

考虑通信延迟的网络化AGC鲁棒控制器设计

段献忠, 何飞跃

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北省 武汉市 430074)

Networked AGC Robust Controller Design in Consideration of Communication Delay

DUAN Xian-zhong, HE Fei-yue

(College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: Time delay uncertainty among the sensors, actuators and controllers is a key problem for the networked control system (NCS). After analyzing the time delay characteristic of a networked AGC system, a robust AGC controller is presented in this paper to meet the networked time-delayed environment by using the time-delayed system control theory. The time-dependent stability criteria is adopted to design the robust H_∞ controller. It can overcome the conservatism which is brought by the time-independent stability criteria, moreover, the coefficient in the state equations need not meet any constraint. A two-area AGC system is studied through digital simulations, to demonstrate the comprehensive applications of the proposed strategy, and the result shows the effectiveness of the presented strategy.

KEY WORDS: automatic generation control; networked control system; time-delayed system; linear matrix inequality

摘要: 传感器, 执行器以及控制器之间的延迟不确定性问题是网络化控制系统(NCS)的一个关键问题。文中对网络化环境下的AGC系统的延迟进行了分析, 提出了基于时滞系统控制理论的AGC H_∞ 控制方法。该控制器采用时滞依赖性稳定条件进行设计, 该方法可以克服时滞独立性稳定条件的保守性, 且被控系统的状态方程系数不必满足任何约束条件。为验证所提出方法的有效性, 利用SIMULINK对两区域AGC系统进行了仿真, 表明该方法可以有效抑制延迟对系统稳定性的影响。

关键词: 自动发电控制; 网络化控制系统; 时滞系统; 线性矩阵不等式

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(50595414); 教育部科学技术重点项目(104123)。

Project Supported by National Nature Science Foundation of China(50595414).

0 引言

传统的AGC控制方式是基于专线方式^[1], 这种方式对通信延迟对系统的稳定性影响不大。如果AGC控制信号与其他信号通过同一通信平台综合传输, 则必须考虑通信延迟对系统稳定性的影响。文献[1]研究了网络延迟对AGC系统的影响, 表明通信延迟超过三个数据包时, 系统的频率偏差和联络线功率偏差(ACE)将表现出振荡行为, 并最终失去稳定。文献[2]对一个三区域的AGC系统进行了仿真, 表明通信延迟超过50s时, 系统不能保持稳定, 且常规的AGC控制方法将不能保证系统稳定。

由于网络控制的技术优势, 将在电力系统中逐步得到应用^[3], 有关文献对解决电力系统中的网络化控制的通信延迟问题进行了研究。文献[4]研究了利用广域测量信号实现电力系统网络化阻尼控制, 提出采用Padé近似法来处理延迟。该方法中控制器参数依赖于延迟的大小。设计控制器之前必须对延迟进行估计, 且延迟变化时需要重新设计控制器参数。为适应不同通信延迟环境, 文献[5]提出了一种基于线性矩阵不等式(LMI)的增益调度控制方法, 用于电力系统阻尼控制, 但该方法要求实时测量延迟, 以保证控制器参数能够随着通信延迟实时变化。对于网络AGC控制系统稳定性问题, 文献[2]提出了一种基于时滞系统的控制方法, 控制器采用时滞独立性稳定条件设计。但用时滞独立性稳定条件设计的控制器所带来的控制效果往往比较保守^[6]; 且被控系统的状态方程的系数矩阵需要满足时滞独立性约束条件^[7], 而这种约束条件在工程实际中往往难以满足。

时滞依赖性稳定条件是时滞系统另一种控制

器设计方法。按照这种设计方法,可以保证被控系统在延迟 $t < t_{dmax}$ 的情况下,系统是渐近稳定的。当延迟 $t > t_{dmax}$ 时,控制器则不能保证系统的稳定性。 t_{dmax} 是系统保证稳定的情况下能够承受的最大延迟。这种控制方法能够克服时滞独立稳定性方法的保守性,同时被控系统的系数矩阵也不需要满足任何约束条件,易于在工程中实现。本文将时滞依赖性稳定设计方法引入到网络化 AGC 系统的控制器设计之中,并利用 H_∞ 控制理论设计了状态反馈控制器,实现了 AGC 系统的鲁棒控制。

