

电力系统一二次调频的反馈微分博弈协同控制

卢润戈¹, 陈皓勇^{1†}, 叶荣², 杨鑫¹

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 2. 国网福建电力经济技术研究院, 福建 福州 350012)

摘要: 风能等间歇式能源并网将是未来电网发展趋势, 其输出功率的波动将加剧一二次调频之间的冲突反调问题. 本文将反馈微分博弈应用于电力系统频率控制中, 建立起一二次调频的协同控制模型, 并考虑调速器死区、控制动作幅值限制、机组爬坡速率约束等工程实际因素, 用协同进化算法求得该模型的反馈纳什均衡解. 用仿真验证了该方法在满足各种工程因素下有效解决一二次调频的冲突反调问题, 充分挖掘了系统蕴藏的调频能力.

关键词: 一次调频; 二次调频; 反馈微分博弈; 协同控制; 协同进化

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Feedback differential game cooperative control for primary and secondary frequency control of power system

LU Run-ge¹, CHEN Hao-yong^{1†}, YE Rong², YANG Xin¹

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;

2. State Power Economic Research Institute of Fujian, Fuzhou Fujian 350012, China)

Abstract: In the integration of renewable energy such as wind power, the conflict between the primary and secondary frequency control in power system is severe because of the great uncertainties of the output power, which costs more wear and tear of the regulating units. We propose a new frequency control framework based on feedback differential game theory to solve this problem. As an example, a frequency control system model is set up with considering some complex constraints such as the dead zone of governor, the limit of controlling movement amplitude and the constraint of climbing speed of units. The proposed cooperative control strategy of this model is solved by a co-evolutionary algorithm. Simulation results show the new control strategy can relieve the conflict while meeting complicated engineering factors, and fully exploit the frequency control ability of the system.

Key words: primary frequency control; secondary frequency control; feedback differential games; cooperative control; co-evolutionary approach

1 引言(Introduction)

在电力系统中, 一次调频和二次调频(自动发电控制, automatic generation control, AGC)是维持频率稳定的主要手段. 两者的工作方式、响应周期、控制信号、控制目标均有较大差异, 其实时调整方向可能相反, 而它们又同时作用于机组有功出力, 故可能发生冲突反调现象, 造成调整动作次数的增多和调整量的浪费^[1]. 在大规模间歇式能源并网情况下, 新能源功率波动将导致系统频率和区域联络线交换功率更大的波动^[2], 大大增加冲突反调现象的发生概率.

一次调频与AGC缺乏协调, 势必削弱各自应有的作用, 不仅不利于系统频率恢复, 有时反而危害系统稳定运行^[3]. 文[4]提出在主要AGC机组的汽轮机数字电液控制系统(digital electric hydraulic control system, DEH)投入一次调频功能时, 在集散控制系统

(distributed control system, DCS)系统中也尽量考虑一次调频环节, 文[5]则验证了AGC延迟控制的协调效果, 文[6]根据云南电网实际特点重新划分了区域控制误差(area control error, ACE)控制区域并调整了各电厂一次调频动作值. 可惜这些方法不具备明确的最优性.

近年来“协同控制”思想被普遍应用于多主体控制系统中. 文[7]在无向拓扑结构上对多星系统相对轨道的协同控制问题进行了研究, 所设计控制率使得多星系统形成目标队形. 文[8]实现了汽车转向和防抱死制动的协同控制系统, 使汽车具有良好的转向控制性能, 又要有良好的制动性能. 而文[9]基于微分博弈理论实现了电力系统一次调频和二次调频的协同控制, 具有清晰的数学意义和良好的控制效果.

文[9]中作为将微分博弈理论引入电力系统频率

控制领域的初次尝试, 选用的博弈模型为开环的, 且忽略调速器死区、控制动作幅值限制、机组爬坡速率约束等工程因素, 建立的系统模型为线性的. 在电力系统中, 一次调频根据当前频率偏差做出响应, 二次调频根据当前ACE做出响应, 故应是一个反馈模型. 另外, 在考虑各类复杂约束后, 系统模型应是非线性的. 非线性模型的反馈博弈^[10-11]求解起来非常困难, 难以找到理论上的均衡解.

为了弥补传统数学方法的不足, 人工智能算法特别是协同进化算法在求解复杂微分博弈中得到了广泛应用^[12-13]. 协同进化算法可以处理多主体问题, 由于考虑了主体间的相互冲突和作用, 很好地符合博弈的自然演化过程, 是求解博弈问题的一个有效方法^[14].

本文在文[9]基础上, 建立起一二次调频的协同控制模型, 并考虑控制器死区、控制动作幅值限制、机组爬坡速率约束等工程因素, 用协同进化算法求得其反馈纳什均衡解(feedback Nash equilibrium solutions, FNES), 实现向电力系统实际应用的靠近.

