

# 可控串补晶闸管失控引起的振荡现象机理研究

王小立<sup>1</sup>, 张一工<sup>2</sup>

(1. 宁夏电力调度中心, 宁夏 银川 750001; 2. 华北电力大学, 北京 102206)

**摘要:** 根据可控串补的时域稳态特性, 分析了可控串补在感性调节模式下的两种具体情况, 定义了可控串补的正常感性调节模式和深度感性调节模式, 分别研究了这两种模式下的振荡现象, 指出这些振荡是由于晶闸管失控而产生, 并推导了可控串补发生振荡的临界条件。根据不同需求提出了几种电抗值选择原则, 对 TCSC 的规划设计有一定的指导意义。

**关键词:** 可控串补; 晶闸管; 失控; 振荡; 调节

## Mechanism research of TCSC resonance caused by thyristor out of control

WANG Xiao-li<sup>1</sup>, ZHANG Yi-gong<sup>2</sup>

(1. Ningxia Electric Power Dispatch Center, Yinchuan 750001, China; 2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Two states of TCSC which operated under Reactance Regulation Mode (RRM) are presented according to its time domain steady state characteristics. Normal Reactance Regulation Mode (NRRM) and Deep Reactance Regulation Mode (DRRM) are defined. Resonances caused by thyristor out of control under these two modes are researched. Critical conditions when resonance happens are presented. Several reactance selection principles are presented according to different requirements, which have some meanings to TCSC planning and designing.

**Key words:** TCSC; thyristor; out of control; resonance; regulation

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)05-0010-04

## 0 引言

可控串联补偿 (TCSC) 技术是柔性交流输电技术的组成部分之一, 它的基本思想是在输电线路中串联一个容抗, 以补偿线路自身感抗。采用晶闸管控制的电抗器 (TCR) 和串联电容器相并联, 通过改变晶闸管的触发角, 使得 TCSC 等效电抗在很大范围内快速、连续的调节。使用 TCSC 可以控制线路中传送的功率、阻尼线路功率振荡以及消除次同步谐振。

国内外的文献对可控串补稳态运行情况已经有了很多研究, 文献[1]中基于可控串补的稳态特性提出了  $K$  值和谐振点之间的关系, 认为当  $K > 3$  时可控串补可能出现多个谐振点。本文深入研究了  $K > 3$  时可控串补的稳态运行特性, 对可控串补发生振荡的机理给出了合理的解释, 认为在  $K > 3$  时可控串补在其调节范围内会发生多次振荡, 但这些振荡中只有一次是电容和电感的并联谐振, 其他都是由于晶闸管失控造成可控串补的正常运行条件被破坏而产生。

## 1 可控串补在感性调节区内的稳态特性

可控串补的原理电路如图 1 所示, 图 1 中表示

出了各物理量的参考方向, 可控串补在  $K > 3$  时的特性和  $K \leq 3$  时有明显的区别, 本文将  $K > 3$  称为小电抗情况,  $K \leq 3$  称为普通情况。由于小电抗情况下可控串补的特性主要反映于感性调节区内, 容性调节区内的特性和普通情况下基本一致, 故本文的研究主要集中在感性调节区。感性调节区内各物理量的波形如图 2 所示, 其中  $i_{line}$  为线路电流,  $i_L$  为 TCR 支路电流,  $v_c$  为电容电压,  $\alpha$  为触发延迟角,  $\beta$  为触发超前角,  $\beta = \pi - \alpha$ ,  $\sigma$  为导通角, 稳态情况下  $\sigma = 2\beta$ 。

定义  $I_m$  为线路电流有效值, TCSC 的自然振荡

$$\text{频率为 } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

定义  $\omega_0$  与电网基波频率  $\omega$  之比为

$$K = \frac{\omega_0}{\omega} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$$

