

可控串补暂态特性的动模试验研究

郑 旭,裴志宏,王少荣,程时杰
(华中科技大学 电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 分析了可控串补 TCSC(Thyristor Controlled Series Compensation)分别以电容电压和线路电流为同步信号,在容性微调区从高补偿区向低补偿区及反方向阶跃跳变时,基频阻抗的暂态变化过程。研究了在不同同步信号下,感性区和容性区相互转换时 TCSC 的暂态特性,指出从容性区转换到感性区以及从感性区转换到容性区阻断模式时,两种同步信号下的暂态过程相似;但由感性区转换到容性微调区时,电容电压同步信号下需先将 TCSC 切换到阻断模式,待进入稳态后再调节补偿度,而线路电流同步信号下则可直接进行。

关键词: TCSC; 同步信号; 暂态特性
中图分类号: TM 761 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2005)06-0017-05

本文利用动模实验对可控串补(TCSC)的暂态特性进行了研究。分析了 TCSC 分别以电容电压和线路电流为同步信号,在容性微调区从高补偿区向低补偿区及反方向跳跃时,基频阻抗的暂态变化过程。研究了在感性区和容性区之间切换时,TCSC 的暂态特性及存在的问题,并提出了相应的策略。

1 TCSC 基本原理

TCSC 单相电路结构示意图如图 1 所示。它主要由串联电容器 C 、反并联晶闸管模块 V_T 、晶闸管控制电抗器 L 、氧化锌压敏电阻(MOV)、保护用旁路断路器 QF 几部分组成。TCSC 基本运行模式有 3 种。

a. 晶闸管阻断模式。即晶闸管的导通角为 0, TCSC 相当于固定串补。

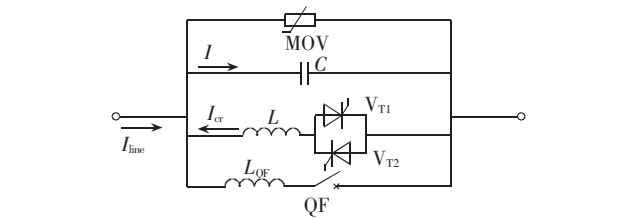


图 1 TCSC 一次主电路结构
Fig.1 The primary circuit of TCSC

b. 晶闸管旁路模式。此时晶闸管连续导通,等效于电抗器和电容器并联,TCSC 呈小感性。

c. 阻抗微调模式。包括感性区和容性区微调两种。通过调节晶闸管的导通角平滑调节 TCSC 的等效基频阻抗。

由于 TCSC 电容基频阻抗相对外部系统的阻抗小得多,因而由晶闸管开断所产生的谐波分量主

要在 TCSC 的内部构成环流,很少注入到外部电路^[1]。因此,只需要研究 TCSC 的基频阻抗。文献[2]给出了 TCSC 的稳态基频阻抗的理论计算公式,一组典型的基频阻抗曲线如图 2 所示。

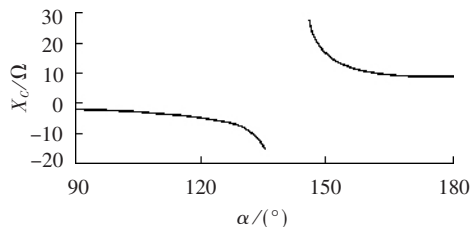


图 2 TCSC 基频阻抗曲线

Fig.2 The impedance curve of TCSC

而实际电力系统中,人们往往使 TCSC 运行于容性区,以缩短发电中心和配电中心的电气距离,而且容性调节范围一般为 $X_c \sim 3X_c$ (1 p.u.~3 p.u.);运行于感性区主要是为了限制短路故障时电流过大。理论研究^[3]、数值仿真和动模试验都表明感性微调区中存在不稳定的区域。因此,本文主要研究 TCSC 在容性区的暂态特性,不讨论在感性区的调节,感性区运行则一律按 Bypass 方式进行。

2 触发控制

TCSC 有多种触发控制方式,且不同的同步信号、不同的触发方式对 TCSC 的暂态特性有较大的影响。文献[1]采用同步信号过零时刻启动计数器设置触发时间的分相触发方式;文献[3]提出了一种新的等间隔的触发方式,并和前者进行了比较。而触发控制按所选时间基准可分为采用电容电压过零时刻和线路电流过零时刻为基准的触发方式。

