

DOI: 10.7667/PSPC201644

# 含常规直流和柔性直流的交直流混合系统次同步 振荡抑制研究

时伯年<sup>1</sup>, 李树鹏<sup>2</sup>, 梅红明<sup>1</sup>, 柳勇军<sup>3</sup>

(1. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085; 2. 国网天津市电力公司, 天津 300010;  
3. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080)

**摘要:** 针对背靠背直流异步联网工程中存在的次同步振荡(SSO)现象, 对基于常规直流(LCC\_HVDC)的次同步阻尼控制器(LCC\_SSDC)和基于柔性直流(VSC\_HVDC)的次同步阻尼控制器(VSC\_SSDC)的协同抑制问题进行了研究。首先针对待研究输电系统, 从电磁转矩矢量合成方面分析了 SSDC 抑制次同步振荡的机理。然后分别设计了 LCC\_SSDC 和 VSC\_SSDC 的结构并整定了其参数。最后在 PSCAD/EMTDC 上搭建电磁暂态仿真模型, 仿真结果验证了结论的正确性和所设计 SSDC 的有效性。

**关键词:** 常规直流输电; 柔性直流输电; 次同步振荡; 次同步阻尼控制器

## Research on the SSO restraining of hybrid system containing LCC\_HVDC and VSC\_HVDC

SHI Bonian<sup>1</sup>, LI Shupeng<sup>2</sup>, MEI Hongming<sup>1</sup>, LIU Yongjun<sup>3</sup>

(1. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China; 2. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China; 3. Southern Power Grid Research Institute, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** Aiming at the sub-synchronous oscillation (SSO) of the back to back DC asynchronous networking project, the coordinated restraint of sub-synchronous oscillation damping controller (SSDC) based on conventional DC and flexible DC is researched. Firstly, the mechanization of SSDC on restraining SSO is analyzed from the point of electromagnetic torque vector synthesis. Then, structures of LCC\_SSDC and VSC\_SSDC are designed and parameters are tuned. Finally, the simulation model is built on PSCAD/EMTDC, and the results verify the correctness of conclusion and the effectiveness of SSDC.

**Key words:** LCC based DC transmission system; VSC based DC transmission system; sub-synchronous oscillation; sub-synchronous oscillation damping controller

## 0 引言

电力系统次同步振荡(sub-synchronous oscillation, SSO)是一种非常严重的电网稳定性问题, 可能会导致发电机大轴的损坏。SSO最初出现在带串补电容的交流输电系统中<sup>[1]</sup>, 随后美国的 SquareButte 发电厂在投入新建成的高压直流输电(High Voltage Direct Current, HVDC)线路时, 发现了由 HVDC 引起的 SSO<sup>[2]</sup>。2015 年底, 我国新疆地区出现了由大规模新能源接入引起的火电机组 SSO 问题, 引起国内外学者的高度重视。

常规 HVDC 输电技术(LCC\_HVDC)与直流换流站电气联系较强的发电机组, 有可能与 HVDC 控

制系统发生扭振相互作用, 引起次同步振荡(sub-synchronous oscillation, SSO)问题。SSO 激发的汽轮发电机组轴系扭振会造成发电机组轴系的疲劳损伤, 严重情况下暂态过程中的强烈扭振甚至可能导致发电机大轴的瞬间断裂。

随着电力电子技术、信息控制技术的进步和发展, 尤其是以绝缘栅双极晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)为代表的全控型可关断器件的快速发展, IGBT 器件的电压和容量等级得到不断提升, 这使得采用 IGBT 构成电压源换流器(Voltage Source Converter, VSC)来进行直流输电(VSC\_HVDC)成为可能。电压源换流器可以等效为幅值和相位都可以控制的可控电压源, 从而实现四

象限运行, 灵活地控制有功功率和无功率<sup>[3]</sup>。目前研究发现, VSC\_HVDC 的输出波形中不含有次同步频率分量, 不会引发 SSO 现象。但在新一代电网架构中, 同时包含 VSC\_HVDC、LCC\_HVDC 和交流串补线路的混合系统仍有发生 SSO 的风险<sup>[4-5]</sup>。

