

柔性直流输电技术综述

徐政, 陈海荣, 潘武略, 张静, 张帆, 常勇

(浙江大学电机系, 浙江省杭州市 310017, hvdc@zju.edu.cn)

摘要: 本文详细介绍了柔性直流输电的系统结构、基本工作原理和技术特点; 总结了 ABB 公司几个典型应用工程的相关技术参数及其技术发展现状; 重点分析了在工程应用中, 柔性直流输电的关键技术及需要重点研究的几个方面的基础理论问题。

1 引言

自 1954 年世界上第一个直流输电工程(瑞典本土至 Gotland 岛的 20MW、100kV 海底直流电缆输电)投入商业化运行至今, 直流输电系统的换流元件经历了从汞弧阀到晶闸管阀的变革。然而, 由于晶闸管阀关断不可控, 使目前广泛采用的基于晶闸管的电流源型高压直流输电技术具有以下固有缺陷: ①只能工作在有源逆变状态, 且受端系统必须有足够大的短路容量, 否则容易发生换相失败; ②换流器产生的谐波次数低、容量大; ③换流器需吸收大量的无功功率, 需要大量的滤波和无功补偿装置; ④换流站占地面积大、投资大。因此, 基于晶闸管的电流源型直流输电技术主要用于远距离大容量输电、海底电缆输电和交流电网的互联等领域。

随着能源紧缺和环境污染等问题的日益严峻, 国家将大力开发和利用可再生能源, 优化能源结构。然而, 随着风能、太阳能等可再生能源利用规模的不断扩大, 其固有的分散性、小型性、远离负荷中心等特点, 使得采用交流输电技术或传统的直流输电技术联网显得很经济。同时海上钻探平台、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, 城市用电负荷的快速增加, 需要不断扩充电网的容量, 但鉴于城市人口膨胀和城区合理规划, 一方面要求利用有限的线路走廊输送更多的电能, 另一方面要求大量的配电网转入地下。因此, 迫切需要采用更加灵活、经济、环保的输电方式解决以上问题。

随着电力电子器件和控制技术的发展，换流站采用 IGBT、IGCT 等元件构成电压源型换流站 (Voltage Source Converter, VSC) 来进行直流输电成为可能。自上世纪九十年代后期，以 ABB 公司为代表的国外公司发展了轻型直流输电 (HVDC Light) 技术，并成功应用于多个领域。这种直流输电技术是采用基于可关断型器件的电压源型换流器和 PWM 技术进行直流输电。从其技术特点和实际工程的运行来看，很适合应用于可再生能源并网、分布式发电并网、孤岛供电、城市电网供电、异步交流电网互联等领域。

因此，根据国家中长期科技发展规划和“十一五”发展规划纲要，发展直流输电技术，建设新一代直流输电联网工程，促进大规模风力发电场的并网，城市供电和孤岛供电等新技术的发展，满足持续快速增长的能源需求和能源的清洁高效利用，增强自主创新能力，符合我国国情和我国的经济规律，符合市场需求，符合电力工业发展规律和电网技术发展方向。

2 柔性直流输电的系统结构和基本原理

与基于自然换相技术的电流源型换流器的传统直流输电不同，VSC-HVDC 是一种以电压源换流器、可控关断器件和脉宽调制 (PWM 技术) 为基础的新型直流输电技术。这种输电技术能够瞬时实现有功和无功的独立解耦控制、能向无源网络供电、换流站间无需通讯、且易于构成多端直流系统。另外，该输电技术能同时向系统提供有功功率和无功功率的紧急支援，在提高系统的稳定性和输电能力等方面具有优势。下面详细介绍 VSC-HVDC 的系统结构及其基本工作原理。

2.1 系统结构

图 1 为柔性直流输电系统单线原理图，两端的换流站均采用 VSC 结构，它由换流站、换流变压器、换流电抗器、直流电容器和交流滤波器等部分组成。下面就各组成部分的结构和作用作一简单介绍^[18]。

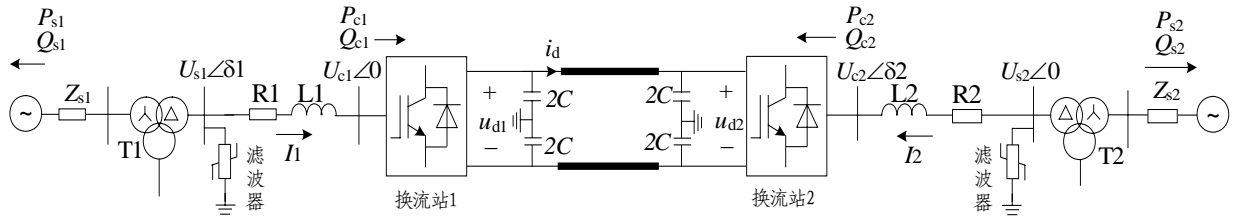
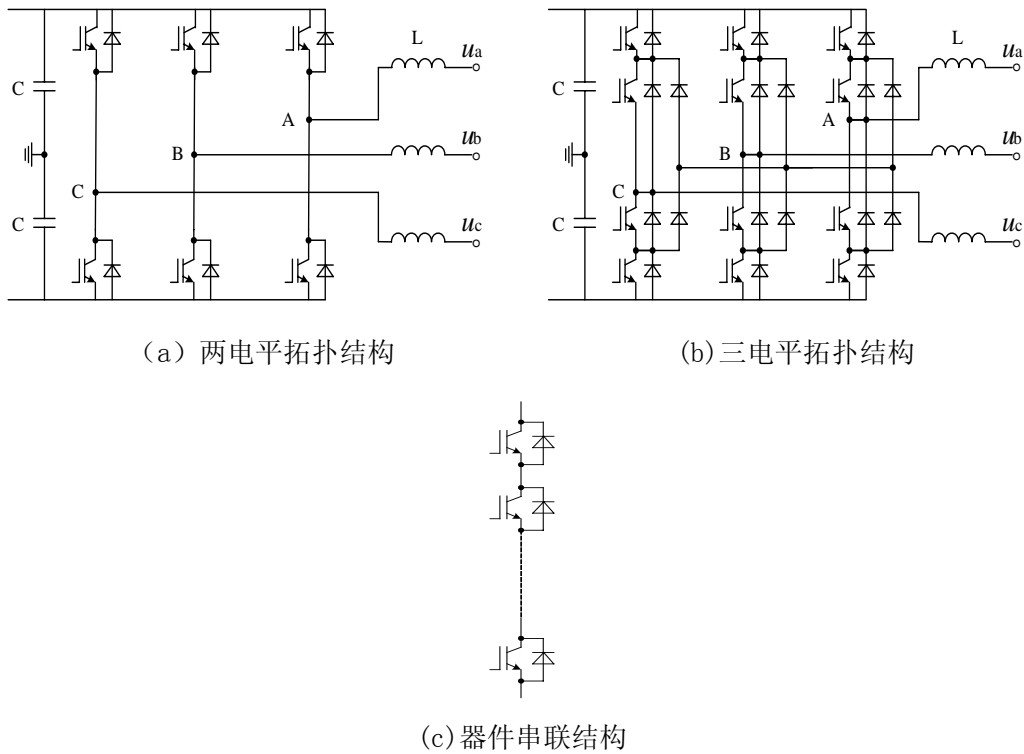


