混合串联补偿装置抑制次同步谐振的研究

高本锋[1] 肖湘宁[1] 赵成勇[1] 郭春林[1] 赵洋[2]
（1. 华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室 北京 102206;2. 北京市电力公司 北京 100020）

摘要 分析了由静止同步串联补偿器（SSSC）与固定串联电容器（FSC）组成的混合串联补偿装置（HSC）的原理，研究了 HSC 安装位置和补偿容量配比对发电机电气阻尼特性的影响。结果表明，在不采用主动阻尼控制时，HSC 自身能够缓解但不能从根本上解决次同步谐振（SSR）问题。提出了 SSSC 主动阻尼 SSR 的控制机理，即通过对 SSSC 的电压参考值（电抗参考值）进行次同步频率调制，控制其输出电压的幅值和相位使其在系统中产生大小和相位适当的模态互补频率电流，进而在发电机中产生对应模态的阻尼扭矩，实现主动阻尼 SSR 的目的。设计了主动阻尼控制器，提出了其参数整定方法。复转矩系数法和时域仿真法结果表明，采用主动阻尼控制后，HSC 能够有效地抑制 SSR。

关键词：混合串联补偿装置 静止同步串联补偿器 固定串联电容器 次同步谐振 主动阻尼控制器

中图分类号：TM71

Study of Hybrid Series Compensator on Sub-Synchronous Resonance Damping

Gao Benfeng[1] *Xiao Xiangning*[1] *Zhao Chengyong*[1] *Guo Chunlin*[1] *Zhao Yang*[2]
（1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control Under Ministry of Education North China Electric Power University Beijing 102206 China;2. Beijing Electric Power Company Beijing 100020 China）

Abstract This paper analyzes the principle of hybrid series compensator (HSC), which is composed by static synchronous series compensator (SSSC) and fixed series capacitor (FSC). The impact of installation location and compensation ratio of HSC on electrical damping is studied. Results show HSC can weaken but can't damp out the SSR problems without active damping. The principle of SSSC to actively damp sub-synchronous resonance (SSR) is proposed, which is realized by modulating the voltage (reactance) reference value of SSSC sub-synchronously, and then injecting voltage with appropriate amplitude and phase so as to generate the current components of the complementary frequencies and produce corresponding damping torque of generator. Based on this principle, active damping controller is designed. Complex torque coefficient method and time domain simulation results show that HSC can damp SSR effectively with active damping strategy.

Keywords: Hybrid series compensator, static synchronous series compensator, fixed series capacitor, sub-synchronous resonance, active damping controller

国家自然科学基金（ 50577024）和中央高校基本科研业务费专项资金（ 09QX63）资助项目。
收稿日期 2010-01-19 改稿日期 2010-03-26

1　引言

为了提高线路输送能力，采用固定串联电容器（Fixed Series Compensator，FSC）进行补偿在交流输电系统得到了广泛应用。 FSC 造价较低，可大幅度提高系统的同步转矩系数，增强系统稳定性，但可能会引起电力系统的次同步谐振（ Sub-Synchronous Resonance，SSR）问题[1-2]。

静止同步串联补偿器（ Static Synchronous Series Compensator，SSSC）是一种基于电压源逆变器（VSC）的串联型 FACTS 装置[3-4]。理论上，SSSC 除了基波电压之外，不会向系统当中串入其他频率的电压，因此同其 他的柔性交流输电（FACTS）装置相比， SSSC 不仅具有 FSC 的串联补偿功能，而且能有效地抑制 SSR[5-8]。

鉴于目前 SSSC 的造价较高，因此可以将 SSSC 和 FSC 串联组合成混合串联补偿装置（Hybrid Series Compensator，HSC）。HSC 不仅解决了单独利用 FSC 补偿时的 SSR 问题，而且降低了单独利用 SSSC 进行串联补偿时的造价过高的问题，因此具有较好的应用前景。国内外的文献主要集中在 SSSC 的建模和暂态过程分析方面，但对 HSC 抑制次同步 谐振的特性以及主动阻尼控制器的设计研究较少[9-11]。

