

# 基于开关函数模型的 TCSC 电容电压过零点特性研究

冯宇, 董海波, 唐轶

(中国矿业大学信电学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: TCSC 电容电压的过零点特性对其工作过程有着显著的影响,这主要体现在 TCSC 的暂稳态特性、工作区域转换、特殊触发策略的采用以及同步信号选择等几个方面。该文基于 TCSC 的开关函数模型并借助 MATLAB 仿真工具,提出了研究电容电压过零点特性的数字仿真方法。通过数字仿真,分析了电容电压过零点特性对暂稳态过程、工作区域转换的影响;指出了采用特殊触发策略和不同同步信号的必要性,讨论了 TCSC 电感支路的通态等值电阻对抗控制的影响。研究结果表明,TCSC 电容电压的过零点特性比较全面地反映了 TCSC 的其他特性,可作为研究其他特性和 TCSC 控制策略的基础。

关键词: 开关函数; TCSC; 过零点特性

中图分类号: TM714.3 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)17-0006-05

## 0 引言

可控串补 (Thyristor Controlled Series Compensation, TCSC)是灵活交流输电系统 (Flexible AC Transmission System, FACTS) 技术在超高压电网应用的重要体现,其理论研究和工程应用近年来引起了广泛的关注。

文献[1]建立了能系统地描述 TCSC 变拓扑电路暂态全过程的开关函数模型,其正确性已被 ARENE 仿真软件验证。本文以该模型为基础,研究了电容电压及其分量的过零点特性。利用过零点特性分析了 TCSC 暂稳态特性,解释了 TCSC 跨区振荡的原因,给出了采用特殊触发策略和不同同步信号的理论依据,讨论了电感支路的通态等值电阻对抗控制的影响。

## 1 TCSC 的开关函数模型及电容电压的过零点分析

### 1.1 TCSC 的开关函数模型

TCSC 的电路模型如图 1 所示。电力系统正常运行时,线路电流为:

$$i(t) = I_m \cos t \quad (1)$$

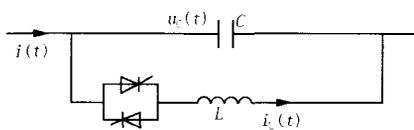


图 1 TCSC 电路结构图

Fig.1 Circuit connection of TCSC

用逻辑开关变量  $M$  表示双向反并联晶闸管的

状态<sup>[1]</sup>:

$$M = \begin{cases} 1 & \text{导通时} \\ 0 & \text{阻断时} \end{cases} \quad (2)$$

则双向反并联晶闸管的等效电阻  $R^{[1]}$ 为:

$$R = R_Z M + R_F (1 - M) \quad (3)$$

其中:  $R_Z$  为导通时的正向电阻,称为电感支路的通态等值电阻;  $R_F$  为阻断时的反向电阻。

必须指出的是:在电感元件本身的电阻不能忽略的情况下,当双向反并联晶闸管导通时,  $R_Z$  包括双向反并联晶闸管的导通电阻以及电感元件的电阻。这样做并不影响分析结果。

文献[1]给出了电容电压的解析表达式:

$$u_C(t) = u_p(t) + u_h(t) \quad (4)$$

其中:  $u_h(t)$  为自由响应,包括  $\omega_0$  分量和非周期分量;  $u_p(t)$  为强迫响应,仅含有  $\omega_0$  分量(或称工频分量)。

### 1.2 电容电压的过零点分析

电容电压 3 个分量的过零点特性各不相同。

$\omega_0$  分量是 LC 电路自身环流的结果,仅出现在双向反并联晶闸管的导通时段,其大小与 TCSC 的结构参数、触发角状态、逻辑开关动作时刻等因素有关。因此,在暂态过程中,其过零点会发生动态漂移。

非周期分量只出现在双向反并联晶闸管的阻断时段,由于电容电压的过零点只出现在导通时段,所以非周期分量对电容电压的过零点没有影响,而且非周期分量本身并不存在过零点。

分量由线路电流产生,受 TCSC 自身参数影响。与触发角状态、逻辑开关动作时刻等因素无关。

因此,其过零点不受暂态过程的影响。

所以,对电容电压过零点产生影响的主要是  $u_{C0}$  分量。 $u_{C0}$  分量的影响有限。这一结论与文献[2]的结论吻合。另外,由于非周期分量不存在过零点,所以在分析电容电压过零点特性的时候可以不考虑其影响。

