

# 基于广域测量的滑模 TCSC 控制器设计

何飞跃, 段献忠

(华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北省 武汉市 430074)

## Design of Wide-Area Measurement Based Sliding-Mode TCSC Controller

HE Fei-yue, DUAN Xian-zhong

(College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology,  
Wuhan 430074, Hubei Province, China)

**ABSTRACT:** Wide-area measurement system (WAMS) offers a new solution for networking control of power system. The authors analyze the wide-area measurement signal based thyristor controlled series compensator (TCSC) system, establish a TCSC system model based on wide-area measurement. By means of leading in additional state variables the time-delay system is changed into discrete control system that does not contain time-delay, and by use of discrete sliding-mode control method a state feedback controller is designed. An effective method to settle the chattering in sliding-mode controller is proposed. To verify the effectiveness of the proposed method, the simulation with single machine infinite system is conducted. Simulation results show that with the proposed method the stability of power system can be effectively retained.

**KEY WORDS:** thyristor controlled series compensator (TCSC); slide variable structure control; time-delay; wide-area measurement system(WAMS); phasor measurement unit(PMU)

**摘要:** 广域测量系统为电力系统实现网络化控制提供了新的解决方案。文章对基于广域测量信号的可控串补(thyristor controlled series compensator, TCSC)系统进行了分析, 建立了基于广域测量的 TCSC 系统模型。通过引入附加状态变量, 将含有时滞的时滞系统转换为不含时滞的离散控制系统, 并采用离散滑模控制的方法设计了状态反馈控制器, 对克服控制器中的抖振问题提出了有效的解决方法。为验证所提出方法的有效性, 对单机无穷大系统进行了仿真计算, 表明该方法可以有效保持系统的稳定性。

**关键词:** 可控串补(TCSC); 变结构控制; 延迟; 广域测量系统(WAMS); 相量测量单元(PMU)

## 0 引言

可控串补(thyristor controlled series compensator, TCSC)是灵活交流输电技术的一种<sup>[1-7]</sup>, 通过改变晶

闸管的触发角来实现对TCSC阻抗的大范围平滑调节。TCSC能减少机组间的电气距离, 增加同步力矩, 提高稳定水平; 利用TCSC可以改善互联电网或地区电网之间对某些振荡模式存在的弱阻尼或负阻尼现象, 从而提高电力系统的动态稳定性<sup>[8-10]</sup>。

基于全球定位系统(global positioning system, GPS)构建的广域测量系统(wide-area measurement system, WAMS)是以同步相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)为基本组成元件的新一代电网监测系统, 使全网动态监测成为可能<sup>[11]</sup>。WAMS可将发电机的状态量实时传送到控制器, 因此WAMS为实现TCSC的优化控制提供了一种新的途径。

基于WAMS的网络化控制系统必须考虑WAMS的通信延迟, 文献[12]提出了一种考虑通信延迟的基于预测器的 $H_{\infty}$ 控制器进行阻尼控制的方法。文献[13]对不同通信介质的WAMS系统的延迟进行了分析。变结构控制理论具有对系统参数摄动及外界扰动鲁棒性强、对所控对象的模型精度要求低以及控制计算量小、实时性强和速度快等优点, 为工程界所广泛关注<sup>[14]</sup>。本文采用变结构理论实现TCSC控制器设计, 以克服广域测量带来的延迟摄动对系统性能的影响。变结构控制必须对抖振问题提出有效的解决方法, 文献[15-16]提出了利用指数趋近律设计离散系统变结构控制律的方法, 但系统会出现很大的抖振, 因此许多学者提出了改进方案。文献[17-18]都是在选定趋近律中一个参数为固定值或随某一参数变化的前提下来选择另一参数的取值范围, 以保证良好的控制效果, 这给实际应用带来了诸多不便。本文根据滑模到达条件<sup>[19]</sup>得到

了改进的离散趋近律, 求得了改进的控制器。并对单机无穷大系统进行了仿真, 结果表明该控制器能改善系统的动态品质, 快速到达滑动模式并保证较强的鲁棒性, 抑制高频抖振。

