

## TCSC 阻抗特性及其导通角对次同步谐振的抑制分析

郑亚强<sup>1</sup>, 李华伟<sup>1</sup>, 吴涛<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044; 2. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045)

**摘要:** 为了解决目前普遍应用的 TCSC 基波阻抗公式无法解释次频正电阻的问题, 推导了 TCSC 基波阻抗的复数表达式, 提出了 TCSC 导通角的选择依据。利用基波阻抗的复数形式, 分析得到 TCSC 受导通角影响, 基波电抗呈现出感性或容性特征, 基波电阻会表现出负电阻和正电阻特性; 次频电抗也会表现出感性或容性特征, 次频电阻始终呈现正值。通过改变导通角使次频电抗呈感性能够有效抑制 SSR, 使工频电阻为负值能够给次频正电阻提供能量; 导通角的选择应同时满足工频下电抗呈容性、次频下呈感性以及工频下电阻为负值。算例分析表明, TCSC 基于上述依据选择导通角能够有效抑制系统的 SSR, 证明了导通角选择的合理性和基波阻抗表达式的正确性。

**关键词:** 可控串联电容 (TCSC); 次同步谐振 (SSR); 基波阻抗复数模型; 次频阻抗特性

### Impedance characteristics of TCSC and its conduction angle for sub-synchronous resonance mitigation

ZHENG Ya-qiang<sup>1</sup>, LI Hua-wei<sup>1</sup>, WU Tao<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. North China Electric Power Research Institute Co., Ltd, Beijing 100045, China)

**Abstract:** In order to explain the positive resistance phenomenon of sub-synchronous frequency based on the commonly used fundamental frequency impedance of TCSC, the complex expression of fundamental frequency impedance is derived and selection principle of TCSC conduction angle is proposed. The fundamental frequency reactance of TCSC is capacitive or inductive and its resistance will be negative or positive. The sub-synchronous reactance of TCSC will also be capacitive or inductive and the sub-synchronous resistance is always positive with conduction angle's influence. Inductive reactance plays a major role for SSR mitigation and power frequency negative resistance provides energy to the positive resistance under sub-synchronous frequency. TCSC conduction angle's selection should make sure that the reactance should be capacitive under power frequency, and inductive under sub-synchronous frequency, meanwhile the power frequency resistance should be negative. Simulation results show that TCSC can mitigate SSR effectively based on the above basis. It proves rationality of selecting the conduction angle and correctness of the fundamental frequency impedance expression.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A113).

**Key words:** thyristor controlled series capacitor (TCSC); sub-synchronous resonance (SSR); complex model of fundamental-frequency impedance; sub-synchronous frequency impedance characteristic

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)16-0027-06

## 0 引言

次同步谐振(SSR)将引起汽轮机轴系的扭曲变形甚至断裂, 造成严重的经济损失。晶闸管控制串联电容(TCSC)补偿装置用于电力系统, 可以提高功率传输极限, 控制系统潮流, 增加系统阻尼作用,

改善系统稳定性, 有效地抑制电力系统次同步谐振, 其研究得到了快速发展<sup>[1]</sup>。文献[2]从机械和电气阻尼对抑制机理进行了分析。文献[3]采用固定串补加可控串补来抑制 SSR, 但其所用的基波阻抗公式实际只是基波电抗部分。文献[4-5]推导了考虑电抗器支路电阻影响的 TCSC 基波阻抗公式, 提出了阻抗双解问题并做了初步分析, 但其实际绘制的是 TCSC 电抗的双解曲线。文献[6]认为 TCSC 抑制 SSR 是电阻特性和电感特性共同作用的结果, 当晶闸管

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划项目 (2011AA05A113); 中央高校基本科研业务费专项基金 (2011JBM112)

导通角较大时,能够有效抑制 SSR。文献[7]给出了等值阻抗的算法,但其认为晶闸管闭锁时 TCR 支路存在电阻,与其他文献相悖。文献[8]则认为当触发角很大时,TCSC 表现为电阻特性,不能有效抑制系统 SSR。文献[9]从能量的角度分析了正电阻特性的抑制机理,但只分析了触发角在 $100^\circ \sim 180^\circ$ 时的情况。文献[10]给出了 TCSC 次同步频率下的阻抗表达式并绘制了三维图形,但其阻抗计算公式及波形与文献[6]又存在差异,并且对电容特性没有分析。文献[11]认为 TCSC 在工频下存在一个负电阻,但其只是从能量的角度进行了定性分析,没有具体的定量计算。文献[12]提出了一种直接计算次同步等值阻抗的算法,并且说明 TCSC 的正电阻随着导通角的增大而增大,这与文献[10]中绘制的 TCSC 三维电阻特性图存在矛盾。文献[13]认为 TCSC 在次同步频率下相当于电阻和电感的串联,其不再表现出容性特性。

