

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201707055



考虑区域间互联电网时延差异性的 分布式 AGC 方法

赵熙临, 何晶晶, 付波, 单治磊, 汤倩

(湖北工业大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉, 430068)

摘要: 针对区域互联电网自动发电控制(AGC)过程中系统间传输时延的随机性与差异性,提出一种分布式模型预测控制(DMPC)方法.首先,在考虑互联电网区域时延存在差异性的前提下,构建互联电网 AGC 系统模型;然后,针对互联电网 AGC 系统的分布式特征,对 DMPC 方法进行讨论,分析在 DMPC 框架下时延的处理模式;最后,分别以阶跃与随机负荷曲线为扰动变量,获取互联电网频率控制效果曲线.仿真结果表明:在考虑区域间时延随机性与差异性的情况下,所提方法能够保证系统良好的动态响应性能,验证了此方法的可行性和有效性.

关键词: 自动发电控制; 分布式模型预测控制; 互联电网; 时延

中图分类号: TM 734 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)03-0439-06

Distributed AGC Method Considering Difference of Time Delay Between Regional Interconnected Power Grids

ZHAO Xilin, HE Jingjing, FU Bo,
SHAN Zhilei, TANG Qian

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

Abstract: For the randomness and difference of time delay between regional interconnected power grid in automatic generation control (AGC) research field, a distributed model predictive control (DMPC) strategy is proposed in this paper. Firstly, the AGC system model of two regional interconnected power grid is built with consideration of the difference of time delay. Then, aiming at the distribution characteristics of interconnected power AGC system, the DMPC method is discussed, and the processing mode of time delay under DMPC framework is also analyzed. Finally, the frequency control effect curves of the interconnected power grid are obtained by using the step and random load curves as input variables. The simulation results show that the system has a good dynamic response performance under the consideration of the randomness and difference of the time delay, and the feasibility and effectiveness of the proposed method is also verified.

Keywords: automatic generation control; distributed model predictive control; interconnected power network; time delay

自动发电控制(AGC)是电力系统运行与控制的重要组成部分,也是系统实现二次调频的重要手段.从电网调度的角度看,当电力系统存在负荷扰动时,AGC 可以尽可能地减小频率和联络线功率的偏差,保证系统频率稳定^[1-3].鉴于频率稳定对电网安全运行的重要性,AGC 的研究得到众多学者的关注,

收稿日期: 2017-07-20

通信作者: 赵熙临(1969-),男,教授,博士,主要从事电力系统及自动化研究. E-mail: zhaoxl@mail.hbut.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61473116); 国家教育部科研基金资助项目(20141685)

动变量和输出变量, $\mathbf{X}_i = [\Delta f_i \quad \Delta P_{t,i} \quad \Delta P_{r,i} \quad \Delta X_{g,i} \quad \Delta P_{t,12}]^T$, $\mathbf{Y}_i = [ACE_i \quad \Delta f_i \quad \Delta P_{t,12}]^T$, $\mathbf{U}_i = [\Delta P_{c,i}]$, $\mathbf{W}_i = [\Delta P_{L,i}]$; $\mathbf{X}_j \in \mathbf{R}^n$, $\mathbf{U}_j \in \mathbf{R}^m$, $\mathbf{W}_j \in \mathbf{R}^k$, $\mathbf{Y}_j \in \mathbf{R}^r$ 分别为与第 i 个区域相邻的第 j 个区域系统的状态变量、控制变量、扰动变量和输出变量; $\mathbf{A}_{i,i}$, $\mathbf{B}_{i,i}$, $\mathbf{F}_{i,i}$, $\mathbf{C}_{i,i}$, $\mathbf{A}_{i,j}$, $\mathbf{B}_{i,j}$, $\mathbf{F}_{i,j}$ 分别为对应维度的参数矩阵。

2 分布式模型预测控制机理

2.1 时延处理

当考虑区域间信息传输时延差异时,即区域 1 的输出交互信息传递给区域 2 时存在时延 τ_1 ,区域 2 的输出交互信息传递给区域 1 时存在 τ_2 ,则系统的控制方式将会发生变化。

对于离散系统而言,由于存在采样周期的问题,需要对其进行离散化处理,即在延时信号值大于仿真采样周期 T_s 时才会表现出时延的存在,输出 1;延时信号值小于或等于仿真采样周期 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,随机时延将转化为随机的马尔科夫跳变过程^[22]。

