

# 广州换流站柔性化改造设计方案研究

简翔浩<sup>1,✉</sup>, 卢毓欣<sup>2</sup>, 郝为瀚<sup>1</sup>, 彭冠炎<sup>1</sup>

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510633; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510080)

**摘要:** [目的] 为避免高压直流受端换流站逆变器换相失败, 同时提高受端换流站交流系统的电压稳定性, 研究将天广直流受端广州换流站改造为柔性直流换流站, 并扩容为3 GW的可行性。[方法] 基于满足柔性直流输电的各种运行方式、便于扩容、适应设备研发水平, 以及充分利用现有设备及建筑, 减少改造的难度和费用, 研究对比了不同换流阀拓扑结构、功率模块拓扑结构, 研究了启动回路设置、直流场电气接线、联接变压器型式等。[结果] 研究分析表明, 扩容改造方案推荐每极采用1个1.5 GW换流阀、半桥-全桥功率模块混合型式、对称双极接线、启动回路设置在阀侧、横向尺寸大的联接变压器。[结论] 该研究为现有常规直流输电换流站改造为柔性直流输电换流站提供改造思路和方法。

**关键词:** 混合直流输电; 柔性直流换流站改造; 半桥-全桥子混合型模块; 启动回路

中图分类号: TM7; TM721.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)04-0054-07

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research on Design of Guangzhou LCC-HVDC Converter Station Retrofit for VSC-HVDC Converter Station

JIAN Xianghao<sup>1,✉</sup>, LU Yuxin<sup>2</sup>, HAO Weihao<sup>1</sup>, PENG Guanyan<sup>1</sup>

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

2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** [Introduction] In order to avoid the commutation failures of receiving end converter station in LCC-HVDC transmission systems, and to improve the voltage stability of receiving end converter station AC system, The research retrofitted Tianguang HVDC receiving end converter station for VSC-HVD, and expansion to 3 GW. [Method] Based on meeting the various operation modes of flexible DC transmission, facilitating capacity increase, adapting to the level of equipment research and development, and making full use of existing equipment and buildings to reduce the difficulty and cost of transformation. Research compared different converter valve topologies and submodule topologies, studied the setting of the start-up circuit, the electrical wiring of the DC field, and the type of interface transformer. [Result] Research and analysis show that the capacity-increasing transformation plan recommends the use of a 1.5 GW converter valve per pole, half bridge-full bridge submodule hybrid type, symmetrical bipolar wiring, start-up circuit set on the side of the valve, large transverse size connection transformer. [Conclusion] This research provides the ideas and methods for the transformation of existing of the existing LCC-HVDC converter station retrofit for VSC-HVDC converter station.

**Key words:** hybrid HVDC transmission systems; retrofit for VSC-HVDC converter station; half bridge-full bridge submodule hybrid type; start-up circuit

常规直流输电在大容量远距离输电以及异步电网背靠背互联等场合有成熟的应用, 但存在着的逆

变电站换相失败、无法对弱交流系统供电、运行过程中需要消耗大量无功功率等缺陷, 制约其进一步发展。

柔性直流输电系统基于IGBT(绝缘栅双极晶体管)电压源换流器VSC, 因此不存在逆变站的换相失败问题, 能抑制甚至避免常规直流多馈入系统

收稿日期: 2020-10-18 修回日期: 2020-11-05

基金项目: 南方电网公司重点科技项目“大容量高电压柔性直流输电关键技术及工程应用研究”

的继发性换相失败问题, 不需要考虑直流系统的潮流反向功能。

混合直流输电系统的一端采用基于晶闸管的电网换相换流器LCC, 另一端采用VSC, 技术综合了两种直流输电技术的优点, 利用VSC快速启动LCC, 参与电网大停电后的恢复, 可以显著改善恢复过程中的波动幅度并减小暂态过程持续时间<sup>[1-2]</sup>, 控制高度灵活且成本相对较低, 在可再生能源发电的能量汇聚、异步电网互联以及远距离输电方面有很好的应用前景<sup>[3]</sup>。

