

互联电力系统鲁棒分布式模型预测负荷频率控制

张 怡^{1,2}, 刘向杰^{1†}

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206; 2. 华北理工大学 轻工学院, 河北 唐山 063000)

摘要: 负荷频率控制是现代互联电力系统运行的重要保障. 本文针对含有不确定因素和负荷扰动的多区域互联电力系统提出了一种基于线性矩阵不等式参数可调节的鲁棒分布式预测控制算法. 设计各个区域控制器目标函数引入相邻区域的状态变量和输入变量, 同时考虑发电机变化速率约束和阀门位置约束, 将求解一组凸优化问题转化成线性矩阵不等式求解, 得到各个区域的控制律, 在线性矩阵不等式中引入一组可调参数, 将优化一个上限值转化成优化吸引区, 降低算法的保守性. 仿真结果验证了该算法在负荷扰动、系统参数不确定和结构不确定性情况下具有鲁棒性.

关键词: 负荷频率控制; 鲁棒控制; 分布式模型预测控制; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Robust distributed model predictive control for load frequency control of uncertain power systems

ZHANG Yi^{1,2}, LIU Xiang-jie^{1†}

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Qingong College, North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei 063000, China)

Abstract: Reliable load frequency control is crucial to the operation and design of modern electric power systems. However, the power systems are always subject to uncertainties and external disturbances. Considering the LFC problem of a multi-area interconnected power system, this paper presents a robust distributed model predictive control (RDMPC) based on linear matrix inequalities. The proposed algorithm solves a series of local convex optimization problems to minimize an attractive range for a robust performance objective by using a time-varying state-feedback controller for each control area. The scheme incorporates the two critical nonlinear constraints, e.g., the generation rate constraint and the valve limit, into convex optimization problems based on linear matrix inequalities. Furthermore, the algorithm explores the use of an expanded group of adjustable parameters in LMI to transform an upper bound into an attractive range for reducing conservativeness. Good performance and robustness are obtained in the presence of power system dynamic uncertainties and load change.

Key words: load frequency control; robust control; distributed model predictive control; linear matrix inequalities

1 引言(Introduction)

负荷频率控制(load frequency control, LFC)作为现代互联电力系统控制的一项基本功能, 通过控制发电机组有功功率跟踪电力系统的负荷变化, 维持系统联络线交换功率为计划值, 实现电力系统频率稳定^[1]. 现代电力系统由多个控制区域通过联络线连接构成的结构复杂的大系统, 每个控制区域主要由火电、水电、核电等构成, LFC任务主要由火电机组和水电机组承担.

基于以上任务, 由频率和联络线交换功率合成的区域控制偏差(area control error, ACE)信号作为控制信号, 并在此基础上构造有效控制策略^[2]. 如基于优化的方法^[3], 自适应和变结构控制方法^[4-5]、鲁棒控制方法^[6]以及基于人工智能的神经网络、模糊逻辑等控制^[7-8]算法等.

模型预测控制(model predictive control, MPC)作为典型的优化控制策略, 具有在线约束处理能力, 在电力生产过程控制中取得了广泛应用^[9-12]. 大规模互

收稿日期: 2015-09-28; 录用日期: 2016-03-17.

[†]通信作者. E-mail: liuxj@ncepu.edu.cn; Tel.: +86 10-61772103.

本文责任编辑: 王伟.

国家自然科学基金项目(61273144, 61533013), 北京市自然科学基金项目(4122071)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61273144, 61533013) and National Natural Science Foundation of Beijing (4122071).

联电力系统各个控制区域地理位置分散,信息量庞大.集中式MPC在计算量、系统容错能力方面十分有限.分布式MPC将集中系统划分为含有多个相互耦合的子系统,每个子系统由一个独立的控制器控制,控制器之间通过网络实现信息交换,并采用一定的协调策略达到某一共同的控制目标或整体性能^[13].文[14]针对互联电力系统提出通过迭代和协调合作满足系统设定的全局控制目标的分布式模型预测控制策略,有效地降低了计算时间,但所提出的控制策略未考虑系统存在的不确定因素,具有一定的局限性.

随着系统运行工况改变,不同类型机组(火电、水电)所呈现的动态特性也不尽相同,甚至在极端条件下,大的负荷变化可能引起系统超限,致使机组退出LFC.因此,设计一组区域控制器以克服存在约束条件和不确定因素情况下,保证负荷扰动发生后互联电力系统的频率稳定成为LFC的关键问题.

鲁棒控制策略在系统存在不确定因素情况下能够有效改善系统动态性能.鲁棒预测控制策略通常采用多面体数学模型,将传统MPC优化问题转化成目标函数上限优化,在满足相关约束条件下,求解一组线性矩阵不等式(linear matrix inequalities, LMI),得到最优控制律^[15-17].文献[18]针对分布式控制系统提出一种新型基于线性矩阵不等式的鲁棒分布式预测控制策略,将分布式优化问题转化成线性矩阵不等式上限优化.文献[19]将鲁棒分布式MPC应用到互联电力系统负荷频率控制中,在系统存在不确定性以及负荷变化的情况下具有较好的动态响应以及鲁棒性.

本文针对含有火电、水电多区域互联电力系统构造基于LMI的参数可调的鲁棒分布式模型预测控制器.在此基础上,建立多区域互联电力系统分布式数学模型并设计相应的鲁棒分布式模型预测控制器.通过求解一组线性矩阵不等式得到各个区域的控制律,实现负荷扰动下各个区域频率偏差稳定.对存在负荷扰动、系统参数不确定和结构不确定性情况下四区域互联电力系统负荷频率控制进行仿真.

2 问题描述(Problem description)

多区域互联电力系统由 M 个控制区域构成,结构

如图1所示.所有控制区域之间均通过联络线互联.维持各区域频率在额定值和控制联络线交换功率为协议规定数值由各个区域RDMPC控制器来实现.控制器之间信息交换通过专用通信网络实现.

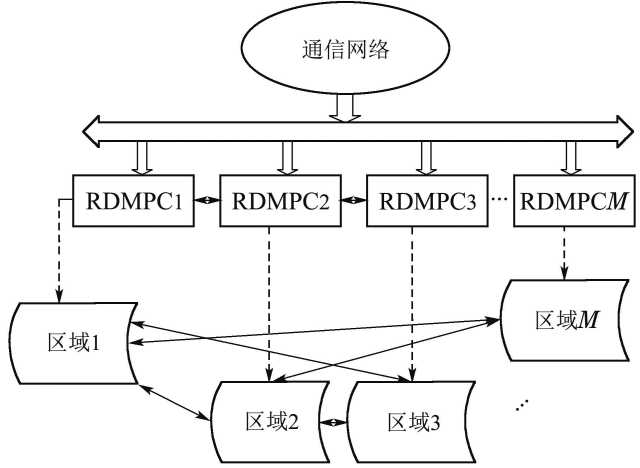


图1 多区域互联电力系统控制结构

Fig. 1 Diagram of the multi-area interconnected power system

首先,分别建立火电区域和水电区域负荷控制模型.火电区域由调速器、再热式汽轮机和发电机构成,如图2所示,系统参数如表1所示.

