

DOI: 10.7500/AEPS20130224003

# 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展

汤广福，贺之渊，庞 辉  
(国网智能电网研究院，北京市 102200)

**摘要：**柔性直流输电作为新一代直流输电技术，在世界范围内已经得到广泛发展和应用。文中针对柔性直流输电在工程技术、工程应用与未来发展 3 个方面分别进行了总结和分析。针对柔性直流输电系统主接线、换流器拓扑结构、控制和保护技术、柔性直流电缆、换流阀试验等多方面进行了全面的技术分析，并指出其技术难点以及未来发展的目标和方向。介绍了国内外柔性直流输电工程应用领域及现状，并结合未来电网发展特点及需求，分析了柔性直流输电工程应用的趋势，表明了柔性直流输电技术对促进未来电网的发展具有极其重要的作用。

**关键词：**柔性直流输电；两电平换流器；模块化多电平换流器；直流电网

## 0 引言

输电技术的发展经历了从直流到交流，再到交直流共存的技术演变。随着电力电子技术的进步，柔性直流作为新一代直流输电技术，可使当前交直流输电技术面临的诸多问题迎刃而解，为输电方式变革和构建未来电网提供了崭新的解决方案<sup>[1-2]</sup>。

基于电压源型换流器的高压直流输电概念最早是由加拿大 McGill 大学 Boon-Teck 等学者于 1990 年提出<sup>[3-4]</sup>。通过控制电压源换流器中全控型电力电子器件的开通和关断，改变输出电压的相角和幅值，可实现对交流侧有功功率和无功功率的控制，达到功率输送和稳定电网等目的，从而有效地克服了此前输电技术存在的一些固有缺陷。国际大电网会议(CIGRE)和美国电气与电子工程师协会于 2004 年将其正式命名为“VSC-HVDC”(voltage source converter based high voltage direct current)。ABB, Siemens 和 Alstom 公司则将该输电技术分别命名为 HVDC Light<sup>[5]</sup>, HVDC Plus 和 HVDC MaxSine，在中国则通常称之为柔性直流输电(HVDC Flexible)。

早期的柔性直流输电都是采用两电平或三电平换流器技术，但是一直存在谐波含量高、开关损耗大等缺陷。随着工程对于电压等级和容量需求的不断提升，这些缺陷体现得越来越明显，成为两电平或三

收稿日期：2013-02-24；修回日期：2013-07-03。  
国家自然科学基金国际（地区）合作与交流项目(51261130471)；国家自然科学基金资助项目(51177154)；国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2013AA050105)。

电平技术本身难以逾越的瓶颈。因此，未来两电平或三电平技术将会主要用于较小功率传输或一些特殊应用场合(如海上平台供电或电机变频驱动等)。2001 年，德国慕尼黑联邦国防军大学 R. Marquart 和 A. Lesnicar 共同提出了模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)拓扑<sup>[6-7]</sup>。MMC 技术的提出和应用，是柔性直流输电工程技术发展史上的一个重要里程碑。该技术的出现，提升了柔性直流输电工程的运行效益，极大地促进了柔性直流输电技术的发展及其工程推广应用。

本文从工程技术、工程应用与未来发展 3 个层面出发，首先分析了柔性直流输电工程现阶段技术发展所面临的挑战，未来相关技术的发展方向及预期的技术目标；然后总结了世界柔性直流输电工程的发展和应用情况，介绍了国外和国内典型柔性直流输电工程，指出其技术和应用上的特点；最后分析了未来国内外在柔性直流输电工程应用领域可能的发展趋势和前景。

## 1 柔性直流输电工程技术

### 1.1 柔性直流输电系统主接线

采用两电平、三电平换流器的柔性直流输电系统一般采用在直流侧中性点接地的方式，而模块化多电平柔性直流输电系统则一般采用交流侧接地的方式。无论是采用直流侧中性点接地的两电平、三电平换流器还是采用交流侧接地的模块化多电平换流器的柔性直流输电系统均为单极对称系统。正常运行时接地点不会有工作电流流过，不需要设置专门的接地极，而当直流线路或换流器发生故障后，整个系统将不能继续运行。此外，通过大地或金属回

线还可构成单极不对称结构,类似于传统高压直流输电系统的一个极。在相同系统参数下,相比于单极对称系统,单极不对称系统换流阀所耐受的电压水平是单极对称系统的 2 倍,且直流侧的不对称还将造成换流器交流侧电压水平的提升。

为了提升柔性直流输电系统的功率容量和电压等级,满足特高压、远距离、大功率输送的要求,单极换流站内换流器还可以由若干容量较小换流器单元串并联组合构成。如图 1 所示,两个单极不对称系统串联还可以构成与传统高压直流输电类似的双极对称系统。

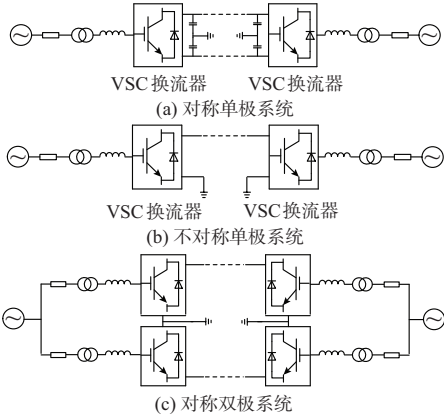


图 1 典型两端柔性直流输电系统

Fig.1 Typical two-terminal HVDC Flexible system

采用双极系统的变压器需要承受由于直流电压不对称造成的变压器直流偏置电压,与常规直流变压器不同的是,此时变压器不需要承受换流站产生的谐波分量。目前,柔性直流输电系统采用单极结构的最主要原因在于柔性直流输电工程为了降低直流侧故障的发生率,大都采用电缆作为传输线路。这样,采用单个换流器的可靠性相对更高一些,而且降低了工程成本。

对于多端柔性直流输电系统,系统连接方式一般为并联形式,以保证换流器工作在相同的直流电压水平。并联型多端柔性直流网络又可分为星形和环形两种基本结构。其他复杂结构都可以看成这两种结构的扩展和组合。图 2 分别为 4 种拓扑结构。

并联式的换流站之间以同等级直流电压运行,功率分配通过改变各换流站的电流来实现;串联式的换流站之间以同等级直流电流运行,功率分配通过改变直流电压来实现;既有并联又有串联的混合式则增加了多端直流接线方式的灵活性。与串联式相比,并联式具有更小的线路损耗、更大的调节范

围、更易实现的绝缘配合、更灵活的扩建方式以及突出的经济性,因此,目前已运行的多端直流输电工程均采用并联式接线方式。

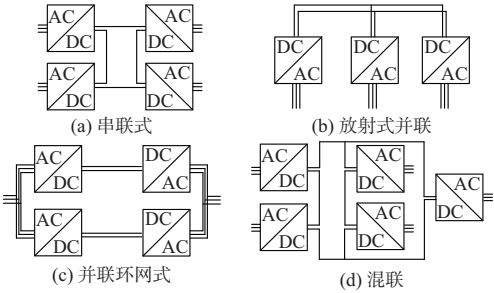


图 2 多端直流输电系统典型接线方式

Fig.2 Typical connection diagrams of multi-terminal HVDC

1.2 柔性直流输电换流器技术

根据桥臂的等效特性,柔性直流输电的换流器可以分为可控开关型和可控电源型两类。可控开关型换流器的换流桥臂等效为可控开关,通过适当的脉宽调制技术控制桥臂的开通与关断,将直流侧电压投递到交流侧。可控电源型换流器的储能电容分散于各桥臂中,其换流桥臂等效为可控电压源,通过改变桥臂的等效电压,间接改变交流侧输出电压。两者的等效电路如图 3 所示。给出了 2 种拓扑换流阀交流出口的输出波形<sup>[8-10]</sup>。

