

LCC 与 VSC 混联型多端高压直流输电系统 运行特性的仿真研究

雷 霄¹, 王华伟¹, 曾南超¹, 闫 朝², 谢国平¹, 李新年¹, 吴 楠³

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 国家知识产权局专利审查协作北京中心, 北京 100190;
3. 中国中轻国际工程有限公司, 北京 100026)

摘要: 设计了由五个 LCC 换流站和一个 VSC 站组成的串并联混合型六端高压直流输电系统, 该结构能发挥不同电压等级的 LCC 换流站以及 VSC 换流站的优势, 扩展多端直流输电的应用范围。本文基于 PSCAD/EMTDC 平台建立该系统单极仿真模型, 进行了稳态运行和暂态故障过程的相关研究, 设计了直流功率协调控制器实现各换流站功率的协调控制, 并提出了单换流站紧急停运的控制保护配合方法, 仿真结果表明混联多端系统的可行性及控制保护策略的有效性。

关键词: 混合多端直流输电; 特高压直流输电; 协调控制; 电压源换流器(VSC)

中图分类号: TM721 文献标识码: A 文章编号: 1003-3076(2013)02-0048-05

1 引言

目前, 高压直流输电技术在我国得到很大发展, 相继建成多条端对端高压直流输电工程, 包括 ±800kV 特高压直流输电工程。特高压直流输电工程电压等级高、输送容量大, 适合大功率、远距离输电, 对区域电网的联络和远距离送电起到关键作用^[1-5]。

传统直流输电的换流器采用由晶闸管构成、基于电网换相的换流器(LCC), 仅适用于具有一定短路比的电力系统, 不能向弱交流系统和无源负荷中心供电。随着电力电子技术的高速发展, 基于电压源换流器的高压直流输电(VSC-HVDC)的研究日趋成熟, 并投入商业运行。与传统基于 LCC 的直流输电比较, VSC-HVDC 可以工作在无源逆变状态, 向弱交流系统和无源系统供电, 实现有功功率和无功功率的传输, 提高交流系统稳定性, 输出电压波形好、功率因数高、谐波小^[6-7]。

基于特高压直流、高压直流和 VSC, 建立串并联混合型多端直流输电系统, 充分发挥特高压直流输

送容量大、距离远以及 VSC 向弱交流系统、无源系统供电的优势和特点, 通过直流联网, 实现多电源供电、多落点受电, 对电网未来的发展会是一个极大地完善^[8-12]。

为了对混联型多端直流输电系统的运行特性和控制保护策略进行研究分析, 本文设计了由 LCC 与 VSC 构成的六端高压直流输电系统, 基于 PSCAD/EMTDC 软件平台建立其单极仿真模型, 针对该系统特有的电压电流运行控制方式、站间协调控制以及典型故障的影响和控制保护策略进行了理论分析与仿真验证。

2 系统结构及运行方式

2.1 系统结构

本文设计了一个由 LCC 与 VSC 构成的六端混联型单极直流输电系统, 包括两个整流站和四个逆变站, 拓扑结构如图 1 所示。

整流站 1、2 以及逆变站 1、2 均为两组十二脉动换流器串联, 每组十二脉动换流器额定直流电压 400kV, 每个站额定直流电压 800kV。逆变站 3 为一

收稿日期: 2012-01-06
基金项目: 国家电网公司大电网重大专项资助项目课题(SGCC-MPLG001-2012)
作者简介: 雷 霄 (1985-), 男, 土家族, 湖南籍, 工程师, 硕士, 从事直流输电工程控制保护系统分析与仿真工作;
王华伟 (1971-), 男, 山东籍, 高级工程师, 硕士, 从事直流输电系统仿真和电磁暂态领域研究工作。