图 1 柔性直流输电单线原理图

电压源型换流器 VSC：电压源型换流器的桥臂是由大功率的可控关断型电力电子器件（如 IGBT、IGCT）和反并联二极管组成。随着大功率电力电子器件的发展，目前 IGBT 的耐受电压达到 6.5kV、通断电流最大达到 3kA，IGCT 目前能承受的断态重复峰值电压达到 6kV，最大可控关断电流达 3~6kA。目前，拥有柔性直流输电系统商业化运行实际工程业绩的，世界上只有 ABB 公司。在这些工程中，主要采用三相二电平和三相三电平两种换流器拓扑结构（如表 1 所示）。两电平换流器是用于轻型直流输电系统最简单的换流器拓扑结构，如图 2(a) 所示。它有六个桥臂，每个桥臂由 IGBT 和与之反并联的二极管组成。图 2(b) 所示为中点钳位型三电平换流器拓扑结构。在高压大功率情况下，为提高换流器容量和系统的电压等级，每个桥臂由多个 IGBT 及其相并联的二极管相互串联来获得，其串联的个数由换流器的额定功率、电压等级和电力电子开关器件的通电能力与耐压强度决定。

表 1 瑞典 ABB 公司已投运的部分柔性直流输电工程的相关参数和指标^[24]

工程名称	投运时间	换流器拓扑	开关调制方式	开关频率 [Hz]	可控性	电路复杂度	损耗
Gotland Tjaereborg Directilind	1999 2000 2000	两电平	Sinus PWM	1950	非常好	低	高
Hagfors	1999	三电平	SFOPWM	1260~1650	非常好	中	中
Cross Sound Cable Murraylink	2002	三电平	3PWM Sinus PWM	1260 1350	非常好	中中	低
Estlink	2006	两电平	Optimum PWM	1150	很好	低	低



(a) 两电平拓扑结构

(b) 三电平拓扑结构

(c) 器件串联结构

图 2 典型电压源型换流器拓扑结构

变压器 T: 变压器可以采用常规的单相或三相变压器。通常, 为了使换流站能够达到最大的有功功率和无功功率, 变压器的二次侧绕组带有分接头开关。通过调节分接头来调节二次侧的基准电压, 进而获得最大的有功和无功输送能力。另外, 变压器连接交流系统侧的绕组(一次侧)一般采用星形接法, 而靠近换流器侧的绕组(二次侧)则采用三角形接法。变压器绕组中基本不含谐波电流分量和直流电流分量; 而且这种变压器接法能够防止由调制模式引起的零序分量向交流系统传递。此外, 为了向换流站提供辅助交流电源, 变压器还可以采用三绕组变压器。除了上述特点外, 换流变压器的另一个重要作用是将系统交流电压变换到与换流器直流侧电压相匹配的二次侧电压, 以确保开关调制度不至于过小, 以减小输出电压和电流的谐波量, 进而可以减小交流滤波装置的容量。

换流电抗器 L: 在电压源换流站中, 对应每一相分别安装一个换流电抗器。换流电抗器是电压源换流站的一个关键部分, 它是 VSC 与交流系统之间传输功率的纽带, 它决定换流器的功率输送能力、有功功率与无功功率的控制; 同时, 换流电抗器能抑制换流器输出的电流和电压中的开关频率谐波量, 以获得期望的基波电流和基波电压。另外, 换流电抗器还能抑制短路电流。因此, 对换流电抗器的

参数必须进行优化设计。

直流侧电容器 C：直流侧电容是 VSC 的直流侧储能元件，它可以缓冲桥臂开断的冲击电流、减小直流侧的电压谐波，并为受端站提供电压支撑。同时，直流侧电容的大小决定其抑制直流电压波动的能力，也影响控制器的响应性能。

交流滤波器：与基于晶闸管的传统直流输电系统不同，电压源型直流输电系统采用 PWM 技术。因此，换流站在较高的开关频率下，其输出的交流电压和电流中含有的低次谐波很少，又由于换流电抗器对输出电流具有滤波作用，使得电流的谐波能较容易符合标准。然而，在没有任何滤波装置的情况下，输出的交流电压中还含有一定量的高次谐波，且其总的谐波畸变率并不能达到相关的谐波标准。因此，通常要在换流母线处安装适当数量的交流滤波器(接地或不接地)，其结构如图 3 所示。当然，交流滤波器的容量和参数选择与换流器所采用的拓扑结构、开关频率及其调制方式等因素有关。因此，在选择交流滤波器参数时，要视上述具体情况而定。

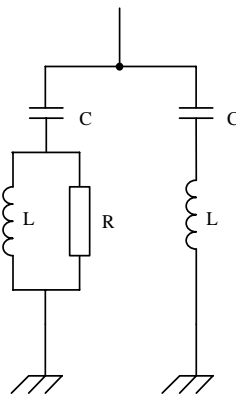


图 3 交流滤波器

输电电缆：为了减少输电线路故障，在柔性直流输电系统中通常采用电缆为输电线路。由 ABB 公司研制的输电电缆是采用新型的三层聚合物挤压的单极性电缆（图 4 所示），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；中间导体一般为铝材单芯导体，它不同于传统纸或者油绝缘电缆，这种新型电缆具有高强度、环保和方便掩埋等特点，适合用于深海等恶劣环境。另外，这种新型电缆重量轻、传输功率密度大，对于一对 95mm^2 的铝电缆在直流电压为 100kV 时能够传输 30MW 的功率，其重量为 1kg/m ，绝缘厚度为 5.5mm ，可以方便地掩埋入地中。



图 4 ABB 公司的直流输电电缆

2.2 基本工作原理

如前所述，与基于晶闸管的传统直流输电技术不同，柔性直流输电采用电压源型换流器和PWM技术，其基本工作原理如图 5 和图 6 所示。由调制波与三角载波比较产生的触发脉冲，使VSC上下桥臂的开关管高频开通和关断，则桥臂中点电压 u_c 在两个固定电压 $+U_d$ 和 $-U_d$ 之间快速切换， u_c 再经过电抗器滤波后则为网侧的交流电压 u_s 。

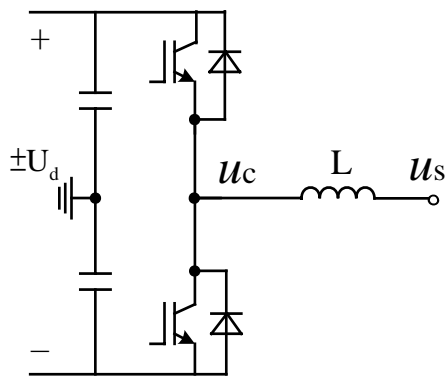


图 5 VSC 单相示意图

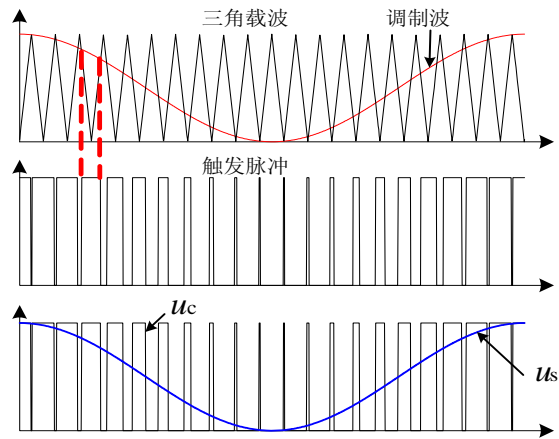


图 6 VSC 正弦脉宽调制原理及输出波形

进一步分析可知，在假设换流电抗器无损耗且忽略谐波分量时，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 U_c 和 U_s 之间的相角差； X_1 为换流电抗器的电抗。

