基于微分博弈理论的频率协调控制方法

叶 荣，陈皓勇，娄二军
（华南理工大学电力学院，广东省广州市 510640）

摘要：通过引入微分博弈理论，为解决电力系统中众多控制器动态协调的难题，提出了一种新的解决思路。以一次、二次调频间的协调为例，建立其微分博弈模型并求得开环纳什均衡解。在 2 区域互联系统上的仿真表明，所述方法能显著缓解一次、二次调频间的冲突反调现象，证明了微分博弈理论在电力系统协调控制领域应用的可行性和有效性。

关键词：微分博弈理论；协调控制；一次调频；二次调频

0 引言

电力系统包含大量控制器，如调频装置、调压装置、电力系统稳定器(PSS)和柔性交流输电系统(FACTS)装置等。随着系统不断大型化、复杂化和智能化，更多新型控制器将被引入。这些控制器作用于不同层面，控制目标相互独立，甚至存在冲突。制定控制策略时若不进行协调，则可能导致各方相互牵制、抵消，控制效果背离目标。因此，分析客观存在的博弈对局关系，研究协调策略使各方利益达到均衡点，是有效发挥各控制器作用的前提。然而，在电力系统中应用广泛的经典控制、自适应控制和最优控制等理论，本质上都属于单主体控制方法，只能通过多目标加权将协调控制转化为单目标控制，无法规避权系数确定的难题。

微分博弈理论是求解协调控制问题的崭新思路[1]。随着微分博弈种类的拓展和解法的完善[2-5]，其被成功应用于经济学、管理学、环境科学等领域[6-9]，且应用范围不断扩大。微分博弈指的是在时间连续的系统内，多个参与者进行持续的博弈，力图最优化各自独立、冲突的目标，最终获得各参与者随时间演变的策略并达到纳什均衡，即任何参与者因不会获益更多，都没有单独改变策略的意愿。由于能考虑时间动态，微分博弈成为最自然的研究多主体动态协调决策问题的方法[9]。不同于传统的单主体控制方法，它将每个控制器都视为独立决策主体，通过其间的自组织竞争达到均衡，无需确定权系数，且因充分体现了个体理性而更贴近于多控制器协调问题的本质。

收稿日期：2011-01-11；修回日期：2011-06-27。
教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET080207)；教育部科学技术研究重点资助项目(109128)。

一次、二次调频都投入运行时，有时会出现相互间冲突、反调的现象[10-12]。一些研究根据工程经验从二次调频的角度单方面提出了协调方案[10-13]，但都未能同时考虑一次调频的动作方式，部分原因正是缺乏多主体协调控制问题的有力研究工具。本文基于微分博弈理论建立了一次、二次调频的协调控制问题模型，并求得开环纳什均衡解，提供了数学意义清晰且双方均乐意接受的协调控制方案，同时搭建起一座连接微分博弈理论和电力系统协调控制领域的桥梁。

1 线性二次型微分博弈的开环均衡

1.1 微分博弈类型的选择

微分博弈可按参与者是否有合作动机分为合作与非合作微分博弈；按信息结构分为确定性与随机性微分博弈；按系统模型分为线性与非线性微分博弈。微分博弈的解法可分为开环纳什均衡、闭环纳什均衡和反馈纳什均衡。

一次、二次调频的协调问题本质上是合作、随机、非线性微分博弈。但该类型博弈的理论研究尚不成熟，求解能力有限。尤其是非线性特征将使微分博弈求解时遭遇非线性偏微分方程组的两点边值问题，此问题通常没有解析解，而数值解的求解时间又长于电力系统多数控制器的指令下达周期。目前最实用的是非合作、确定、线性二次型无限时长微分博弈，它要求系统状态方程是线性的，收益函数是状态量和控制量的二次型无限积分形式。这类微分博弈得到了较充分的研究[2-4]，其求解过程可避开偏微分方程组的两点边值问题，取而代之的是易求解的代数 Riccati 方程，且求得的均衡控制策略是系统状态量线性组合形式，易于工程实现。

解法方面，开环纳什均衡解意味着参与者在博弈的时间起点就决定策略，而后不再改变，它不能保

证均衡的时间一致性，系统发生意外扰动时鲁棒性较差，但其相关理论发展较完善，比闭环均衡和反馈均衡更易求得[5]。为确保问题可解，本文先将研究最成熟的非合作、确定、线性二次型无限时长微分博弈的开环纳什均衡解法引入电力系统。

