

电压源换流器高压直流输电技术最新研究进展

汤广福¹, 贺之渊¹, 滕乐天², 易荣¹, 何维国²

(1. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192; 2. 上海市电力公司, 上海市 浦东区 200122)

New Progress on HVDC Technology Based on Voltage Source Converter

TANG Guang-fu¹, HE Zhi-yuan¹, TENG Le-tian², YI Rong¹, HE Wei-guo²

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;

2. Shanghai Electric Power Company, Pudong District, Shanghai 200122, China)

ABSTRACT: A novel high voltage DC transmission (HVDC) technique based on voltage sourced converter (VSC), fully-controlled power electronic devices and pulse width modulation (PWM) technology is introduced. The work principle and key technology of VSC based HVDC (VSC-HVDC) are presented in detail. The technical characteristics and application fields of VSC-HVDC are analyzed. The latest research and application status, especially the research trends of the first VSC-HVDC demonstration project for wind power grid integration in China, are described. It is shown that VSC-HVDC has extensive application prospect and is one of an important development direction for power transmission in future.

KEY WORDS: VSC-HVDC; voltage source converter; fully-controlled power electronic device

摘要: 介绍了以电压源换流器、全控型电力电子器件和脉宽调制技术为核心的新型高压直流输电技术,详细阐述了电压源换流器高压直流输电系统的工作原理和关键技术,分析了其技术特点和应用领域,回顾了国外的最新研究进展和工程应用现状,以及在我国的研究动态和应用于风电场并网的首个电压源换流器高压直流输电示范工程建设情况。相关研究表明,电压源换相高压直流输电技术在电力系统中有着广阔的应用前景,是未来输电技术的一个重要发展方向。

关键词: 电压源换相高压直流输电(VSC-HVDC); 电压源换流器; 全控型电力电子器件

0 引言

可再生清洁能源固有的分散性、小型性、远离负荷中心等特点使采用交流输电或传统直流输电(high voltage direct current transmission, HVDC)联网很不经济。海上钻探平台、孤立小岛等无源负荷,

目前采用昂贵的本地发电装置,既不经济,又污染环境。另外,城市用电负荷快速增加,要求利用有限的线路走廊输送更多的电能和大量的配电网转入地下。上世纪 90 年代后期发展的新一代直流输电技术,以电压源换流器(voltage source converter, VSC)和可关断电力电子器件为核心,是一种更加灵活、经济和环保的输电方式,可有效解决以上问题。

国际上权威的电力方面学术组织,如国际大电网会议组织和电气电子工程师协会,将该技术正式称为电压源换流器高压直流输电(voltage source converter-high voltage direct current transmission, VSC-HVDC)^[1-3], ABB 公司称之为轻型直流输电^[4],西门子公司则称之为新型直流输电^[5]。为了形成自有知识产权,国内有关专家一致建议在国内将该技术统一命名为柔性直流输电(high voltage direct current transmission flexible, HVDC Flexible)。本文在阐述柔性直流输电原理的基础上,分析其技术特点,总结其国外研究和应用现状,介绍其国内的研究情况,并展望其发展前景。

与目前常用的基于晶闸管的高压直流输电技术相比,柔性直流输电具有有功无功灵活可调、不需要交流电网支撑、不增加系统短路容量、可以对系统快速阻尼调节、滤波容量小、占地面积小、环境污染小、具备黑启动功能等显著特点。详细比较如表 1 所示。

1 柔性直流输电技术简介

1.1 概述

典型的柔性直流输电单站单线原理如图 1 所示,换流站采用 VSC,换流电抗器是 VSC 与交流侧能量交换的纽带。

表1 常规直流和柔性直流输电系统的比较
Tab. 1 Some different characteristics between LCC-HVDC and VSC-HVDC

比较项目	输电方式	
	常规直流输电	柔性直流输电
换流器元件	晶闸管	绝缘栅双极晶体管
开关特性	开通可控、关断不可控	开通关断均可控
触发方式	相控触发	脉宽调制
换相方式	强迫换相	自换相
换相失败	会发生	不会发生
滤波器容量	较大	较小
无功补偿装置	需要	不需要
换流站间通讯	需要	不需要
占地	较大	较小
对交流系统依赖性	不能向无源网络送电	可以向无源网络送电
功率控制	较慢, 不灵活	较快, 灵活
无功控制能力	没有	有
对系统安全稳定影响	不利较多	有利较多
工程建设时间	较长	较短
多端直流互联	较难	容易