综上所述可以看出,文献从不同角度对 TCSC 特性进行了分析,且对抑制机理的分析存在一定差异,对基波阻抗普遍采用如式(1)。

$$X_{\text{TCSC}} = X_C - \frac{X_C}{(k^2-1)} \frac{2\sigma + \sin 2\sigma}{\pi} + \frac{4X_C \cos^2 \sigma k \tan(k\sigma) - \tan \sigma}{(k^2-1)^2 \pi} \quad (1)$$

本文重新推导了 TCSC 的基波阻抗表达式,给出 TCSC 基波阻抗的复数表达形式,证明了式(1)只是其中的电抗部分,各文献在电抗和阻抗概念的分析上存在不足;同时绘制了 TCSC 在次频下的阻抗特性图,表明次频下存在临界导通角,且随导通角变化呈现正电阻、电容和电感特性,仿真得到不同特性对系统 SSR 的抑制效果,并从理论上阐述了不同特性抑制 SSR 的机理,最后综合考虑工频和次频阻抗特性提出 TCSC 导通角的选择方法,为工程中导通角的控制策略提供了理论依据。

## 1 TCSC 基波阻抗计算

### 1.1 TCSC 基本接线图

TCSC 是 FACTS 的重要组成部分,可控串补装置(TCSC)的一次回路主要组成元件为:电容器 C、电感 L、反并联晶闸管 SCR。TCSC 理想化模型电路接线图如图 1 所示。

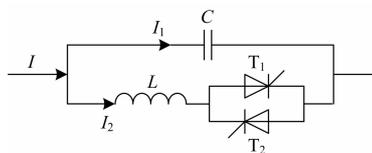


图 1 TCSC 电路结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of TCSC circuit

设  $\alpha$  为电流同步的触发角,  $\beta$  为晶闸管的导通角。 $i(t)$  为工频电流, 设其最大值为  $I_m$

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

### 1.2 晶闸管截止时数学模型及求解

当晶闸管由导通变为截止时可得

$$C \frac{dv_c(t)}{dt} = i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (3)$$

令  $\sigma = \frac{\beta}{2}$ ,  $\varphi_1 = \frac{\pi}{2} + \sigma$ , 则

$$v_c(t) = \frac{I_m}{\omega C} \sin \sigma - \frac{I_m}{\omega C} \sin(\omega t + \sigma) + V_{C0} \quad (4)$$

### 1.3 晶闸管导通时数学模型及求解

当晶闸管由截止变为导通时, 令  $\varphi_2 = \frac{\pi}{2} - \sigma$  可得

$$\begin{cases} C \frac{du_c(t)}{dt} = I_m \sin(\omega t + \varphi_2) - i_L(t) \\ L \frac{di_L(t)}{dt} = u_c(t) \end{cases} \quad (5)$$

对式(5)进行拉普拉斯变换得

$$\begin{cases} sCU_c(s) - CU_{C0} = I(s) - I_L(s) \\ sLI_L(s) = U_c(s) \end{cases} \quad (6)$$

对  $i(t)$  进行拉氏变换得

$$I(s) = \frac{I_m}{s^2 + \omega^2} (\omega \sin \sigma + s \cos \sigma) \quad (7)$$

对式(6)整理可得

$$U_c(s) = \frac{sL}{1 + s^2LC} \left[ \frac{I_m}{s^2 + \omega^2} (\omega \sin \sigma + s \cos \sigma) + CU_{C0} \right] \quad (8)$$

对式(8)进行拉氏反变换得

$$u_c(t) = \frac{I_m}{\omega C k^2 - 1} \cdot [\cos \sigma (k \sin k\omega t - \sin \omega t) - \sin \sigma (\cos k\omega t - \cos \omega t)] + U_{C0} \cos k\omega t \quad (9)$$

