

# 广域时滞电力系统控制器的优化算法及其应用\*

高超 钱伟

(河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454000)

**摘要:** 随着电力系统规模的不断扩大,控制信号在广域环境下产生的时滞现象会对电力系统的稳定运行产生难以忽略的负面影响。基于 Lyapunov 稳定性理论,研究在时滞影响下,基于状态反馈的广域电力系统控制器的设计问题。首先,通过构造 Lyapunov-Krasovskii 泛函,运用矩阵解析方法,得到了基于非线性的矩阵不等式结构;然后,将不等式中的非线性项做线性化处理,使其转化为隶属于线性矩阵不等式的锥补问题,在迭代求解时,对迭代次数进行了优化,平衡了迭代时间与时滞上界的关系。最后,通过仿真算例验证了所得控制器不仅具有较低的保守性,而且具有较快的响应速度,在工程上有较高的实用性。

**关键词:** 广域电力系统;时滞;线性矩阵不等式;优化迭代

**中图分类号:** TP301.6    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 470.4017

## Optimization algorithm of wide-area controller for time-delay power system and its application

Gao Chao Qian Wei

(Dept of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytecnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** With the expansion of the power system, the time-delay of control signal generated in the wide-area environment will produce a negative effects that can not be neglected for the stable operation of power system. Based on Lyapunov stability theory, the design problems of wide-area power system state feedback controller with time-delay was studied in this paper. Firstly, by constructing a Lyapunov-Krasovskii functional, using matrix resolution method, we derive a matrix inequality structure based on the non-linear. Then, transforming the non-linear matrix inequality into linear matrix inequality, it is converted to a cone complementarity problem subjecting to linear matrix inequality and solved by iteration, the time-delay upper bounds and the iteration times is balanced by optimization iterative algorithm. Finally, simulation results indicated that the controller derived in the paper has less conservatism and faster speed, and better project practicality.

**Keywords:** wide area measurement system; time delay; linear matrix inequalities; optimization iterative algorithm

### 1 引言

随着广域测量技术在电网中的广泛应用<sup>[1-2]</sup>,对电网的通信的可靠性提出了更高的要求<sup>[3]</sup>。现代电力系统是一个高维数、强非线性复杂动力系统,其稳定性分析尤其重要<sup>[4-5]</sup>。电力系统广域控制器可以有效的提高互联系统的动态性能,但是在广域环境下,信号在传输时产生的时延可能达到几十甚至数百毫秒,这往往是引起系统不稳定的重要因素,因此在控制器设计阶段,应充分考虑时滞对控制器的影响。

当前设计广域电力系统控制器的方法主要有采最小二

乘预测法<sup>[6]</sup>、Pade逼近法<sup>[7]</sup>等,这些方法通常将电力系统组建成一个无时滞系统。当考虑时滞影响时,基于 Lyapunov 稳定性理论的设计方法得到广泛关注<sup>[8]</sup>。相关方法有以下三种<sup>[9-11]</sup>:1)利用自由权矩阵方法给出了时滞电力系统稳定判据,并设计了无记忆状态反馈控制器,采用调整参数法处理非线性项,将 NLMI 转化为 LMI,但参数的设定需要人为地进行调整,具有较强的保守性;2)应用  $H_\infty$  控制理论设计了电力系统稳定器,但由于权函数的选取没有规律可循,同样具有一定的保守性;3)采用直接迭代算法设计了区间阻尼控制器,将控制器的设计转化为隶属于线性矩阵不等式的锥补线性化问题,但是算法未考虑迭代

收稿日期:2015-10

\* 基金项目:国家自然科学基金(61104119)、河南省高校科技创新人才支持计划(13HASTIT044)资助项目

次数对控制器的影响, 从而导致控制器运算量过大, 难以在实际中应用。

基于以上分析, 本文进一步研究了迭代次数对时滞广域电力系统控制器的影响。通过构造 Lyapunov-Krasovskii 泛函, 得到了基于非线性的矩阵不等式结构, 然后采用锥补线性化算法将 NLMI 转化为 LMI, 并对迭代次数进行了优化处理。最后通过仿真算例验证了该方法所设计的控制器具有很好的控制效果。