式中:  $X_C$  为串补电容  $C$  的基波容抗;  $X_L$  为 TCR 支路  $L$  的基波电抗。

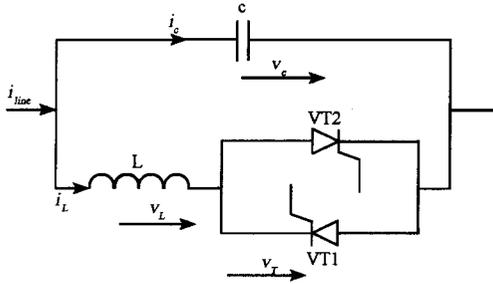


图 1 可控串补原理图

Fig.1 Schematic diagram of TCSC

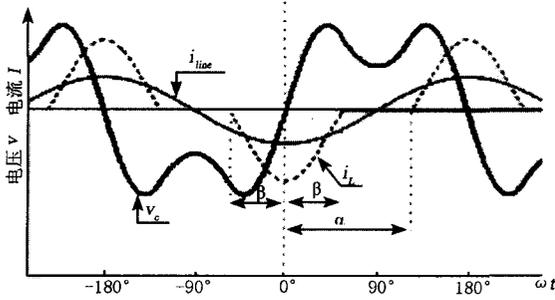


图 2 可控串补感性调节区内波形图

Fig.2 Waveform of TCSC reactance regulation mode

以电容电压  $v_c$  正向过零点为基准, 根据文献[1]

的分析, TCSC 在感性调节模式下, 电容电压的表达式为:

$$v_c(t) = \frac{-I_m}{\omega C(K^2 - 1)} \left( K \frac{\cos \beta}{\cos K\beta} \sin \omega_0 t - \sin \omega t \right), -\beta < \omega t \leq \beta \quad (1)$$

$$v_c(t) = \frac{-I_m}{\omega C} \left[ \sin \omega t + \frac{K}{K^2 - 1} (\cos \beta \tan K\beta - K \sin \beta) \right], \beta < \omega t \leq \pi - \beta \quad (2)$$

如图 2,  $v_c(t)$  在  $\omega t = \pi/2$  时取得一个极小值  $v_{c\min}$ ,

代入 (2) 式, 得:

$$v_{c\min} = \frac{-I_m}{\omega C} \left[ 1 + \frac{K}{K^2 - 1} (\cos \beta \tan K\beta - K \sin \beta) \right] \quad (3)$$

TCR 支路电流  $i_L$  的表达式为:

$$i_L(t) = \frac{-I_m K^2}{(K^2 - 1)} (\cos \omega t - \frac{\cos \beta}{\cos K\beta} \cos \omega_0 t), -\beta < \omega t \leq \beta \quad (4)$$

$$i_L(t) = 0, \quad \beta < \omega t \leq \pi - \beta \quad (5)$$

## 2 感性调节区内电容电压波形变化趋势分析

在导通角  $\beta$  由  $0^\circ$  变化到  $90^\circ$  范围内, 在  $K\beta = \pi/2$  时将会发生一次谐振, TCSC 等效电抗由容性跃变至感性<sup>[3]</sup>, 本节讨论 TCSC 在感性调节区内的波形,

