

互联非线性系统反馈主导控制设计方法及汽门开度控制应用

常乃超¹, 陈来军^{2†}, 侯云鹤³

(1. 国家电网公司, 北京 100032; 2. 清华大学 电机系 电力系统国家重点实验室, 北京 100084;

3. 华中科技大学 电力工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 分析了电力系统非线性的数学性质, 指出电力系统非线性是一种有界非线性. 在此基础上, 将反馈主导方法(feedback domination method, FDM)引入多机电力系统非线性控制. 该方法与反馈线性化方法不同; 反馈线性化方法是通过反馈将原非线性系统转化为线性系统, 反馈主导方法则是通过反馈将原非线性系统转换为特定形式的非线性系统, 该特定形式的非线性系统的动态由反馈引入的非线性部分主导. 以多机系统非线性汽门控制问题为例, 设计了反馈主导非线性汽门控制器, 该控制器仅包含本地量测量, 易于实现. 数值仿真表明, 多机系统反馈主导非线性汽门控制器可显著提高电力系统暂态稳定性.

关键词: 非线性控制; 反馈主导; 电力系统; 汽门开度控制

中图分类号: TM712 文献标识码: A

Stability control of interconnected nonlinear systems based on feedback domination method and application on turbine valve

CHANG Nai-chao¹, CHEN Lai-jun^{2†}, HOU Yun-he³

(1. State Grid Corporation of China, Beijing 100032, China;

2. Department of Electrical Engineering, State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Department of Electrical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Mathematical characteristics of power system nonlinearity are analyzed. It is shown that the nonlinearity between generator output power and node voltage is a kind of bounded nonlinearity. According to the bounded nonlinearity, we introduce the feedback domination method (FDM) for controlling the nonlinear multi-machine power systems. Being different from the feedback linearization method (FLM) which transforms a nonlinear system into a linear system through nonlinear feedback, FDM transforms a nonlinear system into another nonlinear system with a particular form through nonlinear feedback. The dynamics of the transformed nonlinear system is dominated by the nonlinear part in the feedback loop. As an example, feedback domination method (FDM) is applied to design the nonlinear turbine valve control in multi-machine power systems. The nonlinear valve control law constructed for generators only includes local measurements, so that it is easy to be implemented. Numerical simulations demonstrate that the nonlinear valve control law based on FDM effectively improves transient stability in power system.

Key words: nonlinear control; feedback domination; power systems; turbine valve control

1 引言(Introduction)

自文[1]将基于微分几何的非线性反馈线性化方法引入电力系统非线性控制领域以来, 反馈线性化成为电力系统非线性控制的主流, 并取得了大量研究成果. 其基本思想是将非线性的电力系统通过可逆坐标变换转化为线性系统, 从而进行线性最优控制或鲁棒控制. 文[2-4]基于全局反馈线性化提出了非线性最优控制方法, 设计了大型发电机组非线性励磁控制器, 提高了暂态稳定功率输送极限16.7%. 文[5-7]采用变

尺度微分同胚, 提出了非线性鲁棒控制方法和自适应控制方法, 设计了大型水轮机的调速控制器, 可最大程度地抑制干扰并适应参数变化. 文[8-10]针对电力电子设备的非线性特性, 建立了该类系统的反馈线性化模型, 设计了相应的非线性控制器, 有效地提高了电能质量和供电可靠性.

需要指出的是, 反馈线性化方法成功与否取决于能否找到将电力系统非线性模型转化为线性模型的可逆坐标变换. 随着系统模型变得越来越复杂有可能

找不到这样的微分同胚. 反馈线性化的基本思想是保留并利用原系统的非线性而不是取消之.

本文分析了电力系统非线性的数学本质, 指出电力系统非线性主要表现为一种有界非线性. 在此基础上将反馈主导方法(feedback domination method, FDM)引入多机电力系统的非线性控制. 与反馈线性化方法通过反馈控制将原非线性系统转化为线性系统不同, 反馈主导方法的基本思想是通过反馈控制将原非线性系统转换为特定形式的非线性系统, 系统的动态由反馈控制引入的非线性部分主导^[11]. 反馈线性化可看作是反馈主导的一种特例, 反馈主导可看作是反馈线性化的一种推广. 反馈主导方法对系统模型的要求相当宽松因而对系统模型的适应性更强, 而且天然地对参数误差、未知干扰等具有一定鲁棒性.

