

# 基于实时数字仿真器的 SVC 抑制次同步振荡的研究

高本锋<sup>1</sup>, 肖湘宁<sup>1</sup>, 赵成勇<sup>1</sup>, 赵洋<sup>2</sup>, 郭春林<sup>1</sup>

(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:** 针对我国首次采用静止无功补偿器 (Static Var Compensator, SVC) 抑制次同步振荡 (Sub-Synchronous Oscillation, SSO) 的工程, 分析了该工程中 SVC 的接入位置、触发方式和控制策略等。基于实时数字仿真 (Real Time Digital Simulator, RTDS), 搭建了针对该工程中 SVC 控制器进行闭环控制测试的平台。阐述了该平台的框架结构、硬件配置, 分析了建模过程中存在的问题, 提出了大型系统的建模方法。基于该平台, 在典型运行方式和故障方式下, 对 SVC 抑制 SSO 的效果进行了全面的验证, 并仿真分析了 SVC 抑制 SSO 时其对交流系统所可能产生的影响。结果表明, 所采用的 SVC 能够抑制 SSO 现象, 并且对系统的暂态稳定性几乎没有影响。

**关键词:** 锦界电厂; 次同步振荡; 实时数字仿真器; 静止无功补偿器

## Study on mitigation of SSO with SVC based on RTDS

GAO Ben-feng<sup>1</sup>, XIAO Xiang-ning<sup>1</sup>, ZHAO Cheng-yong<sup>1</sup>, ZHAO Yang<sup>2</sup>, GUO Chun-lin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control (North China Electric Power University), Ministry of Education, Beijing 102206, China; 2. Beijing Electric Power Company, Beijing 100020, China)

**Abstract:** This paper briefly introduces the first project using SVC to mitigate SSO in China in the aspects of access location, trigger mode and control strategy, etc. Based on real time digital simulator, a closed-loop platform is established for testing the SVC controller of this project. The issues about this platform, such as the platform architecture, hardware configuration and model selection of RTDS, are discussed. And a method to build model for large scale network is proposed. Under typical operation mode and fault conditions, the performance of SVC controller is fully validated and its effect on AC system is analyzed. Simulation results show that the SVC used in Jin-Jie power plant can mitigate the SSO phenomenon and will not exert influence on the transient stability of systems.

**Key words:** Jin-Jie power plant; SSO; RTDS; SVC

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)23-0006-05

## 0 引言

随着西电东送建设的推进, 在现有交流线路加装串联补偿电容器 (Fixed Series Compensator, FSC) 成为解决输电瓶颈、提高稳定性的必要手段。然而, 固定电容串补度选择不合理便会引发系统的 SSO, 有可能造成发电机转子轴系的严重损伤<sup>[1-3]</sup>。我国内蒙古的托克托电厂、陕西的锦界电厂、东北的伊敏电厂在采用串补送出方案后均存在不同程度的 SSO 问题。固定串补可能引发的次同步振荡问题成为我国电力系统安全运行所面临的新课题<sup>[4]</sup>。

在众多 SSO 治理措施中, 采用 SVC 抑制 SSO

曾得到较为广泛的研究, 早在上世纪八十年代国外已有采用 SVC 成功抑制 SSO 的工程实例<sup>[5-8]</sup>。SVC 抑制 SSO 基于以下理论: 选取含有原动机扭振模式分量的测量量作为控制器的输入信号, 据此控制晶闸管的触发角, 改变晶闸管控制电抗器 (Thyristor Controlled Reactor, TCR) 支路的电流大小, 进而微调发电机的输出功率, 产生阻尼转矩来抑制 SSO<sup>[9]</sup>。SVC 在我国应用范围较广, 但其主要被应用于电压调节、提高线路输送能力等方面<sup>[10-11]</sup>。

陕西锦界电厂在国内首次采用 SVC 抑制 FSC 引起的 SSO。但由于此次与以往国外实际工程有较多区别, 因而无法直接借鉴国外已有理论和现成经验, 又由于国内在该方面亦无经验可参照, 所以在 SVC 设备现场投运前, 有必要对其控制系统进行严格的系统仿真测试, 以期全面检验 SVC 抑制 SSO

