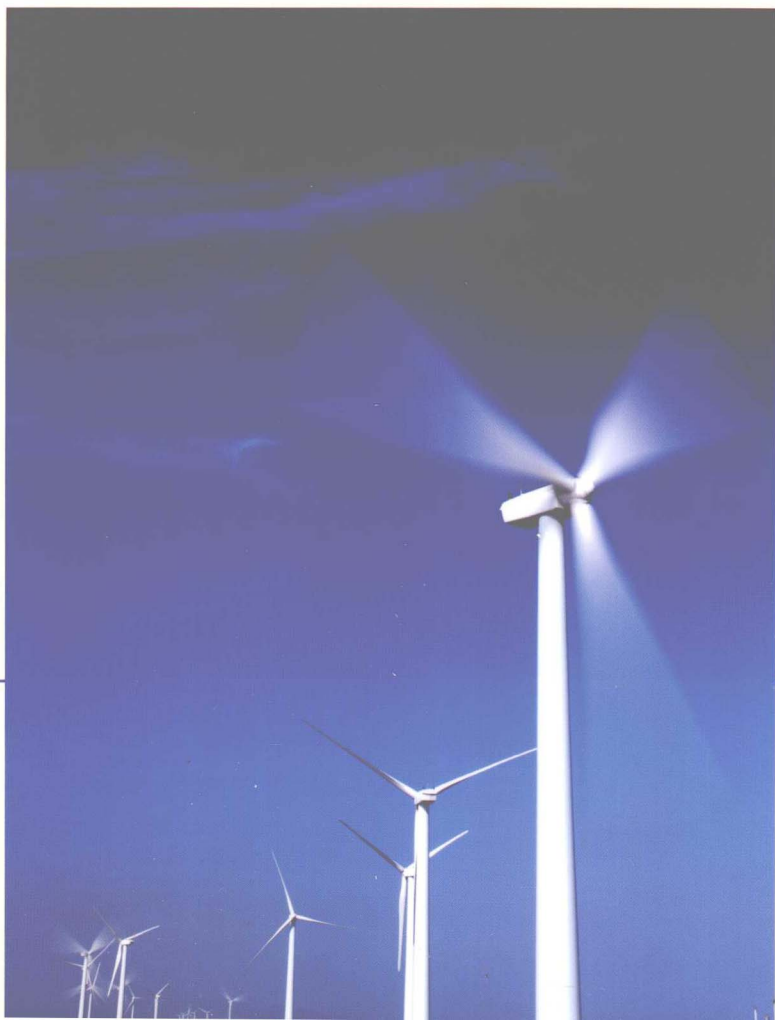


 中国南方电网
CHINA SOUTHERN POWER GRID

◆ 贵州电网有限责任公司科技创新系列丛书 ◆

柔性直流输电技术及 工程应用

贵州电网有限责任公司 组编



贵州大学出版社
Guizhou University Press

 中国南方电网
CHINA SOUTHERN POWER GRID

◆ 贵州电网有限责任公司科技创新系列丛书 ◆

柔性直流输电技术及 工程应用

贵州电网有限责任公司 组编



贵州大学出版社
Guizhou University Press

图书在版编目 (C I P) 数据

柔性直流输电技术及工程应用 / 贵州电网有限责任公司
公司组编. — 贵阳: 贵州大学出版社, 2014.11

(贵州电网有限责任公司科技创新系列丛书)

