

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.006

海上柔性直流换流站关键电气设备选型研究

郝为瀚, 周钰

(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]对于海上柔性直流换流站而言, 环境条件恶劣, 施工困难, 主设备的选择对换流站整体布局影响较大, 合理的选择关键设备的型式对提升换流站的可靠性、减少施工及维护检修工作以及降低工程总体造价具有重要作用。[方法]通过分析海上柔性直流换流站的主回路关键设备构成, 结合海上换流站的运行特点要求加以分析研究。[结果]阐述了海上柔性直流换流站的设备选型原则, 重点分析研究了换流站关键电气设备的型式选择方案及依据, 提出具有指导意义的研究结论。[结论]研究结果为海上换流站工程提供重要设计和应用依据。

关键词: 海上柔性直流换流站; 主回路关键电气设备; 设备选型

中图分类号: TM7; TM721.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)01-0031-05

Research on the Selection of Key Electrical Equipments in Offshore VSC-HVDC Converter Station

HAO Weihang, ZHOU Yu

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

Abstract: [Introduction] For offshore VSC-HVDC converter stations, the environmental conditions are harsh and the construction is difficult. The selection of the main equipment has a great influence on the overall layout of the converter station. Reasonable selection of the key equipment will increase the reliability of the converter station and reduce construction costs, reducing maintenance work and the overall cost of the project. [Method] Analysing the composition of key equipment of the main circuit and the operational characteristics of offshore VSC-HVDC converter station. [Result] By focusing on the analysis of the type selection scheme and basis, we demonstrate the principle of equipment selection for offshore VSC-HVDC converter station. [Conclusion] The research conclusions is instructive and provide important design and application basis for the offshore converter station project.

Key words: offshore VSC-HVDC converter station; key equipment of main circuit; selection of equipment

随着柔性直流输电技术的不断发展, 以及远海风电的大规模开发, 柔性直流技术作为远海送电的唯一选择, 必将实现快速的技术发展^[1]。对于海上柔性直流换流站而言, 环境条件恶劣, 施工困难, 主设备的选择对换流站整体布局影响较大, 合理的选择关键设备的型式对提升换流站的可靠性、减少施工及维护检修工作以及降低工程总体造价具有重要作用^[2]。因此有必要进行关键电气设备选型的研

究, 对设备设计制造提出一定的要求, 进行适当的优化设计, 使电气设备适合海上变电站的需要。

海上布置的换流站的建设成本较高、难度较大, 换流站承台的面积是由电气设备的布置决定, 同时海上承台对电气设备布置提出了很高的要求和大量的限制条件^[3], 有些电气布置较为合理时, 承台结构也能满足但是这时的结构设计不够合理或者土建费用增加很多。因此, 外部环境对海上换流站的电气设备选型提出了很多要求。

本文结合海上换流站建设的需要, 根据海上平台的环境特点和运行要求, 研究海上柔性直流换流站设备选型的适用原则, 分析换流站关键电气设备的型式和使用情况, 采用电气设备方案进

收稿日期: 2018-05-29 修回日期: 2018-09-11

基金项目: 中国能建广东院科技项目“百万千瓦级海上柔性直流输电平台研发”(EV04841W)

行分析比较,提出关键电气设备型式的选择建议和要求。

1 海上柔性直流换流站的关键电气设备

海上柔性直流输电系统结构如图1所示,由陆上换流站、直流线路、海上换流站组成。

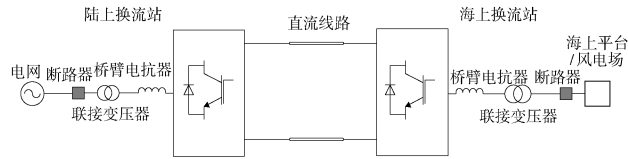


图1 海上柔性直流输电系统

Fig. 1 Offshore VSC-HVDC system

其中海上换流站关键电气设备包括:电压源换流阀、联接变压器、联接变阀侧交流设备、交流开关设备等^[4]。设备的主要功能如下:

