

TCSC 自适应逆推控制器设计

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: 针对可控串联补偿器 TCSC(Thyristor Controlled Series Compensator)的动态过程和发电机阻尼系数不能精确测量的情况,将含有 TCSC 的单机无穷大系统用一个三阶微分方程表示,用自适应逆推方法设计了 TCSC 稳定控制器。在系统模型中考虑了 TCSC 的动态过程,同时保留了系统的非线性特性,运用自适应增益控制律进行参数的实时估计。仿真结果表明设计的 TCSC 稳定控制器能快速抑制振荡,保证单机无穷大系统的暂态稳定。

关键词: TCSC; 暂态稳定; 自适应逆推方法; 不确定参数

中图分类号: TM 712; O 231.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2005)04-0059-03

0 引言

可控串联补偿器 TCSC(Thyristor Controlled Series Compensator)用于电力系统中,具有提高高压远距离线路的传输容量,提高系统稳定性,阻尼次同步振荡(SSR)和低频振荡,连续调节和控制潮流等功能。然而,TCSC 这些效益的取得却与 TCSC 控制器有关。文献[1,2]采用了 PID,直接反馈线性化(DFL)结合线性最优控制等方法设计了 TCSC 控制器,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,理论上这一类方法不具备对系统模型和参数不确定性的鲁棒性^[3]。电力系统实际运行中存在各种不确定性,比如只能采用简化模型或模型参数的不确定性或不确定干扰,因此强鲁棒性的稳定控制研究显得极为重要。文献[4]提出的基于受控哈密顿系统理论,采用自适应 L_2 增益控制设计方法设计了 TCSC 的自适应 L_2 增益控制,对于参数不确定和干扰抑制具有强鲁棒性。但是该方法理论性强,设计比较复杂。

逆推设计方法是一种系统的非线性控制设计方法,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受扰参数不确定非线性系统的渐近稳定性^[5],从而对系统参数的变化具有很好的鲁棒性,同时该方法不需要对原系统进行任何线性化,因而可以完全保留原非线性系统的非线性特性,且设计过程简洁。文献[6]虽然考虑了发电机阻尼系数的不确定性,利用逆推设计方法与自适应控制机理相结合设计了 TCSC 控制器,但是没有考虑 TCSC 本身的

动态过程,相对比较简单,而且没有给出仿真结果,显得说服力不够。本文考虑了 TCSC 本身的动态过程,将含 TCSC 的单机无穷大系统用一个三阶微分方程表示,利用自适应逆推方法设计 TCSC 稳定控制器。

1 含 TCSC 的单机无穷大系统模型

将 TCSC 等值成一个阻值可以改变的元件,含 TCSC 的单机无穷大系统等值电路如图 1 所示。

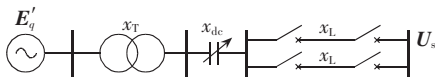


图 1 含 TCSC 的单机无穷大系统等值电路
Fig.1 Equivalent circuit of a single-machine infinite-bus system with TCSC

TCSC 本身的动态过程利用一阶惯性环节等效,利用文献[4]提供的 TCSC 单机无穷大模型如下:

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} &= (\omega_0 / \tau) P_m - (D / \tau) (\omega - \omega_0) - (\omega_0 / \tau) E'_q U_s y_{dc} \sin \delta \\ \dot{y}_{dc} &= (-y_{dc} + y_{des} + u_{dc}) / \tau_{dc} \end{aligned} \tag{1}$$

式中 δ 为转子角; ω 为角速度; $\omega_0 = 2\pi f_0$; P_m 为恒定的输入机械功率; τ 为惯性时间常数; D 为阻尼系数; τ_{dc} 为 TCSC 的惯性时间常数; U_s 为无穷大母线电压, $U_s = 1.0$ p.u.; $y_{dc} = 1/(x'_{ds} - x_{dc})$, 为整个系统的导纳, y_{des} 为其稳态值, x_{dc} 为 TCSC 的等值电抗, $x'_{ds} = x'_d + x_T + x_L/2$, x'_d 为发电机 d 轴暂态电抗, x_T 为变压器漏抗, x_L 为线路电抗; E'_q 为 q 轴暂态电势; u_{dc} 为控制量。

