

AC/DC Transmission System Operation  
Characteristic Analysis

# 交直流混合输电系统 运行特性分析

刘崇茹 著

继电保护



科学出版社

# 交直流混合输电系统运行 特性分析

AC/DC Transmission System Operation  
Characteristic Analysis

刘崇茹 著

科学出版社

## 内 容 简 介

本书的重点主要集中在交直流混合输电系统运行特性分析方面。主要包括：交直流混合系统潮流计算方法、交直流混合系统状态估计、交直流混合系统可观测性分析、交直流混合系统灵敏度分析、交直流混合系统网损分析、静态电压稳定问题、紧急功率支援等，并讨论了受端系统分层接入方式下的控制策略。

本书从交直流系统运行和中长期稳定运行的角度分析直流输电系统的特征，并分析交直流混合系统之间的相互影响问题。对交直流混合输电系统潮流计算、灵敏度分析、状态估计、网损分析、连续潮流计算等方面阐述交直流混合系统在运行分析问题上与纯交流系统的不同之处，以及目前理论和实践上的解决办法。

本书可供从事电力系统分析尤其是从事交直流混合电力系统分析的科技人员参考，也可作为高等院校电力系统及其自动化专业的研究生教学参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

交直流混合输电系统运行特性分析=AC/DC Transmission System Operation Characteristic Analysis / 刘崇茹著.—北京：科学出版社，2017  
ISBN 978-7-03-055104-7

I. ①交… II. ①刘… III. ①混合输电—电力系统运行—分析  
IV. ①TM721.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第269379号

责任编辑：范运年 / 责任校对：桂伟利  
责任印制：张 伟 / 封面设计：铭轩堂

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018年1月第 一 版 开本：720×1000 1/16

2018年1月第一次印刷 印张：21

字数：400 000

定价：98.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

# 前 言

高压直流输电技术进入了飞速发展阶段。在我国，大规模交直流混合输电系统已经建成投运，针对交直流混合输电系统运行问题的研究迫在眉睫。为此，本书对交直流输电系统的运行特点、控制方式、相互影响以及静态电压稳定等问题进行了分析，在交直流混合输电系统的稳态运行和调整方面做了详细剖析和深入研究。近年来，我国直流工程越来越多，电网结构也越来越复杂。直流输电线路的增多，一方面给系统的安全稳定带来新的考验，另一方面为系统故障下的紧急控制提供了新的思路。如何利用直流紧急控制快速、经济的优势来改善故障情况下系统的稳定性，多回直流间如何协调动作以达到较好的控制效果成为亟需研究的关键技术问题。随着直流输电电压等级的提高，以及对换流变压器绝缘要求和运输体积的限制， $\pm 1100\text{kV}$  特高压直流系统逆变侧将采用分层接入超/特高压交流系统的拓扑结构。分层接入方式下，直流逆变侧连接多个不同电压等级交流系统的特点，将使得直流的控制和参数的整定与配合变得更加复杂；对于逆变侧单极串联的各换流器，如何兼顾各个交流系统的功率需求、实现低压限流环节参数的整定与配合，以及在紧急功率控制时，如何充分利用分层接入方式下的直流系统的功率支援能力，成为亟需解决的关键技术问题。

在十多年的研究基础上，整理了本书内容，共 9 章和 1 个附录。第 1 章介绍交直流输电系统的发展，并指出交直流输电系统运行中出现的特殊现象以及亟待解决的问题；第 2 章介绍交直流混合输电系统潮流计算；第 3 章介绍交直流混合输电系统状态估计；第 4 章介绍交直流混合系统可观测分析问题；第 5 章介绍交直流混合输电系统灵敏度分析；第 6 章介绍交直流混合系统网络损耗的构成和影响因素及优化方法；第 7 章介绍交直流系统静态电压稳定问题；第 8 章介绍一种幅值自适应的阶梯式紧急功率支援技术，并探讨多直流之间的协调控制；第 9 章探讨特高压直流系统接入特高压交流系统采用分层接入的方式后，出现的新的问题和解决方案。附录是本书中用到的几个典型的交直流混合系统仿真算例，以供参考。

