

应用附加励磁阻尼控制抑制 HVDC 引起的次同步振荡

张远取, 谢小荣, 姜齐荣

(清华大学电机系, 电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 大型汽轮发电机组经交直流混合送出的系统中, 当高压直流输电 (HVDC) 控制与机组之间相互作用较强时, 可能引发机组轴系的次同步振荡 (SSO) 问题。对此, 研究了附加励磁阻尼控制 (SEDC) 抑制 HVDC-SSO 的有效性。在 PSCAD/EMTDC 仿真平台构建了典型的交直流混合输电系统模型, 研究了 HVDC 引起 SSO 的系统运行条件, 进而设计了多模式 SEDC 控制器, 分别在大/小扰动下分析了 SEDC 改善模式阻尼和暂态响应的效果。结果表明: SEDC 能大幅提高机组轴系多个模式的阻尼, 在大/小扰动下均能有效抑制 SSO, 避免出现 SSO 发散风险, 保障机组和电网的安全稳定运行。SEDC 可望成为解决 HVDC-SSO 问题的有效方法之一。

关键词: 高压直流输电; 次同步振荡; 附加励磁阻尼控制; 模式阻尼

Application of supplementary excitation damping control for suppression of subsynchronous oscillation caused by HVDC

ZHANG Yuan-qu, XIE Xiao-rong, JIANG Qi-rong

(State Key Lab of Power System, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Subsynchronous oscillation (SSO) tends to appear between HVDC control systems and closely coupled turbine-generator shafts in transmission systems involving large turbine-generators and HVDC links. This paper explores the effectiveness of using supplementary excitation damping control, or SEDC, for damping such kind of SSO. A typical AC&DC hybrid transmission system model is firstly modeled in PSCAD/EMTDC. Then various operational conditions are investigated to study the characteristics of HVDC-SSO problem. Further, a multi-modal SEDC is developed and its improvement on modal damping and transient dynamics has been analyzed in both small and large disturbances. The results show that SEDC can greatly enhance the damping of the torsional modes concerned and thus effectively depress SSO under small and large disturbances, insuring safe and stable operation of the generator and the system. Therefore, SEDC promises to be one effective solution for HVDC-SSO problem.

Key words: HVDC transmission system; subsynchronous oscillation; supplementary excitation damping control; modal damping

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)04-0001-05

0 引言

高压直流输电 (High Voltage Direct Current, HVDC) 系统与汽轮发电机组相互作用可能产生次同步振荡 (Subsynchronous Oscillation, SSO)^[1-3], 危及电网和机组的安全稳定运行。世界上第一例由 HVDC 引起的汽轮发电机组 SSO 问题于 1977 年在美国 Square Butte 直流输电工程调试时被发现^[1]。HVDC

引发 SSO 的基本机理是由于 HVDC (通常是整流侧) 控制系统与汽轮发电机组轴系相互作用, 在特定条件下会对机组轴系某些模式的扭振起到加强作用, 即提供负阻尼, 当轴系固有的机械阻尼不足以克服该负阻尼时, 就会在机组轴系导致振幅持续增长的扭振, 影响机组轴系寿命, 严重情况下甚至会损坏机组。随着我国直流输电工程的推广, 并大量应用于大型火电基地的电力外送, HVDC 导致 SSO 的问题日益凸显, 如何有效抑制 SSO 成为一个重要的技术难题。

对于 SSO 的理论研究, 国内外已有较多的成果, 分析方法包括频率扫描法、特征值分析法、复数力

基金项目: 电力系统国家重点实验室项目 (SKLD08M02); 国家重点基础研究发展计划 (973 项目) (2004CB217906); 国家电网公司科技项目资助 (20090857)

矩系数法^[3]等。抑制HVDC引起的SSO的研究主要集中在控制器设计理论上，其中直流附加的次同步阻尼控制（Subsynchronous Damping Control, SSDC）得到广泛的关注，已有一些理论和仿真分析成果，如基于PRONY辨识^[4]、H-∞鲁棒控制理论^[5]和遗传算法^[6]的SSDC控制方法。

