

海上平台柔性直流换流站工程应用方案研究

郝为瀚

(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: 随着柔性直流输电技术的不断发展, 至今已经成为主流的直流输电技术, 在海岛供电、风电接入、电网互连等方面已经有了大量的应用, 积累了充足的工程经验。由于柔性直流输电技术的自身特点, 用于海上平台供电有着先天的优势。基于陆上柔性直流换流站的技术基础, 从拓扑结构、主要电气设备选型、电气平面布置以及二次系统等方面论述了海上平台换流站的工程应用方案, 对柔性直流输电技术的在海上平台供电领域的应用以及发展方向提出了一些具有积极意义的设想和建议。

关键词: 柔性直流输电技术; 海上平台换流站; MMC 拓扑结构

中图分类号: TM721

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)01-0066-05

Research on VSC-HVDC Converter Station Application on Offshore Platform

HAO Weihan

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

Abstract: With the continuous development of VSC-HVDC technology, it has become the mainstream of DC transmission technology. In the island power supply, wind power access, power grid interconnection, and so has a large number of applications, has accumulated plenty of engineering experience. Because of its own characteristics, VSC-HVDC technology has an innate advantage in power supply for offshore platforms. Based on the technical foundation of the VSC-HVDC converter station on land, this paper discusses the engineering application scheme of the offshore platform converter station from the aspects of topological structure, main electrical equipment selection, electrical plane layout and secondary system, etc. And it also has a number of positive ideas and suggestions about the VSC-HVDC technology offshore platform power supply applications and the development of the direction.

Key words: VSC-HVDC; converter station on offshore platform; MMC topological structure

随着国民经济的快速增长、国内能源需求缺口扩大和海洋战略的有力推进, 海上钻井平台业务发展迅猛, 而海上平台的电力供应保障对海上平台的持续、安全工作非常重要^[1]。

随着沿海区域油田开发规模越来越大, 增产措施等带来的电力负荷增加, 海上平台电力负荷变得十分可观。目前海上石油钻井平台电源通常靠价格

昂贵的柴油或天然气发电, 不但发电成本高、供电可靠性难以保证, 而且破坏环境; 同时, 原油发电机组还得背负着高昂的保养维护费用, 长期依赖国外厂家技术支持^[2]。因此, 海上平台研究新型供电模式迫在眉睫, 具有十分重要的持续性发展意义。

柔性直流输电可以实现换流阀的自我关断与开通, 对受端电网短路容量没有要求, 无换相失败问题, 控制灵活, 无需吸收交流侧无功便可以完成对故障系统功率的支援, 提高系统的稳定^[3]。较之传统直流输电具有紧凑化、模块化设计, 易于移动、安装、调试和维护, 易于扩展和实现多端直流输电等优点, 非常适合应用在陆电送海上平台。海上平台属于典型的无源网络, 从供电的电能质量, 供电的可靠性及投资造价方面的比较, 柔性直流输电是

收稿日期: 2016-11-01

基金项目: 中国能建广东院科技项目“STATCOM 设计规范和设备标准研究”(EV02811W)

作者简介: 郝为瀚(1984), 男, 内蒙古包头人, 工程师, 硕士, 主要从事柔性直流输电技术的研究工作 (e-mail) haoweihan@gedi.com.cn。

解决无源网络供电的有力手段^[4]。

目前，在国外海上平台采用柔性直流输电技术已有较多应用，并逐渐成为未来海上平台输电技术的主流方向；在国内相关领域，柔性直流输电技术却鲜有应用，但随海上业务的迅猛发展及逐步提高的技术需求，却无碍于其成为技术发展方向的趋势。

本文基于陆上柔性直流换流站的技术基础，针对海上平台换流站的特点进行分析研究，提出海上平台柔性直流换流站的应用方案。

1 拓扑结构

1.1 系统拓扑结构

海上平台柔性直流输电系统可由陆上换流站、直流线路、海上换流站组成。大陆电网经陆上换流站整流后，以直流电的形式经海底电缆线路送至海上换流站，海上换流站将直流电逆变后再输送至各周边平台，为各平台提供动力电源。根据海上油气平台的建设思路，海上换流站设置于中心平台，换流站交流侧可根据海上组网系统电压等级确定其交流电压，通过交流海缆与各周边平台相连接。海上平台柔性直流输电原理示意图如图 1 所示。

