

DOI: 10.7667/PSPC170573

## 考虑双通道随机时延的区域互联电网 AGC 方法

赵熙临, 何晶晶, 付波, 单治磊, 徐光辉

(湖北工业大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068)

**摘要:** 在区域互联电网网络化自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC)过程中, 信息传输在双通道(如控制器到执行器(C-A)、传感器到控制器(S-C))均存在时延问题。基于模型预测控制(MPC)技术, 拟利用其预测特征, 通过控制过程中信息的存储与处理, 消除双通道随机时延对控制效果的负面影响。首先, 在考虑双通道时延的前提下, 构建互联电网 AGC 系统模型, 并就时延的存在对控制效果的影响进行了分析。然后, 针对互联电网 AGC 系统的控制模式对集中式 MPC(CMPC)的实现方法进行了讨论, 分析了在 CMPC 框架下双通道时延的处理方法。在此基础上, 分别以阶跃与随机负荷曲线为扰动变量, 获取互联电网频率及区域控制偏差曲线。仿真结果表明在考虑互联电网 AGC 系统双通道随机时延的情况下, 所提方法能够保证系统良好的动态响应性能, 从而验证了其可行性和有效性。

**关键词:** 自动发电控制(AGC); 集中式模型预测控制(CMPC); 互联电网; 双通道随机时延

### An AGC method for interconnected power grid with two-channel random delays

ZHAO Xilin, HE Jingjing, FU Bo, SHAN Zhilei, XU Guanghui

(School of Electrical & Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** It exists time delays in information transmission in double channels, i.e. from controller to actuator and sensor to controller, during automatic generation control (AGC) for interconnected power grid. This paper bases on Model Predictive Control (MPC) method, uses its predictive characteristic, and stores and deals with the information in control process to mitigate the negative control effects caused by two-channel random time delays. Firstly, the AGC system model of two regional interconnected power grid is constructed with consideration of two-channel random time delays, and the influence of time delays on control effect is analyzed. Then, the realization method of Centralized Model Predictive Control (CMPC) is discussed in allusion to the control mode of interconnected grid AGC system, and the processing mode of two-channel time delays under CMPC framework is also analyzed. Furthermore, the frequency and Area Control Error (ACE) control deviation curves of the interconnected power grid are obtained by taking the step curve and random load curve as disturbance variables respectively. The simulation results show that the system has a good dynamic response performance by use of the proposed method with the consideration of two-channel random time delays, thereby the feasibility and effectiveness of the proposed method is verified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61473116 and No. 61603127).

**Key words:** automatic generation control (AGC); centralized model predictive control (CMPC); interconnected power grid; two-channel random time delays

## 0 引言

自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC)是现代电力系统实现二次调频的重要手段<sup>[1-3]</sup>。频率偏差是电网供电质量的重要体现, 对电网安全、

优质运行至关重要。当电力系统存在负荷扰动时, AGC 可以尽可能地减小频率偏差, 保证电网频率维持在允许的范围<sup>[4]</sup>。

随着互联电网规模的不断扩大, 负荷变化形式越来越复杂, 如何优化 AGC 系统控制方法也成为值得研究的课题。目前针对此问题出现了多种控制方法及其组合形式, 例如: PID 控制、滑模控制、模糊控制、自适应控制、鲁棒控制以及模型预测控制等<sup>[5-7]</sup>。文献[8]等提出了一种用于多区域互联

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(61473116, 61603127); 国家教育部科研项目资助(教外司留[2014]1685)

电力系统负荷频率控制的 PI 滑模方法, 克服了单一控制模式的不足, 保证了整个系统的渐进稳定。文献[9]提出了一种模糊 PID 与改进的遗传算法相结合的 AGC 系统控制策略, 克服了传统模糊控制需人为设定隶属度且不能动态调整参数的弊端。文献[10]针对多区域互联电力系统 AGC 设计了一种带有微分算子的模糊 PID 控制器, 该控制方式对负载扰动具有很高的灵敏度, 避免了暂态频率振荡。文献[11]提出了一种基于鲁棒 PID 控制器的水轮机发电系统的自动发电控制方法, 较传统 PID 能有效提高系统的稳定性, 改善超调及动态性能。文献[12]针对 AGC 系统提出一种无模型自适应控制算法, 保证了系统具有较强的鲁棒性、非线性适应性及 CPS 指标。但综合来看, 上述控制方法普遍存在控制精度有限, 控制算法复杂的问题, 且缺乏较强的扰动抑制能力, 在控制对象特性渐变时适应性差。