## 2 时滞电力系统模型

本文将电力系统模型考虑为如下四阶微分方程, 并考虑发电机端电压测量值存在一定延时, 则系统方程可表示为<sup>[12-13]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega_0 \omega \\ \dot{\omega} = \frac{1}{M} \{-D\omega + (P_m - P_G)\} \\ \dot{E}' = \frac{1}{T_{d0}} \{-E' - (x_d - x'_d)I_d + E_{fd}\} \\ \dot{E}_{fd} = \frac{1}{T_A} \{-K_A(V_G(t-\tau) - V_{ref}) - (E_{fd} - E_{fd0})\} \end{cases} \quad (1)$$

式中:

$$P_G = \frac{E'V_0 \sin\delta}{x_e + x'_d}, I_d = \frac{E' - V_0 \cos\delta}{x_e + x'_d}, \\ V_G = \frac{\sqrt{(x'_d + x_e E' \cos\delta)^2 + (x_e E' \sin\delta)^2}}{x_e + x'_d}.$$

将式(1)线性化, 可得如下状态空间模型:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{A}_1\mathbf{x}(t-\tau) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{x}(t) = \boldsymbol{\phi}(t) \quad t \in [-h, 0] \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{x}(t) = [\Delta\delta \quad \Delta\omega \quad \Delta E' \quad \Delta E_{fd}]^T$  为电力系统状态变量,  $\mathbf{x}(t-\tau)$  为经过时间延时后的状态变量; 控制输入量  $\mathbf{u}$  为附加的励磁输入  $\Delta V_s$ ;  $\boldsymbol{\phi}(t)$  为  $[-h, 0]$  上连续的初始量函数。当系统存在扰动时, 式(2)可变为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A} + \Delta\mathbf{A})\mathbf{x}(t) + (\mathbf{A}_1 + \Delta\mathbf{A}_1)\mathbf{x}(t-\tau) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{x}(t) = \boldsymbol{\phi}(t), \quad t \in [-h, 0] \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\Delta\mathbf{A}, \Delta\mathbf{A}_1$  为系统的扰动项目, 设  $[\Delta\mathbf{A}, \Delta\mathbf{A}_1] = \mathbf{D}\mathbf{F}(t)[\mathbf{E}, \mathbf{E}_1]$ , 其中  $\mathbf{F}(t)$  满足条件:

$$\mathbf{F}^T(t)\mathbf{F}(t) \leq \mathbf{I}$$

对于式(3)系统, 本文设计了状态反馈控制器  $\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}\mathbf{x}(t)$ , 以保证闭环系统。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A} + \Delta\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K})\mathbf{x}(t) + (\mathbf{A}_1 + \Delta\mathbf{A}_1)\mathbf{x}(t-\tau) \quad (4)$$

渐近稳定, 为得到本文的主要结论, 需要应用以下引理。

引理 1 给定具有适当维数的矩阵  $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{Q} + \mathbf{H}\mathbf{F}(t)\mathbf{E} + \mathbf{E}^T\mathbf{F}^T(t)\mathbf{H}^T < 0$ , 对所有满足  $\mathbf{F}^T(t)\mathbf{F}(t) \leq \mathbf{I}$  的  $\mathbf{F}(t)$  都成立的充分条件是存在一正数  $\lambda > 0$  使得下式

成立:

$$\mathbf{Q} + \lambda^{-1}\mathbf{H}\mathbf{H}^T + \lambda\mathbf{E}^T\mathbf{E} < 0$$

## 3 广域状态反馈控制器设计

首先考虑如下系统

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{x}(t) + \mathbf{A}_1\mathbf{x}(t-\tau) \\ \mathbf{x}(t) = \boldsymbol{\phi}(t), \quad t \in [-h, 0] \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $h$  为系统时滞上界,  $0 \leq \tau \leq h$ , 为此系统构造如下 Lyapunov-Krasovskii 泛函:

$$\begin{aligned} V(t, \mathbf{x}_t) = & \mathbf{x}^T(t)\mathbf{P}\mathbf{x}(t) + \int_{t-h}^t \mathbf{x}^T(s)\mathbf{Q}\mathbf{x}(s)ds \\ & + \int_{-h}^0 \int_{t+\theta}^t \dot{\mathbf{x}}(s)\mathbf{Z}\dot{\mathbf{x}}(s)dsd\theta \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{P} = \mathbf{P}^T > 0$ ,  $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T > 0$  和  $\mathbf{Z} = \mathbf{Z}^T > 0$  是待定矩阵。

