

VDCOL 参数整定的改进对多馈入直流输电系统暂态稳定性的影响研究

杨大春, 刘天琪, 李兴源, 阮仁俊

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要:通过对多馈入直流输电模型的仿真,发现 VDCOL 的参数对多馈入直流输电的暂态稳定性有相当大的影响。通过改变 VDCOL 的参数值,可以使多馈入直流输电系统有不同的暂态特性。通过修正 VDCOL 的参数值,使原本暂态失稳的多馈入直流输电系统快速地恢复到了稳定状态。因此,研究各直流 VDCOL 控制单元的特性对于改进 MDC 的暂态稳定性具有重要意义。

关键词:暂态稳定;多馈入直流输电系统;直流输电系统控制;VDCOL;协调恢复

Abstract: By the multi-infeed HVDC transmission simulation model it is found that the parameters of VDCOL have a significant impact on the transient stability of multi-infeed HVDC transmission. By changing the parameters of VDCOL, multi-infeed HVDC transmission system can have different transient characteristics. By correcting the parameters of VDCOL, the transient instability of the original multi-infeed HVDC transmission system quickly returns to a steady state. Therefore, the study of the characteristics of the control unit (VDCOL) is of great significance to MDC.

Key words: transient stability; multi-infeed HVDC transmission system; control of HVDC transmission system; VDCOL; coordinated recovery

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)02-0024-04

当直流电压或直流换流站附近交流母线电压大幅度降低时,若仍将直流功率(或电流)控制在额定值,则直流系统对其所处交流系统产生的大量无功需求可能会引发交流换相电压持续波动,甚至导致直流系统无法正常工作。为此,需在直流控制系统中引入依赖于电压的电流指令限制单元(VDCOL)^[1],以便对低电压时的直流电流指令加以限制。

在含有多馈入直流输电系统(MDC)^[2]的互联电网中,若各逆变站间的电气距离较近,则交直流系统之间、直流与直流系统之间的相互作用将很强。当某些交流故障发生时,可能会导致多个换流站交流母线电压大幅度降低,严重时有可能导致它们同时发生换相失败,直流功率难以顺利恢复。在这种情形下,VDCOL 控制合理与否将对各直流子系统的恢复乃至整个电网的稳定性产生巨大影响^[2]。另外,与对直流控制系统进行改造相比,对 VDCOL 进行改进通常只需付出很小代价便能对直流系统的恢复性能产生较好的效果。因此,对于 MDC 研究各直流 VDCOL 控制单元的特性具有重要意义。

文献 [3] 针对上述问题,提出了一种适用于多馈入直流输电系统协调恢复的 VDCOL 控制策略,其特

点是在各直流控制系统中综合应用不同类型的 VDCOL 控制,且对 VDCOL 的特性曲线进行了改进。并通过仿真发现,对于多馈入直流输电系统协调恢复的 VDCOL 控制策略,关键在于协调各条直流之间 VDCOL 的参数。

1 VDCOL

VDCOL(依赖于电压的电流指令限制)控制主要有 2 种基本类型,即依赖直流电压的 VDCOL(DC-VDCOL)和依赖交流电压的 VDCOL(AC-VDCOL)。目前,大多数直流工程均采用 DC-VDCOL 控制,该类型 VDCOL 可将直流电压的变化反映于直流电流指令,有效地减少直流故障后可能发生的换相失败。AC-VDCOL 是一种近年来才应用于实际直流工程的以提高交流系统性能的直流系统控制单元,它依赖实际检测到的交流换相电压来限制直流电流指令,能有效改善交流故障发生后换流站附近交流电压和直流功率的恢复。美国太平洋直流联络线便因采用了 AC-VDCOL 而有效地改善了美国西部系统稳定性^[4]。