## 1 基于广域测量的 TCSC 模型

含 TCSC 的单机无穷大系统如图 1 所示。

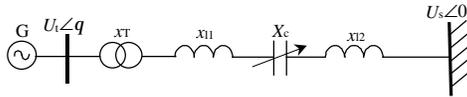


图 1 TCSC 系统接线图

Fig. 1 Connection scheme of TCSC system

图1中:  $G$ 为发电机;  $U_s$ 为无穷大系统母线电压, 其相角为0;  $U_t$ 为发电机机端电压, 其相角为 $q$ ;  $x_T$ 为变压器电抗;  $x_{11}$ 、 $x_{12}$ 为线路电抗;  $X_c$ 为TCSC的容抗。发电机采用3阶实用模型, 计及励磁系统动态及发电机凸极效应; 励磁系统为静止励磁系统并用一阶惯性环节描述; 机械功率恒定; 忽略线路的分布电容及损耗, 忽略变压器损耗, 而只计及其串联感抗。得到系统的非线性状态方程如下:

$$\begin{cases} \dot{d} = w_0(w-1) \\ \dot{w} = [P_m - P_e - D_f(w-1)]/T_j \\ \dot{E}'_q = (-E_q + E_{fe})/T'_{d0} \\ \dot{E}_{fe} = [-E_{fe} + k_e(U_{t0} - U_t)]/T_e \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $d$ 为发电机功角;  $w_0$ 为发电机同步角速度;  $w$ 为发电机转子角速度;  $P_m$ 为发电机原动机输入功率;  $P_e$ 为发电机电磁功率;  $D_f$ 为发电机阻尼转矩系数;  $T_j$ 为发电机的转子惯性时间常数;  $E'_q$ 为发电机暂态电势;  $E_q$ 为发电机空载电势;  $E_{fe}$ 为发电机励磁电压;  $T'_{d0}$ 为发电机励磁绕组的时间常数;  $k_e$ 为励磁系统的放大倍数;  $U_{t0}$ 为发电机端电压的设定值;  $T_e$ 为励磁系统的时间常数。除 $d$ 、 $w_0$ 和各时间常数外, 其余均为标么值。将式(1)在工作点线性化得到:

$$\begin{cases} \Delta \dot{d} = w_0 \Delta w \\ \Delta \dot{w} = (-k_1 \Delta d - k_2 \Delta E'_q - k_p \Delta X_c + \Delta E_{fe})/T_j \\ \Delta \dot{E}'_q = (-k_3 \Delta d - k_4 \Delta E'_q - k_q \Delta X_c + \Delta E_{fe})/T'_{d0} \\ \Delta \dot{E}_{fe} = [-\Delta E_{fe} - k_e(k_5 \Delta d + k_6 \Delta E'_q + k_v \Delta X_c)]/T_e \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} k_1 &= \partial P_e / \partial d, & k_2 &= \partial P_e / \partial E'_q, & k_p &= \partial P_e / \partial X_c \\ k_3 &= \partial E_q / \partial d, & k_4 &= \partial E_q / \partial E'_q, & k_q &= \partial E_q / \partial X_c \\ k_5 &= \partial U_t / \partial d, & k_6 &= \partial U_t / \partial E'_q, & k_v &= \partial U_t / \partial X_c \end{aligned}$$

考虑控制器采用状态反馈控制,  $\Delta X_c$ 为控制

量, 记为 $u$ ;  $\Delta P_m$ 为扰动量。设发电机所在处的 $d$ 、 $w$ 、 $E'_q$ 、 $E_{fe}$ 到TCSC控制器的传输要经历 $t$ 延迟, 可得到计及广域测量延迟的TCSC系统的连续系统模型为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t-t) + \mathbf{D}(t) \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{x} = [d \ w \ E'_q \ E_{fe}]^T, \quad \mathbf{D}(t) = [0 \ \Delta P_m / T_j \ 0 \ 0]^T$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & w_0 & 0 & 0 \\ -k_1/T_j & 0 & -k_2/T_j & 0 \\ -k_3/T'_{d0} & 0 & -k_4/T'_{d0} & 1/T'_{d0} \\ -k_e k_5/T_e & 0 & -k_e k_6/T_e & -1/T_e \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ k_p/T_j \\ k_q/T'_{d0} \\ k_v/T_e \end{bmatrix}$$

