

柔性直流系统故障分析与保护

李 斌 著



科学出版社

柔性直流系统故障分析与保护

李 斌 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统阐述了柔性直流系统的故障分析方法、故障限流与隔离方法以及新型继电保护原理等内容。首先,阐述了常规直流系统和柔性直流系统的基本结构、工作原理及其控制保护或控制策略,分析了柔性直流系统的短路故障暂态特征及含柔性直流的交直流系统中交流故障分析方法;然后,论述了柔性直流系统故障限流、隔离、断流的故障处理方法;最后,结合柔性直流系统故障识别与故障隔离的要求,介绍了柔性直流系统的保护配置方案,深入阐述了直流线路行波保护、暂态量保护原理与技术,分析了直流输电线路参数的频变特性,提出了直流线路电流差动保护等新型保护原理与技术。

本书可供高等院校电力系统等相关专业的教师和学生阅读,也可供从事柔性直流系统研究、开发和应用的工程技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

柔性直流系统故障分析与保护 / 李斌著. —北京: 科学出版社, 2019.9
ISBN 978-7-03-060798-0

I. ①柔… II. ①李… III. ①直流系统-故障-分析 IV. ①TM62

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第044273号

责任编辑: 刘宝莉 陈 婕 赵薇薇 / 责任校对: 郭瑞芝
责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

河北鹏润印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年9月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2019年9月第一次印刷 印张: 20

字数: 400 000

定价: 145.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

全控型电力电子开关器件的发展促使基于电压源型换流器的柔性直流技术日益成熟，以此为核心技术的未来直流电网将以直流形式互联组成电能传输系统，实现新能源的平滑接入、有功无功的独立控制、全局功率的调节互济等。近年来，我国已经有针对性地开展了多个柔性直流输电工程，大大提升了我国柔性直流系统的技术水平和装备制造水平。

柔性直流系统在发挥网络互联、保障安全运行方面面临诸多挑战，其中，柔性直流系统在发生故障情况下如何保障系统生存能力是必须研究解决的关键科学技术问题。柔性直流系统不可避免地存在发生故障的可能，尤其是基于架空线构建的柔性直流电网；柔性直流系统的故障阻尼小、危害大，电网中任一点的故障可能导致全网停运；柔性直流系统的保护难度大，其故障发展速度极快，要求在几毫秒甚至更短时间内实现故障快速可靠定位，而如何兼顾速动性、可靠性等性能要求则成为柔性直流系统继电保护研究的核心难点；柔性直流系统实现故障穿越困难，因此，新能源并网、区域电网互联以及城市负荷的电能供应等需求使得柔性直流系统呈现多端和网络化，在故障情况下如何保障直流系统健全部分的可靠穿越，以及瞬时性故障时如何实现故障线路的可靠重合，成为柔性直流系统或电网发展过程中需研究解决的关键技术问题。为此，本书对柔性直流系统的故障分析与新型保护原理进行了较为全面的阐述、分析和探讨。

本书第1章概述柔性直流系统的技术发展现状和存在的问题等。第2章介绍常规高压直流输电系统及其基本控制保护原理。第3章介绍柔性直流系统的典型换流站拓扑及其控制策略。第4章分析柔性直流系统直流侧故障时的暂态特性。第5章探讨柔性直流系统接入对交流电网故障特性的影响。第6章论述柔性直流系统的故障限流技术，在此基础上研究提出新型桥式故障限流器等。第7章阐述基于电容电压箝位型和故障转移型的换流器故障自清除及故障隔离原理。第8章介绍混合式、机械式等典型直流断路器的基本工作原理，讨论快速开关、换流等关键技术。第9章介绍柔性直流系统的保护分区与配置方案。第10章介绍行波保护的基本原理、保护性能及存在的问题等。第11章提出基于单端量的快速暂态量保护、基于双端量快速方向纵联保护等直流线路保护新原理，以提高保护动作速度和耐受过渡电阻能力。第12章分析直流输电线路具有的分布参数和频变参数特性，阐述相应的常系数分布参数模型和频变参数模型。第13章提出考虑线路分布参数、频变特性影响的直流线路电流差动保护新原理，显著提高保护的

