

海上平台柔性直流技术直流控制保护配置研究

白晋川, 张旭光

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的]海上平台电源多以分布式的形式进行电力组网, 该种组网方式成本高、经济效应差。柔性直流输电技术不需要交流电网提供换相电流, 使得柔性直流输电具有对有功功率和无功功率进行同时控制的能力, 并且不需要配置大量补偿设备, 较好地解决了海上平台输电问题。[方法]基于柔性直流输电技术的特点及接线型式, 研究了直流控制的配置, 分析了常见的直流故障特性, 并展开了直流保护配置的研究。[结果]给出了直流控制系统的配置原则及方案, 以及直流保护的配置原则及方案。[结论]研究成果为该技术在相关工程的应用推广提供了参考。

关键词: 海上平台; 柔性直流; 直流控制; 直流保护

中图分类号: TM614; TM721.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)02-0109-06

Research on the DC Control and Protection Configuration of VSC-HVDC Technology for Offshore Platform

BAI Jinchuan, ZHANG Xuguang

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] The power grid is usually formed in the type of distribution. This type of grid has high cost and poor economic effect. The VSC-HVDC technology does not require alternating phase current in the AC power grid, and the VSC-HVDC has the ability to control both active and reactive power. Besides, there is no need to configure a large amount of compensation equipment. So it can solve the problems for offshore platform. [Method] Based on the characteristics of VSC-HVDC technology and connection type, this article studied the DC control configuration, analyzed common DC fault characteristics and the DC protection configuration. [Result] The configuration principle and scheme of DC control system, the configuration principle and scheme of DC protection is given. [Conclusion] This work provides some guidance for the application of the technology in the related engineering.

Key words: offshore platform; VSC-HVDC; DC control; DC protection

近年来, 各海上平台电源越来越多地以分布式形式进行电力组网, 该种组网形式往往产生大量无功功率, 需大量无功补偿装置来保证电能质量, 成本高, 经济效应差。

柔性直流输电技术以全控型、可关断器件构成的电压源换流器以及脉宽调制控制技术为基础。换流器中全控型器件代替了传统直流输电技术中的半控型晶闸管, 不需要交流电网提供换相电流, 使得柔性直流输电能够对有功功率和无功功率同时进行控制。因此, 采用柔性直流输电是解决海上平台供

电的有效手段。本文针对海上平台柔性直流输电技术中的直流控制保护配置展开相关研究。

1 海上平台柔性直流输电系统结构

海上平台柔性直流输电系统的主接线图如图 1 所示。

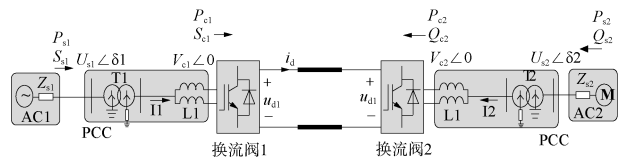


图 1 海上平台柔性直流输电系统主接线图

Fig. 1 Single line diagram of VSC-HVDC system for offshore platform

海上平台柔性直流输电系统主要构成如下:

收稿日期: 2018-03-26 返回日期: 2018-04-15

基金项目: 中国能建广东院科标项目“海上平台柔性直流输电关键技术和工程应用研究”(EV02931W)

1)电压源型换流阀 VSC: 各个桥臂由大功率可控关断型电力电子器件和反并联二极管组成, 是整个柔性直流输电系统的核心元件。

2)联接变压器: 因为 VSC-HVDC 没有换流换相过程, 另外系统谐波含量小, 没有直流偏磁情况, 所以不需要装设换流变压器。但是在实际工程中大都装设了三相变压器作为联接变压器, 用于组合式换流器或形成直流侧中性点。