## 2 离散滑模控制器设计

### 2.1 离散化TCSC模型

在实际工程中, TCSC控制采用微型计算机利用软件来实现, 此时系统已变为采样离散系统。因此, 需要将连续TCSC控制模型离散化。考虑控制器的采样时间为 $T$ , 则控制作用的延迟可表示为

$$l = lT - m \quad (4)$$

式中:  $l$ 为大于零的整数;  $0 \leq m < T$ ,  $m=0$ 时延迟为采样周期的整数倍。对于计算机控制系统, 可认为控制器到控制对象之间通过零阶保持器连接, 即

$$u(t) = u(k) \quad (kT \leq t < (k+1)T) \quad (5)$$

式(3)的解可写为

$$\mathbf{x}(t) = e^{\mathbf{A}(t-t_0)} \mathbf{x}(t_0) + \int_{t_0}^t e^{\mathbf{A}(t-t)} \mathbf{B}u(t-l) dt + \int_{t_0}^t e^{\mathbf{A}(t-t)} \mathbf{D}(t) dt \quad (6)$$

令 $t_0 = kT$ ,  $t = (k+1)T$ , 可得

$$\mathbf{x}(k+1) = e^{\mathbf{A}T} \mathbf{x}(k) + \int_{kT}^{(k+1)T} e^{\mathbf{A}(kT+T-t)} \mathbf{B}u(t-l) dt + \int_{kT}^{(k+1)T} e^{\mathbf{A}(kT+T-t)} \mathbf{D}(t) dt \quad (7)$$

作变量代换 $h = (k+1)T - t$ , 并带入式(4)中, 则式(7)变为

$$\mathbf{x}(k+1) = e^{\mathbf{A}T} \mathbf{x}(k) + \int_0^T e^{\mathbf{A}h} \mathbf{B}u(kT+T-h-l) dh + \int_0^T e^{\mathbf{A}h} \mathbf{D}(kT+T-h) dh \quad (8)$$

下面分别讨论 $m=0$ 和 $m \neq 0$ 两种情况。

(1)  $m=0$ 时, 同时考虑到式(5)的关系, 式(8)可化为

$$\mathbf{x}(k+1) = e^{\mathbf{A}T} \mathbf{x}(k) + \int_0^T e^{\mathbf{A}h} \mathbf{B}u(k-l) dh = \mathbf{F}\mathbf{x}(k) + \mathbf{G}u(k-l) + \mathbf{G}_1 \mathbf{D}(k) \quad (9)$$

其中

$$\mathbf{F} = e^{\mathbf{A}T}, \quad \mathbf{G} = \int_0^T e^{\mathbf{A}t} dt \mathbf{B}, \quad \mathbf{G}_1 = \int_0^T e^{\mathbf{A}t} dt$$

则式(9)就是考虑控制含有延迟的离散状态方程, 为将其转化为不含延迟的标准离散系统状态方程, 引入以下状态变量:

$$\begin{cases} x_{n+1}(k) = u(k-l) \\ x_{n+2}(k) = u(k-l+1) \\ \vdots \\ x_{n+l}(k) = u(k-1) \end{cases} \quad (10)$$

考虑以上状态变量, 令增广状态变量为

$$\bar{x}(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ x_{n+1}(k) \\ \vdots \\ x_{n+l}(k) \end{bmatrix} \quad (11)$$

则式(9)变为

$$\bar{x}(k+1) = \bar{F}\bar{x}(k) + \bar{G}u(k) + \bar{G}_1D(k) \quad (12)$$

其中

$$\bar{F} = \begin{bmatrix} F & G & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & I & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & I \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ I \end{bmatrix}, \quad \bar{G}_1 = \begin{bmatrix} G_1 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

式中  $I$  为单位阵。

(2)  $m \neq 0$  时, 考虑到控制器前有零阶保持器, 因此控制量  $u(t)$  呈梯形, 式(6)的积分可分两段进行, 即

$$\begin{aligned} x(k+1) &= e^{AT}x(k) + \int_0^m e^{Ah}dhBu(k-l+1) + \\ &\int_m^T e^{Ah}dhBu(k-l) + \int_0^T e^{Ah}dhD(k) = Fx(k) + \\ &G_a u(k-l) + G_b u(k-l+1) + G_1 D(k) \end{aligned} \quad (13)$$