ISBN 978-7-81126-734-1

I. ①柔… II. ①贵… III. ①直流输电—输电技术
IV. ①TM721.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 246114 号

柔性直流输电技术及工程应用

组 编: 贵州电网有限责任公司

责任编辑: 但明天

出版发行: 贵州大学出版社

印 刷: 贵阳快捷彩印有限公司

开 本: 720 毫米×1000 毫米 1/16

印 张: 23

字 数: 414 千字

版 次: 2014 年 12 月 第 1 版

印 次: 2014 年 12 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-81126-734-1

定 价: 79.00 元

版权所有 违权必究

本书若出现印装质量问题, 请与本社联系调换

电话: 0851-5981027

编 委 会

主 编 肖 永

副主编 刘 晖 陈建国

参 编 彭小俊 冯 成 桂军国 林呈辉
 徐长宝 姜 浩 文忠进 曹 洪

前 言

目前新型、清洁、可再生能源发电已成为未来电力系统的发展方向，风力、太阳能等新型能源发电技术在世界范围内逐步扩展，其主要特点之一是分散化与小型化。地理条件与发电规模的制约使得利用现有交流输电技术将这些“孤岛”电源与电网连接经济性差、环保压力大。同时钻探平台、岛屿、矿区等“孤岛”负荷目前多采用污染性大的柴油发电机供电，若采用交流输电技术供电也有同样问题。为此，需要一种经济、灵活、高质量的输电方式来解决上述问题。

柔性直流输电技术（HVDC-Flexible）是国外 20 世纪 90 年代在高压直流输电技术（HVDC）基础上发展起来的一项新技术，为配电网提供了新途径，也可以提高交流电网电能质量。相对于 HVDC，HVDC-Flexible 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。此外，HVDC-Flexible 能向系统同时提供有功和无功功率，与交流系统无缝连接以及高可控能力，可抑制和解决高压交流和传统高压直流输电在大规模电网互联中存在的缺点和问题，提高电力系统稳定性和输电能力。

本书分析了柔性直流输电运行的基本原理、PWM 调制原理及调制方式分类，并在此基础上建立了 VSC.HVDC 的数学模型，其中包括高频数学模型和低频数学模型。实际工程应用证明所设计的 VSC.HVDC 控制系统具有优良的稳态和动态性能，具有快速性和强鲁棒性，可实现有功功率、无功功率的解耦控制。

与本书相关的研究工作得到了贵州电网公司重点科技项目 (K-GZ2012-113) 的资助，在此表示感谢。

本书由肖永主编，刘晖、陈建国副主编，彭小俊、冯成、桂军国、林呈辉、徐长宝、姜浩、文忠进、曹洪等参加了编写，冯成对全书进行了校阅。

限于作者水平和时间仓促，书中难免存在错误和不妥之处，恳请读者批评指正。联系邮箱：syyxts@163.com。

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 直流输电技术的发展概况.....	1
1.2 柔性直流输电技术简介.....	5
1.2.1 柔性直流输电技术的基本原理.....	5
1.2.2 柔性直流输电系统构成方式.....	10
1.2.3 柔性直流输电系统的特点.....	17
1.3 柔性直流输电和常规直流输电的对比.....	21
1.3.1 换流站.....	21
1.3.2 输电线路.....	24
1.3.3 控制性能.....	25
1.3.4 与交流电网的关系.....	26
1.3.5 多端直流输电.....	27
1.3.6 技术经济性.....	27
1.3.7 对环境的影响.....	29
1.4 主要应用领域及应用前景.....	32
1.4.1 柔性直流输电的应用领域.....	32
1.4.2 柔性直流输电的适用场合.....	34
1.4.3 柔性直流输电的发展前景.....	35
第 2 章 核心部件的拓扑结构.....	43
2.1 电压源换流器概述.....	43
2.2 两电平换流器.....	46
2.2.1 拓扑结构及基本原理.....	46
2.2.2 PWM.....	48

2.3	PWM 调制的工作原理及特性	49
2.3.1	工作原理	49
2.3.2	特性分析	50
2.4	调制方式	51
2.4.1	两电平电压源换流器调制方式	51
2.4.2	多电平电压源换流器调制方式	59
第 3 章	柔性直流输电系统特性	63
3.1	概述	63
3.2	系统特性	65
3.2.1	潮流特性	65
3.2.2	联结变压器的调节	72
3.2.3	输送能力	74
3.3	柔性直流输电系统的控制方式	81
3.4	柔性直流输电系统的接线方式	82
3.4.1	交流侧接线方式	82
3.4.2	直流侧接线方式	83
第 4 章	柔性直流输电系统的损耗和谐波	87
4.1	柔性直流输电系统损耗	87
4.1.1	柔性直流输电系统损耗计算方法	87
4.1.2	柔性直流输电系统损耗的分类	88
4.1.3	主设备损耗	89
4.1.4	换流站其他辅助设备损耗	101
4.2	柔性直流输电系统谐波	101
4.2.1	换流器的谐波	102
4.2.2	谐波的危害	103
4.2.3	减小谐波的方法	104
4.2.4	换流站交流侧滤波系统	105
4.2.5	换流站直流侧滤波系统	113