## 2 数字仿真结果分析

### 2.1 数字仿真的方法及系统参数

针对 TCSC 的开关函数模型,应用 MATLAB 语言,实现 TCSC 系统的数字仿真,可以得到仿真时间段的数组  $t$ 、电容电压的数组  $u_C(t)$ 、 $u_{C0}$  分量的数组  $u_{C0}(t)$  以及  $u_{C1}$  分量的数组  $u_{C1}(t)$ 。然后分别对  $t$  与  $u_C(t)$ 、 $t$  与  $u_{C0}(t)$ 、 $t$  与  $u_{C1}(t)$  进行线性插值,求得电容电压的过零时刻数组  $t_1$ 、 $u_{C0}$  分量的过零时刻数组  $t_2$ 、 $u_{C1}$  分量的过零时刻数组  $t_3$ 。

设  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  均含有  $N$  个元素,令

$$\begin{cases} H_{1j} = t_{1j} - t_{2j} \\ H_{2j} = t_{1j} - t_{3j} \\ H_{3j} = t_{2j} - t_{3j} \end{cases} \quad (j=1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

其中  $t_{ij}$  为数组  $t_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 的第  $j$  个元素;进而得到式(6)所示的 3 个数组  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ :

$$\begin{cases} H_1 = [H_{11}, H_{12}, \dots, H_{1N}] \\ H_2 = [H_{21}, H_{22}, \dots, H_{2N}] \\ H_3 = [H_{31}, H_{32}, \dots, H_{3N}] \end{cases} \quad (6)$$

$H_1$  表示电容电压过零点相对于  $u_{C0}$  分量过零点的偏移; $H_2$  表示电容电压过零点相对于  $u_{C1}$  分量过零点的偏移; $H_3$  表示  $u_{C0}$  分量过零点相对于  $u_{C1}$  分量过零点的偏移。 $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$  不仅描述了电容电压及其分量的过零点特性,更重要的是反映出电容电压及其分量的过零点之间的相互关系。

通过仿真研究发现,在容性调节模式下, $t_{1j+1} - t_{1j}$ 、 $t_{2j+1} - t_{2j}$ 、 $t_{3j+1} - t_{3j}$  ( $j=1, 2, \dots, N-1$ ) 的值均在 10 ms 左右。这就是说,在容性调节下,电容电压及其分量的过零点偏移是很微小的。

利用 MATLAB 工具,以  $t_2$  为时间轴坐标,绘制  $H_1$  和  $H_2$  的波形图;以  $t_3$  为时间轴坐标,绘制  $H_3$  的波形图。

TCSC 系统的仿真参数为:  $C=175 \mu\text{F}$ ;  $L=9.72 \text{ mH}$ ;  $I_m=2360 \text{ A}$ ;  $R_Z=0.117 \Omega$ ;  $R_F=10 \text{ K}$ 。触发角在 1000 ms 时跃变。

### 2.2 暂态过程中的过零点特性

以电容电压做同步信号的过零点特性如图 2 所

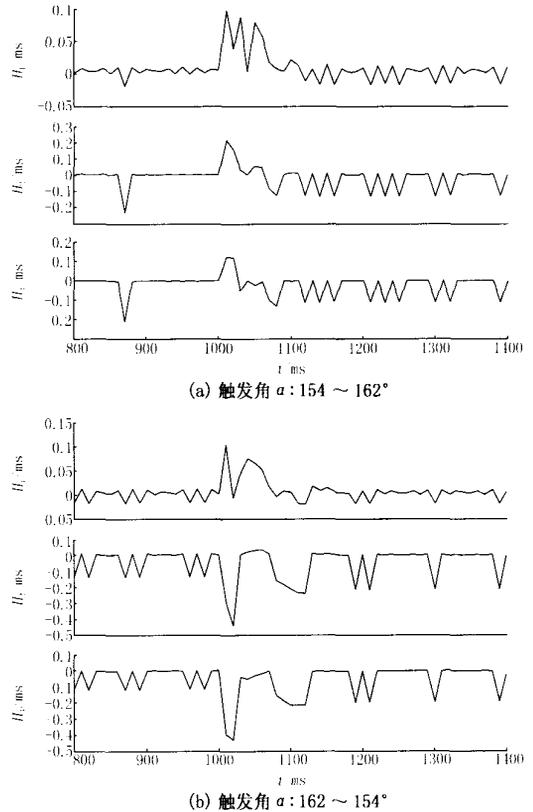


图 2 电容电压同步信号下的过零点特性

Fig. 2 Zero-crossing point characteristics for the capacitive voltage as synchronous signal