2 考虑约束的频率协同控制模型(The model of frequency cooperative control with constraint)

一次调频以设备所在地频率偏差为信号, 经DEH系统或机械调速器改变机组有功出力; 二次调频以频率偏差和区域联络线交换功率偏差为信号, 经总站控制器计算后给出各AGC机组的有功调整量, 最后由各机组控制系统实现. 传统的一二次调频策略可表示为

$$\Delta P_r = -1/R \times \Delta f, \quad (1)$$

$$\Delta P_c = -K_i \times \int ACE dt - K_t \times ACE, \quad (2)$$

其中: R 为发电机组的调差系数, 取正值; Δf 为实际

频率和额定值的偏差量; K_i 和 K_t 为积分增益和比例增益, 取正值; ACE 为区域控制偏差, 计算公式为 $\Delta P_{tie} - 10B\Delta f$, ΔP_{tie} 为区域间联络线交换功率偏差, B 为频率响应系数, 取负值.

B 绝对值较小时易出现 Δf 与 ACE 异号的现象, 从而导致 Δp_r 和 Δp_c 的调节方向相反, 两者作用互相削弱, 造成无意义的设备磨损. 如图1所示, $t = 0$ 时刻某区域频率突然发生正跳变, 一次调频将迅速响应, 调速器减小进汽阀门的开度, 以减少输入功率, 于是 f 往小于60 Hz方向调节. 而此时 ACE 符号仍为正(由于 Δp_{tie} 为正), 从而导致一次调频调节方向与二次调频调节方向相反.

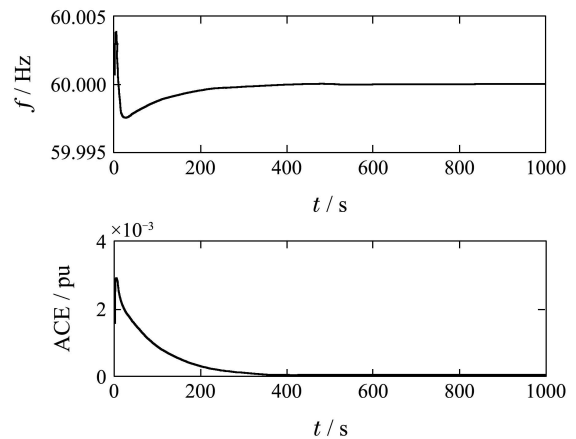


图1 冲突反调现象分析

Fig. 1 Analysis of the conflict between primary and secondary frequency control

为解决该问题, 本文在典型的IEEE两区域互联系统负荷频率控制模型^[15]基础上, 将区域1原有的一二次调频信号由反馈微分博弈计算出来的协调控制信号取代, 并考虑调速器死区、控制动作幅值限制、机组爬坡速率约束因素后, 协同控制模型如图2所示.

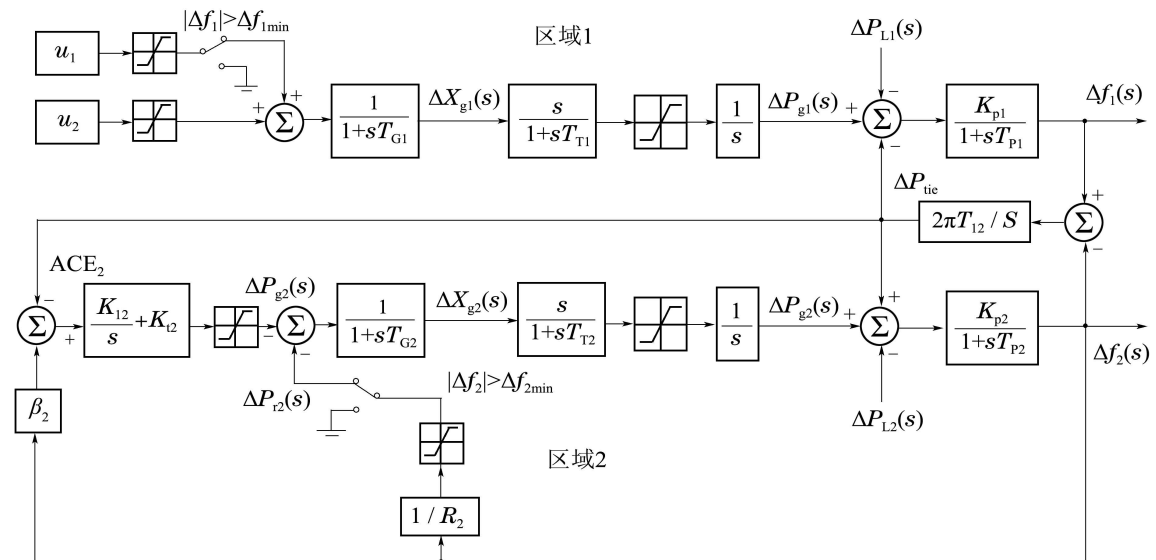


图2 考虑约束的两区域调频协同控制模型

Fig. 2 Two area power system with constraints model based on coordinated control

区域2采用传统的控制方式,其一二次调频信号由式(1)-(2)给出.

