

# 伊冯/呼辽交直流系统的次同步振荡阻尼特性分析

郑蕤, 肖湘宁, 郭春林, 高本锋

(电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

## Analysis on Damping Characteristic of Subsynchronous Oscillation in AC/DC Power Grid Consisting of 500 kV AC Power Transmission From Yimin to Fengtun and $\pm 500$ kV DC Power Transmission From Hulun Buir to Liaoning

ZHENG Rui, XIAO Xiangning, GUO Chunlin, GAO Benfeng

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control (North China Electric Power University), Ministry of Education, Changping District, Beijing 102206, China)

**ABSTRACT:** An electromagnetic transient model for AC/DC power grid consisting of 500 kV AC power transmission from Yimin to Fengtun and  $\pm 500$  kV DC power transmission from Hulun Buir to Liaoning is built, and adopting the complex torque coefficient method-test signal method that is implemented by time-domain simulation a series of testing signals with different frequencies are applied to generation units. Generation units' electrical damping characteristics within the frequency range of subsynchronous oscillation (SSO) under different wiring patterns are calculated, and the influence of TCSC on the damping characteristics is observed. Based on time-domain simulation, the effectiveness of analysis results by test signal method is verified. Both results from theoretical analysis and experimental verification show that in AC/DC power grid the connected operation of DC power system with AC power system is favorable to mitigate SSO caused by HVDC power transmission system and serial compensation equipments in AC power transmission system.

**KEY WORDS:** test signal method; AC/DC power grid; HVDC power transmission; thyristor controlled series compensation (TCSC); subsynchronous oscillation (SSO)

**摘要:** 建立了基于伊冯/呼辽交直流系统的电磁暂态模型, 采用基于时域仿真实现的复转矩系数法——测试信号法, 对机组施加了一系列不同频率的测试信号。计算了不同连接方式下机组在次同步频率范围内的电气阻尼特性, 并考察了可控串联补偿装置对该阻尼特性的影响。最后结合时域仿真法验证了测试信号法分析结果的有效性。理论分析和仿真结果表明, 在交直流系统中采用联网运行带可控串补的方式, 有利于抑制高压直流输电系统和交流输电线路中串补装置引

起的次同步振荡问题。

**关键词:** 测试信号法; 交直流系统; 高压直流输电; 可控串联补偿; 次同步振荡

## 0 引言

随着全国联网步伐的加快, 电网结构愈加复杂化, 交直流混合运行的电网结构已成为一种趋势。2001年6月, 我国南方电网的天生桥—广州 $\pm 500$  kV 直流输电双极投入试运行, 形成了国内首例带串补交直流并列运行系统。然而, 由于水轮发电机的轴系特点, 该系统并不存在次同步振荡(subsynchronous oscillation, SSO)问题, 串联补偿装置主要是为了提高天广 I、II 回输电线路的输送能力, 解决可能出现的低频振荡问题。2010年9月, 连接内蒙古呼伦贝尔煤电基地和辽宁负荷中心的呼伦贝尔—辽宁(呼辽) $\pm 500$  kV 直流输电工程(含配套交流工程)正式竣工并投运。为保证电力送出, 提高系统的暂态稳定性, 抑制系统发生 SSO, 在伊敏—冯屯(伊冯)双回线上加装了固定串联补偿(fixed series compensation, FSC)及可控串联补偿(thyristor controlled series compensation, TCSC)装置。由此可见, 伊冯/呼辽交直流系统的 SSO 问题可能起因于交流线路中的串联电容补偿或高压直流(high voltage direct current, HVDC)控制系统。然而, 对此类既含有柔性交流输电(flexible alternative current transmission system, FACTS)装置, 又存在交直流相互作用的 SSO 问题的研究却鲜有报道, 故上述研究具有重要的理论意义和实用价值。

