

考虑通信延迟的分散网络化预测负荷频率控制

姚伟¹, 文劲宇¹, 孙海顺¹, 程时杰¹, 蒋林²

- (1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074;
2. 利物浦大学电气工程与电子系, 利物浦 L693GJ, 英国)

Decentralized Networked Predictive Load Frequency Control Considering Communication Delays

YAO Wei¹, WEN Jinyu¹, SUN Haishun¹, CHENG Shijie¹, JIANG Lin²

- (1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan, 430074, Hubei Province, China; 2. Department of Electrical Engineering and Electronics, The University of Liverpool, Liverpool, L693GJ, UK)

ABSTRACT: According to the problem of the load frequency control (LFC) system with unavoidable communication delays under the modern power market, a method based on networked predictive control (NPC) was proposed for designing decentralized LFC controller. In the control strategy, a network delay compensator (NDC) was added based on the modified generalized predictive control (GPC) to compensate constant and random communication delays. Besides, the controlled auto-regressive integrated moving average (CARIMA) model was used as the predictive model. The recursive least-squares (RLS) with a forgetting factor algorithm was applied to identify the model parameters online in order to make it adapt to a wide range of operating conditions and model uncertainties. This decentralized control scheme was applied to three-area LFC system considering the influence of generation rate constraints. Simulation results show that the proposed decentralized LFC controller can compensate the constant and random communication delays effectively and has better performances than the conventional proportional integral (PI) type LFC controller.

KEY WORDS: power system; communication delays; generation rate constraints; networked predictive control; load frequency control

摘要: 针对现代电力市场情况下负荷频率控制系统存在不可忽略的通信延迟的问题, 提出一种基于网络化预测控制的分散负荷频率控制策略。这种控制策略在改进的广义预测控制的基础上, 增加了网络延迟补偿器以补偿固定和随机通信网络通信延迟, 此外, 还采用带遗忘因子的递归最小二乘法在线辨识预测模型来消除系统运行状态改变和模型不精确的影响。

响。以3区域负荷频率控制系统为例, 考虑了发电机组发电速率约束的影响, 仿真结果表明, 所提出的基于网络化预测控制的分散负荷频率控制不仅能够有效补偿固定和随机通信延迟, 且其控制效果优于常规的比例积分型负荷频率控制器。

关键词: 电力系统; 通信延迟; 发电速率约束; 网络化预测控制; 负荷频率控制

0 引言

负荷频率控制(load frequency control, LFC)是现代电力系统维持系统频率、保障电能质量的主要措施之一^[1]。近30年来, 国内外学者在负荷频率控制方面取得了诸多研究成果^[2-8], 各种先进控制策略如鲁棒控制^[2]、模型预测控制^[3]、滑模控制^[4]等都被用于LFC系统的控制器设计, 并取得了不错的控制效果^[5-8]。

与传统LFC系统采用专用线路传输信息可以忽略传输延迟不同, 现代电力市场情况下的LFC系统由于采用开放型的通信网络传输信息, 将不可避免地存在不能忽略固定和随机通信延迟^[9-10]。理论研究表明, 该通信延迟会降低LFC系统的控制效果甚至导致系统不稳定, 因此, 在进行LFC系统控制器设计时必须考虑通信延迟的影响^[11]。文献[12]利用网络化控制理论设计了考虑通信延迟的鲁棒LFC控制器; 文献[13-14]基于线性矩阵不等式和混合 H_2/H_∞ 鲁棒控制理论, 优化设计了对一定范围内的通信延迟不敏感的三区域电力系统的分散化鲁棒比例积分型负荷频率控制器; 文献[15]利用线性矩阵不等式设计了考虑通信延迟的LFC状态反馈控制器; 文献[16]采用离散滑模控制理论设计了考

基金项目: 国家自然科学基金项目(50937002, 51177057, 51207063)。
Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50937002, 51177057, 51207063).

考虑时滞影响的负荷频率控制器。这些方法的主要思路是设计对一定范围内的通信延迟不敏感的 LFC 控制器，但是没有从根本上解决通信延迟对控制性能的影响，且这类控制器的设计还需要详细的系统模型，不利于在大电网中推广使用。

近年来，网络化控制系统(networked control system, NCS)的控制理论研究一直是控制学界的热点问题^[17]。网络化预测控制(networked predictive control, NPC)是一种将传统预测控制的设计思想应用到网络化控制系统中，对网络延迟或数据丢包具有补偿作用的网络化控制方法^[18]。NPC 不仅具有传统预测控制不依赖于系统的精确模型、鲁棒性强的特点，同时还突破了传统的单数据流传送的控制方式，利用网络能传输矢量数据流的特点，并采用预测控制的思想来补偿通信延迟或丢包的影响，使得其控制效果与系统无通信延迟的效果几乎完全相同^[19]。

因此，为克服通信延迟对 LFC 系统稳定控制的不利影响，本文提出了一种基于网络化预测控制的 LFC 控制器设计方法，通过该方法设计的 LFC 控制器能够有效补偿固定和随机通信延迟，同时由于采用带变遗忘因子的最小二乘递归辨识算法在线辨识预测控制模型，克服了系统运行方式多变和模型参数不精确的影响。在考虑了发电机组发电速率

约束(generation rate constraint, GRC)的影响基础上，以三区域 LFC 系统为例，仿真验证了所提出的分散网络化 LFC 控制器的有效性。

