

汽轮发电机主汽门开度非线性鲁棒控制

李文磊, 井元伟, 刘晓平

(东北大学 信息科学与工程学院 控制科学研究所, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 由于外界干扰以及各种故障的影响, 电力系统的结构并不是不变的, 因此其中的一些重要参数, 如输电线路电抗等, 总是包含某种不确定性. 针对含有参数不确定性的汽轮机调速系统, 使用自适应逆推方法及 Lyapunov 方法设计了非线性鲁棒汽门控制器. 基于该方法的设计, 设计过程系统、简明, 且不必对原系统进行线性化. 通过对单机无穷大系统的仿真表明了该控制器的有效性.

关键词: 电力系统; 汽门控制; 鲁棒控制; 参数不确定性; 自适应逆推方法

中图分类号: TM712, TP273

文献标识码: A

Nonlinear robust control for turbine main steam valve

LI Wen-lei, JING Yuan-wei, LIU Xiao-ping

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Liaoning Shenyang 110004, China)

Abstract: Owing to the influences of external disturbances and a variety of faults, the configuration of power systems is not constant enough, so that such major parameters as reactance of transmission line always contain a few uncertainties. For the turbine speed governor system with parameter uncertainties, the nonlinear steam valve robust controller is designed using adaptive backstepping and Lyapunov methods. Thanks to these methods, the design procedure turns out to be systematic and concise, and the origin system need not be linearized. The simulation results show the effectiveness of this controller.

Key words: power system; steam valve control; robust control; parameter uncertainty; adaptive backstepping

1 引言 (Introduction)

随着电液式调速器取代了机械液压式调速系统, 并且其传动方式也进行了重大改进^[1], 人们已经逐渐认识到大型发电机组的汽门控制在改善电力系统稳定水平方面的突出作用. 近年来, 许多先进的控制方法也被应用到发电机组汽门开度控制器的设计中. 与以前的线性最优控制方法不同, 文献[1, 2]在对电力系统的非线性模型进行反馈线性化的基础上, 文献[1]应用微分几何方法设计了汽门开度非线性控制器, 文献[2]应用直接反馈线性化方法和 Lyapunov 方法设计了多机系统快速汽门控制器. 但由于反馈线性化方法要求系统参数必须精确可知, 因此它不具备对参数和模型变化的鲁棒性. 虽然将该方法与其它鲁棒控制方法结合可望解决参数不确定性问题, 但最终所设计的控制器针对的毕竟是线性化后的系统, 对原系统是否具强鲁棒性则有待进一

步探讨.

逆推方法作为一种非线性控制的设计工具, 由于其设计过程简明且能有效处理系统参数不确定性, 近来引起许多理论工作者的极大关注. 文献[3]利用递推方法设计了非线性 H_∞ 鲁棒励磁控制器, 文献[4, 5]用逆推方法分别设计了异步电动机和开关磁阻电机的控制器. 本文则利用自适应逆推方法设计了发电机汽门非线性控制器.

2 系统模型 (System model)

考虑带有汽门控制的单机无穷大总线系统 (single machine infinite bus, SMIB), 系统结构如图 1 所示.

假设: 1) 发电机用暂态电抗后的恒定电压源表示; 2) 不计入调节门开度的限幅效应; 再热器输出恒定, 并以高压调节汽门为调节对象. 则主调节汽门控制系统的数学模型如下:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0, \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{H}(P_H + C_{ML}P_{m0} - P_e - P_D), \\ \dot{P}_H = -\frac{1}{T_{HS}}(P_H - C_H P_{m0} + C_H u). \end{cases} \quad (1)$$

其中, δ 为发电机转子运行角; ω 是发电机转子速度; P_m, P_e, P_D 分别为原动机输出的机械功率、发电机的有功功率、阻尼功率; H 为发电机转子的转动惯量; T_{HS} 为汽门控制系统等效时间常数, 约为 0.4; C_H 为高压缸功率分配系数, 约为 0.3; C_{ML} 为中低压缸功率分配系数, 约为 0.7; P_H 为高压缸产生的机械功率; P_{m0} 为机械功率初始值; u 为汽门控制; 同时有

$$P_e = \frac{E'_q V_s}{X'_{ds}} \sin \delta, \quad (2)$$

$$P_D = \frac{D}{\omega_0}(\omega - \omega_0). \quad (3)$$

其中 D, E'_q 分别为阻尼系数和发电机 q 轴暂态电势; V_s 为无穷大总线电压; X'_{ds} 为发电机与无穷大系统间的等值电抗. 以下将考虑在参数 X'_{ds} 未知的情况下控制器的设计问题.