本书的第 1~7 章的全部内容均由深圳供电公司的陈作伟和广东电力科学研究院的邓应松做了详细的文字、公式以及格式的梳理和校核。其中，第 4 章的部分内容由陈作伟做了补充和修订。第 8 章由山东省济宁供电公司魏佛送做了详细的校核。第 9 章由南方电网科学研究院郭龙做了详细的校核，并由北京市电力公司李越做了补充。在此对陈作伟、邓应松、魏佛送、郭龙和李越所做的工作表示感谢。

在编写本书的过程中，我们虽然对结构的安排、内容的选取、文字的叙述都尽了努力，但难免由于考虑不周而存在遗漏，本书作者诚恳希望读者能够将本书的批评和建议反馈给我们，以便在下一版修订中加以改正和补充。

刘崇茹

2016年11月

# 目 录

## 前言

第 1 章 交直流混合输电系统概述 .....	1
1.1 绪论 .....	1
1.2 直流输电技术的发展 .....	3
1.2.1 LCC-HVDC 系统基本原理 .....	3
1.2.2 VSC-HVDC 系统基本原理 .....	5
1.3 国外直流输电工程概况 .....	8
1.4 国内直流输电工程概况 .....	11
1.5 交直流混合输电系统中需要解决的问题 .....	13
参考文献 .....	18
第 2 章 交直流混合输电系统的潮流计算 .....	21
2.1 交直流混合系统潮流概述 .....	21
2.2 交替求解思想 .....	21
2.3 直流输电系统描述方程 .....	24
2.3.1 直流输电系统换流器特性方程 .....	24
2.3.2 直流输电系统控制方程 .....	25
2.3.3 直流输电系统网络方程 .....	26
2.4 典型的交直流系统潮流算法 .....	26
2.4.1 直流输电系统状态变量的选择 .....	26
2.4.2 直流输电系统潮流方程的矩阵形式 .....	27
2.4.3 Gauss-Seidel 迭代法求解直流方程 .....	30
2.4.4 双端直流系统 .....	31
2.4.5 交直流系统典型算法的应用 .....	32
2.4.6 潜在的问题 .....	33
2.5 系数矩阵求逆的可行性分析 .....	33
2.5.1 $G$ 的可逆性分析 .....	33
2.5.2 $G$ 奇异时的一种处理方法 .....	38
2.5.3 存在的缺点 .....	45
2.6 有效的交直流混合系统潮流算法 .....	46
2.6.1 算法的三个特点 .....	46

2.6.2	直流子系统潮流方程	47
2.6.3	交流子系统潮流方程的处理	52
2.6.4	鲁棒性分析	54
2.6.5	理论分析	56
2.6.6	仿真结果	59
	参考文献	61
<b>第3章</b>	<b>交直流混合系统状态估计</b>	<b>63</b>
3.1	交直流混合系统状态估计问题的产生	63
3.2	预备知识	64
3.2.1	矩阵的迹	64
3.2.2	分块矩阵求逆	64
3.2.3	矩阵对标量的微分运算	66
3.2.4	矩阵对矩阵的微分	67
3.2.5	最小二乘法	68
3.2.6	电力系统状态估计	71
3.3	最小二乘法类算法	76
3.3.1	基本加权最小二乘法	76
3.3.2	快速分解状态估计	78
3.3.3	状态估计算法的特点	84
3.3.4	最小二乘法存在的问题	86
3.4	不良数据辨识	87
3.4.1	概述	87
3.4.2	量测残差	89
3.4.3	不良数据的检测	91
3.4.4	不良数据的辨识	97
3.5	交直流混合系统的状态估计	104
3.5.1	直流系统选择状态变量	104
3.5.2	混合系统状态估计要解决的问题	105
3.5.3	常用算法	107
3.5.4	量测方程描述	110
3.5.5	几种算法的性能比较	111
	参考文献	115
<b>第4章</b>	<b>交直流混合输电系统的可观测性分析</b>	<b>117</b>
4.1	引言	117
4.2	交流系统可观测性分析的拓扑算法	118
4.2.1	对量测系统分析的一些基本认识	118