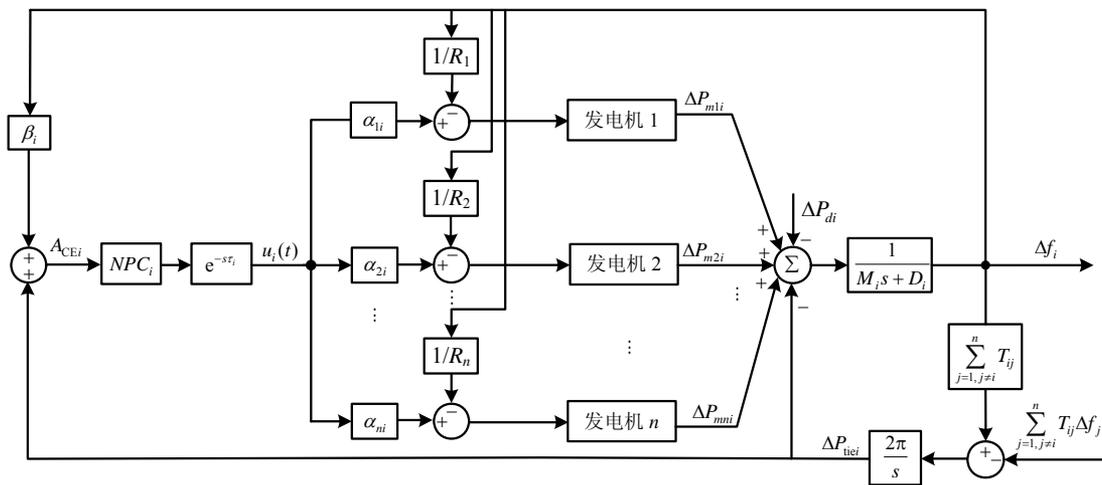
1 考虑通信延迟的负荷频率控制系统模型

当负荷变化不是很大时，LFC 系统可以用线性模型表示。为了将通信延迟考虑进系统的模型，对多区域 LFC 模型进行了相应的修改，得到了如图 1 所示的多区域 LFC 系统中第 i 个控制区域模型。在每个区域中，每台发电机组包括调节器和非再热蒸汽轮机。通信延迟包括从远程终端单元传送到控制中心和从控制中心传送到独立的发电机组 2 部分，为了简单起见，将这 2 部分延迟统一考虑为一个单一的前向通道延迟，并用图 1(a)所示的指数函数 $e^{-s\tau_i}$ 表示，此处用 $\tau_i(t)$ 表示固定或随机延迟。需要注意的是：方框图 1(b)中的发电速率约束 GRC 虽然在建模的时候没有考虑，但是在后文仿真的时候得到了考虑。

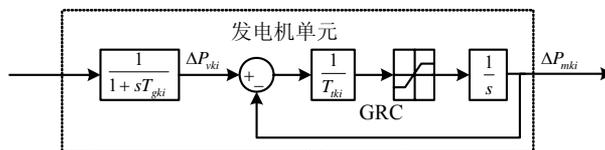
考虑通信延迟多区域 LFC 系统的第 i 个控制区域模型可以表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_i(t) = \mathbf{A}_i \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{B}_i u_i(t - \tau_i) + \mathbf{F}_i \mathbf{y}_i(t) \\ \mathbf{y}_i(t) = \mathbf{C}_i \mathbf{x}_i(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\mathbf{x}_i(t) = [x_{ai}(t) \ x_{vi}(t) \ x_{mi}(t)]^T$ ， $\mathbf{x}_{ai}(t) = [\Delta f_i \ \Delta P_{tiei}]$ ， $\mathbf{x}_{vi}(t) = [\Delta P_{vli} \ \dots \ \Delta P_{vni}]$ ， $\mathbf{x}_{mi}(t) =$



(a) 第 i 个控制区域的模型方框图



(b) 第 i 个控制区域中的第 k 台发电机组的模型

图 1 多区域电力系统中第 i 个控制区域的模型方框图

Fig. 1 Diagram of the i -th control area in multi-area power system

$$\begin{aligned}
& [\Delta P_{m1i} \cdots \Delta P_{mni}] ; \quad u_i(t) = \Delta P_{ci} ; \quad y_i(t) = A_{CEi} , \\
& v_i(t) = [v_{1i} \ v_{2i}]^T ; \quad A_i = \begin{bmatrix} A_{i11} & A_{i12} & A_{i13} \\ A_{i21} & A_{i22} & A_{i23} \\ A_{i31} & A_{i32} & A_{i33} \end{bmatrix} , \quad A_{i11} = \\
& \begin{bmatrix} -\frac{D_i}{M_i} & -\frac{1}{M_i} \\ 2\pi \sum_{j=1, j \neq i}^N T_{ij} & 0 \end{bmatrix} , \quad A_{i12} = \begin{bmatrix} D_i / M_i & \cdots & 1 / M_i \\ 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} , \\
& A_{i22} = -A_{i23} = \text{diag}(-1/T_{t1i} \ -1/T_{t2i} \ \cdots \ -1/T_{tmi}) , \quad A_{i33} = \\
& \text{diag}[-1/T_{g1i} \ -1/T_{g2i} \ \cdots \ -1/T_{gni}] , \quad A_{i31} = \\
& \begin{bmatrix} -1/R_{li}T_{g1i} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -1/R_{ni}T_{gni} & 0 & 0 \end{bmatrix} , \quad A_{i13} = A_{i21}^T = \mathbf{0}_{2 \times n} , \quad A_{i32} = \mathbf{0}_{n \times n} , \\
& T_{ij} = T_{ji} , \quad B_i = [B_{i1} \ B_{i2} \ B_{i3}]^T , \quad F_i = [F_{i1} \ F_{i2} \ F_{i3}]^T , \\
& C_i = [C_{i1} \ C_{i2} \ C_{i3}]^T , \quad F_{i1} = \begin{bmatrix} -1/M_i & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} , \quad B_{i3} = \\
& \left[\frac{\alpha_{1i}}{T_{g1i}} \quad \frac{\alpha_{2i}}{T_{g2i}} \quad \cdots \quad \frac{\alpha_{ni}}{T_{gni}} \right]^T , \quad F_{i2} = F_{i3} = \mathbf{0}_{n \times 2} , \quad C_{i2} = \\
& C_{i3} = \mathbf{0}_{1 \times n} , \quad B_{i1} = \mathbf{0}_{2 \times 1} , \quad B_{i2} = \mathbf{0}_{n \times 1} . \\
& \begin{cases} v_{1i} = \Delta P_{di} \\ v_{2i} = \sum_{j=1, j \neq i}^n T_{ij} \Delta f_j \end{cases} \quad (2)
\end{aligned}$$