1.2　微分博弈模型表达

在 n 人非零和、非合作、确定、线性二次型无限时长的微分博弈中，每位参与者 i 都力图使各自的支付函数 J_i 最小化：

$$\min J_i=\int_{t_0}^{\infty}\frac{1}{2}(\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{Q}_i\boldsymbol{x}(t)+\boldsymbol{u}_i^{\mathrm{T}}(t)R_i\boldsymbol{u}_i(t))\mathrm{d}t \tag{1}$$

式中：$i=1,2,\cdots,n$；t_0 为博弈开始时间；$\boldsymbol{Q}_i$ 为对称权系数矩阵；R_i 为大于0的权系数；$\boldsymbol{u}_i(t)$为参与者i的控制策略；$\boldsymbol{x}(t)$为状态向量，取决于以下 m 阶线性系统，

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{x}}(t)&=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}(t),\boldsymbol{u}_1(t),\boldsymbol{u}_2(t),\cdots,\boldsymbol{u}_n(t),t)=\\&\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t)+\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{u}_1(t)+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{u}_2(t)+\cdots+\\&\boldsymbol{B}_n\boldsymbol{u}_n(t)=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{U}(t)\end{aligned} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{x}(t_0)=\boldsymbol{x}_0 \tag{3}$$

$\boldsymbol{A}$ 为 m 阶方阵；$\boldsymbol{B}_i$ 为 m 维列向量；$\boldsymbol{B}$ 为 $m\times n$ 阶矩阵，$\boldsymbol{B}=[\boldsymbol{B}_1\quad \boldsymbol{B}_2\quad \cdots\quad \boldsymbol{B}_n]$；$\boldsymbol{U}(t)$为由 $\boldsymbol{u}_i(t)$组成的 n 维列向量；$\boldsymbol{x}_0$ 为初始状态向量。

1.3　开环均衡解法

设每位参与者 i 的汉密尔顿函数为：

$$\begin{aligned}&H_i(\boldsymbol{x}(t),\boldsymbol{u}_1(t),\boldsymbol{u}_2(t),\cdots,\boldsymbol{u}_n(t),\boldsymbol{\lambda}_i(t))=\\&\frac{1}{2}\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{Q}_i\boldsymbol{x}(t)+\frac{1}{2}\boldsymbol{u}_i^{\mathrm{T}}(t)R_i\boldsymbol{u}_i(t)+\\&\boldsymbol{\lambda}_i^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}(t),\boldsymbol{u}_1(t),\boldsymbol{u}_2(t),\cdots,\boldsymbol{u}_n(t))\end{aligned} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{\lambda}_i(t)$为伴随向量。

则$[\boldsymbol{u}_1^*(t),\boldsymbol{u}_2^*(t),\cdots,\boldsymbol{u}_n^*(t)]$是微分博弈开环均衡解的充要条件是满足以下方程组[5]：

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{\lambda}}_i(t)=-\dfrac{\partial H_i}{\partial \boldsymbol{x}(t)}=-\boldsymbol{Q}\boldsymbol{x}(t)-\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}_i(t)\\ \dot{\boldsymbol{x}}(t)=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}(t),\boldsymbol{u}_1(t),\boldsymbol{u}_2(t),\cdots,\boldsymbol{u}_n(t),t)=\\ \qquad \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{U}(t)\\ \dfrac{\partial H_i(\boldsymbol{x}(t),\boldsymbol{u}_1^*(t),\boldsymbol{u}_2^*(t),\cdots,\boldsymbol{u}_n^*(t),\boldsymbol{\lambda}_i(t),t_i)}{\partial \boldsymbol{u}_i(t)}=\\ \qquad R_i\boldsymbol{u}_i(t)+\boldsymbol{B}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}_i(t)=\boldsymbol{0}\end{cases} \tag{5}$$

