柔性直流输电技术综述

当前，随着智能电网、分布式电源以及可再生能源等技术的快速发展，电网建设日益困难，为弥补传统高压交直流输电技术的不足，柔性直流输电技术应运而生，提供了新的途径。首先基于电压源换流器的柔性直流输电技术及其发展历史分析了其系统结构、基本工作原理和技术特点；随后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，说明了目前其已经应用的工程领域；最后阐述了目前柔性直流输电技术的研究领域，以及未来需要研究的领域。

白雪松　袁绍军　王　轶　毕圆圆/国网冀北电力有限公司承德供电公司

白雪松/工程师

关键词/Keywords
柔性直流输电·
电压源换流器·
可再生能源·
智能电网·

近年来，在全球范围内，生态环境问题以及能源问题日益突出，因而，合理地开发可持续能源，利用清洁能源代替常规能源成为当今社会主要发展战略。可再生能源例如风能、光伏发电规模日益扩大，这些能源已经成为了并网的必然需求。但是这些可再生能源的分布地区一般较为分散，离用电区较远，并且其规模较小，因而将其投入传统的输电方式中费用较高，不经济。同时，海岛或者海上钻探平台、孤立小岛等一些无源负荷，由于其发电装置都是本地发电，该装置比较昂贵，不经济，且会造成一些环境污染。另外，大城市负荷的用电密度高，且增速快，因而怎样利用有限的输电线路高效地输送更多电能的问题日益突出。上述问题迫切需要采用更加灵活、环保和经济的输电方式来解决[1]。

柔性直流输电技术硬件系统由大功率可控开关组成，结合脉宽调制技术，进行无源逆变。文献[2]指出，由于采用可控开关器件，与传统直流输电相比，控制更加灵活方便，能够实现自关断，运行特性理想，同时提高交流侧电流质量；且柔性直流输电系统对受端负荷无容量要求，因而可以解决传统输电系统无法向无源负荷送电的问题。

目前，常规高压直流输电技术在我国的研究逐渐成熟，并广泛投入到国内多个直流工程的实践中，已经建成的±800 kV特高压直流工程为世界最高电压等级。但对于柔性直流输电技术只处于研究的起步阶段，比较缺乏实践方面的研究和工程经验，目前只局限于风电场接入方面的实践研究，并未应用到其他领域。我国面临着大城市电网供电不足、直流负荷增长以及短路电流超标等问题，并且正在倡导和开发可再生清洁新能源。研究柔性直流输电技术是解决这些问题的关键，因而研究该项技术对我国电网的建设意义重大。

柔性直流输电的发展历史

1990年，用脉宽调制技术（Pulse Width Modulation，PWM）控制电压源换流器（Voltage Source Converter，VSC）来进行直流输电（High Voltage Direct Current，HVDC）的方法由McGill大学的Ooi等提出[3-4]。由于采用了绝缘栅双极晶体管（IGBT）、集成门极换流晶闸管（IGCT）等全控型器件，基于VSC的直流输电（VSC－HVDC）系统具有可独立调节有功功率和无功功率的优点，可以向无源网络送电，克服了传统HVDC的本质缺陷，把HVDC的优势扩展到配电网，极大地拓宽了HVDC的应用

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

范围，具有广阔的应用前景。由文献[5-6]可知，到目前为止，世界上已实际投运的VSC－HVDC工程为9项，在建的为3项，其中，最大传输容量已达到400 MW。下表为传统HVDC与HVDC Light各项性能比较。

表　HVDC和HVDC Light的比较

性能	HVDC	HVDC Light
半导体技术	电网电压换相	自换相
相对体积	4～6	1
电缆类型	大型纸浸渍电缆	聚合物电缆
有功控制	能	能
无功控制	不能	能连续控制
电压控制	范围小	范围大
故障穿越	不能	能
无中断潮流反转	不能	能
负荷侧电源	需要	不需要
变换器一般损耗	0.8%	1.6%
操作经验	＞20年	＞10年
海上操作经验	没有	有

2006年5月，柔性（轻型）直流输电系统关键技术研究框架研讨会由中国电力科学研究院和国家电网公司科技部组织国内权威专家在北京召开。在会上，专家一致建议将该技术暂时在国内统一命名为柔性直流输电（HVDC Flexible）。

