



Ultra High Voltage
AC/DC Power Transmission Technology

特高压交直流输电技术

主 编 周 浩

副主编 丘文千 孙 可 陈稼苗 邓 旭

Ultra-High Voltage AC/DC Power Transmission Technology

特高压交直流输电技术

主 编 周 浩

副主编 丘文千 孙 可 陈稼苗 邓 旭



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

内容简介

本书系统介绍了特高压交直流输电中的关键技术问题。全书共四篇,第一篇概述了特高压输电的发展及其系统特性和经济性。第二篇主要阐述特高压交流系统涉及的关键技术问题,内容包括特高压线路工频过电压、特高压交流系统潜供电流、特高压交流系统操作过电压、特高压交流系统特快速暂态过电压(VFTO)、特高压交流系统防雷、特高压变电站绝缘配合、特高压交流输电线路绝缘配合、特高压交流电气设备、特高压工频电磁感应、特高压交流系统电磁环境。第三篇主要阐述特高压直流系统的关键技术,内容包括特高压直流系统基础及主参数计算、特高压直流系统操作过电压、特高压直流输电系统雷电过电压、特高压直流换流站绝缘配合、特高压直流输电线路外绝缘配合、特高压直流换流阀过电压特性与绝缘配合、特高压直流电气设备、直流感地极、直流偏磁、特高压直流系统电磁环境、 $\pm 800\text{kV}$ 与 $\pm 1100\text{kV}$ 特高压直流系统过电压与绝缘配合比较。第四篇主要介绍了特高压交流变电站与直流换流站、交直流输电线路的设计。

本书可作为高等院校电气学科本科生、研究生的专业课程教材和参考书,供高等院校师生了解特高压交直流输电技术,亦可作为从事特高压输电理论研究、规划设计、运行维护等工作的技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

特高压交直流输电技术 / 周浩主编. — 杭州:
浙江大学出版社, 2014. 6
ISBN 978-7-308-13106-3

I. ①特… II. ①周… III. ①特高压输电—直流输电
②特高压输电—交流输电 IV. ①TM723

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 074071 号

特高压交直流输电技术

主 编 周 浩
副主编 丘文千 孙 可 陈稼苗 邓 旭

责任编辑 杜希武
封面设计 刘依群
出版发行 浙江大学出版社
(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)
(网址: <http://www.zjupress.com>)
排 版 杭州好友排版工作室
印 刷 杭州杭新印务有限公司
开 本 889mm×1194mm 1/16
印 张 49.5
字 数 1568 千
版 次 2014 年 6 月第 1 版 2014 年 6 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-308-13106-3
定 价 88.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部联系方式: (0571) 88925591; <http://zjdxcs.tmall.com>

编委会名单

主 编 周 浩

副主编 丘文千 孙 可 陈稼苗 邓 旭

编委会成员 (以姓氏笔画为序)

王东举 刘 杰 沈 扬 苏 菲 李 杨

陈锡磊 易 强 周志超 赵斌财 施纪栋

查鲲鹏 钱 锋 陶 佳 魏晓光

本书得到国家重点基础研究发展计划(973计划)重大项目《交直流特高压输电系统电磁与绝缘特性的基础问题研究》(2011CB209400)资助。

前 言

从我国能源资源分布情况来看,虽然蕴藏总量丰富,但资源分布与生产力分布很不均衡,煤炭资源大部分在北部和西北部,水能资源主要在西南部,陆地风能与太阳能资源主要在西北部,而能源需求却主要集中在中部与东部沿海地区,能源基地与负荷中心相隔上千公里。发电能源以煤、水为主,能源资源和生产力发展呈逆向分布,是我国的基本国情。改革开放以来,我国电力需求持续快速增长,新建电源规模容量越来越大,受制于能源输送能力和环境保护要求,决定我国必然要发展远距离、大容量输电技术,以提高资源的开发和利用效率,缓解能源输送压力和满足环境保护要求。