直流附加励磁阻尼控制器(SSDC)是目前用于抑制 SSO 的较为有效的方法。SSDC 属于直流系统的附加设备, 通过引入机组的次同步分量, 经移相放大后将输出叠加到整流侧的定电流控制器中从而达到抑制振荡的效果。基于传统直流的次同步阻尼控制器(LCC\_SSDC)和基于柔性直流的次同步阻尼控制器(VSC\_SSDC)是分别应用于传统直流和柔性直流系统的 SSDC。虽然次同步抑制信号的附加位置不同, 但两者都是通过改变机组轴系的次同步扭矩关系, 提高系统的电气阻尼来抑制交直流系统中的 SSO。

为了有效抑制交直流混合系统的 SSO, 保证电力系统的安全稳定运行, 国内外学者开展了一系列研究。文献[6-7]分析了含直流系统的次同步振荡特性。文献[8]提出了具有工程实用性的用于抑制 SSO 的附加次同步阻尼控制器设计方案, 并研究了 SSDC 的参数整定方法。文献[9]对 SSDC 设计中控制器结构、输入信号的选取、相位补偿和增益调整等方面进行了重点论述。文献[10-11]针对直流系统设计了附加控制器抑制次同步振荡。文献[12]和文献[13]分别对 VSC\_HVDC 单通道和多通道结构的 VSC\_SSDC 进行了研究设计并分析了其抑制效果。目前, 运用传统直流次同步阻尼控制器(LCC\_SSDC)和柔性直流次同步阻尼控制器(VSC\_SSDC)协同抑制

SSO 的研究仍是空白, 需要细致地展开分析研究。

### 1 系统结构及参数介绍

图 1 所示为背靠背直流异步联网工程的地理接线图。在该系统中 DD 电厂和 YW 电厂为待研究的发电厂, 该交流侧的其他部分用等效电源代替。为突出柔性直流、传统直流部分和待研究机组, 系统结构的搭建如图 2 所示。

在该系统中, G1 代表待研究机组, 具体包括 DD 电厂和 YW 电厂中的所有机组; S1 代表其中一侧的交流系统, 将其等效为 QJ 站、GS 站、LP 站和 LX 站四部分; S2 代表另一侧的交流系统。两交流系统通过传统直流和柔性直流输电相连, 采用混合直流输电控制策略<sup>[14-15]</sup>。HP、LPA、LPB、GEN 为汽轮发电机组轴系的四个质量块, 分别代表高压缸、低压缸 A、低压缸 B、发电机。通过频率扫描法<sup>[16]</sup>确定该系统含有的次同步扭振模态共有 3 个, 频率依次为: 13.2 Hz, 24.7 Hz, 29.8 Hz。

