

发电机的非线性自适应逆推综合控制

王宝华^{1,2}, 杨成梧¹, 张强²

(1. 南京理工大学 动力学院, 江苏 南京 210094; 2. 南京工程学院 电力工程系, 江苏 南京 210013)

摘要: 发电机励磁和汽门系统是一个典型的多变量、非线性、强耦合、不确定复杂系统, 其综合控制将会改善电力系统稳定性和动态品质, 所以设计简单、有效的综合控制器既必要又困难. 针对单机无穷大励磁与汽门系统, 运用自适应逆推方法和系统的 Lyapunov 函数, 获得了发电机的非线性综合控制器和参数替换律, 文中给出了该控制器的具体设计步骤. 由于在控制器设计中没有运用任何线性化方法, 因而所得控制器充分利用了系统的非线性特性; 同时考虑了发电机阻尼系数的不确定性, 使得控制器对系统参数的变化具有很强的鲁棒性. 数字仿真结果表明, 所设计的控制器具有鲁棒性, 并可有效地提高电力系统的稳定性.

关键词: 非线性; 综合控制; 自适应逆推方法; 电力系统稳定性; Lyapunov 函数

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A

Integrated nonlinear adaptive backstepping controller for synchronous generator

WANG Bao-hua^{1,2}, YANG Cheng-wu¹, ZHANG Qiang²

(1. School of Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China;

2. Department of Electric Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing Jiangsu 210013, China)

Abstract: Integrated control of power system may improve its dynamic performance and stability, but a large turbo-generator with the integrated control of excitation and steam valve opening is a typical multivariable nonlinear and strongly coupled and uncertain system, so it is necessary and difficult to design the simple and effective integrated controller. For a single-machine infinite-bus system, a nonlinear robust integrated controller and a parameter-update law are obtained based on adaptive backstepping methods and Lyapunov functions of the system. In this paper, a design procedure of the controller is given in detail. Since the controller design is based completely on the nonlinear dynamic system without any linearization, the nonlinear property of the dynamic system is well preserved and utilized. The controller also has strong robustness for system parameters variation because damping coefficient uncertainty has been considered. The numerical simulation shows that the proposed control law has robustness and may realize coordinative control of excitation and valve opening, and improve power system stability.

Key words: nonlinear; integrated control; adaptive backstepping method; power system stability; Lyapunov function

1 引言(Introduction)

发电机组励磁与汽门综合控制作为一种改善电力系统稳定性和动态品质的有效措施, 一直受到人们的关注. 文献[1]运用线性最优控制理论设计了发电机线性最优综合控制器, 但是这种方法是针对近似线性化的系统模型设计的, 当系统运行工况和结构参数发生变化时, 则难以保证具有良好的鲁棒性. 文献[2]介绍的基于微分几何法的多变量非线性系统控制器设计方法, 能够实现多变量非线性系统的全局线性化和解耦, 可以用来设计励磁与汽门

的综合控制器^[3], 但是该方法比较抽象和复杂. 运用直接反馈线性化(DFL)方法^[4]和逆系统方法^[5,6]分别设计了发电机组励磁与汽门的综合控制器, 所设计的综合控制器能显著提高电力系统的暂态稳定, 但是无论是 DFL 还是基于微分几何法或逆系统方法的反馈线性化方法, 需要系统的精确模型来描述系统的非线性特性, 理论上这类方法不具备对系统模型和参数不确定性的鲁棒性^[7], 因此, 在控制器的设计中要充分考虑到电力系统实际运行中存在的各种不确定性, 如采用简化模型或模型参数的不

确定性或不确定干扰;同时这类方法首先都要对原非线性系统进行精确线性化,然后针对线性化后的系统进行设计,而事实上,非线性系统的某些非线性特性对控制器的设计是有利的,因此,在设计中也应该充分加以利用。