式中：$i=1,2,\cdots,n$。

解式(5)可得 $\boldsymbol{u}_i^*(t)=-R_i^{-1}\boldsymbol{B}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_i\boldsymbol{x}(t)$，其中 $\boldsymbol{P}_i$ 是代数 Riccati 方程组的解，Riccati 方程组($i=1,2,\cdots,n$)如下式所示：

$$\begin{aligned}&\boldsymbol{P}_i\boldsymbol{A}+\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_i-\boldsymbol{P}_i\boldsymbol{B}R_i^{-1}\boldsymbol{B}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_1-\boldsymbol{P}_i\boldsymbol{B}R_i^{-1}\boldsymbol{B}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_2-\cdots-\\&\boldsymbol{P}_i\boldsymbol{B}R_i^{-1}\boldsymbol{B}_n^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_n+\boldsymbol{Q}_i=\boldsymbol{0}\end{aligned} \tag{6}$$

2　频率协调控制及其微分博弈模型

2.1　一次、二次调频的反调问题

一次调频的目标是对负荷变化作出快速响应，缩小频率和额定值的偏差，并希望控制代价(即调速器和原动机阀门动作量)尽量小。二次调频的目标是调整原动机功率的基准值，实现频率无差调节，并使区域间联络线交换功率贴近额定值，同时要尽量避免连续反调或超调现象，减少机组磨损。

经典的2区域互联系统频率控制模型如图1所示。

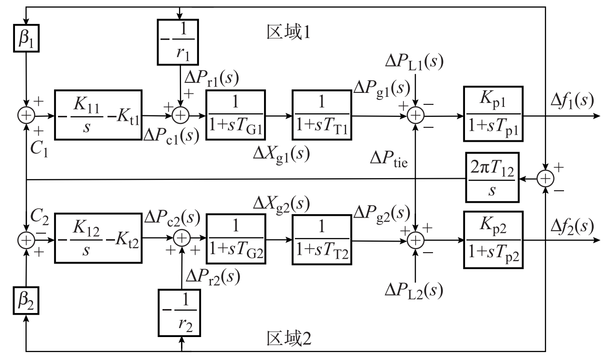

图1　传统2区域互联系统线性模型

Fig. 1　Traditional linear model of two-area power system

图1中，β_1 和 β_2 为频率偏差系数；T_{G1} 和 T_{G2} 为调整器时间常数；T_{T1} 和 T_{T2} 为汽容时间常数；T_{p1} 和 T_{p2} 为惯性时间常数；K_{p1} 和 K_{p2} 为负荷频率调节效应系数；T_{12} 为联络线同步系数；ΔP_{L1} 和 ΔP_{L2} 分别为区域1和区域2的负荷变化；r_1 和 r_2 为发电机组的调差系数；ΔX_{g1} 和 ΔX_{g2} 为调整器阀门位置改变量；ΔP_{g1} 和 ΔP_{g2} 为原动机出力变化量；C_1 和 C_2 分别为区域1和区域2控制偏差。

设2区域参数相同，容量换算系数 $\alpha_{12}=-1$，一次、二次调频有功功率调节信号分别为：

$$\Delta P_{ri}=-\frac{1}{r_i}\Delta f_i \tag{7}$$

$$\Delta P_{ci}=-K_{1i}\int C_i\mathrm{d}t-K_{ti}C_i \tag{8}$$

式中：$i=1,2$；r_i 为发电机组的调差系数，取正值；Δf_i 为实际频率与额定值的偏差量；K_{1i} 和 K_{ti} 分别为积分增益和比例增益，取正值；C_i 为区域控制偏差，$C_i=\Delta P_{tie}-10b_i\Delta f_i$；$\Delta P_{tie}$ 为区域间联络线交换功率偏差；b_i 为频率响应系数，取负值。

跨区域大容量输电线路的增加使区域电网间电气联系愈加紧密，而控制性能标准(CPS)的引入鼓励紧急情况下区域间相互支援。这些因素增大了 Δf_i 与 ΔP_{tie} 异号的概率，在 b_i 绝对值较小时易出现 Δf_i 与 C_i 异号的现象，从而导致 ΔP_{ri} 的符号(即一

次调频的调节方向)与 ΔP_{ci} 的变化方向(即二次调频的调节方向)相反,使得一次、二次调频动作会互相削弱对方的作用,造成无意义的设备磨损。一些研究提出在 Δf_i 与 C_i 异号时闭锁二次调频或其中的比例分量[10],这在一定程度上减轻了反调现象,但对一次调频的动作方式研究较少。一次、二次调频的目标相异而复杂,二者协调问题难以通过基于多目标加权的单主体控制方法解决,将其视为多决策主体间的博弈并用微分博弈理论求解是一个崭新而合理的思路。

