

柔性直流换流站运维岗位培训教材

柔性直流输电 运维技术

国网浙江省电力公司培训中心
国网浙江省电力公司舟山供电公司

组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

柔性直流换流站运维岗位培训教材

柔性直流输电 运维技术

国网浙江省电力公司培训中心 组编
国网浙江省电力公司舟山供电公司



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

柔性直流输电技术在我国工程化应用,提高我国电网安全稳定水平,建立经济、高效、先进的智能电网都有重要意义。本书总结了舟山五端柔性直流输电示范工程的运维检修管理经验,汲取了国内外柔性直流输电工程的经验,对指导我国柔性直流输电工程的运维检修工作具有很好的参考价值。

本书共有7章,主要包括:柔性直流输电技术概述、柔性直流输电换流技术、柔性直流输电换流站主设备、柔性直流输电控制系统、柔性直流输电保护系统、多端柔性直流输电监控系统、柔性直流系统设备状态定义和启停流程。

本书可供从事柔性直流输电系统换流站运行维护的值班员和检修工人使用,也可作为高等院校相关专业的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

柔性直流输电运维技术/国网浙江省电力公司培训中心,国网浙江省电力公司舟山供电公司组编. —北京:中国电力出版社,2017.1

ISBN 978-7-5198-0325-4

I. ①柔… II. ①国… ②国… III. ①直流输电-电力系统-检修 IV. ①TM721.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第010579号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京天宇星印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2017年1月第一版 2017年1月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 10.75印张 255千字

印数0001—1000册 定价38.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

编 委 会

主 编	钟晓波					
副 主 编	俞恩科	许 琤				
编委会成员	顾建明	宋 勤	杨 勇	董 平	詹志雄	
编写组长	李剑波					
编写副组长	戴 杰					
编写组委员	傅乐伟	马浩鹏	袁 杰			
编写组审核	王西瑶	蒋丽娟	高 伟	朱剑伟	傅剑捷	
	周 芳	乔 敏				
编写组成员	赵勋范	石少平	张 吼	刘 黎	张魏晶	
	於英华	陈伟平	车海军			



前言

柔性直流输电是基于全控型电力电子器件的新一代直流输电技术，是当今世界上电力电子技术应用的制高点。柔性直流输电技术在提高电力系统稳定性，增加系统动态无功储备，改善电能质量，解决非线性负荷、冲击性负荷对系统的影响，保障敏感设备供电等方面都具有较强的技术优势。由于其本身具有的技术特点，柔性直流输电系统适用于可再生能源并网、分布式发电并网、孤岛供电、大型城市电网供电等方面。特别是在风力发电并网、海上平台供电和大型城市电网供电方面，柔性直流输电系统的综合优势更加明显。

为提高换流站运检人员技能水平，保证柔性直流输电设备安全稳定运行，特组织编制柔性直流输电技术培训教材。

本书以浙江省电力系统调度规程、舟山电力系统调度规程，舟山柔性直流输电系统调度运行管理规定（试行），换流站现场运行规程为依据编写。本书由国网浙江省电力公司培训中心和国网浙江省电力公司舟山供电公司组织编写，第1章柔性直流输电技术概述由浙江省电力公司赵勋范、余伟编写；第2章柔性直流输电换流技术由浙江省电力公司戴杰、余伟编写；第3章柔性直流输电换流站主设备由浙江省电力公司李剑波、张吼、傅乐伟、刘黎编写；第4章柔性直流输电控制系统由浙江省电力公司李剑波、戴杰编写；第5章柔性直流输电保护系统由浙江省电力公司袁杰、余伟、张魏晶、石少平编写；第6章多端柔性直流输电监控系统由浙江省电力公司陈伟平、朱剑伟、於英华编写；第7章多端柔性系统设备状态定义和启停流程由浙江省电力公司车海军、傅剑捷编写。

本书在编写和出版过程中得到了国网浙江省电力公司培训中心、南京南瑞继保电气有限公司等单位的大力支持和帮助，特在此深表感谢。由于我们的水平和经验有限，书中难免有缺点或错误之处，望读者批评指正。

编者

2016年8月



目 录

前言

第 1 章 概 述

- 1.1 柔性直流输电技术发展概况 2
- 1.2 传统直流输电与柔性直流输电的区别 10
- 1.3 柔性直流输电的技术特点 15
- 1.4 柔性直流输电系统的构成 19

