调频的反馈微分博弈协同控制[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(9): 1182-1189.
LU Runge, CHEN Haoyong, YE Rong, et al. Feedback differential game cooperative control for primary and secondary frequency control of power system[J]. Control Theory & Applications, 2014, 31(9): 1182-1189.
- [15] 卢润戈. 基于微分博弈理论的电力系统频率的协同控制[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
LU Runge. Cooperative control of power system frequency based on differential games theory[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [16] ZHANG Jing, GAO Yuan, YU Peijia, et al. Coordination control of multiple micro sources in islanded microgrid based on differential games theory[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2018, 97: 11-16.

- [17] CHEN H, YE R, WANG X, et al. Cooperative control of power system load and frequency by using differential games[J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 2015, 23(3): 882-897.
- [18] 孟祥萍, 薛昌飞, 张化光. 多区域互联电力系统的 PI 滑模负荷频率控制[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(3): 6-11.
MENG Xiangping, XUE Changfei, ZHANG Huaguang. PI Sliding mode load frequency control of multi-area power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(3): 6-11.
- [19] FOSHA C E, ELGERD O I. The megawatt frequency control problem: a new approach via optimal control theory[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1970, 89(4): 563-577.
- [20] ENGWERDA J. A numerical algorithm to find soft-constrained Nash equilibria in scalar LQ-games[J]. International Journal of Control, 2006, 79(6).
- [21] FREILING G, JANK G, ABOU-KANDIL H. On global existence of solutions to coupled matrix Riccati equations in closed-loop Nash games[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1996, 41(2): 264-269.
- [22] 潘文超. 果蝇最佳化演算法[M]. 台北: 沧海书局, 2011.
- [23] 杜军俊. 果蝇优化算法的加权策略研究[J]. 微型机与应用, 2014, 33(16): 67-74.
DU Junjun. Study on the strategy of weighting in fruit fly optimization algorithm[J]. Microcomputer & Its Applications, 2014, 33(16): 67-74.
- [24] 杨秀媛, 陈麒宇, 王蒙, 等. 考虑网络约束的风电水电协同果蝇优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5286-5293.
YANG Xiuyuan, CHEN Qiyu, WANG Meng, et al. Cooperating control for wind farm and hydro power plant based on the fruit fly optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5286-5293.
- [25] 傅勤, 何永丽. 基于改进欧拉法的一类非线性系统的数值控制方法[J]. 苏州科技学院学报:自然科学版, 2009, 26(2): 7-9.
FU Qin, HE Yongli. A numerical control method for a class of nonlinear systems based on an improved Euler algorithm[J]. Journal of University of Science and Technology of Suzhou: Natural Science, 2009, 26(2): 7-9.
- [26] CHEN H, WANG X. Cooperative coevolutionary algorithm for unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(1): 128-133.
- [27] 叶荣. 基于微分博弈理论的电力系统频率[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
YE Rong. Coordinated frequency control of power systems based on differential games theory[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [28] 张俊武, 王德林, 陈斌, 等. 基于 PSO-GSA 算法的含 DFIG 互联系统 AGC 优化控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 48-54.
ZHANG Junwu, WANG Delin, CHEN Bin, et al. Research on PSO-GSA algorithm optimization for interconnected AGC system including DFIG wind turbines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 48-54.
- [29] 赵文璋, 汤宗尧, 谭林林, 等. 多优化目标下无线充电电动汽车与风电协同调度研究[J]. 供用电, 2018, 35(9): 22-27, 68.
ZHAO Wenxuan, TANG Zongyao, TAN Linlin, et al. Research on coordination scheduling of wireless charging electric vehicle and wind power under multi-objective optimization[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(9): 22-27, 68.
- [30] 罗飞, 焦在滨, 马钊, 等. 直流配电网故障分析和继电保护综述[J]. 供用电, 2018, 35(6): 3-11.
LUO Fei, JIAO Zaibin, MA Zhao, et al. Review of fault analysis and relay protection of DC distribution network [J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(6): 3-11.

收稿日期: 2019-07-23; 修回日期: 2019-12-19

作者简介:

王念(1995—, 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: 1057588497@qq.com

张靖(1979—, 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定、运行与控制; E-mail: zhangjing@gzu.edu.cn

李博文(1993—, 男, 硕士, 研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: libowen_gz@163.com

(编辑 许威)