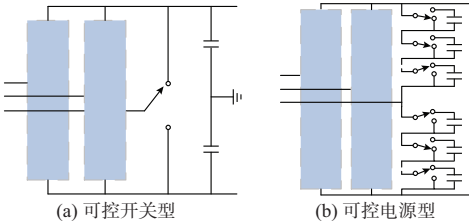


图 3 可控开关型和可控电源型换流器等效电路

Fig.3 Equivalent circuits of switch-controllable converter and voltage-controllable converter

可控开关型换流器以两电平换流器为典型代表,其拓扑结构与运行控制相对简单,但换流器开关频率较高(接近 2 kHz),交直流侧谐波含量较大,需要在换流站中加装多组滤波器,同时换流器的损耗也较高。三电平换流器虽然输出电压波形谐波含量相对较少,换流器的开关频率、总谐波水平和损耗都有所降低,但该换流器拓扑结构复杂,且成本较高,系统可靠性较低。此外,开关型电压源换流器每个桥臂由大量的开关器件直接串联,需要解决开关器件开通和关断引起的静态与动态均压等问题。

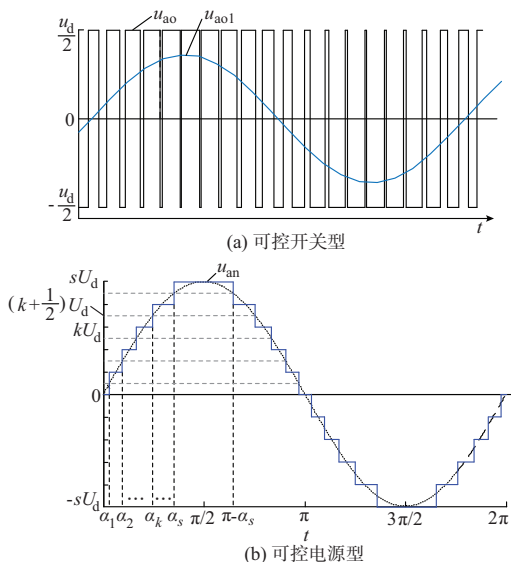


图4 换流阀交流侧输出波形  
Fig.4 Output waveform in converter AC-side

模块化多电平换流器是可控电源型换流器的典型代表<sup>[11-13]</sup>。桥臂的等效输出电压是通过改变投入桥臂内的串联子模块个数来实现的。如图5所示,根据子模块所采用的类型,又可分为半桥型、全桥型以及钳位双子模块型等多种形式。此外,级联两电平换流器(cascaded two level, CTL)由半桥电路级联而成,其本质上属于可控电源型换流器<sup>[14]</sup>。

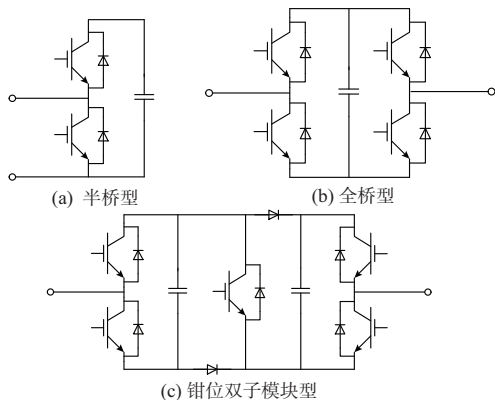


图5 模块化多电平子模块拓扑  
Fig.5 Submodule topologies of modular multilevel converter

当其桥臂中的子模块超过一定数量时,换流器输出波形为近似正弦的阶梯波,无需加装滤波装置。与两电平换流器相比,模块化多电平换流器的突出优势表现在:①模块化设计,易于电压等级的提升和容量的升级;②器件的开关频率和开关应力显著降低;③输出电压谐波含量和总电压畸变率大大减少,交流侧无需滤波装置。

相比于两电平换流器,模块化多电平换流器的

不足主要在于:①由于每个桥臂中串联的子模块数量较多,因此阀控系统在每个周期内所需处理的数据量非常大,对控制系统要求很高;②分布式储能电容需要增加子模块电容电压的均衡控制<sup>[15]</sup>;③各桥臂间能量分配不均,将破坏子模块内部的稳定性,导致电流波形发生畸变。

在目前投入工程应用的换流器技术中,无论是两电平还是半桥型模块化多电平换流器,均存在一个突出问题,即无法在直流故障下实现交直流系统的隔离。但全桥式和钳位双子模块型模块化多电平换流器,由于可以使桥臂等效输出电压为负,在直流电压急剧降低时,仍然可以支撑交流电压,从而实现对交流侧短路电流的抑制作用<sup>[16]</sup>。

### 1.3 柔性直流输电控制与保护

柔性直流控制保护系统是系统能够正常运行的核心,用于实现系统正常运行的控制功能和故障下的保护功能。控制保护系统包括换流站级控制保护系统和换流阀级控制保护系统。

但与常规直流输电不同的是,柔性直流输电中的阀级控制保护系统更为复杂。尤其是在模块化多电平柔性直流输电系统中,换流站级控制器(简称极控或者站控)只承担一部分控制和保护功能,对阀体的控制保护更多依赖阀级控制器完成。包括根据换流站级控制信号的要求产生换流阀子模块的控制信号,进行数据处理和汇总,以及实现换流阀的保护等功能(如图6所示)。因此,柔性直流控制保护系统通常要实现纳秒级的高速同步控制,以满足柔性直流输电控制系统高实时性的要求。

柔性直流换流站级控制系统除实现系统的正常启动、停运操作外,还包括稳态的功率控制和调节,其功率控制器包括有功类功率控制器和无功类功率控制器,有功类控制器包括有功功率控制和直流电压控制;无功类控制器包括无功功率控制和交流电压控制。一般来说,双端柔性直流系统的正常运行需要一站控制直流电压,另一端控制有功功率,而两站的无功调节相互独立,可以自由选择控制无功功率还是交流电压。在控制策略上,无论采用两电平还是模块化多电平换流器技术,其交流侧具有类似的等效数学模型,因此均可采用相同的站级控制策略。在众多的站级控制策略中,直接电流矢量控制策略以较高的电流响应速度和精确的电流控制效果已成为电压源型换流器的主流控制技术<sup>[17-19]</sup>。

模块化多电平换流器与常规直流输电和两电平柔性直流输电控制系统的区别主要在阀级。柔性直流输电中的阀基控制器(valve base controller, VBC)是实现站级控制系统与底层子模块控制的中