4.2.2	交流系统可观测性分析	119
4.3	交流系统可观测性分析的数值算法	129
4.3.1	基于三角分解的可观测性分析算法	129
4.3.2	可观测性分析数值算法的步骤	133
4.3.3	交流系统可观测性分析数值算法与拓扑算法的比较	134
4.4	含 LCC-HVDC 的交直流可观测性分析	134
4.4.1	交直流输电系统可观测原理分析	134
4.4.2	交流部分和直流部分的相互影响	135
4.4.3	直流系统的可观测性分析	138
4.4.4	交直流系统可观测性	142
4.4.5	算例分析	143
4.5	含 VSC-HVDC 的交直流可观测性分析	146
4.5.1	VSC-HVDC 换流站的数学模型	146
4.5.2	VSC-HVDC 换流站和交流系统的相互影响	149
4.5.3	VSC-HVDC 系统的可观测性分析	150
4.5.4	VSC-AC 系统可观测性分析算法	151
4.5.5	算例分析	152
4.5.6	LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 可观测性分析算法比较	153
	参考文献	155
第 5 章	交直流混合输电系统灵敏度分析	156
5.1	概述	156
5.1.1	灵敏度分析方法简述	156
5.1.2	交直流输电系统之间的相互影响	157
5.1.3	灵敏度分析的纲要	157
5.2	交直流混合系统灵敏度分析	158
5.2.1	直流输电系统空载电压保持不变	158
5.2.2	直流输电系统控制方式保持不变	164
5.3	MIDC 系统输送功率对交流输电系统的灵敏度分析	173
5.3.1	MIDC 系统特点	174
5.3.2	MIDC 系统运行方式	174
5.3.3	MIDC 系统输送功率对交流输电系统电压的灵敏度	176
5.3.4	MIDC 系统运行方式实例分析	178
5.4	直流输电系统控制参数对连接母线电压幅值的影响	180
5.4.1	解耦求解交直流输电系统灵敏度矩阵	181
5.4.2	联合求解交直流输电系统灵敏度矩阵	186
5.4.3	解耦求解和联合求解区别的讨论	190



5.4.4 实例分析	190
参考文献	195
<b>第 6 章 交直流输电系统网损分析</b>	197
6.1 概述	197
6.2 系统分析	198
6.2.1 换流站模型	198
6.2.2 控制模式 1	199
6.2.3 控制模式 2	199
6.3 多馈入直流输电系统的功率优化模型	200
6.3.1 优化模型	200
6.3.2 SQP 方法	200
6.3.3 拟牛顿法求解	202
6.3.4 网损灵敏度	205
6.3.5 算例分析	207
6.4 交直流并列运行系统网损的影响因素	211
6.4.1 网损构成分析	211
6.4.2 换流站运行方式对网损的影响	214
6.4.3 控制参数对网损的影响分析	220
6.4.4 对网损的影响的分析总结	222
参考文献	223
<b>第 7 章 交直流混合输电系统静态电压稳定问题的研究</b>	225
7.1 引言	225
7.2 连续潮流计算方法	225
7.2.1 带参数的潮流方程	226
7.2.2 预测环节	227
7.2.3 参数化过程	227
7.2.4 步长控制	228
7.2.5 校正环节	228
7.2.6 发电机功率越界的处理	228
7.2.7 无功控制策略	229
7.2.8 直流输电系统的协调控制	231
7.2.9 PV 曲线的求取	234
7.3 换流变压器分接头档位和运行方式的调整	240
7.3.1 换流变压器分接头档位的调整	240
7.3.2 非定角度控制运行	240
7.3.3 定角度控制运行	242