由于对任意合适维数的  $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{11} & \mathbf{X}_{12} \\ * & \mathbf{X}_{22} \end{bmatrix} \geq 0$ ,  $N_1$  和  $N_2$  有

$$\begin{aligned} & 2[\mathbf{x}^T(t)\mathbf{N}_1 + \mathbf{x}^T(t-h)\mathbf{N}_2] \times \\ & \left[ \mathbf{x}(t) - \int_{t-h}^t \dot{\mathbf{x}}(s)ds - \mathbf{x}(t-h) \right] = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$h\boldsymbol{\eta}_1^T(t)\mathbf{X}\boldsymbol{\eta}_1(t) - \int_{t-h}^t h\boldsymbol{\eta}_1^T(t)\mathbf{X}\boldsymbol{\eta}_1(t)ds = 0 \quad (8)$$

式中:  $\boldsymbol{\eta}_1(t) = [\mathbf{x}^T(t) \quad \mathbf{x}^T(t-h)]^T$ 。那么对  $V(t, \mathbf{x}_t)$  求导数, 并引入式(7)和(8), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t, \mathbf{x}_t) = & \mathbf{x}^T(t)[\bar{\mathbf{P}}\mathbf{A} + \bar{\mathbf{A}}^T\mathbf{P}]\mathbf{x}(t) + 2\mathbf{x}^T(t)\mathbf{P}\mathbf{A}_1\mathbf{x}(t-h) + \\ & \mathbf{x}^T(t)\mathbf{Q}\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}^T(t-h)\mathbf{Q}\mathbf{x}(t-h) + \\ & h\dot{\mathbf{x}}^T(t)\mathbf{Z}\dot{\mathbf{x}}(t) - \int_{t-h}^t \dot{\mathbf{x}}^T(t)\mathbf{Z}\dot{\mathbf{x}}(t)ds + \\ & 2[\mathbf{x}^T(t)\mathbf{N}_1 + \mathbf{x}^T(t-h)\mathbf{N}_2] \times \\ & \left[ \mathbf{x}(t) - \int_{t-h}^t \dot{\mathbf{x}}(s)ds - \mathbf{x}(t-h) \right] + h\boldsymbol{\eta}_1^T(t)\mathbf{X}\boldsymbol{\eta}_1(t) - \\ & \int_{t-h}^t h\boldsymbol{\eta}_2^T(t)\mathbf{X}\boldsymbol{\eta}_2(t)ds = \boldsymbol{\eta}_1^T(t)\boldsymbol{\varphi}_1(t) - \\ & \int_{t-h}^t \boldsymbol{\eta}_2^T(t, s)\boldsymbol{\varphi}_2(t, s)ds \end{aligned} \quad (9)$$

式中:

$$\boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & h\bar{\mathbf{A}}^T\mathbf{Z} \\ * & \phi_{22} & h\bar{\mathbf{A}}_1^T\mathbf{Z} \\ * & * & -h\mathbf{Z} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\boldsymbol{\varphi} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{11} & \mathbf{X}_{12} & \mathbf{N}_1 \\ * & \mathbf{X}_{22} & \mathbf{N}_2 \\ * & * & \mathbf{Z} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\phi_{11} = \bar{\mathbf{P}}\mathbf{A} + \bar{\mathbf{A}}^T\mathbf{P} + \mathbf{N}_1 + \mathbf{N}_1^T + \mathbf{Q} + h\mathbf{X}_{11}$$

$$\phi_{12} = \mathbf{P}\mathbf{A}_1 - \mathbf{N}_1 + \mathbf{N}_2^T + h\mathbf{X}_{12}$$

$$\phi_{22} = -\mathbf{N}_2 - \mathbf{N}_2^T - \mathbf{W} + h\mathbf{X}_{22}$$

根据 Lyapunov 稳定性定理, 若上式中  $\boldsymbol{\phi} < 0$  且  $\boldsymbol{\varphi} > 0$ , 则系统(5)是渐近稳定的。当引入状态反馈  $\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}\mathbf{x}(t)$  时, 系统(5)改写为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K})\mathbf{x}(t) + \mathbf{A}_1\mathbf{x}(t-\tau)$$

此时将式(10)中的  $\bar{\mathbf{A}}$  替换为  $\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K}$ , 同时对式(10)左