示,从中可以看出:

(1) 在稳态情况下,电容电压的过零点和  $u_{C0}$  分量的过零点十分接近,其差值  $H_1$  正负不定,表现为微小波动; $H_2$  在一定的范围内波动,如果补偿度高,则波动的幅值大,并且  $H_2$  不大于零(大于零的波动太小,可以忽略不计); $H_3$  的变化规律与  $H_2$  相同,数值上也相差不大。

(2) 在触发角跃变的暂态过程中, $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$  均经历了一个幅值突然增大,然后由大到小的衰减过程,之后进入下一个稳态。幅值的衰减时间就是 TCSC 的暂态响应时间。需要指出的是,一般情况下,多使用基波阻抗的周波数来描述暂态过程的长短,基波阻抗由全周傅立叶算法得到,单位为一个周波。而在容性调节模式下, $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$  是以半个周波为单位的。此时如果使用  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$  来描述暂态过程的长短,会比使用基波阻抗的精度高。如果基波阻抗改由半周傅立叶算法得到的话,二者的精度就一样了。

(3) 当触发角跃变程度相同时,在由低补偿度向高补偿度跃变的暂态过程中, $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$  的幅值

变化大,暂态过程长(图 2a 中的各量在 1060 ms 左右进入下一个稳态,图 2b 中的各量在 1130 ms 左右进入下一个稳态)。这就从另一个角度佐证了“向高补偿度跃变的暂态响应时间较长”的结论。

(4) 文献[2]认为:在稳态时,  $U_{c0}$  分量和  $\omega_0$  分量的过零点是重合的,而在暂态过程中,  $\omega_0$  分量的过零点则发生了偏移,随着时间的推移,该偏移量逐渐趋向于零,与  $U_{c0}$  分量的过零点重合,TCSC 进入下一个稳态。观察图 2 中的  $H_3$  可以看出,在稳态时,分量和  $\omega_0$  分量存在一定的偏移,且在一定范围内波动;而在暂态过程中,两分量过零点的偏移却经过了一个由大到小的衰减过程。也就是说:在暂态过程中,  $\omega_0$  分量的过零点相对于  $U_{c0}$  分量的过零点发生衰减振荡而最终趋于稳定。

### 2.3 工作区域转换的过零点特性

文献[3]指出:在实现容性区和感性区的跃变过程中,如果采用常规触发方式,电容电压将达到正常时的十几倍,威胁设备的安全运行。但是,文献[3]并没有对这一现象做出定量的解释。

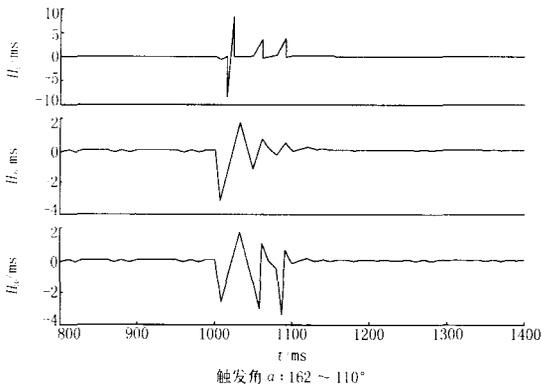


图 3 工作区域转换的过零点特性

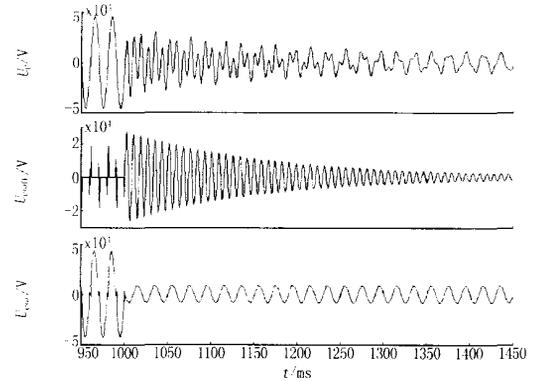
Fig. 3 Zero-crossing point characteristics for working area conversion