本文阐述了 HSC 的工作原理，采用复转矩系数法，分析了 HSC 安装位置和补偿容量配比对发电机电气阻尼特性的影响。提出了利用 HSC 对 SSSC 的参考电压（参考电流）进行次同步频率调制，从而主动阻尼 SSR 的机理。设计了主动阻尼控制器，并对其有效性进行了验证。

2　HSC 的工作原理

如图 1 所示，HSC 由 SSSC 和 FSC 串联组合而成，其等效电抗值 X_{HSC} 应为 SSSC 等效电抗 X_{SSSC} 和 FSC 电抗 X_{FSC} 的和。假设线路电流为 $\dot{I}_L$，SSSC 注入线路的电压为 $\dot{V}_{SC}$，可求得 SSSC 的等效电抗 X_{SSSC} 为 $\dot{V}_{SC}/\dot{I}_L$。改变 SSSC 注入电压 $\dot{V}_{SC}$ 的大小，即

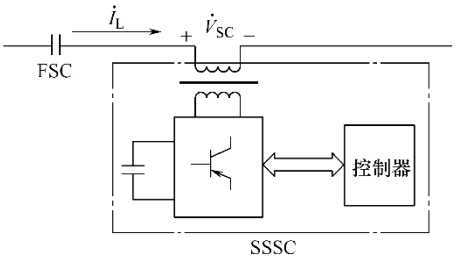


图 1　HSC 结构示意图

Fig.1　Structure diagram of HSC

可改变 SSSC 等效电抗的大小，从而改变 HSC 的等效电抗值 X_{HSC}。

因为 FSC 不可控，HSC 的控制通过控制 SSSC 实现。SSSC 基本控制框图如图 2 所示，有恒电压和恒阻抗两种运行方式。

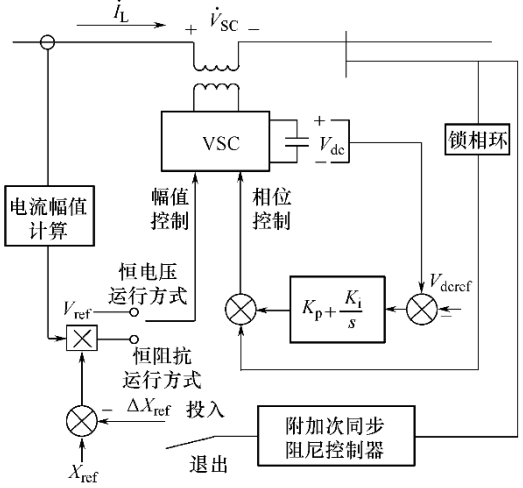


图 2　SSSC 的基本控制框图

Fig.2　Control diagram of SSSC

3　测试模型

基于 IEEE 次同步谐振第一标准模型，本文搭建包括 SSSC 的测试模型，等效电路如图 3 所示。采用复转矩系数法分析时，发电机采用单刚体模型；时域仿真时，发电机采用多质量块模型，其 自然扭振频率分别为 15.7Hz（模式 1）、20.2Hz（模式 2）、25.5Hz（模式 3）、32.3Hz（模式 4）和 47.5Hz（模式 5）[12]。

系统的基准容量为： S_B=894.2MVA，U_B=539kV；发电机输出的有功功率为 0.9（pu），无功功率为　0.3（pu）。仿真过程中， HSC 的补偿容量保持不变，其等值电抗 X_{HSC} 恒为容性 0.4（pu）。系统详细参数见文献 [12]。

定义 SSSC 补偿百分比 k 为：SSSC 补偿容量占 HSC 总补偿容量的比值，即 $k=X_{SSSC}/X_{HSC}\times100\%$。

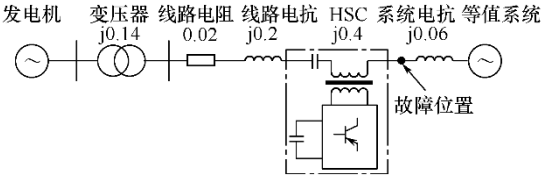


图 3 测试模型等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of test model

根据复转矩系数法的理论[13]，电气阻尼系数 D_e 的表达式为

$$D_e(f)=\mathrm{Re}\left(\frac{\Delta\dot{T}_e(f)}{\Delta\dot{\omega}(f)}\right) \quad (1)$$