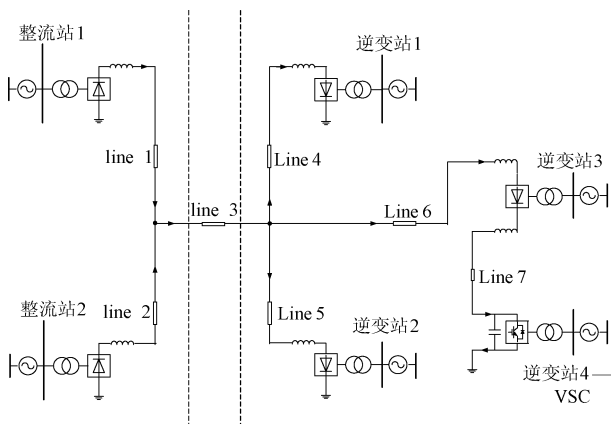


图1 六端混联型单极直流输电系统拓扑结构

Fig.1 Hybrid 6-MTDC monopole configuration

组十二脉动换流器,额定直流电压 500kV。VSC 换流站额定直流电压 300kV,直流功率 300MW。各换流站均配置换流变压器、交流滤波器、直流滤波器、平波电抗器。图1中直流线路1~7长度分别为320km, 110km, 1500km, 300km、100km、250km 和 150km。

整流站1、2和逆变站1、2组成并联方式的四端特高压直流输电系统,500kV 逆变站以及 VSC 逆变站互为串联形式,作为一个整体与逆变站2并联,通过这种串联和并联的方法,达到了为 VSC 换流站分压和均流的效果,实现了 VSC 的接入。这种结构的优点在于:两个特高压整流站具有很大的输送容量,能将邻近的大型能源基地的电集中起来送往远方负荷中心;逆变站1和逆变站2同样作为特高压换流站,能给电力需求高的大型工业中心、人口密集城市供电;而 VSC 换流站的接入,能实现向弱交流系统或者孤岛等无源系统送电。

2.2 运行控制方式

混合多端直流输电系统的控制思路与传统多端直流输电 (MTDC) 相同,在并联方式下选择一个换流站维持系统正常运行的直流电压,其他换流站控制直流电流;在串联方式下由一个换流站维持系统正常运行的直流电流,其余换流站控制直流电压。

对于本文的系统,稳态运行时整流站1、2与逆变站1均采用定直流电流控制,逆变站2采用定熄弧角控制,作为电压控制站,在这种方式下四端特高压直流输电系统可以稳定运行;逆变站3和 VSC 换流站相当于串联方式,两个站电流相等,逆变站3采用定直流电流控制,通过它的控制能调整流经逆变站2和 VSC 站的直流电流。VSC 站采用定直流电

压和交流电压控制方式,其中,交流电压相位的控制可以通过改变调制波的调制系数来实现;直流电压的控制可以通过改变调制波的相位来实现。VSC 控制原理如图2所示。

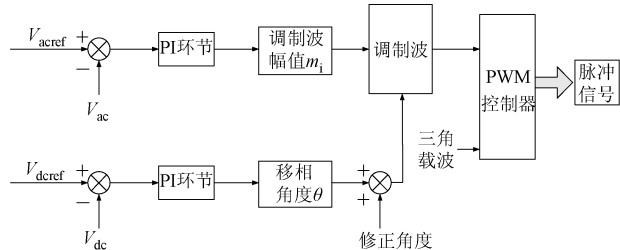


图2 VSC 控制原理图

Fig.2 VSC controller

由于 VSC 站控制直流电压,作为与之串联存在的逆变站3直流电压也得到了维持。系统在此种配合控制方式下能维持稳定运行状态。

3 功率协调控制

多端直流系统中,一个或多个换流站直流功率发生变化时,需要协调控制器来重新整定各换流站的功率定值,保证系统能运行在一个稳定的功率水平下。各换流站运行在电流控制模式下时,由电流协调控制器完成协调控制功能,在一些文献中已有详细说明^[13-14]。而在实际直流输电工程的运行中,换流站一般处于定功率控制模式,以直流功率作为控制目标能抑制功率变化过程中的暂态扰动,动态性能优于电流协调控制器。本研究设计的功率协调控制器原理如图3所示。

