

# 可控串补 (TCSC) 模式切换控制策略的动模实验研究

李可军<sup>1</sup>, 孙莹<sup>1</sup>, 马悦<sup>2</sup>, 邹振宇<sup>2</sup>, 赵建国<sup>3</sup>, 牛林<sup>3</sup>

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013;  
3. 国家电网技术学院, 山东 济南 250002)

**摘要:** 基于模块化动模实验平台, 提出了一套可控串联补偿 (TCSC) 模式切换控制策略。动模实验证实了通过简单改变触发角 TCSC 的模式切换无法实现; 分析了电抗器支路不同品质因数对硬件旁路切换的影响, 通过串加小电阻的方法改进 TCSC 主回路接线以有利于模式切换的实现。采用线路电流与晶闸管支路电流同向触发的方法实现由容性运行模式到 Bypass 的切换。动模实验结果表明, 提出的模式切换策略能使切换过程平稳迅速, 且动态特性良好。

**关键词:** 可控串联补偿 (TCSC); 动模实验; 模式切换; 同向触发

## Dynamic simulation research on mode-switching control strategy of TCSC

LI Ke-jun<sup>1</sup>, SUN Ying<sup>2</sup>, MA Yue<sup>2</sup>, ZOU Zhen-yu<sup>2</sup>, ZHAO Jian-guo<sup>3</sup>, NIU Lin<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;  
2. Shangdong Electric Power Engineering Consulting Institute Corporation Limited, Jinan 250013, China;  
3. State Grid of China Technology College, Jinan 250002, China)

**Abstract:** Based on the dynamic simulation device of TCSC, a set of mode-switching control strategy is proposed. The dynamic simulation results show that it is impossible to realize mode-switching of TCSC only by changing firing angles. The influence of different quality factor of reactor branch on the hardware bypass switching is analyzed. The TCSC circuit connection is improved by adding small resistance in serial which can benefit the realization of mode switching. 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. Experimental results show that the proposed control strategy can make the switching process faster and possess better dynamic performance.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50977053).

**Key words:** thyristor controlled series capacitor (TCSC); dynamic simulation; mode-switching; forced synchronization

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)20-0115-06

## 0 引言

可控串联补偿 (TCSC) 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。TCSC 既可以平滑地调节阻抗, 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>[1-8]</sup>, 而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, 而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

动互相激励, 反而使系统更容易失去稳定。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。

动态模拟实验研究是电力系统研究的基本手段之一, 它区别于数值计算和数字仿真的特点就在于能够反映系统真实的物理特性。TCSC 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, 同时又不像现场试验那样受到系统运行条件的约束<sup>[9-12]</sup>。控制系统是 TCSC 装置的关键, 其性能的优劣直接关系到整个系统的运行效果, 而实验装置的控制器和实际工程的控制器的完全一样, 利用各种控制理论设计的 TCSC 控制装置可以在实验室首先进行试验, 其结果可直接为工程服务。因此, 以动模实验装置为平台开展对 TCSC 控制策略的研

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (50977053); 山东省科技攻关计划项目 (2008GG30001020); 教育部留学回国人员科研启动基金 ([2010]609); 山东大学自主创新基金项目

究具有重要的理论和实际意义。

TCSC 共有四种运行模式：容性微调、感性微调、Block 和 Bypass，理论上有 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 大都运行在上述前三种工作模式中，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范畴<sup>[12-14]</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 模式切换到 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。

本文基于 TCSC 动模实验装置平台，研究容性微调模式到 Block 以及从容性微调模式或 Block 模式到 Bypass 模式的切换控制策略，为 TCSC 工程的实际运行提供参考和技术支持。

### 1 TCSC 动模实验装置

TCSC 实验装置由控制柜和三个单相装置共 4 个机柜组成，如图 1 所示。单相装置包括主电路、保护电路和测试系统的传感器。控制柜内装设测试单元和控制单元，包括数据采集、数据处理、控制信号接口、工业控制计算机等。配置工业控制计算机是为了方便实验研究，允许实验人员根据自己的研究植入不同的控制方法和控制规律<sup>[13]</sup>。



