

# 静止同步串联补偿器的机电暂态特性研究与仿真

刘青<sup>1</sup>, 郑振华<sup>1</sup>, 王增平<sup>1</sup>, 李冬梅<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 河南正阳电业局, 河南 驻马店 463600)

**摘要:** 静止同步串联补偿器 (SSSC) 是 FACTS 家族中新兴的串联补偿元件, 对其暂态特性的研究有助于使其更好地与继电保护装置及重合闸的协调配合。在介绍 SSSC 基本原理的基础上, 根据加入 SSSC 后单机无穷大系统的动态方程, 利用 Matlab 中的电力系统仿真库搭建了含 SSSC 的单机无穷大系统, 并对其机电暂态特性进行了仿真。仿真结果表明系统发生故障后 SSSC 能有效地抑制功率振荡, 并且 SSSC 不同的投入方式所产生的抑制效果不同。在此基础上还总结了区内区外故障时 SSSC 的投入运行方式, 且线路区内故障时 SSSC 若以旁路运行方式投入则能达到最佳效果。

**关键词:** 静止同步串联补偿器; 机电暂态特性; 功率振荡; 投入方式

## Investigation and simulation of the transient characteristic of static synchronous series compensator

LIU Qing<sup>1</sup>, ZHENG Zhen-hua<sup>1</sup>, WANG Zeng-ping<sup>1</sup>, LI Dong-mei<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Henan Zhengyang Power Supply Bureau, Zhumadian 463600, China)

**Abstract:** The static synchronous series compensator (SSSC) is a new series compensator element of the FACTS family. The study on its transient characteristic will redound it to harmonize and cooperate with relay protection equipment and auto-reclosure. Based on the principle of SSSC, the dynamic equation of Single Machine Infinite Bus System (SMIB) has been considered. The SMIB system with SSSC is built by using the simpowersystem toolbox of MATLAB, and the transient characteristic is simulated. The simulation demonstrates that the SSSC can damp the power oscillation effectively, and different switch models of SSSC will result in different effects. Besides, the strategy of switch model within the region and outside is summarized, and the SSSC switched by bypass model when transmission line faults within region will reach the best effect.

**Key words:** SSSC; transient characteristic; power oscillation; switch model

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)18-0010-05

## 0 引言

静止同步串联补偿器 SSSC (static synchronous series compensator) 是串联型的 FACTS 元件, 是基于可关断器件构成的静止型补偿器件。它通过在线路中串联幅值可调, 并与线路电流相角差为  $90^\circ$  的电压来实现对线路纵向电压的控制。SSSC 具有其它 FACTS 元件无可比拟的优点<sup>[1,2]</sup>: ①可不需任何交流电容器或电抗器在线路内产生或吸收无功功率; ②在同一电容性和电感性范围内, 能产生与线路电流大小无关的可控补偿电压; ③对次同步谐振 (SSR) 及其它振荡现象具有一定的抑制能力; ④接入储能器后, 可对线路进行有功功率和无功功率补偿 (增大或减少线路功率, 甚至可使其反向流动); ⑤接入

直流电源后, 可补偿线路电阻 (或电抗), 与线路串补度无关地维持  $X/R$  的高比值; ⑥能快速或几乎瞬时地响应控制指令; ⑦适应单相重合闸时的非全相运行状态。综上所述, SSSC 具有良好的应用前景, 不论是我国电网的发展需要还是电力技术研究的要求, 对静止同步串联补偿器进行研究与分析都是很有必要的。

目前国内外对 SSSC 的研究主要集中在 SSSC 的控制器和器件模型的搭建上。文献[3]利用 Matlab 仿真建立了 SSSC 的模型, 利用瞬时有功无功功率理论设计了装置的控制回路, 并用无功功率参考值的阶跃变化来评估 SSSC 的动态特性。文献[4]提出了阻尼功率振荡的串联 FACTS 装置 (如 TCSC、SSSC) 的最优控制规律和安装位置的选择原则。文

献[5]建立了 SSSC 的三阶动态模型, 其注入电压幅值为脉冲宽度角的函数, 用一阶惯性环节表示注入电压相角和脉冲宽度角的关系, 利用直接反馈线性化方法提高了系统的鲁棒性。文献[6]与文献[7]分别利用神经网络控制策略和模糊自整定 PI 控制方法设计了 SSSC 潮流控制器, 提高了控制器的自适应能力和鲁棒性, 加快了潮流调节速度。现有文献尝试利用各种算法和模型来使得 SSSC 控制器更加精确有效, 而在 SSSC 故障时的运行方式和故障后投入方式方面却缺乏深入研究。