式中，$\Delta\dot{T}_e$ 和 $\Delta\dot{\omega}$ 分别为发电机施加频率为 f 的脉动转矩后发电机电磁转矩和角速度的增量。

4 HSC 电气阻尼特性研究

4.1 HSC 的安装位置对发电机 D_e 的影响

SSSC 补偿百分比为 20%，保持图 3 中的其他参数不变，改变 HSC 与输电电路的相对位置，分别计算 HSC 位于输电线路始端、中间和末端时的电气阻尼特性 D_e（步长为 1Hz），仿真结果如图 4 所示。可以看出，HSC 安装位置对发电机电气阻尼特性影响很小。

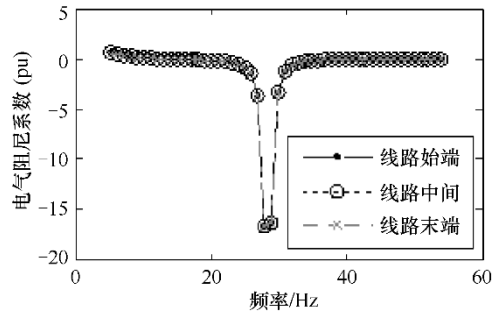


图 4 不同安装位置对阻尼特性 的影响

Fig.4 Effect of location on damping characteristic

4.2 HSC 补偿容量配比不同时对发电机 D_e 的影响

保持 HSC 总的补偿容量不变，改变 SSSC 和 FSC 补偿容量的配比，即改变 SSSC 的补偿百分比 k 的大小，计算发电机的电气阻尼系数 D_e，从而分析 SSSC 补偿容量的变化对发电机电气阻尼特性的影响。

图 5 是 SSSC 的补偿百分比 k 分别为 0、20%和 40%时，发电机的电气阻尼系数曲线。当仅有 FSC 补偿时，系统的电气谐振频率为 25Hz（折算到转子侧，下文中电气谐振频率均为折算到转子侧的频率），电气负阻尼约为 –45（pu）；当 k=20%时，系统的电气谐振频率变为 28Hz，此时的电气负阻尼约为–15（pu），较之仅有固定串联电容器的系统有较大的提高；当 k=40%时，电气谐振频率继续向高频方向移动，约为 32Hz，电气阻尼系数提高至 –13（pu）。

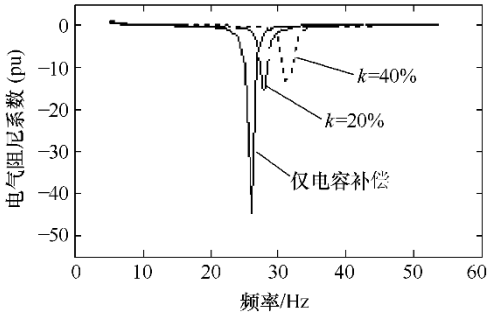
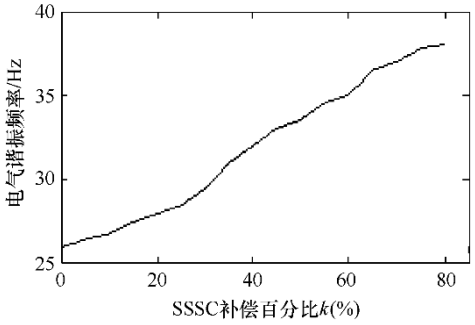