3)连接电抗器: VSC 换流器的关键组成部分。换流器交流输出侧对应的每一相都安装了一个或两个换流电抗器。

4)直流输电线路: 除了背靠背系统外, VSC-HVDC 两侧的换流器通过架空线或电缆线进行连接^[1-2]。

2 直流控制配置

直流控制系统采用分层结构, 分为系统级控制层、站/双极控制层、极控制层和换流器控制层, 如图 2 所示。

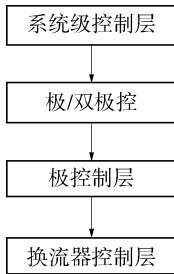


图 2 直流控制系统结构图

Fig. 2 Diagram of the DC control system structure

2.1 直流控制系统功能

针对海上平台供电应用场合, 可以采用如下控制策略来满足系统运行的要求, 如图 3 所示。

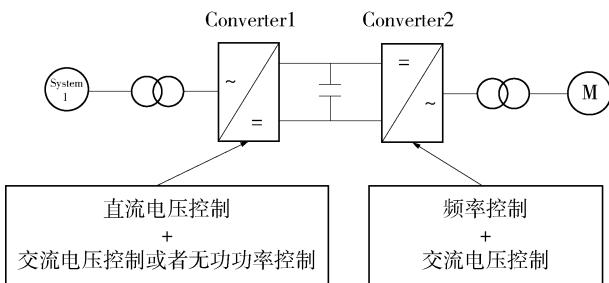


图 3 换流站运行模式图

Fig. 3 Diagram of the converter station operation mode

直流控制系统的主要作用是根据当前运行情况, 通过对调制波形节, 以实现系统要求的有功、无功控制目标。

1)有功功率控制

系统级有功类功率控制的主要功能为实现有功功率控制、直流电压控制和频率控制模式的平滑切换, 以及相应控制模式下有功类参考值的设定和调节。考虑换流阀承受电压、电流应力的限制, 系统级控制器需要对功率及电压的参考值及变化速率进行限制以得到换流站级控制的有功功率、直流电压、频率的指令参考值。控制框图如图 4 所示。

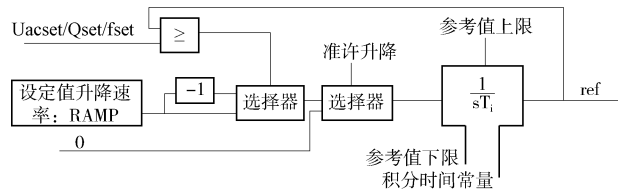


图 4 有功控制图

Fig. 4 Diagram of the active power control

2)无功功率控制

系统级无功类功率控制的主要功能为实现无功功率控制和交流电压控制模式的平滑切换, 以及相应控制模式下无功类参考值的设定和调节。考虑换流阀承受电压、电流应力的限制, 系统级控制器需要对功率及电压的参考值及变化速率进行限制以得到换流站级控制的无功功率、交流电压的指令参考值。控制框图如图 5 所示。

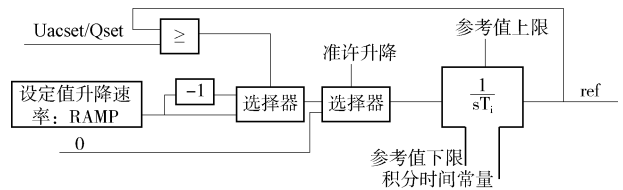


图 5 有功控制图

Fig. 5 Diagram of the reactive power control

此外, 控制系统还具有根据交直流运行工况对联接变压器抽头调节、对换流阀解锁/闭锁顺序的控制、保证系统平稳启/停以及为提高系统性能而进行的附加控制等^[3-5]。

2.2 直流控制系统配置方案

为了达到工程要求的可用率及可靠性, 柔性直流控制系统应采用冗余设计, 通常采用双重化设计。正常运行时, 一套系统处于正常工作状态, 另

一套系统处于热备用状态。两套系统可以同时对上传的数据信息进行采集和处理。当一套系统由于故障、检修或其它原因退出运行时,另一套系统将迅速切换投入到运行当中,不会对整个系统的运行造成影响。

