

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.10.019

基于柔性直流阻尼控制器与附加励磁阻尼控制器协同抑制次同步振荡研究

王中阳, 李润秋, 朱岸明, 罗 迪

(国网陕西省电力公司 经济技术研究院, 陕西 西安 710065)

摘要:针对包含模块化多电平换流器型直流输电(MMC_HVDC)的交直流混合输电系统中出现的次同步振荡(SSO)问题,对基于MMC_HVDC的次同步阻尼控制器(MMC_SSDC)与附加励磁阻尼控制器(SED)的协同抑制问题进行了研究。首先针对待研究的交直流混合输电系统,设计了MMC_SSDC和SED的结构并针对实际算例整定其相位补偿及增益参数;然后分别从理论分析和系统电气阻尼特性的矢量叠加关系方面对MMC_SSDC和SED协同抑制策略的可行性进行了研究;最后在PSCAD/EMTDC上搭建模块化多电平换流器为335电平的交直流混合系统时域仿真模型,仿真结果验证了结论的正确性和协同抑制方案的有效性。研究结果表明:MMC_SSDC和SED在增加系统电气阻尼的效果上不仅不会相互影响且基本满足矢量叠加关系,利用两者协同抑制SSO的方案是可行的。

关键词:模块化多电平换流器型直流输电; 次同步振荡; 直流次同步阻尼控制器; 附加励磁阻尼控制器; 协同抑制

中图分类号:TM933

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)10-1253-05

Coordinated control of SSO via MMC_SSDC and SEDC

WANG Zhong-yang, LI Run-qiu, ZHU An-ming, LUO Di

(State Grid Shanxi Economic Research Institute, xi'an 710065, China)

Abstract: Aiming at the sub-synchronous oscillation (SSO) of hybrid AC-DC transmission system which contained modular multilevel converter based High Voltage Direct Current (MMC_HVDC), the coordinated control of sub-synchronous oscillation damping controller (MMC_SSDC) and supplementary excitation damping controller (SED) was researched. Firstly, aiming at the hybrid system, the structure and parameters of MMC_SSDC and SED were designed. Then, the practicability of the coordinated control of SSO via MMC_SSDC and SED was studied in both theory and electrical damping characteristics. Finally, the simulation model with 335 levels was built on PSCAD/EMTDC, and the results validated the correctness of the conclusion and the efficiency of the coordinated control strategy. The results indicate that MMC_SSDC and SED can superpose each other on increasing the electrical damping characteristic of whole system, and the coordinated control strategy proposed in this paper is practicable.

Key words: modular multilevel converter(MMC) based high voltage direct current (HVDC); sub-synchronous oscillation; sub-synchronous oscillation damping controller; supplementary excitation damping controller; coordinated control strategy

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^[1],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^[2]。模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)是由德国学者R. Marquardt^[3,4]提出的电压源型换流器(voltage source converter, VSC)的一种新的拓扑结构。凭借其良好可扩展性、谐波畸

变率小、开关损耗低的优势,包含 MMC 型直流输电(MMC based HVDC, MMC_HVDC)会迅速发展成为未来直流输电的主流。

虽然 MMC_HVDC 的输出波形中不含有次同步频率分量,不会引发 SSO 现象^[5],但在 MMC_HVDC 与交流串补线路所形成的交直流混合系统中,串补线路的存在使系统仍有发生 SSO 的风险。

目前,次同步阻尼控制器(sub-synchronous oscillation damping controller, SSDC)和附加励磁阻尼控制器(supplementary excitation damping controller, SEDC)是用于抑制 SSO 的两种比较有效的措施。MMC_HVDC 中的 SSDC(MMC_SSDC)以母线电压中的次同步分量作为其采样信号的输入,通过相位补偿和比例放大后,其输出的有功调制信号 P_{SSDC} 或无功调制信号 Q_{SSDC} 叠加到其外环控制器的有功或无功参考值上。SEDC 的信号输入为汽轮机高压缸转速,经移相放大后,其输出的附加励磁信号 U_{fSEDC} 叠加到发电机的励磁电压上。虽然 MMC_SSDC 和 SEDC 安装在输电系统的不同位置,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。