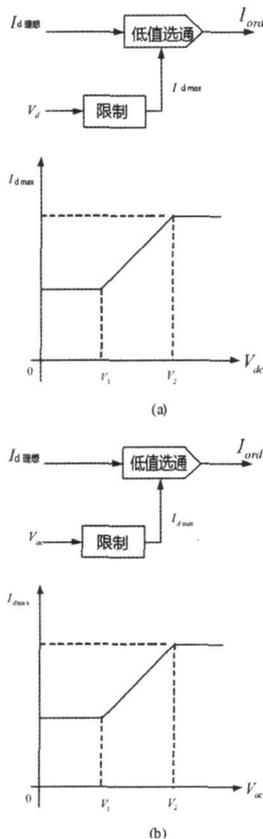
在低电压条件下,要想保持额定直流电流和额定

基金项目: 973 项目(2004CB217909);自然科学基金重大项目(50595412)

功率是不可期望或不可能的,其原因如下^[5]

(1)当一台换流器的电压降超过 30%时,和它相隔很远的换流器的无功需求将增加,这对交流系统可能有不利的影响。远端换流器的 α 或 β 必须更高以控制电流,因而引起无功功率的增加。系统电压水平的降低也会使滤波器和电容器所提供的无功功率明显减少,而通常换流器吸收的无功功率大部分由它们提供。

(2)当电压降低时,也会面临换相失败和电压不稳定的风险。这些和低电压条件下的运行状况有关的问题可通过引入“依赖于电压的电流指令限制”(VDCOL)来防止。当电压降低到预定值以下时,这个限制降低了最大容许直流电流。VDCOL 特性曲线可能是交流换相电压或直流电压的函数。图 1 示出了这两种类型的 VDCOL。



(a) 作为直流电压函数的电流限制;
(b) 作为交流电压函数的电流限制。
图 1 依赖于电压的电流指令限制

2 典型多馈入直流输电系统模型

由于交直流间存在复杂的相互作用,除了考虑交流电压及其相角和直流电流等因数外,还需考虑各直

流系统之间的相互作用对换相失败的影响;除所考虑的逆变侧自身参数影响外,还与其他逆变侧的影响有关。为了体现交直流之间的相互作用和多馈入直流输电的特点,现采用这样一个具有 2 条直流输电线路的交、直流输电系统为例进行研究,如图 2 所示^[6]。

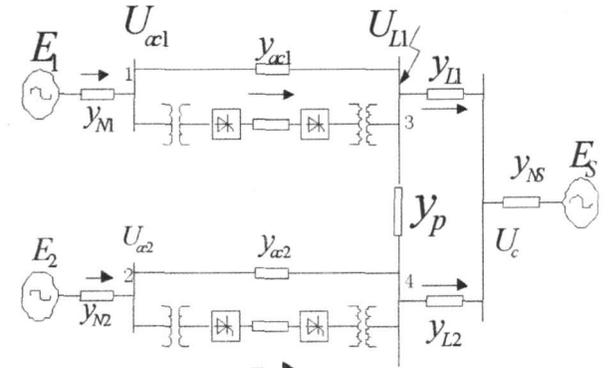


图 2 典型多馈入直流输电系统模型

在图 2 中,系统 E_1 通过一条交流线路和直流线路 1 给右边交流系统输送功率;系统 E_2 通过另一条交流线路和直流线路 2 给右边交流系统输送功率。2 条直流输电线路由 HVDC 标准模型组成^[7],逆变侧接于相邻的同侧,相邻交流换流母线用耦合阻抗连接,直流系统整流侧相互独立。整流侧采用定电流控制,逆变侧采用定熄弧角控制。

3 模型的故障仿真和分析

选择 Matlab/simulink 对图 2 所示模型进行建模和仿真。其中两条直流线路都选用 PSCAD/emtdc 中 CIGRE HVDC 的控制系统^[7]。在 Matlab 中建立的模型如图 3 所示。

