

伪双极 LCC-VSC 型混合高压直流输电系统 向无源网络供电的研究

王磊, 李兴源, 李宽, 胡永银, 黄睿

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 电网换相换流器高压直流输电系统(Line Commutated Converter based High Voltage Direct Current, LCC-HVDC)在功率传输特性、线路故障时的自防护能力、过负荷能力等方面均优于交流输电,但却无法向弱交流系统和无源网络供电。电压源换流器高压直流输电系统(Voltage Source Converter based HVDC, VSC-HVDC)可实现向无源网络供电的目的,但由于电力电子技术的局限性, VSC-HVDC 系统投资成本过高。结合两者的优势,提出了一种新型混合高压直流输电系统(Hybrid High Voltage Direct Current, H-HVDC)。该系统的整流侧为两个 6 脉动 LCC 接一交流网络,逆变侧为三相二电平 VSC 接无源网络。在此基础上,对该 H-HVDC 的稳态数学模型、启动特性、稳态特性与暂态特性、单极闭锁进行了研究。仿真结果表明,该 H-HVDC 系统能实现向无源网络供电,且具有较高的稳定性,为混合直流的进一步发展提供了理论基础。

关键词: 混合高压直流输电系统; 电网换相换流器高压直流输电系统; 电压源换流器高压直流输电系统; 无源网络; 暂态特性

Research of pseudo bipolar LCC-VSC hybrid HVDC system supplying passive network

WANG Lei, LI Xingyuan, LI Kuan, HU Yongyin, HUANG Rui

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Line commutated converter based HVDC (LCC-HVDC) is better than AC transmission in power transmission characteristic, self-defense capability in line fault, overloading capability, but it can't supply the weak AC system and passive network. Voltage source converter based HVDC (VSC-HVDC) can supply the passive network, but the cost of its investment is high because of the limitation of power electronics technology. This paper proposes a new novel hybrid HVDC (H-HVDC) transmission system combining the advantages of both sides. The rectifier side of the H-HVDC is that two 6-pulse LCC connect a AC network, and the inverter is that three-phase two level VSC connect a passive network. On this basis, its steady-state mathematical model, start-up characteristic, steady-state and transient characteristics, monopole block are deduced. Simulation results show that this H-HVDC system can supply the passive network with high stability, which provides a theoretical foundation for further development of the future in hybrid HVDC.

This work is supported by National Key Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2013CB2280204).

Key words: hybrid high voltage direct current (H-HVDC); line commutated converter based HVDC (LCC-HVDC); voltage source converter based HVDC (VSC-HVDC); passive network; transient characteristics

中图分类号: TM721.1

文章编号: 1674-3415(2015)21-0027-07

0 引言

随着高压直流(HVDC)输电技术越来越成熟,越来越多的远距离大功率输电、海底电缆送电、两个

交流系统之间的非同步联网等方面开始采用 HVDC 输电技术^[1]。然而传统电网换相高压直流输电(Line-Commutated-Converter High Voltage Direct Current, LCC-HVDC)由于晶闸管换流过程的本质又有其固有的缺陷,比如换流时需要消耗大量无功功率,换流器会产生大量谐波,向弱交流系统供电时可能发生换相失败^[2-3],无法向弱交流系统或无源网

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2013CB2280204)

络供电等。

随着电力电子器件和控制技术的发展,出现了新型的全控型半导体器件-绝缘栅双极晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)。20世纪90年代以后,以全控型器件为基础的电压源换流器高压直流输电(Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current, VSC-HVDC)得到了快速发展。VSC-HVDC 突出了全控型电力电子器件、电压源换流器和脉冲调制三大技术特点,解决了传统 LCC-VSC 的诸多固有瓶颈,比如 VSC-HVDC 可以实现有功功率和无功功率的独立控制,而无需无功补偿;可以无需电网短路电流的支撑换相,从而用于对无源交流系统供电;可以两站独立控制和运行,无需站间通信^[4]。然而与传统 LCC-VSC 相比, VSC-HVDC 的系统开关损耗较大、工程造价高。