系统状态变量为

$$x(t) = [\Delta f_1 \ \Delta P_{g1} \ \Delta X_{g1} \ \Delta f_2 \ \Delta P_{g2} \ \Delta X_{g2} \ \Delta P_{c2} \ \Delta P_{tie}]^T,$$

负荷扰动项为 $\Delta P_L = [\Delta P_{L1} \ \Delta P_{L2}]$. ΔX_{g1} 和 ΔX_{g2} 是调速器阀门位置改变量, ΔP_{g1} 和 ΔP_{g2} 是机组出力变化量. 则系统状态方程为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_1 u_1(t) + B_2 u_2(t) + \Gamma \Delta P_L. \quad (3)$$

状态矩阵A形式为

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{p1}} & \frac{K_{p1}}{T_{p1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{p1}}{T_{p1}} \\ 0 & -\frac{1}{T_{T1}} & \frac{1}{T_{T1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{G1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{p2}} & \frac{K_{p2}}{T_{p2}} & 0 & 0 & \frac{K_{p2}}{T_{p2}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{T2}} & \frac{1}{T_{T2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_2 T_{G2}} & 0 & -\frac{1}{T_{G2}} & -\frac{1}{T_{G2}} & 0 \\ A_{71} & 0 & 0 & A_{74} & A_{75} & 0 & 0 & A_{78} \\ 2\pi T_{12} & 0 & 0 & -2\pi T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_{71} = -2\pi T_{12} K_{t2},$$

$$A_{74} = \frac{K_{i2}}{R_2} - \frac{K_{t2}}{R_2 T_{p2}} + 2\pi T_{12} K_{t2},$$

$$A_{75} = \frac{K_{t2} K_{p2}}{R_2 T_{p2}}, \quad A_{78} = \frac{K_{t2} K_{p2}}{R_2 T_{p2}} - K_{i2}.$$

输入矩阵 B_1, B_2 , 负荷扰动项系数矩阵形式为

$$B_1 = B_2 = [0 \ 0 \ \frac{1}{T_{G1}} \ \frac{1}{T_{G1}} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T,$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} -\frac{K_{p1}}{T_{p1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{p2}}{T_{p2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T.$$

一二次调频控制动作幅值约束为

$$u_1 = \begin{cases} u_{1 \max}, & u_1 > u_{1 \max}, \\ u_1, & u_{1 \min} \leq u_1 \leq u_{1 \max}, \\ u_{1 \min}, & u_1 < u_{1 \min}, \end{cases}$$

$$\Delta P_{r2} = \begin{cases} \Delta P_{r2 \max}, & \Delta P_{r2} > \Delta P_{r2 \max}, \\ \Delta P_{r2}, & \Delta P_{r2 \min} \leq \Delta P_{r2} \leq \Delta P_{r2 \max}, \\ \Delta P_{r2 \min}, & \Delta P_{r2} < \Delta P_{r2 \min}, \end{cases}$$

$$u_2 = \begin{cases} u_{2 \max}, & u_2 > u_{2 \max}, \\ u_2, & u_{2 \min} \leq u_2 \leq u_{2 \max}, \\ u_{2 \min}, & u_2 < u_{2 \min}, \end{cases}$$

$$\Delta P_{c2} = \begin{cases} \Delta P_{c2 \max}, & \Delta P_{c2} > \Delta P_{c2 \max}, \\ \Delta P_{c2}, & \Delta P_{c2 \min} \leq \Delta P_{c2} \leq \Delta P_{c2 \max}, \\ \Delta P_{c2 \min}, & \Delta P_{c2} < \Delta P_{c2 \min}, \end{cases}$$

一次调频考虑调速器死区后,控制量为

$$u_1 = \begin{cases} 0, & |\Delta f_1| < \Delta f_{1 \min}, \\ u_1, & |\Delta f_1| \geq \Delta f_{1 \min}, \end{cases}$$

$$\Delta P_{r2} = \begin{cases} 0, & |\Delta f_2| < \Delta f_{2 \min}, \\ \Delta P_{r2}, & |\Delta f_2| \geq \Delta f_{2 \min} \end{cases}$$

机组爬坡速率用机组出力的导数来近似,约束为

$$\Delta \dot{P}_{g1} = \begin{cases} \Delta \dot{P}_{g1 \max}, & \Delta \dot{P}_{g1} > \Delta \dot{P}_{g1 \max}, \\ \Delta \dot{P}_{g1}, & \Delta \dot{P}_{g1 \min} \leq \Delta \dot{P}_{g1} \leq \Delta \dot{P}_{g1 \max}, \\ \Delta \dot{P}_{g1 \min}, & \Delta \dot{P}_{g1} < \Delta \dot{P}_{g1 \min}, \end{cases}$$

$$\Delta \dot{P}_{g2} = \begin{cases} \Delta \dot{P}_{g2 \max}, & \Delta \dot{P}_{g2} > \Delta \dot{P}_{g2 \max}, \\ \Delta \dot{P}_{g2}, & \Delta \dot{P}_{g2 \min} \leq \Delta \dot{P}_{g2} \leq \Delta \dot{P}_{g2 \max}, \\ \Delta \dot{P}_{g2 \min}, & \Delta \dot{P}_{g2} < \Delta \dot{P}_{g2 \min}, \end{cases}$$

假设负荷作确定性阶跃变化,参考文[16]对负荷的处理方法,以扰动后稳态值作为参考点重新定义系统状态

$$x^1(t) = x(t) - x_{ss}(t), \quad u_i^1(t) = u_i(t) - u_{iss}(t),$$

$$\Delta P_L^1(t) = \Delta P_L(t) - \Delta P_{Lss}(t) = 0.$$

Q_i 与 R_i 取与文[9]相同的数值:

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix},$$

$$R_1 = 10, \quad R_2 = 1.$$

u_1 和 u_2 间的微分博弈模型最终表示如下:

$$\begin{cases} i = (1, 2), \\ J_i = \int_{t_0}^{\infty} \frac{1}{2} [x^{1T}(t) Q_i x^1(t) + \\ u_i^{1T}(t) R_i u_i^1(t)] dt, \\ \dot{x}^1(t) = Ax^1(t) + B_1 u_1^1(t) + B_2 u_2^1(t). \end{cases} \quad (4)$$

3 考虑约束的反馈博弈解法(Feedback game solution with constraint)

3.1 无约束反馈博弈及其均衡解(Feedback game and its equilibrium solution without constraint)

n 人非零和、非合作、确定性无限时长线性二次型微分博弈中, 每位参与者力图最小化各自的支付函数 J_i :

$$J_i = \int_{t_0}^{\infty} \frac{1}{2} [x^T(t) Q_i x(t) + u_i^T(t) R_i u_i(t)] dt, \quad (5)$$

其中: t_0 是博弈开始时间, Q_i 是对应于状态变量的权系数矩阵, R_i 为对应于控制变量的权系数矩阵, Q_i, R_i 为对称正定阵, $u_i(t)$ 对应参与者 i 的控制策略, $x(t)$ 为状态变量. 系统状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B_1 u_1(t) + \dots + \\ B_n u_n(t) = Ax(t) + BU(t), \\ x(t_0) = x_0, \end{cases} \quad (6)$$

A 为 m 阶状态矩阵, B_i 为 m 维列向量, B 为输入矩阵 $[B_1 \ B_2 \ \dots \ B_n]$.

若反馈博弈过程的信息集是无记忆、完全状态信息的, 则博弈各方的均衡策略为^[10]

$$u_i^*(t) = -R_i^{-1} B_i^T P_i x(t), \quad i = 1, \dots, n, \quad (7)$$

其中: (P_1, P_2, \dots, P_n) 为代数Riccati方程组的解, $P_i (i = 1, \dots, n)$ 皆为对称阵

$$\begin{aligned} & -P_i A - A^T P_i - Q_i - P_i B_i R_i^{-1} B_i^T P_i - \\ & \sum_{j=1}^N (-P_i B_j R_j^{-1} B_j^T P_j - P_j B_j R_j^{-1} B_j^T P_i) = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

该均衡策略是系统状态的线性组合形式, 具有重要的工程意义. 线性二次型开环微分博弈也可得到类似的结论, 仅是对应的Riccati方程组不同^[11]. 但开环信息结构意味着决策者拥有的信息集仅有初始状态与时间, 在时间起点决定整个博弈过程的策略, 这与电力系统调频的实际情况不符.

3.2 反馈纳什均衡的解耦(Decoupling of feedback Nash equilibrium)

以2人博弈为例, 参与者1与参与者2的纳什均衡策略分别为

$$u_1^* = -R_1^{-1} B_1^T P_1 x(t), \quad u_2^* = -R_2^{-1} B_2^T P_2 x(t). \quad (9)$$

参与者1均衡策略对应的Riccati方程为

$$\begin{aligned} & -P_1 A - A^T P_1 - Q_1 + P_1 B_1 R_1^{-1} B_1^T P_1 + \\ & P_1 B_2 R_2^{-1} B_2^T P_2 + P_2 B_2 R_2^{-1} B_2^T P_1 = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

固定参与者2策略为式(9)表示的均衡策略, 则若参与者1是明智的, 它将采取参与者2做出决策后己方的最优策略, 这相当于以下系统中求最优控制:

$$\dot{x}(t) = (A - B_2 R_2^{-1} B_2^T P_2) x(t) + B_1 u_1(t). \quad (11)$$

根据线性二次型最优控制理论, 参与者1此时的最优策略也为状态变量的线性反馈, 对应式(11)的Riccati方程:

$$\begin{aligned} & -P(A - B_2 R_2^{-1} B_2^T P_2) - (A - B_2 R_2^{-1} B_2^T P_2)^T P + \\ & P B_1 R_1^{-1} B_1^T P - Q_1 = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

对比式(10)和式(12), 可知 $P = P_1$. 同样, 对应于参与者2的分析, 也可得到相同的结论.

上面的分析提供了求解反馈纳什均衡的一个新思路: 轮流求解各方的最优反馈系数, 当 n 组最优反馈系数都迭代收敛时, 这些最优反馈系数决定的策略就形成了反馈纳什均衡策略. 该算法体现了“解耦”的思想. 算法流程如图3所示.