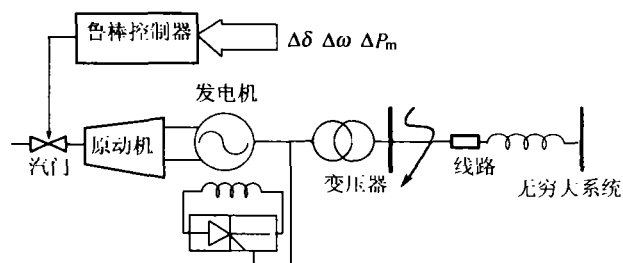


图1 具有汽门控制的单机无穷大总线系统

Fig. 1 A single machine infinite bus system with steam valve control

3 自适应逆推(Adaptive backstepping)

逆推方法主要适用于下三角结构(也称严格反馈结构)^[6]的系统. 其中的自适应逆推技术是通过非线性动态反馈, 一步步地构造全系统的控制 Lyapunov 函数(CLF), 其根本思想是参数估计. 这样的控制器不仅能保证系统状态有界, 而且能够达到跟踪误差收敛于零的目的. 由于它没有对原系统进行任何线性化, 因而完整保留了系统的非线性特性. 其简单提法为^[7]:

对于如下二阶系统

$$\dot{x}_1 = x_2 + \phi_1(x_1), \quad (4a)$$

$$\dot{x}_2 = u + \phi_2(x)\theta, \quad (4b)$$

其中 $x = [x_1, x_2]^T$, θ 是未知参量. 为实现对系统

(4)的鲁棒镇定, 可分以下两步:

第1步 考虑式(4a), 将 x_2 看作虚拟控制, 设计控制函数 $\alpha_1(x_1) = -c_1 x_1 - \phi_1(x_1)$, 形成 Lyapunov 函数 $V_0(x) = \frac{1}{2}x_1^2 + \frac{1}{2}[x_2 - \alpha_1(x_1)]^2$. 若 θ 已知, 可令 $\dot{V}_0 < 0$, 从而得到反馈控制律. 但现在 θ 未知, 合理的途径是用估计值 $\hat{\theta}$ 代替 θ , 则获得一个自适应控制律.

第2步 为获得全系统的 Lyapunov 函数, 必须在 $V_0(x)$ 的基础上增广一个参数误差 $\bar{\theta} = \theta - \hat{\theta}$ 的二次项, 通过使其导数负定, 最终得到参数替换律.

对于系统(1), 为使其变为适合逆推的形式, 可令 $x_1 = \delta - \delta_0, x_2 = \omega - \omega_0, x_3 = P_H - C_H P_{m0}$, 其中 $\delta_0, \omega_0, P_{m0}$, 表示对应变量的初始值, 则系统(1)转化为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -\frac{D}{H}x_2 + \frac{\omega_0}{H}(x_3 + P_{m0} - P_e), \\ \dot{x}_3 = -\frac{1}{T_{HS}}(x_3 + C_H u). \end{cases} \quad (5)$$

令 $k_1 = -\frac{D}{H}, k_2 = \frac{\omega_0}{H}, \frac{\omega_0}{H}P_{m0} = a_0, -\frac{1}{T_{HS}} = T$ 为

已知常数; 令 $\theta = -\frac{\omega_0 E'_q V_s}{HX'_{ds}}$ 为未知参量, 则式(5)进一步化为

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad (6a)$$

$$\dot{x}_2 = k_1 x_2 + k_2 x_3 + a_0 + \theta \sin(\delta_0 + x_1), \quad (6b)$$

$$\dot{x}_3 = T x_3 + T C_H u. \quad (6c)$$

4 非线性鲁棒控制器的设计(Design of nonlinear robust controller)

对于含有不确定参数的系统(6), 下面可以应用自适应逆推方法进行非线性汽门鲁棒控制器的设计.

