

# 考虑阻抗双解现象的可控串补模式切换控制方法

李可军<sup>1</sup>, 赵建国<sup>1</sup>, 高洪霞<sup>1</sup>, 韩学山<sup>1</sup>, 牛林<sup>1</sup>, K. M. Tsang<sup>2</sup>, W. L. Chan<sup>2</sup>

(1. 山东大学电气工程学院, 山东省 济南市 250061; 2. 香港理工大学电机工程系, 中国香港特别行政区)

## Mode-switching Control Method of TCSC Considering Dual Impedance Phenomenon

LI Ke-jun<sup>1</sup>, ZHAO Jian-guo<sup>1</sup>, GAO Hong-xia<sup>1</sup>, HAN Xue-shan<sup>1</sup>, NIU Lin<sup>1</sup>, K. M. Tsang<sup>2</sup>, W. L. Chan<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong Province, China;

2. Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong SAR, China)

**ABSTRACT:** The mode-switching control method of thyristor controlled series capacitor (TCSC) is of great importance to power system stability. The switching control method becomes more complex because of the dual impedance phenomenon of TCSC. There is no way to realize mode-switching only by changing firing angles. Considering the influence of dual impedance phenomenon, a set of mode-switching control methods is proposed. By means of forced synchronization of current in thyristor branch with the line current, the mode switching from capacitive mode to Bypass can be implemented. In the switching strategy from capacitive mode to inductive veriner mode, a method of thyristor conditional firing is put forward. The thyristors will be fired and conducted on condition that both line current and capacitor voltage are inphase. To provide synchronization signal of line current for switching control in time, a method to forecast the zero-crossing point of the current is given. Simulation and experimental results show that the proposed switching methods can make the switching process fast and possess good dynamic performance.

**KEY WORDS:** power system; thyristor controlled series capacitor; mode-switching; dual impedance phenomenon; conditional firing

**摘要:** 可控串联补偿(thyristor controlled series capacitor, TCSC)的模式切换对电力系统的稳定控制具有重要意义。TCSC阻抗双解现象的存在对其模式切换提出了更高的要求,单一改变触发角的方法无法实现模式切换。在考虑阻抗双解现象影响的基础上,提出了一套相应的TCSC模式切换控制方法。通过强制晶闸管支路电流与线路电流同步,实现由容性区到

Bypass模式的切换;在由容性区到感性微调模式切换的过程中提出了晶闸管条件触发的方法,即当线路电流和电容电压满足同向条件时晶闸管才触发导通。同时为及时切换控制提供线路电流同步信号,提出了一种预测电流过零的新方法。数字仿真及动模实验结果表明,提出的切换方法能使切换过程平稳迅速,且动态特性良好。

**关键词:** 电力系统;可控串联补偿;模式切换;阻抗双解现象;条件触发

## 0 引言

可控串联补偿是目前世界上应用最广泛、最成功的串联型灵活交流输电(FACTS)技术,它通过改变晶闸管的触发角来改变整个装置的阻抗。大范围快速平滑可调的阻抗特性使其具有许多优点,它既可平滑地调节阻抗,也可以在容性和感性状态之间快速切换,这在电力系统稳定控制中具有重要意义<sup>[1-10]</sup>,而TCSC的模式切换策略是具有上述优点的关键。由于模式切换是在两种运行模式之间切换,且大都是系统出现较大扰动时为保持系统稳定发出的,所以暂态过程剧烈,有可能与系统的扰动相互激励,反而使系统更易失去稳定。因此模式切换控制不仅要求迅速和准确可靠,而且要尽可能使其动态过程平缓。

TCSC共有4种运行模式:容性微调、感性微调、Block和Bypass,理论上共有12种模式切换。但由于感性微调模式,电容器电压和电流的波形畸变比较严重,谐波分量较大,对系统安全和经济运行不利,所以实际工程中一般不采用感性微调模式,目前已投运的TCSC大都运行在上述前3种工作模式中,所以通常讨论6种模式切换就可以了。传统上将由Block模式切换到容性微调模式归为阻抗控制

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(50677036);山东省自然科学基金项目(Y2007F31)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50677036).

范畴<sup>[11-12]</sup>；Bypass模式切换到容性微调模式在线路电流同步下可以直接进行，Bypass模式切换Block模式，可通过先进入容性微调模式然后调节触发角进入Block模式即可。

TCSC阻抗双解现象的存在对模式切换控制方法提出了更高的要求。若只简单的改变触发角，TCSC阻抗一般会沿着调节前所处的曲线变化，而不会跳到另一条曲线上。因此在进行模式切换时，不能只简单的改变触发角，而必须通过一定的控制方法来实现<sup>[13-15]</sup>。在阻抗调节中，如果出现较大的干扰，阻抗有可能从这条曲线跳到另一条曲线，从而达不到预期的调节效果，因此也必须有相应的模式切换控制方法来保证TCSC的正确可靠运行。

为此，本文分析讨论了TCSC阻抗双解现象对模式切换的影响，在此基础上给出了相应的模式切换控制方法。为及时向切换控制提供线路电流同步信号，同时提出了一种预测电流过零的新方法。

### 1 TCSC 的阻抗双解现象

考虑晶闸管导通特性和电抗器支路等效电阻时，TCSC 接线图以及各变量的参考方向如图 1 所示。图中， $U$  为晶闸管正向导通压降， $R$  为电抗器支路的等效电阻，定义电抗器支路的等效品质因数  $Q = \omega L / R$ 。