1 网络化 AGC 系统

1.1 系统结构

将通信网引入AGC系统后,网络化AGC系统的框架如图1所示。控制中心到电厂控制器(PLC)的ACE信号通过网络传输;发电厂自动化系统中从调速器到智能执行机构的输出也采用网络,这部分网络包括现场总线以及工业以太网两种模式。在现场总线方式下智能执行机构通过网关与电厂自动化系统连接。对于以太网模式,智能执行机构通过工业以太网接口直接与电厂自动化系统连接。

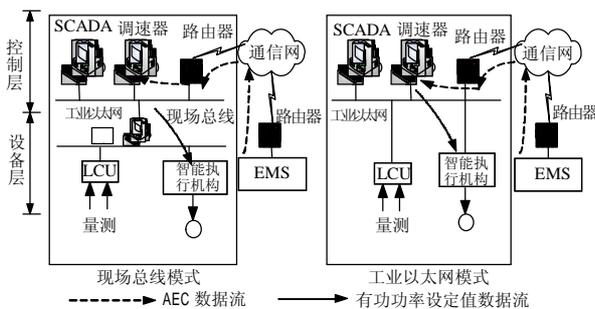


图1 网络化AGC系统框图

Fig. 1 Networked AGC diagram

1.2 系统的延迟特性

对于 AGC 业务,通过网络传输的数据主要包括联络线交换功率的实际值、计划值,系统频率的实际值、计划值,ACE 控制值以及受控 AGC 电厂机组的相关遥测和遥信^[8]。数据包的长度一般为固定长度,传输方式为周期性传输(从控制中心到电厂自动化发送周期一般为 3~4s,从调速器到智能执行模块的发送周期为毫秒级)。网络化 AGC 系统通信延迟包括控制中心到电厂自动化系统以及调速器到机组智能执行机构两部分延迟。

从控制中心到电厂自动化属于广域网通信,其延迟主要包括端系统数据处理延迟、传输延迟、信

号的传播延迟以及数据包在路由器中的排队延迟。除排队延迟外,其他延迟都是确定的。由于 AGC 数据为周期性传送方式,其排队模型可以考虑为 M/G/1 分布,到达率为确定性分布,服务为一般分布。根据排队理论,其延迟上限为 $T \leq l(d_s^2 + d_a^2) / 2(1-r) + 1/m$ 。其中, l 是数据包的到达率; d_s^2 是服务时间方差; d_a^2 是到达时间方差; $1/m$ 是平均服务时间; $r = l/m$ 是链路利用率。对于这部分延迟,可以采用多种 IP QoS 技术保证 AGC 业务的要求^[9]。AGC 系统的扫描周期为 3~4s,只有当 ACE 信号延迟远大于 AGC 扫描周期时,这部分延迟才会对系统的稳定性造成影响。本文对这一问题进行了仿真,当 ACE 延迟到达 30s 时,系统才会失去稳定。工程实际中,对于采用 SDH 上的专用通道或 IP 交换方式,其信号延迟大约在数百 ms 以内。因此 ACE 信号延迟,对网络化 AGC 系统稳定性影响并不突出。

从调速器到智能执行机构通信属于局域网通信,其延迟包括:端系统的数据处理延迟、传输延迟、信号的传播延迟以及数据包在交换机的等待延迟。除等待延迟外,其他延迟是确定的。由于调速器模块的扫描周期在 ms 级,考虑到电厂自动化系统端端的延迟基本在几百 ms 以内,正好与调速器模块的扫描周期在同一数量级。这部分延迟对网络化 AGC 控制影响比较突出。

2 基于时滞动力系统的网络化 AGC 控制器设计

2.1 网络化 AGC 系统模型

假设一个互联的两区域电力系统采用网络化 AGC 控制方式,且采用水轮机机组作为二次调频手段,两区域各等值为一台发电机。将 AGC 系统在正常工作点线性化,可以得到系统的时滞状态方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + A_d x(t-d) + B_1 w(t) + B_2 u(t) \\ y(t) = Cx(t) + Dw(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $w(t)$ 为负荷扰动量; $u(t)$ 为控制量; d 为调速器到机组的智能执行机构部分延迟; $x(t)$ 为状态变量,等于 $[\Delta f, \Delta p_v, \Delta p_m, \Delta e, \Delta p_{ie}]^T$; Δf 表示频率偏差; Δp_v 为受控 AGC 机组导叶开度偏差; Δp_m 为受控 AGC 机组的功率偏差; Δe 为 ACE 的偏差; Δp_{ie} 为联络线功率偏差。