混合型高压直流输电(hybrid-HVDC)即一端采用 LCC, 另一端采用 VSC 的输电结构,可以合理结合 LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 的优点。传统的 LCC-HVDC 输送容量大、电压等级高,而目前在建 VSC-HVDC 工程的最高输送容量和最高电压等级也分别达到了 2×1000 MW 和 ± 345 kV,虽然二者的容量和电压等级还有一定差距,但是考虑到 VSC-HVDC 的发展现状和前景,结合 LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 的混合直流输电将具有工程应用前景,因此该课题将具有重要的研究价值^[5]。

文献[5]研究了整流侧两组两电平 VSC 串联、逆变侧双 12 脉动的 LCC 的模型,并且提出了抑制逆变侧换相失败的控制策略,但是逆变侧还是有发生换相失败的可能性。文献[6-11]研究了整流侧 LCC、逆变侧 VSC 的特性,但是容量太小,且无法对无源网络供电。文献[12]则采用整流侧两个 6 脉动 LCC 串联,逆变侧是一组三相二电平的 VSC 模型,研究了它的控制策略,并且与相同传输容量的两端 VSC 进行了对比,但是仍然没有研究对无源网络供电的情况。文献[13]在文献[5]的基础上讨论了整流侧 LCC、逆变侧 VSC 的控制策略,但是没有讨论对无源网络供电的情形。文献[14-17]研究了 VSC 向无源网络供电的控制策略,但是两端采用 VSC 成本又太高。文献[18]研究了伪双极 VSC-LCC 型混合直流输电系统启动方法。文献[19]研究了模块化多电平柔性直流输电系统直流侧的启动方法。文献[20]则在伪双极 LCC-VSC 模型下,通过采用整流侧定直流电流,逆变侧定交流电压-直流电压控制方式下实现了对无源网络供电。

本文采用整流侧两个 6 脉动 LCC 串联、逆变侧是三相二电平的 VSC 的混合高压直流输电(Hybrid High Voltage Direct Current, H-HVDC)系统。这样就能实现向无源交流网络供电这一目的,解决了传统的 LCC 的缺陷,同时降低全部采用 VSC 的成本。在 PSCAD/EMTDC 上构建了仿真模型,控制方式采用整流侧定直流电压控制,逆变侧定交流电压-直流电流。对该模型的启动特性、稳态特性与暂态特性、单极闭锁进行了研究。仿真结果表明,该 H-HVDC 系统能够实现向无源网络供电,且具有较高的稳定性,为混合直流的进一步发展提供了理论基础。

1 伪双极 LCC-VSC 混合高压直流输电系统

1.1 基本结构

伪双极由一个 VSC 换流器构成了双极,不是传统直流输电意义上的双极系统,这种结构称为伪双极结构^[21]。

本文搭建的模型的送端采用 LCC,由换流变压器、滤波器、两个 6 脉动换流桥、平波电抗器等组成,其中 S_1 和 Z_1 为等值送端交流系统的电源和等值系统的阻抗。而受端换流器则采用 VSC,由换流桥、换流电抗器、直流电容器和交流滤波器组成。 R_d 、 L_d 分别为直流线路等效电阻、电感。 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 是与直流电容并联的旁路开关, R_1 、 R_2 、 L_1 、 L_2 是抑制过电流的器件。当直流输电线路发生故障或某一 6 脉动 LCC 发生闭锁时,闭合相关的旁路开关,此系统可转换为单极直流输电系统。

该 H-HVDC 的拓扑结构图如图 1 所示。

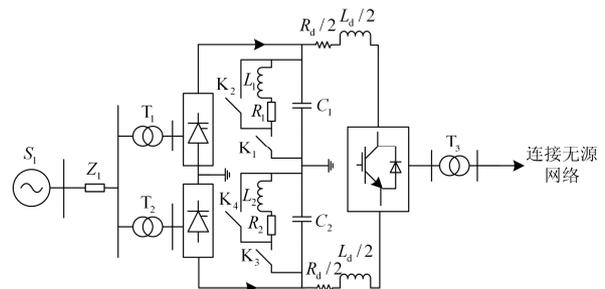


图 1 LCC-VSC 拓扑结构图

Fig. 1 Topology diagram of LCC-VSC

虽然目前 LCC-HVDC 应用较为广泛的是双极 12 脉动直流输电系统,但增加两个 6 脉动换流桥,投资成本增加更多。综合考虑,该 H-HVDC 的整流侧采用双极 6 脉动形式。这种拓扑结构可在保证传输容量尽可能大、输电可靠性高的同时,尽可能减少工程建设投资。

