

基于输入对状态反馈线性化的非线性励磁控制

胡兆庆,毛承雄,陆继明

(华中科技大学电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 将输入对状态反馈线性化的思想应用于发电机励磁控制系统,得出了一套实用的发电机非线性励磁控制规律,应用此方法和采用状态反馈精确线性化的方法推导出的非线性控制规律具有一致性,且比基于微分几何理论的状态反馈精确线性化方法更加简单实用。仿真证明该文提出的非线性励磁控制器在系统发生大扰动时比常规的 AVR + PSS 更能抑制系统的振荡,对增强系统稳定性具有一定作用。

关键词: 非线性; 输入对状态反馈线性化; 微分几何; 励磁控制

中图分类号: TM712; TP13 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)05-0032-04

0 引言

电力系统运行的稳定性是电力系统安全运行的基本要求,而对同步发电机励磁的控制是改善电力系统运行稳定性的一个经济和有效的手段。通过对发电机励磁施加适当的控制,可以改善电力系统在大、小扰动下的稳定性^[1~3]。以往励磁控制器设计通常是基于运行点的线性化方法所得,将电力系统近似作为一个线性化系统进行处理。但是电力系统的非线性决定了这种方法的局限性。基于微分几何理论的状态反馈精确线性化方法被引入发电机励磁控制系统设计^[6],但是这种方法需要复杂的微分几何数学工具,作为改进,文献^[7~9]提出基于直接反馈线性化理论的非线性励磁控制器。本文提出一种基于输入对状态反馈线性化的非线性励磁控制器,这种方法实用方便,容易理解。本文对这种新型的励磁控制器进行详细的仿真研究,仿真结果证明这种非线性励磁控制器对提高电力系统在大、小扰动下的稳定性有一定作用。

1 输入对状态反馈线性化理论简述

对于给定单输入仿射非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (1)$$

系统(1)能够被输入对状态反馈线性化的条件是:系统具有相对度(relative degree) $r = n$,其中 n 为系统的阶数。若非线性系统(1)能够被输入对状态反馈线性化。则在一个邻域 $\Omega \subset R^n$ 中存在一个微分同胚 $T: \Omega \rightarrow R^n$,在新的坐标变换下 $z = T(x)$ 下,系统可以转化为:

$$\dot{z} = A_c z + B_c^{-1}(z)(u - a(z)) \quad (2)$$

其中:

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad B_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

将 $z = T(x)$ 代入式(2),在其逆变换 $x = T^{-1}(z)$ 存在的情况下,则可以得到 $T(x) = (T_1(x) \ T_2(x) \ \dots \ T_n(x))^T$,求解方程,如式(3)所示:

$$\begin{cases} \frac{\partial T(x)}{\partial x} f(x) = A_c T(x) - B_c^{-1}(x) a(x) \\ \frac{\partial T(x)}{\partial x} g(x) = B_c^{-1}(x) \end{cases} \quad (3)$$

同时可得到 $a(x)$, $b(x)$ 的表达式,如式(4)所示:

$$\begin{cases} \frac{1}{b(x)} = \frac{\partial T_n(x)}{\partial x} g(x) = 0 \\ -\frac{a(x)}{b(x)} = \frac{\partial T_n(x)}{\partial x} f(x) \end{cases} \quad (4)$$

式(2)中,令 $u = a(x) + b(x)v$,得到系统(1)对应的精确线性化系统,如式(5)所示:

$$\dot{z} = A_c z + B_c v \quad (5)$$

式(5)是一线性化系统,所以其控制规律 v 可以完全按照线性系统的方法来设计。

2 非线性励磁控制设计

所要研究的系统如图1所示,发电机采用三阶简化模型,在保持原动机功率不变,并且忽略摩擦阻尼影响的情况下,系统可用下面一组微分方程表示:

$$\begin{cases} = b(\delta - 1) \\ = \frac{1}{M}(P_m - P_e) \\ e_q = \frac{1}{T_{d0}}(E_{fd} - E_q) \end{cases} \quad (6)$$

其中: δ 为发电机功角, $b = 2f$, f 为发电机角频率, P_m 为原动机功率, P_e 为发电机电磁功率, e_q 为暂态电势, E_{fd} 为励磁电压, E_q 为空载电势。 M 为惯性时间常数, T_{d0} 为励磁绕组暂态时间常数。