图 1 TCSC 动模实验装置

Fig.1 The front view of the TCSC physical simulator

根据动模系统的线路参数以及模拟线路长度的不同，TCSC 实验装置主电路方案采用电容器分组并联、电抗器分抽头的组合方式，使得三种组合分别对应 600 km、400 km、300 km 线路长度，每种组合保证相应线路长度的可控串补范围基本相同，主电路结构示意图如图 2 所示，电容组和电抗器在每种组合情况下，TCSC 为三种线路长度提供的基本串补度

为 25% 左右，可控串补范围为 25%~75% 左右。

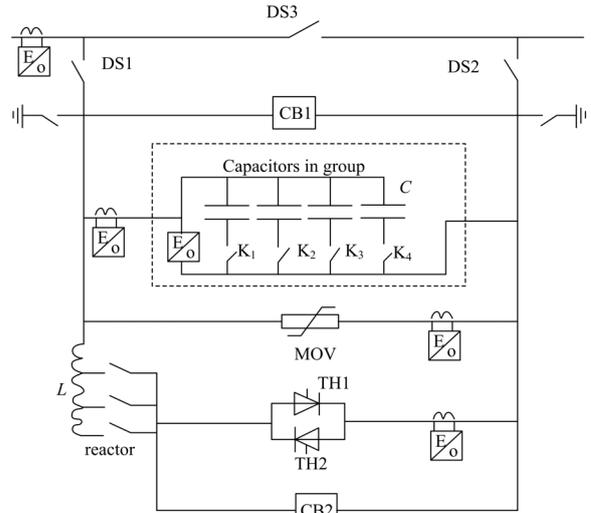


图 2 单相 TCSC 实验装置主电路接线图

Fig.2 Single line diagram of TCSC device in experiments

### 2 TCSC 简单模式切换

TCSC 动模实验系统接线如图 3 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， $C = 340 \mu F$ ， $L = 5.5 \text{ mH}$ ，晶闸管支路等效品质因数约等于 10。

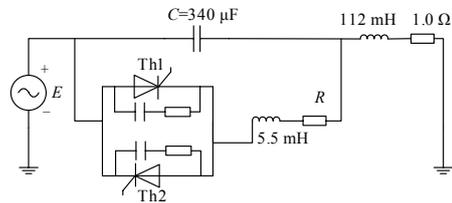


图 3 动模实验系统

Fig.3 Dynamic simulation system

图 4 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。

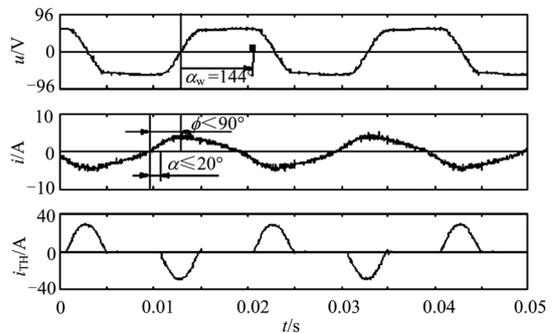


图 4 线路电流同步方式下触发角为 20° 时稳态实验结果

Fig.4 Experiment results synchronized by line current with firing angle at 20°

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。但是由于晶闸管导通特性和电抗器支路等效电阻的影响, 可以看到图 4 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。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。

### 3 TCSC 模式切换控制策略

#### 3.1 从容性微调模式切换到 Block 模式

线路电流同步时当 TCSC 从容性微调模式(触发角为  $58^\circ$ ) 直接切换到 Block 模式的动模实验结果如图 5 所示,  $I_{line}$ 、 $U_{capa}$ 、 $I_{Ia}$  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, 下同。