以往对于 SSO 的分析方法主要是以系统小扰

动方程的计算为基础, 其中有特征值分析法与复转矩系数法<sup>[1]</sup>。在有 HVDC 或 FACTS 装置的系统中使用特征根分析法, 难以得到系统在整个次同步频率范围内皆适用的数学模型, 即无法用基于准稳态模型的线性化方程准确表达系统, 因此该方法用于复杂交直流系统的分析具有局限性。而复转矩系数法可以考虑到各种控制系统动态及运行工况对 SSO 的影响, 并且可以用于分析机电扭振相互作用和装置引起的 SSO 问题<sup>[2]</sup>。因此基于时域仿真实现的复转矩系数法——测试信号法则为上述研究提供了一条捷径。

随着国家电网智能化战略目标的实施, SSO 作为智能电网发电环节中的重要问题越来越引起国内学者的关注<sup>[3-4]</sup>。然而, 目前对于串联补偿与直流输电共存时所发生的 SSO 研究甚少, 文献[5]对单机—等效电源系统交直流并联运行的情况进行了研究, 得出交直流系统更多地表现出交流阻尼特性等结论, 但这在多机系统中并不具有普遍性, 且未考虑 TCSC 装置及系统非并联运行时阻尼特性对系统的影响。因此, 虽然简单系统所得到的结论具有前瞻性和指导性, 但同时也具有局限性与特殊性。为结合工程实际, 本文基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台, 搭建了伊冯/呼辽交直流系统的电磁暂态模型, 并运用测试信号法研究连接方式及串补装置对电气阻尼特性的影响, 从而得出一些较有工程实际价值的结论。

## 1 研究方法简介

本文采用通过时域仿真实现的测试信号法进行仿真分析。具体做法是, 在系统稳定运行条件下, 对待研发电机的转子施加一系列频率成整数倍的小值脉动转矩, 直至系统再次进入稳态后, 截取脉动转矩 1 个公共周期上的电磁转矩  $T_e$  和角频率  $\omega$ , 并对它们进行傅里叶分解, 得出不同频率下的  $\Delta \dot{T}_e$  和  $\Delta \dot{\omega}$ , 进而求得电气阻尼系数。电气阻尼系数  $D_e$  计算公式<sup>[6]</sup>为

$$D_e = R_e (\Delta \dot{T}_e / \Delta \dot{\omega}) \quad (1)$$

由于本文需要对比不同发电机在不同运行方式下的电气阻尼特性, 即需要对每台待研发电机都要作电气阻尼特性曲线, 且每个频率点都要作大量计算以获得电气阻尼, 故工作量较大。经反复试验, 对于伊冯/呼辽系统电磁暂态模型加入幅值为 0.05 pu 的小值脉动转矩后, 系统需要的稳定时间为 10~15 s, 且仿真步长取 10  $\mu$ s 时, 各个频率点下的  $D_e$  时域波形能在仿真时间(50s)内稳定下来。

## 2 待研系统模型

待研模型为呼辽  $\pm 500$  kV 高压直流系统与伊冯 500 kV 交流系统构成的大系统, 如图 1 所示。联网运行时, 呼伦贝尔地区有 6  $\times$  600 MW 发电机组, 装机容量合计 3 600 MW, 扣除厂用电后实际输出有功功率 3 220 MW。呼伦贝尔—辽宁的  $\pm 500$  kV 直流输