2 逆推自适应控制器设计

因发电机阻尼系数难以准确测量,所以式(1)是一个参数不确定的非线性系统,不对式(1)所示的非

线性系统做任何线性化处理,这里利用自适应逆推方法设计 TCSC 稳定控制器。

令 $x_1 = \delta - \delta_0, x_2 = \omega - \omega_0, x_3 = y_{\text{des}} - y_{\text{des}}$, 则式(1)可转化为

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= k_1 P_m + k_2 x_2 + k_3 (x_3 + y_{\text{des}}) \sin(x_1 + \delta_0) \\ \dot{x}_3 &= (-x_3 + u_{\text{dc}}) / \tau_{\text{dc}}\end{aligned}\quad (2)$$

式中 $k_1 = \omega_0 / \tau; k_2 = -D / \tau; k_3 = -\omega_0 E'_q U_s / \tau$ 。

这是一个三阶系统,其自适应逆推控制器的设计需要 3 步,在第 i 步,中间控制量 α_i 要通过选择合适的 Lyapunov 函数 $V_i(t)$ 确定。

a. 第 1 步: 选择 $z_1 = x_1, z_2 = x_2 - \alpha_1$, 则

$$\dot{z}_1 = \dot{x}_1 = z_2 + \alpha_1 \quad (3)$$

α_1 是一个需要设计的控制量,运用 α_1 作为控制量使得如式(3)所定义的 z_1 子系统稳定。选择如下的 Lyapunov 函数:

$$V_1(t) = z_1^2 / 2 \quad (4)$$

则其对时间的导数为

$$\dot{V}_1(t) = z_1 z_2 + z_1 \alpha_1 \quad (5)$$

令 $\alpha_1 = -c_1 x_1 = -c_1 z_1, c_1 > 0$, 则

$$\dot{V}_1(t) = z_1 z_2 - c_1 z_1^2$$

当 $z_2 = 0$ 时, $\dot{V}_1(t) < 0$ 。

b. 第 2 步: 令 $z_3 = x_3 - \alpha_2$, 则

$$\begin{aligned}\dot{z}_2 &= \dot{x}_2 + c_1 \dot{x}_1 = k_1 P_m + k_2 x_2 + \\ &k_3 (x_3 + y_{\text{des}}) \sin(x_1 + \delta_0) + c_1 z_2 - c_1^2 z_1 =\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&k_1 P_m + (\hat{k}_2 + c_1)(z_2 - c_1 z_1) + \\ &k_3 (z_3 + \alpha_2 + y_{\text{des}}) \sin(x_1 + \delta_0) + \\ &(k_2 - \hat{k}_2)(z_2 - c_1 z_1)\end{aligned}$$

选择如下的 Lyapunov 函数:

$$V_2(t) = V_1(t) + \frac{1}{2} z_2^2 + \frac{1}{2r} (k_2 - \hat{k}_2)^2$$

则其对时间的导数为

$$\begin{aligned}\dot{V}_2(t) &= -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 + z_2 \dot{z}_2 - \\ &(1/r)(k_2 - \hat{k}_2) \dot{\hat{k}}_2 = -c_1 z_1^2 + \\ &z_2 [z_1 + k_1 P_m + (\hat{k}_2 + c_1)(z_2 - c_1 z_1) + \\ &k_3 (z_3 + \alpha_2 + y_{\text{des}}) \sin(x_1 + \delta_0)] + \\ &(1/r)(k_2 - \hat{k}_2) [-\dot{\hat{k}}_2 + r z_2 (z_2 - c_1 z_1)]\end{aligned}$$

选择

$$\dot{\hat{k}}_2 = r z_2 (z_2 - c_1 z_1) \quad (6)$$

式中 $\hat{k}_2$ 是参数 k_2 的估计值。

利用式(6)所示的自适应增益控制律对参数 k_2 进行实时估计, $r > 0$, 为自适应增益系数。

令 $n_1 = k_3 \sin(x_1 + \delta_0)$, 选择

$$\begin{aligned}\alpha_2 &= -y_{\text{des}} - [z_1 + k_1 P_m + (\hat{k}_2 + c_1) \times \\ &(z_2 - c_1 z_1) + c_2 z_2] / n_1, \quad c_2 > 0\end{aligned}$$

由此

$$\dot{V}_2(t) = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 + n_1 z_2 z_3$$