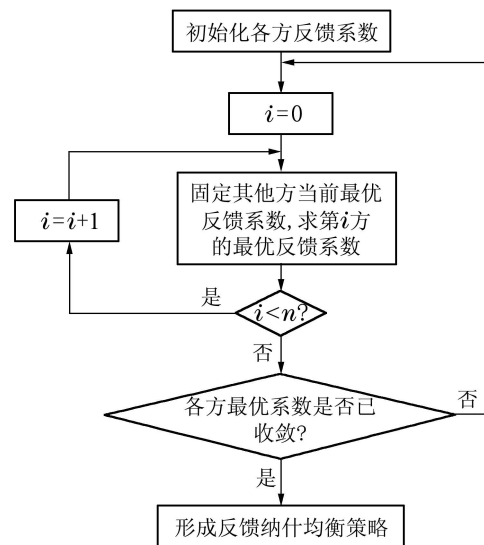


图3 反馈纳什均衡的解耦算法流程图

Fig. 3 the decoupling algorithm of feedback Nash equilibrium

3.3 求解有约束非线性反馈博弈的协同进化算法(The cooperative co-evolutionary algorithm for nonlinear feedback game with constraints)

工程实际中, 控制变量和状态变量往往有约束,

而实际系统模型也为非线性. 电力系统中, 一次调频和二次调频控制量有幅值限制, AGC机组有爬坡速率限制, 调速器死区限制使调频系统成为非线性系统. 这种情况下的最优控制率难以求得.

为解决有约束情况的最优控制问题, 文[17]提出一种多参数二次规划法(multi-parametric quadratic programming, mp-QP), 将问题归约为一个二次规划问题进行求解, 但求出的控制率为状态量的非线性反馈, 不利于工程实现. 文[18]通过“不亏损的S过程”方法将问题转化成无约束线性二次型最优控制问题, 但其增益矩阵的选择与初始状态有关, 且对某些初始状态可能出现奇异情况. 本文求取满足复杂约束下的最优饱和和线性反馈, 在控制率到达约束边界时, 将保持该最大值不变.

本文采用协同进化算法来求解有约束非线性系统的反馈纳什均衡. 协同进化算法的框架类似于多代理仿真, 符合博弈演化框架. 每个最优控制子问题采用遗传算法独立进化求解, 采取精英保留策略. 算法过程描述如下:

步骤 1 个参与者以状态变量的线性反馈系数 k 为变量, 即令参与者 i 的策略为 $u_i = k_i x$, 为每个参与者设置独立种群 pop_i ;

步骤 2 设当前系统进化至第 L 代, 各个种群在协同机制下进化, 式(2)描述的系统状态方程为联系各种群的枢纽, 将式(1)表达的支付函数的倒数 $1/J_i$ 作为种群中染色体适应度的评价函数. 以种群 i 为例, 选择将其他种群 $-i$ 在第 $L-1$ 代适应度最高的染色体所对应的策略作为代表, 形成代表策略集 k_{-i}^{reper} , 表示为 $k_{-i}^{\text{reper}} = \{k_1^{\text{best}}, \dots, k_{i-1}^{\text{best}}, k_{i+1}^{\text{best}}, \dots, k_n^{\text{best}}\}$. 将种群 i 中每一条染色体对应策略 k_i^s 与其他种群的策略集 k_{-i}^{reper} 代入式(2)求出系统状态轨迹, 将参与者 i 的支付函数倒数 $1/J_i$ 设置为该个体的适应度;

步骤 3 将种群 i 中适应度最高的个体 k_i^{best} 设为该种群的策略, 单独对种群 i 进行选择、交叉、变异;

步骤 4 重复步骤2-3, 使 n 个代表策略的种群都实现进化;

步骤 5 重复步骤2-4, 终止条件为策略收敛或 L 到达设定的进化代数.

迭代中策略的选择有可能使系统无法收敛, 如频率最终无法收敛至设定值. 本文采用惩罚函数法来处理, 即当系统不收敛时, 适应度设置为 $1/(J_i + M)$, 惩罚因子 M 为一常数, 取值远大于收敛情况下的 J_i .

4 算例和分析(Examples and analysis)

以图2表示的模型作为仿真研究对象, 设两区域负荷均发生阶跃变化:

$$\Delta P_{L1} = -0.005 \text{ pu}, \Delta P_{L2} = 0.01 \text{ pu}.$$

系统额定频率60 Hz, 相关参数如下:

$$T_{G1} = T_{G2} = 0.08 \text{ s}, T_{T1} = T_{T2} = 0.3 \text{ s},$$

$$T_{P1} = T_{P2} = 20 \text{ s}, K_{P1} = K_{P2} = 12 \text{ Hz/pu},$$

$$\alpha_{12} = -1, \beta_1 = \beta_2 = 0.45 \text{ pu/Hz}, T_{12} = 0.00545.$$

分别用协同进化算法求解不考虑复杂约束及考虑复杂约束的两区域调频模型. 协同进化算法参数设置为: 两个种群单独采用标准遗传算法进行演化, 种群中个体总数为200, 采用轮盘赌法进行个体选择, 交叉率为0.95, 突变率为0.1, 采用精英保留策略. 调频模型中状态变量为 8×1 维, 故每个个体代表的反馈系数为8维向量, 每个元素用16位二进制字符进行编码. 算法收敛判断条件为: 两个种群的策略在进化过程中连续5代保持不变. 对使系统不收敛的策略采用惩罚函数法设置其适应度, 惩罚常数 $M = 100$.

4.1 不考虑复杂约束的情况(The situation without complex constraints)

对第1节描述的模型, 不考虑调速器死区、控制动作幅值限制、机组爬坡速率约束, 采用以下3种方法进行求解.

方法 1 求解反馈纳什均衡的一般解法, 先求解式(8)得到 (P_1, P_2) , 代入式(7)求得反馈纳什均衡策略, 在均衡点处一二次调频控制量的反馈系数为 $k_i = -R_i^{-1} B_i^T P_i$, $i = 1, 2$.