式中: T_{ij} 为区域 i 和区域 j 之间联络线同步系数; v_{1i} 和 v_{2i} 分别表示负荷扰动和区域互联的影响。

每个区域的区域控制偏差(area control error, ACE)信号由该区域的频率偏差和净交换功率偏差综合而成, 可以定义为

$$A_{CEi} = \beta_i \Delta f_i + \Delta P_{tiei} \quad (3)$$

式中: ΔP_{tiei} 为区域 i 联络线上的净交换功率偏差; β_i 为区域 i 频率偏差系数。

2 网络化预测控制

2.1 网络化预测控制系统简介

常规的网络化预测控制系统结构如图 2 所示, 主要包括控制预测发生器(control prediction generator, CPG)、网络延迟补偿器(network delay compensator, NDC)和在线模型辨识器 3 部分。在每个控制周期内, 缓冲器将新采集的被控对象的输入输出值以数据包的形式通过网络传输到控制端, 在线模型辨识器根据收到的最新输入输出数据包进行控制对象的预测模型辨识以适应被控对象参数和运行状态的变化, 然后 CPG 根据在线模型辨识器得到的预测模型及被控对象最新的输入输出序列,

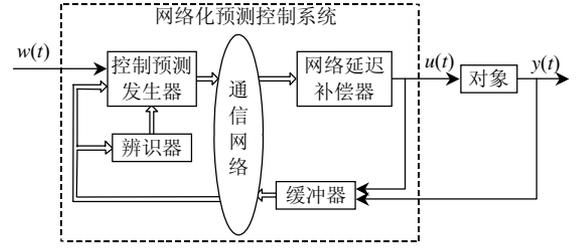


图 2 网络化预测控制系统

Fig. 2 Networked predictive control system

运用某种预测控制算法得到将来的预测控制序列, 然后 CPG 将得出的预测控制序列以数据包的形式通过网络传输到网络延迟补偿器侧, NDC 根据网络环路延迟的大小从接收到的最新控制序列包中选择合适的控制量, 以补偿网络通信延迟的影响。

广义预测控制(generalized predictive control, GPC)是预测控制中最具有代表性的算法, 一般采用受控自回归积分滑动平均(controlled auto-regressive integrated moving average, CARIMA)模型为预测控制模型, 该算法具有较强的适应能力, 对模型要求精度低, 对于变参数、变结构、变时滞对象具有较强的鲁棒性等诸多优点, 在工业过程控制领域得到了广泛的应用^[20]。文献[19]将采用 CARIMA 模型的 GPC 发展成为 NPC 控制策略, 并将其成功地应用于连续搅动水箱式反应堆的网络化控制中, 这种新的 NPC 算法不仅具备 GPC 算法的优点, 而且能够减小通信延迟的影响。本文将采用该 NPC 控制设计分散 LFC 控制器, 在此给出这种 NPC 控制策略的基本原理。

2.2 控制预测发生器

对基于 CARIMA 模型的 GPC 控制算法稍作修改, 用作 CPG 产生预测控制输出序列产生算法, 具体过程详细叙述如下。

GPC 一般采用如式(1)所示的 CARIMA 模型。

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t-1) + \frac{1}{\Delta} C(z^{-1})e(t) \quad (4)$$

式中: $y(t)$ 和 $u(t-1)$ 分别为系统的输出和输入; $e(t)$ 为白噪声信号; 运算符 $\Delta=1-z^{-1}$; $A(z^{-1})=1$, $B(z^{-1})=1$ 和 $C(z^{-1})=1$ 分别为阶次为 n_a 、 n_b 和 n_c 的多项式。为了简化起见, 下文如无特别说明均假设 $C(z^{-1})=1$ 。

系统的优化目标函数定义如下

$$\begin{aligned}
J_{\text{GPC}}(N, N_u) = E \{ & \sum_{j=1}^N [\hat{y}(t+j) - w(t+j)]^2 + \\
& \sum_{j=1}^{N_u} r_j \Delta u(t+j-1)^2 \} \quad (5)
\end{aligned}$$

式中: $E\{\cdot\}$ 为期望运算符; $\hat{y}(t+j)$ 为 t 时刻的第 j 步的优化预测输出; $w(t+j)$ 为 t 时刻的第 j 步的参考输出; N 为预测区间长度; $\Delta u(t+j-1)$ 为 t 时刻的第 j 步控制增量输出; N_u 为控制区间长度; r_j 为控制加权序列, 一般定义为常数, 且 $r_j = r$, $j=1,2,\dots,N_u$ 。

通过求解丢番图方程, N 步的预测输出值可以表示为

$$\hat{y} = \mathbf{G}\Delta\mathbf{U} + \mathbf{f} \quad (6)$$

式中: $\hat{y} = [\hat{y}(t+1) \ \hat{y}(t+2) \ \dots \ \hat{y}(t+N)]^T$; $\Delta\mathbf{U} = [\Delta u(t+1) \ \Delta u(t+2) \ \dots \ \Delta u(t+N_u-1)]^T$;

$$\mathbf{f} = [f_1 \ f_2 \ \dots \ f_N]^T; \mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \dots & 0 \\ g_1 & g_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N_u-1} & g_{N_u-2} & \dots & g_0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N-1} & g_{N-2} & \dots & g_{N-N_u} \end{bmatrix}。$$

$N \times N_u$ 维矩阵 \mathbf{G} 中的元素 g_i 是系统的阶跃响应采样值, 可以通过模型递归求解, 与此同时, 还可以相应地求出向量 \mathbf{f} 中元素 f_i 的值。