图 3 是工作区域跃变时的过零点特性。从中可以看出,在工作区域转换的过程中,电容电压及其分量的过零点发生了严重的偏移,其程度远大于容性区触发角跃变的情况(与图 2 相比  $H_1$  增大了几十倍,  $H_2$ 、 $H_3$  增大了 10 倍左右),加剧了暂态过程,从而产生非常大的过电压。

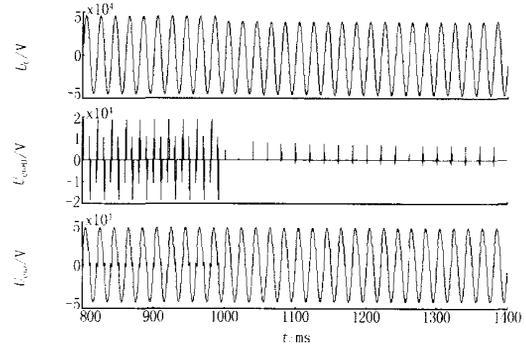
### 2.4 采用特殊触发策略的必要性和理论依据

图 4 给出了常规触发方式下从容性区跃变到 90°(即旁路模式)和 180°的仿真波形。

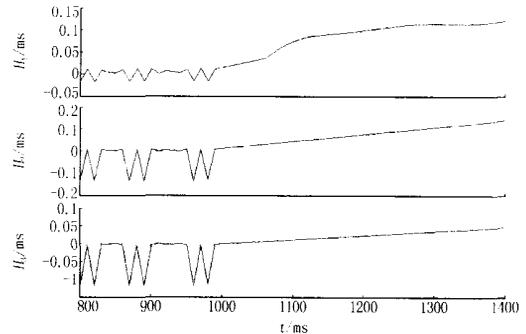
从图 4(a)可以看出:当触发角跃变到 90°后,电容电压及分量的波形发生了严重畸变,电容电压相邻过零点之间的时间差在 1000~1200 ms 的时间段



(a) 162°~90°时的电容电压、 $\omega_0$  分量及  $\omega$  分量



(b) 162°~180°时的电容电压、 $\omega_0$  分量及  $\omega$  分量



(c) 162°~180°的过零点特性

图 4 常规触发策略下触发角向 90°和 180°跃变的仿真波形

Fig. 4 Simulation wave of trigger angle from 90°stepping to 180°under conventional triggering strategy

内约为 4 ms 左右,1200 ms 以后则变为 10 ms 左右;而  $\omega_0$  分量相邻过零点之间的时间差始终在 5 ms 左右。分量相邻过零点间的时间差为 10 ms 左右。这就是说,在旁路模式下,分量的过零点不能象容性调节模式那样,经一个衰减振荡过程而最终趋于分量的过零点。所以,此时式(5)、式(6)所定义的关于过零点的对应关系也就失去了实际意义。因此,旁路模式如果采用常规触发策略是不可行的。

从图 4(b)可以看出:当触发角跃变到 180°后,  $\omega_0$  分量依然存在(但理论上  $\omega_0$  分量只出现在晶闸

管的导通时段),可见常规触发策略对于向 180 的跃变是失效的。从图 4(c)的过零点特性可以看出,随着时间的推移  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$  的幅值越来越大,失去稳定。

可见,如果用常规触发策略实现触发角向 90 和 180 的跃变,会使电容电压的波形发生严重畸变或者使过零点特性失去稳定。因此,必须采用特殊的触发策略<sup>[3]</sup>。

### 2.5 不同同步信号下的过零点特性

文献[4]提出以电容电压的工频分量(即分量)做同步信号,可以消除电容电压的超调振荡并缩短暂态响应时间。这一结论也可以用电容电压及其分量的过零点特性来解释。图 5 给出了以电容电压分量做同步信号的过零点特性。

