

文章编号: 1001-0920(2014)09-1703-04

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2013.0914

具有 TCSC 的单机无线总线系统非线性阻尼浸入与不变控制

董秀娟¹, 李圣涛², 井元伟¹, 姜 因¹, 张嗣瀛¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004; 2. 山东师范大学 信息科学工程学院, 济南 250014)

摘 要: 针对带有晶闸管控制串补(TCSC)的单机无限总线系统, 利用浸入和不变思想设计了基于状态反馈的非线性阻尼控制器. 通过选定一个特定的二维目标系统和映射函数, 将所研究的对象浸入其中, 使得所设计的非线性阻尼控制器在不需构造 Lyapunov 函数的情况下即可保证闭环系统的渐近稳定性和轨迹的有界性. 仿真对比结果表明了采用所提出方法设计的控制器是有效的, 且能够明显提高闭环系统的暂态稳定性.

关键词: 电力系统; 浸入与不变; 状态反馈; 非线性阻尼; 晶闸管控制串补

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Nonlinear damping immersion and invariance control for single machine infinite bus systems with TCSC

DONG Xiu-juan¹, LI Sheng-tao², JING Yuan-wei¹, JIANG Nan¹, ZHANG Si-ying¹

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. College of Information Science and Engineering, Shandong Normal University, Ji'nan 250014, China. Correspondent: DONG Xiu-juan, E-mail: dongxiujuan5532@163.com)

Abstract: A nonlinear state-feedback controller design scheme based on immersion and invariance methodology is proposed for single machine infinite bus systems with thyristor-controlled series compensation. A nonlinear damping controller is obtained by choosing a stable target system and some designed mappings, which efficiently avoids choosing Lyapunov function and guarantees that all trajectories of the closed-loop system are asymptotically stable and bounded. Simulation result shows not only the validity of the proposed methodology but obviously enhances the transient stability of the closed-loop system.

Key words: power system; immersion and invariance; state-feedback; nonlinear damping; thyristor-controlled series compensation

0 引 言

近年来, 由于电力电子技术的发展, 柔性交流输电系统(FACTS)在提高电力系统暂态稳定性中的作用越发显著^[1]. 晶闸管控制串补(TCSC)作为 FACTS 系统重要的组成部分, 在改善电力系统性能方面具有很多优点, 其应用研究已引起学者们的极大关注^[2].

传统 TCSC 的控制方式主要是在近似线性化模型的基础上设计控制器, 没有考虑系统的非线性特性^[3-5]. 基于微分几何的精确线性化和直接反馈线性化等方法在使用时要求系统模型必须精确可知, 文献[6-7]虽然利用该方法对系统的非线性模型进行设计, 得出了较好的结论, 但没有考虑 TCSC 本身的电

磁暂态过程^[8]. 文献[9]设计了鲁棒 TCSC 控制器, 结合线性矩阵不等式(LMI)方法实现了系统的局部渐近稳定^[10]. 文献[11]讨论了基于 Hamilton 理论的非线性 TCSC 控制器设计问题, 所设计的控制器提升了电力系统的暂态稳定性能, 但如何构造 Hamilton 函数却是一个难题.

以上文献都基于能量函数方法对电力系统进行了研究, 与上述方法不同, Ortega 等^[12]利用系统浸入和流形不变思想, 对输入仿射非线性系统给出一种新的镇定方法. 该方法不需要对非线性系统选取能量函数, 避开了构造能量函数的难题, 且所设计的控制器可以同时保证闭环系统稳定和轨迹有界, 因此受到

收稿日期: 2013-07-08; 修回日期: 2013-11-27.

基金项目: 国家 863 计划项目(2010AA101702); 中央高校基本科研业务费项目(N100604019); 中央高校基本科研业务费专项基金项目(N110404032).

作者简介: 董秀娟(1978—), 女, 博士生, 从事电力系统非线性控制的研究; 井元伟(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂非线性大系统的分析与控制、复杂系统与复杂性科学等研究.

广大研究人员的青睐,得到一些新的研究成果^[13-15].文献[13]利用浸入和不变方法,对一类非线性系统的动态输出反馈控制进行了研究.文献[14]针对一类特殊的三维非线性系统,设计了浸入和不变控制器.文献[15]针对带有励磁控制的单机无线总线系统,利用浸入和不变方法设计了控制器,但该方法需要用到复杂的坐标变换和多次选取 Lyapunov 函数,使得设计控制器的过程非常复杂.