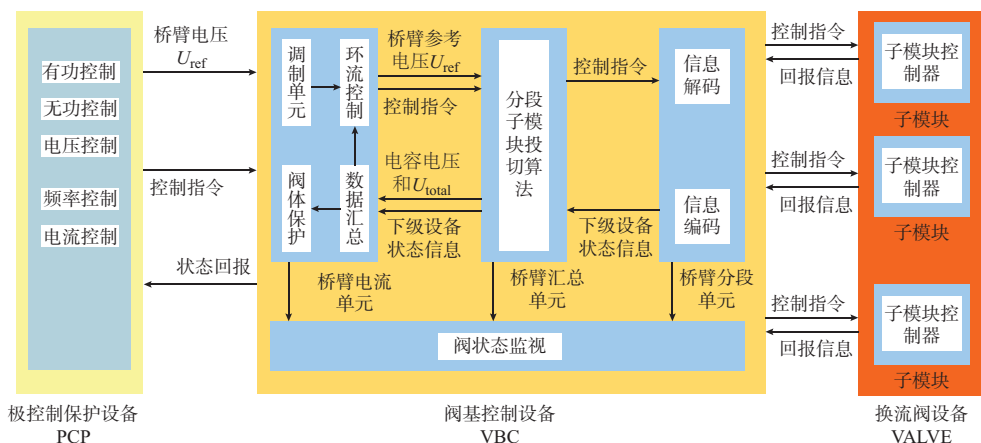


图 6 站控及阀控系统  
Fig.6 Station and converter control system

间接口,用于实现阀臂的控制、保护、监测及与站控系统以及换流阀的通信,同时实现子模块电容电压平衡功能以及环流控制功能,这是保证模块化多电平柔性直流系统正常运行的关键。由于高压大容量系统的阀臂往往由数百个子模块组成,为保证各个子模块之间的电压平衡,VBC 对子模块数据的处理速度要求极高,往往在  $100\ \mu\text{s}$  以下,这种大规模子模块的高速控制平衡技术,对阀控设计提出了很大的挑战。同时,模块化多电平技术所特有的环流现象会引起换流阀电流应力以及损耗水平的上升,严重时会造成系统失稳无法运行,因此环流控制策略的设计也成为阀控中的关键环节。

柔性直流输电保护系统的主要功能是保护输电系统中所有设备的安全正常运行,在故障工况下,能够迅速切除系统中故障或不正常的运行设备,以保证剩余健全系统的安全运行。高压直流输电系统的保护配置需满足可靠性、灵敏性、选择性、快速性、可控性、安全性和可维修性等原则。基于模块化多电平换流器的柔性直流输电系统其故障特性与两电平换流器系统保护策略两者主要的区别在于具体的保护分区和保护算法设计。但总体而言在保护总体配置上相差不大,如图 7 所示,大致可分为交流侧保护、换流器保护和直流区保护。

### 1.4 柔性直流输电电缆技术

由于柔性直流输电系统切除直流侧故障时比较困难,因此已建成的柔性直流工程线路大多数采用直流电缆以降低故障率。

与交流电缆相比,由于直流电缆的导体没有集肤效应和邻近效应,即使输送很大电流,也不必采用复杂的分裂导体结构。直流电缆的电场强度是按绝

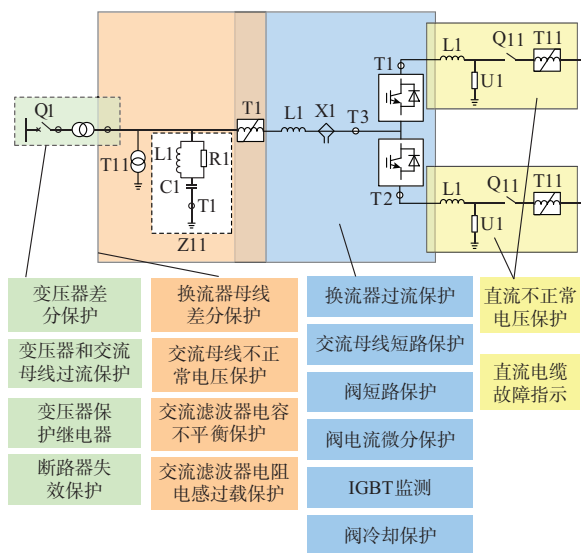


图7 柔性直流输电系统典型保护分区  
Fig.7 Typical protection zoning of HVDC Flexible transmission system

缘的电阻系数成正比分配的,绝缘的电阻系数是随温度变化的,当负载变大时绝缘表面的电场强度逐渐增加,因此直流电缆允许的最大负载不应使绝缘表面的电场强度超过其允许值,即不仅要考虑电缆的最高工作温度,而且要考虑绝缘层的温度分布。

与传统直流电缆相比,柔性直流输电中不要求直流电缆承受电压极性翻转,因此从某种意义上说,对柔性直流电缆的技术要求比传统直流电缆要低。

目前,用于柔性直流输电的电缆根据绝缘形式不同,主要分为自容式充油(SCOF)电缆、黏性浸渍纸绝缘(MI)电缆、交联聚乙烯(XLPE)电缆,如图8所示。



图 8 三种直流电缆技术

Fig.8 Three types of DC cable technology

SCOF 电缆技术非常成熟,电压等级可达到 800 kV。电缆内部充有低黏度的电缆油。SCOF 电缆的绝缘纸由针叶树木浆牛皮纸制成。当 SCOF 受到外力破坏而发生漏油时,不必马上进行停电处理,可从补油设备中加油维持电缆正常运行。但从环境角度来看,电缆漏油会造成环境污染,特别是海底电缆对海洋环境的污染。SCOF 电缆需要油箱等附属设备,运行维护工作量大,成本高。

MI 电缆技术也非常成熟,用于直流输电系统已超过 100 年。该种电缆最高可适用于直流 500 kV。目前,最长的工程路由长度为 580 km(NorNed 工程,2008 年),但理论上其传输长度几乎不受限制。MI 电缆运行温度最高只有 55 ℃,且不适用于温差较大的条件下运行。

XLPE 绝缘柔性直流输电电缆的绝缘材料为交联聚乙烯,其通过超净高纯度工艺或在交联交流电缆绝缘中添加纳米材料解决了交联直流电缆的空间电荷问题。XLPE 软化点高、热变形小,在高温下的机械强度高、抗热老化性能好,使该种类型电缆的最高运行温度达 90 ℃,而短时允许温度则达 250 ℃。XLPE 绝缘柔性直流输电电缆采用新型的三层聚合材料挤压的单极性电缆,由导体屏蔽层、绝缘层、绝缘屏蔽层同时挤压成绝缘层;中间导体一般为铝材或铜材单芯导体<sup>[20]</sup>。现有可满足工程要求的柔性直流电缆最高参数为±320 kV/1 560 A,±500 kV 及以上电压等级的柔性直流电缆也正在开发。

1.5 柔性直流输电试验技术

柔性直流输电的试验技术主要包括换流阀及阀控设备的试验技术。

针对换流阀试验技术,国外已经有了很多前期工作。CIGRE B4 48 工作组针对换流阀在各种工况下耐受的应力进行了详细的阐述和分析,并提出了相关的试验建议;IEC 62501 制定了相关的换流阀试验标准,但并没有给出相应的试验电路。目前,国际上许多公司都在开发柔性直流的相关试验能力,中国已经具备了相关的柔性直流型式试验能力,并完成了 1 000 MW/±320 kV 等级换流阀的型式试验。柔性直流换流器为电压源型,其基本工作原

理与常规直流换流器有所不同。因此,柔性直流换流阀的暂态、稳态工况均与常规直流换流阀有较大区别,原有的常规直流换流阀的试验项目、方法和设备大部分已不适用。因此应深入研究阀的工作原理和其中电力电子器件及其组合体上的电压、电流、热、力等应力和波形,然后提出相应的试验项目和等效试验方法。

在稳态运行中,柔性直流换流阀承受的电压、电流应力均为持续的直流和交流分量叠加。在暂态过程中,由于在子模块电容电压钳位作用下,换流阀中会出现短时的电容放电电流,该电流随着保护动作逐渐降低。