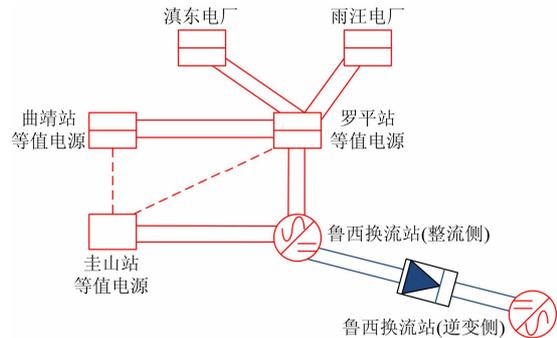


图 1 地理接线图

Fig. 1 Geographic connection of the project

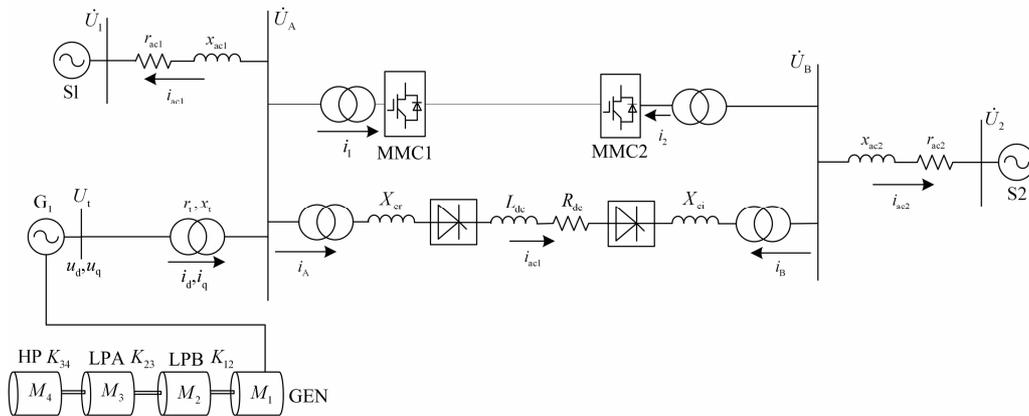


图 2 系统结构图

Fig. 2 Structure of the system

### 2 原理分析

电磁转矩  $T_e$  是次同步扭矩关系中重要的一部

分, 其表达式为

$$T_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d \tag{1}$$

基于机组的 Park 方程模型, 忽略阻尼绕组电流变化等一些次要因素, 电磁转矩可进一步表示为

$$T_e \approx [(X_q - X_d) i_d + X_{ad} i_f] i_q \quad (2)$$

对于汽轮发电机, 有  $X_q \approx X_d$ ,  $(X_q - X_d) \approx X_{ad}$ , 则:

$$T_e \approx X_{ad} i_q i_f + X_{ad} (i_q i_{f-} + i_f i_{q-}) \quad (3)$$

式(3)中:  $i_{q-}$ ,  $i_{q-}$  分别对应定子电流的工频分量和次同步频率分量;  $i_{f-}$ ,  $i_{f-}$  分别对应转子电流的直流分量和次同步频率分量。分析式(3)可知, 电磁转矩  $T_e$  主要包括两部分, 其中  $T_{e1}$  (式(3)前半部分) 对应工频扭矩, 是机组输出正常功率的基础扭矩;  $T_{e,sub}$  (式(3)后半部分) 对应次同步频率扭矩, 是决定轴系次同步振荡的作用力。  $T_{e,sub}$  主要由两部分构成, 前者是转子电流波动量  $i_{f-}$  与定子电流工频分量  $i_q$  相互作用产生的, 后者是由定子电流波动量  $i_{q-}$  与转子直流流量  $i_f$  相互作用产生。抑制次同步振荡的关键是控制  $T_{e,sub}$ , 通过式(3)可知适当调节转子和定子电流的次同步频率分量即可达到这一目标。

LCC\_SSDC 和 VSC\_HVDC 分别通过调节常规直流换流站和柔性直流换流站的输出功率来抑制 SSO, 属于网侧抑制措施。LCC\_SSDC 和 VSC\_HVDC 通过不同附加回路产生的附加电磁转矩分别为  $\Delta T_{LCC\_SSDC}$  和  $\Delta T_{VSC\_SSDC}$ , 与原电磁转矩  $\Delta T_e$  合成可得到系统扰动时施加 LCC\_SSDC 和 VSC\_HVDC 后新的合成电磁转矩  $\Delta T_e'$ , 如图 3 所示。若  $\Delta T_e$  与  $\Delta \omega$  之间的相角差超过  $90^\circ$ , 系统将产生负阻尼, 可能导致系统不稳定。若提供一个位于第一象限的附加电磁转矩  $\Delta T_{SSDC}$ , 使得  $\Delta T_e$  与  $\Delta T_{SSDC}$  的相量和在第一象限, 则系统最终就具有正的阻尼转矩, 起到抑制 SSO 的效果。

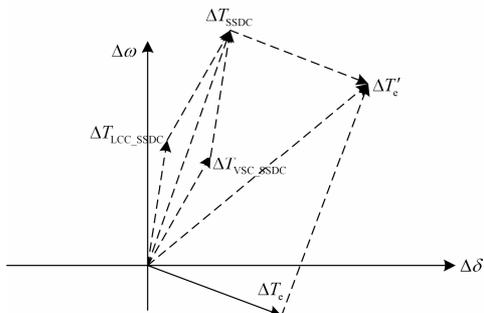


图 3 协同抑制的电磁转矩矢量合成关系图

Fig. 3 Relationship of electromagnetic torque vector synthesis of coordinated restraining

因此, 为保证 LCC\_SSDC 和 VSC\_SSDC 的次同步抑制信号经过直流系统后能提供正的阻尼转矩, 需要整定 SSDC 相位补偿环节的参数, 使得最终合成电磁转矩  $\Delta T_e'$  与  $\Delta \omega$  同相位, 同时尽量保证  $\Delta T_e'$  具有较大的幅值。