第 2 章 柔性直流输电换流技术

- 2.1 柔性直流输电的基本原理 24
- 2.2 电压源换流器 (VSC) 27
- 2.3 模块化多电平 (MMC) 电压源型换流器 28

第 3 章 柔性直流输电换流站主设备

- 3.1 换流站电气主设备概述 36
- 3.2 换流阀 37
- 3.3 联结变压器 41
- 3.4 电抗器 50
- 3.5 启动电阻 52
- 3.6 断路器设备 54
- 3.7 隔离开关 58
- 3.8 换流阀冷却系统 60
- 3.9 电流互感器 74

3.10	电压互感器	83
3.11	避雷器	87

第 4 章 柔性直流输电控制系统

4.1	概述	92
4.2	系统级控制	92
4.3	换流阀级控制	93
4.4	换流站级控制	94
4.5	控制系统硬件结构	94
4.6	控制系统功能说明	96
4.7	启动控制策略	108
4.8	空载加压试验	109
4.9	黑启动	111
4.10	孤岛与联网互转	111

第 5 章 柔性直流输电保护系统

5.1	概述	114
5.2	MMC - HVDC 保护策略	114
5.3	直流保护冗余配置	114
5.4	直流保护系统层次设计	115
5.5	直流保护系统功能介绍	116
5.6	详细保护配置	118
5.7	直流保护装置结构	124

第 6 章 多端柔性直流输电监控系统

6.1	概述	128
6.2	功能配置	129
6.3	系统配置	131
6.4	OWS (运行人员工作站) 基本操作	132
6.5	控制窗口	136
6.6	事件报警窗口	142
6.7	趋势窗口	146

第 7 章 柔性直流系统设备状态定义和启停流程

7.1 换流站设备状态定义	150
7.2 单站换流站启动和停运流程（典型操作任务）	157
7.3 不同端数换流站顺控流程	159
参考文献	161



第 1 章

概 述



1.1 柔性直流输电技术发展概况

1.1.1 直流输电技术背景

直流输电技术是以直流电的方式实现电能的输送，电力科学技术的发展最早就是从直流电开始的。早期的直流输电是不需要经过换流，直接从直流电源送往直流负荷，即发电、输电和用电均为直流电。由于当时送端的直流发电机和受端的直流电动机均是直接串联方式运行，可靠性较差，而且高压大容量的直流电机换向困难，导致直流输电技术停滞不前。到了19世纪80、90年代，三相交流发电机、感应电动机和变压器相继问世。由于交流电的发电、变压、输送、分配和使用都很方便，从而使交流输电和交流电网得到了迅速的发展。但是，随着用电领域和地域的不断增加，电网规模迅速扩大，直接导致了一系列交流输电很难跨越的技术阻碍，如远距离电缆输电、异步电网互联等。在1971年10月26日美国加州南部莫哈维（Mohave）电厂发生由次同步谐振引起的发电机机轴断裂事故，更动摇了人们对交流输电的信心。而与此同时，由于高电压大功率换流技术的快速发展，使直流输电又重新为人们所重视。

目前，电力系统中的发电和用电的绝大部分均为交流电，要使用直流电，必须进行电能转换。也就是说在输电系统的送端需要将交流电转换为直流电（这个过程称为整流），经过直流输电线路将电能送往受端；而在受端又必须将直流电转换为交流电（这个过程称为逆变），然后才能送到受端的交流系统中去，供用户进行使用。在这个系统的送端进行整流变换的地方叫整流站，而在受端进行逆变变换的地方叫逆变站，一般统称为换流站。而实现电力的整流和逆变的电力电子装置分别称为整流器和逆变器，一般统称为变流器。

在发电和用电的绝大部分均为交流电的情况下，要采用直流输电，必须要解决换流问题。因此，直流输电的发展与换流技术（特别是高压大功率换流技术）的发展有密切的关系。早在20世纪30、40年代，相关领域的科学家和工程技术人员就相继采用气吹电弧整流器、闸流管和引燃管作为变流器建设一些试验工程。但直到高电压大容量的可控汞弧整流器的研制成功，才为高压直流输电（High Voltage Direct Current, HVDC）的工程化应用创造了必要条件。从1954年世界上第一个直流输电工程（瑞典本土至哥特兰岛的20MW、100kV海底直流电缆输电）投入商业化运行，到1977年为止共有12项采用汞弧阀的直流工程投入运行。但是，由于汞弧阀的制造技术复杂、价格昂贵、逆弧故障率高，直接造成输电系统的可靠性较低、运行维护工作量大的不便因素，使得直流输电的发展受到了一定限制。