针对上述问题, 以最优化理论为内核的控制方式, 如模型预测控制在该领域得到了迅速发展<sup>[13]</sup>。模型预测控制不仅能提升对具有时滞性、非线性和不确定性等特征的系统控制的鲁棒性, 还能实现控制量实时在线优化。文献[14]提出了采用集中式模型预测控制(CMPC)代替传统 PID 控制器, 该方法获取的动态响应性能较传统 PI 控制方法有显著改善, 并具有更强的鲁棒性。文献[15]提出了一种分布式模型预测控制模式, 并将之应用于 AGC 系统中, 解决了大规模的网络化 AGC 系统控制问题。文献[16]在变速风力发电机的 AGC 控制中采用分布式模型预测控制策略, 改善了系统全局动态性能。文献[17]在 AGC 系统中采用分布式模型预测控制, 以解决发电速率约束和发电量限制等问题。但传统 AGC 方法的研究普遍基于 AGC 专用通信通道的存在, 控

制方法的设计没有考虑通信时延对系统的影响。

随着智能电网理念的提出以及发展, 基于综合信息网的网络化 AGC 方法以其开放性、灵活性等特点将逐渐成为智能电网时代系统二次调频的主要控制方式。同时, 即使是传统的专用通信网络, 也无法绝对避免网络传输时延的现象。因此, 在 AGC 实施过程中, 时延、丢包等通信环境的影响成为不容忽视的因素。文献[18]针对随机网络延时提出基于神经网络的预测控制方案构建网络化 AGC 系统, 在一定程度上补偿了随机网络延时。文献[19]也针对具有时滞性特征的 AGC 系统提出了一种模型预测控制算法, 确保了网络化 AGC 对通信延迟的鲁棒性和适应性。但上述文献均只考虑了控制器到执行机构的单通道时延处理问题, 而实际控制过程中, 除了控制器到执行机构存在信息传输时延, 传感器到控制器的时延也不可忽视。因此, 针对双通道随机时延的处理不仅具有实际意义, 而且对于 AGC 理论体系的完善也至关重要。

本文以网络化 AGC 系统为研究对象, 将模型预测控制算法应用到互联电网 AGC 过程中。在考虑到区域电网双通道随机时延的情况下, 以两区域互联电网为例, 构建了 AGC 系统仿真模型, 并采用集中式模型预测控制(CMPC)方法实现系统频率调整。

## 1 两区域互联 AGC 系统动态模型

不失一般性, 以两区域电网互联为例进行分析, 按照 AGC 系统组成及等效原则, 可构建其考虑双通道随机时延的结构模型。计及区域内信息的传递时延和区域间延时的情况时, 两区域互联电网 AGC 系统的动态模型如图 1 所示。

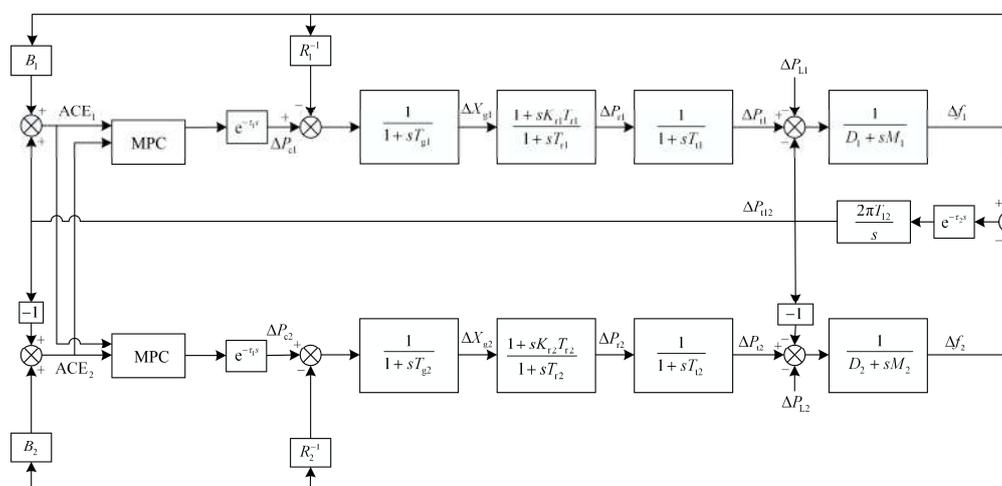


图 1 考虑双通道随机时延的两区域互联电网 AGC 系统动态模型

Fig. 1 Two-area interconnected power grid AGC dynamic model considering two-channel random delays

