

基于 RAFL 非线性系统控制的研究及在 HVDC 系统中的应用

姚致清¹, 刘喜梅², 于洁²

(1. 许昌继电器研究所, 河南 许昌 461000; 2. 青岛科技大学, 山东 青岛 266042)

摘要: 研究非线性系统的控制问题具有重要的理论意义和实用价值。高压直流输电系统(简称 HVDC 系统)是典型非线性系统, HVDC 系统是高度可控的, 其中控制系统是直流输电技术的核心。HVDC 系统能否正常运行与其基本控制器的性能息息相关。论文对鲁棒近似反馈线性化控制方法进行了研究, 研究结果解决了一类非线性系统的控制问题, 同时应用到 HVDC 系统中, 并设计了相应的控制器。

关键词: 高压直流输电; 鲁棒近似反馈线性化; 非线性; 基本控制

Study of nonlinear system control based on RAFL and its application in HVDC system

YAO Zhi-qing¹, LIU Xi-mei², YU Jie²

(1. Xuchang Relay Research Institute, Xuchang 461000, China;

2. Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: It is valuable in both theoretical and practical area to study the control of nonlinear systems. High Voltage Direct Current Transmission (HVDC) is a typical nonlinear system. HVDC is high controllable. The control system is the core of DC transmission system. The performance of its basic controller decides the operation condition of HVDC system. This paper researches and improves a novel nonlinear robust approximate feedback linearization method based on model observers to solve the control problems for a class of nonlinear systems. Also the application problems of HVDC control system are discussed in detail. And a nonlinear controller for HVDC system is designed.

Key words: HVDC transmission; robust approximate feedback linearization (RAFL); nonlinear; basic control

中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)16-0038-04

0 引言

今后十到二十年内, 我国电网的发展战略是“全国联网、西电东送、南北互供”^[1]。对于输电距离上千公里、输送容量上千万千瓦的西电东送工程来说, 采用常规 500 kV 交流输电技术已无能为力, 它存在电网短路电流水平超限、可能发生联络线功率低频振荡以及故障蔓延等难以解决的困难。目前, 随着全球对环境保护的日益重视, 交流高压技术的研究和开发在全球范围内早已处于停顿状态, 已很难再有发展, 因此, 在未来二十年内, 我国要进行西电东送和全国联网, 采用交流特高压技术进行没有现实性, 高压直流输电(HVDC)将在西电东送和全国联网中起主导作用。

鲁棒近似反馈线性化(RAFL)方法也是从工程实用角度提出的, 旨在为控制工程中面临的棘手控制问题提供简单实用的解决途径, 利用一种包含积分作用的“模型观测器”^[2]来完成不确定性被控对象的估计和补偿。目前该方法已经被成功

地应用于二自由度的机械臂控制^[2]、两薄膜柔性夹层控制^[3]、机炉协调控制^[4]、水轮机调节系统控制^[5]、微型直升机控制^[6]等的仿真研究中。

1 RAFL 设计控制器描述

考虑一类输入输出维数相等 MIMO 非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x)u_i, & x \in R^n, u \in R^m \\ y_1(t) = h_1(x) \\ \vdots \\ y_m(t) = h_m(x) \end{cases} \quad y \in R^m \quad (1)$$

此处, x 为 n 维状态向量, $f(x)$ 及 $g_i(x)(i=1, \dots, m)$ 皆为 n 维向量场, u_i 为第 i 个控制量, $y_i(t)$ 为第 i 个输出量, $h_i(x)$ 为 x 的标量函数。 $f(x)$, $g_i(x)(i=1, \dots, m)$ 以及 $h_i(x)$ 都是可微的函数向量。 $y = (y_1, \dots, y_m)^T$, $u = (u_1, \dots, u_m)^T$,

$$g(x) = (g_1(x), \dots, g_m(x))^T, \quad h(x) = (h_1(x), \dots, h_m(x))^T.$$

定义 1^[7]: 对在 x_0 一个邻域内的所有 x , 若满足:

(i) 对 $\forall i, j = 1, \dots, m, 0 \leq k_i < \rho_i - 1$, 有 $L_{g_j} L_f^{k_i} h_i(x) = 0$;

(ii) $m \times m$ 阶矩阵

$$A(x) = \begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^{\rho_1-1} h_1(x) & \dots & L_{g_m} L_f^{\rho_1-1} h_1(x) \\ \dots & \dots & \dots \\ L_{g_1} L_f^{\rho_m-1} h_m(x) & \dots & L_{g_m} L_f^{\rho_m-1} h_m(x) \end{bmatrix}$$