设 P_{r1} 、 P_{r2} 、 P_{i1} 、 P_{i2} 、 P_{i3} 、 P_{VSC} 分别为整流站1、2和逆变站1、2、3、VSC站的直流功率指令, P_R 为所有直流线路上的功率损耗,则直流功率基本平衡关系可由下式表述。

$$P_{r1} + P_{r2} = P_{i1} + P_{i2} + P_R + P_{i3} + P_{VSC} \quad (1)$$

其中, P_R 由各条线路实际直流电流与线路等效电阻计算得出。由式(1)可知,以这7个变量作为功率协调控制的计算变量,即能保证功率的平衡。

其中, T 为时间常数, P_{r1ord} 、 P_{r2ord} 、 P_{i1ord} 、 P_{i2ord} 、 P_{i3ord} 、 $P_{iVSCord}$ 分别为六个换流站的直流功率最终指令值, k_{r1} 、 k_{r2} 、 k_{i1} 、 k_{i2} 、 k_{i3} 和 k_{iVSC} 分别为六个站的功率协调控制比例参数。当某个换流站的直流功率变化时, P_R 同时变化, ΔP 不再为0,经过一个积分环节,与 k 参数控制器计算出的每个换流站的 k 参数相乘,得出各站功率指令变化量,叠加在原功率指令

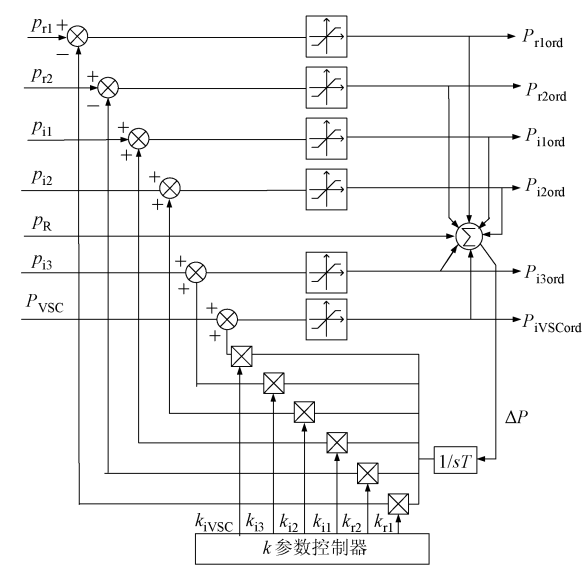


图 3 功率协调控制器原理图

Fig. 3 Principle of power balance controller

上,重新整定出各换流站的功率指令值,送至相应换流站完成功率协调控制。

在协调控制中,参数 k 确定是关键,它是多端系统的换流站直流功率、换流母线电压、短路容量等变量的函数,可根据实时采集的工况参数,采用查表的方式得出或由计算程序完成在线计算的方式得出。

图 4 给出了功率协调控制器作用下,某个换流站功率发生变化时的仿真波形:初始状态为六端系统稳定运行,整流站 1、2 直流功率 1600MW,逆变站 1、2、3 和 VSC 换流站直流功率分别为 1120MW、1280MW、500MW 和 300MW。设定整流站 1 直流功率在 2s 时由 1600MW 快速下降至 800MW,整定 k 参数为 $k_{r1}=0, k_{r2}=0.5, k_{i1}=0.35, k_{i2}=0, k_{i3}=0.09375, k_{VSC}=0.05625$ 。

左图从上至下依次为整流站 1、2、逆变站 1、2、3 和 VSC 站的直流电压,右图从上至下依次为它们的直流功率,后续分析中的波形图排列均与此相同。可见,整流站 1 直流功率突然下降后,功率协调控制器按照设定参数重新整定各换流站功率定值,整流站 2 直流功率上升以补偿一部分送端损失的输出功率,除逆变站 2 之外其余逆变站功率不同程度下降,保证各逆变侧交流电网不会出现过大波动,系统继续稳定运行。