天广直流2001年6月投产, 是国内第2条投产的高压直流输电工程, 运行时间较长; 受端广州换流站位于珠江三角洲负荷中心, 额定电压 $\pm 500$  kV, 容量1.8 GW, 容量较小。为避免广州换流站逆变器换相失败问题, 提高输电的可靠性, 为电网提供无功功率支撑, 提高交流系统的电压稳定性, 同时增大输送容量, 研究将天广直流改造为送端为常规直流, 受端为柔性直流的高压混合直流输电系统的可行性。

受端广州换流站柔性化改造设计方案综合考虑系统运行方式、设备研发水平, 以及充分利用现有设备及建筑, 减少改造的难度和费用。

## 1 换流阀拓扑结构

天广直流为长架空线送电, 输送距离960 km, 为提高运行稳定性、供电可靠性, 采用对称双极接线。柔性化改造仍采用对称双极接线, 单极容量1.5 GW, 直流额定电压 $\pm 500$  kV。输电结构示意图如图1所示。

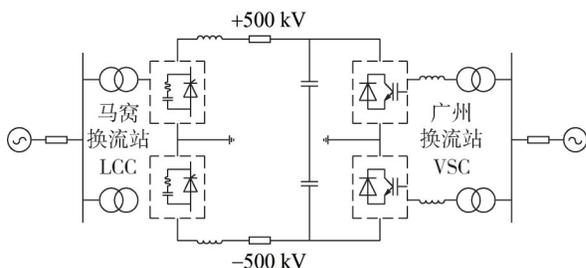


图1 LCC-VSC混合直流输电结构示意图

Fig. 1 Hybrid HVDC transmission structure

换流阀拓扑结构可分为每极1个1.5 GW换流阀和每极2个750 MW换流阀两种方案。

### 1.1 每极1个1.5 GW换流阀

换流阀单极由1个1.5 GW柔性直流单元组成, 直流额定电流为3 kA, 换流阀需采用额定电流3 kA的功率模块, 单极换流阀组可布置于1个阀厅内, 如图2所示。

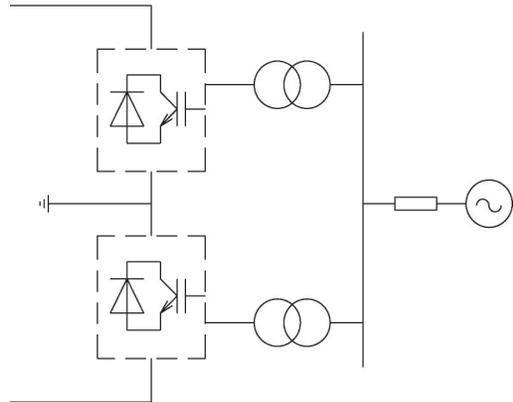


图2 每极1个1.5 GW换流阀

Fig. 2 One 1.5 GW converter valve per pole

### 1.2 每极2个750 MW换流阀

换流阀单极由2个750 MW的柔性直流单元并联组成, 每单元直流额定电流为1.5 kA, 单极换流阀组需布置于2个阀厅内, 如图3所示。

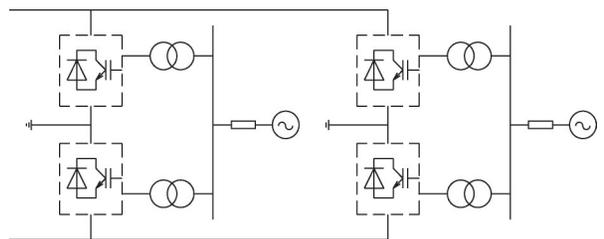


图3 每极2个750 MW换流阀

Fig. 3 Two 750 MW converter valves per pole

### 1.3 方案比较

常用的高压IGBT器件的标称电压等级主要有3.3 kV、4.5 kV和6.5 kV。在实际设计时, 考虑到开关器件开关动作时产生的尖峰电压, 以及直流电容电压上存在的波动, 在选择器件电压等级时需要考虑1.5~2.0倍的裕量。IGBT器件所标称的电流值通常是指所能持续流过的有效值电流, 这个电流主要受到器件发热的限制, 一般在使用IGBT器件时也会考虑到使其电流承受能力有1.5倍~2.0倍裕量。

