

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(SEDG)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SEDG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SEDG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。研究表明:MMC_SSDC和SEDG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 SEDG

WANG Zhong-yang, LI Run-qi, 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 (SEDG) was researched. Firstly, aiming at the hybrid system, the structure and parameters of MMC_SSDC and SEDG were designed. Then, the practicability of the coordinated control of SSO via MMC_SSDC and SEDG 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 SEDG 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

收稿日期:2016-05-23

作者简介:王中阳(1974-),男,河南漯河人,硕士,高级工程师,主要从事电网技术管理工作。E-mail:liyunqiu029@163.com

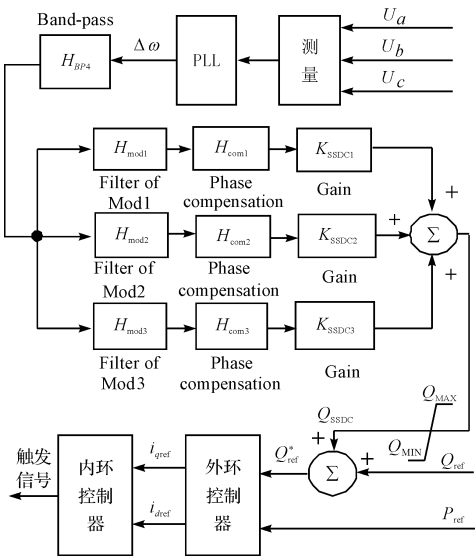


图 2 MMC_SSDC 结构图

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 $\Delta\omega_{\text{mod}}$ 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	0.019 7	0.006 9	16.3
模态 2:24.907	127.83	0.027 6	0.001 5	8.1
模态 3:29.517	134.14	0.026 6	0.001 1	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。

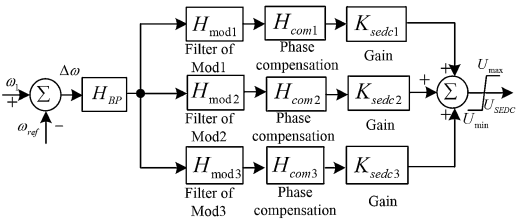


图 3 SEDC 结构图

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	0.017 1	0.008 0	20.8
模态 2:24.907	82.02	0.014 0	0.002 9	28
模态 3:29.517	68.85	0.010 2	0.002 8	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,其中工频转矩 T_{e1} (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。