图 1 中:  $T_{gi}$  为调速器时间常数;  $T_{vi}$  为发电机时间常数;  $K_{ri}$  为汽轮机再热系数;  $T_{ri}$  为再热时间常数;  $R_i$  为机组调差系数;  $B_i$  为系统调差系数;  $M_i$  为机组转动惯量;  $D_i$  为负荷阻尼系数;  $\Delta P_{vi}$  为发电机输出功率增量;  $\Delta P_{ri}$  为再热发电机组输出热功率增量;  $\Delta X_{gi}$  为调速器位置增量;  $\Delta P_{ci}$  为控制器控制量;  $\Delta P_{Li}$  为负荷的变化量;  $\Delta f_i$  为频率的变化量;  $\Delta P_{112}$  为联络线交换功率变化量;  $T_{12}$  为联络线功率同步系数。

网络化 AGC 系统动态方程可写为

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + A_\tau X(t - \tau_2) + BU(t - \tau_1) + FW(t) \\ Y(t) = CX(t) + C_\tau X(t - \tau_2) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $X \in R^n$ 、 $U \in R^m$ 、 $W \in R^k$ 、 $Y \in R^r$  分别代表系统状态变量、控制变量、扰动变量和输出变量;  $A$ 、 $A_\tau$ 、 $B$ 、 $F$ 、 $C$ 、 $C_\tau$  分别为对应维度的参数矩阵; 其他见式(2)一式(11)。

$$X = [\Delta f_1 \ \Delta P_{v1} \ \Delta P_{r1} \ \Delta X_{g1} \ \Delta P_{112} \ \Delta f_2 \ \Delta P_{v2} \ \Delta P_{r2} \ \Delta X_{g2}]^T \quad (2)$$

$$U = [\Delta P_{c1} \ \Delta P_{c2}]^T \quad (3)$$

$$W = [\Delta P_{L1} \ \Delta P_{L2}]^T \quad (4)$$

$$Y = [ACE_1 \ ACE_2 \ \Delta f_1 \ \Delta f_2 \ \Delta P_{112}]^T \quad (5)$$

$$F = \begin{bmatrix} \frac{-1}{M_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{M_2} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{K_{r1}}{T_{g1}} & \frac{1}{T_{g1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{r2}}{T_{g2}} & \frac{1}{T_{g2}} \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{M_1} & 0 & 0 & \frac{-1}{M_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{T_{v1}} & \frac{1}{T_{v1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{T_{r1}} & \left( \frac{1}{T_{r1}} - \frac{K_{r1}}{T_{g1}} \right) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{g1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{M_2} & 0 & \frac{1}{M_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{12}} & \left( \frac{1}{T_{12}} - \frac{K_{r2}}{T_{g2}} \right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{g2}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$C_\tau = \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B_2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$A_\tau = \begin{bmatrix} \frac{-D_1}{M_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-K_{r1}}{R_1 T_{g1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-1}{R_1 T_{g1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2\pi T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & -2\pi T_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-D_2}{M_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{12}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-K_{r2}}{R_2 T_{g2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{R_2 T_{g2}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

## 2 双通道时延处理

### 2.1 预测控制机理

根据模型预测控制理论, 对于式(1)对应的离散系统状态方程, 以  $k_i$  为起始时刻, 由起始时刻状态值及输入序列见式(12)。

$$U(k) = [U(k_i) \ U(k_i+1) \ \cdots \ U(k_i+N_c-1)]^T \quad (12)$$

可获取状态变量预测序列  $X$  和输出量的预测序列  $Y$ 。分别见式(13)、式(14)。

$$X = [X(k_i+1|k_i) \ X(k_i+2|k_i) \ \cdots \ X(k_i+N_p|k_i)]^T \quad (13)$$

$$Y = [Y(k_i+1|k_i) \ Y(k_i+2|k_i) \ \cdots \ Y(k_i+N_p|k_i)]^T \quad (14)$$

式中:  $N_p$  为预测域;  $N_c$  为控制域, 一般有  $N_p \geq N_c$ 。

假设系统期望输出为  $R_S$ , 以输出期望为控制目标, 可定义如下二次型目标函数。

$$J = (R_s - Y)^T (R_s - Y) \quad (15)$$

上述目标函数最优化, 可获取最优控制序列为

$$U^* = [u^*(k) \ u^*(k+1) \ \cdots \ u^*(k+N_c-1)]^T \quad (16)$$

根据预测控制的时域特征, 控制域存在的控制变量序列仅当前时刻变量值参与到控制过程, 即取控制序列的第一个值作为控制变量输入。

## 2.2 时延处理与影响分析

随着网络化区域互联电网 AGC 的提出, 不可避免地需考虑时延与丢包现象的影响。当系统出现一定程度的时延与丢包时, 传统 AGC 无法维持负荷频率控制的稳定性。针对此问题的处理, 有别于大部分文献中单一时延处理的方式, 本文将考虑双通道(控制器到执行器、传感器到控制器)时延存在时系统频率控制问题。