按照在同步信号 1 个周期内判断过零点的次数又可分为单边沿触发和双边沿触发。双边沿触发,即在同步信号的 1 个周期内捕获两次过零点,以向上过零时刻开始计算第 1 个脉冲触发延时,即触发角 α_1 ;以向下过零时刻开始计算第 2 个脉冲触发延时,即触发角 α_2 ;而单边沿触发只捕获向上过零时刻并计算第 1 个触发脉冲,而第 2 个触发脉冲通过第 1 个脉冲延时 180° 得到。

本文的动模试验均采用固定触发角的分相控制,且采用单边沿触发方式。

3 动模试验及结果分析

TCSC 的动模实验系统接线如图 3 所示。

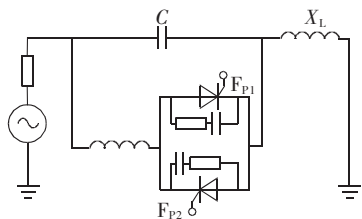


图 3 动模实验系统

Fig.3 The dynamic simulation system

激励电压为 35 V,线路感抗 $X_L=37.5 \Omega$ (112 mH),在 TCSC 模块中, $C=340 \mu\text{F}$, $L=5.5 \text{ mH}$,则基频阻抗 $X_c=9.3 \Omega$ 。

3.1 阻抗阶跃响应

阻抗特性是 TCSC 最基本和最重要的特性。TCSC 对电力系统的潮流控制、暂态稳定的改善以及次同步谐振的抑制等都要直接或者间接转化为对 TCSC 阻抗的控制。本节着重研究了 TCSC 在不同同步信号下基频阻抗的阶跃暂态特性,包括从高补偿区向低补偿区跳跃及反方向跳跃。

3.1.1 电容电压同步时阶跃特性

a. 低补偿区向高补偿区阶跃。TCSC 容抗从 1.02 p.u.阶跃变化到 1.6 p.u.时线路电流、电容电压、晶闸管电流、阻抗变化曲线如图 4 所示。

b. 高补偿区向低补偿区阶跃。TCSC 容抗从 1.6 p.u.阶跃变化到 1.02 p.u.时线路电流、电容电压、晶闸管电流、阻抗变化曲线如图 5 所示。

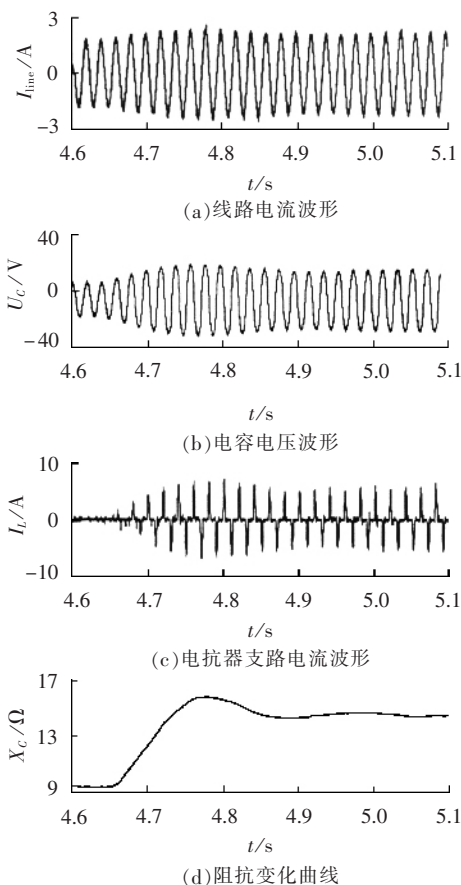
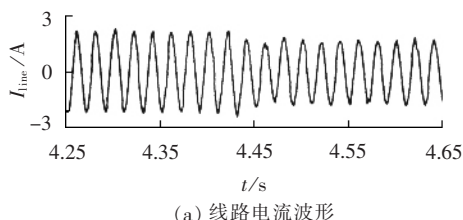


图 4 1.02 p.u.到 1.6 p.u.的阶跃响应

Fig.4 Step response from 1.02 p.u. to 1.6 p.u. under capacitive voltage synchronization signal