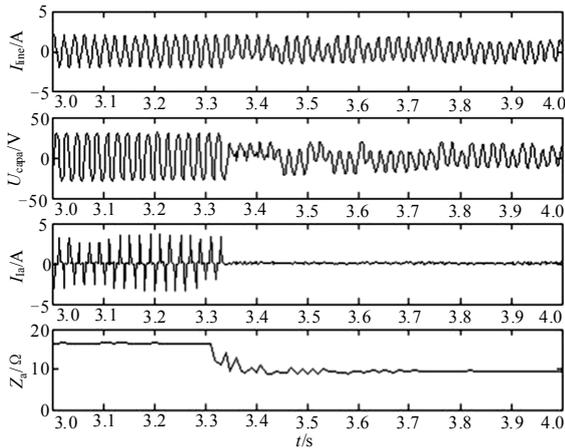


图 5 从容性微调模式切换到 Block 模式的实验波形

Fig.5 Experiment results when switching from capacitive vernier to Block

由于高倍阻抗对应的电容器电压较高, 电容器储存的能量也较高, 而 Block 对应的电容器电压较低, 储存的能量也较低, 因此在切换过程中, 这个能量必须经过某个回路释放掉。如果直接 Block, 那么电抗器支路完全断开, 电容器通过外电路放电, 使线路电流在最初几个周波产生明显的偏移, 而电容器电压则产生很大的畸变, 对整个系统不利。

为了避免上述情况发生, 可以让 TCSC 先从高倍阻抗过渡到低倍阻抗, 然后再 Block, 这样可使电容器的能量先通过电抗器支路放电, 在 TCSC 内部形成环流, 减少了对外电路的影响。这种切换策略的实验波形如图 6 所示。由图 6 可以看出, 整个

切换过程中, 线路电流几乎没有发生明显的变化, 电容器电压也平稳地过渡到低电压水平, 取得了很好的效果。如果从低倍阻抗要求 Block, 则可以直接切换, 因为此时电容器的能量较小, 放电过程不明显, 对系统的影响很小。

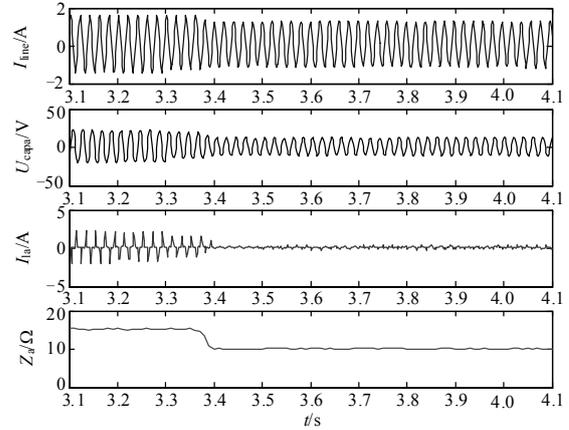


图 6 从高倍阻抗经低倍阻抗切换到 Block 的实验波形

Fig.6 Experiment results when switching from 2 to 1.2 times of basic capacitance and then to Block

#### 3.2 容性区切换到 Bypass 模式

##### 3.2.1 品质因数对硬件旁路切换的影响

电抗器支路的等效品质因数  $Q$  为电抗器感抗与电抗器所带电阻和晶闸管导通时等效电阻之和的比值:

$$Q = \omega L / (R_L + R_{TH}) \quad (1)$$

目前比较认可的从其他模式切换到 Bypass 模式的方法是通过硬件旁路的办法, 使正反向晶闸管连续不停地导通来实现。图 7 给出了不同品质因数下的切换过程仿真波形。

从图 7 可以看出, 随着品质因数的逐渐增大, 硬件旁路方法的切换效果也越来越差, 直至不能实现切换。

##### 3.2.2 改进 TCSC 主回路接线方式的方法

较低的品质因数可以有利于实现切换。而工程实际中电抗器支路品质因数都比较高, 为此这里提出一种新方法: 在电抗器支路中增加一个小电阻, 用晶闸管进行投切, 正常运行时不投入小电阻, 当模式切换时投入小电阻, 这样就可以在短时间内降低电抗器支路品质因数。这时就可以应用简单的硬件旁路方法进行模式切换, 该方法的接线图如图 8 所示。