应用 MMC_SSDC 和 SEDC 协调控制 SSO 的策略时,两者之间有一种可以相互配合和补充的关系,它们构成一套基于转子侧和网侧协调控制 SSO 的整体抑制方法。MMC_SSDC 采用换流站交流母线电压作为其频率采样的信号输入,电网中发生的大扰动能够激发很大的次同步分量,此时 MMC_SSDC 能够检测到交流母线电压中的次同步频率信号,可以对次同步振荡起到抑制作用;但当电网中发生小扰动时,激发的次同步模态分量较小,在换流站交流母线上与该模态分量相关的频率分量太小,完全淹没在噪声中,此时 MMC_SSDC 不能检测到次同步频率信号,无法进行有效抑制。而 SEDC 安装在机组侧,且采用发电机转速偏差作为输入信号,较容易检测出系统小扰动激发的次同步分量,故 SEDC 能对系统中发生的小扰动起到较好的抑制作用。然而,受到励磁容量的限制,SEDC 对系统大扰动激发的 SSO 抑制作用有限。MMC_SSDC 和 SEDC 的协同调节可取长补短,共同增强系统电气阻尼,对系统大扰动和小扰动激发的 SSO 均起到较好的抑制作用。

目前国内外学者们针对柔性交直流混合输电系统中 SSO 的问题进行了一系列研究。文献[6-7]对 VSC_HVDC 的次同步振荡阻尼特性进行了分析。文献[8]分析了含 MMC_HVDC 系统的次同步振荡特性。文献[9]分别对 VSC_HVDC 单通道和多通道结构的

次同步阻尼控制器进行了研究设计并分析了其抑制效果。上述研究只对 VSC_HVDC 的次同步阻尼特性以及 MMC_SSDC 对 SSO 的抑制效果进行了研究分析。作为两种比较重要的抑制 SSO 的附加设备,MMC_SSDC 与 SEDC 协同抑制 SSO 的研究目前仍是空白。随着 MMC_HVDC 的发展和 SSO 激发因素的多样化,有必要在相对复杂的交直流混合输电系统上对 MMC_SSDC 和 SEDC 协同抑制 SSO 的问题展开研究。

本研究将对 MMC_SSDC 与 SEDC 协同抑制包含 MMC_HVDC 的交直流混合输电系统 SSO 的问题展开研究,并提出协同抑制方案。

1 待研交直流混合输电系统

首先研究适合于分析 MMC_SSDC 与 SEDC 协同抑制 SSO 的交直流混合输电系统模型。

待研 MMC 交直流混合输电系统的模型如图 1 所示。

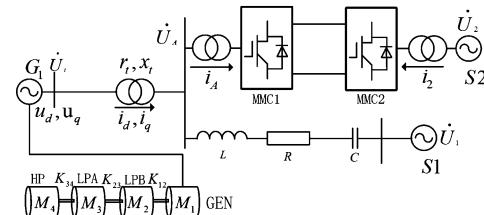


图 1 待研 MMC 交直流混合输电系统接线图

G1—待研机组; S1, S2—等值的交流系统;
HP, LPA, LPB, GEN—汽轮发电机组轴系的 4 个质量块, 分别代表高压缸、低压缸 A、低压缸 B、发电机;
L, R—交流输电线路的等效电感值和电阻值;
C—串联补偿的电容值

在本研究的系统中,其次同步扭振模态共有 3 个,频率依次为:13.602 Hz, 24.907 Hz, 29.517 Hz。

2 阻尼控制器的设计

2.1 MMC_SSDC 的设计

本研究中,MMC_HVDC 采用的是无功型 MMC_SSDC。这种结构的 MMC_SSDC 对无功功率进行调制,可减少由于有功变化对 MMC_HVDC 系统直流电压的影响,有利于直流系统中其它换流器的稳定运行。