其中

$$F = e^{AT}, \quad G_a = \int_m^T e^{Ah}dhB, \quad G_b = \int_0^m e^{Ah}dhB$$

若令  $F(t) = e^{AT} = F(T)$ , 则

$$G_a = \int_m^T e^{Ah}dhB = e^{Am} \int_0^{T-m} e^{As}dsB = F(m)G(T-m)$$

$$G_b = \int_0^m e^{Ah}dhB = G(m)$$

仿照上述方法建立增广状态, 得到增广的标准离散系统方程为

$$\bar{x}(k+1) = \bar{F}\bar{x}(k) + \bar{G}u(k) + \bar{G}_1D(k) \quad (14)$$

其中

$$\bar{x}(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ x_{n+1}(k) \\ \vdots \\ x_{n+l}(k) \end{bmatrix}, \quad \bar{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ I \end{bmatrix}, \quad \bar{G}_1 = \begin{bmatrix} G_1 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{F} = \begin{bmatrix} F & G_a & G_b & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & I \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

## 2.2 滑模控制器设计

对于离散系统

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (15)$$

基于离散趋近律的系统控制律一般为

$$u(k) = -(CB)^{-1}\{CAx(k) - (1-qT)s(k) + eT \operatorname{sgn}[s(k)]\} \quad (16)$$

式中:  $C$  为切换超平面;  $q$  为趋近速度参数;  $s(k) = Cx(k)$  为切换函数。在式(16)中, 参数  $e$  的作用非常重要,  $e$  值减小将相对降低系统的抖振, 但  $e$  值太小会影响系统到达切换面的趋近速度。因此理想的  $e$  应该是时变的, 即系统开始运动时  $e$  值应大一些, 随着时间的增加  $e$  值应逐步减小。因此本文选择以下改进控制律:

$$\begin{aligned} u(k) &= -(CB)^{-1}\{CAx(k) - (1-qT)s(k) + \\ &\frac{|s(k)|}{2}T \operatorname{sgn}[s(k)]\} \end{aligned} \quad (17)$$

可以证明变结构控制器(17)满足离散滑动模态的存在性和到达性条件, 因此可将系统引导至滑动模态上, 即由它设计的控制系统是稳定的。

## 3 TCSC 系统时域仿真

### 3.1 仿真系统参数

将所设计的滑模控制器用于单机无穷大电力系统进行性能分析, 单机无穷大系统的参数为:  $x_d = 2.534 \text{ pu}$ ,  $x_q = 2.534 \text{ pu}$ ,  $x'_d = 0.318 \text{ pu}$ ,  $x_e = x_r + X_c + x_{11} + x_{12} = 0.83 \text{ pu}$ ,  $X_{c0} = -0.1 \text{ pu}$ ,  $D = 0$ ,  $T_j = 8$ ,  $T'_{d0} = 10$ 。初始运行工况为:  $P_0 = 0.8 \text{ pu}$ ,  $d_0 = 29.56^\circ$ ,  $U = 1 \text{ pu}$ , TCSC 阻抗可调范围为  $[0.6 \text{ pu}, -0.6 \text{ pu}]$ 。设 TCSC 控制器的采样周期为  $10 \text{ ms}$ 。

若对离散 TCSC 系统不加控制信号, 对式(9)进行特征根分析, 其特征根为  $-0.5548 + 0.1822i$ ,  $-0.5548 - 0.1822i$ ,  $1.0 + 0.0024i$ ,  $1.0 - 0.0024i$ , 可见有 2 个特征根位于单位圆外, 因此系统是不稳定的, 需要采用相关控制策略才能保证系统稳定。

### 3.2 不考虑延迟的最优控制

若不考虑广域测量的通信延迟, 按照二次型性能指标设计最优控制器, 选择适当的状态量和控制量的权矩阵, 求得最优控制器  $K$ :

$$K = [-767.02 \quad -279.32 \quad 7.631 \quad 0.0796] \quad (18)$$

设控制器采样周期为 10 ms, 同时设广域测量到控制器经历 5 ms 延迟, 功角发生 10% 的扰动, 得到系统的功角响应曲线如图 2 所示。由图 2 可见, 系统在 2 s 左右可以达到稳态。