乘和右乘  $\text{diag}\{P^{-1}, P^{-1}, Z^{-1}\}$ , 对式(11)左乘和右乘  $\text{diag}\{P^{-1}, P^{-1}, P^{-1}\}$ , 令  $L = P^{-1}, W = P^{-1} * QP^{-1}, Y = \text{diag}\{P^{-1}, P^{-1}\}X\text{diag}\{P^{-1}, P^{-1}\}, M_1 = P^{-1} * N_1P^{-1}, M_2 = P^{-1}N_2P^{-1}, R = Z^{-1}$ , 且  $V = KP^{-1}$ , 可得:

$$\Pi = \begin{bmatrix} \Pi_{11} & \Pi_{12} & h(LA^T + V^T B^T) \\ * & \Pi_{22} & hLA_1^T \\ * & * & -hR \end{bmatrix} < 0 \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & M_1 \\ * & Y_{22} & M_2 \\ * & * & LR^{-1}L \end{bmatrix} \geq 0 \quad (13)$$

式中:

$$\Pi_{11} = LA^T + AL + BV + V^T B^T + M_1 + M_1^T + W + hY_{11}$$

$$\Pi_{12} = A_1L - M_1 + M_2^T + hY_{12}$$

$$\Pi_{22} = -M_2 - M_2^T - W + hY_{22}$$

当系统中存在扰动项时,可再利用  $A + DF(t)E$  和  $A_1 + DF(t)E_1$  分别替代式(12)中的  $A$  和  $A_1$ , 可得:

$$\Pi + \begin{bmatrix} D \\ 0 \\ hD \end{bmatrix} F(t) \begin{bmatrix} EL & E_1L & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} LE^T \\ LE_1^T \\ 0 \end{bmatrix} F(t) \begin{bmatrix} D^T & 0 & hD^T \end{bmatrix} < 0 \quad (14)$$

由引理 1 可知,式(14)等价于:

$$\Pi + \lambda \begin{bmatrix} D \\ 0 \\ hD \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D^T & 0 & hD^T \end{bmatrix} +$$

$$\lambda^{-1} \begin{bmatrix} LE^T \\ LE_1^T \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} EL & E_1L & 0 \end{bmatrix} < 0 \quad (15)$$

再根据 Schur 补定理,式(15)经过变换即得到如下定理。

**定理 1** 给定标量  $h > 0$ , 如果存在矩阵  $L = L^T > 0$ ,

$W = W^T \geq 0, R = R^T \geq 0, Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ * & Y_{22} \end{bmatrix} \geq 0$ , 以及任意合适维数矩阵  $M_1, M_2, V$  和一标量  $\lambda > 0$ , 使得矩阵不等式(16), (17)成立

$$\begin{bmatrix} \Pi_{11} & \Pi_{12} & h(LA^T + V^T B^T + \lambda DD^T) & LE^T \\ * & \Pi_{22} & hLA_1^T & LE_1^T \\ * & * & -hR + \lambda h^2 DD^T & 0 \\ * & * & * & -\lambda I \end{bmatrix} < 0 \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & M_1 \\ * & Y_{22} & M_2 \\ * & * & LR^{-1}L \end{bmatrix} \geq 0 \quad (17)$$

式中:

$$\Pi_{11} = LA^T + AL + BV + V^T B^T + M_1 + M_1^T + W + hY_{11} + \lambda DD^T$$

$$\Pi_{12} = A_1L - M_1 + M_2^T + hY_{12}$$

$$\Pi_{22} = -M_2 - M_2^T - W + hY_{22}$$

则对任意的时滞  $\tau$  满足  $0 \leq \tau \leq h$ , 均能使闭环系统(4)渐近稳定。

由于式(13)中的  $LR^{-1}L$  为非线性项, 处理非线性项的方法主要有两种方法: 一是调整参数法<sup>[9]</sup>; 二是锥补线性化算法<sup>[14]</sup>。调整参数法直接将矩阵不等式中的某些矩阵设定为一钟特殊形式, 且参数的调整往往依靠经验, 就有较大的保守性, 因此本文采用第二种方来实现。

对于式(13)中的非线性项  $LR^{-1}L$ , 显然若存在矩阵  $J$ , 使其等价于:

$$LR^{-1}L \geq J, \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & M_1 \\ * & Y_{22} & M_2 \\ * & * & J \end{bmatrix} \geq 0 \quad (18)$$