2.2 预测模型

假设预测窗口大小为 N_p ,控制窗口大小为 N_c ,一般情况下,有 $N_p \geq N_c$ 。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,其输入序列为

$$\mathbf{U}(k) = [u(k_i)u(k_i+1)\cdots u(k_i+N_c-1)]^T. \quad (2)$$

假设系统期望输出为

$$\mathbf{R}_s = \frac{N_p}{[r(k_i)r(k_i+1)\cdots r(k_i+N_p-1)]^T}. \quad (3)$$

式(3)中: $r(k_i)$ 为某一采样时刻的输出期望值。

为实现滚动优化,定义目标函数为

$$\mathbf{J} = (\mathbf{R}_s - \mathbf{Y})^T (\mathbf{R}_s - \mathbf{Y}) + \mathbf{U}^T \mathbf{R} \mathbf{U}. \quad (4)$$

式(4)中: \mathbf{Y} 为系统输出; \mathbf{R} 为输入对目标函数影响的权重。

当寻求预测控制达到最优控制目标时,目标函数对输入的一阶导为零,可获得最优控制序列,即

$$\mathbf{U}^* = [u^*(k)u^*(k+1)\cdots u^*(k+N_c-1)]^T. \quad (5)$$

根据预测控制的时域特征,控制域存在的控制变量序列,仅当前时刻序列值参与到控制过程中。

2.3 优化选择

MPC 的最优化轨迹依赖于最优控制序列(5),若考虑区域间时延,存在控制器无法获取反馈信息的情况。利用 MPC 的预测控制功能,在执行器信号接收端设置缓存器,用来存储控制量预测序列,当发生延迟、网络数据包丢失等情况时,可以将缓存器所存储的上时刻原控制序列作为备用控制序列使用,其操作如图 3 所示。

如 k 时刻反馈信息由于网络时延未获取,则可有 $k-1$ 时刻计算的最优控制序列中第二个值代替。

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,控制效果优于按上述方法进行选择。因此,采取的操作策略是:当检测时延发生时,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;同时,以该信息对应时刻计算的控制序列中对应位置值作为控制变量,比较两种控制模式下的控制性能指标,选择性能指标更优的作为当前时刻实际控制变量输出。

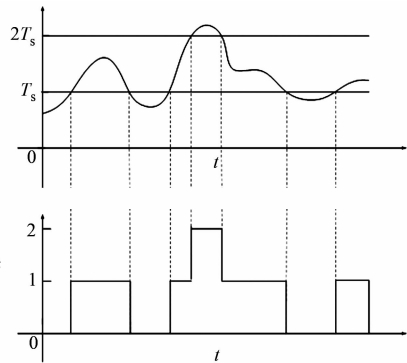


图 2 时延信号离散化

Fig. 2 Discretization of time delay signal

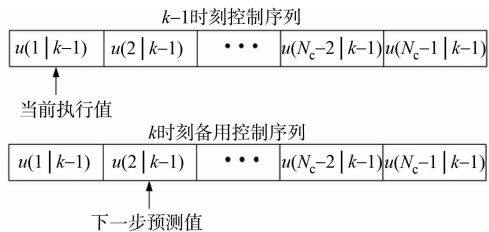


图 3 控制变量选择示意图

Fig. 3 Schematic diagram of control variables selection

3 仿真分析

在 Matlab/Simulink 中构建考虑区域时延差异性的 AGC 系统仿真模型,详细参数如表 1 所示。按

照前述方法设计控制器,设置预测时域 $N_p=10$,控制时域 $N_c=4$,权矩阵 $\mathbf{R}=\mathbf{I}$,针对两区域分别生成随机时延序列,体现区域间时延的差异性.

表 1 两区域互联 AGC 系统动态模型仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of dynamic model of two regional interconnected AGC system

参数	区域 1	区域 2	参数	区域 1	区域 2	参数	区域 1	区域 2
M_i	11	12.5	R_i	0.04	0.06	$T_{r,i}$	11	9
D_i	2.75	2.00	$K_{r,i}$	0.3	0.4	$T_{1,i}$	0.2	0.3
B_i	28	19	$T_{g,i}$	0.15	0.10	T_{12}	0.85	—

设置仿真采样周期为 0.01 s,采用 3 种方法对控制变量进行处理,并进行仿真对比.

