

水轮机导叶开度的自适应非线性输出反馈控制

常乃超¹, 刘 锋², 梅生伟¹, 何光宇¹

- (1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084;
2. 上海市电力公司调度通信中心, 上海市 浦东新区 200122)

Adaptive Nonlinear Governor Control of Hydro-turbine Generator Sets

CHANG Nai-chao¹, LIU Feng², MEI Sheng-wei¹, HE Guang-yu¹

- (1. State Key Lab. of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments (Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China; 2. Dispatch and Communication Center, Shanghai Municipal Electric Power Co., Pudong New Area, Shanghai 200122, China)

ABSTRACT: Hydro-turbine generators sets' governor control is described by a complicated non-minimum phase nonlinear model, to which traditional adaptive control methods cannot be easily applied. In order to give out a scheme for adaptive control of hydro-turbine generators sets' governor, universal adaptive output feedback control method is applied to governor control of hydro-turbine generators sets. Firstly, the nonlinear model of governor control of hydro-turbine generator sets is transformed into the form whose structure satisfies the requirements from universal adaptive output feedback theorem (UAOFT). Secondly, it is proved that the mathematical characteristics of the transformed form for governor control of hydro-turbine generator sets satisfy the requirements from UAOFT. Finally, an adaptive nonlinear controller for governor control of hydro-turbine generator sets is gotten by UAOFT. Numerical simulations manifest that the adaptive nonlinear controller designed is effective, and it has strong robustness to system parameters' variations.

KEY WORDS: hydro-turbine generators sets; universal adaptive output feedback control; adaptive control; power systems

摘要: 水轮机导叶开度的控制归结为一个复杂的非最小相位非线性控制模型, 其自适应控制不易采用传统非线性控制方法解决。为解决水轮机导叶开度的自适应控制问题, 将通用自适应输出反馈控制应用到水轮机导叶开度的控制。首先通

过一个线性可逆变换将水轮机导叶开度控制的非线性模型变换成满足通用自适应输出反馈控制定理要求的形式, 然后证明变换后的形式满足通用自适应输出反馈控制定理要求的条件, 最后对变换后的模型应用通用自适应输出反馈控制定理得到相应的控制器。数值仿真表明, 基于通用自适应输出反馈设计的水轮机导叶非线性开度控制是有效的, 且对系统参数变化具有极强的鲁棒性。

关键词: 水轮机; 通用自适应输出反馈控制; 自适应控制; 电力系统

0 引言

水轮机导叶开度的控制归结为一个复杂的非最小相位非线性模型。鉴于传统的基于线性控制理论的控制方法不能适应系统运行点的大范围变化, 近来许多非线性控制方法被引入水轮机导叶开度控制的研究中^[1-13]。在这些被引入的非线性控制方法中, 基于微分几何的反馈线性化方法及基于反馈线性化的非线性鲁棒控制方法居于主流地位, 取得了较好的结果^[1,4-5,8,12-13]。反馈线性化方法基于系统的精确数学模型^[14-15], 但实际上得到精确的系统数学模型是困难的; 已有的基于反馈线性化的非线性鲁棒控制方法虽然能对系统参数误差具有一定鲁棒性, 但由于其本身的框架还是基于反馈线性化, 因此其对参数变化的鲁棒性具有一定限制。虽然已有一些关于水轮机自适应控制的研究并取得了一定进展^[6,12], 但这些方法不同程度存在控制器结构复杂、需要估计的参数较多、需要的量测量较多等不足。研究结构更简单、更易实现、对系统参数误差具有更强鲁棒性的水轮机导叶开度自适应非线性控制方法是一个有意义的课题。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2004CB-217903); 国家自然科学基金项目(50595411); 中国博士后科学基金(20070410521)。

The National Basic Research Program of China(973 Program)(2004CB217903); Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50595411).