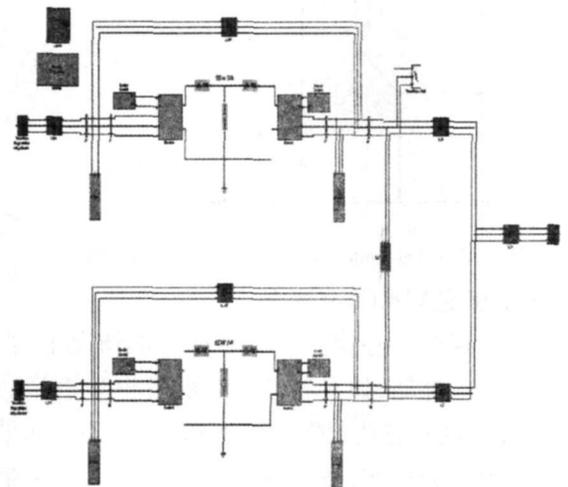


图 3 多馈入直流输电模型

假设直流线路 1 换流站逆变侧 (节点 3 处) 在 1 s 的时候发生 100 ms 三相瞬时短路故障, 以图 2 模型为例, 2 条直流输电系统在初始运行点处的运行参数如下。

该网络自身的导纳参数为: $y_{ac1} = 0.0251 \Omega^{-1}$, $y_{ac2} = 0.01255 \Omega^{-1}$, $y_{L1} = 0.017575 \Omega^{-1}$, $y_{L2} = 0.02636 \Omega^{-1}$, $y_p = 0.0455 \Omega^{-1}$ 。

2 条直流输电系统整流侧交流系统的等值导纳参数为: $y_{N1} = 3.1152 \Omega^{-1}$, $y_{N2} = 3.1152 \Omega^{-1}$ 。

2 条直流输电系统逆变侧交流系统的等值导纳参数为: $y_{NS} = 2.9418 \Omega^{-1}$ 。

2 条直流输电系统整流侧对应的交流系统的暂态等值电势参数为: $E_1 = E_2 = 345 \text{ kV}$ 。

2 条直流输电系统逆变侧对应的交流系统的暂态等值电势参数为: $E_s = 340 \text{ kV}$ 。

3.1 VDCOL 采用 PSCAD /emtdc 中 cigreHVDC 参数

PSCAD /emtdc 中 cigreHVDC 的 VDCOL 参数由图 4 可知。当直流电压下降到 0.9 pu 时, VDCOL 开始启动。随着直流电压 V_{dc} 的逐渐降低, VDCOL 控制的直流电流指令也逐渐降低。当 V_{dc} 降低到 0.4 pu 时, VDCOL 控制的直流电流指令输出最低值 $I_{dmax} = 0.55 \text{ pu}$ 。

图 5、图 6 为基于图 4 所示的 VDCOL 的多馈入直流输电系统仿真结果。由图 5 和图 6 可知, 当系统在 1 s 的时候发生 100 ms 三相瞬时短路故障后, 系统线路 1、2 都无法恢复正常功率输出。

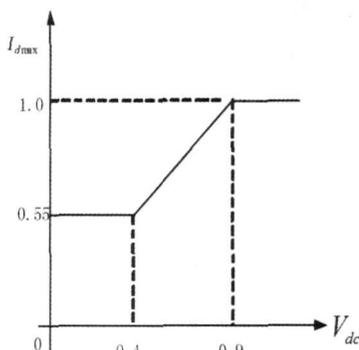
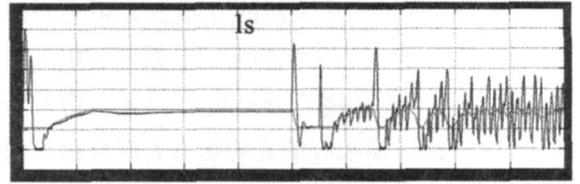


图 4 PSCAD/emtdc 中 cigreHVDC 的 VDCOL

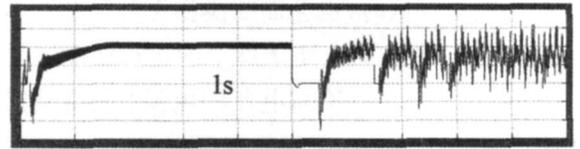
3.2 重新整定 VDCOL 的参数

文献 [8] 指出: 在交直流并联运行的情况下, 当交流系统发生扰动, 如果直流系统保持恒定直流功率, 将可能导致暂态功角失稳和暂态电压失稳。如果交直流传输能量相当, 则情况更为严重。通过文献 [7] 给出的结论, 可以认为上述仿真算例中出现的结果 (图 5、图 6) 是由于三相瞬时短路故障发生后, VD-