特高压输电技术是目前世界上最高电压等级的输电技术,其最大的特点是大容量、远距离、低损耗输送电力。1000kV 特高压交流的输电能力大约是 500kV 超高压交流的 4~5 倍。发展交直流特高压输电可以有效解决大规模电力输送问题,且与超高压输电线路相比,特高压线路在相同输电容量下占用的土地资源更少,经济效益和社会效益十分显著。建设以特高压电网为骨干、各级电网协调发展的国家级电网,符合我国能源资源与经济发展逆向分布的基本国情,符合国家节能减排的总体部署,是实现电网与电源协调发展的有效途径,是建设资源节约型、环境友好型社会的迫切需要。

国际上前苏联、日本、美国、意大利和加拿大等少数国家对特高压交流输电技术进行过试验研究,前苏联在 1981—1994 年间共建成 1150kV 输电线路 2364km,其中埃基巴斯图兹—科克切塔夫线(长 495km)于 1985 年以 1150kV 投入运行,是世界上第一条投入实际运行的特高压输电线路。日本于 20 世纪 90 年代建设了 1000kV 特高压交流双回输电线路,但一直处于 500kV 降压运行状态。国外直流输电已建成投运的最高电压等级工程为巴西伊泰普输电工程,包括两回±600 千伏电压等级、360 万千瓦额定输送功率的直流线路;苏联曾计划建设一条从埃基巴斯图兹到唐波夫的±750kV 特高压直流输电工程,该工程是世界上特高压直流输电技术的第一次工程实践,于 1980 年开始建设,并已建成 1090km 线路,但最终因政治、经济等原因停建。

特高压输电研究在中国起步比较晚。从 1986 年起特高压输电研究先后被列入中国“七五”、“八五”和“十五”科技攻关计划,1990—1995 年国务院重大办组织“远距离输电方式和电压等级论证”;1990—1999 年国家科委组织“特高压输电前期论证”和“采用交流百万伏特高压输电的可行性”等专题研究。中国国家电网公司于 2004 年首次提出“建设以特高压为核心的坚强国家电网”的战略构想,重点建设以特高压电网为骨干,各级电网协调发展的网架体系。中国南方电网公司也从 2003 年开始研究建设±800kV 直流输电工程的可行性。2006 年国家发展改革委员会正式核准晋东南经南阳至荆门 1000kV 特高压交流试验示范工程,联接华北、华中电网。中国分别在 2007 年和 2010 年建成并投运 1000kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流输电试验示范工程和±800kV 云南—广东、向家坝—上海特高压直流输电工程。此后,特高压输电在中国得到迅速发展,截至 2014 年 1 月,国内已建成并投运 1000kV 特高压交流输电线路 2 条,±800kV 特高压直流输电线路 5 条。

特高压输电是处于世界输电技术前沿的工程技术,其在我国的迅速成功发展已经充分证明了我国在电力系统技术方面所取得的巨大成就。与之同时,特高压输电技术的复杂性及其在我国发展的紧迫性,要求电力系统相关专业人员对其具备更深入的了解和掌握。本书基于浙江大学高电压实验室近十年来在特高压交直流输电领域的大量研究成果和浙江省电力设计院多年来在特高压输电工程领域的丰富实践经验,同时也汲取了国内外在特高压交直流输电技术方面的相关研究成果以及实际运行经验,系统地介绍了特高压交直流输电中的关键技术问题。

本书分为四篇共二十八章,主要研究内容为特高压电网的过电压、绝缘配合与设计。第一篇共三章,主编孙可,概述了特高压输电的发展及其系统特性和经济性;第一章特高压电网的发展,由孙可、王