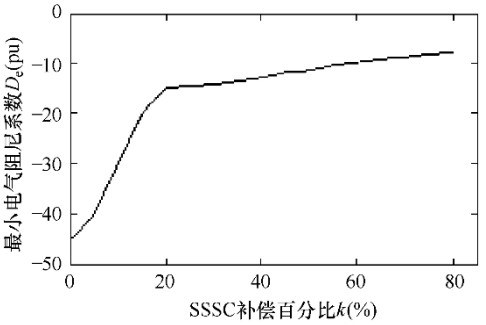
图 5 三种串补方案的电气阻尼特性

Fig.5 Electrical damping characteristic of three types of compensation

为了详细分析 HSC 补偿容量配比不同时对发电机 D_e 的影响，改变 SSSC 补偿百分比 k 的大小，使其在（0，80%）范围内以步长 5%递增，计算每种情况下所对应 的电气谐振频率以及电气谐振频率对应的电气阻尼系数（电气阻尼系数的最小值）。图 6a 和图 6b 分别为电气谐振频率和最小电气阻尼系数与 SSSC 补偿百分比 k 的关系。



（a）电气谐振频率与 SSSC 补偿百分比的关系



（b）最小电气阻尼系数与 SSSC 补偿百分比的关系

图 6 电气阻尼特性与 SSSC 补偿百分比的关系

Fig.6 Relationship between electrical damping characteristic and degree of SSSC compensation

由图 6 可知，在不采用主动阻尼的情况下，

SSSC 补偿百分比越高，系统的电气谐振频率越高，最小电气负阻尼幅值越小，越有利于缓解 SSR 对系统的影响。但由图 6 可知，即使 SSSC 的百分比为 80%的情况下，系统最小电气阻尼仍为负值，从而存在 SSR 的风险。也就是说，无主动阻尼控制时，HSC 能缓解但不能从根本上解决 SSR 问题。另外，鉴于 SSSC 的成本较高，应用时 SSSC 的补偿百分比越小越能节省投资。因此，有必要研究 HSC 的主动阻尼策略，使其在 SSSC 补偿百分比较小的情况下具有对 SSR 良好的阻尼特性。

基于此目的，本文提出了 HSC 主动抑制 SSR 的机理，设计了主动阻尼控制器。

5 主动阻尼控制器的设计

5.1 HSC 主动阻尼 SSR 的机理

恒电压运行方式下，SSSC 注入到线路的电压 $\dot{V}_{SC}$ 为

$$\dot{V}_{SC}=V_{ref}\sin(\omega_1 t+\theta_{ref})+V_{else} \tag{2}$$

式中，V_{ref} 为 SSSC 注入的电压幅值参考值；ω_1 为基波频率；θ_{ref} 为电压的初相位参考值；V_{else} 为电压特征谐波分量。

在电压幅值参考值 V_{ref} 加入频率为 ω_n 的次同步频率分量，即对 V_{ref} 进行次同步频率为 ω_n 的调制。则此时电压幅值参考值 V'_{ref} 为

$$V'_{ref}=V_{ref}+V_n\sin(\omega_n t+\theta_n) \tag{3}$$

式中，V_n，θ_n 分别为加入的次同步分量的幅值和初相位。

忽略电压特征谐波分量 V_{else}，由式（2）和式（3）可求得，V_{ref} 进行次同步频率为 ω_n 的调制后，SSSC

注入到线路的电压 $\dot{V}_{SC}$ 为

$$\begin{aligned}\dot{V}_{SC}\approx V'_{ref}\sin(\omega_1 t+\theta_{ref})=&V_{ref}\sin(\omega_1 t+\theta_{ref})+\\ &\frac{1}{2}V_{ref}V_n\cos[(\omega_1-\omega_n)t+\theta_{ref}-\theta_n]+\\ &\frac{1}{2}V_{ref}V_n\cos[(\omega_1+\omega_n)t+\theta_{ref}+\theta_n]\end{aligned} \tag{4}$$

式（4）右边包括 3 项，依次为电压的基波、次同步频率分量和超同步频率分量，其必将在系统中产生相应频率的电流分量。同理，恒阻抗运行方式下，对阻抗参考值 X_{ref} 进行频率为 ω_n 的调制，也产生上述电流分量。

基于上述理论，本文提出了通过对 SSSC 注入电压幅值参考值（恒电压运行方式）或阻抗幅值参考值（恒阻抗运行方式）进行次同步频率调制以抑制 SSR 的机理。针对模态频率为 ω_n 的 SSR，通过对 SSSC 电压幅值参考值或阻抗参考值进行振荡频率为 ω_n 的适当调制，产生的频率为 $\omega_1\pm\omega_n$ 的次同步（超同步）电流分量将在机组轴系中形成频率为 ω_n 的次同步转矩。通过控制调制信号的幅值和相位，可改变其所对应的次同步转矩的幅值和相位，从而抑制 SSR。