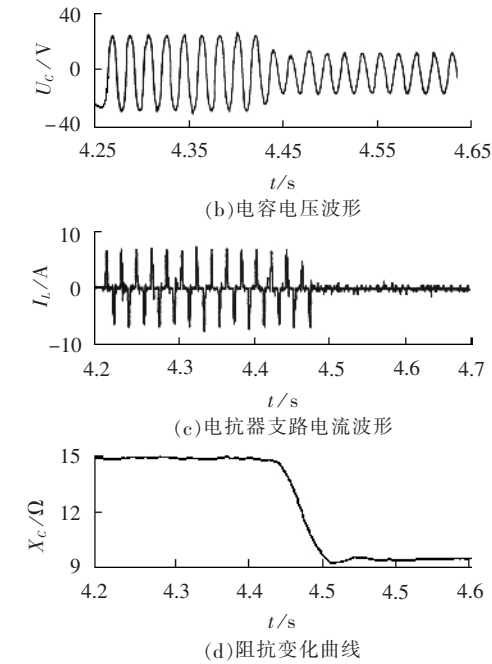


图 5 1.6 p.u. 到 1.02 p.u. 的阶跃响应

Fig.5 Step response from 1.6 p.u. to 1.02 p.u. under capacitive voltage synchronization signal

由实验结果可以看出,电容电压同步时:

- a. 从低补偿区向高补偿区阶跃时,系统需要 10 个周期左右的时间才能进入稳态,且基频阻抗特性会产生较大的过冲和超调;
- b. 从高补偿区向低补偿区阶跃时,系统只需大约 2 个周期的时间就能进入稳态,基频阻抗只产生很小的超调过程;
- c. 整个过程中,线路电流一直都比较稳定,没有大的波动。

3.1.2 线路电流同步时阶跃特性

a. 低补偿区向高补偿区阶跃。TCSC 容抗从 1.02p.u. 阶跃变化到 1.6 p.u. 时线路电流、电容电压、晶闸管电流、阻抗变化曲线如图6 所示。

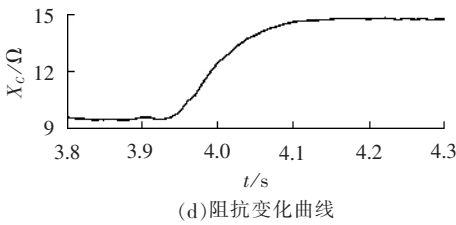
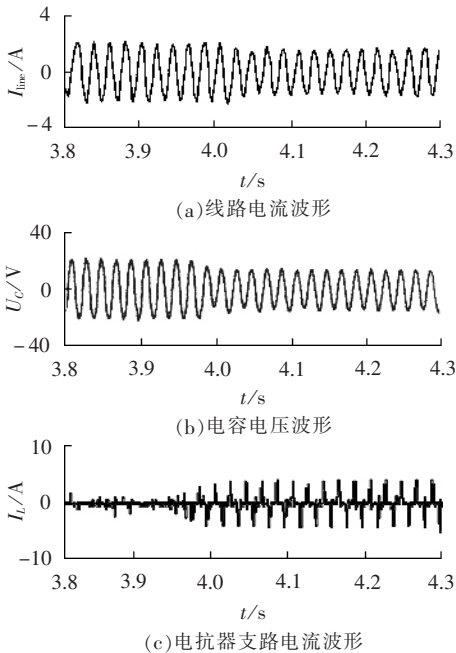


图 6 1.02 p.u.到 1.6 p.u.的阶跃响应

Fig.6 Step response from 1.02 p.u. to 1.6 p.u. under line current synchronization signal

b. 高补偿区向低补偿区阶跃。TCSC 容抗从 1.6 p.u.阶跃变化到 1.02 p.u.时线路电流、电容电压、晶闸管电流、阻抗变化曲线如图 7 所示。

由实验结果可看出,以线路电流为同步信号时:

- a. 不论从低补偿区向高补偿区还是高补偿区向低补偿区阶跃跳变时,基频阻抗均不会产生过冲和超调现象,变化过程比较平缓,类似于一阶惯性环节的阶跃现象,这也证实了文献[4]的结论;
- b. 从高补偿区跳变到低补偿区比相反方向跳变时进入稳态所需时间更短。