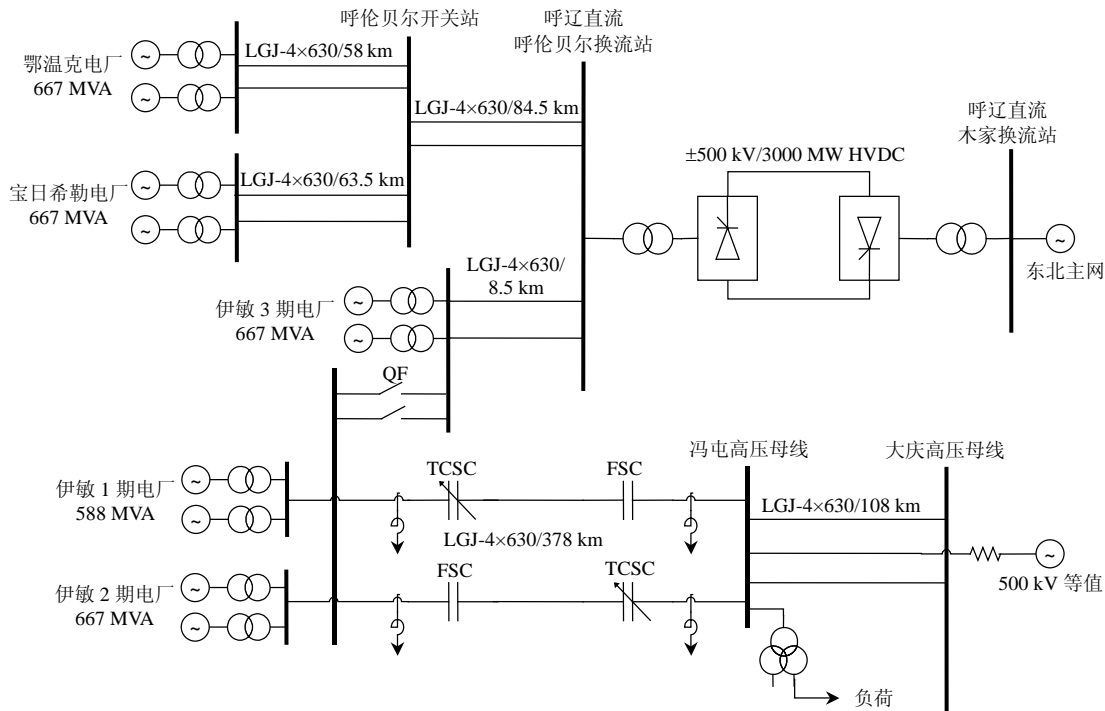


图 1 伊冯/呼辽交直流系统模型

Fig. 1 Yi-Feng AC/ Hu-Liao DC system model

电工程额定容量为 3000MW,其余容量将通过双回 500kV 交流伊冯线送出。若不采用串联补偿装置,2 回交流线路按照单相永久故障校验,暂态稳定极限仅为 1 600 MW 左右,输送能力难以满足伊敏电厂满发的送出要求。考虑到伊冯线在原路径扩建新线路需长距离穿越原始林区,方案不可行,因此为保证电力送出并提高系统的暂态稳定性,抑制系统发生 SSO,在伊冯线上装设串补度为 15%的 TCSC 装置和串补度为 30%的 FSC 装置,其中 TCSC 连续运行的阻抗提升系数为 1.2。

在电磁暂态模型中,10 台发电机均采用多质量块模型,伊敏 1 期发电机采用 5 质量块,伊敏 2 期、3 期发电机采用 4 质量块。分析过程中不计机械阻尼,而只分析系统电气阻尼,所得结果偏于保守。HVDC 输电系统为定功率/定熄弧角控制,额定运行状态为 500 kV/3 000 MW。交流输电线路采用分布参数,TCSC 中上层控制包括由暂态稳定控制回路、阻尼振荡控制回路以及电容器短时过载能力和金属氧化物变阻器(metal oxide varistor, MOV)过电压保护回路构成的调节范围限制回路共 3 部分,底层控制为闭环阻抗控制<sup>[7]</sup>。

### 3 基于测试信号法的电气阻尼分析

#### 3.1 系统情况

由现场数据可知,鄂温克和宝日希勒电厂的汽轮发电机组离直流输电系统整流侧较远,存在 SSO 的危险性较小。伊敏 3 期电厂的汽轮发电机组的机组作用系数(unit interaction factor, UIF)为 0.63,其发电机组存在 SSO 的可能性很大<sup>[8]</sup>。同时,伊冯交流线路的串补装置易诱发伊敏 1、2 期电厂的 SSO 现象,因此本文重点研究伊敏电厂汽轮发电机组的电气阻尼特性。