5.2 主动阻尼控制器的结构

在 SSSC 原有控制结构的基础上，加入主动阻尼控制器（Active Damping Controller，ADC），如图 2 所示。图 7 中虚线框为所设计的 ADC 结构示意图，由测量环节 、锁相环、滤波环节、相位校正、增益调节和限幅环节组成。

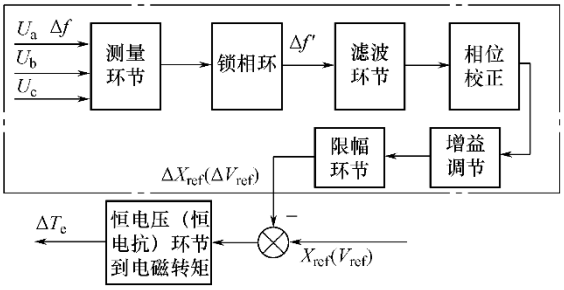


图 7　ADC 结构示意图

Fig.7　Sketch of active damping controller

文献[14-15]采用发电机转速偏差 $\Delta\omega$ 作为 ADC 的输入信号，但 HSC 安装地点通常远离发电厂，采用 $\Delta\omega$ 在工程上较难实现。故本文采用 HSC 所在位置的频率偏差 Δf 作为附加控制器的输入信号。

ADC 首先通过锁相环（PLL）获取 HSC 电压的频率偏差信号 $\Delta f'$，并滤除其中低频和高频部分，保留次同步频带内的振荡模态信息；然后通过相位补偿和幅值调整环节得到调制信号 ΔX_{ref}（恒阻抗运行方式）或 ΔV_{ref}（恒电压运行方式），对相应的阻抗参考值 X_{ref}（恒阻抗运行方式）或电压幅值参考值 V_{ref}（恒电压运行方式）进行调制，进而调节 SSSC 注入线路的电压；注入的电压会在发电机端产生对应的电磁转矩增量 ΔT_e。

5.3 参数的整定方法

5.3.1 相位补偿环节

未加入相位校正环节前，图 7 中 ADC 输入信号Δf到ΔT_e环节相位偏移为以下环节相位偏移的代数和：测量环节、锁相环、滤波环节和定电压（定电抗）到电磁转矩环节。测量环节、锁相环和滤波环节可以分别求得其传递函数，进而求得其相位偏移；ΔX_{ref}（ΔV_{ref}）到ΔT_e环节的传递函数很难得到，其引起的相位偏差难以通过解析方法计算，只能通过测试信号法求得。

相位校正环节采用多个超前 –滞后环节$(1+sT_a)/(1-sT_b)$串联的方法进行相位校正，使校正后Δf与其产生ΔT_e相位差ψ在$-90°<\psi<+90°$范围内[16]。时间常数 T_a、T_b采用式（5）确定。

$$\begin{cases} a=\dfrac{1-\sin\theta}{1+\sin\theta} \\ T_a=\dfrac{1}{\omega\sqrt{a}} \\ T_b=aT_a \end{cases} \tag{5}$$

式中，T_a为超前环节时间常数；T_b为滞后环节时间常数；ω 所选择相位补偿的频率；θ为频率ω需要补偿的相位。

5.3.2 增益的选择

增益调节系数 G 直接关系到提供 ADC 的阻尼大小。增益 G 越大，SSR 抑制效果也越好。但是 G 过大会影响系统的高频稳定性，且控制器输出也更容易达到限幅环节的限值。

本文通过大量数字仿真，选择在系统最恶劣的运行条件下，能够抑制 SSR 的 G 最小值作为其设定值。

5.4 有效性验证

5.4.1 复转矩系数法

为了验证 HSC 主动阻尼 SSR 的控制机理和 ADC 的有效性，采用复转矩系数法对有、无 ADC 两种情况下发电机的电气阻尼特性进行了计算。SSSC 的补偿百分比设置为 40%，由本文 4.2 节分析结果可知，此时的电气谐振频率为 32Hz，与发电机谐振模式 4 对应，故谐振模式 4 为主导不稳定模式。图 8 为 SSSC 的补偿百分比设置为 40%时，有、无 ADC 两种情况下发电机的电气阻尼特性曲线。

