

# 特高压直流换流站电气设计的主要特点

胡劲松, 余波, 黄晓明

(西南电力设计院, 四川 成都 610021)

**摘要:** 由于输送容量和电压等级的提高, 特高压直流换流站的电气设计在电气主接线、过电压保护与绝缘配合、外绝缘特性、设备选型以及平面布置等方面, 同常规超高压换流站相比均有显著变化。针对这些方面, 并基于中国(也是世界上)的第一批特高压直流输电工程的阶段性设计研究成果, 归纳分析特高压直流换流站电气设计应注意把握的主要技术特点, 对后续工程设计工作的开展有重要的指导和借鉴意义。

**关键词:** 特高压; 直流换流站; 电气设计; 技术特点

**Abstract:** Compared to the common EHV converter station, the electrical engineering design of UHVDC converter station has great changes in main electrical connection, overvoltage protection, insulation coordination, equipment selection and general layout because of the greater transmission capacity and the higher voltage class. According to the above-mentioned features, the main technical principle for the electrical engineering design of UHVDC converter station is analyzed, which is based on the interim design study of the first UHVDC transmission project in China (also in the world).

**Key words:** UHV; DC converter station; electrical engineering design; technical principle

中图分类号: TM721.1 文献标识码: B 文章编号: 1003-6954(2008)03-0004-05

±800 kV 特高压直流不仅输送容量大、损耗小、送电距离远, 而且可以节约宝贵的输电走廊资源, 提高输电通道走廊的利用率, 是中国电力跨区域大规模输电的必然选择。“十一五”云南至广东特高压直流输电工程已于 2006 年 12 月开工建设, 向家坝至上海±800 kV 特高压直流输电工程也即将开工, “十一五”至“十三五”期间规划建设特高压直流输电工程还有 7~9 个, “十三五”以后还将规划建设“藏电外送”特高压直流输电工程<sup>[1]</sup>。目前, 特高压直流输电技术在全世界都还没有成熟的应用经验, 针对第一批特高压直流输电工程的阶段性设计研究成果, 归纳分析特高压直流换流站设计应注意把握的主要技术原则, 对后续工程设计工作的开展有重要的指导和借鉴意义。

## 1 电气主接线

### 1.1 交流开关场电气主接线

±800 kV 特高压直流换流站输送容量一般为 5 000~6 400 MW, 交流侧一般采用 500 kV 电压等级, 进出线规模约为 12~20 回, 其中换流变组进线 4 回, 交流滤波器/电容器 3~5 大组, 站用电 1~2 回, 其它交流进出线 4~9 回, 根据工程具体情况有时需要装设母线高压电抗器<sup>[2][3]</sup>。按此规模, 交流开关场电

气主接线采用可靠性高、有丰富调度运行经验、在中国 500 kV 电网广泛应用的一个半断路器接线毫无争议, 工程设计中主要应对元件配串加以重点研究, 以减少各种故障工况下直流输送功率的损失, 提高换流站的可靠性和可用率。

### 1.2 换流阀组接线

除巴西伊泰普直流输电工程为两回±600 kV、单回输送容量 3 150 MW, 每极采用 2 个 12 脉动阀组串联接线外, 其余大多高压直流输电工程, 特别是中国 500 kV 直流输电工程均采用每极 1 个 12 脉动阀组接线。中国规划的特高压直流输电工程额定输送容量为 5 000~6 400 MW, 额定直流电流为 3 125~4 000 A。对每极 1 个 12 脉动换流单元接线具有接线简单、设备投资最低等优点, 但即便是每个 12 脉动换流单元换流变采用单相双绕组型式, 单台变压器容量也达 500~644 MVA, 设备制造和大件运输都异常困难; 而对每极 2 个 12 脉动阀组并联方案, 最大的优点是减少流过单个换流单元的电流, 但由于每极 2 个 12 脉动阀组并联接线复杂、控制保护系统复杂、运行不方便、单阀数量和高电压绝缘变压器数量增加, 投资较大, 一般在单阀通态电流不能满足要求时才考虑采用, 从目前的电力电子技术发展水平来看, 具备生产换流阀 4000 A 的换流能力。因此, 特高压换流站换流阀组接线采用每极 2 个 12 脉动阀组串联接线;<sup>2</sup>