第1步 对于系统(6a), 将 x_2 看作虚拟控制, 取镇定函数 $x_2^* = -c_1 x_1, c_1 > 0$ 为一设计常数; 令 $e_1 = x_1, e_2 = x_2 - x_2^*$, 则系统(6a)可表示为

$$\dot{e}_1 = e_2 - c_1 x_1. \quad (7)$$

令系统(6a)的 Lyapunov 函数为

$$V_1 = \frac{1}{2}e_1^2, \quad (8)$$

则其时间导数 $\dot{V}_1 = e_1(e_2 - c_1 e_1) = e_1 e_2 - c_1 e_1^2$. 很明显, 当 $e_2 = 0$ 时, $\dot{V}_1 \leq 0$.

第2步 对式(8)进行增广, 从而形成新的 Lyapunov 函数

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}e_2^2. \quad (9)$$

注意到 $\dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{x}_2^* = k_1 x_2 + k_2 x_3 + a_0 + \theta \sin(\delta_0 + x_1) + x_1 + c_1 \dot{x}_1$, 则有

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2 = \\ &-c_1 e_1^2 + e_2 [e_1 + k_1 x_2 + k_2 x_3 + a_0 + \theta \sin(\delta_0 + x_1) + c_1 x_2] = \\ &-c_1 e_1^2 + e_2 [e_1 + (k_1 + c_1) x_2 + k_2 x_3 + a_0 + \theta \sin(\delta_0 + x_1)]. \end{aligned}$$

令

$$x_3^* = (-e_1 - c_2 e_2 - (k_1 + c_1) x_2 - a_0 - \bar{\theta} \sin(\delta_0 + x_1)) / k_2,$$

其中 $c_2 > 0$ 为设计常数, $\bar{\theta}$ 为参数 θ 的估计值. 由此可得

$$\dot{e}_2 = -c_2 e_2 - e_1 + \bar{\theta} \sin(\delta_0 + x_1).$$

其中 $\bar{\theta} = \theta - \hat{\theta}$ 为估计误差.

第3步 增广式(9)形成下面的 Lyapunov 函数

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2\gamma} \bar{\theta}^2, \quad (10)$$

则有

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= \dot{V}_2 + \frac{1}{\gamma} \bar{\theta} \dot{\bar{\theta}} = \\ &-c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 + \bar{\theta} \sin(\delta_0 + x_1) e_2 + \frac{1}{\gamma} \bar{\theta} \dot{\bar{\theta}} = \\ &-c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 + \bar{\theta} \sin(\delta_0 + x_1) e_2 - \frac{1}{\gamma} \bar{\theta} \dot{\bar{\theta}}. \end{aligned}$$

为降低参数估计器的维数, 推迟参数替换律的选择至下一步.

第4步 定义 $e_3 = x_3 - x_3^*$, 增广式(10)形成全系统的 Lyapunov 函数

$$V(e_1, e_2, e_3, \bar{\theta}) = V_3 + \frac{1}{2} e_3^2.$$

注意到

$$\begin{aligned} \dot{e}_3 &= \dot{x}_3 - \dot{x}_3^* = \\ &Tx_3 + TC_H u + \frac{1}{k_2} (e_2 - c_1 e_1 + (k_1 + c_1) \dot{x}_2 + \\ &c_2 (k_1 x_2 + k_2 x_3 + a_0 + \bar{\theta} \sin(\delta_0 + x_1) + \hat{\theta} \sin(\delta_0 + x_1) + \\ &c_1 x_2) + \dot{\hat{\theta}} \sin(\delta_0 + x_1) + \hat{\theta} \cos(\delta_0 + x_1) \dot{x}_1), \end{aligned}$$