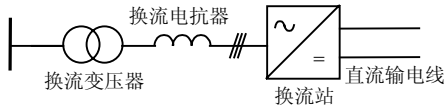


图1 柔性直流输电系统原理图
Fig. 1 Basic diagram of HVDC Flexible

假设换流电抗器是无损耗的, 忽略谐波分量时, 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:

$$P = \frac{U_s U_c}{X_1} \sin \delta \quad (1)$$

$$Q = \frac{U_s (U_s - U_c \cos \delta)}{X_1} \quad (2)$$

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; δ 为 \dot{U}_s 和 \dot{U}_c 之间的相角差; X_1 为换流电抗器的电抗。

可以看出, 通过控制 δ 就可以控制直流电流的方向及输送有功功率的大小, 通过控制 U_c 就可以控制 VSC 发或吸收无功功率及其大小。

VSC 和全控型电力电子器件有多种, 本文仅介绍目前在柔性直流输电中已得到应用的两电平、二极管钳位式三电平和模块化多电平 VSC 及其采用的全控型器件绝缘栅双极晶体管 (insulate gate bipolar transistor, IGBT)^[1]。

1.2 IGBT 器件

IGBT 问世于 1982 年, 1997 年出现了 2.5 kV 和 3.3 kV 的 IGBT, 最近 6.5 kV 的 IGBT 也已投入市场。开关速度快、驱动功率小、自保护能力强、控制精确灵活等优良特性使得 IGBT 成为柔性直流输电系统电力电子器件的最佳选择。IGBT 为三端四层结构的半导体器件, IGBT 的等效电路图及图

形符号如图 2 所示。从图中可以看出, IGBT 相当于一个由 MOSFET 驱动的 GTR, 是以 GTR 为主导器件, MOSFET 为驱动器件的达林顿结构器件。由于 IGBT 器件不能承受反向电压, IGBT 在使用时需要反并联一个快恢复二极管。

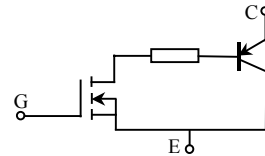


图2 IGBT 等效电路图原理图
Fig. 2 Equivalent principle of IGBT

图 3 和图 4 给出了目前柔性直流输电所采用 IGBT 器件换流阀的分解图。压装式 IGBT 由于其短路失效特性应用于两/三电平 IGBT 串联换流阀中^[6]; 模块化多电平换流器(modular multi-level converter, MMC)由于无需器件串联, 焊接式 IGBT 完全满足需求, 而且更加经济^[5]。

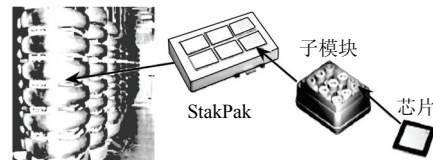


图3 两/三电平拓扑 IGBT 换流阀分解图
Fig. 3 Disassembling diagram of 2/3-level converter valve



图4 模块化多电平拓扑 IGBT 换流阀分解图
Fig. 4 Disassembling diagram of MMC converter valve

1.3 电压源型换流器

两电平 VSC 拓扑如图 5(a)所示, 其结构简单、紧凑, 具有很好地工程应用价值。两电平 VSC 前期较多采用正弦脉宽调制 (sinusoidal pulse width modulation, SPWM), 如图 5(b)所示。SPWM 缺点是开关频率高 (1950 Hz), 增加了系统损耗。在后期工程中, ABB 采用了优化脉宽调制, 将开关频率降低至 1150 Hz^[4]。

二极管钳位式三电平 VSC 拓扑如图 6 所示。与两电平 VSC 相比, 开关器件电压应力减小; 在得到同样波形质量的情况下, 所需开关频率较低。二极管钳位式三电平 VSC 调制策略与两电平 VSC 的类似。但是, 它必须采取必要措施克服其固有中性点电压偏移问题。另外, 当采用三次谐波注入 SPWM 调制来提升调制比宽度时, 必须采取必要措施防止注入的三次谐波波及到直流侧。

