



全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材



高压直流输电 原理与应用

张勇军 主编
陈碧云 副主编

<http://www.tup.com.cn>

清华大学出版社

全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材

高压直流输电 原理与应用

常州大学图书馆

藏书章

张勇军 编
陈碧云 副主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书介绍高压直流输电基本原理和工程应用,内容共 11 章,涉及直流输电的基本概念和原理、换流电路工作原理、换流站及主设备、直流输电线路、谐波与滤波器、直流系统的控制和保护、直流系统的功率损耗及可靠性评估、特高压直流输电以及直流输电新技术。

本书主要供电气工程专业硕士研究生、工学硕士研究生,以及电气工程及其自动化等相关专业的本科生教学和科研使用,并可供直流输电工程的设计与运行人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

高压直流输电原理与应用/张勇军主编.--北京:清华大学出版社,2012. 8

(全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材)

ISBN 978-7-302-30090-8

I. ①高… II. ①张… III. ①高电压—直流—输电技术—研究生—教材 IV. ①TM726.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 214277 号

责任编辑:张占奎

封面设计:何凤霞

责任校对:赵丽敏

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×230mm 印 张:19.5 字 数:423 千字

版 次:2012 年 8 月第 1 版 印 次:2012 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:48.00 元

产品编号:047632-01

随着国民经济的高速增长,我国电力工业得到快速发展,2011年全国用电量为4.72万亿kW·h,发电装机容量达到10.56亿kW,分别居于世界第一位和第二位。与此同时,我国电网发展速度更快,截至2011年年底,全国电网220kV及以上输电线路回路长度为48.03万km,公用变电设备容量为21.99亿kW·A,位居世界第一。由于我国能源与负荷呈逆向分布,能源远距离输送现象突出,而直流输电具有送电距离远、送电容量大、控制灵活等特点,适合电力系统之间的网络互联及巨型水电、火电基地电力外送等,因而是目前我国电网发展中所迫切需要的技术。

高压直流输电技术起步在20世纪50年代,而突破性的发展是在80年代,进入21世纪后,更是备受关注。我国直流输电技术也是在20世纪80年代得到重要发展,建成了代表当时世界先进水平的葛洲坝—上海±500kV直流输电工程。随后我国在发展直流输电方面的步伐不断加快,到2011年已经有17个直流工程输送超过4000万kW的电力。当前我国直流输电工程的运行规模和建设规模都是世界第一。特别是在2010年和2011年相继建成投产了±800kV云南—广东特高压直流工程和±800kV向家坝—上海特高压直流工程,使我国直流输电技术达到世界先进水平乃至领先于世界。

在这种背景下,我国对高压直流输电技术的人才需求量迅速增大,越来越多的高校的电气工程专业开设了高压直流输电课程。与此同时,广大的电气工程师为适应工作需要,也热切地希望学习高压直流输电技术。为此迫切需要一本理论与实践结合紧密、系统性强的教材,以满足研究生、本科生的教学,并满足电气工程师的进修以及相关科研的需求。本书恰针对上述目的而编写。

本书系统地介绍了高压直流输电系统的基本概念与原理,换流器工作原理与运行工况,直流输电的运行方式及其稳态特性,换流站主设备的作用原理、结构特点与技术要求,直流输电线路的运行特性,谐波产生的原理与滤波器的结构、特性、功能特点,直流输电系统的控制原理、方式及调节特性,直流

输电系统的保护构成及其原理,直流输电系统的损耗计算方法,直流输电系统的可靠性评估的数学模型与方法,特高压直流输电的技术特点和运行,以及柔性直流输电、多端直流输电和电容换相换流器等前沿技术。

直流输电在我国电网的发展中占有非常重要的位置。我国需要着力发展高压、特高压直流输电技术,提高设备制造水平和生产能力,并结合我国的电网结构研究相应的控制保护技术、系统稳定技术和直流输电可靠性技术,研究符合中国特点的运行技术。直流输电技术的研究,必定会带动柔性交流输电技术的发展和运用,带动现代电力系统(包括配电系统)采用新的技术进行改造和再装备。因此,做好直流输电的研究、规划和建设,是今后一个时期我国电网发展的重要任务。

愿本书对我国直流输电技术的进步和人才培养做出贡献!