- 1) 不考虑时延存在;
- 2) 根据当前时刻时延的判断,选择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,选择结果较优的控制变量输出.

这 3 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 3 种情况.

当输入为阶跃信号时,给定区域 1 的扰动负荷 $\Delta P_{L,1}$ 为 0.04 pu(pu 为标么值),区域 2 的扰动负荷 $\Delta P_{L,2}$ 为 0.01 pu,则各控制方式下两区域输出响应,如图 4,5 所示.

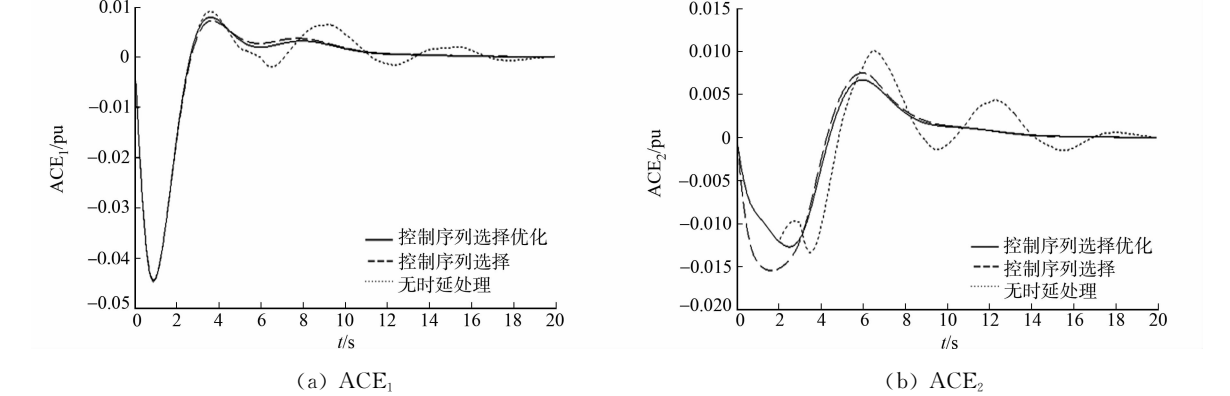


图 4 阶跃信号下 ACE_1 和 ACE_2 响应曲线

Fig. 4 Response curve of ACE_1 and ACE_2 step signal

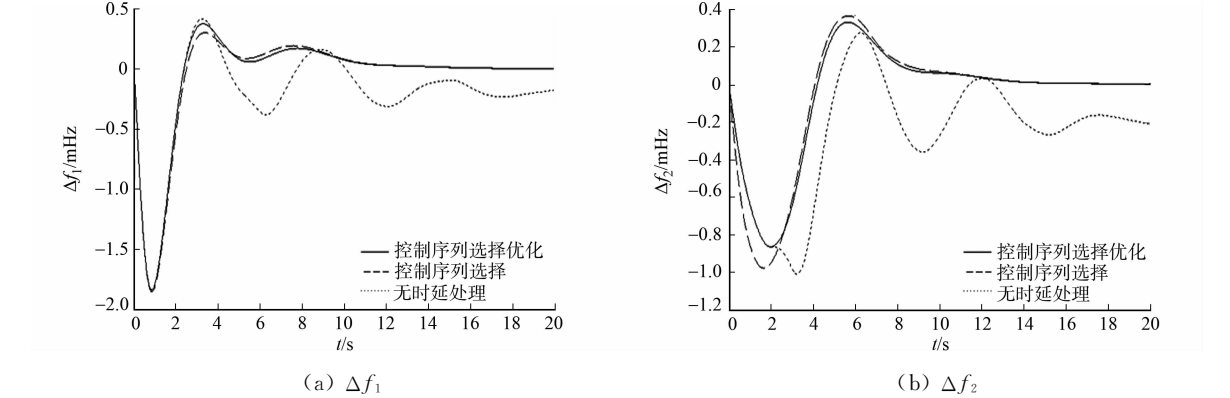


图 5 阶跃信号下 Δf_1 和 Δf_2 响应曲线

Fig. 5 Response curve of Δf_1 and Δf_2 step signal

由图 4,5 可知:当区域间时延存在时,第 2,3 种情况相比第 1 种情况调节时间短,超调量小,且无稳态误差.而无时延处理的各输出曲线不仅具有较差的暂态响应,而且明显存在稳态误差,说明时延的存在会降低系统的控制性能指标.同时,在对时延的处理中,对控制序列进行选择优化相比只进行选择输出的控制效果更优.