本文首先介绍反馈主导的基本思想, 进而给出一类互联非线性多输入大系统的反馈主导控制方法, 然后将该方法应用于多机电力系统的非线性汽门控制问题, 最后通过数值仿真验证了反馈主导控制器的有效性.

2 反馈主导的基本原理(Principle of FDM)

本节首先用一个简单示例说明反馈主导的概念. 考察简单系统

$$\dot{x} = x^2 + u, \quad (1)$$

其中: $x \in \mathbb{R}$ 为状态变量, u 为控制输入. 按照通常的反馈线性化方法, 控制 u 可取为

$$u = -x^2 - x, \quad (2)$$

如此, 则系统(1)变为

$$\dot{x} = -x. \quad (3)$$

显然, 上述线性系统是稳定的.

反馈主导的思想与反馈线性化不同, 反馈主导不谋求通过反馈将原非线性系统线性化, 而是通过反馈将原非线性系统改造成为具有特定形式的非线性系统. 按照反馈主导的思想, 控制 u 可取为

$$u = -x^3 - x, \quad (4)$$

如此, 系统(1)将变为

$$\dot{x} = -x^3 + x^2 - x, \quad (5)$$

可以证明 $x > 0$ 时 $x^2 < x^3 + x$, $x < 0$ 时 $x^2 > x^3 + x$, 因此 $x = 0$ 为系统(5)唯一稳定平衡点, 即用 x^3 和 x 主导 x^2 , 而不是取消非线性, 此即反馈主导的基本思想.

3 电力系统的非线性界定 (Bounded nonlinearity of power systems)

电力系统的非线性主要表现为发电机电磁功率与节点电压之间的非线性关系. 发电机采用暂态电抗后电势模型时, 发电机电磁功率与暂态电抗后电势的关系为^[12]

$$P_{ei} = E_i'^2 G_{ii} + E_i' \sum_{j \in i} E_j' (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}), \quad (6)$$

其中: E_i' 为暂态电抗后电势, δ_i 为暂态电抗后电势相角, $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$, G_{ij} , B_{ij} 分别为网络导纳矩阵第 i 行第 j 列元素的虚部和实部.

考虑发电机电磁功率 P_{ei} 在初始点 δ_i^0 附近的偏差量, 有

$$\Delta P_{ei} = E_i' \sum_{j \in i} E_j' (G_{ij} (\cos(\delta_{ij}^0 + \Delta \delta_{ij}) - \cos \delta_{ij}^0) + B_{ij} (\sin(\delta_{ij}^0 + \Delta \delta_{ij}) - \sin \delta_{ij}^0)). \quad (7)$$

由于 $|\sin x| \leq |x|$, $\forall x \in \mathbb{R}$, 因此

$$\begin{aligned} |\cos \delta_{ij}^0 - \cos(\delta_{ij}^0 + \Delta \delta_{ij})| &= \\ |2 \sin(\delta_{ij}^0 + \frac{\Delta \delta_{ij}}{2}) \sin \frac{\Delta \delta_{ij}}{2}| &\leq \\ |2 \sin \frac{\Delta \delta_{ij}}{2}| &\leq |\Delta \delta_{ij}| \leq |\Delta \delta_i| + |\Delta \delta_j|. \end{aligned} \quad (8)$$

同样地, 可以证明

$$|\sin \delta_{ij}^0 - \sin(\delta_{ij}^0 + \Delta \delta_{ij})| \leq |\Delta \delta_i| + |\Delta \delta_j|, \quad (9)$$

因此

$$\begin{aligned} |\Delta P_{ei}| &= \\ |E_i' \sum_{j \in i} E_j' (G_{ij} (\cos(\delta_{ij}^0 + \Delta \delta_{ij}) - \cos \delta_{ij}^0) + \\ B_{ij} (\sin(\delta_{ij}^0 + \Delta \delta_{ij}) - \sin \delta_{ij}^0))| &\leq \\ |E_i' \sum_{j \in i} E_j' (G_{ij} (|\Delta \delta_i| + |\Delta \delta_j|) + \\ B_{ij} (|\Delta \delta_i| + |\Delta \delta_j|))| &\leq \\ c_i \sum_{j=1}^N |\Delta \delta_j|, \end{aligned} \quad (10)$$

其中 c_i 为适当常数. 该不等式表明, 电磁功率的偏差具有一个线性函数上界(linearly bounded). 从某种意义上说, 电力系统的非线性并不是“很强”, 而是一种有界非线性. 这种有界非线性是反馈主导控制方法可以应用的关键.