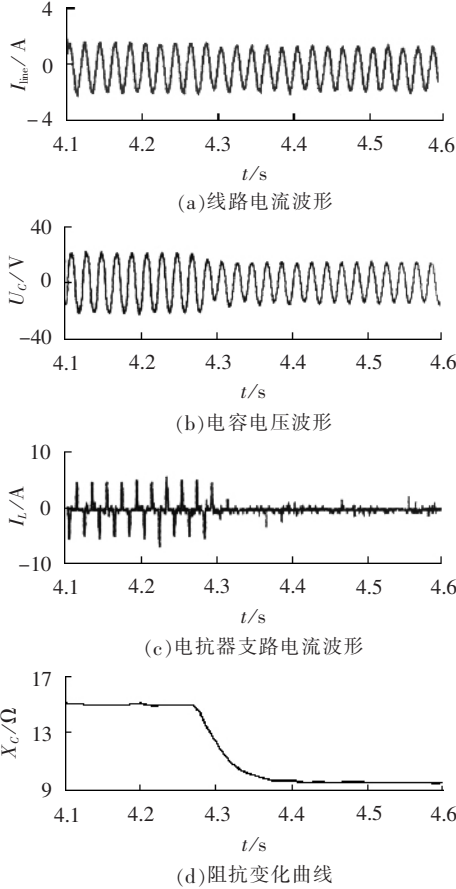


图 7 1.6 p.u.到 1.02 p.u.的阶跃响应

Fig.7 Step response from 1.6 p.u. to 1.02 p.u. under line current synchronization signal

3.2 工作区域转化

TCSC 在正常工作时常常需要在感性区和容性区之间切换,以达到改善电力系统动态特性的目的。而容性区和感性区之间切换时要跨越谐振区,这时系统可能会出现异常现象。本节主要研究在不同同步信号下,容性区、感性区相互转化时 TCSC 的暂态

特性。前文已经提到,感性区运行均为 Bypass,即以 小感抗方式运行。

3.2.1 电容电压同步

a. 容性区转换到感性区。由容性区 1.0 p.u. 转换为感性区(Bypass)时电容电压和电抗器支路电流如图 8 所示。

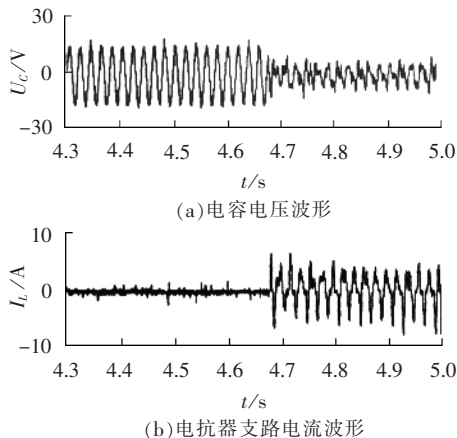


图 8 容性区转换到感性区(Bypass)时波形

Fig.8 Transition from capacitive to inductive region

可以看出,TCSC 从容性区转换到感性区(Bypass)的速度非常迅速,大约 1 个工频周期即可完成。

b. 感性区转换到容性区。由感性区(Bypass)转换到容性区 1.0 p.u.(Block), 1.02 p.u., 1.6 p.u. 时电容电压波形如图 9 所示。

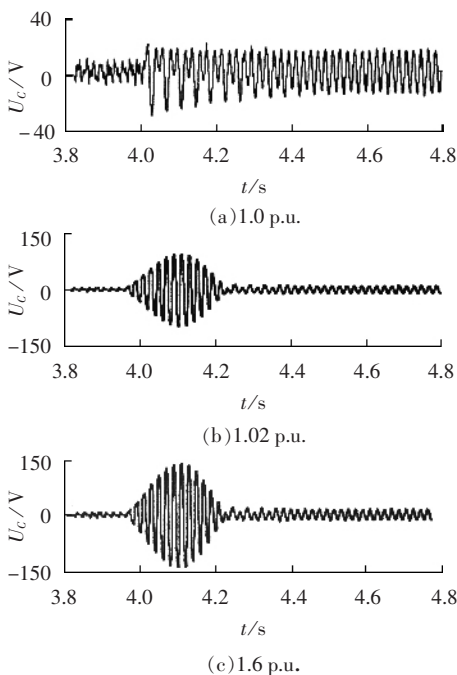


图 9 感性区(Bypass)转换到容性区时电容电压波形

Fig.9 Transition from inductive to capacitive region

试验结果表明,以电容电压为同步信号时:

a. 由感性区转换为容性区 Block 时,在转换的初始时刻电容电压会产生较大的直流分量,且经过较长的时间,该直流分量才逐渐衰减,经过大约 20 个工频周期系统进入稳态;

b. 由感性区转换到容性微调区时,电容器上会产生非常高的过电压和振荡,而且切换到容性补偿度越高的区域,电容器上产生的过电压越高,振荡时间越长。

因此,以电容电压为同步信号时,感性区切换到容性微调区时,系统会出现很高的过电压和振荡,必须采取一定的措施防止对设备安全运行造成威胁。经分析,提出一种策略:当需要感性区切换到容性微调区时,先将 TCSC 切换到 Block 方式,待进入稳态后(大约 20 个周期),再调节到需要的补偿度。由前面的试验可知,由感性切换到 Block 时,电容电压中会产生逐渐衰减的直流分量,却不会产生非常高的过电压,相对比较稳定;而在容性区内进行阶跃调节时系统也比较稳定。这样,加入 Block 这一中间过渡过程就避免了直接切换时出现的过电压和振荡。

3.2.2 线路电流同步

a. 容性区转换到感性区。由容性区 1.0 p.u. 转换为感性区(Bypass)时电容电压和电感支路电流如图 10 所示。

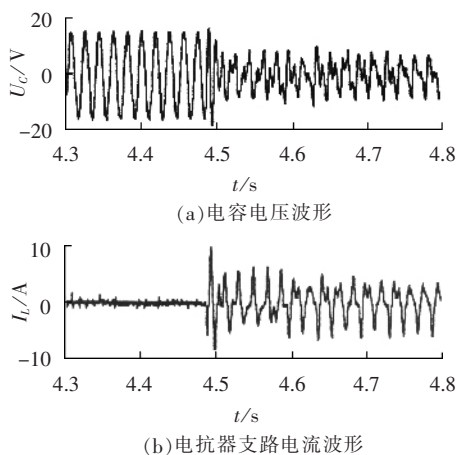
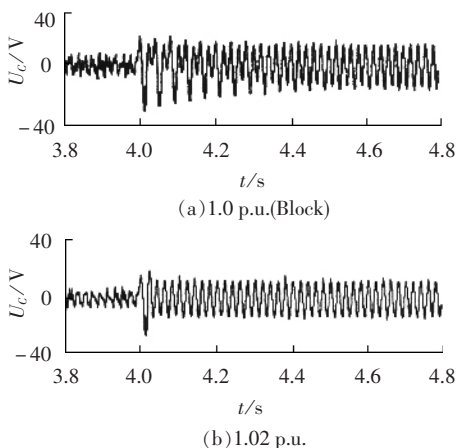


图 10 容性区转换到感性区(Bypass)时波形

Fig.10 Transition from capacitive to inductive region

可见,和电容电压同步时一样,TCSC 从容性转换到感性(Bypass)的速度非常迅速,大约 1 个工频周期即可完成。

b. 感性区转换到容性区。由感性区(Bypass)转换到容性区 1.0 p.u.(Block), 1.02 p.u., 1.6 p.u. 时电容电压波形如图 11 所示。



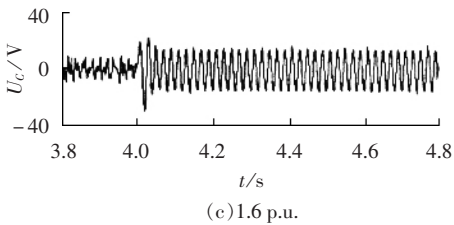


图 11 感性区(Bypass)转换到容性区时电容电压波形

Fig.11 Transition from inductive to capacitive region

试验结果表明,以线路电流为同步信号时:

a. 由感性区转换为容性区 Block 时,电容电压的动态变化过程和以电容电压为同步信号时的暂态过程十分相似,产生直流分量,经过 20 个工频周期后系统才进入稳态;

b. 由感性区转换为容性微调区时,系统的暂态特性和以电容电压为同步信号时大不相同,无论转换到容性高补偿还是低补偿区补偿区,TCSC 只需经过 2 个工频周期进入稳态,且不会产生振荡。

由此可见,以线路电流为同步信号,TCSC 由感性区转换到容性微调比转换到容性 Block 时更稳定、快速,且电容器上不会产生直流分量。因此,和电容电压同步不同,从感性区到容性微调区的跳变可以直接进行。