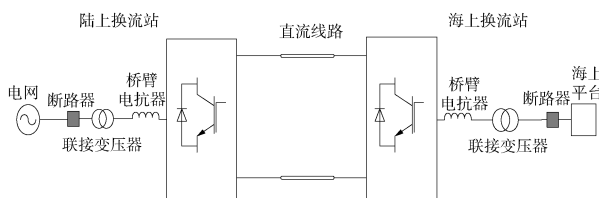


图 1 海上平台柔性直流输电系统原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the HVDC system on offshore platforms

1.2 换流器拓扑结构

随着柔性直流输电技术的不断发展，模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 技术取代两电平换流器、三电平换流器等拓扑结构成为了柔性直流技术领域最主流的的拓扑结构^[5]。模块化多电平换流器采用子模块串联技术，子模块中的功率器件可选择模块化 IGBT 或压接式 IGBT，模块化 IGBT 较后者发展更为成熟，且器件制造厂商更多。另外，在电平数达到一定程度时，MMC 输出电压具有较高的正弦性，不需设置滤波器，开关频率大幅降低，损耗减小^[6]。

1.3 主回路拓扑结构

对柔性直流输电系统的主回路拓扑结构，目前主要的接线方式主要采用对称单极或双极方案^[7]。

两种方案各有特点：对称单极接线具有对称的直流电压，从而简化了变压器设计，同时节省了联接变压器的数量以及用作金属回线的电缆，但对称单极接线每相桥臂所耐受电压是双极系统的 2 倍；对称双极系统在一极出现故障时仍能够采用单极运行，可靠性要高，但是具有多个换流器及联接变压器，成本要高，且在部分技术应用方面仍需要进一步进行研究，通常应用于可靠性要求较高或电压等级较高和容量较大的应用场合^[8]。

因此，目前对称单极系统接线越来越被应用和接受，工程应用也越来越多，对于输送容量不大、需要有成熟技术经验的海上平台输电系统来说，对称单极接线更具优势。

综上所述，对于海上平台柔性直流输电系统，较具优势的拓扑结构方案是采用 MMC 换流器的对称单极拓扑结构。采用对称单极的柔性直流换流站主要电气设备与其他类似工程基本一致，主要包括：电压源换流器、联接变压器、桥臂电抗器、交流开关设备、测量装置、计算机监控系统、控制保护系统及站用电设备等。

2 主要电气设备选择

海上平台处于海洋环境，内部电气设备除了需要满足国标及电力行业通用的各项标准外，还需满足潮湿、高腐蚀性环境对设备提出的特殊要求^[9]。由于海上平台的换流站为电力行业中的新兴领域，至今无完整标准可供参照执行，所以一般可参考石油、船舶行业标准，借鉴石油生产平台、船舶用电气设备的特殊要求。本文将针对海上平台柔性直流换流站中的主要电气设备的选择原则进行论述，相关技术参数需根据实际工程进行专项研究，本文不对其进行论述。

2.1 电压源换流阀开关器件

目前，由于 IGBT 运行稳定可靠、供应厂商广泛等优势，近年来发展迅速，已经发展到 4 500 V/3 000 A 的等级^[10]，虽然仍没有完全达到晶闸管类器件的水平，但是已经可以满足大部分高压大容量换流器的应用，是最适合于柔性直流输电工程的开关器件，在柔性直流输电工程中占绝对主导地位。

目前主流的 IGBT 器件可分为模块式和压接式两种型式。模块式 IGBT 额定电流相对较小,工业界应用广泛,生产厂家众多,电压等级从 600 ~ 6 500 V,额定电流可达到 1 500 A,主要生产厂家包括有英飞凌、三菱、日立、ABB、DYNEX 等公司;压接式 IGBT 额定电流较大,工程应用业绩较少,目前电压最大可达到 4 500 V,电流最大可达到 3 000 A,但生产厂家较少,仅限于 ABB、东芝、Westcode 三家公司。