由式（1）和式（2）可以得到图 7 所示的换流器稳态运行时的基波相量图。由图可知，有功功率的传输主要取决于 δ ，无功功率的传输主要取决于 U_c 。因此通过对 δ 的控制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发出或者吸收的无功功率。从系统角度来看，VSC可以看成是一个无转动惯量的电动机或发电机，几乎可以瞬时实现有功功率和无功功率的独立调节，实现四象限运行。

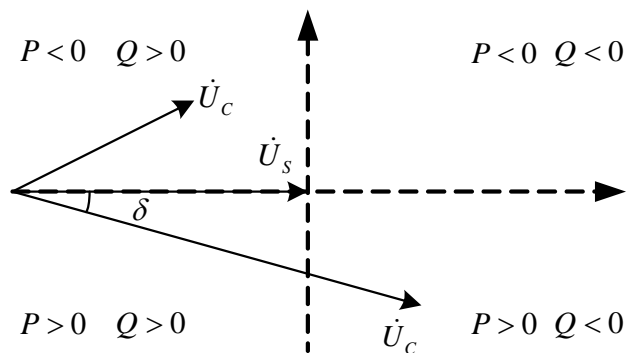


图 7 VSC-HVDC 换流器稳态运行时的基波相量图

3 国内外研究与应用现状

高压直流（HVDC）输电技术始于 20 世纪 20 年代，到 1954 年，连接哥特兰岛与瑞典大陆之间的世界上第一条高压直流输电线路建成，才进入了商业化时代。多年来，HVDC 输电技术的性能有了很大的提高，但在技术上没有发生根本性的变化，采用的是基于晶闸管器件的自然换相技术。20 世纪末出现了采用电压源换流器（VSC）技术的柔性直流输电。

随着新型高压大功率可控关断电力电子器件，如 IGBT、GTO、IGCT 的不断涌现，及其额定电压、电流的快速增长，原来在中低压和小功率系统中广泛使用的基于脉宽调制（PWM）技术的新型换流技术已开始输电领域得到了部分应用，并有可能将来取代相控换流技术，其中基于电压源换流技术的柔性直流输电技术相对较为成熟。1990 年，利用脉宽调制控制的 VSC 的直流输电概念首先由加拿大 McGill 大学的 Boon-Teck Ooi 等提出^[1-3]。在此基础上，ABB 公司把 VSC 和聚合物电缆相结合提出了柔性直流输电的概念，并于 1997 年 3 月在瑞典中部的赫尔斯杨和格兰斯堡之间进行了首次的 HVDC light 的工业试验。该试验站的功率为 3MW，直流电压等级为 ±10kV，输电距离为 10km，分别连接到现有的 10kV 交流电网中。从此柔性直流输电作为一种新兴的输电技术开始进入大发展的商业应用阶段。

3.1 国内外研究现状

随着 1997 年第一条柔性直流输电工程的出现，世界范围内关于柔性直流输电的研究一直处于十分活跃的状态。目前，国际上关于柔性直流输电的研究，无论

在工程实用化方面还是在基础理论方面都已比较深入。这种以电压源换流器、可关断器件和脉宽调制（PWM）技术为基础的新一代直流输电技术，国际上电力方面的权威学术组织 CIGRE 和 IEEE，将其正式称为“VSC HVDC”，即“电压源换流器型直流输电”。而 ABB 公司则称之为轻型直流输电（HVDC Light），并作为商标注册；西门子公司则称之为 HVDC Plus。国际大电网会议 CIGRE 于前些年已经成立了专门研究 VSC-HVDC 输电的 B4-37 工作组，以推动柔性直流输电技术的发展，目前已经完成了关于 VSC-HVDC 输电的工作组研究报告；另外，国际大电网会议最近又成立了研究采用 VSC-HVDC 将风电场接入电网的 B4-39 工作组。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，如何提高柔性直流输电的安全可靠性，以及对交流电网的支持、与交流电网相互作用等。

国内关于柔性直流输电技术的研究开始的比较晚，目前还属于起步阶段。中国电力科学研究院、浙江大学、华北电力大学、华中科技大学、合肥工业大学等单位已经开展了这方面的基础理论研究，研究工作主要集中在柔性直流输电的建模仿真，柔性直流输电的控制和保护策略等。国内，由于受 ABB 公司宣传的影响较多，常常将柔性直流输电叫做轻型直流输电。为了促进并形成自有知识产权，2006 年 5 月，由中国电力科学研究院组织国内权威专家在北京召开“柔性（轻型）直流输电系统关键技术研究框架研讨会”，会上，与会专家一致建议国内将该技术统一命名为“柔性直流输电”，对应英文为 HVDC Flexible。

3.2 国内外应用现状

自 1997 年第一条柔性直流输电工程投入工业试验运行以来，至今已有多个柔性直流输电工程投入商业运行。这些柔性直流输电工程全部由 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 列出了这些投运工程的主要技术指标和应用领域。

表 2 ABB 公司 世界范围内已经投运的 VSC-HVDC 工程的主要技术指标

工程名称	国家	投运时间	额定功率	两侧交流电压/kV	直流电压/kV	直流电流/A	长度/km	选择的主要原因
Hellsjon	瑞典	1997.03	3MW/3 MVar	10/10	±10	150	10	工业试验
Gotland	瑞典	1999.06	50MW/±30MVar	80/80	±80	350	2×70	风力发电（电压支撑）、地下电缆
Directlink	澳大利亚	1999.12	3×60/±75MVar	132/110	±80	342	6×59	电力交易、系统互联、地下电缆
Tjaereborg	丹麦	2000.08	7.2MW/−3~+4MVar	10.5/10.5	±9	358	2×4.3	风力发电并网示范工程
Eagle Pass	美国-墨西哥	2000.09	36MW/±36MVar	132/132	±15.9	1100	背靠背	电力交易、系统互联、电压控制
Cross Sound Cat	美国	2002	330MW/±75 MVar	345/138	±150	1175	2×40	电力交易、系统互联、海底电缆
Murray link	澳大利亚	2002	200MW/+140~-150 MVar	132/220	±150	1400	2×180	电力交易、系统互联、地下电缆
Troll A	挪威	2004	40MW	132kV/50 Hz, 56 kV/0-63 Hz	±60	—	4×70	向钻井平台供电和电机驱动、海底电缆

在表 2 所列的投运工程中，具有代表性的工程介绍如下^{[3][18]}：

(1) 第一条试验线路

1997 年 3 月，ABB 公司进行了首次 VSC-HVDC 的工业试验，该工程位于瑞典中部的赫尔斯扬（Hellsjon），额定容量为 3MW，直流电流 150A，直流电压±10kV。该工程自 1997 年 3 月建成以来完成了复杂的试验计划，获得了 VSC-HVDC 运行的详细技术数据。