各组成单元的动态过程描述为:

汽轮机:

$$\Delta \dot{P}_{gi} = -\frac{1}{T_{Ti}} \Delta P_{gi} - \frac{1}{T_{Ti}} \Delta P_{ri}; \quad (1)$$

调速器:

$$\Delta \dot{X}_{gi} = -\frac{1}{T_{Gi} R_i} \Delta f_i - \frac{1}{T_{Gi}} \Delta X_{gi}; \quad (2)$$

再热单元:

$$\Delta \dot{P}_{ri} = -\frac{K_{ri}}{T_{Gi} R_i} \Delta f_i + \left(\frac{1}{T_{ri}} - \frac{K_{ri}}{T_{Gi}} \right) \Delta X_{gi} - \frac{1}{T_{ri}} \Delta P_{ri}. \quad (3)$$

水电区域由调速器、水轮机和发电机构成,如图3所示.

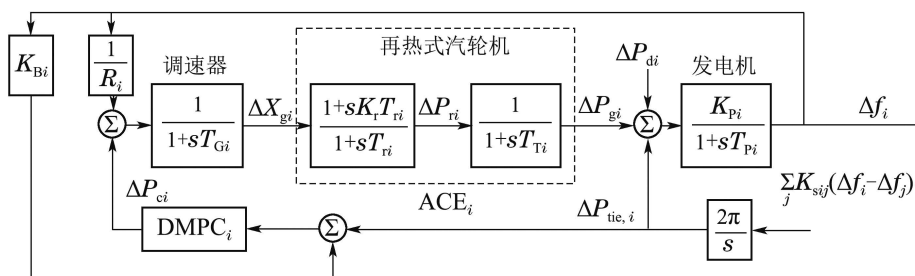


图2 火电区域负荷频率控制模型

Fig. 2 LFC model of thermal power

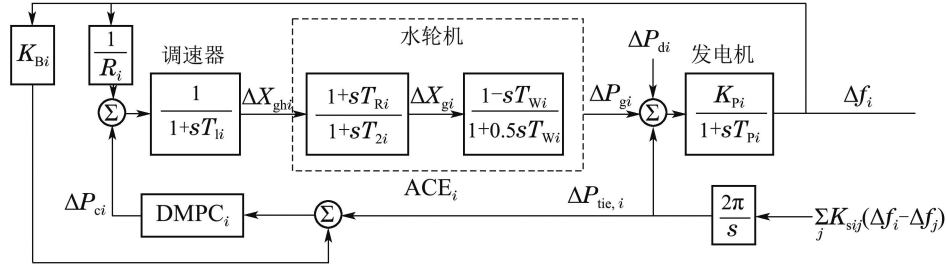


图3 水电区域负荷频率控制模型

Fig. 3 LFC model of a hydro power

表1 电力系统参数或变量

Table 1 Power system variables and parameters

参数/变量	含义	单位
$\Delta f(t)$	频率偏差	Hz
$\Delta P_g(t)$	发电机功率偏差	p.u.MW
$\Delta X_g(t)$	调节阀位置偏差	p.u.
$\Delta X_{gh}(t)$	伺服电机调节阀位置偏差	p.u.
$\Delta P_{tie}(t)$	联络线功率偏差	p.u.MW
$\Delta P_d(t)$	负荷扰动偏差	p.u.MW
K_P	发电机增益	Hz / p.u.MW
K_R	再热系数	Hz / p.u.MW
T_P	发电机时间常数	s
T_R	再热时间常数	s
T_W	水轮机启动时间	s
T_{2i}, T_R	水轮机调节阀时间常数	s
T_{1i}, T_G	调速器时间常数	s
T_T	汽容时间常数	s
K_S	控制区交互增益	p.u.MW
K_B	频率偏差因子	p.u.MW / Hz
ACE	区域控制偏差	p.u.MW

各组成单元的动态过程描述为:

水轮机:

$$\Delta \dot{P}_{gi} = 2\alpha \Delta f_i - \frac{2}{T_{Wi}} \Delta P_{gi} + 2\kappa \Delta X_{gi} + 2\beta \Delta X_{ghi}; \quad (4)$$

调速器:

$$\Delta \dot{X}_{gi} = -\alpha \Delta f_i - \frac{1}{T_{2i}} \Delta X_{gi} - \beta \Delta X_{ghi}; \quad (5)$$

水锤:

$$\Delta \dot{X}_{ghi} = -\frac{1}{T_{1i} R_i} \Delta f_i - \frac{1}{T_{1i}} \Delta X_{ghi}. \quad (6)$$

其中:

$$\alpha = \frac{T_{Ri}}{T_{1i} T_{2i} R_i}, \beta = \frac{T_{Ri} - T_{1i}}{T_{1i} T_{2i}}, \kappa = \frac{T_{2i} + T_{Wi}}{T_{2i} T_{Wi}}.$$

区域*i*发电机($i \in 1, 2, \dots, M$)

$$\Delta \dot{f}_i = -\frac{1}{T_{Pi}} \Delta f_i - \frac{K_{Pi}}{T_{Pi}} \Delta P_{tie,i} + \frac{K_{Pi}}{T_{Pi}} \Delta P_{gi} - \frac{K_{Pi}}{T_{Pi}} \Delta P_{di} + \frac{1}{T_{Gi}} \Delta P_{ci}. \quad (7)$$

区域间联络线功率偏差

$$\Delta \dot{P}_{tie}^{ij} = K_{Sij} (\Delta f_i - \Delta f_j), \Delta P_{tie}^{ij} = -\Delta P_{tie}^{ji}. \quad (8)$$

区域*i*与外区域间有功交换功率变化率可表示为

$$\Delta \dot{P}_{tie,i} = \sum_{j=1, j \neq i}^4 \Delta \dot{P}_{tie}^{ij} = \sum_{j=1, j \neq i}^4 K_{Sij} (\Delta f_i - \Delta f_j). \quad (9)$$

第*i*($i \in 1, 2, \dots, M$)个控制区域模型为

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_i(t) = \bar{A}_{ii}(t) \bar{x}_i(t) + \bar{B}_i(t) \bar{u}_i(t) + \bar{D}_i(t) \bar{w}_i(t) + \bar{h}_i(t), \\ \bar{h}_i(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^4 (\bar{A}_{ij}(t) \bar{x}_j(t) + \bar{B}_{ij}(t) \bar{u}_j(t)), \\ \bar{y}_i(t) = \bar{C}_i \bar{x}_i(t), \end{cases} \quad (10)$$

其中*j*为相邻区域且*j* ≠ *i*.