在有的工程中,也有采用三重化及以上的冗余设计,采用“三取二”的原则作为输出方案,但该种方案将增加元器件数量、设备投资,以及系统的复杂程度。

综上,双重化设计是一种较好的选择。I/O单元、直流控制系统、站级控制系统、站LAN网、现场总线网、系统服务器和所有相关的直流控制装置都采用双重化设计。控制系统的冗余设计能够确保柔性直流控制系统不会因为任何一个控制系统的故障而导致停运事件发生,也不会因为单套控制系统的故障失去对整个换流站的监控能力。

每套直流控制主机从I/O到主机均采用完全冗余配置。直流就地控制屏配置显示器和键盘,可完成就地的监视控制功能。直流控制系统配置从硬件结构上可分为两部分:

1)直流控制柜:主要负责换流站内的通信、控制、故障录波、直流保护以及相关接口。

2)分布式I/O及现场总线:主要负责换流站内模拟量和开关量数据信息的实时采集,以及与各个子系统间的接口^[6]。

3 直流保护配置

3.1 直流故障特性分析

3.1.1 直流线路单极故障

目前,实际的直流配电系统示范工程中,为了减小单极接地过流危害,往往采用换流变阀侧星型经大电阻接地或经含有大接地电阻的接地装置接地的接地方式。

发生单极接地故障的主要故障后果如下:

- 1)故障极电位被迅速箝位为零。
- 2)另外一极直流电压上升至额定值的2倍。
- 3)接地装置中性电阻出现额定直流电压分量。

由于中性点电阻很大,因此单极接地故障下的电流应力并不大,主要为单极电压的升高。相应的故障检测及保护动作如果在要求时间内完成,则换流器承受的应力并不大。

3.1.2 双极短路故障

MMC的直流系统两极短路故障后,故障电流快速上升。为了保护换流器,在检测到直流故障的发生后会立即闭锁所有子模块。因此根据子模块是否闭锁可以将故障暂态过程分成子模块闭锁前和子模块闭锁后两部分。

1)子模块未闭锁

该阶段内故障电流主要由子模块电容放电和交流侧电源馈流组成,其中前者占主导部分,因此在估算故障电流时可以仅考察子模块电容的放电电流。同时子模块按照正常调制模式进行投切,由于子模块电容电压平衡控制原则,期间所有子模块均会投入或切除,每相所有子模块可近似等分为两组,依次交替放电。而且由于系统的控制频率很高,可以近似认为每相中交替放电的两组子模块处于并联状态^[7-8]。

2)子模块闭锁后初始阶段

当直流保护检测到直流故障的发生以后,为了保护换流器,将立即闭锁换流器内所有子模块;此外,IGBT的自保护功能亦会在桥臂电流上升后关断IGBT。因此进入子模块闭锁后阶段。在子模块闭锁后,桥臂电流衰减到零以前,故障电流主要由两部分组成:交流侧电源馈流和桥臂电抗续流^[8]。

3)IGBT关断后不控整流阶段

随着桥臂电抗续流的不断衰减,六个桥臂会分别出现电流过零现象,此后续流二极管将体现出单向导通性。因此,MMC最终会以不控整流桥的形式运行,由于此时不控整流桥的等效直流负载就是短路线路阻抗,因此该阶段交流侧、直流侧、换流器侧仍将受到严重的过电流危害。

3.2 直流保护配置原则

针对上述直流故障特点,本文对直流保护配置展开研究。

1)从配置和功能上,直流保护系统应考虑预防拒动和误动的措施,任何一重系统的故障都不应引起保护系统的误动和拒动。保护的防误动措施应当在每一重保护的设计中完成,不允许通过采用两重保护系统之间的切换来实现。保护出口均独立启动跳闸。

2)所有直流系统保护至少应双重化配置。

3)每重保护都应完整的覆盖所规定的区域,并能独立地对各自所负责的区域进行全面、正确的保

护。各重保护之间的二次回路应完全独立，例如：电源回路，测量回路，信号回路，跳闸回路、通信回路，保护通道等。任意一套保护系统因故障、运维或其它原因退出时，不应影响其余套保护的切换投入，也不应对整个系统的正常运行产生影响。