### 3 次同步阻尼控制器的设计

#### 3.1 模态频率提取

直流次同步阻尼控制器(SSDC)一般采用整流侧或换流站的交流母线电压作为信号输入, 通过锁相环节后可从中提取出次同步分量。其具体的控制逻辑可用图 4 表示。

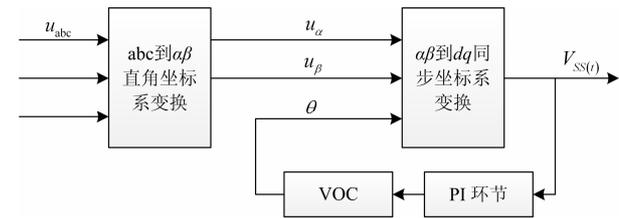


图 4 偏差提取环节的逻辑图

Fig. 4 Diagram of the error extracting

#### 3.2 滤波和相位补偿

SSDC 的实质是向系统提供正的阻尼效应, 其结构一般由滤波环节和相位补偿环节组成, 其结构如图 5 所示。

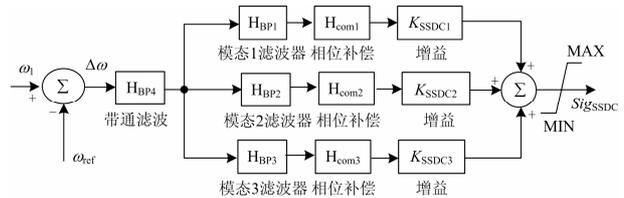


图 5 滤波和补偿环节

Fig. 5 Filter and compensation

SSDC 采取转速偏差信号  $\Delta \omega$  作为其信号输入; 为了防止在补偿环节频率的混叠, 采用窄频带、多通道的滤波及相位补偿, 将多个模态的信号叠加后可得到输出信号。

SSDC 的输入信号是母线电压中提取的偏差信号, 它不仅包含了次同步频率分量信号, 还包含了噪声信号。而 SSDC 控制所需要的仅是次同步频率信号, 应通过低通滤波环节和高通滤波环节进行隔离。通过低通和高通滤波的组合, 相当于构成了一个带宽比较大的“带通滤波器”。

高通滤波器采用二阶 Butterworth 滤波器, 保证所关注的、频率最低的次同步模态信号顺利通过,

只有一个参数,即高通截止频率 $\omega_H$ 需要整定。其传

$$递函数为 H = \frac{0.0002533s^2}{0.0002533s^2 + 0.0095493s + 1}。$$

低通滤波器同样采用二阶 Butterworth 滤波器,保证所关注的、频率最高的次同步模态信号顺利通过,只有一个参数,即低通截止频率 $\omega_L$ 需要整定。

$$其传递函数为 H = \frac{1}{0.00002326s^2 + 0.00144686s + 1}。$$

带通滤波器设计的总体目的是将不同的扭振模态信号进行解耦,以分别对其进行比例移相控制。要求在滤波器中心频率或频率有较小的偏差时,其对应模态信号的幅频特性不受较大影响;而其他频率的信号被大幅衰减。所有带阻、带通都采用 2 阶 Butterworth 滤波器。根据以上所述的设计要求,设计出 SSDC 中带通和带阻滤波器的具体参数如表 1 所示。

表 1 SSDC 带通带阻滤波器的参数

Table 1 Parameters of band-pass and band-reject filter

	模态 1(13.2 Hz)		模态 2(24.7 Hz)		模态 3(29.8 Hz)	
	增益	阻尼比	增益	阻尼比	增益	阻尼比
通道 1	1.0	0.06	1.0	0.046 7	1.0	0.039 9
通道 2	1.0	0.079 2	1.0	0.070 1	1.0	0.039 9
通道 3	1.0	0.079 2	1.0	0.01	1.0	0.011

对于相位补偿环节,可利用形如 $(1+sT_1)/(1+sT_2)$ 的超前滞后环节来补偿附加信号滞后 $\Delta\omega_{mod}$ 的相位,其中 $T_1$ 、 $T_2$ 的确定如式(4)所示。

$$\begin{cases} a = \frac{T_2}{T_1} = \frac{1 - \sin\phi}{1 + \sin\phi} \\ T_1 = (\omega_x \sqrt{a})^{-1} \\ T_2 = aT_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\omega_x$ 为所选择相位补偿的频率; $\phi$ 为 $\omega_x$ 对应的需要补偿的相角。