(2) 风力发电的接入系统

1999 年 6 月，瑞典哥特兰（Gotland）岛 VSC-HVDC 工程投入运行。这是世界上第一个商业化运行的 VSC-HVDC 工程，额定容量 54MW，两端的交流电网电压 80kV，直流电压±80kV，直流电流 350A，输电距离 70km。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，对环境的影响很小。

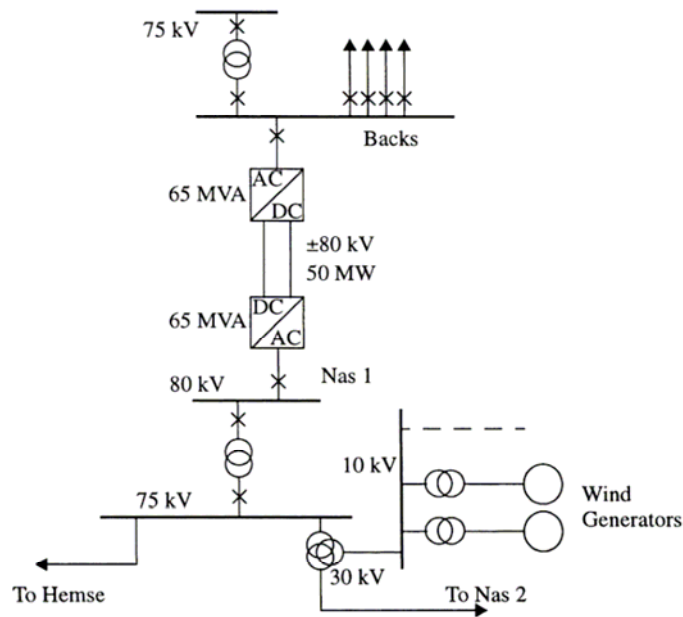


图 8 哥特兰岛柔性直流输电工程单线图

2000 年 6 月，丹麦投运了第一个用于风力发电的 VSC-HVDC 示范工程—Tjaereborg 工程，该工程额定容量 8MVA/7.2MW，直流电压 $\pm 9\text{kV}$ ，直流电流 358A，输电距离 4.3km。该工程主要为了解决风力发电引起的无功功率和电压问题。

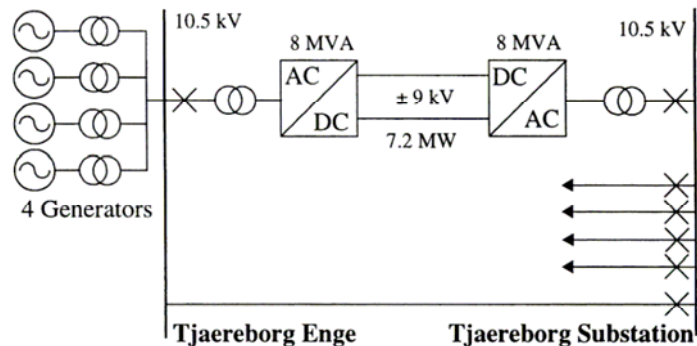


图 9 Tjaereborg 工程单线图

(3) 电网的非同步互联和电力交易

2000 年，澳大利亚投运的 Direct Link VSC-HVDC 工程将新南威尔士 (New South Wales) 电网和昆士兰 (Queens Land) 电网连接起来，并在两个电网之间进行电力市场交易，线路传输的功率由市场交易的结果决定。该工程额定容量 180MW ($3 \times 60 \text{ MW}$)，两端交流电压 132/110kV，直流电压 $\pm 80\text{kV}$ ，直流电流 342A，地下电缆 $6 \times 59\text{km}$ ，工程主要目的是异步联网进行电力交易并满足环境要求。

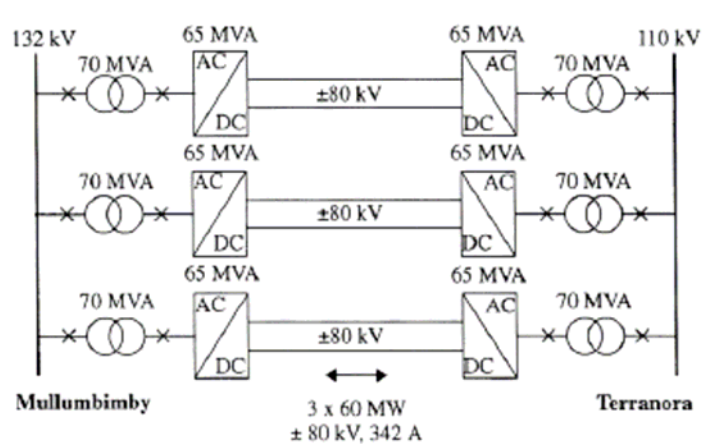


图 10 澳大利亚 Direct Link 工程

2002 年 7 月投运的美国 Cross Sound Cable 工程将纽约长岛与 New England 电网非同步联网，直流线路采用 $2 \times 42\text{km}$ 海底电缆，两端交流电压 345/138kV，工程额定容量 330MW，直流电压 $\pm 150\text{kV}$ ，直流电流 1175A。选择 VSC-HVDC 主要是考虑到电力交易和长距离的海底电缆输电。由于 Cross Sound Cable 工程将柔性直流输电的直流电压和直流电流等级（即单个换流器容量）提高到了一个新的水平，同时该工程于 2003 年 8 月美国东北部电网的恢复中起了很好的作用。因此，该工程的商业化运行，在 ABB 公司 VSC-HVDC 技术发展历程中具有里程碑意义。

2002 年 8 月投运的澳大利亚 Murray Link 直流工程，额定容量 220MW，两端的交流网络电压 132/220kV，直流电压 $\pm 150\text{kV}$ ，直流电流 739A，直流输电线路为 $2 \times 180\text{km}$ 地下电缆，该工程是目前世界上最长的地下电缆输电项目，工程的目的是电力市场交易和将澳大利亚南部 River land 电网与 Victoria 电网非同步互联。

(4) 海上钻井平台供电

2005 年 10 月投运的挪威 Troll VSC-HVDC 工程，用于向海上天然气钻井平台上的用电设备供电，额定功率 $2 \times 45\text{MW}$ ，两端交流电压 132/56 kV，直流电压 $\pm 60\text{kV}$ ，直流电流 350A，输电线路为 $4 \times 70\text{km}$ 海底电缆。该工程采用 VSC-HVDC 技术主要考虑到长距离海底电缆输电和环境保护要求。此外钻井平台上的同步电动机需要变频（0~63Hz）调速，运行电压在 0~56kV 范围内变化，而且换流站的空间和重量都受到限制。