个12脉动阀组电压按 $\pm(400+400)$ kV分配,换流变压器采用单相双绕组型式,双极共4个换流器单元<sup>[2][3]</sup>。

### 1.3 直流开关场接线

换流站直流侧装设有平波电抗器、直流滤波器、直流电流及电压测量装置、过电压保护设备以及切除故障、检修和转换运行方式所需的开关设备等。特高压换流站直流侧采用的直流双极典型接线方式与现有 $\pm 500$  kV直流工程基本相同,着重研究了以下问题:(1)为提高阀组可用率,每个阀组设置旁路回路;(2)为了降低上12脉动换流阀组和直流极母线的过电压水平,将每极平波电抗器分成两组,一组安装在上12脉动换流阀组高压端与直流滤波器高压端之间的直流极母线上,另一组安装在下12脉动换流阀组低压端与直流滤波器低压端之间的直流中性母线上;(3)为提高直流系统的可靠性和可用率,避免因直流开关场中性线故障而导致直流双极闭锁,对直流金属一大地方式转换回路采用双MRTB(金属回路转换开关)配置或直流中性点区域采用一个半开关接线方式进行了研究,研究表明,上述接线方案对减少故障影响范围极为有限,而投资增加较大,因此直流中性线接线推荐仍采用 $\pm 500$  kV直流工程典型接线<sup>[4]</sup>。

## 2 过电压保护与绝缘配合

在超高压换流站过电压保护与绝缘配合的工程经验基础上,特高压重点研究了换流阀的绝缘配合裕度选择和单极双十二脉动阀组串联的避雷器配置方案。

### 2.1 换流阀绝缘配合裕度

在超高压直流换流站工程实践中,换流阀绝缘配合裕度如表1所示有两种取值,中国均采用文献<sup>[5]</sup>的推荐值,该标准是根据国际大电网会议(CIGRE)33.05工作组1984年9月提出的《高压直流换流站绝缘配合和避雷器保护使用导则》编写的,在技术内容上与该导则等效。

对特高压换流阀绝缘配合裕度选取有两种观点。一种观点认为,进入特高压范畴后,设备绝缘水平的些微提高,都有可能引起设备造价和研发、制造难度的大幅度增加,绝缘配合裕度取值应从实际需要出发,不宜保守。换流阀由跨在阀上的避雷器直接保护,而且晶闸管阀与常规电力设备(如变压器)的老化

过程不同,故障晶闸管可在定期检修时予以更换,可以认为,阀的耐受电压在每次检修后都恢复到它的初始值。因此建议参考部分国外工程实践,特高压换流阀操作冲击、雷电冲击、陡波冲击绝缘配合裕度分别取10%、10%、15%。