逆推设计方法是一种系统的非线性系统控制设计方法,它把选择 Lyapunov 函数与设计反馈控制交织在一起,同时该方法与自适应机制有机结合所设计的控制器可以保证对系统参数变化的鲁棒性^[8],而且不需要采用任何线性化,设计过程显得比较简洁。文[9,10]利用该方法设计了发电机汽门开度的非线性鲁棒控制器。本文针对典型的多变量、非线性、强耦合、不确定复杂系统——单机无穷大励磁与汽门系统,在阻尼系数不能精确测量的情况下,不对该系统进行解耦,直接利用自适应逆推方法设计了励磁和汽门综合控制器。设计过程和仿真结果都表明该控制器能保证系统状态收敛,而且对系统参数变化具有很强的鲁棒性。

2 发电机励磁与汽门系统的数学模型 (Mathematical model of turbo-generator with the integrated control of excitation and valve opening)

研究如图1所示的单机无穷大系统,其数学模型为:

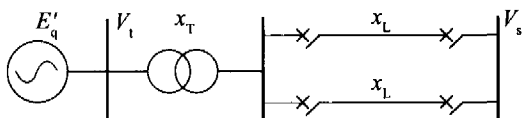


图1 单机无穷大系统

Fig. 1 Single machine infinite-bus system

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0, \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{H} P_H + \frac{\omega_0}{H} C_{ML} P_{m0} - \frac{D}{H} (\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0 E'_q V_s}{H x'_{d\Sigma}} \sin \delta, \\ \dot{E}'_q = -\frac{x_{d\Sigma}}{x'_{d\Sigma} T_{d0}} E'_q + \frac{1}{T_{d0}} \frac{x_d - x'_d}{x'_{d\Sigma}} V_s \cos \delta + \frac{u_1}{T_{d0}}, \\ \dot{P}_H = (-P_H + C_H P_{m0} + C_H u_2) / T_{H\Sigma}. \end{cases} \quad (1)$$

式中 δ 为发电机转子角; ω 为发电机角速度; $\omega_0 = 2\pi f_0$; P_{m0} 为发电机机械功率的初始值; D 为阻尼系数; H 和 T_{d0} 分别为发电机惯性常数和 d 轴绕组开路暂态时间常数; V_s 为无穷大母线电压, $V_s = 1.0$; $x'_{d\Sigma} = x'_d + x_T + \frac{1}{2}x_L$; $x_{d\Sigma} = x_d + x_T + \frac{1}{2}x_L$; x_d, x'_d 分别为发电机 d 轴同步电抗和暂态电抗; x_q 为发电

机 q 轴同步电抗; x_T 为变压器漏抗; x_L 为线路电抗; E'_q 为 q 轴暂态电势; $T_{H\Sigma}$ 为汽门控制系统等效时间常数; C_H, C_{ML} 分别为高压及中低压缸功率分配系数, $C_H + C_{ML} = 1$; P_H 为高压缸输出有功功率; u_1, u_2 为励磁控制和主汽门控制输入; V_1 为发电机端电压。

$$V_1 = \left[\left(\frac{x_q V_s \sin \delta}{x_{q\Sigma}} \right)^2 + \left(\frac{E'_q (x'_{d\Sigma} - x'_d) + V_s x'_d \cos \delta}{x'_{d\Sigma}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

式(1)表示的系统是一个典型的多变量、强耦合的非线性系统。本文利用自适应逆推方法直接对其进行控制,不需要进行任何线性化和解耦,其设计过程简洁。

对于系统(1),为使其适合逆推的形式,令 $x_1 = \delta - \delta_0, x_2 = \omega - \omega_0, x_3 = E'_q - E'_{q0}, x_4 = P_H - P_{H0}$,其中,下标“0”表示对应变量的初始值。则系统(1)转化为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \frac{\omega_0}{H} x_4 + \frac{\omega_0}{H} P_{m0} - \frac{D}{H} x_2 - \frac{\omega_0 V_s}{H x'_{d\Sigma}} (x_3 + E'_{q0}) \sin(x_1 + \delta_0), \\ \dot{x}_3 = -\frac{x_{d\Sigma}}{x'_{d\Sigma} T_{d0}} (x_3 + E'_{q0}) + \frac{1}{T_{d0}} \frac{x_d - x'_d}{x'_{d\Sigma}} V_s \cos(x_1 + \delta_0) + \frac{u_1}{T_{d0}}, \\ \dot{x}_4 = (-x_4 + C_H u_2) / T_{H\Sigma}. \end{cases} \quad (2)$$