在实际系统中, 需要考虑控制信号的输出约束, 可以表示为

$$\mathbf{I}\Delta\mathbf{U}_{\min} \leq \Delta\mathbf{U} \leq \mathbf{I}\Delta\mathbf{U}_{\max}, \mathbf{I}\mathbf{U}_{\min} \leq \mathbf{U} \leq \mathbf{I}\mathbf{U}_{\max} \quad (7)$$

式中: $\Delta\mathbf{U}_{\min}$ 和 $\Delta\mathbf{U}_{\max}$ 分别为控制增量信号的下限和上限; \mathbf{U}_{\min} 和 \mathbf{U}_{\max} 分别为控制信号的下限和上限。

依据式(5)和(6), 可将求解有约束控制信号的问题表示为如下二次线性规划(QP)问题

$$\begin{cases} \min [J(\Delta\mathbf{U})] = \frac{1}{2}\Delta\mathbf{U}^T \mathbf{H}\Delta\mathbf{U} + \mathbf{b}^T \Delta\mathbf{U} + \mathbf{f}_0 \\ \text{s.t. } \mathbf{A}_{qp}\Delta\mathbf{U} \leq \mathbf{b}_c \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{H} = 2(\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \mathbf{R})$; $\mathbf{R} = \text{diag}(r_1 \ r_2 \ \dots \ r_{N_u})$; $\mathbf{b} = 2(\mathbf{f} - \mathbf{W})^T \mathbf{G}$; $\mathbf{f}_0 = \mathbf{f}^T \mathbf{f}$; $\mathbf{A}_{qp} = [\mathbf{I}, -\mathbf{I}, \mathbf{T}, -\mathbf{T}]^T$; $\mathbf{b}_c = [\mathbf{I}\Delta\mathbf{U}_{\max}, -\mathbf{I}\Delta\mathbf{U}_{\min}, \mathbf{I}(\mathbf{U}_{\max} - \mathbf{u}(t-1)), -\mathbf{I}(\mathbf{U}_{\min} - \mathbf{u}(t-1))]^T$; $\mathbf{W} = [w(t+1) \ w(t+2) \ \dots \ w(t+N)]^T$ 。

求解式(8)所示的QP问题可以得到控制增量信号 $\Delta\mathbf{U}$, 从而计算出 N_u 步控制预测向量 \mathbf{U} :

$$\mathbf{U} = \mathbf{u}(t-1)\mathbf{I} + \mathbf{T}\Delta\mathbf{U} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{U} = [u(t+1|t) \ u(t+2|t) \ \dots \ u(t+N_u-1|t)]^T$; \mathbf{I} 为 $N_u \times 1$ 的单位矩阵; \mathbf{T} 为 $N_u \times N_u$ 的下三角单位矩阵。

最后, 将计算出控制预测序列 \mathbf{U} 和时标一起打包通过网络传送到被控端。

2.3 网络延迟补偿器

网络延迟补偿器(NDC)的任务是根据环形回路时延, 选择恰当的预测控制信号以补偿网络通信延迟的影响。NDC从最新到达的控制序列报表中选择恰当的控制信号。

为充分利用网络能同时传送一系列数据包的特征, 可以将 t 时刻所有的预测信息打到一个“块包”中, 然后通过网络传送到被控对象端。在接收到该块包后, 网络延迟补偿器可以从被控对象端可用的预测控制序列中选择最新的预测控制信号对系统进行控制。例如, 在 t 时刻被控对象端接收到如下预测控制序列值:

$$\begin{bmatrix} u(t-k_1|t-k_1) \\ u(t-k_1+1|t-k_1) \\ \vdots \\ u(t|t-k_1) \\ \vdots \\ u(t-k_1+N_u|t-k_1) \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} u(t-k_t|t-k_t) \\ u(t-k_t+1|t-k_t) \\ \vdots \\ u(t|t-k_t) \\ \vdots \\ u(t-k_t+N_u|t-k_t) \end{bmatrix}$$

其中 $u(t|t-k_i)$, $i=1,2,\dots,t$, 为 t 时刻的候选预测控制信号。

定义 $k = \min\{k_1, k_2, \dots, k_t\}$, 则网络延迟补偿器将选择

$$u(t) = u(t|t-k) \quad (10)$$

作为系统的输入信号, 即 $t-k$ 时刻计算的 t 时刻的预测控制量就是当前控制输出值。

2.4 在线模型辨识器

考虑电力系统的时变性, 当系统参数未知或慢时变时, 可使用参数估计算法在线估计出如式(4)所示模型的参数, 然后用估计值代替真实值进行控制律推导。模型(4)的参数可以采用带遗忘因子的递归最小二乘法在线辨识得到。其算法如下:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{K}}(t) = \mathbf{P}(t-1)\boldsymbol{\varphi}(t)/[\lambda + \boldsymbol{\varphi}^T(t)\mathbf{P}(t-1)\boldsymbol{\varphi}(t)] \\ \hat{\boldsymbol{\theta}}(t) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(t-1) + \hat{\mathbf{K}}(t)[\mathbf{y}(t) - \boldsymbol{\varphi}^T(t)\hat{\boldsymbol{\theta}}(t-1)] \\ \mathbf{P}(t) = [\mathbf{I} - \hat{\mathbf{K}}(t)\boldsymbol{\varphi}^T(t)]\mathbf{P}(t-1)/\lambda \end{cases} \quad (11)$$

式中: 辨识的参数相量 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(t) = [a_1, \dots, a_{n_a}, b_0, b_1, \dots, b_{n_b}]^T$; 测量相量 $\boldsymbol{\varphi}(t) = [-y(t-1), \dots, -y(t-n_a), u(t-1), \dots, u(t-n_b-1)]^T$; λ 为遗忘因子, 一般取值范围: $0.90 \leq \lambda \leq 0.99$; $\mathbf{P}(t)$ 为协方差矩阵, 其初值 $\mathbf{P}(0) = \alpha^2 \mathbf{I}$, $\alpha^2 = 10^5 \sim 10^{10}$; \mathbf{I} 为单位矩阵。