到了20世纪70年代，随着半导体和电力电子技术的迅速发展以及高压大功率晶闸管的问世，使晶闸管换流阀在直流输电工程中得到了广泛的应用，这些技术有效地改善了直流输电的运行性和可靠性，促进了直流输电技术的发展。由于晶闸管换流阀不存在逆弧问题，而且制造、试验、运行维护和检修都比汞弧阀简单而方便，因此，1970年瑞典首先在哥特兰岛直流工程上进行了10MW/50kV的采用晶闸管换流阀的试验工程。1972年世界上第一个采用晶闸管换流的伊尔河背靠背直流工程在加拿大投入运行。由于晶闸管换流阀相比于汞弧阀具有明显的优点，在以后新建的直流工程均采用晶闸管换流阀。与此同时，原来采用汞弧阀的直流工程也逐步被晶闸管换流阀替换。从此，直流输电技术进入了晶闸管换流阀时期。

在此期间，由于微机控制和保护、光电传输技术、水冷却技术、氧化锌避雷器等新技术的产生和发展以及在直流输电工程中广泛的应用，极大地推动了直流输电技术，自此输电能力没有暂稳极限限制的直流输电进入了黄金发展期。直流输电在远距离大容量输电、电网互联和电缆送电（特别是海底电缆）等方面均发挥了重大的作用。

由于晶闸管阀没有自关断电流的能力，并且其开关频率也较低，使变流器的性能受到很大的约束，因此，基于晶闸管的电流源型高压直流输电技术具有许多的固有缺陷。例如，变流器只能工作在有源逆变状态，且直流受端系统必须要有足够大的短路容量，否则容易发生换相失败；变流器产生的谐波次数低、容量大，需要大量的滤波装置；变流器功率因数低，需吸收大量的无功功率，要配置大量的无功补偿设备；换流站占地面积较大；输电线路环境污染较大等。

随着电力电子器件和控制技术的发展，出现了新型的半导体器件——绝缘栅双极晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT）。IGBT 于 1982 年开始用于低电压场合（600 ~ 1200V），使用 IGBT 作为开关器件的电压源变流器（VSC）随后在工业驱动装置上得到广泛的应用。随着 IGBT 器件电压和容量等级的不断提升，到了 20 世纪 90 年代初，出现了高压 IGBT（2.5kV，1997 年 3.3kV，2004 年 6.5kV），这使采用绝缘栅双极晶体管构成电压源型变流器（Voltage Source Converter, VSC）来进行直流输电成为可能。1997 年，首个使用电压源换流技术的直流输电工程——赫尔斯扬实验性工程投入运行，其系统参数为 3MW/±10kV。其中的变流器采用 IGBT 和两电平三相桥结构，并使用脉宽调制技术（PWM）控制 IGBT 的开关和变流器的交流输出。由于 IGBT 具有可控开通和关断的能力，这使得由其构成的直流输电系统在许多方面不同于传统直流，从而也可以有效地克服传统直流的一些固有缺陷。

同时，随着能源紧缺和环境污染等问题的日益严峻，风能、太阳能等可再生能源利用规模不断扩大，其固有的分散性、小型性、远离负荷中心等特点，使采用交流输电技术或传统的直流输电技术联网显得很经济；一些海上钻探平台、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。而采用基于可关断型器件的电压源型变流器和 PWM 技术的新型直流输电技术可以很好地解决上述问题，从其技术特点和实际工程的运行情况来看，当前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。

随着 IGBT 器件电压和容量等级的不断提升，直流输电技术也随着 IGBT 技术的提高而得到快速的发展。柔性直流输电是 20 世纪 90 年代开始发展的一种新型的高压直流输电技术。1990 年，由加拿大 McGill 大学 Boon-Teck Ooi 等人首次提出。其主要特点是采用具有自关断能力的全控型电力电子器件构成的电压源换流器（Voltage Sourced Converter, VSC），取代常规直流输电中基于半控晶闸管器件的电流源换流器。