由式(18)可得  $L^{-1}RL^{-1} \leq J^{-1}$ , 根据 Schur 补可得到

$$\begin{bmatrix} J^{-1} & L^{-1} \\ L^{-1} & R^{-1} \end{bmatrix} \geq 0, \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & M_1 \\ * & Y_{22} & M_2 \\ * & * & J \end{bmatrix} \geq 0 \quad (19)$$

对于式(19), 若存在矩阵  $JJ_1 = I, LL_1 = I, RR_1 = I$ , 则式(19)可改写为

$$\begin{bmatrix} J_1 & L_1 \\ L_1 & R_1 \end{bmatrix} \geq 0, \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & M_1 \\ * & Y_{22} & M_2 \\ * & * & J \end{bmatrix} \geq 0 \quad (20)$$

显然可将上述不等式转化为隶属于 LMI 的锥补问题<sup>[14]</sup>, 即

$$\begin{cases} \min \text{tr}(JJ_1 + LL_1 + RR_1) \\ \text{st. 式(16), (20)} \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} J & I \\ I & J_1 \end{bmatrix} \geq 0, \begin{bmatrix} L & I \\ I & L_1 \end{bmatrix} \geq 0, \begin{bmatrix} R & I \\ I & R_1 \end{bmatrix} \geq 0 \quad (22)$$

求解上述问题的具体算法步骤如下。

Step1, 选取一个足够小的时间常数  $h_0 > 0$ 。

Step2, 寻找一组可行解:  $L, W, R, Y, M_1, M_2, V, \lambda, J, J_1, L_1, R_1$  满足式(21)和式(22), 若无解则退出, 若有解则验证式(17)是否成立。若式(17)成立, 迭代结束, 若不成立则进入 Step 3。

Step3, 求解关于  $L, W, R, Y, M_1, M_2, V, \lambda, J, J_1, L_1, R_1$  的凸优化问题:

$$\begin{cases} \min \text{tr}(J^k J_1 + J_1^k J + L^k L_1 + L_1^k L + R^k R_1 + R_1^k R) \\ \text{s. t. 式(16), (20)} \end{cases} \quad (23)$$

Step4, 将式(23)得到的结果代入式(17), 验证不等式是否成立。若不成立, 且在迭代次数内, 令  $k = k + 1$ , 再次进入 Step 3, 继续迭代。若成立则返回 Step 1, 令  $h_0 = h_0 + \Delta h$ , 再次迭代, 当  $h_0 = h$  时, 可得系统的反馈矩阵  $K = VL^{-1}$ 。

## 4 迭代次数 $k$ 的优化

采用迭代算法处理非线性项时,需要设定一个最大迭代次数  $k$ 。以第 1 节系统模型为例,由图 1 可知,若选的  $k$  值过大,由于实际电力系统中需要考虑的变量较多,控制器在迭代过程中消耗的运算时间将会增大。由图 2 可知,若选的  $k$  值过小,则系统所能承受的时滞稳定区域将会变小,不能满足实际需要。

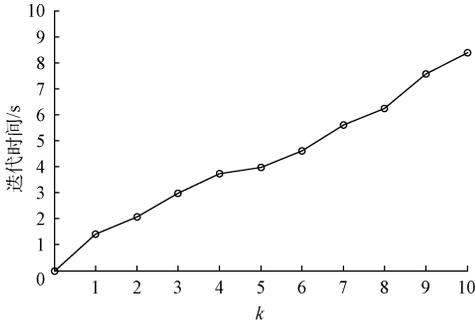


图 1 迭代时间随迭代次数的变化规律

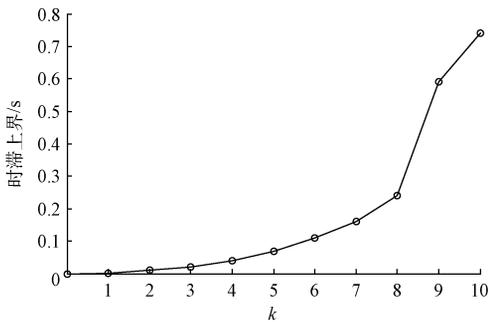


图 2 时滞上限随迭代次数的变化规律

为了平衡迭代时间与时滞上限的关系,需要给控制器选择一个合适的  $k$  值,使控制器用较少的迭代次数获得较高的时滞上限,因此采用如下优化迭代算法。

设控制器迭代时间  $t$  随迭代次数  $k$  的变化规律为  $t = f(k)$ ,时滞上限  $h$  随迭代次数  $k$  的变化规律为  $h = g(k)$ ,当选取的迭代次数  $k$  使下式中  $M_k$  取值最大,则所选取的  $k$  值为最优的迭代次数。