对于离散系统而言, 需要对时延信号进行离散化处理, 当延时信号大于采样周期  $T_s$  时, 会对系统信息传输产生影响, 输出 1; 延时信号小于或等于采样周期  $T_s$  时, 对系统无影响, 输出 0。延时信号的离散化处理过程如图 2 所示, 经过此离散化处理, 则随机时延将转化为一个随机的马尔可夫跳变过程<sup>[20]</sup>。

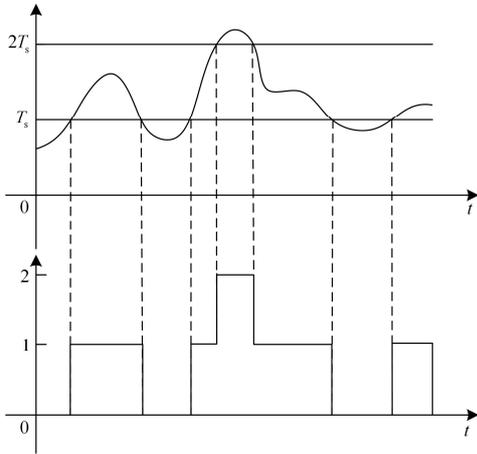


图 2 时延信号离散化

Fig. 2 Discretization of time delay signal

当系统出现一定程度的时延时, 传统 AGC 无法维持负荷频率控制的稳定性。针对 AGC 系统信息传输过程中无时延、单通道时延、双通道时延的几种情况, 分别以无时延、控制器到执行机构的时延  $\tau_1$ 、传感器到控制器的时延  $\tau_2$ 、控制器到执行机构的时延  $\tau_1$  及传感器到控制器的时延  $\tau_2$  同时存在的四种情况作对应, 则可分别获取其输出响应如图 3—图 6 所示。