**基金项目:** “电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室” 开放课题重点资助项目 (SKLD09KZ09)

的有效性。RTDS 作为一种专门用于电力系统实时闭环测试的工具,在国内外均被广泛应用于对控制保护设备的闭环测试中<sup>[12-14]</sup>。

在充分了解工程背景的基础上,本文应用实时数字仿真器与 SVC 控制器相连,设计了用于对该工程的 SVC 控制器进行闭环测试的仿真平台。介绍了所设计平台的结构、硬件构成、建模方法与特点。基于以上平台,对 SVC 抑制 SSO 的效果进行了全面测试,同时对 SVC 抑制 SSO 过程对于交流系统的影响进行了分析。

## 1 工程背景<sup>[15]</sup>

### 1.1 锦界电厂简介

前期的系统研究表明,锦忻双回线串补度为 35%时,锦界电厂存在 SSO 的风险。经多方论证,锦界电厂决定采用 SVC 抑制 SSO 的方案。

### 1.2 SVC 接入位置

国外已有工程中将 SVC 接在发电机出口侧,理论上能获得对于 SSO 的最大阻尼效果。但这种接入增加了发电机的事故几率,也对 SVC 的可靠性提出了更高要求。鉴于以上考虑,锦界电厂采取将每两台 SVC 通过一台启备变接入 500 kV 母线的方案,使得 SVC 经变压器与发电机出口母线连接,降低了发电机的事故概率,如图 1 所示。但此种方式由于主升压变的存在,增加了 SVC 与发电机内电势,降低了抑制效果,为此,本文对 SVC 接于主变高压侧的抑制 SSO 的效果进行了仿真分析。