MMC_SSDC 采取交流电压作为其信号输入,经过测量环节和 PLL 锁相环节后可得到发电机的转速偏差信号 $\Delta\omega^{[10]}$ 。得到 $\Delta\omega$ 后,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。在本研究中,输出作为无功调制信号 Q_{SSDC} 叠加到其外环控制器的无功参考值上。其结构如图 2 所示。

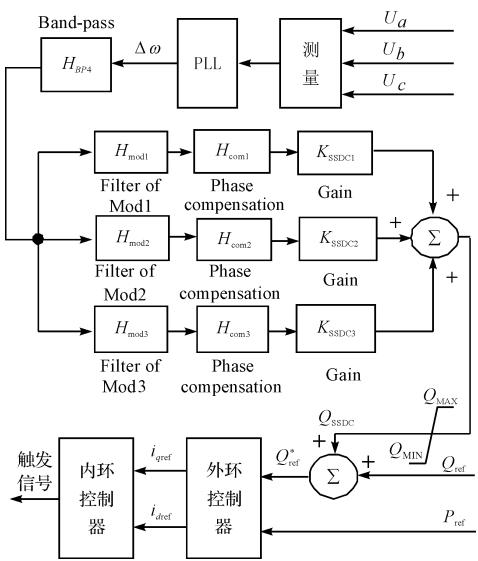


图 2 MMC_SSDC 结构图

在 MMC_SSDC 的结构确定后,需要确定适当的相位补偿参数和比例参数。本研究中,MMC_SSDC 待补偿相位的整定计算采用测试信号法^[11]。利用形如 $(1 + sT_1)/(1 + sT_2)$ 的超前滞后环节来补偿 ΔQ 滞后 $\Delta\omega_{mod}$ 的相位,其中: T_1, T_2 的确定可参照下式:

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

式中: ω_x —所选择相位补偿的频率; φ — ω_x 对应的需要补偿的相角; T_1, T_2 —补偿环节的时间常数。

MMC_SSDC 各模态通道所补偿的角度、时间常数及增益如表 1 所示。

表 1 MMC_SSDC 补偿环节参数及增益

模态频率	补偿角度与时间常数			增益
	补偿角度	T_1	T_2	
模态 1:13.602	57.32	0.0197	0.0069	16.3
模态 2:24.907	127.83	0.0276	0.0015	8.1
模态 3:29.517	134.14	0.0266	0.0011	4.6

2.2 SEDC 的设计

SEDC 的设计也采用窄频带多通道结构^[12],如图 3 所示。

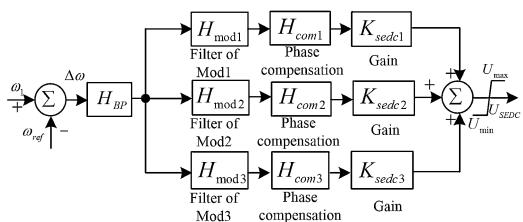


图 3 SEDC 结构图

SEDC 的结构确定后,同样需要确定相位补偿的参数和比例参数,其确定方法与 MMC_SSDC 参数的确

定方法类似,此处不再赘述。

SEDC 各模态通道所补偿的角度、时间常数及增益如表 2 所示。

表 2 SEDC 补偿环节参数及增益

模态频率	补偿角度与时间常数			增益
	补偿角度	T_1	T_2	
模态 1:13.602	42.49	0.0171	0.0080	20.8
模态 2:24.907	82.02	0.0140	0.0029	28
模态 3:29.517	68.85	0.0102	0.0028	37

3 MMC_SSDC 与 SEDC 协同抑制

3.1 机理分析

SEDC 与 MMC_SSDC 是依据不同的机理对 SSO 进行抑制的,它们分别在发电机励磁装置和 MMC 换流器上实施控制。SEDC 调节的是励磁电压信号,属于发电机转子侧的抑制措施;MMC_SSDC 调节的是 MMC 外环定功率控制器的无功参考信号,属于网侧抑制措施。这两方面的措施都是通过改变机组轴系的次同步扭矩关系来调节扭振特性的。