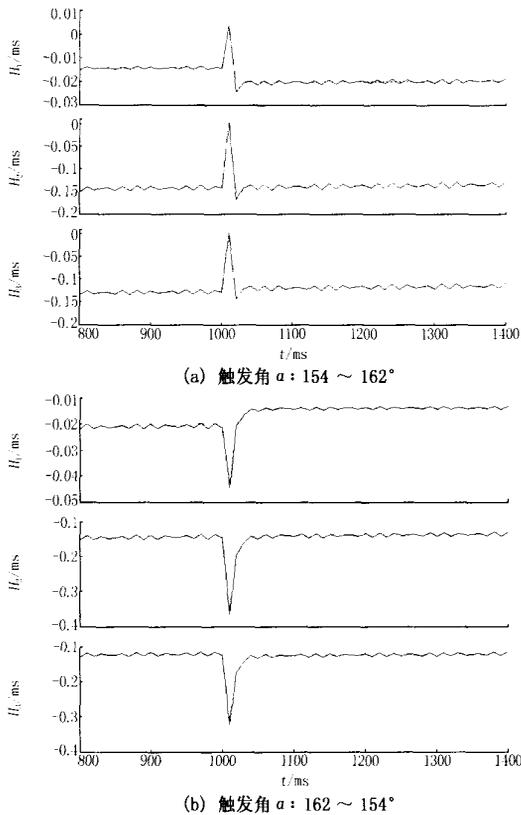


图 5 分量做同步信号的过零点特性

Fig. 5 Zero-crossing point characteristics for the heft of as synchronous signal

比较图 2 与图 5 可知:

(1) 以分量做同步信号时,在触发角跃变的暂态过程中,  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$  也同样都经历了一个幅值突然增大,然后由大到小的衰减过程,之后进入下一个稳态。与电容电压做同步信号的情况相比,  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$  的振荡幅度小,响应时间短。

(2) 在稳态过程中,  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$  的幅值波动也比电容电压做同步信号的情况小。

综合两种同步信号下的电容电压及其分量的过零点特性可知:  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$  幅值波动的剧烈程度决定了电容电压及其分量的过零点漂移程度,进而决定了电容电压及其分量在稳态时的波动情况以及在暂态时的动态变化过程。

### 2.6 电感支路的通态等值电阻对过零点特性的影响

图 6 给出了电感支路的通态等值电阻  $R_Z$  取不同数值时的电容电压及其分量的过零点特性(以电容电压做同步信号)。

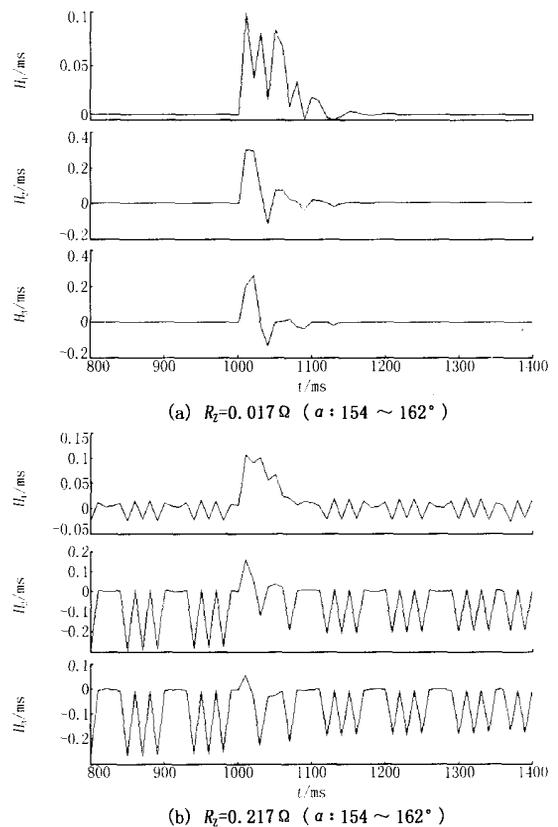


图 6  $R_Z$  取值不同时的过零点特性

Fig. 6 Zero-crossing point characteristics for different  $R_Z$

比较图 6 与图 2(b)可知:

(1)  $R_Z$  的变化并不影响  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$  的暂态响应时间,也就是说,对 TCSC 暂态响应时间的长短没有影响。

(2) 当  $R_Z$  较小时,  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$  的波动幅度较小,这一点在稳态情况下尤其突出。

所以,电感支路的通态等值电阻  $R_Z$  的变化,直接影响到了 TCSC 电容电压及其分量的过零点特性。如果  $R_Z$  选取不当,就会令电容电压及其分量的过零点发生很大的漂移,使阻抗控制变得十分困