本文利用电力系统仿真工具搭建单机无穷大系统, 对 SSSC 的机电暂态特性进行了仿真, 并且针对故障过程采用了多种投入 SSSC 的方式, 比较了不同投入方式所带来的抑制功率振荡的不同效果, 总结了区内区外的旁路策略。对 SSSC 机电暂态特性的研究有助于使其更安全更有效地应用于电网, 对其投入方式、投入时间的研究有助于使其更好地与继电保护装置及重合闸的协调配合, 具有重要的工程实践意义。

### 1 SSSC 基本原理

SSSC 是基于可关断晶闸管构成的静止型补偿器, 其核心部分是一个带有直流储能电容的电压源逆变器 (VSI)。SSSC 原理接线图如图 1 所示。

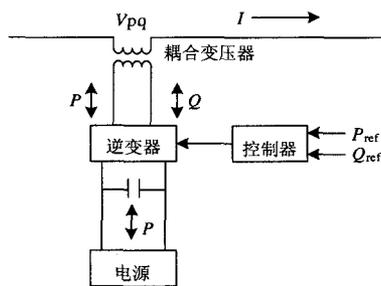
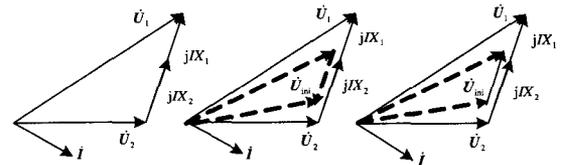


图 1 SSSC 原理接线图

Fig.1 Single line diagram of SSSC

它主要由逆变器、直流环节(储能电容器或直流电源)、控制器和耦合变压器组成。 $P_{ref}$  和  $Q_{ref}$  是给定功率,  $P$  和  $Q$  是实际功率,  $V_{PQ}$  是补偿电压,  $I$  是线电流。SSSC 由变流器产生一幅值和相角可控的三相正弦注入电压(它的相位在  $0^\circ \sim 360^\circ$  之间可调)。注入电压大小不受线路电流或系统阻抗影响, 且与线路电抗压降相位相反(容性补偿)或相同(感性补偿), 可以起到类似串联电容或串联电感的作用。容性补偿时, 注入电压滞后线路电流  $90^\circ$ , 使线路输送功率能力提高; 感性补偿时, 注入电压超

前线路电流  $90^\circ$ , 减小线路输送功率, 图 2 为无补偿、容性及感性补偿时的向量图。



(a) 无补偿 (b) 容性补偿 (c) 感性补偿

图 2 SSSC 相量图

Fig.2 Phasor diagram of SSSC

电力系统暂态稳定分析主要由发电机转子摇摆曲线来判断系统的暂态稳定性。SSSC 注入电压的灵活控制使其能有效的在系统发生扰动后抑制系统的功率振荡及发电机功角摇摆。它能增强发电机的阻尼, 能够减少加速面积并增大减速面积, 能在功角回摆时降低功角曲线, 而在功角上摆时再升高功角曲线, 从而阻尼功角的上下摆动。而若采取恰当的投入方式则能使其发挥更大的作用。

### 2 系统模型

加入了 SSSC 的单机无穷大系统模型如图 3 所示<sup>[8]</sup>。图中  $X_d$  和  $X_d''$  为发电机纵轴同步电抗和暂态电抗,  $X_q$  为发电机横轴同步电抗;  $\delta$  为发电机功角;  $V_G$  和  $V_S$  分别为发电机机端电压相量和无穷大系统电压相量;  $I_d$  和  $I_q$  分别为输电线路电流的 d、q 轴分量;  $V_U$  和  $\alpha$  分别为 SSSC 注入电压的幅值和相位角(以  $V_S$  为参考);  $R_1$  和  $X_1$  分别为 SSSC 控制器的等效电阻和电抗;  $P_e$  为发电机的电磁功率;  $P_u$  为 SSSC 吸收的有功功率;  $P_L$  为输电线路上传输的有功功率。发电机通过升压变压器经并联的双回线与一无穷大系统相连, SSSC 安装于其中的一回线上。

