

# ±800 kV 柔性直流换流站换流变区域电气布置研究

郝为瀚<sup>1</sup>, 郭金川<sup>1</sup>, 周钰<sup>1</sup>, 李鸿鑫<sup>2</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 510663;

2. 南方电网科学研究院有限责任公司 直流输电技术国家重点实验室, 广州 510663)

**摘要:** [目的] 柔性直流输电技术不断发展, 至今已经成为主流的直流输电技术。面对远距离、高电压、大功率的送电需求, ±800 kV 级特高压柔性直流输电技术的工程应用迫在眉睫。换流变压器作为柔性换流站的核心部分, 相关区域的布置方案非常重要, 将会对全站整体布置方案产生重要影响。[方法] 基于柔性直流换流站的技术基础, 从电气接线、换流变压器布置、换流变广场布置、启动回路布置等方面进行分析, 并根据其特点进行优化设计, 提出了换流变区域的整体布置方案。[结果] 换流变区域的整体布置方案可靠性高、可实施性强, 节约了占地面积和投资成本。[结论] 研究结果对 ±800 kV 柔性直流换流站的工程应用有指导意义, 有广泛的工程应用前景。

**关键词:** 特高压柔性直流换流站; 换流变压器; 对称双极接线

中图分类号: TM721.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)03-0067-05

## Research on VSC-UHVDC Converter Station Transformer Area Layout

HAO Weihai<sup>1</sup>, GUO Jinchuan<sup>1</sup>, ZHOU Yu<sup>1</sup>, LI Hongxin<sup>2</sup>

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

2. State Key Laboratory of HVDC, Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** [Introduction] With the continuous development of VSC-HVDC technology, it has become the mainstream of DC transmission technology. For long-distance, high voltage, high power demands for power transmission, ±800 kV VSC-UHVDC transmission engineering applications are imminent. As the core part of the VSC-UHVDC converter station, the layout of the converter transformer is very important and will have a significant impact on the general layout of the whole station. [Method] Based on the technology of VSC-UHVDC, this paper analyzed single line diagram, the layout of converter transformer, layout of converter transformer square, and the layout of starting circuit. And according to the characteristics, this paper provided a superior design of converter transformer layout. [Result] The layout is highly reliable and can be implemented, saving the space and investment cost. [Conclusion] The research is instructive for the engineering application of the ±800 kV DC converter station and has a wide range of engineering application prospects.

**Key words:** VSC-UHVDC; converter transformer; symmetrical bipolar

柔性直流输电技术是一种基于电压源换流器的新型直流输电技术, 具有可控性强、对环境影响小、对受端短路容量没有要求、能提高系统动态稳定性等优点<sup>[1-4]</sup>, 从其技术特点和实际工程的运行来看, 很适合应用于可再生能源并网、分布式发电

并网、孤岛供电、城市电网供电、异步电网互联等领域<sup>[5-7]</sup>。

近几年国内在柔性直流研究和应用方面发展较快, 技术更新日新月异, 国内首个 1 GW 级别的柔性直流输电工程日前已经投运<sup>[8]</sup>。但对于特高压大容量(±800 kV/5 GW 级)柔性直流输电技术的研究还处于起步阶段, 新设备和新技术的应用还需进一步的探索。

对于特高压大容量柔性直流换流站, 由于没有

工程应用实例,需充分考虑技术能力和设备制造水平,结合工程实际应用需求,从工艺水平、占地面积、技术经济等多方面进行电气布置的研究。换流变压器作为换流站核心部件,其布置方案对于全站电气布置有非常重要的影响,是决定整体技术方案的核心内容。