#### 3.2 运行方式对电气阻尼特性的影响分析

待研系统连接方式说明如下:

1) 联网运行。即伊敏 3 期与 1、2 期间的双回 500 kV 交流母线之间断路器 QF 合上时的运行方式,记为 HVDC/AC(TCSC+FSC)。

2) 单独运行。即伊敏 3 期与 1、2 期间的双回 500 kV 交流母线之间断路器 QF 断开时的运行方式,交流和直流输送功率与联网运行时相同,记为 AC(TCSC+FSC)及 HVDC。

由于伊敏各期的每 2 台发电机参数及运行条件完全相同,由此仅记录其中 3 台发电机,记为

YM1G1、YM2G1、YM3G1。运用测试信号法计算单独运行与联网运行时对应机组在次频(5~45 Hz)下的电气阻尼特性,即 HVDC/AC(TCSC+FSC)时计算 YM1G1、YM2G1、YM3G1 的电气阻尼特性,AC(TCSC+FSC)时计算 YM1G1、YM2G1 的电气阻尼特性,HVDC 时计算 YM3G1 的电气阻尼特性,对比结果如图 2—4 所示。

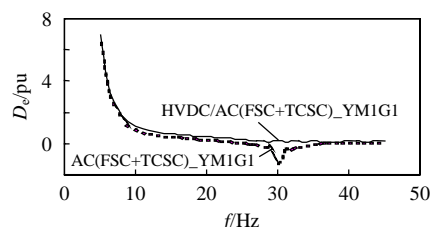


图 2 不同连接方式下伊敏 1 期发电机电气阻尼特性对比  
Fig. 2 Comparison of the damping characteristic of YM1G1 under different connection mode

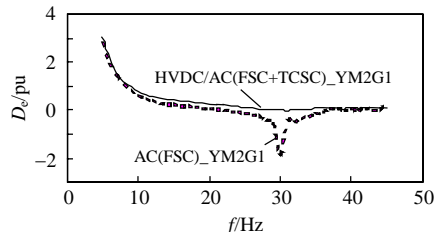


图 3 不同连接方式下伊敏 2 期发电机电气阻尼特性对比  
Fig. 3 Comparison of the damping characteristic of YM2G1 under different connection mode

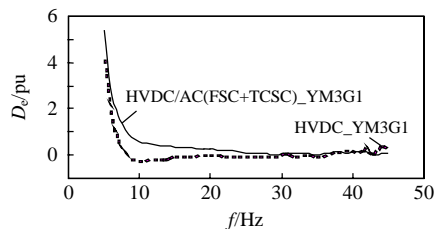


图 4 不同连接方式下伊敏 3 期发电机电气阻尼特性对比  
Fig. 4 Comparison of the damping characteristic of YM3G1 under different connection mode

由图 2—4 可知,当联网运行时发电机的电气阻尼特性皆为正值,改善了在交流线路及 HVDC 系统单独运行时局部频率为负值的情况。由复转矩系数法的判断依据可知,此时系统将不会发生 SSO 现象。由此可得,对于伊冯/呼辽交直流系统,联网运行比单独运行更稳定。即当系统联网运行时,可不投入次同步阻尼控制器(subsynchronous damping controller, SSDC)<sup>[9-10]</sup>。

分析上述现象的原因可知,一方面,对于 TCSC 装置引起的 SSO 问题,其引发可能性除了与轴系的扭振频率和阻尼有关外,还与电气系统的自振频率和电气阻尼有关,而系统接线方式则直接影响到系统的自振频率和电气阻尼<sup>[7]</sup>。经验表明,在网状输