火电区域状态变量为

$$\bar{x}_i(t) = [\Delta f_i(t) \Delta P_{tie,i}(t) \Delta P_{gi}(t) \Delta X_{gi}(t) \Delta P_{ri}(t)]^T.$$

水电区域状态变量为

$$\bar{x}_i(t) = [\Delta f_i(t) \Delta P_{tie,i}(t) \Delta P_{gi}(t) \Delta X_{gi}(t) \Delta X_{ghi}(t)]^T.$$

所有区域输入变量、扰动变量和输出变量分别为

$$\bar{u}_i(t) = \Delta P_{ci}(t), \bar{w}_i(t) = \Delta P_{di}(t), \bar{y}_i(t) = ACE_i(t) = [K_{Bi} \Delta f_i(t) + \Delta P_{tie,i}(t)].$$

火电区域系数矩阵:

$$\bar{A}_i = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{Pi}} & -\frac{K_{Pi}}{T_{Pi}} & \frac{K_{Pi}}{T_{Pi}} & 0 & 0 \\ \sum_j K_{Sij} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{Ti}} & 0 & \frac{1}{T_{Ti}} \\ -\frac{1}{T_{Gi} R_i} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{Gi}} & 0 \\ -\frac{K_{Ri}}{T_{Gi} R_i} & 0 & 0 & \frac{1}{T_{Ri}} - \frac{K_{Ri}}{T_{Gi}} - \frac{1}{T_{Ri}} \end{bmatrix},$$

$$\bar{B}_i = [0 \ 0 \ 0 \ \frac{1}{T_{Gi}} \ 0]^T, \bar{C}_i = [K_{Bi} \ 1 \ 0 \ 0 \ 0],$$

$$\bar{D}_i = [-\frac{K_{Pi}}{T_{Pi}} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T.$$

水电区域状态矩阵为

$$\bar{A}_i = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{Pi}} & -\frac{K_{Pi}}{T_{Pi}} & \frac{K_{Pi}}{T_{Pi}} & 0 & 0 \\ \sum_j K_{Sij} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2\alpha & 0 & -\frac{2}{T_{Wi}} & 2\kappa & 2\beta \\ -\alpha & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{2i}} & -\beta \\ -\frac{1}{T_{1i}R_i} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{1i}} \end{bmatrix},$$

$$\bar{B}_i = [0 \ 0 \ -2R_i\alpha \ R_i\alpha \ \frac{1}{T_{1i}}]^T,$$

$$\bar{C}_i = [K_{Bi} \ 1 \ 0 \ 0 \ 0],$$

$$\bar{D}_i = [-\frac{K_{Pi}}{T_{Pi}} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T.$$

关联系数矩阵为

$$\bar{A}_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_{Sij} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{B}_{ij} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T.$$

本文是针对互联电力系统(10)设计鲁棒分布式预测控制器,满足约束条件下,使系统性能指标最优.系统存在负荷扰动,参数不确定和结构不确定性下具有鲁棒稳定性.

3 鲁棒分布式模型预测控制器(RDMPC controller)

3.1 控制器设计(Controller design)

采用零阶保持器对系统模型(10)离散化得到

$$\begin{cases} x_i(k+1) = \\ A_i(k)x_i(k) + B_i(k)u_i(k) + D_i(k)w_i(k) + \\ \sum_{\substack{j \neq i \\ j=1}} (A_{ij}(k)x_j(k) + B_{ij}(k)u_j(k)), \\ y_i(k) = C_i(k)x_i(k). \end{cases} \quad (11)$$

本文考虑系统参数和结构不确定性,针对多区域互联电力系统模型(11),采用泰勒级数构造多胞模型:

$$\begin{cases} [A_i(k)B_i(k)D_i(k) \cdots A_{ij}(k)B_{ij}(k) \cdots] = \\ \sum_{l=1}^L \lambda_l [A_i^{(l)} B_i^{(l)} D_i^{(l)} \cdots A_{ij}^{(l)} B_{ij}^{(l)} \cdots] \in \Omega, \\ \forall j \in \{1, 2, \dots, M\}, j \neq i, \\ \sum_{l=1}^L \lambda_l = 1, \lambda_l \geq 0, \end{cases} \quad (12)$$

其中 Ω 为系统不确定参数集合.

定义每个区域 k 时刻性能指标函数:

$$\begin{aligned} J_i(k) = & \sum_{n=0}^N [x_i^T(k+n|k)Q_i x_i(k+n|k) + \\ & u_i^T(k+n|k)R_i u_i(k+n|k) - \\ & \rho_i^2 w_i^T(k+n|k)w_i(k+n|k)] + \\ & \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^4 \sum_{n=0}^N [x_j^T(k+n|k)Q_j x_j(k+n|k) + \\ & u_j^{T*}(k+n|k)R_j u_j^*(k+n|k)], \end{aligned} \quad (13)$$

其中: N 为预测时域, $x_i(k+n|k)$, $u_i(k+n|k)$ 和 $w_i(k+n|k)$ 为第 i 个区域在第 k 时刻预测到的第 $k+n$ 时刻的状态变量、控制变量和扰动量.每个区域的权重系数矩阵为正定对角矩阵且 $Q_i > 0$, $Q_j > 0$, $R_i > 0$ 和 $R_j > 0$.“*”号为其他区域在 $k+n$ 前一时刻计算得到的状态变量和控制变量.

互联电力系统中,每个区域的鲁棒分布式MPC与所有其他区域控制器进行状态信息和控制信息交换,获得其他区域前一时刻计算得到的优化控制序列,通过优化性能指标 $J_i(k)$ 求得控制器的最优解:

$$\min_{u_i(k+n|k)} \sum_{i=1}^M J_i(k), \quad (14)$$

$$\text{s. t. } |x_{i3}(k+n|k)| \leq 0.0017, \quad (15a)$$

$$|x_{i3}(k+n|k)| \leq 0.045, \quad (15b)$$

$$|x_{i4}(k+n|k)| \leq \sigma_i, \quad (15c)$$

$$|w_i(k+n|k)| \leq 0.3, \quad (15d)$$

其中:式(15a)为火电机组发电机变化速率约束,式(15b)为水电机组发电机变化速率约束,式(15c)为各个区域阀门约束,式(15d)为负荷扰动约束.

结合鲁棒控制思想,对于互联电力系统的多胞模型式(12)所示,多采用“min-max”描述方法来表示优化性能目标.文献[17]最先提出了结合min-max思想的鲁棒模型预测控制方法,将min-max问题最后转化成最小化问题来进行优化控制.

$$\begin{aligned} & \min_{u_i(k+n|k)} [A_i(k+n)B_i(k+n)D_i(k+n)\cdots A_{ij}(k+n)B_{ij}(k+n)\cdots] \in \Omega, n \geq 0 \quad J_i(k), \\ & \text{s.t. 式(15)}. \end{aligned} \quad (16)$$

此系统的最小最大化问题所表示的意义为: 最大化(max)是指在模型参数不确定集 Ω 内选择某一时刻变模型参数 $[A_i(k)B_i(k)D_i(k) \cdots A_{ij}(k)B_{ij}(k) \cdots]$, 使 $J_i(k)$ 的值最大, 即 $J_i(k)$ 达到最坏情况; 然后在此模型参数下, 在当前和未来控制时域上对 $J_i(k)$ 进行最小化(min).