本文基于特高压柔性直流输电技术,针对 $\pm 800$  kV 柔性直流换流站换流变区域的电气布置进行深入研究,并提出技术经济指标优良、可实施性强的技术方案。

## 1 换流变区域电气接线

特高压柔性直流换流站换流变区域电气接线与常规直流换流站和一般采用对称单极接线的柔性直流换流站存在一定差异,其具体特点如图1所示。

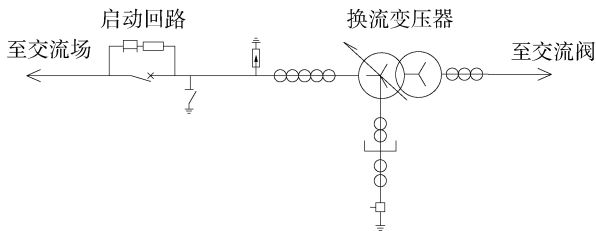


图1 特高压柔性直流换流站换流变区域电气接线示意图

Fig. 1 Single line diagram of VSC-UHVDC converter transformer area

### 1.1 换流变压器接线

对于 $\pm 800$  kV 柔性直流换流站,输送功率最高也到达5 GW,为保证系统运行可靠性和多种运行方式运行的可行性,换流阀建议采用对称双极接线。且由于额定电压达到了 $\pm 800$  kV 电压等级,参照特高压常规直流换流站的思路,需考虑每极由高低端阀组组成,保证高低端阀组可分列运行。

因此,需针对高低端阀组独立设置相应的换流变压器,换流变接线型式可为YNd型或YNy型接线。另外由于对称双极接线中,直流侧存在专用的接地回路,因此换流变压器阀侧不需另设专门的接地点。

结合制造水平、运输条件、国产化能力及投资等多方面因素综合考虑,并结合合同等级绝缘水平下变压器的型式, $\pm 800$  kV 柔性直流换流变压器建议采用单相双绕组型式,接线型式为YNy0接线。

### 1.2 启动回路接线

启动回路是柔性直流换流站必要的电气回路,

主要作用是限制系统启动过程中过电流,一般启动回路主要包括启动电阻和相应的旁路开关设备。启动回路一般紧邻换流变压器设置,并可根据系统需要设置在换流变的网侧或阀侧,同时兼顾换流变阀侧套管的布置型式<sup>[9]</sup>。

1)启动回路设置在网侧时可降低变压器励磁涌流,但需承受励磁涌流在其上产生的能量,能量要求相对较高。

2)启动回路设置在阀侧时能量要求较低,但需承受直流偏置电压,对绝缘的要求较高。

由于两种方式的性能和造价差别不明显,可根据工程的实际进行选择。 $\pm 800$  kV 柔性直流换流站中,为有效减小阀厅面积,一般情况下换流变压器阀侧套管采用伸入阀厅布置,另考虑设备绝缘水平和布置的便捷性等因素,启动回路建议设置在换流变网侧。

## 2 换流变区域电气布置研究

根据上文所述的 $\pm 800$  kV 柔性直流换流站的电气接线和系统运行需求,换流变区域主要由高、低端换流变压器、换流变广场和启动回路三部分组成。通过对其布置和占地进行研究,在满足安全运行的前提下,实现减少占地面积、降低施工难度、换流区域更加整齐、美观的目的,对提高 $\pm 800$  kV 柔性直流换流站的整体设计水平,具有重要的意义。

本节在总结已建和在建的特高压直流工程、柔性直流换流站经验的基础上,重点研究阀厅与换流变布置、换流变广场布置和启动回路布置的优化等几个方面的内容。

### 2.1 阀厅与换流变布置

#### 2.1.1 换流变压器阀侧套管布置

对于换流变压器阀侧套管,若设置在户内,类似于常规直流工程的换流变压器的阀侧套管设置,工程经验丰富,技术上无难度,且阀侧短路故障基本为理论风险;若设置在户外,外绝缘配置需提高、爬电距离需加大,阀侧套管需要重新开展外绝缘设计及验证。另外,阀侧套管及引线因污秽、淋雨、雷电侵入等因素引起的短路故障概率高,系统运行可靠性降低<sup>[10]</sup>。

因此,结合国内主要设备厂家的制造经验及工程工期要求, $\pm 800$  kV 柔性直流换流站换流变压器

阀侧套管建议按户内布置考虑。

### 2.1.2 阀厅与换流变布置型式

换流阀采用每极高、低端两个阀组串联的接线方式, 换流变压器采用单相双绕组变压器, 换流站内共设4个阀厅及电抗器室、12台工作换流变。

在常规直流换流站中, 阀厅与换流变区域多采用“面对面”布置方案, 即每极的高端阀厅和低端阀厅面对面布置, 两个低端阀厅相邻背靠背布置; 每个阀厅对应的两组换流变与阀厅紧靠一字排列, 换流变阀侧套管直接插入阀厅。但由于柔性直流换流站和常规直流换流站布置方案中最大的一个区别点就是常规直流换流站阀厅面积较小, 与换流变结合布置整体区域面积利用率高; 而柔性直流换流站阀厅面积增大很多。因此仍采用“面对面”布置方案的话, 换流变及阀厅区域横向尺寸则会增大至400~500 m, 是整体布置方案不能接受的。