令 $a_0 = \frac{\omega_0}{H} P_{m0}, k_1 = \frac{\omega_0}{H}, k_2 = -\frac{\omega_0 V_s}{H x'_{d\Sigma}}, k_3 = \frac{x_{d\Sigma}}{x'_{d\Sigma}}, k_4 = \frac{x_d - x'_d}{x'_{d\Sigma}} V_s, T_1 = \frac{1}{T_{d0}}, T_2 = \frac{1}{T_{H\Sigma}}, \theta = \frac{D}{H}$ 为未知常参量,则系统(2)可进一步转化为

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad (3a)$$

$$\dot{x}_2 = k_1 x_4 + a_0 + \theta x_2 + k_2 (x_3 + E'_{q0}) \sin(x_1 + \delta_0), \quad (3b)$$

$$\dot{x}_3 = -k_3 T_1 (x_3 + E'_{q0}) + k_4 T_1 \cos(x_1 + \delta_0) + T_1 u_1, \quad (3c)$$

$$\dot{x}_4 = -T_2 x_4 + T_2 C_H u_2. \quad (3d)$$

3 非线性自适应逆推控制器的设计 (Nonlinear adaptive backstepping controller design)

对于参数不确定的系统(3)运用自适应逆推方法进行发电机励磁和汽门综合控制器的设计。

$$\text{令 } e_1 = x_1, e_2 = x_2 + c_1 e_1, e_3 = x_3 - \alpha_3, e_4 = x_4,$$

$c_1 > 0, \alpha_3$ 为待设计的量, 则系统(3a) 可表示为

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_1 = x_2 = e_2 - c_1 e_1. \quad (4)$$

令系统(3a) 的 Lyapunov 函数为

$$V_1(t) = \frac{1}{2} e_1^2, \quad (5)$$

则其对时间的导数为

$$\dot{V}_1(t) = e_1 e_2 - c_1 e_1^2, \quad (6)$$

很明显, 当 $e_2 = 0$ 时, $\dot{V}_1(t) \leq 0$.

由 $e_2 = x_2 + c_1 e_1$ 有

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= \dot{x}_2 + c_1 \dot{e}_1 = \\ &k_1 e_4 + a_0 + \theta(e_2 - c_1 e_1) + \\ &k_2(e_3 + \alpha_3 + E'_{\varphi_0}) \sin(e_1 + \delta_0) + c_1(e_2 - c_1 e_1) = \\ &k_1 e_4 + a_0 + (\hat{\theta} + c_1)(e_2 - c_1 e_1) + \\ &k_2(e_3 + \alpha_3 + E'_{\varphi_0}) \sin(e_1 + \delta_0) + \\ &(\theta - \hat{\theta})(e_2 - c_1 e_1). \end{aligned}$$

对式(5)进行增广, 从而形成新的 Lyapunov 函数

$$V_2(t) = V_1(t) + \frac{1}{2} e_2^2 + \frac{1}{2\gamma} (\theta - \hat{\theta})^2, \quad (7)$$

则其对时间的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(t) &= \dot{V}_1(t) + e_2 \dot{e}_2 - \frac{1}{\gamma} (\theta - \hat{\theta}) \dot{\hat{\theta}} = \\ &- c_1 e_1^2 + e_1 e_2 + e_2 [k_1 e_4 + a_0 + \\ &(\hat{\theta} + c_1)(e_2 - c_1 e_1) + \\ &k_2(e_3 + \alpha_3 + E'_{\varphi_0}) \sin(e_1 + \delta_0)] - \\ &\frac{1}{\gamma} (\theta - \hat{\theta}) [\hat{\theta} - \gamma e_2(e_2 - c_1 e_1)]. \end{aligned}$$

选择参数替换律

$$\dot{\hat{\theta}} = \gamma e_2(e_2 - c_1 e_1), \quad (8)$$

式中 $\hat{\theta}$ 是参数 θ 的估计值, $\gamma > 0$.