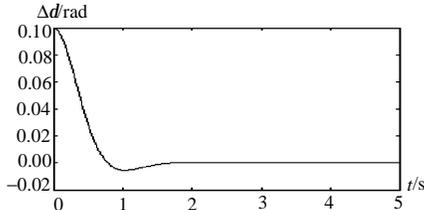


图 2 功角扰动、5 ms 延迟情况下 TCSC 系统功角响应曲线  
Fig. 2 Power angle curve in TCSC system with power angle perturbation and 5 ms delay

进一步, 当延迟达到 50 ms, 若还采用控制器(18), 系统将不能稳定, 呈发散的振荡状态, 其功角响应曲线如图 3(a)所示。从理论上说, 由于状态反馈存在延迟, 使得闭环系统的根轨迹向  $s$  平面的右半平面移动, 使系统的稳定性逐步恶化。因此采用常规的不考虑延迟的控制器不能保证基于 WAMS 的 TCSC 系统的稳定, 需要针对 WAMS 带来的通信延迟设计控制器。

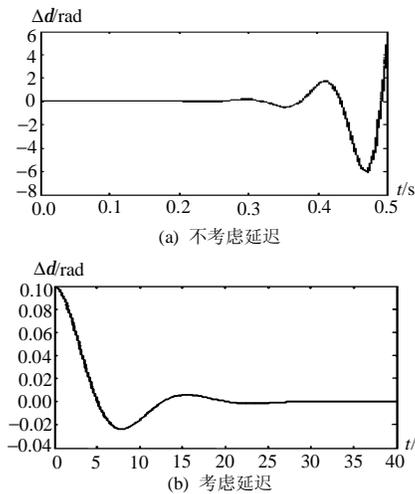


图 3 功角扰动、50 ms 延迟情况下 TCSC 系统功角响应曲线  
Fig. 3 Power angle curve in TCSC system with power angle perturbation and 50 ms delay

### 3.3 考虑延迟的离散滑模控制

由 3.2 节的仿真结果可以看出, 需要针对通信延迟采取相关的控制策略才能保证基于 WAMS 系统的 TCSC 系统稳定。对于 TCSC 这类实时控制系统, 其通信延迟为确定性延迟, 即通信延迟  $t$  有确定性的上下限范围。因此本文采用第 2 节叙述的离散滑模控制方法进行控制器设计, 并分别对传输延迟  $t$  为采样周期的整数倍及非整数倍进行仿真。

(1) 传输延迟为采样周期的整数倍。

设 TCSC 控制器的信号传输延迟为 50 ms, 按照最优化设计方法, 得到切换超平面  $C$ :

$$C = [-0.688 \quad -2.608 \quad -2.934 \quad 0.003 \quad -0.127 \quad -0.127 \quad -0.097 \quad 0.008 \quad 0.294 \quad 1] \quad (19)$$

分别进行功角和机械功率扰动的仿真。设系统功角发生 10% 扰动, 功角扰动曲线如图 3(b)所示, 可以看出系统约在 25 s 时可以达到稳定。

当系统发生 10% 机械功率扰动时, 功角响应曲线如图 4 所示, 可以看出系统约在 25 s 时可以达到稳定。

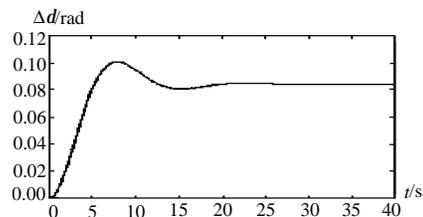


图 4 机械功率扰动、50 ms 延迟情况下 TCSC 系统功角响应曲线

Fig. 4 Power angle curve in TCSC system with mechanical power perturbation and 50 ms delay

(2) 传输延迟为采样周期的非整数倍。

设 TCSC 控制器的信号传输延迟为 55 ms, 按照最优化设计方法, 得到如下切换超平面:

$$C = [-0.055 \quad -5.501 \quad -1.079 \quad -0.005 \quad -0.093 \quad -0.106 \quad 0.170 \quad 0.879 \quad 1] \quad (20)$$