中国工程院院士

李立涅

2012年7月

近年来,高压直流输电在世界范围内都得到了快速发展和应用,特别是在我国。目前我国已成为全世界直流输电容量最大、直流工程项目最多、直流电压等级最高的国家。未来20年,随着电网建设和新能源开发利用进程的加快,我国直流输电技术将得到进一步的强化。高压直流输电已经成为当前电力行业中最富有吸引力、最引人关注的一个发展方向。

目前越来越多的学生选修高压直流输电方面的课程,工程领域专业培训对此的需求也越来越大,因而对兼顾直流输电基本原理和工程应用两个方面的有系统性、针对性的教材需求非常迫切。本书正因应这一目的而编写。

全书共分为11章,内容涉及直流输电的基本概念和原理、换流电路工作原理、换流站及主设备、直流输电线路、谐波与滤波器、直流系统的控制和保护、直流系统的功率损耗及可靠性评估、特高压直流输电以及直流输电新技术等。

本书主要面向电气工程专业硕士研究生、工学硕士研究生以及电气工程及其自动化等相关专业的本科生教学和科研,并对直流输电工程的设计与运行提供参考。

本书由张勇军任主编,陈碧云任副主编,李晓华、史丹参加了部分编写;其中第4章、第6章前5节、第9章主要由陈碧云执笔,第7章前4节主要由李晓华执笔,第8章主要由史丹执笔,其余部分由张勇军执笔;全书由张勇军统稿和校对;全书由王渝红、韩永霞审核。

我们在编写过程中先后得到了任震、郝艳捧、欧阳森、朱革兰等的指导和帮助,在此谨表谢意。

本书的编写得到“全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材”的立项,并得到了中国南方电网有限责任公司超高压公司多个部门的专家帮助,提

供了丰富的文件资料,在此表示衷心的感谢!本书在编写过程中参考了大量文献,但由于编写时间长、修改内容多,对某些重要文献的列举或标注可能有所遗漏,在此谨对所有相关文献的作者表示感谢,并对遗漏标注的参考文献作者表示诚恳的歉意。

由于编者水平和经验所限,书中难免有错漏之处,希望得到读者的批评和指正。

编者

2012年5月

第 1 章 绪论	1
1.1 直流输电的发展历史	1
1.1.1 早期电力传输技术回顾	1
1.1.2 高压直流输电技术的发展	2
1.1.3 高压直流输电的基本概念	6
1.1.4 国外高压直流输电工程代表性案例	7
1.1.5 高压直流输电在中国的发展	9
1.2 高压直流输电的基本接线方式	11
1.2.1 单极线路方式	11
1.2.2 双极线路方式	12
1.2.3 背靠背换流方式	14
1.2.4 多端方式	15
1.3 直流输电的优缺点	17
1.3.1 直流输电的优势	17
1.3.2 直流输电的不足	20
1.3.3 直流输电的应用场合	22
习题 1	23
第 2 章 换流电路的工作原理	24
2.1 晶闸管与相控换流	24
2.1.1 晶闸管的特性	24
2.1.2 换流电路	25
2.1.3 多桥换流器	26
2.2 整流器的工作原理	27
2.2.1 理想情况下的工作原理	29