即  $K\beta > \pi/2$  时的波形。

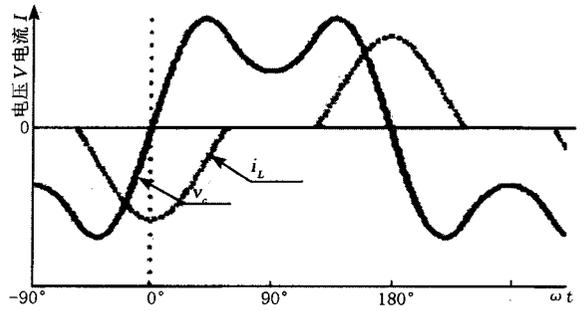


图 3 正常感性调节模式的波形

Fig.3 Waveform of TCSC normal reactance regulation mode

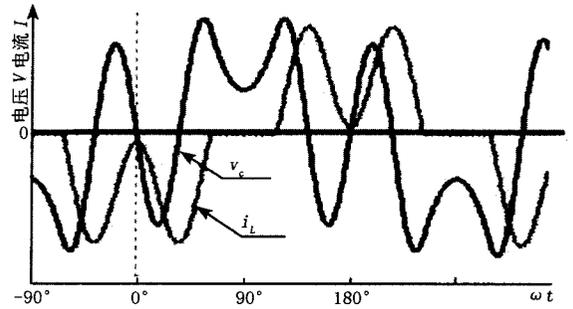


图 4 深度感性调节模式的波形

Fig.4 Waveform of TCSC deep reactance regulation mode

分析公式 (1), 晶闸管导通时的电容电压波形由两部分组成, 即  $K \frac{\cos \beta}{\cos K\beta} \sin \omega_0 t$  和  $\sin \omega t$ , 相当于  $\sin \omega_0 t$  和  $\sin \omega t$  两部分波形的叠加。当  $K\beta > \pi/2$  时, 前一部分的系数  $K \frac{\cos \beta}{\cos K\beta}$  可能为正值, 也可能为负

值, 因此导致感性调节区内电容电压  $v_c(t)$  的波形可能呈现两种情况, 两种情况下电容电压及相应的 TCR 支路电流分别如图 3 和图 4 所示。当  $K \frac{\cos \beta}{\cos K\beta} \leq 0$  时,  $\sin \omega_0 t$  和  $\sin \omega t$  同相, 对应图 3 中的电容电压及 TCR 支路电流波形, 当  $K \frac{\cos \beta}{\cos K\beta} > 0$  时,

$\sin \omega_0 t$  和  $\sin \omega t$  反相, 对应图 4 中的电容电压波形及 TCR 支路电流波形。

感性调节范围内满足  $K\beta > \pi/2$ , 据此分析可知仅当  $K\beta > 3\pi/2$  时才可能满足图 4 波形产生的条件, 即仅当  $K > 3$  时才可能产生图 4 中的波形。为了方便文中表达, 在此将图 3 的情况定义为正常感性调节模式, 图 4 的情况定义为深度感性调节模式。

### 3 可控串补晶闸管失控情况分析

文献[3]中根据 TCSC 的电流源模型列出其微分方程, 推导出 TCSC 发生谐振的条件是:

$$K\beta = (2m \pm 1)\pi/2 \quad m \text{ 为自然数} \quad (6)$$

本文经过分析后发现, 该结论是建立在一定假设条件之下的, 即一个周期内, 晶闸管在  $[-\beta, \beta]$  范围内导通,  $[\beta, \pi - \beta]$  范围内截止, 而且, 所有本文中列出的公式都是在该假设的基础之上推导的。

当  $K \leq 3$  时, 感性调节情况下波形如图 3 所示, 本文中的假设条件满足, 公式 (6) 成立, TCSC 仅在  $K\beta = \pi/2$  时发生一次并联谐振。

当  $K > 3$  时,  $\beta$  从  $0^\circ$  变到  $90^\circ$  过程中, 在  $K\beta = \pi/2$  时将发生一次并联谐振, 随着  $\beta$  的继续增大, 可控串补还有可能发生振荡, 其主要原因是由于电容电压波形在一个半周内出现过零, 电压波形的畸变导致晶闸管不能正常导通或关断(失控), 导致可控串补发生振荡。如图 5 所示的是正常感性调节情况下的临界波形, 在  $\omega t = \alpha$  时, 电容电压正好由负变正, 由于电容电压的对称性, 晶闸管将一直导通, 在  $\omega t = \pi + \beta$  时刻 TCR 支路电流减小至零, 但此时电容电压又变为正向, 晶闸管未有足够时间截止又再次导通, 此时晶闸管失控, 导通时间不再是  $-\beta < \omega t < \beta$ , TCSC 发生振荡。