分别进行 10% 功角和 10% 机械功率扰动仿真, 可得到与图 3(b)和图 4 相似的结果。

进一步, 当广域测量的通信延迟分别为 52 ms 和 59 ms 时, 还采用式(20)所示的切换超平面, 仍然可得到类似的控制效果, 这说明滑模控制器对通信延迟具有一定的鲁棒性。因此, 对于工程实际中的 TCSC 控制系统, 其通信延迟一般具有确定性的范围, 在控制器设计过程中可针对传输延迟周期采用合适的设计方法。

### 3.4 系统抑制抖振的验证

若采用式(18)所示的控制器, 在通信延迟为 50 ms 的环境下, 进行机械功率 10% 的扰动仿真试验。为使系统尽快趋近切换超平面, 加快系统的响应速度, 选取  $e = 0.2$ ,  $q = 9$ , 得到状态反馈控制器的输出, 即 TCSC 装置阻抗相对变化值  $\Delta X_c$  的响应曲线, 如图 5(a)所示, 可以看出, 控制量存在明显的抖振现象, 这在实际工程中是不允许的。

若采用改进的式(20)所示的控制器, 在通信延

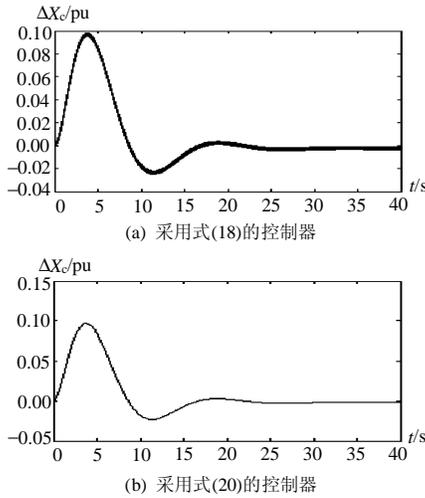


图5 机械功率扰动、50ms延迟情况下 TCSC 阻抗响应曲线

Fig. 5 Impedance response curve in TCSC system with mechanical power perturbation and 50ms delay

迟为 50 ms 的环境下, 进行机械功率 10% 的扰动仿真试验,  $\Delta X_c$  的响应曲线如图 5(b) 所示, 可以看出控制量不会出现抖振现象, 而且机械扰动也不会引起 TCSC 阻抗的静态偏移。这说明改进滑模控制器的设计方法是合理的。

### 3.5 滑模控制器实用化考虑

对变结构控制器而言, 要求所有状态可观测。 $d$ 、 $w$ 、 $E_{fe}$  状态均可实际测量, 而发电机暂态电势  $E'_q$  难以实际测量得到, 实际上, 对发电机端电压  $U_t$  有

$$U_t = \sqrt{\left(\frac{x_q U_0 \sin d}{x_e + x_q}\right)^2 + \frac{x_e E'_q}{x_e + x'_d} + \frac{x'_d U_0 \cos d}{(x_e + x'_d)^2}}$$

于是有

$$E'_q = \frac{x_e + x'_d}{x_e} \sqrt{\left(\frac{x_q U_0 \sin d}{x_e + x_q}\right)^2} - U_t^2 - \frac{x'_d}{x_e} U_0 \cos d$$

由于 WAMS 系统可以直接测量  $U_t$ 、 $d$ , 因此  $E'_q$  也可以直接测量得到, 从而控制器在实际工程中是可以实现的。

## 4 结论

本文对基于广域测量的 TCSC 系统进行了分析, 建立了包含通信延迟的 TCSC 模型, 为将含有延迟的 TCSC 模型转化为不含延迟的模型, 采用了引入附加状态变量的方法。同时, 为克服外界扰动量对系统稳定性和控制性能的影响, 提出了离散滑模控制器的设计方法。在减小离散滑模变结构中的高频抖振问题上, 采用了改进的离散趋近律方法。

为验证所提出方法的有效性, 对含有 TCSC 装置的单机无穷大系统进行了功角扰动和机械功率扰动的仿真, 结果表明系统具有较好的控制性能, 滑模控制器可以有效抑制延迟对系统稳定性的影响, 保证发电机稳定运行。