柔性直流换流阀的型式试验项目主要包括绝缘型式试验和运行型式试验,其中绝缘型式试验又分为阀对地绝缘试验和阀体绝缘试验,具体见表 1。

表 1 柔性直流输电换流阀主要试验项目  
Table 1 Main test items for HVDC Flexible converter

| 试验项目            | 内容          |
|-----------------|-------------|
| 柔性直流换流阀对地绝缘型式试验 | 阀支架交流耐压试验   |
|                 | 阀支架直流耐压试验   |
|                 | 阀支架操作冲击波试验  |
|                 | 阀支架雷电冲击波试验  |
| 柔性直流换流阀绝缘型式试验   | 直流耐压试验      |
|                 | 交直流耐压试验     |
| 柔性直流换流阀运行试验     | 最大运行负载试验    |
|                 | 最大暂态过负荷运行试验 |
|                 | 最小直流电压试验    |
|                 | 阀短路电流试验     |
|                 | 阀过电流关断试验    |
|                 | 阀电磁干扰试验     |

阀基控制器试验技术是测试阀控系统功能和可靠性的重要环节。从柔性直流阀基控制器试验系统角度看,常规直流的一个桥臂所有器件触发信号相同,可以采用单一的晶闸管器件等效方案进行试验;而柔性直流单个桥臂内的各个子模块触发信号均不相同,柔性直流输电的阀控系统为每个换流子模块提供不同的控制命令,原有的阀控系统等效测试方法已不适用于柔性直流换流阀控系统(见图 9)。

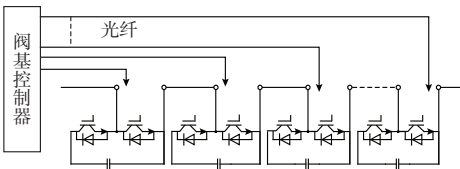


图 9 阀基控制器试验系统示意图

Fig.9 Diagram of test system for valve base controller

采用动模仿真技术构建的柔性直流数模混合仿真系统是目前模块化多电平换流器柔性直流输电系

统仿真研究重要技术手段。动模系统能精确模拟柔性直流换流阀动态特性,可为阀控系统和极控制保护系统提供硬件实时在环测试功能,如图 10 所示。

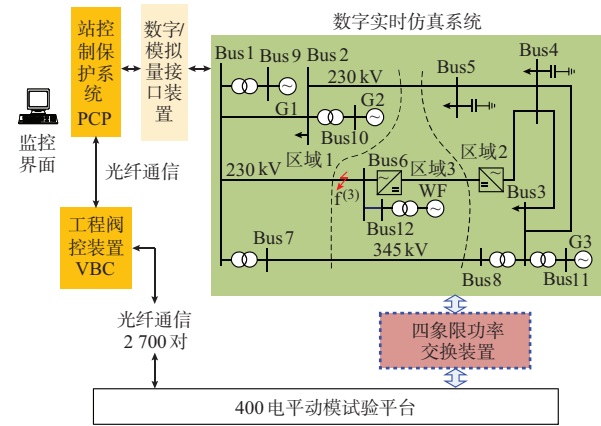


图 10 数模混合实时仿真系统示意图

Fig.10 Diagram of real-time hybrid simulation system

国外很多单位已开发出针对模块化多电平换流器阀控系统的试验设备。中国已经完成了可满足 3 000 节点的模块化多电平柔性直流动模实时仿真系统,能满足  $\pm 320\text{ kV}$  电压等级、控制  $100\text{ }\mu\text{s}$  以内的阀基控制设备在环测试和系统仿真,目前在国际上处于领先地位。而针对  $\pm 500\text{ kV}$  及以上电压等级工程,以及多端柔性直流和直流输电网络的仿真系统,也已经开始建设。

数字实时仿真系统可以完成电网建模,实现电磁暂态过程仿真,柔性直流接入、切除和运行方式切换过程仿真、低频振荡现象和故障态仿真,阀控系统解锁闭锁试验,阀控与极控设备之间的通信试验,换流阀启/停控制试验,阀故障模拟试验等。数字实时仿真是柔性直流输电系统研究和试验的必要手段,也可和动模试验相结合,组成功能更完善的仿真试验平台,降低动模试验系统开发成本和时间<sup>[21-22]</sup>。

2 柔性直流输电工程应用领域及现状

2.1 柔性直流输电工程应用领域

鉴于柔性直流输电技术特点,由其构成的系统可广泛应用于可再生能源接入、孤岛供电、城市供电、电网互联等领域。

采用柔性直流输电技术来进行风电、太阳能等功率输出波动较大的可再生能源接入,可以缓解由可再生能源输出功率波动引起的电压波动,改善电能质量。当交流系统发生短路故障时,柔性直流输电系统能够有效地隔离故障,保证风电场的稳定运行。据 CIGRE 测算,在距离大陆 60 km 以上的海

上风电场,柔性直流输电系统是唯一技术上可实现、经济上可接受的解决方案。

采用柔性直流输电技术向海岛、海上钻井平台等孤岛负荷供电时,可以充分发挥柔性直流系统自换相的技术优势。同时,直流线路在投资、运行费用、长距离传输不需要添加补偿设备等方面相对于交流线路具有优势。

采用柔性直流输电技术向城市中心供电,不仅可以快速控制有功功率和无功功率,解决电压闪变等电能质量问题;还能够提供系统阻尼,提高系统稳定性,并在严重故障时提供“黑启动功能”。另外,柔性直流输电采用地埋式直流电缆,无交变电磁场、无油污染,可以在无电磁干扰及不影响城市市容的情况下,完成城市电网的增容改造,满足城市中心负荷的需求和环保节能的要求。

采用柔性直流输电技术实现电网互联,不仅可以完成电网间功率交换的功能,还可以凭借其快速独立调节无功功率、“黑启动”、不提供短路电流等技术特性,解决大规模电网中的动态稳定性、电网黑启动以及短路电流超标等问题。同时,柔性直流换流站较同等容量的常规直流换流站占地面积更小,因此可以建设在更靠近负荷中心的位置。

2.2 国外柔性直流输电工程应用现状

截至 2012 年年底,欧洲、美洲、亚洲、大洋洲、非洲的 16 个国家共有 13 个柔性直流输电工程投运,其中 4 个工程用于风电接入、6 个工程用于电网互联、1 个工程用于大型城市供电、2 个工程用于海上钻井平台供电。

1999 年投运的哥特兰工程是世界上第一个风电接入柔性直流工程。该工程实现了瑞典哥特兰岛上的风电场接入电网。其参数为  $50\text{ MW}/\pm 80\text{ kV}$ ,首次采用了两电平技术以及 XLPE 电缆,如图 11 所示。工程投运后取得了良好的运行效果,但也暴露出损耗较高的问题。

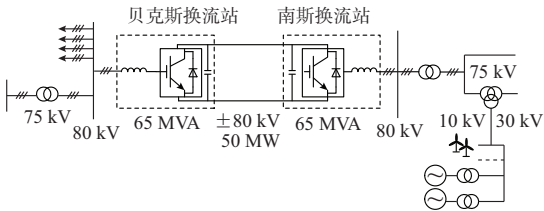


图 11 哥特兰柔性直流工程单线图

Fig.11 Single line diagram of Gotland HVDC Flexible project

2002 年投运的 Cross Sound Cable 工程实现了美国新英格兰纽黑文地区电网和纽约长岛地区电网的互联。其参数为 330 MW/ $\pm 150$  kV, 使用了 42 km 的海底电缆, 如图 12 所示。在 2003 年的北美“8·14”大停电事故后的几个小时, 根据电力调度要求, 首先将该工程投入运行。这样除了通过直流电缆向长岛供电以外, 还通过交流电压控制对相连的长岛和纽黑文地区电网提供了稳定交流电压的能力, 对于长岛的电力恢复起到了重要支撑作用。此工程在事故后恢复供电所提供的黑启动能力, 很好地体现了柔性直流输电系统的技术优势。