最近,林威等人针对一类特定结构的非线性系统提出了一种通用动态输出反馈控制方法^[16-19],对一类非线性自适应控制问题^[20]取得了良好效果。这种方法的思路完全不同于基于微分几何的反馈线性化方法及基于反馈线性化的非线性鲁棒控制方法。对于一个非线性系统,只要其模型具有一个特定形式的结构且其模型中的非线性项满足一个有界的条件,则该系统就能被一个结构很简单的通用动态输出反馈控制器镇定。这里所谓的“通用”,是指该动态输出反馈不包含任何系统参数,因此该动态输出反馈能镇定任何具有一种特定结构的非线性系统。

本文将上述通用动态输出反馈控制应用到水轮机导叶开度的控制。首先通过一个线性可逆变换将水轮机导叶开度控制的非线性模型变换成满足通用动态输出反馈控制定理要求的形式,然后证明变换后的形式满足通用动态输出反馈定理要求的条件,最后对变换后的模型应用通用动态输出反馈定理得到相应的控制器。数值仿真表明,基于通用动态输出反馈设计的水轮机导叶非线性开度控制器结构简单,且对系统参数变化具有极强的鲁棒性。

1 通用输出反馈控制的主要结果

考虑如下非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + \phi_1(t, x, u) \\ \dot{x}_2 = x_3 + \phi_2(t, x, u) \\ \vdots \\ \dot{x}_n = u + \phi_n(t, x, u) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $[x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n]^T \in R_n$ 为状态变量; $u \in R$ 为控制变量; $y \in R$ 为输出变量; $\phi_i(t, x, u) \in C^1$, $i=1, 2, \dots, n$ 。

定理 1^[16]若如下条件满足: $|\phi_i(t, x, u)| \leq c(|x_1| + |x_2| + \cdots + |x_n|)$, $i=1, 2, \dots, n$ 。则存在如下动态输出反馈控制:

$$\begin{cases} u = -[L^n k_1 \tilde{x}_1 + L^{n-1} k_2 \tilde{x}_2 + \cdots + L k_n \tilde{x}_n] \\ \dot{\tilde{x}}_1 = \tilde{x}_2 + L a_1 (y - \tilde{x}_1) \\ \dot{\tilde{x}}_2 = \tilde{x}_3 + L^2 a_2 (y - \tilde{x}_1) \\ \vdots \\ \dot{\tilde{x}}_n = u + L^n a_n (y - \tilde{x}_1) \\ \dot{L} = (y - \tilde{x}_1)^2 / L^2, L(0) = 1 \end{cases} \quad (2)$$

使闭环系统(1)~(2)是稳定的。其中 $a_i > 0$, $k_i > 0$,

且若 $s^n + h_1 s^{n-1} + h_2 s^{n-2} + \cdots + h_{n-1} s + h_n$ 是 Hurwitz 多项式, 则 a_i 可选为 $a_i = h_i$, $i=1, 2, \dots, n$; k_i 可选为 $k_i = h_{n-i+1}$, $i=1, 2, \dots, n$ 。

可看到, 式(2)所示的自适应动态输出反馈控制器不包含系统(1)的任何参数, 因此对系统(1)参数的变化具有极强鲁棒性。这就是式(2)被称为通用输出反馈控制的原因。

2 水轮机导叶开度非线性控制模型

水轮机导叶开度非线性控制模型^[1]为

$$\begin{cases} \Delta \dot{\delta} = \Delta \omega \\ \Delta \dot{\omega} = \omega_0 \Delta P_m / H - \omega_0 \Delta P_e / H \\ \Delta \dot{P}_m = -2 \Delta P_m / T_w + (2/T_w + 2/T_s) \Delta \mu - 2u / T_s \\ \Delta \dot{\mu} = -\Delta \mu / T_s + u / T_s \\ y = \Delta \delta \end{cases} \quad (3)$$

式中

$$\begin{aligned} \Delta P_e(\Delta \delta) &= \frac{E'_d U_s}{x'_{d\Sigma}} (\sin(\delta_0 + \Delta \delta) - \sin \delta_0) - \\ &\frac{U_s^2}{2} \frac{x'_{d\Sigma} - x_{q\Sigma}}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} (\sin 2(\delta_0 + \Delta \delta) - \sin 2\delta_0) \end{aligned} \quad (4)$$

首先做变换:

$$\begin{cases} x_1 = \Delta \delta \\ x_2 = \Delta \omega \\ x_3 = \omega_0 (\Delta P_m + 2\Delta \mu) / (2H) \\ x_4 = -3\omega_0 (\Delta P_m - 2\Delta \mu) / (4HT_w) \\ \tilde{u} = u / T_s \end{cases} \quad (5)$$