当 $z_3 = 0$ 时, $\dot{V}_2(t) < 0$ 。

$$\begin{aligned}\dot{z}_2 &= n_1 z_3 - z_1 - c_2 z_2 + (k_2 - \hat{k}_2)(z_2 - c_1 z_1) \\ \dot{z}_3 &= \dot{x}_3 - \dot{\alpha}_2 = (-x_3 + u_{\text{dc}}) / \tau_{\text{dc}} - \left(\frac{\partial \alpha_2}{\partial z_1} \dot{z}_1 + \frac{\partial \alpha_2}{\partial z_2} \dot{z}_2 \right)\end{aligned}$$

c. 第 3 步: 令 $V_3(t) = V_2(t) + z_3^2 / 2$, 则

$$\begin{aligned}\dot{V}_3(t) &= \dot{V}_2(t) + z_3 \dot{z}_3 = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 + \\ &n_1 z_2 z_3 + z_3 [(-x_3 + u_{\text{dc}}) / \tau_{\text{dc}} - \\ &\left(\frac{\partial \alpha_2}{\partial z_1} \dot{z}_1 + \frac{\partial \alpha_2}{\partial z_2} \dot{z}_2 \right)] \\ u_{\text{dc}} &= x_3 + \tau_{\text{dc}} \left[\left(\frac{\partial \alpha_2}{\partial z_1} \dot{z}_1 + \frac{\partial \alpha_2}{\partial z_2} \dot{z}_2 \right) - \right. \\ &\left. n_1 z_2 - c_3 z_3 \right] \quad c_3 > 0\end{aligned}\quad (7)$$

$$\dot{V}_3(t) = \dot{V}_2(t) + z_3 \dot{z}_3 = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 - c_3 z_3^2 < 0 \quad (8)$$

$$\dot{z}_3 = -n_1 z_2 - c_3 z_3$$

于是得到闭环的受控系统为

$$\begin{aligned}\dot{z}_1 &= z_2 - c_1 z_1 \\ \dot{z}_2 &= n_1 z_3 - z_1 - c_2 z_2 + (k_2 - \hat{k}_2)(z_2 - c_1 z_1) \\ \dot{z}_3 &= -n_1 z_2 - c_3 z_3 \\ \dot{\hat{k}}_2 &= r z_2 (z_2 - c_1 z_1)\end{aligned}\quad (9)$$

由式(8)可知,受控系统(9)可以获得渐近稳定。

由式(2)(7)(9)以及 α_2 的表达式可知,所设计的控制器为

$$\begin{aligned}u_{\text{dc}} &= x_3 + \tau_{\text{dc}} \{ -[r x_2^3 + r c_1 x_1 x_2^2 + (\hat{k}_2 + c_1 + c_2) \dot{x}_2 + \\ &(1 + c_1 c_2) x_2] / n_1 + [(c_1 c_2 + 1) x_1 + \\ &(\hat{k}_2 + c_1 + c_2) x_2 + k_1 P_m] n_2 x_2 / n_1^2 - \\ &n_1 (x_2 + c_1 x_1) - c_3 x_3 - c_3 [y_{\text{des}} + [(c_1 c_2 + 1) x_1 + \\ &(\hat{k}_2 + c_1 + c_2) x_2 + k_1 P_m] / n_1] \} \\ n_2 &= k_3 \cos(x_1 + \delta_0)\end{aligned}\quad (10)$$

从控制器的表达式上看,控制器比较复杂,这是由于没有进行线性化的原因,因而保留了系统的原有非线性特性,但是设计过程很简洁。

3 仿真分析

仿真系统的结构如图 1 所示,参数分别为^[4]: $\tau = 12.922$ s, $\tau_{\text{dc}} = 0.05$ s, $x'_d = 0.104$ 5 p.u., $x_T = 0.029$ 2 p.u., $x_L = 0.053$ 2 p.u., $U_s = 1.0$ p.u.。

仿真中,自适应增益参数 $r = 0.1$; 参数估计初值 $\hat{k}_2 = 0, D = 1$, 该值选取大小不影响仿真结果; 初始运行点为: $\delta_0 = 0.229$ 8 rad, $E'_q = 1.066$ 79 p.u.。考虑 $t = 0$ 时,在某条线路的始端发生三相短路, $t = 0.10$ s 时切除故障线路。仿真结果见图 2,结果表明发生短路的电力系统在 TCSC 控制器的作用下很快进入到一个新的稳定状态。由于式(6)所确定的自适应控制律可以对实际系统的阻尼系统系数进行估计,所以若