柔性直流输电系统作为直流输电的一种新技术，也同样由换流站和直流输电线路构成。图 1-1 是柔性直流输电系统单线原理图，包括两个换流站和两条直流线路。柔性直流输电功率可双向流动，两个换流站中的任一个既可以作整流站也可以作逆变站运行，其中处在送电端的工作在整流方式，处在受电端的工作在逆变方式。

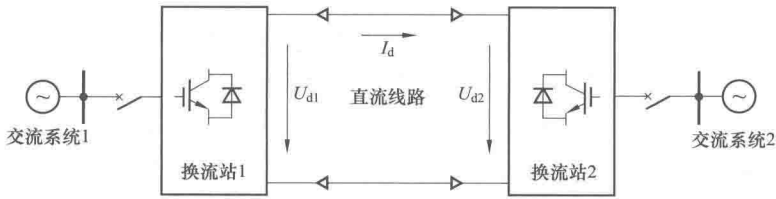


图 1-1 柔性直流输电系统单线原理图

对于这种新型的直流输电技术，国际权威电力学术组织，如国际大电网会议（CIGRE）和美国电气电子工程协会（IEEE），都将其学术名称定义为“VSC-HVDC”或者“VSC Transmission”，即“基于电压源换流器的高压直流输电”。ABB公司为了形象宣传，称之为“轻型直流（HVDC-Light）”，西门子公司则称之为“新型直流（HVDC-Plus）”。为简化、形象地描述此技术，国内很多专家建议将该技术简称为“柔性直流（HVDC-Flexible）”，以区别于采用晶闸管的常规直流输电技术。

1.1.2 柔性直流输电工程适用场合

作为新一代直流输电技术，柔性直流输电突出体现全控型电力电子器件、电压源变流器和脉冲调制三大技术特点，可解决常规直流输电的诸多固有瓶颈。柔性直流输电系统可以快速独立地控制与交流系统交换的有功功率和无功功率、控制公共连接点的交流电压，潮流反转方便灵活，可以自换相。因此具有提高交流系统电压稳定性、功角稳定性，降低损耗，事故后快速恢复，便于电力交易等功能。加之设计施工方便灵活、施工周期短、电磁场污染小、噪声污染小、没有油污染等特点，使得柔性直流特别适合在连接分散的新能源电源、弱交流节点处的交流电网非同步互联、偏远负荷供电、海上钻井平台或孤岛供电、提高配电网电能质量等领域应用。它的出现为直流输电技术开辟了更广阔的应用领域，其主要适用于如下场合：

(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) 异步电网互联。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) 构筑城市直流输配电网。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。柔性直流输电技术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。

(4) 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原因，这同时也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) 海上采油平台供电。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，这些问题都可解决，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。同时，柔性直流输电系统还可以向两端的交流系统提供无功支撑的能力，大大提高了相连电网的运行稳定性。因此，柔性直流输电技术是未来改善电网电能质量的有效措施。

(7) 电力市场。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，柔性直流输电较之常规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。基于电压源变流器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。

1.1.3 柔性直流输电工程介绍

从 20 世纪 80 年代开始，欧洲国家已有试验性自换流直流工程出现。1999 年 6 月，世界上第一个商业运行的柔性直流输电工程在瑞典哥特兰岛（Gotland）投运，其变流器为两点平结构，输送容量为 50MW，直流侧电压为 $\pm 80\text{kV}$ ，可以将南斯（Nas）风电场的电能送到哥特兰岛西岸的维斯比（Visby）市。随后的几个工程都采用了与此类似的设计。这些早期柔性直流输电系统的变流器开关频率较高，采用的都是两电平变流器技术，直流侧电压最高为 $\pm 80\text{kV}$ 。而第二代柔性直流输电工程一般采用三电平变流器，直流侧电压最高达到了 $\pm 150\text{kV}$ ，输电功率达到了 330MW。这种新的设计方案用在了克罗斯桑德联络工程和莫里互联工程中。同时，由于变流器电平数的提高，使变流器的开关频率有所降低，其中克罗斯桑德工程的开关频率为 1260Hz，莫里互联工程的开关频率为 1350 Hz。而在 2007 年投入运行的伊斯特互联工程以及随后的工程，可以认为是第三代柔性直流输电技术。这些工程中的变流器由于采用了优化脉宽调制（OPWM）技术，在变流器拓扑结构又回归到简单的两电平的同时，还显著降低了开关频率（1150Hz）。截止到目前，已经投入商业运行的柔性直流输电工程有 9 项，同时还有 4 项工程在建。目前运行的工程总输电容量为 950MW 左右，而随着技术的发展，新建工程的容量越来越大，电压等级也越来越高。