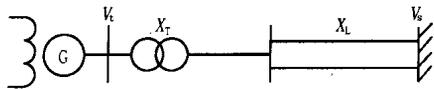


图1 单机无穷大系统

Fig.1 Single-generator infinite bus system

如果选择输出 $y = \begin{bmatrix} \delta \\ P_e \end{bmatrix}$, 可以证明系统(6)的相对度 $r=3^{[9]}$, 所以可以实现输入对状态反馈线性化, 如果令 $x^T = (\delta, P_e, e_q)$,

$$f(x) = \begin{bmatrix} b(\delta - 1) \\ \frac{1}{M}(P_m - P_e) \\ -\frac{e_q}{T_{d0}} \end{bmatrix}, \quad g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_{d0}} \end{bmatrix}$$

系统方程可以写成:

$$\dot{x} = f(x) + g(x) E_{fd} \quad (7)$$

由于该系统可以实现输入对状态反馈线性化, 所以存在可逆变换 $z = T(x) = (T_1(x) \quad T_2(x) \quad T_3(x))^T$ 将系统转换为式(5)形式。由式(3)可得:

$$\frac{\partial T_1(x)}{\partial x_3} \frac{1}{T_{d0}} = 0 \quad (8)$$

由式(8)可知 $T_1(x)$ 中不含 e_q , 不妨设 $T_1(x) = \delta$, 根据式(3)可求得:

$$T(x) = \begin{bmatrix} b(\delta - 1) \\ -\frac{1}{M}(P_m - P_e) \\ e_q \end{bmatrix}$$

其逆变换 $T^{-1}(z)$ 存在。根据式(4), 可求得 $x(z)$,

$$\begin{cases} \delta = \frac{MT_{d0}x_d \Sigma}{bV_s \sin} \left\{ \frac{2}{M}(1 - \cos 2\theta) \frac{V_s e_q \cos \theta}{x_d \Sigma} - V_s^2 \left(\frac{1}{x_d \Sigma} - \frac{1}{x_q \Sigma} \right) \cos 2\theta \right\} + \frac{b e_q V_s \sin \theta}{MT_{d0} x_d \Sigma} \\ e_q = -\frac{MT_{d0} x_d \Sigma}{b V_s \sin} \end{cases} \quad (9)$$

其中:

$$x_d \Sigma = x_d + x_T + 0.5 x_L$$

$$x_q \Sigma = x_q + x_T + 0.5 x_L$$

在坐标 $z = T(x)$ 变换下, 系统(6)转化为(10)

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v \quad (10)$$

其中: $v = \frac{E_{fd}}{T_{d0}}$

系统(10)为一线性系统, 可以按照线性最优控制^[10]设计控制量 v , 控制量 v 表达式如式(11)所示:

$$v = -k_1 \int_0^t \delta dt - k_2 \delta - k_3 \frac{1}{M}(P_m - P_e) \quad (11)$$

实际控制量:

$$E_{fd} = v + E_{fd} \quad (12)$$

可以证明, 用输入对状态反馈线性化方法推导出的控制规律和用基于微分几何理论的状态反馈精确线性化方法以及用直接反馈线性化(DFL)方法推导出的控制规律一致^[6,8,9], 且此方法更简单、实用。

针对控制量(12)中 e_q, e_q 不易测量的问题, 可以通过式(13)、(14)进行转换:

$$e_q = \frac{x_d \Sigma}{V_s \sin} (P_e - 0.5 V_s^2 \frac{x_d - x_q}{x_d \Sigma x_q \Sigma} \sin \theta) \quad (13)$$

$$e_q = e_q \frac{x_d \Sigma}{x_d \Sigma} + (1 - \frac{x_d \Sigma}{x_d \Sigma}) V_s \cos \theta \quad (14)$$

这样控制量的计算只需要测量 δ, P_e 。

3 仿真结果

针对图1所示系统, 分别对系统发生三相短路0.2 s后切除故障以及切除一条线路运行3.5 s后恢复双回线路运行两种扰动下的动态过程进行了仿真。仿真结果如图2、图3所示。

从图2、图3可以看出, 本文提出的非线性励磁控制器在系统发生扰动时, 总是表现出比常规的AVR + PSS更好的阻尼特性, 因此采用非线性励磁控制器更能抑制系统在发生故障时的振荡, 对于增强系统稳定性有一定促进作用。