其中逆变侧的拓扑结构如图 2 所示。

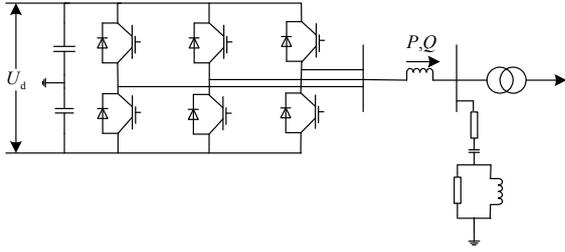


图 2 三相两电平 VSC 拓扑结构

Fig. 2 Topology diagram of two-level VSC

1.2 工作原理

在整流侧，设触发滞后角为 α ，换相角为 γ ，则送端的准稳态数学模型如下所示^[22]。

$$I_{d1} = \frac{\sqrt{2}U_{s1}}{2X_1} [\cos \alpha - \cos(\alpha + r)] \quad (1)$$

$$U_{d1} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{s1} \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X_1 I_{d1} \quad (2)$$

$$I = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_{d1} \quad (3)$$

$$\cos \varphi = \frac{U_{d1}}{U_{d0}} \quad (4)$$

$$P_{d1} = U_{d1} I_{d1} \quad (5)$$

$$Q_{d1} = P_{d1} \tan \varphi \quad (6)$$

式中： $U_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{s1}$ ； I_{d1} 为送端直流电流； U_{d1} 为送端直流电压； X_1 为送端系统单相电抗。将式(1)代入式(2)中得整流侧直流电压为

$$U_{d1} = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U_{s1} [\cos \alpha + \cos(\alpha + r)] \quad (7)$$

逆变侧 VSC 换流器采用脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)技术，数学模型为

$$U_{c2} = \frac{\mu m}{\sqrt{2}} U_{d2} \angle \delta \quad (8)$$

$$P = \frac{U_{s2} U_{c2}}{X_2} \sin \delta \quad (9)$$

$$Q = \frac{U_{s2}(U_{c2} \cos \delta - U_{s2})}{X_2} \quad (10)$$

式中： μ 为直流电压利用率； m 为调制度； δ 为 U_{c2} 和 U_{s2} 之间的相角差； U_{d2} 为逆变侧直流电压； X_2 为换流电抗器的电抗。

由式(1)~式(7)可以看出，整流侧通过控制触发延迟角 α 控制直流电压和有功功率。而由式(9)~式(10)可以看出，有功功率主要取决于 δ 角，无功功率主要取决于 U_{c2} ，而 U_{s2} 是由 VSC 输出的 PWM 电

压脉冲宽度控制的。因此，通过对 δ 角的控制就可以控制系统输送有功功率的大小，通过控制 U_{c2} 就可以控制 VSC 发出或吸收的无功功率及其大小。

1.3 LCC-VSC 控制器原理

1.3.1 整流侧 LCC 控制策略

整流侧 LCC 控制策略，采用定直流电压控制方式，实现对 α 角的控制，整流侧的逻辑图如图 3 所示。

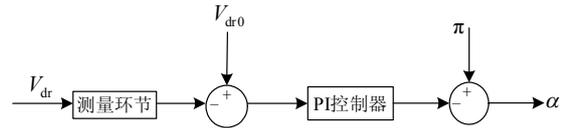


图 3 整流侧的控制器

Fig. 3 Controller of rectifier side

1.3.2 逆变侧 VSC 控制策略

逆变侧为电压源换流器，采用目前应用比较广泛的直流电流双闭环解耦控制，即 D-Q 解耦控制方式。

根据 VSC-HVDC 系统的一般控制规律，与无源交流网络联接的换流器应向无源网络供给稳定的交流电压，因此需要对无源侧的交流电压进行控制，即无功控制类应采用定交流电压控制。为了实现混合直流输电传输功率水平的恒定，逆变侧的有功控制类采用定直流电流控制方式。