另一种观点认为,特高压直流输电工程在电网占有及其重要的地位,可靠性要求高,设备标准不应低于超高压工程,绝缘配合裕度应执行现行电力行业标准。

目前,在不同的工程中两种绝缘配合裕度都有采用。

表1 换流阀最小绝缘配合裕度表

	最小绝缘配合裕度		
	操作冲击	雷电冲击	陡波冲击
中国电力行业标准	15%	15%	20%
部分国外工程实践	10%	10%	15%

### 2.2 换流阀组避雷器配置方案

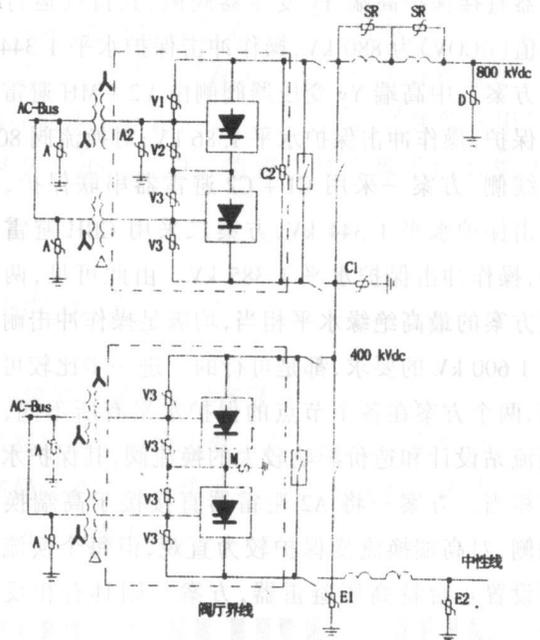


图1 避雷器配置方案一

经过前期广泛深入研究,特高压单极双十二脉动阀组串联的避雷器配置形成了两种典型方案,如图1、图2所示<sup>[6]</sup>。从保护效果看,方案一配置的A2避

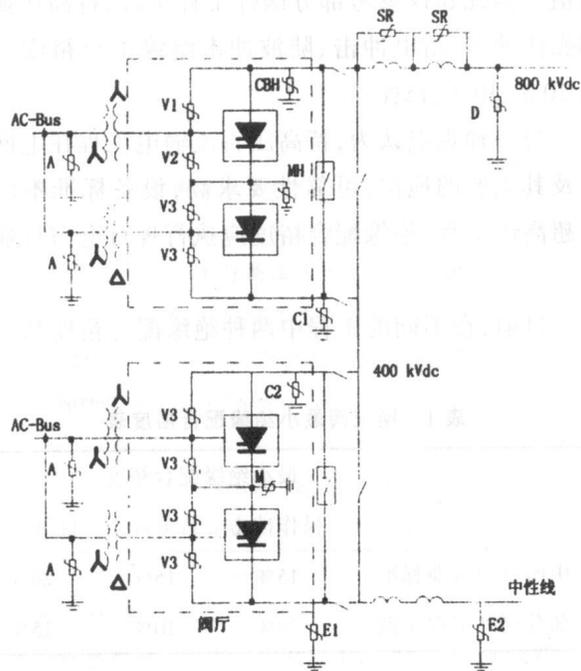


图2 避雷器配置方案二

雷器直接保护高端 Yy 变压器阀侧,其持续运行电压峰值(CCOV)为 880 kV,操作冲击保护水平 1 344 kV,而方案二中高端 Yy 变压器阀侧由 V2+MH 避雷器串联保护,操作冲击保护水平 1386 kV;对换流阀 800 kV 极线侧,方案一采用 C1+C2 避雷器串联保护,操作冲击保护水平 1 344 kV,方案二采用 CBH 避雷器保护,操作冲击保护水平 1 385 kV。由此可见,两种配置方案的最高绝缘水平相当,均满足操作冲击耐受水平 1 600 kV 的要求,都是可行的。进一步比较可以看出,两个方案在各个节点的保护水平有所不同,但对换流站设计和造价影响较大的换流阀,其保护水平基本相当。方案一将 A2 避雷器直接接于高端换流变阀侧,对高端换流变保护较为直观,但每个换流站需多设置 4 台特高压避雷器,方案二则具有相反的特点。

### 3 外绝缘

#### 3.1 空气间隙

由于换流站的设备带电导体多为固定电极,因此空气间隙主要由雷电和操作冲击所决定。设计空气间隙时需要各种换流站真型雷电波、操作波放电电压

特性曲线,以确定恰当的最小空气间隙取值,优化阀厅和直流开关场的布置。随着±800 kV 直流工程的开展,中国一些科研单位也在积极地进行这方面的研究,但阀厅和直流开关场间隙形状类别较多,要完成各种间隙的真型试验尚需时日,现阶段主要按照国际大电网会议推荐公式进行初步计算。以直流开关场极母线对地最小空气间隙为例,其值根据计算值考虑适当裕度后可取 7650 mm。表 2 为文献[6]提供的管母线对遮栏空气间隙的操作冲击 50% 击穿电压试验结果。