2.2.2	考虑触发延迟角的情况	31
2.2.3	同时考虑触发延迟角和换相电感的情况	32
2.2.4	换流装置的功率因数	36
2.3	逆变器的的工作原理	39
2.3.1	触发延迟角与直流电压的关系	39
2.3.2	逆变器的运行	41
2.3.3	换相失败的概念	43
2.3.4	换相失败的影响因素	44
2.3.5	换相失败的预防措施	47
2.4	直流输电的运行方式及其稳态特性	49
2.4.1	直流输电工程的额定值	49
2.4.2	直流输电的运行方式	50
2.4.3	稳态工况的计算	52
2.4.4	换流器的功率特性	54
2.4.5	换流器的无功功率特性	54
习题 2	.....	55
第 3 章	换流站及其主设备	56
3.1	换流站概况	56
3.1.1	主设备及其功能	56
3.1.2	换流站的平面布置	58
3.2	晶闸管换流器	59
3.2.1	性能要求	60
3.2.2	晶闸管阀的结构	60
3.2.3	晶闸管的触发方式	62
3.3	换流变压器	64
3.3.1	换流变压器的特点	64
3.3.2	换流变压器的选择	65
3.3.3	换流变压器的选型方案	67
3.4	平波电抗器	69
3.4.1	平波电抗器的结构和功能	69
3.4.2	平波电抗器的选择	70
3.5	无功补偿装置	71
3.5.1	静态无功补偿装置	72
3.5.2	动态无功补偿装置	73

3.6 换流站的工程实例	75
习题 3	80
第 4 章 高压直流输电线路	81
4.1 概况	81
4.1.1 杆塔	81
4.1.2 直流线路绝缘子	82
4.1.3 直流电缆线路	83
4.2 架空线路的运行特性	84
4.2.1 电晕效应	84
4.2.2 电场效应	85
4.2.3 电晕损耗	86
4.2.4 屏蔽效应与派生效应	87
4.2.5 无线电干扰	87
4.2.6 可听噪声	88
4.3 架空线路的参数选择	89
4.3.1 额定电压	89
4.3.2 导体截面	90
4.3.3 分裂导线数	91
4.3.4 直流输电线路工程实例	91
4.4 大地回路	92
4.4.1 电磁效应	93
4.4.2 热力效应	93
4.4.3 电化效应	94
4.4.4 陆地接地电极	94
4.4.5 海岸电极和海水电极	95
4.4.6 接地极线路工程实例	97
习题 4	98
第 5 章 高压直流系统的谐波和滤波器	99
5.1 谐波的基本概念	99
5.1.1 谐波源与谐波	99
5.1.2 谐波的指标	100
5.1.3 直流输电的谐波	101
5.2 换流装置交流侧的特征谐波	102

5.2.1	换流变压器阀侧线电流	102
5.2.2	换流变压器交流侧线电流	103
5.2.3	双桥 12 脉动换流变压器交流侧线电流	104
5.3	换流装置直流侧的特征谐波	104
5.3.1	换流器直流侧的谐波电压	105
5.3.2	换流器直流侧的谐波电流	106
5.4	交流滤波器	106
5.4.1	并联交流滤波器的阻抗特性	106
5.4.2	交流滤波器的选择设计	110
5.4.3	交流滤波器的配置	111
5.4.4	交流滤波器的工程实例	112
5.5	直流滤波器	114
5.5.1	直流滤波器的配置	114
5.5.2	直流滤波器的工程实例	116
5.6	有源滤波器	117
5.6.1	基本构成与原理	119
5.6.2	接线方式的选择	120
5.6.3	混合有源直流滤波系统	121
5.6.4	直流有源滤波器的工程实例	123
习题 5	.....	124
第 6 章	高压直流系统的控制	125
6.1	概述	125
6.1.1	分层控制模式	125
6.1.2	基本控制要求	126
6.2	基本控制方式	127
6.2.1	定电流控制	128
6.2.2	定电压控制	130
6.2.3	定触发角控制	130
6.2.4	定熄弧角控制	131
6.3	功率控制和频率控制	133
6.3.1	定功率控制	133
6.3.2	定频率控制与功率/频率控制	135
6.4	两侧换流器控制的配合特性	136
6.4.1	理想控制特性	136