由 Park 变换得到 d - q 坐标系下交流侧三相动态微分方程为

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{u_{sd} - u_{cd}}{L} - \frac{R}{L} i_d + \omega i_q \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{u_{sq} - u_{cq}}{L} - \frac{R}{L} i_q - \omega i_d \end{cases} \quad (11)$$

式中： u_{sd} 、 u_{sq} 分别为电网电压的 d 、 q 轴分量； u_{cd} 、 u_{cq} 分别为 VSC 交流侧电压基波的 d 、 q 轴分量； i_d 、 i_q 分别为电网电流的 d 、 q 轴分量； R 、 L 是联结变压器加相电抗器的等效电阻及等效电感。

由式(11)可得

$$\begin{cases} u_{cd} = u_{sd} + \omega L i_q - (R i_d + L \frac{di_d}{dt}) \\ u_{cq} = u_{sq} - \omega L i_d - (R i_q + L \frac{di_q}{dt}) \end{cases} \quad (12)$$

由于

$$\begin{pmatrix} u_{cd} \\ u_{cq} \end{pmatrix} = \frac{m U_{dc}}{2} \begin{pmatrix} \sin \delta \\ \cos \delta \end{pmatrix} \quad (13)$$

进而可得 VSC 的控制量 m 和 δ 分别为

$$m = \frac{2\sqrt{u_{cd}^2 + u_{cq}^2}}{U_{dc}} \quad (14)$$

$$\delta = \arctan \frac{u_{cd}}{u_{cq}} \quad (15)$$

逆变侧的控制系统结构图，如图 4 所示。

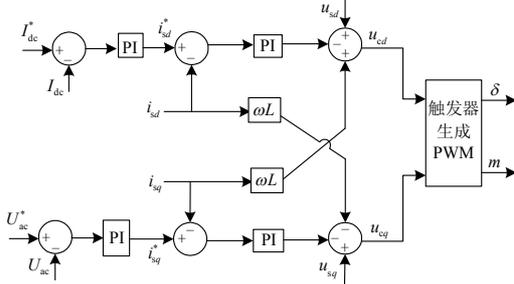


图 4 逆变侧的控制器

Fig. 4 Controller of inverter side

2 仿真分析

2.1 仿真系统参数

针对图 1 所示的混合直流输电系统在 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真程序中建立模型，为实现向无源网络供电，选取直流传输功率为 400 MW，直流电压等级为±200 kV，直流电流为 1 kA。其中整流侧交流系统电压等级为 220 kV，逆变侧无源网络电压等级为 10.5 kV，逆变侧直流电容为 600 μF，相电抗器为 0.074 3 H，直流线路等效电阻 R_d 为 2 Ω、等效电阻电感为 0.07 H，仿真步长为 50 μs，仿真时间为 5 s。无源网络的负荷用 400 MW 的三相电阻性负载来模拟。

2.2 启动与稳态特性研究

由于逆变侧 VSC 换流站没有电源支撑，故启动策略为在 0.04 s 时首先触发整流侧 LCC 换流站，待直流电容充电 0.1 s 后解锁逆变侧 VSC。启动和稳态时，直流电压、直流电流、有功功率、无功功率整流侧和逆变侧有功功率的仿真图形如图 5 所示。

前四个小图中，红色代表正极部分的直流电压、直流电流、有功功率、无功功率。而绿色代表负极的直流电压、直流电流、有功功率、无功功率。而第五个图中，红色代表整流侧送端的有功功率，绿色代表逆变侧受端的有功功率。由于 LCC 正负极对称，所以选择只描述正极的情况，以下同上。

由图 5 可知，直流电压只用了 0.3 s 就达到了额定值，电压上升过程中，最大过电压为 234 kV，总体平稳。直流电流也用了 0.35 s 就达到了额定值，最大过电流为 2.13 kA，传输的有功功率用了 0.35 s