本文利用浸入与不变思想,针对带有 TCSC 的单机电力系统,进行暂态稳定性能研究.通过选取一个合适的稳定的二维目标系统,求取一个映射,将所要研究的对象动态浸入到该目标系统,建立目标系统与实际对象之间的联系.选取一个隐式流形,在保证流形吸引性和轨迹有界性的前提下,设计带有阻尼的非线性控制器.控制器的设计过程简单明了,仿真比较结果表明,所给出结果能够明显提高闭环系统的暂态性能.

1 问题描述

考虑带有 TCSC 的单机无线总线系统,如图 1 所示,其数学模型^[23]为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0, \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{H} \left(P_m - E_q V_s y_{\text{tcsc}} \sin \delta - \frac{D}{\omega_0} (\omega - \omega_0) \right), \\ \dot{y}_{\text{tcsc}} = -\frac{1}{T_{\text{tcsc}}} (y_{\text{tcsc}} - y_{\text{tcsc}0} - u). \end{cases} \quad (1)$$

其中: δ 为发电机转子运行角度, ω 为发电机转子速度, P_m 为原动机输出的机械功率, H 为发电机转子的转动惯量, T_{tcsc} 为 TCSC 的时间常值, D 和 E_q 分别为阻尼系数和发电轴暂态电压, V_s 为无穷大总线电压, $y_{\text{tcsc}} = 1/(X_{d\Sigma} + X_{\text{tcsc}})$ 为整个系统导纳, X_{tcsc} 为 TCSC 的电抗, $X_{d\Sigma}$ 为外部电抗, u 为 TCSC 的电抗调制输入.

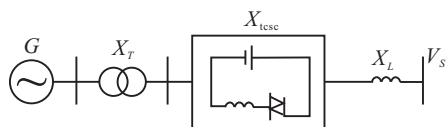


图 1 带有 TCSC 的单机无线总线系统

对于系统(1),令

$$x_1 = \delta - \delta_0, \quad x_2 = \omega - \omega_0, \quad x_3 = y_{\text{tcsc}} - y_{\text{tcsc}0},$$

其中 $\delta_0, \omega_0, y_{\text{tcsc}0}$ 为相应变量的稳态值,则系统(1)可以改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -\frac{D}{H} x_2 + \frac{\omega_0}{H} \left(P_m - E_q V_s (x_3 + y_{\text{tcsc}0}) \sin(x_1 + \delta_0) \right), \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{T_{\text{tcsc}}} (-x_3 + u). \end{cases} \quad (2)$$

令

$$b_1 = -\frac{D}{H}, \quad k_1 = \frac{\omega_0}{H}, \quad k_2 = \frac{\omega_0 E_q V_s}{H}, \quad T = \frac{1}{T_{\text{tcsc}}},$$

其中 b_1, k_1, k_2, T 为已知常数,则系统(2)有如下状态空间表达式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = b_1 x_2 + k_1 P_m - k_2 (x_3 + y_{\text{tcsc}0}) \sin(x_1 + \delta_0), \\ \dot{x}_3 = -T x_3 + T u. \end{cases} \quad (3)$$

本文主要利用浸入与不变的方法对带有 TCSC 的单机电力系统进行暂态稳定研究.下面给出控制目标和控制器设计方法.

2 控制目标和控制器设计

2.1 控制目标

假设 x_* 表示可操作的稳定平衡点且已知,控制目标是设计控制器 $u = \psi(x, z)$,使得系统(1)在平衡点渐近稳定,同时提高单机无限总线系统的暂态性能.根据文献[12],只需所设计的控制器满足文献中定理的4个条件,便可以保证闭环系统的渐近稳定性和轨迹的有界性.

2.2 控制器设计

控制器设计采取以下步骤.

Step 1 (目标系统) 该方法的主要思想是将对象动态浸入到一个稳定的低阶目标系统.定义目标系统为

$$\Sigma_T : \begin{cases} \dot{\xi}_1 = \xi_2, \\ \dot{\xi}_2 = -V'(\xi_1) - R(\xi_1, \xi_2) \xi_2. \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\xi_1, \xi_2 \in R$; $V(\xi_1) : R \rightarrow R$ 为系统的势能; $R(\xi_1, \xi_2) : R \times R \rightarrow R$ 为需要选择的阻尼函数; ξ_* 为目标系统(4)的一个稳定平衡点; $H(\xi_1, \xi_2) = \xi_2^2/2 + V(\xi_1)$ 为目标系统的能量函数.