原系统的阻尼系数不是假设的 $D=1$, 所设计的控制器也具有同样的控制效果, 所以该控制器具有对不确定系统参数的鲁棒性。

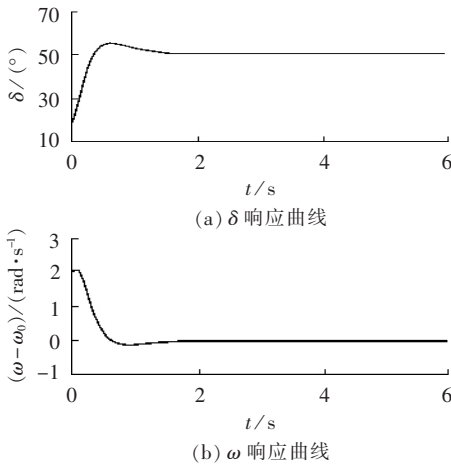


图2 TCSC 仿真结果

Fig.2 Simulative results of TCSC

4 结论

考虑TCSC本身的动态过程和发电机阻尼系数不能精确测量的情况, 本文利用自适应逆推方法设计了TCSC稳定控制器。由于没有对原非线性系统做任何线性化, 因此完整保留了系统的非线性特性, 当然控制器在形式上显得有些复杂, 但设计过程比较简单。该控制器考虑到了电力系统参数(如阻尼系数)的不确定性, 使得控制器对系统参数变化具有很强的鲁棒性。从设计过程可以看出该控制器可以保证电力系统在Lyapunov意义下的渐近稳定, 而且, 计算机仿真结果表明其能保证电力系统的暂态稳定, 且响应速度快。

参考文献:

[1] TSO S K, LIANG J, ZHOU X X. Coordination of TCSC and SVC for improvement of power system performance with NN-based parameter adaptation[J]. **Electrical Power**

and Energy Systems, 1999, 21(4): 235–244.

- [2] SRIVASTAVA P C, GHOSH A, KUMAR S V J. Model-based control design of a TCSC-compensated power system[J]. **Electrical Power and Energy Systems**, 1999, 21(4): 299–307.
- [3] 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 Qing-hua, JIANG Lin. Survey on nonlinear control theory and its application in power system[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2001, 25(3): 1–10.
- [4] 刘前进, 孙元章, 宋永华, 等. FACTS的PCH模型与自适应 L_2 增益控制(二)应用篇[J]. **电力系统自动化**, 2001, 25(16): 1–5.
- LIU Qian-jin, SUN Yuan-zhang, SONG Yong-hua, et al. PCH models of FACTS with adaptive L_2 gain control. Part two: Application[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2001, 25(16): 1–5.
- [5] 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.
- [6] 井元伟, 李文磊, 刘晓平, 等. TCSC的非线性逆推设计[J]. **东北大学学报(自然科学版)**, 2003, 24(1): 4–6.
- JING Yuan-wei, LI Wen-lei, LIU Xiao-ping, et al. Nonlinear backstepping design for TCSC[J]. **Journal of Northeastern University(Natural Science)**, 2003, 24(1): 4–6.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

王宝华(1968–), 男, 江苏海安人, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为分岔、混沌控制, 电力系统非线性控制(E-mail: wangbaohua@sohu.com);

杨成梧(1936–), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 博士研究生导师, 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, 江苏常州人, 副教授, 硕士, 主要研究方向为电力系统运行与控制。

Design of adaptive backstepping controller for TCSC

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

(1. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 210013, China)

Abstract: A single-machine infinite-bus system with TCSC(Thyristor Controlled Series Compensator), in which the dynamic process of TCSC and damping coefficient of generator are uncertain, is represented by a three-order differential equation. A TCSC stability controller is designed based on adaptive backstepping method. The dynamic process of TCSC is considered in the system model and the nonlinear characteristic is reserved. An adaptive gain control law is applied to real-time parameter estimation. Simulative results show that the proposed controller suppresses oscillation rapidly and ensures the transient stability of single-machine infinite-bus system.

This project is supported by Natural Science Research Foundation of Jiangsu Province Higher Education(03KJB470035) and (04KJD470085).

Key words: TCSC; transient stability; adaptive backstepping method; uncertain parameter