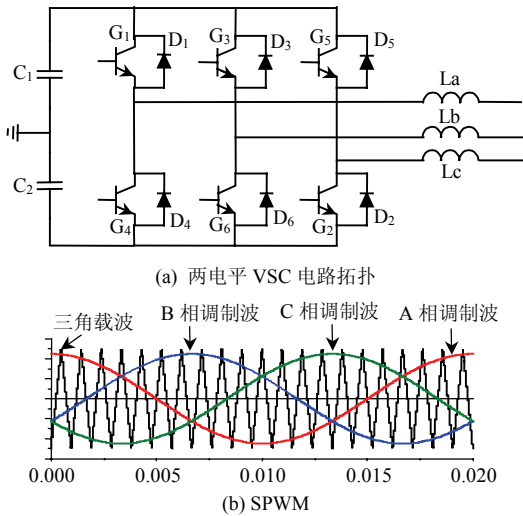


图 5 两电平 VSC 拓扑及其调制

Fig. 5 Diagram of a 2-level VSC topology and its modulation

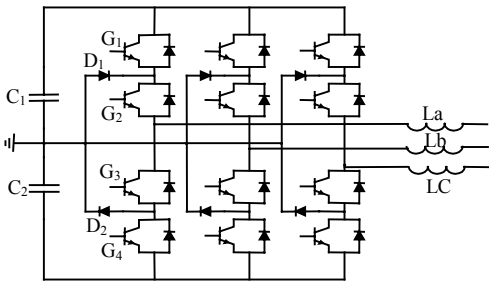


图 6 二极管钳位型三电平 VSC 拓扑

Fig. 6 Diagram of three-level diode-clamped type VSC topology

在现有柔性直流输电工程中已经广泛采用两电平和二极管钳位式三电平 VSC。由于直流输电电压等级比较高，单个 IGBT 器件远不能满足耐压要求，须采用 IGBT 串联提高耐压。西门子公司则另辟蹊径，采用了模块化多电平 VSC^[5]，其单相结构示意图如图 7 所示。该拓扑无需器件直接串联，功

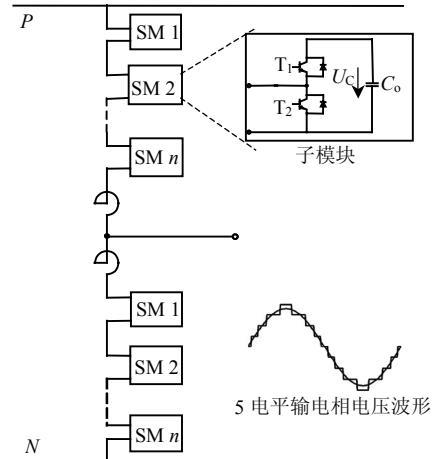


图 7 模块化多电平换流器单相拓扑

Fig. 7 Single-phase diagram of MMC converter topology

率、电压等级变化灵活，随着电平数的增加，开关频率和谐波可大大减小，在很多情况下无需使用交流滤波器。其不足之处在于各子模块电容电压间的平衡以及高电平数时所带来的控制难度的增加。

1.4 柔性直流输电系统控制

对于柔性直流输电系统的控制策略，已有较多的相关文献进行了报道^[1-8]，归纳起来主要分 2 类：1) 基于“电压幅值和相位控制”的间接电流控制策略；2) 基于同步旋转坐标系下的直接电流控制策略。由于直接电流控制策略通过电流反馈和电压前馈补偿等环节，直接控制流过换流电抗器和变压器的电流，具有动态响应速度快、能实现限流等良好的控制性能，因此目前的应用工程基本采用此种控制策略。