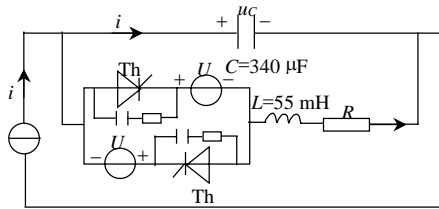


图 1 TCSC 接线图  
Fig. 1 Wiring diagram of TCSC  
恒流源的表达式为<sup>[16]</sup>

$$i(t) = I_m \sin(\omega t) = 2 \sin(100\pi t) \quad (1)$$

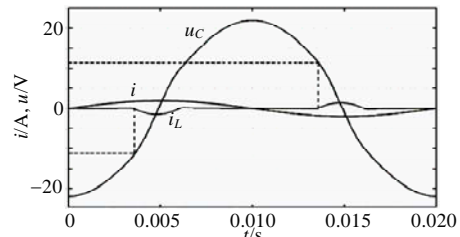
当电抗器支路等效品质因数  $Q=10$  时，TCSC 电容电压、晶闸管电流和线路电流的稳态波形如图 2 所示。其中， $\alpha$  为以电流同步时的触发角； $\beta$  为导通角。图 2(b) 中虚线表示  $Q = 85$  时的晶闸管导通电流，可以看出，理想情况下导通角  $\beta$  与触发角  $\alpha$  的关系式  $\beta = \pi - \alpha$  此时已不再成立，分析 TCSC 特性时必须要考虑此种变化。文献[13]推导出考虑电抗器支路等效电阻影响时导通角  $\beta$  与触发角  $\alpha$  的关系式为

$$f(\alpha, \beta) = -c_7 \sin(\alpha - \alpha_2) e^{-r\beta/\omega} \cos(b\beta/\omega) + c_7 \sin(\alpha + \beta - \alpha_2) + [e^{-r\beta/\omega} / b \sin(b\beta/\omega)] \cdot$$

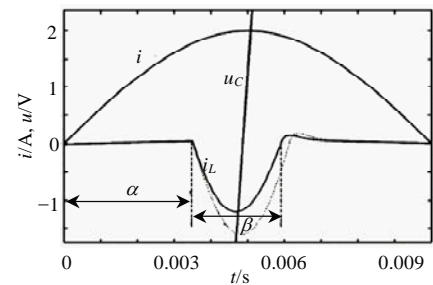
$$\{ [c_8 \cos(\alpha + \beta) e^{-r\beta/\omega} \cos(b\beta/\omega) - (\cos \alpha / \omega C) - [\cos(\alpha + \beta) / \omega C] - c_8 \cos(\alpha + \beta - \alpha_3) - [(\sin \alpha / C) - rc_8 \cos(\alpha - \alpha_3) + \omega c_8 \sin(\alpha - \alpha_3)] e^{-r\beta/\omega} \sin(b\beta/\omega) ] / [rL e^{-r\beta/\omega} / b \sin(b\beta/\omega) + L e^{-r\beta/\omega} \cos(b\beta/\omega) + L] - rc_7 \sin(\alpha - \alpha_2) - \omega c_7 \cos(\alpha - \alpha_2) \} = 0 \quad (2)$$

式中： $\alpha_1 = \arctan(R / \omega L)$ ； $M = I_m \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} / LC$ ； $r = R / 2L$ ； $b_0 = \sqrt{1 / LC}$ ； $b = \sqrt{b_0^2 - r^2}$ ； $c_3 = M / \sqrt{(b_0^2 - \omega^2)^2 + 4r^2 \omega^2}$ ； $\alpha_2 = \arctan 2r\omega / b_0^2 \omega^2$ ； $c_7 = c_6 / I_m$ ； $c_8 = c_3 / I_m$ 。

式(2)是超越方程，无法得到  $\beta$  与  $\alpha$  的解析关系，可通过数值分析的方法逐点解出它的离散解。图 3 为  $\alpha$  取不同数值时函数  $f(\alpha, \beta)$  的曲线族。从图 3 中可以看出，这时触发角和导通角的关系不满足  $\beta = \pi - 2\alpha$ ，这个结论与图 2(b) 的仿真结果中得到的结论一致。



(a) 电容电压、晶闸管电流和线路电流的稳态波形



(b) 电容电压、晶闸管电流和线路电流的稳态波形(局部放大)

图 2 TCSC 稳态运行变量的波形(容性)  
Fig. 2 Steady state operation waveform of TCSC(capacitive)

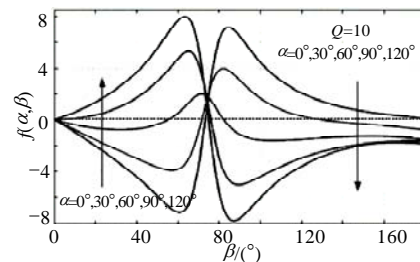


图 3 触发角和导通角的关系曲线  
Fig. 3 Relation curve of firing angle and conduction angle

在进行动模实验时,由于电压级别比较低,装置中电抗器本身具有的电阻、元件之间的接触电阻以及晶闸管导通压降带来的电阻等都不可忽略,所以 $Q$ 值一般比较低。图4为 $Q=10$ 时的基波等效阻抗特性曲线,图中虚线为理想阻抗曲线。理想曲线跳变的点为理想曲线谐振点,其附近区域为理想曲线的谐振区。基波阻抗曲线分为2条分支曲线,且1条在感性区,1条在容性区。这样每1个触发角就会对应2个阻抗值,1个为感性,1个为容性。