1) 电压源型换流器

电压源型换流器是柔性直流系统中最核心的设备,是实现交流和直流系统之间转换的关键设备。目前主要采用的为两电平、三电平及模块化多电平拓扑结构^[5]。

2) 联接变压器

联接变压器是柔性直流输电系统中核心的设备,其电网侧与交流场相联,换流阀侧和换流器相联,是交直流两侧功率输送的纽带^[6]。

3) 联接变阀侧交流设备

联接变阀侧交流设备主要包括桥臂电抗器和启动电阻。

桥臂电抗器是柔性直流换流站的一个非常关键的部件,决定换流器的功率输送能力,同时也影响有功功率与无功功率的控制,并可抑制换流器输出的电流和电压中的开关频率谐波量和短路电流^[7-9]。

启动电阻主要作用时降低功率模块电容的充电电流,减小充电时交流系统造成的扰动,并减小对功率模块中二极管的电流应力^[10]。

4) 交流开关设备

柔性直流换流站开关设备作用与常规直流换流站的开关设备作用相同,主要用于将故障的柔性直流换流站从系统中切除或将恢复正常的换流站重新投入系统中。

2 电气设备选型的基本原则

海上柔性直流换流站设计时应综合考虑海洋特

殊的环境条件、设计施工的特点和运行维护的要求,实现功能分区,并选择合理的电气设备型式^[11]。设备选型的基本要求可从如下几点考虑:

1) 海上换流站及生产辅助设施的设计应满足运行与维护的基本要求。电气设备的设计、制造与安装应考虑安全和便于检修,注重模块化、小型化、无油化、自动化、免维护或少维护的技术方针,选择性能优越,可靠性高,免维护或少维护,能满足潮湿重盐雾等恶劣环境条件下稳定运行要求的设备^[12]。

2) 海上换流站主要电气设备设计应充分考虑到设备尺寸问题。海上平台造价高昂,运输及施工难度大,复杂程度高,且海上环境复杂,设备可利用空间小,因此设备的紧凑化设计必须考虑,以减小占地面积。

3) 海上换流站运行模式原则上按无人值班远方监控设计。二次系统应遵循标准化设计、模块化设备、小型化设备的原则。

4) 海上换流站工程的电气主设备设计寿命不小于30年。

3 电压源换流阀选型

3.1 功率器件

柔性直流换流阀中的核心设备是半导体功率器件,功率器件一般采用绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)^[13]。由于IGBT运行稳定可靠、供应厂商广泛等优势,其技术发展迅速,本体性能已经到达4.5 kV/3 kA的等级,国内各主流制造商均选择了IGBT器件作为主要技术发展路线,在柔性直流输电工程中占绝对主导地位。

在IGBT的种类上,包括适用于二电平、三电平拓扑和级联二电平拓扑的压接式IGBT,以及适用于MMC及其类似拓扑的模块式IGBT。其中模块IGBT是当前IGBT主流方案,供应商也均为主流的IGBT厂商。但是会引起损坏开路模式和可能爆炸,需要设计额外的旁路保护电路,并且在机械结构设计上也要考虑保证旁路电路不受IGBT爆炸的影响。

在IGBT选型时,应保证IGBT的电压和电流不超过器件的安全工作区域(SOA),避免器件产生损坏。

考虑电路的杂散参数等因素, 一般情况下 IGBT 的运行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 $1/2 \sim 2/3$ 左右。

3.2 换流阀型式

换流阀的型式可以选择悬挂式, 也可以选择立式(支撑式)。考虑海上换流站的环境运行特点, 需要考虑长期的海浪影响以及大风情况, 选择抗震性能较好的悬挂式是更好的型式方案。而且, 目前已投运工程中海上换流站的换流阀都是采用悬挂式布置, 一方面是受欧洲厂家本身设计方案的影响, 一方面也是考虑悬挂式布置具备良好的抗震条件。

另外, 由于 MMC 拓扑结构的特点, 其换流阀本体体积及重量较高, 国内主流厂家及部分国外厂家在陆上换流站基本采用立式布置。若在海上换流站也采用立式布置, 需要进行严格的抗震校验, 并提出详细的抗震要求。