$$M_k = \frac{g(k) - g(k-1)}{f(k) - f(k-1)} \quad (24)$$

## 5 算例仿真

### 5.1 单机无穷大系统算例

利用如图 3 所示单机无穷大系统<sup>[12]</sup>来验证方法的有效性,系统模型和参数见文献,控制输入量  $u$  为附加的励磁输入  $\Delta V_s$ ,即本文的状态反馈信号,则此时  $B = [0, 0, 0, 1]$ 。

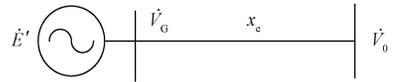


图 3 单机无穷大系统

采用上节优化迭代算法,可得表 1 和 2,由表 1 可知,当  $k = 9$  时,  $M_k$  取值最大,由表 2 可得到不同的迭代次数对应的控制器增益。

表 1  $M_k$  随迭代次数变化规律

迭代次数 $k$	迭代时间 $t/s$	时滞上限 $h/s$	$M_k$
0	0	0	0.000 00
1	1.405	0.000 1	0.000 07
2	2.063	0.01	0.015 05
3	2.986	0.02	0.010 83
4	3.732	0.04	0.026 81
5	3.964	0.07	0.129 31
6	4.596	0.11	0.063 29
7	5.619	0.16	0.048 88
8	6.224	0.24	0.132 23
9	7.576	0.59	0.258 88
10	8.735	0.74	0.129 42

表 2 控制器增益随迭代次数变化规律

迭代次数 $k$	时滞上限 $h/s$	控制器增益			
6	0.106	-163.21	-1 130.3	-215.42	-800.94
7	0.16	-186.75	-1 361.6	-300.9	-748.23
8	0.24	-243.37	-387.25	-525.76	-761.22
9	0.59	-323.92	5 880.55	-800.52	-579.08
10	0.74	-338.78	8 851.95	-787.77	-607.33

由文献<sup>[12]</sup>可知,不加任何反馈控制时,单机无穷大系统可承受的时滞运行区间为  $[0, 0.0654 \text{ s}]$ ,并且当扰动参数变化时,时滞稳定区间将减小。在图 4 中给出了  $\tau = 0.07 \text{ s}$  时系统在不加控制器时仿真曲线。

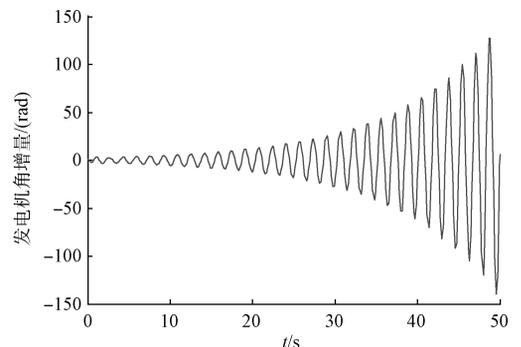


图 5 发电机角增量随时间变化

由图 5 的仿真曲线可以看出,采用本文设计的控制器,系统的时滞稳定区间得到了提高。

### 5.2 WSCC 3 机 9 节点算例

下面利用图 6 所示的 3 机 9 节点系统<sup>[12]</sup>来进行验证,将 1 号发电机设定为无穷大系统,系统的状态空间模型的建立与上述单机无穷大系统的建立方法类似,不再赘述。

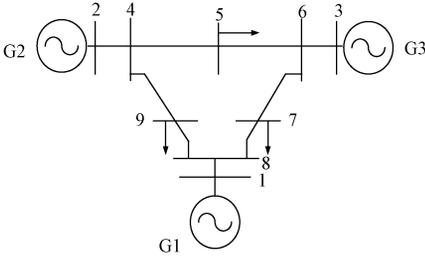


图 6 WSCC 3 机 9 节点系统

采用本文方法,可得迭代次数  $k=30$  时,  $M_k$  值最大,此时,  $h=0.16\text{ s}$ , 控制器增益  $K=1.0 \times 10^5 \times [0.006\ 7, -1.404\ 2, -0.022\ 4, -0.008\ 2, -0.000\ 9, 0.013\ 4, -0.506\ 8, -0.067\ 5, 0.011\ 1, -0.000\ 1]$ 。此时系统的仿真曲线如图 7 所示。