对于海上平台柔性直流换流站,换流器的功率器件推荐采用模块式 IGBT,可以根据系统电压及容量选择提供 3 300 V/1 500 A、4 500 V/1 200 A、6 500 V/750 A 等 IGBT 模块。器件有大量的工程应用经验,有较多厂家可供选择,器件供应较为有保证,换流器易于实现国产化。在 IGBT 选型时,应核对各种工况下 IGBT 承受的电压和电流,使其不会超出 IGBT 器件的安全工作区域导致器件损坏。由于电路中必然存在杂散参数和非理想因素,并考虑到运行的安全裕量,一般情况下在运行的电压和电流都会留有一定的裕量,实际工程中典型的方式是取额定参数的 1/2 ~ 2/3 左右。

2.2 联接变压器

联接变压器是柔性直流换流站与交流系统之间传输功率的纽带,联接变压器的变比选择应使得换流器出口电压与阀侧电压匹配,而联接变压器的漏抗电感值一般并无准确的计算公式,一般根据经验综合考虑各方面因素选择,然后通过计算或仿真进行校验。

对于海上平台柔性直流换流站,联接变压器选型主要考虑:

- 1) 联接变压器的变比选择应使得换流器出口电压与网侧电压匹配。
- 2) 阻抗的选择需考虑变压器的电压等级、容量、耐受短路电流水平、运输条件限制。实际工程中,一般选择短路阻抗 15% 的连接变压器。
- 3) 一般变压器阀侧按星形连接,中性点引出(与接地方式有关),网侧根据系统情况可选择星型或角型连接。
- 4) 一般宜采用三相变压器,三绕组或双绕组变压器,与系统要求、生产能力、备用相设置等有关。
- 5) 由于变压器位于海上,可维护性较差,为提

高变压器的工作的可靠性,尽量采用自然风冷却方式的变压器,当采用大容量变压器,自然冷却不满足时,可采用自然油循环风冷却方式。

6) 海上平台设备所处环境湿度高,空气含盐度高,在电气设备选择上需考虑相关因素,主变压器进出线宜为封闭安装,无外部裸露带电部分。

2.3 桥臂电抗器

桥臂电抗器选型主要考虑:

- 1) 桥臂电抗器电抗值的选择需要考虑换流器的无功电流输出能力、桥臂环流、PCC(公共连接点)的谐波水平、直流线路谐波、响应速度等因素。
- 2) 桥臂电抗器应采用杂散电容很小的电抗器,以减少传送到系统侧的谐波,减小换流器每个开关过程因电容效应产生的大冲击电流对换流器的强应力。

考虑海上盐雾腐蚀等因素,桥臂电抗器应尽量使用油浸式电抗器,避免使用干式空芯电抗器及铁心电抗器。

2.4 启动电阻

启动电阻主要用于限制换流阀充电电流及电路上升率,从而减小对交流系统的冲击并限制充电启动瞬间桥臂电抗器上的瞬态过电压以及功率模块电容器和 IGBT 续流二极管上的瞬态过电流。充电完毕后启动电阻退出。启动电阻选型主要考虑:

- 1) 限制功率模块直流储能电容的充电电流,使换流阀和相关设备免受电流、电压冲击。
- 2) 阻值由电容电流限制要求。
- 3) 峰值电流由系统条件、电阻决定。
- 4) 能量由系统条件、功率模块电容、联接变压器、桥臂电抗器、功率模块放电电阻、自取能电源损耗、启动方式决定,同时决定了旁路开关的性能要求。

2.5 交流开关设备

对于海上平台柔性直流换流站,交流开关设备宜采用 GIS 设备或开关柜。GIS 设备和开关柜具有占地面积小、电气绝缘不受外界环境影响、维护工作量少、检修周期长以及运行可靠性高的特点,特别适用于湿度高、盐雾重、受台风影响的海洋环境。