两种换流阀拓扑结构, 考虑器件的可选性, 开关器件参数如表1所示。

由于采用换流阀并联的方案直流电压并没有降

表1 开关器件参数

Tab. 1 Switching device parameters

额定容量/ MW	额定电流/ kA	桥臂电流/ kA	开关器件参数	
			额定参数	实际利用电压/kV
1 500	3	2. 808	4. 5 kV/3 kA	2. 25
750	1. 5	1. 404	4. 5 kV/2 kA	2. 25

低, 仍为 $\pm 500$  kV, 而功率模块的数量主要是根据直流电压的要求而选择, 因此采用换流阀并联的方案对于换流阀来说额定电流小了一半, 但功率模块

的数量增加了一倍, 而两种开关器件的尺寸相差少, 因此两种方案的单个阀厅占地面积相差很少, 并联方案阀厅总面积增加约一倍。

4.5 kV/2 kA 的功率器件已在多个工程成熟应用, 而额定电流 3 kA 的功率器件在张北柔性直流工程和昆柳龙工程中应用, 中车的压接式 IGBT 也试点应用在上述 2 个工程中, 已应用 2 370 只, 目前在投项目运行良好。

两方案的对比如表 2 所示。

表2 换流阀拓扑结构对比

Tab. 2 Comparison of topological of converter valve

项目	单换流阀	双换流阀
功率器件	IGBT, 4. 5 kV, 3 kA	IGBT, 4. 5 kV, 2 kA
阀厅	2×(长 53~57 m, 宽 84~89 m), 阀冷却系统、 阀厅空调对应每个阀厅	4×(长 53~57 m, 宽 84~89 m), 阀冷却系统、 阀厅空调均对应每个阀厅
交流侧设备	启动回路及换流变压器等交流侧设备按 2 套配置	启动回路及换流变压器等交流侧设备按 4 套配置
换流变进线	使用 2 回 500 kV 交流进线	使用 4 回 500 kV 交流进线, 进线难度大
技术成熟度	国内已有 2 个项目应用, 国产化器件已试点应用	较高, 有多个国内外工程应用
控制保护	成熟	2 个柔性直流单元并联组成, 控制策略难度加大

由于在原换流站进行改造, 为尽量增大容量, 而少增加用地, 且改造过程尽量利用原站设备, 并对站内已有设备影响小, 同时在造价、控制策略上有优势, 开关器件国产化也已取得较好的成果, 推荐每极 1 个 1.5 GW 换流阀的换流阀拓扑方案。

## 2 功率模块拓扑结构

由于原常规直流出线是远距离架空线出线, 线路较容易发生故障, 受端换流站改造为柔性直流后需考虑直流短路电流的限制方案。目前限制直流短路电流的方案主要是通过采用新型拓扑结构的功率模块(如全桥结构、钳位双子模块等)或加装直流线路开断设备(如直路断路器等), 由此功率模块可根据需求分为如下方案:

### 2.1 半桥结构+直流断路器

半桥结构是柔性直流最常用的拓扑结构, 拓扑结构如图 4 所示。国内目前所有的柔性直流工程均采用该结构, 但应用在长距离架空送电时, 当直流侧发生故障, 对于采用半桥拓扑结构形式的换流阀, 全控型开关器件所反并联的续流二极管容易构成故障点, 与交流系统直接连通的能量回馈回路, 无法单纯依靠换流阀动作完成直流侧故障电流的清