由于电容电压是关于过零点对称的, 所以有

$$V_{C0} = U_c \left( \frac{2\sigma}{\omega} \right) = -U_{C0} \quad (10)$$

把式(10)代入式(9)可得

$$\begin{aligned} & \frac{I_m}{\omega C k^2 - 1} \cdot \\ & [\cos(k \sin 2k\sigma - \sin 2\sigma) - \sin \sigma (\cos 2k\sigma - \cos 2\sigma)] + \\ & U_{C0} \cos 2k\sigma = -U_{C0} \end{aligned} \quad (11)$$

整理得

$$U_{C0} = \frac{I_m}{\omega C k^2 - 1} (k \tan k\sigma \cos \sigma - \sin \sigma) \quad (12)$$

把式(12)代入式(9)可得  $u_C(t)$ 。

#### 1.4 基波阻抗计算

对从电流正向过零点开始的周期电容电压波形进行如下傅里叶积分, 求取电容电压基波分量, 其中要综合考虑晶闸管导通状态和截止状态, 并且  $u_C(t)$ ,  $v_C(t)$  均应选取基波分量, 而不是直接全部代入。对于式(9), 其基波分量为

$$u_{C1}(t) = \frac{I_m}{\omega C k^2 - 1} [\sin \sigma \cos \omega t - \cos \sigma \sin \omega t] \quad (13)$$

对于  $v_C(t)$ , 由式(4), 可得  $v_{C1}(t) = v_C(t)$ 。

由于电容电压为分段函数, 并且  $u_{C1}(t)$ 、 $v_{C1}(t)$

既包含奇函数又包含偶函数, 则傅里叶积分如式(14)。

$$U(j\omega) = \frac{4\omega}{\pi} \int_0^{\frac{\pi-\sigma}{\omega}} v_{C1}(t) e^{-j\omega t} dt + \frac{4\omega}{\pi} \int_{\frac{\pi-\sigma}{\omega}}^{2\omega} u_{C1}(t) e^{-j\omega t} dt = \frac{4\omega}{\pi} \left[ \int_0^{\frac{\pi-\sigma}{\omega}} v_{C1}(t) \cos \omega t dt + \int_{\frac{\pi-\sigma}{\omega}}^{2\omega} u_{C1}(t) \cos \omega t dt \right] - j \frac{4\omega}{\pi} \left[ \int_0^{\frac{\pi-\sigma}{\omega}} v_{C1}(t) \sin \omega t dt + \int_{\frac{\pi-\sigma}{\omega}}^{2\omega} u_{C1}(t) \sin \omega t dt \right] \quad (14)$$

可见式(14)有实部和虚部组成, 得其第一项实部结果为

$$\frac{2I_m}{\pi\omega C} \left[ \sin 2\sigma - \cos \sigma + \left(\sigma - \frac{\pi}{2}\right) \sin \sigma \right] + \frac{4I_m}{\pi\omega C k^2 - 1} \cdot \left[ -\cos \sigma \sin^2 \sigma + \frac{\sigma \sin \sigma}{2} - k \tan k\sigma \cos^2 \sigma + \sin \sigma \cos \sigma \right] \quad (15)$$

第二项虚部结果为

$$\frac{2I_m}{\pi\omega C} \left[ \left(\sigma - \frac{\pi}{2}\right) \cos \sigma - 2\sin^2 \sigma \right] + \frac{2I_m}{\pi\omega C k^2 - 1} \cdot \left[ 2k \tan k\sigma \cos \sigma \sin \sigma + 2\sin^2 \sigma - 2\sin \sigma \cos^2 \sigma + \sigma \cos \sigma - \sin \sigma \right] \quad (16)$$

TCSC 的基波阻抗表达式为

$$Z_{TCSC} = \frac{\dot{U}}{I} = \left\{ \frac{2}{\pi\omega C} \left[ \sin 2\sigma - \cos \sigma + \left(\sigma - \frac{\pi}{2}\right) \sin \sigma \right] + \frac{4}{\pi\omega C k^2 - 1} \left[ -\cos \sigma \sin^2 \sigma + \frac{\sigma \sin \sigma}{2} - k \tan k\sigma \cos^2 \sigma + \sin \sigma \cos \sigma \right] \right\} + j \left\{ \frac{2}{\pi\omega C} \left[ \left(\sigma - \frac{\pi}{2}\right) \cos \sigma - 2\sin^2 \sigma \right] + \frac{2}{\pi\omega C k^2 - 1} \left[ 2k \tan k\sigma \cos \sigma \sin \sigma + 2\sin^2 \sigma - 2\sin \sigma \cos^2 \sigma + \sigma \cos \sigma - \sin \sigma \right] \right\} \quad (17)$$