结合电气主接线的工艺流程, 阀厅及换流变建议高、低端阀厅“一字形”布置。“一字形”布置的特点具体如下所述:

1) 一字型布置的阀厅对换流变噪声有明显的阻挡作用, 直流场侧噪音小, 基本不受换流变的影响。但12台换流变一字排开面向交流场, 其噪音向交流场及其两侧传播, 影响相对大些。

2) 换流变进线构架正对阀厅, 换流变引线容易实现。

3) 辅助设备按极分区布置, 设置2个控制楼, 单元体系清晰。

4) 由于换流变广场仅考虑一台换流变安装同时后部过车的空间, 换流变进线跨距小。

5) 极1、极2广场相通, 备用变更换时运输距离较短, 并且高、低端备用换流变的布置方向均与工作变同向, 在更换时可做到不旋转, 快速便利。

## 2.2 换流变广场布置

换流变压器作为换流站的核心设备之一, 其组装与更换都至关重要。另外, 换流变体量巨大, 换流变广场面积的大小会直接影响整个换流站的占地面积。因此, 按照换流变的外形尺寸, 对换流变广场进行了设计。

### 2.2.1 换流变外形尺寸

换流变压器外形尺寸对阀厅及换流变压器场布置影响较大。 $\pm 800$  kV 柔性直流换流站额定输送容量可高达5 GW, 相应输送容量下单台换流变压器

容量约为480 MVA, 根据换流变厂家相关资料, 目前换流变压器主要技术路线可分为ABB路线和西门子路线, 相应的设备外形如图2~图3所示。

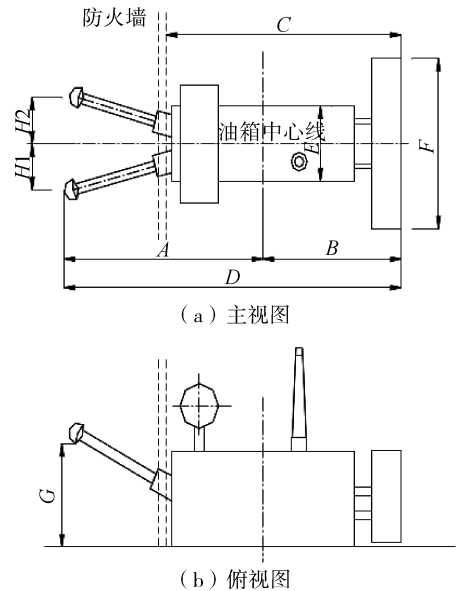


图2 ABB技术路线换流变外形图

Fig. 2 Outline drawings of ABB type converter transformer

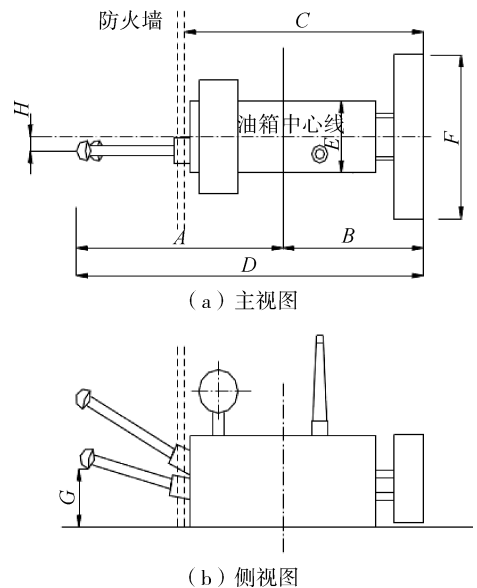


图3 西门子技术路线换流变外形图

Fig. 3 Outline drawings of Siemens type converter transformer

ABB技术路线换流变外形尺寸如表1所示。

表1 ABB技术换流变尺寸

Tab. 1 Size of ABB type converter transformer

电压等级/kV	换流变容量/MVA	尺寸/m						
		A	B	C	D	G	H1/H2	F
800	480	16.1	9.3	16.1	25.4	6.4	2.3/2.7	8.5