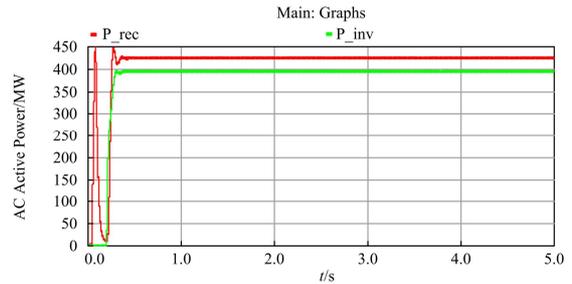
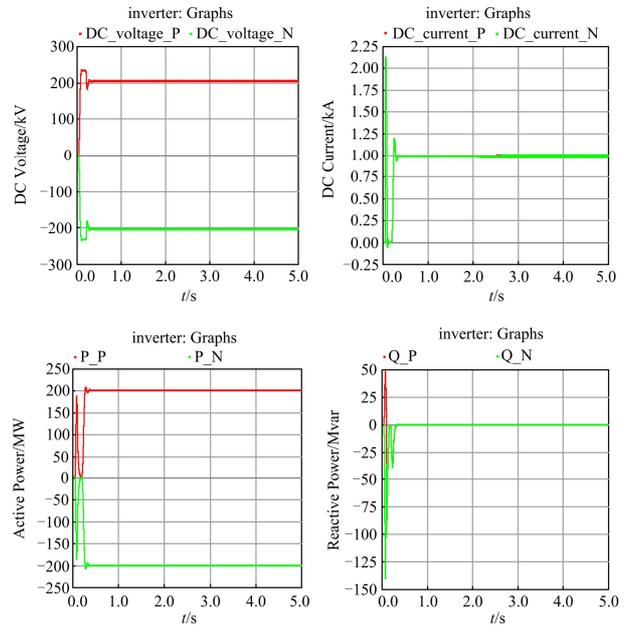


图 5 直流电压、直流电流、有功功率、无功功率、整流侧和逆变侧的有功功率

Fig. 5 DC voltage, DC current, active power, reactive power, and active power of rectifier and inverter side

才达到额定值。整流侧有功功率波动较大，逆变侧有功功率则平稳上升到 400 MW 额定值。

稳定运行时，直流电压、直流电流、有功功率、无功功率以及整流侧和逆变侧的有功功率均十分平稳，整流侧和逆变侧传输功率分别为 430 MW 和 400 MW，直流功率损耗为 30 MW，损耗率为 5%。

2.3 故障特性研究

由于篇幅限制，本文在整流侧和逆变侧没有做单相和两相短路，只做了最严重的三相短路。如果该 H-HVDC 系统在三相短路情况下还能够恢复到稳定状态，那么单相和两相短路也能恢复到稳定状态。

2.3.1 整流侧交流母线三相短路

设置的故障发生在 $t=3$ s 时，故障持续时间为 0.2 s。在 $t=2.9$ s 到 4 s 的直流电压、直流电流、有功功率、无功功率的仿真波形如图 6 所示。

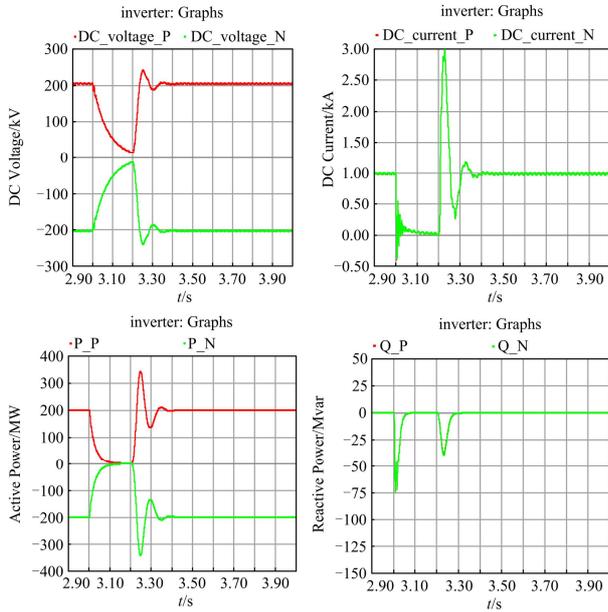


图 6 整流侧交流母线发生三相短路故障

Fig. 6 Three-phase short circuit fault occurred rectifier side AC bus

由图 6 可知, 当整流侧交流母线发生三相短路时, 直流电压、直流电流、有功功率均用了 0.4 s 就恢复到稳定状态, 无功功率则只用了 0.3 s 就恢复到了稳定状态。故障期间, 没有出现功率中断现象, 说明了选择的控制策略的有效性。