动作速度和可靠性。

本书是天津大学智能电网保护控制研究团队在柔性直流系统领域的工作积累，在撰写上力求深入浅出，适合高等院校电力系统等相关专业的师生和电网企业的工程师参考使用。感谢何佳伟、李晔、张纪航、张伟鑫、关天一、叶仕磊、王晨阳、吕慧婕、王常骐、刘海金、邱宏等研究生为本书撰写所付出的辛勤工作，感谢李博通副教授和温伟杰博士给予的帮助。感谢众多行业专家的指导和支持。

与本书内容相关的研究工作得到了国家自然科学基金委员会-国家电网公司智能电网联合基金项目(U1866205)、国家自然科学基金面上项目(51677126)以及天津市人才发展特殊支持计划的支持，在此表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请广大读者批评指正。

李 斌

2019年2月

于天津大学北洋园

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 直流输电概述	1
1.2 直流输电技术	2
1.2.1 直流输电技术的优势	2
1.2.2 直流输电技术的发展	5
1.3 柔性直流电网的发展	7
1.3.1 柔性直流系统的发展形态	7
1.3.2 柔性直流系统的故障危害与保护	9
参考文献	11
第 2 章 常规直流输电系统及其控制保护	12
2.1 常规直流输电系统的基本构成	12
2.2 常规直流输电系统的基本原理	14
2.2.1 换流器的基本工作原理	14
2.2.2 直流系统基本控制原理	17
2.3 高压直流系统的故障分析	20
2.3.1 阀短路故障分析	20
2.3.2 换流器出口短路故障分析	28
2.3.3 直流线路故障	30
2.4 高压直流系统的保护方案	30
2.4.1 直流系统的保护分区	30
2.4.2 直流系统的保护配置	31
参考文献	33
第 3 章 柔性直流系统的基本结构和工作原理	34
3.1 两电平电压源型换流器的基本结构和工作原理	34
3.1.1 基本结构	34
3.1.2 调制原理	35
3.1.3 数学模型	36
3.2 二极管箝位型三电平电压源型换流器的基本结构和工作原理	38
3.3 模块化多电平换流器的基本结构和工作原理	40

3.3.1	模块化多电平换流器的基本结构	40
3.3.2	三相模块化多电平换流器的工作原理	43
3.3.3	最近电平逼近调制原理	45
3.3.4	模块化多电平换流器的数学模型	46
3.4	柔性直流系统的控制策略	50
3.4.1	换流器阀级控制	50
3.4.2	换流站级控制	50
3.4.3	直流系统级控制	55
	参考文献	61
第 4 章	柔性直流系统的短路故障暂态特征	62
4.1	基于两电平电压源型换流器的直流系统短路故障暂态特性	62
4.1.1	两电平电压源型换流器两极短路故障	62
4.1.2	两电平电压源型换流器单极接地故障	66
4.1.3	仿真分析与验证	68
4.2	基于模块化多电平换流器的直流系统短路故障暂态特性	73
4.2.1	模块化多电平换流器两极短路故障	74
4.2.2	模块化多电平换流器两极短路不控整流阶段的故障电流	81
4.2.3	模块化多电平换流器单极接地故障	92
	参考文献	94
第 5 章	含柔性直流的交直流系统中交流故障分析	95
5.1	交流侧不对称故障分析	95
5.1.1	负序分量的抑制	96
5.1.2	换流器的正序等值	98
5.1.3	交流侧不对称故障分析和计算	100
5.2	交流侧三相短路故障分析	104
5.2.1	三相短路故障特征	104
5.2.2	三相短路故障对柔性直流系统的影响	105
5.3	仿真分析与验证	106
5.3.1	定功率端的交流侧不对称故障	106
5.3.2	定电压端的交流侧不对称故障	118
5.3.3	三相短路故障	121
	参考文献	123
第 6 章	柔性直流系统的故障限流技术	124
6.1	柔性直流系统的故障限流技术需求	124
6.1.1	故障限流需求	124
6.1.2	故障限流特性	125