则原模型变为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + \phi_1(t, x, u) \\ \dot{x}_2 = x_3 + \phi_2(t, x, u) \\ \dot{x}_3 = x_4 + \phi_3(t, x, u) \\ \dot{x}_4 = \tilde{u} + \phi_4(t, x, u) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\phi_1(t, x, u) = 0$; $\phi_2(t, x, u) = -2T_w x_4 / 3 - \omega_0 \cdot \Delta P_e(\Delta \delta) / H$; $\phi_3(t, x, u) = -x_3 / 2T_w$; $\phi_4(t, x, u) = -(2Hx_3 / \omega_0 + 4HT_w x_4 / 3\omega_0) / 4T_s$ 。

可见 $\phi_1(t, x, u)$ 、 $\phi_3(t, x, u)$ 、 $\phi_4(t, x, u)$ 均满足定理 1 的条件。

由 $|\sin \Delta \delta| \leq |\Delta \delta|$, $\forall \Delta \delta \in R$, 可知

$$|\sin(\delta_0 + \Delta \delta) - \sin \delta_0| = 2 |\cos(\Delta \delta / 2 + \delta_0)| \cdot$$

$$\sin(\Delta \delta / 2) \leq 2 |\sin(\Delta \delta / 2)| \leq 2 |\Delta \delta / 2| = |\Delta \delta| \quad (7)$$

$$|\sin 2(\delta_0 + \Delta \delta) - \sin 2\delta_0| = 2 |\cos(\Delta \delta + 2\delta_0)| \cdot$$

$$\sin \Delta \delta \leq 2 |\sin \Delta \delta| \leq 2 |\Delta \delta| \quad (8)$$

因此有

$$\begin{aligned}
 |\Delta P_e(\Delta\delta)| &= \left| \frac{E'_q U_s}{x'_{d\Sigma}} (\sin(\delta_0 + \Delta\delta) - \sin \delta_0) - \frac{U_s^2}{2} \right. \\
 &\quad \left. \frac{x'_{d\Sigma} - x_{q\Sigma}}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} (\sin 2(\delta_0 + \Delta\delta) - \sin 2\delta_0) \right| \leq \left| \frac{E'_q U_s}{x'_{d\Sigma}} \right| \\
 &\quad |\sin(\delta_0 + \Delta\delta) - \sin \delta_0| + \left| \frac{U_s^2}{2} \frac{x'_{d\Sigma} - x_{q\Sigma}}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \right| \\
 |\sin 2(\delta_0 + \Delta\delta) - \sin 2\delta_0| &\leq \frac{U_s E'_q}{x'_{d\Sigma}} |\Delta\delta| + U_s^2 \\
 \left| \frac{x'_{d\Sigma} - x_{q\Sigma}}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \right| |\Delta\delta| &= \left(\frac{U_s E'_q}{x'_{d\Sigma}} + U_s^2 \frac{x'_{d\Sigma} - x_{q\Sigma}}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \right) |\Delta\delta| \quad (9)
 \end{aligned}$$

于是有

$$\begin{aligned}
 |\phi_2(t, x, u)| &= \left| -\frac{2T_w}{3} x_4 - \frac{\omega_0}{H} \Delta P_e(\Delta\delta) \right| \leq \frac{2T_w}{3} \\
 |x_4| + \frac{\omega_0}{H} |\Delta P_e(\Delta\delta)| &\leq \frac{2T_w}{3} |x_4| + \frac{\omega_0}{H} \left(\frac{U_s E'_q}{x'_{d\Sigma}} + \right. \\
 &\quad \left. U_s^2 \left| \frac{x'_{d\Sigma} - x_{q\Sigma}}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \right| \right) |\Delta\delta| \leq c(|x_1| + |x_4|) \quad (10)
 \end{aligned}$$

式中 $c = \max\left\{ \frac{2T_w}{3}, \frac{\omega_0}{H} \left(\frac{U_s E'_q}{x'_{d\Sigma}} + U_s^2 \left| \frac{x'_{d\Sigma} - x_{q\Sigma}}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \right| \right) \right\}$ 。式