非奇异, 则称 $\rho = (\rho_1, \dots, \rho_m)^T$ 为系统 (1) 的相对阶向量, 且其中每个子相对阶 ρ_i 与输出 $y_i(t) = h_i(x)$ 是对应的。

假设 2: 相对阶向量 ρ 有界且已知,

$$\gamma = \sum_{i=1}^m \rho_i \leq n;$$

假设 3: 输出变量 $y_i(t)$ 及其对时间导数

$$y_i^{(j)}(t) (i=1, \dots, m, j=1, \dots, \rho_i-1)$$
 可测;

根据假设 2, 通过局部微分同胚变换

$$\Phi(x) = [\phi_{1,1}(x), \dots, \phi_{\rho_1,1}(x), \dots, \phi_{1,m}(x), \dots, \phi_{\rho_m,m}(x), \phi_{\gamma+1}, \dots, \phi_n]^T$$

可将系统 (1) 化为如下标准型:

$$\begin{cases} \dot{z}_{1,i} = z_{2,i} \\ \dots \\ \dot{z}_{\rho_i-1,i} = z_{\rho_i,i} \\ \dot{z}_{\rho_i,i} = a_i(z, w) + \sum_{j=1}^m b_{i,j}(z, w) u_j, i=1, \dots, m \\ \dot{w} = c(z, w) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} y_1 = z_{1,1} \\ \dots \\ y_m = z_{1,m} \end{cases}$$

其中: $z = (z_{1,1}, \dots, z_{\rho_1,1}, \dots, z_{1,m}, \dots, z_{\rho_m,m})^T$,

$$w = (w_1, \dots, w_{n-\gamma})^T,$$

$$\phi_{j,i}(x) = L_f^{j-1} h_i(x), i=1, \dots, m, j=1, \dots, \rho_i,$$

$$a_i(z, w) = L_f^{\rho_i} h_i(x) \Big|_{x=\Phi^{-1}(z,w)}, 1 \leq i \leq m,$$

$$b_{i,j}(z, w) = L_{g_j} L_f^{\rho_i-1} h_i(x) \Big|_{x=\Phi^{-1}(z,w)}, 1 \leq i, j \leq m.$$

假设 4: 矩阵 $A(x)$ 正定或通过初等变换可化成正定矩阵。

说明 (1): 对于假设 4 中提到的 $A(x)$ 可化为正定矩阵的情况, 即存在非奇异阵 E 使得 $\hat{A} = AE$ 正定, 可以考虑通过变换定义新的输入变量 $u' = E^{-1}u$ 来消除 $A(x)$ 非正定的影响。所以在本文中, 不妨假定 $A(x)$ 恒为正定矩阵。

假设 5: 当 $\gamma < n$ 时, 系统 (2) 的零动态局部渐近稳定。

假设 6: 参考输出 $y_{d,i}(t)$ 及其对时间的导数

$$y_{d,i}^{(j)}(t), j=1, \dots, \rho_i$$
 已知且有界。

假设 7: $\dot{d} = (\dot{d}_1, \dots, \dot{d}_m)^T$ 有界。

综合整理, 多变量系统的 RAFL 控制律形式如下:

$$\begin{cases} u = v - \hat{d} \\ v = y_d^{(\rho)} - H\hat{e} \\ \hat{d}_i = \xi_i + \sum_{j=0}^{\rho_i-1} k_{j,i} e_i^{(j)}, i=1, \dots, m \\ \dot{\xi}_i = -k_{\rho_i-1,i} \xi_i - k_{\rho_i-2,i} \sum_{j=0}^{\rho_i-1} k_{j,i} e_i^{(j)} - \sum_{j=0}^{\rho_i-2} k_{j,i} e_i^{(j+1)} - k_{\rho_i-1,i} u_i \end{cases} \quad (3)$$