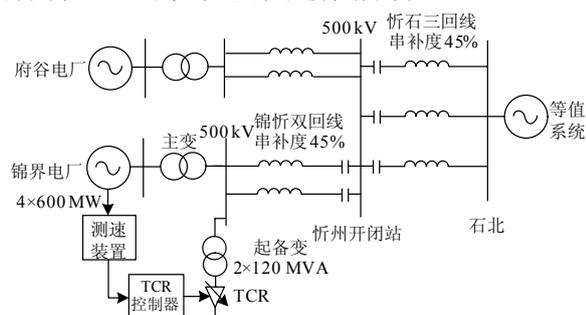


图 1 锦界电厂及串补装置接线图

Fig.1 Diagram of Jin-Jie plant and series compensator

图 2 为将 SVC 连接于电厂主变的高压侧, SVC 对于 SSO 的抑制效果图。此时发电机有功出力为 0.9,故障方式为忻石三相永久故障。

由图 2 可以看出,当 SVC 位于发电机主变高压侧时, SVC 能够很好地抑制 SSO。

### 1.3 SVC 的触发方式

从三角形连接 TCR 整体来讲,可选择的触发方式有两种,一种是三个桥臂的触发角度相同;另一

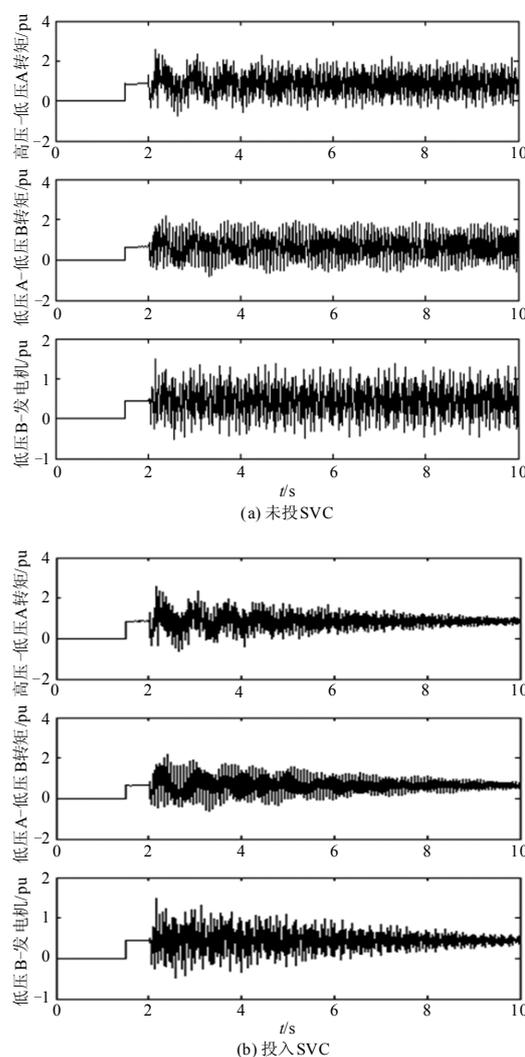


图 2 SVC 位于主变高压侧时对于 SSO 抑制效果

Fig.2 Mitigation of SSO by SVC connected at high voltage side

种是 A 相、B 相和 C 相的触发角度不同,即每相各自针对不同参考电抗分别求解触发角。这样虽然导致三相不平衡但能够更快地反应参考电抗的变化。理论上能够在更短的时间内抑制 SSO,将电厂损失降至最低。为此锦界电厂 SVC 工程采用三个桥臂采用第二种触发方式。

从单个桥臂或每一相的角度来讲,也存在两种触发方式。第一种为对称触发方式,直流分量不会出现或者其值很小可以忽略。第二种为非对称触发方式,这样的方式有可能产生幅值较大的直流分量。直流分量流过启备变低压侧时,可能产生偏磁作用,使得变压器工作于饱和状态,有可能产生铁磁饱和谐振,使启备变超载。图 3 对比了 SVC 采用这两种触发方式抑制 SSO 的效果。可以看出,对称触发方式抑制 SSO 的效果虽然不及非对称触发方式,但仍

能很好地抑制 SSO。但非对称触发方式容易导致启备变的过载，综合考虑上述因素，锦界工程 SVC 单桥臂反并联的两个晶闸管采取对称触发的方式。

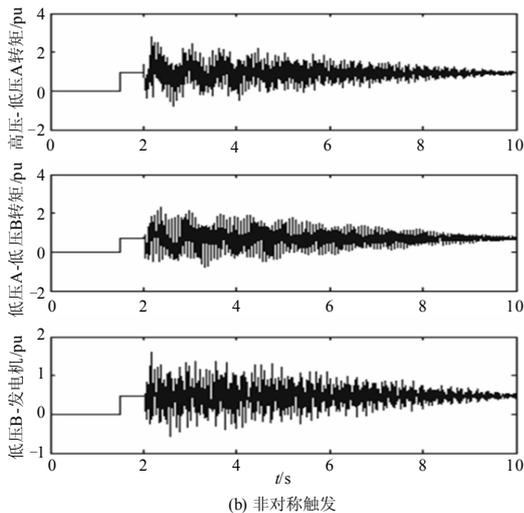
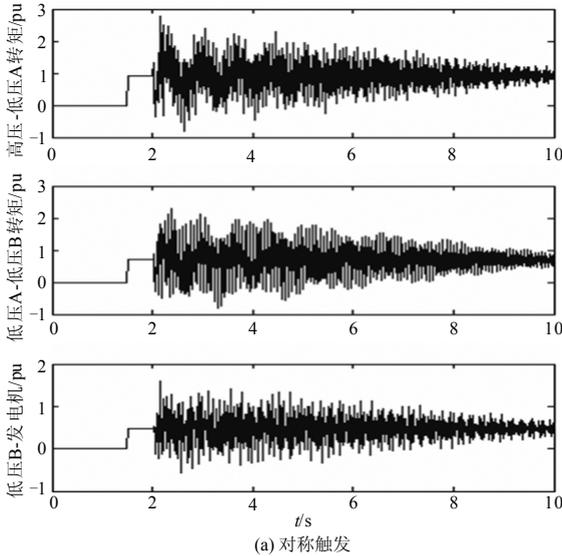


图 3 SVC 不同触发方式抑制 SSO 的效果

Fig.3 Mitigation of SSO by SVC with different trigger mode

### 1.4 SVC 的控制策略

SVC 对 SSO 的阻尼作用，通过采用附加次同步阻尼控制器（Supplementary Subsynchronous Damping Controller, SSDC）提供正阻尼来实现，其结构如图 4 所示。

本方案中，SSDC 采用多模态的方案，即针对每个模态采取不同的比例和移相参数，已达到最优的抑制效果。SSDC 采用电厂在线机组的转速偏差的平均值  $\Delta\omega$  作为反馈信号，通过精细的带通滤波得到各个 SSO 模态的振荡分量；再经过比例