电系统中, 由于电气阻尼较大, 不容易出现 SSO。例如 1970 年和 1971 年 Mohave 电厂 2 次 SSO 事故时的运行系统, 现象与损坏情况基本相同, 都是在 Mohave 和 Eldorado 的连线跳开、Mohave 电厂单独通过一条 283 km 串补线路向 Lugo 系统送电的情况下发生的。而当 Mohave 通过 500 kV 线路与 Lugo 和 Eldorado 两母线相连形成网状输电时, 就没有 SSO 现象<sup>[11]</sup>。同样, 内蒙古自治区的托克托电厂以点对网方式通过串补线路向华北送电时, 可能出现严重的 SSO 问题, 但若将托克托电厂与约 30 km 外的内蒙网相连, 再通过串补线路向华北送电, 则 SSO 问题基本消失。

另一方面, 与文献[12]的分析结果一致, 由 HVDC 输电引起的 SSO 问题与整流侧汽轮发电机组和交流大电网联系的强弱有关。在联网模式下, 交流侧常规的电力负荷具有随频率而变化的特性, 从而对汽轮发电机组的 SSO 起阻尼作用, 同时也起到分压分流的作用, 因此在一定程度上减轻了 HVDC 与发电机组之间的耦合<sup>[13]</sup>。汽轮发电机组与交流大电网联系薄弱, 可以用联络线的阻抗来表达。由现场数据可知, 当呼辽直流与伊冯交流联网运行时, 联络双回线的阻抗很小, 因此伊冯交流部分将对整流侧伊敏电厂汽轮发电机组的 SSO 起阻尼作用。同样, 在贵广 II 直流系统中也有类似的现象, 即系统在强交流系统连接方式下是稳定的, 而在弱交流连接方式及孤岛方式下都有发生 SSO 的危险。

### 3.3 串补方式对电气阻尼特性的影响

在保持串补度不变, 即保持交流线路强度的情况下, 将 15% TCSC+30% FSC 串补方式改为全固补方式, 相关运行方式记为 AC(FSC), HVDC/AC(FSC)。同样运用测试信号计算对应机组的电气阻尼特性, 并与 AC(FSC+TCSC)及 HVDC/AC(FSC+TCSC)的计算结果进行对比, 如图 5—7 所示, 其中交直流联网运行时以伊敏 3 期机组为例说明情况, 伊敏 1、2 期的阻尼变化情况与之类似。

当交流输电线路采用全固补时, 由图 5—6 看

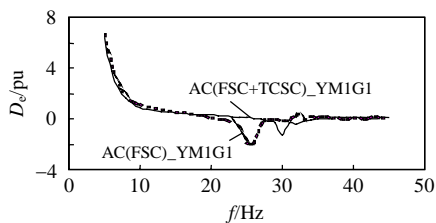


图 5 串联补偿装置对伊敏 1 期发电机电气阻尼特性影响  
Fig. 5 The influence of series capacitor compensation on damping characteristic of YM1G1

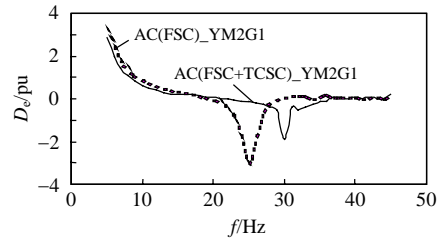


图 6 串联补偿装置对伊敏 2 期发电机电气阻尼特性影响  
Fig. 6 The influence of series capacitor compensation on damping characteristic of YM2G1

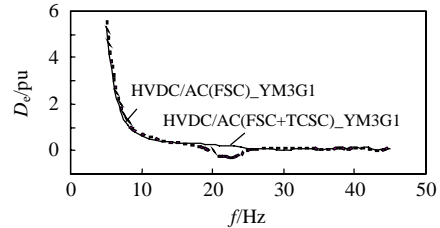


图 7 串联补偿装置对伊敏 3 期发电机电气阻尼特性影响  
Fig. 7 The influence of series capacitor compensation on damping characteristic of YM3G1