6.2 柔性直流系统的故障限流电抗器	127
6.2.1 故障暂态分析计算	127
6.2.2 故障限流电感的分析计算	128
6.3 新型桥式故障限流器	130
6.3.1 新型桥式故障限流器的工作原理	130
6.3.2 新型桥式故障限流器与直流断路器的协调配合	132
6.3.3 实验分析	134
6.3.4 仿真验证	137
6.4 具有自适应限流能力的新型直流固态断路器	142
6.4.1 新型直流固态断路器的拓扑结构与工作原理	142
6.4.2 实验验证	146
参考文献	151
第7章 柔性直流系统的直流故障隔离方法	153
7.1 利用交流断路器隔离直流故障的方法	153
7.2 基于模块化多电平换流器子模块的直流故障隔离方法	154
7.2.1 故障自清除型模块化多电平换流器子模块的工作机理	155
7.2.2 故障自清除型模块化多电平换流器子模块的故障阻断性能	161
7.3 基于交直流系统隔离的直流故障处理方法	172
7.3.1 子模块旁路开关与并联晶闸管的作用	173
7.3.2 双晶闸管法的原理与性能	173
7.3.3 基于阻尼模块的直流故障隔离改进方案	179
参考文献	187
第8章 直流断路器的工作原理与关键技术	189
8.1 直流断路器的应用	189
8.1.1 直流故障隔离方式比较	189
8.1.2 直流断路器的安装位置及保护范围	190
8.2 直流断路器的基本工作原理	191
8.2.1 混合式直流断路器	191
8.2.2 机械式直流断路器	192
8.3 直流断路器的关键技术	193
8.3.1 快速开关	193
8.3.2 换流技术	196
8.4 直流断路器与换流器保护的配合	199
参考文献	201

第 9 章 柔性直流系统的保护分区与配置	202
9.1 柔性直流换流站的保护分区.....	202
9.1.1 换流站保护的设计原则.....	202
9.1.2 换流站的保护分区.....	203
9.1.3 常见的保护动作.....	204
9.2 交流电网侧保护区的保护配置.....	205
9.3 变压器及连接线保护区的保护配置.....	207
9.4 换流阀保护区的保护配置.....	209
9.5 直流侧保护区的保护配置.....	213
参考文献.....	213
第 10 章 直流输电线路的行波保护	214
10.1 行波的基本理论.....	214
10.1.1 直流输电线路的故障过程.....	214
10.1.2 直流输电线路的行波理论.....	215
10.1.3 输电线路行波时域传播计算方法.....	218
10.2 直流输电线路的行波保护原理.....	221
10.2.1 基本原理.....	221
10.2.2 ABB 公司的行波保护判据.....	226
10.2.3 西门子公司的行波保护判据.....	227
10.3 直流输电线路的行波方向保护.....	228
参考文献.....	231
第 11 章 基于线路边界特征的直流输电线路暂态量保护新原理	232
11.1 基于电抗器暂态电压幅值比的快速方向纵联保护原理.....	233
11.1.1 直流线路区内外故障时的暂态电压幅值比.....	234
11.1.2 直流线路快速方向纵联保护方案.....	236
11.1.3 直流快速方向纵联保护的仿真验证.....	240
11.2 基于单端暂态能量的快速保护原理及方案.....	249
11.2.1 直流线路区内外故障时的单端暂态能量特征分析.....	249
11.2.2 基于快速方向判断的单端暂态能量保护原理.....	252
11.2.3 直流单端暂态能量保护的仿真验证.....	253
参考文献.....	258
第 12 章 直流输电线路的参数特性及其等效模型	260
12.1 直流输电线路的常系数参数模型.....	260
12.1.1 直流输电线路参数的分布特性.....	260
12.1.2 直流输电线路的贝瑞隆等效模型.....	261

12.2 直流输电线路的频变参数模型	263
12.2.1 直流输电线路参数的频变特性	263
12.2.2 直流输电线路的频变参数模型	275
参考文献	281
第 13 章 直流输电线路的电流差动保护新原理	283
13.1 直流输电线路常规电流差动保护	283
13.2 基于分布参数模型的直流线路分极电流差动保护	284
13.2.1 输电线路故障时的电气量函数关系	284
13.2.2 差电流与故障点电流的函数关系	285
13.2.3 基于贝瑞隆模型的新型分极电流差动保护	289
13.2.4 仿真验证	292
13.3 线路参数频变特性对新型电流差动保护的影响	295
13.3.1 线路参数频变的影响	295
13.3.2 行波色散的影响	297
13.4 考虑线路参数频变特性的模量电流差动保护方案	300
13.4.1 基于线路贝瑞隆模型的模量电流差动保护	300
13.4.2 故障选极方法	302
13.4.3 仿真验证	304
参考文献	306