和移相环节得到各个模态的控制信号，相加后形成总的 SVC 控制输出，经限幅后得到所需的 SVC 装置目标电纳值，并进而利用 TCR 电纳与延迟触发角的非线性关系得到晶闸管的控制角；通过调制 SVC 的电纳，使其按照次同步频率波动，进而在机组内部形成次同步频率的电磁转矩。只要 SSDC 的比例和移相环节参数选择合适，这个转矩就能对轴系的次同步振荡起到阻尼作用。

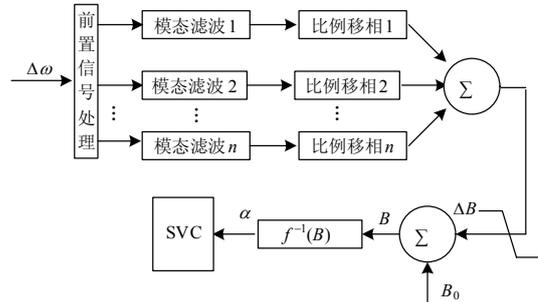


图 4 SSDC 原理图

Fig.4 Principle of SSDC

## 2 RTDS+SVC 的闭环测试平台

### 2.1 测试平台框架

该闭环实验平台包括荣信公司为锦界电厂 SVC 装置提供的四台控制器，以及 RTDS 实时仿真器。图 5 所示为本文搭建的 RTDS+SVC 闭环测试平台的原理示意图。RTDS 中一次系统模型的各个状态变量，如发电机输出的有功、无功、端口电压和角频率等，由模拟量输出卡 GTAO 输出至 SVC 的物理控制器；同时，SVC 物理控制器输出的触发脉冲，通过脉冲采集卡 DITS 采集，并控制 RTDS 中模型中 TCR 桥臂上的反并联晶闸管，形成 SVC 的数字-物理混合闭环测试平台。

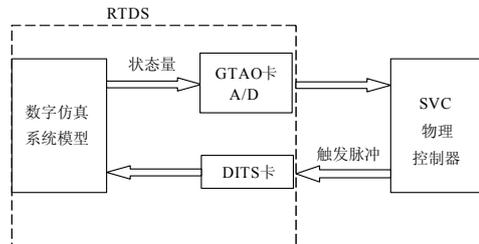


图 5 闭环测试平台示意图

Fig.5 Close loop test platform sketch map

### 2.2 RTDS 的一次系统建模

采用实时仿真系统对 SVC 进行闭环实验时，首要条件是具备完整、准确的仿真模型，然后实现仿真系统与装置的相连并调试通过，进而开展控制器性能测试实验。

基于实时数字仿真器,本文所搭建一次系统模型主要包括:发电机模型,轴系多质量块模型,厂用电模型,输电线路模型,串补还有 SVC 及其控制模型等。网络规模较大,采用实时仿真器搭建该模型具有很大难度。

由于实时数字仿真器每台 RACK 只能处理 18 个三相节点,仿真规模受到限制,因此首先要对本文所搭建的系统分割为几个子系统,使其在不同的 RACK 上运行。将大系统分为若干子系统运行时,会出现以下几个方面的问题。

#### 1) 参数输入问题

RTDS 公司向用户提供了 PSS/e 模型到自身模型的转换功能。该功能能够将 PSS/e 中电力系统的所有模型转换至 RSCAD 当中。大大节省了时间,但也出现了一些问题。

经过数据转换之后的仿真模型中所有的线路参数模型均存储于 x.tline 文件当中,而不是针对相应的输电线路形成 x.tlb 或 x.tli 文件,可操作性很差,这便使得在接下来对输电线路模型的模型调整、修正过程中,很多建模操作不够直观。所以应根据每条输电线路模型自行建立 x.tlb 或 x.tli 文件。在进行子系统之间联络线选择时,RTDS 公司的使用手册当中并未详细说明确定的原则。目前可确定的是子系统之间的联络线路在行波时间大于仿真补偿的分布参数线路模型中选择。对于转换之后的仿真模型,本文自行确定了子系统之间的联络线,尽量选择较长输电线路。

#### 2) 仿真步长与输电线路

如果仿真步长设定过高,在编译过程中经常会遇到警告消息:针对子系统之间的联络线路如果系统仿真步长超过了某些线路的行波时间,那么在仿真时,此线路的行波时间将被设定为仿真步长,使得最终的仿真结果不够精确;针对子系统内部的线路,如果此线路行波时间相对于仿真步长短的多,那么此线路将被认定为集中参数模型。以上两种警告信息是尽量要避免的,通常的办法是平均分配处理器资源,降低仿真步长。