第 5 章 柔性直流输电系统的控制体系	117
5.1 控制系统概述	117
5.2 柔性直流输电系统级控制	119
5.3 柔性直流输电换流站级控制	121
5.3.1 间接电流控制	122
5.3.2 直接电流控制	126
5.3.3 其他环节	135
5.4 柔性直流输电换流阀级控制	136
5.4.1 阀元件	137
5.4.2 阀结构	145
5.4.3 触发脉冲生成	171
5.4.4 阀的触发技术	171
5.5 柔性直流输电系统的启动控制	174
第 6 章 柔性直流输电系统的故障与保护	177
6.1 概述	177
6.2 故障介绍	178
6.2.1 换流站内部故障	178
6.2.2 交流系统故障	186
6.2.3 直流系统故障	189
6.3 柔性直流输电的保护系统配置	192
6.3.1 保护系统配置原则	192
6.3.2 换流站的分区保护配置	193
第 7 章 柔性直流输电系统试验	197
7.1 概述	197
7.2 型式试验	198
7.3 功率模块试验	199
7.3.1 功率模块换流试验	200
7.3.2 功率模块热试验	203

7.3.3	功率模块短路保护试验	208
7.3.4	功率模块功能试验	210
7.3.5	功率模块阀串压力测试	215
7.3.6	功率模块局部放电及耐压试验	216
7.4	阀支架绝缘试验	219
7.4.1	阀支架直流耐压试验	220
7.4.2	阀支架交流耐压试验	220
7.4.3	阀支架操作冲击试验	221
7.4.4	阀支架雷电冲击试验	221
7.5	背靠背样机试验	222
7.5.1	背靠背样机研制的目的和意义	222
7.5.2	背靠背样机的系统构成	222
7.5.3	背靠背样机主电路设计	224
7.5.4	背靠背样机保护配置	228
7.5.5	背靠背样机仿真分析	228
7.6	动模样机试验	233
7.6.1	动模试验样机研制的目的和意义	234
7.6.2	动模试验样机的系统构成	234
7.6.3	动模试验样机主电路设计	235
7.6.4	动模试验样机保护配置	237
7.6.5	动模试验样机仿真分析	238
7.7	阀控试验	242
7.7.1	一般检查和测试	242
7.7.2	绝缘性能试验	242
7.7.3	控制及保护功能试验	243
7.7.4	运行试验	244
7.7.5	性能试验	245
7.7.6	可听噪声测试	248

7.7.7	控制器电磁兼容和环境试验	249
7.7.8	其他试验	251
7.8	整机全电压试验	252
7.8.1	试验目的	252
7.8.2	试验系统构成	253
7.8.3	试验项目和试验要求	254
第 8 章	柔性直流技术的工程应用	261
8.1	柔性直流技术在输电网中的应用	261
8.1.1	输电网应用概述	261
8.1.2	电网互联	262
8.1.3	城市供电	268
8.1.4	背靠背应用	271
8.1.5	风电场接入	274
8.2	柔性直流技术在配电网中的应用	278
8.2.1	当前配电网面临的问题	278
8.2.2	柔性直流技术应用于配电网的目的	280
8.2.3	柔性直流技术可以满足配电网的运行条件	282
8.2.4	直流配电网的应用论证	283
8.3	柔性直流在孤岛或者弱电网中的应用	286
8.4	微电网应用	288
8.4.1	微网概念	289
8.4.2	微网并网及其意义	289
8.4.3	交流直接连接	290
8.4.4	经电压源换流器(VSC)的微网并网连接	291
8.5	多端柔性直流输电技术	292
8.5.1	不同直流输电技术在建立多端网络时的差异	293
8.5.2	多端直流的发展概况和工程实例	294
8.5.3	多端柔性直流的连接拓扑	296