第1章 绪 论

1.1 直流输电概述

电能最初是以直流电形式进行输送的。早期送端的直流发电机和受端的直流电动机直接串联,可靠性较差。直流系统不能直接实现电压的升降,无法进行远距离输电。19世纪末,三相交流发电机、感应电动机和变压器相继问世,鉴于交流电在发电、变压、输电、配电以及用电等领域的明显优势,交流输电和交流电网很快占据了统治地位。

20世纪中后期,随着高压大功率换流器技术的快速发展,直流输电又开始受到高度重视。由于直流输电具有线路损耗低、传输容量大,且不存在频率稳定性问题等优势,它在远距离大容量输电、电网互联和海底电缆送电等方面具有广阔的应用前景^[1]。然而,目前电力系统中发电和用电多为交流电,要采用直流输电,首先要解决换流问题。因此,直流输电技术的发展与换流技术,尤其是与高压大容量换流技术的发展密切相关,而换流技术革新的主要推动力是组成换流站元器件的革命性突破。

1954年,世界上第一个工业性直流输电工程(瑞典本土至哥特兰岛)投入商业化运行。到1977年,全球共有12项采用汞弧阀的直流工程投入运行,该时期也被称为汞换流阀时期。然而,汞弧阀存在制造技术复杂、价格昂贵、逆弧故障率较高等缺陷,限制了这一时期直流输电技术的发展。20世纪70年代,高压大功率晶闸管及其在直流输电系统的应用,有效改善了直流输电的运行性能与可靠性,促进了直流输电技术的发展。1970年,瑞典首先在哥特兰岛上建成了10MW/50kV的晶闸管换流阀实验工程。1972年,加拿大建成了世界上第一个全部采用晶闸管换流阀的直流输电工程。由于晶闸管换流器具有明显的技术优势,它很快取代了汞弧阀换流器,使得直流输电技术进入基于晶闸管换流的黄金发展期。基于晶闸管换流的超、特高压直流输电工程在我国已经得到了广泛应用,发挥了其在远距离大容量输电和电网互联等方面的突出作用。但是,由于晶闸管没有自关断能力,且开关频率较低,晶闸管换流站对交流侧系统的依赖性较大,这也成为晶闸管换流技术发展的重要约束。

20世纪90年代,新型全控型半导体器件——绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)开始应用于直流输电^[2,3]。随着高压IGBT的出现,采用全控型器件构成电压源型换流器进行直流输配电成为可能。1997年,基于电

压源型换流器的直流输电工程——赫尔斯扬实验性工程投入运行^[4]。国际大电网会议(International Council on Large Electric Systems, CIGRE)与美国电气和电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)将这种新型的直流输电技术称为“基于电压源型换流器的高压直流输电”(voltage source converter based high voltage direct current, VSC-HVDC)^[5]。为简单、形象地描述此项技术变革,国内专家建议将该技术简称为“柔性直流”输电技术,以区别于采用晶闸管的常规直流输电技术^[6]。由于全控型器件具有可控开通和可控关断的能力,这使得由其构成的电压源型换流器在换流原理上完全不同于汞弧阀换流器和晶闸管换流器,能够有效克服常规直流的一些固有缺陷。同时,随着可再生能源接入规模的不断扩大、城市用电负荷的快速增加、直流负荷占比的不断增大,基于全控型器件的电压源型换流器可以更好地适应电力系统的发展趋势。

基于两电平/三电平结构的电压源型换流器控制简单,但存在谐波含量高、开关损耗大等缺陷^[7],同时,IGBT 耐压、耐流能力有限,因此很难满足电力系统高压大容量的电能传输要求。21 世纪初,德国专家提出了模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)拓扑结构及其相关技术,显著提升了柔性直流输电工程的运行效益,促进了柔性直流输电技术的发展及其工程推广应用。2010 年,基于 MMC 的柔性直流输电工程——美国 Trans Bay Cable 工程投入运行^[8]。自此,基于 MMC 的理论研究与工程应用迅速展开。我国自 2011 年上海南汇 ±30kV 柔性直流工程建成投运以来,已有多个高压柔性直流输电工程成功投运^[9]。同时,模块化多电平结构在直流变压领域的发展和应用,将进一步促进柔性直流输电技术的发展。

1.2 直流输电技术

1.2.1 直流输电技术的优势

直流输电系统主要由整流站、逆变站和直流输电线路等组成,常规 12 脉动直流输电系统拓扑结构如图 1.1 所示。在送电侧将交流电整流成直流电进行传输,完成整流的场所称为整流站;在受电侧,直流电再逆变成交流电供用户使用,完成逆变的场所称为逆变站。整流站和逆变站统称为换流站。

