

# 柔性直流输电技术及其示范工程

王熙骏<sup>1</sup>, 包海龙<sup>2</sup>, 叶 军<sup>1</sup>

(1. 上海电力设计院有限公司, 上海 200025; 2. 上海市电力公司, 上海 200122)

**摘 要:**城市电网的不断发展和电力电子器件的快速进步,使柔性直流技术在城市电网中的实际应用已成为可能。简要介绍了柔性直流输电的技术特点。具体介绍了上海南汇柔性直流输电示范工程的换流系统参数,主要设备的选择、配置,设备布置方案。总结了柔性直流输电技术在工程应用中存在的一些问题。

**关键词:**柔性直流输电; 高压直流输电; 电压源换流器

**中图分类号:** TM721.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6357(2011)02-5

## High-Voltage DC Flexible Technology and its Demonstration Engineering

WANG Xijun<sup>1</sup>, BAO Hailong<sup>2</sup>, YE Jun<sup>1</sup>

(1. Shanghai Electric Power Design Institute Ltd, Shanghai 200025, Shanghai China;

2. Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, Shanghai China)

**Abstract:** The continuous development of urban network and rapid updating of electric and electronic products make it possible that high-voltage DC (HVDC) flexible technology can be applied to urban network. Its technical features are briefly introduced. The converting system parameters of HVDC flexible demonstration engineering in Nanhui, Shanghai are presented in detail, as well as the equipment selection, configuration and arrangement. Some problems existing in the application of HVDC flexible are submitted.

**Key words:** HVDC flexible; HVDC transmission; voltage sources converter

自 1954 年世界上第一条高压直流输电 (HVDC) 投入商业运行以来,其作为一项日趋成熟的技术在远距离大功率输电、海底电缆送电、两个交流系统之间的非同步联络等方面得到了广泛应用。随着电力半导体技术尤其是绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 的快速发展,以电压源换流器 (VSC) 和 IGBT 为基础的柔性直流输电技术,将 HVDC 的容量减小到了只有几兆瓦到几十兆瓦。柔性直流输电除具有常规 HVDC 的优点外,还可直接

向小型孤立的远距离负荷供电、更经济地向市中心送电、方便地连接分布式电源、运行控制方式灵活多变、可减少输电线路电压降落和电压闪变等优点,从而可进一步提高电能质量。这种小功率的柔性直流输电系统有很好的应用前景。

## 1 柔性直流技术的基本原理

柔性直流输电系统的原理图如图 1 所示。

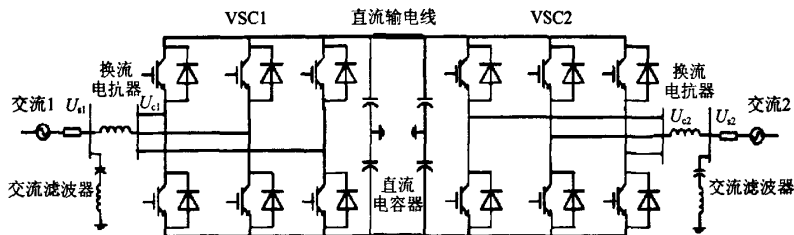


图 1 柔性直流输电系统的原理图

假设换流电抗器是无损耗的且忽略谐波分量,则柔性直流输电系统的等效简化如图 2 所示。

换流器和交流电网之间传输的有功功率  $P$  及无功功率  $Q$  分别为

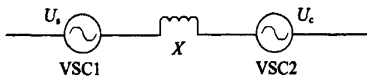


图2 柔性直流输电系统的等效简化图

$$P = \frac{U_c U_s}{X} \sin \delta \quad (1)$$

$$Q = \frac{U_s (U_s - U_c \cos \delta)}{X} \quad (2)$$

式中: $U_c$  为换流器输出电压的基波分量; $U_s$  为交流母线电压基波分量; $\delta$  为  $U_c$  和  $U_s$  之间的相角差; $X$  为换流电抗器的电抗。