## 参考文献

- [1] 闫冬, 赵建国, 武守远. 用于 TCSC 阻抗控制的积分投切式 PID 控制方法[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 29-32.  
Yan Dong, Zhao Jianguo, Wu Shouyuan. Integration-switched PID control method for impedance control of TCSC[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 29-32(in Chinese).
- [2] 林宇锋, 徐政, 黄莹. TCSC 功率振荡阻尼控制器的设计[J]. 电网技术, 2005, 29(22): 35-39.  
Lin Yufeng, Xu Zheng, Huang Ying. Design of TCSC auxiliary controller for inter-area power oscillation damping[J]. Power System Technology, 2005, 29(22): 35-39(in Chinese).
- [3] 李亮, 江全元, 邹振宇. 多机电力系统中多台 TCSC 控制器间的交互影响研究[J]. 电网技术, 2005, 29(9): 10-14.  
Li Liang, Jiang Quanyuan, Zou Zhenyu. Research on interaction among TCSC controllers in multi-machine power system[J]. Power System Technology, 2005, 29(9): 10-14(in Chinese).
- [4] 钟胜. 与超高压输电线路加装串补装置有关的系统问题及其解决方案[J]. 电网技术, 2004, 28(6): 26-30.  
Zhong Sheng. Problems caused by adding series compensation devices to EHV transmission system and their solution[J]. Power System Technology, 2004, 28(6): 26-30(in Chinese).
- [5] 何瑞文, 蔡泽祥. 结合谐波特征的可控串补动态相量法建模与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 28-32.  
He Ruiwen, Cai Zexiang. Modeling and analysis of thyristor-controlled series capacitor with dynamic phasors considering harmonic characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 28-32(in Chinese).
- [6] 张慧媛, 姜建国, 冯宇. 可控串补装置的动态建模及数字仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 14-18.  
Zhang Huiyuan, Jiang Jianguo, Feng Yu. Research on dynamic modeling and digital simulation of TCSC[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 14-18(in Chinese).
- [7] 李亚健, 周孝信, 武守远, 等. 以可控串补抑制次同步谐振的物理模拟试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(6): 1-4.  
Li Yajian, Zhou Xiaoxin, Wu Shouyuan, et al. SSR mitigation test studies of TCSC on analog simulator[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(6): 1-4(in Chinese).
- [8] 郭春林, 童陆园. 多机系统中可控串补(TCSC)抑制功率振荡的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 1-6.  
Guo Chunlin, Tong Luyuan. Application of TCSC to damp oscillations in multi-machine system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 1-6(in Chinese).
- [9] 徐桂芝, 武守远, 王宇红, 等. 用 TCSC 装置抑制电力系统低频振荡的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 45-47.  
Xu Guizhi, Wu Shouyuan, Wang Yuhong, et al. Damping low frequency oscillation in power system by TCSC[J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 45-47(in Chinese).
- [10] Del Rosso A D, Canizares C A, Dona V M. A study of TCSC controller design for power system stability improvement[J]. IEEE

- Trans on Power Systems, 2003, 18(4): 1487-1496.
- [11] 常乃超, 兰洲, 甘德强, 等. 广域测量系统在电力系统分析及控制中的应用综述[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 46-52.  
Chang Naichao, Lan Zhou, Gan Deqiang, et al. A survey on applications of wide-area measurement system in power system analysis and control[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 46-52(in Chinese).
- [12] Ch audhuri B, Majumder R, Pal B C. Wide-area measurement-based stabilizing control of power system considering signal transmission delay[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4): 1971-1979.
- [13] Naduvathuparambil B, Valenti M C, Feliachi A. Communication delays in wide area measurement systems[C]. Proceedings of the Thirty-Fourth Southeastern Symposium on System Theory, 2002: 118-122.
- [14] 张昌凡, 王耀南. 滑模变结构的智能控制及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(3): 27-29,44.  
Zhang Changfan, Wang Yaonan. An intelligent control using sliding mode variable structure and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(3): 27-29,44(in Chinese).
- [15] 高为炳. 离散时间系统的变结构控制[J]. 自动化学报, 1995, 21(2): 154-160.  
Gao Weibing. Variable structure control of discrete-time system [J]. ACTA Automatic SINICA, 1995, 21(2): 154-160(in Chinese).
- [16] Gao Weibing, Wang Yufu, Abdollah Homaifa. Discrete-time variable structure control systems[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1995, 42(2): 117-122.
- [17] 翟长连, 吴智铭. 一种离散时间系统的变结构控制方法[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(5): 719-722.  
Zhai Changlian, Wu Zhiming. Variable structure control method for discrete time systems[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000, 34(5): 719-722(in Chinese).
- [18] 张益波, 张井岗, 陈志梅. 一种新的离散时间系统的变结构控制方法[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(11): 1524-1527.  
Zhang Yibo, Zhang Jinggang, Chen Zhimei. A new variable structure control scheme for discrete-time system[J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(11): 1524-1527(in Chinese).
- [19] 王丰尧. 滑模变结构控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.