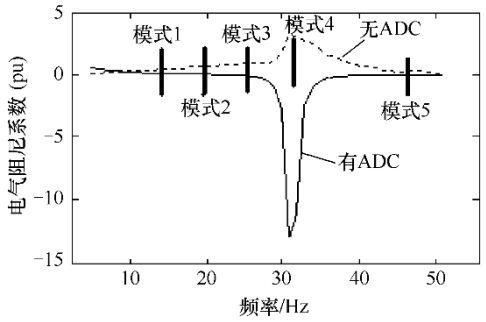


图 8 ADC 的作用

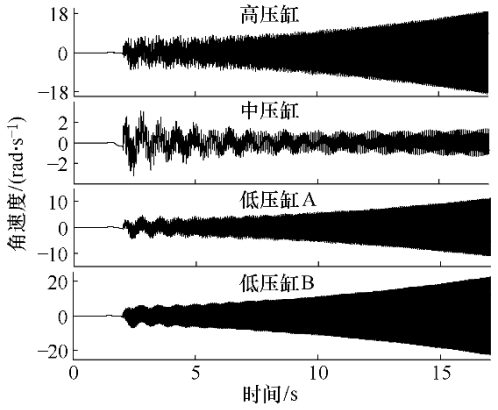
Fig.8 Effect of active damping controller

由图 8 可知，采用 ADC 后，不仅振荡模式 4 的电气阻尼得到较大提升，变为正阻尼，而且其他模式的电气阻尼特性也得到了改善，从而从根本上避免系统发生 SSR 的可能性。

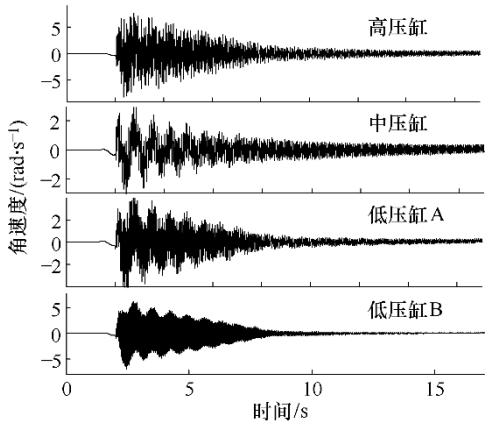
5.4.2 时域仿真

采用时域仿真法对 ADC 抑制 SSR 效果进一步验证，仿真模型仍然采用测试模型。其中，SSSC 的补偿百分比仍为 40%，转子采用多质量块模型，忽略机组轴系机械阻尼和质量块间互阻尼的作用。2s 时无穷大母线处发生单相瞬时接地故障，故障位置如图 3 所示，故障持续时间为 0.075s。

图 9 中分别给出了有、无 ADC 时，各质量块的角速度变化曲线。无 ADC 时，各个质量块的角速度偏差不断增大，质量块之间扭矩开始自发增幅振荡，振荡的频率分量主要为 32Hz，同采用复转矩系数法的分析结果一致。加入 ADC 后，振荡得到了很好的抑制，并很快平息。



（a）无 ADC



（b）有 ADC

图 9　各质量块的角速度变化曲线

Fig.9　Angular speed curve of multimass

复转矩系数法和时域仿真法的结果均表明，HSC 采用 ADC 后，极大地改善了系统的阻尼特性，有效地抑制 SSR。

6　结论

HSC 为解决 SSR 问题提供了新的思路，对加速 SSSC 的商业化运行提供了较为可行的方法。本文对 HSC 抑制 SSR 的特性与机理进行了研究，结论如下：

（1）发电机的电气阻尼特性受 HSC 安装位置的影响非常小。

（2）在不采取主动阻尼的情况下，SSSC 所占 HSC 的补偿百分比越高，系统的电气谐振频率越高，电气负阻尼幅值越小，越有利缓解 SSR。

（3）提出了 HSC 主动阻尼 SSR 控制机理，即通过对 SSSC 的阻抗参考值或电压参考值进行次同步频率调制，使其在机组中产生对应模态的阻尼扭矩，从而将电气阻尼抬升至正值区域，实现了抑制 SSR 的目的。