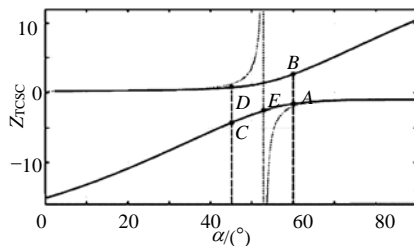


图4  $Q=10$ 时基波等效阻抗特性  
Fig. 4 Equivalent fundamental frequency impedance characteristic when  $Q=10$

## 2 TCSC 的简单模式切换

### 2.1 通过改变触发角的模式切换

TCSC 进行各种开环阻抗阶跃调节的暂态响应波形如图5~8所示,图中实线为线路电流波形,长划线为电容电压波形,虚线为电抗器支路电流波形。

图5和6为分别从Block和Bypass阶跃到 $60^\circ$ 触发角时TCSC的暂态响应波形。触发角 $60^\circ$ 时理论上TCSC应该运行在容性区。图5中,TCSC初始运行在Block模式,0.04s触发角跳变到 $60^\circ$ ,跃变后电容电压幅值增大,相位依然落后线路电流,对外呈现较大的容性阻抗;而在图6中,初始运行状态为Bypass,0.04s触发角跳变到 $60^\circ$ ,跃变后电容电压幅值急剧增大,谐波含量高,波形不稳定,但仍然保持跃变前的相位关系,即电容电压超前线路电流,此时TCSC呈现的是数值很大的感性阻抗。

图7和8为分别从Block和Bypass阶跃到 $45^\circ$ 触发角时TCSC的暂态响应波形。触发角 $45^\circ$ 时TCSC应该运行在感性区。图7中,TCSC初始运行状态为Bypass模式,0.04s触发角跳变到 $45^\circ$ ,跃变后电容电压幅值增大,谐波含量高,相位超前线路电流,此时TCSC呈现的是较大感性阻抗;而在图8中,初始运行模式为Block,0.04s触发角跳变到 $45^\circ$ ,跃变后电容电压幅值急剧增大且波形不稳定,但相位仍然落后线路电流,对外呈现的是数值很大的容性阻抗。

由图5~8可以看出,模式切换无法实现。如果简单的改变触发角,阻抗一般会沿着系统调节前所处的曲线变化,而不会跳到另一条曲线上去。所以在进行模式切换时,不能通过简单的改变触发角,而必须通过一定的控制策略来实现。

图9所示为发生瞬时接地故障时TCSC的仿真波形。为了方便观察波形,纵坐标中电容电压的单位取为10V,线路电流和电抗器支路电流的单位取为安培。图9中TCSC开始时稳定运行在容性工

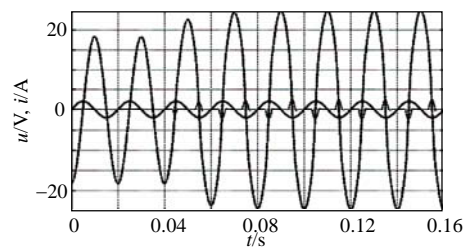


图5 从Block阶跃到 $60^\circ$ 触发角时TCSC的暂态响应波形  
Fig. 5 Transient waveforms of TCSC from Block to firing angle  $\alpha=60^\circ$

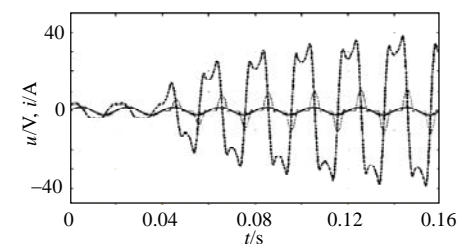


图6 从Bypass阶跃到 $60^\circ$ 触发角时TCSC的暂态响应波形  
Fig. 6 Transient waveforms of TCSC from Bypass to firing angle  $\alpha=60^\circ$

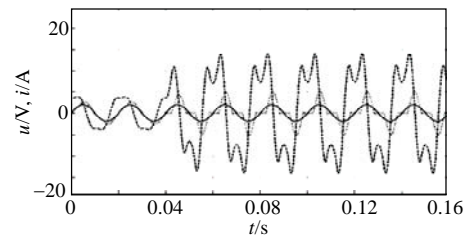


图7 从Bypass阶跃到 $45^\circ$ 触发角时TCSC的暂态响应波形  
Fig. 7 Transient waveforms of TCSC from Bypass to firing angle  $\alpha=45^\circ$

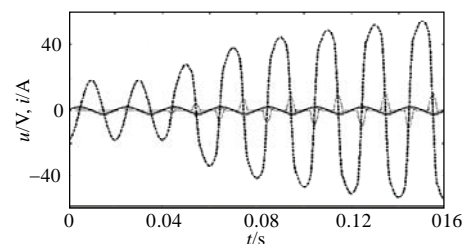


图8 从Block阶跃到 $45^\circ$ 触发角时TCSC的暂态响应波形  
Fig. 8 Transient waveforms of TCSC from Block to firing angle  $\alpha=45^\circ$