除。因此, 可额外通过在极线配置直流断路器, 形成“半桥结构+直流断路器”的拓扑结构, 来实现限制短路电流的目的<sup>[4]</sup>。

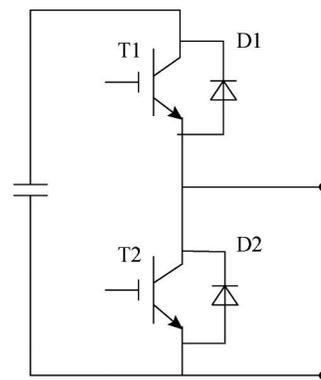


图4 半桥子模块拓扑结构

Fig. 4 Half-bridge submodule

直流断路器运行较为灵活, 功率模块可保持半桥结构不变, 是目前在低电压等级直流工程中限制直流短路电流的主流方案。随着 IGBT 功率器件的快速进步和成熟应用, 高压直流断路也走向成熟, 舟山柔性直流 2016 年 12 月加装了 $\pm 200$  kV 混合式直流断路器, 南澳柔性直流 2017 年 12 月加装了 $\pm 160$  kV 机械式直流断路器, 张北四端柔直 2020 年 6 月投入 $\pm 500$  kV 混合式、负压耦合式和机械式直流断

路器。

### 2.2 半桥-全桥混合结构

全桥结构的功率模块在发生短路情况下, 可产生反由于采用了全桥结构, 功率模块中功率器件数量是半桥结构的 2 倍, 且模块内需配置更大容量的直流电容器投资向电流用于限制短路电流, 拓扑结构如图 5 所示。

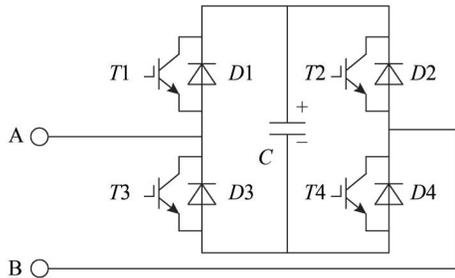


图 5 全桥子模块拓扑结构  
Fig. 5 Full-bridge submodule

为降低造价和损耗, 可部分采用半桥结构, 构成半桥-全桥混合结构<sup>[5-6]</sup>, 该结构成熟, 可实施性高。在±800 kV 龙门换流站和±800 kV 柳北换流站中采用全桥功率模块数量 80% 的半桥-全桥结构混合型式。

### 2.3 钳位双子模块结构

钳位双子模块是在全桥结构上的一种优化, 在继承了全桥结构的优点的情况下, 还具备直流侧故障自清除能力, 拓扑结构如图 6 所示。但相对全桥结构的阀组占地面积和投资都有所增加, 且目前该模块还停留在技术理论阶段, 还没有主流技术厂商以此为核心技术路线进行研发工作, 因此在未来几年的应用情况尚不明朗<sup>[7-8]</sup>。

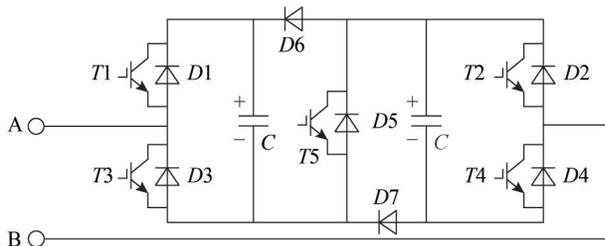


图 6 钳位双子模块拓扑结构  
Fig. 6 Clamping double submodule

### 2.4 比较

三种拓扑结构比较如表 3 所示:

半桥-全桥混合结构较为成熟, 可实施性较高, 因此推荐功率模块采用半桥-全桥混合结构。

表 3 拓扑结构比较表

Tab. 3 Topology comparison table

项目	半桥结构+直流 断路器	半桥-全桥 混合结构	钳位双子 模块
子模块数	2N	2N	N
IGBT 数	4N	7.2N(按 80% 考虑)	5N
过载能力	弱	强	弱
快速过流关 断能力要求	高	高	高
损耗/%	1	1.35	1.15
设备投资/亿元 (阀组+断路器)	约 10+(1.5×2)	约 14	—
技术成熟度	较高, 在张北 柔直中应用	高, 在昆柳龙 工程中应用	低, 停留在 理论阶段