基于同步旋转坐标系下的直接电流控制策略原理如图 8 所示。由图可知，该控制系统主要由内环电流控制器、外环功率控制器、触发脉冲生成环

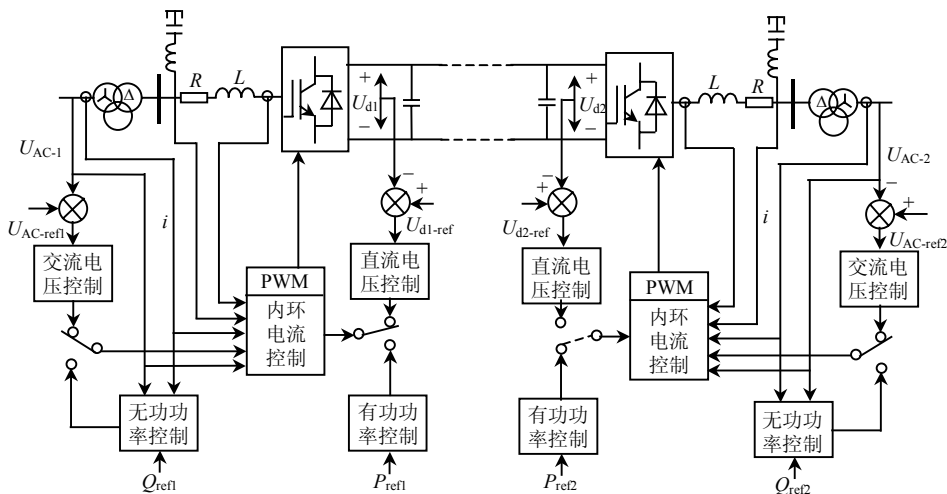


图 8 柔性直流输电系统的控制系统框图

Fig. 8 Control system diagram of VSC-HVDC

节、以及锁相同步和同步坐标变换等环节(图中未标出)构成。对于外环功率控制器,其主要形式有:无功功率控制器、有功功率控制器、直流电压控制器、交流电压控制器等,上述这些控制器也构成了 VSC-HVDC 系统的基本控制方式。然而对于 VSC-HVDC 系统应用于不同的领域,如电网背靠背互联、大容量风电场接入、孤岛供电、多端直流输电并联运行、VSC-HVDC 与传统直流输电的混合运行、VSC-HVDC 与交流线路的混合并联运行等,其具体采用的控制方式也不尽相同。在 VSC-HVDC 系统中,两站之间的有功功率控制应该协调一致,其中一个 VSC 站采用直流电压控制模式,而另外一个站采用有功功率控制模式。恒定的直流电压控制可以使两个 VSC 站间的有功潮流自动保持平衡控制,两站之间不需要通讯。通常,受端站采用直流电压控制模式,而送端站采用有功功率控制模式,例如 Gotland 工程就采用这种控制方式。当然,也允许每个站从有功功率控制模式转变为直流电压控制模式,反之亦然。

两站之间无功功率的控制是完全独立的,所需无功功率可以由交流电压或直接无功功率控制来实现。由于换流器容量限制,在同一个站实现独立有功功率和无功功率控制时,必须限制在一个特定运行范围。当使用 VSC-HVDC 连接风力发电场时,通常连接风场的 VSC 站使用频率控制模式和电压控制模式。另外,当使用 VSC-HVDC 向无源交流网络供电时,通常连接无源交流系统侧的 VSC 站也使用交流电压控制模式和频率控制模式。与传统的直流输电相比,VSC-HVDC 的另外一个显著特点是,在连接两个独立的交流系统时,一侧交流系统发生故障并不会影响到另一侧交流系统和换流器的工作。有关研究表明,通过控制系统的设计,能够有效地抑制换流装置的过电流和过电压问题,而且能够在两侧交流系统发生不对称故障或三相短路故障时,VSC-HVDC 系统仍能传输一定的有功功率。因此,在设计 VSC-HVDC 的控制系统时,可以通过合理的控制策略来提高系统在故障情况下的不间断运行能力。

1.5 柔性直流输电的传输电缆

柔性直流电缆采用新型的三层聚合材料挤压的单极性电缆^[4]。它由导体屏蔽层、绝缘层、绝缘屏蔽层三层同时挤压成绝缘层,中间导体一般为铝(铜)材单芯导体。该电缆有如下特点:

1) 强度高,抗拉伸能力强,方便掩埋,尤其

适合于海底敷设。

2) 重量轻、传输功率密度大。

3) 因绝缘材料寿命比交流电缆的长得多,电缆寿命也较长。

地下/海底电缆实物图如图 9 所示。值得注意的是虽然交联聚乙烯交流电缆的外形和结构于挤压聚乙烯直流电缆类似,但并不能直接用于直流输电,因为通过直流电流时聚乙烯中空间电荷分布不均会破坏电缆绝缘^[7]。