说明 (2): 若 $\sum_{i=1}^m \rho_i = n$, 系统标准型中不再包含零动态, 控制器的分析及设计过程将得到很大简化。不妨假定本章所研究的 MIMO 系统满足

$$\sum_{i=1}^m \rho_i = n.$$

说明 (3): 由于线性系统是非线性系统的特例, 所以 RAFL 方法对线性多变量系统的控制同样适用。

2 RAFL 在直流输电系统中的应用

直流输电系统可以由如图 1 所示的等值电路来表示。

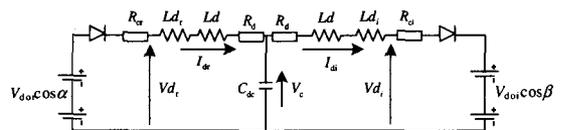


图 1 直流输电系统等值电路图

Fig. 1 Equivalent circuit of HVDC transfer system

图中, V_{dr} 和 V_{di} 分别为整流侧和逆变侧的直流电压, I_{dr} 和 I_{di} 分别为整流侧和逆变侧的直流电流; V_{dor} 和 V_{doi} 分别为整流侧和逆变侧的理想空载直流电压; R_{cr} 和 R_{ci} 分别为整流侧和逆变侧的等效换向

电阻, $R_{cr} = \frac{3}{\pi} X_{cr}$, $R_{ci} = \frac{3}{\pi} X_{ci}$, X_{cr} 和 X_{ci} 分别为整流器和逆变器的换流电抗; L_{cr} 和 L_{ci} 分别为整流侧和逆变侧平波电抗器的电感值; L_d 和 R_d 分别为二分之一的直流线路电感值和电阻值; C_{dc} 为直流输电线路总的对地电容值, V_c 为电容上的电压值; α 为整流器的触发滞后角, β 为逆变侧的触发超前角。

系统的状态方程和输出方程如下, 状态方程为^[8]:

$$\begin{aligned} \dot{i} &= \frac{1}{L_{d\Sigma}} (-R_{d\Sigma} I_d + kV_{ar} \cos \alpha - kV_{ai} \cos \beta) \\ \dot{\alpha} &= \frac{1}{T_\alpha} (-\Delta \alpha + u_\alpha) \\ \dot{\beta} &= \frac{1}{T_\beta} (-\Delta \beta + u_\beta) \end{aligned} \quad (4a)$$

输出方程为:

$$\begin{aligned} y_d(t) &= I_d(t) - I_{ds} \\ y_q(t) &= \frac{I_d}{V_a} \sqrt{(kV_a)^2 - (kV_a \cos \beta + R_{ci} I_d)^2} - I_\varphi \end{aligned} \quad (4b)$$

对(4)所示的非线性系统, 可以写成以下紧凑形式:

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= f(X(t)) + g_1(X(t))u_1 + g_2(X(t))u_2 \\ y_1(t) &= h_1(X(t)) \\ y_2(t) &= h_2(X(t)) \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $X(t) = [I_d \ \alpha \ \beta]^T$; $u_1 = u_\alpha$; $u_2 = u_\beta$;

$$\begin{aligned} g_1(X(t)) &= g_\alpha(X(t)) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{T_\alpha} & 0 \end{bmatrix}^T; \\ g_2(X(t)) &= g_\beta(X(t)) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{T_\beta} \end{bmatrix}^T; \\ h_1(X(t)) &= y_d(t) = I_d(t) - I_{ds}; \\ h_2(X(t)) &= y_q(t) = \frac{I_d}{V_a} \sqrt{(kV_a)^2 - (kV_a \cos \beta + R_{ci} I_d)^2} - I_\varphi; \\ f(X(t)) &= \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{d\Sigma}} (-R_{d\Sigma} I_d + kV_{ar} \cos \alpha - kV_{ai} \cos \beta) \\ -\frac{1}{T_\alpha} \Delta \alpha \\ -\frac{1}{T_\beta} \Delta \beta \end{bmatrix}; \end{aligned}$$

通过李导数变换及坐标变换, 根据坐标映射的选择原则, 可以求出以下坐标变换 $Z = \phi(X)$ 为:

$$z_1 = h_1(X(t)) = I_d(t) - I_{ds}$$

$$\begin{aligned} z_2 &= L_f h_1(X(t)) = \dot{I}_d = \frac{1}{L_{d\Sigma}} (-R_{d\Sigma} I_d + kV_{ar} \cos \alpha - kV_{ai} \cos \beta) \\ z_3 &= h_2(X(t)) = \frac{I_d}{V_a} \sqrt{(kV_a)^2 - (kV_a \cos \beta + R_{ci} I_d)^2} - I_\varphi \end{aligned} \quad (6)$$