7.3.4 计算档位和档位变比 .....	246
7.4 换流器运行方式的调整 .....	247
7.4.1 换流器控制方式 .....	247
7.4.2 调整方案 .....	248
7.4.3 小结 .....	251
参考文献 .....	251
<b>第 8 章 幅值自适应的阶梯式紧急功率支援技术 .....</b>	<b>253</b>
8.1 引言 .....	253
8.2 紧急功率支援的影响因素 .....	254
8.2.1 交流电网强度的影响 .....	255
8.2.2 直流系统控制方式的影响 .....	258
8.2.3 无功补偿能力的影响 .....	263
8.3 幅值自适应的阶梯式紧急功率支援控制技术 .....	264
8.3.1 新型紧急功率支援控制原理 .....	264
8.3.2 功率提升模块的判据 .....	266
8.3.3 控制模块参数整定 .....	269
8.3.4 与传统功率提升控制仿真对比 .....	274
8.4 多回直流输电能力及稳定性分析 .....	276
8.5 紧急功率转移控制器 .....	279
8.5.1 基本控制原理 .....	279
8.5.2 变阶梯分段式功率提升控制 .....	279
8.5.3 控制器的协调与启停信号 .....	280
8.5.4 算例与验证 .....	281
参考文献 .....	286
<b>第 9 章 受端分层接入方式下的直流控制策略 .....</b>	<b>287</b>
9.1 引言 .....	287
9.2 换流器独立控制方式 .....	288
9.2.1 按极控制模式和独立控制模式 .....	288
9.2.2 谐波分析 .....	291
9.2.3 定电压端和定电流端的确定 .....	294
9.3 附加功率-电压控制 .....	296
9.3.1 附加功率-电压控制原理 .....	296
9.3.2 附加功率-电压控制器结构 .....	298
9.3.3 功率调节能力分析 .....	299
9.3.4 功率转移 .....	300
9.3.5 仿真验证 .....	302

---

9.4 紧急功率协调控制 .....	307
9.4.1 新型紧急功率支援控制原理 .....	307
9.4.2 各换流器的功率分配问题 .....	308
9.4.3 功率协调控制 .....	310
参考文献 .....	316
附录 A 交直流混合输电系统算例 .....	317
A.1 双端直流输电系统 .....	317
A.2 三端直流输电系统 .....	319
A.3 双馈入直流输电系统 .....	321
A.4 三馈入直流输电系统 .....	321
A.5 多回直流输电系统 .....	322
致谢 .....	323

# 第 1 章 交直流混合输电系统概述

## 1.1 绪 论

输电技术发展至今,经历了 100 多年的变化<sup>[1]</sup>。从 19 世纪法国物理学家德普勒完成第一次输电实验开始,就出现了直流输电系统,但直流输电技术一直没有被大规模应用到现代电力系统中。1954 年瑞典在本土和果特兰岛之间建成的直流输电海底电缆,是世界上第一个工业性高压直流输电(High Voltage Direct Current, HVDC)工程<sup>[1]</sup>。

随着电力需求的增大,电网规模越来越大,电网日趋复杂,为了提高现有交流输电线路的输送能力,解决交流输电系统可控性等问题,1986 年美国著名电力专家 Hingorani 提出了灵活交流输电系统(Flexible AC Transmission System, FACTS)的概念<sup>[2,3]</sup>。发展 FACTS 的目的是在传统交流输电系统的基础上,应用电力电子技术和现代控制技术,实现对交流输电系统的快速灵活控制,从而在不改变网络结构的情况下,使电网的功率输送能力以及潮流和电压的可控性得以提高。随着现代电力电子技术的快速发展,FACTS 技术在电力系统中被广泛应用<sup>[1,4]</sup>。FACTS 技术以及高压直流输电技术、智能控制、基于全球定位系统(Global Position System, GPS)的动态安全分析与检测系统被认为是将会在本世纪初给现代电力系统带来变革性影响的三项前沿研究课题<sup>[5]</sup>。

FACTS 技术的出现,一方面弥补了交流网络潮流控制能力不足的弱点,另一方面解决了 HVDC 技术中电力电子方面的关键技术。同时,由于直流输电具有很多优点,所以 HVDC 得以迅速发展起来。