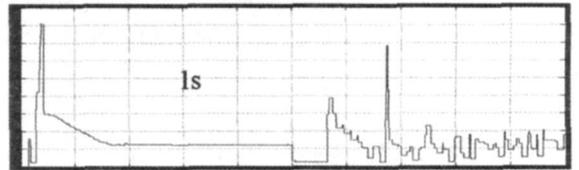
COL 控制直流电流的指令下降不及时导致的。所以通过重新整定 VDCOL 的参数, 再对上述多馈入直流输电系统进行仿真分析。



(a) 直流线路 1 逆变侧直流电流的仿真波形

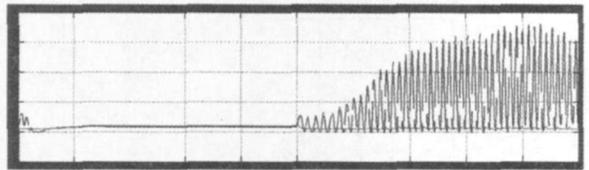


(b) 直流线路 1 逆变侧直流电压的仿真波形

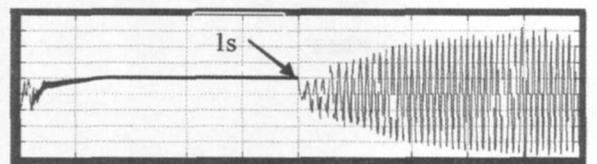


(c) 直流线路 1 逆变侧关断角 (Gamma) 的仿真波形

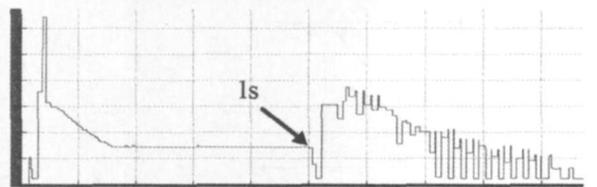
图 5 直流线路 1 的仿真波形



(a) 直流线路 2 逆变侧直流电流的仿真波形



(b) 直流线路 2 逆变侧直流电压的仿真波形



(c) 直流线路 2 逆变侧关断角 (Gamma) 的仿真波形

图 6 直流线路 2 的仿真波形

重新整定后的 VDCOL 如图 7 所示。为了使直流电流指令下降更为及时, 令降低到 0.6 pu 时, VDCOL 控制的直流电流指令输出最低值 $I_{dmax} = 0.55 \text{ pu}$ 。

图 8、图 9 为重新整定 VDCOL 后的系统仿真波形图。由图可知, 当系统在 1 s 的时候发生 100 ms 三相瞬时短路故障后 (即系统 1.1 s 时切除故障), 系统

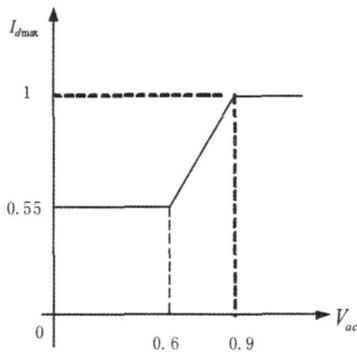
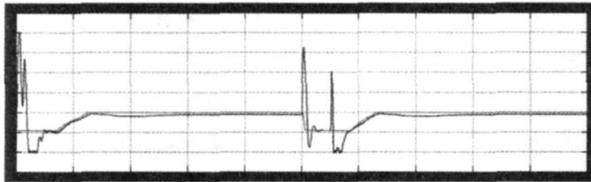
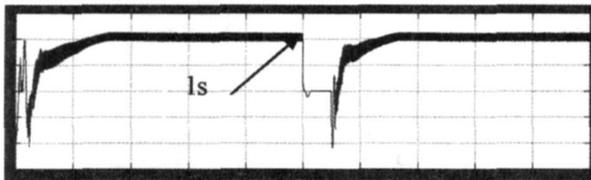