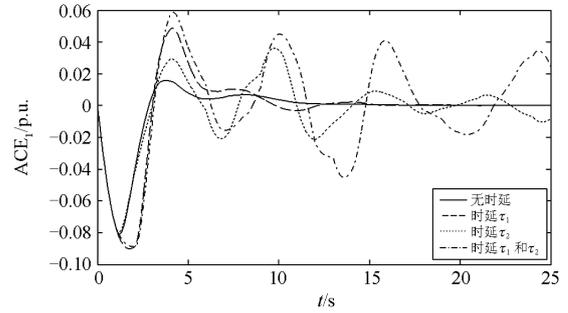


图 3 四种时延情况下  $ACE_1$  响应曲线

Fig. 3  $ACE_1$  response curve under four kinds of delays

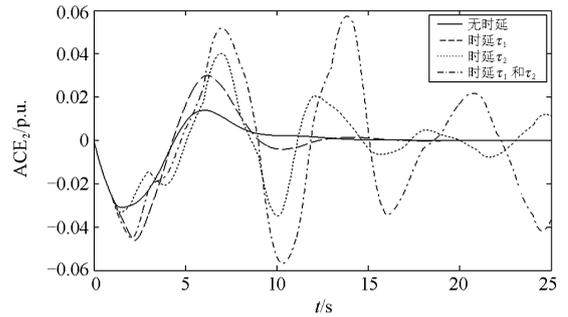


图 4 四种时延情况下  $ACE_2$  响应曲线

Fig. 4  $ACE_2$  response curve under four kinds of delays

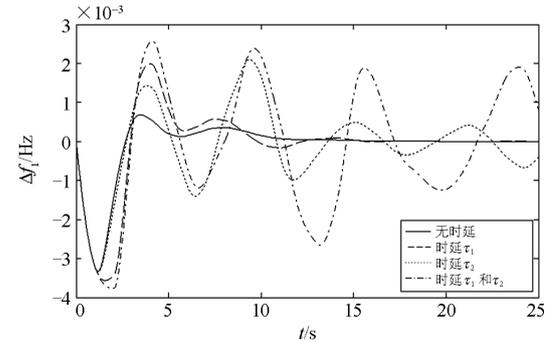


图 5 四种时延情况下  $\Delta f_1$  响应曲线

Fig. 5  $\Delta f_1$  response curve under four kinds of delays

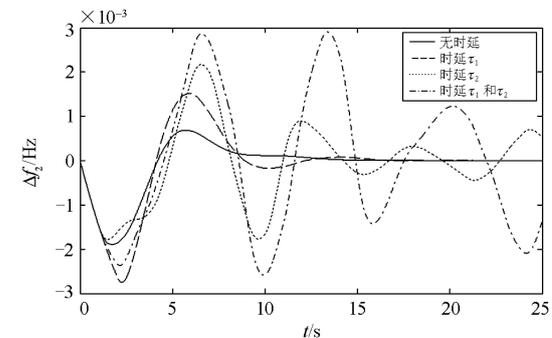


图 6 四种时延情况下  $\Delta f_2$  响应曲线

Fig. 6  $\Delta f_2$  response curve under four kinds of delays

由图 3—图 6 可明显看到, 两种单通道时延或双通道时延存在时, 系统的动态性能大大降低, 甚至可能导致系统不断振荡无法稳定, 以致无法达到理想的控制期望。因此, 通道存在的时延不容忽视。

### 2.3 控制变量优化选择方法

系统在信息传输过程中存在时延时, 执行器无法获取准确的控制信号, 控制器则无法准确接收原始的反馈信号, 在此情况下若不采取控制变量选择优化策略, 将大大影响控制器的控制效果和系统的动态性能。利用 MPC 的预测控制功能, 可对控制序列的信号值进行选择。考虑双通道随机时延时, 在执行器、控制器信号接收端分别设置缓存器, 存储原控制序列作为备用控制序列。当延时发生时, 可将缓存器所存储的上时刻控制序列值发送给执行器、控制器使用, 如图 7 所示。

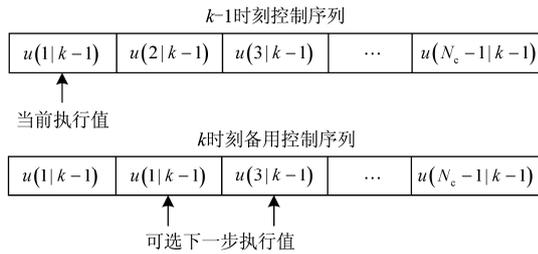


图 7 控制变量选择示意图

Fig. 7 Schematic diagram of control variables selection

由图 7 可知,  $k$  时刻由于网络延时导致执行器和控制器无法获取相应的控制信号和反馈信号时, 缓存器中  $k-1$  时刻的最优控制序列, 即备用控制序列的后续预测控制元素可代替当前信号值进入执行器实施控制。

而考虑到在某些特定控制形式下, 如在平稳控制过程中, 也就是在控制量变化不大的过程中, 存在一种可能, 即按接收到的前时刻信息重新计算获取当前时刻控制量的控制效果可能优于按上述方法进行选择的控制效果。因此本文采取的操作策略如下所述。

**Step1:** 检测当前时延信号并输出对应值。无时延发生时, 对应输出序列为 0; 单通道时延发生(即  $\tau_1$ 、 $\tau_2$  有一个存在)时, 对应输出序列为 1; 单通道时延发生(即  $\tau_1$ 、 $\tau_2$  二者均存在)时, 对应输出序列为 2。

**Step2:** 根据接收到的时延种类信号(0/1/2)区分控制信号的选择。即接收信号为 0 时, 以接收到的最新信息为基础, 重新进行控制序列的计算, 选择序列第一个值作为控制变量; 接收信号为 1 时, 以存在的最新接收信息对应时刻计算的控制序列的第二个预测值作为控制变量; 接收信号为 2 时, 以存

在的最新接收信息对应时刻计算的控制序列的第三个预测值作为控制变量。

**Step3:** 以存在的最新接收信息重新计算控制序列, 以序列第一个值作为控制变量, 并在上述三种模式下, 比较其与 Step2 中获取的控制变量所对应的目标函数值  $J_1$ 、 $J_2$ 、 $J_3$ , 选择性能指标更优的一个作为当前时刻实际控制变量输出。

## 3 仿真分析

在 Matlab/Simulink 中利用 MPC 工具箱构建考虑双通道随机时延的 AGC 系统仿真模型, 详细参数见表 1, 按照前述方法设计 CMPC 控制器。设置预测时域  $N_p=10$ , 控制时域  $N_c=4$ 。

表 1 两区域互联 AGC 系统动态模型仿真参数

Table 1 Simulation parameters of dynamic model of two

regional interconnected AGC system

参数	区域 1	区域 2
$M_i$	11	12.5
$D_i$	2.75	2.0
$B_i$	36	22
$R_i$	0.04	0.06
$K_{ri}$	0.3	0.4
$T_{gi}$	0.15	0.1
$T_{ri}$	11	9
$T_{vi}$	0.2	0.3
$T_{12}$	0.85	—