收稿日期: 2006-07-31。

作者简介:

何飞跃(1970—), 男, 博士研究生, 研究方向为基于网络的电力系统运行与控制, E-mail: [hfy70@sina.com](mailto:hfy70@sina.com);

段献忠(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统分析、电力系统自动化等方面的研究。

(责任编辑 沈杰)

(上接第44页 continued from page 44)

- Tang Wei, Li Dianpu. Chaotic optimization for economic dispatch of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(10): 36-40(in Chinese).
- [9] 侯云鹤, 熊信良, 吴耀武, 等. 基于广义蚁群算法的电力系统经济负荷分配[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 59-64.  
Hou Yunhe, Xiong Xinyin, Wu Yaowu, et al. Economic dispatch of power systems based on generalized ant colony optimization method [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 59-64(in Chinese).
- [10] 杨俊杰, 周建中, 吴玮, 等. 改进粒子群优化算法在负荷经济分配中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 1-4.  
Yang Junjie, Zhou Jianzhong, Wu Wei, et al. Application of improved particle swarm optimization in economic dispatching[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 1-4(in Chinese).
- [11] Khawa T, Rahman A, Yasin Z M, et al. Artificial-immune- based for solving economic dispatch in power system[C]. National Power and Energy Conference, 2004.
- [12] 毛亚林, 张国忠, 朱斌, 等. 基于混沌模拟退火神经网络模型的电力系统经济负荷分配[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 65-70.  
Mao Yalin, Zhang Guozhong, Zhu Bin, et al. Economic load dispatch of power system based on chaotic simulated annealing neural network model[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 65-70(in Chinese).
- [13] 侯云鹤, 鲁丽娟, 熊信良, 等. 广义蚁群与粒子群结合算法在电力系统经济负荷分配中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 34-38.  
Hou Yunhe, Lu Lijuan, Xiong Xinyin, et al. Application of generalized ant colony optimization algorithm integrated with particle swarm optimization algorithm in economic dispatch of power system[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 34-38(in Chinese).
- [14] Timmis J, Knight T. Artificial immune system: using the immune system as inspiration for data mining[C]. // Abbass H A, Sarker R A, Newton C S. Data mining: a heuristic approach. Hershey: Idea Publishing Group, 2001: 209-230.
- [15] 张彤, 王宏伟, 王子才. 变尺度混沌优化方法及其应用[J]. 控制与决策, 1999, 14(3): 285-288.  
Zhang Tong, Wang Hongwei, Wang Zicai. Mutative scale chaos optimization algorithm and its application[J]. Control and Decision, 1999, 14(3): 285-288(in Chinese).
- [16] de Casto L N, Von Zuben F J. Learning and optimization using the clonal selection principle[J]. IEEE Trans. on Evolution Computation. 2002, 24(3): 239-251.
- [17] 卓峻峰, 赵冬梅. 基于混沌搜索的多目标模糊优化潮流算法[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 41-49.  
Zhuo Junfeng, Zhao Dongmei. A chaos optimization based algorithm for multi-objective fuzzy optimal power flow[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 41-49(in Chinese).

收稿日期: 2006-04-10。

作者简介:

蒙文川(1976—), 男, 博士研究生, 研究方向为人工智能技术在电力系统中的应用, E-mail: [superman@zju.edu.cn](mailto:superman@zju.edu.cn);

邱家驹(1944—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力系统分析和控制的研究和教学工作。

(编辑 王金芝)