8.5.4	多端柔性直流的稳态控制	296
8.6	直流断路器	304
8.6.1	高压直流断路器技术基本要求	306
8.6.2	高压直流断路器的主要技术	307
8.6.3	ABB 最新高压直流断路器技术	311
8.6.4	高压直流断路器关键技术及难点	314
第9章	配电网示范工程	317
9.1	概述	317
9.2	文昌油田柔直输电项目	319
9.2.1	方案概述	319
9.2.2	设计参数	320
9.2.3	主设备	321
9.2.4	运行方式	327
9.2.5	整机调试	327
9.2.6	项目总结	331
9.3	贵州配电网柔直输电项目	332
9.3.1	系统设计	332
9.3.2	一次电气设计	341
9.3.3	控制保护系统设计	342
9.3.4	工程整体性能特点	345
9.3.5	出厂试验	347
9.3.6	项目管理	350
	参考文献	352

第 1 章 绪 论

1.1 直流输电技术的发展概况

自 19 世纪末三相交流电力系统问世以来，交流电以其巨大的优越性在发电和输电方面都居于主导地位，并发展为今日规模巨大的联合电力系统。现代交流电力系统在充分发挥其优越性的同时，也暴露了其一些固有的缺点，特别是交流远距离输电会受到同步运行稳定性问题的限制。

20 世纪 50 年代以后，电力的需求增长很快，电力系统的规模发展得更大，电网的联系也日趋复杂。随着汞弧阀换流技术的逐步成熟和应用，使得高压直流(High Voltage Direct Current, HVDC)输电重新进入人们的视野，交流输电的局限性因此也显得更为明显。

1954 年采用汞弧阀换流技术的直流输电线路首次投入商业运行。20 世纪 60 年代可控硅技术的发展为直流输电提供了性能更好的换流元件，使直流输电技术发展到一个新的阶段。

1972 年，首个采用晶闸管换流阀的直流输电系统投入运行。晶闸管换流阀由此成为标准装备，它使得换流站体积更小、成本降低、可靠性提高。同时新的计算机和通信技术使直流输电的运行控制日趋完善，这些发展使高压直流输电得到了广泛的应用。1975 年，全世界投入运行的直流工程只有 11 项，输电容量 5GW，到 1996 年已增加到 56 项，输电容量高达 54.166GW。当前不仅很多新建电网采用直流输电，而且许多大区电网间也采用直流系统互联。可以预见，采用晶闸管换流阀的传统直流输电技术在未来的电力系统中仍将有很大的发展。

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、输电和用电环节均为直流电。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 世纪八九十年代, 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, 使得交流输电和交流电网得到了迅速的发展, 并很快占据了主导地位。但是由于高电压大功率换流技术的快速发展, 使得直流输电又重新为人们所重视。

由于电力系统的发电和输电以及用电环节等绝大部分都采用交流电, 如果想要使用直流电, 就必须将交流电转换为直流电。在输电系统的输送端经过整流过程将交流电转换为直流电, 再经直流输电线路将电能送往受端; 在受端经过逆变过程将直流电转换为交流电, 然后送到受端的交流系统, 供用户使用。在系统送端进行整流变换的地方叫整流站, 在受端进行逆变变换的地方叫逆变站, 一般统称为换流站。实现电力整流和逆变的电力电子装置分别称为整流器和逆变器, 一般统称为换流器。

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 世纪三四十年代, 相关领域的科学家和工程技术人员相继采用气吹电弧整流器、闸流管和引燃管作为换流器建设了一些试验工程, 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, 而且难于产生更高的直流电压、价格昂贵、可能产生逆弧现象等因素的限制, 造成输电系统的可靠性较低、运行维护工作量大, 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，使得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能和可靠性，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方便，因此 1970 年瑞典首先在哥特兰岛上进行了基于晶闸管换流阀的 10MW/50kV 直流试验工程。1972 年，世界上第一个采用晶闸管换流阀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对于汞弧阀具有明显的优点，因此以后新建的直流工程均采用了晶闸管换流阀。与此同时，原来采用汞弧阀的直流工程也逐步使用晶闸管阀进行了替换。