直流电流流通回路的基本形式主要有如下三种:第一种是两端换流器直接相连形成背靠背形式;第二种是高压端通过直流线路,而低压端通过大地(或海水)作为返回线连接形成端对大地(或海水)返回线形式;第三种是高压端通过直流线路,而低压端通过金属导线作为返回线连接形成端对金属返回线形式。由整流和逆变两端及返回连接线形成的电流回路称为直流极。图 1.1 为直流双极大地回线主电路示意图,双极(正极和负极)共用大地回路。

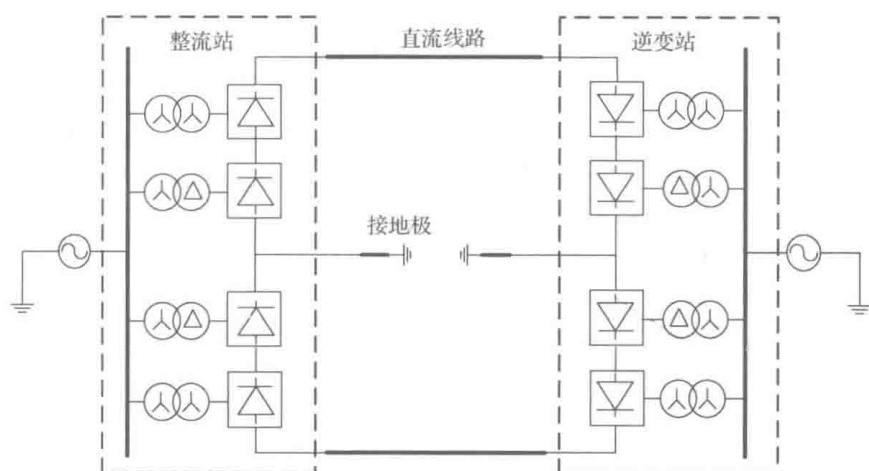
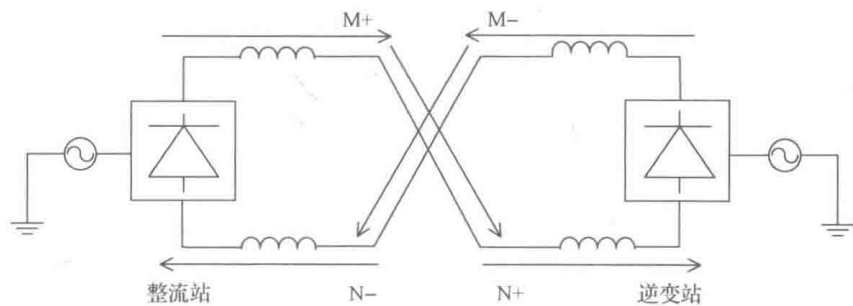
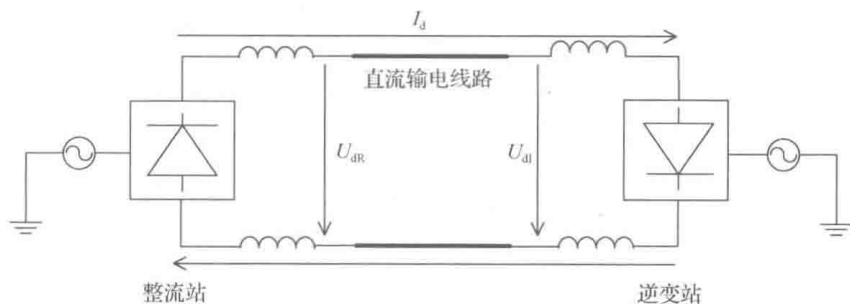


图 1.1 直流双极大地回线主电路示意图

直流输电系统中，换流器和逆变器均采用电力电子开关器件。对于常规直流输电系统，其换流站采用的是晶闸管元件。由于晶闸管具有单向导通性，即电流只能从晶闸管的阳极流向晶闸管的阴极，因此直流输电系统中电流从整流站到逆变站只能单向流通。如图 1.2(a)所示，“+”和“-”分别表示直流输电系统的正极和负极，M 表示整流器(或逆变器)的电流流出端，N 表示整流器(或逆变器)的电流流入端。为了建立直流电流的运行回路，整流器与逆变器的连接拓扑需要满足整流器的电流流出端与逆变器的电流流入端相连，即 M+端与 N+端相连。整流器阀、逆变器阀导通工况下电流回路如图 1.2(b)所示。