另外, 本文对图4所示5台机电力系统进行了仿真研究, 假定在No.3发电机出口端发生三相短路时, 在No.3机上装常规的AVR + PSS或者非线性励磁控制器, 考察多机系统的动态响应情况, 仿真结果如图5所示。

由图5可以看出, 当发电机装上本文提出的非线性励磁控制器后, 在系统发生故障时, 比起常规的

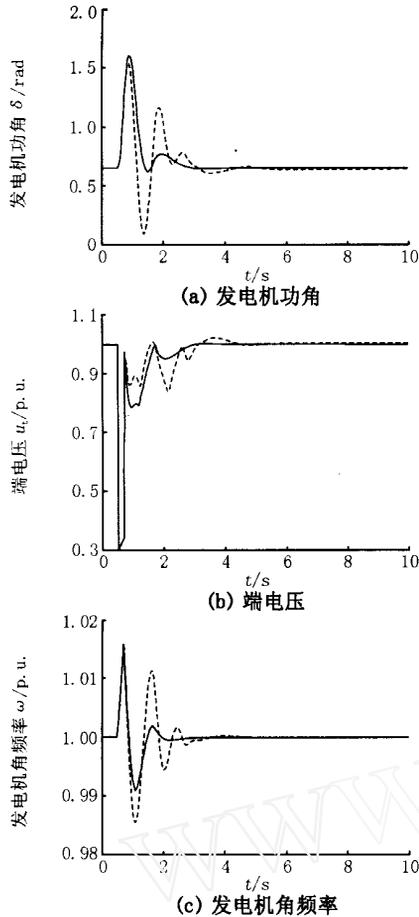


图2 变压器高压侧 0.5 s 时发生三相短路, 0.2 s 后切除短路故障后系统动态响应

Fig.2 Response to a three-phase fault at high voltage side of transformer in single-generator infinite bus system

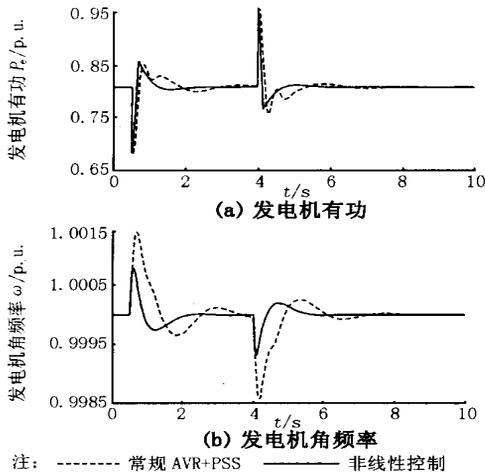


图3 0.5 s 时切除一条线路运行 3.5 s 后恢复双回线路运行时系统动态响应

Fig.3 Response to opening and closing of one of double circuit transmission lines in single-generator infinite bus system

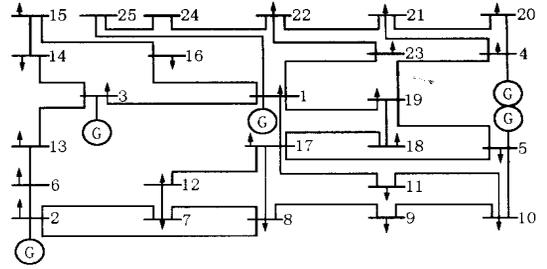
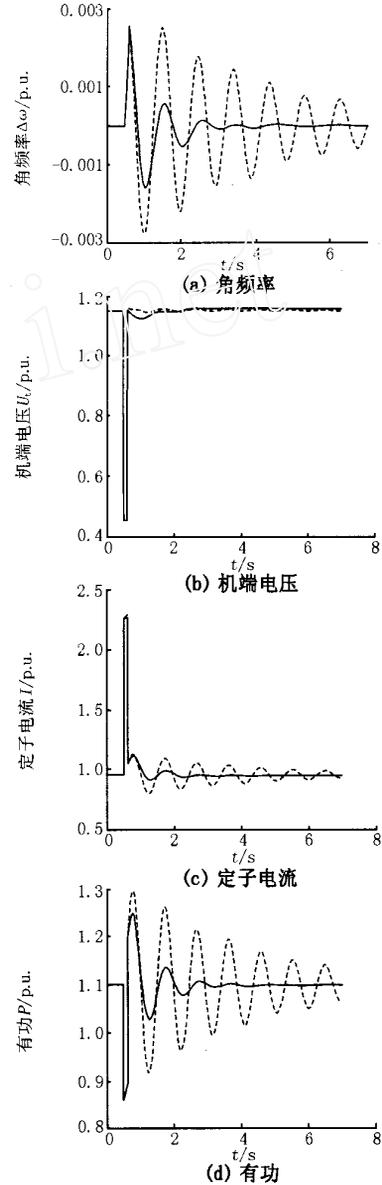