方法 2 采用第2.2节和图3描述的算法, 将求解反馈纳什均衡的问题解耦为分别对应于一二次调频的两个最优控制子问题. 当算法收敛时, 即可求得双方在均衡点处的反馈系数.

方法 3 采用第2.3节描述的协同进化算法进行求解. 本文在MATLAB平台上实现算法, 并用Simulink搭建起一二次调频信号间的协同控制模型.

3种方法解得的均衡结果如表1所示, 结果保留5位有效数字. 对比方法1和方法2的结果可知, 方法2成功地求解了反馈纳什均衡. 方法3是通过智能算法得到的解, 离精确解有较小误差, 但它们的性能指标值已非常接近. 3种方法求得的策略有着相似的控制效果.

表 1 3种方法的求解结果

Table 1 Results of the three different methods

方法	一次调频控制量反馈系数	二次调频控制量反馈系数	J_1^*	J_2^*
1	(-0.046029, -0.0074587, -0.0019117, 0.0030455, -0.00023270, -0.000058712, -0.010240, 0.037285)	(-0.89067, -0.15115, -0.039453, -0.078133, 0.0050623, 0.0013417, 0.23648, -0.0035767)	0.00021205	0.0014905
2	(-0.046029, -0.0074587, -0.0019117, 0.0030455, -0.00023270, -0.000058712, -0.010240, 0.037285)	(-0.89067, -0.15115, -0.039453, -0.078133, 0.0050623, 0.0013417, 0.23648, -0.0035767)	0.00021205	0.0014905
3	(-0.041675, -0.0073640, -0.0017731, 0.0060600, -0.00041303, -0.000018701, -0.014360, 0.037379)	(-0.85280, -0.097627, -0.097494, -0.035012, 0.0070857, 0.0094195, 0.29250, -0.0031205)	0.00021324	0.0014967

以区域1机组出力变化量为例, 通过仿真分别画出3种策略控制下 ΔP_{g1} 的变化曲线, 如图4所示, 3条曲线几乎重合. 从而证明方法3求得的是近似的反馈纳什均衡策略.

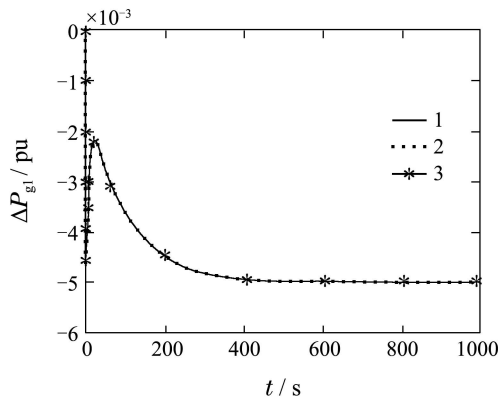


图 4 3种策略控制下 ΔP_{g1} 的变化曲线

Fig. 4 Curves of ΔP_{g1} under the control of three strategies

对方法3的求解性能进行分析: 对该方法运算30次, 认为在最大迭代次数后仍收敛不到均衡解, 则求解失败. 统计失败次数, 及收敛情况下的平均迭代次数, 如表2所示.

表 2 方法3求解性能分析

Table 2 Performance of Scheme 3

运算次数	收敛迭代次数	失败次数
30	27	2

4.2 考虑复杂约束的情况(The situation with complex constraints)

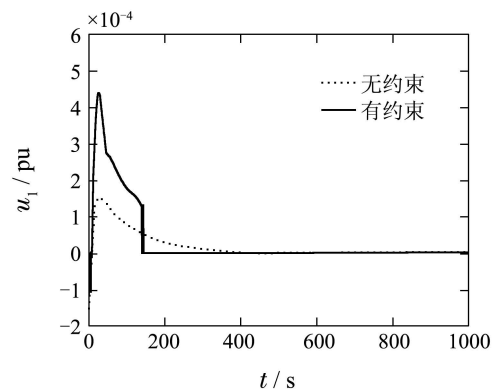
对第1节描述的模型, 考虑调速器死区、控制动作幅值限制、机组爬坡速率约束, 各工程因素参数为: 区域1一次调频、二次调频控制量幅值约束 $u_{1\max} = 3 \times 10^{-3}$ pu, $u_{1\min} = -3 \times 10^{-3}$ pu, $u_{2\max} = 2 \times 10^{-3}$ pu, $u_{2\min} = -2 \times 10^{-3}$ pu, 调速器死区阈值 $\Delta f_{1\min} = 0.001$ Hz. 区域2一次调频、二次调频控

制量幅值约束 $\Delta P_{r2\max} = 3 \times 10^{-3}$ pu, $\Delta P_{r2\min} = -3 \times 10^{-3}$ pu, $\Delta P_{c2\max} = 2 \times 10^{-3}$ pu, $\Delta P_{c2\min} = -2 \times 10^{-3}$ pu, 调速器死区阈值 $\Delta f_{2\min} = 0.001$ Hz, 两区域机组的爬坡速率最大值为 10^{-2} pu, 最小值为 -10^{-2} pu.