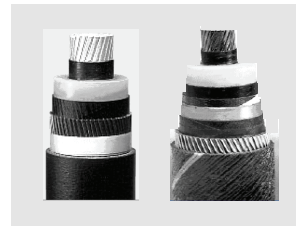


图 9 地下/海底电缆实物图

Fig. 9 Real DC cable (land/submarine)

2 柔性直流输电技术的特点和应用领域

2.1 技术特点

柔性直流输电具有如下显著的技术优势^[1-4,8]:

1) 克服了传统 HVDC 受端系统必须是有源网络的根本缺陷,使利用 HVDC 为远距离的孤立负荷送电成为可能。

2) 克服了传统 HVDC 不能单独控制有功功率和无功功率的不足,可独立、精确、灵活方便的对有功功率和无功功率进行控制。此外,能够起到静止同步补偿器的作用,提高系统稳定性。

3) 在潮流反转时,直流电流方向反转而直流电压极性不变,这与传统的 HVDC 恰好相反。从而克服了传统多端 HVDC 系统并联连接时潮流控制不便和串联连接时影响可靠性的问题。

4) 较传统 HVDC 而言,其产生的谐波大为减弱,从而减小了滤波装置的容量,简化了换流站的结构,换流站占地面积仅为同容量下传统 HVDC 的 20%左右。

此外,柔性直流输电不会增加系统的短路容量,具有良好的电网故障后快速恢复控制能力,模块化设计使柔性直流输电的设计、生产、安装和调试周期大大缩短,换流站间无需快速通信,可以相互独立控制,易于实现无人值守等。

2.2 应用领域

VSC-HVDC 克服了传统 HVDC 的固有缺陷,使得 HVDC 的应用范围得到扩展,为 HVDC 技术的发展开辟了新的方向。按其现有投运的工程及其

技术特点来分析其应用领域为^[9-12]:

1) 连接分散的小型发电厂。受环境条件限制,清洁能源发电一般装机容量小、供电质量不高且远离主网,如中小型水电厂、风电场(含海上风电场)、潮汐电站、太阳能电站等,由于其运营成本很高及交流线路输送能力偏低等原因使采用交流互联方案在经济和技术上均难以满足要求,利用 VSC-HVDC 与交流大电网实现互联是充分利用可再生能源的最佳方式,有利于保护环境。如瑞典哥特兰(Gotland)岛 VSC-HVDC 工程和丹麦的 Tjaereborg 工程。Gotland 工程是世界上第一个商业化运行的 VSC-HVDC 工程。该系统为风力发电提供电压支持且采用地下电缆输送电能,环境影响很小。Tjaereborg 工程是第一个用于风力发电的 VSC-VDC 示范工程,它有效地解决了风力发电所致的无功功率和电压问题。

2) 用于电网的非同步互联和电力交易。通过 VSC-HVDC 可以实现不同频率的电网互联,构筑地区电力供应商之间交换电力的技术平台,从而增加系统的运行灵活性和可靠性。如澳大利亚的 Direct Link 工程和 Murray Link 工程都是用于异步联网、电力交易,同时满足环境的要求。同样,美国的 Cross Sound Cable 工程将纽约长岛和 New England 电网实现非同步联网,该工程将 VSC-HVDC 的直流电压和直流电流等级都提高到了一个新的水平,而且该工程于 2003 年 8 月在美国东北部电网的黑启动过程中发挥了十分积极的作用,反映了 VSC-HVDC 具有很强的电网恢复控制能力。

3) 用于海上钻井平台供电。远离陆地电网的海上负荷如:海岛或海上石油钻井平台等负荷,通常靠柴油或天然气来发电,不但发电成本高、供电可靠性难以保证,而且破坏环境。用 VSC-HVDC 输电,这些问题都能得以解决,同时还可将多余电能(如用石油钻井产生的天然气发电)反送给系统。挪威投运的 Troll 工程,就是用于向海上天然气钻井平台上的用电设备供电。该工程采用 VSC-HVDC 技术除了考虑到长距离海底电缆输电和环境保护要求外,还考虑到钻井平台上的同步电动机需要变频(0~63 Hz)调速、运行电压在 0~56 kV 范围内变化、以及换流器空间和重量等限制因素。