某地区电网两区域某时段的负荷变化曲线,如图 6 所示.两区域的频率 $\Delta f_1, \Delta f_2$ 控制响应曲线,如图 7 所示.由图 6,7 可知:在扰动负荷为随机信号时,有时延处理相比无时延处理具有更好的控制表现.

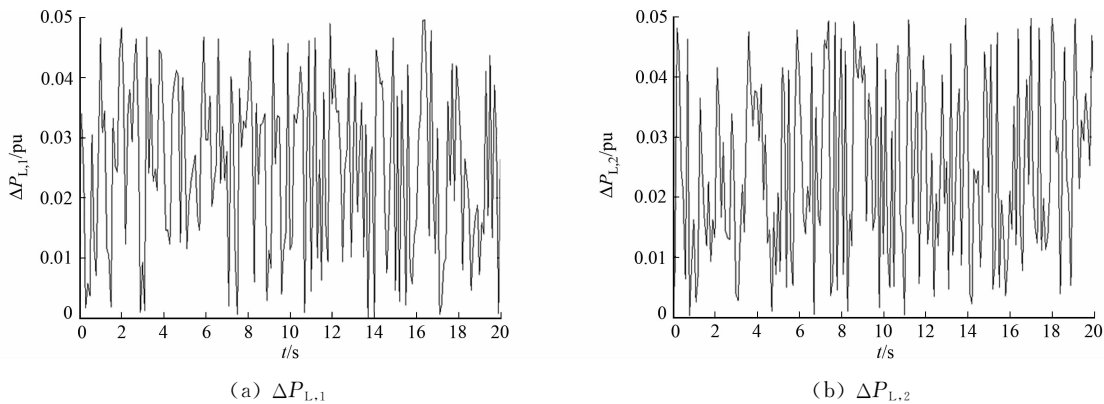


图 6 随机输入信号 $\Delta P_{L,1}$ 和 $\Delta P_{L,2}$ 的负荷变化曲线
Fig. 6 Loading variation curve for random input signal $\Delta P_{L,1}$ and $\Delta P_{L,2}$

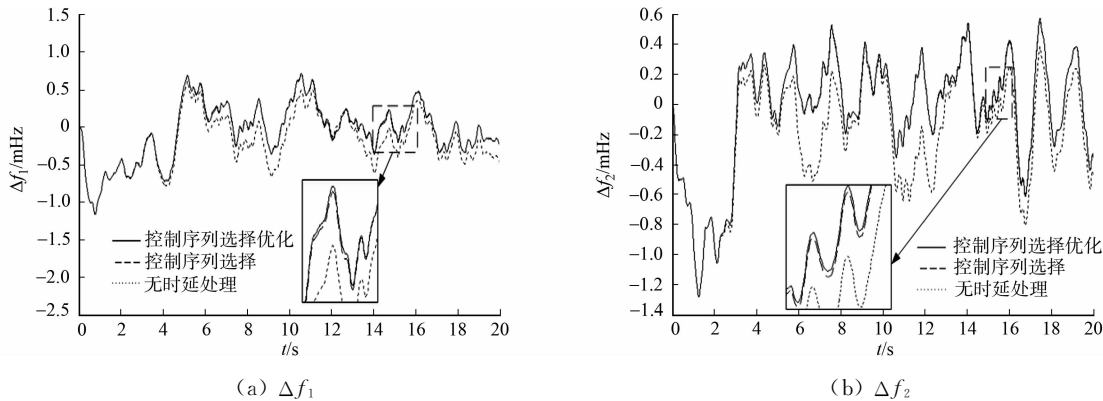


图 7 随机信号下 Δf_1 和 Δf_2 响应曲线
Fig. 7 Δf_1 and Δf_2 response curve under random signal

4 结束语

针对互联电网区域间信息传递时延的差异性,提出一种模型预测控制方法.通过构建区域间时延存在的两区域 AGC 系统模型,进行控制过程中时延差异的处理,运用 MPC 的控制特征,对预测的控制序列进行存储.根据预测序列中对应时刻的元素进行时延导致的缺失数据的替代,分别对无时延处理、对控制序列进行选择、对控制序列进行选择优化 3 种方式进行了仿真验证.结果表明:所提方法具有更好的频率控制效果,从而验证了其可行性和有效性.