为了解决优化问题(16), 首先要找出目标函数(13)的上界. 考虑以下二次函数: $V(x) = x^T P x$, $P > 0$, $V(0) = 0$, 其中 $x = [x_1^T \ x_2^T \ x_3^T \ x_4^T]^T$. 对于任意区域 i , $V(x)$ 需满足以下稳定性约束:

$$\begin{aligned} & V_i(x(k+n+1|k)) - V_i(x(k+n|k)) \leq \\ & -[x_i^T(k+n|k)Q_i x_i(k+n|k) + \\ & u_i^T(k+n|k)R_i u_i(k+n|k) - \\ & \rho_i^2 w_i^T(k+n|k)w_i(k+n|k) + \\ & \sum_{j=1, j \neq i}^N (x_j^T(k+n|k)Q_j x_j(k+n|k) + \\ & u_j^T(k+n|k)R_j u_j(k+n|k))]. \end{aligned} \quad (17)$$

将式(17)进行累加($n = 0, 1, \dots, N$), 可得到 $V_i(x(k|k)) \geq J_i(k)$, 目标函数 $J_i(k)$ 满足以下表达式:

$$\begin{aligned} & \max_{[A_i(k+n)B_i(k+n)D_i(k+n)\cdots A_{ij}(k+n)B_{ij}(k+n)\cdots]} J_i(k) \leq \\ & V_i(x(k|k)). \end{aligned} \quad (18)$$

定义上界 γ_i , 即

$$J_i(k) \leq V_i(x(k|k)) = x^T(k|k)P_i x(k|k) \leq \gamma_i. \quad (19)$$

采用状态反馈控制律来优化目标函数寻找控制律. 区域 i 的状态反馈控制律为

$$u_i(k+n|k) = K_i x(k+n|k), \quad (20)$$

其中 $K_i = [K_{i1} \ K_{i2} \ K_{i3} \ K_{i4}]$.

相邻区域 $j(j \neq i)$ 的状态反馈控制律为

$$u_j(k+n|k) = K_j^* x(k+n|k), \quad (21)$$

其中 $K_j^* = [K_{j1}^* \ K_{j2}^* \ K_{j3}^* \ K_{j4}^*]$.

对于当前时刻, 在求解子区域 i 的最优解的时候, 其关联子区域 $j(j \neq i)$ 的反馈控制律 K_j^* 是通过区域 j 的上一次优化得到的, 所以在 i 的当前优化步骤中可以作为已知量来使用. 鲁棒分布式MPC即运用状态反馈控制律(20)来最小化上界 $V_i(x(k|k))$, 即可得到如下最小化问题:

$$\begin{aligned} & \min_{u_i(k+n|k)} V_i(x(k|k)) = \min_{K_i} x^T(k|k)P_i x(k|k), \\ & P_i > 0. \end{aligned}$$

不考虑扰动 $w_i(k)$ 的情况, 互联电力系统的数学模型表达形式为

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ \vdots \\ x_M(k+1) \end{bmatrix} = \\ & \begin{bmatrix} A_1(k) & A_{12}(k) & \cdots & A_{1M}(k) \\ A_{21}(k) & A_2(k) & \cdots & A_{2M}(k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{M1}(k) & A_{M2}(k) & \cdots & A_M(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_M(k) \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} B_1(k) \\ B_{21}(k) \\ \vdots \\ B_{M1}(k) \end{bmatrix} u_1(k) + \begin{bmatrix} B_{12}(k) \\ B_2(k) \\ \vdots \\ B_{M2}(k) \end{bmatrix} u_2(k) + \cdots + \\ & \begin{bmatrix} B_{1M}(k) \\ B_{2M}(k) \\ \vdots \\ B_M(k) \end{bmatrix} u_M(k). \end{aligned} \quad (22)$$

加入扰动表达式后式(22)简化为

$$x(k+1) = [\tilde{A}(k) + B_i(k)K_i]x(k) + D_i(k)w_i(k), \quad (23)$$

其中:

$$\tilde{A}(k) = A(k) + \sum_{j=1, j \neq i}^4 B_j(k)K_j^*(k), \quad i \in 1, 2, \dots, M,$$

$$A(k) = \begin{bmatrix} A_1(k) & A_{12}(k) & \cdots & A_{1M}(k) \\ A_{21}(k) & A_2(k) & \cdots & A_{2M}(k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{M1}(k) & A_{M2}(k) & \cdots & A_M(k) \end{bmatrix}, \quad B_i = \begin{bmatrix} B_{1i}(k) \\ B_{2i}(k) \\ \vdots \\ B_{Mi}(k) \end{bmatrix}.$$

将式(23)代入鲁棒稳定性约束条件(17)中得

$$\begin{aligned} & [\tilde{A}^{(\ell)}(k+l) + B_i^{(\ell)}(k+n)K_i]^T P_i \cdot \\ & [\tilde{A}^{(\ell)}(k+n) + B_i^{(\ell)}(k+n)K_i] - P_i \leq -\tilde{Q}_i, \end{aligned} \quad (24)$$

其中: $l = 1, 2, \dots, L$, $Q_i > 0$, $Q_j > 0$,

$$\tilde{Q}_i = Q_i + Q_j + \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^4 K_j^T(k+n|k) R_j K_j^*(k+n|k).$$

在每个采样时刻, 将优化问题(16)转化为求解如下优化问题:

$$\begin{aligned} \min_{\gamma_i, Z_i, Q_i} \quad & \gamma_i, \\ \text{s.t.} \quad & \text{式(15)}. \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} Q_i & 0 & Q_i \tilde{A}^{(l)} + Z_i^T B_i^{(l)} + Q_i D_i^{(l)} & \mu Q_i \tilde{Q}_i^{1/2} & \varphi Z_i^T R_i^{1/2} \\ 0 & \rho^2 I & 0 & 0 & 0 \\ \tilde{A}^{(l)} Q_i + B_i^{(l)} Z_i + D_i^{(l)} Q_i & 0 & Q_i & 0 & 0 \\ \mu \tilde{Q}_i^{1/2} Q_i & 0 & 0 & \gamma_i I & 0 \\ \varphi R_i^{1/2} Z_i & 0 & 0 & 0 & \gamma_i I \end{bmatrix} \geq 0. \quad (26)$$

通过上述求解, 将优化目标函数 $J_i(k)$ 转化成优化其上界 γ_i . 此处, γ_i 为每个区域的上界, 此上界为一个范围而非一个固定的数值.