电磁转矩 T_e 作为次同步扭矩关系中重要的一部分,其表达式为:

$$T_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d \quad (2)$$

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:

$$T_e \approx [(X_q - X_d)i_d + X_{ad}i_f]i_q \quad (3)$$

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

$$T_e \approx X_{ad}i_{q-}i_{f-} + X_{ad}(i_{q-}i_{f-} + i_{f-}i_{q-}) \quad (4)$$

式中: i_{q-}, i_{q-} —对应定子电流的工频分量和次同步频率分量; i_{f-}, i_{f-} —对应转子电流的直流分量和次同步频率分量。

分析式(4)可知,电磁转矩 T_e 主要包括两部分,其中工频扭矩 T_{el} (式(4)前半部分)是机组输出正常功率的基础扭矩;次同步频率扭矩 $T_{e,sub}$ (式(4)后半部分)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-} 与转子直流量 i_{f-} 相互作用产生。

抑制次同步振荡的关键是控制好 $T_{e,sub}$,通过式(4)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。SEDC 通过向发电机励磁系统注入与次同步频率电流反向的信号来抑制 SSO,而 MMC_SSDC 在 MMC 外环定无功控制器中加入附加无功参考量并通过线路传递也可改变发电机定子电流的次同步分量。两者通过不同附加回路产生的附加电磁转矩分别为 ΔT_{SEDC} 和 ΔT_{SSDC} ,与原电磁转矩 ΔT_e 合成可得到系统扰动时施加 SEDC 与 MMC_SSDC 后新的

合成电磁转矩 $\Delta T'_e$ 。使合成电磁转矩 $\Delta T'_e$ 与 $\Delta\omega$ 的角度差在 90° 以内, 即可向系统提供一个正的电气阻尼, 达到抑制 SSO 的目的。

电磁转矩矢量合成关系图如图 4 所示。

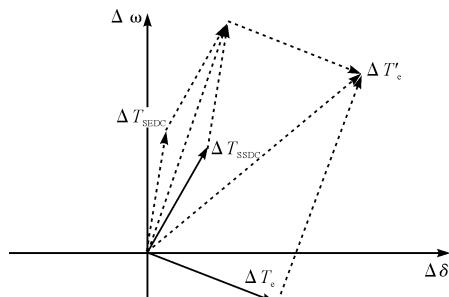


图 4 电磁转矩矢量合成关系图

3.2 电气阻尼特性分析

由图 4 可知, 系统扰动后, 合成电磁转矩 $\Delta T'_e$ 是 ΔT_e 、 ΔT_{SEDC} 和 ΔT_{SSDC} 的矢量和, 因此两者产生的电气阻尼满足矢量叠加关系。若 SEDC 与 MMC_SSDC 都设计合理, 就能够配合抑制交直流混合输电系统中出现的 SSO。不加、只加 MMC_SSDC、只加 SEDC 和同时加入两者时, 系统的电气阻尼特性如图 5 所示。