东举负责编写;第二章中国特高压发展规划与建设,由孙可、袁士超负责编写;第三章特高压输电的系统特性及经济性分析,由陈光、周浩负责编写。第二篇共十章,主编周浩,主要讨论特高压交流系统,研究内容包括:第四章特高压线路工频过电压,由周浩、易强负责编写;第五章特高压交流系统潜供电流,由易强、周浩负责编写;第六章特高压交流系统操作过电压,由计荣荣、周浩负责编写;第七章特高压交流系统 VFTO,由李杨、周浩负责编写;第八章特高压交流系统防雷,由赵斌财、周浩负责编写;第九章特高压变电站绝缘配合,由苏菲、周浩、李杨负责编写;第十章特高压交流输电线路绝缘配合,由周浩、苏菲负责编写;第十一章特高压交流电气设备,由胡贤德、李杨负责编写;第十二章特高压工频电磁感应,由李宝聚、施纪栋负责编写;第十三章特高压交流系统电磁环境,由张晓、陆海清、沈扬负责编写。第三篇共十一章,主编周浩、邓旭,主要讨论特高压直流系统,研究内容包括:第十四章特高压直流系统基础及主参数计算,由周浩、陈锡磊负责编写;第十五章特高压直流系统操作过电压,由王东举、周浩、沈扬负责编写;第十六章特高压直流系统防雷,由戴攀、周浩、赵斌财负责编写;第十七章特高压直流换流站绝缘配合,由陈锡磊、周浩、邓旭负责编写;第十八章特高压直流输电线路绝缘配合,由施纪栋、周浩、邓旭负责编写;第十九章特高压直流换流阀过电压与绝缘配合,由查鲲鹏、魏晓光、刘杰负责编写;第二十章特高压直流电气设备,由邓旭、徐安闻负责编写;第二十一章直流接地极,由沈扬、袁士超、唐俊熙负责编写;第二十二章直流偏磁,由丘文千、陶佳负责编写,陈晴、毛昭磊等参与;第二十三章特高压直流系统电磁环境,由万亦如、张晓负责编写;第二十四章 $\pm 800\text{kV}$ 与 $\pm 1100\text{kV}$ 特高压直流系统过电压与绝缘配合比较,由周浩、王东举负责编写。第四篇为设计篇,主编丘文千、陈稼苗,主要讨论特高压交流变电站与直流换流站、交直流输电线路的设计,研究内容包括:第二十五章特高压交流变电站设计,由钱锋、丘文千负责编写,安春秀、刘宏波、陈建华等参与;第二十六章特高压直流换流站设计,由周志超、丘文千负责编写,安春秀、刘盛等参与;第二十七章特高压交流线路设计,由陈稼苗、丘文千负责编写,潘峰、宋刚等参与;第二十八章特高压直流线路设计,由陈稼苗、丘文千负责编写,郭勇、陈建飞等参与。全书由周浩负责统稿,丘文千、邓旭担任总校阅。

本书可作为高等院校电气学科本科生、研究生的专业课程教材和参考书,供高等院校师生了解特高压交直流输电技术,亦可作为从事特高压输电理论研究、规划设计、运行维护等工作的技术人员的参考书。

本书的研究工作得到了国家重点基础研究发展计划(973计划)重大项目《交直流特高压输电系统电磁与绝缘特性的基础问题研究》(2011CB209400)资助,并得到浙江大学—浙江省电力设计院合作中心的资助。

衷心希望本书可以更好地帮助读者了解特高压交直流输电技术,为电力系统相关技术人员的研究工作提供参考。本书由浙江大学、浙江省电力设计院、浙江省电力公司、中国电力科学研究院的相关研究人员共同编写。在编写过程中得到了多位专家的指导帮助,在此感谢韩祯祥院士、赵智大教授、陈维江教授高工、周沛洪教授高工、张翠霞教授高工、李勇伟教授高工、谷定燮教授高工、聂定珍教授高工、田杰教授高工、康重庆教授、崔翔教授、李成榕教授、文福栓教授、宿志一教授高工、邬雄教授高工、万保权教授高工、孙昭英教授高工、陈家宏教授高工、戴敏教授高工、李志兵教授高工、朱韬析高工、黄莹高工等的支持与帮助。

本书编写过程历时近五年,凝聚了众作者的研究成果,但限于作者的理论水平和实践经验,本书难免存在不妥和错误之处,恳请读者给予批评指正,不胜感激。作者联系方式,电子邮箱:hvlab_zju@163.com。