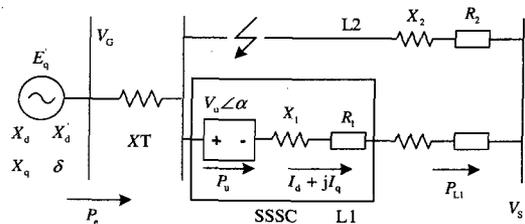


图 3 含 SSSC 简单系统等值电路图

Fig.3 The simple system including equivalent circuit diagram

无串联补偿时单机无穷大系统的非线性微分方程如下:

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_J} [P_m - P_e - D(\omega - \omega_0)] \end{cases} \quad (1)$$

系统加入 SSSC 后的动态微分方程为<sup>[9-11]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_J} (P_m - \frac{E'_q U}{X'_{d\Sigma}} \sin\delta + \frac{U^2}{2} \frac{X_{q\Sigma} - X'_{d\Sigma}}{X_q X'_d} \sin 2\delta + \frac{mU_{dc} \cos\delta_{ss}}{\sqrt{2}X'_{d\Sigma}} U \sin\delta - \frac{mU_{dc} \sin\delta_{ss}}{\sqrt{2}X_{q\Sigma}} U \cos\delta - D\omega) \\ \frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{do}} [E_{qe} - \frac{X_{d\Sigma}}{X'_{d\Sigma}} E'_q + \frac{X_{d\Sigma} - X'_{d\Sigma}}{X'_{d\Sigma}} \frac{X_{d\Sigma} - X'_{d\Sigma}}{\sqrt{2}X'_{d\Sigma}} mU_{dc} \cos\delta_{ss}] \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $\delta$  为线路两端相角差,  $\omega$ ,  $\omega_0$  为电角速度和同步电角速度,  $D$  为阻尼功率系数;  $T'_{do}$  为励磁绕组时间常数,  $X_{d\Sigma}$ 、 $X_{d\Sigma}'$ 、 $X_{q\Sigma}$  为包括线路电抗、变压器漏抗在内的纵轴电抗、纵轴暂态电抗和横轴电抗;  $E_{qe}$  为强制空载电动势,  $\delta_{ss}$  为注入角,  $U_{dc}$  为电容电压。

本文 SSSC 的阻尼控制器采用 POD (Power Oscillation Damping) 控制, 选择线路的有功功率作为输入信号, 然后经过测量环节, 隔直环节, 一个系数为  $K_{pod}$  的增益环节, 低通和高通滤波器, 一个时间常数为  $T_{num}$ 、 $T_{den}$  的超前-滞后滤波器, 再与电压参考信号  $V_{qref}$  相加后经过限幅器, 最后产生一个与线路潮流振荡分量成正比的信号<sup>[12]</sup>。加入超前-滞后滤波器和限幅器是为了保证 POD 的动态控制作用不超过 SSSC 的可控范围。

### 3 SSSC 机电暂态特性的仿真

基于图 3 模型利用 Matlab 电力系统仿真库对系统进行了动态仿真。系统参数为: 发电机: 凸极机, 容量  $S=2100$  MVA,  $V_G=13800$  V,  $X_d=1.305$ ,  $X'_d=0.296$ ,  $X''_d=0.252$ ,  $X_q=0.474$ ,  $X'_q=0.243$ ,  $X_1=0.18$ ,  $T'_d=1.01$ ,  $T'_d=0.053$ ,  $T_{qo}'=0.1$ ,  $R_s=2.8544e-3$ ,  $H=3.7$ ,  $P=32$ 。变压器容量  $S=2100$  MVA 13.8 kV/500 kV,  $R_1=R_2=0.002$ ,  $L_1=0$ ,  $L_2=0.12$ 。无穷大系统采用三相电源模块代替, 其容量为 100 GVA。输

电线路采用分布参数模型, 发电机励磁系统参数采用系统默认值。

#### 3.1 区内故障时的仿真及旁路策略

区内故障时, 即 SSSC 安装于线路 L1 上, 4.0 s 时线路 L1 首端发生三相短路故障, 4.1 s 时故障消除。在故障过程中, SSSC 控制回路按三种方式投入: (a) SSSC 在故障过程中一直投入运行; (b) SSSC 按旁路运行方式投入运行(即故障后 0.1 s 投入运行); (c) SSSC 延迟投入运行(即在故障后 0.5 s 投入运行)。线路 L1 功率及发电机功角仿真结果如下:

1) 线路 L1 功率仿真图如图 4~图 7。

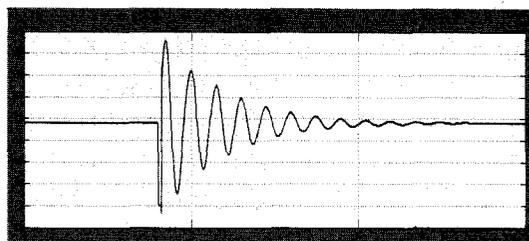
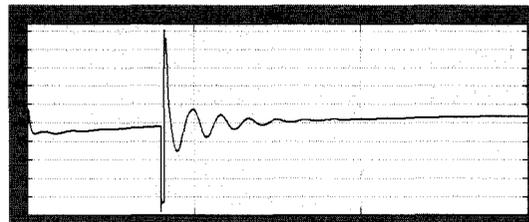
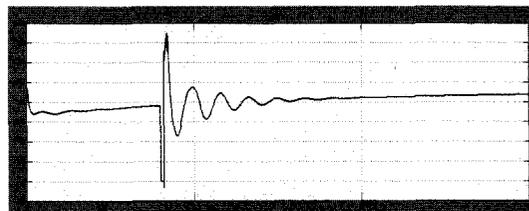


图 4 未安装 SSSC 时线路 L1 功率曲线

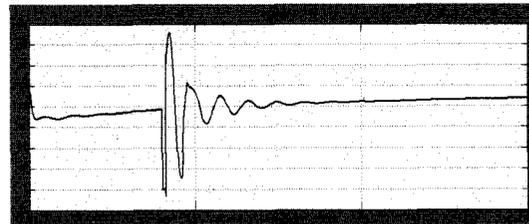
Fig.4 Active power of line L1 without SSSC



(a) SSSC 一直投入运行



(b) SSSC 旁路方式运行 (0.1 s 后投入)



(c) SSSC 延迟投入 (0.5 s 后投入)

图 5 区内故障时 SSSC 三种投入方式下线路 L1 的功率曲线

Fig.5 Active power of line L1 between three switch models when fault within the region

由图 4 和图 5 的仿真结果对比可知, SSSC 在线路故障后快速有效地抑制了功率振荡, 明显地缩短了振荡时间和幅度, 提高了系统的暂态稳定性。而由图 5 中三种投入方式的对比可知: 一直投入方式在故障消除后出现了尖顶脉冲, 功率飙升到 1800 MW 左右, 远大于 b、c 两种方式; 延迟投入方式在功率下摆时过大, 而旁路方式很好地控制了功率的上下摆, 经过几个波动后便趋于平稳, 恢复稳定状态。因此对比可知旁路方式(故障后 0.1 s 投入)所达到的效果最佳。

2) 发电机功角仿真图 6~图 7。

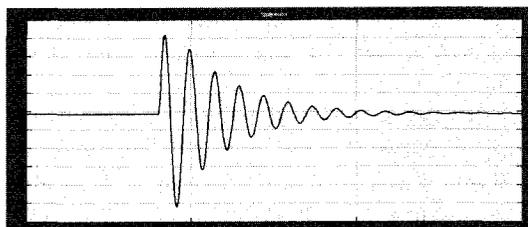
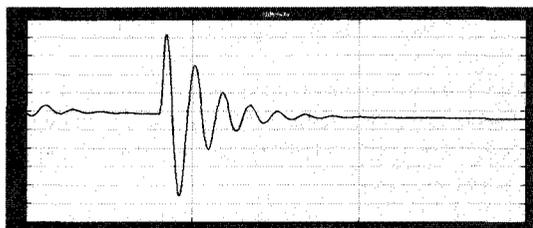
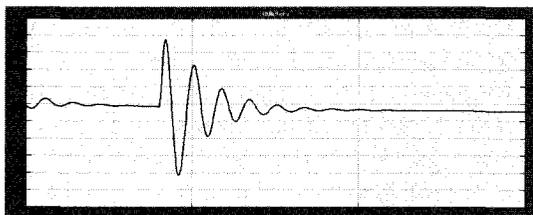