表 2 管母线对遮栏空气间隙的操作冲击  
50% 击穿电压

间隙距离(m)	3	5	7	9
U <sub>50%</sub> (kV)	1 387	1 626	1 916	2 214

#### 3.2 设备外绝缘

设备的外绝缘必须要考虑干弧距离和爬电距离两方面的要求。

干弧距离取决于设备轴向长度。对超高压和特高压而言,操作冲击水平(SIL)是确定干弧距离的关键因素,二者呈幂函数关系。试验研究表明,干弧距离为 8 000 mm 的支柱绝缘子,操作冲击耐受电压可达 2 100 kV 以上,满足特高压换流站 1 600 kV 的操作冲击绝缘水平要求。

爬电距离则主要取决于工作电压下绝缘子的污秽特性。从已开展的特高压直流输电工程前期工作情况来看,如金沙江一期溪洛渡、向家坝水电站送电华中、华东特高压直流输电工程,以及云(云南小湾、金安桥水电站)广(东)特高压直流输电工程,特高压换流站大多有条件选址于污秽中等或较轻的地区,预测的直流自然积污附盐密度一般在 0.05~0.07 mg/cm<sup>2</sup>[2][3]。具体工程应根据站址的环境情况对直流自然积污附盐密度进行专题试验研究。超高压直流换流站运行经验表明,一般而言,直流自然积污附盐密度为 0.07 mg/cm<sup>2</sup>,灰密取其 5 倍,采用深棱形瓷支柱绝缘子(伞间距/伞伸出为 95/95 mm)取爬电比距 54 mm/kV 可以满足防污要求,当外绝缘采用合成材料时,爬电比距可取 54×0.75~0.80=40.50~43.20mm/kV,爬电距离约 33 050~35 250 mm。以此为基础,根据设备套管或支柱绝缘子选择的外绝缘材料和直径,可以推算出特高压直流侧设备所需爬电距离,

同时对绝缘子伞形、伞间距等参数提出要求。

## 4 主要设备选择

### 4.1 换流阀

对于输送容量为 5 000 MW 的特高压直流输电工程,换流阀可采用成熟的直径为 5 英寸、光触发或光电触发、空气绝缘、水冷却晶闸管;当输送容量为 6 400 MW 时,由于额定输送电流达到 4 000 A,需要研发直径为 6 英寸的晶闸管,从目前研发情况看,供应商对 6 英寸晶闸管均采用光电触发技术。从换流阀本身的结构来看,采用二重阀或者四重阀均是可行的,没有明显的技术经济差异,采用四重阀可在一定程度上节约阀厅的投资和运行费用,但换流站总体占地面积较大,考虑到土地为不可再生的宝贵资源,目前各工程均推荐采用二重阀结构的换流阀<sup>[2][3]</sup>。

### 4.2 换流变压器

换流变压器的总体结构可以是三相三绕组式、三相双绕组式、单相三绕组式和单相双绕组式,类型的选择需根据运输条件和制造能力综合确定。特高压换流变由于电压等级高,容量大,一般只能采用单相双绕组变压器。