由式(1)和式(2)可以看出,有功功率的传输主要取决于  $\delta$  角, $\delta$  角的正负决定了 VSC 是处于整流运行方式还是逆变运行方式,即有功功率的传输方向; $\delta$  角的大小决定了传输有功功率的大小。无功功率的传输主要取决于  $U_c$ 、 $U_s$  的正负决定了 VSC 是处于感性运行方式还是容性运行方式,即无功功率的传输方向; $U_c$  的大小决定了传输无功功率的大小。

## 2 柔性直流输电的技术特点

柔性直流输电与传统 HVDC 进行比较,柔性直流输电技术具有以下特点。

1) 在结构上,传统 HVDC 通过换流变压器同电网连接,柔性直流输电则通过小型电抗器与电网相连,只有在直流电压同电网电压不相匹配时才加换流变压器;传统的 HVDC 需要加电容器或者调相机等进行无功补偿,柔性直流输电则只需要尺寸很小的滤波器,如控制方式效果良好甚至可以取消滤波器;传统 HVDC 在直流侧采用平波电抗器抑制直流电流变化时的上升速度,减少直流线路中电压和电流的谐波分量,柔性直流输电采用 VSC 技术,直流侧采用电容器滤波。

2) 在应用场合上,柔性直流输电可用于向无源网络供电。如小岛,钻井平台等远离电网的负载,在距离超过 50~100 km 以上或者传输功率过大时,采用交流电缆变得不可行,而传统 HVDC 因占地面积大而难以实施。在柔性直流输电技术出现以前,小岛和钻井等地往往采用代价昂贵的本地柴油发电,成本高,且对环境造成污染,采用了柔性直流输电技术后,可以从电网直接输送电能至这些负荷区,降低了成本,减小了占地面积和对环境的污染。传统 HVDC 往往用于大

容量电能传输,在中、小容量电能传输成本方面,柔性直流输电更具有竞争力。柔性直流输电灵活的潮流控制能力使其具有系统中静止无功补偿器(SVC)或者静止同步补偿器(STATCOM)的功能,两端换流站可以各自独立地调节交流电压,在系统故障情况下,其控制交流电压的能力对于稳定电力系统更有利。传统 HVDC 要求所连接电网的短路容量足够大,柔性直流输电则可以用于短路容量小的系统,甚至是无源网络。

3) 在控制方式上,传统 HVDC 靠控制无功补偿器,如电容器的投切达到无功补偿的目的,其控制方式比较复杂,且成本较高。柔性直流输电系统中的 VSC 本身可以自由控制有功和无功功率,甚至可以使功率因数为 1,VSC 的这种调节能够快速完成;柔性直流输电可以自由控制输出交流电压的幅值和频率,可将变压器一次电压稳定在常数值,在系统发生短路故障时能通过调节输出电压来降低短路电流,有利于提高系统稳定性;柔性直流输电系统两个站之间不需要快速通信联系,每个站可以独立控制。

## 3 上海南汇柔性直流输电示范工程的换流系统参数

上海南汇柔性直流输电示范工程(下称本示范工程)将柔性直流输电技术应用于南汇风电场与主网并网的试点研究,可为以后的风电场和孤岛电网并网提供技术支撑和相关运行经验。

### 3.1 本示范工程的传输容量

本示范工程的柔性直流输电容量按照南汇风电场的现有容量进行选择。

南汇风电场总装机容量为 16.5 MW,共有 11 组风力发电机,风力发电机组稳态运行时的功率因数为 1.0,因此南汇风电场侧换流站的最大输送容量为 16.5 MW。考虑到风电场调压要求,按照换流站实现功率因数 0.85 计算,换流站容量设计为 19.4 MW。考虑本期工程为示范工程,确定柔性直流输电系统传输容量为 20 MW。这样不仅可以提高整个输送通道的供电可靠性,当并列运行的交流线路出现故障或退出运行时,柔性直流输电可以快速地承担全部的功率输送,而且可起到良好的电压动态支撑作用,可以解决因为系统侧电压波动和风力发电机出力波动所带来的