4 联接变压器选型

柔性直流输电系统中使用的联接变压器和普通的电力变压器结构基本相同, 但是由于两者的运行条件存在一定的差异, 所以在联接变压器的设计、制造和运行中也不尽相同^[14]。

另外对于用于海上换流站的变压器的设计, 从主变本体型式及冷却系统设计均有更高的要求。

4.1 绕组配置

联接变压器为考虑消除零序分量, 隔离变压器两端零序分量的相互影响, 实际工程中多为 Y_n/Y 或 Y_n/Δ 接法。

4.2 过负荷要求

海上换流站联接变压器设计, 应充分考虑到负荷随机性强、间歇性明显, 波动大, 波动频率也无规律性等特点, 因此过负荷能力的提高是确保海上换流站安全可靠性的前提条件之一。

联接变压器设计必须考虑到: 控制合理的负载损耗(精确量化的漏磁场计算用于附加损耗控制)、高、中、低线圈电密的均衡, 避免出现各线圈温升失衡, 合理配置线圈冷却油道, 计算并调整合理的各线圈中油流分配, 使线圈的冷却效果达到最佳。合理设计导线线规, 有效降低涡流损耗、杂散损耗, 控制最热点温升; 所有的线圈全部采用完全换位, 消除环流; 有效控制及精确计算绕组漏磁通; 有效控制及精确计算由漏磁通在油箱夹件等结构件

表面产生的附加损耗并采取相应的措施。

4.3 结构型式

根据海上平台输电系统的一般规模和容量来看, 联接变压器宜选用三相变压器, 以减小占地与造价。联接变压器设计, 还应充分考虑到主变尺寸问题, 布置条件受限, 因此联接变压器的紧凑化设计必须考虑, 以减小占地面积。

联接变压器设计必须考虑:

- 1) 联接变压器内、外部所有电气距离精确计算以选取最佳绝缘距离。
- 2) 优化器身尺寸, 优化线圈间距离。
- 3) 优化相间距离, 优化线圈饼、层间距离。
- 4) 正确选取合适的线规、电磁线形式及线圈形式以提高窗口利用系数。
- 5) 精确计算线圈与上下铁轭距离。
- 6) 精确分析计算电场强度及磁场强度, 确定最佳的器身至油箱及结构件距离, 并可采取相应措施以减小相应尺寸。

4.4 联接变压器的散热

目前大容量变压器均采用油绝缘, 其体量在额定容量下变化很小, 决定海上换流站联接变压器选择的关键因素是散热方式。

用于海上换流站的油绝缘变压器主要可考虑三种散热方式: 第一种是片式散热器技术, 第二种是油循环油冷技术, 第三种是油水循环技术。比较这三种技术而言, 油-水循环或油-油循环技术均比较复杂, 而油循环自冷技术则比较简单。

采用油循环自冷技术是直接把散热器布置在变压器本体上, 这种类型变压器省却了油水混冷换热器及水冷系统, 因而简单得多。大容量的主变产生的损耗相当大, 散热量非常大, 因此需要的散热器体积大, 占地面积大, 如采用一体化的变压器, 变压器的散热器在主变本体上, 布置在主变室, 由于变压器热量较大, 需要很大的通风量才能带走热量, 将大大增加通风系统的负载; 由于海上环境恶劣, 重盐雾潮湿, 腐蚀性强, 主变可考虑采用分体式布置, 将主变本体密封在房间内, 减小盐雾对主变本体的影响, 另一方面将散热器分体布置在户外, 不影响散热效果。虽然户外环境对片式散热器耐腐蚀要求大大增加, 可考虑如增加防腐涂层厚度或增加散热片的冗余度。由于散热器户外布置, 也便于散热器的更换。

考虑到海上恶劣运行环境和海上换流站布置紧凑的特点,采用强迫油循环冷却器也是一种不错的选择,冷却器可考虑和主变本体分体式布置,将主变本体封闭在主变室内,有效阻隔海上环境的高湿度和重盐雾的腐蚀侵害;冷却器布置在户外,便于冷却器的通风散热和运行维护,同时也可减小散热器的占地面积。考虑到盐雾环境对散热器的腐蚀,一旦冷却器损坏,对散热效果影响较大,需加强对冷却器的防腐蚀措施和运维管理。