出, 伊敏 1、2 期发电机电气谐振的频率向低频方向转移(折算到转子侧), 对应电气谐振点的负阻尼增大。由图 7 看出, 伊敏 3 期发电机在 23 Hz 附近出现负阻尼。由此可知, 交流输电线路安装 TCSC 后, 伊敏各期电厂发电机组的电气阻尼特性都得到了提高, 即 TCSC 不仅改善了交流线路的 SSO 稳定性, 也改善了 HVDC 的 SSO 稳定性, 提高了系统的整体稳定性。这是由于 TCSC 自身在次同步频率下的次频阻抗特性起到了调制解调作用<sup>[14]</sup>, 减少了出现 SSO 的可能性。

要进一步说明的是, 为了达到抑制 SSO 的目的, 必须合理地选择 TCSC 和 FSC 的比例, 其中 TCSC 部分的比例不能太低, 太低可能达不到抑制 SSO 的目的, 比例太高就达不到节省投资的目的。合理的串补比例随总串补度、系统情况、机组情况等因素变化, 需通过详细的系统研究确定。IEEE 推荐采用以下原则, 即以不发生 SSO 为目的来确定最高固定串补度, 如果需要更高的串补度, 则附加采用可控串补, 形成 TCSC 与 FSC 相结合的串补方式<sup>[15]</sup>。本文采用的串补比例(30%FSC+15%TCSC)以及 TCSC 提升系数皆由实际工程数据所得。

## 4 时域仿真验证

为验证上述分析结果的有效性, 采用 PSCAD/EMTDC 进行时域仿真, 通过以下 2 种方案来验证:

**方案 1:** 在呼伦贝尔开关站设置三相短路接地故障, 观测伊敏 3 期发电机(YM3G1)在 HVDC、HVDC/AC(TCSC+FSC)、HVDC/AC(FSC)时的轴系

扭振变化。

**方案 2:** 在冯屯高压母线设置三相短路接地故障, 观测伊敏 1 期发电机(YM1G1)在 AC(FSC+TCSC) 及 HVDC/AC(TCSC+FSC)时的轴系扭振变化。

上述方案下各发电机的轴系扭矩波形如图 8—12 所示。图中:  $T_{HI}$  为高压缸 HP 与中压缸 IP 之间的扭矩;  $T_{IL}$  为中压缸 IP 与低压缸 LP 之间的扭矩;  $T_{LG}$  为低压缸 LP 与发电机质块 GEN 之间的扭矩。另外伊敏 1 期发电机 YM1G1 是 5 质量块, 有 LPA、LPB 2 个低压缸, 因此它们之间扭矩表示为  $T_{LL}$ 。

方案 1 和方案 2 的时域仿真波形验证了上述阻尼特性分析的有效性。其中: 图 8—9 验证了联网运行比高压直流输电孤岛运行更稳定; 图 9—10 验证了 TCSC 在改善次同步阻尼特性时起到的积极作用; 图 11—12 验证了联网运行比交流输电单独运

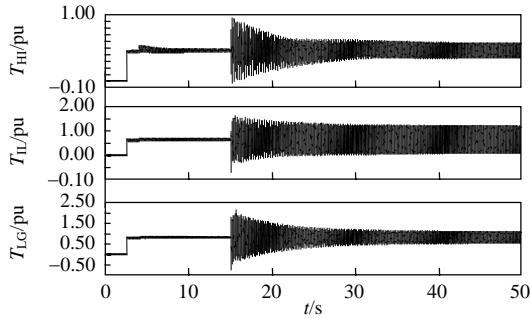


图 8 HVDC 时 YM3G1 轴系扭矩波形  
Fig. 8 The torque response curve of YM3G1 (HVDC)

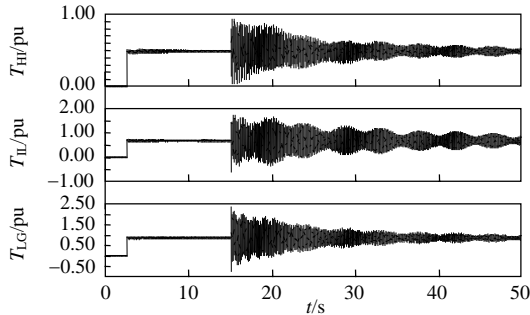


图 9 HVDC/AC(FSC+TCSC)时 YM3G1 轴系扭矩波形  
Fig. 9 The torque response curve of YM3G1 (HVDC/AC(FSC+TCSC))