为了保证平衡点的稳定性,作如下假设.

假设 1 $V(\xi_1)$ 势能函数满足

$$V'(\xi_{1*}) = 0, \quad V''(\xi_{1*}) > 0.$$

假设 2 阻尼函数满足 $R(\xi_*) \geq 0$.

Step 2 (浸入条件) 当控制目标和目标系统已知时,映射 π 的一个自然选择如下:

$$\pi(\xi) = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \pi_3(\xi) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

令

$$V(\xi_1) = -\beta \cos \tilde{\xi}_1, \quad R(\xi_1, \xi_2) = -b_1 + d, \quad \beta > 0.$$

其中: d 为附加阻尼, $\pi_3(\xi)$ 为一个未知函数.

在选定 $\pi(\xi)$ 和目标系统后,文献[12]中的浸入

条件可以转化为

$$\begin{bmatrix} \xi_2 \\ b_1\xi_2 + k_1P_m - k_2(\pi_3(\xi_1, \xi_2) + y_{tcsc0}) \sin(\xi_1 + \delta_0) \\ -T\pi_3(\xi_1, \xi_2) \end{bmatrix} +$$

$$[0 \ 0 \ T]^T c(\pi(\xi)) =$$

$$\begin{bmatrix} \xi_2 \\ -V'(\xi_1) + (b_1 - d)\xi_2 \\ \frac{\partial\pi_3(\xi)}{\partial\xi_1}\xi_2 - \frac{\partial\pi_3(\xi)(V'(\xi_1) - (b_1 - d)\xi_2)}{\partial\xi_2} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

故有

$$k_1P_m - k_2(\pi_3(\xi_1, \xi_2) + y_{tcsc0}) \sin(\xi_1 + \delta_0) = -\beta \sin \tilde{\xi}_1 - d\xi_2, \quad (7)$$

$$-T\pi_3\xi_1, \xi_2 + Tc(\pi(\xi)) =$$

$$\frac{\partial\pi_3(\xi)}{\partial\xi_1}\xi_2 - \frac{\partial\pi_3(\xi)}{\partial\xi_2}(\beta \sin \tilde{\xi}_1 + (b_1 - d)\xi_2). \quad (8)$$

通过计算式(7), 得到映射 $\pi_3(\xi)$ 为

$$\pi_3(\xi) = \frac{k_1P_m + \beta \sin \tilde{\xi}_1 + d\xi_2}{k_2 \sin(\xi_1 + \delta_0)} - y_{tcsc0}. \quad (9)$$

此时, 计算所得的映射 $\pi_3(\xi)$ 是变量 ξ_1, ξ_2 的函数. 这样, 在设计控制器时即可有效利用目标系统的信息, 达到更好的控制效果. 计算式(8)得到

$$c(\pi(\xi)) = T^{-1} \left[\frac{\partial\pi_3(\xi)}{\partial\xi_1}\xi_2 + T\pi_3(\xi_1, \xi_2) - \frac{\partial\pi_3(\xi)}{\partial\xi_2}(\beta \sin \tilde{\xi}_1 + (b_1 - d)\xi_2) \right]. \quad (10)$$

Step 3 (隐式流形) 流形 \mathcal{M} 的隐式描述同样为

$$\mathcal{M} = \{x \in R^3 \mid \phi(x) = 0\},$$

其中

$$\phi(x) = x_3 - \pi_3(x_1, x_2) = x_3 - \frac{k_1P_m + \beta \sin \tilde{x}_1 + dx_2}{k_2 \sin(x_1 + \delta_0)} + y_{tcsc0}, \quad (11)$$

\tilde{x}_1 表示 $x_1 - x_{1*}$.

