

# 含有 STATCOM 的电力系统次同步谐振研究

刘燕, 康积涛, 李晨霞, 何宗奎, 袁业升

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 在超高压远距离输电系统中采用串联电容补偿后, 在某种运行方式或补偿度的情况下, 会发生电力系统的次同步谐振 (SSR) 现象。柔性交流输电技术在电力系统有着广阔的应用前景, 是近年来电力系统研究的前沿课题之一。而静止同步无功补偿器 (STATCOM) 是 FACTS 家族的重要成员, 是并联型补偿装置的代表。采用扫频-复转矩法分析系统的次同步谐振, 摒弃传统的 PID 控制策略, 设计多目标控制算法实现对 STATCOM 装置的系统级控制, 使其在进行无功补偿的同时可以阻尼电力系统次同步谐振现象, 这就显得既有理论又有现实意义。

**关键词:** 次同步谐振; 静止同步无功补偿器; 柔性交流输电技术

## Analysis of subsynchronous resonance of power system with STATCOM

LIU Yan, KANG Ji-tao, LI Chen-xia, HE Zong-kui, YUAN Ye-sheng

(Department of Electric Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** After the series capacitor compensation is used in the extra-high voltage long distance transmission system, in a certain operation mode or compensation degree, sub-synchronous resonance (SSR) will occur. And Flexible AC Transmission System (FACTS) will be widely used in power system, it is one of the burgeoning subject of power system in recent years. Static Synchronous Compensator (STATCOM) is the important elements of FACTS family. It is the typical representation of parallel compensation equipment. This paper analyses SSR damping characteristics with STATCOM by frequency scanning-complex torque coefficient, abandons the traditional PID control strategy, and presents STATCOM installment system-level control with designing the multi-objective control algorithm. It focuses on reactive power compensating and damps the SSR, which has comparatively large theory meaning and practicability value.

**Key words:** SSR; STATCOM; FACTS

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)20-0038-03

## 0 引言

电力系统次同步谐振<sup>[1]</sup> (sub-synchronous resonance) 是由于电力系统中串联入电容补偿的输电系统时, 处于平衡状态下的系统受到扰动后, 电力网络与汽轮发电机组之间可能以系统的一个或数个低于同步频率的自然频率交换数量相当可观的能量, 而产生的一种危害性极大的现象。在次同步谐振状态下, 发电机内会产生次同步的旋转磁场, 它与旋转磁场相互作用, 产生差频振荡转矩, 有可能在机械与电气系统之间发生谐振, 损坏发电机的轴系统。迄今为止, 已有许多 SSR 抑制措施相继提出, 其中以 FACTS 原件<sup>[2, 3]</sup> 尤其引起大家的重视。目前在次同步抑制方面研究最多的 FACTS 元件是串联电容补偿器 (TSCS)<sup>[4]</sup>, 本文以 IEEE 次同步谐振第

二标准测试系统, 介绍了一种引入静止同步无功补偿器 (STATCOM) 进行无功补偿并且同时抑制次同步谐振的方法。

## 1 基本原理

静止同步无功补偿器<sup>[5]</sup> (STATCOM), 国内曾将其称为新型静止无功发生器 ASVG (Advanced Static VAR Generator)。

图 1 中 D 为整流器, T 为逆变器。C 为储能电容。其中逆变器采用门极可关断晶闸管 GTO (Gate Turn-off Thyristor)。TT 为整流变压器。一般, 电压型逆变器的输出电压有三种模式, 即移相调压, 脉宽调制和直接调制。对于 STATCOM, 由于直流侧的电压是电容器的充电电压而不是直流电源, 所以我们一般采用移相调压或脉宽调制。

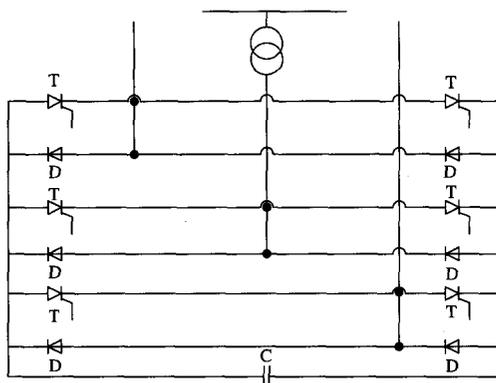


图 1 STATCOM 电路结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of STATCOM circuit