2.2 一次、二次调频的微分博弈模型

在图 1 中的区域 1 使用微分博弈理论求取一次、二次调频的控制信号 u_1 和 u_2 以代替原有的控制环,见图 2。为了简化说明微分博弈的应用过程,本文假设负荷作确定性阶跃变化,且不考虑控制器动作死区及机组爬坡速率约束。

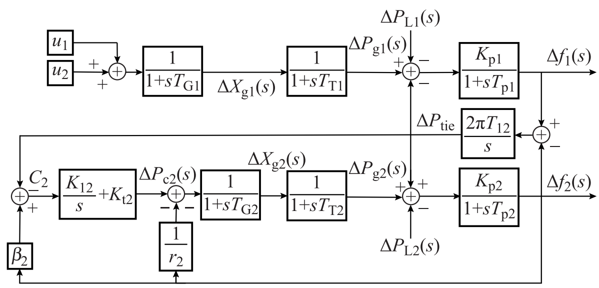

图 2 基于微分博弈解法的 2 区域互联系统模型

Fig. 2 Linear model of two-area power system based on differential games

系统状态方程为:

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t)=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t)+\boldsymbol{B}_1u_1(t)+\boldsymbol{B}_2u_2(t)+\boldsymbol{\Gamma}\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{L}} \tag{9}$$

式中:

$$\boldsymbol{x}(t)=\begin{bmatrix}\Delta f_1 & \Delta P_{g1} & \Delta X_{g1} & \Delta f_2 & \Delta P_{g2} & \Delta X_{g2} & \Delta P_{c2} & \Delta P_{tie}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}
\frac{-1}{T_{p1}} & \frac{K_{p1}}{T_{p1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-K_{p1}}{T_{p1}}\\
0 & \frac{-1}{T_{T1}} & \frac{1}{T_{T1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & \frac{-1}{T_{G1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{p2}} & \frac{K_{p2}}{T_{p2}} & 0 & 0 & \frac{K_{p2}}{T_{p2}}\\
0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{T2}} & \frac{1}{T_{T2}} & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & \frac{-1}{r_2T_{G2}} & 0 & \frac{-1}{T_{G2}} & \frac{-1}{T_{G2}} & 0\\
A_{71} & 0 & 0 & A_{74} & A_{75} & 0 & 0 & A_{78}\\
2\pi T_{12} & 0 & 0 & -2\pi T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0
\end{bmatrix}$$

$$A_{71}=-2\pi T_{12}K_{t2}\quad A_{74}=\frac{K_{i2}}{r_2}-\frac{K_{t2}}{r_2T_{p2}}+2\pi T_{12}K_{t2}$$

$$A_{75}=\frac{K_{t2}K_{p2}}{R_2T_{p2}}\quad A_{78}=\frac{K_{t2}K_{p2}}{r_2T_{p2}}-K_{i2}$$

$$\boldsymbol{B}_1=\boldsymbol{B}_2=\begin{bmatrix}0 & 0 & \frac{1}{T_{G1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

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

$$\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{L}}=\begin{bmatrix}\Delta P_{L1} & \Delta P_{L2}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

式(9)比式(2)所示的微分博弈模型的一般形式多出了负荷扰动项 $\boldsymbol{\Gamma}\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{L}}$。考虑随机负荷变化时,基于最优控制理论的自动发电控制(AGC)策略研究提出了许多可借鉴的解决办法,如文献[14]采用卡尔曼滤波器估计负荷扰动,文献[15]通过对控制目标的修改,巧妙地规避此问题。更有参考价值的是,文献[5,8]研究了随机微分博弈模型的解法。但本文假设负荷作确定性阶跃变化,故可采用文献[16]的方法,以扰动后的稳态值作为参考点重新定义系统状态:

$$\begin{cases}\boldsymbol{x}_{\mathrm{n}}(t)=\boldsymbol{x}(t)-\boldsymbol{x}_{\mathrm{ss}}(t)\\ u_{in}(t)=u_i(t)-u_{iss}(t)\\ \Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{Ln}}(t)=\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{L}}(t)-\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{Lss}}(t)=\boldsymbol{0}\end{cases} \tag{10}$$