选择

$$\begin{aligned} \alpha_3 &= -E'_{\varphi_0} + \frac{-1}{k_2 \sin(e_1 + \delta_0)} [a_0 + \\ &(\hat{\theta} + c_1)(e_2 - c_1 e_1) + e_1 + c_2 e_2], \quad (9) \end{aligned}$$

式中 $c_2 > 0$.

$$\dot{V}_2(t) = -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 + k_1 e_2 e_4 + k_2 e_2 e_3 \sin(e_1 + \delta_0)$$

显然, 当 $e_3 = e_4 = 0$ 时, $\dot{V}_2(t) \leq 0$. 于是有

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= k_1 e_4 + k_2 e_3 \sin(e_1 + \delta_0) + (\theta - \hat{\theta} - c_2) e_2 - \\ &(c_1 \theta - c_1 \hat{\theta} + 1) e_1, \quad (10) \end{aligned}$$

$$\dot{e}_3 = \dot{x}_3 - \dot{\alpha}_3 = -k_3 T_1(e_3 + \alpha_3 + E'_{\varphi_0}) +$$

$$k_4 T_1 \cos(x_1 + \delta_0) + T_1 u_1 - \left(\frac{\partial \alpha_3}{\partial e_1} \dot{e}_1 + \frac{\partial \alpha_3}{\partial e_2} \dot{e}_2 \right) =$$

$$\begin{aligned} &-k_3 T_1 e_3 + \frac{k_3 T_1}{k_2 \sin(e_1 + \delta_0)} [a_0 + (\hat{\theta} + c_1 + c_2) e_2 + \\ &(1 - c_1^2 - c_1 \hat{\theta}) e_1] + k_4 T_1 \cos(e_1 + \delta_0) + T_1 u_1 - \\ &\left(\frac{\partial \alpha_3}{\partial e_1} \dot{e}_1 + \frac{\partial \alpha_3}{\partial e_2} \dot{e}_2 \right). \end{aligned}$$

增广式(7)形成如下的 Lyapunov 函数

$$V_3(t) = V_2(t) + \frac{1}{2} e_3^2, \quad (11)$$

则其对时间的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_3(t) &= -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 + k_1 e_2 e_4 + \\ &k_2 e_2 e_3 \sin(e_1 + \delta_0) + e_3 \dot{e}_3. \end{aligned}$$

选择

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{-k_3}{k_2 \sin(e_1 + \delta_0)} [a_0 + (\hat{\theta} + c_1 + c_2) e_2 + \\ &(1 - c_1^2 - c_1 \hat{\theta}) e_1] - k_4 \cos(e_1 + \delta_0) + \\ &\frac{1}{T_1} \left(\frac{\partial \alpha_3}{\partial e_1} \dot{e}_1 + \frac{\partial \alpha_3}{\partial e_2} \dot{e}_2 \right) - \frac{1}{T_1} k_2 e_2 \sin(e_1 + \delta_0) - \frac{1}{T_1} c_3 e_3, \end{aligned}$$

式中 $c_3 > 0$. 于是

$$\dot{e}_3 = -k_3 T_1 e_3 - c_3 e_3 - k_2 e_2 \sin(e_1 + \delta_0), \quad (13)$$

$$\dot{V}_3(t) = -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 + k_1 e_2 e_4 - (c_3 + k_3 T_1) e_3^2.$$

可见, $e_4 = 0$ 时, $\dot{V}_3(t) \leq 0$.