其中:  $\omega_0 = \sqrt{1/LC}$ ;  $k = \omega_0/\omega = \sqrt{1/\omega^2 LC}$ 。

#### 2 基波阻抗特性分析

可见 TCSC 基波阻抗存在实部和虚部, 即存在电阻和电抗, 其值都与晶闸管导通角有关。绘制以  $X_C$  为底数的基波电阻、电抗及模值的标幺值曲线如图 2。

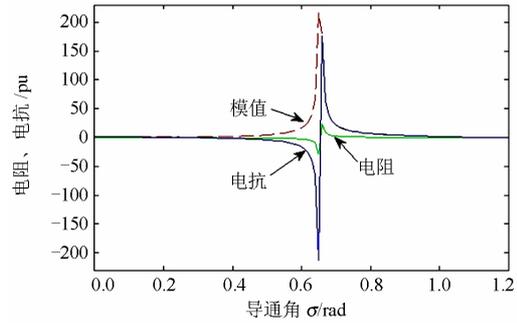


图2 TCSC基波电阻、电抗图

Fig. 2 Fundamental-frequency resistance and reactance diagram of TCSC

由图2可以看出基波电阻和电抗都存在正值和负值, 其大小随晶闸管导通角的变化而变化。

同理, 由现普遍应用的式(1)绘制得阻抗特性图如图3。

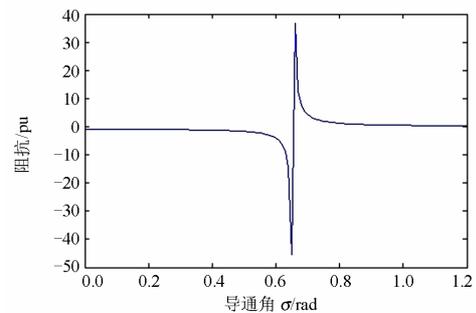


图3 TCSC基波阻抗图

Fig. 3 Fundamental-frequency impedance diagram of TCSC

可见本文推导的公式与公式(1)所绘图形基本一致，但式(1)实际上只是电抗的表达式，未包含电阻部分，本文绘制了包含电阻和电抗的阻抗曲线，可以看出基波电抗表现出容性和感性，从而纠正了以往文献中认为 TCSC 在工频下只表现为容性的错误认识。

TCSC 自身可以认为是非耗能的，但是现已证明在次同步频率下有正电阻的存在，其所消耗的能量必然由工频提供，目前还没有文献对次频正电阻给出具体的解释，文献[11]从能量的角度说明工频下存在负电阻，但也只是进行定性分析，没有具体的定量计算。本文进行了详细的推导并绘制了基波电阻曲线，由图 2 可以看出基波电阻随导通角的变化确实存在负值，采用本文参数绘制基波电阻和次频电阻的特性如图 4 所示。

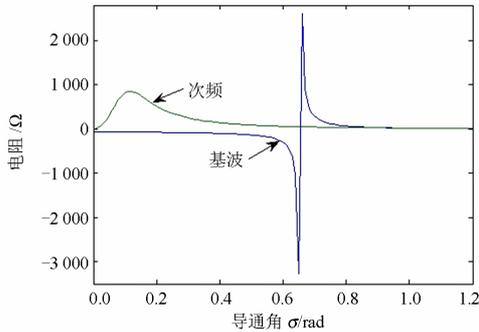


图4 基波电阻和次频电阻图

Fig. 4 Resistance diagram of fundamental and sub-synchronous frequency

可见基波负电阻发出能量，补偿次频正电阻对能量的消耗，从而合理地解释了 TCSC 在次同步频率下的正电阻特性，在导通角的控制上要始终保持基波电阻呈现负值，为后续的控制策略提供了理论依据。

### 3 SSR 系统的建模与仿真

#### 3.1 系统参数设计

以IEEE第一标准模型为例，汽轮机轴系采用6轴段的分段集中质量弹簧模型，轴系自然频率为15.7 Hz(TM1)、20.2 Hz(TM2)、25.5 Hz(TM3)、32.3 Hz(TM4)、47.5 Hz(TM5)，输电线路电压等级为500 kV，发电机容量为600 MVA，系统等效图如图5所示。