### 4.3 平波电抗器

平波电抗器按绝缘和磁路结构的不同,可分为干式空心油浸铁心式两种。这两种型式的平波电抗器在高压直流输电工程中均有成功的运行经验。在国外高压直流输电工程中,干式空心平波电抗器的应用较为广泛,在中国早期的高压直流输电工程中,如葛一南、天一广直流输电工程中,采用干式空心平波电抗器;而在 2000 年后建设的几条±500 kV, 3 000 MW 的高压直流输电工程,如三一常、三一广、贵一广 I 回以及贵一广 II 回直流输电工程中,均选用了油浸铁心式平波电抗器。应该指出,采用油浸铁心式平波电抗器的背景,是早期水平穿墙套管的非均匀淋雨闪络较难解决;利用油浸铁心式平波电抗器的干式套管直接穿入阀厅,取代水平穿墙套管,可回避这一问题。经前期广泛深入论证,特高压直流平波电抗器采用了干式空心型,主要基于以下理由:(1)油浸铁心式平波电抗器的综合造价约为干式空心平波电抗器的 2~3 倍;(2)采用合成穿墙套管,可有效解决非均匀淋雨闪络问题;(3)干式空心平波电抗器主绝缘只简单地由

支柱绝缘子提供,提高了主绝缘的可靠性,降低了设备研发难度;(4)干式空心平波电抗器一般不需配置在线监测电抗器内部故障的装置,简化了二次控制和保护设备;(5)干式空心平波电抗器无油,没有辅助运行系统,运行、维护费用低,基本属于免(少)维护,油浸铁心式平波电抗器需要装设风扇、水喷雾消防及油处理等,维护工作量大,运行费用高<sup>[7]</sup>。但需要说明的是,干式空心平波电抗器也有早期故障难于检测、可听噪声大以及抗震性能差等缺点。

### 4.4 特高压直流支柱绝缘子

平波电抗器、隔离开关和母线支撑均需要采用大量支柱绝缘子,因此支柱绝缘子的设计方案是影响特高压换流站直流开关场设备型式选择的关键因素之一。采用电瓷作为外绝缘,爬电比距取 54 mm/kV,同时考虑绝缘子伞间距的要求,±800 kV 户外绝缘子高度将达到约 15 000 mm 以上。研究表明,应用 15 000 mm 高的电瓷支柱绝缘子需要采用多支并联的复杂结构。作为平波电抗器支柱时,绝缘子数量多且安装倾角大,占地面积大;作为母线支撑时绝缘子需组装成三角架结构;用于隔离开关时每柱需 3~4 支绝缘子并联,设备结构复杂、庞大。因而无论从产品设计还是工程设计角度看采用电瓷作为外绝缘的支柱绝缘子技术方案均极不合理。因此,外绝缘采用合成材料是±800 kV 户外直流支柱绝缘子的必然选择。

## 5 平面布置

### 5.1 换流变压器及阀厅布置

特高压换流站换流变及阀厅布置方案对总平面布置格局起到决定性作用,目前工程实践中采用如图 3、图 4 两种组合方案<sup>[4]</sup>。

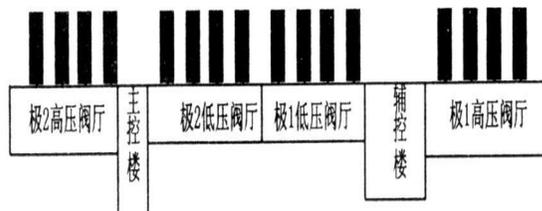


图 3 “一字型”二重阀厅布置示意图

两个方案在阀厅、控制楼的造价上没有明显的区

别,“背靠背”方案可听噪声控制效果略佳,“背靠背”方案运行维护条件略好。方案的最终取舍应当根据总平面布置格局的总体合理性,考虑地形地貌、地质条件、噪音敏感点方位等因素,经综合技术经济比较确定。