然而，将SSDC作为HVDC的附加控制来抑制SSO在实际应用中会碰到一些问题，如：（1）HVDC-SSDC一般采用变流站电压和/或电流作为反馈量，对轴系扭振的可观性不好，扭振信号的信噪比较低，影响控制效果；（2）当HVDC送端存在多台扭振频率不一样的机组或机组多个扭振模式阻尼较低时，SSDC窄带控制不能满足多模式控制需求，宽带控制则受单一参数限制，控制效果难以优化；

（3）在目前厂网分开管理的情况下，HVDC属于电网管理和调度，而次同步扭振直接关系机组安全和寿命，因而HVDC-SSDC在实际的运行管理方面也存在一些问题。基于以上分析，本文探讨通过机组侧附加励磁阻尼控制（Supplementary Excitation Damping Control, SEDC）来提高机组轴系的模式阻尼，实现抑制HVDC-SSO的目标。SEDC的优点是：直接跟机组匹配，针对性强，可观性好，可实现多模式优化控制效果；加上国内在SEDC实践上已经取得一定的突破^[7-8]，可望将其发展为在机组侧解决HVDC-SSO问题的有效方法之一。

1 典型交直流混合输电系统及其模型

研究的交直流混合输电系统如图1所示：一台大型汽轮发电机组通过交直流混合输电通道向主网送电，输电通道包括一回500 kV HVDC线路和两条等效500 kV交流输电线。直流输电模型基于CIGRE直流输电标准测试系统设计^[9]，额定电压为500 kV，额定电流为1 kA，整流侧采用定电流和最小触发角控制，逆变侧采用定电流和定关断角控制。两条等效交流线路中，一回（L1）阻抗较低，代表电厂与主网的强交流联系通道；另一回（L2）阻抗较高，代表电厂与主网的弱交流联系通道。该研究系统虽然简单，但能较好地描述大型火电基地通过远距离交直流输电通道向主网送电时可能引发的HVDC-SSO问题，具有典型性。

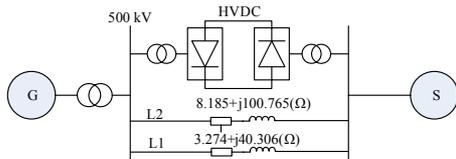


图1 交直流输电系统示意图
Fig.1 The AC/DC transmission system

图1中主网系统采用一个大电源（S）来等效。而汽轮发电机组（G）参考国内典型600 MW机组参数，额定电压为22.0 kV，额定功率为667 MW。机组轴系多质块模型和参数分别如图2和表1所示，3个次同步扭振模式的频率分别约为15.5 Hz（模式1）、26.0 Hz（模式2）和29.9 Hz（模式3），振型如图3所示。

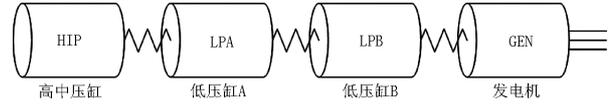


图2 机组轴系模型
Fig.2 Torsional shaft model

表1 轴系模型的参数

Tab.1 Parameters of the turbine-generator shaft

集中质量模块	惯性常数 /kg · m ²	入/出功率/MW	质块	弹性常数 /(kNm · rad ⁻¹)
高压缸	2 851	319.08	1~2	76 882
HIP				
低压缸	15 542	144.82	2~3	133 160
ALP				
低压缸	15 235	144.82	3~4	132 320
BLP				
发电机	9 732	--	--	--
转子				
GEN				