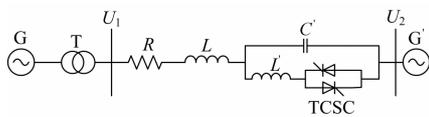


图5 系统等效图

Fig. 5 Equivalent diagram of system

输电线路采用 55% 的串补度，可得： $C' = 24.11 \mu\text{F}$ ，文中采用 TCSC 代替全部的串联电容补偿，对于 TCSC 中  $L'$  的选取，由  $k = \sqrt{X_{C'}/X_{L'}}$  根据国内外的运行经验， $k$  的取值一般在 2.3~2.7 之间，从而使 TCSC 在整个导通角内只有一个谐振点，本文选取  $k=2.4$ ，得  $L'=61.3 \text{ mH}$ 。

#### 3.2 轴系扭矩仿真

利用 Matlab/Simulink 进行电路仿真，以三相瞬时短路为扰动信号，故障发生在母线  $U_2$  处，在 0.1 s 时发生短路，0.2 s 时故障被切除。

(1) 晶闸管闭锁模式，即晶闸管触发角为  $180^\circ$ ，此时相当于系统采用固定串联电容补偿，低压缸 (LPB) 与发电机 (GEN) 之间扭矩情况如图 6。

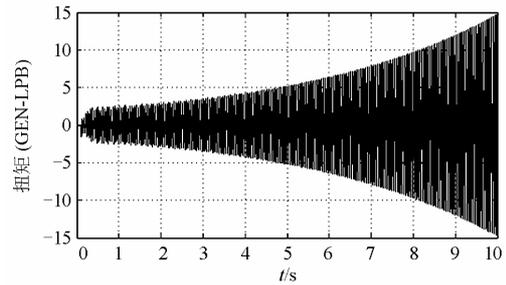


图6 低压缸 (LPB) 与发电机 (GEN) 扭矩

Fig. 6 Torque curve of LPB-GEN shafting

由波形图可以看出，采用固定串联电容补偿，当故障切除之后，系统振荡失稳，截取某一时刻波形并进行放大如图 7。

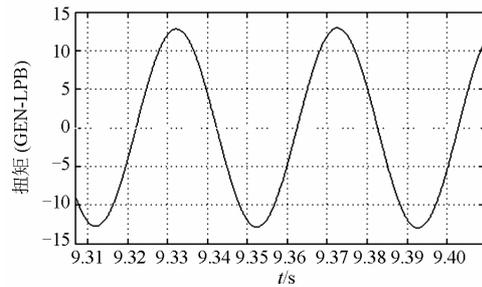


图7 扭矩放大波形

Fig. 7 Amplification diagram of the torque

由图7可以看出  $f=25 \text{ Hz}$  左右，正好对应于模式 3，即系统发生了 TM3 为主导模式的次同步谐振。

(2) 晶闸管微调模式，设置晶闸管的触发角为  $170^\circ$ ，观察低压缸 (LPB) 与发电机 (GEN) 之间的扭矩情况如图 8。

可见系统的振荡幅值得到一定的削弱，但系统最终还是振荡失稳。

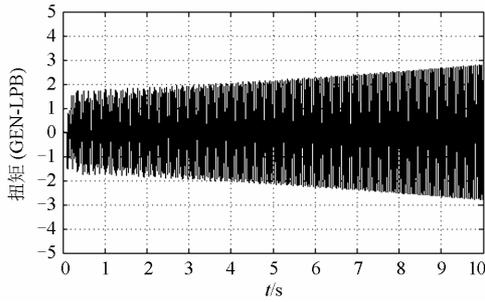


图8 触发角为170°时扭矩波形

Fig. 8 Diagram of torque when firing angle is 170°

设置晶闸管触发角为155°, 相同条件下观察低压缸(LPB)与发电机(GEN)扭矩波形如图9。

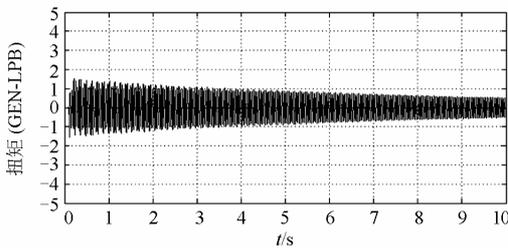


图9 触发角为155°时扭矩波形

Fig. 9 Diagram of torque when firing angle is 155°

再次设置晶闸管触发角为135°, 观察扭矩波形如图10。

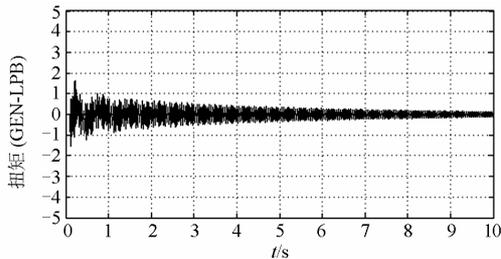


图10 触发角为135°时扭矩波形

Fig. 10 Diagram of torque when firing angle is 135°

可见两种情况下系统扭矩都得到很好的抑制, 只是在抑制速度上存在微小差异。