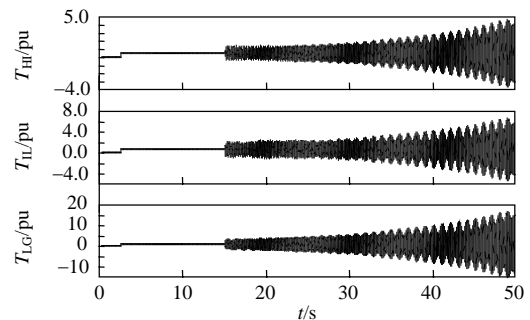


图 10 HVDC/AC(FSC)时 YM3G1 轴系扭矩波形  
Fig. 10 The torque response curve of YM3G1 (HVDC/AC(FSC))

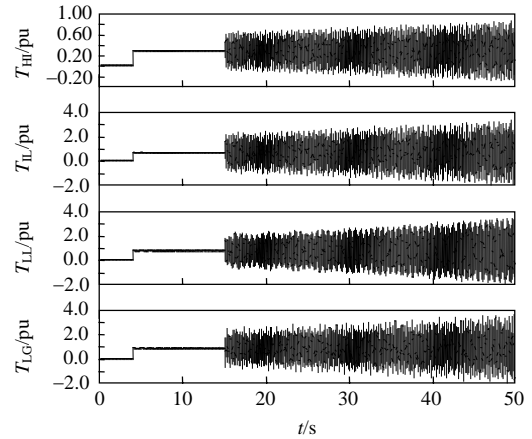


图 11 AC(FSC+TCSC)时 YM1G1 轴系扭矩波形  
Fig. 11 The torque response curve of YM1G1 (AC(FSC+TCSC))

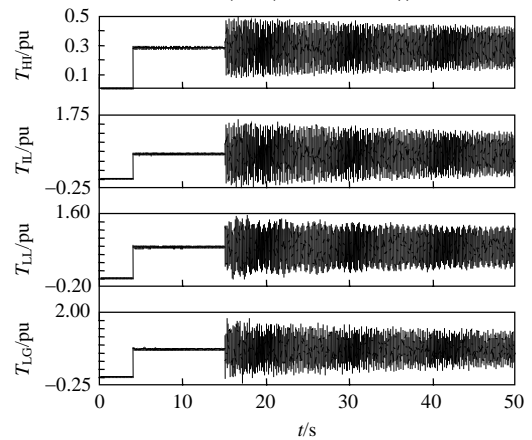


图 12 HVDC/AC(FSC+TCSC)时 YM1G1 轴系扭矩波形  
Fig. 12 The torque response curve of YM1G1 (HVDC/AC(FSC+TCSC))

行更稳定。

以上结果表明, 时域仿真法不受机组之间扭振相互作用的影响, 可以直接观察系统发生 SSO 时各变量的响应曲线, 既可用于大扰动下 SSO 的研究, 也可用于小扰动下 SSO 的研究。该方法的缺点是难以鉴别各个扭振模式和阻尼特性, 对 SSO 产生的机制、影响因素及预防对策不容易提供信息。而测试信号法在整个次同步频率范围内对系统作频率扫描, 从而计算出各频率下系统的电气阻尼, 物理透明度高, 有利于采取 SSO 对策, 2 者结合可有效地分析系统的 SSO 特性。

## 5 结论

1) 系统连接方式对抑制 SSO 有影响。对于伊冯/呼辽交直流系统, 联网运行增强了与交流系统的联系, 增大了系统的电气阻尼, 从而比交流或直流系统单独运行时更稳定。