图 6 未安装 SSSC 时发电机功角曲线

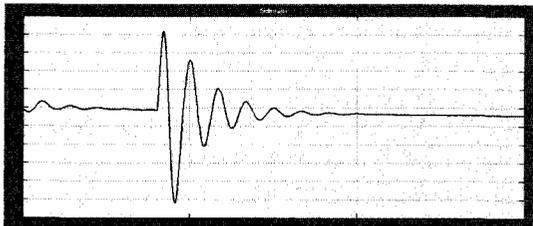
Fig.6 Power-angle curve of generator without SSSC



(a) SSSC 一直投入运行



(b) SSSC 旁路方式运行 (0.1 s 后投入)



(c) SSSC 延迟投入 (0.5 s 后投入)

图 7 区内故障时 SSSC 三种投入方式下发电机的功角曲线

Fig.7 Power-angle curve of generator between three switch models when fault within the region

由图 6 和图 7 的对比可以看到, 由于 SSSC 投入后的迅速补偿作用, 使得发电机的功角摇摆明显减弱, 波动时间明显变短, 幅度明显变小。这得益于 SSSC 的固有特性, 即 SSSC 输出电压的相对独立性, 它不依赖于线路电流以及其它系统变量。从图 7 中可以更明显的看出 SSSC 不同投入方式之间的差别。SSSC 旁路运行方式使得发电机功角第一摆减弱许多, 上摆和下摆的幅度都要小于其它两种方式。而故障期间一直投入方式使得 SSSC 在故障期间所受冲击很大, 若通过故障期间旁路 SSSC 可以有效地减小这个冲击。另外, 通过图 8 比较 SSSC 的注入电压也可以得到这个结论。

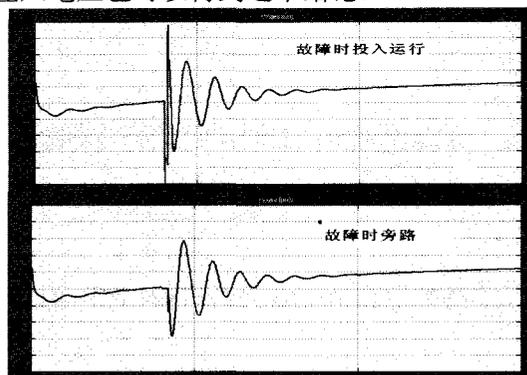


图 8 SSSC 注入电压比较

Fig.8 Comparison of SSSC injection voltage

综上所述, 区内故障时, SSSC 所受的冲击比较大, SSSC 不旁路会使电力电子器件的端电压达到旁路时的 2 倍多, 超过了器件的耐压极限。因此, 区内故障时应该采取故障时旁路, 一定延迟时间后再投入 SSSC 的策略来抑制功率振荡。延迟时间对抑制作用是很敏感的, 时间过长则起不到抑制功率振荡作用, 时间过短则又会使 SSSC 处于击穿的危险区, 所以应在器件过电压、过电流耐受许可范围内尽量减少延迟时间。不同的延迟时间对抑制效果的影响见图 9。

从图中可以看出, 延迟 0 s 会使功率发生尖顶脉冲, 延迟 0.2 s 使得功率下摆严重, 延迟 0.3 s 不仅下摆严重还伴有谐波产生。而采用故障后延迟 0.1 s 取得了较好的效果, 既能保证比较满意的抑制功率振荡的作用, 又使得器件处于安全状态, 避开了冲击电压和冲击电流。

### 3.2 区外故障时的旁路策略

区外故障时, 即 SSSC 所在线路 L2 首端发生三相短路故障。区外故障时不同投入方式对结果的影响较之区内故障会小一些, 其原因在于 SSSC 的输入控制变量变化变小了, 使 SSSC 的出力变小。特别是对于大区域多节点电网, 区外故障对 SSSC 所

在线路的影响可能更小。且 SSSC 在线路发生故障后能快速进入感性运行方式，限制线路电流。但是这种限制电流能力受到 SSSC 输出额定电压以及电力电子器件最大截止电流的限制，若 SSSC 容量较小，其作用是有限的。因此，此时 SSSC 采用一直投入方式还是旁路方式需视实际线路应用情况而定。