(10)表明 $\phi_2(t, x, u)$ 满足定理 1 的条件。

综上，非线性模型式(6)可被式(2)所示的通用动态输出反馈镇定，即在式(2)所示的控制下有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{X}(t) = 0 \quad (11)$$

式中 $\mathbf{X}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t) \ x_4(t)]^T$ 。

另外，由于变换式(5)为一个线性可逆变换，因此当式(11)成立时必有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \nabla \{ \Delta\delta(t), \Delta\omega(t), \Delta P_m(t), \Delta\mu(t) \} = 0 \quad (12)$$

3 控制器设计

由定理 1，非线性模型式(6)可被如下动态输出反馈镇定：

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = \tilde{x}_2 + L a_1 (y - \tilde{x}_1) \\ \dot{\tilde{x}}_2 = \tilde{x}_3 + L^2 a_2 (y - \tilde{x}_1) \\ \dot{\tilde{x}}_3 = \tilde{x}_4 + L^3 a_3 (y - \tilde{x}_1) \\ \dot{\tilde{x}}_4 = \tilde{u} + L^4 a_4 (y - \tilde{x}_1) \\ \dot{L} = (y - \tilde{x}_1)^2 / L^2, \quad L(0) = 1 \end{cases} \quad (13)$$

$$\tilde{u} = -[L^4 k_1 \tilde{x}_1 + L^3 k_2 \tilde{x}_2 + L^2 k_3 \tilde{x}_3 + L k_4 \tilde{x}_4] \quad (14)$$

式中： $a_1 = 2$ ； $a_2 = 3/2$ ； $a_3 = 1/2$ ； $a_4 = 1/16$ ； $k_1 = 81$ ； $k_2 = 30$ ； $k_3 = 54$ ； $k_4 = 12$ 。

可看出，这里设计的自适应动态输出反馈控制器不包含任何系统参数，因此它对系统参数变化具

有极强的鲁棒性。

4 数值仿真

对图 1 所示单机无穷大系统，取 $H=8$ ， $T_s=2$ s， $T_w=5$ s， $\Delta P_e = 0.8(\sin(\delta_0 + \Delta\delta) - \sin \delta_0) - 0.1(\sin 2(\delta_0 + \Delta\delta) - \sin 2\delta_0)$ 。这些参数值只是为了数值仿真，实际上控制器的设计并不需要这些参数值。假设 $t=0$ s 时发生机端三相短路， $t=0.1$ s 时短路清除， $\Delta\delta(t)$ 、 $\Delta\omega(t)$ 、 $\Delta P_m(t)$ 、 $\Delta\mu(t)$ 、 L 的动态响应如图 2~6 中的实线所示。