4 故障下的控制保护策略

4.1 单个整流站紧急停运

并联多端直流输电系统中的某个换流站发生故

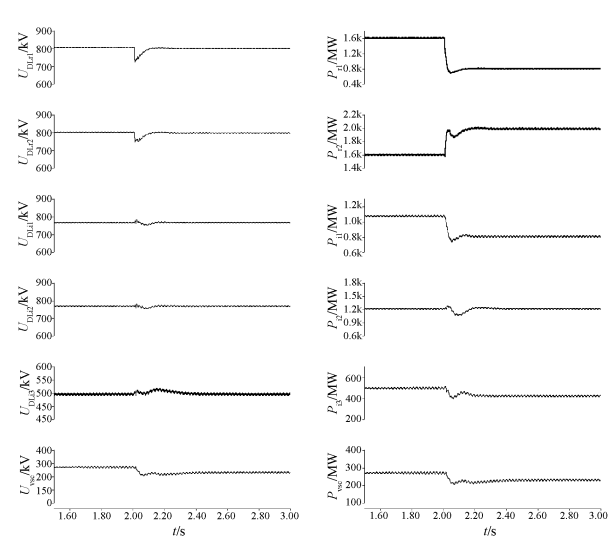


图 4 功率协调控制仿真

Fig. 4 Simulation of power balance control

障且需要紧急停运时,可通过控制保护功能完成停运,并从系统中切除。在很多情况下,多端直流输电系统仅需停运该故障换流站,整个系统仍可运行,但暂态过程中直流电压和电流均会出现或大或小的波动,因此需通过控制和保护功能以及协调控制的配合,减少单站停运的影响,最大限度保证系统的稳定。

单个整流站紧急停运时,由于系统中另一个整流站继续运行,送端仍能输送功率,故整个系统可以作为五端系统继续运行。单个整流站紧急停运的时序设计为:紧急停运的整流站 α 角指令立刻移相至 164° ,使其变为逆变模式,直流电流快速降至 0,之后闭锁换流器,断开与直流系统相连接的开关,根据故障类型选择是否跳开交流开关;由于停运一个整流站,直流功率会大幅下降,此时协调控制起作用(如果不进行协调控制,逆变站 2 作为电压控制站,其直流电流会降至很低),根据直流系统和交流系统情况重新整定各换流站功率或电流定值,保证系统的稳定性。

4.2 逆变站 1 紧急停运

单个逆变站因故障发生紧急停运,系统中还存在其余逆变站,因此可以继续运行。但是在逆变站停运时,不能采用投旁通对的方法,这样会形成直流短路,把整个系统的直流电流都转移到该逆变站,导致该站换流器不能正常关断,无法正常停运,且对其余系统产生较大扰动。

逆变站 1 为电流控制站,其故障后紧急停运时,

在不考虑高压直流断路器的情况下,需要将直流电流降至 0 才能顺利完成闭锁。闭锁时序设计为:发生故障后,立即通知两个整流站紧急移相至 164° ,将直流系统电流降至 0,之后闭锁逆变站 1 的换流器,断开逆变站 1 与直流系统连接的开关,根据故障类型选择是否跳开交流开关。在其闭锁后,正常的换流站通过回调触发角使系统恢复为五端状态,在协调控制器重新整定的功率定值下继续运行。

图 5 为逆变站 1 紧急停运的仿真波形:初始状态为六端系统稳定运行,运行工况同上一个仿真计算。1.5s 时逆变站 1 发生紧急停运,功率协调控制参数分别设为 $k_{r1}=0.5,k_{r2}=0.5,k_{i1}=0,k_{i2}=0,k_{i3}=0,k_{VSC}=0$ 。

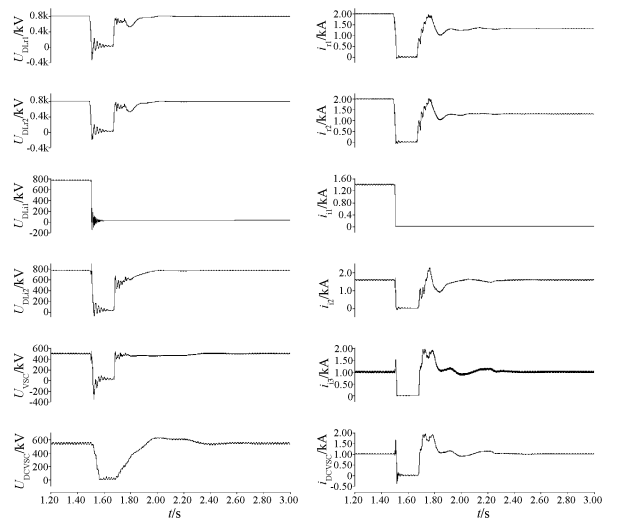


图5 逆变站 1 紧急停运
Fig.5 Inverter station 1 emergency stop

在功率协调控制器作用下,两个整流站的直流功率均降至 800MW,逆变站 2、3 以及 VSC 站功率保持不变。逆变站 1 退出运行后,五端系统能继续保持在设定值稳定运行。