设置仿真采样周期为 0.01 s, 考虑双通道时延, 采用三种方法对控制变量进行处理, 并进行仿真结果对比。① 根据当前采样值进行控制序列计算, 取序列第一个值作为当前控制量输出; ② 根据当前时刻时延的判断, 选择已获取的最新控制序列中对应序列值作为控制变量输出; ③ 在第②种状态下, 将对应序列值与最近一次采样值重新计算获取的控制序列首元素进行目标函数比较, 选择目标函数较优的控制变量输出。此三种方法分别对应无时延处理、控制序列选择、控制序列选择优化等处理模式。

当输入为阶跃信号时, 给定区域 1 的扰动负荷  $\Delta P_{L1}$  为 0.04 p.u., 区域 2 的扰动负荷  $\Delta P_{L2}$  为 0.01 p.u., 则各控制方式下两区域输出响应如图 8—图 11 所示。

图 8—图 11 表明在 CMPC 控制方式下, 当计及双通道时延时, 对控制序列进行选择优化和对控制序列进行选择相比无时延处理调节时间短, 超调量小, 且系统最终趋于稳定。而无时延处理的各输出曲线不仅具有较差的暂态响应, 而且明显存在振荡无法稳定。同时, 在对延时的处理中, 对控制序列

进行选择优化相比对控制序列只进行选择输出的控制效果更优。

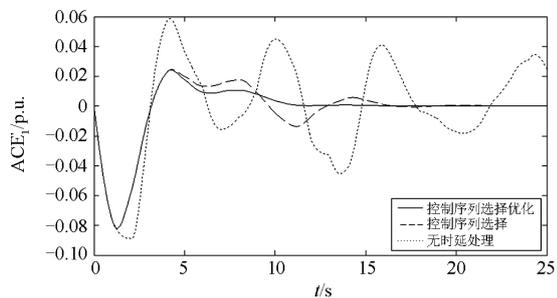


图 8 阶跃信号下  $ACE_1$  响应曲线

Fig. 8  $ACE_1$  response curve under step signal

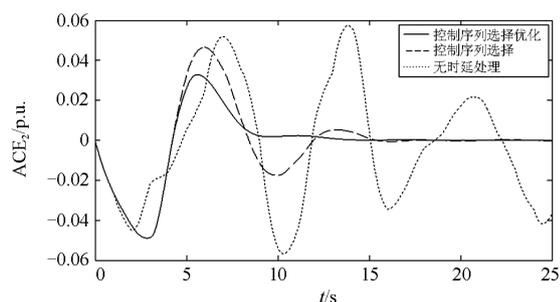


图 9 阶跃信号下  $ACE_2$  响应曲线

Fig. 9  $ACE_2$  response curve under step signal

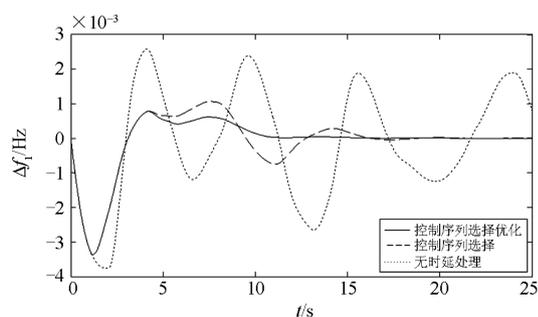


图 10 阶跃信号下  $\Delta f_1$  响应曲线

Fig. 10  $\Delta f_1$  response curve under step signal

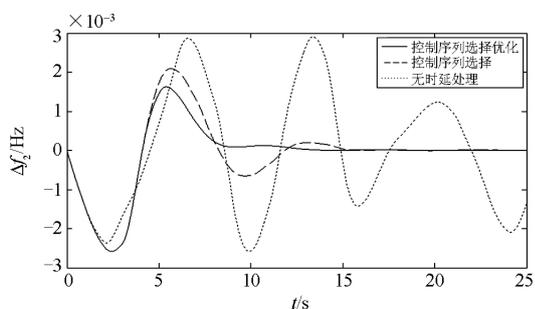


图 11 阶跃信号下  $\Delta f_2$  响应曲线

Fig. 11  $\Delta f_2$  response curve under step signal

以某两区域电网某时段负荷变化曲线为例, 如图 12 和图 13 所示, 两区域  $\Delta P_{L1}$ 、 $\Delta P_{L2}$  控制响应曲线分别如图 14 和图 15 所示。