4 结论

a. 选择不同的同步信号,系统的暂态特性大不相同,且 TCSC 在不同的补偿度时,阶跃响应达到稳态的时间不同。电压同步时,从低补偿区向高补偿区阶跃时,需要 10 个周期的时间才能进入稳态,且基频阻抗会产生较大的过冲和超调;而从高补偿区向低补偿区阶跃时,只需大约 2 个周期的时间就能进入稳态,基频阻抗只产生很小的超调过程。电流同步时,不论从低补偿区向高补偿区还是高补偿区向低补偿区阶跃跳变时,基频阻抗均不会产生过冲和超调现象,变化过程比较平缓。

b. 电压同步时,从感性区跳变到容性微调区时,电容器上会产生很高的过电压,晶闸管上也会出现很大的过电流。为了避免这种情况,提出的方法是在跳变过程中加入 Block 这一中间过渡过程。

c. 电流同步时,由感性区转换为容性区 Block

时和电压同步相似;而由感性区转换为容性微调区时,TCSC 只需经过 2 个工频周期就进入稳态,且不会产生振荡。

d. 由文中多组动模实验表明,暂态过程中线路电流一直很稳定,且线路电流同步时的暂态过程中,过渡过程平稳而迅速。因此,选择线路电流作为同步信号对 TCSC 进行研究更为适合。

参考文献:

- [1] 葛俊,童陆园,耿俊成.基于电容电压同步信号的 TCSC 阻抗阶跃性的研究[J].电力系统自动化,2001,25(2):37-40.
GE Jun,TONG Lu-yuan,GENG Jun-cheng.Study on impedance step characteristics of TCSC based on capacitor voltage synchronizing signal [J]. *Automation of Electric Power Systems*,2001,25(2):37-40.
- [2] 徐政.可控串补装置的稳态特性分析[J].电力电子技术,1998,(2):32-35,31.
XU Zheng.Steady state characteristics analysis of thyristor controlled series compensation[J]. *Power Electronic Technology*,1998,(2):32-35,31.
- [3] 田杰,尹建华.可控串联补偿(TCSC)的分析研究(下)TCSC的触发控制方式对电力系统暂态特性的影响[J].电力系统自动化,1997,21(12):34-36.
TIAN Jie,YIN Jian-hua.Investigation of the thyristor-controlled series compensation(II) The effect of TCSC firing control schemes on the system performance[J]. *Automation Electric Power Systems*,1997,21(12):34-36.
- [4] HELBING S G,KARADY G G. Investigation of an advanced form of series compensation [J]. *IEEE Trans. on Power Delivery*,1994,9(2):939-947.
- [5] 刘晓冬,解大,陈陈.可控串联补偿(TCSC)系统感性微调区的 Pitchfork 分叉现象[J].中国电机工程学报,1999,19(12):1-4,69.
LIU Xiao-dong,XIE Da,CHEN Chen. Pitchfork bifurcation phenomenon of TCSC in inductive vernier operation mode[J]. *Proceedings of the CSEE*,1999,19(12):1-4,69.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

郑旭(1979-),男,湖北荆门人,硕士研究生,研究方向为电力系统仿真和电力系统控制;

裴志宏(1976-),男,河北唐山人,硕士研究生,研究方向为电力系统负荷建模。

Study on transient characteristics of TCSC with dynamic simulation

ZHENG Xu,PEI Zhi-hong,WANG Shao-rong,CHENG Shi-jie

(Huazhong University of Science and Technology,Wuhan 430074,China)

Abstract: Respectively with capacitive voltage and line current as the synchronization signal,the transient impedance characteristics of TCSC(Thyristor Controlled Series Compensation)during step change from high compensation to low compensation of the capacitive vernier region or vice versa are analyzed.The transient characteristics of TCSC during transitions between inductive region and capacitive region under different synchronization signals are studies. During the transition from capacitive region to inductive region or from inductive region to capacitive block mode,the transient processes under both synchronization signals are similar. However,during transition from inductive region to capacitive vernier region,it is necessary for TCSC under capacitive voltage synchronization signal to transit first to block mode and then adjust the compensation degree after steady,while under line current synchronization signal,it is not necessary.

Key words: TCSC; synchronous signal; transient characteristics