4 反馈主导控制器设计(Design of controller based on FDM)

本节给出一类互联非线性系统反馈主导控制器的设计方法. 首先介绍一个引理.

引理 1^[13] 对于任何正整数 m, n 和任何实值函数 $\gamma(x, y) > 0$, 下面不等式成立:

$$\begin{aligned} |x|^m |y|^n &\leq \frac{m}{m+n} \gamma(x, y) |x|^{m+n} + \\ \frac{n}{m+n} [\gamma(x, y)]^{-\frac{m}{n}} |y|^{m+n}. \end{aligned} \quad (11)$$

根据上述引理, 本节给出了主导控制器的设计步骤并将其归纳为如下定理.

定理 1 考虑如下互联非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{L}_i^T = f_i(L_1, L_2, L, L_n, y_i), & i = 1, 2, \dots, n, \\ \dot{y}_i = u_i + g_i(y_i), \end{cases} \quad (12)$$

其中 $L_i \in \mathbb{R}_m, y_i \in \mathbb{R}$ 为状态变量, $L_i = [l_{i1} \ l_{i2} \ \dots \ l_{im}]$, $l_{ij} \in \mathbb{R}, j = 1, 2, \dots, m; u_i \in \mathbb{R}$ 为控制量; $f_i(\cdot)$ 为光滑函数向量, $f_i(\cdot) = [f_{i1}(\cdot) \ f_{i1}(\cdot) \ \dots \ f_{im}(\cdot)]^T$; $g_i(\cdot)$ 为光滑函数. 记 $L = [L_1 \ L_2 \ \dots \ L_n]$, 若成立下列条件:

$$\|f_i(L_1, L_2, \dots, L_n, y_i)\| \leq (\|L\| + |y_i|) C_{1,i}, \quad (13)$$

$$\|g_i(y_i)\| \leq |y_i| C_{2,i}, \quad (14)$$

且存在光滑函数 $y_i = y_i^*(L), y_i^*(0) = 0$, 和一个 Lyapunov 函数 $V_i(L)$, 满足:

$$\frac{\partial V_i}{\partial L_i} f_i(L_1, L_2, \dots, L_n, y_i^*(L)) \leq -\|L_i\|^2 W_i, \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_i}{\partial L_i} [f_i(L_1, L_2, \dots, L_n, y_i) - \\ f_i(L_1, L_2, \dots, L_n, y_i^*(L))] \leq B_{1,i} \|L_i\|^2 + B_{2,i} |\xi_i|^2, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\left\| \frac{\partial y_i^*}{\partial L} \right\| \leq C_{3,i}, \quad (17)$$

$$\|y_i^*(L)\| \leq \|L\| C_{4,i}, \quad (18)$$

则在下述控制器作用下:

$$u_i = -G\xi_i = -G(y_i - y_i^*(L)), i = 1, 2, \dots, n, \quad (19)$$

互联非线性系统(12)是稳定的, 其中 $\|\cdot\|$ 表示 2-范数, $\xi_i = y_i - y_i^*, C_{1,i}, C_{2,i}, B_{1,i}, B_{2,i}, C_{3,i}, C_{4,i}, W_i, G$ 为常数.

反馈主导控制器(19)的基本设计思路是将式(12)中的 y_i 看做虚拟控制量, 寻找使式(12)中第 1 式所示降阶系统渐近稳定的虚拟控制规律, 然后再应用式(12)的有界非线性(16)–(18), 构造使式(12)稳定的控制规律.

上述定理的证明过程如下:

证 考虑如下 Lyapunov 函数:

$$V(L, y) = \sum_{i=1}^n V_i(L_i) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*)^2. \quad (20)$$

直接计算可以得到

$$\begin{aligned} \dot{V}(L, y) = & \sum_{i=1}^n \frac{\partial V_i(L_i)}{\partial L_i} f_i(L_1, L_2, \dots, L_n, y_i^*) + \\ & \sum_{i=1}^n \frac{\partial V_i(L_i)}{\partial L_i} [f_i(L_1, L_2, \dots, L_n, y_i) - \\ & f_i(L_1, L_2, \dots, L_n, y_i^*)] + \\ & \sum_{i=1}^n \xi_i [g_i(y_i) - \frac{\partial y_i^*(L)}{\partial L} \dot{L}] + \sum_{i=1}^n \xi_i u_i. \end{aligned} \quad (21)$$