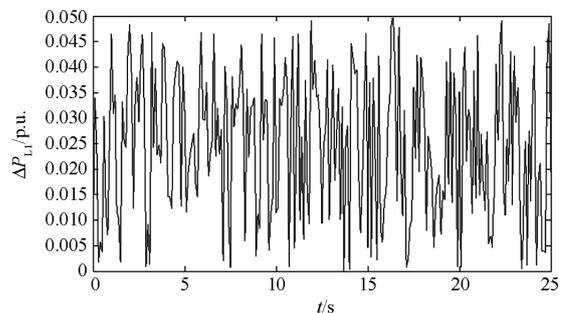


图 12 随机输入信号  $\Delta P_{L1}$

Fig. 12 Random input signal  $\Delta P_{L1}$

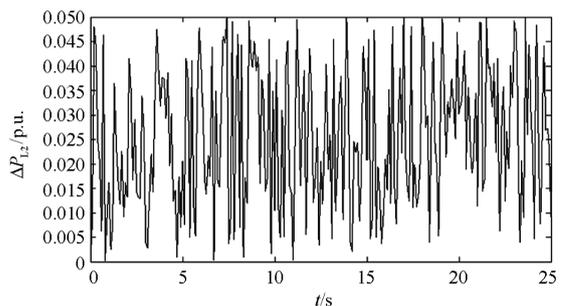


图 13 随机输入信号  $\Delta P_{L2}$

Fig. 13 Random input signal  $\Delta P_{L2}$

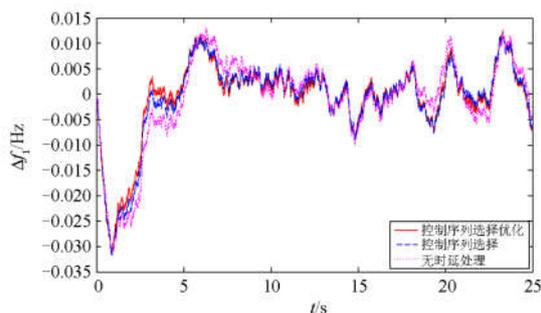


图 14 随机信号下  $\Delta f_1$  响应曲线

Fig. 14  $\Delta f_1$  response curve under random signal

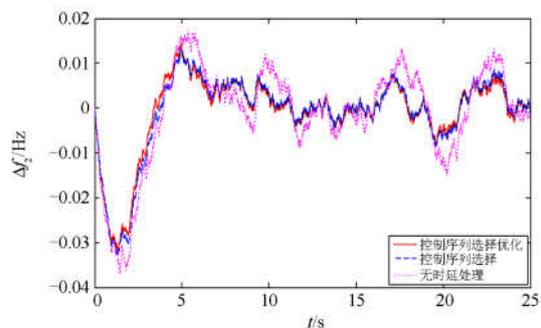


图 15 随机信号下  $\Delta f_2$  响应曲线

Fig. 15  $\Delta f_2$  response curve under random signal

由图 14 和图 15 也可明显看到, 在扰动负荷为随机信号时, 有时延处理相比无时延处理的频率控制趋稳性更好。

## 4 结论

本文针对双通道随机时延存在的客观性, 提出了一种集中式模型预测控制方法。通过构建考虑控制器到执行器、传感器到控制器时延的两区域互联电网 AGC 系统模型, 进行控制过程中时延的处理。运用 MPC 的控制特征, 分别对无时延处理、控制序列进行选择、控制序列进行选择优化三种控制方式进行了仿真验证。仿真结果表明, 改进后的 CMPC 方法具有更好的频率控制效果, 从而验证了本文所提方法的可行性和有效性。