(a) 整流器、逆变器正极与负极关系示意图



(b) 整流器、逆变器导通工况下电流回路示意图

图 1.2 整流器、逆变器的电流回路示意图

直流系统需要在整流端建立稍高于逆变端的电压，这样才能在直流回路中形成直流电流，可以表示为

$$I_d = \frac{U_{dR} - U_{dI}}{R_L} \quad (1.1)$$

式中，下标 R 代表整流侧，下标 I 代表逆变侧； U_{dR} 为整流侧换流器端口直流电压； U_{dI} 为逆变侧换流器端口直流电压； R_L 为直流回路电阻。

为了比较方便，将交流输电和直流输电的输送功率分别表示为

$$P_{ac} = \sqrt{3}V_N I_{ac} \cos \varphi = 3V_{\varphi,N} I_{ac} \cos \varphi \quad (1.2)$$

$$P_{dc} = V_{dc} I_{dc} = 2V_d I_{dc} \quad (1.3)$$

式中， P_{ac} 和 P_{dc} 分别为交流输电和直流输电的输送功率； V_N 为交流输电线路的额定线电压； $V_{\varphi,N}$ 为交流输电线路的相对地电压； I_{ac} 为交流输电线路电流； $\cos \varphi$ 为交流输电线路的功率因数； V_{dc} 为直流两极线路之间的极间电压； V_d 为直流极的对地电压； I_{dc} 为直流线路电流。

假设交流输电和直流输电的每根导线具有相同的截面和绝缘水平，则可近似认为：①交流输电线路和直流输电线路所载电流相等，即 $I_{dc} = I_{ac}$ ；②交流输电线路和直流输电线路的耐压水平相同，即 $V_d = \sqrt{2}V_{\varphi,N}$ 。因此，直流输电与交流输电的功率传输能力比为

$$\frac{P_{dc}}{P_{ac}} = \frac{2V_d I_{dc}}{3V_{\varphi,N} I_{ac} \cos \varphi} = \frac{2\sqrt{2}}{3 \cos \varphi} \quad (1.4)$$

交流输电线路的功率因数 $\cos \varphi$ 往往接近于 1。当 $\cos \varphi = 2\sqrt{2}/3 \approx 0.9428$ 时， $P_{dc}/P_{ac} = 1$ 。这就意味着：包含两根导线的直流输电线路的输送功率 P_{dc} 和包含三根导线的交流输电线路的输送功率 P_{ac} 是相等的。

从建设成本的角度来看，单位长度的直流线路所需的金属导体和绝缘材料比交流线路节省了三分之一。而且，对于采用架空线构建直流线路的场合，由于直流线路杆塔的荷载更小，其线路架设所需的走廊也更窄。

从运行成本的角度来看，在输送功率相同的情况下，直流线路只有两根导体，因此直流线路导体自身电阻所造成的功率损耗比交流线路少三分之一。而且，由于交流电流在导线传输时的集肤效应，导线所呈现的交流电阻也比直流情况下的电阻略大，这也增大了线路的功率损耗。此外，针对一些必须采用电缆输电的特殊场合，如城市电网往往采用地下电缆、跨海输电往往采用海底电缆等，由于电缆芯线与大地之间构成了同轴电容器，交流输电线路的空载电容电流极为可观，其造成的能耗较大；而直流输电线路的电压波动非常微小，基本上没有电容电流及电容电流产生的损耗。

从输电能力的角度来看,直流输电在技术上而言对传输距离几乎没有限制。而交流输电则因电容电流、耐压水平和运行稳定性等限制了传输距离。另外,交流系统电网互联的必要条件是同步,而直流系统可实现异步电网的互联等。

1.2.2 直流输电技术的发展

1. LCC-HVDC

相对于柔性直流输电而言,一般将基于晶闸管换流的高压直流输电称为常规高压直流输电,又称为电网换相式高压直流输电(line commutated converter high voltage direct current, LCC-HVDC)。LCC-HVDC 输电距离远、输送容量大、损耗小、功率调节迅速灵活、非同步联络能力强,这一技术目前已经相当成熟,并得到了广泛应用,具体涉及电网互联、远距离大容量输电及跨海峡送电等方面。在我国,已经有大量基于 LCC-HVDC 技术的高压直流输电工程实现了成功投运。