作区, 0.198 s 时发生故障, 0.215 s 故障结束。TCSC 在无任何调节而一直保持  $60^\circ$  的触发角时, 在瞬时故障的扰动下, 自发地从容性区间跃变到感性区间, 并且在故障后能够稳定的运行在感性工作区。

当 TCSC 受到比较大的扰动, 从而使 TCSC 的电容电压和线路电流的相位关系发生改变时, TCSC 就会因为这个相位的改变而发生相应的工作区间跳变, 这是工程中不希望看到的, 应该引起相关人员注意。而假如要求 TCSC 进行模式切换, 如果不能通过某种控制策略使电容电压和线路电流的相位关系产生变化, 而只是简单的改变触发角, 显然是行不通的。在阻抗调节中, 如果出现较大的干扰, 阻抗有可能从这条曲线跳到另一条曲线, 从而达不到预期的调节效果, 因此必须有相应的模式切换控制方法来保证 TCSC 的正确可靠运行。

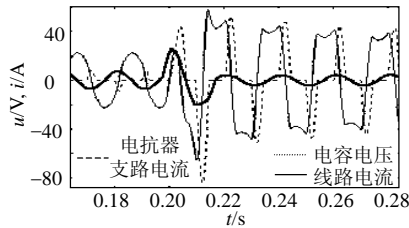


图 9 瞬时故障后 TCSC 发生区间跳变的波形  
Fig. 9 Waveform of TCSC when area switching occurs after instantaneous fault

### 2.2 简单模式切换的动模实验

TCSC 动模实验装置可以在一定程度上真实地反映实际装置的物理特性<sup>[17-20]</sup>。本节将通过笔者课题组开发完成的 TCSC 实验装置平台进一步验证 TCSC 阻抗双解现象下的简单模式切换。TCSC 动模实验系统接线如图 10 所示, 激励电压为 35 V, 线路感抗为  $X_L=37.5 \Omega$  (112 mH), TCSC 模块中,  $C=340 \mu\text{F}$ ,  $L=5.5 \text{ mH}$ , 晶闸管支路等效品质因数约等于 10。

图 11 是线路电流同步方式下触发角指令为  $\alpha=20^\circ$  时的实验结果。

TCSC 初始运行模式为 Block 模式。理论上,  $\alpha=20^\circ$  应该位于 TCSC 的感性区, 电容电压相位超前线路电流, TCSC 呈现感性阻抗。但是由于晶闸

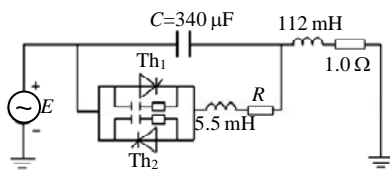


图 10 动模实验系统  
Fig. 10 Dynamic simulation system

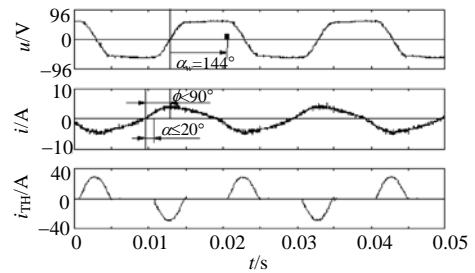


图 11 线路电流同步方式下触发角为  $20^\circ$  时稳态实验波形  
Fig. 11 Experimental waveform synchronized by line current with firing angle at  $20^\circ$

管导通特性和电抗器支路等效电阻的影响, 可以看到图 11 显示的实际触发角(相对于电容电压过零点)约为  $144^\circ$ , 此时电容电压相位滞后线路电流, 相位差小于  $90^\circ$ , TCSC 仍然位于容性运行微调范围之内, 模式切换失败。

## 3 TCSC 模式切换控制方法研究

### 3.1 预测电流过零

通常采用判断前后 2 个采样点正负的方法进行过零检测, 如果一正一负则判断为过零, 此时的时刻为后一过零时刻, 而不是真正的过零时刻, 这样判断出的过零时刻滞后于实际过零时刻, 延迟时间最大可达前后 2 个采样点的间隔, 本文的采样间隔为  $1/128$  工频周期, 即  $0.15625 \text{ ms}$ ; 且由于模式切换过程中存在暂态过程, 因此这个延迟时间不固定, 这样很容易影响切换效果。在容性微调模式下, 由于要求的触发时刻和过零时刻有较长的时间间隔, 因此可通过对过零前后 2 个采样点进行线性拟合来得到这个延迟时间, 计算触发时刻时减去这个延迟时间。但在模式切换过程中或运行在 Bypass 模式时常常要求在实际过零时刻发出触发脉冲, 不可能在判断出过零时刻后再补偿这个时间延迟。为解决该问题, 本文提出了一种预测过零算法, 如图 12 所示。图中,  $Z_m(n-1)$  和  $Z_c(n-1)$  分别为第  $n-1$  个实测过零点和预测过零点,  $I_k$  和  $I_{k+1}$  为该过零时刻前后的采样点;  $Z_m(n)$  和  $Z_c(n)$  分别为第  $n$  个实测过零点和预测过零点,  $I_j$  和  $I_{j+1}$  为该过零时刻前后的采样点;  $\Delta T(n-1)$  和  $\Delta T(n)$  分别为第  $n-1$  和第  $n$  个测量过零点和预测过零点之间的时间差, 在稳态情况下, 这 2 个过零点是重合的, 即  $\Delta T(n-1)$  和  $\Delta T(n)$  的值为零; 在暂态或有扰动的情况下, 二者有一定的偏差, 即  $\Delta T(n-1)$  和  $\Delta T(n)$  的值不为零。