注意到式(12)–(18)应用引理 1, 有

$$\dot{V}(L, y) \leq$$

$$\begin{aligned} & - \sum_{i=1}^n W_i \|L_i\|^2 + \sum_{i=1}^n (B_{1,i} \|L_i\|^2 + B_{2,i} |\xi_i|^2) + \\ & \sum_{i=1}^n C_{2,i} |\xi_i| |y_i| + \sum_{i=1}^n \xi_i u_i + \\ & \sum_{i=1}^n C_{3,i} |\xi_i| \|f_i(L_1, L_2, \dots, L_n, y_i)\| \leq \\ & - \sum_{i=1}^n (W_i - B_{1,i} - E) \|L_i\|^2 + \\ & \sum_{i=1}^n D_i |\xi_i|^2 + \sum_{i=1}^n \xi_i u_i, \end{aligned} \quad (22)$$

式中:

$$\begin{aligned} D_i = & B_{2,i} + C_{2,i} + \frac{C_{2,i} C_{4,i}}{p_{1,i}} + \\ & (1 + \frac{1}{2p_{1,i}}) C_{1,i} C_{3,i} + \frac{C_{1,i} C_{3,i} C_{4,i}}{2p_{1,i}}, \\ E = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (C_{2,i} C_{4,i} + C_{1,i} C_{3,i} + C_{1,i} C_{3,i} C_{4,i}) p_{1,i}, \end{aligned}$$

$p_{1,i}$ 是任意正数.

令

$$\begin{cases} D = \max_i \{D_i\}, \\ W = \min_i \{W_i - B_{1,i} - E\}, \\ u_i = -(D + W)\xi_i = -G\xi_i, \end{cases} \quad (23)$$

从而有

$$\begin{aligned} \dot{V}(L, y) \leq & -W \sum_{i=1}^n (\|L_i\|^2 + |\xi_i|^2) \leq \\ & -W \sum_{i=1}^n (\|L_i\|^2 + |y_i - y_i^*|^2) \leq \\ & -W \sum_{i=1}^n (\|L_i\|^2 + 2|y_i|^2 + 2C_{4,i}^2 \|L\|^2) \leq \\ & -\tilde{W} (\|L\|^2 + \|y\|^2), \end{aligned} \quad (24)$$

其中: $\tilde{W} = W \min_i (F_i), F_i = \min\{2nC_{4,i}^2 + 1, 2\}$.

综上, 式(23)–(24)表明式(19)所示的控制规律可以镇定式(12)所示的互联非线性系统. 证毕.

5 多机系统汽门开度控制应用分析(FDM application in turbine valve control in multi-machine power systems)

5.1 控制器设计(Controller design)

多机系统汽门控制模型为^[1]

$$\begin{cases} \Delta \dot{\delta}_i = \Delta \dot{\omega}_i, \\ \Delta \dot{\omega}_i = \frac{\omega_0}{M_i} (P_{mi,0} + \Delta P_{mi} - E_i'^2 G_{ii} - \\ \quad E_i' \sum_{j \in i} E_j' (G_{ij} \cos(\delta_{ij}^0 + \Delta \delta_{ij}) + \\ \quad B_{ij} \sin(\delta_{ij}^0 + \Delta \delta_{ij}))), \\ \Delta \dot{P}_{mi} = -\frac{1}{T_i} \Delta P_{mi} + \frac{1}{T_i} u_i \\ i = 1, 2, \dots, n, \end{cases} \quad (25)$$

其中: $\Delta\delta_i, \Delta\omega_i, \Delta P_{mi}$ 分别为第*i*台发电机转子角度、转速、机械功率的变化量; M_i 为转子惯量; $\Delta\delta_{ij} = \Delta\delta_i - \Delta\delta_j, \Delta\delta_{ij}^0$ 为 $\Delta\delta_{ij}$ 的初始值; T_i, u_i 分别为第*i*台发电机的汽轮机的时间常数和汽门控制输入; G_{ij}, B_{ij} 分别为导纳矩阵第*i*行第*j*列元素的实部和虚部; $P_{mi,0}$ 为第*i*台发电机的机械功率初始值, $P_{mi,0} = E_i'^2 G_{ii} + E_i' \sum_{j \in i} E_j' (G_{ij} \cos \delta_{ij}^0 + B_{ij} \sin \delta_{ij}^0)$; $\omega_0 = 100\pi$ 为同步转速.