难。文献[5]也有类似的结论。

### 3 结论

(1) 提出用  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$  来描述电容电压及其分量的过零点特性,并借助 MATLAB 仿真工具进行了数字仿真:电容电压的过零点特性较好地反映了 TCSC 的暂稳态过程;在工作区域转换时由于过零点发生严重偏移而使 TCSC 上产生了过电压;常规触发策略下的触发角跃变到 90 和 180 时,会使过零点特性失去稳定,因此必须采用特殊的触发策略;采用工频分量做同步信号的优点在于缩短了  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$  的暂态响应时间,减小了  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$  在暂态过程中的幅值波动;电感支路的通态等值电阻  $R_Z$  的变化,直接影响了电容电压及其分量的过零点特性。

(2) TCSC 电容电压的过零点特性较全面地反映了 TCSC 的许多特性,可作为研究其他特性和 TCSC 控制策略的基础。

另外,实际的晶闸管器件,具有导通和阻断的稳态特性以及开通和关断的动态特性。而开关函数法则是反映电力电子器件开关调制特性即稳态特性的一种方法,它无法反映电力电子器件的动态特性。所以文献[1]的开关函数模型无法描述 TCSC 开通和关断的动态过程。因此,建立包括开通、导通、关断、阻断全过程的 TCSC 模型将是本文今后的研究重点。

### 参考文献:

[1] 张慧媛,姜建国,冯宇 (ZHANG Hui-yuan, JIANG Jianguo, FENG Yu). 可控串补装置的动态建模及数字仿真研究 (Research on Dynamic Modeling and Digital Simulation of TCSC) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2003, 23(5):14-18.

- [2] 葛俊,童陆园,耿俊成 (GE Jun, TONG Luyuan, GENG Jun-cheng). 基于电容电压同步方式的 TCSC 暂态特性的数学描述 (The Mathematical Model for Describing Transient Characteristics of TCSC Based on Capacitor Voltage Synchronization Mode) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2001, 21(3):1-5.
- [3] 尹忠东,童陆园,郭春林,等 (YIN Zhong-dong, TONG Luyuan, GUO Chun-lin, et al). 基于暂态稳定控制的 TCSC 装置特性研究 (Research on Characteristics of TCSC Device Based on Transient Stability Control) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1999, 23(6):19-25.
- [4] 冯宇,张慧媛,张军国 (FENG Yu, ZHANG Hui-yuan, ZHANG Jun-guo). 基于不同同步信号的 TCSC 暂态特性仿真研究 (Research of Simulation on Transient Characteristic for TCSC Based on Different Synchronization Signals) [A]. 全国高等学校电力系统及其自动化专业第十八届学术年会论文集 (Proceedings of the 18th CUS EPSA), 2002. 10:487-493.
- [5] 邹振宇,马洪涛,赵建国,等 (ZOU Zhen-yu, MA Hongtao, ZHAO Jianguo, et al). 基于 MATLAB 的 TCSC 器件级仿真建模及特性分析 (Modeling Simulation and Performance Analysis Based on TCSC of Matlab) [A]. 全国高等学校电力系统及其自动化专业第十八届学术年会论文集 (Proceedings of the 18th CUS EPSA), 2002. 10:474-479.

收稿日期: 2003-12-19; 修回日期: 2004-03-16

作者简介:

冯宇(1978-),博士研究生,从事 FACTS 技术、系统建模与仿真方面的研究; Email: fengyu19780119@163.com

董海波(1973-),硕士研究生,讲师,研究方向为电力系统检测与控制;

唐轶(1957-),博士,教授,博士生导师,研究方向为配电系统及其自动化、FACTS 技术。

### Study of TCSC zero-crossing point characteristics of capacitor voltage based on switch function model

FENG Yu, DONG Hai-bo, TANG Yi

(College of Information and Electrical Engineering, CUMT, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** The TCSC zero-crossing point characteristics of the capacitor voltage have a significant influence on its work process. The transient characteristics, transition of working area, adoption special trigger strategy and selection of synchronous signals are the main representation. Based on switch function model of TCSC and MATLAB, the digital simulation method in researching zero-crossing point characteristic of the capacitor voltage is put forward. Using the digital simulation, this paper also analyzes the effects of zero-crossing point characteristic the capacitor voltage on the transient process and transition of working area, points out the necessities of adopting particular trigger strategy and choosing different synchronous signals, and discusses the influence of TCSC inductance branch's equivalence resistance on impedance control. The results show that the TCSC zero-crossing point characteristics of the capacitor voltage can well embody the rest characteristic of the TCSC, which can be the basis of other characteristic as well as control strategy of TCSC.

**Key words:** switch function; TCSC; zero-crossing point characteristics