2.6 直流设备

由于目前直流设备并没有专门针对海洋环境的特殊设备型式,因此在选择直流设备时需根据

海洋环境湿度高、盐雾重、易发生震动等因素对设备进行要求，并将其布置于户内，以减轻环境的影响。

3 电气平面布置

海上换流站的平面布置，应从紧凑型的角度出发，根据电气主接线方案、建设条件、噪音控制、出线方向等条件进行综合考虑，主要考虑以下因素：

- 1) 功能分区明确、合理，不宜功能混杂或凌乱，造成运行、维护的不便。
- 2) 工艺流程紧凑、顺畅、合理，方便接线，不能出现工艺迂回、接线困难。
- 3) 布置紧凑、合理，充分考虑施工、设备安装、运行维护的便捷性，不能一味追求紧凑而造成施工、运行维护不便。
- 4) 与周围环境友好、协调，不能影响周围工作人员的生活。
- 5) 布置优化，节能节地。

海上换流站布置中，应尽量考虑易实现电气连接，避免迂回、曲折，为节省占地，应考虑多层布置，而不是陆上换流站常用的单层布置：

- 1) 当变压器、阀电抗器布置在一层时，为使流程顺畅，接线简洁、明晰，则交流场区域宜整体布置在同一层。
- 2) 考虑交流场区域与阀厅和直流场的整体尺寸相当，为节约占地，当交流场区域布置在首层时，阀厅和直流场宜布置在二层。
- 3) 考虑到每层都有与其相关联的功能房间，则各层设置功能房间区域。

换流站每层平面布置及接线工艺规划如图2所示。

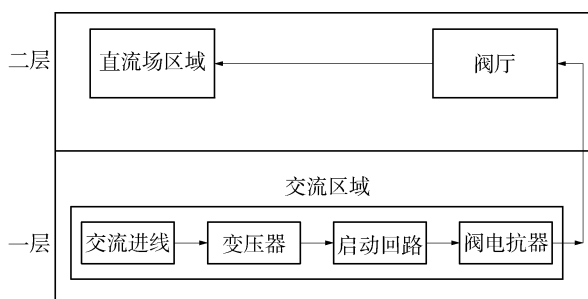


图2 换流站平面布置及接线流程工艺规划图

Fig. 2 Layout and wiring process of converter station

4 二次系统

海上平台换流站具有无人值守、离岸距离远、运行环境恶劣、检修维护不便、发生故障经济损失大、布局紧凑等特点，因此海上平台换流站二次系统设计相对于传统陆上换流站具有一定的不同，主要体现在：

- 1) 设备布置更紧凑：海上平台换流站空间有限，设备的布置应综合考虑规程规范要求 and 工程实际。
- 2) 设备抗盐雾能力要求高：海上平台换流站所处自然环境恶劣，尽管设备布置在房间内，但仍应在设计阶段充分考虑设备防盐防腐的要求。
- 3) 设备防潮能力要求高：根据相关规范，各类电气设备均需配置空间加热装置或采用防护等级高的设备，以防止高度潮湿环境对设备造成的影响。
- 4) 监控系统功能更完备：配置了完善的计算机监控系统、视频监控及安全警卫系统、电气设备状态监测系统，确保在远方能够实现主要电气设备的集中监控，并在故障发生极早期得到及时的预警预报。
- 5) 远动和通信设备的可靠性更高：远动装置和通信设备双重化配置，设置无线通信设备作为海底电缆光纤通信的备用。
- 6) 火灾自动报警要求更高：采用灵敏度更高的火灾探测器，用于火灾极早期的报警，并设置多级报警联动逻辑，以避免自动灭火系统的误动。
- 7) 直流系统和 UPS 系统后备时间更长、可靠性要求更高：直流系统和 UPS 系统后备时间按 4 小时考虑，充分考虑设备冗余，确保事故期间监控、通信及火灾报警设备处于正常工作状态。

5 结论

本文重点介绍了适用于海上平台柔性直流换流站的工程应用技术看方案，论述了包括拓扑结构、主要电气设备选型、电气平面布置以及二次系统在内的海上平台换流站的工程应用方案。

随着柔性直流输电技术的不断发展，因其具有较强的远距离输电能力以及灵活的有功和无功控制能力，作为大陆电网对海上平台供电方式具有一定的优势，不仅能够提高供电可靠性，为系统提供优异的并网性能和较强的抗干扰性能，满足对暂稳态