3.2 约束问题处理(Constraint handling)

每个控制区域的阀门位置约束和GRC约束为状态约束. 分别如图4-5所示.

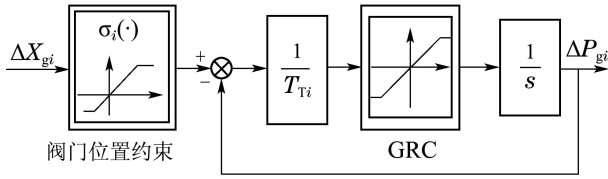


图4 火电机组中的阀门位置约束和GRC约束

Fig. 4 Valve saturation and GRC in the thermal power system

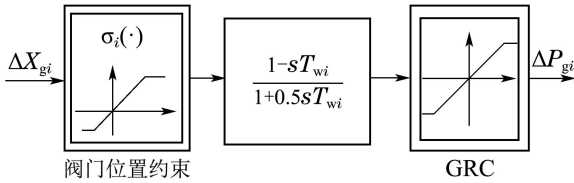


图5 水电机组的阀门位置约束和GRC约束

Fig. 5 Valve saturation and GRC in the hydro power system

根据Surch补, 输入约束(15d)可以写成

$$\begin{bmatrix} (p_{\text{ref}_i})^2 I & Z_i \\ Z_i^T & Q_i \end{bmatrix} \geq 0. \quad (27)$$

图4和图5可知, 阀门位置约束可以写成

$$\sigma_{i \min} \leq \Delta x_{gi}(k) \leq \sigma_{i \max}, \quad (28)$$

其中 $\sigma_{i \max}$, $\sigma_{i \min}$ 为阀门位置的最大值和最小值.

GRC约束可表示为

$$(\Delta \dot{P}_{gi}(k))_{\min} \leq \Delta \dot{P}_{gi}(k) \leq (\Delta \dot{P}_{gi}(k))_{\max}, \quad (29)$$

$$\text{其中 } \Delta \dot{P}_{gi}(k) = \frac{\Delta P_{gi}(k) - \Delta P_{gi}(k-1)}{T}.$$

因此, 系统模型(11)的“min-max”优化目标(16)最终可以等价于式(25)表示的最小化优化问题. 本文利用线性矩阵不等式(LMI)来求解该问题, 最后得到区域 i 的状态反馈控制律 u_i .

令 $P_i = \gamma_i Q_i^{-1} > 0$, $K_i = Z_i Q_i^{-1}$, 给定一组给定参数 $\mu \geq 0$, $\varphi \geq 0$, 运用Schur补引理, 可得到

令

$$\begin{aligned} \theta_{i \min} &\leq \Delta P_{gi}(k) \leq \theta_{i \max}, \\ \theta_{i \min} &= T(\Delta \dot{P}_{gi}(k))_{\min} + \Delta P_{gi}(k-1), \\ \theta_{i \max} &= T(\Delta \dot{P}_{gi}(k))_{\max} + \Delta P_{gi}(k-1). \end{aligned}$$

E_i , G_i 定义为: 火电机组: $E_i = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]$, $G_i = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]$, $\theta_{i \min} = -0.0017$, $\theta_{i \max} = 0.0017$; 水电机组: $E_i = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]$, $G_i = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]$, $\theta_{i \min} = -0.045$, $\theta_{i \max} = 0.045$.

由于 $\Delta X_{gi}(k) = E_i X_i(k)$, $\Delta P_{gi}(k) = G_i X_i(k)$,

$$\begin{aligned} \sigma_{i \min} &\leq E_i X_i(k) \leq \sigma_{i \max}, \\ \theta_{i \min} &\leq G_i X_i(k) \leq \theta_{i \max}. \end{aligned} \quad (30)$$

在每个采样时刻 k , 考虑如下:

$$\begin{aligned} |E_i x_i(k+n)| &\leq \sigma_{i \max}, \\ |G_i x_i(k+n)| &\leq \theta_{i \max}. \end{aligned} \quad (31)$$

转化为线性矩阵不等式为:

$$\begin{bmatrix} Q_i & (\bar{A}_i^{(l)} Q_i + B_i^{(l)} Z_i)^T E_i^T \\ E_i (\bar{A}_i^{(l)} Q_i + B_i^{(l)} Z_i) & \sigma_{i, \max}^2 I \end{bmatrix} \geq 0, \quad (32)$$

$$\begin{bmatrix} Q_i & (\bar{A}_i^{(l)} Q_i + B_i^{(l)} Z_i)^T G_i^T \\ G_i (\bar{A}_i^{(l)} Q_i + B_i^{(l)} Z_i) & \theta_{i, \max}^2 I \end{bmatrix} \geq 0. \quad (33)$$

则对于区域 i , 存在反馈控制律为 $u_i(k+n|k) = K_i x(k+n|k)$ 的状态反馈矩阵 $K_i = Z_i Q_i^{-1}$, 使系统的鲁棒性能目标函数(25)在满足LMI(26)–(27)(32)–(33)时最小.

RDMPC算法步骤为: 在采样时刻 k , $p_{\max}$ 代表采样时刻的最大迭代数:

步骤1 参数初始化. 给定矩阵 R_i , R_j , Q_i 和 Q_j . 在 $k=0$ 时刻, 令 $K_i^{(0)} = 0$, $K_j^{(0)} = 0$, $\mu \geq 0$, φ

≥ 0 . 迭代初值为 $p = 0$.

步骤2 信息交换并更新. 交换预测状态变量 $x_i(k)$, $x_j(k)$, $w_i(k)$ 和更新状态反馈矩阵 K_i 和 K_j .

步骤3 迭代优化. 当 $p < p_{\max}$, 求解线性矩阵不等式(26)–(27)(32)–(33), 从而使得 $Z_i^{(p)}$, $Q_i^{(p)}$ 最小. 得到并到状态反馈控制率 $K_i^{(p)} = Z_i^{(p)} Q_i^{-1(p)}$. 检查所有控制器的收敛性 ε_i . 若 $\|K_i^{(p)} - K_i^{(p-1)}\| \leq \varepsilon_i$, $\forall i \in \{1, 2, \dots, M\}$, 停止.

否则交换状态反馈控制率 K_i , K_j , 并且令 $p = p + 1$.

若 $\varepsilon_i = 0, \forall i \in \{1, 2, \dots, M\}$

停止

优化结束

步骤4 预测. 预测各个控制区域 i 和相邻区域 j 的状态 $x_i(k+n+1|k+1)$ 和 $x_j(k+n+1|k+1)$.

步骤5 执行. 将控制量 $u_i = K_i x_i$, 传送至各个控制区域, 令 $k = k + 1$. 返回步骤2开始下一轮计算.