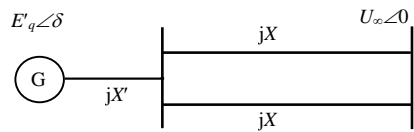


图 1 单机无穷大系统

Fig. 1 A single machine infinite bus power system

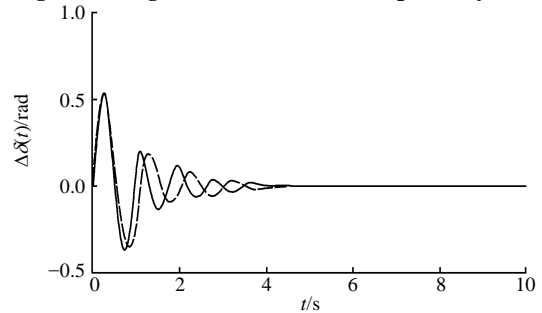


图 2 不同系统参数下 $\Delta\delta(t)$ 的响应

Fig. 2 Response of $\Delta\delta(t)$ under different system parameters

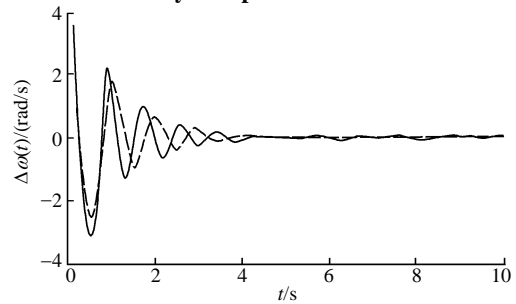


图 3 不同系统参数下 $\Delta\omega(t)$ 的响应

Fig. 3 Response of $\Delta\omega(t)$ under different system parameters

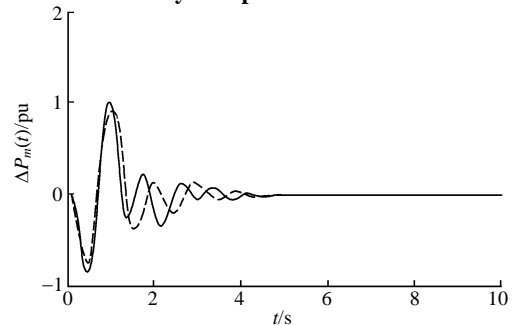


图 4 不同系统参数下 $\Delta P_m(t)$ 的响应

Fig. 4 Response of $\Delta P_m(t)$ under different system parameters

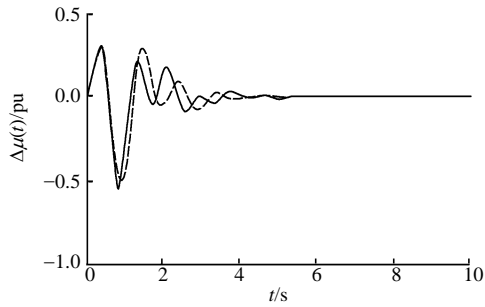


图5 不同系统参数下 $\Delta\mu(t)$ 的响应
Fig. 5 Response of $\Delta\mu(t)$ under different system parameters

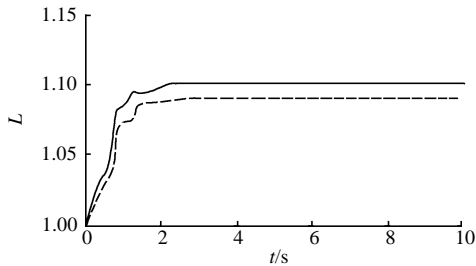


图6 不同系统参数下 L 的响应
Fig. 6 Response of L under different system parameters

为验证这种自适应输出反馈控制器的鲁棒性,设置另外一组不同的参数值 $H=10$, $T_s=1$ s, $T_w=2$ s, 假设 $t=0$ s时发生机端三相短路, $t=0.1$ s时短路清除, $\Delta\delta(t)$ 、 $\Delta\omega(t)$ 、 $\Delta P_m(t)$ 、 $\Delta\mu(t)L$ 的动态响应如图 2~6 中的虚线所示。可看到,所设计的通用自适应非线性输出反馈控制器在不同的系统参数下均能保证闭环系统的稳定性。另外,这种通用自适应非线性输出反馈控制器只需要一个量测量 $\Delta\delta(t)$,便于工程实现。

5 结论

本文将通用动态输出反馈控制应用到水轮机导叶开度的控制。首先通过一个线性可逆变换将水轮机导叶开度控制的非线性模型转换成满足通用动态输出反馈控制定理要求的形式,然后证明变换后的形式满足通用动态输出反馈定理要求的条件,最后对变换后的模型应用通用动态输出反馈定理得到相应的控制器。数值仿真表明,基于通用动态输出反馈设计的水轮机导叶非线性开度控制结构简单,且对系统参数变化具有极强的鲁棒性。