在新坐标系下, 系统可以变换成为以下形式:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= \dot{I}_d = z_2 \\ \dot{z}_2 &= \frac{d}{dt} L_f h_1(X(t)) = L_f^2 h_1(X) + L_{g_1} L_f h_1(X) u_1 + \\ &L_{g_2} L_f h_1(X) u_2 + \frac{\partial L_f h_1(X)}{\partial V_{ar}} \dot{V}_{ar} + \frac{\partial L_f h_1(X)}{\partial V_{ai}} \dot{V}_{ai} \\ \dot{z}_3 &= \frac{d}{dt} L_f h_2(X(t)) = L_f^2 h_2(X) + L_{g_1} L_f h_2(X) u_1 + \\ &L_{g_2} L_f h_2(X) u_2 + \frac{\partial h_2(X)}{\partial V_{ar}} \dot{V}_{ar} + \frac{\partial h_2(X)}{\partial V_{ai}} \dot{V}_{ai} \end{aligned} \quad (7a)$$

输出方程为:

$$\begin{aligned} y_1 &= z_1 \\ y_2 &= z_3 \end{aligned} \quad (7b)$$

精确反馈线性化方法的实现完全依赖于对象的准确模型^[9], 然而事实上, 对象的模型往往因存在不确定性而无法精确已知, 仅仅依赖标称情况下的向量和矩阵计算出的精确反馈线性化控制律, 无法实现真正的反馈线性化, 势必会导致系统的控制性能下降, 甚至失稳。

针对这个问题, 本文基于 MO 结构, 根据对象输入直流控制电流 I_d 、整流器触发滞后角 α 、逆变器触发超前角 β 估计出模型信息, 采用的整流侧定电流, 逆变侧定无功功率的方法, 用设计的鲁棒控制器来跟踪输出各自期望的值 I_{ds} 和 I_{qs} , 使高压直流输电系统的两个输出在存在系统的不确定因素时仍能跟踪各自的值。

设计步骤如下:

(i) 经过检验可知, 该系统满足了 MIMO 系统的 RAFL 控制器设计的前提条件。

a) 系统的相对阶向量有界且已知:

$$\rho = (\rho_1, \rho_2)^T = (2, 1)^T, \text{ 且满足: } \sum_{i=1}^2 \rho_i = 3$$

b) 输出向量 y_i 及其导数 \dot{y}_i , $i=1, 2$ 可测;

c) 输入-输出方程中, 控制量系数矩阵 B 的初等列变换阵是正定的;

d) $d(z_1, z_2, u)$ 连续且有界, 即 \dot{d} 有界。

(ii) 选取满足系统性能指标的方程。同样的, 为了保证系统的稳定性及满意的动态品质, 多项式 $h(s) = s^3 + h_2 s^2 + h_1 s + h_0$ 的特征根需配置到合适的左半开平面内。

(iii) 设计 RAFL 控制器, 该控制器内含的积

分环节可以补偿系统的各种未知因素。

$$\begin{cases} \bar{u}_1 = -h_0 z_1 - h_1 z_2 - \hat{d}_1 \\ \bar{u}_2 = -h_2 z_3 - \hat{d}_2 \\ \hat{d}_1 = \xi_1 + k_0 z_1 + k_1 z_2 \\ \hat{d}_2 = \xi_2 + k_2 z_3 \\ \dot{\xi}_1 = -k_0 \xi_1 - k_1(k_0 z_1 + k_1 z_2) - k_0 z_2 - k_1 \bar{u}_1 \\ \dot{\xi}_2 = -k_2 \xi_2 - k_2^2 z_3 - k_2 \bar{u}_2 \end{cases} \quad (8)$$

其中: h_0, h_1, h_2 为正常数矩阵, k_0, k_1, k_2 为适当的常数对角矩阵, z_1, z_2, z_3 及 \bar{u}_1, \bar{u}_2 的含义与前文说所述一致, 不再赘述。