电能质量问题,有利于稳定电网电压,提高系统稳定性。

### 3.2 本示范工程的直流电压等级

本示范工程传输容量为 20 MW,若选取不同直流电压,则柔性直流输电系统换流站部分器件的稳态电气特性如表 1 所示。

表 1 不同直流电压下换流站部分器件的稳态电气特性

| 直流电压/kV | 直流线路中电流/kA | 换流阀中最大电流(峰值)/kA | 换流阀上/下桥臂耐受电压/kV |
|---------|------------|-----------------|-----------------|
| ±15     | 0.67       | 1.11            | 30              |
| ±20     | 0.50       | 0.83            | 40              |
| ±25     | 0.40       | 0.67            | 50              |
| ±30     | 0.33       | 0.56            | 60              |
| ±35     | 0.29       | 0.48            | 70              |

由表 1 可见,随着直流电压的升高,流过直流线路以及换流阀的电流不断降低,系统损耗也将因此减小。但是,换流阀上/下桥臂上的耐受电压却相应升高,这给 IGBT 的串联均压的实现带来了难度。因此,综合考虑输电系统损耗以及 IGBT 串联的可实现性,确定本示范工程的额定直流电压为 ±30 kV,此时直流线路上的电流为 0.33 kA,相应换流阀中最大电流为 0.56 kA。

## 4 本示范工程主设备的配置

### 4.1 换流阀

换流阀是组成换流器的基本组件,是交流系统和直流系统的分界点和转换器。由于柔性直流输电的电压和功率等级都比较高,单个 IGBT 器件远不能满足其耐压要求,因此需要使用 IGBT 串联组成阀体来满足耐压要求。但是由于每个器件的特性不尽相同,IGBT 串联阀体的可靠性成为了制约柔性直流输电技术发展的主要问题,也是需要解决的核心问题。

为了解决这一问题,从传统的多电平结构的概念出发,国外提出了一种新型的模块化多电平换流器(MMC),其输出交流电压的电压变化率小、电平台阶数多,且输出波形更趋近于正弦,并在容量扩展、运输、安装和维护等方面都明显优于其他换流器。

由于 MMC 结构的模块化特点,使其具有良好的可扩展性,在理论上可以方便地扩展到期望的任何电压和功率等级;在机械结构设计上,换流器中的每个模块为一个单元,可以通过特定工具

很容易地拆卸;每个换流桥臂中的单元数量可以通过这些单元的水平阵列最佳组合实现,也可以按垂直排列方式安装这些单元以满足特殊的工程要求。

根据目前国内柔性直流输电设备的研究情况,并考虑到本示范工程的示范性,为方便柔性直流输电技术应用到更高电压等级、更大输送容量系统中的扩展性,本次换流阀采用 MMC 技术。模块化多电平换流器(MMC)是由多个子模块(SM)构成,每个 SM 包含两个开关器件 IGBT,通过合理地控制每相桥臂中的 SM 的状态,就可以得到不同的交流输出电压。因此,可以将每个相单元的两个换流桥臂视为两个可控电压源,每个相单元中两个换流桥臂上电压之和即为直流侧电压。对于 MMC 来说通常控制直流侧电压保持定值,因此在保持直流侧电压值不变的情况下,调节上、下两个交流桥臂的电压输出比例,即可实现对换流器交流侧输出电压的调节。

### 4.2 接口变压器

本示范工程中接口变压器的主要功能有:①提供交流系统和换流器单元间的部分换相电抗;②将系统交流电压变换成与换流器交流出口电压相匹配的值,以确保开关调制度不至于过小,减小输出电压和电流的谐波量,并满足功率交换的要求;③阻止交流系统和换流器单元间零序电流的流通;④为换流器提供接地的可能性。

根据系统仿真计算得到,本示范工程中接口变压器中性点会有 2~4 A 的直流电流,直流偏置电流会使变压器铁芯迅速饱和并带动变压器本体发生震动而引起噪声。变压器按散热方式分为自冷和风冷,其中风冷散热器的噪声较高。因本示范工程中接口变压器的容量仅为 20 MV·A,散热量不高,此外考虑到环境噪声的要求,因此接口变压器采用自冷方式。另外,为了最大限度地降低接口变压器本体的噪声,将变压器本体与散热器采用水平分体布置的方式,变压器本体单独布置在变压器室,从而达到降低噪声与散热相兼顾的目的。