STATCOM 与系统等效连接图如图 2 所示。

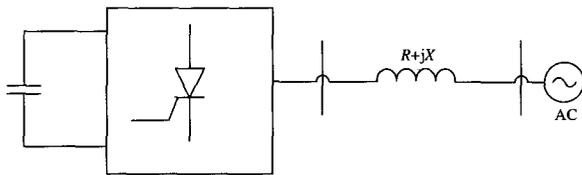


图 2 STATCOM 与系统等效连接图

Fig.2 Equivalent circuit of STATCOM with system

我们设系统为三相基波正序系统, 电压有效值为  $V_s$ , 其领先  $V_{STATCOM}$  相角为  $\delta$ , 通过分析我们可以得到, 若保持脉宽  $\theta$  不变只调整相位角  $\delta$  则即可改变 STATCOM 向系统输入的无功功率, 同时电容器电压也将随之改变。

目前 SSR 分析通常采用频域分析法和时域分析法两大类<sup>[6-9]</sup>。通过分析 SSR 系统的线性化模型我们可以发现, 机械部分和电气部分的线性化方程之间, 除了通过发电机转子的角度关系式  $\Delta\delta = \Delta\delta_5$  和电磁转矩的关系式  $\Delta T_e = -\Delta T_5$  (质量块 5 为发电机的转子,  $\Delta\delta_5, \Delta T_5$  为发电机的转子角度与发电机的电磁转矩)相互联系外其他变量之间并无直接联系。再考虑到次同步谐振频率与轴系的自然扭振频率互补, 我们将采用扫频-复转矩<sup>[10,11]</sup>系数辨别法来分析和阻尼次同步谐振。该方法是 Canay 于 1982 年提出的一种用于电力系统次同步谐振的分析方法, 其基本思想是: 令  $\Delta\delta$  在轴系自然扭振频率附近作等幅振荡, 分别求出机械部分和电气部分的转矩对这一振荡的响应, 通过在次同步频率范围内对机械和电气复转矩系数进行扫描, 根据使得机械和电气弹性系数之和为零的频率下机械和电气阻尼之和的正负来判别  $\Delta\delta$  的振荡是否被阻尼, 从而判别系统是否会发生次同步谐振。而且根据扫频-复转矩系数辨别法的思想, 我们可以得知只要通过采取适当措施

以改变全系统的电气复转矩系数中的电气阻尼系数, 使得电气阻尼系数和系统中的机械阻尼系数之和大于零, 就可以实现对电力系统次同步谐振的阻尼。

为了使 STATCOM 具有更好的稳定性和灵活性, 本文采用多目标控制策略, 在这里只对抑制系统次同步谐振部分的控制方法做简要介绍, 主要是应用模糊控制算法通过改变 STATCOM 的控制角  $\delta_{STATCOM}$  来实现抑制电力系统次同步谐振的目的。通过分析我们可以知道要增大发电机的阻尼必须产生一个类似于  $D \frac{d\Delta\delta_5}{dt}$  的项, 设原动机输出功率  $P_m$  不变, 那么只有改变发电机电磁功率  $P_e$ , 因为

$$\Delta P_e \propto \Delta I_{STATCOM} \propto \int \delta_{STATCOM} dt$$

因此要  $\Delta P_e \propto \frac{d\Delta\delta_5}{dt}$  则有  $\delta_{STATCOM} \propto \Delta\dot{\omega}$  所以 STATCOM 的控制角  $\delta_{STATCOM}$  中加入与  $\Delta\dot{\omega}$  成正比的项才能增大系统的阻尼, 抑制次同步谐振。

## 2 研究对象

图 3 是选用 STATCOM 方案仿真分析的研究对象以理想电压源代替 STATCOM, 它是由 IEEE 第二基准模型建立而成的。机械系统轴系由六个转子<sup>[12]</sup>串联而成。它们依次为汽轮机的高压段 (HP), 中压段 (IP), 低压段 A (LPA), 低压段 B (LPB), 发电机 (GEN) 和励磁机 (EXC)。电气系统包括发电机, 变压器, 输电线路, 固定串补电容, STATCOM 回路和无限大系统。完整的电气和机械参数参见文献<sup>[13]</sup>。

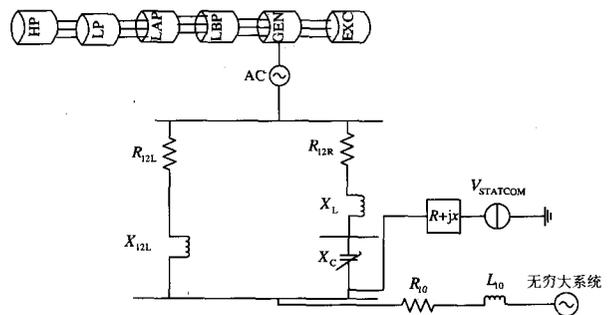


图 3 待研究系统模型

Fig.3 Circuit diagram of the studied system

## 3 Matlab/Simulink 仿真

本文研究的 IEEE SSR 第二标准测试系统。所用的静止同步补偿器 (STATCOM) 主电路采用电压型变流器四重化技术, 48 脉冲变流器组的模型结构。通过仿真实验我们可以得到, 当系统采用 55%