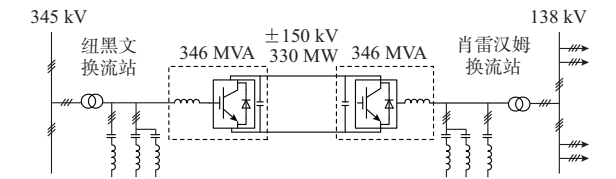


图 12 Cross Sound Cable 工程单线图  
Fig.12 Single line diagram of Cross Sound Cable project

2005 年 10 月投运的挪威泰瑞尔柔性直流输电工程(Troll A)是世界上第一个从大陆向海上平台提供电能的柔性直流输电系统(见图 13)。用于从挪威的克尔斯奈斯换流站向泰瑞尔海上天然气钻井平台上的用电设备供电。工程使用了 2 个并联的柔性直流输电系统, 每个系统的额定功率为 45 MW, 直流电压  $\pm 60$  kV, 输电线路为 70 km 长的海底电缆。这是世界上第一个从大陆向海上平台提供电能的柔性直流输电系统。

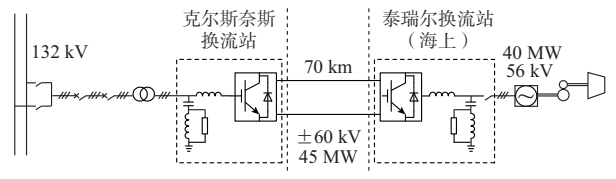


图 13 泰瑞尔工程单线图  
Fig.13 Single line diagram of Troll A project

Trans Bay Cable 工程于 2010 年投入运行。该工程实现了对旧金山城市供电, 同时还是世界上第一个使用 MMC 技术的柔性直流输电工程(见图 14), 其额定参数为 400 MW/ $\pm 200$  kV。Trans Bay Cable 工程从匹兹堡市开始, 经过一条位于旧金山湾区海底的 88 km 直流电缆, 把电能送到旧金山。在此工程完成之后, 电能可以直接送到旧金山的市中心, 增强了旧金山城市供电的可靠性。该工程的投运, 标志着模块化多电平技术正式在工程中应用, 在柔性直流输电发展史上具有里程碑式的意义。

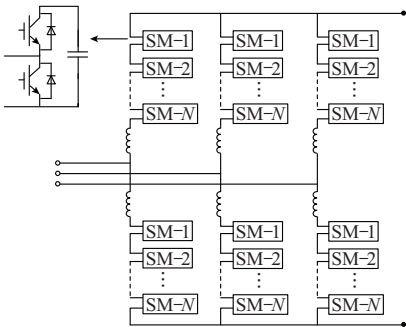


图 14 Trans Bay Cable 工程换流器拓扑  
Fig.14 Converter topology of Trans Bay Cable project

### 2.3 国内柔性直流输电工程应用现状

中国在柔性直流输电工程技术与应用方面起步较晚。直到 2005 年, 国内的研究基本还都集中在两电平换流器柔性直流输电的系统建模与仿真分析等方面, 对于工程技术的研究少有涉及。

2006 年开始, 国内相关研究单位及时把握住了技术发展的趋势, 与西门子公司几乎同步开展了基于 MMC 的柔性直流输电工程技术研究。在基础理论研究、关键技术攻关、核心设备研制、试验能力建设、工程系统集成等方面取得了一系列的自主创新成果, 并于 2011 年 7 月在上海南汇投运了中国首条柔性直流输电示范工程<sup>[18-23]</sup>, 使中国在柔性直流输电技术与工程应用领域实现了飞跃式发展。

通过近几年的研发, 中国在柔性直流输电整体技术研究和工程应用等方面均已达到世界先进水平, 并在部分换流阀技术和工程参数等方面达到了世界领先。

上海南汇柔性直流输电示范工程采用模块化多电平换流器结构, 其容量为 20 MW, 直流电压为  $\pm 30$  kV, 输送长度约为 8 km<sup>[23]</sup>, 南汇风电场通过该工程接入上海电网(见图 15)。为了验证柔性直流系统在风电接入中的作用, 在世界上首次开展了人工短路试验, 结果表明该工程可大幅度提高风电场的低电压穿越能力。这是中国在直流输电领域取得的又一重大创新成果, 标志着中国在柔性直流输电技术领域已经迈入世界前列。

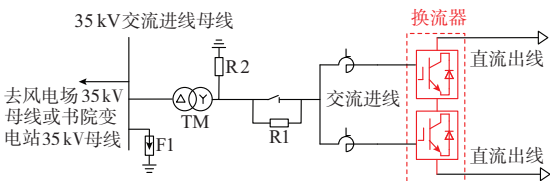


图 15 上海南汇工程南风换流站接线图  
Fig.15 Circuit diagram of Nanfeng station in Shanghai Nanhui project

为满足大连市区南部经济发展对电力的需求,避免自然灾害对市区供电产生严重影响,消除电网安全隐患,2012 年开始在大连市建设一个连接北部主网和市区南部港东地区的柔性直流输电工程。该工程额定容量 1 000 MW,直流电压 $\pm 320$  kV<sup>[24]</sup>,输送距离约 60 km。2012 年 12 月底,依托该工程研制成功了世界首套 1 000 MW/ $\pm 320$  kV 换流阀及阀基控制器,并通过了 DNV KEMA 的见证试验(见图 16)。这标志着中国在柔性直流输电换流阀领域已经达到世界最高水平。同时依托该工程,建成了世界上规模最大的 400 电平动模平台,该平台有效验证了大连阀控系统设计和各种功能的正确性。在工程设计的基础上,掌握了一整套高压大容量柔性直流系统成套设计技术、换流站施工技术以及系统运行维护技术,为中国柔性直流技术的进一步推广奠定了良好的基础。

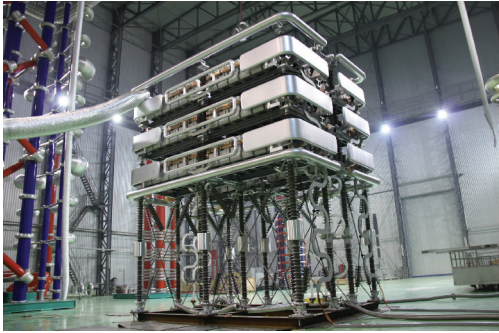


图 16 1 000 MW/ $\pm 320$  kV 柔性直流换流阀  
Fig.16 1 000 MW/ $\pm 320$  kV HVDC Flexible converter valve

为提高舟山电网的供电可靠性和运行灵活性,并考虑对舟山诸岛丰富风力资源的消纳,国家电网公司在浙江舟山规划建设了一个 5 端柔性直流输电工程。该工程计划于 2014 年建成,工程包含 5 个换流站,系统总容量 1 000 MW,其中最大的换流站容量为 400 MW,直流电压等级为 $\pm 200$  kV(见图 17)。

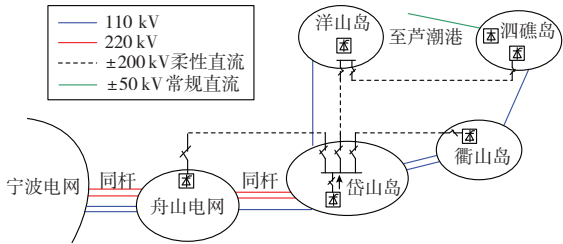


图 17 舟山 5 端柔性直流输电工程示意图  
Fig.17 Diagram of Zhoushan five-terminal HVDC Flexible project