状态方程(1)中的各系数矩阵为

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} -D_1/M_1 & 1/M_1 & 0 & 0 & -1/M_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1/T_{ch1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1/(T_{g1} * R_1) & 0 & 1/T_{g1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_1 * B_1 & 0 & 0 & -K_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -T_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/M_2 & -D_2/M_2 & 1/M_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/T_{ch2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/(T_{g2} * R_2) & 0 & 0 & 1/T_{g2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_2 & -K_2 * B_2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 A_d &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/T_{ch1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/T_{g1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/T_{ch2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/T_{g2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 B_1 &= [-1/M_1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \\
 B_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/T_{ch2} & 0 & 0 \\ 0 & 1/T_{ch1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \\
 C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 D &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2}$$

式中： M_i ($i=1,2$)为发电机的转动惯量； D_i ($i=1,2$)为发电机阻尼系数； T_g 为发电机的惯性时间常数； T_{ch} 为水轮机时间常数。

AGC 系统有 3 种控制方式：定联络线交换功率控制、定频率以及联络线偏差控制^[10-11]。本文选择第 3 种方式。

2.2 时滞动力系统控制方法

韩国学者 J.H.Lee 于 1994 年基于时域状态空间模型^[7]，利用 Riccati 方法，提出了时滞系统的无记忆 H_∞ 控制器设计方法，其后时滞系统的 H_∞ 控制问题的研究取得了长足的发展。在现有的时滞系统稳定性研究条件中，根据是否依赖系统中的时滞大小，可将稳定性条件分为时滞独立和时滞依赖两类^[12]：

①时滞独立的稳定性条件：即在该条件下，对所有的时滞 $d > 0$ ，系统是渐近稳定的。由于这样的条件无需知道系统滞后时间信息，因此，适合于处理具有不确定滞后时间和未知滞后时间的时滞系统稳定性分析问题。②时滞依赖的稳定性条件：即在该条件下，对滞后时间 d 的某些值，系统是稳定的；而对滞后时间 d 的某些值，系统则是不稳定的^[13]。因此，系统的稳定性依赖于滞后时间。基于文章第

一部分的分析,文章采用时滞依赖的稳定性条件来设计网络化 AGC 控制器。

根据时滞依赖的稳定性条件,对于时滞 AGC 系统(1)，若存在标量 $\bar{d} > 0$ 、实对称矩阵 $P > 0, Q > 0, V > 0$ 和矩阵 W 满足(3)式，则对于所有的 $d < \bar{d}$ ，则网络化 AGC1)均能渐近稳定。

$$\begin{bmatrix} S & -W^T A_d & A^T A_d^T V & -\bar{d}(W + P) \\ -A_d^T W & -Q & A_d^T A_d^T V & 0 \\ V A_d A & V A_d A_d & -V & 0 \\ \bar{d}(W^T + P) & 0 & 0 & -V \end{bmatrix} < 0 \tag{3}$$

式中 $S = (A + A_d)^T P + P(A + A_d) + W^T A_d + A_d^T W + Q$ 事实上，式(3)求解比较困难，可以将其变形为

$$\begin{bmatrix} S & -W^T A_d & A^T A_d^T V & 0 \\ -A_d^T W & -Q & A_d^T A_d^T V & 0 \\ V A_d A & V A_d A_d & -V & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -V \end{bmatrix} < \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -(W + P) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ (W^T + P) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4}$$

根据网络化的 AGC 时滞状态方程(1)， A, A_d 为已知的常数矩阵 P, Q, V, W 为待求变量。式(4)具有广义特征向量的形式，可以通过 MATLAB 中的 `gevp` 函数求得 \bar{d} ^[14]。