图 6 为深度感性调节情况下的临界波形,  $\beta$  从大到小变化, 晶闸管在  $[-\beta, \beta]$  范围内导通,  $\beta$  减小到一定值时, 晶闸管在  $\omega t = 0$  时刻电流减小至零, 晶闸管截止, 不能在  $[-\beta, \beta]$  范围内导通, TCSC 同样发生振荡。

但应该注意的是需要把这种振荡和谐振区分开来, 因为这种振荡是因为晶闸管失控造成的。以下分别分析这两种情况发生的临界条件:

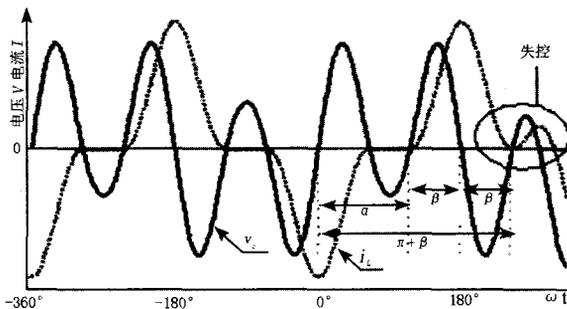


图 5 正常感性调节模式临界情况

Fig.5 Critical condition of TCSC normal reactance regulation mode

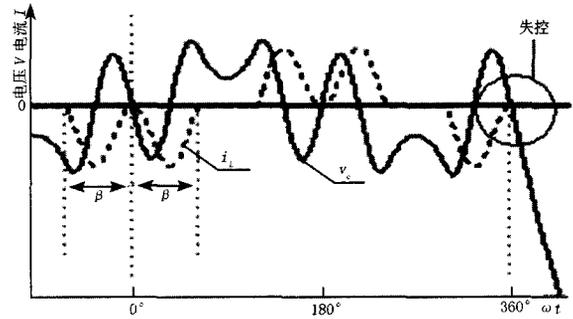


图 6 深度感性调节模式临界情况

Fig.6 Critical condition of TCSC deep reactance regulation mode

根据图 5 中的波形分析, 正常感性调节模式的临界情况发生条件为, 触发时刻电容电压  $v_c(t) = 0$ , 即  $\omega t = \pi - \beta$  时,  $v_c(t) = 0$ , 代入公式 (2), 得到:

$$\sin(\pi - \beta) + \frac{K}{K^2 - 1} (\cos \beta \tan K\beta - K \sin \beta) = 0$$

进而得到在正常感性调节模式下, 发生振荡的临界条件为:  $K \tan K\beta = \tan \beta$  (7) 分析该公式, 仅当  $K > 3$  时才可能成立, 和前面的分析一致。

再分析图 6 中的情况, 深度感性调节模式的临界情况发生条件为  $\omega t = 0$  时电感电流为 0, 代入公式 (4), 得到:

$$1 - \frac{\cos \beta}{\cos K\beta} = 0$$

由此可得到在深度感性调节模式下, 发生振荡的临界条件为:  $\cos \beta = \cos K\beta$  (8)

同样, 上式仅当  $K > 3$  时才可能成立, 据此可知,  $K > 3$  时可能会发生多次振荡, 但仅有一次是并联谐振, 其他全部是由于晶闸管失控而造成的振荡。

TCSC 运行时应该避开这些振荡点, 在给定  $K$  值的条件下, 可由公式 (7) 确定的一个最小的  $\beta$  角记为  $\beta_0$ , 则当  $K > 3$  时  $\beta$  的调节范围应该是从  $0^\circ$  到  $\beta_0$ , 这样, 在整个调节范围内, TCSC 只有一个谐振点, 控制时只需要避开该谐振点即可。