该工程是目前世界上端数最多的柔性直流输电

工程<sup>[25]</sup>,建成后可满足舟山地区负荷增长需求,形成北部诸岛供电的第二电源,提高供电可靠性;提供动态无功补偿能力,提高舟山电网电能质量;缓解舟山群岛风电场并网难题,提高电网调度运行的灵活性。工程的建设和实施,也将为未来实现海岛供电、可再生能源并网、多端直流输电系统乃至直流电网构建等应用,提供技术和工程上的良好借鉴。

在广东南澳风电基地,也正在建设一个 3 端柔性直流输电工程<sup>[26]</sup>。因为南澳岛周围安装了大量风力发电机,为实现可靠的风电接入,计划首先将两个风电场分别通过 110 kV 变电站接入两端换流站,在汇总后通过柔性直流输电系统将电能输送到汕头电网。南澳工程的直流电压等级为 $\pm 160$  kV,输送额定功率为 200 MW。其系统接线见图 18。

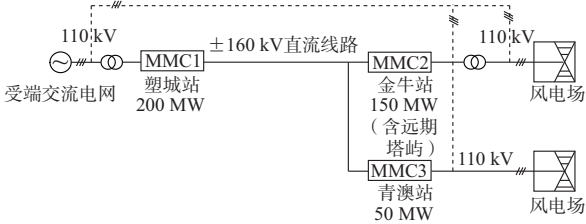


图 18 南澳 3 端柔性直流输电工程接线图  
Fig.18 Circuit diagram of Nan'ao three-terminal HVDC Flexible project

3 柔性直流输电未来发展趋势

柔性直流技术的快速进步,推动了其在风电并网、电网互联等场合的广泛应用,而市场的发展又反过来推动了技术水平的提升。从目前国内外应用需求上看,未来柔性直流技术的主要发展方向将包括:高压大容量柔性直流技术、直流电网技术及架空线柔性直流输电技术等。

3.1 高压大容量柔性直流输电技术

大型风电场群、城市负荷、电网互联等应用场合对柔性直流输电输送容量提出更高要求。目前世界上最高等级柔性直流输电工程为 1 000 MW/ $\pm 320$  kV,而在未来 3~5 年,1 200 MW/ $\pm 400$  kV 及以上等级的工程也将很快得到实施。

从技术上来看,目前柔性直流输电系统未来电压等级和容量的提升,主要受到 XLPE 电缆的电压等级和现有绝缘栅双极型晶体管(IGBT)器件发展水平的限制。而此前工程中所采用单个换流器方式,也限制了系统容量的提升。因此未来柔性直流的容量水平提升,将主要集中于更高电压等级 XLPE 电缆、新型大容量电力电子器件以及新的系统拓扑应用等方面。

### 1) XLPE 电缆技术

在电缆的选择上,更大容量的柔性直流输电工程目前还可以考虑采用 MI 电缆。这种电缆有更高的电压等级,但造价相对要高,难以大范围推广,因此未来仍然需要在 XLPE 电缆方面取得突破。

在 XLPE 电缆方面,目前面临的主要难点是电缆绝缘材料的电荷分布和制造工艺,以及电缆接头的设计和加工。世界上的主要电缆厂家,均在此方面投入了较大的研发力度。目前  $\pm 500$  kV 的 XLPE 电缆已经处于试验阶段,有望在近 2~3 年内能够得到工程应用。而随着未来工程等级的继续提升,更高电压等级的 XLPE 电缆也可能出现。根据预测,在未来 5 年内,XLPE 直流电缆的电压和容量等级将可以提升至 600 kV/2 GW。而在未来 10 年左右的时间,直流电缆的电压和容量等级将会达到 750 kV/3 GW 以上。

### 2) 电力电子器件技术

提高 IGBT 器件的容量,需要解决由于电压电流提升给 IGBT 芯片制造及封装带来的难题。要在保证产品可靠性的同时大幅提升产品生产工艺,所面临的难度极高。目前国内外的主要器件生产厂家针对高压大电流等级的 IGBT 器件都正在开展研发,有望在未来几年内投入商业使用。同时,在器件的应用过程中还要解决新型 IGBT 的驱动设计、电流关断过冲抑制、快速保护设计等一系列技术难点,这需要进行认真的设计及长期的测试验证。

而在新型的半导体器件方面,未来最有发展前景的一种材料是“宽禁带”半导体材料(如碳化硅(SiC)等),这也是目前世界范围内功率半导体器件研究的热点之一。使用这种材料所制造的 IGBT 器件,在耐压水平、通流能力、工作温度等方面与现有器件相比均有数倍至数十倍的提升,同时在损耗方面则只有传统硅器件的几分之一。基于这种器件构成的换流器和系统,将直接可以使现有的工程容量提升数倍至数十倍,这将对柔性直流输电的发展带来革命性的改变。但是由于 SiC 等材料的质量和工艺控制等方面目前还存在较多难题,因此目前还只停留在小容量的样品和产品阶段,在短期内还无法真正投入大容量的工程应用。预计在未来 20 年, SiC 等器件可以在电力系统中取得一定规模的示范性应用。

### 3) 组合式系统拓扑技术

由于电缆和器件开发的周期都较长,近期内的工程如果需提升容量可以采用两种方案。一是采用换流器组合的形式;二是采用全桥式子模块构成的换流器,利用其负电平输出提升交流电压水平,从而提升系统容量。但这两种方案都将导致系统造价

增加。

多个换流器组合的基本方法包括串联、并联或串并联等,这与常规直流输电中所使用的多换流器方案基本相同。多换流器组合的系统结构不仅可以降低线路的绝缘水平要求,而且可以提高系统在故障情况下的可靠性,也有利于开展分期的工程建设(如 Caprivi Link 工程)。另外,目前的柔性直流输电工程中,每个系统两端均采用电压源换流器,但是其他的换流站结构形式在特殊的场合下也有着较高的可行性,例如系统两端换流站分别采用电流源换流器与电压源换流器的混合式直流,或者换流站中的两个换流器分别采用电流源换流器和电压源换流器的系统等<sup>[27-29]</sup>。这些系统结构中的一些方案已经开始在工程中使用(如 Skagerrak4 工程和 GBX 工程等)。

基于目前技术水平及组合型拓扑的应用,可将柔性直流输电系统电压等级直接提升到  $\pm 640$  kV 及以上,单个换流器容量可提升到 2 000 MW。而如果考虑使用换流器的串并联组合形式,例如使用 8 个 320 kV/1 kA 换流器单元,每两个单元串联后再进行并联,则其电压等级可以达到 640 kV,总容量可以达到 2 560 MW。如果由这个串并联单元再组合成双极系统,则系统参数将可达到  $\pm 640$  kV/5 120 MW。

## 3.2 多端直流及直流电网技术

随着可再生能源的继续发展,以及现有电网技术升级等方面的需求,柔性直流输电未来的发展将会继续集中在风电场的组网和集中送出、区域电网的互联、城市中心负荷的电力输送等方面。这些应用场合在很多情况下需要实现多电源输入和多落点的供电,这就需要采用多端直流甚至直流电网技术。

### 1) 多端直流与直流电网的概念

多端直流输电(multi-terminal HVDC)是直流电网发展的初级阶段,是由 3 个以上换流站通过串联、并联或混联方式连接起来的输电系统,能够实现多电源供电和多落点受电。由于柔性直流在构建多端系统具有的独特技术优势,未来必将会在多端直流系统中得到快速发展。