Step 4 (流形吸引性和轨迹有界性) 定义偏流形坐标 $z = \phi(x)$, 经过简单计算得到

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \dot{x}_3 - \dot{\pi}_3(x_1, x_2) = \\ &= -Tx_3 + Tc(\pi(x, z)) - \left[\frac{\beta \sin(x_{1*} + \delta_0)x_2}{k_2 \sin^2(x_1 + \delta_0)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\cos(x_1 + \delta_0)(k_1P_m + dx_2)x_2}{k_2 \sin^2(x_1 + \delta_0)} + \frac{d(b_1x_2 + k_1P_m)}{k_2 \sin(x_1 + \delta_0)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{d(-k_2(x_3 + y_{tcsc0}) \sin(x_1 + \delta_0))}{k_2 \sin(x_1 + \delta_0)} \right]. \quad (12) \end{aligned}$$

为了保证偏流形坐标的有界性和 $\lim_{t \rightarrow \infty} z(t) = 0$, 选择偏流形坐标的动态行为为满足

$$\dot{z} = -\gamma z, \gamma > 0, \quad (13)$$

则可以求得

$$\psi(x, z) = T^{-1} \left[-\gamma z + Tx_3 +$$

$$\frac{\beta \sin(x_{1*} + \delta_0) - \cos(x_1 + \delta_0)(k_1P_m + dx_2)}{k_2 \sin^2(x_1 + \delta_0)} x_2 + \frac{d(b_1x_2 + k_1P_m - k_2(x_3 + y_{tcsc0}) \sin(x_1 + \delta_0))}{k_2 \sin(x_1 + \delta_0)} \right], \quad (14)$$

即控制律为

$$\begin{aligned} u &= \psi(x, \phi(x)) = \\ &= T^{-1} \left[-\gamma \left(x_3 - \frac{k_1P_m + \beta \sin \tilde{x}_1 + dx_2}{k_2 \sin(x_1 + \delta_0)} + y_{tcsc0} \right) + \right. \\ &\quad \left. \frac{\beta \sin(\delta_0) - \cos(x_1 + \delta_0)(k_1P_m + dx_2)}{k_2 \sin^2(x_1 + \delta_0)} x_2 + Tx_3 + \right. \\ &\quad \left. \frac{d(b_1x_2 + k_1P_m - k_2(x_3 + y_{tcsc0}) \sin(x_1 + \delta_0))}{k_2 \sin(x_1 + \delta_0)} \right]. \quad (15) \end{aligned}$$

这样即可得到定理 1.

定理 1 由系统(1)和控制律(15)构成的闭环系统的状态轨迹在平衡点 x_* 处是渐近稳定的.

3 仿真分析

目前, 对非线性系统的研究方法中, backstepping 方法的使用较为广泛, 故对本文方法所得的阻尼分配控制器进行仿真, 并与利用 backstepping 方法设计所得的控制器进行比较. 仿真用到的参数取值^[2]如下:

$$\begin{aligned} D &= 1 \text{ p.u.}, H = 7 \text{ s}, v_s = 0.995 \text{ p.u.}, \\ E_q &= 1.067 \text{ p.u.}, P_m = 0.9 \text{ p.u.}, \gamma = 5, \\ T_{tcsc} &= 0.05 \text{ s}, \omega_0 = 1 \text{ p.u.}, \beta = 4, \\ \delta_0 &= 0.7854 \text{ rad}, y_{tcsc0} = 1.1991 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

系统的状态初始值为 $x(0) = [1, 1, 1]^T$. 仿真结果如图 2~图 4 所示. 当 $d = 5$ 时, 由图 2~图 4 可见, 本文方法在收敛速度方面明显优于 backstepping 方法, 暂态性能明显提高.