则有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{V}_3 + e_3 \dot{e}_3 = \\ &-c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 + \bar{\theta} \left(\sin(\delta_0 + x_1) e_2 - \frac{1}{\gamma} \dot{\bar{\theta}} \right) + \\ &e_3 (Tx_3 + TC_H u + \frac{1}{k_2} (e_2 - c_1 e_1 + (k_1 + c_1) \dot{x}_2 + \\ &c_2 (k_1 x_2 + k_2 x_3 + a_0 + \bar{\theta} \sin(\delta_0 + x_1) + \hat{\theta} \sin(\delta_0 + x_1) + \\ &c_1 x_2) + \dot{\hat{\theta}} \sin(\delta_0 + x_1) + \hat{\theta} \cos(\delta_0 + x_1) \dot{x}_1)) = \\ &-c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 + \bar{\theta} \left(\sin(\delta_0 + x_1) e_2 - \frac{1}{\gamma} \dot{\bar{\theta}} \right) + \\ &\frac{(c_1 + k_1 + c_2) e_3 \sin(\delta_0 + x_1)}{k_2} \bar{\theta} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &e_3 (Tx_3 + C_H u + \frac{1}{k_2} (e_2 - c_1 e_1 + \\ &(c_1 + c_2 + k_1) (k_1 x_2 + k_2 x_3 + a_0) + \hat{\theta} (\cos(\delta_0 + x_1) x_2 + \\ &(c_1 + c_2 + k_1) \sin(\delta_0 + x_1)) + \dot{\hat{\theta}} \sin(\delta_0 + x_1) + c_1 c_2 x_2)), \end{aligned}$$

令

$$u =$$

$$\begin{aligned} &\frac{1}{C_H} \left[-c_3 e_3 - Tx_3 - \frac{1}{k_2} (e_2 - c_1 e_1 + c_1 c_2 x_2 + (c_1 + \right. \\ &c_2 + k_1) (k_1 x_2 + k_2 x_3 + a_0) + \hat{\theta} (\cos(\delta_0 + x_1) x_2 + \\ &(c_1 + c_2 + k_1) \sin(\delta_0 + x_1)) + \dot{\hat{\theta}} \sin(\delta_0 + x_1) \left. \right)], \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $c_3 > 0$. 令参数替换律

$$\dot{\hat{\theta}} = \gamma \left(\sin(\delta_0 + x_1) e_2 + \frac{(c_1 + k_1 + c_2) e_3 \sin(\delta_0 + x_1)}{k_2} \right),$$

则 $\dot{V} = -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 - c_3 e_3^2 \leq 0$. 因此在反馈控制律(11)下的闭环误差系统

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - c_1 e_1, \\ \dot{e}_2 = -c_2 e_2 - e_1 + \bar{\theta} \sin(\delta_0 + x_1), \\ \dot{e}_3 = -c_3 e_3 + \bar{\theta} \frac{(c_1 + k_1 + c_2) e_3 \sin(\delta_0 + x_1)}{k_2}, \\ \dot{\bar{\theta}} = -\dot{\hat{\theta}} = \\ \gamma \left(\sin(\delta_0 + x_1) e_2 + \frac{(c_1 + k_1 + c_2) e_3 \sin(\delta_0 + x_1)}{k_2} \right) \end{cases}$$

渐近稳定, 则当 $t \rightarrow \infty$ 时, $e_1 \rightarrow 0, e_2 \rightarrow 0, e_3 \rightarrow 0$. 根据 x_1, x_2, x_3 以及 x_2^*, x_3^* 的定义可知 x_1, x_2 也将收敛于零, 因此系统状态亦有界. 同时, 式(11)中只用了发电机本身的参数而与网络参数无关, 从而易于工程实现.

5 仿真(Simulation)

根据上文的设计结果, 对图1所示的单机无穷大总线系统进行了仿真, 并将本文提出的非线性鲁棒汽门控制器(NLRVC, nonlinear robust valving controller)与线性最优汽门控制器(LOVC, linear optimal valving controller)的作用效果进行了比较. 仿真参数为 $D = 5, H = 8, a_0 = 31.42, T = -2.5, c_1 = c_2 = c_3 = 2, \gamma = 3$. 仿真条件为 $\delta_0 = 60^\circ, \omega_0 = 314.159, P_{m0} = 0.8 \text{ pu}, t = 0.1 \text{ s}$ 时系统发生三相对地短路, $t = 0.2 \text{ s}$ 故障切除. 仿真结果如图2.