西门子技术路线换流变外形尺寸如表2所示。

表2 西门子技术路线换流变尺寸

Tab. 2 Size of siemens type converter transformer

电压等级/kV	换流变容量/MVA	尺寸/m						
		A	B	C	D	G	H	F
800	480	21.6	9.9	20.0	31.5	5.9	1.3	8.5
400	480	13.4	9.6	17.8	23.0	3.4	1.3	8.5

比较可知, 西门子技术路线换流变比 ABB 技术路线长约 6 m。从工程设计适用性角度出发, 建议采用基于西门子技术路线换流变进行联接广场设计。

综上所述,  $\pm 800$  kV 柔性直流换流站高、低端换流变外形尺寸如表3所示。

表3 高、低端换流变外形尺寸

Tab. 3 Size of HV and LV converter transformer

换流变类型	换流变外形尺寸(长/m×宽/m×高/m)
高端换流变	31.5×8.5×14.5
低端换流变	23.0×8.5×14.5

## 2.2.2 换流变广场的确定

换流变广场位于阀厅与交流配电装置之间的空地, 换流变压器进线位于换流变压器上方, 利用架空线引接至 500 kV 交流配电装置。

### 2.2.2.1 设计原则

参考现有  $\pm 800$  kV 直流输电工程的建设经验,  $\pm 800$  kV 柔性直流换流站换流变压器广场设计原则为<sup>[11]</sup>:

1) 运行中考虑最大一台换流变压器能搬运, 并且轨道不设在道路上。

2) 允许布置在同一侧的换流变压器同时进行安装, 同时考虑不占用其他换流变压器的运输通道。

3) 换流变压器退出运行的临时放置位置不影响备用换流变压器进入广场。

### 2.2.2.2 换流变广场尺寸确定

由于阀厅一字型布置, 广场尺寸主要由最长一台变压器的尺寸决定。同时结合以往常规直流工程运行习惯, 一般情况下, 换流变阀侧套管在户外做完试验后再安装就位<sup>[12]</sup>。因此, 考虑试验时套管对防火墙距离约 9 m, 结合空间距离, 则广场尺寸(从阀厅外墙面至运输道路边之间的距离)建议设置为 63 m, 即 20 m(换流变器身尺寸)+9 m(试验距离)+31.5 m(换流变整体尺寸)+1.5 m(设计裕度)。具体尺寸设计如图4所示。

### 2.2.2.3 备用换流变的布置

备用换流变根据换流站总平面优化布置。备用换流变位于阀厅端部, 与工作变平行布置, 更换备用变不需要进行转向操作, 节省了占地和更换的时间。

## 2.3 启动回路布置

由于  $\pm 800$  kV 柔性直流换流站内, 每个阀厅仅对应 3 台换流变压器, 启动回路可充分利用换流变广场横向尺寸, 并行设置在换流变侧面空间。

为有效利用空间, 建议启动回路采用启动电阻和旁路开关设备平行布置, 启动回路中其他设备(电压电流测量装置、避雷器等)建议利用启动回路两侧空间, 与连接用管母线结合布置, 达到实现空间利用最优化的目的。