4.5 联接变压器的防火设计

海上平台空间有限,一旦发生火宅事故容易升级和蔓延,同时,平台远离陆地,应急救援不便,甚至可能因为天气原因使得工作人员无法到达平台处理事故,因此变压器应选用高燃点变压器油,不可使用常规的矿物变压器油,尽可能降低平台的火宅风险。合成酯类油和硅油适合作为海上平台的变压器用油,大分子烃类油和植物油则不适用。

同样,为了尽量减少平台上的带油设备,降低火宅风险,变压器必须采用真空型有载调压开关机构。

5 换流变阀侧交流设备选型

5.1 桥臂电抗器

桥臂电抗器的选型需要考虑减小反馈到交流系统的谐波,要求电抗器的杂散电容较小。为了减小换流器阀每个开关过程产生的高 du/dt 对换流器阀的强应力,应该尽量使用干式空心电抗器,避免使用油浸式电抗器。

同时,除相电抗的电感参数外,在设计连接电抗时还必须考虑到其电流承受能力。除额定的工频电流外,应用于换流器的连接电抗器还会承受一定的高频谐波电流,这主要是由于换流器脉冲控制的谐波电压所带来的。高频谐波电流对于电抗器的发热有较大的影响,在设计电抗器时必须根据运行时所可能出现的最大谐波电流值及其对应频率进行专门设计。

5.2 启动电阻

在柔性直流输电系统在启动时,交流系统会通过功率模块中的二极管向直流电容充电,此时相当于一个不控整流电路。由于换流器直流侧电容器容量较大,而且各滤波器组中也都含有电容器,因此在交流侧断路器闭合时,会在功率模块内的电容器

上产生较大的暂态恢复电压及冲击电流。

因此有必要在主回路中加装一个缓冲电路,较小上述情况对柔性直流输电系统的影响。通常考虑在联接变压器的网侧或阀侧设置一个启动电阻,降低功率模块电容的充电电流,减小充电时对交流系统造成的扰动,并减小对功率模块中二极管的电流应力。

柔性直流系统在作为 STATCOM 运行时,交流电流为纯电容或电感电流。国标《高压交流断路器》(GB 1984—2003)对 110 kV ~ 500 kV 断路器的容性电流开断能力为 400 A,咨询国内外断路器厂家,一般厂家的型式试验报告均按此要求进行产品试验,同时表示国标对该要求的设定主要考虑试验条件的限制,实际上断路器的容性开断能力要大于该值。关于交流断路器容性电流开断能力,在具体工程设计中需加以注意。

6 交流开关设备选型

交流侧断路器及开关设备是从交流系统进入柔性直流输电系统的入口,其主要功能是连接或断开柔性直流输电系统和交流系统之间的联系。

6.1 35 kV GIS 开关柜

根据海上平台输电系统交流电压等级,换流站交流侧开关一般最高不超过 35 kV,考虑 35 kV 配电装置的应用情况,换流站交流侧开关可采用 35 kV 气体绝缘开关柜。

由于海上平台群规模可能比较大,再计及主变进线及分段等间隔,35 kV 部分有 10 余个间隔,35 kV 气体绝缘开关柜将减少配电装置室的建筑面积。空气绝缘开关柜单个间隔尺寸为 1.2 m × 2.565 m,而气体绝缘开关柜单个间隔尺寸为 0.6 m × 1.7 m,可见采用气体绝缘开关柜后配电装置室面积小,布置安排也比较方便。

目前主流设备厂家 35 kV GIS 情况如表 1 所示。

6.2 中/高压配电柜

中/高压配电柜为室内安装,金属外壳,其防护等级至少为 IP32。新建平台 35 kV 配电盘为充气金属开关柜,主开关采用真空式,10.5 kV 配电盘可采用铠装移开式金属封闭开关柜,主开关可采用真空式,电机的主回路可采用真空接触器加熔断器的形式。