4 仿真分析(Simulation)

本文以四区域互联电力系统为例, 结构如图6所示. 其中, 区域1和区域4为火电机组, 区域2和区域3为水电机组, 区域之间均通过联络线互联. 系统数学模型表达式见式(11), 其中: A_1, A_2, A_3, A_4 阶数为 5×5 , B_1, B_2, B_3, B_4 阶数为 5×1 , A_{ij} 阶数为 5×5 , B_{ij} 阶数为 5×1 . 在此基础上, 分析鲁棒分布式MPC控制器在施加阶跃负荷扰动后系统稳定性, 验证系统在参数和结构变化情况下系统的鲁棒性. 最后得到4个区域控制器之间能够实现稳定的纳什平衡. 仿真参数分别为: $T_s = 0.1$ s, $S_i = 1$, $R_i = 0.05$, $\mu = 0.95$ 和 $\varphi = 1$. 其他参数取值见表2.

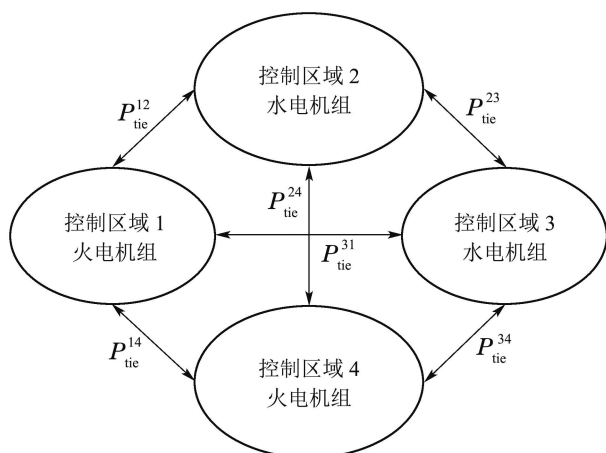


图6 四区域互联电力系统

Fig. 6 Diagram of the four-area power system

表2 四区域互联电力系统参数取值

Table 2 Parameters for the four-areas

$K_{P1} = 120$ Hz/p.u.MW, $K_{P2} = 115$ Hz/p.u.MW
$K_{P3} = 80$ Hz/p.u.MW, $K_{P4} = 75$ Hz/p.u.MW
$T_{P1} = 20$ s, $T_{P2} = 20$ s, $T_{P3} = 13$ s, $T_{P4} = 15$ s
$R_1 = 2.4$ Hz/p.u.MW, $R_2 = 2.5$ Hz/p.u.MW
$R_3 = 3.3$ Hz/p.u.MW, $R_4 = 3$ Hz/p.u.MW
$K_{B1} = 0.425$ p.u.MW/Hz, $K_{B2} = 0.409$ p.u.MW/Hz
$K_{B3} = 0.316$ p.u.MW/Hz, $K_{B4} = 0.347$ p.u.MW/Hz
$T_{G1} = 0.08$ s, $T_{G2} = 0.1$ s, $T_{G3} = 0.08$ s, $T_{G4} = 0.2$ s
$T_{T1} = T_{T4} = 0.3$ s, $T_{T1} = T_{T4} = 10$ s
$T_{R2} = 0.6$ s, $T_{R3} = 0.513$ s
$T_{22} = 5$ s, $T_{23} = 10$ s, $T_{W2} = 1$ s, $T_{W3} = 2$ s
$K_{S12} = -K_{S21} = 0.545$ p.u.MW
$K_{S23} = -K_{S32} = 0.444$ p.u.MW
$K_{S13} = -K_{S31} = 0.545$ p.u.MW
$K_{S14} = -K_{S41} = 0.5$ p.u.MW
$K_{S24} = -K_{S42} = 0.545$ p.u.MW
$K_{S34} = -K_{S43} = 0.545$ p.u.MW

4.1 阶跃负荷扰动(Step load change)

为了验证算法的有效性, 本文采用集中式MPC和分布式MPC与本文算法进行对比.

集中式MPC求解如下优化问题:

$$\min_{u(k+n|k)} J(k), \quad (34)$$

$$J(k) = \sum_{n=0}^N [x^T(k+n|k)Q_x(k+n|k) + u^T(k+n|k)R_u(k+n|k)]. \quad (35)$$

式(35)中的参数 R 和 Q 的选择为

$$R = \text{diag}\{1, 1, 1, 1\},$$

$$Q = \text{diag}\{1000, 0, 0, 1000, 1000, 0, 0, 1000, 1000, 0, 0, 1000, 1000, 0, 0, 1000\}.$$

分布式预测控制求解如下优化问题^[14]:

$$\min_{u_i(k+n|k)} J_i(k), \quad (36)$$

$$J_i(k) = \sum_{n=0}^N [x_i^T(k+n|k)Q_i x_i(k+n|k) + u_i^T(k+n|k)R_i u_i(k+n|k)]. \quad (37)$$

式(37)中的参数 R 和 Q_i 的选择为

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 1,$$

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = \text{diag}\{1000, 0, 0, 1000\}.$$

3种算法的控制时域和预测时域为 $N_p = 20$, $N_c = 15$. 分别在区域1 $t = 0$ s施加+20%的负荷扰动, 区域3在 $t = 40$ s施加-20%的负荷扰动. 图7给出了在区域1和区域3加入负荷扰动后频率偏差3

种算法的性能对比.