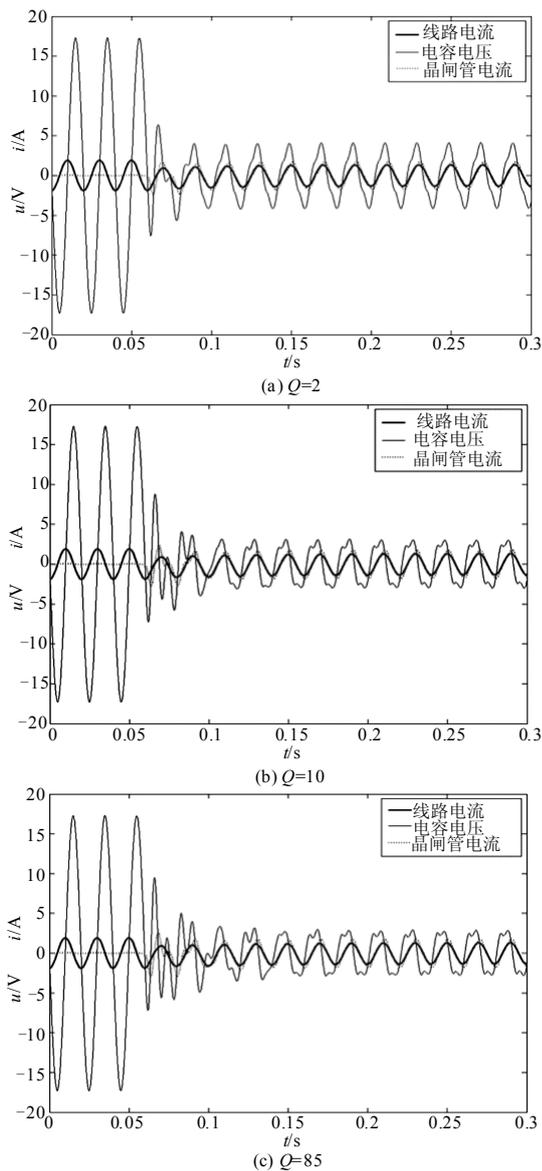


图7 不同品质因数下硬件旁路的仿真波形  
Fig.7 Simulation waveforms in hardware bypass with different  $Q$

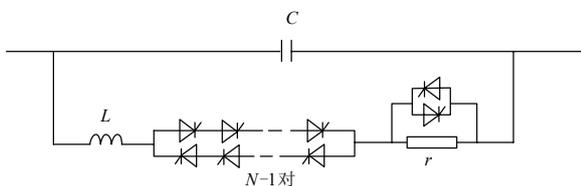


图8 改进的 TCSC 主接线图  
Fig.8 Improved connection diagram of TCSC

在实际的 TCSC 的工程中，都是采用十几个或二十几个晶闸管串联的方式来解决耐压问题。图8中在电抗器支路串加了一个小电阻，加上电抗器原来所具有的电阻和晶闸管导通时的等效电阻，使整

个电抗器支路的等效品质因数在 10 左右。为了能够快速投切该电阻，可在小电阻的两端并联一对晶闸管。这样当 TCSC 正常运行时，这一对晶闸管和其他对晶闸管同步导通，小电阻被短路，整个导通特性和原来一致。当要求 Bypass 时，断开这一对晶闸管，只对其他晶闸管进行控制，此时这一对晶闸管两端的电压就等于小电阻的导通电压。

采用此接线方式时使用硬件旁路办法实现由 Block 模式到 Bypass 模式的切换时的实验波形如图 9 所示。由图 9 可以看出，本方法很好地实现了模式切换。

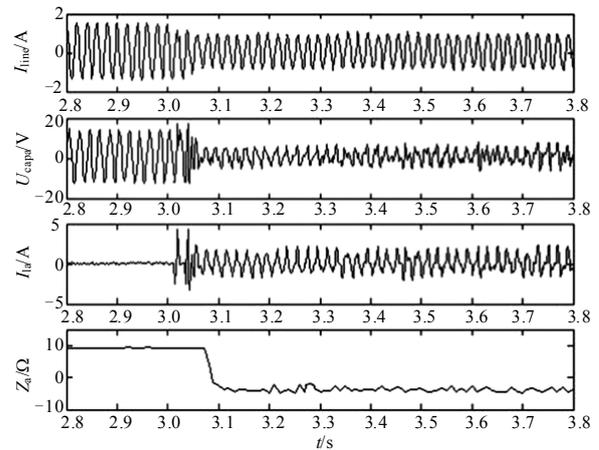


图9 通过串加小电阻实现模式切换实验波形图  
Fig.9 Experiment waveforms of mode-switching by adding the resistance in series