2) 串联补偿装置对抑制 SSO 有影响。TCSC 不仅改善了交流线路的 SSO 稳定性, 也改善了

HVDC 的 SSO 稳定性, 从而提高了系统的整体稳定性。

3) 联网运行带 TCSC 的方式有利于抑制高压直流输电系统和交流输电线路中串补装置引起的 SSO 问题。若此时测得的电气阻尼系数为正, 则无需投入次同步阻尼控制器。

4) 本文采用的分析方法对今后复杂交直流系统的 SSO 特性分析及系统网架结构建设提供参考。

## 参考文献

- [1] 徐政, 罗惠群, 祝瑞金. 电力系统次同步振荡问题的分析方法概述[J]. 电网技术, 1999, 23(6): 36-39.  
Xu Zheng, Luo Huiqun, Zhu Ruijin. Review on methods of analysis for subsynchronous oscillations of power systems[J]. Power System Technology, 1999, 23(6): 36-39(in Chinese).
- [2] 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: 292, 323-327.
- [3] 刘敏, 周孝信, 田芳, 等. 抑制次同步振荡的可控串补附加阻尼控制[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 65-70.  
Liu Min, Zhou Xiaoxin, Tian Fang, et al. Supplementary damping control of TCSC for subsynchronous oscillation suppression[J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 65-70(in Chinese).
- [4] 田旭, 姜齐荣, 谢小荣. 电力系统次同步谐振抑制措施综述[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 74-79.  
Tian Xu, Jiang Qirong, Xie Xiaorong. Review of measures to mitigate subsynchronous resonance in power systems[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 74-79(in Chinese).
- [5] 周长春. 高压直流输电系统次同步振荡阻尼特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [6] 徐政. 复转矩系数法的适用性分析及其实域仿真实现[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(in Chinese).
- [7] 周孝信, 郭剑波, 林集明, 等. 电力系统可控串联电容补偿[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 266-273.
- [8] 陈陈, 杨煜. 几种次同步振荡分析方法和工具的阐述[J]. 电网技术, 1998, 22(8): 10-13.  
Chen Chen, Yang Yu. Discussion of several analytical tolls about subsynchronous resonance (SSR)[J]. Power System Technology, 1998, 22(8): 10-13(in Chinese).
- [9] 张帆, 徐政. 直流输电次同步阻尼控制器的设计[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 13-17.  
Zhang Fan, Xu Zheng. A method to design a subsynchronous damping controller for HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 13-17(in Chinese).
- [10] 杨秀, 陈陈, 王西田. HVDC 控制系统对汽轮发电机组次同步振荡的影响[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 5-8.  
Yang Xiu, Chen Chen, Wang Xitian. Impact of HVDC control on subsynchronous oscillation of turbine-generator set[J]. Power System Technology, 2004, 28(5): 5-8(in Chinese).
- [11] Walker D N, Bowler C E J, Jackson R L, et al. Results of subsynchronous resonance test at Mohave Power[J]. Apparatus and Systems, 1975, 94(5): 1878-1889.
- [12] 郑蕤, 肖湘宁, 李伟, 等. 复杂交直流系统 SSO 模式辨识及仿真验证[J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 3035-3040.  
Zheng Rui, Xiao Xiangning, Li Wei, et al. Subsynchronous oscillation mode analysis of AC/DC system based on Prony and time-domain method[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 3035-3040(in Chinese).
- [13] Wasynczuk O. Damping subsynchronous resonance using reactive power control[J]. IEEE T-PAS, 1981, 100(3): 1096-1104.
- [14] Daneshpooy A, Gole A M. Frequency response of the thyristor controlled series capacitor[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(1): 53-58.
- [15] IEEE Std 1534-2002 IEEE recommended practice for specifying thyristor-controlled series capacitors[S].



郑蕤

收稿日期: 2011-03-25。

作者简介:

郑蕤(1986), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析运行与控制, E-mail: 179379153@qq.com;

肖湘宁(1953), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力电子技术在电力系统中的应用、电能质量等方面的研究工作;

郭春林(1975), 男, 副教授, 从事电力系统稳定、电能质量分析与控制方面的研究与教学工作。

(责任编辑 王晔)