但是,LCC-HVDC 也存在自身的技术弊端,如换流元件晶闸管的正常工作需要交流电网提供换相电压,因此与弱交流电网连接并进行供电时容易引起换相失败;基于晶闸管的换流器在运行控制过程中对无功功率的需求较大,需要在交流侧配置大量的滤波器和电容器来补偿无功,这增加了换流站的投资,也可能引起换流站交流母线电压的升高;当潮流反转时,LCC-HVDC 系统直流电压的极性需要反转,极性反转条件下直流输电线路或电缆的充放电问题也是不容忽视的。

2. VSC-HVDC

随着功率半导体器件技术的快速发展,以及大功率 IGBT 的出现,脉宽调制(pulse width modulation, PWM)技术和多电平控制技术开始被应用到 HVDC 输电领域,发展形成了 VSC-HVDC。VSC-HVDC 与 LCC-HVDC 在拓扑结构上的差别主要集中在换流器,大部分 VSC-HVDC 换流器均由全控型电力电子器件 IGBT 构成。目前,较为典型的两电平 VSC 和 MMC 拓扑结构如图 1.3 所示。两电平 VSC 将电容跨接在直流侧正、负极之间,而 MMC 则将电容分散布置于子模块内部,通过子模块之间的相互串联实现直流电压稳定控制。

电压源型换流器采用全控型 IGBT 器件,保证了换流器可以实现自换相,从根本上避免了 LCC 换相失败的问题。而且,VSC 可以独立控制有功功率和无功功率,控制方式灵活;也可以工作在 STATCOM 模式,为交流系统提供无功功率;直流系统潮流反转时,VSC 仅需改变直流电流方向,不需要改变直流电压的极性。此外,相比于 LCC,VSC 可省去大量滤波器和无功补偿设备,其原因有两个:一是 PWM 技术的使用,VSC 系统中只有高频谐波,因而对滤波器的要求大大降低;二是 VSC 的无功调节及控制能力强,在传输有功功率的同时,既可向系统发出无功功率,又可从系统吸收无功功率。