从此，直流输电技术进入了晶闸管换流时期。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的广泛应用，极大地推动了直流输电技术的发展，至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。

然而，由于晶闸管阀没有自关断电流的能力，并且其开关频率较低，使得换流器的性能受到很大的约束，因此，基于晶闸管的电流源高压直流输电技术的特点使得受电端必须有一个相当大容量的电力系统，由这个系统提供换相电流，即短路电流，其逆变器才能将直流还原为交流，送入受端电网。晶闸管自己没有逆变换相的能力，如果输电电网容量小、不能提供足够的换相电流，常规直流就不能工作，所以常规直流输电也称为线路换相换流器高压直流输电(LCHVDC)。

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换流器(Voltage Source Converter, VSC)随后在工业驱动装置上得到了广泛的应用。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), 使得采用绝缘栅双极晶体管构成电压源换流器来进行直流输电成为可能。

在 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。其中的换流器采用 IGBT 阀和两电平三相桥结构, 并使用脉宽调制技术(PWM)控制 IGBT 阀的开关和换流器的交流输出。由于 IGBT 阀具有可控开通和关断的能力, 使得由其构成的直流输电系统在许多方面不同于常规直流, 从而可以有效地克服常规直流的一些固有缺陷。

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。一些海上钻探平台、孤立小岛等无源负荷, 大都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换流器和脉宽调制(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适应情况来看, 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。

对于这种新型的直流输电技术, 国际权威电力学术组织——国际大电网会议(CIGRE)和美国电气电子工程师协会(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, 称之为柔性直流(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, 本书将在此后的叙述中均采用该定义。

1.2 柔性直流输电技术简介

1.2.1 柔性直流输电技术的基本原理

柔性直流输电系统的核心依然是直流输电技术，主要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。在柔性直流输电系统中，功率是可以双向流动的，换流站既可以作为整流站又可以作为逆变站。其中：处于送电端的换流站工作在整流模式，处于受电端的换流站工作在逆变模式。

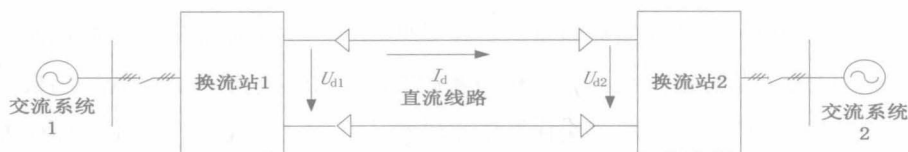


图 1.1 柔性直流输电系统单线原理图

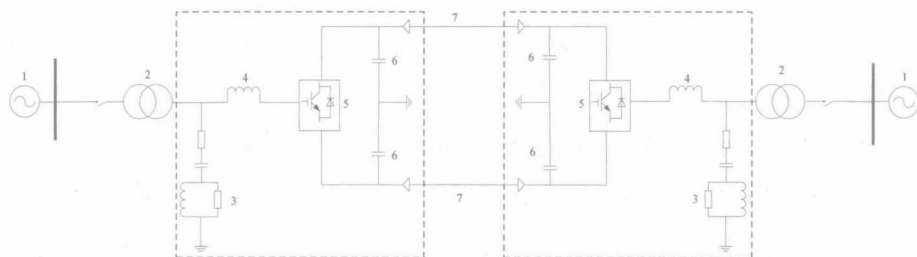


图 1.2 两端 VSC-HVDC 结构示意图

1-两端交流系统；2-联结变压器；3-交流滤波器；4-相电抗器；5-换流阀；6-直流电容；7-直流电缆/架空线路(背靠背式两端 VSC-HVDC 不包含 7)

为简明起见，这里以典型的三相两电平六脉动型换流器的柔性直流输电换流站为例，其系统结构如图 1.2 所示。由图 1.2 虚线划分可知，两端柔性直流输电系统可以看作两个独立的静止无功发生器(STATCOM)通过直流线路联