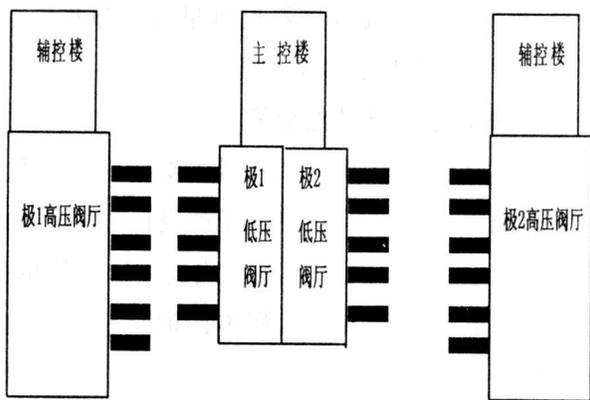


图4 “背靠背”二重阀厅布置示意图

## 5.2 直流场布置

户外布置和户内布置均是直流场可供选择的布置方案,采用户内开关场,设备研发难度相对较小,技术风险也相对较小,但土建投资大(每个换流站增加约6000万元)、运行能耗及费用高,而户外开关场则具有相反的特点,具体工程方案应根据站址污秽情况综合土建投资、设备投资以及运行费用等因素经技术经济比较确定。对严重污秽地区,户内开关场是较为可靠的解决方案,而污秽中等或较轻的地区,应尽可能采用户外开关场方案。从目前特高压直流工程直流场招标情况看,直流场设备外绝缘采用合成材料或瓷涂憎水涂料,均可满足户外安装要求,且各承包商并没有针对户内场进行设备研发,因此,直流场布置多采用户外布置方案。

与常规±500 kV 换流站直流场布置相比较,特高压直流场布置不同之处如下:(1)换流阀组的旁路回路布置在直流场;(2)平波电抗器(极母线和中性母线均安装)采用干式空芯型,支持式安装方式。

## 6 结语

1) 特高压换流站交流开关场电气主接线采用一个半断路器接线,换流阀组接线采用每极2个12脉

动阀组串联接线,每个阀组设置旁路回路。

2) 换流阀绝缘配合裕度按现行国家标准推荐值选取;在换流阀直流极母线侧或高端换流变阀侧出线套管处装设避雷器均是可行的。

3) 设备的外绝缘必须要考虑干弧距离和爬电距离两方面的要求,具体工程应根据站址的环境情况对直流自然积污附盐密度进行专题试验研究,作为特高压直流侧设备爬电距离选取的基础。

4) 换流阀宜采用二重阀结构,换流变一般应采用单相双绕组型式,平波电抗器采用干式空芯型。

5) 阀厅及换流变布置格局应当根据总平面布置方案的合理性,考虑地形地貌、地质条件、噪音敏感点方位等因素,经综合技术经济比较确定。对严重污秽地区,户内布置是特高压直流场较为可靠的解决方案,而污秽中等或较轻的地区,应尽可能采用户外开关场。

## 参考文献

- [1] 胡劲松等. 特高压直流输电工程可行性研究主要技术原则[J]. 中国电力, 2007, 40(8): 36—39.
- [2] 中国电力工程顾问集团公司, 西南电力设计院, 广东省电力设计研究院. 云广±800 kV 特高压直流输电工程可行性研究报告[R]. 北京: 中国电力工程顾问集团公司, 2005.
- [3] 中国电力工程顾问集团公司, 金沙江一期溪洛渡、向家坝水电站送电华东、华中±800 kV 特高压直流输电工程可行性研究报告[R]. 北京: 中国电力工程顾问集团公司, 2005.
- [4] 西南电力设计院, ±800 kV 向家坝换流站预初步设计报告[R]. 成都: 西南电力设计院, 2006.
- [5] DL/T605—1996. 《高压直流换流站绝缘配合导则》[S].
- [6] 中国南方电网公司. ±800 kV 直流输电技术研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [7] 张劲松. 特高压直流平波电抗器的选择[J]. 广东电力, 2006, 19(5).
- [8] 胡劲松. 涂敷RTV的电瓷支柱绝缘子在±800 kV 特高压换流站户外直流开关场的应用探讨[C]. 中国电机工程学会变电专委会变电站学组2007年度学术年会论文集.

### 作者简介:

胡劲松(1968—), 男, 工程硕士, 高级工程师(教授级), 从事发、变电设计工作。

(收稿日期: 2008—02—10)