3 仿真结果

首先, 搭建仿真框架, 采用两种不同的方式, 进行比较二者性能的优劣。

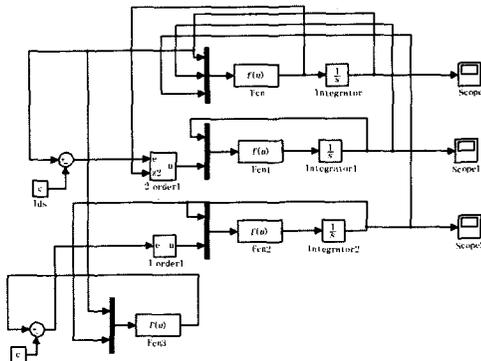


图 2 采用 RAFL 控制器的系统仿真框架

Fig.2 Simulation frame of the system with RAFL controller

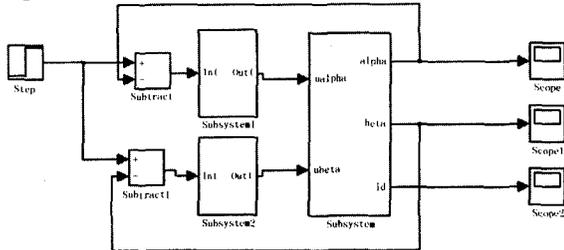


图 3 采用 PI 控制器的系统仿真框架

Fig.3 Simulation frame of the system with PI controller

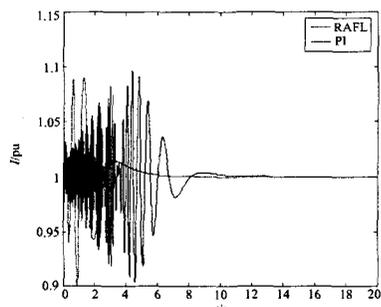


图 4 两种控制方法下直流电流稳定过程比较

Fig.4 Comparison of the DC current stable process with two different control strategies

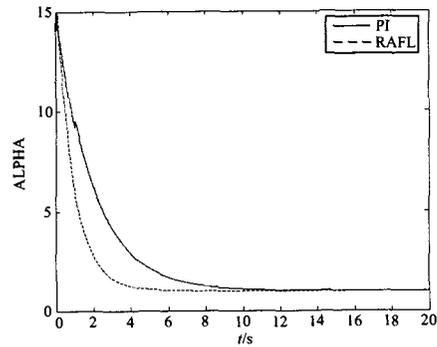


图 5 整流侧触发滞后角 α

Fig.5 Trigger lag angle α of the rectifier

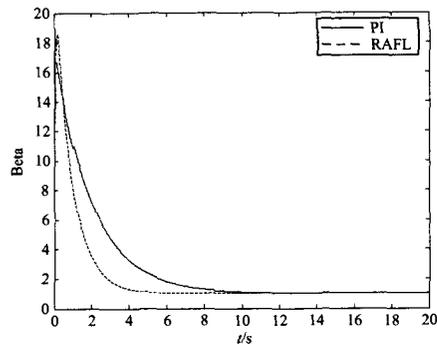


图 6 逆变侧触发超前角 β

Fig.6 Trigger leading angle β of the inverter

通过上面高压直流输电系统的 RAFL 控制和 PI 控制的比较发现, 采用 RAFL 控制在第 5 s 就能达到稳定, 而 PI 控制在第 11 s 才能稳定下来, 说明 RAFL 控制比 PI 控制能快速准确的到达期望值。下面我们来比较一下其控制精度即跟踪误差 $e(t)$ 。

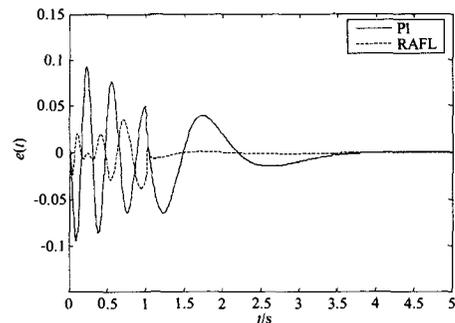


图 7 跟踪误差比较

Fig.7 Comparison of the track errors

通过跟踪误差的比较, 可以发现 RAFL 的控制精度高于传统 PI 控制器的控制精度, 根据以上的仿真结果, 可以证明在高压直流输电系统中, 采用鲁棒近似反馈线性化方法 (RAFL) 比传统的比例积分 (PI) 控制要好, 其稳定速度快, 控制精度高。

(下转第 47 页 continued on page 47)

电抗率的优化配置问题,提出了该问题的内、外双层优化模型,其中内层优化用于搜索给定电抗率方案下谐波畸变最严重的运行方式,外层优化用于确定电抗率的最优配置方案。该模型可保证优化方案在各种可能的运行方式下均满足谐波畸变约束。针对该模型,提出了基于改进 PSO 算法的电抗率优化配置算法,利用该算法对一个含谐波源的 IEEE 14 节点系统进行了算例研究,优化结果验证了所提模型及算法在电容器组电抗率优化配置问题中的有效性。