主编

2014年于浙大求是园

目 录

一 概述篇

第 1 章 特高压输电的发展	3
1.1 特高压输电	3
1.1.1 输电电压等级的发展	3
1.1.2 电网电压等级序列	4
1.1.3 特高压输电电压等级选择	6
1.2 特高压输电技术的发展	9
1.2.1 前苏联(俄罗斯)	9
1.2.2 日本	10
1.2.3 美国	11
1.2.4 加拿大	11
1.2.5 意大利	11
参考文献	12
第 2 章 中国特高压发展规划与建设	13
2.1 中国发展特高压输电的必要性	13
2.1.1 发展特高压输电是中国电网发展的客观要求	13
2.1.2 特高压电网对全国统一电力市场建设具有促进作用	15
2.1.3 特高压输电提升中国科技自主创新能力	15
2.2 中国特高压发展规划	16
2.2.1 国家电网公司特高压发展规划	16
2.2.2 南方电网公司特高压发展规划	18
2.2.3 中国特高压发展历程	18
参考文献	23
第 3 章 特高压输电的系统特性及经济性分析	24
3.1 交流特高压输电的系统特性	24
3.1.1 可靠性与稳定性	24
3.1.2 输电特性与输电能力	25
3.2 直流特高压输电的系统特性	28
3.2.1 可靠性与稳定性	28
3.2.2 输电特性与输电能力	29
3.3 特高压输电的经济性分析	30
3.3.1 交流特高压/超高压输电的经济性比较	30
3.3.2 交流/直流特高压输电的经济性比较	32

3.4 交流/直流特高压输电的适用场合	32
3.4.1 交流/直流特高压输电的技术特点	32
3.4.2 特高压输电的技术优势	33
3.4.3 特高压电网互联	33
3.4.4 交流/直流特高压输电的适用场合	34
参考文献	36

二 交流篇

第4章 特高压线路工频过电压	39
4.1 工频过电压产生机理	39
4.1.1 空载长线电容效应	39
4.1.2 线路不对称短路故障	41
4.1.3 三相甩负荷工频过电压	41
4.2 特高压工频过电压特点	43
4.3 特高压工频过电压种类	44
4.3.1 特高压工频过电压分类	44
4.3.2 各种工频过电压的系统比较	45
4.4 特高压工频过电压限制要求	52
4.5 特高压工频过电压影响因素	52
4.5.1 线路长度	52
4.5.2 等效电源阻抗	52
4.5.3 接地故障点位置	54
4.5.4 输送功率	57
4.5.5 线路杆塔	57
4.6 特高压工频过电压的限制措施	58
4.6.1 固定高抗	58
4.6.2 可控高抗	62
4.6.3 继电保护限制方案	66
4.6.4 限制措施的选择	66
4.7 高抗补偿度上、下限的确定	67
4.7.1 高抗补偿度上限的确定	67
4.7.2 高抗补偿度下限的确定	83
参考文献	89
第5章 特高压交流系统潜供电流	91
5.1 潜供电流产生机理	91
5.2 熄灭潜供电弧的措施	92
5.2.1 并联电抗器中性点接小电抗补偿	92
5.2.2 加装 HSGS 限制潜供电弧	101
5.2.3 两种限制潜供电流的措施比较与讨论	103
5.3 潜供电流和恢复电压的仿真	104

5.3.1	模型的构建	104
5.3.2	并联电抗器中性点接小电抗抑制潜供电弧的效果	105
5.3.3	快速接地开关 HSGS 抑制潜供电弧的效果分析	106
	参考文献	109
第 6 章	特高压交流系统操作过电压	111
6.1	概 述	111
6.1.1	特高压交流系统操作过电压	111
6.1.2	特高压交流系统中常用限制操作过电压方法	113
6.2	单相接地故障过电压	115
6.2.1	产生机理	115
6.2.2	建模仿真	116
6.2.3	影响因素分析	117
6.2.4	限制措施	123
6.3	合闸过电压	131
6.3.1	产生机理	131
6.3.2	建模仿真	134
6.3.3	影响因素分析	137
6.3.4	限制措施	145
6.3.5	超高压及特高压交流输电线路断路器合闸电阻的适用性研究	145
6.4	分闸过电压	153
6.4.1	甩负荷过电压	153
6.4.2	故障清除过电压	157
6.5	串补对电磁暂态特性的影响	163
6.5.1	串补装置的构成	163
6.5.2	串补对工频过电压的影响	163
6.5.3	串补对潜供电流的影响	163
6.5.4	串补对合闸操作过电压的影响	164
6.5.5	串补与断路器的联动	164
	参考文献	164
第 7 章	特高压交流系统 VFTO	166
7.1	VFTO 的产生机理与特点	166
7.2	VFTO 的危害	169
7.2.1	VFTO 对 GIS 主绝缘的危害	169
7.2.2	VFTO 对电力变压器的影响	169
7.2.3	VFTO 对二次设备的影响	170
7.2.4	VFTO 的累积效应	171
7.3	1000kV GIS 变电站中不同运行工况下的 VFTO	171
7.3.1	主变操作产生的 VFTO	171
7.3.2	出线操作产生的 VFTO	172
7.3.3	母线操作产生的 VFTO	172
7.4	VFTO 的影响因素	172
7.4.1	负荷侧残余电压对 VFTO 过电压幅值的影响	173
7.4.2	变压器入口电容对 VFTO 的影响	173