2.3 网络化 AGC 系统 H_∞ 控制器设计方法

对于网络化 AGC 系统(1)，将其改写为 H_∞ 标准控制问题

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + A_d x(t-d) + B_1 w(t) + B_2 u(t) \\ z(t) = C_1 x(t) + D_{11} w(t) + D_{12} u(t) \\ y(t) = C_2 x(t) + D_{21} w(t) \end{cases} \tag{5}$$

其中， d 是滞后时间， $A, A_d, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{11}, D_{12}$ 和 D_{21} 是已知的时滞数矩阵。

假定 (A, B_2, C_2) 是能稳能检测的。 z 是系统的被控输出信号， y 是系统的测量输出信号。考虑控制器采用无记忆的状态反馈控制规律 $u(t) = Kx(t)$ ，其中 $K \in R^{m \times n}$ 是定常的反馈增益矩阵，将控制规律 $u(t) = Kx(t)$ 应用到系统(5)，则得到闭环系统为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + B_2 K)x(t) + A_d x(t-d) + B_1 w(t) \\ z(t) = (C_1 + D_{12} K)x(t) + D_{11} w(t) = Cx(t) + Dw(t) \end{cases} \tag{6}$$

如果由式(6)表示的闭环系统具有 H_∞ 性能 g ，即外部扰动 $w(t)$ 到被调输出 $z(t)$ 的传递函数矩阵 $G_{wz}(s)$

的 H_∞ 范数小于 g , 即 $\|G_{wz}(s)\|_\infty < g$, 则控制规律 $u = Kx(t)$ 是式(1)表示的网络化 AGC 系统的一个 g 次优状态反馈 H_∞ 控制律。

对于网络化 AGC 系统(6), 对给的正常数 g , 如果存在实对称矩 $X_1 > 0, X_2 > 0, X_3 > 0$, 满足式(7)

$$\begin{bmatrix} Q(X,Y,X_1,X_2) & \bar{d}(XA^T + Y^T B_2^T) & \bar{d}XA_d^T & H(X,Y) \\ \bar{d}(AX + B_2Y) & -X_1 & 0 & 0 \\ \bar{d}A_d X & 0 & -X_2 & 0 \\ H^T(X,Y) & 0 & 0 & -W \end{bmatrix} < 0 \quad (7)$$

式中: $Q(X,Y,X_1,X_2) = X(A + A_d)^T + (A + A_d)X + Y^T B_2^T + B_2 Y + A_d(X_1 + X_2)A_d^T$;

$H(X,Y) = [\bar{d}A_d \quad (CX + DY)^T \quad B_1]$;

$W = \text{diag}\{X_3 \quad I \quad g^2 I - B_1^T X_3 B_1\}$

通过求解式(7), 可以求得状态反馈控制器, 即: 若 $(\hat{X}, \hat{X}_1, \hat{X}_2, \hat{X}_3, \hat{Y})$ 是式的一个可行解, 则 $u(t) =$

$\hat{Y}\hat{X}^{-1}x(t)$ 是网络化 AGC 的一个 g 次优状态反馈 H_∞ 控制律。进一步可以利用求解以下优化问题:

$$\begin{cases} \min g \\ \text{st (7)} \\ X > 0, X_1 > 0, X_2 > 0, X_3 > 0 \end{cases} \quad (8)$$

可以求得使得闭环系统具有扰动抑制度 g 最小化的状态反馈 H_∞ 控制律。式(8)是一个线性矩阵不等式(LMI)的优化问题。MATLAB 提供了 LMI 工具箱中的 MINCX 函数, 可很方便地求解得到控制规律 $u(t)$ 。

利用式(4)求得可以使网络化 AGC 系统保持稳定的最大延迟 \bar{d} , 再与网络化 AGC 系统的 A, A_d, B_1, B_2 参数一并代入式(7)。利用 MATLAB 中的 MINCX 函数对式(8)求解, 求出可行解 \hat{Y}, \hat{X} , 从而可求出增益系数 $K = \hat{Y}\hat{X}^{-1}$ (即 H_∞ 控制器)。再利用 MATLAB 的 SIMULINK 工具就可对系统进行仿真。两区域 AGC 系统仿真模型如图 2 所示。