采用协同进化算法进行求解, 算法最终收敛于反馈纳什均衡策略 $[u_1^*, u_2^*]$:

$$\begin{aligned}
 u_1^* = & -0.0999999x_1^* - 0.0098402x_2^* - 0.0097834x_3^* + \\
 & 5.3597 \times 10^{-5}x_4^* - 0.0008176x_5^* - \\
 & 1.5239 \times 10^{-5}x_6^* - 1.03 \times 10^{-5}x_7^* + 0.046328x_8^*, \\
 u_2^* = & -0.992x_1^* - 0.3499x_2^* - 0.036833x_3^* - \\
 & 0.094843x_4^* + 0.0029516x_5^* + 0.0057701x_6^* + \\
 & 0.19183x_7^* - 0.0078319x_8^*.
 \end{aligned}$$

通过Simulink仿真对有无复杂约束两种情况下的控制效果进行比较. 图5中, 虚线表示无约束情况, 实线表示有约束情况. 一二次调频信号在整个暂态过程中变化趋势保持相同, 从而在考虑各种复杂约束下有效避免了冲突反调问题. 为满足约束, 控制以一定的动态特性作为代价.



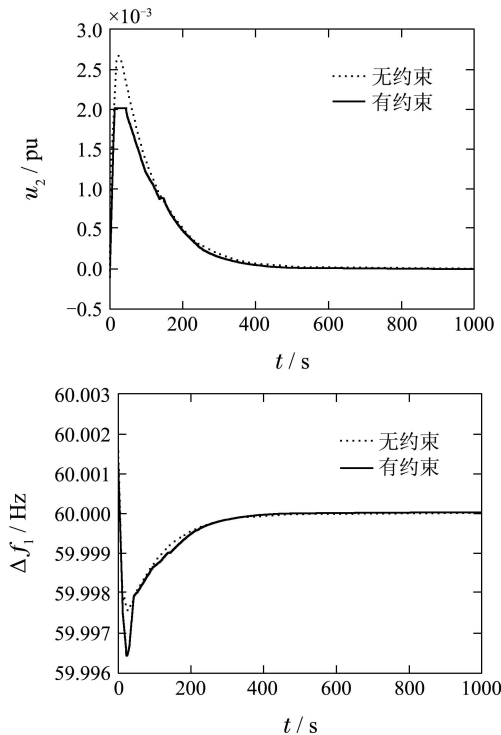
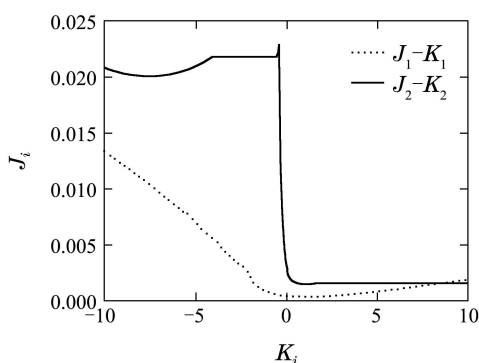


图5 两种情况下的仿真结果

Fig. 5 Simulation results under the two situations

更重要的是,一二次调频在策略 $[u_1^*, u_2^*]$ 达到了反馈纳什均衡,即一二次调频单独改变策略将导致己方的收益下降,从而两者间的博弈达到一个稳定的局势,彰显策略的协同控制性能^[10].下面通过仿真验证,令 $u'_1 = k_1 u_1^*$, $u'_2 = k_2 u_2^*$.

令 k_1 在 $[-10, 10]$ 变化,以 $[u_1^*, u_2^*]$ 为控制信号仿真,则支付函数 J_1 在 $k_1 = 1$ 达极值;令 k_2 在 $[-10, 10]$ 变化,以 $[u_1^*, u_2^*]$ 为控制信号仿真,则支付函数 J_2 在 $k_2 = 1$ 达极值,如图6.更一般地,固定 $u'_2 = u_2^*$ 不变,令 k_1 的8个元素在 $[-10, 10]$ 内随机取值1000次,仿真得到支付函数 J_1 值总比 $u'_1 = u_1^*$ 时大,固定 $u'_1 = u_1^*$ 不变,令 k_2 中8个元素在 $[-10, 10]$ 内随机取值1000次,仿真得到支付函数 J_2 值总比 $u'_2 = u_2^*$ 时大.由此证明了协同进化算法成功地求取出问题的反馈纳什均衡.

图6 $J_i (i = 1, 2)$ 的变化曲线Fig. 6 Curves of J_i versus $k_i (i = 1, 2)$

5 结语(Conclusions)

本文将反馈微分博弈应用于解决电力系统一二次调频间的冲突反调问题中,符合一二次调频信号对当前系统状态量进行反馈的实际.当考虑调速器死区、控制信号幅值限制、机组爬坡速率约束等工程因素的影响时,调频系统为非线性且控制量和状态量有约束的,传统算法难以求解.本文用协同进化算法成功求解了该问题,所得的控制策略达到了反馈纳什均衡,实现了一二次调频的协同控制.