7.4.3	弧道电阻对 VFTO 过电压幅值的影响	174
7.4.4	氧化锌避雷器对 VFTO 的影响	174
7.5	500kV 和 1000kV GIS 变电站 VFTO 的比较	174
7.5.1	变电站中典型隔离开关操作方式下开关操作顺序	174
7.5.2	500kV/1000kV GIS 变电站中设备对 VFTO 的限制水平	177
7.5.3	典型 500kV 和 1000kV GIS 变电站中的 VFTO 比较	177
7.5.4	VFTO 对 500kV 和 1000kV GIS 变电站的影响总结	180
7.5.5	500kV 与 1000kV GIS 变电站是否安装隔离开关并联电阻的讨论	180
7.6	变电站与发电厂里的 VFTO 特性比较	180
7.6.1	变电站与发电厂接线图的比较	180
7.6.2	特高压 GIS 变电站与发电厂中 VFTO 特性的比较	181
7.6.3	特高压 GIS 变电站与发电厂中 VFTO 的比较总结	184
7.7	限制和防护措施	184
7.7.1	合理安排断路器和隔离开关操作顺序	184
7.7.2	发电厂安装发电机出口断路器	185
7.7.3	隔离开关加装并联电阻	186
7.7.4	铁氧体磁环	187
7.7.5	架空线	187
7.7.6	其他措施	188
7.8	架空线对入侵主变端口 VFTO 波前陡度限制的定量研究	188
7.8.1	架空线长度对 VFTO 波前陡度影响的实验探究	188
7.8.2	架空线长度对 VFTO 波前陡度影响的仿真分析	190
7.8.3	1000kV 发电厂中利用架空线限制入侵主变 VFTO 波前陡度的进一步探讨	194
7.9	变电站和发电厂中 GIS 暂态壳体电压(TEV)研究	196
7.9.1	产生原理	197
7.9.2	TEV 计算方法	197
7.9.3	降低暂态壳体电压的措施	198
7.10	国内特高压 GIS 系统中 VFTO 特性的试验研究	199
7.10.1	VFTO 特性试验回路	199
7.10.2	VFTO 产生机制与波形特征	200
7.10.3	VFTO 特性试验内容	201
7.11	500kV/1000kV GIS 变电站和发电厂中 VFTO 特性总结	202
	参考文献	203
第 8 章	特高压交流系统防雷	205
8.1	特高压交流线路的防雷防护	205
8.1.1	概述	205
8.1.2	耐雷性能评估计算方法	208
8.1.3	国内 1000kV 特高压线路的耐雷性能评估	220
8.1.4	特高压交流线路防雷措施	225
8.2	特高压变电站(开关站)的防雷保护	227
8.2.1	概述	227
8.2.2	特高压变电站耐雷性能评估方法	228
8.2.3	特高压变电站的雷电侵入波过电压防护	234
8.2.4	特高压变电站雷电侵入波防护措施	237

