

文章编号:1671-6833(2007)01-0026-04

# 多机系统 TCSC 非线性 PID 控制器研究

王克文<sup>1</sup>, 朱永胜<sup>1</sup>, 董 燕<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 中原工学院 电子信息学院, 河南 郑州 450007)

**摘要:** TCSC 阻抗控制是实现 TCSC 其他控制功能的基础, 而系统层控制在一定的控制策略下对电力系统的目标参数进行及时有效地反映. 结合非线性控制和 PID 控制的优点, 采用非线性控制作为系统层控制, PID 控制作为中层控制, 设计了控制器, 其控制策略采用本地信息, 不依赖于系统的精确模型. 在 Matlab/Simulink 仿真环境下搭建两区域四机系统进行仿真. 结果表明, 该控制器在提高系统暂态稳定性方面有很好的作用.

**关键词:** 多机系统; TCSC; 非线性; PID

**中图分类号:** TM 743 **文献标识码:** A

## 0 引言

基于晶闸管的可控串联补偿装置 (Thyristor Controlled Series Compensator, TCSC) 是近年来串联补偿新技术的代表, 是灵活交流输电系统 (Flexible AC Transmission Systems, FACTS) 的主要组成部分. 在潮流控制, 提高系统稳定性方面发挥着重要作用<sup>[1]</sup>.

与早期研究注重 TCSC 的建模不同, 近期的研究多集中在应用各种线性和非线性理论设计高性能控制器方面<sup>[2,3]</sup>. 电力系统是一个强非线性系统, 采用线性控制即在运行点局部采用近似线性化方法, 当系统受到扰动偏离所选状态点较远时, 可能会出现鲁棒性差的情况. 而基于微分几何法的非线性控制采用非线性状态反馈和恰当的坐标变化, 在一定条件下, 可以对系统进行精确线性化<sup>[4]</sup>, 在系统受到扰动后能保证系统的稳定性, 具有良好的动态品质. 另一方面, 目前已经有多种控制方法应用到 TCSC 的暂态稳定研究中. 但是在实际工程中, 由于 TCSC 的可调范围有限, 使很多只考虑系统层控制策略的控制方法难以实现, 加之有些方法过于复杂, 实际应用仍然以 PID 控制为主.

笔者结合非线性控制和 PID 控制的优点, 采用非线性控制作为系统层控制, PID 控制作为中

层控制, 设计了控制器, 并在 Matlab/Simulink 仿真环境下进行仿真. 结果表明, 该控制器在提高系统暂态稳定性方面有很好的作用.

## 1 TCSC 的基本原理与数学模型

TCSC 模块由一个串联电容器 C 和一个晶闸管控制的电抗器 L 并联组成, 如图 1 所示, 其中断路器 (CB) 和金属氧化物可变电阻器 (MOV) 是与串联电容器一起安装的保护设备.

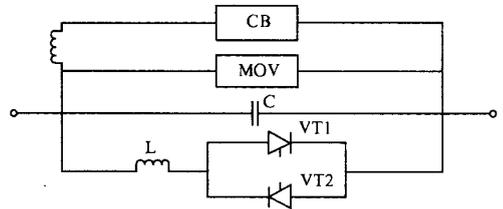


图 1 TCSC 模块

Fig. 1 TCSC module

TCSC 的工作原理与具有可变电抗的并联 LC 电路相似. 在并联 LC 电路的电感支路中串联一对反并联的晶闸管开关, 通过适当地改变触发角改变晶闸管支路电流, 等效于改变了该支路的电抗值, 从而改变了 TCSC 的等效基波阻抗. TCSC 模块的等效阻抗为 (LC 回路):

$$Z_{eq} = \left( \frac{1}{j\omega C} \right) \parallel j\omega L = -j \frac{1}{\omega C - 1/\omega L} \quad (1)$$

收稿日期:2006-11-06; 修订日期:2006-11-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50177028).

作者简介:王克文(1964-),男,山西平陆人,郑州大学教授,博士,主要从事电力系统稳定性分析与控制研究.