柔性直流输电的系统概述

1. 系统组成

柔性直流输电技术采用大功率可控电力电子器件构成电压源换流器，与交联聚乙烯电缆相结合，利用脉宽调制技术（PWM）得以应用，该系统降低了直流输电的经济应用功率范围，可低至几十兆瓦。柔性直流输电技术的系统原理如图1所示。

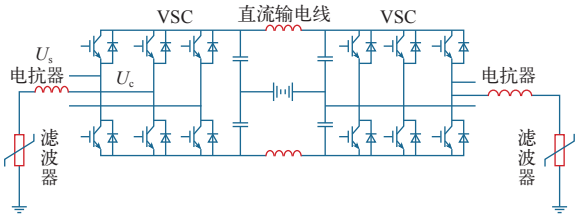

图1　VSC－HVDC系统原理图

其中，由大功率可控开关器件（IGBT、IGCT等）与反向并联在其两端的二极管组成了电压源型换流器的桥壁，在桥壁中点电压输出侧装有环流电抗器，为消除电流中谐波分量对换流器各项性能如有功功率和无功功率传输控制以及功率传输能力的影响；同时，其可以使由于开关频率较高而在电流和电压中产生的谐波分量得以抑制。由于换流器需要储能，因而在直流侧并有电容，作为储能元件，能够缓冲电压电流突变对电路造成损坏。由于电压源型直流输电系统采用 PWM技术，该技术要求开关进行高频通断，因而，在输出的电压电流中高频谐波分量高，低频谐波分量少。由于装有换流电抗器，其对于电流有滤波作用，因而能够滤除大部分谐波，使电流的谐波分量符合标准。相关文献中提到，由于电压中的高频谐波分量还存在，无法有效地滤除，因而需要在环流母线处安装交流滤波器，滤除电压中的高频谐波分量，使总的电压谐波畸变率达到相关的标准。

2. 基本原理

如上文所述，与传统的采用晶闸管进行直流输电的系统不同，采用VSC以及脉宽调制技术的柔性直流输电技术基本工作原理如图2、图3所示。

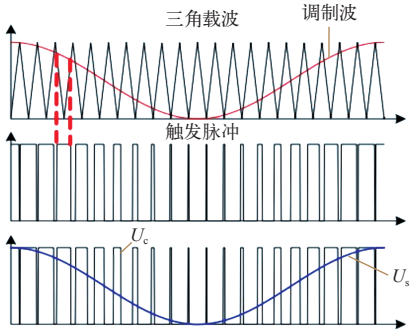

图2　VSC正弦脉宽调制原理及输出波形

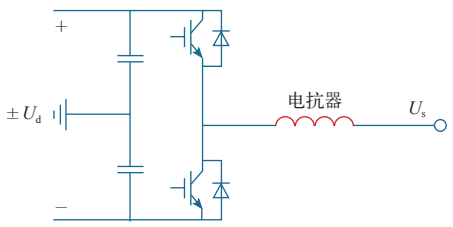

图3　VSC单相示意图

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

高频通断开关的触发脉冲由调制波与三角载波相比较产生，开关的通断使桥壁中点电压在$+U_d$和$-U_d$之间来回切换，该电压再通过交流电抗器滤波，进而得到三相交流电压U_s，馈到电网。

式（1）、式（2）为换流器两端传输功率，其中忽略了电抗器由于谐波分量等因素产生的损耗，即

$$P=\frac{U_sU_c}{X_1}\sin\delta \tag{1}$$

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

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U_c和U_s之间的相角差；X_1为换流电抗器的电抗。通过调节PWM占空比，可以分别控制δ和U_c两个量，因而可以间接地通过调整这两个量而对有功功率P和无功功率Q进行控制。

由式（1）、式（2）可以看出，δ决定有功功率传输，U_c决定无功功率的传输。

3. 系统结构及主接线

柔性直流输电系统主要包括电压源换流器、换相电感（可能由相电抗器、联结变压器或其组合来提供）、交流开关设备、直流电容（可能包含在换流阀子模块中）、直流开关设备、测量系统和控制与保护装置等。根据不同的工程需要，可能还会包括输电线路、交/直流滤波器、平波电抗器和共模抑制电抗器等设备。