4. 柔性直流输电的技术特点及其应用领域

4.1 技术特点

如前所述，柔性直流输电是采用可控关断型电力电子器件和PWM技术，它与传统直流输电相比，主要有以下技术特点^{[1-3][18][25-28]}：

- (1) VSC 电流能够自关断，可以工作在无源逆变方式，所以不需要外加的换相电压，受端系统可以是无源网络，克服了传统的 HVDC 受端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) 正常运行时，VSC 可以同时且独立地控制有功功率和无功功率，控制更加灵活方便。而传统 HVDC 中控制量只有触发角，不可能单独控制有功功率或无功功率。
- (3) VSC 不仅不需要交流侧提供无功功率而且能够起到 STATCOM 的作用，动态补偿交流母线的无功功率，稳定交流母线电压。这意味着故障时，如 VSC 容量允许，那么柔性直流输电系统既可向故障系统提供有功功率的紧急支援，又可提供无功功率紧急支援，从而既能提高系统的功角稳定性，还能提高系统的电压稳定性。
- (4) 柔性直流输电系统在潮流反转时，直流电流方向反转而直流电压极性不变，与传统的 HVDC 恰好相反。这个特点有利于构成既能方便地控制潮流又有较高可靠性的并联多端直流系统，克服了传统多端 HVDC 系统并联连接时潮流控制不便、串联连接时又影响可靠性的缺点。
- (5) 由于 VSC 交流侧电流可以被控制，所以不会增加系统的短路功率。这意味着增加新的柔性直流输电线路后，交流系统的保护整定基本不需改变。
- (6) VSC 通常采用 PWM 技术，开关频率相对较高，经过低通滤波后就可得到所需交流电压，可以不用变压器，从而简化了换流站的结构，并使所需滤波装置的容量也大大减小。
- (7) 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。同时，换流站的占地面积仅为同容量下传统直流输电的 20%左右。
- (8) 换流站间的通讯不是必需的，其控制结构易于实现无人值守。
- (9) 柔性直流输电具有良好的电网故障后的快速恢复控制能力。

4.2 应用领域

柔性直流输电克服了传统 HVDC 的固有缺陷，使得直流输电的应用范围得到扩展，为直流输电技术的发展开辟了一个新的方向。其主要应用领域是：

(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、供电质量不高并且远离主网，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以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，利用柔性直流输电与主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。

(2) 不同额定频率或相同额定频率的交流系统间的非同步运行。模块化结构及电缆线路使柔性直流输电对场地及环境的要求大为降低，换流站的投资大大下降，因此可根据供电技术要求选择最理想的接入系统位置。

(3) 构筑城市直流输电网。由于大中城市的空中输电走廊已没有发展余地，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，而且能输送更多的有功，因此采用柔性直流输电向城市中心区域供电可能成为未来城市增容的最佳途径。

(4) 向偏远地区供电。偏远地区一般远离电网，负荷轻而且日负荷波动大，经济因素及线路输送能力低是限制架设交流输电线路发展的主要因素，制约了偏远地区经济的发展和人民生活水平的提高。采用柔性直流输电进行供电，可使电缆线路的单位输送功率提高，线路维护工作量减少，并提高供电可靠性。

(5) 海上供电。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，通常靠价格昂贵的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，用柔性直流输电以后，这些问题得以解决，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。

(6) 提高配电网电能质量。柔性直流输电系统可以独立快速地控制有功和无功，且能够保持交流系统的电压基本不变，它使系统的电压和电流较容易地满足电能质量的相关标准。因此，柔性直流输电技术是未来改善配网电能质量的有效措施。

(7) 电力市场模式下的应用。通过柔性直流输电的直接连接，可以构筑地区

电力供应商之间交换电力的可行的技术平台，增加了运行灵活性和可靠性。

综上所述，柔性直流输电较之传统直流输电具有紧凑化、模块化设计，易于移动、安装、调试和维护，易于扩展和实现多端直流输电等优点。在风力发电、太阳能发电等新能源发电技术上，柔性直流输电又成为必不可少甚至是唯一的输电手段。基于 VSC 技术的柔性直流输电由于其自身的诸多优势必将成为未来输配电系统中一个不可或缺的重要组成部分。

5. 柔性直流输电的关键技术

5.1 主电路及其相关技术

换流器的主电路拓扑结构是柔性直流输电技术的一个重要方面，它与实际工程的容量和电压等级、IGBT 串联数目、开关频率、损耗、开关调制方式和系统可控性等因素密切相关。在工业驱动领域中，为了提高换流装置的容量，通常采用的方法有：桥臂器件的串并联、换流器的多重化技术以及目前广泛研究的多电平技术等。但从表 1 所示 ABB 公司的几个典型工程的相关参数可知，应用于柔性直流输电工程中的换流器拓扑结构突出以下几个特点：①拓扑结构简单，主要采用两种结构：两电平结构（如瑞典的 Hellsjon 工程和美国的 Directlink 等工程）和三电平结构（如澳大利亚的 Murraylink 工程、美国墨西哥的 Eagle Pass 等），其提升电压等级是采用最直接的桥臂器件串联的方式来实现。②开关频率低、可控性好。③换流器损耗小。另外，在设计主电路拓扑时，还要充分考虑装置的实现难易程度、造价、运行经济性等因素。因此，理想的大容量换流器主回路拓扑结构应该不仅能够降低电力电子器件直接串联数目、器件开关频率，简化系统主电路拓扑结构，而且还能有效降低控制保护系统和主电路的复杂性、器件的开关损耗，为总体上保证系统的经济性、运行可靠性和有效缓解研发难度奠定良好的基础。

另外，主电路的开关调制方式直接关系到系统运行的可靠性、安全性、性能以及系统设计是否优化等诸多问题。在主电路拓扑结构确定的前提下，选择良好的调制方式能够降低换流器输出的谐波，减少交流滤波器容量，降低器件开关损耗，满足交流系统谐波方面的相应标准等。

5.2 控制系统设计

对于柔性直流输电的控制策略，已有较多的相关文献进行了报道，总结起来主要分两类：一类是基于“电压幅值和相位控制”的间接电流控制策略^[17]；另一类是基于同步旋转坐标系下的直接电流控制策略^[15-17]。由于直接电流控制策略能够直接控制流过换流电抗器和变压器的电流，具有动态响应快、能实现限流等良好的控制性能，因此ABB公司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 11 所示^[19-21]。由图 11 可知，其基本结构主要由内环电流控制器、外环功率控制器、触发脉冲生成环节、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柔性直流输电系统的基本控制方式。然而对于柔性直流输电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、多端柔性直流输电的并联运行、柔性直流输电与传统直流输电的混合运行、柔性直流输电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。

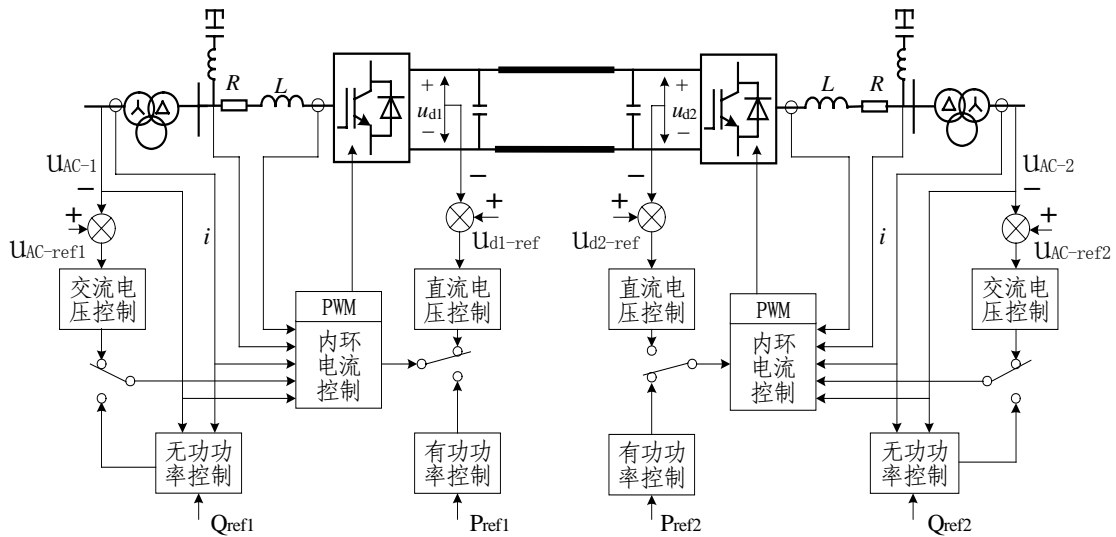


图 11 柔性直流输电系统的控制系统示意图

在柔性直流输电系统中，两站之间的有功功率控制应该协调一致，其中的一个 VSC 站采用直流电压控制模式，而另外一个站采用有功控制模式。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，而送端站采用有功控制，例如 Gotland