HVDC 有很多优点<sup>[1,6]</sup>。

### 1) 线路造价低

对于架空线路,常见三相交流输电线路需 3 根导线,而单极直流输电线路只需 2 根导线,当用大地或海水作回路时,仅需一根导线。直流输电设备无集肤效应,导线截面得到充分利用,导线的功率损耗率也比交流输电小。采用直流输电时,架空线路杆塔结构较简单,相同绝缘水平的电缆可以运行于较高的电压,线路走廊较窄。同时直流输电线路的运行费用也较低。

### 2) 适宜远距离输电

高压交流电缆线路单位长度的电容电流很大,为避免电缆的芯线过热,电缆

输送交流容量总是低于自然功率，采用直流输电就无此弊病，并且在导线几何尺寸和电压有效值与交流输电线路相等的条件下，电晕无线电干扰较小。由图 1-1 可以看出，超过等价距离时，采用直流输电比交流输电要节省费用。

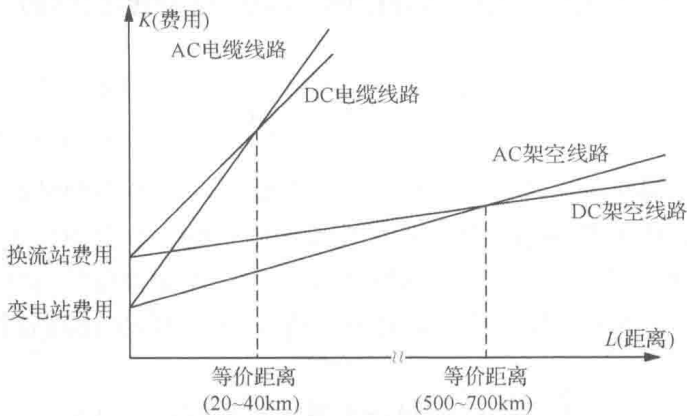


图 1-1 等价距离

### 3) 输电距离不受电力系统同步稳定运行要求的限制

如果采用直流线路连接两个独立电网，那么相连接的交流系统不需要同步运行，可按各自的电压、频率、相角运行，与对侧无关。这样，既可以得到联网的技术经济效益，又可避免大面积停电事故发生。

### 4) 限制短路电流

用交流线路互联的电力系统，短路电流随系统短路容量的增加而增加，因此两侧的交流系统因联网而使得短路电流增大，造成原有断路器不能满足遮断容量的限制等问题。而采用直流线路连接两个交流电网，各自的短路容量并不明显增大，并且直流系统的定电流控制，能够把系统的短路电流限定在额定值之内。

### 5) 实现快速调节

直流输电线路电流和功率的调节比较容易而且迅速，可实现多种调节和控制。HVDC 系统是高度可控的<sup>[7]</sup>，栅/门极控制是快速的(1~10ms)，改变分接头则慢得多(每改一档需 5~6s)，它们以互补的形式来联合应用。

### 6) 交直流输电线路并联运行可提高交流输电系统的稳定性

在直流输电系统和交流输电系统的一端或两端连接在一起并联的情况下，当交流输电线路因扰动引起输送功率变化时，可迅速地调节直流输电线路运行功率，以抵消相连接的电力系统因扰动引起的功率变化。

## 1.2 直流输电技术的发展

随着直流输电技术研究的不断深入，两种直流输电技术开始广泛应用。一种是电流源型高压直流输电 (Line-Commutated Converter HVDC, LCC-HVDC) 系统，另一种是电压源型高压直流输电 (Voltage Source Converter HVDC, VSC-HVDC) 系统。

### 1.2.1 LCC-HVDC 系统基本原理

LCC-HVDC 系统根据连接关系，大致可分为三种：单极系统、双极系统、同极系统。单极系统结构图如图 1-2 所示。单极系统通常采用一条导线传输功率，以大地或水作为返回回路，条件允许的情况下会采用导线将两个接地极连接起来，防止不对称情况下接地极流入大地电流过大造成对其他地下深埋设备的腐蚀，或者防止对附近其他设备的影响。架空导线的极性通常为负极，这是因为云层的极性通常为负极，利用同极相斥的原理，选择负极性的目的是减少雷击的可能。单极接线形式也通常是双极系统发展的初级阶段，双极系统是通过两条架空线传输功率。通常双极连接有两条极性一正一负的导线，每端在直流侧串联两个额定电压相等的换流器。通常两极线中的电流是相等的，没有接地电流，换流器之间的连线是接地的，双极可独立运行。