式中:$i=1,2$;下标 ss 表示稳态值。

从而 u_1 和 u_2 间的微分博弈模型最终表示如下($i=1,2$):

$$\begin{cases}\min\ J_i=\int_{t_0}^{\infty}\frac{1}{2}(\boldsymbol{x}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{Q}_i\boldsymbol{x}_{\mathrm{n}}(t)+u_{in}(t)R_iu_{in}(t))\mathrm{d}t\\ \dot{\boldsymbol{x}}_{\mathrm{n}}(t)=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_{\mathrm{n}}(t)+\boldsymbol{B}_1u_{1\mathrm{n}}(t)+\boldsymbol{B}_2u_{2\mathrm{n}}(t)\end{cases} \tag{11}$$

$\boldsymbol{A}$,$\boldsymbol{B}_1$,$\boldsymbol{B}_2$ 保持不变,$\boldsymbol{Q}_i$ 和 R_i 取值如下:

$$\boldsymbol{Q}_1=\begin{bmatrix}1&0&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&0&0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{Q}_2=\begin{bmatrix}1&0&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&1&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&0&2\end{bmatrix}$$

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

由 $\Delta f_{1ss}(t)=\Delta f_{2ss}(t)=\Delta u_{1ss}(t)=\Delta P_{tiess}(t)=0$,可知

$$J_1=\int_{t_0}^{\infty}\frac{1}{2}(\Delta f_{1n}^2(t)+10u_{1n}^2(t))\mathrm{d}t=\int_{t_0}^{\infty}\frac{1}{2}(\Delta f_1^2(t)+10u_1^2(t))\mathrm{d}t$$

$$J_2=\int_{t_0}^{\infty}\frac{1}{2}(\Delta f_{1n}^2(t)+\Delta f_{2n}^2(t)+2\Delta P_{tien}^2(t)+u_{2n}^2(t))\mathrm{d}t=\int_{t_0}^{\infty}\frac{1}{2}(\Delta f_1^2(t)+\Delta f_2^2(t)+2\Delta P_{tie}^2(t)+u_{2n}^2(t))\mathrm{d}t$$

博弈双方可根据自己的偏好决定矩阵 $\boldsymbol{Q}_i$ 和 R_i 的取值,在本文的取值下,双方的支付函数意为:u_1 追求 f_1 贴近额定值且调速器阀门动作量尽量小;u_2 追求 f_1 和 P_{tie} 贴近额定值,有功功率基准值设定尽量精确跟踪负荷变化,并适当支援区域 2。

3　算例与分析

3.1　与经典控制理论的比较

以 IEEE 2 区域互联系统负荷频率控制模型[17]作为仿真研究对象,结构框图如图 1 所示。系统额定频率为 60 Hz,$T_{G1}=T_{G2}=0.08$ s,$T_{T1}=T_{T2}=0.3$ s,$T_{p1}=T_{p2}=20$ s,$K_{p1}=K_{p2}=12$ Hz,$\alpha_{12}=-1$,$\beta_1=\beta_2=0.45\ \mathrm{Hz}^{-1}$,$T_{12}=0.005\ 45$ s。

考察以下 3 个控制方案在区域 1 的控制效果。

方案 1(不考虑协调的经典控制方案):2 区域控制策略完全相同,一次调频调差系数 $r_1=r_2=2.4$ Hz,二次调频采用经典 PI 控制,积分增益 $K_{I1}=K_{I2}=0.02$,比例增益 $K_{t1}=K_{t2}=1$。

方案 2(考虑协调的经典控制方案[10-13]):保持区域 2 不变,在区域 1 进行一次、二次调频的协调,当 Δf_1 与 C_1 异号时,闭锁区域 1 的二次调频信号。

方案 3(基于微分博弈理论的协调方案):保持区域 2 不变,在区域 1 进行一次、二次协调,使用 MATLAB 7.8.0 建立一次、二次调频控制信号 u_1 和 u_2 间的微分博弈模型,如 2.2 节所述,求得达到开环纳什均衡的控制策略$[u_{1n}^*\quad u_{2n}^*]$如下,Riccati 方程求解精度为 10^{-15}。

$$u_{1n}^*=-0.070\ 43x_{1n}-0.012\ 18x_{2n}-0.003\ 19x_{3n}+0.011\ 877x_{4n}-0.002\ 21x_{5n}-0.000\ 58x_{6n}-0.054\ 9x_{7n}+0.183\ 717x_{8n}$$

$$u_{2n}^*=-0.903\ 3x_{1n}-0.153\ 14x_{2n}-0.039\ 96x_{3n}-0.084\ 7x_{4n}+0.006\ 804x_{5n}+0.001\ 806x_{6n}+0.272\ 167x_{7n}-0.108\ 66x_{8n}$$