令 $L_i = [\Delta\delta_i \ \Delta\omega_i], y_i = \Delta P_{mi}$, 上述模型可写为

$$\begin{cases} \dot{L}_i^T = \begin{bmatrix} \Delta\dot{\delta}_i \\ \Delta\dot{\omega}_i \end{bmatrix} = f_i(L_1, L_2, \dots, L_N, y_i), \\ \dot{y}_i = -\frac{1}{T_i} y_i + \bar{u}_i = \bar{u}_i + g_i(y_i), \\ i = 1, 2, \dots, n, \end{cases} \quad (26)$$

其中:

$$\begin{cases} f_{i,1}(L_1, L_2, \dots, L_N, y_i) = \Delta\omega_i, \\ f_{i,2}(L_1, L_2, \dots, L_N, y_i) = \\ \frac{\omega_0}{M_i} [P_{mi,0} + \Delta P_{mi} - E_i'^2 G_{ii} - \\ E_i' \sum_{j \in i} E_j' (G_{ij} \cos(\delta_{ij}^0 + \Delta\delta_{ij}) + \\ B_{ij} \sin(\delta_{ij}^0 + \Delta\delta_{ij}))], \\ g_i(y_i) = -\frac{1}{T_i} y_i. \end{cases} \quad (27)$$

下面证明定理1可以应用于上述多机系统汽门控制模型. 注意到式(10), 可得

$$\begin{aligned} \|f_i(L_1, L_2, \dots, L_N, y_i)\| &\leq \\ |f_{i,1}(L_1, L_2, \dots, L_N, y_i)| &+ |f_{i,2}(L_1, L_2, \dots, L_N, y_i)| \leq \\ |\Delta\omega_i| + \frac{\omega_0}{M_i} |\Delta P_{mi}| + \\ E_i' \sum_{j \in i} E_j' (|G_{ij}| + |B_{ij}|) (|\Delta\delta_i| &+ |\Delta\delta_j|) \leq \\ |\Delta\omega_i| + a_{i,1} |\Delta P_{mi}| + a_{i,2} |\Delta\delta_i| &+ \sum_{j \in i} b_{i,j} |\Delta\delta_j| \leq \\ (\|L\| + |y_i|) C_{1,i}, \end{aligned} \quad (28)$$

其中 $C_{1,i}$ 为常数, 因此式(13)所示条件得到满足.

容易看出

$$|g_i(y_i)| = \left| -\frac{1}{T_i} y_i \right| \leq |y_i| C_{2,i}, \quad C_{2,i} = \frac{1}{T_i}, \quad (29)$$

因此式(14)所示条件得到满足. 令

$$\begin{aligned} y_i = y_i^*(L) = \\ -P_{mi,0} + P_{e,i} + \frac{M_i}{\omega_0} (k_1 \Delta\delta_i + k_2 \Delta\omega_i) = \\ -P_{mi,0} + \frac{M_i}{\omega_0} (k_1 \Delta\delta_i + k_2 \Delta\omega_i) + \end{aligned}$$

$$\left\| \frac{\partial y_i^*(L)}{\partial L} \right\| \leq \sqrt{\left(\frac{M_i k_1}{\omega_0} + E_i' \sum_{j \in i} E_j' (|G_{ij}| + |B_{ij}|) \right)^2 + \left(\frac{M_i k_2}{\omega_0} \right)^2 + \sum_{j \in i} [E_i' E_j' (|G_{ij}| + |B_{ij}|)]^2} = C_{3,i}. \quad (39)$$

$$\begin{aligned} E_i'^2 G_{ii} E_i' \sum_{j \in i} E_j' (G_{ij} \cos(\delta_{ij}^0 + \Delta\delta_{ij}) + \\ B_{ij} \sin(\delta_{ij}^0 + \Delta\delta_{ij})). \end{aligned} \quad (30)$$

从而有

$$\dot{L}_i^T = f_i(L_1, L_2, \dots, L_N, y_i^*) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ k_1 & k_2 \end{bmatrix} L_i = A L_i. \quad (31)$$

选择如下Lyapunov函数:

$$V_i(L_i) = L_i^T P L_i, \quad (32)$$

其中 P 为下述Lyapunov方程的正定解:

$$P A + A^T P = -Q, \quad (33)$$

Q 为正定对角阵, 进一步有

$$\begin{aligned} \dot{V}_i(L_i) = \frac{\partial V_i}{\partial L_i} f_i(L_1, L_2, \dots, L_N, y_i^*) = \\ L_i^T (P A + A^T P) L_i. \end{aligned} \quad (34)$$

因此

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_i}{\partial L_i} f_i(L_1, L_2, \dots, L_N, y_i^*) = \\ -L_i^T Q L_i \leq -W_i \|L_i\|^2, \end{aligned} \quad (35)$$

其中 $W_i = \min\{Q_{ii}\}$ 为 Q 的最小元.