采用线性拟合方法可求得测量过零点, 如由  $I_k$  和  $I_{k+1}$  求出  $Z_m(n-1)$ , 由  $I_j$  和  $I_{j+1}$  求出  $Z_m(n)$ 。

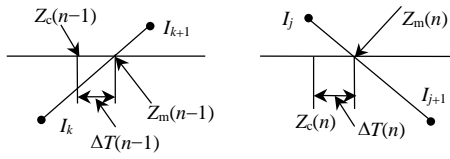


图 12 预测过零算法

Fig. 12 Algorithm forecasting zero crossing point

预测过零点和测量过零点之间的关系为

$$Z_c(n) = Z_c(n-1) + T_0/2 + \Delta T(n-1)(k_p + k_i/s) \quad (3)$$

式中： $T_0$ 为采样周期； $k_p$ 、 $k_i$ 分别为比例环节和积分环节系数。将式(1)离散化后的公式为

$$\begin{cases} S = S + \Delta T(n-1) \cdot (T_0/2) \\ \Delta Y = k_p \Delta T(n-1) + k_i S \end{cases} \quad (4)$$

则有

$$Z_c(n) = Z_c(n-1) + T_0/2 + \Delta Y \quad (5)$$

$$\Delta T(n) = Z_m(n) - Z_c(n) \quad (6)$$

$$T_0 = 2 \sum_{i=1}^k \frac{[Z_m(n-i) - Z_m(n-i-1)]}{k} \quad (7)$$

式中： $S$ 为误差累加器； $\Delta Y$ 为预测过零点 $Z_c(n)$ 的修正量； $k$ 为周期序数。

由于实际系统频率不可能完全等于工频，因此这里的周期通过计算前  $k$  个周期的平均值来获得。由于每个预测过零点都是通过前面过零点的误差来修正，因此第一个预测过零点不能通过本算法得出，而取为测量过零点。由于可控串补的投入过程都是先投常规串补(即 TCSC 运行在 Block 模式)然后再切换到其它运行模式，因此第一个预测过零点取为测量过零点引起的时间延迟不会影响切换。

由于积分环节的效果，预测过零点在可靠跟踪实际过零点的同时具有一定的延时性，这样可以很好地躲过高频分量引起的零点漂移，对稳定控制有利。

### 3.2 容性区切换到 Bypass 模式

#### 3.2.1 硬件旁路方法

通过硬件旁路使正反向晶闸管连续不停地交替导通实现到 Block 模式的切换。图 13 给出了该方法在由 Block 模式切换到 Bypass 模式时的仿真结果，其中切换时刻为 0.03 s。

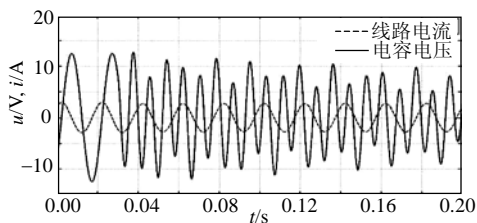


图 13 硬件旁路时电容电压和线路电流波形  
Fig. 13 Waveform of capacitor voltage and line current in hardware bypass

由图 13 可见，硬件旁路方法不能完成切换。Bypass 模式时电容电压应为标准的正弦波形，而图中的电容电压出现了很大的高频分量。

因为 Bypass 模式时 TCSC 呈现的感抗小于 Block 模式时呈现的容抗，由此推得 Bypass 模式时电容电压的峰值小于 Block 模式时电容电压的峰值，如果当电容电压接近峰值时收到 Bypass 命令，此时电容电压储存了较多的能量，这个能量大于 Bypass 模式时储存能量的最大值，这个能量差要在切换过程中释放出去，而由于外电路感抗远大于晶闸管支路感抗，因此这个能量主要通过电容支路和晶闸管支路形成的环流在电容和电感之间转换，并通过电感所带电阻逐渐释放，由于电感所带电阻很小，因此放电过程很长，以致图 13 中出现了持续时间很长的高频分量。

#### 3.2.2 线路电流同向触发的方法

Bypass 模式时整个 TCSC 近似为纯感性，晶闸管支路也近似为纯感性，此时晶闸管支路电流与线路电流应该同相位。基于这一前提，提出了与线路电流同向触发的方法，即当线路电流正向时只触发正向晶闸管，而电流反向时只触发反向晶闸管。线路电流同向触发法的仿真结果如图 14 和图 15 所示，其中切换时刻分别为 0.03 s 和 0.2 s。

图 15 中，晶闸管不停地导通，很多时候晶闸管支路电流与线路电流反向，这不利于顺利切换。因此当线路电流为正向时只触发正向晶闸管，而电流反向时只触发反向晶闸管。显然，当线路电流为正向时电容电压不一定是正向，这时即使发出正向触发脉冲，晶闸管也不能导通，反向亦然。因此当线路电流和电容电压反向时没有触发脉冲，晶闸管