工程的控制方式就是这样。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控制或直接无功功率控制来实现。由于换流器容量的限制，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的运行范围——VSC的PQ特性如图12所示。当使用柔性直流输电连接风力发电场时，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，当使用柔性直流输电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。

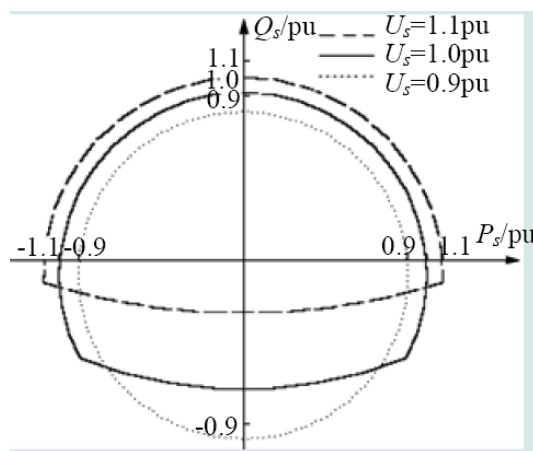
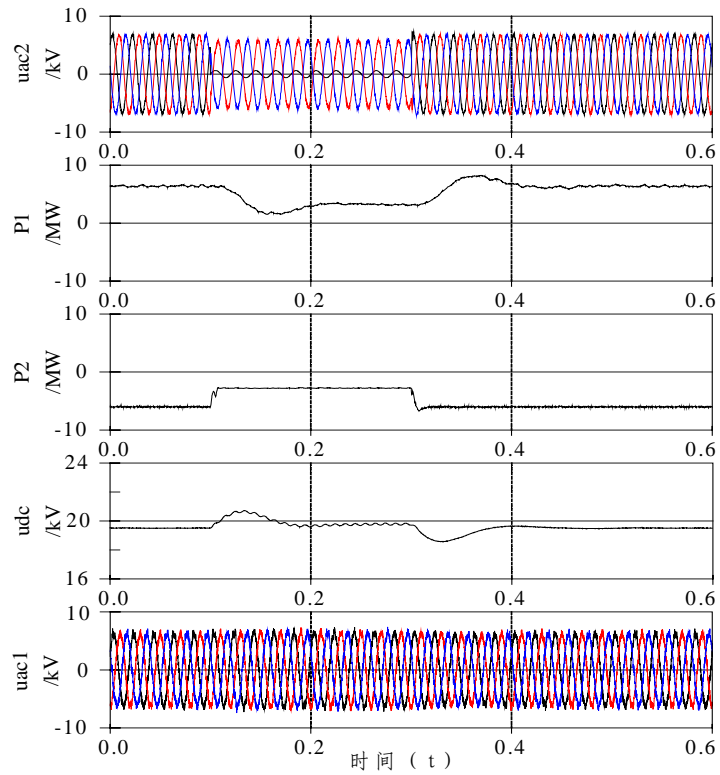
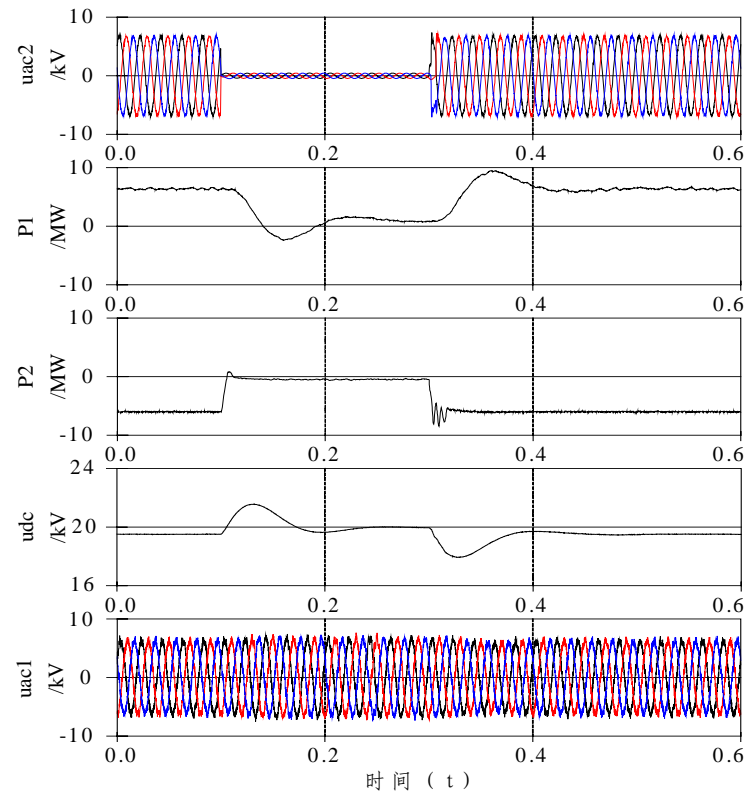


图 12 柔性直流输电系统的站 PQ 特性曲线

与传统的直流输电相比，柔性直流输电还具有另外一个显著特点：在连接两个独立的交流系统的柔性直流输电系统中，一侧交流系统发生故障或扰动并不会影响到另一侧交流系统和换流器的工作。如图13所示，通过控制系统的设计，能够有效地抑制系统的过电流和过电压，而且能够在—侧交流系统发生单相故障或远处三相短路故障时，柔性直流输电系统仍能传输一定的有功功率。因此，在设计柔性直流输电的控制系统时，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。



(a) 一侧交流系统发生单相短路故障时的情况



(b) 一侧交流系统发生三相短路故障时情况

图 13 柔性直流输电的一侧交流系统发生故障时的过流保护控制结果图

5.3 保护系统设计

柔性直流输电系统的故障分析及其相关保护策略的研究是关系到系统安全可靠运行的关键问题之一。柔性直流输电系统的保护策略示意如图 13 所示^[18]。图中，针对柔性直流输电的各个主设备和每种不同的故障类型都有相应的保护策略。柔性直流输电的保护系统在保证系统安全运行的前提下，就从相应的器件级、装置级和系统级保护角度确定相应保护优先级别。

对于柔性直流输电系统中的大部分元件，保护要求与传统 HVDC 输电的策略相同。VSC 站保护的目的是保护 VSC 站免受来自外部故障/外部过电压的危害，限制在 VSC 站内的内部故障的危害或者导通故障。

如果外部暂态故障发生在交流电网中，柔性直流输电必须停止功率传输直到故障清除。外部暂态故障清除后，根据需要，柔性直流输电必须能够手动或自动重新启动恢复输电。对于非永久性故障，柔性直流输电系统不应该跳闸，这也是针对风力发电保护的基本要求。