4) 直流系统保护具有完整的自监测功能，顺序事件记录功能。直流系统保护应配置故障录波功能，包含各类模拟量、开关量和保护动作数字量。

5) 保护测点配置必须满足相邻保护区域之间重迭，不存在保护死区。直流测量设备的精度和动态测量范围应与保护功能相匹配。

6) 在所有运行条件和工况下，直流保护系统与交流保护系统应能正确地配合。直流保护方案对系统扰动最小或对设备产生应力最小，保护定值的设定与设备设计中所承受的应力相匹配^[2]。

3.3 直流保护区域划分

直流保护按下述分区进行配置，如图6所示。

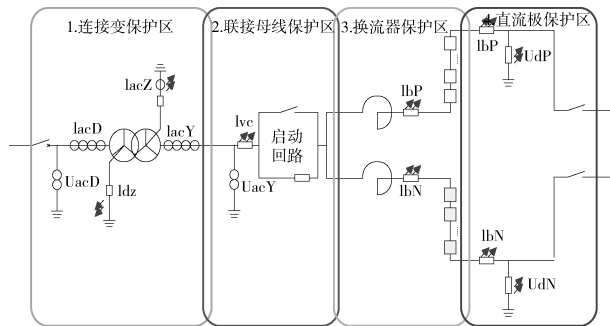


图6 直流保护区域图

Fig. 6 Diagram of the DC protection zone

1) 联接变保护区：联接变压器，包括联接变电气量和非电量的保护。

2) 联接母线保护区：联接变阀侧套管至桥臂电抗器网侧区域。

3) 换流器区域：桥臂电抗器网侧至换流器正负极线电流互感器之间的区域。

4) 直流极区域：两侧换流器高低压极线电流互感器之间的区域。

3.4 直流保护配置方案

3.4.1 联接母线保护

联接母线保护的设备范围为联接变阀侧套管至桥臂电抗器网侧区域，在此区域发生的接地、相间短路等故障均由联接母线保护实现。主要包括交流联接母线差动、过流保护；交流过压、欠压保护，

接地保护和过载保护。保护配置示意图如图7所示。

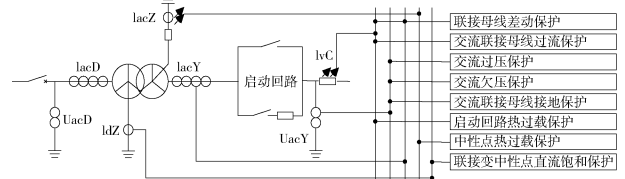


图7 联接母线保护配置图

Fig. 7 Diagram of the connected bus protection configuration

1) 交流联接母线差动保护

保护故障类型：当直流系统充电时或是直流系统正常运行时，发生的交流联接母线接地及相间故障。

2) 交流联接母线过流保护

保护故障类型：短路故障导致的过流。

3) 交流低电压保护

保护故障类型：交流电压过低。

4) 交流过电压保护

保护故障类型：极端情况下的交流过压。

5) 交流联接母线接地保护

保护故障类型：联接变阀侧绕组到换流阀之间的区域接地。

6) 启动回路热过载保护

保护故障类型：启动过程中启动电阻过热。

7) 中性点电阻热过载保护

保护故障类型：中性点电阻过热。

8) 联接变中性点直流饱和保护

保护故障类型：防止联接变中性点流过较大直流电流对联接变造成热损坏。

3.4.2 换流器区保护

换流器区保护的设备范围为桥臂电抗器网侧至换流器正负极线电流互感器之间的区域，在此区域发生的故障均由换流器区保护实现。主要包括桥臂差动、过流保护；阀直流过流、桥臂电抗器差动保护，谐波保护，保护配置示意图如图8所示。