增广式(11)得到下面的 Lyapunov 函数

$$V_4(t) = V_3(t) + \frac{1}{2} e_4^2, \quad (14)$$

则其对时间的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_4(t) &= -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 + k_1 e_2 e_4 - (c_3 + k_3 T_1) e_3^2 + \\ &e_4 (-T_2 e_4 + T_2 C_H u_2). \end{aligned}$$

令

$$u_2 = (-k_1 e_2 - c_4 e_4) / (C_H T_2), \quad (15)$$

式中 $c_4 > 0$. 则

$$\dot{e}_4 = -(T_2 + c_4) e_4 - k_1 e_2, \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_4(t) &= -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 - (c_3 + k_3 T_1) e_3^2 - \\ &(T_2 + c_4) e_4^2. \quad (17) \end{aligned}$$

由于 c_1, c_2, c_3, c_4 均大于零, k_3, T_1, T_2 也大于零, 则

$\dot{V}_4(t) \leq 0$. 于是在反馈控制律式(12)(15) 以及参数替换律式(8) 作用下的闭环误差系统(18) 渐近稳定, 则当 $t \rightarrow \infty$ 时, $e_1 \rightarrow 0, e_2 \rightarrow 0, e_3 \rightarrow 0, e_4 \rightarrow 0$. 则 $x_1, x_2,$

x_3, x_4 也将收敛于零. 由于 $\dot{\hat{\theta}} = \gamma e_2(e_2 - c_1 e_1)$ 是使得 $\dot{V}_4(t) \leq 0$ 的参数替换律, 它与控制律一起使得系统是李雅普诺夫稳定的, 从而系统的状态及参数估计均有界, 所以说 $\hat{\theta}$ 可以作为 θ 的估计值. 同时由于采用

了参数替换律,使得控制律与系统具体的阻尼系数无关,因此,控制器对系统参数变化具有很强的鲁棒性.

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \dot{x}_1 = x_2 = e_2 - c_1 e_1, \\ \dot{e}_2 = k_1 e_4 + k_2 e_3 \sin(e_1 + \delta_0) + \\ \quad (\theta - \hat{\theta} - c_2) e_2 - (c_1 \theta - c_1 \hat{\theta} + 1) e_1, \\ \dot{e}_3 = -k_3 T_1 e_3 - c_3 e_3 - k_2 e_2 \sin(e_1 + \delta_0), \\ \dot{e}_4 = -(T_2 + c_4) e_4 - k_1 e_2, \\ \dot{\hat{\theta}} = \gamma e_2 (e_2 - c_1 e_1). \end{cases} \quad (18)$$

利用 x_1, x_2, x_3, x_4 表示的控制器为

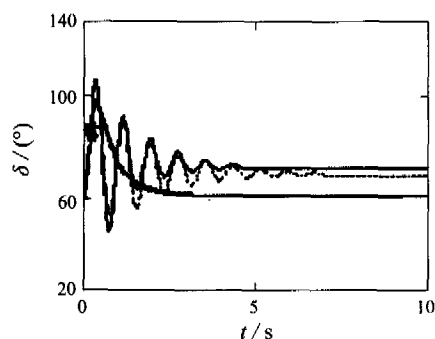
$$\begin{aligned} u_1 = & \frac{-(k_3 T_1 + c_3) \sin(x_1 + \delta_0) + x_2 \cos(x_1 + \delta_0)}{k_2 T_1 \sin^2(x_1 + \delta_0)} \cdot \\ & [a_0 + (\hat{\theta} + c_1 + c_2) x_2 + (1 + c_1 c_2) x_1] - \\ & k_4 \cos(x_1 + \delta_0) - \\ & \frac{(\hat{\theta} + c_1 + c_2) \dot{x}_2 + (\hat{\theta} + 1 + c_1 c_2) x_2}{T_1 k_2 \sin(x_1 + \delta_0)} - \\ & \frac{1}{T_1} k_2 (x_2 + c_1 x_1) \sin(x_1 + \delta_0) - \frac{1}{T_1} c_3 (x_3 + E'_{q0}), \end{aligned} \quad (19)$$

$$u_2 = -[c_4 x_4 + k_1 (x_2 + c_1 x_1)] / (C_H T_2). \quad (20)$$

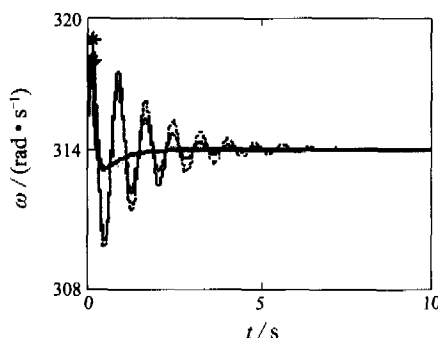
4 实例分析与数值仿真 (Example analysis and numerical simulation)