基于常规直流的次同步阻尼控制器(LCC\_SSDC)和基于柔性直流的次同步阻尼控制器(VSC\_SSDC)在三个模态下,其补偿环节的参数分别如表 2、表 3 所示。

表 2 LCC\_SSDC 补偿环节的参数

Table 2 Compensation parameters of LCC\_SSDC

模态	相位补偿环节(4 个)		
	参数 $T_1$	参数 $T_2$	增益 $K$
模态 1	0.023 161 7	0.006 276 58	0.43
模态 2	0.003 177 59	0.013 066 2	87
模态 3	0.007 627 41	0.003 402 45	0.3

表 3 VSC\_SSDC 补偿环节的参数

Table 3 Compensation parameters of VSC\_SSDC

模态	相位补偿环节(4 个)		
	参数 $T_1$	参数 $T_2$	增益 $K$
模态 1	0.015 023	0.009 676 92	0.55
模态 2	0.011 160 5	0.003 720 17	0.43
模态 3	0.002 930 05	0.009 734 94	1.2

### 3.3 SSDC 输出信号的叠加位置

#### 3.3.1 传统直流系统

对于传统直流输电系统,次同步抑制信号一般以附加有功功率的形式,加入在定电流控制环节,如图 6 所示。

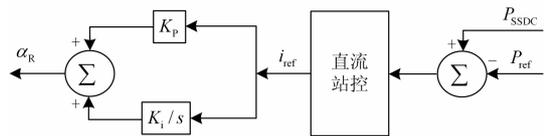


图 6 常规直流部分的附加信号添加位置

Fig. 6 Additional signal of LCC\_HVDC

#### 3.3.2 柔性直流系统

对于柔性直流输电系统,次同步抑制信号的叠加位置可以有多种形式,如叠加到有功外环 $P_{ref}$ 、无功外环 $Q_{ref}$ 以及 $d$ 轴电流内环 $i_{Dref}$ 、 $q$ 轴电流内环 $i_{Qref}$ 上。这 4 种叠加方式所取得的抑制效果是不同的:无功类叠加方式改变的是换流站与交流系统交换的无功功率,因无功功率不宜在线路上传输,一般采用就地补偿的方式,对于距离换流站母线较远的发电机组,无功类叠加方式基本起不到抑制效果;内环叠加方式不受外环控制器控制模式变化的影响,通用性更强。综上分析,对于柔性直流系统,次同步抑制信号的最佳叠加位置是 $d$ 轴电流内环参考值 $i_{dref}$ ,其叠加方式如图 7 所示。

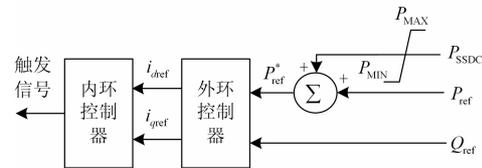


图 7 柔性直流部分的附加信号添加位置

Fig. 7 Additional signal of VSC\_HVDC

## 4 仿真验证

为了验证 LCC\_SSDC 和 VSC\_SSDC 的实际暂态控制效果,在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建如图 1 所示的背靠背直流异步联网工程时域仿真模型<sup>[17]</sup>。模拟交流母线 A 发生三相接地短路故障,其接地电阻为 $6\Omega$ ,故障发生在第 6 s,持续 0.1 s。图

8 为不加、只加 LCC\_SSDC、只加 VSC\_SSDC 和同时加入两者时, 各模态转速的变化情况, 其中横坐标为时间  $t$ , 纵坐标为转速偏差的标么值。