参考文献	238
第 9 章 特高压变电站绝缘配合	240
9.1 绝缘配合的基本概念与原则	240
9.2 特高压绝缘配合方法	241
9.3 特高压变电站的绝缘配合	243
9.3.1 特高压变电站空气间隙的确定	243
9.3.2 特高压设备绝缘的选择	247
参考文献	251
第 10 章 特高压交流输电线路绝缘配合	252
10.1 特高压绝缘子串形、型式的选择	252
10.1.1 三种不同特高压输电线路绝缘子的比较	252
10.1.2 特高压输电线路绝缘子串形、型式的选择	255
10.2 特高压输电线路绝缘子片数确定方法	255
10.2.1 按工频电压选择绝缘子片数	255
10.2.2 按操作过电压选择绝缘子片数	263
10.2.3 按雷电过电压要求校核绝缘子片数	263
10.3 特高压线路空气间隙的确定	263
10.3.1 工频电压下空气间隙的确定	266
10.3.2 操作冲击电压下的空气间隙确定	270
10.3.3 雷电冲击电压下的空气间隙确定	280
10.3.4 特高压系统在三种过电压下线路空气间隙选择	283
10.3.5 各国特高压线路空气间隙的选择	283
参考文献	284
第 11 章 特高压交流电气设备	285
11.1 特高压变压器	285
11.1.1 国内外特高压变压器现状	285
11.1.2 特高压变压器特点与选型	285
11.1.3 特高压交流试验示范工程用特高压变压器主要参数	288
11.2 特高压并联电抗器	288
11.2.1 结构设计	289
11.2.2 绝缘设计	290
11.2.3 冷却方式	291
11.2.4 噪声控制	292
11.2.5 特高压可控并联电抗器	292
11.3 特高压互感器	292
11.3.1 国内外特高压电压互感器和电流互感器现状	292
11.3.2 特高压电压互感器	293
11.3.3 特高压电流互感器	294
11.3.4 光电式特高压互感器	295
11.4 特高压避雷器	295
11.4.1 国内外特高压避雷器现状	295
11.4.2 特高压避雷器特点	295
11.4.3 特高压交流试验示范工程用特高压避雷器主要参数	296

11.5	特高压开关设备	296
11.5.1	国内外特高压开关设备现状	296
11.5.2	特高压开关设备特点	297
11.6	特高压套管	298
11.6.1	国内外特高压套管现状	298
11.6.2	特高压套管特点	299
11.7	特高压串补装置	299
11.7.1	国内外特高压串补装置现状	299
11.7.2	特高压串补装置保护方式	299
	参考文献	300
第12章	特高压工频电磁感应	302
12.1	1000kV 同塔双回线路感应电压和电流	302
12.1.1	产生机理及四种不同感应参数	302
12.1.2	感应电压、电流仿真计算	303
12.1.3	感应电压和感应电流的影响分析	305
12.2	1000kV 交流输电线路架空地线感应电压和感应电流	305
12.2.1	特高压单回线路架空地线感应电压和感应电流	306
12.2.2	特高压同塔双回线路架空地线感应电压和感应电流	308
12.2.3	特高压架空绝缘导线的绝缘间隙及其耐压选取	308
12.3	交流线路对平行架设特高压直流线路的工频电磁感应影响	308
12.3.1	特高压交流线路对平行架设特高压直流线路的工频电磁感应	309
12.3.2	交流线路对平行直流线路电磁感应的影响因素	312
12.3.3	特高压单回/同塔双回交流线路与特高压直流线路平行架设对比分析	316
12.3.4	超/特高压交流输电线路与特高压直流线路平行架设对比分析	318
	参考文献	319
第13章	特高压交流系统电磁环境	320
13.1	特高压与超高压输电线路电磁环境比较	320
13.2	特高压交流输电线路的电磁环境	321
13.2.1	工频电场	321
13.2.2	工频磁场	326
13.2.3	电晕损失	328
13.2.4	无线电干扰	329
13.2.5	可听噪声	333
13.3	特高压双回输电线路的相序优化布置	337
13.3.1	电磁环境的影响	338
13.3.2	自然功率的影响	339
13.3.3	线路不平衡度的影响	339
13.3.4	耐雷性能的影响	340
13.3.5	地线感应电压、感应电流的影响	341
13.3.6	特高压同塔双回线路最优相序推荐	341
13.4	特高压输电线路跨越建筑物安全距离问题	341
13.4.1	安全距离研究的必要性	341
13.4.2	计算方法与仿真模型	342