通过改变  $\omega L$  的大小,即可使整个并联回路体现容性或者感性电抗。TCSC 的基波电抗可通过理论计算得<sup>[5]</sup>

$$X_{TCSC} = K_{\beta} X_C \quad (2)$$

式中:  $X_C = -\frac{1}{\omega C}$ ;  $\beta = \pi - \alpha$ ;  $\lambda = \omega_0/\omega$ ;

$$K_{\beta} = 1 + \frac{2}{\pi} \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 1} \times \left[ \frac{2 \cos^2 \beta}{\lambda^2 - 1} (\lambda \tan \lambda \beta - \tan \beta) - \beta - \frac{\sin \beta}{2} \right].$$

可见,通过改变晶闸管的触发角  $\alpha$  可以改变  $X_{TCSC}$ ,从而使线路等值阻抗成为可控参数。在一定控制策略作用下,可以改变线路的潮流以及其他电气量。

## 2 TCSC 非线性 PID 控制器

TCSC 的控制系统分为三部分:上层控制系统,中层控制系统和底层控制系统。其中上层控制系统对电力系统的目标参数进行及时的反映,并根据一定的控制策略和算法,产生被控目标参数,如阻抗等,又称系统层控制。中层控制系统对目标参数进行及时的跟踪,起到承上启下起的作用。而底层控制系统负责触发晶闸管模块,对系统的电气参数进行在线调整,形成闭环控制。本文由非线性控制器计算出参考阻抗,并由 PID 控制器进行跟踪,采用本地信号进行控制,具体模型见图 2。

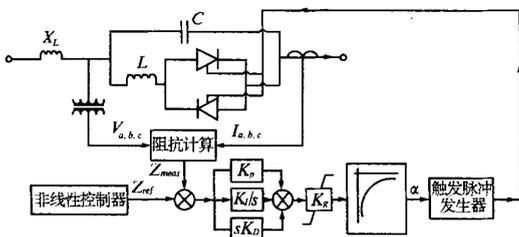


图 2 TCSC 控制模型

Fig. 2 Model of the TCSC control system

### 2.1 PID 阻抗控制

PID 控制作为最早发展的控制策略之一,算法简单,鲁棒性和可靠性高,而且各个控制器参数有明显的物理意义,调整方便。应用其进行阻抗控制,可以明显改善控制系统的动态性能。PID 各校正环节的作用如下<sup>[6]</sup>:

(1) 比例环节:成比例的反映控制系统的偏差信号,偏差一旦产生,控制器立即产生作用,以万方数据

减少偏差。

(2) 积分环节:主要用于消除静差,提高系统的无差度,积分作用的强弱取决于积分时间常数。

(3) 微分环节:反映误差信号的变化趋势(变化速率),并能够在偏差信号变得太大之前,在系统中引入一个有效的早期修正信号,从而加快系统的动作速度,减少调节时间。

数字式 PID 控制器的控制算式为

$$u(k) = k_c \left\{ e(k) + \frac{T_0}{T_i} \sum_{i=0}^k e(i) + \frac{T_0}{T_D} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (3)$$

式中:  $K_c$  为控制器增益;  $T_i$  为积分时间常数;  $T_D$  为微分时间常数;  $T_0$  为采样周期;  $e(k)$  测量阻抗与命令之差;  $k$  为周期序数。为了描述方便,把式(3)可改写为

$$u(k) = K_p \times e(k) + K_I \sum_{i=0}^k e(i) + K_D [e(k) - e(k-1)] \quad (4)$$

式中:  $K_p$ 、 $K_I$  和  $K_D$  分别为比例系数、积分系数和微分系数;  $\sum_{i=0}^k e(i)$  为误差累加器,在每次阻抗阶跃时,该累加器必须清零。

图 3 是 PID 阻抗控制器的仿真结果图,0 ~ 0.5 s 内 TCSC 被断路器 CB 短接,不投入运行,0.5 s 时 TCSC 投入,参考阻抗设置为 1 倍基波容抗,2.5 s 时向下阶跃到 0.95 倍。图中虚线为命令阻抗,实线为测量阻抗。可见,在阻抗上下阶跃时,该控制器均能较好的满足要求,超调小,震荡时间短,体现了一定的鲁棒性。

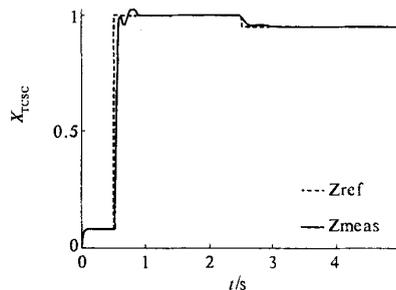


图 3 PID 阻抗控制效果

Fig. 3 Response of PID impedance controller

### 2.2 基于微分几何理论的上层控制器设计

考虑如图 4 所示的单机无穷大系统,发电机采用经典的二阶模型,则系统可以按以下的非线性状态方程表示。

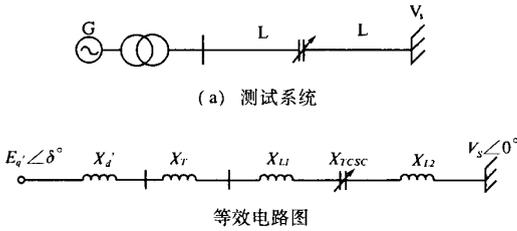


图4 单机无穷大系统  
Fig.4 Single machine infinite bus system

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{H} \left( P_m - \frac{D}{\omega_0} (\omega - \omega_0) - \frac{E'_q V_s}{X_\Sigma} \sin\delta \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $X_\Sigma = X'_d + X_r + X_{L\Sigma} + X_{rcsc}$ .