因此式(15)所示条件得到满足.

通过计算可得到

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_i}{\partial L_i} [f_i(L_1, L_2, \dots, L_N, y_i) - \\ f_i(L_1, L_2, \dots, L_N, y_i^*(L))] = \\ 2L_i^T P \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_0 \\ M_i \end{bmatrix} \xi_i = \frac{2\omega_0}{M_i} (p_{12} \Delta\delta_i + p_{22} \Delta\omega_i) \xi_i \leq \\ h_i \|L_i\| |\xi_i|, \end{aligned} \quad (36)$$

$$\text{其中: } \xi_i = y_i - y_i^*, \quad h_i = \frac{2\omega_0 |p_{12}|}{M_i} + \frac{2\omega_0 |p_{22}|}{M_i}.$$

由引理1得

$$\|L_i\| |\xi_i| \leq \frac{1}{2q_i} |\xi_i|^2 + \frac{1}{2} q_i \|L_i\|^2, \quad (37)$$

其中 q_i 为任意正数, 有

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_i}{\partial L_i} (f_i(L_1, L_2, \dots, L_N, y_i) - \\ f_i(L_1, L_2, \dots, L_N, y_i^*(L))) \leq \\ B_{1,i} \|L_i\|^2 + B_{2,i} |\xi_i|^2, \end{aligned} \quad (38)$$

$$\text{其中: } B_{1,i} = \frac{1}{2} q_i, \quad B_{2,i} = \frac{1}{2q_i}.$$

因此式(16)条件得到满足. 由式(30), 可得

因此式(17)所示条件得到满足.

从式(19)–(24), 可以看出

$$|y_i^*(L)| \leq \frac{M_i|k_1|}{\omega_0}|\Delta\delta_i| + \frac{M_i|k_2|}{\omega_0}|\Delta\omega_i| + E'_i \sum_{j \in i} E'_j(|G_{ij}| + |B_{ij}|)(|\Delta\delta_i| + |\Delta\delta_j|) \leq \|L\|C_{4,i}. \quad (40)$$

因此式(18)所示条件得到满足.

以上分析表明多机系统汽门控制模型满足反馈主导控制方法的条件, 其主导控制器为

$$u_i = -G(y_i - y_i^*(L)) = -G[\Delta P_{mi} + P_{mi,0} - P_{e,i} - \frac{M_i}{\omega_0}(k_1\Delta\delta_i + k_2\Delta\omega_i)], \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (41)$$

其中 G 为适当正数, 该控制器能够镇定多机系统. 由于所设计的控制律中仅包含本地量测量, 因此易于分散就地实现.

5.2 数值仿真(Numerical simulation)

使用 IEEE 6 机 30 节点系统^[14]进行了仿真, 如图1所示, 选择 $k_1 = -2, k_2 = -3, G = 100$.

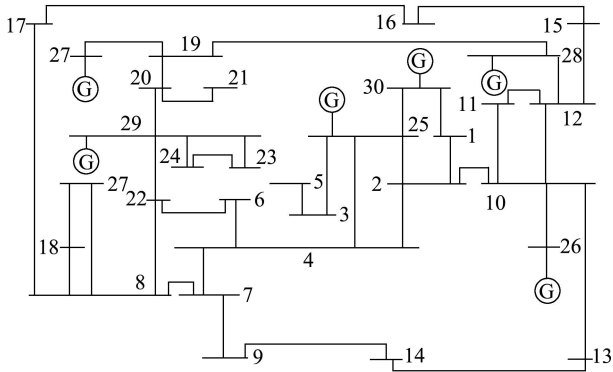


图 1 6机30节点系统

Fig. 1 6 machine 30 bus power systems

故障 1 母线4处 $t = 0$ s时发生三相短路, $t = 0.15$ s短路清除. 各发电机1–5相对于发电机6的角度如图2所示, 各发电机的角速度响应如图3所示.