### 4 电抗值的选择原则

文献[2]中提出为了使可控串补在  $\beta$  由  $0^\circ$  变到  $90^\circ$  时只出现一个容性电抗区和一个感性电抗区, 应满足  $K \leq 3$ , 这么做是考虑到可控串补在调节范围内可能有多个振荡点, 为了避免多个振荡点而选择这样的条件。但通过限制触发角至  $[0^\circ, \beta_0]$  同样可以达到避开振荡点的目的, 这样就可以不必将  $K$  值限制在  $K \leq 3$  范围内, 而可以选择较小的电抗来

实现 TCSC。需要考虑的是  $K$  值过大将会使可控串补的阻抗灵敏度系数 ISF 增大<sup>[3]</sup>, 即调节单位角度导致的电抗变化增大, 不利于系统的稳定。但随着芯片技术的发展, 运算误差会越来越小, 对于 ISF 的限制可适当放宽。本文提出了以下几种选择原则, 可根据实际要求的不同具体考虑:

1) 在 TCSC 的调节范围内, 电容电压在一个半周内不应该有过零。在使用电容电压作同步信号时, 为了方便对同步电压信号进行处理, 电压在一个半周内不应该有过零点, 由此可推导使电压在一个半周内无过零点的条件。

公式 (3) 给出了可控串补在感性调节情况下, 其电容电压在一个半周内的极小值的表达式  $v_{c \min}$ , 选择合适的  $K$  值, 使  $\beta$  在所有取值范围内满足  $v_{c \min} > 0$ , 代入公式 (3), 得:

$1 + \frac{K}{K^2 - 1} (\cos \beta \tan K\beta - K \sin \beta) < 0$ , 由于讨论的是感性调节模式,  $\beta$  的取值范围为感性区间, 基于可控串补的基本要求,  $K > 1$ , 对  $K$  进行分段考虑:

$1 < K \leq 2$  时, 在  $\beta$  的所有取值范围内  $v_{c \min} > 0$

$2 < K \leq 3$  时,  $v_{c \min}$  在  $\sin K\beta = 0$  时达到最小值, 即  $\beta = \frac{\pi}{K}$  时  $v_{c \min} > 0$ , 代入公式 (3), 得:

$$1 - K^2 + K^2 \sin \frac{\pi}{K} > 0 \quad (9)$$

求解该不等式, 近似解为  $2 < K < 2.91$

$K > 3$  时,  $v_{c \min}$  不可能在  $\beta$  的所有取值范围内全为正。

由以上推导可知, 当  $1 < K < 2.91$  时, 可控串补在感性调节范围内, 电容电压在半个周波内不会有过零点, 在以电容电压作为同步信号的情况下以此为原则选择电抗值, 可以简化对同步信号的处理。

2) 在 TCSC 的全部调节范围内只有一个谐振点, 使 TCSC 在避开晶闸管失控引起的振荡点基础上  $\beta$  的调节范围最大。根据前文中的分析,  $K \leq 3$  时, TCSC 在  $\beta$  从  $0^\circ$  变化到  $90^\circ$  范围内只有一个并联谐振点。

3) TCSC 在整个调节范围内感性电抗的调节范围最大, 即可以使感抗调节至 0。

可控串补处于正常感性调节模式,  $K$  大于一定值时会出现等效基频电抗为零的情况, 由图 3 中的电压波形也可以看出, 一定条件下, 其基频电压幅值有可能为 0。但由于  $K$  值过高会导致可控串补阻抗灵敏度 ISF 增大, 影响系统稳定运行, 综合考虑可以选择在阻抗为零时振荡作为临界条件, 这样既

增大了可控串补感性电抗的调节范围, 又兼顾了系统的稳定性。

可控串补稳定运行时基频等效电抗表达式为<sup>[1]</sup>:

$$X_{\text{eq}} = \frac{1}{\omega C} \left[ 1 - \frac{K^2}{\pi(K^2 - 1)} (2\beta + \sin 2\beta) + \frac{4K^2 \cos^2 \beta}{\pi(K^2 - 1)^2} (K \tan K\beta - \tan \beta) \right] \quad (10)$$