1997 年投入运行的赫尔斯扬（Hällsjön）实验性工程是世界上第一个采用电压源变流器进行的直流输电工程（见图 1-2）。这个实验性工程的容量和电压等级为 3MW/ $\pm 10\text{kV}$ ，电能通过一条用交流线路改造的 10km 架空线路进行传输。这个工程连接了瑞典中部的赫尔斯扬和哥狄斯摩（Grängesberg）两个换流站。工程于 1997 年 3 月开始试运行，随后进行的各项现场试验表明，此系统的功率传输稳定，在稳态和暂态下的所有性能都达到了预期效果。

此工程可以将赫尔斯扬的电能输送到哥狄斯摩处的交流系统，或者直接对哥狄斯摩处的独立负荷供电。在后一种情况下，相当于柔性直流输电系统向无源负荷供电，此时负荷的电

压和频率均由柔性直流输电的控制系统决定。由于柔性直流输电系统的变流器是可以四象限运行的，因此具有较大的运行灵活性。并且由于具有无功补偿的能力，因此可以很好地抑制相连交流系统的电压波动。

此工程的意义在于，它在世界上首次实现了柔性直流输电技术的工程化应用，将可关断晶体管阀的技术引入了直流输电领域，使直流输电技术进入了一个新的发展阶段，开创了直流输电技术的一个新时代。柔性直流输电系统的出现，使直流输电系统的经济容量降低到了几十兆瓦的等级。同时，新型变流器技术的应用，为交流输电系统电能质量的提高和传统输电线路的改造提供了一种新的思路。

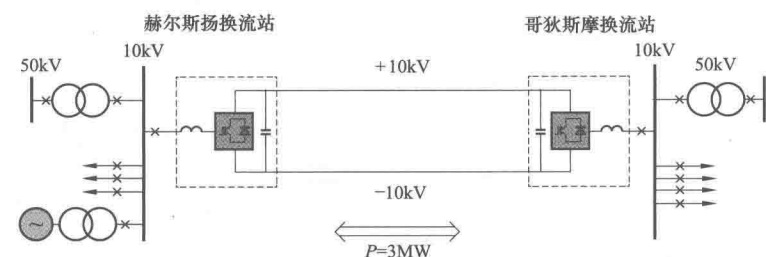


图 1-2 赫尔斯扬实验工程原理接线图

柔性直流输电现有工程的应用领域主要分为风电场并网、电网互联、孤岛供电和城市供电四个方面，下面分别就上述应用领域分别简要介绍柔性直流输电工程应用情况。

(1) 风电场并网工程。目前，应用于风电场并网的柔性直流工程有哥特兰 (Gotland) 工程、泰伯格 (Tjareborg) 工程和在建的瑙德 (Nord E. ON 1) 工程。

哥特兰 (Gotland) 岛是瑞典最大的岛屿，具有非常丰富的风力资源。岛上风力发电的快速发展，使其发电量从 1994 年的 15MW 发展到 1997 年的 48MW。但是岛屿本身的用电量较小，使得多余的电力需要送出。由于该风电场所在的南斯敦地区是瑞典风电场最集中的地方，由此导致本地电网严重失衡；另外，在风电场运行过程中还需要吸收一定的无功功率，使电网的电压质量较差。为了满足风电的发展需要和保证电压质量，在南斯敦 (Näsudden) 的南斯 (Näs) 换流站和瑞典北部港口城市维斯比 (Visby) 附近的贝克斯 (Bäcks) 换流站之间，采用一条柔性直流输电系统将哥特兰岛上的风电资源送往大陆。工程于 1999 年秋季投入运行，是世界上第一条商用的柔性直流输电系统，其原理接线图如图 1-3 所示。该工程不仅将哥特兰岛的电能输送到瑞典本土，而且提供了风电场所需要的动态无功