（4）设计了用于实现主动阻尼的 ADC，提出了其参数整定方法。复转矩系数法和时域仿真法验证其有效性。

参考文献

[1] 倪以信，陈寿孙，张宝霖．动态电力系统的理论和分析[M]. 北京：清华大学出版社，2002.

[2] 张帆，徐政．电力系统稳定器抑制次同步谐振的效果[J]. 电工技术学报，2007，22(6)：121-127.
Zhang Fan, Xu Zheng. Effect of exciter and power system stabilizer on subsynchronous resonance damping[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2007, 22(6) : 121-127.

[3] Jowder F A J. Influence of mode of operation of the SSSC on the small disturbance and transient stability of a radial power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 935-942.

[4] 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)：25-31.
Cao Lu, Chen Heng. The mechanism of mitigating sub-synchronous resonance by thyristor-controlled series compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(4): 25-31 .

[5] 颜伟，吴文胜，华智明，等 . SSSC 非线性控制的直接反馈线性化方法 [J]. 中国电机工程学报，2003，23(3)：65-68.
Yan Wei, Wu Wensheng, Hua Zhiming, et al. Direct feedback linearization method for designing SSSC nonlinear control law[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3)：65-68.

[6] Pillai G N, Ghosh A, Joshi A. Torsional interaction studies on a power system compensated by SSSC and fixed capacitor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3): 988-993.

[7] Jowder F A R A, Boon Teck Ooi. Series compensation of radial power system by a combination of SSSC and dielectric capacitors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 458-465.

[8] Sen K K. SSSC-static synchronous series compensator: theory，modeling and applications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(1): 241-246.

[9] IEEE Sub Synchronous Resonance Working Group. Countermeasures to subsynchroous resonance problems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1980, 99(5): 1810-1818.

[10] 赵建军．静止同步串联补偿器机电暂态及电磁暂态特性研究 [D]. 北京：中国电力科学研究院，2005.

[11] 刘黎明，康勇，陈坚，等 . SSSC 建模、控制策略及性能[J]. 电工技术学报，2006，21(9)：37-43.
Liu Liming, Kang Yong, Chen Jian, et al. Static synchronous series compensator: modeling, control scheme and performance[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2006, 21(9): 37-43.

[12] IEEE Subsynchronous Resonance Task Force. First

benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(5): 1565-1572.

[13] 徐政. 复转矩系数法的适用性分析及其时域仿真实现[J]. 中国电机工程学报，2000，20(6)：1-4.
Xu Zheng. The complex torque coefficient approach's applicability analysis and its realization by time domain simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 1-4.

[14] Massimo Bongiorno, Lennart Ängquist, Jan Svensson. A novel control strategy for subsynchronous resonance mitigation using SSSC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 23(2): 1033-1041.

[15] Padiyar K R, Nagesh Prabhu. Analysis of subsynchronous resonance with three level twelve-pulse VSC based SSSC[C]. Conference on Convergent Technologies for Asia-Pacific Region, 2003, 1: 76-80.

[16] Wang H F. Design of SSSC damping controller to improve power system oscillation stability[C]. AFRICON, 1999, 1: 495-500.

[17] 伍凌云，李兴源，龚勋，等 . 基于模糊免疫方法的次同步阻尼控制器设计 [J]. 电力系统自动化，2007，31(11)：12-16.
Wu Lingyun, Li Xingyuan, Gong Xun, et al. Design of subsynchronous damping controller based on fuzzy immune method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (11): 12-16.

作者简介:高本锋 男，1981 年生，博士研究生，主要研究方向为柔性交流输电技术在电力系统中的应用。 肖湘宁 男，1953 年生，教授，博士生导师，从事电力电子技术在电力系统中的应用、电能质量方面的研究工作。