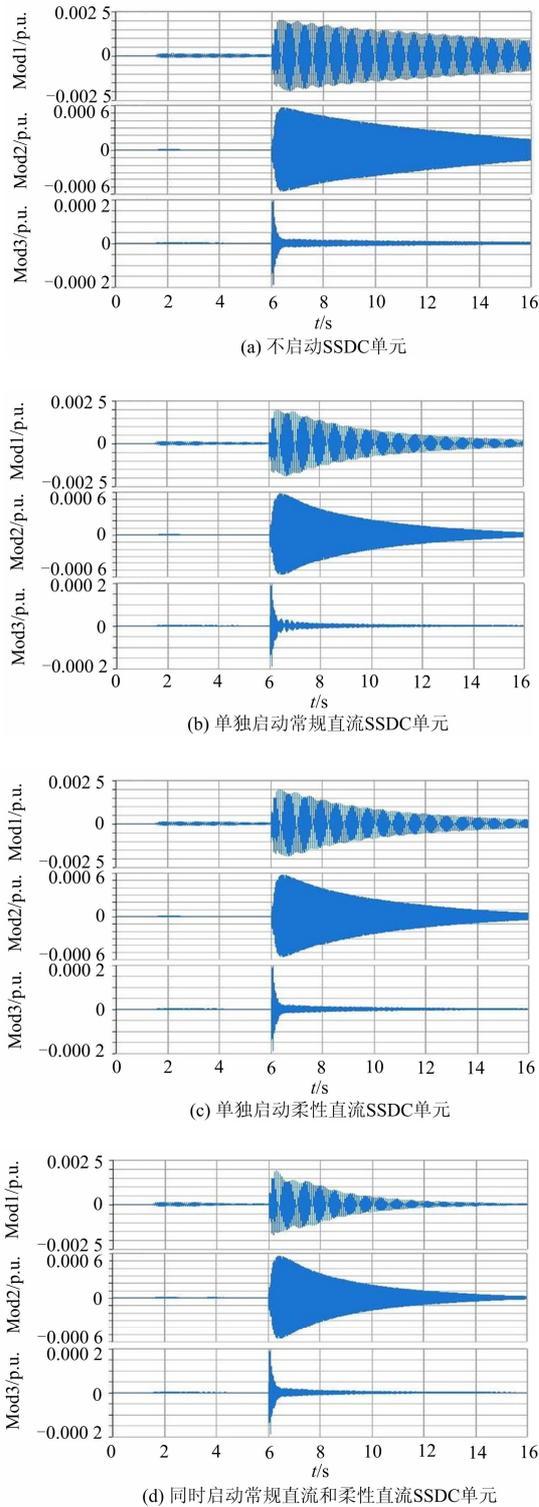


图 8 各种情况下, 模态转速的变化情况

Fig. 8 Change of each modality speed in all cases

分析图 8 可知: 系统中无 SSDC 时, 模态 1、2、3 转速的收敛缓慢, 这种情况可能会引发 SSO, 影响系统的安全稳定运行; 单独应用 LCC\_SSDC 或 VSC\_SSDC 时, 模态 1、2、3 转速的收敛速度有所加快; 同时加入 LCC\_SSDC 和 VSC\_SSDC 时, 模态 1、2、3 转速的收敛速度明显加快, 大大降低了系统发生 SSO 的风险。

## 5 结论

本文针对背靠背直流异步联网工程中存在的次同步振荡(SSO)现象, 对 LCC\_SSDC 和 VSC\_SSDC 的协同抑制问题开展研究, 并进行了仿真验证, 结论如下:

(1) 系统中无 SSDC 时, 模态转速的收敛缓慢, 这种情况可能会引发 SSO, 影响系统的安全稳定运行;

(2) 单独应用 LCC\_SSDC 和 VSC\_SSDC 时, 模态转速的收敛速度有所加快, 降低了系统发生 SSO 的风险;

(3) 同时应用 LCC\_SSDC 和 VSC\_SSDC 时, 系统故障所激发的次同步频率信号可以被迅速抑制, 从而提高了系统的稳定性。

## 参考文献

- [1] Technique for sub-synchronous resonance analysis and an application to the Kaiparowits system[J]. IEEE Power Apparatus and Systems, 1977, 96(4): 1251-1255.
- [2] LI Z, WAN Q L, ZHANG X P. Study on the SSO caused by HVDC link in hybrid AC-DC power system[C] // IET Proceedings on AC and DC Power Transmission, 2010: 1-5.
- [3] 杨煜, 孙大卫, 谢小荣, 等. 模块化多电平换流器型柔性直流系统的等效仿真方法比较[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 43-48.  
YANG Yu, SUN Dawei, XIE Xiaorong, et al. Comparative study on the accelerated models of MMC-based VSC-HVDC systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 43-48.
- [4] 李海峰. 交直流混合系统次同步振荡分析与抑制[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [5] 肖湘宁. 新一代电网中多源多变换复杂交直流系统的基础问题[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 1-14.  
XIAO Xiangning. Basic problems of the new complex AC-DC power grid with multiple energy resources and multiple conversions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 1-14.
- [6] 徐衍会. 基于可观测与可控度的直流输电次同步振荡阻尼控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 21-26.