4) 构筑新一代城市直流输配电网。由于大中城市的空中输电走廊限制,原有架空配电网络已不

能满足电力增容的要求,合理的方法是采用电缆输电。而直流电缆不仅比交流电缆占有空间小,且能输送更多的有功。另外,VSC-HVDC 系统具有的有功和无功独立调节能力,使系统在输送有功的同时能够保持两侧交流系统的电压恒定,从而提高电能质量;柔性直流输电由于自身的特点还容易实现多馈入分支供电,且不增加系统的短路电流。因此 VSC-HVDC 技术是城市供电和增容的最佳途径。

3 柔性直流输电国外研究和应用现状

柔性直流输电自 1997 年第一个工程投入工业试验运行以来,世界范围内的研究一直十分活跃。目前,国际上的研究在工程实用化方面和基础理论方面都已比较深入。国际大电网会议组织于前些年已经成立了专门研究柔性直流输电的系列工作组开展相应的研究工作^[2-3],最近又成立了柔性直流输电 B4-48 工作组,由我国专家牵头组织开展研究,重点瞄准柔性直流输电系统组件的试验方法,对柔性直流输电组件应力模型、试验方法等展开研究。针对实际工程中所遇到的困难,国际上的研究热点包括如何提高柔性直流输电的容量、降低输电损耗、降低造价、提高安全可靠性以及与交流电网的支持、与交流电网相互作用等。

至今世界上已有多个柔性直流输电工程投入商业运行。这些工程全部由 ABB 公司制造,主要应用于风力发电、电力交易、电网互联、海上钻井平台供电等领域,表 2 列出了主要工程主要技术指标^[2]。西门子公司采用基于模块化多电平 VSC 的柔性直流输电技术,其第一个工程“Trans Bay Cable Project”将于 2010 年投运,容量 400 MW,直流电压 ± 200 kV,每个桥臂采用了 216 个子模块。另外,ABB 也正在进行第一条长线路、架空线型的柔性直

表 2 已投运柔性直流输电主要工程的主要技术指标
Tab. 2 Main technical specification of VSC-HVDC

工程名称	国家	投运时间	额定功率/ MW	直流电压/ kV	长度/ km
Hallsjon	瑞典	1997 年	3	± 10	0.2
Gotland	瑞典	1999 年	50	± 80	70
Tjaereborg	丹麦	2000 年	7.2	± 9	2×4.3
Directlink	澳大利亚	2000 年	180	± 80	65
Eagle Pass	美国-墨西哥	2000 年	36	± 15.9	背靠背
Murraylink	澳大利亚	2002 年	200	± 150	180
Cross Sound Cable	美国	2002 年	330	± 150	2×40
Troll A	挪威	2005 年	40	± 60	4×70
Estlink	芬兰	2006 年	350	± 150	105

流工程, 该工程从赞比亚到南非, 全长 970 km, 2009 年底首先实现单极运行, 单极容量 300 MW, 电压 350 kV。工程建设相关研究成果表明, 无论是基于元件串联多电平拓扑, 还是模块化多电平拓扑, 均可以将 VSC-HVDC 的电压等级提升至 ± 350 kV、容量提升至 1000 MW, 甚至更高。而且, 在技术上没有障碍制约柔性直流向更高电压等级和更大传输容量方面发展, 呈现出良好的发展态势。

4 柔性直流输电技术在我国的研究情况

国内关于柔性直流输电技术的研究起步较晚, 90 年代末期, 在国家自然科学基金等项目资助下, 浙江大学、华北电力大学和华中科技大学等高等院校开展了这方面的跟踪性基础理论研究^[13-15]。国家电网公司于 2006 年 5 月制定了《柔性直流输电系统关键技术研究框架》, 全面启动了该技术的系统研究。2007 年底, 由中国电力科学研究院牵头, 上海电力公司和浙江大学等单位共同参与第一阶段研究, 完成了柔性直流输电技术工程前期和基础理论研究^[16-17]。该研究结合我国实际情况, 从应用规划、经济性、可靠性和可用率、环境影响、控制保护策略、谐波与接地系统等各方面全面论证了柔性直流输电在我国发展的可行性。研究结果表明: 我国大量可再生能源亟待开发利用, 在 2020 年前计划兴建 6 个百万千瓦级乃至千万千瓦级的超大型风电场, 我国海岛众多, 城市供电压力大, 柔性直流输电在这些领域有着巨大的应用潜力, 将会带来巨大的经济效益和社会效益。