2.3.2 逆变侧交流母线电压三相短路

故障发生在 $t=3$ s 时, 故障持续时间为 0.2 s, 在 $t=2.9$ s 到 4 s 的直流电压、直流电流、有功功率、无功功率的仿真波形如图 7 所示。

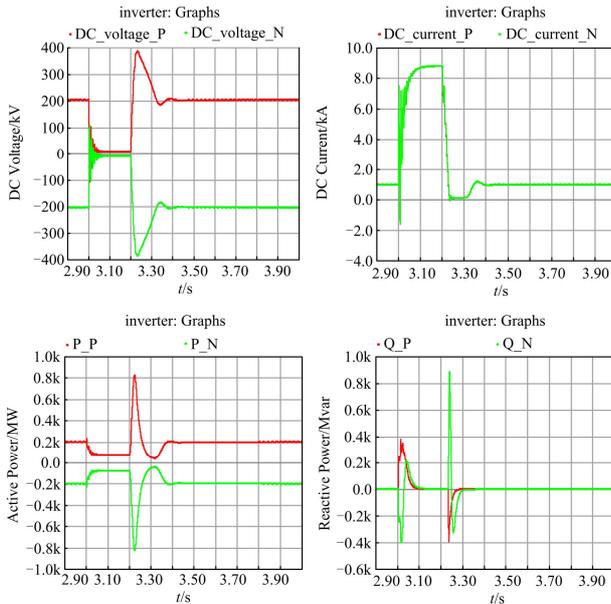


图 7 逆变侧交流母线发生三相短路故障

Fig. 7 Three-phase short circuit fault occurred inverter side AC bus

由图 7 可知, 当逆变侧交流母线发生三相短路时, 直流电压用了 0.4 s 才恢复到稳定状态, 且故障期间, 直流电压中断, 但故障切除后, 立刻恢复到了额定值。直流电流用了 0.4 s 就恢复到了稳定状态, 故障期间, 出现的过电流最大值为 8.8 kA, 最小值为 -1.6 kA, 过电流较大。有功功率用了 0.4 s 才恢复到稳定状态, 故障期间无中断现象发生。

故障期间, 正极无功功率最大值为 -375 Mvar, 恢复到稳定状态只用了 0.3 s。负极无功功率最大值为 880 Mvar, 最小值为 -400 Mvar, 恢复到稳定状态用了 0.4 s。

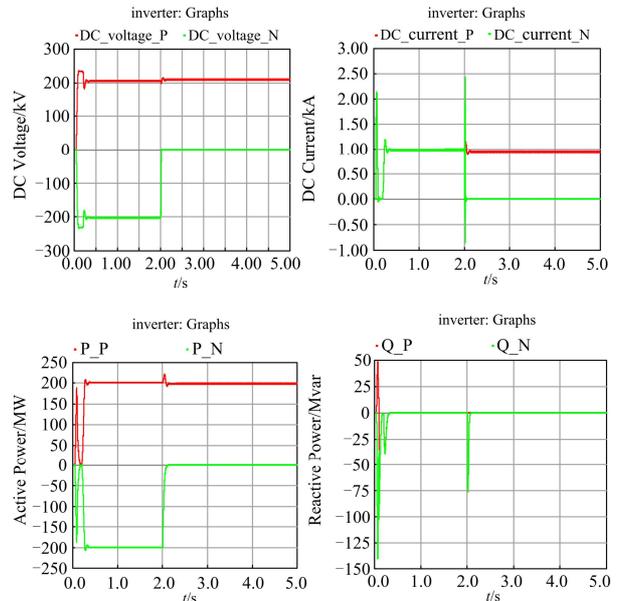
综上所述, 该 H-HVDC 系统即使在整流侧和逆变侧交流母线发生最严重的三相短路时, 都能快速地恢复到稳定状态, 说明了该系统的稳定性能较好。