#### 3) 处理器资源分配

一般来讲,GPC 的处理能力要比 3PC 强得多。特别是发电机、励磁等较为复杂的仿真元件,尽量要放置于 GPC 处理器上。

### 2.3 大型系统的建模方法

通过对该工程一次系统的建模,总结出了以下适用于大型系统建模方法,其步骤如下:

1) 通过模型转换软件实现基本参数输入(发电机、励磁、线路以及变压器等)和构建所需模型的

基本拓扑结构;

2) 建立分布参数线路 TLine 模型,如有必要,将子系统之间的联络线路更换为较长的分布参数输电线路;

3) 调整处理器分配,除为发电机、变压器、输电线路等预留的处理器外,将二次控制系统在各个处理器上平均分配;

4) 确定仿真步长,在运行时所遇到的错误信息大都因为仿真步长的不合适所导致;

5) 运行 Load Flow 实现潮流初始化,之后完成编译,运行 Runtime。

## 3 SVC 控制器的闭环测试

### 3.1 SVC 抑制 SSO 的效果

基于上文提出的闭环测试平台,选择了典型运行方式和故障方式,对 SVC 控制器抑制 SSO 的效果进行了验证。

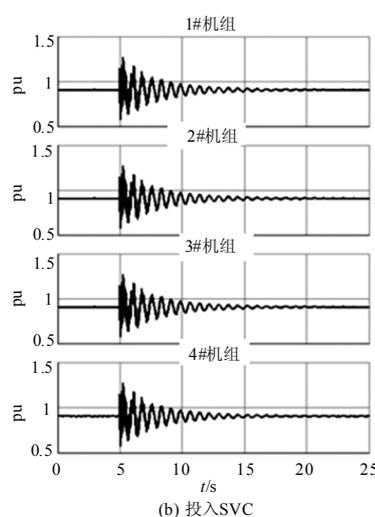
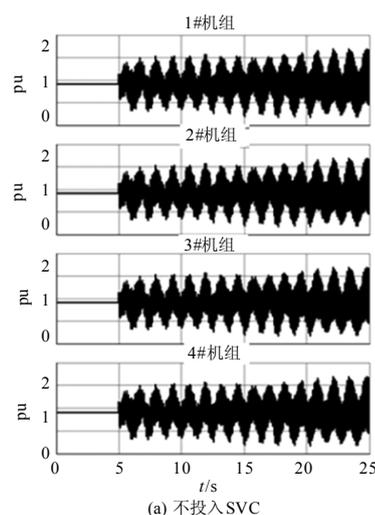