### 4.3 35 kV 开关设备

目前,国内 35 kV 的交流配电装置主要产品中按产品型式可分为,装配式设备和金属封闭开关设备两类,其中金属封闭开关柜按绝缘介质不

同又分为空气绝缘和 SF<sub>6</sub> 绝缘(即气体绝缘金属封闭开关设备 GIS)。目前国内 35 kV 的配电装置的生产工艺均已十分成熟,其电气要求都可达到本工程的要求。但金属封闭开关柜相对装配式设备而言,具有占地面积小、安装简单、运行可靠性更高、操作方便、检修维护量小等优点。另外, SF<sub>6</sub> 绝缘开关柜相对于空气绝缘开关柜来说,虽然占地相对更小,绝缘效果更好,但费用更高,设备运行业绩较空气绝缘开关柜也少很多。本示范工程中,35 kV 开关设备的额定电流和额定短路开断电流的要求均不高,空气绝缘开关柜完全能够满足要求,且设备费用节省明显,因此 35 kV 开关设备选择空气绝缘金属开关柜。

#### 4.4 阀电抗器

阀电抗器是本示范工程换流系统的一个关键部分,它是换流系统与交流系统之间功率的交换设备,对换流器的功率输送能力、有功功率与无功功率的控制都有影响。阀电抗器主要用于提供系统的换相电抗、平滑交流电流、抑制换流器相间环流的作用。

1) 阀电抗器阀侧电压是多电平阶梯波,造成阀电抗器端间电压带有纹波电压,增大电感值可以平滑流过阀电抗器的桥臂电流,将电流纹波限制在±5%以内。

2) 柔性直流输电系统内环采用间接电流控制,电流跟踪设定值的速度与桥臂电感值成反比,要使内环电流快速跟踪外环功率调节要求,调节阀电抗器端间电压引起的电流变化率应高于桥臂电流实际变化率。

3) 可以避免桥臂电流谐振。

本示范工程中阀电抗器容量较小,同时结合场地布置要求,最终选择空心干式电抗器,并按水平一字形布置。

### 5 本示范工程的设备布置方案

1) 传统 HVDC 由于电压等级高、输送容量大,其交流场设备及换流变压器基本都为户外布置,且换流阀大多为悬吊式。本工程交流电压为 35 kV,直流电压为±30 kV,电压等级较低,并且输送容量较小,换流阀阀塔为落地支架式。根据本示范工程设备的实际情况,并考虑到用地紧张的情况,两座换流站的电气布置均按全户内布置考虑。

2) 考虑到设备运输安装的便利性,大型一次设备如接口变压器、换流阀阀塔、电抗器等设备,均布置在地面一层;二次设备如保护屏柜、交直流辅助系统屏柜等,均布置在楼上的相应房间;按照电气连接的便利和清晰性要求,交流场地、直流场地相应布置在换流阀厅的两侧。

3) 与传统 HVDC 相同,柔性直流输电的换流阀阀厅对于空气温湿度及洁净度的要求均很高,站内需要配置大功率的空调和通风系统。在本示范工程中,根据场地和建筑空间的实际情况,将暖通设备布置在地下一层,设备主机尽量靠近阀厅。

### 6 柔性直流输电工程应用中存在的若干问题

1) 设备集成。目前,我国城市化的速度越来越快,很多城市尤其是上海、北京这样的特大城市中,市政建设的可用地块越来越少,用地成本则逐年增加。而柔性直流输电的重点应用方向就是向城市负荷中心供电,这就要求相关设备能够集成设计和生产,做到能够利用尽量小的空间输送尽可能多的功率。

2) 噪声的控制。换流站内换流阀及散热通风设备是主要的噪声源。常规直流换流站大多建设在城市远郊地区,占地面积较大,靠空间距离就能够有效地衰减噪声。而本示范工程的柔性直流换流站占地很小,依靠空间距离衰减噪声几乎不可能,这一方面需要降低设备的本体噪声,另一方面则需要对其建筑物设计提出新的要求以降低噪声。