4.3 逆变站 3 紧急停运

逆变站 3 与 VSC 站构成串联形式,当逆变站 3 出现故障紧急停运时,如果按照一般意义上串联多端的控制方法,将逆变站 3 换流器两端进行短接操作,相当于将 VSC 换流站直接并联在 800kV 直流母线上,电压等级过高,VSC 站无法正常运行,甚至损害设备。VSC 换流站故障单独退出运行时的情况与之相同。故当逆变站 3 或者 VSC 换流站其中之一故障并紧急停运时,需要同时停运另一换流站并将这条串联支路的直流线路开关断开,将之从多端系统中切除。此时其余四站相应进行功率调整并继续

运行。

设计逆变站 3 紧急停运的闭锁时序如下:紧急停运时,立即通知两个整流站紧急移相至 164° ,将直流系统电流降至 0;VSC 换流站电压定值置为 0,之后闭锁逆变站 3 和 VSC 站的换流器,断开逆变站 3 与直流系统、逆变站 3 与 VSC 换流站的连接开关,根据故障类型选择是否跳开交流开关。最后正常的直流系统重新起动,恢复稳定运行状态,稳态功率分配由协调控制器完成。

图 6 为逆变站 3 紧急停运的仿真波形:初始状态为六端系统稳定运行,运行工况同上一个仿真计算。1.5s 时逆变站 3 发生紧急停运,功率协调控制参数分别设为 $k_{r1}=0.5,k_{r2}=0.5,k_{i1}=0,k_{i2}=0,k_{i3}=0,k_{VSC}=0$ 。

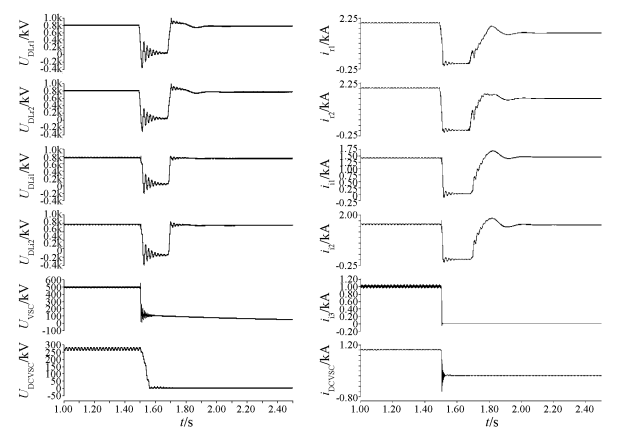


图6 逆变站 3 紧急停运
Fig.6 Inverter station 3 emergency stop

在功率协调控制器作用下,两个整流站的直流功率均降至 1200MW,逆变站 2 和 3 直流功率保持不变。逆变站 3 和 VSC 站退出运行后,四端系统能继续保持在设定值稳定运行。

5 结论

本文建立了由 LCC 和 VSC 组成的混联型多端高压直流输电系统,得到的结论如下:

- (1) 此结构实现了将电压等级较低的 VSC 接入特高压直流输电系统,能充分发挥不同电压等级的 LCC 换流站以及 VSC 换流站的优势,由 LCC 换流站完成大型能源基地电能的送出和向需求大量电能的负荷中心供电,同时由于 VSC 换流站的接入,能实现向弱交流系统或无源系统送电,增加了输电的灵活性,扩展了多端直流系统的应用范围。
- (2) 为了保证对直流功率的控制性能,本文设