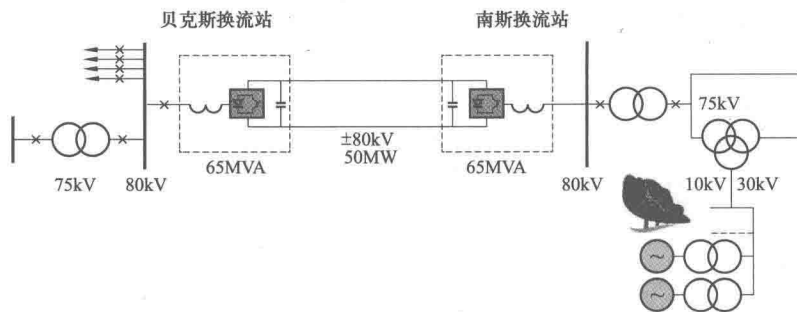


图 1-3 哥特兰工程原理接线图

功率支撑,解决了潮流波动、电压闪变和频率的不稳定问题,提高了相连交流系统的稳定性,并有效改善了电能质量,充分体现了柔性直流输电系统的优良性能。

(2) 电网互联工程。目前,应用于电网互联的柔性直流工程有迪莱克特联接(Directlink)工程、伊格-帕斯背靠背(Eagle Pass B2B)互联工程、克劳斯-桑德互联(Cross Sound Cable)工程、莫里联络(Murraylink)工程、伊斯特互联(Estlink)工程和在建的卡普里维(Capriivi Link)互联工程。

迪莱克特联接(Directlink)工程连接了澳大利亚新南威尔士和昆士兰两个地区的电网,其中包含了3条并联的60MVA传输线,总功率180MW,用来完成两个区域电网之间的连接和电力交易,原理接线如图1-4所示。由于全部采用了地下电缆来进行输送,使得迪莱克特联接工程在环境、外观等方面的不利影响都降到了最小。同时,由于柔性直流输电系统有良好可控性,使得两个区域电网之间的功率流动可以得到精确、快速的控制。由于每个换流站在传输有功功率的同时还可以提供独立的无功功率,因此还可以对所连接的电网提供动态无功支撑能力。

迪莱克特联接工程的3条并联线路在2000年的中期开始投入运行,并在传输控制特性方面取得了良好的预期效果。

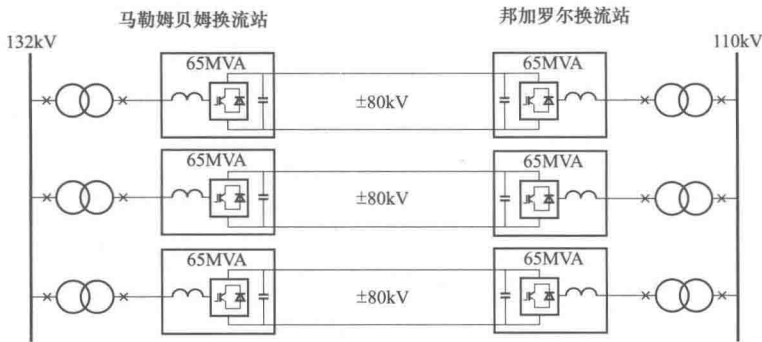


图 1-4 迪莱克特联结工程原理接线图

伊格-帕斯背靠背(Eagle Pass B2B)互联工程安装在美国的伊格-帕斯(Eagle Pass)变电站,连接到墨西哥边境上的彼德拉斯-内格拉斯(Piedras Negras)变电站,原理接线如图1-5所示。伊格-帕斯的负荷原来是由两条138kV的交流传输线提供的,但是由于地区负荷的增长使在峰值负荷下电网的电压稳定性有所降低,这使美国侧功率输送的可靠性也降低了。而在紧急情况下,虽然伊格-帕斯变电站可以通过138kV的联络线从墨西哥的电网中获取功率,但是会使变电站运行在饱和状态下,这可能会使变电站发生问题而导致供电中断。

为了提高电压的稳定性,同时使美国和墨西哥之间的功率双向交换不容易产生中断而对用户造成影响,需要对此线路进行升级。可选的第一个方案是再建设一条70km的138kV输电线路,和现有的两条