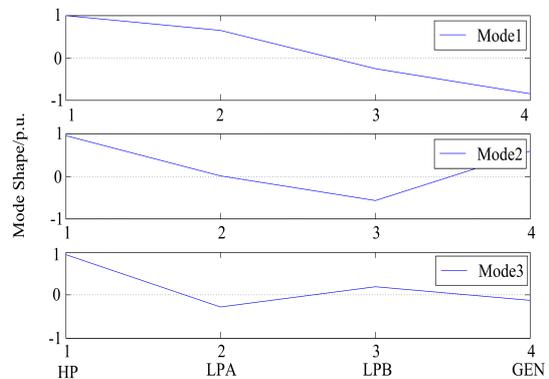


图3 机组轴系的振型
Fig.3 Torsional mode shape

本文研究针对图1系统在PSCAD/EMTDC中建立了对应的电磁暂态模型，其中包括上述交直流输电系统、机组轴系模型，此外还包括机组详细的励磁、调速系统，以及将重点讨论的SEDC控制系统。

2 HVDC 引起的 SSO 现象

已有研究表明^[10]，当HVDC与机组之间相互作用强或者机组作用系数（UIF）大时，HVDC引起

SSO的风险高。针对所研究系统, 主要考察三种代表性的电网方式, 即:

- (1) HVDC独立联网方式: 所有交流通道均断开, 机组仅通过HVDC向主电网送电;
- (2) HVDC+弱交流联网方式: 强交流通道L1断开, 保留HVDC和弱交流通道L2;
- (3) HVDC+强交流联网方式: 保留所有送电通道, 即完整联网方式。

对上述三种联网方式分别进行时域小扰动分析, 得到各扭振模式的衰减率如表2所示。其中机组3个扭振模式的机械阻尼分别设定为0.093(1/s), 0.102 4(1/s), 0.065 0(1/s)。

表2 扭振模式衰减率(无 SEDC)

Tab.2 Modal damping ratios (without SEDC)

运行方式	模式 1	模式 2	模式 3
HVDC+强交流联网方式	-0.107 2	-0.124 8	-0.125 6
HVDC+弱交流联网方式	0.009 469	-0.092 1	-0.013 95
HVDC 独立联网方式	0.039 09	0.083 59	-0.011 86

以下列出两种大扰动情况下的时域仿真结果:

(1) 扰动1(对应图4): 初始正常(即完整联网)方式下, 3.0 s L1发生单相短路接地故障, 3.1 s故障线路切除, 过渡到HVDC+弱交流联网方式。

(2) 扰动2(对应图5): 初始正常(即完整联网)方式下, 3.0 s跳开L1和L2, 过渡到HVDC独立联网方式。

图4和图5中依次列出了机组高压缸转速偏差、模式1转速和低压缸A-B间的扭矩值。

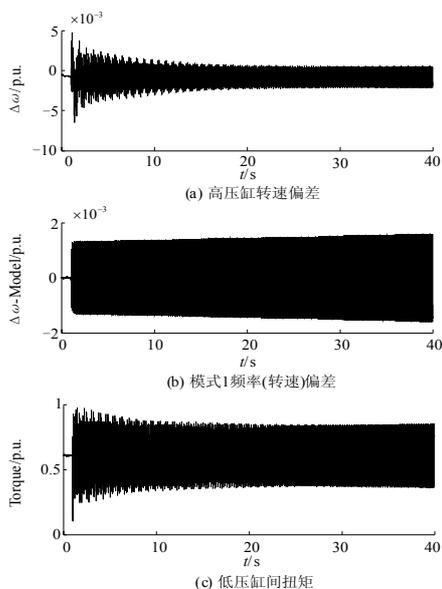


图4 扰动1的扭振动态

Fig.4 Torsional dynamics following the disturbance No.1

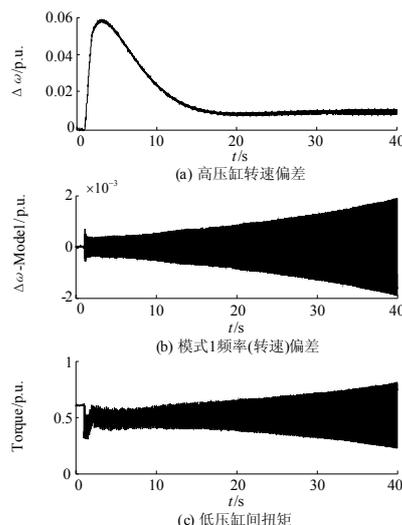


图5 扰动2的扭振动态

Fig.5 Torsional dynamics following the disturbance No.2

以上分析表明, 三种运行方式下SSO风险从大到小依次为: HVDC独立联网方式、HVDC+弱交流联网方式和HVDC+强交流联网方式; 其中前两种方式下, 机组轴系的模式1会出现明显的发散现象, 各缸体之间扭矩随时间逐渐增长, 如不采取抑制或保护措施, 将造成轴系疲劳损伤乃至轴系破坏。

3 SEDC 抑制 SSO 的分析

3.1 SEDC的工作原理和参数设计

SEDC作为一种抑制次同步谐振或振荡(SSR/SSO)的有效手段, 最早于20世纪70年代在美国两个电厂(Navajo和Jim Bridger)得到应用。国内首例SEDC工业装置安装于内蒙古上都电厂, 用以解决固定串补输电带来的SSR问题, 并通过现场试验验证了控制效果^[7-8], 本文进一步将其应用于抑制HVDC引发的SSO问题。

SEDC的功能结构如图6所示^[11]。反馈信号采用了汽轮机高压缸的转速偏差信号, 将其通过带通滤波得到3个扭振模式的振荡分量, 再分别经过比例和移相环节得到各模式对应的控制信号, 相加后进行适当限幅, 形成SEDC总的控制信号去控制励磁调节器, 产生次同步频率励磁电压、电流, 进而形成阻尼扭矩, 实现抑制SSO的目标。

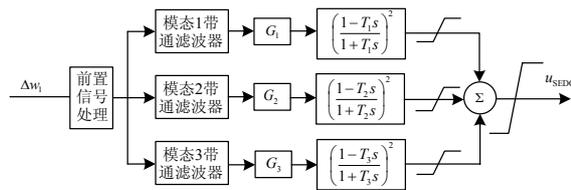


图6 SEDC 示意图

Fig.6 Principle of SEDC

采用如下方法设计SEDC的增益和移相参数：首先在多个典型运行方式下，通过励磁注入-激励法^[7]辨识系统的开环传递函数，然后采用相位补偿法设计适当的时间常数和能稳定系统的初始增益，进而通过时域仿真对增益进行修正，原则是：严重故障情况下SEDC输出饱和的时间限定在一定范围（如6 s）之内，并尽量提高各扭振模式的闭环阻尼。针对所研究系统，SEDC比例-移相参数设置如表3所示。

表 3 SEDC 的比例移相参数

模式	比例系数 G	时间常数 T
1	319	0.001 7
2	323	0.005 3
3	301	0.002 7

3.2 SEDC控制下的小扰动阻尼分析

在SEDC控制情况下对系统进行小扰动分析，得到了闭环模式衰减率如表4所示。

表 4 扭振模式衰减率（增加 SEDC）

运行方式	模式 1	模式 2	模式 3
HVDC+强交流联网方式	-0.567 7	-0.516 8	-0.354 3
HVDC+弱交流联网方式	-0.289 7	-0.318 2	-0.268 6
HVDC 独立联网方式	-0.035 64	-0.133 1	-0.155 7