3) 电磁屏蔽处理。柔性直流输电系统中,由于 IGBT 中电压和电流的急剧变换会产生频谱较宽的电磁干扰,当换流站离周边居民较近、电磁干扰等环境问题容易对人们的日常生活产生影响时,在建设柔性直流换流站之前,就需要预测电磁辐射对周围的影响。目前柔性直流的电磁噪声还没有较为准确的数学模型可供利用,工程实践中多参考常规直流的屏蔽方法。

### 7 结语

1) 柔性直流输电技术的控制和运行特性使其在输电距离较短时也具备较强的竞争力。柔性

(下转第 80 页)

动型是指用户需要通过身份验证,才能被动地对电力公司有关的业务做查询。

## 2.2 公共信息

目前 IVR 系统中的公共信息分为主动型和被动型 2 种。主动型公共信息是指用户无需身份验证,电力公司就可以主动地对用户进行各项告知;被动型则是指用户无需身份验证,就可以被动地对电力公司有关的业务做查询。

## 3 客户基础信息收集

为了确保短信平台能够顺利实施运行,需要对用户信息资料库进行更新完善,重点是对用户信息资料的收集整理(如用户手机联系方式的收集确认)。结合目前实际情况,针对居民用户,可以考虑采用以下几种形式进行用户基础信息收集。

- 1) 通过街道办事处收集用户信息。
- 2) 通过电费回执单的形式收集用户信息。
- 3) 通过电力片警收集用户信息。
- 4) 通过电力营业厅网点收集用户信息。
- 5) 通过电力公司网站收集用户信息。

## 4 结语

- 1) 短信平台的开发应用为电力用户提供了

(上接第 26 页)

直流输电占地面积小、能够瞬时实现有功和无功功率的解耦控制、易于构成多端直流系统,且能够同时向系统提供有功功率和无功率的紧急支援,在提高系统的稳定性和输电能力等方面具有优势。利用这些特点不仅可以解决目前城市电网存在的很多问题,而且可满足未来城市电网发展的要求,改善电力系统的安全稳定运行。

2) 于 2007 年,由国家电网公司立项的上海南汇柔性直流输电示范工程是上海电网在电力技术研发应用领域的重点项目之一,它的建成和投运必将对柔性直流输电的发展产生积极的示范作用。

### 参考文献

- [1] 文俊,张一工,韩民晓,等. 轻型直流输电——

更多的电力信息办理、查询途径,使用户可更加方便、快捷、及时地了解所需信息,也在一定程度上分流了 95598 客户服务中心的热线电话接听量和电力营业厅的业务处理量。同时,短信平台独有的双向沟通特点,确保了电力公司与用户(包括残障人士)之间沟通更加顺畅,也为加快电力服务的智能化提供了服务保障。

2) IVR 平台的拓展应用为用户提供语音提示,引导用户选择服务内容、输入电话业务所需数据,实现对数据库信息的交互式访问,并在需要的情况下将呼叫转到人工服务,使用户可得到及时、准确的服务。

### 参考文献

- [1] 林敏,何华,周晨,等. 省级集中的 95598 供电服务中心应用管理平台建设思路[J]. 电力信息化, 2010(06):68-71.
- [2] 李永斌,马磊. 电力系统短信服务平台[J]. 华东电力, 2009(11):1868-1869.

收修改稿日期:2010 年 12 月

杲永庆 (1970—),长期从事客户服务工作

施政欣 (1971—),长期从事营销工作

张立新 (1966—),政工员,长期从事营销、信访工作

种新一代的 HVDC 技术[J]. 电网技术, 2003, 27(1):47-51.

- [2] 马听霞,宋明中,李永光. 风力发电并网技术及其对电能质量的影响[J]. 上海电力学院学报, 2006, 22(3):283-291.
- [3] 胡兆庆,毛承雄,陆继明,等. 一种新型的直流输电技术——HVDC Light[J]. 电工技术学报, 2005, 20(7):12-16.
- [4] 徐政,陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术, 2007, 33(1):1-10.
- [5] 水利电力部西北电力设计院. 电力工程电气设计手册 电气一次部分[M]. 北京:中国电力出版社, 1989.

收修改稿日期:2011 年 2 月

王熙骏 (1978—),国家注册电气工程师,从事变电站电气设计工作

包海龙 (1974—),硕士,高级工程师,从事电力系统规划研究