6.4.2	控制特性不稳定的对策	138
6.4.3	低压限流与触发角限制	139
6.4.4	换流站的控制特性	140
6.4.5	潮流翻转控制	142
6.4.6	直流系统的启停控制	143
6.4.7	换流变压器分接头切换控制	144
6.5	基本的脉冲触发控制方式	145
6.5.1	分相控制方式	146
6.5.2	等距离脉冲相位控制方式	147
6.6	极控系统	149
6.6.1	极控系统设备配置及其主要功能	152
6.6.2	换流器动作顺序	154
6.6.3	非正常闭锁的控制	156
6.7	直流站控系统	157
6.7.1	直流站控系统的主要功能	157
6.7.2	系统无功功率控制	158
6.7.3	直流系统控制级别	159
6.8	交流站控系统	159
6.8.1	交流站控系统的主要功能	159
6.8.2	交流场设备其他功能的实现方式	160
习题 6	.....	160
第 7 章	高压直流输电的保护	161
7.1	高压直流输电系统保护的配置原则与动作策略	161
7.1.1	高压直流输电系统故障种类	161
7.1.2	直流输电系统保护配置原则	162
7.1.3	直流系统保护动作策略	164
7.2	换流站保护的配置	165
7.2.1	主要保护配置	166
7.2.2	其他辅助保护	169
7.2.3	极控保护	170
7.3	换流器的保护	172
7.3.1	换流器的故障分析	172
7.3.2	换流器的保护配置	175
7.4	高压直流输电线路的保护	179

7.4.1	直流线路故障类型	179
7.4.2	直流线路故障过程	180
7.4.3	高压直流线路保护的要求与配置	181
7.4.4	直流线路行波保护	183
7.4.5	直流线路的主要后备保护	186
7.4.6	直流线路故障恢复顺序	188
7.5	换流站的过电压与防护	189
7.5.1	换流站交流侧过电压	189
7.5.2	换流站直流侧过电压	191
7.5.3	换流站过电压保护	192
7.5.4	换流站过电压保护和绝缘配合	193
7.5.5	换流站防雷保护	193
7.6	直流输电线路的过电压与防雷保护	196
7.6.1	直流线路过电压	196
7.6.2	直流输电线路的耐雷性能	196
7.6.3	高压直流线路的防雷保护措施	198
7.7	直流输电系统过电压保护和绝缘配合	198
7.7.1	过电压保护和绝缘配合	198
7.7.2	过电压保护和绝缘配合的工程实例	199
	习题 7	201
第 8 章	直流输电系统的损耗计算	202
8.1	概述	202
8.1.1	直流输电线路的损耗	202
8.1.2	接地极系统的损耗	202
8.1.3	直流换流站的损耗	203
8.2	晶闸管阀的损耗	205
8.2.1	阀损耗分量	206
8.2.2	阀的总损耗	208
8.3	其他设备的损耗	208
8.3.1	换流变压器的损耗	208
8.3.2	并联电容器组的损耗	210
8.3.3	交流滤波器的损耗	210
8.3.4	直流滤波器的损耗	211
8.3.5	平波电抗器的损耗	211