选择控制量:  $u = 1/X_\Sigma$ , 则(5)式可写成仿射非线性系统形式

$$\dot{X} = f(X) + g(X)u \quad (6)$$

此处,  $X = [\omega, \delta]^T$ ,

$$f(X) = \begin{bmatrix} \frac{\omega_0}{H} \left( P_m - \frac{D}{\omega_0} (\omega - \omega_0) \right) \\ \omega - \omega_0 \end{bmatrix},$$

$$g(X) = \begin{bmatrix} -\frac{\omega_0}{H} E'_q V_s \sin\delta \\ 0 \end{bmatrix}.$$

根据非线性系统的微分几何理论,在文献[4]给定的条件下,可将仿射非线性系统(6)转化为布鲁诺夫斯基标准型

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = \nu \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $z_1 = \delta - \delta_0, z_2 = \omega - \omega_0$ , 满足二次型性能指标的最优控制律为  $\nu = -KZ$ , 并有

$$\tilde{f}(X) = J_T(X)f(X) = \begin{bmatrix} \frac{\omega_0}{H} \left( P_m - \frac{D}{\omega_0} (\omega - \omega_0) \right) \\ \omega - \omega_0 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{g}(X) = J_T(X)g(X) = \begin{bmatrix} -\frac{\omega_0}{H} E'_q V_s \sin\delta \\ 0 \end{bmatrix}.$$

而  $u = \frac{-\tilde{f}(X) + \nu}{\tilde{g}(X)}$ , 所以得

$$u = \frac{P_m - \frac{D}{\omega_0} + \frac{H}{\omega_0} (k_1 \Delta\delta + k_2 \Delta\omega)}{E'_q V_s \sin\delta} \quad (8)$$

将  $X_{rcsc}$  带入控制量表达式, 即可解出

$$X_{rcsc} = \frac{E'_q V_s \sin\delta}{P_m - \frac{D}{\omega_0} + \frac{H}{\omega_0} (k_1 \Delta\delta + k_2 \Delta\omega) - X'_d - X_r - X_{L\Sigma}} \quad (9)$$

万方数据

在 TCSC 的安装地点, 要获取  $E'_q, \delta, \omega$  等信号是非常难的, 文献[2]已经为这些信号本地化提供了有效的方法, 使非线性控制器在实际中应用成为可能.

### 3 仿真及结果分析

由于实际系统都是多台发电机并联运行的复杂系统, 有多摆失步和多模震荡等现象发生, 它们直接影响到系统的暂态稳定性. 为此本文选取四机系统, 采用本地信息进行控制, 来研究 TCSC 在系统暂态过程中的作用.

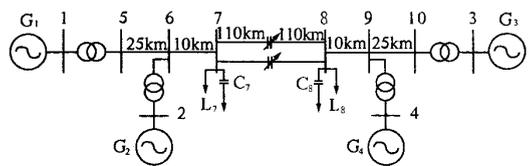


图5 两区域四机 TCSC 系统  
Fig.5 Two-area four-machine TCSC system

在该四机模型中,  $G_1, G_2$  代表区域一,  $G_3, G_4$  代表区域二. 在 Matlab/Simulink 仿真环境下, 同步发电机采用六阶模型; 变压器采用“Three-Phase Transformer (Two Windings)”模型, 接线方式为“ $\Delta(D1)/Y_g$ ”; 输电线路方面, 短距离线路采用 PI 型模型, 长距离线路采用分布参数型. 仿真采用连续型(“continuous”), 并采用“ode23t”算法.

TCSC 模块是整个仿真的关键, 本文所搭建 TCSC 模块分为晶闸管模块, 控制模块和触发模块. 晶闸管模块与图 1 所示基本一致, 由保护装置和 LC 回路组成, 考虑到三相晶闸管并非同时导通, 在 Matlab 中对三相分别建模.