## 3 启动回路设置

柔性直流系统启动时需要对接容器进行预充电, 启动回路设置启动电阻主要用于限制换流阀充电电流及电流上升率, 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。

启动回路设置位置有两种:

#### 1) 设置在联接变的阀侧

接线如图 7 所示, 设置在阀侧时能量要求较低。在已有的单极结构中, 联接变阀侧电压通常较网测低, 不需要承受直流偏置电压<sup>[9-10]</sup>, 因此, 常采用该方式。但在对称双极结构中, 需承受直流偏置电压, 本次改造, 阀侧电压为交流 250 kV 加直流偏置电压 250 kV, 外绝缘的要求较高。

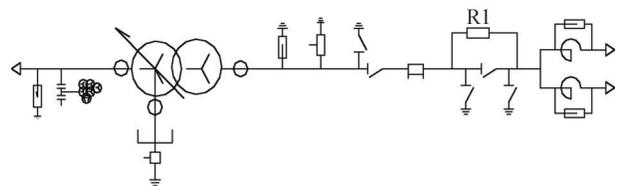


图 7 启动回路设置在阀侧  
Fig. 7 Start-up circuit located on the valve side

#### 2) 设置在联接变的网侧

接线如图 8 所示, 设置网侧时可降低励磁涌流, 但需承受励磁涌流在其上产生的能量, 能量要求相对较高<sup>[11]</sup>。本次改造, 网侧电压为交流 525 kV, 外绝缘的要求较低。

虽然启动回路设置在阀侧设备外绝缘稍高, 但常规直流换流站无启动回路, 一般换流变套管插入

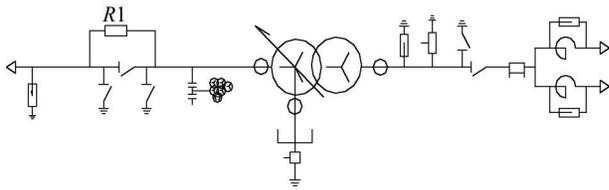


图8 启动回路设置在网侧

Fig. 8 Start-up circuit located on network side

阀厅布置,网侧接入交流配电装置,改造为柔性直流换流站后,设置在阀侧和网侧均需加大位置,为减少换流变运输道路改动对交流配电装置的影响,

广州换流站柔性化改造后启动回路布置位置在阀侧。

#### 4 直流场电气接线

现有的常规直流换流站直流场主接线方案需满足长距离、大容量输电工程,柔直改造后仍需满足原有的系统运行方式,通过简单改造完成。改造后,直流侧根据柔性直流的特点,取消了直流滤波器,增加了启动回路、桥臂电抗器,电气主接线如图9所示。