此外, 当系统出现较大的扰动时, 为了避免辨识参数变化过快, 需要给每个辨识参数加上滑动上下限^[21-22]。

在 t 时刻辨识参数的平均值如下

$$\varphi_i(t) = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T \theta_i(t-k) \quad i=1,2,\dots,(n_a+n_b+1) \quad (12)$$

式中 $\theta_i(t)$ 为 $\hat{\theta}(t)$ 的元素, 且 $T>1$, 保持参数的稳定性, 参数 T 越大, 参数边界越稳定, 适应性越差。

因此, 在 t 时刻每个参数的高低边界定义如下:

$$\begin{cases} \varphi_{iH}(t) = \varphi_i(t) + \gamma |\varphi_i(t)| \\ \varphi_{iL}(t) = \varphi_i(t) - \gamma |\varphi_i(t)| \end{cases} \quad (13)$$

式中 $0<\gamma<1$, γ 越小, 则加在被辨识参数上的约束越强, 反之越弱。在每个采样周期, 每个参数都被其相应的高低边界所限制。

2.5 网络化预测控制流程

综上所述, 网络化预测控制的流程如图3所示, 其主要由3个步骤组成, 依次分别是通过辨识算法不断更新模型参数、通过二次规划求解优化控制序列和网络延迟补偿器从最新接收到的预测控制序列中选择合适的控制量, 以补偿网络通信延迟, 从而实现整个网络化预测控制。

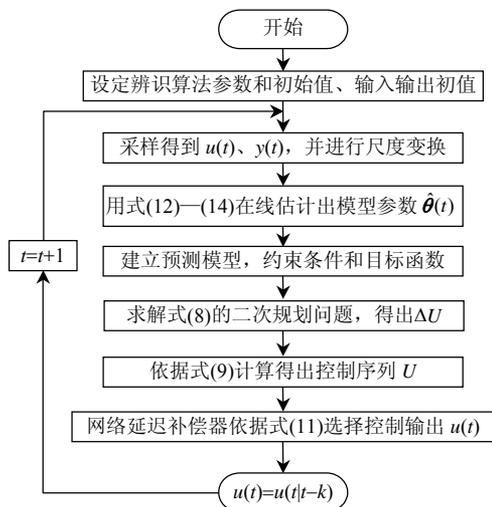


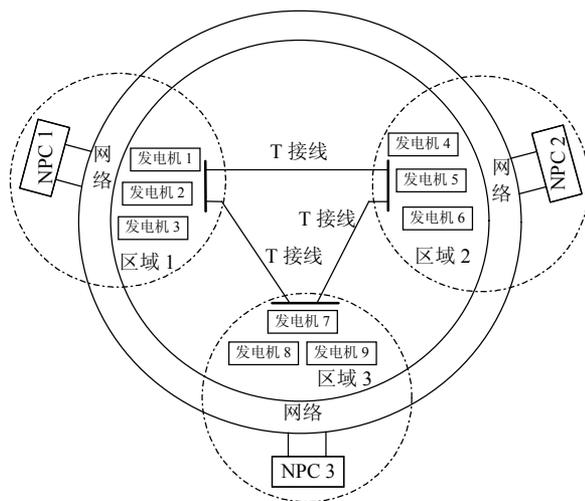
图3 网络化预测控制流程

Fig. 3 Flow chart of the networked predictive control

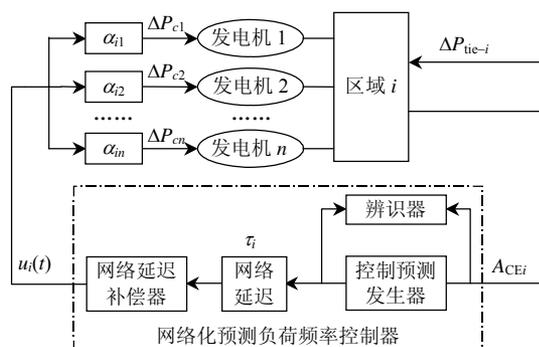
3 网络化预测负荷频率控制器设计

以如图4(a)所示的3区域LFC系统为研究对象, 每个区域由3台发电机组组成, 其详细参数见文献[15]。采用第2节中介绍的网络化预测控制策略设计LFC控制器, 将每个区域的ACE信号作为所设计的分散网络化预测LFC控制器的输入信号, 其详细结构如图4(b)所示。很多研究中将LFC控制器考虑为连续的情况, 但是在实际应用中, LFC控制器一般是离散的且采样周期 T_s 在2~4s之间^[1]。因此, 在本文所设计的分散网络化预测LFC控制器中, 采样周期选择为2s。

预测模型的阶次确定原则是在满足模型精度的基础上选择尽可能低的模型阶数以减小在线计



(a) 三区域系统



(b) 区域 i 的 NPC-LFC 结构

图4 3区域系统的网络化预测负荷频率控制器

Fig. 4 Three-area power system with the proposed decentralized NPC-LFC

算量, 通过理论和仿真确定式(4)所示的预测模型的阶次为 $n_a=4$ 、 $n_b=3$, 虽然这个线性模型的阶数低于实际模型的阶数, 但已经足以满足算法精度的要求。在线辨识器的辨识参数选为: $\lambda=0.96$; $T=10$; $\gamma=0.02$ 。

此外, 需要确定的分散网络化预测 NPC-LFC 参数还有预测长度 N 、控制区间 N_u 和控制加权系数 r 。尽管这些参数的调整一般都是采用探索法进行的, 但是仍然有相关文献给出了一些通用的调整准则^[19]。预测长度 N 一般取较大的值, 使它包括被控对象的主要动态响应。 N 较小时, 系统响应的快速性好, 但稳定性和鲁棒性较差; 反之, 系统的鲁棒性好, 但动态响应慢, 而且由于增加了计算时间, 系统的实时性也会受到影响。实际选择时, 可在上述两者之间折衷选取 N 值, 使闭环系统既具有所期望的鲁棒性, 又具有所要求的快速性。对于本文所提出的网络化预测 LFC 控制器, 预测区间取