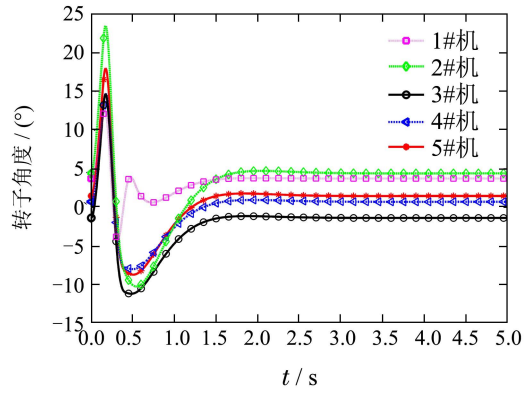
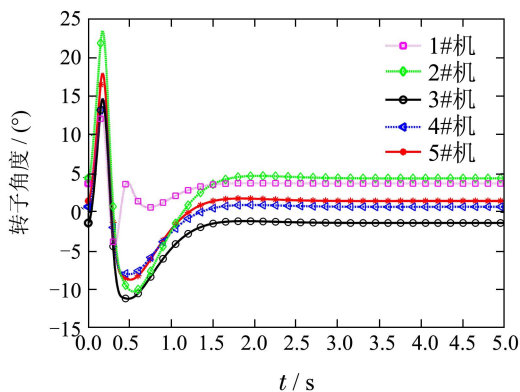


图 2 故障1下的发电机转子角度曲线

Fig. 2 Generator rotor angle curves under fault 1

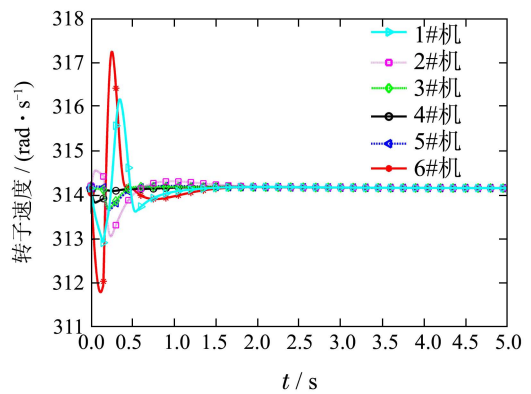


图 3 故障1下的发电机转子速度曲线

Fig. 3 Generator rotor speed curves under fault 1

故障 2 母线10处 $t = 0$ s时发生三相短路, $t = 0.15$ s短路清除. 各发电机角度响应如图4–5所示.

从上述仿真结果可以看出, 基于反馈主导的控制规律能够在较短时间内平息故障后系统的暂态振荡, 提高大扰动后系统的暂态稳定性.

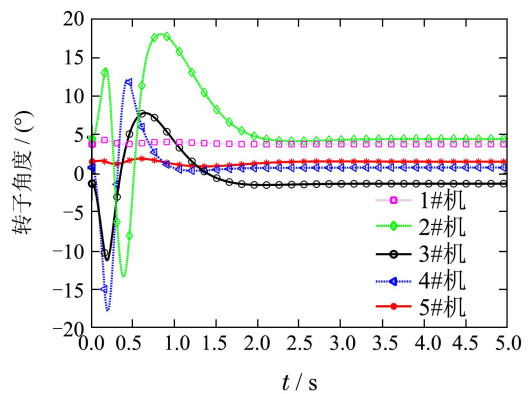


图 4 故障2下的发电机转子角度曲线

Fig. 4 Generator rotor angle curves under fault 2

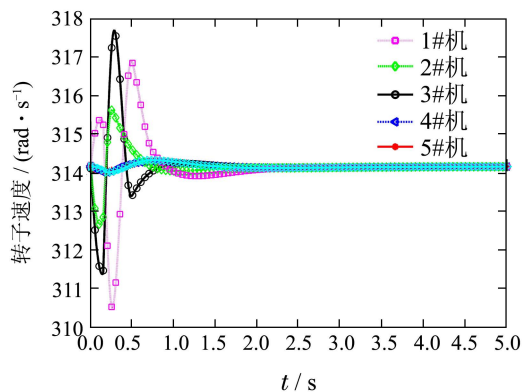


图5 故障2下的发电机转子速度曲线

Fig. 5 Generator rotor speed curves under fault 2

6 结语(Conclusions)

电力系统的非线性特性主要呈现为发电机电磁功率与节点电压之间的非线性关系,这种非线性具有线性函数上界,因此是一种有界非线性。

基于电力系统的有界非线性,按照反馈主导控制器设计的基本思路,构造了多机系统受控Lyapunov函数,并基于该受控Lyapunov函数设计了使多机系统渐近稳定的非线性汽门控制规律,所设计的非线性汽门控制规律是各机分散的,仅包含一些容易测量的本地量且不包含测量值的导数,便于工程实现。这一点是对笔者已有工作的最大改进。数值仿真表明所设计的非线性汽门控制规律能够大幅度地提高系统的暂态稳定性。