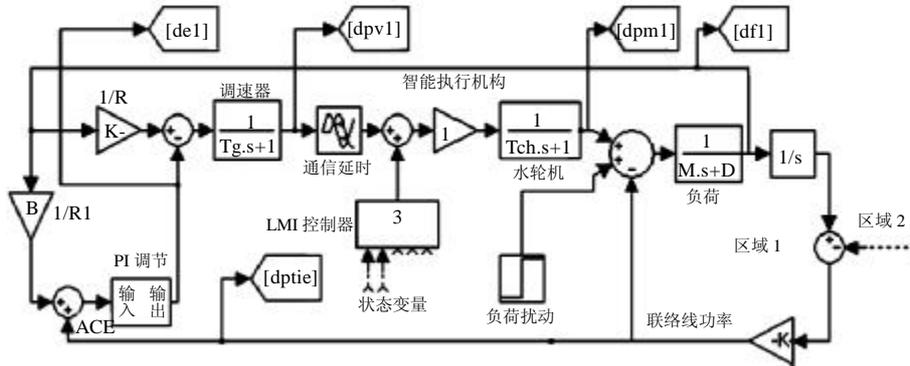


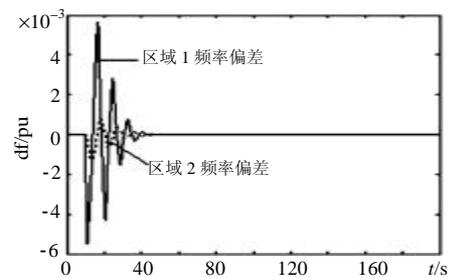
图2 两区域 AGC 系统仿真图
Fig. 2 Two-area AGC system

3 网络化 AGC 系统时域仿真

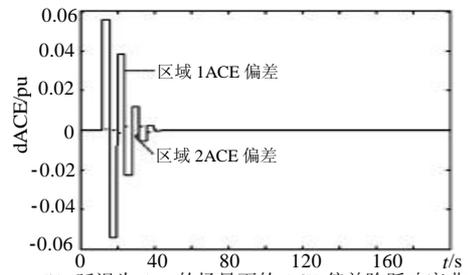
3.1 传统 AGC 控制方法

对区域一设置负荷扰动, 扰动设置在 10s 时刻, 扰动量设为 10%。区域二负荷保持不变。两区域发电机、调速器、负荷的参数参见文献[13], 分别采用传统 AGC 控制方法和 H_∞ 控制方法进行仿真。

对现场运行的调速器来说, 调速器控制程序的扫描周期一般在 2~20ms 之间^[14]。传统 AGC 控制采用 PI 控制^[15]。在采用该控制方法的情况下, 本文对调速器输出到机组的智能执行机构延迟为 5ms 的场景进行了仿真, 其结果如图 3 所示。其中, 频率偏差响应曲线中, 横坐标表示时间, 2 个区域的频率调节出现了超调现象, 两个区域的 ACE 信号在零点附近出现了几次摆动, 这一点会导致机组的导水叶抖动^[14], 对机组的正常运行是不利的。进一步, 当



(a) 延迟为 5ms 的场景下的频率偏差阶跃响应曲线



(b) 延迟为 5ms 的场景下的 ACE 偏差阶跃响应曲线

图3 传统AGC控制方法(5ms延迟)
Fig. 3 Traditional AGC control approach(5ms delay)

调速器输出到机组的智能执行机构延迟为20ms时，其仿真结果如图4所示。从图中可看出，系统的调节性能逐步变差，超调量变大，调节次数增多，调节时间变长。如果延迟再增大，则系统就会失去稳定，呈发散的振荡状态。

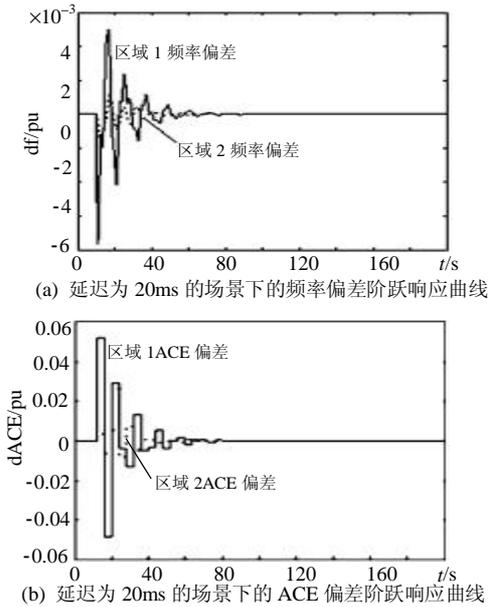


图 4 传统AGC控制方法(20ms延迟)