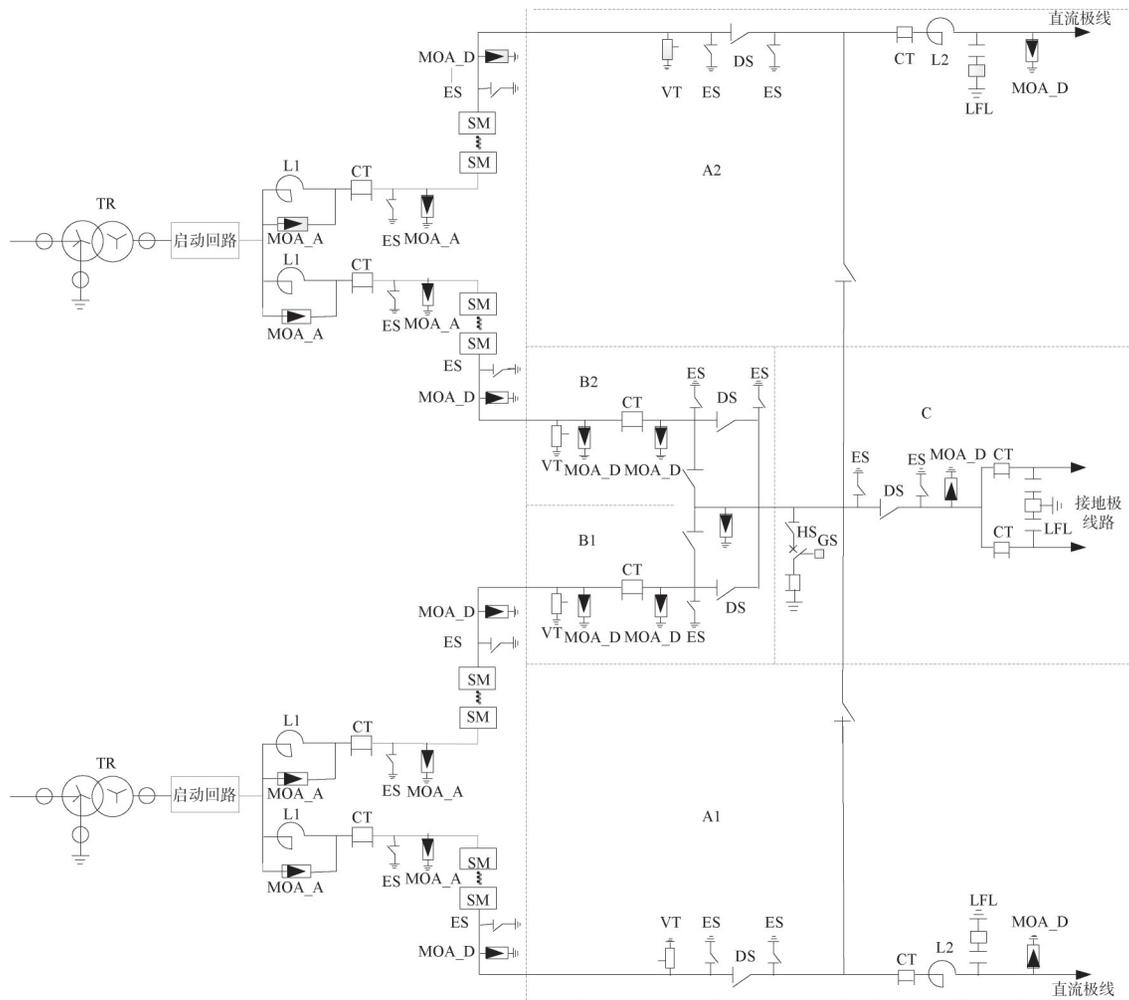


图9 柔性直流换流站直流场接线

Fig. 9 DC field wiring scheme of VSC-HVDC converter station.