13.4.3 畸变电场的影响因素讨论·····	344
13.4.4 特高压输电线路跨越建筑物安全距离推算·····	347
13.5 特高压交流变电站电磁环境·····	348
13.5.1 工频电场·····	348
13.5.2 工频磁场·····	348
13.5.3 无线电干扰·····	349
13.5.4 噪声·····	349
参考文献·····	349

三 直 流 篇

第 14 章 特高压直流系统基础及主参数计算 ·····	353
14.1 换流器工作原理·····	353
14.1.1 6 脉动换流器·····	353
14.1.2 12 脉动换流器·····	358
14.1.3 双 12 脉动换流器串联·····	358
14.2 特高压直流输电系统运行方式·····	358
14.2.1 特高压直流换流器电压等级的选择·····	359
14.2.2 特高压直流系统运行方式·····	359
14.3 特高压直流系统主回路参数计算·····	363
14.3.1 特高压直流输电工程主接线及运行方式·····	363
14.3.2 直流系统额定运行参数·····	364
14.3.3 交流系统额定运行参数·····	364
14.3.4 直流线路参数·····	365
14.3.5 设备参数·····	365
14.3.6 直流系统运行参数·····	371
参考文献·····	371
第 15 章 特高压直流系统操作过电压 ·····	372
15.1 特高压直流系统操作过电压分类及其特点·····	372
15.1.1 操作过电压分类·····	372
15.1.2 特高压直流操作过电压特点·····	373
15.1.3 引起操作过电压的故障类型·····	374
15.2 直流系统仿真模型·····	374
15.2.1 直流系统主回路模型·····	374
15.2.2 直流控制系统模型·····	375
15.2.3 换流站避雷器布置方案·····	377
15.3 交流侧操作过电压·····	378
15.3.1 三相接地故障及清除·····	378
15.3.2 逆变侧失交流电源·····	380
15.3.3 交流滤波器内部过电压·····	382
15.4 阀厅内操作过电压·····	386

15.4.1	阀避雷器 V11/V1 上的操作过电压	386
15.4.2	阀避雷器 V12/V2 上的操作过电压	390
15.4.3	阀避雷器 V3 上的操作过电压	392
15.4.4	换流器母线避雷器上的操作过电压	394
15.5	直流场操作过电压	396
15.5.1	直流极线过电压	396
15.5.2	中性母线过电压	399
15.5.3	直流滤波器内部过电压	407
	参考文献	410
第 16 章	特高压直流输电系统雷电过电压	411
16.1	特高压直流输电线路的防雷保护	411
16.1.1	交、直流线路防雷的主要区别	411
16.1.2	特高压直流线路的耐雷性能特点	412
16.1.3	±800kV 特高压直流输电线路防雷分析	413
16.2	特高压直流换流站的防雷保护	415
16.2.1	直流换流站的雷电侵入波防护特点	415
16.2.2	直流换流站的雷电侵入波计算方法	416
16.2.3	±800kV 直流换流站雷电侵入波防护分析	419
	参考文献	426
第 17 章	特高压直流换流站绝缘配合	427
17.1	特高压直流避雷器概述	427
17.1.1	直流避雷器的应用	427
17.1.2	直流阀片典型伏安特性	427
17.1.3	特高压直流避雷器特点	428
17.1.4	特高压直流避雷器的基本参数定义	429
17.2	换流站避雷器配置	429
17.2.1	避雷器配置基本原则	429
17.2.2	换流站避雷器配置方案	429
17.2.3	特高压换流站避雷器配置特点	432
17.3	特高压直流避雷器参数选取	433
17.3.1	避雷器参数选择的基本原则	433
17.3.2	交流侧避雷器	433
17.3.3	直流侧避雷器	435
17.3.4	两端换流站避雷器参数差异	439
17.4	平波电抗器分置方案	439
17.4.1	平抗分置的经济技术优势	439
17.4.2	特高压采用平抗分置的必要性	442
17.5	设备绝缘水平的确定	443
17.5.1	绝缘配合原则和方法	443
17.5.2	绝缘裕度	443
17.5.3	保护水平和绝缘水平	445
17.6	换流站最小空气净距	446
17.6.1	换流站极母线空气间隙放电特性试验	446