换流站是柔性直流输电系统最主要的部分，根据其运行状态可以分为整流站和逆变站，两者的结构可以相同，也可以不同。目前常见的柔性直流换流站主接线方案主要包括单极对称接线方案和双极对称接线方案两种，两种主接线方案分别如图4、图5所示。图4中，TM为联结变压器，L_s为直流电抗器，SM为模块化IGBT换流阀。

单极对称接线方案是目前柔性直流输电系统中最常见的接线方案，这种接线方案采用一个6脉动桥结构，在交流侧或直流侧采用合适的接地装置钳制住中性点电位，两条直流极线的电位为对称的正负电位。

双极对称接线方案在目前柔性直流输电系统中不常见，这种接线方案采用两个6脉动桥结构，分别组成正极和负极，两极可以独立运行，中间采用金属回线或接地极形成返回电流通路。

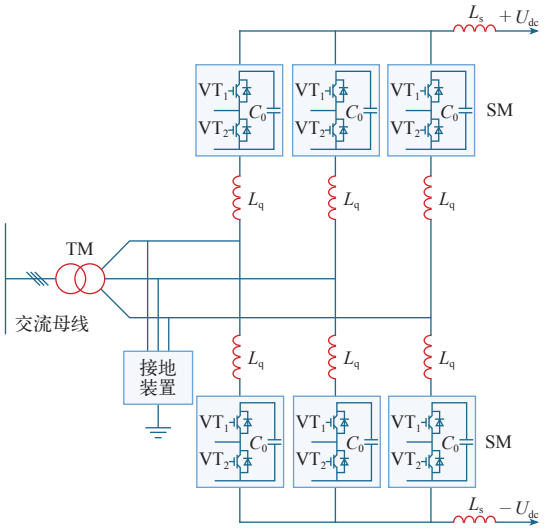

图4 柔性直流输电单极对称接线方案

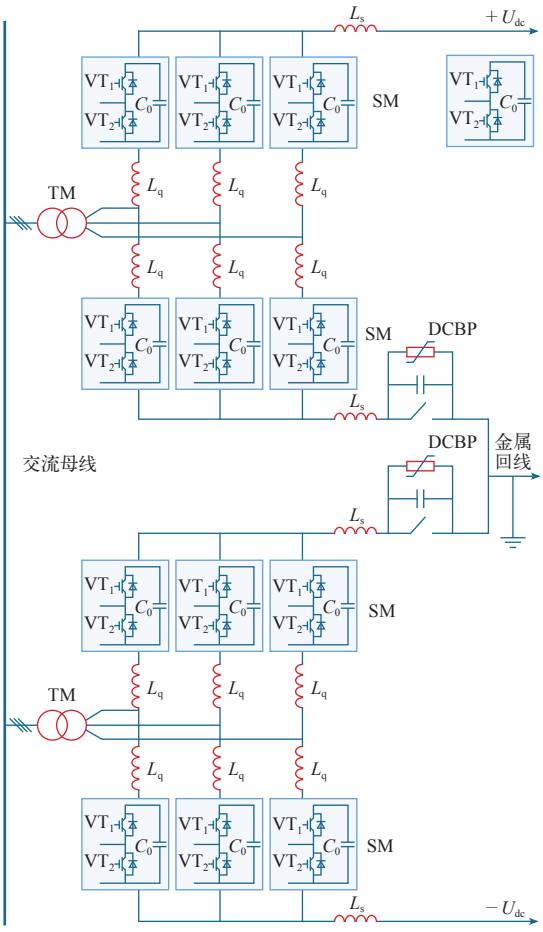

图5 柔性直流输电双极对称接线方案

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

柔性直流输电的技术特点与应用

1. 技术特点

中国在柔性直流输电工程技术研究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双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。

如上文所述，与传统的直流输电系统相比，柔性直流输电采用可控电力电子开关和PWM技术相结合，具有以下特性[7-9]。

1）对于传统的直流输电系统，要求其受端负荷是有源网络，而VSC可以工作在无源逆变方式下，无须加额外的换相电压使电流关断，其能够实现自关断功能，因而其受端负荷可以无源，解决了向远距离无源孤立负荷的问题。

2）传统的直流输电环流器桥壁由半控开关组成，因而只能控制其触发角，无法随时控制其关断，只能有限地对功率输出量进行控制；而利用VSC和PWM技术相结合，可以通过调节PWM波形对有功功率和无功功率单独进行控制，因而控制方法更加灵活，对于系统的运行状态能更好地掌握。