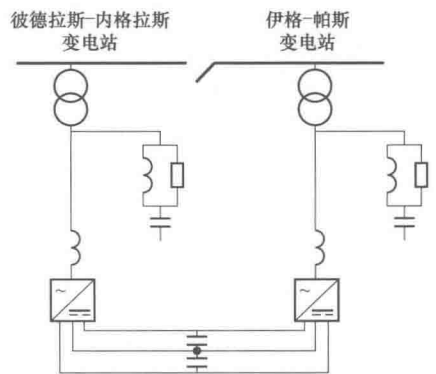


图 1-5 伊格-帕斯工程原理接线图

138kV 线路并联运行，但这个方案所面临的问题是很难获得一条新的输电走廊。第二个方案是使用传统的高压直流输电技术，但是由于美国侧的交流系统是一个弱电网，可能会无法为传统直流输电系统提供所需要的换相容量，因此这个方案也不甚理想。而基于电压源变流器技术的柔性直流输电系统因为不受相连交流系统的影响，最终采用了该方案，在伊格帕斯安装了一个 36MVA 的背靠背柔性直流输电系统。此工程投入运行后，可以稳定交流电压，并且可以在紧急情况下从墨西哥获得必要的功率输送。

伊斯特互联 (Estlink) 工程是欧洲电网互联最重要的工程之一。该工程的实施是为了确保电力系统的可靠运行，提高功率交换能力，并且建立一个更加高效的欧洲电力市场。由于波罗的海国家的电力网络没有和其他的欧洲国家互联，只是和俄罗斯的电网存在一定联系，因此基本成为一个电力孤岛。在爱沙尼亚和芬兰两个国家电网之间建立互联，不仅可以增强波罗的海地区电力系统的安全性和稳定性，另外还提供了电力交易的可能性。

由于两个地区的电网是非同步电网 (即两个电网的频率不同)，而且传输距离较长，并且有大部分输电走廊都需要经过海底，因此首先考虑使用高压直流输电系统。在项目的可行性研究阶段，通过对投资成本、过载能力、传输损耗、系统可用率、维护成本和建设时间的综合比较之后，最后选择了使用柔性直流输电系统。

工程在 2006 年底投运，其两端分别位于芬兰的赫尔辛基西部的埃斯波 (Espoo) 换流站和爱沙尼亚的塔林附近的哈库 (Harku) 换流站。两个换流站之间使用了 105km 的电缆进行连接 (其中 74km 为海底电缆，31km 为地下电缆)。工程的额定传输功率为 350MW (最大为 365MW)，直流侧电压为 $\pm 150\text{kV}$ 。该工程是目前世界上已投运的输电功率最大的柔性直流输电项目，原理接线如图 1-6 所示。在伊斯特工程中，变流器使用了两电平结构，但是由于采用了先进的优化脉宽调制 (OPWM) 技术，其谐波含量比以前的两电平和三电平结构都有所减小，同时开关频率也得到了降低。可以认为，工程的实施标志着第三代柔性直流输电技术的成功使用。