$N=25$ 。

由于优化的输出预测最多只受到 N 个控制增量的影响, 所以控制区间 N_u 应满足 $N_u \leq N$ 。同时, 所设计的 NPC-LFC 能够补偿的最大通信延迟取决于 N_u 的值, 即 $N_u T_s$ 应该大于整个闭环控制回路中通信延迟的上限, NPC-LFC 才能够有效补偿回路中的通信延迟。由于 LFC 系统的通信延迟一般在几 s 到几十 s 之间, 为保证能够有效补偿各种情况下的通信延迟, 选择 $N_u=10$, 可以最多补偿 10 步(20 s)的网络延迟, 这对于补偿 LFC 通信延迟是足够的。

控制加权系数 r 的作用是用来限制控制增量 $\Delta u(t)$ 的剧烈变化, 以减少对被控对象的过大冲击。通过增大 r 可以实现稳定控制, 但同时也减弱了控制的作用。一般 r 取得较小, 实际选择时, 可先令 r 为 0 或是一个较小的数值。此时若控制系统稳定但控制量变化较大, 则可适当增加 r , 直到得到满意的控制效果为止, 经过通过多次仿真比较, 将控制加权系数选定为 $r=3.2$ 。在实际的应用中, 可以通过离线仿真确定 r 的一个大致范围, 然后根据实际控制效果进行修正。

4 仿真分析

4.1 固定通信延迟

为验证所设计的分散网络化预测 LFC 控制器性能, 通过 Matlab/Simulink 软件对如图 4 所示的 3 区域 LFC 系统进行了仿真研究, 并对所提出的网络化预测 LFC 控制器(NPC-LFC)、广义预测 LFC 控制器(GPC-LFC)和常规 PI 型 LFC 控制器(PI-LFC)的控制效果进行了比较。需要特别指出的是, NPC-LFC 和 GPC-LFC 这 2 种负荷频率控制器的唯一区别在于, NPC-LFC 具有 NDC, 能够主动补偿通信延迟的影响。仿真中分别考虑了固定通信延迟和随机通信延迟 2 种情况。

在实际电力系统中, 发电量的变化是有限制的, 对于非再热汽轮机组, 一般将 GRC 考虑为 0.1 pu/min。需要说明的是, 和不考虑 GRC 的情况相比, 考虑 GRC 时机组的超调量更大且调节时间更长。在下列仿真中, 每台发电机的 GRC 被限制为 0.1 pu/min。为清楚起见, 首先考虑固定通信延迟的情况。

如图 4 所示的 3 区域 LFC 系统在 10 s 时, 区域 1 的负荷增加 0.01 pu, 在不考虑通信延迟的情况下, 区域 1 的频率和 ACE 信号的响应如图 5 所示。由仿真结果可以看出, 常规 PI-LFC 控制器和

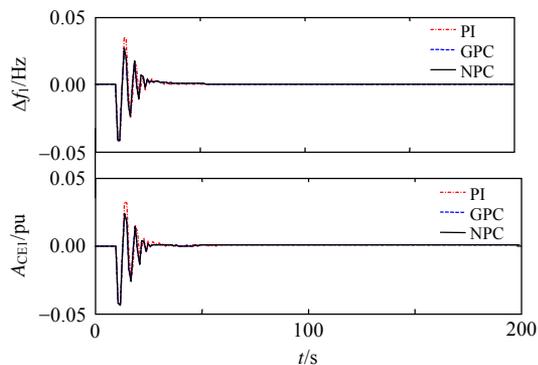


图 5 不考虑通信延迟时 3 区域 LFC 系统响应

Fig. 5 Response of three-area LFC system without communication delays

GPC-LFC 控制器都能很好地使频率和 ACE 回到设定的值, 且 NPC-LFC 控制器和 GPC-LFC 控制器的效果在没有考虑通信延迟时是一样的。

在上述同样的情况下, 当通信延迟为 6 s(3 个采样周期)时, 区域 1 的频率和 ACE 信号的响应如图 6 所示。可以看出, NPC-LFC 控制器能够很好地补偿通信延迟的影响, 而常规 PI-LFC 控制器和 GPC-LFC 控制器都不能保持系统的稳定性。预测模型辨识的参数如图 7 所示, 可以看出, 低阶预测模型能够较好地跟踪系统的变化。

为比较在不同通信延迟情况下的 NPC-LFC 的通信延迟补偿效果, 考虑当通信延迟为 8 和 12 s 时,

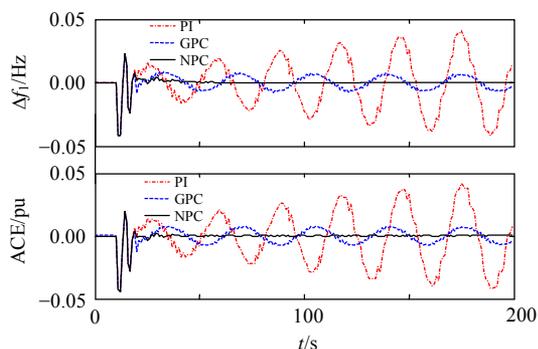


图 6 固定通信延迟为 6 s 时 3 区域 LFC 系统响应

Fig. 6 Response of three-area LFC system with 6 s communication delays

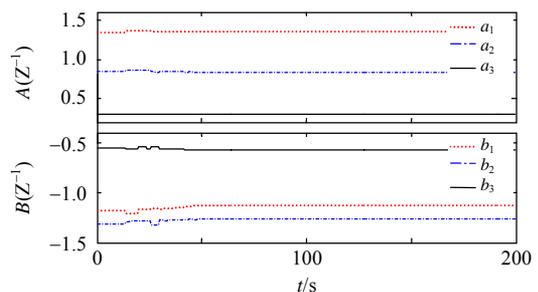


图 7 辨识参数的变化曲线

Fig. 7 Curves of the identified parameters

在上述同样的情况下，系统采用 NPC-LFC 控制时的响应如图 8 所示，可以看出，不同通信延迟的情况下，采用 NPC-LFC 控制器时系统的响应几乎相同，这意味着 NPC-LFC 控制器能够很好地补偿不同的固定通信延迟。