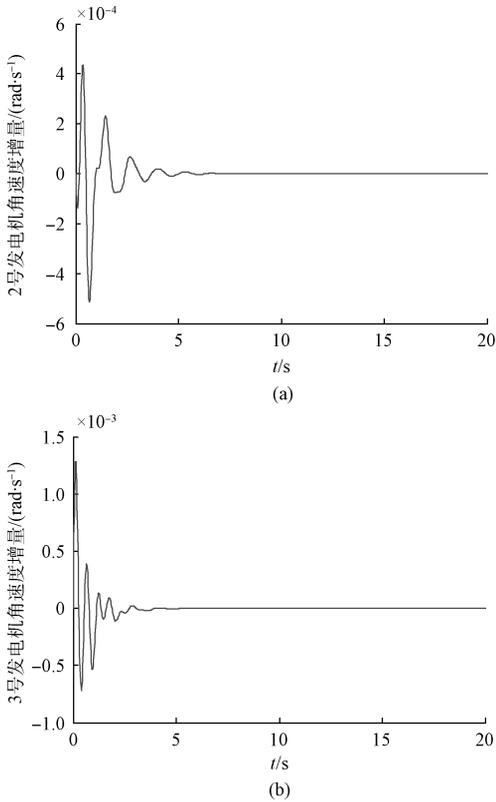


图 7 加控制器后系统的角速度响应曲线

从图 7 中的仿真曲线容易看出,  $0 \leq \tau \leq 0.16\text{ s}$

时,采用本文设计的控制器可使系统保持渐近稳定。下面将本文方法与表 3 中文献进行比较。

表 3 不同方法求得系统时滞上界

方法	文献[12]	文献[15]	本文
$h/s$	0.059	0.14	0.16

对比上表可知,本文方法求得的时滞上界明显高于上述文献方法所得结果,说明本文方法具有更小的保守性。

## 6 结 论

本文主要研究了时滞影响下的广域电力系统控制器的设计问题,提出了一种电力系统控制器的优化迭代设计方法。该方法在对控制器锥补线性化迭代求解过程时,考虑了迭代次数对控制器的影响,并对迭代次数进行了优化,平衡了迭代时间与时滞上界的关系。通过仿真算例说明了所得该控制器不仅具有较低的保守性,而且具有较快的响应速度。由于在本文控制器的设计过程中,引入了自由权矩阵,这会使系统的变量增加,今后的研究需进一步考虑这些因素对控制器的影响。

## 参 考 文 献

- [1] 易建波,黄琦,丁理杰. 结合 WAMS 的低频振荡模式信息在线检测算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(7): 1616-1624.
- [2] 程云峰,张欣然,陆超. 广域测量技术在电力系统中的应用研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 145-153.
- [3] 王建平,王梦彪,王金玲,等. 智能配电网通信实时性与可靠性 QoS 路由机制研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(3): 187-193.
- [4] 田野,沈爱弟,王良,等. 小型电力系统稳定性分析的改进算法及其应用[J]. 计算机工程, 2015, 41(1): 296-302.
- [5] 段虎,李益华. 小波变换在电力系统谐波检测方面的应用[J]. 国外电子测量技术, 2010, 29(12): 73-75.
- [6] 谭文,李志攀,张敏. 基于最小二乘支持向量机的电力系统混沌振荡控制[J]. 湖南科技大学学报, 2010, 25(3): 59-62.
- [7] 叶华,霍健,刘玉田. 基于 Pade 近似的时滞电力系统特征值计算方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 25-30.
- [8] 郑长波,高杰. 应用线性矩阵不等式解决控制问题[J]. 沈阳师范大学学报:自然科学版, 2009, 27(4): 396-400.
- [9] 安海云,贾宏杰,余晓丹. 基于 LMI 理论的时滞电力系统无记忆状态反馈控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 6-10.

(下转第 79 页)