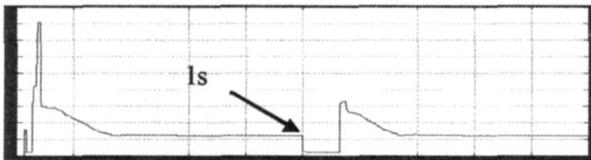
图 7 重新整定的 VDCOL



(a) 直流线路 1 逆变侧直流电流的仿真波形

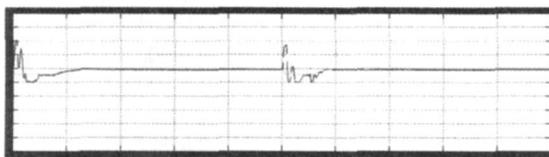


(b) 直流线路 1 逆变侧直流电压的仿真波形

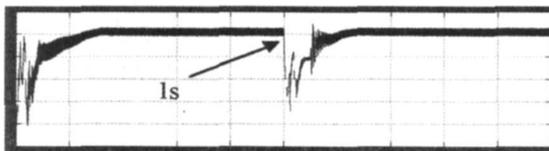


(c) 直流线路 1 逆变侧关断角 (Gamma) 的仿真波形

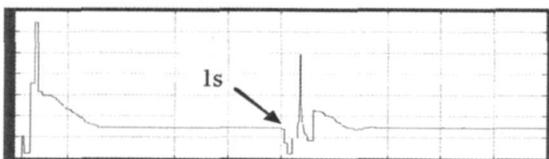
图 8 直流线路 1 的仿真波形



(a) 直流线路 2 逆变侧直流电流的仿真波形



(b) 直流线路 2 逆变侧直流电压的仿真波形



(c) 直流线路 2 逆变侧关断角 (Gamma) 的仿真波形

图 9 直流线路 2 的仿真波形

直流线路 1、2 在 1.2 s 时 (100 ms 的时间内) 基本恢复正常功率输出。

4 总 结

通过对上述多馈入直流输电模型的仿真,发现 VDCOL 的参数对多馈入直流输电的暂态稳定性有相当大的影响。通过改变 VDCOL 的参数值,可以使多馈入直流输电系统有不同的暂态特性。

文中所做的工作是通过手动调节 VDCOL 仿真分析其对多馈入直流输电系统的影响,没有涉及到 VDCOL 的在线调节控制。对于 VDCOL 的在线调节应该是以后研究的重点。

参考文献

- [1] KUNDUR P K. Power System Stability and Control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [2] SZECHTMAN M, PILOTTO LA S, PING WW, et al. The Behavior of Several HVDC Links Terminating in the Same Load Area[C]. CIGRE, Paris, 1992.
- [3] 王珂, 杨卫东, 方勇杰. 有利于多馈入直流输电系统协调恢复的 VDCOL 控制策略研究 [J]. 江苏电机工程 [J]. 2007, 26(1): 1-4.
- [4] BUNCH R, KOSTEREV D. Design and Implementation of AC Voltage Dependent Current Order Limiter at Pacific HVDC Intertie [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2000, 15(1): 697-703.
- [5] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制 [M]. 北京出版社, 1998.
- [6] 何朝荣, 李兴源. 影响多馈入高压直流换相失败的耦合导纳研究 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 51-57.
- [7] 杨汾艳, 徐政. 直流输电系统典型暂态相应特性分析 [J]. 电工技术学报, 2005, 20(3): 45-52.
- [8] A. Hammad. "Stability and control of HVDC and AC transmissions in parallel" presented at the 1998 Winter IEEE PES Meeting Tampa FL, paper PE-517-PWRD-0-1-1998.

作者简介:

杨大春 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高压直流输电的建模和仿真, 电力系统稳定与控制。

刘天琪 (1962-), 女, 通信作者, 教授, 博士生导师, IEEE 会员, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电、调度自动化。

李兴源 (1945-), 男, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定与控制、高压直流输电、分布式发电等研究。

阮仁俊 (1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 电力系统稳定与控制, 调度自动化。

(收稿日期: 2008-12-25)