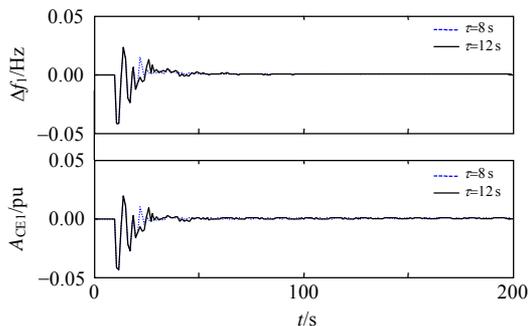
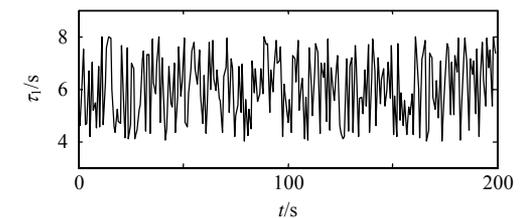


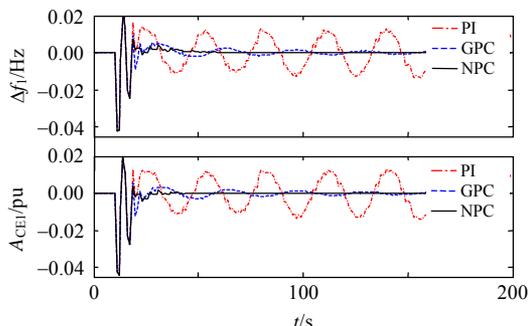
图 8 不同固定通信延迟时 3 区域 LFC 系统响应
Fig. 8 Response of three-area LFC system with different communication delays

4.2 随机通信延迟

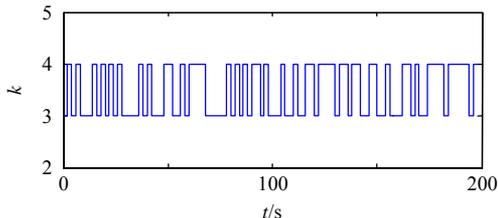
考虑如图 9(a)所示随机通信延迟 1 时闭环系统的响应如图 9(b)所示，由仿真结果可以看出，NPC-LFC 控制器能够有效地将频率和 ACE 调节到指定的值，而常规 PI-LFC 控制器受通信延迟的影响



(a) 随机通信延迟 1(4~8 s)



(b) 三区域 LFC 响应

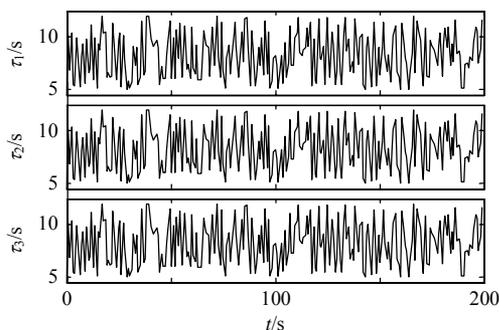


(c) NDC 选择控制序列序号 k

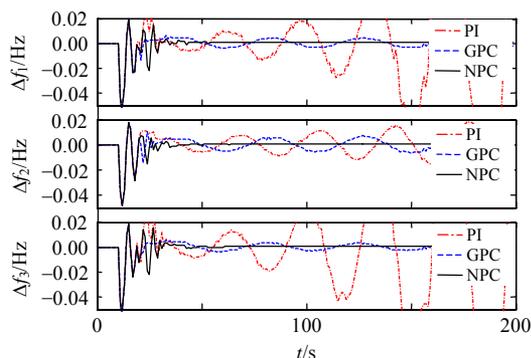
图 9 考虑随机通信延迟 1 时 3 区域 LFC 系统响应
Fig. 9 Response of three-area LFC system with random communication delays 1

响不能保持系统的稳定性，而 GPC-LFC 控制器由于不能补偿通信延迟的影响，虽然能保持系统的稳定性，但是调整时间过长。其预测控制序列的选择值 k 如图 9(c)所示，可以看出 NDC 能根据网络通信延迟的变化选择恰当的控制信号。

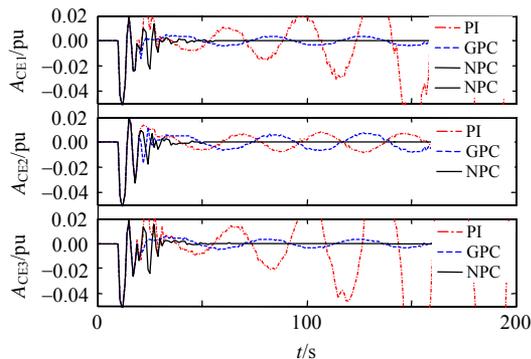
在图 10(a)所示具有较大随机通信延迟 2 的情况下，3 区域系统的各区域频率和 ACE 信号的响应



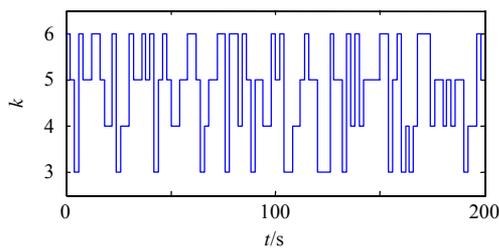
(a) 随机通信延迟 2(5~12 s)