3）由于PWM可以控制输出的无功功率，因而在容量允许的情况下，VSC可以动态地补偿电网无功功率，进而稳定母线电压，不需要受端提供无功功率补偿，起到静止无功补偿（STATCOM）的作用。

4）传统的直流输电系统以改变电压方向且保持电流方向的方式来改变潮流方向，而柔性直流输电系统改变潮流的方式为保持电压不变，而改变电流方向，这有利于多网并联。在多电网同时运行时，增加系统稳定性，且控制灵活，克服了在传统方式下并联控制不便，串联稳定性低的缺陷。

5）系统在短路时，由于VSC的控制作用，对交流侧电流进行相关控制，可以实现系统在短路时功率不变的功能。因而即使并入新的输电线路，短路功率不会变化，所以无须改变系统的保护整定。

6）VSC和PWM技术相结合，无须采用变压器，只需利用低通滤波器滤除由于高速的开关频率所产生的多余谐波分量，并且滤波器的容量可以在很大程度上减小，简化换流站的结构。

7）传统直流输电换流站占地面积大，而采用柔性输电技术，由于滤波器等器件体积较小的缘故，因而与同容量的传统换流站相比，仅利用其1/5占地面积即可。并且柔性输电采用了模块化设计，因而缩短了其生产、安装和调试的周期。

8）换流站之间无须进行实时通信，可实现无人值守。

9）传统的直流输电系统稳定性不高，发生故障后恢复较慢；而柔性输电系统由于先进的数学模型和控制技术，其稳定性较高，并且当发生故障时，能够迅速地检测并排除。

2. 应用领域

（1）国内柔性直流输电工程应用现状

2006年，国内相关研究单位及时把握住了技术发展趋势，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、试验能力建设和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[10-13]，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。

2012年12月底，依托该工程研制成功了如图6所示的世界首套1 000 MW/±320 kV换流阀及阀基控制器，并通过了DNVKWMA的见证试验。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。

图6 1 000 MV／±320 kV柔性直流换流阀

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

（2）国外柔性直流输电工程应用现状

从1997年瑞典的Hellsjon工程试验成功开始，到目前为止，世界上已运行的VSC－HVDC工程有9项，在建的有3项。

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。

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。

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。

Trans Bay Cable工程于2010年投入运行。该工程实现了对旧金山的城市供电，同时还是世界上第一个使用MMC技术的柔性直流输电工程，其额定参数为400 MW/±200 kV。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。

柔性直流输电的研究状况

1. 目前研究现状

VSC－HVDC工程涉及电力系统、材料和控制等学科。

1）国内关于VSC－HVDC技术的研究开始比较晚，浙江大学、华北电力大学、中国电力科学研究院和华中科技大学等单位已经开展了这方面的基础理论研究，主要集中在VSC－HVDC的建模仿真、VSC－HVDC的控制和保护策略等。

2）国际上关于VSC－HVDC的研究热点包括如何提高其系统容量以及系统的安全性、可靠性，同时降低系统损耗，如何节省成本，以及对于电网中出现故障时如何进行保护，且各交流电网之间如何进行互联等。

3）由于目前国内还未有相关工程实践经验，因此要充分调研国外VSC－HVDC技术的研究成果和相关工程经验，对其关键技术进行重点研究。

2. 未来研究领域

1）VSC－HVDC模型的分析。虽然已有文献对VSC－HVDC的高频、低频等数学模型进行了一定的研究，但这些模型均没有对VSC－HVDC的动、静态特性进行详细分析。另外，对于VSC－HVDC的暂态运行特性分析仍需深入研究。

2）VSC－HVDC稳态运行控制策略的研究。基本上将该问题分为3类：线性控制、基于线性系统的鲁棒控制和非线性控制。这3种方法虽然可以建立准确的数学模型，但是系统在实际动态运行时是更加复杂的，很多参数的变化并没有被考虑到数学模型中，因而只能认为在稳态下比较准确，而在动态系统下的稳定性研究还需要进一步加深。

3）VSC－HVDC系统保护策略的研究。这方面的研究相对而言比较薄弱。由于高压直流断路器的缺失，在VSC－HVDC扰动或故障后的系统保护相比交流保护而言变得复杂了，但由于VSC采用PWM控制，其高速的开关特性使得可通过控制手段来达到系统保护的目的。问题的关键在于采用怎样的控制步骤来保护系统，即保护的策略。