本方法的优点是简单可靠，并且可以避免由于晶闸管的短时关断带来的电容电压回升。但是该方法增加了一对晶闸管和小电阻。更需要指出的是，该方法在简化控制环节的同时，需要分别触发原来的晶闸管串和并联在小电阻两端的晶闸管对，给触发环节带来难度。在实际应用中的关键是小电阻值的选取及晶闸管对的可靠触发。

### 3.2.3 线路电流同向触发的切换方法

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时触发的方法，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。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，这时晶闸管不导通，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。

采用线路电流同向触发的方法, TCSC 分别从 Block 模式和容性微调模式 (触发角为  $58^\circ$ ) 切换到 Bypass 运行状态时的响应特性曲线如图 10 和图 11 所示。

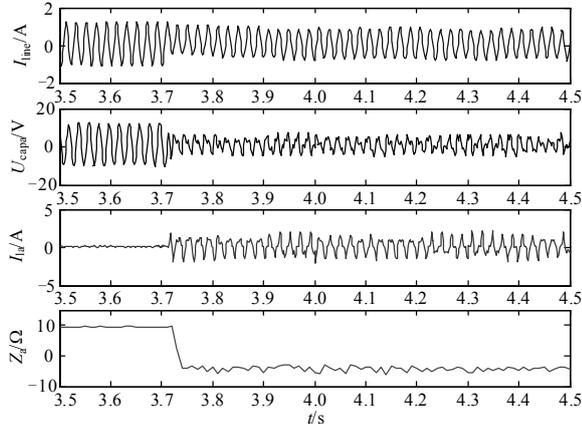


图 10 从 Block 模式切换到 Bypass 的实验波形  
Fig.10 Experiment results when switching from Block to Bypass

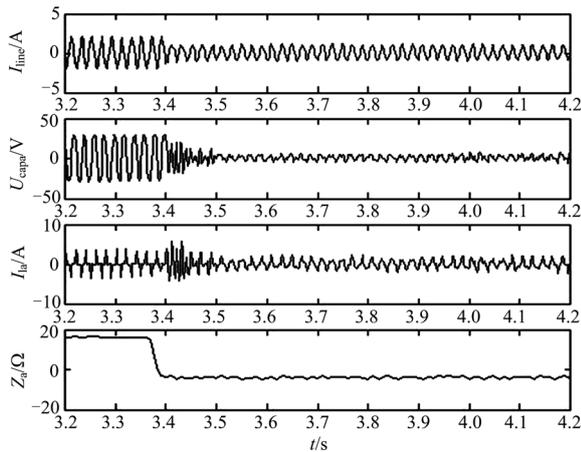


图 11 从容性微调模式切换到 Bypass 的实验波形  
Fig.11 Experiment results when switching from capacitive vernier to Bypass

图 10 和图 11 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。

当 TCSC 系统从 TCSC 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 12 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。

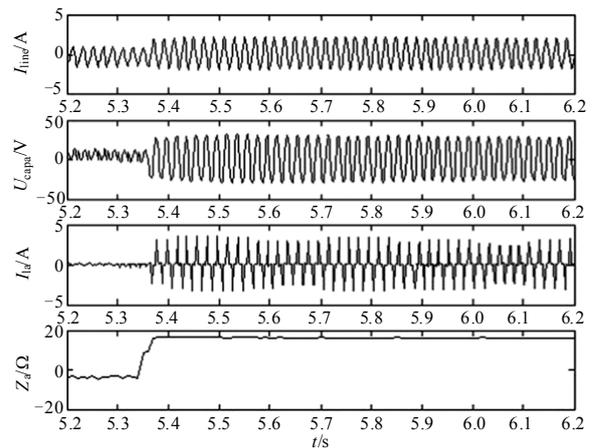


图 12 从 Bypass 切换到容性微调模式的实验波形  
Fig.12 Experiment results when switching from Bypass to capacitive vernier