图 6 转矩响应曲线对比

Fig.6 Comparisons of torque response

锦界电厂四台半载，府谷电厂两台满载运行方式下，锦忻线线路中间发生单相瞬时故障时，锦界电厂的 1#~4#发电机的转矩响应波形，如图 6 所示。

图 6 和其他运行方式下的仿真结果均表明，SVC 均能有效地抑制 SSO；运行方式和故障方式不同，抑制 SSO 所需要的时间有所不同。

### 3.2 SVC 抑制 SSO 时对电网暂态稳定性的影响

为了考察 SVC 在抑制 SSO 时对交流系统暂态稳定性的影响，对 SVC 投入和不投入 SVC 两种情况下，发电机的功角特性进行了仿真。

图 7 为锦界电厂四台半载，府谷电厂两台满载运行方式下，锦忻线线路中间发生单相瞬时故障时，锦界电厂四台发电机的电磁转矩波形。

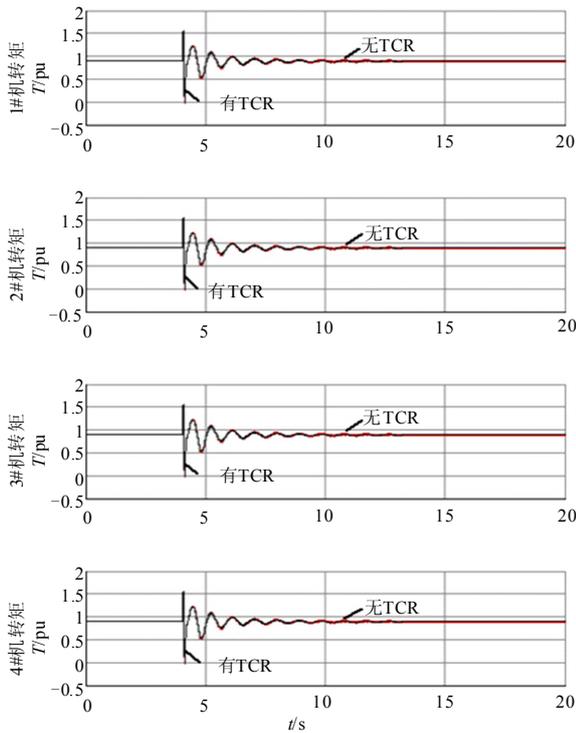


图 7 SVC 投入前后锦界电厂发电机功角波形

Fig.7 Electrical torque curve of Jin-Jie generators with and without SVC

由图 7 可以看出，在有、无 SVC 两种情况之下，发电机的电磁转矩基本重合一致，没有明显的偏差，说明 SVC 对于 SSR 的抑制不会对电网的暂态稳定性造成不利影响。

## 4 结论

1) 介绍了国内首个采用 SVC 抑制 SSO 工程的相关情况，从 SVC 的接入位置、输入信号选择、触发方式和控制策略等方面阐述了该方案的特点。

2) 搭建了基于 RTDS+SVC 的闭环测试平台。分析了建模过程中存在的难点，提出了一种用于大型实时仿真模型建模的方法。该平台同样用于测试其他控制策略以及评估其他 FACTS 装置的控制性能。

3) 基于该平台的仿真结果，表明了所采用的 SVC 能够在所考虑的所有运行情况下均能有效地抑制 SSO，在抑制过程中不会导致启备变过载。

## 参考文献

[1] 李战鹰. 南方电网交直流混合系统 RTDS 建模研究[J]. 电网技术, 2006, 30 (增): 253-254.  
LI Zhan-ying. Study of China southern power grid AC/DC hybrid system model constructed with real-time digital simulator [J]. Power System Technology, 2006, 30 (S): 253-254.

[2] 吴小辰, 陆超, 贺静波, 等. 直流广域自适应阻尼控制器设计与 RTDS 实验[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (15): 11-16.  
WU Xiao-chen, LU Chao, HE Jing-bo, et al. Design and RTDS experiment of adaptive HVDC supplementary damping controller based on WAMS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (15): 11-16.

[3] KUNDER P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.  
KUNDER P. Power system stability and control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.

[4] 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.  
NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin. Theory and analysis of dynamic power system[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

[5] Ramey D G, Kimmel D S, Dorney J W, et al. Dynamic stabilizer verification tests at the San Juan station[J]. IEEE Trans on PAS, 1981, 100 (12): 5011-5019.

[6] Kimmel D S, Carter M P, Bednarek J H, et al. Dynamic stabilizer on line experience[J]. IEEE Trans on PAS, 1984, 103 (1): 72-75.

[7] Putman T H, Ramey D G. Theory of the modulated reactance solution for subsynchronous resonance[J]. IEEE Trans on PAS, 1982, 101 (6): 1527-1535.

[8] Wasynczuk O. Damping subsynchronous resonance using reactive power control[J]. IEEE Trans on PAS, 1981, 100 (3): 1096-1104.

[9] 张帆, 徐政. 采用 SVC 抑制发电机次同步谐振的理论与实践[J]. 高电压技术, 2007, 33 (3): 26-31.  
ZHANG Fan, XU Zheng. Theory and experiences of SVC for damping sub synchronous resonance[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (3): 26-31.

[10] 冯煜理, 陈陈. 静止同步补偿器与传统静止无功补偿器的比较与分析[J]. 华东电力, 2005, 33 (9): 16-19.