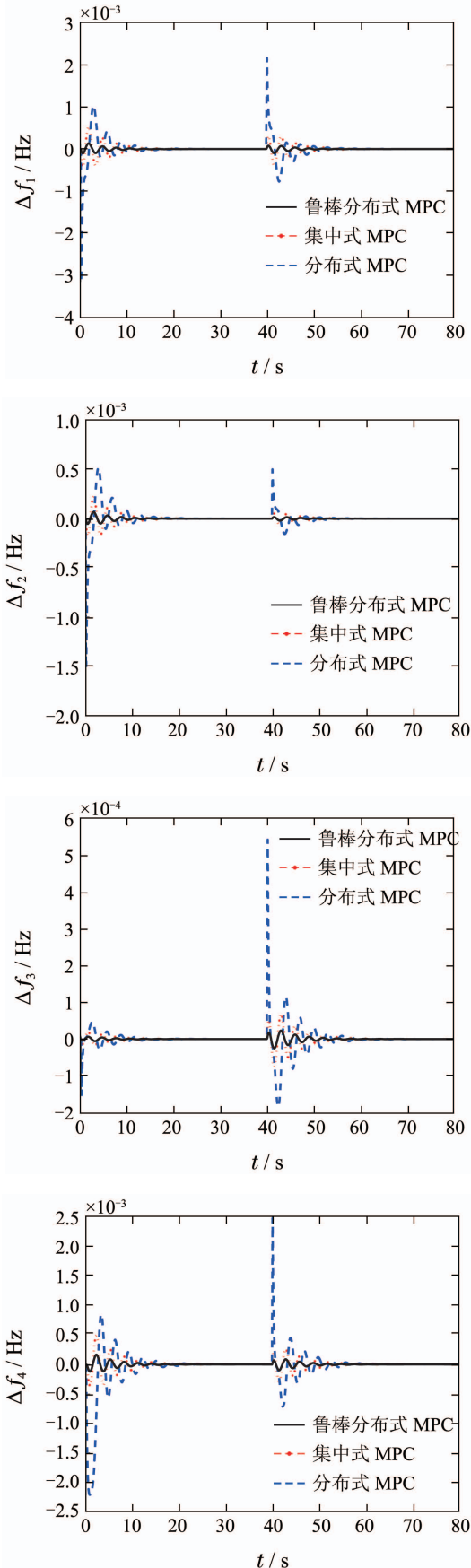


图7 负荷扰动下的不同区域负荷频率偏差

Fig. 7 Frequency deviation during load change

从图中可以看出, 由于负荷扰动发生在区域1和区域3, 因此, 区域1和区域3的频率偏差比较大, 而与之相邻的区域2和区域4变化稍小. 另一方面, 由图7可知, RDMPC算法控制效果最佳, 分布式MPC算法次之, 集中式MPC的性能最差. RDMPC算法经过5次迭代后能有效地保证负荷频率偏差归零在不超过定义的GRC约束和调节阀输入约束. 系统在10 s内达到稳定且超调量、收敛性能都要优于分布式MPC和集中式MPC. 这反映了RDMPC算法在有效地改善控制性能的同时也能减小计算负担.

4.2 鲁棒性能仿真(Robust simulation)

第1种情况: 参数不确定. 4个区域的调节阀时间常数和汽轮机时间常数偏离正常值 $\pm 40\%$. 同时, 区域1在 $t = 0$ s负荷增加10%, 在 $t = 40$ s区域3负荷降低10%.

在公式(12)表示的多面体形式模型中, 区域1和区域4火电厂的参数变化为

$$A_i^{(1)}(0.6T_{Gi}, 0.6T_{Pi}, 0.6T_{Ti});$$

$$A_i^{(2)}(1.4T_{Gi}, 1.4T_{Pi}, 1.4T_{Ti});$$

$$A_i^{(3)}(1.4T_{Gi}, 0.6T_{Pi}, 1.4T_{Ti});$$

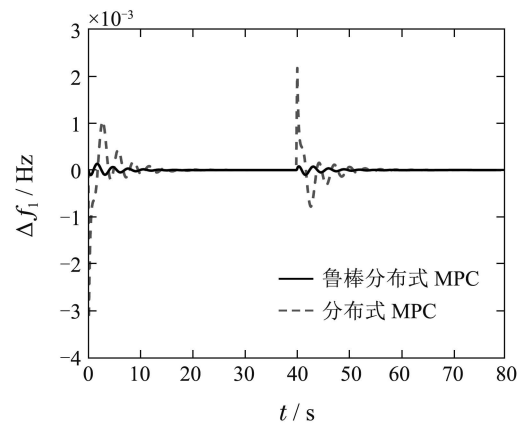
$$A_i^{(4)}(0.6T_{Gi}, 1.4T_{Pi}, 0.6T_{Ti}).$$

区域2和区域3水电厂的参数变化为

$$A_i^{(1)}(0.6T_{Gi}, 0.6T_{Pi}); A_i^{(2)}(1.4T_{Gi}, 1.4T_{Pi});$$

$$A_i^{(3)}(1.4T_{Gi}, 0.6T_{Pi}); A_i^{(4)}(0.6T_{Gi}, 1.4T_{Pi}).$$

图8为分布式MPC和RDMPC两种控制策略在参数变化下的频率偏差仿真结果比较. 由图可知, 系统参数和外界负荷发生变化的情况下, 本文提出的RDMPC控制策略跟踪效果明显优于分布式MPC. 两种控制策略均满足GRC约束, 阀门约束和输入约束.



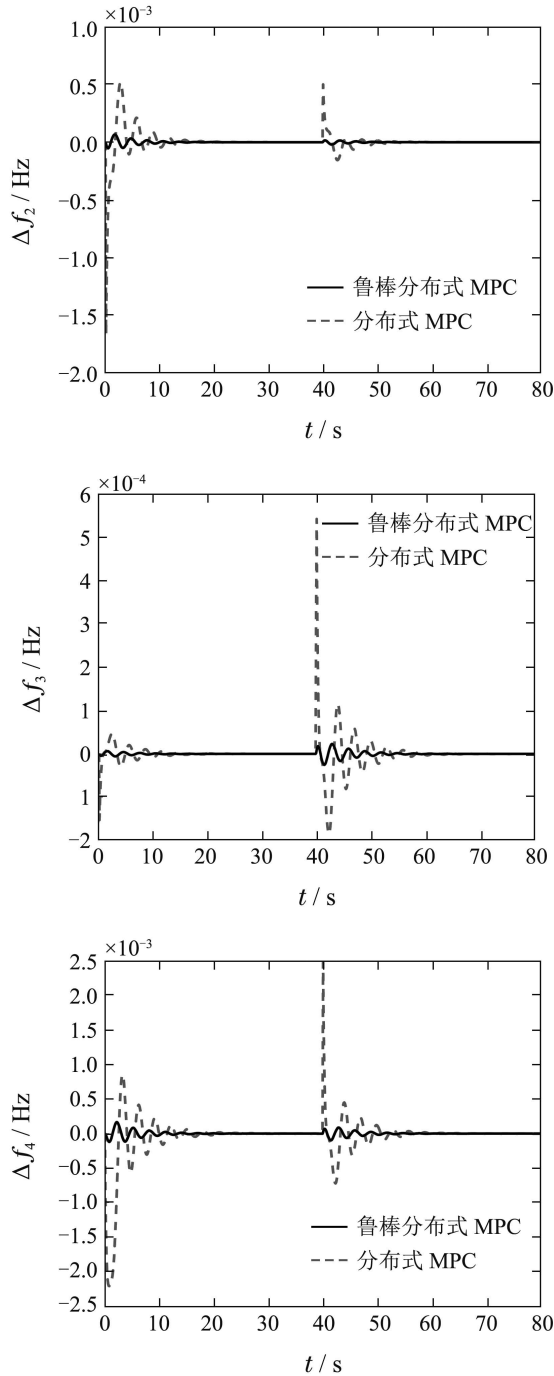


图8 参数变化情况下的不同区域频率偏差

Fig. 8 The frequency deviation during parameters variations

第2种情况: 模型不确定性. 考虑极端情况下及区域2和区域3的机组在 $t = 20$ s退出LFC. 区域1和区域4的在模型结构发生变化的情况下的频率偏差如图9所示.