串联电容补偿时,发生次同步谐振,原动机低压段 A 与低压段 B 轴系间的扭矩  $T_3$  以及低压段 B 与发电机轴系间的扭矩  $T_2$  如图 4 所示。

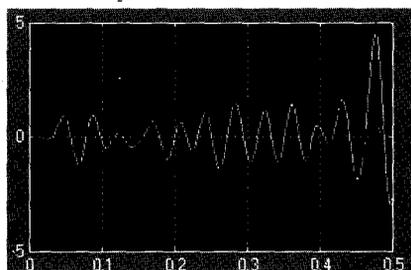


图 4 无 STATCOM 低压缸 A 和低压缸 B 之间的扭矩 (P.U)

Fig.4 Torsion between LAP and LBP with no STATCOM(P.U)

由图我们可以看出轴系之间的扭矩较大,且有发散振荡迹象,说明此时发电机发生了次同步谐振现象,这正是采用古典串补而引发的问题。

而当系统采用 STATCOM 方案时系统原动机轴系间的扭矩  $T_2, T_3$ ,为:

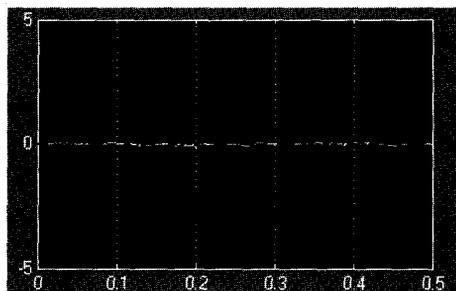


图 5 有 STATCOM 低压缸 A 和低压缸 B 之间的扭矩 (P.U)

Fig.5 Torsion between LAP and LBP with STATCOM(P.U)

我们可以清楚地看到,原动机低压段 A 与低压段 B 轴系间的扭矩  $T_3$  以及低压段 B 与发电机轴系间的扭矩  $T_2$  比采用固定串补的情况下明显的减小,并使其振荡波形趋于平缓,这说明系统采用了 STATCOM 方案后,次同步谐振现象得到了很好的抑制。而且我们可以同时得到输电线路相电压的标幺值如 6 所示。

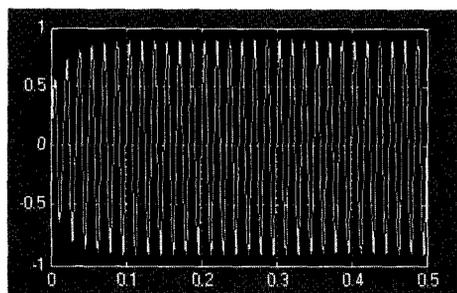


图 6 系统 A 相电压 (P.U)

Fig.6 The A phase voltage of system(P.U)

### 4 结论

通过以上算例的仿真分析,我们可以看出采用 STATCOM 方案进行电力系统的无功补偿,既可以稳定电力系统的电压,提高电压的峰值,而且还可以对电力系统发电机轴系之间的扭振现象有很好的抑制作用,阻尼次同步谐振现象的产生。对于不同的运行工况和需要解决的问题,STATCOM 方案的控制策略可以根据需要作一些变化。

综上所述,应用 STATCOM 方案,进行电力系统的无功补偿以及次同步谐振的阻尼具有极高的经济实用价值。

### 参考文献

- [1] 钟胜.与超高压输电线路加串补装置有关的系统问题及其解决方案[J]. 电网技术, 2004, 28(6):26-29.  
ZHONG Sheng.Problem Caused by Adding Series Compensation Devices to EHV Transmission System and Their Solution[J]. Power System Technology, 2004, 28(6):26-29.
- [2] 赵贺.电力电子学在电力系统中的应用—灵活交流输电系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.  
ZHAO He. Power Electronic & Its Application in Power System—FACTS System[M]. Beijing: China Electric Power Press,2001.
- [3] 何大愚.柔性交流输电技术的定义,机遇及局限性[J]. 电网技术, 1996, 20:18-24.  
HE Da-yu.The Definition, Opportunities and Limitations of FACTS Technology[J].Power System Technology, 1996,20:18-24.
- [4] 曹路, 陈衍.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 of Mitigating Subsynchronous Resonance by Thyristor-Controlled Series Compensation[J].Automation of Electric Power Systems, 2001,25(4): 25-30.
- [5] 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,2005.  
XIE Xiao-rong, JIANG Qi-rong. FACTS Technology Power System Theory and Its Application[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2005.
- [6] 张文涛.次同步谐振问题及防止措施[J]. 电网技术, 1989, 13(2): 59-65.  
ZHANG Wen-tao. Weelset the Problems Existing in SSR and Prevention Measures[J]. Power System Technology, 1989, 13(2): 59-65.
- [7] IEEE Committee Report, Countermeasures to Sub Synchronous Resonance Prombles[J]. IEEE Trans on PAS,1980, 99(5):1810-1817.