参考文献

- [1] 卢强, 桂小阳, 梅生伟, 等. 大型发电机组调速器的非线性最优 PSS[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(9): 15-19.
Lu Qiang, Gui Xiaoyang, Mei Shengwei, et al. A novel nonlinear optimal power system stabilizer for the governor of large-scaled generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(9): 15-19(in Chinese).
- [2] 景雷, 叶鲁卿. 一种新型水轮发电机组智能模糊控制系统[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(1): 42-47.
Jing Lei, Ye Luqing. New intelligent fuzzy control system for hydroelectric generating units[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(1): 42-47(in Chinese).
- [3] 刘翔, 姜学智, 李东海. 水轮发电机组调速系统的自抗扰控制[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2001, 41(10): 69-73.
Liu Xiang, Jiang Xuezhi, Li Donghai. Auto disturbance rejection control for hydroturbine governor[J]. Journal of Tsinghua University: Sci & Tech, 2001, 41(10): 69-73(in Chinese).
- [4] 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): 56-59.
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): 56-59(in Chinese).
- [5] 方庆红, 沈祖谥, 吴凯. 水轮机调节系统非线性扰动解耦控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 151-155.
Fang Qinghong, Shen Zuyi, Wu Kai. Nonlinear disturbance decoupling control for hydraulic turbo-generators regulating system [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 151-155(in Chinese).
- [6] 乔俊飞, 孙雅明, 杜红卫. 水轮发电机组的一种自适应调速方法 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(10): 1-4.
Qiao Junfei, Sun Yaming, Du Hongwei. A self-adaptive governing method for hydroelectric generating units[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(10): 1-4(in Chinese).
- [7] 董清, 高曙, 鲍海. 同步发电机调速系统附加 H_∞ 鲁棒分散控制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 47-51.
Dong Qing, Gao Shu, Bao Hai. Governor additional H_∞ robust decentralized control of synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 47-51(in Chinese).
- [8] 卢强, 桂小阳, 梅生伟, 等. 大型发电机组调速器的非线性最优 PSS[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(9): 15-19.
Lu Qiang, Gui Xiaoyang, Mei Shengwei, et al. A novel nonlinear optimal power system stabilizer for the governor of large-scaled generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(9): 15-19(in Chinese).
- [9] 李辉, 杨顺昌. 基于 CMAC 的双馈水轮发电机系统控制策略研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 187-192.
Li Hui, Yang Shunchang. Study of control strategies for hydrogenerator system with double fed generators based on CMAC neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 187-192 (in Chinese).
- [10] 李东海, 吴麟, 葛军, 等. 水轮机调速系统的智能设计[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(1): 68-72.
Li Donghai, Wu qi, Ge Jun, et al. Intelligent design of the governing system of a hydraulic generator[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(1): 68-72(in Chinese).
- [11] 凌代俭, 沈祖谥. 水轮机调节系统的非线性模型、PID 控制及其 Hopf 分叉[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 97-102.
Ling Daijian, Shen Zuyi. The nonlinear model of hydraulic turbine governing systems and its PID control and Hopf bifurcation [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 97-102(in Chinese).
- [12] 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(in Chinese).
- [13] Lu Qiang, Sun Yusong, Sun Yuanzhang, et al. Nonlinear decentralized robust governor control for hydroturbine-generator sets in multi-machine power systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2004, 26(5): 333-339.
- [14] Isidori A. Nonlinear control systems[M]. New York: Springer, 1995.
- [15] Lu Qiang, Sun Yuanzhang, Mei Shengwei. Nonlinear control systems and power system dynamics[M]. Boston, USA: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [16] Lei H, Lin W. Universal adaptive control of nonlinear systems with unknown growth rate by output feedback[J]. Automatica, 2006, 42(10): 1783-1789.
- [17] Lei H, Lin W. Adaptive regulation of uncertain nonlinear systems by output feedback: a universal control approach[J]. Systems & Control Letters, 2007, 56(7): 529-537.
- [18] Lei H, Lin W. Using a reduced-order observer for adaptive output feedback stabilization of uncertain cascade systems[C]. Proceedings of 2006 American Control Conference, Minneapolis, MN, 2006: 4016-4017.
- [19] Qian C, Lin W. Output feedback control of a class of nonlinear systems: a nonseparation principle paradigm[J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 2002, 47(10): 1710-1715.
- [20] Khalil H K, Saberi A. Adaptive stabilization of a class of nonlinear systems using high-gain feedback[J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 1987, 32(11): 1031-1035.



常乃超

收稿日期: 2007-12-12。

作者简介:

常乃超(1977—), 男, 河南人, 博士后, 研究方向为电力系统稳定及电力 IT 技术, changnaichao@mail.tsinghua.edu.cn;

刘 锋(1977—), 男, 云南人, 博士后, 现从事电力系统调度运行及管理工作;

梅生伟(1965—), 男, 河南人, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析及控制;

何光宇(1972—), 男, 湖南人, 副教授, 研究方向为电力系统优化运行及电力系统 IT 技术。

(编辑 谷 子)