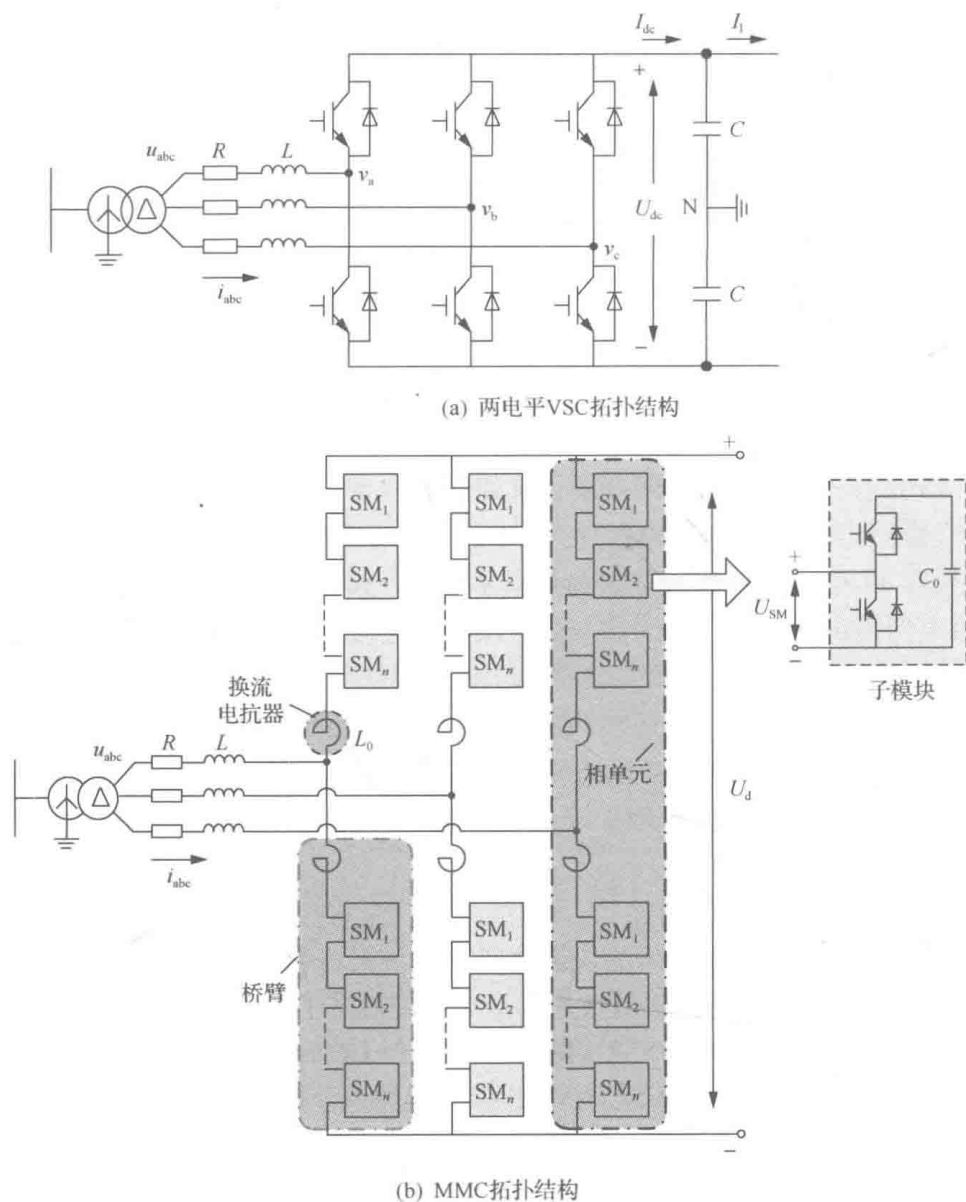


图 1.3 电压源型换流器拓扑结构

但 VSC-HVDC 同样存在一些技术问题。例如，VSC 损耗较大，一个 VSC 终端的损耗约为 1.6%，其中换流阀的损耗就占到其中的 70%；VSC 的故障处理能力差，当直流侧发生故障时，由于直流侧的电感很小，直流电容的放电将导致直流故障电流快速上升。为了便于对比分析，将 LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 的技术特点列于表 1.1。

表 1.1 LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 的技术特点对比

技术特点	LCC-HVDC	VSC-HVDC
基本元件	晶闸管	IGBT
谐波分量	较大的低次谐波分量	较小的高次谐波分量
无功功率/有功功率	消耗大量无功功率	有功和无功独立解耦控制
损耗	0.7%	1.6%
最大容量与电压等级	达到 6400MW ($\pm 1000\text{kV}$)	400~800MW (300kV)
与交流电网连接	换流变压器	电抗器与换流变压器
潮流反转	电压极性反转	电压保持不变, 电流变化
直流侧故障控制	调整触发角	电容放电、失控
直流侧电感	大	小
直流侧电容	小	大
直流短路电流上升率	小	大

MMC 拓扑结构如图 1.3 (b) 所示。MMC 采用阶梯波逼近正弦波的调制方式, 使得输出的交流电压波形更加接近于标准的正弦波, 进一步降低了谐波含量。相比于两电平和三电平式 VSC 的高频 PWM, MMC 采用的阶梯波调制可使得 IGBT 器件的开关损耗成倍降低。模块化结构串联构建的 MMC 避免了 IGBT 器件的直接串联, 随着电平数的增加, 可实现更高电压等级、更大容量的电力输送, 打破 VSC 输电能力的瓶颈。此外, MMC 结构不存在直流侧集中大电容, 分散布置的子模块电容和桥臂电感串联可从一定程度上限制故障电流的上升速度。但是, MMC 所用开关器件数量多, 拓扑结构也更为复杂, 运行控制需要兼顾如子模块电容电压均衡控制、桥臂环流控制等新问题。

1.3 柔性直流电网的发展

1.3.1 柔性直流系统的发展形态

1. 多端直流输电

国内外直流输电工程大部分是基于点对点的功率传输, 以实现远距离大容量输电。随着电网建设需求的提高, 多端直流输电得到快速发展^[10]。它是由三个以上换流站, 通过串联、并联或混联方式连接起来的输电系统, 能够实现多电源供电和多落点受电。

世界上已经建设投入了一些多端直流输电工程, 包括意大利—科西嘉—撒丁岛三端直流输电系统、加拿大魁北克—新英格兰五端直流系统、日本信浓背靠背