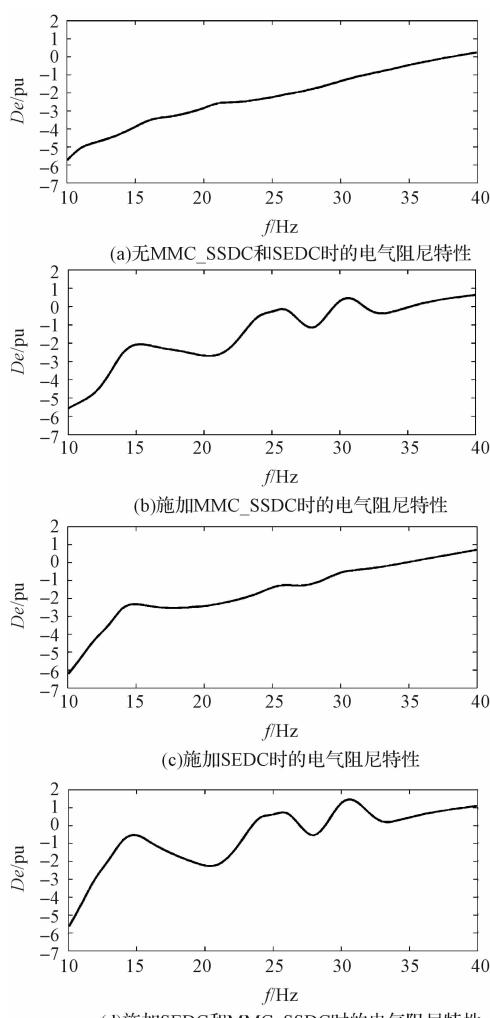


图 5 不同情况下, 系统的电气阻尼特性

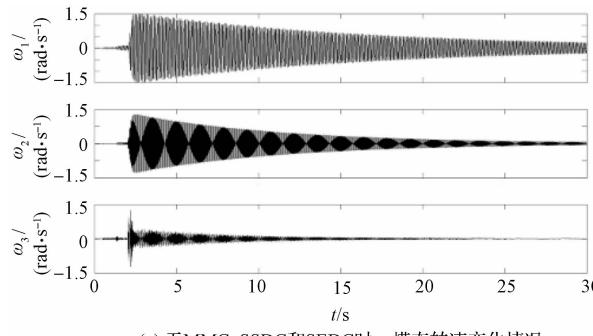
分析图 5 可知, 不施加任何抑制措施时, 系统的电气阻尼较小, 该系统有发生 SSO 的风险; 分别单独施加 MMC_SSDC 和 SEDC 时, 系统各模态频率下的电气阻尼得到相应的增强, 但其改善效果不明显; 同时施加 MMC_SSDC 和 SEDC 后, 系统的电气阻尼得到进一步增强, 显著降低了系统发生 SSO 的风险。进一步分析上图可以发现, MMC_SSDC 和 SEDC 在增加系统电气阻尼的效果上不但不会相互影响, 还基本满足叠加关系, 这与上边理论分析的结果是一致的。

综合上述理论分析和电气阻尼特性分析可知, 虽然 MMC_SSDC 和 SEDC 单独作用时都可以改善系统的电气阻尼, 但在实际应用中两者存在相互补充和配合的关系。当系统中同时使用 MMC_SSDC 和 SEDC 时, 两者的作用不仅不会相互影响, 还基本满足叠加关系。因此, 在 MMC_HVDC 交直流混合输电系统中利用 MMC_SSDC 和 SEDC 协调抑制 SSO 的方案是可行的。

4 仿真验证

为了进一步验证协同抑制方案下, MMC_SSDC 和 SEDC 实际的暂态控制效果, 本研究在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建如图 1 所示的时域仿真模型。在该模型中, 两端交流系统的额定电压值为 500 kV。发电机出口变压器额定电压比为 22 kV/500 kV, 换流变压器额定电压比为 500 kV/330 kV (网侧/阀侧)。MMC_HVDC 容量为 1000 MVA, 直流电压的额定值为 ± 350 kV, 直流电流额定值为 1.43 kA。MMC1 的控制外环采用定直流电压控制和定无功功率控制, MMC2 的控制外环采用定有功功率控制和定无功功率控制; 控制内环均采用 DQ 轴电流解耦控制^[13-14]。

模拟交流母线 A 发生单相接地短路故障, 其接地电阻为 10Ω , 故障发生在第 2 s, 持续 0.1 s。不加、只加 MMC_SSDC、只加 SEDC 和同时加入两者时, 各模态转速的变化情况如图 6 所示。