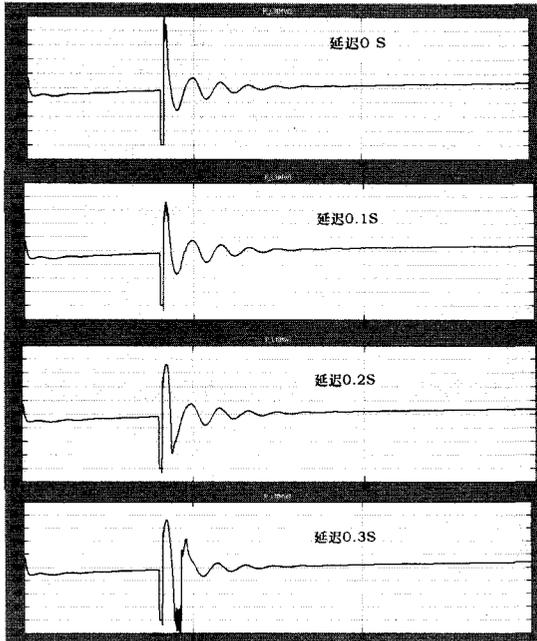


图 9 不同延迟时间的对比

Fig.9 Comparison of different delay times

#### 4 结论

本文通过 Matlab 搭建含 SSSC 的单机无穷大系统，仿真分析了 SSSC 的机电暂态特性，同时总结了区内区外的旁路策略。仿真结果表明，系统加入 SSSC 能有效抑制功率振荡，不同的投入方式使得所到达的效果不尽相同，且区内故障时表现的更加明显；区内故障时三种投入方式中采用故障时旁路方式所取得的效果最好，也能很好的避开冲击电压和冲击电流，仿真表明延迟时间为 0.1 s 取得的效果令人满意。

#### 参考文献

- [1] Sen K K. SSSC—Static Synchronous Series Compensator. Theory, Modeling and Applications[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998,13(1): 241-246.
- [2] Kumar, Ghosh A. Modeling and Control Design of a Static Synchronous Series Compensator[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(4): 1448-1453.
- [3] Gyugyi L, Schauder C D, Sen K K. Static Synchronous Series Compensator: a Solid-state Approach to the Series

Compensation of Transmission Lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997,12(1): 406-417.

- [4] Kulkarni A M, Padiyar K R. Damping of Power Swings Using Series FACTS Controllers [J]. Electrical Power and Energy System, 1999,(21):475-495.
- [5] 王超, 舒乃秋, 吕小静. 基于非线性控制理论的 SSSC 控制器的研究[J]. 中国电力, 2004, 37 (4): 36-38. WANG Chao, SHU Nai-qiu, Lü Xiao-jing. Study on SSSC Controller Based on Nonlinear Control Theory[J]. Electric Power, 2004, 37 (4): 36-38.
- [6] 杨琪, 王辉. 基于神经网络控制算法的 SSSC 潮流控制器设计[J]. 电机电器技术, 2005,(5):17-20. YANG Qi, WANG Hui. SSSC Power Flow Control Based on Artificial Function Neural Network[J]. Technology of Electric Machine and Appliance, 2005,(5):17-20.
- [7] 王辉, 王耀南, 许维东. 基于模糊自整定 PI 控制的 SSSC 潮流控制器研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(7): 66-69. WANG Hui, WANG Yao-nan, XU Wei-dong. Investigation of a Power Flow Controller of SSSC Based on Self-Tuning PI Controller with Fuzzy Logic[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2004, 19(7): 66-69.
- [8] 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 Wen-sheng, HUA Zhi-ming, et al. Direct Feedback Linearization Method for Designing SSSC Nonlinear Control Law[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 65-68.
- [9] 赵建军, 郭剑波, 周孝信. 基于 EMTDC 的静态同步串联补偿器稳态及暂态特性分析[J]. 电网技术, 2006, 30(14): 13-18. ZHAO Jian-jun, GUO Jian-bo, ZHOU Xiao-xin. Analysis on Steady State and Transient Characteristics of Static Synchronous Series Compensator Based on EMTDC[J]. Power System Technology, 2006, 30(14): 13-18.
- [10] 赵建军, 郭剑波, 周孝信. 静态同步串联补偿器稳态特性分析与详细数学模型的建立[J]. 中国电力, 2005, 38(10): 11-14. ZHAO Jian-jun, GUO Jian-bo, ZHOU Xiao-xin. The Steady State Performance Analysis and Mathematical Model of Static Synchronous Series Compensator[J]. Electric Power, 2005, 38(10): 11-14.
- [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 Li-ming, KANG Yong, CHEN Jian, et al. Static Synchronous Series Compensator: Modeling, Control Scheme and Performance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(9): 37-43.