## 参考文献

- [1] 许昌, 魏媛, 李涛, 等. 大型风电机组机组层 AGC 控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 69-74.  
XU Chang, WEI Yuan, LI Tao, et al. Research on automatic generation turbine control strategy of large wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 69-74.
- [2] 李中豪, 黄屹俊, 张沛超, 等. 大型风燃协调等效电厂的自动发电控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 44-50.  
LI Zhonghao, HUANG Yijun, ZHANG Peichao, et al. A study about the automatic generation control strategy of large scale wind-gas coordinating equivalent power plant[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 44-50.
- [3] 郭亮, 于昌海, 吴继平, 等. 四川电网 AGC 机组协调优化控制策略研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 159-164.  
GUO Liang, YU Changhai, WU Jiping, et al. Research and application of AGC generators coordinated optimization control strategy in Sichuan power grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 159-164.
- [4] 丁冬, 刘宗歧, 杨水丽, 等. 基于模糊控制的电池储能系统辅助 AGC 调频方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 81-87.  
DING Dong, LIU Zongqi, YANG Shuili, et al. Battery energy storage aid automatic generation control for load frequency control based on fuzzy control[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 81-87.
- [5] MI Y, FU Y, WANG C, et al. Decentralized sliding mode load frequency control for multi-area power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4301-4309.
- [6] 杨平, 董国威. 互联电网 AGC 控制研究进展[J]. 华东电力, 2011, 39(9): 1488-1492.  
YANG Ping, DONG Guowei. Research progress on AGC control of interconnected power grid[J]. East China Electric Power, 2011, 39(9): 1488-1492.
- [7] 李丽, 恒庆海. 鲁棒控制在热连轧 AGC 中的应用[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2015, 30(3): 90-94.  
LI Li, HENG Qinghai. Robust control for automatic gauge control in hot strip milling[J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University (Science Edition), 2015, 30(3): 90-94.
- [8] CAGIENARD R, GRIEDER P, KERRIGAN E C, et al. Move blocking strategies in receding horizon control[J]. Journal of Process Control, 2007, 17(6): 563-570.
- [9] 李绍铭, 徐龙淞, 杨帆. 基于遗传模糊 P ID 的液压 AGC 控制系统研究[J]. 机床与液压, 2015, 43(10): 127-131.  
LI Shaoming, XU Longsong, YANG Fan. Research on hydraulic AGC system based on GA fuzzy PID algorithm[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(10): 127-131.
- [10] KAR S, PANDA S, PARI T, et al. Design and analysis of fuzzy PID controller with derivative filter for AGC in multi-area interconnected power system[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(15): 3764-3776.
- [11] KHODABAKHSHIAN A, HOOSHMAND R. A new PID controller design for automatic generation control of hydro power systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2010, 32(5): 375-382.
- [12] 黄伟峰, 姚建刚, 韦亦龙, 等. 无模型自适应控制算法在互联电网 AGC 中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(4): 78-84.  
HUANG Weifeng, YAO Jiangan, WEI Yilong, et al. Application of model-free adaptive control algorithm into

- AGC control of interconnected power grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2016, 28(4): 78-84.
- [13] JIANG H, LIN J, SONG Y, et al. Explicit model predictive control applications in power systems: an AGC study for an isolated industrial system[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(4): 964-971.
- [14] 周念成, 付鹏武, 王强钢, 等. 基于模型预测控制的两区域互联电网 AGC 系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 46-51.  
ZHOU Niancheng, FU Pengwu, WANG Qianggang, et al. Research on AGC of two area interconnected power system based on MPC[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 46-51.
- [15] VENKAT A N, HISKENS I A, RAWLINGS J B, et al. Distributed MPC strategies with application to power system automatic generation control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(6): 1192-1206.
- [16] YAN Y, ZHANG Y, LIU X. Distributed MPC strategy with application to AGC in the presence of variable speed wind turbine[C] // Control Conference: IEEE, July 28, 2015, Hangzhou, China: 4151-4155.
- [17] NANG H, LIU X. Nonlinear distributed MPC strategy with application to AGC of interconnected power system[C] // Control and Decision Conference, May 25-27, 2013, Guiyang, China: 3935-3940.
- [18] 张杰超, 张建华. 神经网络预测控制应用于网络 AGC 系统[C] // 华北电力大学研究生学术交流年会, 12, 24, 2017, 保定, 中国: 1-6.  
ZHANG Jiechao, ZHANG Jianhua. Application of neural network predictive control for AGC system over communication network[C] // North China Electric Power University Graduate Student Academic Exchange Annual Meeting, December 24, 2007, Baoding, China: 1-6.
- [19] 付鹏武, 周念成, 王强钢, 等. 基于时滞模型预测控制算法的网络化 AGC 研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 188-195.  
FU Pengwu, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang, et al. Research on networked AGC system based on delay model predictive control algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 188-195.
- [20] SHI Y, YU B. Robust mixed  $H_2/H_\infty/H_\infty$  control of networked control systems with random time delays in both forward and backward communication links[J]. Automatica, 2011, 47(4): 754-760.
- 
- 收稿日期: 2017-04-20; 修回日期: 2017-11-10  
作者简介:  
赵熙临(1969—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: zhaoxl@mail.hbut.edu.cn  
何晶晶(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术。E-mail: 1223312730@qq.com  
(编辑 姜新丽)