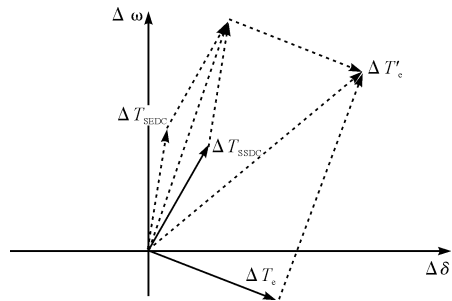


图 4 电磁转矩矢量合成关系图

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。

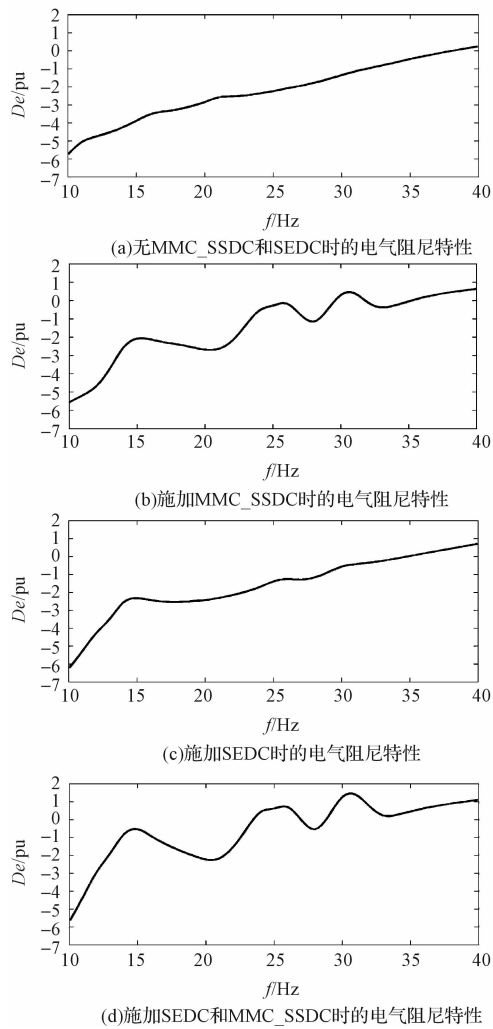


图 5 不同情况下,系统的电气阻尼特性

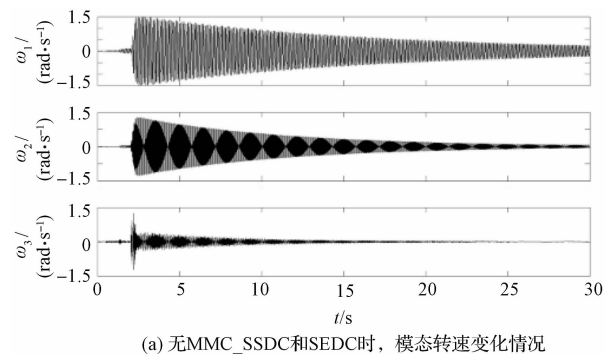
分析图 5 可知,不施加任何抑制措施时,系统的电气阻尼较小,该系统有发生 SSO 的风险;分别单独施加 MMC_SSDC 和 SEDC 时,系统各模态频率下的电气阻尼得到相应的增强,但其改善效果不明显;同时施加 MMC_SSDC 和 SEDC 后,系统的电气阻尼得到进一步增强,显著降低了系统发生 SSO 的风险。进一步分析上图可以发现,MMC_SSDC 和 SEDC 在增加系统电气阻尼的效果上不但不会相互影响,还基本满足叠加关系,这与上边理论分析的结果是一致的。

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。

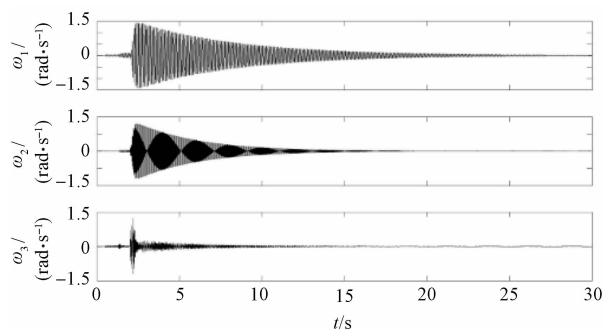
4 仿真验证

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]。

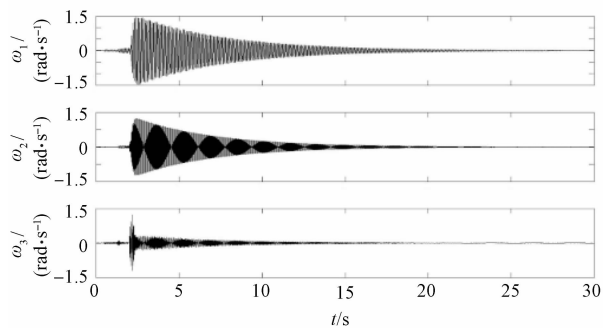
模拟交流母线 A 发生单相接地短路故障,其接地电阻为 10 Ω ,故障发生在第 2 s,持续 0.1 s。不加、只加 MMC_SSDC、只加 SEDC 和同时加入两者时,各模态转速的变化情况如图 6 所示。



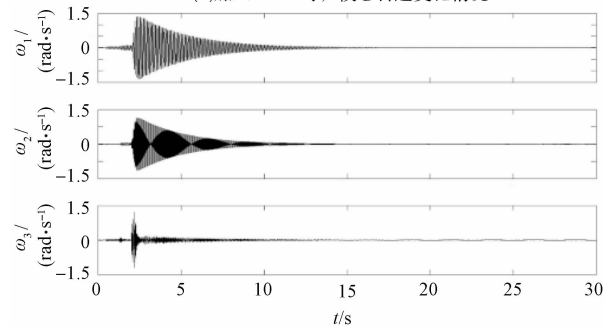
(a) 无 MMC_SSDC 和 SEDC 时, 模态转速变化情况



(b)加入MMC SSDC时, 模式转速变化情况



(c)加入SEDC时, 模式转速变化情况



(d)同时加入MMC_SSDC和SEDC后, 模式转速变化情况

图6 不同情况下, 模式转速变化情况

分析图6可知:系统中无MMC_SSDC和SEDC时, 模式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, 模式1、2、3转速的收敛速度有所加快; 同时加入MMC_SSDC和SEDC时, 模式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.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>