设 2 区域均发生阶跃负荷变化,$\Delta P_{L1}=-0.005$(标幺值),$\Delta P_{L2}=0.01$(标幺值),在 Simulink 平台上建模仿真得到 3 个方案的控制效果如图 3 所示。

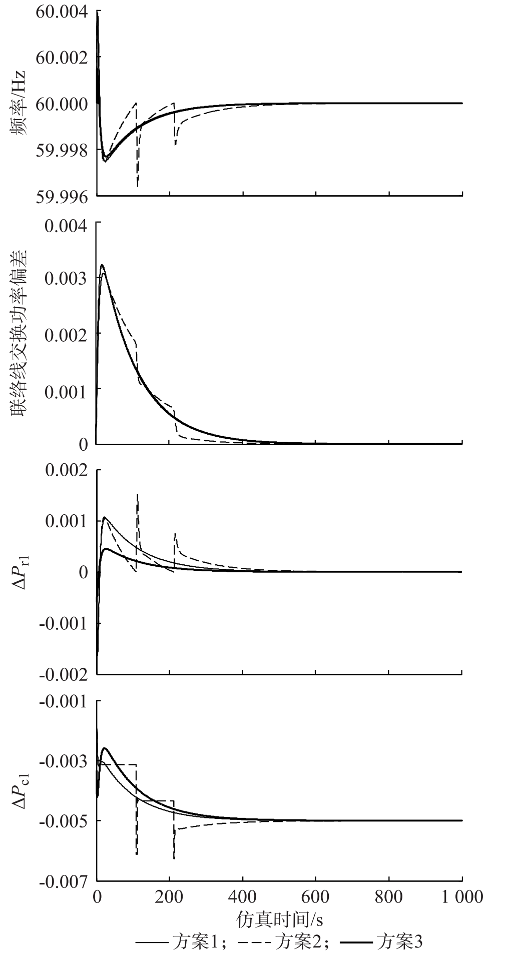

图 3　3 种控制方案的仿真结果

Fig. 3　Simulation results of the three control methods

方案 1 没有采取任何协调措施。区域 1 二次调频信号 ΔP_{c1} 下降,要求机组有功出力基准值减小以跟踪区域 1 负荷变化;但 Δf_1 与 C_1 异号,区域 1 一次调频信号 ΔP_{r1} 大于 0,要求机组有功出力增加,一次、二次调频反向调节。

方案 2 认为 Δf_1 与 C_1 异号时,C_1 的存在对互联系统频率恢复有利,因此闭锁二次调频以保持 C_1。该方案中有功出力基准值的减小慢于方案 1,一次调频的动作量小于方案 1,实质上是通过前者"替代"后者的动作,减少了无谓的磨损。但该方案存在控制目标波动较大的弊端。

方案 3 应用微分博弈理论进行协调,频率和联络线交换功率的控制效果略好于方案 1,有功出力基准值的减小比方案 2 更慢,因此其对一次调频动作的"替代"作用更明显,一次调频的动作量显著降低,反调现象得到缓解。

方案 3 花费小于方案 1 的控制代价得到了略好的控制效果,根本原因是方案 1 中一次、二次调频反向调节现象严重,互相抵消了对方的作用,浪费了控制器动作量。方案 3 通过微分博弈使一次、二次调频得到协调,提高了控制动作的效率。而方案 3 的协调效果优于方案 2 的原因,是在微分博弈中求解了极小化问题,对系统协调潜力的挖掘比方案 2 更加彻底。

3.2　与最优控制理论的比较

通过求极值问题最优化控制效果,是微分博弈理论和最优控制理论的相似之处。两者的根本差异在于微分博弈的解能自动达到纳什均衡,而最优控制不能。

下文仍以一次、二次调频的协调问题进行说明。使用最优控制理论求解时,需将式(11)的多目标加权合并为单目标 $\min\{\alpha J_1+J_2\}$,状态方程不变。不同的权系数 α 将导致不同的 J_1 值和 J_2 值,见图 4。