Fig. 4 Traditional AGC control approach(20ms delay)

3.2 基于时滞动力系统的 AGC 控制方法

如果按照时滞依赖稳定性条件，设计无记忆状态反馈控制器。根据式(4)，可以求得系统能够保持稳定的最大延迟 $d=76.4ms$ ，将 d 带入式(7)，利用线性矩阵不等式(LMI)求解式(8)，得到了具有 H_∞ 性能的控制器的 K 。

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} \\ k_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -450.19 & -2.41 & 2.23 & 20.56 \\ 13.47 & -0.021 & 0.064 & 5.81 \\ -44.75 & 19.55 & 0.069 & 0.18 & -0.96 \\ 73.21 & -118.61 & -2.28 & 0.41 & 1.34 \end{bmatrix}$$

如果 AGC 系统能实时采集所有受控 AGC 机组的状态变量，则可以采用全状态反馈，即将所有受控 AGC 机组的状态 $(\Delta f, \Delta p_v, \Delta p_m, \Delta e)$ 都接入受控机组的 LMI 状态反馈控制器中。如果系统不能实时采集所有 AGC 机组的状态变量，则可以采用分布式的控制方法，在受控 AGC 机组控制器内只选择与本机组有关的状态变量接入控制器，其他系数只需置零。即对于区域 1 的控制器参数 k_{11} ，与 $(\Delta f_2, \Delta p_{v2}, \Delta p_{m2}, \Delta e_2)$ 相关的系数可以置零，对区域 2 的控制器 k_{21} ，与 $(\Delta f_1, \Delta p_{v1}, \Delta p_{m1}, \Delta e_1)$ 相关的系数可以置零。同时，从 k_{11} 和 k_{21} 的各项系数可看出，与

本区域的状态量相关的系数比其他区域状态量系数幅值要大，因此这种方法应该是可行的。从仿真结果来看，二者效果基本接近。

本文采用分布式控制方法，对调速器输出到机组的智能执行机构延迟为 5 和 20ms 的场景进行了仿真，由于采用 H_∞ 控制器，控制效果对延迟具有鲁棒性，两种场景下的调节效果基本一致。取 5ms 延迟的控制结果如图 5(a)和(b)所示。从图 5 可看出，当区域一在 10s 时刻发生 10% 负荷扰动时，两个区域的频率信号在 80s 左右可以稳定，两区域的 ACE 信号在 100s 左右可以稳定。其中，在频率偏差阶跃响应曲线中，纵坐标单位为 2×10^{-4} /格。在 ACE 偏差阶跃响应曲线中，纵坐标单位为 1×10^{-3} /格。同样延迟为 5ms，与常规的 AGC 控制方法相比(调节效果如图 3)， H_∞ 控制器的控制效果是明显的。

另外对于调速器输出到智能执行机构的延迟超过系统可以忍受的最大延迟 d 时，智能机构可以闭锁调速器给它的输入信号，保持当前的输出，待恢复正常通信时，智能执行机构解除闭锁状态即可。