性能的要求,而且还能有效节约发电成本,改善海上平台对海洋环境的影响。因此,可以预见采用柔性直流输电技术对海上平台进行供电将发挥很好的经济效益和社会效益,为我国海上资源开发和沿海发展提供重要的助力。

参考文献:

- [1] 吴锋,胡辉,胡鹏,等.海上油气田电力组网技术研究与实践[J].中国海上油气,2010,22(1):54-58.
WU F, HU H, HU P, et al. Study and practice of power group network technology for offshore oil and gas fields [J]. China Offsh Ore Oil and Gas, 2010, 22(1): 54-58.
- [2] 李强,李鑫,魏澈.海上油气田群电力组网技术[J].中国造船,2011,52(7):218-223.
LI Q, LI X, WEI C. Power grid interlinking technology for offshore oil fields [J]. Shipbuilding of China, 2011, 52(7): 218-223.
- [3] 董玉龙,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): 21-26.
- [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,2010:72-76.
- [5] 汤广福,贺之渊,庞辉.柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J].电力系统自动化,2013,37(15):3-14.

- TANG G F, HE Z Y, PANG H. Research application and development of VSC-HVDC engineering technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [6] 刘钟淇.基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统研究[D].北京:清华大学,2010.
- [7] 徐政,屠卿瑞,管敏渊,等.柔性直流输电系统[M].北京:机械工业出版社,2013.
- [8] 徐政,薛英林,张哲任.大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5051-5062.
XU Z, XUE Y L, ZHANG Z R. VSC-HVDC technology suitable for bulk power overhead line transmission [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5051-5062.
- [9] 郑明.300 MW海上风电场电气主接线设计[J].南方能源建设,2015,2(3):62-66.
ZHENG M. Electrical single-line diagram design of a 300 MW offshore wind farm [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(3): 62-66.
- [10] 钟杰峰,陈丽萍,袁康龙,等.多端柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J].南方能源建设,2015,2(Supp.1):42-45.
ZHONG J F, CHEN L P, YUAN K L, et al. Analysis on present situation and application prospect of VSC-MTDC technology [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2 (Supp. 1): 42-45.

(责任编辑 郑文棠)

(下接第74页 Continued from Page 74)

- [2] 丁晓兵,赵曼勇,皮显松,等.防止交流串入直流导致母线保护误动的措施[J].电力系统保护与控制,2008,36(22):97-99.
DING X B, ZHAO M Y, PI X S, et al. Treatments to avoid misoperation of busbar protection when AC flows into DC circuit [J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(22): 97-99.
- [3] 曹景玉,郑文敬,田峰.交流混入直流引起开关跳闸的原因分析及防范[J].电力安全技术,2010,12(11):31-32.
- [4] 孟凡超,高志强,杨书东.交流串入直流回路引起开关跳闸的原因分析[J].继电器,2007,35(14):77-78.
MENG F C, GAO Z Q, YANG S D. Analysis of the tripping of the circuit breaker by the AC in the DC [J]. Relay, 2007, 36(22): 97-99.
- [5] 吴剑鸣,严正.控制电缆的分布电容对继电保护的影响及防范措施[J].电力自动化设备,2007,27(11):115-121.

- WU J M, YAN Z. Influence of control cable distributing capacitance on protection and its countermeasures [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(11): 115-121.
- [6] 高旭,青桂仙,孙集伟,等.一起典型的500 kV失灵保护误动分析[J].电力系统自动化,2007,31(8):104-106.
- [7] 王振彦.直流接地引起断路器跳闸情况分析[J].上海电力,2001(1):15-16.
- [8] 周卫,杨理才.直流系统分布电容对断路器跳闸的影响分析[J].广西电力,2013,36(3):64-66.
ZHOU W, YANG L C. Influence of DC system distribution capacitance on breaker tripping [J]. GuangXi Electric Power, 2013, 36(3): 64-66.
- [9] 姜玉龙,贾晋,史凤娟.继电保护交直流串扰原因分析及解决措施[J].电工技术,2010(2):13-15.
- [10] 中国南方电网电力调度通信中心.南方电网继电保护通用技术规范[M].北京:中国电力出版社,2012.

(责任编辑 黄肇和)