1) 桥臂差动保护

保护故障类型：桥臂短路、阀组接地故障。

2) 桥臂过流保护

保护故障类型：检测换流阀的接地、短路故障，以及换流阀器过载。

3) 阀直流过流保护

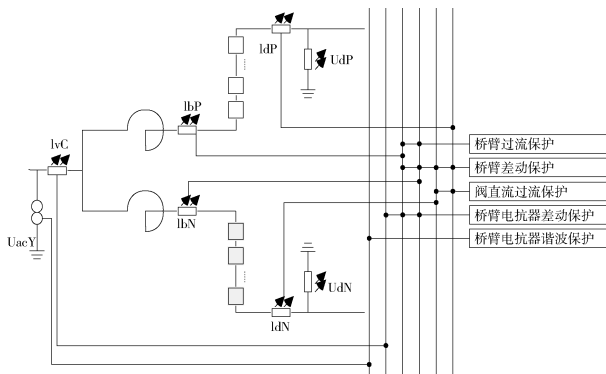


图8 换流器区保护配置图

Fig. 8 Diagram of the converter zone protection configuration

保护故障类型: 防止直流电流过大造成设备损坏。

4) 桥臂电抗差保护

保护故障类型: 桥臂电抗器上的故障。

5) 桥臂电抗器谐波保护

保护故障类型: 主要保护桥臂电抗器匝间故障。

3.4.3 直流极区保护

直流极区域保护的 设备范围为两侧换流器高低压极线电流互感器之间的区域, 在此区域发生的故障均由换流器区保护实现。主要包括直流电压不平衡、直流过压和欠压、接地过流、线路纵差保护和汇流母线差动保护(三端直流汇流场), 保护配置示意图如图9所示。

1) 直流电压不平衡保护

保护故障类型: 直流极、直流线路接地故障。

2) 直流低电压过电流保护

保护故障类型: 保护整个直流系统、检测各种

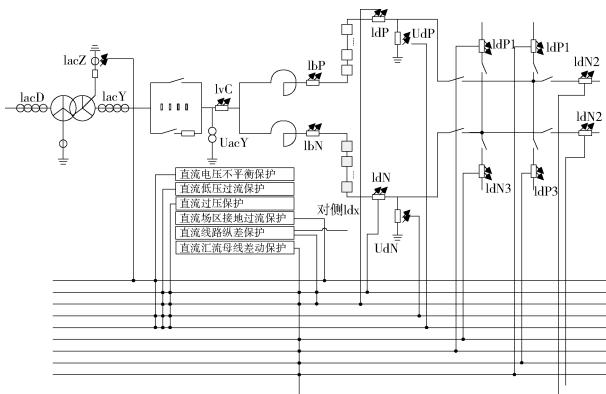


图9 直流极区保护配置图

Fig. 9 Diagram of the DC pole zone protection configuration

原因造成的接地短路故障, 或双极短路故障。

3) 直流过电压保护

保护故障类型: 控制异常、分接头操作错误、雷击、直流极接地故障、直流极线开路等造成的过电压。

4) 直流、场区接地过流保护

保护故障类型: 极端情况下的交流过压。

5) 直流线路纵差保护

保护故障类型: 直流线路接地故障。

6) 汇流母线差动保护

保护故障类型: 汇流母线接地故障。

4 直流控制保护特点

直流系统的控制与保护功能关系密切。直流控制始终保持输送的功率以及直流电压恒定, 当系统发生故障时, 直流系统能够快速响应, 迅速清除障碍, 维持运行的系统性。只有当故障无法清除, 或者超出直流控制范围时, 才会进行直流系统的停运。

直流系统保护动作的策略是某些保护先告警, 同时采取控制措施, 有些工程采取冗余的控制系统切换。根据不同的故障情况, 直流保护启动不同的自动顺序控制程序, 可以闭锁触阀脉冲, 减小对阀设备的冲击影响, 或者根据故障的严重程度和不同的区域, 发出指令进行极隔离, 或者跳开交流侧的断路器。