表1 40.5 kV 气体绝缘开关柜外形尺寸比较

Tab. 1 Comparison of dimensions of 40.5 kV gas-insulated switchgear

厂家	型号	绝缘气体	额定电流/A	短路开断电流/kA	外形尺寸/mm
ABB	ZX2	SF6	630~2 000	31.5	600×2 300×1 710
			2 500	31.5	800×2 300×1 710
西门子	8DA10	SF6	~2 500	31.5	600×2 350×1 625
施耐德	WS	SF6	630~2 000	31.5	600×2 400×1 200
			2 500	31.5	900×2 780×1 380

7 结论

本文通过海上柔性直流换流站的主回路关键设备构成, 结合海上换流站的运行特点要求, 阐述了海上柔性直流换流站的设备选型原则, 重点分析研究了换流站关键电气设备的型式选择方案及依据, 提出具有指导意义的研究结论, 为海上换流站工程提供重要设计和应用依据。

海上换流站的关键电气设备的电气参数的选择方案可根据丰富的陆上换流站的经验基础进行优化选择, 但海上换流站电气设备的核心关键技术是适用于海洋环境的电气设备的型式选择。合理的设备型式不仅可以保障工程造价的经济性、建设的便捷性, 更可以保障运行的安全性和维护的快捷性。

随着柔性直流输电技术的不断发展, 以及远海风电的大规模开发, 柔性直流技术作为远海送电的唯一选择, 必将实现快速的技术发展。因此, 对柔性直流换流站的电气设备提出型式上的合理化的分析和建议是促进远海风电送出的重要环节, 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] 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.
- [2] 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 Offshore Oil and Gas, 2010, 22(1): 54-58.
- [3] 郝为瀚. 海上平台柔性直流换流站工程应用方案研究 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(1): 66-70.

HAO W H. Research on VSC-HVDC converter station application on offshore platform [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(1): 66-70.

- [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] 李岩, 罗雨, 许树楷, 等. 柔性直流输电技术: 应用、进步与期望 [J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 7-13.
LI Y, LUO Y, XU S K, et al. VSC-HVDC transmission technology: application, advancement and expectation [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 7-13.
- [6] 刘钟洪. 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] 马为民, 吴方劫, 杨一鸣, 等. 柔性直流输电技术的现状及应用前景分析 [J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2429-2439.
MA W M, WU F J, YANG Y M, et al. Flexible HVDC transmission technology's today and tomorrow [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2429-2439.
- [8] 葛维春, 顾洪群, 贺之渊. 大连跨海柔性直流输电科技示范工程综述 [J]. 东北电力技术, 2012, 33(2): 1-4.
GE W C, GU H Q, HE Z Y. Overview on Dalian flexible HVDC transmission demonstration project [J]. Northeast Electric Power Technology, 2012, 33(2): 1-4.
- [9] 乔卫东, 毛颖科. 上海柔性直流输电示范工程综述 [J]. 华东电力, 2011, 39(7): 1137-1140.
- [10] 宋海彬, 戴甲水, 郭莉萨, 等. 柔性直流输电系统启动回路中启动电阻的研究 [J]. 贵州电力技术, 2017, 20(2): 65-69.
- [11] 张明, 张哲, 叶军. 海上风电场升压平台布置研究初探 [J]. 上海节能, 2015(2): 80-84.
- [12] 郗鑫, 张哲, 胡君慧, 等. 海上风电场升压变电站电气布置研究 [J]. 供用电, 2015(1): 64-67.
- [13] 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(增刊1): 38-45.
- [14] 魏澈, 王建丰, 张研, 等. 集装箱式海上柔性直流输电方案探讨 [J]. 供用电, 2015(3): 62-65.

作者简介:



HAO W H

郝为瀚(通信作者)

1984-, 男, 内蒙古包头人, 高级工程师, 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。

周钰

1986-, 女, 江西九江人, 高级工程师, 硕士, 主要从事电池储能技术、微网技术、大型输变电工程设计工作 (e-mail) zhouyu2@gedi.com.cn。

(责任编辑 郑文棠)