图4 5 机电力系统

Fig.4 Five-generator infinite bus system



注: ----- NO.3 机装常规 AVR+PSS ———— NO.3 机装非线性控制

图5 No.3 发电机出口端发生 0.1 s 三相短路故障时系统的动态响应

Fig.5 Response to three-phase fault at the terminal of generator No. 3

AVR + PSS,能够更快地平息振荡。

4 结论

本文提出了一种基于输入对状态反馈线性化理论的非线性励磁控制器,所得的控制规律和用基于微分几何理论的精确线性化思想推导出的控制规律具有一致性,但是本文的方法更简单实用,利于工程应用。单机无穷大系统以及多机系统下的仿真结果证明,该非线性励磁控制器和常规 AVR + PSS 相比,能够更好地抑制电力系统在大、小扰动下振荡,对于增强系统稳定性有一定作用。

参考文献:

- [1] 范澍,毛承雄,陆继明(FAN Shu, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming). 基于BP神经网络的最优励磁控制器(Optimal Excitation Controller Based on BP Neural Network) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(8):29-32.
- [2] 范澍,毛承雄,陆继明(FAN Shu, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming). 基于在线辨识的实时最优励磁控制器(Optimal Excitation Controller Based on On-line System Identification) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(13):16-20.
- [3] Malik O P, MAO Cheng-xiong. An Adaptive Optimal Controller and Its Application to an Electric Generation Unit [J]. Electrical Power & Energy Systems, 1993, 15(3): 169-178.
- [4] Mao C X, Fan J, Malik O P, et al. Study of Realtime Adaptive Optimal Excitation Controller and Adaptive Optimal Power System Stabilizer [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1992, 7(3): 598-605.
- [5] MAO Cheng-xiong, Malik O P, Hope G S, et al. An Adaptive Generator Excitation Controller Based on Linear Optimal Control [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1990, 5(4): 673-678.
- [6] 卢强,孙元章(LU Qiang, SUN Yuan-zhang). 电力系统非线性控制(Nonlinear Control of Power Systems) [M]. 北京: 科学出版社(Beijing: Science Press), 1992.
- [7] 高龙,等(GAO Long, et al). 电力系统新型非线性控制器(New Nonlinear Controller for Power System) [J]. 清华大学学报(Journal of Tsinghua University), 1989, 29(1):38-46.
- [8] 周双喜,汪兴盛(ZHOU Shuang-xi, WANG Xing-sheng). 基于直接反馈线性化的非线性励磁控制器(Nonlinear Excitation Controller Based on the Direct Feedback Linearization) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 1995, 15(4):281-288.
- [9] 马幼捷,周雪松,迟正刚(MA You-jie, ZHOU Xue-song, CHI Zheng-gang). 基于直接反馈线性化理论的微机非线性励磁控制器(Microcomputer-based Nonlinear Excitation Controller Designed by Direct Feedback Linearization Theory) [J]. 控制理论与应用(Control Theory and Applications), 1997, 14(6):857-861.
- [10] 余耀南(YU Yao-nan). 动态电力系统(Dynamic Power Systems) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1985.

收稿日期: 2003-06-26

作者简介:

胡兆庆(1976-),男,博士研究生,研究方向为大型同步发电机励磁控制及电力电子技术在电力系统中应用;

毛承雄(1964-),男,教授,博士生导师,主要研究领域为电力系统运行与控制;

陆继明(1957-),男,副教授,主要研究领域为电力系统运行与控制。

Nonlinear excitation controller based on input-state linearization

HU Zhao-qing, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming

(College of Electrical Electronics Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The nonlinear excitation controller based on input state linearization theory is proposed. The control law inferred from the proposed method has coherence with the result deduced from the exact linearization based on theory of differential geometry. Moreover, the method presented in this paper is more convenient and practical. Simulation results show that the proposed nonlinear controller can provide better damping characteristics than the general AVR + PSS does when the power system is subject to the small or large disturbance. Consequently the stability of the system could be enhanced with the proposed controller.

Key words: nonlinear; input-state linearization; differential geometry; excitation control