利用本文3中的结果对图1所示的系统进行了仿真. 仿真中单机无穷大发电机励磁与汽门系统的潮流及参数如下: $x_d = 2.534, x'_d = 0.318, x_q = 2.534, x_T = 0.1, x_L = 0.146, H = 8, T_{d0} = 10, C_H = 0.3, C_{M1} = 0.7, T_{H\Sigma} = 0.35, P_{m0} = 0.70, E'_{q0} = 0.3913, \delta_0 = 61.4444^\circ$. 仿真条件为: 0s 时某一条线路的始端发生三相短路故障, 0.2s 时故障切除, 单回线运行. 图2分别给出了自适应逆推综合控制器和基于直接反馈线性化的非线性综合控制器分别作用下系统的暂态响应曲线. 图中响应曲线上的“*”表示故障切除时刻各电气量的大小, 细实线和虚线为 $D = 5$ 和 $D = 10$ 时, 在基于直接反馈线性化的非线性综合控制器作用下系统的暂态响应曲线, $D = 5$ 和 $D = 10$ 时, 自适应逆推综合控制器作用下系统的暂态响应曲线重合, 如粗实线所示. 由图2可见, 当系统受到大的冲击进入暂态运行时, 在基于直接反馈线性化的非线性综合控制器作用下, 要经过多次振荡才能进入稳定状态, 而且振荡的时间和幅度与系统的参数有关, 当系统的参数存在不确定性时, 控制器的性能要产生变化, 即控制器的鲁棒性较差. 而在自适应逆推综合控制器的作用下, 系统获得了

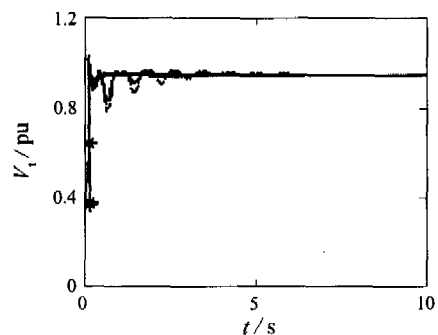
较好的动态品质, 功角、角速度、端电压和发电机机械功率很快稳定在期望值, 且不论阻尼系数取何值, 其响应曲线都一样, 即控制器的性能和系统参数无关, 因此, 自适应逆推综合控制器实现了机端电压和发电机功角的协调控制, 显著提高了电力系统的暂态稳定性, 且控制器对系统参数变化具有很强的鲁棒性.



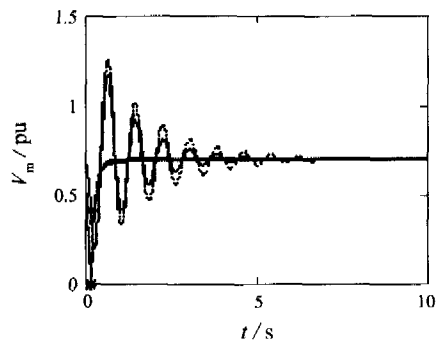
(a) 功角 δ



(b) 角速度 ω



(c) 发电机端电压 V_t



(d) 汽轮机输出功率 P_m

图2 系统的响应曲线

Fig. 2 System response curves

5 结论(Conclusion)

将自适应逆推方法应用到发电机组励磁与汽门这一多变量、非线性、强耦合复杂系统的控制中,提出了单机无穷大励磁与汽门系统的综合控制器设计方法.该方法不同于微分几何法、逆系统方法和直接反馈线性化的非线性控制器设计方法,在设计过程中没有用到任何线性化方法,完全保留了原动态系统的非线性特性;同时又考虑了发电机阻尼系数的不确定性,因此该控制器对系统参数变化具有很强的鲁棒性.数字仿真结果表明,应用该控制器可以实现发电机励磁与汽门系统的协调控制,同时稳定发电机的功角和机端电压,有效地改善系统的暂态稳定性,并对系统参数变化具有很强的鲁棒性.