(a) 无 MMC_SSDC 和 SEDC 时, 模态转速变化情况

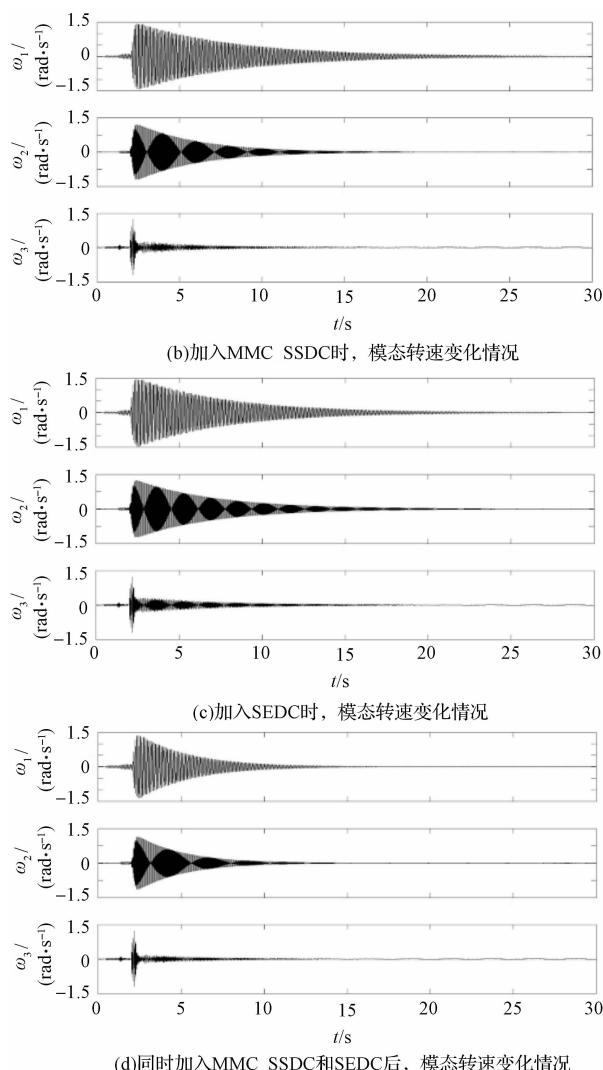


图 6 不同情况下, 模态转速变化情况

分析图 6 可知: 系统中无 MMC_SSDC 和 SEDC 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 MMC_SSDC 或 SEDC 时, 模态 1、2、3 转速的收敛速度有所加快; 同时加入 MMC_SSDC 和 SEDC 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。这与上边系统电气阻尼特性分析得出的结果是一致的。

5 结束语

本研究针对 MMC_HVDC 交直流混合输电系统的 SSO 问题, 提出 MMC_SSDC 和 SEDC 协同抑制策略, 并进行了可行性分析和仿真验证, 结论如下:

(1) 在 MMC_HVDC 交直流混合输电系统中利用 MMC_SSDC 和 SEDC 协同抑制 SSO 的方案是可行的。

(2) MMC_SSDC 和 SEDC 同时作用于系统时, 其对电气阻尼的改善效果不会相互影响, 且基本满足叠加关系。

(3) 利用 MMC_SSDC 和 SEDC 协同抑制策略时, 系统故障所激发的次同步频率信号可以被迅速抑制, 降低了发生 SSO 的风险, 从而提高了系统的稳定性。

参考文献(References):

- [1] HALL M C, DANIELS R L, RAMEY D G. A new 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*, London: IET, 2010: 1-5.
- [3] 徐政, 陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 1-10.
- [4] 韦延方, 卫志农, 孙国强, 等. 一种新型的高压直流输电技术——MMC_HVDC[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 1-9.
- [5] 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.
- [6] 徐坤. VSC_HVDC 对次同步振荡抑制作用分析[D]. 北京: 华北电力大学电气与电子工程学院, 2012.
- [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.
- [8] 李海峰. 交直流混合系统次同步振荡分析与抑制[D]. 北京: 华北电力大学电气与电子工程学院, 2013.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 张帆, 徐政. 附加励磁阻尼控制抑制次同步谐振研究[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(23): 24-29.
- [13] 蔡新红. 模块化多电平换流器型直流输电系统控制保护策略研究[D]. 北京: 华北电力大学电气与电子工程学院, 2014.
- [14] 管敏渊. 基于模块化多电平换流器的直流输电系统控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2013.

[编辑: 周昱晨]

本文引用格式:

王中阳, 李润秋, 朱岸明, 等. 基于柔性直流阻尼控制器与附加励磁阻尼控制器协同抑制次同步振荡研究[J]. 机电工程, 2016, 33(10): 1253-1257.
WANG Zhong-yang, LI Run-qiu, ZHU An-ming, et al. Coordinated control of SSO via MMC_SSDC and SEDC[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(10): 1253-1257.