4）多端VSC－HVDC系统的研究。由于当今比较重视电能质量以及可再生能源的利用，而直流电网在联结可再生能源方面更能发挥优势。VSC技术为直流组网提供了技术上的可能，因此研究多端VSC－HVDC系统是很有意义的。当前对于该方面的研究还比较浅显，对其系统的线性分析以及如何控制该系统还需要加深理论方面和实践方面的钻研。

5）电网不对称条件下的VSC－HVDC系统运行控制问题的研究。电网不对称条件下，常规的控制方案会使直流侧产生偶次谐波分量，且通过PWM控制，会导致网侧电流畸变。已有一些文献对此进行了研究，其中，文献[14]提出的将正序和负序两套系统分离，单独建立两个同步旋转坐标系，并单独进行控制，结构比较复杂，并且在线运算量大是该方案的主要缺点。因此，有必要进一步研究简单有效的控制策略。

6）VSC－HVDC技术在系统中应用的进一步扩展。VSC－HVDC技术的优点可以改善电力系统

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

多方面性能，如阻尼状况的改变、系统输送功率能力得以提高、系统更加稳定可靠以及出现故障时能够够迅速响应；并且能够抑制系统低频振荡、黑启动以及大规模停电等一些大规模故障。

7）VSC－HVDC试验系统的开发。在国内尚无VSC－HVDC实际工程的背景下，研究VSC－HVDC只能停留在软件仿真阶段，从而缺乏相应的试验结果。这样对我国VSC－HVDC的工程实用化是极其不利的。所以，开发VSC－HVDC试验系统也是一个急需的任务。

结束语

VSC－HVDC技术极大地拓展了直流输电的应用范围，由于其在控制灵活性、环境保护、电力交易、绿色能源并网和提高电能质量等方面的优良特性，使其成为当前输配电领域的研究热点之一，并且伴随着电力电子器件、计算机控制等技术的不断发展，柔性直流输电的输送容量、电压等级将不断提高，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、城市电网供电和交流电网互联等应用领域得到更快的发展。

参考文献

[1] 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．

[2] Asplund G，Eriksson K．HVDC light-DC transmission based on voltage sourced converters [C]．CIGRE SCl4 Colloquium，South Africa，1997：1-8．

[3] Wang X，Ooi B T．High voltage direct current transmission system based on voltage source converters [C]．PESC'90，San Antonio，TX，USA，1990：325-332．

[4] Ooi B T，Wang X．Boost type PWM HVDC transmission system [J]．IEEE Transactions on Power Delivery，1991，6 (4)：1557-1563．

[5] Lars Weimers．HVDC light：a new technology for a better environment [J]．IEEE Power Engineering Review，1998，18 (8)：19-20．

[6] 李庚银，吕鹏飞，李广凯，等．轻型高压直流输电技术的发展与展望 [J]．电力系统自动化，2003，27 (4)：77-81．

[7] Ooi Boon-Teck，Wang Xiao．Boost type PWM HVDC transmission system [J]．IEEE Transactions on Power Delivery，1991，6 (1)：1557-1563．

[8] Ooi Boon-Teck，Wang Xiao．Voltage angle lock loop control of the boost type PWM converter for HVDC application [J]．IEEE Transactions on Power Delivery，1990，5 (2)：229-235．

[9] 徐政．高压直流输电与柔性交流输电控制装置—静止换流器在电力系统中的应用 [M]．北京：机械工业出版社，2006．

[10] 柳睿，杨镜非，程浩忠，等．分布式电源并网的综合评价 [J]．电力系统及其自动化学报，2013，25 (1)：34-39．

[11] 张林山，杨晴，崔玉峰，等．柔性直流输电技术在城市电网中的应用 [J]．云南电力技术，2010，38 (4)：13-34．

[12] 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．

[13] 杨晓东，黄伟琼，吴威，等．柔性直流输电技术在福建沿海孤岛供电中的应用研究 [J]．电力与电工，2012，32 (1)：10-12．

[14] Song Hong-seok，Nam Kwanghee．Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage conditions [J]．IEEE Transactions on Industrial Electronics，1999，46 (5)：953-959．

（收稿日期：2015－07－15）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net