(下转第 36 页 continued on page 36)

功电流<sup>[9]</sup>,原因是电压畸变时,p轴上电压中的直流量并不完全来自电压基波正序分量。

### 3 结论

本文对目前研究较多的基于瞬时无功功率理论谐波检测方法进行了深入的分析,以理论推导和仿真来说明这些方法的优缺点,给出各种不同方法的动态过程、时间滞后、计算量、以及稳态精度等特性。

### 参考文献

- [1] 吴竟昌.供电系统谐波[M].北京:中国电力出版社,1998.
- [2] Hammad A E.Analysis of Second Harmonic Instability for the Chateauguay HVDC/SVC Scheme[M]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992,(11):410-415.
- [3] LUO Shi-guo,HOU Zheng-cheng. An Adaptive Detecting Method for Harmonic and Reactive Current[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1995,42(1): 85-89.
- [4] 朱鹏程,李勋,康勇,等.统一电能质量控制器控制策略研究[J].中国电机工程学报,2004,24(8):67-73. ZHU Peng-cheng, LI Xun, KANG Yong, et al. Study of Control Strategy for Unified Power Quality Conditioner [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 67-73.
- [5] 丁洪发,段献忠.同步检测法的改进及其在三相不对称无功补偿中的应用[J].中国电机工程学报,2000,20(6):17-20.
- [6] 杨君,王兆安,邱关源.单相电路谐波及无功电流的一种检测方法[J].电工技术学报,1996,11(3):42-46. YANG Jun, WANG Zhao-an, QIU Guan-yuan. Detecting Method for Harmonics and Reactive Currents in Single-Phase Circuits[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1977, 17(1): 37-41.

- [7] 蒋斌,颜钢锋,赵光宙.单相电路瞬时谐波及无功电流实时检测新方法[J].电力系统自动化,2000,25(21):35-39. JIANG Bin, YAN Gang-feng, ZHAO Guang-zhou. A New Method for Real-Time Detecting Harmonics and Reactive Currents in Single-phase Circuit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 25(21): 35-39.
- [8] Kim H, Blaabjerg F. Instantaneous Power Compensation in Three-phase Systems by Using p-q-r Theory [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2002,17(5):701-710.
- [9] 刘开培,陈艳慧,张俊敏.基于p-q-r法的电力系统谐波检测方法[J].中国电机工程学报,2005,25(14):25-29. LIU Kai-pei, CHEN Yan-hui, ZHANG Jun-min. Harmonic Detection Method for Power System Based on p-q-r Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2005,25(14): 25-29.
- [10] 刘开培,张俊敏.基于重采样理论和均值滤波的三相电路谐波检测方法[J].中国电机工程学报,2003,23(9):78-82. LIU Kai-pei, ZHANG Jun-min. Harmonics Detection Method for Three-phase Circuits Based on Resampling Theory and Mean Filtering[J]. Proceedings of the CSEE, 2003,23(9): 78-82.
- [11] 刘开培,张俊敏.基于重采样的三相谐波检测瞬时无功功率法[J].电力系统自动化,2003,27(12):151-153. LIU Kai-pei, ZHANG Jun-min. Harmonics Detecting Method for Three-phase Circuits Based on Resampling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003,27(12): 151-153.

收稿日期:2007-12-12; 修回日期:2008-01-23

作者简介:

张俊敏(1977-),女,博士,研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: forzhanghua@sohu.com

(上接第14页 continued from page 14)

- [12] Mohan Mathur R, Varma R K.基于晶闸管的柔性交流输电控制装置[M].徐政,译.北京:机械工业出版社,2005. Mohan Mathur R, Varma R K.Thyristor-based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems[M]. XU Zheng,Trans.Beijing: China Machine Press, 2005.

作者简介:

刘青(1974-),女,讲师,博士研究生,主要从事微机保护、FACTS元件对保护影响方面的研究;E-mail: liuqing0816@yahoo.com.cn

郑振华(1984-),男,硕士研究生,研究方向为微机保护;

王增平(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事微机保护、变电站综合自动化等方面的研究。

收稿日期:2007-12-04; 修回日期:2008-02-24