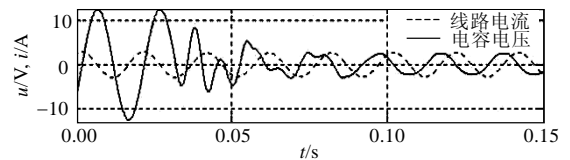


图 14 由 Block 模式切换到 Bypass 模式时的仿真结果  
Fig. 14 Simulation result when switching from Block to Bypass

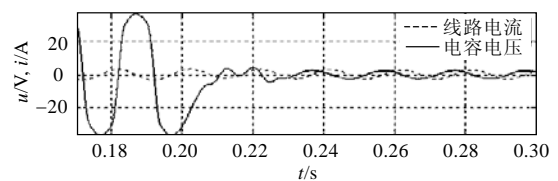


图 15 由容性微调模式切换到 Bypass 模式时的仿真结果  
Fig. 15 Simulation result when switching from capacitive vernier to Bypass

不导通，这有利于通过外电路释放电容上储存的能量，有利于切换，而线路电流和电容电压同向时晶闸管导通。这样经过几个工频周期，晶闸管导通时间所占的比例越来越大，最终连续导通，从而实现顺利切换。

### 3.3 容性区切换到感性微调模式

#### 3.3.1 经过 10ms 连续导通切换

文献[21]中的切换策略为：收到切换到感性微调命令时先使晶闸管连续导通 10 ms，当线路电流和电容电压形成稳定的滞后 90°关系后，再按感性命令对应的触发角进行触发。这一策略存在 2 个问题：1) 这个 10 ms 的得出没有理论根据；2) 由图 13 可见，无论连续导通多长时间，线路电流都不会稳定滞后电容电压 90°。

图 16 和图 17 给出了由容性微调模式切换到感性微调模式时该方法的仿真结果，其中 0.1945 s 收到切换命令，从 0.1945~0.2045 s 发连续触发命令，然后发感性微调模式命令。可见该方法无法完成切换，晶闸管最后处于截止状态，TCSC 进入 Block 状态。

在 TCSC 中，通常是在触发角对应时刻发出脉冲信号，这个信号一般是单脉冲<sup>[9]</sup>。在模式切换命令后的前几个周期，达到触发角对应时刻时电压可能反向，这样即使发出触发脉冲也不能触发晶闸管，如果是单脉冲触发，整个周期都可能没有晶闸管导通，这样 TCSC 会很快进入 Block 状态，这就是图 16 和图 17 中不能完成切换的原因。

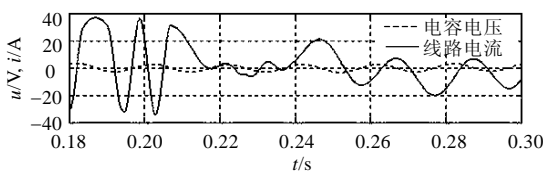


图 16 经连续导通 10 ms 切换时的电容电压和线路电流  
Fig. 16 Waveform of capacitor voltage and line current when switching by continual triggering for 10 ms

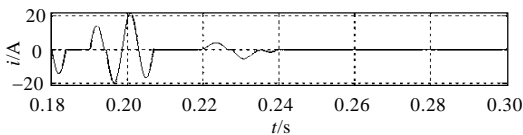


图 17 经连续导通 10 ms 切换时晶闸管支路电流  
Fig. 17 Waveform of thyristor branch current when switching by continual triggering for 10 ms

#### 3.3.2 晶闸管条件触发的方法

为保证正常切换，本文提出了晶闸管条件触发的方法，定义从达到触发角对应时刻起到电流再次过零时止为触发区间。在该区间内，当线路电流为

正向时只触发正向晶闸管，而电流反向时只触发反向晶闸管，即当线路电流和电容电压同向时晶闸管才导通；当线路电流正向而电容电压反向时，即使发出正向触发脉冲晶闸管也不能导通。这样经过几个周期，晶闸管导通时间所占的比例越来越大，从而顺利过渡到感性微调模式区。3.2.2 中提到的线路电流同向触发切换到 Bypass 的方法也可认为是一种特殊的条件触发方法，只是它的触发角对应时刻为每次电流过零时刻。

数字仿真结果如图 18 和图 19 所示，采用容许区间触发方法能较好地实现由容性微调模式或 Block 模式到感性微调模式的切换。其中切换时刻分别为 0.2 和 0.03 s。

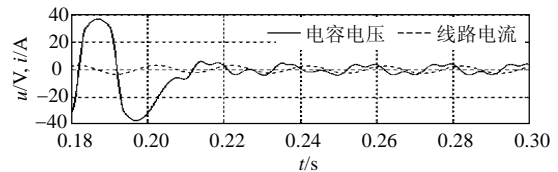


图 18 由容性微调模式切换到感性微调模式时的仿真结果  
Fig. 18 Simulation result when switching from capacitive vernier to inductive vernier

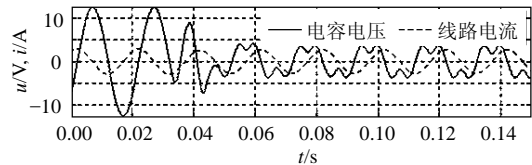


图 19 由 Block 模式切换到感性微调模式时的仿真结果  
Fig. 19 Simulation result when switching from Block to inductive vernier

## 4 模式切换控制方法的动模验证

线路电流同步时当 TCSC 从容性微调模式(触发角为 58°)切换到 Block 模式的动模实验结果如图 20 所示， $I_{line}$ 、 $U_{capa}$ 、 $I_a$ 和 $Z_a$ 分别代表线路电流、电容电压、A相晶闸管导通电流和基频阻抗。