- XU Yanhui. Research on HVDC subsynchronous damping control based on observability and controllability degree[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 21-26.
- [7] 高本锋, 徐坤, 肖湘宁, 等. VSC\_HVDC 抑制串补引发的次同步振荡研究[J]. 华东电力, 2011, 39(4): 556-560.
- GAO Benfeng, XU Kun, XIAO Xiangning, et al. Subsynchronous oscillation caused by VSC-HVDC for damping fixed series compensation[J]. East China Electric Power, 2011, 39(4): 556-560.
- [8] 高本锋. 电力系统次同步振荡分析方法与抑制技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [9] 高本锋, 赵成勇, 肖湘宁, 等. 高压直流输电系统附加次同步振荡阻尼控制器的设计与实现[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 501-506.
- GAO Benfeng, ZHAO Chengyong, XIAO Xiangning, et al. Design and implementation of SSDC for HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 501-506.
- [10] 顾威, 李兴源, 陈建国, 等. 基于瞬时无功理论的 SVC 抑制次同步振荡的附加控制设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 107-111.
- GU Wei, LI Xingyuan, CHEN Jianguo, et al. Additional control design of SVC for mitigating subsynchronous oscillation based on instantaneous reactive power theory[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 107-111.
- [11] 顾威, 李兴源, 王渝红, 等. 基于改进粒子群算法的次同步阻尼控制器设计[J]. 电网技术, 2010, 34(8): 52-56.
- GU Wei, LI Xingyuan, WANG Yuhong, et al. Design of subsynchronous damping controller based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Technology, 2010, 34(8): 52-56.
- [12] 郑超, 汤涌, 马世英, 等. 基于等效仿真模型的 VSC\_HVDC 次同步振荡阻尼特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(31): 33-39.
- ZHENG Chao, TANG Yong, MA Shiyong, et al. Subsynchronous oscillation damping characteristic analysis for VSC-HVDC based on its equivalent simulation model[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(31): 33-39.
- [13] 蒋平, 胡弢, 吴熙. VSC\_HVDC 多通道附加阻尼控制抑制次同步振荡[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(9): 27-31.
- JIANG Ping, HU Tao, WU Xi. Multi-channel supplementary damping control in VSC-HVDC for SSO suppression[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(9): 27-31.
- [14] 陈博怡, 李兴源, 胡永银, 等. 混合直流输电控制策略研究[J]. 高压电器, 2016, 52(1): 118-123.
- CHEN Boyi, LI Xingyuan, HU Yongyin, et al. Research of control strategies for hybrid HVDC[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1): 118-123.
- [15] 冉晓洪, 苗世洪, 吴英杰, 等. 基于最优功率分配的多端直流网络改进下垂控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(9): 16-24.
- RAN Xiaohong, MIAO Shihong, WU Yingjie, et al. An improved droop control Strategy for multi-terminal DC grids based on optimal active power allocation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(9): 16-24.
- [16] 卓华, 黄立, 侯小平. 一种基于全闭环实时数字物理仿真的次同步振荡阻尼控制[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(2): 71-77.
- ZHUO Hua, HUANG Li, HOU Xiaoping. Reducing subsynchronous oscillation based on RTDS[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(2): 71-77.
- [17] 汪谦, 宋强, 许树楷, 等. 基于 RT-LAB 的 MMC 换流器 HVDC 输电系统实时仿真[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 36-40.
- WANG Qian, SONG Qiang, XU Shukai. Real-time simulation of MMC based HVDC power transmission system using RT-LAB[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 36-40.

收稿日期: 2016-03-31; 修回日期: 2016-06-16

作者简介:

时伯年(1976-), 男, 博士, 研究方向为电力系统稳定及广域保护; E-mail: shibonian@sf-auto.com

李树鹏(1990-), 男, 硕士, 通信作者, 研究方向为电力系统稳定与控制、柔性直流输电; E-mail: lsp9002@163.com

梅红明(1984-), 男, 博士, 研究方向为高压直流输电保护与控制。E-mail: meihongming@sf-auto.com

(编辑 魏小丽)