#### 4 TCSC 对 SSR 的抑制机理分析

根据文献[6]可得TCSC在次同步频率下的导纳表达式如式(18)。

$$Y = G + jB = \frac{k}{\pi f_{\text{sub}} L} (1 - \cos \frac{\sigma}{k}) + j \left[ f_{\text{sub}} C + \frac{1}{\pi f_{\text{sub}} L} (k \sin \frac{\sigma}{k}) - \sigma \right] \quad (18)$$

则可得阻抗的表达式为

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{G}{G^2 + B^2} - j \frac{B}{G^2 + B^2} \quad (19)$$

其中,  $f_{\text{sub}}$  为次同步频率。

由此可绘制出系统在TM3模式下TCSC的阻抗特性图如图11。

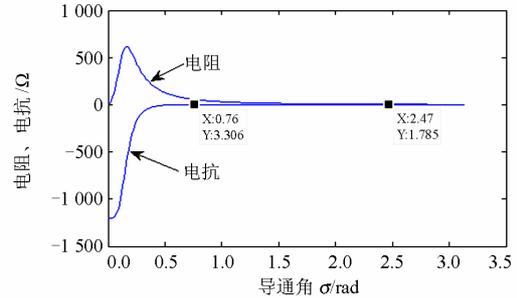


图11 次同步频率TCSC阻抗特性

Fig. 11 Impedance diagram of TCSC under sub-synchronous frequency

由图11可以看出次同步频率下, TCSC在整个导通角内始终存在一个正电阻, 其阻值随导通角的变化先增后减; 电抗则存在容性和感性两种状态, 且容性到感性是平滑过渡, 不像工频基波阻抗特性那样存在显著的谐振区域, 且电抗值先增后减, 容性到感性过渡存在一个临界导通角, 其公式如下<sup>[10]</sup>:

$$\sigma = \frac{2\pi^2 f_{\text{sub}}}{k \omega_0} \quad (20)$$

其中,  $\omega_0$  为工频角速度。

对于TM3模式, 可得临界导通角  $\sigma = 31.8^\circ$ 。

(1) 当触发角为170°时, 即导通角为10°, 由仿真波形来看, 虽然系统的振荡幅值得到一定的削弱, 但是系统最终还是振荡失稳, 此时TCSC主要表现出正电阻特性, 正电阻的存在使TCSC在次同步频率下等效为一个RLC串联谐振电路, 则可知其品质因数  $Q = \omega L/R$ , 当R增大时, Q将减小, 谐振电路的振荡幅值与Q成正比, 因此系统的振荡扭矩将被削弱, 但是R始终存在且呈减小的趋势, 系统振荡幅值最终还是放大, 正电阻只能起到削弱系统振荡幅值的作用, 不能从根本上抑制SSR。

(2) 当触发角为155°时, 即导通角为25°, 小于临界导通角, 由阻抗特性知此时TCSC电抗表现为容性, 但是由仿真结果来看, 系统的SSR现象得到了抑制, 这是因为此区域容抗斜率较大, 导通角的微小变化将导致容抗的较大变化, 破坏了系统发生次同步谐振的条件, 加上TCSC本身的正电阻特性, 也在一定程度上起到抑制作用, 从而对系统SSR起到了抑制作用, 但其本身存在引发系统SSR的危险。

(3) 当触发角为135°时, 即导通角为45°, 由仿

真结果可以看到系统的SSR被很好的抑制,此时TCSC的电抗表现为感性,而电阻则一直减小,基本呈“中性”,不存在使系统发生谐振的条件,从而很好地破坏了系统发生次同步谐振的条件,从根本上抑制了系统的SSR现象。