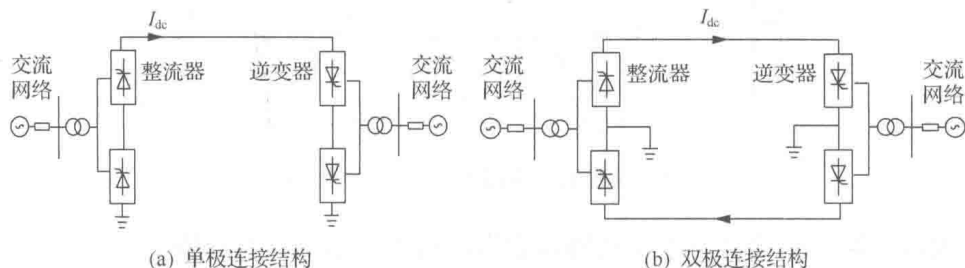


图 1-2 LCC-HVDC 系统示意图

换流器完成交流/直流(整流器)和直流/交流(逆变器)的变换，是 LCC-HVDC 系统的核心元件，其主要由阀桥和带负载调分接头的变压器组成。阀桥由高压阀接成 6 脉波或 12 脉波来组成，换流变压器为阀桥提供适当水平的不接地三相电压源，通常换流器的正端或负端接地。6 脉波桥是直流工程中最基本的整流单元，其结构如图 1-3(a) 所示，其中  $E_a$ 、 $E_b$  和  $E_c$  分别表示三相交流电压， $L_c$  表示换相电抗。整流后的直流电压波形如图 1-3(b) 中  $U_{dc}$  所示。

由图 1-3(b) 可以看出，整流出来的直流电压波形并非一条直线，由傅里叶分

解可知，其包含的谐波次数为  $6n$  次（即 6 次、12 次、18 次等）。当忽略换相重叠影响时，对于换流器，控制系统将阀侧交流电流按  $\Phi=\alpha$  移动电流的波形和基波分量，如图 1-4 所示，因此延时触发将导致换相电压和阀侧交流电流的相位差异；故对于 LCC-HVDC 系统，换流器总是需要一定量的无功来保证换相的正常进行。通常额定情况下，整流站消耗无功约占直流输送功率的 40%~50%，逆变站需要消耗的无功功率占 50%~60%。由于 LCC-HVDC 系统需要消耗大量的无功，同时产生大量谐波，所以在传统直流工程设计中，对于无功补偿和滤波的要求非常高，通常在整流侧和逆变侧均装设有定量的谐波滤波器和无功功率电源。