2.3.3 单极闭锁

设置直流输电线路的负极在 $t=2$ s 时发生单极闭锁故障, 为了防止故障过程中出现过电流, 在 2.01 s 时闭合开关 K_3 , 通过串联 RL 电路防止过电流; 然后当 $t=2.02$ s 闭合开关 K_4 防止产生 LC 振荡。该 H-HVDC 系统的直流电压、直流电流、有功功率、无功功率及整流侧和逆变侧的有功功率如图 8 所示。

由图 8 可知, 当负极发生单极闭锁后, 正极的直流电压、直流电流、有功功率保持不变。而负极的直流电压由 200 kV 逐渐降到了 0 kV, 用了 0.02 s。直流电流最大过电流为 2.4 kA, 它迅速降到 0 kA, 用时 0.05 s。有功功率逐渐降为 0 MW, 用时 0.15 s。

该伪双极系统在单极闭锁情况下迅速转化为单极高压直流输电系统。而且 H-HVDC 系统传输的有功功率由 400 MW 变为 200 MW, 该系统在直流故障情况下具有一定的抗干扰性。



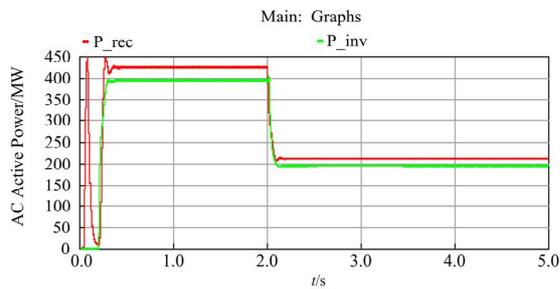


图8 单极闭锁时的直流电压、直流电流、有功功率、无功功率及整流侧和逆变侧的有功功率

Fig. 8 DC voltage, DC current, active power, reactive power, The active power of rectifier and inverter when occurred monopole block

3 结论

本文建立了含有整流侧 LCC 换流器和逆变侧 VSC 换流器的伪双极 H-HVDC 系统向无源网络供电的模型, 推导了其在稳态时的数学模型, 且针对向无源网络供电的特性条件, 对整流侧与逆变侧协调控制策略进行了研究。然后在 PSCAD/EMTDC 环境下对该 H-HVDC 系统的启动特性、稳定运行特性、整流侧和逆变侧母线发生三相短路故障的恢复特性以及单极闭锁进行了研究, 得到如下结论:

(1) 逆变侧采用 VSC 换流器, 使混合直流输电向无源网络供电成为可能, 同时在整流侧采用 LCC 换流器, 与 VSC-HVDC 相比, H-HVDC 系统降低了投资成本, 提高了经济效益。该类模型非常适合于单向电力传输, 减少了整个系统的成本和功率损耗, 可以应用于对小岛、孤立负荷和偏远山区供电。

(2) 鉴于混合直流向无源网络供电的特殊性, 需要稳定逆变侧无源网络的电压, 逆变侧 VSC 的控制方式特定要求为定交流电压模式, 通过系统的稳态与暂态特性研究仿真, 验证了该控制方式选择的正确性。

(3) 通过在整流侧和逆变侧换流母线施加三相接地短路故障以及单极闭锁故障仿真, 仿真结果表明了 H-HVDC 系统具有较好的抗干扰能力, 在故障发生时能够迅速恢复到稳定状态。

参考文献

[1] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1-6.
[2] 李永猛, 李兴源, 肖俊, 等. 多馈入直流系统换相失败风险仿真分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014,

26(8): 1-5.