需要指出的是,本文的数学模型是在假设系统各变电站的无功补偿容量和分组容量都已由无功优化计算确定的前提下建立的,控制变量仅考虑串联电抗器的电抗率。如何将传统的无功优化问题和本文的电抗率优化问题结合起来,统一确定电容器组的补偿容量、分组容量和电抗率,以最大程度地节约电容器组综合投资和抑制谐波放大,是需要进一步研究的问题。

参考文献

- [1] 余欣梅.考虑谐波影响的配电网电容器优化模型及相关算法研究(博士学位论文)[D].武汉:华中科技大学,2004.
YU Xin-mei.Study on Modeling and Solution Algorithms of Capacitor Optimization with Harmonic Consideration in Distribution Systems,Doctoral Dissertation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2004.
- [2] 国家技术监督局. 并联电容器装置设计规范 (GB

50227-95)[M]. 北京: 中国计划出版社,1995.

State Bureau of Technical Supervision.Design Specification of Shunt Capacitors(GB 50227-95)[M]. Beijing: China Planning Press, 1995.

- [3] 陈伯胜. 串联电抗器抑制谐波的作用及电抗率的选择[J]. 电网技术,2003, 27(12): 92-95.
CHEN Bo-sheng. Harmonics Restraining Function of Serial Reactor and Selection of Reactance Rate[J].Power System Technology, 2003, 27(12): 92-95.
- [4] Schmill J V. Optimum Size and Location of Shunt Capacitors on Distribution Feeders[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1965, 84(9): 825-832.
- [5] Richards G G, Yang H. Distribution System Harmonic Worst Case Design Using a Genetic Algorithm[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(3): 1484-1491.
- [6] Kennedy J, Eberhart R. A Discrete Binary Version of the Particle Swarm Algorithm[A].In: Proceedings IEEE International Conference on Neural Network[C]. Perth(Australia): 1997.4104-4108.
- [7] Task Force on Harmonics Modeling and Simulation. Test Systems for Harmonic Modeling and Simulation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(2): 579-585.

收稿日期: 2007-11-21; 修回日期: 2008-05-20

作者简介:

王星华(1972-),男,硕士,讲师,从事电力系统分析、继电保护及电力系统软件技术等领域的研究; E-mail: riskmouse@163.com

余欣梅(1978-),女,工程师,从事电力系统分析、规划等方面的工作。

(上接第 41 页 continued from page 41)

4 结论

为了验证所设计的直流系统鲁棒近似反馈线性化基本控制器的有效性,采用 Matlab7.0 对直流输电系统进行了仿真,结果证明控制器可以有效地保持系统稳定。

参考文献

- [1] 吕伟业. 中国电力工业发展及产业结构调整[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [2] Tornambe A, Valigi P A. Decentralized Controller for the Robust Stabilization of a Class of MIMO Dynamical Systems[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control,1994,116:293-304.
- [3] Indri M, Tornambe A. Robust Trajectory Tracking for Flexible Piezoelectric Structures[J].IEE Proceedings on Control Theory and Applications, 1994, 141(5):289-294.
- [4] 曾河华. 发电机组的自抗扰 PID 控制[D]. 北京:清华大学,2005.

[5] 宁喜荣. 水轮机调节系统的非线性鲁棒控制优化研究[D]. 北京:清华大学,2006.

[6] 黄炳红. 自抗扰控制器在飞控及火控系统中的应用研究[D]. 北京:北京理工大学, 2006.

[7] Isidori A. Nonlinear Control Systems, 3rd ed[M]. Berlin(Germany): Springer-Verlag, 1995.112-120.

[8] 陈凌云. 高压直流输电系统中非线性控制策略的研究[D]. 成都: 四川大学, 2004.

[9] 段富海, 韩崇昭. 动态逆方法和微分几何反馈线性化方法的对比[J]. 自动化与仪器仪表, 2002, (3): 4-5.

收稿日期: 2008-01-26

作者简介:

姚致清(1960-),男,本科,高级工程师,从事电力系统保护与控制研究; E-mail: zhiqingy@xjgc.com

刘喜梅(1961-),女,教授,硕士学位,从事网络控制系统和故障诊断研究;

于洁(1983-),女,硕士研究生,从事控制理论与控制工程研究。