5 结论

本文基于柔性直流输电技术的特点及接线型式, 研究了直流控制的配置, 分析了常见的直流故障特性, 并展开了直流保护配置的研究, 给出了直流控制系统的配置原则及方案, 以及直流保护的配置原则及方案:

1) 根据直流控制系统的层级结构分别设置相应的控制设备, 可分为系统级及换流站级控制设备, 极控制设备、阀控制设备及相应的接口设备。

2) 进行保护区域的划分和测点配置研究, 得到适应海上平台直流保护的改进型双重化的配置原则, 并针对每个故障区域给出相应的保护配置。

参考文献:

- [1] 邓明. 牵柔性直流输电系统及其无网侧电动势传感器控制技术的研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2010: 16-25.
- [2] 季叔平. 上海南汇柔性直流输电示范工程关键技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013: 12-23.
- [3] 杨光亮. 高压直流输电系统控制保护配置方案研究及谐波影响分析 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015: 34-37.
- [4] 张豹. 高压直流输电的控制和保护系统策略分析 [D]. 南京: 东南大学, 2015: 21-31.
- [5] 聂雪松. 特高压直流输电控制系统模型的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2015: 16-38.
- [6] 杨光亮, 邵能灵, 郑晓冬. ± 800 kV 特高压直流输电控制保护系统分析 [J]. 高电压技术, 2012, 38(12): 3277-3283.
YANG G L, TAI N L, ZHENG X D. Discussion of ± 800 kV UHVDC transmission control and protection system [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(12): 3277-3283.
- [7] 廖武. 模块化多电平变流器(MMC)运行与控制若干关键技术研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2016: 30-34.
- [8] 李探. 模块化多电平换流器直流输电系统稳定性关键问题研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2016: 50-55.

作者简介:



BAI J C

白晋川(通信作者)
1989-, 男, 湖北荆州人, 工程师, 硕士, 主要从事变电站、换流站电气设计及研究等工作(e-mail) baijinchuan@gedi.com.cn。



ZHANG X G

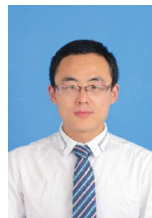
张旭光
1981-, 男, 浙江浦江人, 高级工程师, 硕士, 主要从事电气二次设计工作(e-mail) zhangxuguang@gedi.com.cn。

(责任编辑: 高春萌)

(下接第 120 页 Continued from Page 120)

- [7] 董云龙, 胡兆庆, 田杰, 等. 多端柔性直流控制保护系统架构和策略 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(2): 21-26.
DONG Y L, HU Z Q, TIAN J, et al. Frame of control protection system and control strategy implement in Multi-terminal VSC-HVDC system [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(2): 1-26.
- [8] 郝正航, 余贻鑫. 双馈风力发电机组对电力系统稳定性影响 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 7-12
HAO Z H, YU Y X. The influence of doubly-fed induction generator on stability of power system [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 7-12.
- [9] 胡兆庆, 毛承雄, 陆继明. 适用于电压源型高压直流输电的控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(1): 39-44.
HU Z Q, MAO C X, LU J M. A novel control strategy for voltage sourced converters based HVDC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(1): 39-44.
- [10] 彭冠炎, 卢毓欣, 简翔浩. 常规直流柔性化改造过渡方案研究 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(1): 61-65.
PENG G Y, LU Y X, JIAN X H. Research on transition scheme of LCC-HVDC retrofitting for VSC-HVDC [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(1): 61-65.

作者简介:



LIU J W

刘军伟
1987-, 男, 湖北枣阳人, 工程师, 硕士, 主要从事电力系统规划研究工作(e-mail) liujunwei@gedi.com.cn。



ZHANG Z F

张紫凡(通信作者)
1987-, 女, 河北石家庄人, 讲师, 硕士, 主要从事电力系统及其自动化研究工作(e-mail) zzf3345@qq.com。

(责任编辑: 高春萌)