参考文献(References):

- [1] 文学,王坚.南方电网调频模式现状及未来调频模式研究[J].电网技术,2010,34(12):119-123.
(WEN Xue, WANG Jian. Research on current situation and its future of frequency regulation mode of China southern power grid [J]. *Power System Technology*, 2010, 34(12): 119-113.)
- [2] LALOR G, MULLANCE A, OMALLY M. Frequency control and wind turbine technologies [J]. *IEEE Transaction on Power System*, 2005, 20(4): 1905-1913.
- [3] 吴红,王玮,黄文伟,等.自动发电控制在贵州电网中的应用[J].电网技术,2002,26(1):73-75.
(WU Hong, WANG Wei, HUANG Wenwei, et al. Application of automatic generation control in Guizhou power system [J]. *Power System Technology*, 2002, 26(1): 73-75.)
- [4] 唐跃中,张王俊,张健,等.基于CPS的AGC控制策略研究[J].电网技术,2004,28(21):75-79.
(TANG Yuezhong, ZHANG Wangjun, ZHANG Jian, et al. Research on control performance standard based control strategy for AGC [J]. *Power System Technology*, 2004, 28(21): 75-79.)
- [5] 田涛,张雷,唐国平.葛洲坝水电厂AGC调节与机组一次调频配合缺陷的解决方法[J].水电自动化与大坝监测,2009,33(6):34-39.
(TIAN Tao, ZHANG Lei, TANG Guoping. The coordinate flaw solution of Gezhouba hydropower plant AGC and primary frequency modulation [J]. *Hydropower Automation and Dam Monitoring*, 2009, 33(6): 34-39.)
- [6] 王珍意,谢一工,尹成全,等.对CPS标准下AGC与一次调频配合问题的研究[J].电力系统保护与控制,2009,37(19):22-25.
(WANG Zhenyi, XIE Yigong, YIN Chengquan, et al. Research on the coordination of AGC and primary frequency regulation based on CPS [J]. *Power System Protection and Control*, 2009, 37(19): 22-25.)
- [7] 李果,刘华伟,王旭.汽车转向/防抱死制动协同控制[J].控制理论与应用,2010,27(12):1700-1704.
(LI Guo, LIU Huawei, WANG Xu. Cooperative controller for vehicle steering/antilock braking system [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(12): 1700-1704.)
- [8] 马广富,梅杰.多星系统相对轨道的自适应协同控制[J].控制理论与应用,2011,28(6):781-786.
(MA Guangfu, MEI Jie. Adaptive cooperative control for relative orbits of multi-satellite systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(6): 781-786.)
- [9] 叶荣,陈皓勇,娄二军.基于微分博弈理论的频率协调控制方法[J].电力系统自动化,2011,35(20):41-46.
(YE Rong, CHEN Haoyong, LOU Erjun. A Coordinated frequency control method based on differential game theory [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(20): 41-46.)

- [10] BASAR T, OLSDER G J. *Random Process* [M]. New York: Academic Press, 1999.
- [11] STARR A W, HO Y C. Nonzero-sum differential games [J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 1969, 3(3): 184 – 206.
- [12] MILLER G F, CLIFF D. *Co-evolution of pursuit and evasion i: biological and game-theoretic foundation, technical report CSR311* [R]. Brighton, UK: University of Sussex, 1994.
- [13] 陈迎春, 齐欢. 基于协同进化的平面追逃对策研究 [J]. *控制与决策*, 2009, 24(3): 383 – 387.
(CHEN Yingchun, QI Huan. Co-evolutionary pursuit-evasion game on a plane [J]. *Control and Decision*. 2009, 24(3): 383 – 387.)
- [14] 陈皓勇, 王锡凡, 别朝红, 等. 协同进化算法及其在电力系统中的应用前景 [J]. *电力系统自动化*, 2003, 27(23): 94 – 100.
(CHEN Haoyong, WANG Xifan, BIE Zhaohong, et al. Cooperative coevolutionary approaches and their potential applications in power systems [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(23): 94 – 100.)
- [15] IMTHIAS AHAMED T P, NAGENDRA RAO P S, SASTY P S. A reinforcement learning approach to automatic generation control [J]. *Electric Power Systems Research*, 2002, 63(1): 9 – 26.
- [16] FOSHA C E, ELGERD O I. The megawatt frequency control problem: a new approach via optimal control theory [J]. *IEEE Trans Power Apparatus and System*, 1970, 89(4): 563 – 577.
- [17] ALBERTO B, MANFRED M, VIVEK D, et al. The explicit linear quadratic regulator for constrained systems [J]. *Automatica*, 2002, 3(20): 1 – 18.
- [18] 陈阳舟. 控制能量有界的时不变系统线性二次型最优控制 [J]. *控制理论与应用*, 1998, 15(3): 451 – 454.
(CHEN Yangzhou. Optimal control for the time-invariant linear-quadratic problem with energy constraint on control input [J]. *Control Theory & Applications*. 1998, 15(3): 451 – 454.)

作者简介:

卢润戈 (1991–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为电力系统优化运行与控制等, E-mail: lurunge@foxmail.com;

陈皓勇 (1975–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为电力系统分析运行与控制、新能源并网技术、智能电网、电力市场等, E-mail: eehychen@scut.edu.cn;

叶荣 (1985–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为电力系统优化运行与控制、新能源并网相关技术等, E-mail: yerong.cp@gmail.com;

杨鑫 (1990–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为电力系统优化运行与控制等, E-mail: yxcome111@163.com.