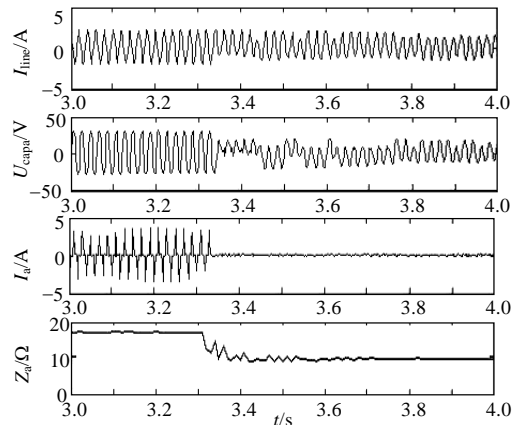


图 20 TCSC 从容性微调模式切换到 Block 模式的实验波形  
Fig. 20 Experiment results when switching from capacitive vernier to Block

由实验结果可以看出,以线路电流为同步信号时,TCSC从 $58^\circ$ 触发角变化到Block运行状态时,基频阻抗没有产生超调和过冲现象,变化过程比较平缓,类似一阶惯性环节的阶跃现象。

TCSC采用线路电流同向触发的方法,从Block变化到Bypass运行状态时的响应特性曲线如图21所示。TCSC从感性区转换到感性区(Bypass)的速度非常迅速,大约2个工频周期即可完成。

TCSC系统从Bypass模式切换到容性微调模式(触发角为 $58^\circ$ )的响应特性曲线如图22所示。由图可知,由感性区转换为容性微调区(触发角为 $58^\circ$ )时,系统的暂态特性和以电容电压为同步信号时大不相同。TCSC只需经过几个工频周期就进入稳态,且不会产生振荡和超调。

采用晶闸管条件触发的切换控制方法,TCSC从容性微调模式(触发角为 $58^\circ$ )切换到Bypass模式的响应特性曲线如图23所示。

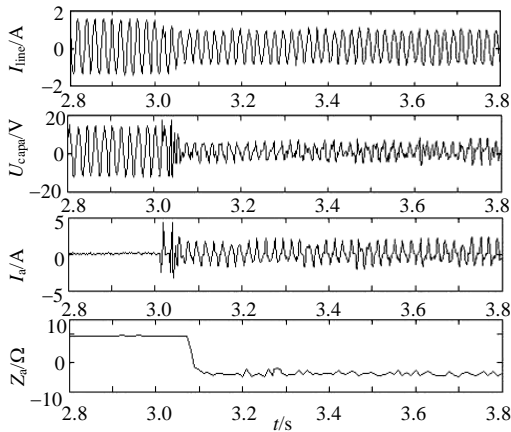


图21 从Block模式切换到Bypass的实验波形  
Fig. 21 Experiment results when switching from Block to Bypass

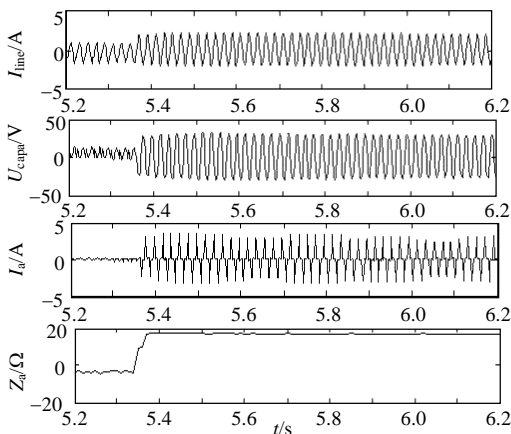


图22 从Bypass切换到容性微调模式的实验波形  
Fig. 22 Experiment results when switching from Bypass to capacitive vernier

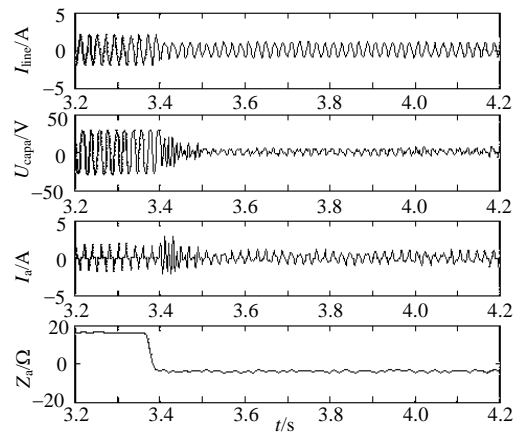


图23 从容性微调模式切换到Bypass的实验波形  
Fig. 23 Experiment results when switching from capacitive vernier to Bypass

由图23可见,线路电流1~2个工频周期即可进入稳态波形,电容电压波形和晶闸管电流波形经过大约5个工频周期进入稳态,基频阻抗曲线响应迅速且无超调发生。

## 5 结论

TCSC能平滑地调节阻抗,也可以在容性和感性状态之间快速切换,这在电力系统稳定控制中具有重要意义,模式切换策略是具有上述优点的关键。TCSC阻抗双解现象的存在对模式切换控制方法提出了更高的要求,只单一改变触发角无法实现模式切换,在出现较大干扰时,TCSC还可发生自主的区间跃变。本文考虑了阻抗双解现象影响,提出通过强制晶闸管支路电流与线路电流同步,实现由感性区到Bypass模式的切换;在由感性区到感性微调模式的切换过程中提出了条件触发的方法。同时为及时向切换控制提供线路电流同步信号,提出了一种预测电流过零的新方法。数字仿真及动模实验结果表明,所提出的一套切换控制方法能使切换过程平稳迅速,且动态特性良好。