3.3 SEDC控制下的大扰动时域仿真

投入SEDC控制，在与第2节相同的大扰动情况下进行时域仿真分析，得到的结果如图7和图8所示。

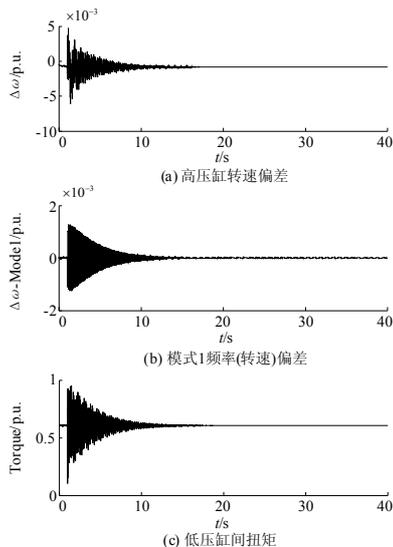


图 7 增加 SEDC 扰动 1 的扭振动态

Fig.7 Torsional dynamics following the disturbance No.1 (with SEDC)

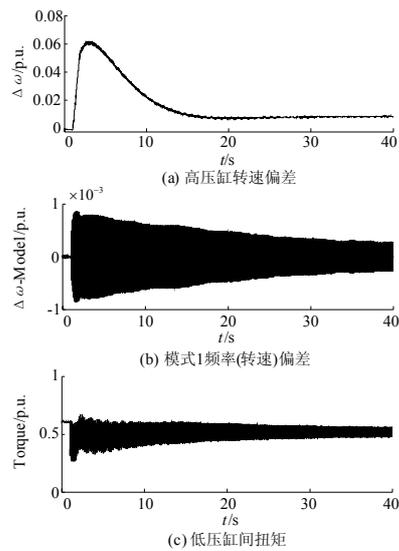


图 8 增加 SEDC 扰动 2 的扭振动态

Fig.8 Torsional dynamics following the disturbance No.2 (with SEDC)

将表4与表3对比，图7、8与图4、5对比，可见：SEDC能大幅提高机组轴系3个扭振模式的阻尼，在大/小扰动下均能有效抑制SSO，特别是对于模式1，避免了HVDC独立联网或通过HVDC削弱交流联网情况下的SSO发散风险，保障了机组的安全和电网的稳定。

4 结论

本文针对典型的汽轮发电机组通过交直流与主网联接的混合输电系统，研究采用附加励磁阻尼控制（SEDC）解决HVDC引发的次同步振荡（SSO）问题，主要结论如下：

(1) 在汽轮发电机组通过HVDC独立联网或通过HVDC削弱交流联网情况下，发生SSO的风险大，且通常是频率较低的模式易于发散。

(2) 采用 SEDC 控制，能大幅提高机组轴系多个模式的阻尼，在大/小扰动下均能有效抑制 SSO，避免在 HVDC 独立联网或通过 HVDC 削弱交流联网情况下的 SSO 发散风险，保障机组和电网的安全稳定运行。