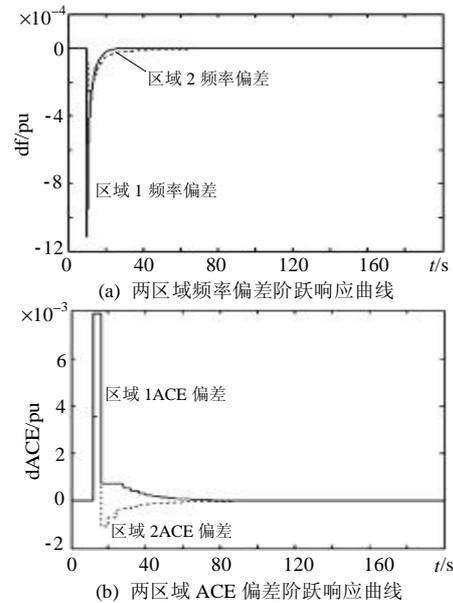


图 5 时滞系统 H_∞ 控制方法

Fig. 5 Time-delayed system control based H_∞ approach

4 结论

本文对网络化控制在 AGC 系统中的应用进行了分析，探讨了网络化 AGC 系统的基本框架，提出了基于时滞依赖性稳定条件的网络化 AGC H_∞ 控制器设计方法，相对时滞独立性稳定条件而言，该控制方法保守性小，更具有普遍适应性。为验证所提出方法的有效性，利用 SIMULINK 对两区域 AGC

系统进行了仿真,表明该方法可以有效抑制延迟对系统稳定性的影响。

参考文献

- [1] Bhowmik S, Tomsovic K, Bose A. Communication models for third party load frequency control[J]. IEEE Trans. power system, 2004, 19(1): 543-548.
- [2] Xiaofeng Yu, Tomsovic K. Application of linear matrix inequalities for load frequency control with communication delays[J]. IEEE Trans. Power Systems, 2004, 19(3): 1508-1515.
- [3] 段献忠, 何飞跃, 辛建波. 基于信息网络综合传输的电力系统运行与控制[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 38-41.
Xianzhong Duan, Feiyue He, Xianbo Xin. Integrative information transmission based operation and control for power system [J]. Power system technology, 2004, 28(9): 38-41(in Chinese).
- [4] Hongxia Wu, Hui Ni, Heydt G T. The impact of time delay on robust control design in power systems[C]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, New York, USA, 2002, 2: 1511-1516.
- [5] Hongxia Wu, Heydt G T. Design of delayed-input wide area power system stabilizer using the gain scheduling method [C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Toronto, Canada, 2003.
- [6] Carlos E de Souza, Li Xi. Delay-dependend robust H_{∞} control of uncertain linear state-delayed system[J]. Automatica, 1999, 35(8): 1313-1321.
- [7] Lee Joon Hwa. Memoryless H_{∞} controller for state delayed system[J]. IEEE Trans. Automat. control, 1994, 39: 159-162.
- [8] 李端超, 谢恒, 江山立. 安徽电网实时发电控制系统设计及实现[J]. 电网技术, 2001, 25(1): 62-66.
Li duanchao, Xie Heng, Jiang Shanli. Design and implementation of real-time generation control system for anhui power system[J]. Power System Technology, 2001, 25(1): 62-66(in Chinese).
- [9] Tantertid S, Pao-on A. IP/MPLS-based data communication network for power utility[C]. Proc on IEEE Power Tech Conference, 2003 Bologna, Italy, 2003.
- [10] 成海彦, 黄定成, 郑广辉. TBC 方式下河北南部电网的 AGC 控制策略分析[J]. 电网技术, 2005, 29(18): 53-55.
Cheng Haiyan, Huang Dingcheng, Zheng Guanghui, Analysis on control strategy of agc in southern hebei power grid under tie-line load and frequency bias control mode[J]. Power System Technology, 2005, 29(18): 53-55(in Chinese).
- [11] 徐兴伟, 林伟. 互联网网控制性能标准下自动发电控制策略的选择[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 32-34.
Xu Xingwei, Lin Wei. selection of automatic generation control strategy under control performacne standard for interconnected power grids[J]. Power System Technology, 2003. 27(10): 32-34(in Chinese).
- [12] Dugard L, Verriest E I. Stability and control of time-delay systems[M]. New York: Springer, 1997.
- [13] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw- Hill, 1994.
- [14] 魏守平. 水轮机控制工程[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.
- [15] 郭钰锋, 徐志强, 于达仁. 考虑调频死区的二次调频控制回路设计[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 77-81.
Guo Yu-feng, Xu Zhiqiang, Yu daren. The design of secondary frequency regulation loop considering regualtion dead band [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 77-81(in Chinese).

收稿日期: 2006-05-04。

作者简介:

段献忠(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统分析、电力系统自动化等方面的研究, xzduan@263.com;

何飞跃(1970—), 男, 博士研究生, 主要从事基于网络的电力系统运行与控制的研究。

(编辑 王彦骏)