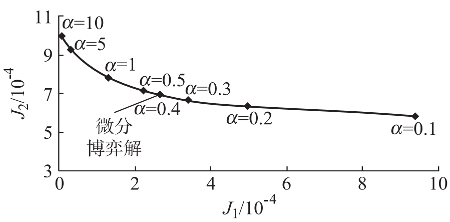

图 4　微分博弈解与不同权系数下最优控制解的对比
Fig. 4　Comparison between results of differential games and optimal control with various weight coefficients

最优控制得到图 4 中的解曲线后,线上各点的优劣无法客观判断,如何选择 α 全凭操作人员的经验。而微分博弈可得到唯一解 $[u_{1n}^{*}\quad u_{2n}^{*}]$,与 α 取 0.4 时的最优控制解接近重合。该解在曲线上具有特殊性,即它是唯一纳什均衡点。当一次、二次调频都采取该解的控制策略时,其间的博弈得到真正意义上的协调,因为博弈达到了稳定状态,任何一方单独改变策略都会导致自己的损失。仿真验证如下:令 $u_{1n}{}'=k_1u_{1n}^{*}$,$u_{2n}{}'=k_2u_{2n}^{*}$,以 $[u_{1n}{}'\quad u_{2n}^{*}]$ 为控制信号进行仿真,当 k_1 在 $[-10,10]$ 变化时,支付函数 J_1 在 $k_1=1$ 达到极值,如图 5 所示。

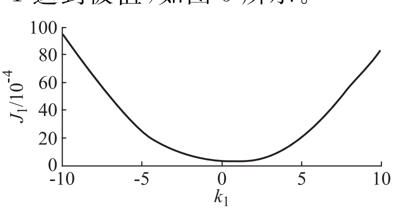

图 5　J_1 关于 k_1 的变化曲线
Fig. 5　Curve of J_1 versus k_1

以 $[u_{1n}^{*}\quad u_{2n}{}']$ 为控制信号进行仿真,当 k_2 在 $[-10,10]$ 变化时,支付函数 J_2 在 $k_2=1$ 达到极值,如图 6 所示,k_2 小于 -0.8 时系统失稳。

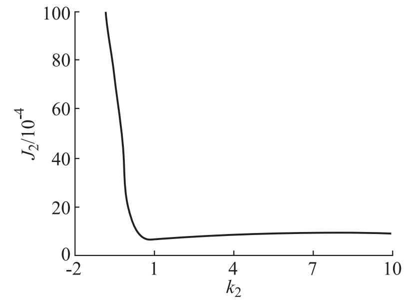

图 6　J_2 关于 k_2 的变化曲线
Fig. 6　Curve of J_2 versus k_2

事实上,进一步令:$u_{1n}{}'=\boldsymbol{K}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}_n(t)$,$u_{2n}{}'=\boldsymbol{K}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}_n(t)$。$\boldsymbol{K}_1$ 和 $\boldsymbol{K}_2$ 均为 8 维列向量,分别对其所有元素在 $[-100,100]$ 进行 1 000 次随机抽样,组成控制方案 $[u_{1n}{}'\quad u_{2n}^{*}]$ 和 $[u_{1n}^{*}\quad u_{2n}{}']$ 各 1 000 个。仿真结果显示,在使系统稳定的方案中,所有 $[u_{1n}{}'\quad u_{2n}^{*}]$ 对应的 J_1 均劣于方案 $[u_{1n}^{*}\quad u_{2n}^{*}]$,所有 $[u_{1n}^{*}\quad u_{2n}{}']$ 对应的 J_2 均劣于方案 $[u_{1n}^{*}\quad u_{2n}^{*}]$。也就是说,当一次调频策略取 u_{1n}^{*} 时,u_{2n}^{*} 是二次调频采用状态变量线性反馈形式的最优策略,反之亦然,即 $[u_{1n}^{*}\quad u_{2n}^{*}]$ 是纳什均衡点。