(b) 频率响应曲线



(c) ACE 响应曲线



(d) NDC 选择控制序列序号 k

图 10 考虑随机通信延迟 2 时 3 区域 LFC 系统响应
Fig. 10 Response of three-area LFC system with random communication delays 2

曲线如图 10(b)所示, 可以发现, NPC-LFC 控制器能够有效地补偿随机通信延迟, 而常规 PI-LFC 控制器和 GPC-LFC 控制器却不能保持系统的稳定性, 其 NDC 的预测控制序列的选择值 k 如图 10(c)所示。上述仿真结果表明, NPC-LFC 控制器能够有效地补偿随机网络通信延迟。

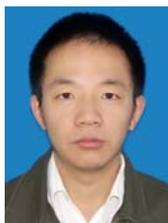
5 结论

本文提出了一种基于网络化预测控制和模型辨识的分散负荷频率控制器设计方法。该方法在改进广义预测控制的基础上, 增加了网络延迟补偿器以补偿网络固定和随机通信延迟, 消除了通信延迟对控制效果的不利影响; 同时, 采用带遗忘因子的递归最小二乘法在线辨识获得低阶预测控制模型, 可以克服系统运行方式复杂多变和系统参数不精确引起的控制性能下降的不利影响。3 区域负荷频率系统的仿真结果表明, 所提出的分散网络化预测负荷频率控制器不仅能够有效地将频率调节到指定的值, 也能有效地补偿固定和随机通信延迟。

参考文献

- [1] Kundur P. Power system stability and control [M]. New York: McGraw-Hill Inc., 1994: 581-622.
- [2] Rerkpreedapong D, Hasanovic A, Feliachi A. Robust load frequency control using genetic algorithms and linear matrix inequalities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 855-861.
- [3] 孔莲芳, 罗天祥, 吴捷. 基于状态收缩约束的模型预测负荷频率控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(7): 18-22.
Kong Lianfang, Luo Tianxiang, Wu Jie. State contractive constraint-based model predictive load frequency control [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 27(7): 18-22(in Chinese).
- [4] 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.
- [5] 余涛, 王宇名, 刘前进. 互联电网 CPS 调节指令动态最优分配 Q-学习算法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 62-69.
Yu Tao, Wang Yuming, Liu Qianjin. Q-learning-based dynamic optimal allocation algorithm for CPS order of interconnected power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 62-69(in Chinese).
- [6] 李滨, 韦化, 农蔚涛, 等. 基于现代内点理论的互联电网控制性能评价标准下的 AGC 控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 56-61.
Li Bin, Wei Hua, Nong Weitao, et al. AGC control strategy under control performance standard for interconnected power grid based on optimization theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 56-61(in Chinese).
- [7] 温步瀛. 计及调速器死区影响的两区域互联电力系统 AGC 研究[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 176-182.
Wen Buying. Research on AGC of two-area interconnected power system considering the effect of the governor dead band[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 176-182(in Chinese).
- [8] Ibraheem A, Kumar P, Kothari D P. Recent philosophies of automatic generation control strategies in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1): 346-357.
- [9] 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.
Duan Xianzhong, He Feiyue, Xin Jianbo. Integrative information transmission based operation and control for power system[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 38-41(in Chinese).
- [10] 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.
- [11] 刘梅招, 杨莉, 甘德强, 等. 存在均匀通信时滞的 AGC 稳定极限计算[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 7-12.
Liu Meizhao, Yang Li, Gan Deqiang, et al. Computing the delay margin of AGC system with commensurate communication delay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 7-12(in Chinese).
- [12] 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.
Duan Xianzhong, He Feiyue. Networked AGC robust controller design in consideration of communication delay[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(22): 35-40(in Chinese).
- [13] Bevrani H, Hiyama T. Robust decentralised PI based LFC design for time delay power systems[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(2): 193-204.
- [14] 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.
- [15] Yu X F, Tomsovic K. Application of linear matrix inequalities for load frequency control with communication delays[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1508-1515.
- [16] Vrdoljak K, Petrovic I, Peric N. Discrete-time sliding

- mode control of load frequency in power systems with input delay[C]//Proceedings of the 12th International Power Electronics and Motion Control Conference. Piscataway, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2006: 567-572.
- [17] Hespanha J P, Naghshtabrizi P, Xu Y G. A survey of recent results in networked control systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 138-162.
- [18] Liu G P, Rees D, Chai S C. Design and practical implementation of networked predictive control systems [C]//Proceedings of IEEE Networking, Sensing and Control. Tucson, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2005: 336-341.
- [19] Tang P L, Silva C W. Compensation for transmission delays in an ethernet-based control network using variable-horizon predictive control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14(4): 707-718.
- [20] Clarke D W, Mohtadi C, Tuffs P S. Generalized predictive control, Part I: the basic algorithm[J]. Automatica, 1987, 23(2): 137-148.
- [21] Cheng S J, Chow Y S, Malik O P, et al. An adaptive synchronous machine stabilizer[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1986, 1(3): 101-107.
- [22] Wu Q H, Hogg B W. Robust self-tuning regulator for a synchronous generator[J]. IEE Proceedings: Control Theory and Applications, 1988, 135(6): 463-473.
- [23] 姚伟. 时滞电力系统稳定性分析与网络预测控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- Yao Wei. Stability analysis and its predictive control of power systems with time-delay[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010(in Chinese).



姚伟

收稿日期: 2012-04-27。

作者简介:

姚伟(1983), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力系统分析与控制, yao_wei@163.com;

文劲宇(1970), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电能存储与电力安全、电力系统运行与控制;

孙海顺(1971), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统运行与控制;

程时杰(1945), 男, 中国科学院院士, 教授, 博士生导师, IEEE Fellow, 主要研究方向为电力系统运行与控制, 人工智能、柔性交流输电和储能等技术在电力系统中的应用。

(责任编辑 刘浩芳)