- LI Yongmeng, LI Xingyuan, XIAO Jun, et al. Simulation analysis of commutation failure risk in multi-infeed systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(8): 1-5.
- [3] 余海翔, 陈立, 梁家豪. 天广直流广州换流站换相失败机理探讨[J]. 高压电器, 2015, 51(3): 151-156.
YU Haixiang, CHEN Li, LIANG Jiahao. Investigation of commutation failure in Guangzhou converter station of Tian-Guang HVDC project[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(3): 151-156.
- [4] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 1-2.
- [5] 郭春义, 刘文静, 赵成勇. 电压源电流源混合型高压直流输电控制方法研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(11): 1281-1288.
GUO Chunyi, LIU Wenjing, ZHAO Chengyong. Research on the control method for voltage-current source hybrid-HVDC system[J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 2013, 43(11): 1281-1288.
- [6] 李广凯, 李庚银, 梁海峰, 等. 新型混合直流输电方式的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(4): 82-86.
LI Guangkai, LI Gengyin, LIANG Haifeng, et al. Research on a novel hybrid HVDC system[J]. Power System Technology, 2006, 30(4): 82-86.
- [7] LI G K, LI G Y, LIANG H F, et al. Operational mechanism and characteristic analysis of novel hybrid HVDC system[C] // International Conference on Power System Technology, Chongqing, China, 2006.
- [8] LI G K, LI G Y, LIANG H F, et al. Research on hybrid HVDC[C] // International Conference on Power System Technology, Singapore, 2006.
- [9] 李广凯. VSC-HVDC系统及其在电网恢复中的应用研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2008.
- [10] 潘武略. 新型直流输电系统损耗特性及降损措施研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [11] 赵成勇, 刘文静, 郭春义, 等. 一种适用于风电场送出的混合型高压直流输电系统拓扑[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 146-151.
ZHAO Chengyong, LIU Wenjing, GUO Chunyi, et al. Topology of a hybrid HVDC transmission system for wind power grid connection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 146-151.
- [12] MANOHAR P, KELAMANE V, KAUSHIK D, et al.

- Improved controls for LCC-VSC hybrid HVDC system[C] // International Conference on Circuits, Control, Communication and Computing, Bengaluru, India, 2013.
- [13] LIU W, ZHAO C Y, GUO C Y. The control strategy for Hybrid HVDC using voltage margin control and voltage dependent current order limiter control[C] // IET Renewable Power Generation Conference, Beijing, China, 2013.
- [14] 杨用春, 赵成勇. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 控制性能实验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 31-35, 66.
YANG Yongchun, ZHAO Chengyong. Experimental study on control performance of VSC-HVDC connected to passive network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(21): 31-35, 66.
- [15] 杨浩, 张楠, 叶明佳. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 离散模型及其控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 37-42.
YANG Hao, ZHANG Nan, YE Mingjia. Study of VSC-HVDC connected to passive network discrete model and its control strategies[J]. Power system Protection and Control, 2012, 40(4): 37-42.
- [16] 包宗贤, 邹超. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统的新型控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(14): 22-27.
BAO Zongxian, ZOU Chao. New control design for VSC-HVDC supplying passive networks[J]. Power system Protection and Control, 2008, 36(14): 22-27.
- [17] 郑连清, 池俊锋, 陆治国. 基于三级模糊自适应 PI 控制的 VSC-HVDC 控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 117-122, 127.
ZHENG Lianqing, CHI Junfeng, LU Zhiguo. Three-step fuzzy adaptive PI controller for VSC-HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 117-122, 127.
- [18] 余瑜, 刘开培, 陈灏泽, 等. 伪双极 VSC-LCC 型混合直流输电系统启动方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2572-2578.
YU Yu, LIU Kaipei, CHEN Haoze, et al. Startup procedure for VSC-LCC based hybrid pseudo bipolar HVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2572-2578.
- [19] 岳伟, 易荣, 张海涛, 等. 模块化多电平柔性直流输电系统的直流侧启动方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(10): 8-12.
YUE Wei, YI Rong, ZHANG Haitao, et al. Research on DC starting method in the MMC-HVDC system[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(10): 8-12.
- [20] LI K, LI X Y, CHEN S. Investigation of hybrid pseudo bipolar HVDC performances supply power to passive AC network[J]. Sensors & Transducers, 2014, 175(7): 306-312.
- [21] 徐政, 唐庚, 黄弘扬, 等. 消解多直流馈入问题的两种新技术[J]. 南方电网技术, 2013, 7(1): 6-14.
XU Zheng, TANG Geng, HUANG Hongyang, et al. Two new technologies for eliminating the problems with multiple HVDC infeeds[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(1): 6-14.
- [22] 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: 106-110.

收稿日期: 2015-01-27; 修回日期: 2015-03-25

作者简介:

王磊(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统高压直流输电; E-mail: pi_zilei@126.com

李兴源(1945-), 男, 教授, IEEE 高级会员, 主要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;

李宽(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事电力系统高压直流输电的研究工作。

(编辑 魏小丽)