4　结语

微分博弈理论的应用缓解了一次、二次调频的冲突反调现象,减少了无谓的机组磨损。更重要的是,由于求得的开环纳什均衡解含义清晰,因此博弈双方都愿意接受该协调策略,不再有单独改变的意愿。所得结果显示了一次、二次调频进行协调的潜力,为工程实际中制定协调控制策略提供了参考。但不可否认,本文作为将微分博弈理论引入电力系统协调控制领域的初次尝试,对系统模型作了一定简化。下一步工作中,将考虑负荷随机变化、控制器死区、控制动作幅值限制、机组爬坡速率约束等因素的影响,研究含不等式约束的非线性随机协调控制问题的微分博弈模型及其解法,逐步向电力系统工程实际靠近。

参 考 文 献

[1] ISAACS R. Differential games[M]. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1965.
[2] ENGWERDA J C, SALMAH. The open-loop linear quadratic differential game for index one descriptor systems [J]. Automatica, 2009, 45(2): 585-592.
[3] BASAR T, OLSDER G J. Dynamic non-cooperative game theory[M]. New York, NY, USA: Academic Press, 1999.

[4] ENGWERDA J C. Uniqueness conditions for the affine open-loop linear quadratic differential game[J]. Automatica, 2008, 44(2): 504-511.

[5] YEUNG D W K, PETROSYAN L. Cooperative stochastic differential games[M]. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2006.

[6] CLEMHOUT S, WAN H Y. Interactive economic dynamics and differential games[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 1979, 27(1): 7-30.

[7] FEICHTINGER G, JORGENSEN S. Differential game models in management science[J]. European Journal of Operational Research, 1983, 14(2): 137-155.

[8] YEUNG D W K, PETROSYAN L. A cooperative stochastic differential game of transboundary industrial pollution[J]. Automatica, 2008, 44(6): 1532-1544.

[9] DOCKNER E, JORGENSEN S, VAN LONG N, et al. Differential games in economics and management science[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000.

[10] 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 AGS and primary frequency regulation based on CPS[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 22-25.

[11] 曾火琼.浅析水电厂 AGC 与一次调频的配合[J].水电自动化与大坝监测,2008,32(1):40-42.
ZENG Huoqiong. Analysis of matching between AGC and PFR in hydropower stations[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2008, 32(1): 40-42.

[12] 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):34-35.
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): 34-35.

[13] 高宗和,滕贤亮,涂力群.互联电网 AGC 分层控制与 CPS 控制策略[J].电力系统自动化,2004,28(1):78-81.
GAO Zonghe, TENG Xianliang, TU Liqun. Hierarchical AGC mode and CPS control strategy for interconnected power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(1): 78-81.

[14] CAVIN R K, BUDGE M C, RASMUSSEN P. An optimal linear systems approach to load-frequency control[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1971, 90(6): 2472-2482.

[15] KOTHARI M L, NANDA J. Application of optimal control strategy to automatic generation control of a hydrothermal system[J]. IEE Proceedings: Control Theory and Applications, 1988, 135(4): 268-274.

[16] FOSHA C E, ELGERD O I. The megawatt-frequency control problem: a new approach via optimal control theory. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1970, 89(4): 563-577.

[17] AHAMED T P I, RAO P S N, SASTRY P S. A reinforcement learning approach to automatic generation control[J]. Electric Power Systems Research, 2002, 63(1): 9-26.

叶 荣(1985—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统优化运行与控制、新能源并网相关技术。E-mail: yerong1985@qq.com

陈皓勇(1975—),男,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统优化规划与优化运行、新能源并网相关技术、人工智能在电力系统中的应用及电力市场。E-mail: eehychen@scut.edu.cn

娄二军(1987—),男,硕士研究生,主要研究方向:电力系统优化运行与控制。E-mail: 692005170@qq.com

A Coordinated Frequency Control Method Based on Differential Game Theory

YE Rong, CHEN Haoyong, LOU Erjun

(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Differential game theory is introduced as a new method to solve the problem of coordinating a large number of varied controllers in a power system. The coordination between primary and secondary frequency controls is used as example application, whose differential game model is established and open-loop Nash equilibria are solved. The simulation results on the two-area connected system show that the proposed method can alleviate the conflict between primary and secondary frequency controls, and verify that the application of differential game theory in the field of power system coordinated control is feasible and effective.

This work is supported by the Program for New Century Excellent Talents in University (No. NCET080207) and the Key Project of Chinese Ministry of Education (No. 109128).

Key words: differential game theory; coordinated control; primary frequency control; secondary frequency control