参考文献(References):

- [1] 卢强,王仲鸿,韩英铎.输电系统最优控制[M].北京:科学出版社,1982.
(LU Qiang, WANG Zhonghong, HAN Yingduo. *Optimal Control for Power System*[M]. Beijing: Science Press, 1982.)
- [2] 卢强,孙元章.电力系统非线性控制[M].北京:科学出版社,1993.
(LU Qiang, SUN Yuanzhang. *Nonlinear Control for Power System*[M]. Beijing: Science Press, 1993.)
- [3] SINGH S N. Nonlinear state-variable-feedback excitation and governor control design using decoupling theory[J]. *IEEE Proc D: Control Theory and Applications*, 1980, 127(3): 63-77.
- [4] 黄健,涂光瑜,陈德树.发电机的非线性综合控制[J].电网技术,1997,21(3):5-9.
(HUANG Jian, TU Guangyu, CHEN Deshu. Integrated nonlinear control for speed and excitation of synchronous generators[J]. *Power System Technology*, 1997, 21(3): 5-9.)
- [5] 葛友,李春文,孙政顺.逆系统方法在电力系统综合控制中的应用[J].中国电机工程学报,2001,21(4):1-4.
(GE You, LI Chunwen, SUN Zhengshun. Application of inverse system method for power system integrated control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2001, 21(4): 1-4.)
- [6] 张腾,戴先中,陆翔.基于逆系统方法的汽轮发电机综合控制器[J].电力系统自动化,2001,25(6):27-30.
(ZHANG Teng, DAI Xianzhong, LU Xiang. Design of a turbo-generator integrated controller based on the inverse system method[J]. *Automation of Electric Power System*, 2001, 25(6): 27-30.)
- [7] 吴青华,蒋林.非线性控制理论在电力系统控制中应用综述[J].电力系统自动化,2001,25(3):1-10.
(WU Qinghua, JIANG Lin. Survey on nonlinear control theory and its application in power system[J]. *Automation of Electric Power System*, 2001, 25(3): 1-10.)
- [8] MASCOLO S, GRASSI G. Controlling chaotic dynamics using backstepping design with application to the Lorenz system and Chua's circuit[J]. *Int J Bifurcation and Chaos*, 1999, 9(6): 1425-1434.
- [9] 李文磊,井元伟,刘晓平.汽轮发电机主汽门开度非线性鲁棒控制[J].控制理论与应用,2003,20(3):387-390.
(LI Wenlei, JING Yuanwei, LIU Xiaoping. Nonlinear robust control for turbine main steam valve[J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(3): 387-390.)
- [10] 李文磊,井元伟,刘晓平.非线性汽门控制器的自适应鲁棒逆推设计[J].中国电机工程学报,2003,23(1):155-158.
(LI Wenlei, JING Yuanwei, LIU Xiaoping. Adaptive robust backstepping design for nonlinear steam valve controller[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(1): 155-158.)

作者简介:

王宝华 (1968—),男,博士,南京工程学院电力系副教授,主要研究兴趣有分岔、混沌控制,电力系统非线性控制, E-mail: wangbaohua@sohu.com;

杨成梧 (1936—),男,南京理工大学动力学院教授,博士生导师,美国《数学评论》评论员,美国国家数学学会会员.长期从事复杂系统控制理论、 H_∞ 控制、信息与信号处理及数字采样控制的研究;

张强 (1959—),男,南京工程学院电力系副教授,主要研究方向为电力系统运行与控制.