由图可知, 在区域2和区域3的水电机组退出AGC后, RDMPC控制策略能有效地使系统能够有效地跟踪输出, 响应振荡幅度要明显小于分布式MPC. 这反映了RDMPC控制策略具备较好的鲁棒性.

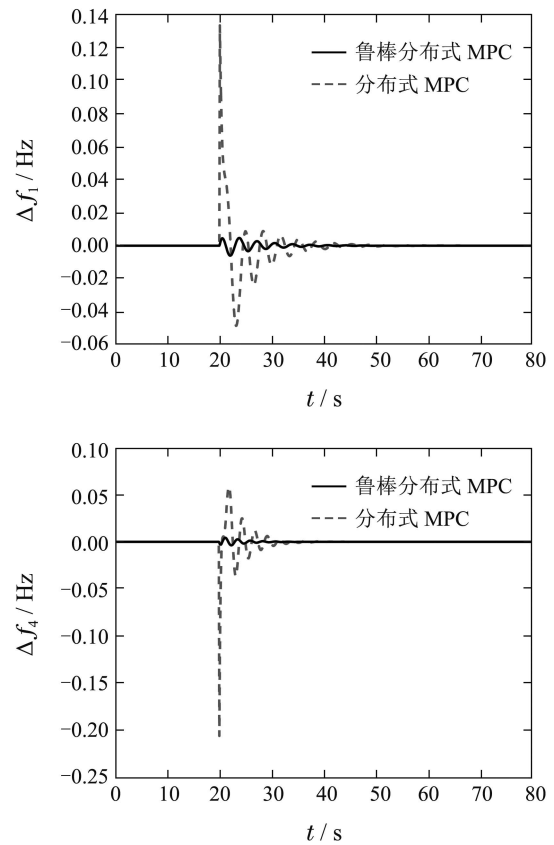


图9 结构变化下区域1和区域4的频率偏差

Fig. 9 Frequency deviation during structure uncertainties

5 结论(Conclusions)

本文针对多区域互联电力系统, 提出了一种基于线性矩阵不等式的鲁棒分布式模型预测控制策略. 首先, 该算法的各个区域控制器目标函数考虑现实约束情况下引入相邻区域的状态变量和输入变量, 通过求解一组线性矩阵不等式得到各个区域的控制率. 其次, 将GRC约束和阀门位置状态约束以及输入约束问题转化成线性矩阵不等式求解. 并针对互联电力系统中存在的参数和结构不确定性, 实现了闭环系统的鲁棒稳定性. 并以四区域互联电力系统为例, 在系统存在阶跃负荷扰动, 参数变化和结构变化3种情况下进行仿真验证了RDMPC算法的有效性.

参考文献(References):

- [1] SHAYEGHI H, SHAYANFAR H A, JALILI A. Load frequency control strategies: A state-of-the-art survey for the researcher [J]. *Energy Conversion and Management*, 2009, 50(20): 244 – 253.
- [2] PANDEY S K, MOHANTY S R, KISHOR N. A literature survey on load of frequency control for conventional and distribution generation power system [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 25(10): 318 – 334.
- [3] BRAHEEM I, KUMAR P, KOTHARI D P. Recent philosophies of automatic generation control strategies in power systems [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005, 21(10): 346 – 357.

- [4] PAN C T, LIAW C M. Adaptive controller for power system load-frequency control [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1989, 4(10): 122 – 128.
- [5] VRDOLJAK K, PERIC N, PETROVIC I. Sliding mode based load-frequency control in power systems [J]. *Electric Power Systems Research*, 2010, 80(5): 514 – 527.
- [6] WANG Y, ZHOU R, WEN C. Robust load-frequency controller design for power systems [J]. *IEEE Proceeding Control*, 1993, 140(10): 1 – 8.
- [7] SHAYEGHI H, SHAYANFAR H A. Application of ANN technique based on μ -synthesis to load frequency control of interconnected power system [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2006, 28(7): 503 – 511.
- [8] SAHU B K, PATI S, PANDA S. Hybrid differential evolution particle swarm optimization fuzzy proportional-integral derivative controller for automatic generation control of interconnected power system [J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2014, 8(11): 1789 – 1800.
- [9] LIU X J, KONG X B. Nonlinear fuzzy model predictive iterative learning control for drum-type boiler-turbine system [J]. *Journal of Process Control*, 2013, 23(8): 1023 – 1040.
- [10] LIU X J, CHAN C W. Neuro-fuzzy generalized predictive control of boiler steam temperature [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2006, 21(4): 900 – 908.
- [11] LIU X J, GUAN P, CHAN C W. Nonlinear multivariable power plant coordinate control by constrained predictive scheme [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, 18(5): 1116 – 1125.
- [12] XI Yugeng, LI Dewei, LIN Shu. Model predictive control-status and challenges [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(3): 222 – 237. (席裕庚, 李德伟, 林姝. 模型预测控制—现状与挑战 [J]. *自动化学报*, 2013, 39(3): 222 – 237.)
- [13] ZHENG Yi, LI Shaoyuan. Networked cooperative distributed model predictive control for dynamic coupling systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(11): 1778 – 1786. (郑毅, 李少远. 网络信息模式下分布式系统协调预测控制 [J]. *自动化学报*, 2013, 39(11): 1778 – 1786.)
- [14] 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.
- [15] PING Xubin, DING Baocang. Dynamic output feedback robust model predictive control based on ellipsoidal estimation error bound [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(20): 219 – 226. (平续斌, 丁宝苍. 基于椭圆形估计误差界的动态输出反馈鲁棒模型预测控制 [J]. *自动化学报*, 2014, 40(20): 219 – 226.)
- [16] ZHENG Pengyuan, XI Yugeng, LI Dewei. Closed-loop robust model predictive control for time-delays systems with structures uncertainties [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(6): 683 – 693. (郑鹏远, 席裕庚, 李德伟. 具有结构不确定性的时滞系统的闭环鲁棒预测控制器 [J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(6): 683 – 693.)
- [17] KOTHARE M V, BALAKRISHNAN V, MORARI M. Robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities [J]. *Automatica*, 1996, 32(10): 1361 – 1379.
- [18] GHERWI W A, BUDMAN H, ELKAMEL A. A robust distributed model predictive control algorithm [J]. *Journal of Process Control*, 2011, 21(10): 1127 – 1137.
- [19] LIU X J, NONG H Y, XI K, et al. Robust distributed model predictive load frequency control interconnected power system [J]. *Mathematical Problem in Engineering*, 2013, 12(20): 1 – 10.

作者简介:

张 怡 (1983–), 女, 讲师, 博士研究生, 从事分布式预测控制、新能源电力系统负荷频率控制的研究, E-mail: zhangyizhouzhao@163.com;

刘向杰 (1966–), 男, 教授, 博士生导师, 从事先进控制策略在电力过程控制中的应用研究, E-mail: liuxj@ncepu.edu.cn.