8.3.6	辅助设备和站用电的损耗	212
8.3.7	PLC 滤波器的损耗	212
8.4	功率损耗计算的工程实例	212
8.4.1	贵广一回/二回直流系统的损耗计算	212
8.4.2	计算结果分析	213
习题 8		214
第 9 章	高压直流输电的可靠性评估	215
9.1	基本概念	215
9.1.1	目标、任务和评估手段	216
9.1.2	可靠性准则	217
9.1.3	高压直流输电系统的可靠性指标	218
9.1.4	提高高压直流输电系统的可靠性措施	220
9.2	可靠性评估的数学基础	220
9.2.1	马尔可夫方程	220
9.2.2	频率-持续时间法	222
9.3	等值模型法	224
9.3.1	子系统及等值模型	224
9.3.2	子系统状态空间图的建立及等效模型	226
9.3.3	组合模型和整个高压直流输电系统的状态空间图	229
9.4	交直流并联输电系统的可靠性评估	231
9.4.1	运算条件	232
9.4.2	交直流并联输电系统的可靠性指标	236
9.4.3	交直流并联输电系统可靠性的蒙特卡洛模拟	237
9.4.4	计算实例	241
习题 9		242
第 10 章	特高压直流输电	243
10.1	概况	243
10.1.1	特高压输电的定义	243
10.1.2	推动特高压输电发展的因素	244
10.1.3	特高压直流输电在中国的发展	247
10.1.4	特高压直流输电的技术难点	250
10.2	特高压直流系统的工程实例	252
10.2.1	主回路接线方式	252

10.2.2	换流阀	253
10.2.3	换流变压器	256
10.2.4	滤波器	257
10.2.5	接地极	258
10.2.6	控制系统与保护	259
10.3	特高压直流对受端系统电压稳定的影响	260
10.3.1	电压稳定的概念	260
10.3.2	电压稳定与无功补偿	261
10.3.3	大型受端电网的电压稳定问题	262
10.3.4	特高压直流对受端系统电压稳定性的影响	264
10.4	特高压直流输电的过电压与绝缘配合	266
10.4.1	直流输电系统过电压保护	267
10.4.2	换流站电气设备的绝缘配合	268
习题 10	.....	269
第 11 章	现代高压直流输电新技术	270
11.1	电压源换流器的换流原理与柔性直流输电	270
11.1.1	电压源换流器与 IGBT	271
11.1.2	柔性直流输电与传统直流输电的差异	273
11.1.3	柔性直流输电的应用	274
11.2	多端直流输电	277
11.2.1	多端直流输电的发展现状	278
11.2.2	多端直流输电的关键技术	279
11.2.3	新型多端直流输电技术的发展趋势	281
11.3	电容换相换流器	281
11.3.1	工作机理	282
11.3.2	运行特性	283
11.3.3	无功功率特性	285
11.3.4	串、并联电容器组的基波无功功率	288
11.3.5	CCC 的经济补偿度	289
习题 11	.....	289
附录	部分专业词汇对照表	290
参考文献	.....	295

1 绪 论

1.1 直流输电的发展历史

人们对电的应用和认识以及电力科学的发展都是起源于直流电。伽尔伐尼、伏特、奥斯特、欧姆、安培等人的发明均与直流相关。直流电最早的广泛实际应用,是由蓄电池供电的以大地作回路的直流电报。

1.1.1 早期电力传输技术回顾

电气照明和动力最早也是采用由直流发电机提供的直流电。先是有了以定电流串联运行并由串接发电机供电的碳弧灯,后来又出现了以定电压并联运行且由并接发电机供电的碳丝白炽灯。1882年,爱迪生在纽约珍珠街建造的世界首座电站开始投入运行。该电站以110V的直流通过地下主管道向供电半径约1.6km的地区供电。它装备了由蒸汽机驱动的爱迪生双极直流发电机。短短几年内,类似电站在世界上多数大城市的中心地区相继投运。

但是19世纪末出现的变压器、多相电路和感应电机,催生了交流电力系统。

结构简单、牢固耐用且效率很高的变压器使得不同的电压等级在发电、输电、配电、用电中的应用成为可能。特别地,它使长距离高电压输电成为可能。通常远离用电负荷中心的水电的开发促进了这种输电方式。变压器的雏型是1851年由列姆勒夫提出的感应线圈,一直到19世纪80年代,在探索变压器的研制中不断有所突破。1882年,莫斯科全球展览会上,乌荫金首次展出了有升压、降压变压器的高压变电装置。翌年,法国高拉德和英国吉布斯创制了一台具有实用价值的电力变压器,容量为 $5\text{kV}\cdot\text{A}$ 。这种早期变压器,当时被人们称为“二次发电机”。与此同时,美国西屋电气公司对高拉德、吉布斯两人创制的开磁路式变压器结构进行了革新,1885年制成具有现代实用性能的电力变压器,为之后三相交流输配电系统的发明与发展创造了条件。