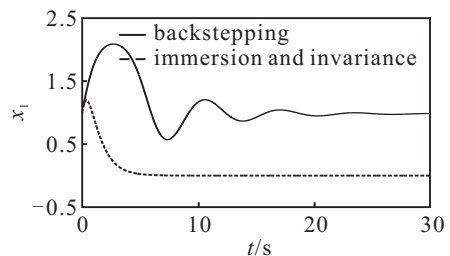


图 2 闭环系统状态 1 响应对比曲线

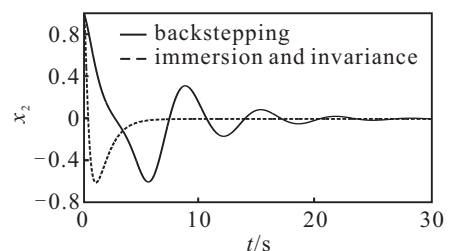


图 3 闭环系统状态 2 响应对比曲线

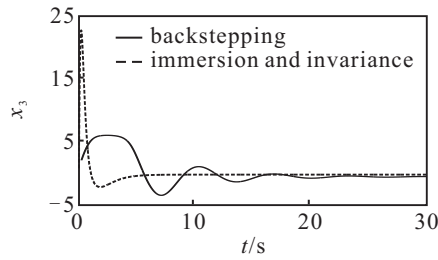


图4 闭环系统状态3响应对比曲线

4 结论

本文利用系统浸入和流形不变方法,对含有 TCSC 的单机无限总线系统设计状态反馈控制器,保证了闭环系统的稳定性和轨迹的有界性.在设计过程中,利用映射思想建立了目标系统与所研究对象之间的联系,设计所得控制律使得所选流形是不变和吸引的,保证了限制在流形上的闭环系统动态与目标系统动态一致性.仿真结果表明了所设计控制器是有效的,同时使得闭环系统具有较好的暂态稳定性能,且在收敛速度等方面优于 backstepping 方法所设计的常规控制器,能够快速达到平衡状态.

实际上,控制效果的好坏与目标函数的选取有很大的关系,一个好的目标函数的选择决定了控制器的控制效果.因此如何选择更好的目标函数,设计更好控制性能的控制器的本设计方法需要重点考虑的一个方面.然而,目前对于目标函数的选择还没有一个统一的方法,这就需要根据实际物理背景或者专家经验来选取,这也是该设计方法的一个难点.

参考文献(References)

- [1] Farsangi M M, Song Y H, Lee K Y. Choice of FACTS device control inputs for damping interarea oscillations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(2): 1135-1143.
- [2] 孙元章, 焦晓红, 申铁龙. 电力系统非线性鲁棒控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 194-213.
(Sun Y Z, Jiao X H, Shen T L. Nonlinear robust control of power system[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 194-213.)
- [3] Taranto G N, Chow J H. A robust frequency domain optimization technique for tuning series compensation damping controllers[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(3): 1219-1225.
- [4] Zhao Q H, Jiang J. A TCSC damping controller design using robust control theory[J]. Int J of Electrical Power and Energy Systems, 1998, 20(1): 25-33.
- [5] Son K M, Park J K. On the robust LQG control of TCSC for damping power system oscillations[J]. IEEE Trans on Power System, 2000, 15(4): 1306-1312.
- [6] Wang Y Y, Tan Y L. Robust nonlinear coordinated control for power systems[J]. Automatica, 1996, 64(4): 611-618.
- [7] Li X Y. Nonlinear controller design of the thyristor controlled series compensation for damping inter-area power oscillation[J]. Electric Power Systems Research, 2006, 76 (12): 1040-1046.
- [8] Li W L, Jing Y W, Dimirovski G M, et al. Nonlinear robust control based on adaptive back-stepping design for thyristor controlled series compensator[C]. IEEE CCA 03 Conf. Turkey, 2003, 1: 296-300.
- [9] Ishimaru M, Yokoyama Ryuichi, Shirai G, et al. Robust thyristor-controlled series capacitor controller design based on linear matrix inequality for a multi-machine power system[J]. Int J of Electrical Power and Energy Systems, 2002, 24(8): 621-629.
- [10] Guan T Q, Mei S W. A L2-gain disturbance attenuation controller of the static phase shifter[J]. Automation of Power Systems, 2001, 25(1): 15-18.
- [11] 张靠社, 张增强, 杨宝杰. 基于 Hamilton 能量函数含 TCSC 的电力系统非线性控制[J]. 陕西电力, 2009, 3(1): 23-26.
(Zhang K S, Zhang Z Q, Yang B J. Nonlinear control for power system with TCSC based on Hamiltonian energy function[J]. Shanxi Electric Power, 2009, 3(1): 23-26.)
- [12] Astolfi A, Ortega R. Immersion and invariance: A new tool for stabilization and adaptive control of nonlinear systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2003, 48(4): 590-606.
- [13] Jing Y W, Li S T, Liu X M. Dynamic output feedback stabilization for discrete-time nonlinear systems based on immersion and invariance[J]. J of Computational Information Systems, 2012, 8(15): 6249-6255.
- [14] Li S T, Liu X M, Dong X J, et al. A novel controller for a class of nonlinear systems via immersion and invariance[J]. Int J of Innovative Computing, Information and Control, 2013, 9(8): 3463-3470.
- [15] Yuan R X, Ruan Y, Hu P. Nonlinear excitation controller design for power systems: An immersion and invariance approach[J]. J of Control Theory and Application, 2012, 10(4): 554-558.

(责任编辑: 郑晓蕾)