## 参考文献

- [1] Del Rosso A D, Canizares C A, Dona V M. A study of TCSC controller design for power system stability improvement[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(4): 1487-1496.
- [2] Chaudhuri, B, Pal B C. Robust damping of multiple swing modes employing global stabilizing signals with a TCSC[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1): 499-506.
- [3] Son K M, Park J K. On the robust LQG control of TCSC for damping power system oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(4): 1306-1312.
- [4] Guang Yayang, Geir Hovland, Rajat Majumder, et al. TCSC allocation based on line flow based equations via mixed-integer programming

- [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 2262-2269.
- [5] Khosro Kabiri, Sebastian Henschel, José Ramón Martí, et al. A discrete state-space model for ssr stabilizing controller design for tcsc compensated systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 466-474.
- [6] 郭春林, 童陆园. 多机系统可控串补(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-machines system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 1-6(in Chinese).
- [7] 李亚键, 武守远, 周孝信, 等. 以可控串补抑制次同步振荡的物理模拟实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(6): 1-4.  
Li Yajian, Wu Shouyuan, Zhou Xiaoxin, et al. SSR mitigation test studies of TCSC on analog simulator[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(6): 1-4(in Chinese).
- [8] 曹继丰. 平果可控串补工程及其在南方电网中的作用[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 6-9.  
Cao Jifeng. An introduction to Pingguo TCSC project and its function in China southern power grid[J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 6-9(in Chinese).
- [9] Pilotto L A S, Bianco A, Long W F, et al. Impact of TCSC control methodologies on subsynchronous oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 243-252.
- [10] Kakimoto N, Phongphanphane A. Subsynchronous resonance damping control of thyristor-controlled series capacitor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3): 1051-1059.
- [11] 葛俊, 童陆园, 耿俊成. 基于电容电压同步信号的 TCSC 阻抗阶跃特性的研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(4): 37-40.  
Ge Jun, Tong Luyuan, Geng Juncheng. Study on impedance step characteristics of TCSC based on capacitor voltage synchronizing signal[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(4): 37-40(in Chinese).
- [12] 闫冬, 赵建国, 武守远. 考虑电抗器支路电阻影响的 TCSC 触发特性研究[J]. 电网技术, 2004, 28(8): 38-41.  
Yan Dong, Zhao Jianguo, Wu Shouyuan. Research on firing characteristics of TCSC considering resistance influence of reactor branch[J]. Power System Technology, 2004, 28(8): 38-41(in Chinese).
- [13] 闫冬, 赵建国, 武守远. 考虑电抗器支路电阻影响时的 TCSC 稳定运行区域内的双解现象[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 67-73.  
Yan Dong, Zhao Jianguo, Wu Shouyuan. Dual solutions phenomenon of TCSC in steady operation area considering resistance influence of reactor branch[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 67-73(in Chinese).
- [14] 孙海顺, 裴志宏, 程时杰, 等. 电抗器品质因数对 TCSC 特性的影响及阻抗特性的双解现象[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 46-51.  
Sun Haishun, Pei Zhihong, Cheng Shijie, et al. Effects of the reactor's quality factor on the characteristics of TCSC and its dual impedance solutions[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 46-51(in Chinese).
- [15] 李可军, 赵建国. TCSC 阻抗双解现象机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 33-39.  
Li Kejun, Zhao Jianguo. The mechanism research on dual impedance solutions of TCSC[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 33-39 (in Chinese).
- [16] Arindam Ghosh, Avinash Joshi, Mahesh K M. State space simulation and accurate determination of fundamental impedance characteristics of a TCSC[C]. IEEE Winter Power Meeting, Columbus, ohio, USA, 2001.
- [17] Dragan Jovcic, Pillai G N. Analytical modeling of TCSC dynamics [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1097-1104.
- [18] 李可军, 赵建国, 孙海顺. 一种可控串补动态模拟实验装置 [J]. 电网技术, 2005, 29(15): 71-75.  
Li Kejun, Zhao Jianguo, Sun Haishun. An experiment device for thyristor controlled series compensation dynamic simulation [J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 71-75(in Chinese).
- [19] 孙海顺, 裴志宏, 文劲宇, 等. TCSC 实验装置研制中的若干问题研究[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(9): 4-8.  
Sun Haishun, Pei Zhihong, Wen Jinyu, et al. Some development issues of laboratory used prototype TCSC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(9): 4-8(in Chinese).
- [20] 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).
- [21] 中国电力科学研究院. 超高压输电系统中灵活交流输电(可控串补)技术的技术总结报告第四篇: 可控串补控制系统及动模实验 [R]. 北京: 中国电力科学研究院, 1999.



李可军

收稿日期: 2008-01-31。

作者简介:

李可军(1972—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电能质量、灵活交流输电及其智能控制, lkjun@sdu.edu.cn;

赵建国(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统调度自动化, 电力电子与电力传动等方面的研究工作。

(责任编辑 王剑乔)