2008 年 8 月 1 日, 国家电网公司重大科技专项《柔性直流输电关键技术研究及示范》在上海启动, 通过大功率可关断器件及其串联技术研究、VSC 阀设计及冷却技术研究、电磁兼容技术研究、过电压与绝缘配合技术研究、控制保护技术研究、VSC 阀等效试验方法及一次设备试验规范研究等, 完成柔性直流输电示范工程所有关键设备技术参数设计, 实现主要设备国产化, 完成柔性直流输电示范工程系统集成。研制一台容量为 20 MW、电压等级为 ± 50 kV 的柔性直流输电系统关键设备, 并通过相关的试验验证, 于 2010 年在上海南汇风电厂挂网运行, 建成我国首个柔性直流输电示范工程。目前, 项目组已经取得了重要的阶段性研究成果, 该示范工程的建设将极大促进柔性直流输电技术

在我国的研究、开发和推广应用。

5 结语

基于电压源换流器和 IGBT 的柔性直流输电对有功功率进行快速、灵活控制的同时还能够动态补偿交流母线的无功功率, 提高系统稳定性。随着柔性直流输电输送容量、电压等级不断提高, 而系统损耗和成本将不断下降, 加上国外现有实际工程的运行经验以及能源战略和能源结构的不断调整和完善, 柔性直流输电必将在可再生能源并网、分布式发电并网、孤岛供电、城市电网供电、交流电网互联等应用领域得到更快的发展, 成为未来输电技术重要的技术发展方向。

参考文献

- [1] Nojtaba N, Abdel-Aty E, David K, et al. The potential use of voltage sourced converter based back-to-back tie in load restoration[J]. IEEE Trans.on Power Delivery, 2003, 18(4): 1416-1421.
- [2] Ying J H, Hugo D, Michael K, et al. HVDC with voltage source converters-a powerful standby black start facility[J]. IEEE PES T&D conference, Chicago, USA, 2008.
- [3] Peter S, Lars S. Large scale offshore wind power energy evacuation by HVDC light[C]. EWEC, Brussels, Belgium, 2008.
- [4] Söderström J. It's time to connect-technical description of HVDC Light technology[OL]. <http://www.abb.com/hvdc>.
- [5] Dorn J, Huang H, Retzmann D. Novel voltage source converters for HVDC and FACTS applications[C]. Conf.CIGRE Symposium, Osaka, Japan, 2007.
- [6] Andersen B R, Xu L, Horton P, et al. Topologies for VSC transmission[J]. IEE Power Engineering Journal, 2002, (16): 142-150.
- [7] Bjorn J, Paulo F T, Gunnar A, et al. 500 MW city center infeed with voltage source converter based HVDC[C]. 40th Meeting of Study Committee B4 and Colloquium on Role of HVDC, FACTS and Emerging Technologies in Evolving Power Systems, Bangalore, India, 2005.
- [8] Gunnar A, Kjell E, Kjell S. DC transmission based on voltage source converters[C]. CIGRE SC14 colloquium, South Africa, 1997.
- [9] Urban A, Anders H, Christer L, et al. GOTLAND HVDC Light Transmission-World's First Commercial Small Scale DC Transmission [C]. CIREC Conference, Nice, France, 1999.
- [10] Erlich I, Bachmann U. Grid code requirements concerning connection and operation of wind turbines in Germany[C]. IEEE PES General meeting, San Francisco, USA, 2005.
- [11] Horle N, Eriksson K. Electrical supply for offshore installation made possible by use of VSC technology[C]. CIGRE Conference, Paris, France, 2002.
- [12] Railing B D, Moreau G, Ronstrom L, et al. Cross sound cable project: second generation VSC technology for HVDC[C]. CIGRE Conference, Paris, France, 2004.

(下转第 89 页 continued on page 89)