直流电网相当于多端直流的扩展,它是具有先进能源管理系统的智能、稳定的交直流混合广域传输网络。在网络中不同客户端,现有输电网络、微电网和不同的电源都可以得到有效的管理、优化、监控、控制和对任何问题进行及时响应。它能够整合多个电源,并以最小的损耗和最大的效率在较大范围内对电能进行传输和分配。

直流电网与多端直流系统最根本的区别在于:直流电网是一个具有“网孔”的输电系统,其每个换

流站间都有多条传输线路,整个系统拥有冗余,可靠性高<sup>[30]</sup>(见图 19)。因此,未来多端直流的发展方向应该是向网络化发展,即基于直流的输配电网。

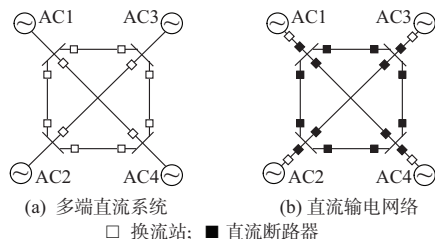


图 19 多端直流输电系统与直流输电网络  
Fig.19 Multi-terminal HVDC and HVDC grid

## 2) 直流电网的未来发展趋势

针对直流电网的发展,欧洲 2008 年提出了基于高压直流输电技术来构建新一代输电网络的“超级电网(Super Grid)”计划,基于高压直流输电(主要是柔性直流输电)来建立广域的智能输电网络,实现广域范围内的可再生分布式电源的功率波动抑制,以及可再生能源的大规模高效接入、保障电网的安全稳定运行、提升供电质量并促进可再生能源与电力系统的协调发展等目标<sup>[31-33]</sup>。以英国为例,英国国家电网在东海岸和北海区域规划了数十个大型海上风电场,以及近 50 条柔性直流输电工程,构成柔性直流输电网络,并通过直流网络和挪威等国相联,以在大范围内平衡可再生能源的波动。

## 3) 直流电网技术与装备发展

应该看到,目前直流电网还处于起始发展阶段,还有很多关键性问题需要解决。如直流电网系统和设备的标准化,直流电网核心设备研制,直流电网控制技术,直流电网广域测量及故障检测技术,直流电网保护技术,直流电网安全可靠评估技术等。

从目前的技术发展来看,直流电网要真正实现应用还需要重点解决以下问题。

一是要解决直流线路故障的故障隔离问题,其主要研发方向是新的换流器拓扑。由于多端直流和直流电网可能需要换流器实现直流故障自清除等功能。因此,如何在现有的拓扑结构上进行改进,甚至研究出全新的换流器拓扑,以满足这些场合的应用需求,是目前研究的一个热点问题。目前可应用于多端系统的具有直流故障清除能力的拓扑除了已有的全桥子模块拓扑外,已经有多个机构和学者提出了新型的换流器拓扑结构,如基于全桥或者 CDSM(钳位双子模块)的方案<sup>[34]</sup>;Alstom 公司提出的混合拓扑方案既能有效降低系统造价,同时能够抑制直流故障电流,实现故障清除,也是现在的研究热点之一。

二是要研制适用于直流系统的直流断路器。针对直流断路器,国内外已经展开相应的样机设计研制,目前 ABB 已经研发出 320 kV 电压等级的直流断路器,可开断直流电流 16 kA,该样机模块可适用于 320 kV 电压等级应用场合。Alstom 公司和中国相关产业公司也开展了相关研制工作,预计 2~3 年内也将有相应的产品推出<sup>[25]</sup>。

三是要解决不同电压等级直流电网联结问题,主要解决方案为研发合适的直流变压器。针对直流变压器(DC/DC 变换器),国内外还未有相关的产品推出,各个研究单位和产业公司均在研究和概念设计阶段,预计成熟产品的推出还需要一定时间。

## 3.3 长距离架空线柔性直流输电技术

柔性直流输电技术在架空线作为传输线路的应用情况同样有着广泛的应用前景。采用架空线传输不仅可以通过提升电压等级提升系统容量,还可以有效降低线路投资,节省造价。而中国地域辽阔,各地发电和用电资源配置严重不平衡,因此长距离架空线输电在国内电力发展过程中有着不可替代的作用。

采用架空线传输系统,需要解决线路暂时性故障所需要的故障清除能力,其解决方案除了研制相应电压等级的直流断路器以外,还可以通过研制可以清除直流故障的新型换流器拓扑来解决,这与直流电网技术的需求相同。

同时,在架空线传输系统中,通过采用送端常规直流,受端柔性直流进行工程建设或者将常规直流逆变站改造为柔性直流换流站。在节省造价的同时,解决由于系统故障造成的换相失败,也是柔性直流在架空线系统应用中的一种重要发展方向。

## 4 总结和展望

全球应对气候变化要求的日益提升及能源供给安全形势的日趋严峻,迫切需要构建更为智能、清洁、高效、可靠的输电网络,这也已经成为世界各国电力行业发展的共同目标。柔性直流技术以其有功无功独立调节、无源供电能力以及易于构建直流电网等特点,越来越受到人们的关注。同时,可关断器件、直流电缆等设备技术水平的不断提高,有效提升了柔性直流的输送容量,使柔性直流输电成为电网可采用的主要输电方式之一。可以预见,随着未来可再生能源接入和电网升级改造等需求,世界范围内的柔性直流输电应用将会获得日益广阔的发展。

由于地域和经济发展的影响,欧洲发达国家普遍面临着供电走廊紧张、能源结构调整等重大问题,建设大规模直流电网有利于其能源的优化配置,同

时能够解决由于大范围风电接入引起的系统安全隐患,柔性直流技术作为其风电接入和直流电网建设的优先选择,发展极为迅速。预计在10~20年时间内,欧洲范围内将有望建成以柔性直流为基础、主干网为500 kV及以上等级、10 GW及以上输送容量为主的区域性直流电网。

而在中国、美国、印度、巴西等地域辽阔的国家,特高压交直流输电技术仍将是解决远距离大容量电能输送问题的有效手段,但对于区域性新能源并网和消纳问题,柔性直流和直流电网技术将是有效的补充。未来10年将是直流电网技术和建设快速发展的阶段,随着容量的不断提升,某些领域逐步取代传统直流和交流输电是大势所趋。