参考文献:

[1] JALEELI N,VANSLYCK L S,EWART D, *et al.* Understanding automatic generation control[J]. IEEE Transactions on Power System,1992,7(3):1106-1122. DOI:10.1109/59.207324.

[2] 薛禹胜,雷兴,薛峰,等.关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5029-5040. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.29.004.

[3] 滕贤亮,高宗和,朱斌,等.智能电网调度控制系统 AGC 需求分析及关键技术[J].电力系统自动化,2015,39(1):81-87. DOI:10.7500/AEPS20141008020.

[4] 刘梦欣,王杰,陈陈.电力系统频率控制理论与发展[J].电工技术学报,2007,22(11):135-145. DOI:10.3321/j.issn:1000-6753.2007.11.024.

[5] 张磊,罗毅,肖雅元,等.大规模风电并网条件下 AGC 机组跨区分布式最优协调控制[J].电工技术学报,2016,31(9):42-49. DOI:10.3969/j.issn.1000-6753.2016.09.006.

[6] 赵霞,张荣荣,赵瑞峰,等.CPS 标准下 AGC 机组动态优化调度的改进模型[J].电工技术学报,2016,31(5):99-106. DOI:10.3969/j.issn.1000-6753.2016.05.013.

[7] ERSCHLER J,ROUBELLAT F,VERNHES J P. Automation of a hydroelectric power station using variable-struc-

- ture control systems[J]. *Automatica*, 1974, 10(1): 31-36. DOI: 10.1016/0005-1098(74)90007-7.
- [8] 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 and Distribution*, 2016, 10(15): 3764-3776. DOI: 10.1049/iet-gtd.2016.0106.
- [9] 高宗和, 滕贤亮, 张小白. 互联电网 CPS 标准下的自动发电控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2005, 29(19): 40-44. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1026.2005.19.008.
- [10] KHODABAKHSHIAN A, HOOSHMAND R. A new PID controller design for automatic generation control of hydro power systems[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2010, 32(5): 375-382. DOI: 10.1016/j.ijepes.2009.11.006.
- [11] YANG Mi, YANG Fu, WANG Chengshan, *et al.* Decentralized sliding mode load frequency control for multi-area power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(4): 4301-4309. DOI: 10.1109/TPWRS.2013.2277131.
- [12] 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. DOI: 10.1016/j.jprocont.2007.01.001.
- [13] MENG Xiangping, XUE Changfei, ZHANG Huaguang. Decentralized sliding mode load frequency control based on Ackermann's formula[J]. *Journal of Northeastern University*, 2000, 21(2): 128-131.
- [14] CARSON J M, MAIRICE J. Robust model predictive control with a reactive safety mode[J]. *Dissertations and Theses-Gradworks*, 2008, 49(5): 1251-1260.
- [15] 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(22): 46-51.
- [16] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6753.2014.04.025.
- [17] YAN Yujia, ZHANG Yi, LIU Xiangjie. Distributed MPC strategy with application to AGC in the presence of variable speed wind turbine[C]// 34th Chinese Control Conference. Hangzhou: IEEE Press, 2015: 4151-4155. DOI: 10.1109/ChiCC.2015.7260279.
- [18] LIN Jiang, WEI Yao, WU Q H, *et al.* Delay-dependent stability for load frequency control with constant and time-varying delays[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, 27(2): 932-941. DOI: 10.1109/PES.2009.5275834.
- [19] BEVRANI H, HIYAMA T. On load-frequency regulation with time delays: Design and real-time implementation [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2009, 24(1): 292-300. DOI: 10.1109/TEC.2008.2003205.
- [20] BHOWMIK S, TOMSOVIC K, BOSE A. Communication models for third party load frequency control[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004, 19(1): 543-548. DOI: 10.1109/TPWRS.2003.818700.
- [21] 段献忠, 何飞跃. 考虑通信延迟的网络化 AGC 鲁棒控制器设计[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(22): 35-40. DOI: 10.3321/j.issn:0258-8013.2006.22.007.
- [22] SHI Yang, YU Bo. Robust mixed H_2/H^∞ control of networked control systems with random time delays in both forward and backward communication links[J]. *Automatica*, 2011, 47(4): 754-760. DOI: 10.1016/j.automatica.2011.01.022.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 吴逢铁)