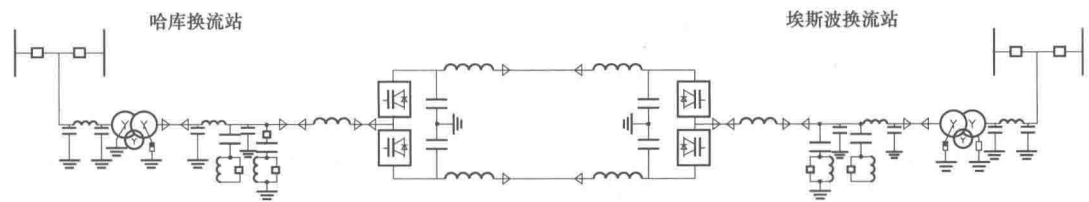


图 1-6 伊斯特工程原理接线图

由于电压源变流器的使用，柔性直流输电系统的两端都可以额外地提供无功功率和电压支撑能力，这对于提高爱沙尼亚电网的电压稳定性是很有好处的。同时，由于柔性直流输电系统的变流器可以产生一个幅值和相角都可以变化的电压，因此可以提供黑启动能力，即在一侧交流电网掉电以后，将变流器切换到控制器运行状态，此时可以由柔性直流输电系统向失去电压的交流电网提供启动功率，这个黑启动能力在爱沙尼亚电网进行了验证。在实际运行中，变压器上需要装有一个特别的辅助绕组来提供站用电，而当控制系统检测到电网完全停电以后，爱沙尼亚侧的变流器就自动地与交流电网断开，并且运行在“站用电负荷”模式下，由芬兰的换流站向其供电。此时变流器上的电压和频率由控制器本身决定，也就是作为发电机运行在频率控制下。然后再连接上爱沙尼亚侧的交流系统，首先加上一个较小的负载，然后逐渐增大负载，直到达到柔性直流输电系统的额定功率为止。黑启动特性可以使爱

沙尼亚的电网在几分钟的时间内从完全停电的状态变为能够恢复一部分功能。而当交流侧足够的发电机开始运转发电后，爱沙尼亚侧变频器的控制模式可以从频率/电压控制转为正常情况下的功率/电压控制。

此工程的意义在于第一次将波罗的海地区的电力系统和欧洲电力系统进行了互联；提高了波罗的海和芬兰电网供电的可靠性；增加了各电力市场中的供电商数量。

(3) 孤岛供电工程。目前，应用于孤岛供电的柔性直流工程有泰瑞尔 (Troll A) 工程和瓦尔哈 (Valhall) 工程。

在大部分海上平台中，所需要的电能都是由安装在平台上的燃气轮机或柴油发电机来提供的。但是这些发电机的效率一般都比较低 (小于 25%)，这不仅会导致大量的二氧化碳排放，而且造成了燃料的浪费，不利于节能减排。因此，考虑从陆上为海上平台提供电能，不仅可以减低温室气体的排放，还能够节省平台的发电成本和发电设备的维护费用，并且其生命周期和可用率都能得到提高。由于海上平台距离大陆较远而且负荷相对较小，因此所需要的输电距离较长而且容量很小。再加上长距离海底电缆输电和环境保护的要求，因此最好使用柔性直流输电系统向海上平台供电。

2005 年 10 月投运的挪威泰瑞尔 (Troll A) 柔性直流输电工程，就是用于从挪威的克斯奈斯 (Kollsnes) 换流站向泰瑞尔海上天然气钻井平台上的用电设备供电。工程使用了两个并联的柔性直流输电系统，每个系统的额定功率为 45MW，直流电压 $\pm 60\text{kV}$ ，输电线路为 70km 长的海底电缆，原理接线如图 1-7 所示。在泰瑞尔海上钻井平台中，由于平台上所使用的气体压缩机转速是时刻变化的，由柔性直流输电系统的变流器直接向上的变速同步电机进行供电，使同步电机的频率可以在 42~63Hz、运行电压在 0~56kV 之间变化。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。

由于在海上平台上，空间和质量都要受到严格的限制，因此对换流站的设计提出了较高的要求。而柔性直流输电系统的换流站所需要的滤波器远小于普通直流输电系统，而且不需要无功补偿设备，变压器也不需要特别设计，因此其质量和体积都要远远小于传统直流输电系统的换流站。

此工程投运后，不仅每年可以减少二氧化碳排放量 23 万 t，还显著地降低了海上平台的运营成本和维护费用以及在海上使用燃气轮机的危险性。

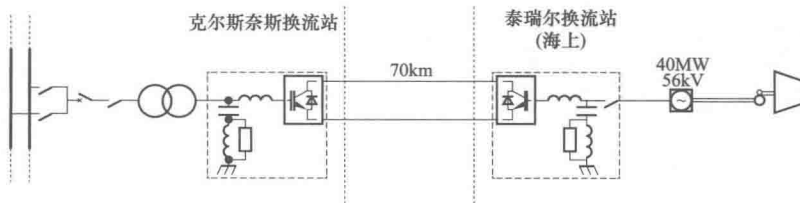


图 1-7 泰瑞尔工程原理接线图 (单个系统)

(4) 城市供电工程。目前，应用于城市供电的柔性直流工程仅有在建的传斯贝尔联络 (Trans Bay Cable) 工程。

传斯贝尔联络工程是从匹兹堡市的匹兹堡换流站开始，经过一条位于旧金山湾区海底的 88km 长的高压直流电缆，把电能传送到旧金山的波特雷罗换流站。工程计划于 2010 年 3 月