作者针对图 5 所示系统在 Matlab 中作了大量的仿真试验, 包括不同的故障点, 不同的故障类型以及不同的网络结构. 在此给出了 3 组仿真结果, 故障类型采用比较严重的三相短路故障, 对应的运行方式为

(1) 母线故障: 系统双回线路稳态运行, 0.1 s 母线 7 发生三相接地短路故障, 0.2 s 故障清除, 系统回到稳态运行.

(2) 线路故障: 系统双回线路稳态运行, 0.1 s 时线路 7-8 中的一回线路发生三相接地短路故障, 故障点位于线路正中, 0.2 s 故障清除, 系统回到稳态运行.

(3) 改变网络的拓扑结构: 0~0.2 s 的系统

运行和故障情况同运行方式(2),0.2 s 故障线路被切除,系统单回线路运行。

图 6~图 8 给出了不同故障类型下各发电机的转子相对角和线路电压的响应曲线,并且对 TCSC 装置是否投入对系统的影响进行了比较。(a)、(b)为 TCSC 不投入时故障发生的系统的响应,(c)、(d)为 TCSC 投入后系统故障的响应。 $\delta_{12}$  (实线), $\delta_{13}$  (长划线), $\delta_{14}$  (虚线)分别对应  $G_1$  与  $G_2$ ,  $G_1$  与  $G_3$ ,  $G_1$  与  $G_4$  的转子相对角; $V_1$  (实线),  $V_2$  (长划线),  $V_3$  (虚线)分别对应母线 7, TCSC 安装处以及母线 8 的电压。