## 5 结论

TCSC 基波阻抗表现出电阻和电抗特性,电阻值随导通角的变化会表现出负值,从而为次频正电阻提供能量,基波电抗则表现出容性和感性。实际工程中TCSC导通角的控制要综合考虑工频和次频两个方面:(1)使次频阻抗呈感性来彻底抑制系统的SSR;(2)工频下电抗呈容性提高传输功率,电阻呈现负值为次频正电阻提供能量。本文通过计算分析及仿真验证给出了导通角的选择依据,从而为后期导通角控制策略的设计提供了理论支持。

## 参考文献

- [1] 张健,冀瑞芳,李国庆. TCSC 优化配置提高可用输电能力的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 23-28.  
ZHANG Jian, JI Rui-fang, LI Guo-qing. Study of enhancement of available transfer capability using TCSC optimal allocation[J]. Power System Protection Control, 2012, 40(1): 23-28.
- [2] 吴熙,蒋平. TCSC 在次同步谐振中的借阻尼现象[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 34-38.  
WU Xi, JIANG Ping. Borrow damping phenomena of TCSC to subsynchronous resonance[J]. Power System Protection Control, 2010, 38(2): 34-38.
- [3] 白菲菲,和鹏,张鹏,等. 抑制次同步谐振的串补方案仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 121-125.  
BAI Fei-fei, HE Peng, ZHANG Peng, et al. Simulation research on series compensation schemes for damping subsynchronous resonance[J]. Power System Protection Control, 2011, 39(19): 121-125.
- [4] 李可军,赵建国. TCSC 阻抗双解现象的机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 33-39.  
LI Ke-jun, ZHAO Jian-guo. The mechanism research on dual impedance solutions of TCSC[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 33-39.
- [5] 李可军,孙莹,马悦,等. TCSC 模式切换控制策略的动模试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 115-120.  
LI Ke-jun, SUN Ying, MA Yue, et al. Dynamic simulation research on mode-switching control strategy of TCSC[J]. Power System Protection Control, 2010, 38(20): 115-120.
- [6] 高俊,丁洪发. TCSC 的次频阻抗特性[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(12): 24-28.  
GAO Jun, DING Hong-fa. The sub-synchronous frequency impedance features of TCSC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(12): 24-28.
- [7] 韩彦华,李璇,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(1): 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(1): 96-99.
- [8] 葛俊,童陆园,耿俊成,等. TCSC 抑制次同步谐振的机理研究及其参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 25-29.  
GE Jun, TONG Lu-yuan, GENG Jun-cheng, et al. The mechanism research of SSR mitigation by TCSC and its parameter design[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 25-29.
- [9] 张少康,李兴源,张振,等. TCSC 及其主动阻尼控制对次同步谐振的抑制[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 22-26.  
ZHANG Shao-kang, LI Xing-yuan, ZHANG Zhen, et al. Research on suppressing sub-synchronous resonance by TCSC and its active damping control[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 22-26.
- [10] 康海燕,王西田. TCSC 次同步频率阻抗特性及其抑制 SSR 的参数设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(5): 91-96.  
KANG Hai-yan, WANG Xi-tian. Sub-synchronous frequency impedance characteristics of TCSC and its parameter design for mitigating SSR[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(5): 91-96.
- [11] 韩光,童陆园,葛俊,等. TCSC 抑制次同步谐振的机理分析[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(2): 18-21.  
HAN Guang, TONG Lu-yuan, GE Jun, et al. The mechanism research of SSR mitigation by TCSC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(2): 18-21.
- [12] 吕世荣,刘晓鹏,郭强,等. TCSC 对抑制次同步谐振的机理分析[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(6): 14-18.  
Lü Shi-rong, LIU Xiao-peng, GUO Qiang, et al. The mechanism research of SSR mitigation by TCSC[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(6): 14-18.
- [13] 曹路,陈珩. 可控串联补偿抑制次同步谐振的机理[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(4): 25-30.  
CAO Lu, CHEN Heng. The mechanism research of SSR mitigation by thyristor controlled series capacitor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(4): 25-30.

收稿日期: 2013-11-10; 修回日期: 2014-03-05

作者简介:

郑亚强(1989-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统分析; E-mail: 12121593@bjtu.edu.cn

李华伟(1970-),女,通讯作者,副教授,研究方向为电力系统仿真与控制技术。E-mail: hwli@bjtu.edu.cn