参考文献

[1] Electric Power Research Institute. HVDC System Control for Damping Subsynchronous Oscillations[M]. New York (USA): EPRI, 1982.
 [2] Kundur P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京：中国电力出版社，2002.
 [3] 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. Dynamic Power System Theory and Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [4] 刘红超, 李兴源. 基于 PRONY 辨识的交直流并联输电系统直流阻尼控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 54-57.
- LIU Hong-chao, LI Xing-yuan. Study of DC Damping Control in AC/DC Transmission Systems Based on Prony Method[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 54-57.
- [5] 杨秀, 王西田, 陈陈. 基于 $H-\infty$ 鲁棒控制理论的高压直流输电系统附加次同步振荡阻尼控制设计[J]. 电网技术, 2006, 30(9): 57-61.
- YANG Xiu, WANG Xi-tian, CHEN Chen. Design of Supplemental Sub-Synchronous Oscillation Damping Control Based on $H-\infty$ Robust Control Theory of HVDC System[J]. Power System Technology, 2006, 30(9): 57-61.
- [6] 江全元, 程时杰, 曹一家. 基于遗传算法的 HVDC 附加次同步阻尼控制器的设计[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 87-91.
- JIANG Quan-yuan, CHENG Shi-jie, CAO Yi-jia. Design of HVDC Supplementary Subsynchronous Damping Controller Using Genetic Algorithms[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 87-91.
- [7] 郭锡玖, 谢小荣, 刘世宇, 等. 上都电厂 SEDC 提高次同步扭振阻尼的现场试验[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(10): 97-100.
- GUO Xi-jiu, XIE Xiao-rong, LIU Shi-yu, et al. Field Test of SEDC for Subsynchronous Torsional Damping Enhancement at Shangdu Power Plant[J]. Power System Technology, 2008, 32(10): 97-100.
- [8] 李国宝, 张明, 郭锡玖, 等. 上都电厂串补输电系统次同步谐振解决方案研究[J]. 中国电力, 2008, 41(5): 75-78.
- LI Guo-bao, ZHANG Ming, GUO Xi-jiu, et al. The Solution to SSR Problem in Shangdu Series Compensation Transmission System[J]. Electric Power, 2008, 41(5): 75-78.
- [9] Szechtman M, Wdss T, Thio C V. First Benchmark Model for HVDC Control Studies[J]. Electra, 1991(135): 54-73.
- [10] 徐政, 罗瑞群, 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 Rui-qun, ZHU Rui-jin. Review on Methods of Analysis for Subsynchronous Oscillations of Power System[J]. Power System Technology, 1999, 23(6): 36-39.
- [11] 谢小荣, 刘世宇, 张树卿, 等. 附加励磁阻尼控制抑制多模态 SSR 的机理及其关键技术[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 10-14.
- XIE Xiao-rong, LIU Shi-yu, ZHANG Shu-qing, et al. Basic Principles and Key Issues of Depressing Multimode SSR by Supplementary Excitation Damping Control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 10-14.

收稿日期: 2009-09-25

作者简介:

张远取 (1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制;

谢小荣 (1975-), 男, 副教授, 研究领域为柔性输配电系统、WAMS 和次同步谐振等; E-mail: xiexr@tsinghua.edu.cn

姜齐荣 (1969-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为 FACTS 技术、电力系统分析与控制等。

国网全面部署 2010 年智能电网建设

2010 年, 国家电网公司建设坚强智能电网的总体目标是“一完善、两完成、五突破、五深化”。

“一完善、两完成、五突破、五深化”是指, 完善国家电网公司智能电网工作体系; 完成国家电网智能化规划和支撑智能电网试点工程的关键标准制定; 实现智能电网调度技术支持系统、智能变电站、电动汽车充电设施、用电信息采集系统、“多网融合”等五项试点工程建设的突破; 实现设备研制、专题研究、商业模式、管理创新、宣传交流等五个方面的工作深化。

2009 年, 国家电网建设坚强智能电网取得良好开局, 坚强智能电网工作机制已初步形成, 第一阶段实施方案及时出台, 电网智能化规划编制工作顺利开展, 试点项目建设全面推进, 标准化工作扎实有序进行, 重点研究专题取得阶段性成果。

国家电网一届五次职工代表大会暨 2010 年工作会议明确提出要加强人财物集约化管理, 构建大规划、大建设、大运行、大生产、大营销的发展框架, 是现阶段发展坚强智能电网、实现电网发展方式转变和公司发展方式转变的创新性实践。据了解, 2010 年国家电网建设坚强智能电网的工作思路是, 坚持统一规划、统一标准、统一建设的原则, 以国家电网智能化规划为指导, 加强组织协调, 加大工作力度, 全力推进并基本完成试点工程建设, 不断深化细化工作内容, 为坚强智能电网第二阶段工作奠定基础。

围绕建设坚强智能电网的总体目标, 国家电网 2010 年将着力抓好七项具体工作: 完善工作体系, 有序推动坚强智能电网建设; 完成规划编制, 完善电网智能化规划内容; 加快试点建设, 确保在重点领域取得突破; 明确工作分工, 完善标准化体系; 加强重点专题研究, 提升技术研发和管理创新能力; 深入总结第一阶段工作, 科学谋划下阶段工作思路; 深化沟通与交流, 积极获取外界理解与支持。