从系统的暂态响应曲线可以看出, 与线性最优汽门控制器的作用效果相比, 虽然故障发生引起系统参数的变化, 但在非线性鲁棒汽门控制器的作用下, 发电机功角及机械功率对系统参数变化并不敏感, 系统很快即进入稳定状态.

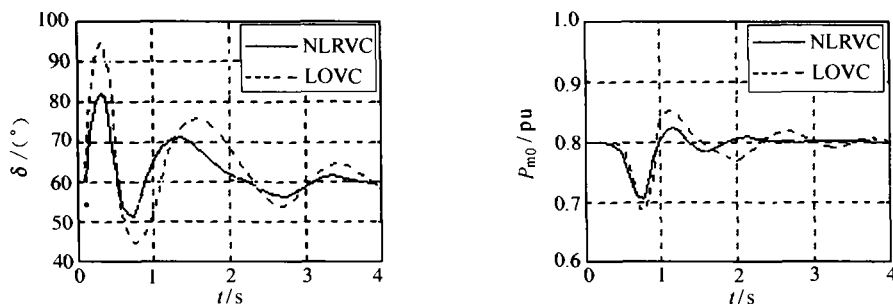


图2 系统的暂态响应

Fig. 2 Transient responses of the system

6 结论(Conclusion)

本文利用自适应逆推方法设计了发电机汽门非线性鲁棒控制器. 由于没有对原系统进行任何线性化处理, 因而完整保留了系统的非线性特性. 该控制器不仅能保证系统状态有界, 而且能够达到调节/跟踪误差收敛于零的目的. 同时, 在控制器的设计过程中, 重点考虑了系统中的输电线路等参数不确定性等, 因此该控制器对系统参数变化具有很强的鲁棒性且与网络拓扑无关. 进一步的仿真证明了该控制器在改善系统暂态稳定性方面优于传统的控制器.

参考文献(References):

- [1] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
(LU Qiang, SUN Yuanzhang. *Nonlinear Control of Power Systems* [M]. Beijing: Science Press, 1993.)
- [2] 刘国贤, 林宪枢, 杨奇逊. 应用李雅普诺夫理论求解发电机快速汽门非线性控制[J]. 电力自动化设备, 1996, 16(1): 11-14.
(LIU Guoxian, LIN Xianshu, YANG Qisun. Apply Lyapunov theory to solve turbine fast valving non-linear control [J]. *Electric Power Automation Equipments*, 1996, 16(1): 11-14.)
- [3] 卢强, 梅生伟, 申铁龙, 等. 非线性 H_∞ 励磁控制器的递推设计[J]. 中国科学(E辑), 2000, 30(1): 70-78.
(LU Qiang, MEI Shengwei, SHEN Teilong, et al. Recursive design of nonlinear H_∞ excitation controller [J]. *Science in China (Series E)*, 2000, 30(1): 70-78.)
- [4] TAN Huanglin, CHANG Jie. Adaptive backstepping control of induction motor with uncertainties [A]. *Proc of 1999 American Control Conference* [C]. San Diego, California: IEEE Service Center, American Automatic Control Council, 1999: 1-5.
- [5] ALRIFAI M T, CHOW J H, TORREY D A. A backstepping nonlinear control approach to switched reluctance motors [A]. *Proc of the 37th IEEE Conference on Decision and Control* [C]. Tampa: IEEE Customer Service, IEEE Control Systems Society, 1998: 4653-4657.
- [6] MARINO R, TOMEI P. Robust stabilization of feedback linearizable time-varying uncertain nonlinear system [J]. *Automatica*, 1993, 29(1): 181-189.
- [7] KRSTIC M, KANELAKOPOULOS I, KOKOTOVIC P V. *Nonlinear and Adaptive Control Design* [M]. New York: Wiley, 1995.

作者简介:

李文磊 (1970—), 男, 讲师, 分别于1992年、1997年在东北电力学院获学士、硕士学位, 现为东北大学博士研究生. 研究兴趣为电力系统非线性控制. E-mail: liwenlei@etang.com;

井元伟 (1956—), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂控制系统的对称性、相似性、稳定性等的研究;

刘晓平 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事奇异系统、非线性鲁棒控制的研究.