代入以上条件, 得到使可控串补在感性调节模式下调节范围最大的  $K$  值选择条件为:

$$\begin{cases} K \tan K\beta - \tan \beta = 0 \\ 1 - \frac{K^2}{\pi(K^2 - 1)} (2\beta + \sin 2\beta) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

由该方程组可确定出  $K$  和  $\beta$ , 使得可控串补的阻抗调节范围最宽,  $\beta$  为避免振荡的临界导通角。经图解计算,  $K$  和  $\beta$  的近似取值为  $K=3.59$ ,  $\beta=56^\circ$ 。即选择  $K=3.59$  时,  $\beta$  从  $0^\circ$  调节到  $56^\circ$ , TCSC 基频等效电抗可调节至 0, 调节范围最大。

## 5 结论

本文根据 TCSC 的稳态特性, 提出 TCSC 在一定条件下可能会发生晶闸管失控, 进而导致其发生振荡的观点; 根据电容电压波形的差异, 将 TCSC 在感性区中的波形分为正常感性调节模式和深度感性调节模式两种情况; 推导了 TCSC 晶闸管在两种模式下发生失控的临界条件。

对 TCSC 在  $K > 3$  时出现多个谐振点的理论分别进行了仿真分析和理论推导, 从 TCSC 稳态特性成立的前提条件出发, 结合本文中提出的 TCSC 晶闸管失控问题, 认为理论上推导出的多个谐振点发生时刻正好处于晶闸管失控状态, 已不满足稳态稳态特性推导的条件, 所以此时发生的振荡并非谐振。

最后, 本文根据实际需求的不同, 提出了几种 TCSC 电抗值选择的依据, 该依据对 TCSC 的规划设计有一定指导意义。文中利用数字仿真验证了晶闸管失控的情况。

## 参考文献

- [1] XU Zheng, ZHANG Gui-bin, LIU Hai-feng. The Controllable Impedance Range of TCSC and Its TCR Reactance Constraints[A]. In: Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE[C]. 2001.939-943.
- [2] 徐政. 可控串联补偿装置的稳态特性分析[J]. 电力电子技术, 1998,(2): 32-35.

(下转第 46 页 continued on page 46)

种新的基于 SOM 的算法——DPSOM 算法进行实验, 并成功地得到了比较满意的可视化结果: 不但分类结果更加完善, 而且将原始 SOM 算法不能区分的点分离开来, 从而达到了可视化的目的, 为电力系统暂态稳定评估提供了支持。

参考文献

[1] 李军, 刘艳, 顾雪平. 基于信息熵的属性离散化算法在暂态稳定评估中的应用[J]. 电力系统自动化, 2005,29(8): 26-31.  
LI Jun, LIU Yan, GU Xue-ping. An Entropy-based Discretization Method Applied in Transient Stability Assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (8): 26-31.

[2] 王成山, 许晓菲, 余贻鑫. 基于割基功率空间上的静态电压稳定域局部可视化方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (9): 13-18.  
WANG Cheng-shan, XU Xiao-fei, YU Yi-xin. Visualization of Power System Static Voltage Stability Region in Cut-set Space[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (9): 13-18.

[3] 方怡, 王君, 王晓茹. 暂态稳定评估的数据挖掘预处理[J]. 机电工程, 2007, 24 (10): 46-50.  
FANG Yi, WANG Jun, WANG Xiao-ru. Data Preprocess of Association Rules Based on Transient Stability Assessment[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2007, 24(10): 46-50.

[4] 向丽萍, 王晓红, 王建. 基于支持向量机的暂态稳定分类中的特征选择[J]. 继电器, 2007, 35 (9): 17-21.  
XIANG Li-ping, WANG Xiao-hong, WANG Jian. Feature Selection for SVM Based Transient Stability Classification[J]. Relay, 2007, 35 (9): 17-21.