感应电机,尤其是多相式感应电机,同样因其结构简单、牢固耐用、造价低廉的特点而被广泛应用于工业与民用领域。直流电动机和直流发电机的换向器除了需要较大维护量外,也

限制了直流电机的电压、转速和容量的提高。由于每个换向片的电压不宜超过 22V 以免出现过度的电弧,因此高电压的换向器需要很多的换向片,从而导致电机直径很大。但大直径的电机转速不能太高,以保证换向器和绕组可以承受离心力,而低速电机比起同容量的高速电机更笨重、更昂贵。在高转速下性能很好的汽轮机的出现,又给了交流发电机一个大大的优势。

1888 年,由费朗蒂设计的伦敦泰晤士河畔的大型交流电站开始输电。用钢皮铜心电缆将 10kV 的交流电送往 10km 外的市区变电站,降为 2500V 后再分送到各街区的二级变压器,降为 100V 供用户照明。此后,由于直流电机串接运行复杂,而高电压大容量直流电机又存在换向困难等技术问题,直流输电在技术和经济上都不能与交流输电相竞争,因此发展缓慢。同时,交流系统由于自身的优势,其应用变得日益广泛。电力的发、输、配、用都逐渐采用交流方式。如果在某些特殊场合需要直流,如可调速电机驱动和电解过程等,则可以通过同步转换器或者整流器将交流电转换成直流电。

20 世纪 50 年代后,电力需求日益增长,远距离大容量输电线不断增加,电网扩大,交流在超高压长距离输电中也显现了该技术的弊端,例如:交流输电线路走廊宽,费用高,传输稳定性差;交流输电网络过大导致整个系统阻抗减小,电网短路容量增大,使得系统原有的断路器和与短路容量有关的电气设备有可能无法继续使用;交流电晕损耗与电磁辐射严重,等等。单一采用交流输电,一味提高交流电压等级,已不是大电网、大容量、远距离输电的最佳办法。在一定条件下,采用直流输电更为合理,比交流电有更好的经济效益和运行特性。因此尽管交流输电占据了绝对的优势,直流输电依然保持着顽强的生命力。当然,直流输电也不能完全取代交流输电,而是作为交流输电的补充,可以在交流系统中采用直流系统输送部分电力或者用直流系统连接两个交流系统。电力系统的各个环节,仍然维持以交流为主体的局面。

1.1.2 高压直流输电技术的发展

直流输电要求在直流线的送端能将交流电转换成直流电,在其受端将直流电转换成交流电。其可行性和优越性取决于高电压大功率换流器的研制。在适当的换流器研制出来之前,法国工程师雷诺-杜里设计的杜里直流系统(Thury system)成为早期著名的高压直流输电模式。

如图 1-1 所示,在输电线的送端,相当数量的由原动机驱动的串接直流发电机串联起来以形成所需的高电压,而在受端,数量相当的串接直流电动机也串联起来,以驱动低压直流或交流的发电机。杜里系统以定电流运行。高压串联线路中每台电机的电压可以通过可调电刷来调整。

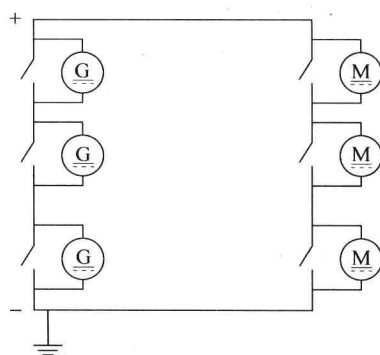


图 1-1 杜里直流输电系统示意图