- 处理方法的研究[J]. 高压电器, 2000, 36 (3): 17-19.  
CAO Yu-ya, SHEN Zhong-ru, REN Wen-zhu. Study of digital process method for dielectric loss detection with charge[J]. High Voltage Apparatus, 2000, 36 (3): 17-19.
- [2] 王楠, 律方成, 李燕青, 等. 相关函数法计算容型设备介质损耗角正切[J]. 华北电力大学学报, 2001, 28 (3): 22-25.  
WANG Nan, Lü Fang-cheng, LI Yan-qing, et al. Calculation of  $\tan\delta$  based on correlation function algorithm[J]. Journal of North China Electric Power University, 2001, 28 (3): 22-25.
- [3] 王微乐, 李福祺, 谈克雄. 测量介质损耗角的高阶正弦拟合算法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2001, 41 (9): 5-8.  
WANG Wei-le, LI Fu-qi, TAN Ke-xiong. Higher-order sine fitting algorithm for dielectric loss measurement[J]. Journal of Tsinghua University: Sci & Tech, 2001, 41 (9): 5-8.
- [4] 徐志钮, 律方成, 汪佛池, 等. 用加 Hanning 窗插值高阶正弦拟合测介损角[J]. 高电压技术, 2007, 33 (4): 50-53.  
XU Zhi-niu, Lü Fang-cheng, WANG Fo-chi, et al. Application of higher-order sine fitting algorithm with hanning-windowed interpolated in dielectric loss angle measurement[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (4): 50-53.
- [5] 陈楷, 王卉, 张承学. 介损角测量中非同步采样算法的研究[J]. 继电器, 2004, 32 (14): 5-7.  
CHEN Kai, WANG Hui, ZHANG Cheng-xue. Research on dielectric loss angle measurement in the condition of nonsynchronous sampling[J]. Relay, 2004, 32 (14): 5-7.
- [6] 徐志钮, 律方成, 姚辉, 等. 改进基波相位分离法在介损角测量中的应用[J]. 高电压技术, 2007, 33 (5): 29-31, 49.  
XU Zhi-niu, Lü Fang-cheng, YAO Hui, et al. Application of modified fundamental harmonic separation algorithm based on hanning-windowed interpolation in measurement of dielectric loss angle[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (5): 29-31, 49.
- [7] 谢明, 丁康. 频谱分析的校正方法[J]. 振动工程学报, 1994, 7 (2): 172-179.  
XIE Ming, DING Kang. Rectifying technique of spectrum analysis[J]. Journal of Vibration Engineering, 1994, 7 (2): 172-179.

---

收稿日期: 2009-12-23

作者简介:

徐志钮 (1979-), 男, 博士生, 研究方向为电力系统外绝缘、电气设备状态监测与故障诊断、电力系统谐波分析;  
E-mail: wzcjxx@sohu.com

律方成 (1963-), 男, 教授, 博士, 博导, 主要研究方向为电气设备状态监测与故障诊断、高电压与绝缘技术。

---

(上接第 10 页 continued from page 10)

- FENG Yu-cheng, CHEN Chen. Comparison and analysis between static synchronous compensator and traditional static var compensator[J]. Power of East China, 2005, 33 (9): 16-19.
- [11] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [12] 马玉龙, 肖湘宁, 陈琦, 等. 用于HVDC控制保护系统闭环测试的RTDS建模[J]. 电力自动化设备, 2006, 26 (2): 25-27.  
MA Yu-long, XIAO Xiang-ning, CHEN Qi, et al. Modelling of HVDC in RTDS for closed loop system test [J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26 (2): 25-27.
- [13] 郑三立, 雷宪章, 黄梅, 等. HVDC 和FACTS 控制与保护系统的实时测试技术[J]. 电工技术学报, 2004, 19 (6): 90-94.  
ZHENG San-li, LEI Xian-zhang, HUANG Mei, et al. Real-time testing for control and protection systems of HVDC and FACTS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19 (6): 90-94.
- [14] 龙英, 马玉龙, 曾南超, 等. RTDS 应用于直流控制保护系统的仿真试验[J]. 高电压技术, 2005, 31 (8): 56-58.  
LONG Ying, MA Yu-long, ZENG Nan-chao, et al. Application of real time digital simulator in simulation test of HVDC control and protection system[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31 (8): 56-58.
- [15] 赵洋. 静止同步串联补偿器控制策略及抑制次同步谐振的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- [16] 陕西国华锦界能源有限责任公司. 陕西国华锦界能源有限责任公司#1机组励磁系统模型和参数测试报告[R]. 西安: 2008.

---

收稿日期: 2009-11-27; 修回日期: 2010-03-17

作者简介:

高本锋 (1981-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统次同步振荡抑制技术; E-mail: gaobenfeng@126.com

肖湘宁 (1953-), 男, 教授, 硕士生导师, 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;

赵成勇 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为高压直流输电与 FACTS 技术、电能质量分析与控制。