(下转第 44 页 continued on page 44)

参考文献

[1] 广东省科学技术厅.配电网中性点快速消弧线圈快速选线跳闸接地运行方式的应用研究.科技成果鉴定证书[Z].粤科鉴字[2005]041号.2005,3(3).

[2] 陆国庆,姜新宇,欧阳旭东,等.高短路阻抗变压器式自动快速消弧系统—配电网中性点新型接地方式的实现[J].电网技术,2000,24(7):25-28.  
LU Guo-qing, JIANG Xin-yu, OUYANG Xu-dong, et al. An Automatic Rapid Arc Suppression System Based on Transformer with High Short Circuit Impedance—Implementation of a New Approach of Neutral Grounding for Distribution Network[J]. Power System Technology, 2000,24(7):25-28.

[3] 陆国庆,姜新宇,梅中健,等.配电网中性点接地的新途径[J].电网技术,2004,28(2):32-35.  
LU Guo-qing, JIANG Xin-yu, MEI Zhong-jian, et al. A New Approach to Neutral Grounding in Distribution Networks[J]. Power System Technology, 2004,28(2):32-35.

[4] 要焕年,曹梅月.电力系统谐振接地[M].北京:中国电力出版社,2000.

YAO Huan-nian, CAO Mei-yue. Resonance Ground of Electric Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.

[5] DL/T 872-2004,小接地电流系统单相接地保护装置[S]. DL/T 872-2004, Specification of Single Phase Relay in Non-effective Earthed Power System[S].

[6] DL/T 1057-2007,自动跟踪补偿消弧线圈成套装置技术条件[S]. DL/T 1057-2007, Specification of Arc Suppressing Coil Apparatus with Automatic Tracking and Compensation[S].

[7] 张山,杨玉昆,潘华东,等.KD-XH型智能化快速消弧系统应用效果分析[J].高电压技术,2001,27(4):77-78.  
ZHANG Shan, YANG Yu-kun, PAN Hua-dong, et al. Analysis of Application of KD-XH Intelligent Arc Suppressing Coil[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(4):77-78.

收稿日期:2008-01-07; 修回日期:2008-01-22  
作者简介:

陈锐(1976-),男,工程硕士,从事电力系统试验和研究工作。E-mail:cray@163.com

(上接第37页 continued from page 37)

[8] 郭敏.风电场机端无功补偿的探讨[J].内蒙古电力技术,2006,24(3).  
GUO Min. Research on Reactive Compensation for Generator End of Wind Power Site[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2006,24(3).

[9] 陈金贵,陈海焱,段献忠.含分布式电源的配电网潮流计算[J].电力系统自动化,2006,30(1):39-44.  
CHEN Jin-gui, CHEN Hai-yan, DUAN Xian-zhong. Study on Power Flow Calculation of Distribution System with DGs[J]. Automation of Electric Power Systems,

2006,30(1):39-44.

收稿日期:2008-03-08; 修回日期:2008-05-08  
作者简介:

张平(1982-),男,硕士,从事电力系统继电保护的研究和开发工作; E-mail: zp06108@126.com  
刘国频(1965-),男,高级工程师;  
曾祥君(1972-),男,博士,教授,从事电力系统微机保护与控制的教研和研究开发工作。

(上接第40页 continued from page 40)

[8] Farmer R G, Svchwalb A L, Kvate E. Navajo Project Report on Sub Synchronous Resonance Analysis and Solutions[J]. IEEE Trans on PAS, 1977:1266-1232.

[9] Wolff R F. Stop Sub Synchronous T/G-Shaft Damage[J]. Electrical World, 1981:129-133.

[10] 李岩松.基于统一潮流控制器的阻尼次同步谐振的研究[M].北京:华北电力大学,2000.  
LI Yan-song. Research on Damping Subsynchronous Resonance Based on United Power Flow Controller[M]. Beijing: North China Electric Power University, 2000.

[11] Xing K, Kusic G L. Damping Subsynchronous Resonance by Phase Shifters[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1989, 4(3):344-350.

[12] 倪以信,等.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, et al. Theoretical Analysis of Dynamic of Power System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

[13] LI Wang. Damping of Torsional Oscillation Using Excitation Control of Synchronous Generator, the IEEE Second Benchmark Model Investigation[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1991,6(1).

收稿日期:2007-12-26; 修回日期:2008-01-09  
作者简介:

刘燕(1984-),女,硕士研究生,研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。E-mail:aacd.4321@163.com