TCSC 模式切换通常在电力系统出现大的扰动 (如短路故障) 时为保持系统稳定而进行的, 此时线路电流、电容电压等暂态波形变化剧烈, 准确把握两者同向的时段并在该区间内触发导通晶闸管是该方法在工程中应用的关键。

## 4 结论

TCSC 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 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, 可方便地用于 TCSC 的运行、保护和策略的研究。在分析品质因数对硬件旁路切换影响的基础上, 提出改进 TCSC 主回路接线方式的方法以利于实现切换。采用线路电流同向触发的方法实现由容性运行模式到 Bypass 的切换。动模实验结果表明, 所提出的一套切换控制策略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] 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 Ya-jian, WU Shou-yuan, ZHOU Xiao-xin, et al. SSR mitigation test studies of TCSC on analog simulator[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (6): 1-4.

[4] 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 Chun-lin, TONG Lu-yuan. Application of TCSC to damp oscillations in multi-machines system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (6): 1-6.

[5] 林字锋, 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 Zi-feng, XU Zheng, HUANG Ying. Design of TCSC auxiliary controller for inter-area power oscillation damping[J]. Power System Technology, 2005, 29 (22): 35-39.

[6] 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.

[7] Kakimoto N, Phongphananee A. Subsynchronous resonance damping control of thyristor-controlled series capacitor[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18 (3): 1051-1059.

[8] 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 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 (4): 37-40.

[9] 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.

[10] 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 Hui-yuan, JIANG Jian-guo, FENG Yu. Research on dynamic modeling and digital simulation of TCSC[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (5): 14-18.

[11] Dragan Jovicic, Pillai G N. Analytical modeling of TCSC dynamics[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (2): 1097-1104.

[12] Yin Z D, Tong L Y, Chen Y T, et al. A study on the characteristics of TCSC based on digital simulations and physical experiments[C]. //Proceedings of 1998 International Conference on Power System Technology. Beijing(China): 1998: 328-332.

[13] 姚伟, 孙海顺, 文劲宇, 等. TCSC动模装置及其实验研究[J]. 电力自动化设备, 2009, 29 (2): 51-55.

YAO Wei, SUN Hai-shun, WEN Jin-yu, et al. TCSC dynamic simulation device and experimental research[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29 (2): 51-55.

[14] 李可军, 赵建国, 孙海顺. 一种可控串联补偿动态模拟实验装置[J]. 电网技术, 2005, 29 (15): 71-75.

LI Ke-jun, ZHAO Jian-guo, SUN Hai-shun. An experiment device for thyristor controlled series compensation dynamic simulation[J]. Power System Technology, 2005, 29 (15): 71-75.

收稿日期: 2009-10-29; 修回日期: 2009-12-31

作者简介:

李可军 (1972-), 男, 副教授, 博士, 从事可控串补动态模拟及其控制策略的研究; E-mail: lkjun@sdu.edu.cn

孙莹 (1959-), 男, 教授, 主要从事电力系统自动化、电力系统运行与控制等领域的研究。

(上接第 114 页 continued from page 114)

[9] Zhang C, Chen G, Guo Z, et al. An alternating-master-slave parallel control research for single phase paralleled inverters based on CAN bus[C]. //Proc of IEEE IPEDMC. 2006: 1-5.

[10] Liserre M, Blaabjerg F, Hansen S. Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005, 41 (10): 1281-1291.

[11] Chen C L, Park S Y, Lai J S, et al. Admittance compensation in current loop control for a grid-tie LCL fuel cell inverter[C]. //Proc of IEEE PESC. Orlando FL: 2007: 520-526.

[12] Lasseter R H. Microgrids[C]. //Proc. of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. 2002: 305-308.

收稿日期: 2009-11-02; 修回日期: 2010-03-29

作者简介:

王玉斌 (1967-), 男, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为现代电力电子技术及应用。E-mail: sdjnywb@163.com