计了直流功率协调控制器,在某个换流站直流功率发生变化时,会重新整定各换流站功率定值,完成多端系统整体功率的稳定控制。

(3) 在不考虑采用直流断路器的情况下,单个逆变站紧急停运时,需要整流站配合移相使该逆变站电流降至0,保证该逆变站顺利闭锁;对于本文中特殊结构的多端系统,逆变站3或VSC站之一需要停运时,另一个站也应立刻停运。

混联型多端直流输电系统能充分利用LCC与VSC的优势,且具有良好的运行特性,是将来多端直流输电系统值得研究的方向。

参考文献 (References):

- [1] 赵畹君 (Zhao Wanjun). 高压直流输电工程技术 (High voltage DC transmission engineering technology) [M]. 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 2004.
- [2] 李兴源 (Li Xingyuan). 高压直流输电系统的运行和控制 (Operation and control of high voltage DC transmission system operation and control) [M]. 北京: 科学出版社 (Beijing: Science Press), 1998.
- [3] Prabha Kundur. 电力系统稳定与控制 (Power system stability and control) [M]. 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 2002.
- [4] 胡铭, 田杰, 曹冬明, 等 (Hu Ming, Tian Jie, Cao Dongming, et al.). 特高压直流输电控制系统结构配置分析 (Analysis of structure and configuration for UHVDC transmission control system) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2008, 32(24): 88-92.
- [5] 王晶芳, 王智冬, 李新年, 等 (Wang Jingfang, Wang Zhidong, Li Xinnian, et al.). 含特高压直流的多馈入交直流系统动态特性仿真 (Simulation to study the dynamic performance of multi-infeed AC/DC power system including UHVDC) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2007, 31(11): 97-102.
- [6] 严干贵, 陈涛, 穆钢, 等 (Yan Gangui, Chen Tao, Mu Gang, et al.). 轻型高压直流输电系统的动态建模及非线性解耦控制 (Dynamic modeling and nonlinear-decoupling control of HVDC light system) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2007, 31(6): 45-50.
- [7] 赵成勇, 李金丰, 李广凯 (Zhao Chengyong, Li Jinfeng, Li Guangkai). 基于有功和无功独立调节的VSC-HVDC控制策略 (VSC-HVDC control strategy based on respective adjustment of active and reactive power) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2005, 29(9): 20-24.
- [8] Sood V K, Nakra H L, Khodabakhchian B, et al. Simulator study of hydro-quebec MTDC line from James bay to New England [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 3(4): 1880-1886.
- [9] Jiang H, Ekstrom A. Multi terminal HVDC systems in urban areas of large cities [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(4): 1278-1284.
- [10] 曾南超 (Zeng Nanchao). 高压直流输电在我国电网发展中的作用 (Role of HVDC transmission in the power system development in China) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2004, 30(11): 11-12.
- [11] 林凌霄, 张尧, 钟庆, 等 (Lin Lingxue, Zhang Yao, Zhong Qing, et al.). 多馈入直流输电系统中换相失败研究综述 (A survey on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission system) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2006, 30(17): 40-46.
- [12] 周长春, 徐政 (Zhou Changchun, Xu Zheng). 连于弱交流系统的HVDC故障恢复特性仿真分析 (Simulation and analysis of recovery characteristics of HVDC connected to AC system with weak strength) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2003, 27(11): 18-21.
- [13] 袁旭峰 (Yuan Xufeng). 新型混合多端直流输电系统理论及其若干关键问题研究 (Research on theory of novel hybrid multi terminal HVDC system and some key problems) [D]. 武汉: 华中科技大学 (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology), 2007.
- [14] 袁旭峰, 文劲宇, 程时杰 (Yuan Xufeng, Wen Jinyu, Cheng Shijie). 多端直流输电系统中的直流功率调制技术 (DC power modulation in multi-terminal HVDC transmission system) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2007, 31(14): 57-61.

Simulation research on operation characteristics of hybrid multi-terminal HVDC system with LCC and VSC

LEI Xiao¹, WANG Hua-wei¹, ZENG Nan-chao¹, YAN Chao², XIE Guo-ping¹, LI Xin-nian¹, WU Nan³

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. Patent Examination Cooperation Center of the Patent Office, SIPO, Beijing 100190, China;

3. China BCEL International Engineering Co., Ltd, Beijing 100026, China)