#### 5 联接变压器型式

为提供与直流侧电压相匹配的交流二次侧电压,使换流阀工作在最佳的运行范围内,柔性直流换流站需配置联接变压器。由于采用了对称双极接

线,且有专门的接地极回路,因此换流变阀侧不需设专门的接地点,换流变压器交流侧直接接地。

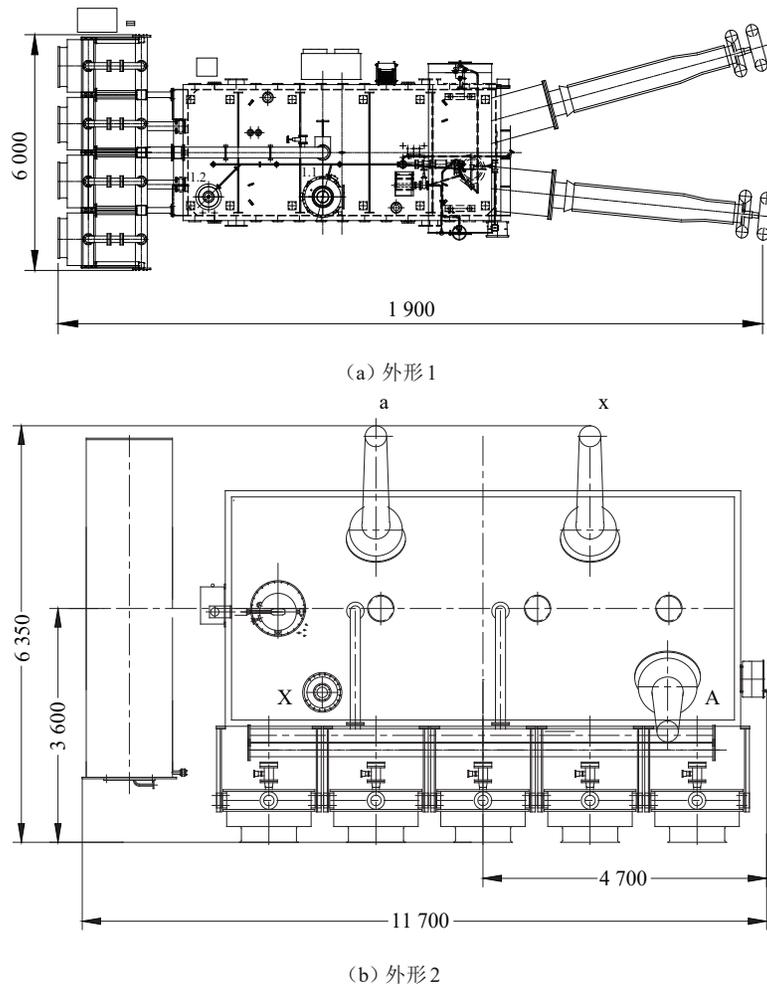
联接变压器拟采用单相双绕组有载调压电力变压器,变比为  $525/\sqrt{3}+8 \times 1.25\%: 250/\sqrt{3}$  kV,容量为 575 MVA,直流偏置电压 240 kV,接线组别

为 $I, i0$  (YNY0)。

变压器容量较大,但近年来,大容量换流变不断出现,如乌东德 $\pm 800$  kV联接变换流变容量480 MVA,准东—皖南 $\pm 1100$  kV直流换流变容量586 MVA,设备制造上有较成熟的经验。广州换流

站位于珠江三角洲平原地区,运输便利,因此换流变不考虑采用两台单相联接变并联的方式,采用单台联接变。

根据初步收集的资料,换流变外形结构主要有2种,如图10所示。



注:图中尺寸单位为mm。

图10 575 MVA联接变外形

Fig. 10 575 MVA interface transformer shape

联接变外形结构1和目前的换流变类似,长度较长,达到21 m,宽度较窄。联接变外形结构2和常规的交流变类似,长度方向为6~8 m。

柔性直流换流站阀厅横向尺寸达到70多米,而对应每阀厅仅有3台换流变,为节省纵向尺寸,因此采用联接变形式2更能适应场地尺寸。

## 6 结论

常规直流换流站改造为柔性直流换流站需满足柔性直流输电的各种运行方式、设备研发水平,以

及充分利用现有设备及建筑,减少改造的难度和费用。

广州换流站的柔性化改造设计方案主要结论如下:

1) 为适应长距离架空送电,提高运行稳定性、供电可靠性,便于受端换流站改造,系统接线采用对称双极接线方案,每极采用1个1.5 GW换流阀。

2) 半桥-全桥混合结构较为成熟,可实施性较高,因此推荐功率模块采用半桥-全桥结构混合型式。

3) 接线采用对称双极接线, 启动回路设置在阀侧, 需承受直流偏置电压, 但可减少换流变运输道路的改动和对交流配电装置的影响。

4) 受端换流站运输条件良好, 因此联接变压器采用单台 575 MVA 变压器, 变压器需承受直流偏置电压。为节省纵向尺寸, 选用横向尺寸大的联接变压器。

#### 参考文献:

- [1] 郭春义, 赵成勇, MONTANARI A, 等. 混合双极高压直流输电系统的特性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 14+104.  
GUO C Y, ZHAO C Y, MONTANARI A, et al. Investigation of hybrid bipolar HVDC system performances [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(10): 14+104.
- [2] 冯明, 李兴源, 李宽. 混合直流输电系统综述 [J]. 现代电力, 2015, 32(2): 1-8.  
FENG M, LI X Y, LI K. A review on hybrid HVDC system [J]. Modern Electric Power, 2015, 32(2): 1-8.
- [3] 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 G K, LI G Y, LIANG H F, et al. Research on a novel hybrid HVDC system [J]. Power System Technology, 2006, 30(4): 82-86.
- [4] 江道灼, 张驰, 郑欢等. 一种限流式混合直流断路器方案 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4): 65-71.  
JIANG D Z, ZHANG C, ZHENG H, et al. A scheme for current-limiting hybrid DC circuit breaker [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(4): 65-71.
- [5] 罗永捷, 李耀华, 李子欣, 等. 全桥型 MMC-HVDC 直流短路故障穿越控制保护策略 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1933-1943.  
LUO Y J, LI Y H, LI Z X, et al. DC Short-circuit fault ride-through control strategy of full-bridge MMC-HVDC systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1933-1943.
- [6] 赵宇含, 王鑫, 赵成勇等. 半桥-全桥子模块混合型 MMC 的换流阀损耗分析方法 [EB/OL]. (2020-07-03) [2020-10-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20200730.1422.003.html>.  
ZHAO Y H, WANG X, ZHAO C Y, et al. Analysis method for converter valve loss of half bridge full bridge sub module hybrid MMC [EB/OL]. (2020-07-03) [2020-10-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20200730.1422.003.html>.
- [7] 丁云芝, 苏建徽, 周建. 基于钳位双子模块的 MMC 故障清除和重启能力分析 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 97-103.  
DING Y Z, SU J H, ZHOU J. Analysis on fault limitation and self-recovery of MCC based on clamp double sub-module [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 97-103.
- [8] 朱晋, 韦统振, 霍群海, 等. 适用于架空线的 MMC-HVDC 换流站子单元拓扑系列 [J]. 电工电能新技术, 2015, 34(2): 20-24+71.  
ZHU J, WEI T Z, HUO Q H, et al. A series of sub-module topology suitable for overhead lines MMC-HVDC [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(2): 20-24+71.
- [9] 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 Y, LIU K P, CHEN H Z, et al. Startup procedure for VSC-LCC based hybrid pseudo bipolar HVDC system [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2572-2578.
- [10] 吴方劫, 马玉龙, 梅念, 等. 舟山多端柔性直流输电工程主接线方案设计 [J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2651-2657.  
WU F J, MA Y L, MEI N, et al. Design of main connection scheme for Zhoushan flexible multi-terminal HVDC transmission project [J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2651-2657.
- [11] 李亚男, 蒋维勇, 余世峰, 等. 舟山多端柔性直流输电工程系统设计 [J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2490-2496.  
LI Y N, JIANG W Y, YU S F, et al. System design of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC transmission project [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2490-2496.

#### 作者简介:



简翔浩

简翔浩 (通信作者)

1975-, 男, 广东云浮人, 高级工程师, 广东工业大学电气工程学士, 主要从事变电站、换流站工程设计工作 (e-mail) [jianxianghao@gedi.com.cn](mailto:jianxianghao@gedi.com.cn)。

卢毓欣

1984-, 女, 江西南昌人, 高级工程师, 华中科技大学电气工程硕士, 主要从事高压直流输电系统研究工作 (e-mail) [luyx@csg.cn](mailto:luyx@csg.cn)。

郝为瀚

1984-, 男, 内蒙古包头人, 高级工程师, 华中科技大学电气工程硕士, 主要从事柔性直流输电技术的研究工作 (e-mail) [haoweihan@gedi.com.cn](mailto:haoweihan@gedi.com.cn)。

彭冠炎

1984-, 男, 广东化州人, 高级工程师, 华南理工电气工程硕士, 主要从事变电站、换流站工程设计工作 (e-mail) [pengguanyan@@gedi.com.cn](mailto:pengguanyan@@gedi.com.cn)。

(责任编辑 李辉)