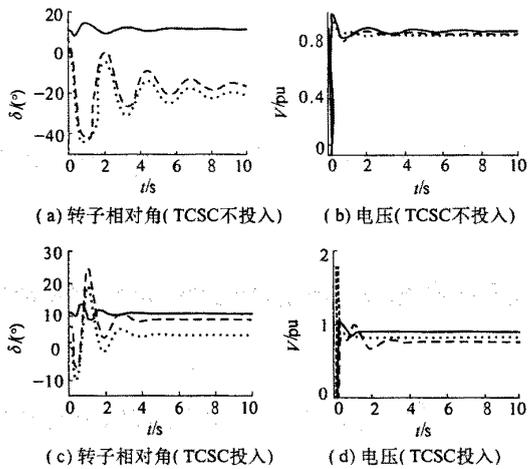


图 6 母线故障仿真结果  
Fig. 6 Simulation results of the bus fault

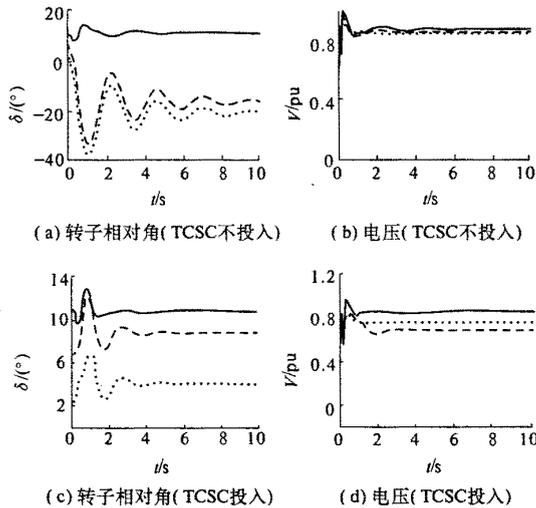


图 7 线路故障仿真结果  
Fig. 7 Simulation results of the line fault

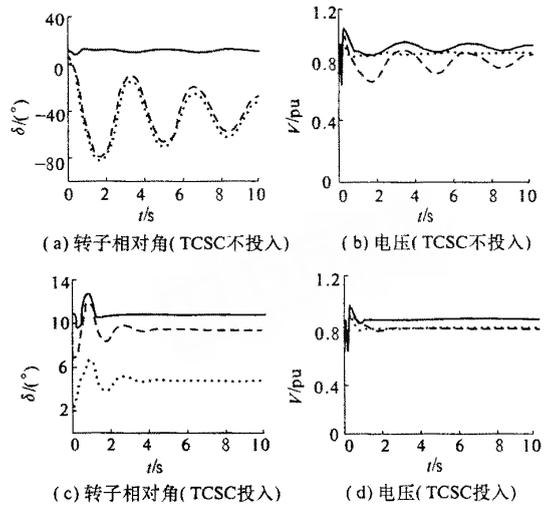


图 8 故障后单回线运行仿真结果  
Fig. 8 Simulation results of the permanent fault

由图 6~图 8 可见,该控制器在不同的故障点、故障类型,以至于网络拓扑结构改变时,都能快速的平息振荡,有效提高了系统的暂态稳定性,改善了系统的动态性能。

发电机参数:  $P_{GN} = 900 \text{ MW}$ ,  $f = 60 \text{ Hz}$ ,  $X_d = 1.305$ ,  $X'_d = 0.296$ ,  $X''_d = 0.252$ ,  $X_q = 0.474$ ,  $X'_q = 0.243$ ,  $X''_q = 0.18$ ,  $T'_d = 1.01 \text{ s}$ ,  $T''_d = 0.053 \text{ s}$ ,  $T''_{q0} = 0.1 \text{ s}$ ,  $H = 6.5 \text{ s}$ ,  $R_s = 2.5e-3$ ,  $D = 0$ ,  $p = 4$ 。

励磁系统参数:  $T_f = 20e-3 \text{ s}$ ,  $K_a = 200$ ,  $T_a = 0.001 \text{ s}$ ,  $K_e = 1$ ,  $T_e = 0 \text{ s}$ ,  $K_f = 0.001$ ,  $T_f = 0.1 \text{ s}$ ,  $E_{fmin} = 0$ ,  $E_{fmax} = 7$ 。

线路参数:  $r_{(1)} = 0.0529 \text{ } \Omega/\text{km}$ ,  $l_{(1)} = 1.4e-3 \text{ H/km}$ ,  $c_{(1)} = 8.77e-9 \text{ F/km}$ 。

控制器参数:  $k_1 = 1$ ,  $k_2 = \sqrt{2}$ ,  $K_p = 0.8$ ,  $K_i = 4.6$ ,  $K_D = 0.01$ 。

### 5 结论

作者以提高电力系统暂态稳定性和有效地阻尼系统振荡为目的,结合非线性控制和 PID 控制的优点,设计了非线性 PID 控制器,其控制策略采用本地信息,不依赖于系统的精确模型,有一定的鲁棒性。在 Matlab/Simulink 仿真环境下搭建两区域四机系统进行仿真,结果表明,该控制器在抑制阻尼,提高系统暂态稳定性方面有很好的作用。

## A New Method to Calculate the Natural Frequencies of Simply Supported Box Girder Including the Effect of Shear Lag and Shear Deformation

ZHANG Yong - jian, HUANG Ping - ming

(Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** The vibration frequency of box girder is usually calculated by the elementary beam theory, but it will lead to a large error because of the existence of shear lag effect and shear deformation. Based on energy variational principle, this paper proposes a new method to calculate the vibration of simply supported box girder, which includes the effect of shear lag and shear deformation, and the closed-form solutions to the natural frequencies are derived. It extends the usage of the methods of the past. Numerical examples show the analysis is feasible and the precision is improved greatly compared with the elementary beam theory. Finally, the effect of shear lag and shear deformation to the vibration of box girder is discussed. It is found that the natural frequencies of simply supported box girder decreases when the effects of shear lag or shear deformation is taken into account, especially in the high order frequencies' calculation, and the decrease is closely related to the width span ratio of the box girder.

**Key words:** shear lag; shear deformation; simply supported box girder; natural frequencies; variational principle

(上接第29页)

### 参考文献:

- [1] 陈准金. 可控串联补偿在提高电力系统稳定性中的作用研究[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(10): 14 - 17.
- [2] ZHOU X X, LIANG J. Nonlinear adaptive control of TCSC to improve the performance of power system[J]. IEE Proc-G, 1999, 146(3): 301 - 305.
- [3] 陈菊明, 梅生伟, 刘 锋. 多机系统 TCSC 多目标控制
- 器设计[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(21): 11 - 14.
- [4] 卢 强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 1993. 47 - 93.
- [5] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版, 2003. 212 - 216.
- [6] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003. 1 - 3.

## Study on Nonlinear PID Controller for TCSC in Multi-Machine System

WANG Ke - wen<sup>1</sup>, ZHU Yong - sheng<sup>1</sup>, DONG Yan<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Electric and Information Engineering, Zhongyuan Institute of Technology, Zhengzhou 450007, China)

**Abstract:** TCSC impedance control is the foundation of other control functions of the TCSC, and the system layer controller can show exactly the change of the objective parameters based on the given control schemes. This paper takes the advantage of both nonlinear and PID controller and designs a compositive controller using the nonlinear controller in the system layer and the PID controller in the middle layer. It uses the local information and is not dependent on the system's accurate model and parameters. The Matlab/Simulink software is used to build the detailed model of the TCSC and the two-area four-machine TCSC system. The simulation results indicate the good performance of the TCSC controller on power systems.

**Key words:** multi-machine system; TCSC; nonlinear; PID