## 参考文献

- [1] 国家电网公司. 国家电网公司促进清洁能源发展综合研究报告[R]. 北京: 国家电网公司, 2009.
- [2] 汤广福, 贺之渊, 曹均正, 等. 2012年国际大电网会议系列报道: 高压直流输电和电力电子技术最新进展[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(24): 1-6.  
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, CAO Junzheng, et al. A review of 2012 CIGRE on application and perspective in HVDC and power electronics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(24): 1-6.
- [3] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.
- [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.
- [5] ABB. HVDC Light[EB/OL]. [2012-12-31]. <http://www.abb.com.cn/industries/us/9AAC30300394.aspx?country=US>.
- [6] MARQUART R, LESNICAR A. New concept for high voltage—modular multilevel converter[C]//Proceedings of the IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists, Conference (PESC'04), June 20-25, 2004, Aachen, Germany: 5p.
- [7] 丁冠军, 丁明, 汤广福. VSC-HVDC主电路拓扑及其调制策略分析与比较[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 64-68.  
DING Guanjin, DING Ming, TANG Guangfu. Analysis and comparison of VSC-HVDC topologies and corresponding modulation schemes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 64-68.
- [8] CIGRE Technical Brochure No. 269. DC transmission using voltage sourced converters[R]. Paris, France: International Council on Large Electric Systems, 2005.
- [9] 丁冠军, 汤广福, 丁明. 新型多电平电压源换流器模块的拓扑机制与调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(36): 1-8.  
DING Guanjin, TANG Guangfu, DING Ming. Topology mechanism and modulation scheme of a new multilevel voltage source converter modular[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(36): 1-8.
- [10] 丁冠军, 丁明, 汤广福, 等. 应用于VSC-HVDC输电系统中的新型混合脉宽调制技术[J]. 电网技术, 2009, 33(7): 7-13.  
DING Guanjin, DING Ming, TANG Guangfu, et al. A new hybrid PWM technology used in the VSC-HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2009, 33(7): 7-13.
- [11] HENRY S, DENIS A M, PANCIATICI P. Feasibility study of off-shore HVDC grids[C]//Proceedings of the IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 25-29, 2010, Minneapolis, MN, USA: 5p.
- [12] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平电压源换流器的数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(24): 1-8.  
WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Modeling of modular multi-level voltage source converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(24): 1-8.
- [13] HANS-JOACHIM KNAACK. Modular multilevel converters and HVDC/FACTS: a success story[C]//Proceedings of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications, August 30-September 1, 2011, LUDVIKA, SWEDEN: 2498-2503.
- [14] BJORN J, KARLSSON P, ASPLUND G, et al. VSC-HVDC transmission with cascaded two-level converters[R]. CIGRE session, Paris, France, 2010.
- [15] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平HVDC输电系统子模块电容值的选取和计算[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 26-32.  
WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Selection and calculation for sub-module capacitance in modular multi-level converter HVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 26-32.
- [16] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 交流电网强度对模块化多电平换流器HVDC运行特性的影响[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 17-24.  
WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Influence of ac system strength on operating characteristics of MMC-HVDC system[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 17-24.
- [17] 赵岩, 胡学浩, 汤广福, 等. 模块化多电平变流器HVDC输电系统控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 35-42.  
ZHAO Yan, HU Xuehao, TANG Guangfu, et al. Control strategy of modular multilevel converters based HVDC transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 35-42.
- [18] 董云龙, 包海龙, 田杰, 等. 柔性直流输电控制及保护系统[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 89-92.  
DONG Yunlong, BAO Hailong, TIAN Jie, et al. Control and protection system for VSC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 89-92.
- [19] 韦延方, 卫志农, 孙国强, 等. 一种新型的高压直流输电技术—MMC-HVDC[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 1-9.  
WEI Yanfang, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. New HVDC power transmission technology: MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 1-9.
- [20] 应启良. 我国发展直流海底电力电缆的前景[J]. 电线电缆, 2012(3): 1-7.  
YING Qiliang. The prospect of development of DC submarine cables in China[J]. Electric Wire & Cable, 2012(3): 1-7.
- [21] 刘栋, 汤广福, 郑健超, 等. 模块化多电平换流器小信号模型及开环响应时间常数[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24): 1-7.  
LIU Dong, TANG Guangfu, ZHENG Jianchao, et al. Small signal modeling and analysis of open-loop response time constant of MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(24): 1-7.
- [22] 刘栋, 汤广福, 贺之渊. 模块化多电平柔性直流输电数字-模拟混合实时仿真技术[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 68-73.  
LIU Dong, TANG Guangfu, HE Zhiyuan. Hybrid real-time

- simulation technology for MMC-HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 68-73.
- [23] 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.
- QIAO Weidong, MAO Yingke. Overview of Shanghai flexible HVDC transmission demonstration project [J]. East China Electric Power, 2011, 39(7): 1137-1140.
- [24] 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,2012,2:1-5.
- GE Weichun, GU Hongqun, HE Zhiyuan. Overview of Dalian flexible HVDC transmission demonstration project [J]. Northeast China Electric Power, 2012, 2: 1-5.
- [25] 国家电网公司.浙江舟山海岛多端柔性直流项目获批复[EB/OL]. [2012-11-26]. <http://www.sgcc.com.cn/ztlz/newzndw/sdsf/04/271599.shtml>.
- [26] 饶宏.南方电网大功率电力电子技术的研究和应用[J].南方电网技术,2013,7(1):1-5.
- RAO Hong. Research and application of the high-power electronic technology in China Southern Power Grid [J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(1): 1-5.
- [27] 郭春义,赵成勇, MONTANARI A.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):98-104.
- GUO Chunyi, ZHAO Chengyong, MONTANARI A. Investigation of hybrid bipolar HVDC system performances [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(10): 98-104.
- [28] 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,2011,35(2):82-86.
- LI Guangkai, LI Gengyin, LIANG Haifeng, et al. Research on a novel hybrid HVDC system [J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 82-86.
- [29] 袁旭峰,程时杰,文劲宇.基于 CSC 和 VSC 的混合多端直流输电系统及其仿真[J].电力系统自动化,2006,30(20):32-36.
- YUAN Xufeng, CHENG Shijie, WEN Jingyu. Simulation study for a hybrid multi-terminal HVDC system based on VSC and CSC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(20): 32-36.
- [30] 汤广福,罗湘,魏晓光.多端直流输电与直流电网技术[J].中国电机工程学报,2013,33(10):8-17.
- TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [31] VRANA T K, TORRES-OLGUIN R E, LIU B, et al. The North Sea Super Grid—a technical perspective [C]// Proceedings of the IET 9th International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC'10), October 19-21, 2010, Glasgow, UK: 5p.
- [32] JOVICIC D, HERTEM van D, LINDEN K, et al. Feasibility of DC transmission networks [C]//Proceedings of the 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe'11), December 5-7, 2011, Manchester, UK: 8p.
- [33] FELTES J W, GEMMELL B D, RETZMANN D. From smart grid to super grid: solutions with HVDC and FACTS for grid access of renewable energy sources [C]//Proceedings of the IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 24-28, 2011, Detroit, MI, USA: 6p.
- [34] MARQUARDT R. Modular multilevel converter topologies with DC short circuit current limitation [C]// Proceedings of the IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE&ECCE'11), May 30-June 3, 2011, Jeju, Republic of Korea: 1425-1431.

汤广福(1966—),男,通信作者,博士,教授级高级工程师,博士生导师,主要研究方向:高压直流输电、柔性直流输电和灵活交流输电技术及应用。E-mail: gftang@sgri.sgcc.com.cn

贺之渊(1977—),男,博士,高级工程师,主要研究方向:柔性直流输电和大功率电力电子试验技术研发及应用。

庞辉(1980—),男,博士,工程师,主要研究方向:柔性直流输电技术研发及应用。

(编辑 丁琰)

## Research, Application and Development of VSC-HVDC Engineering Technology

TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui

(State Grid Smart Grid Research Institute, Beijing 102200, China)

**Abstract:** As a new generation of DC transmission technology, voltage source converter based high voltage direct current (VSC-HVDC) system is being developed and applied worldwide. The engineering technology, engineering application and future development for VSC-HVDC are summarized and analyzed, respectively. A comprehensive technical analysis is made of VSC-HVDC including main circuit design, converter topology, control and protection system, VSC-HVDC cable, converter valve testing etc. to point out the technical barriers and future development directions. This paper also gives an overview of the application and status quo of VSC-HVDC projects in the world. With an eye to the characteristics and demands of future grid development, the engineering application trend of VSC-HVDC projects is demonstrated, which shows that the VSC-HVDC technology has a critical role to play in future grid development.

This work is supported by the Funds for International Cooperation and Exchange of the National Natural Science Foundation of China (No. 51261130471), National Natural Science Foundation of China (No. 51177154) and National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2013AA050105).

**Key words:** VSC-HVDC; two-level converter; modular multilevel converter; DC grid