17.6.2	最小空气净距设计的公式法	449
17.6.3	非标准大气条件修正方法	451
17.7	换流站污秽外绝缘	455
17.7.1	中国±500kV换流站污秽外绝缘的运行经验	455
17.7.2	换流站支柱绝缘子选型	457
17.7.3	换流站支柱绝缘子的外绝缘设计	458
17.7.4	换流站直流穿墙套管爬距	462
	参考文献	462
第 18 章	特高压直流输电线路外绝缘配合	464
18.1	特高压直流线路绝缘子型式与片数的选择	464
18.1.1	绝缘子材质、伞形的选择	464
18.1.2	绝缘子串型的选择	466
18.1.3	绝缘子片数的确定	466
18.1.4	覆冰区绝缘子的选择	471
18.2	特高压直流线路空气间距的确定	473
18.2.1	直流电压下空气间距的确定	476
18.2.2	操作冲击下空气间距的确定	476
18.2.3	雷电冲击下空气间距的确定	477
18.2.4	特高压直流线路空气间隙规程推荐与工程应用值	478
	参考文献	478
第 19 章	特高压直流换流阀过电压特性与绝缘配合	480
19.1	冲击电压作用下换流阀过电压特性分析	480
19.1.1	换流阀系统寄生电容提取	480
19.1.2	换流阀系统冲击暂态分析模型	481
19.1.3	换流阀系统冲击暂态过电压特性	482
19.2	运行工况下换流阀过电压特性分析	483
19.2.1	换流阀关断暂态过电压分析	484
19.2.2	物理模拟法	485
19.2.3	经典式法	486
19.2.4	时域电路法	487
19.3	直流输电换流阀过电压保护及其设计	488
19.3.1	换流阀绝缘配合策略选择	488
19.3.2	门极电子电路过电压保护功能	488
19.4	直流输电换流阀绝缘配合研究	489
19.4.1	爬电距离计算方法	489
19.4.2	空气净距计算方法	489
	参考文献	490
第 20 章	特高压直流电气设备	491
20.1	特高压直流设备布置	491
20.2	特高压换流阀	493
20.2.1	特高压换流阀结构	493
20.2.2	特高压换流阀特点	495
20.2.3	特高压换流阀试验	496

20.2.4	特高压换流阀制造水平	496
20.3	特高压换流变压器	497
20.3.1	特高压换流变压器结构	497
20.3.2	特高压换流变压器特点	498
20.3.3	特高压换流变压器试验	499
20.3.4	特高压换流变压器制造水平	500
20.4	特高压平波电抗器	500
20.4.1	特高压平波电抗器结构	500
20.4.2	特高压平波电抗器特点	502
20.4.3	特高压平波电抗器试验	502
20.4.4	特高压平波电抗器制造水平	503
20.5	特高压交直流滤波器	503
20.5.1	特高压交流滤波器	503
20.5.2	特高压直流滤波器	504
20.5.3	特高压交直流滤波器试验	506
20.5.4	特高压交直流滤波器制造水平	506
20.6	特高压直流避雷器	506
20.6.1	特高压直流避雷器的类型	506
20.6.2	特高压直流避雷器特点	508
20.6.3	特高压直流避雷器试验	509
20.6.4	特高压直流避雷器制造水平	509
20.7	特高压套管	510
20.7.1	特高压套管结构	510
20.7.2	特高压套管特点	511
20.7.3	特高压套管试验	511
20.7.4	特高压套管制造水平	512
20.8	特高压直流开关设备	512
20.8.1	特高压直流转换开关	512
20.8.2	特高压直流隔离开关和接地开关	515
20.8.3	特高压直流旁路开关	515
20.8.4	特高压直流开关设备试验	516
20.9	特高压直流测量装置	516
20.9.1	特高压直流电压测量装置	516
20.9.2	特高压直流电流测量装置	517
	参考文献	518
第 21 章	直流接地极	519
21.1	接地极概述	519
21.1.1	接地极的作用	519
21.1.2	接地极的种类	519
21.1.3	接地极运行特点	522
21.2	接地极设计	523
21.2.1	设计原则	523
21.2.2	极址的确定	526
21.2.3	极体设计	527