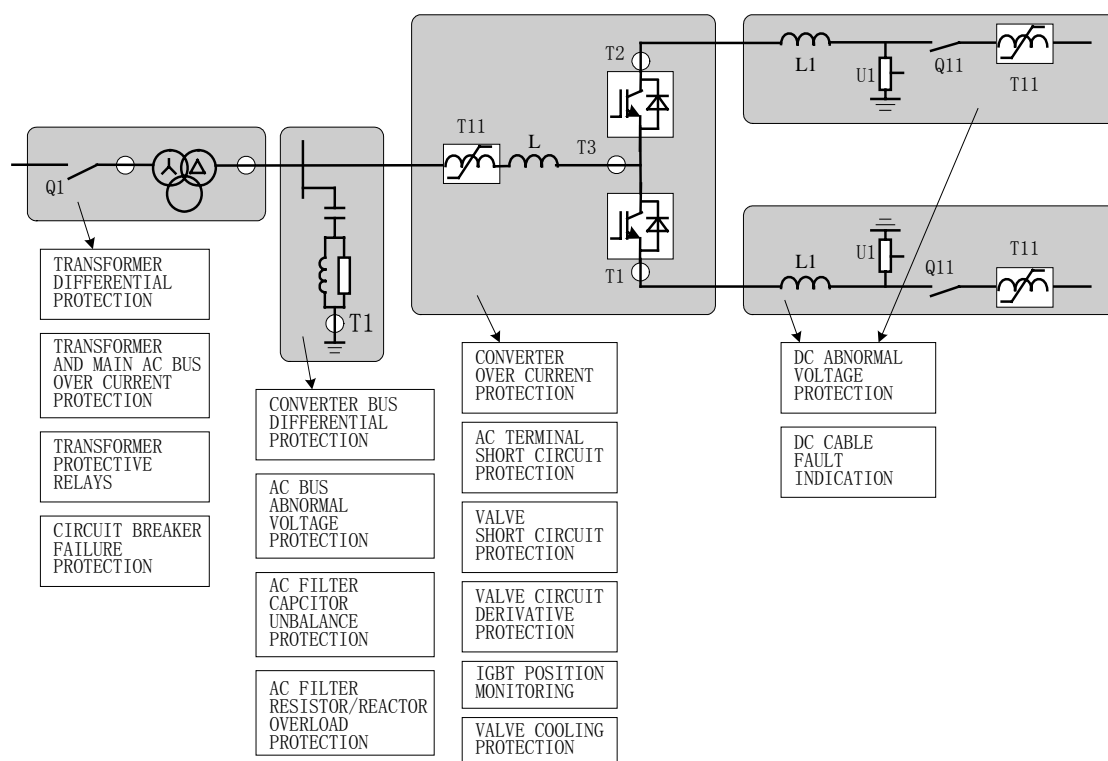


图 14 柔性直流输电系统的保护策略示意图

柔性直流输电的故障可以分为内部故障和外部故障。如果外部故障发生在直流输电电线上，若是电缆，故障将会是永久性故障，这时柔性直流系统应该闭锁。如果是架空线，故障应该就是暂时的。为了防止故障继续通过 VSC 站的反并联二极管馈入，必须使所有末端交流电路断路器或者直流断路器（若有的话）跳闸。如果是内部故障，VSC 站的保护必须隔离任何故障元件并且迅速的把柔性直流系统从运行中闭锁。内部故障可能是短路或者是非正常运行，将导致设备的损坏或者干扰交流系统的有效运行。柔性直流输电的保护配置取决于 VSC 主电路的设计和策略。

5.4 柔性直流输电系统谐波与接地系统

柔性直流输电对电压质量的影响主要表现在谐波方面。电压源换流器在运行时，将同时在其直流侧和交流侧产生谐波。它的影响不是局限在换流站附近，而且能够传播很远的距离；当发生系统电压不平衡或交流系统发生不对称故障时，直流侧和交流侧都将产生大量的非特征谐波，这些谐波将使系统产生过电压和过电流，直接影响器件和系统的安全运行。而治理谐波的主要措施有：①脉宽调制技术（PWM）；②多脉冲技术；③多电平技术；④滤波器（串联/并联、或者相结合）；⑤采用控制系统进行抵制；⑥以上技术的综合。

一般而言，当 VSC 的拓扑结构和控制策略固定以后，VSC-HVDC 输电的谐波特性和谐波水平就已经确定了。由于结合了基于可关断器件的 VSC 技术和 PWM 技术（通常载波频率为 20~40 倍的基波频率），使得 VSC 的特征谐波为高次谐波，谐波含量相对很小，因此小容量的高通滤波器接于公共连接点，就能使系统电压满足谐波水平要求。

进行柔性直流输电系统交直流侧的谐波理论计算、仿真分析和优化设计，可以为交直流侧滤波系统、PWM 控制的设计及其优化，噪音和无线电干扰的降低，提供相应的理论基础。

柔性直流输电换流站及其主要部分，例如直流电容器、滤波器和换流变压器绕组的接地都会影响换流器的性能并且增加 VSC 阀的负荷电流。通过对中性点接地系统在正常、异常工况下的环流及其对柔性直流输电系统运行、各个主设备及其控制保护功能影响进行理论分析和仿真研究，可以提出相应的对策，确保系统

安全可靠运行。

5.5 柔性直流输电损耗分析

目前柔性直流输电应用于大容量功率传输的主要障碍就是其相对较高的功率损耗，主要包括 IGBT、滤波器和换流变压器的损耗，其中以 IGBT 的损耗分析最为重要。柔性直流输电损耗的决定因素包括 VSC 的拓扑结构、IGBT 的开关频率、直流侧电压等。而这些因素又与柔性直流输电的其他性能指标密切相关，如电能质量等。

IGBT 的损耗包括三个方面：①通态损耗或导通损耗；②开通损耗；③关断损耗。通态损耗取决于 IGBT 中的有效电流和功率因数，并且由 IGBT 的固定前向电压降和 IGBT 的导通电阻引起。而开通损耗和关断损耗则由每个开关状态的电压和电流、开关频率以及 IGBT 的开通和关断时的特性决定。对于与 IGBT 反并联的二极管，开通损耗可以忽略，因为只要前向电压一出现二极管就导通了。而关断损耗由二极管恢复引起，所以关断损耗不能够忽略。

除了以上 3 类损耗外，IGBT 阀损耗还包括门极单元和吸收电路的损耗以及短路状态下的漏电流损耗。逆变器运行时 VSC 的损耗由 IGBT 的损耗决定，而整流器的损耗由二极管的损耗决定。另外，开关速度 dv/dt 和 di/dt 也决定了 IGBT 的通断损耗，大的 dv/dt 和 di/dt 可以降低损耗。但是在实际运行中，较大的 dv/dt 和 di/dt 对串联的 IGBT 阀有一定的影响，因此必须兼顾损耗和 IGBT 的串联特性。其次柔性直流输电系统在连续运行时和故障状态下损耗大小也不同。由于柔性直流输电的换流器是一个非线性、强耦合系统，而换流器的损耗分析与系统其它诸多因素有关，因此，开展柔性直流输电的损耗分析是一项既有意义也极具挑战性的工作。