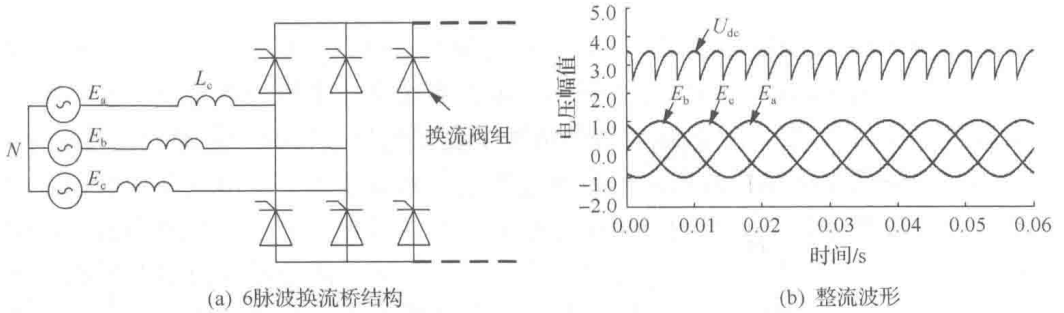


图 1-3 整流示意图

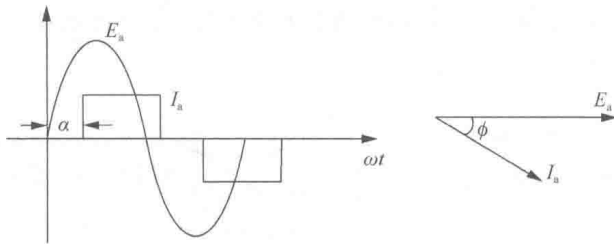


图 1-4 换相电压和阀侧交流电流相位关系

直流控制系统通过给予换流器以适当的触发角指令控制器整流或逆变过程，从而改变系统的各运行量，如直流电流、直流电压和直流功率等，图 1-5 所示为 LCC-HVDC 两端直流系统的等值电路。

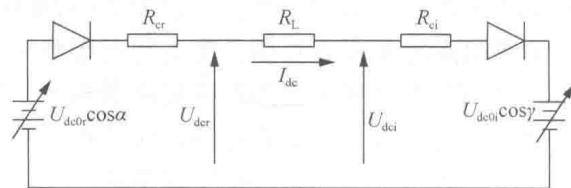


图 1-5 整流示意图

直流电流  $I_{dc}$  可以表示为

$$I_{dc} = \frac{U_{dc0r} \cos \alpha - U_{dc0i} \cos \gamma}{R_{cr} + R_L - R_{ci}}$$

式中,  $V_{dc0r}$  和  $V_{dc0i}$  与交流母线电压以及换流变压器的变比有关, 正常运行情况下基本不变; 而  $R_{ci}$ 、 $R_{cr}$  以及  $R_L$  等参数取决于换流变电抗以及直流线路电抗, 也基本为常数;  $\alpha$  为换流器触发角;  $\gamma$  是换流器熄弧角。因此直流线路电流以及每一点的电压值均由  $\alpha$  和  $\gamma$  决定。

直流线路需要输送一定的功率, 一般要求整流侧控制电流, 而逆变侧控制电压。逆变侧考虑到要维持足够的换相裕度, 通常采用定  $\gamma$  控制。较大的触发角或熄弧角将导致换流器对于系统无功需求增加, 过小的触发角或熄弧角有可能影响换流阀的正常换相, 因而一般整流侧额定触发角为  $15^\circ$  左右, 逆变侧额定熄弧角一般为  $18^\circ$  左右。

当有多个双端直流输电系统的换流站落点于同一个交流系统时, 称为多馈入直流 (multi-infeed direct current, MIDC) 输电系统。多馈入直流输电系统相关问题的研究不容忽视。这包括两种情形: 一是直流输电系统整流侧和逆变侧分别在两个交流系统网络里, 如图 1-6 (a) 所示; 二是多个直流输电系统在同一个交流网络里, 如图 1-6 (b) 所示。随着三峡电力系统的建成, 多馈入交直流输电系统的格局在我国南方电网、华中电网和华东电网<sup>[8]</sup>已经出现。