反馈主导方法对模型的要求是相当宽泛的,因此,该方法有望应用于很多电力系统控制问题,这也是笔者未来进一步工作的方向。

参考文献(References):

- [1] LU Q, SUN Y Z. Nonlinear stabilizing control of multi-machine power systems [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1989, 4(1): 236 – 241.
- [2] LU Q, SUN Y Z, XU Z, et al. Decentralized nonlinear optimal excitation control [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1996, 11(4): 1957 – 1962.
- [3] MEI S W, LI X, LU Q, et al. Feedback linearization H_∞ control and its application to excitation systems [J]. *Tsinghua Science and Technology*, 1999, 4(4): 1701 – 1706.
- [4] LU Q, MEI S W, HU W, et al. Decentralised nonlinear H_∞ excitation control based on regulation linearization [J]. *IEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution*, 2000, 147(4): 245 – 251.
- [5] 孙郁松, 孙元章, 卢强, 等. 水轮机调节系统非线性 H_∞ 控制规律的研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2001, 21(2): 56 – 65.
- (SUN Yusong, SUN Yuanzhang, LU Qiang, et al. Research on nonlinear robust control strategy for hydroelectric generator's valve [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2001, 21(2): 56 – 65.)
- [6] 桂小阳, 梅生伟, 卢强. 多机系统水轮机调速器鲁棒非线性协调控制 [J]. *电力系统自动化*, 2006, 30(3): 29 – 33.
- (GUI Xiaoyang, MEI Shengwei, LU Qiang. Nonlinear coordinated robust governor control of hydro-turbine generator sets in multi-machine power systems [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(3): 29 – 33.)
- [7] 桂小阳, 梅生伟, 刘锋, 等. 水轮机调速系统的非线性自适应控制 [J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(8): 66 – 71.
- (GUI Xiaoyang, MEI Shengwei, LIU Feng, et al. Adaptive nonlinear control for hydraulic turbine governor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(8): 66 – 71.)
- [8] 谢桦, 梅生伟, 徐政, 等. 统一潮流控制器的非线性控制和对电力系统稳定性的改善 [J]. *电力系统自动化*, 2001, 25(19): 1 – 5.
- (XIE Hua, MEI Shengwei, XU Zheng, et al. Nonlinear control for UPFC to improve transient stability of power systems [J]. *Automation of Electric Power System*, 2001, 25(19): 1 – 5.)
- [9] 王文聪, 梅生伟, 刘锋. 区域互联线路上的STATCOM的鲁棒控制器设计 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2004, 44(4): 433 – 437.
- (WANG Wencong, MEI Shengwei, LIU Feng. Robust controller design for STATCOM installed in connection lines [J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2004, 44(4): 433 – 437.)
- [10] 陈菊明, 刘锋, 梅生伟. 基于无源化方法的三相四线制APF控制器策略 [J]. *电力系统自动化*, 2006, 30(8): 32 – 36.
- (CHEN Juming, LIU Feng, MEI Shengwei. Passivity-based controller for three-phase four-wire APF [J]. *Automation of Electric Power System*, 2006, 30(8): 32 – 36.)
- [11] LIN W, QIAN C J. Adding one power integrator: a tool for global stabilization of high-order lower triangular systems [J]. *Systems & Control Letters*, 2000, 39(5): 339 – 351.
- [12] 梅生伟, 刘锋, 薛安成. 电力系统暂态分析中的半张量积方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- (MEI Shengwei, LIU Feng, XUE Ancheng. *Semi-tensor Product Method in Transient Analysis of Power System* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.)
- [13] 卢强, 梅生伟, 孙元章. 电力系统非线性控制 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- (LU Qiang, MEI Shengwei, SUN Yuanzhang. *Nonlinear Control for Power System* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.)
- [14] ZIMMERMAN R D, MURILLO-SÁNCHEZ C E, THOMAS R J. Matpower steady-state operations, planning and analysis tools for power systems research and education [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(1): 12 – 19.

作者简介:

常乃超 (1977–), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统稳定控制, E-mail: changnaichao@sina.com;

陈来军 (1984–), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为电力系统仿真分析, E-mail: chenlaijun@tsinghua.edu.cn;

侯云鹤 (1975–), 男, 博士, 助理教授, 研究方向为电力系统运行分析、电力市场, E-mail: yhou@eee.hku.hk.