6 面向工程应用时需要开展的基础理论研究

柔性直流输电工程涉及电力系统、材料、控制等学科。由于目前国内还未有相关的工程实践经验，因此在开展柔性直流输电技术工程应用的研究中，要充分调动国外柔性直流输电技术的研究成果和相关工程经验，并需对以下几方面技术进行重点研究。

(1) 柔性直流输电的主电路拓扑结构及调制方式。通过主电路拓扑结构和调制方式的研究，比较和明确适用于柔性直流输电的各种换流器拓扑结构、技术特点及其相应的调制方式，为示范工程的建设提供理论依据。

(2) 在研究和总结现有电压源型换流器数学模型的基础上，建立柔性直流输电系统的数学模型，针对不同的换流器拓扑结构和系统接线方式，建立相应的电磁暂态仿真模型和机电暂态仿真模型，并对不同仿真模型下所得结果进行对比研究，为系统的主电路拓扑结构、开关调制方式、控制保护策略，系统过电压和绝缘配合等相关课题的研究提供有效的仿真手段。

(3) 针对柔性直流输电的不同应用领域，对其控制保护策略展开研究。从保护系统安全运行的角度出发，提出相应的器件级、装置级和系统级保护策略和保护优先级别，为示范工程的保护系统方案设计提供理论支撑。

(4) 进行柔性直流输电系统交直流侧的谐波理论计算、仿真分析和优化分析，为交直流侧滤波系统、PWM 控制的设计及其优化、噪音和无线电干扰的降低提供相应的理论基础。对中性点接地系统在正常、异常工况下的环流及其对柔性直流输电系统运行、各个主设备及其控制保护功能影响进行理论分析和仿真研究，提出相应的对策，确保系统安全可靠运行。通过上述方面的研究，提出柔性直流输电相应的谐波标准和中性点接地系统配置原则。

(5) 对柔性直流输电系统在正常运行及故障状态下的关键设备的损耗进行分析，主要包括：换流变压器的损耗分析、换流电抗器的损耗分析、交直流滤波器的损耗分析、输电线电缆及架空线的损耗分析以及 VSC 阀的损耗分析，其中以 VSC 阀的损耗分析最为重要。

7. 结束语

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、交流电网互联等应用领域得到更快的发展。加快发展柔性直流输电的基础理论研究和工程实践，提高我国电网的整体科技含量，形成具有自主知识产权的关键技术，走出一条中

国特色的电力发展之路，符合中国国情和中国经济发展规律，符合市场需求，符合电力工业发展规律和电网技术发展方向。

参考文献

- [1] Boon-Teck Ooi, Xiao Wang. Boost type PWM HVDC transmission system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991,6(1): 1557-1563.
- [2] Boon-Teck Ooi, Xiao Wang. 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.
- [3] 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.
- [4] Weixing Lu, Boon Teck Ooi. Multiterminal LVDC system for optimal acquisition of power in wind-farm using induction generators [J]. IEEE transactions on power electronics, 2002.17(4): 558-563.
- [5] Asplund G, Eriksson K, Svensson K. DC transmission based on voltage source converter [J]. CIGRE SC14 Colloquium, South Africa, 1997.
- [6] Jan O. Lamell M. et al. Offshore platform powered with new electrical motor drive system [J]. Fifty-second annual technical conference of the petroleum and chemical industry committee denver, CO, USA, September 12-14,2005.
- [7] Lingberg A, Larsson T. PWM and control of three level voltage source converters in an HVDC back-to-back station [J] IEE AC/DC power transmission conference. pp :297-302, 1996.
- [8] M.P.Bahrman, J.G.Johansson, et al. Voltage source converter transmission technologies—the right fit for the application [J]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2003, Vol.3.1840-1847.
- [9] Guibin Zhang, Zheng Xu. Research on the linear and decoupled control strategy for VSC based HVDC system [J]. Proceedings of Transmission and Distribution Conference and Exposition 2001 IEEE/PES, Vol 1. Atlanta (CA, USA), 2001,14-19.
- [10] 张桂斌, 徐政, 王广柱.基于 VSC 的直流输电系统的稳态建模及其非线性控制

- [J].中国电机工程学报, 2002, 22(1): 17-22.
- [11] Guibin Zhang, Zheng Xu. Control strategy for unsymmetrical operation of HVDC-VSC based on the improved instantaneous reactive power theory [J]. Proceedings of Transmission and Distribution Conference and Exposition 2001 IEEE/PES, Vol. 1, Atlanta (CA,USA),2001,14-19.
- [12] L. Xu, B.R. Andersen, P. Cartwright. Multilevel-converter-based VSC transmission operating under fault AC conditions [J]. IEE Transm. Distrib. , 2005, vol. 152, no. 2, pp:185-193.
- [13] 王冠, 蔡晔, 张桂斌, 等. 高压直流输电电压源换流器的等效模型及混合仿真技术[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 4-8.
- [14] Juan W. Dixon, Boon Teck Ooi. Indirect current control of a unity power factor sinusoidal current boost type three-phase rectifier[J]. IEEE Transactions on industrial electronics. 1988, 35(4):508-515.
- [15] 梁海峰, 李庚银等. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统仿真研究[J].电网技术, 2005, 29(8): 45-50.
- [16]尹明, 李庚银, 牛同义等. VSC-HVDC 连续时间状态空间模型及其控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (18): 34-39.
- [17] 张崇巍, 张兴. PMW 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.10.
- [18] It's time to connect – Technical description of HVDC Light technology, ABB power technology AB, 2005. <http://www.abb.com/hvdc>.
- [19] L. Ronström, B.D. Railing, J. J. Miller, P.Steckley, G. Moreau, P. Bard, J. Lindberg. Cross sound cable project second generation VSC technology for HVDC. Cigre Session 2004, B4-102.
- [20] S.G. JOHANSSON, G. ASPLUND, E. JANSSON, R. RUDERVALL. Power system stability benefits with VSC DC transmission systems. Cigre Session 2004, B4-204.
- [21] M. HYTTINEN, J-O. LAMELL, T.F. NESTLI. New application of voltage source converter (VSC) HVDC to be installed on the gas platform Troll A. Cigre Session 2004, B4-210.
- [22] M. Byggeth, K. Johannesson, C. Liljegren, U. Axelsson. Gotland HVDC Light –

- the world's first commercial extruded HVDC cable system. Cigre Session 2000,14-205.
- [23] Pilottol.A.S., Bianco A., Watanabe. E.H., Aredes M., Long W.F. Back-to-back VSC devices: a new solution for the interconnection of asynchronous AC systems - Cigre Session 2000,14-203.
- [24] B.Jacobson, Y. Jiang-hafner, P. Rey, G. Asplund. HVDC with voltage source converters and extruded cables for up to $\pm 300\text{kV}$ and 1000MW. Cigre session 2006, B4-105.
- [25] 张桂斌. 新型直流输电及其相关技术[博士学位论文].浙江大学, 2001.
- [26] 刘洪涛. 新型直流输电的控制与保护策略研究[博士学位论文].浙江大学, 2003.
- [27] Nojtaba Noroozian, Abdel-Aty Edris, David Kidd, 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.
- [28] 李庚银, 吕鹏飞等. 轻型高压直流输电技术的发展和展望[J].电力系统自动化, 2003, 27(4): 1-5.