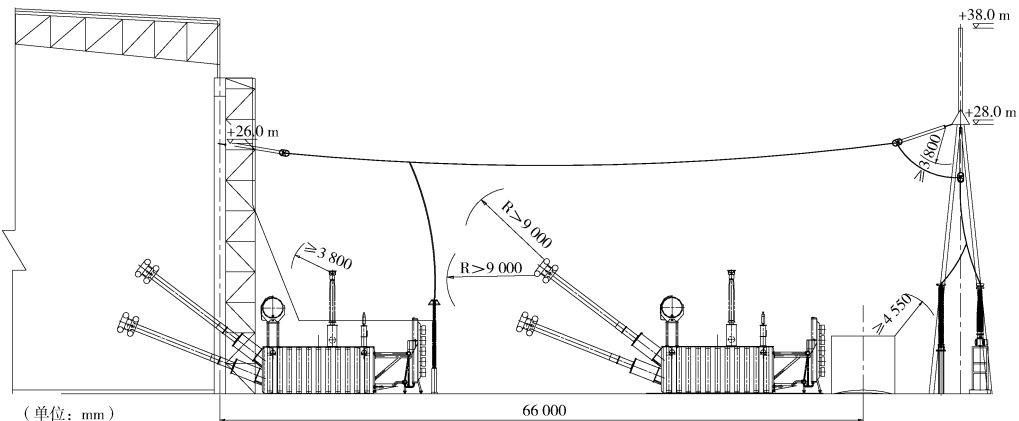


图4 换流变试验距离校验

Fig. 4 Converter transformer test clearance distance checking

## 2.4 主辅控楼布置

由于柔性直流换流变区域布置的特殊性, 换流变和启动回路占用了很大区域的面积, 主辅控楼不能和常规直流换流站中一样布置于换流变交流侧的位置。

因此, 建议主辅控楼采用联合建筑的形式布置于阀厅两侧, 最大程度地节约了占地面积, 也是现阶段大容量柔性直流换流站多采用的一种布置方案。

## 2.5 换流变区域布置整体方案

综上所述, 在考虑工艺流程顺畅, 空间利用率高以及电气接线易实现等因素的情况下, 换流变区域电气布置建议采用阀厅及换流变“一字形”布置, 启动回路设置在换流变网侧的方案。具体布置方案示意图如图5所示。

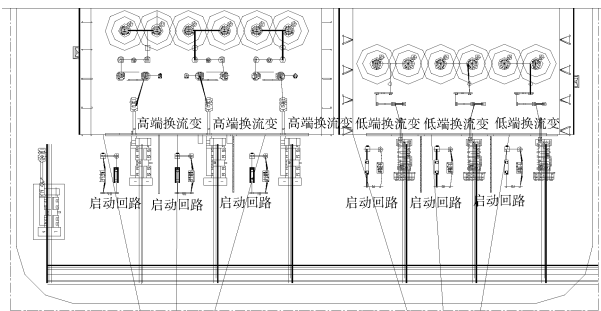


图5  $\pm 800$  kV 柔性直流换流站换流变区域电气布置示意图

Fig. 5 Layout of  $\pm 800$  kV VSC-UHVDC converter station transformer area

## 3 结论

本文重点论述了适用于  $\pm 800$  kV 柔性直流换流站的换流变区域电气布置方案, 通过对设备尺寸、运行需求、安装要求等方面进行分析, 分别针对换流变压器、换流变广场和启动回路三部分电气布置开展研究工作。

1) 综合考虑各方面因素,  $\pm 800$  kV 柔性直流换流变压器建议采用单相双绕组型式, 接线型式为 YNy0 接线。

2) 考虑有效减小阀厅面积, 启动回路建议设置在换流变网侧。并充分利用换流变横向尺寸, 设置在换流变侧面空间。

3) 换流变和阀厅建议采用“一字型”布置方案, 是结合整体布置方案的最优选择。

4) 综合考虑安装试验等因素, 换流变广场尺寸

建议设置为 63 m。

5) 主辅控楼建议采用联合建筑的形式布置于阀厅两侧。

综上所述, 本文提出可靠性高、可实施性强的换流变区域电气布置方案, 对提高  $\pm 800$  kV 柔性直流换流站的整体设计水平, 具有重要的意义。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [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.
- [6] 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.
- [7] 胡航海, 李敬如, 杨卫红, 等. 柔性直流输电技术的发展与展望 [J]. 电力建设, 2011, 32(5): 62-66.
- [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.
- [9] 郝为瀚, 简翔浩. 混合直流输电柔性直流换流站直流场接线研究 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(增刊1): 99-102.
- [10] 张熠, 黄黎琴, 张弛. 大容量柔性直流换流站阀厅联合建筑结构选型及优化 [J]. 福建建设科技, 2016(3): 13-16.
- [11] 曹效义, 杜建建.  $\pm 800$  kV 特高压换流站电气总平面布置设计优化 [J]. 内蒙古电力技术, 2015, 33(4): 5-10.
- [12] 郭金川, 周敏, 孔志达, 等. 柔性直流换流站空气净距研究 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(增刊1): 50-54.

## 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@gd-di.com.cn.

(责任编辑 李辉)