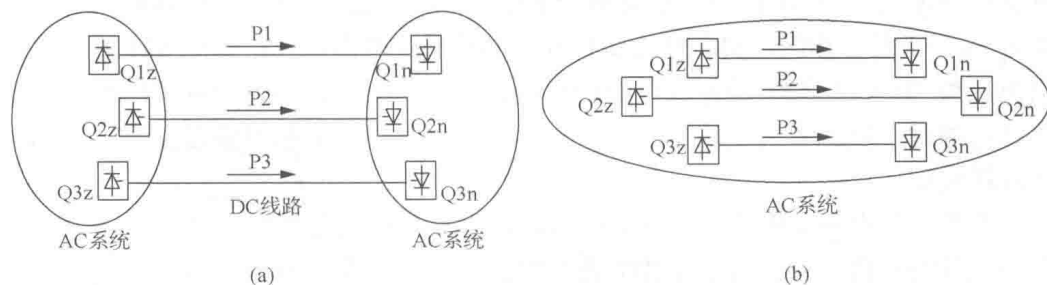


图 1-6 多馈入直流输电系统示意图

### 1.2.2 VSC-HVDC 系统基本原理

基于 VSC 技术的直流输电概念最早于 1990 年被加拿大 McGill 大学的 Boon-Teck-Ooi 等提出。之后 ABB 公司于 1997 年 3 月在瑞典中部的 Hellsjon 和 Grangesberg 之间进行了首个 VSC-HVDC 的实验性工业工程, 并命名为轻型高压直流输电 (HVDC Light)。伴随着该工程的出现, VSC-HVDC 作为基于可关断电力电子开关器件和 PWM 技术的第三代直流输电技术正式被国际大电网会议 (CIGRE) 和美国电气与电子工程师学会 (IEEE) 命名。ABB 公司将其注册为 HVDC



Light 的商标，而西门子公司则称为 HVDC Plus。在国内，中国电力科学研究院于 2006 年 5 月组织国内权威专家在北京召开“轻型直流输电系统关键技术研究框架研讨会”，会上正式命名基于 VSC 的直流输电技术为“柔性直流输电”。

用于 VSC-HVDC 系统的换流站拓扑结构为三相六桥臂式，具有共同直流母线用于传输有功功率，如图 1-7 所示。交流系统电压  $u_{s\varphi}(\varphi=a, b, c)$  通过环流电抗器  $L$  与换流站相连接。目前用于工程实际的 VSC 拓扑结构可以分为三类，即两电平换流器、二极管箝位型三电平换流器和模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)。其中，两电平换流器和二极管箝位型三电平换流器可以简称为两或三电平换流器，需要直流侧有共地电容来储能和维持直流电压，而 MMC 的每子模块(sub-module, SM)中均含有储能电容元件，因此不需要直流侧再提供共地电容。两电平换流器的每个桥臂由若干个 IGBT 和反向并联的二极管所组成的单元串联而成。正常工作时，整个桥臂只有两个状态，即导通或截止，上下桥臂工作状态相反。因此，当各桥臂按一定顺序依次导通或截止时，各换流相单元输出的电位只有两种，即  $\pm u_{dc}/2$ 。而二极管箝位型换流器则在换流相单元的两个桥臂间增加了“0”电位点，因此换流相单元可以输出三种电位，即  $\pm u_{dc}/2$  和 0。MMC 是近年来被提出的新型 VSC 拓扑结构，其桥臂拓扑结构为以 SM 级联替代 IGBT 的直接级联，同时每个桥臂中加入缓冲电感  $L_0$  来限制短路电流和抑制相间环流。SM 的拓扑中包含两个 IGBT、两个反向并联的二极管和一个储能电容  $C_0$ 。正常工作时，SM 的上下 IGBT 导通/截止状态相反，因此 SM 的端口输出电压为 0(旁路状态)或电容电压(投入状态)。当控制该桥臂中各子模块依次投入或旁路时，换流器交流输出端  $u_{c\varphi}(\varphi=a, b, c)$  可以轻易输出逼近正弦波的多电平阶梯波形。

从图 1-7 中各类换流器拓扑结构可以看出，两或三电平的 VSC 拓扑为 IGBT 开关元件的直接串联。由于 IGBT 耐压载流能力差，所以换流器多采用大量开关元件串联增压来提高 VSC-HVDC 系统的输送容量。这就要求大量被直接串联的 IGBT 具有高度一致的动作特性，否则开关元件会被高电压击穿损坏。两或三电平的 VSC 拓扑很难实现高电平的输出波形，因此除了要求每个开关元件有较高的开关频率，还需要在换流器交流侧出口安装滤波器以提高输出波形质量。较高的开关频率意味着较高的开关损耗，同时，在高开关频率下保证大量开关元件的动作一致性是一项很大的挑战。受制于以上缺陷，在实际工程中，VSC-HVDC 系统的输送容量一直远小于 LCC-HVDC 系统。随着 MMC 拓扑结构的提出，SM 的级联化构造使得不同 SM 中的 IGBT 不需要保持开关一致性，大幅度降低每个开关元件的开关频率，同时保持较高的桥臂等效开关频率，轻易实现高电压多电平的输出波形和冗余子模块保护功能。当 MMC 输出波形电平数足够大时，甚至无须安