[5] 邵超, 黄厚宽. 一种新的基于SOM的数据可视化算法[J]. 计算机研究与发展, 2006, 43 (3): 429-435.  
SHAO Chao, HUANG Hou-kuan. A New Data Visualization Algorithm Based on SOM[J]. Journal of Computer Research and Development, 2006, 43 (3): 429-435.

[6] 涂晓芝, 颜学峰, 钱锋. 基于SOM网络的基因表达数据聚类分析[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2006, 32 (8): 992-996.  
TU Xiao-zhi, YAN Xue-feng, QIAN feng. Cluster Analysis of Gene Expression Data Based on SOM Network[J]. Journal of East China University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2006, 32 (8): 992-996.

[7] 白耀辉, 陈明. 利用自组织特征映射神经网络进行可视化聚类[J]. 计算机仿真, 2006, 23 (1): 180-183.  
BAI Yao-hui, CHEN ming. Visualizing Clusters Based on the Self-Organizing Map[J]. Computer Simulation, 2006, 23 (1): 180-183.

[8] Kohonen T. The Self-organizing map[J]. Proceedings of the IEEE, 1990, 78(9): 1464-1480.

[9] Shao C, Huang H K. Improvement of Data Visualization Based on SOM[A]. In: Proc. Int'l Symposium on Neural Networks[C]. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 707-712.

[10] Merk D, Rauber A. Alternative Ways for Cluster Visualization in Self-organizing Maps[A]. In: The Workshop on Self-Organizing Maps(Wsom'97)[C]. Helsinki University of Technology, 1997.

[11] Wang D, Ressom H, Musavi H, et al. Double Self-organizing Maps to Cluster gene Expression Data[A]. In: The 10th European Symposium on Artificial Neural Networks (ESANN'02) [C]. Bruges: 2002.

收稿日期: 2008-05-10; 修回日期: 2008-06-08

作者简介:

李亦宁(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为数据挖掘与电力系统紧急控制; E-mail: liyning84@163.com  
王晓茹(1962-), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统保护与安全稳定控制、变电站自动化;  
向丽萍(1981-), 女, 硕士研究生, 研究方向为数据挖掘与电力系统紧急控制。

(上接第 13 页 continued from page 13)

XU Zheng. Steady State Characteristics Analysis of Thyristor Controlled Series Compensation[J]. Power Electronics, 1998,(2):32-35.

[3] 徐政. 可控串补的可控范围及串容与电抗关系的研究[J]. 电工技术学报, 1998, 13(3):13-17.  
XU Zheng. The Controllable Impedance Range of TCSC and the Parameter Selection Method of Its TCR[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1998, 13(3):13-17.

[4] 胡国文, 王仲鸿, 韩英铎. 可控串补基频等效阻抗与TCR基频电抗关系的仿真和动模实验研究[J]. 电工技术学报, 2002, 17(4):93-99.  
HU Guo-wen, WANG Zhong-hong, HAN Ying-duo. Research of the Numerical Emulation and Dynamic Simulation of the Relation Between the Basic Frequency

Equivalent Impedance of the TCSC and Basic Frequency Reactance of the TCR[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(4):93-99.

[5] 韩彦华, 李琥, 施围. 可控串补等值阻抗的计算方法研究[J]. 电工技术学报, 2003, 18(11):96-99.  
HAN Yan-hua, LI Hu, SHI Wei. An Approach to Calculating the Equivalent Impedance of TCSC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(11):96-99.

收稿日期: 2008-04-22; 修回日期: 2008-06-22

作者简介:

王小立(1980-), 男, 硕士, 主要从事电网调度运行工作; E-mail: wxl\_972116@163.com  
张一工(1956-), 男, 教授, 主要研究方向为电力电子技术 在电力系统中的应用。