



国家电网公司
电力科技著作出版项目

高压直流输电 设计手册

GAOYA ZHILIU SHUDIAN
SHEJI SHOUCHE

中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

高压直流输电 设计手册

GAOYA ZHILIU SHUDIAN
SHEJI SHOUC

中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本手册系统地介绍了高压直流输电工程设计的内容、要求、方法和技术方案,主要适用于电力系统、送电电气、送电土建、变电一次、变电二次、总图、建筑、结构、水工、暖通等与高压直流输电工程设计相关的专业。

本手册主要涵盖电流源型两端换流站和背靠背换流站、直流线路、直流感地极及接地极引线的设计,包括电力系统论证及其对直流输电工程的要求,换流站成套设计和电气接线、布置、设备选择及二次系统设计,通信设计,总图设计,阀厅等建构筑物设计及噪声防护设计,阀冷却、水工及采暖通风系统设计,接地极及接地极引线设计,直流线路电气及杆塔设计等。

本手册用作高压直流输电工程设计人员的专业技术工具书,可供从事高压直流输电工程建设、施工、调试、运行、维护及直流输电设备制造等专业人员使用,也可作为大专院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高压直流输电设计手册 / 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司编著. —北京: 中国电力出版社, 2017.9
ISBN 978-7-5198-1199-0

I. ①高… II. ①中… III. ①高压输电线路—直流输电线路—设计—手册 IV. ①TM726-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 239477 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

策划编辑: 张 涛 王春娟

责任编辑: 丰兴庆 马 青 易 攀

责任校对: 闫秀英 常燕昆 王开云 朱丽芳

装帧设计: 张俊霞 左 铭

责任印制: 邹树群

印 刷: 北京雅昌艺术印刷有限公司

版 次: 2017 年 12 月第一版

印 次: 2017 年 12 月北京第一次印刷

开 本: 889 毫米×1194 毫米 16 开本

印 张: 70.25

字 数: 2666 千字

印 数: 0001—1500 册

定 价: 318.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

序

直流输电是 20 世纪 50 年代发展起来的一种新型输电方式，它将送端交流电变换为直流电，通过直流输电线路进行输送，在受端再将直流电变换为交流电。与交流输电相比，直流输电具有诸多优点，因此世界上大功率长距离输电、海底电缆送电、交流系统间异步联网等均广泛采用直流输电技术。自 1954 年瑞典哥特兰岛世界上第一个高压直流输电工程投运以来，全世界陆续已有 110 多个高压直流输电工程建成投运。

我国能源主要是煤电和水电，且主要集中在西部及华北地区，而能源需求最大的地区则主要集中在京津、华东及华南地区，能源产地与需求地区之间的距离为 1000~3000km。这种能源与负荷分布严重不平衡的现状不仅构成了我国电网“西电东送”和“北电南送”的基本格局，也使得高压直流输电在我国电网建设中得到了越来越广泛的应用。国内第一个远距离、大容量直流输电项目——葛洲坝—南桥±500kV 直流输电工程始建于 20 世纪 80 年代并于 1990 年建成，实现了华中与华东区域电网的互联及送电需求。其后第二个直流输电项目——±500kV 天生桥—广州直流输电工程于 2001 年投运，实现了西部水电向华南负荷中心的电力输送。随着三峡输变电工程建设和国家“西电东送”战略部署的全面实施，我国相继建设了三峡—常州、三峡—广东、贵州—广东等±500kV 直流输电工程以及西北—华中联网灵宝背靠背和华北—东北联网高岭背靠背直联联网工程。同时，更远距离、更大容量、更高电压等级的±660kV 宁东直流和±800kV 云南—广东、向家坝—上海、锦屏—苏南、哈密南—郑州、溪洛渡左岸—浙西、糯扎渡—广东、灵州—绍兴等特高压直流输电工程也先后投入商业运行。到 2020 年前，我国将建成大约 40 个高压直流输电工程，直流输电电压最高达到±1100kV。

我国高压直流输电虽然起步较晚，但发展迅速，无论是从输送容量还是输电距离，都已成为直流输电第一大国。随着国内高压直流输电建设高速而有序的发展，直流输电从系统研究到成套设计、从工程设计到设备制造已全面实现了国产化，标志着我国的直流输电工程建设已进入一个全新的发展时期。《高压直流输电设计手册》的编纂和出版，顺应了国内直流输电工程建设的新形势，高度契合了直流输电工程设计专业化和规范化的要求，将进一步提升我国高压直流输电的设计水平。

中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司自国内早期的葛洲坝—南桥±500kV 直流输电工程伊始，近三十年来作为主要设计单位参与国内直流输电工程建设的项目多达 30 余项，主持编制了多项直流输电工程设计国家标准和电力行业标准，在直流输电设计领域砥砺前行，积累了丰富的设计经验。本着全面实用、体现创新的宗旨，组织一批从事高压直流输电工程设计的专业技术骨干，编写了《高压直流输电设计手册》，并列入了国家电网公司电力科技著作出版资助项目。

《高压直流输电设计手册》主要对电流源型两端换流站和背靠背换流站、直流输电线路、直流接地极及接

地极引线各相关专业的设计内容和设计方法进行了系统的阐述，同时对电压源型直流换流站和多端直流换流站的设计也进行了初步论述。该书将为高压直流输电工程设计人员提供一本系统实用的工具书，并为从事高压直流输电工程建设、施工、调试、运行、维护及直流输电设备制造等专业人员和大专院校相关专业的师生提供一本注重实践的参考书。期望本手册的出版能进一步提升我国的高压直流输电工程设计水平，并为我国的直流输电技术发展和电网建设做出贡献！

谢国恩

2017年12月

前言

高压直流输电在远距离大容量输电、异步联网以及海底电缆送电等方面与交流输电相比具有明显的优势。自 20 世纪 80 年代葛洲坝—南桥 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电工程的建设开始，到正在建设中的准东—华东 $\pm 1100\text{kV}$ 特高压直流输电工程，两端高压直流输电工程电压涵盖了 $\pm 400\text{kV}$ 、 $\pm 500\text{kV}$ 、 $\pm 660\text{kV}$ 、 $\pm 800\text{kV}$ 、 $\pm 1100\text{kV}$ 各个等级，直流输送容量从 1200MW 到 $12\,000\text{MW}$ 已整整提升 10 倍，输送距离更是长达 3000 余千米；背靠背异步联网换流容量亦从 360MW 提高到 1250MW 。高压直流输电为实现“西电东送”“北电南送”和优化全国能源合理配置起到了重要的作用。

20 世纪，中国早期建设的高压直流输电工程基本上依靠国外的技术和设备。随着高压直流输电建设的迅猛发展，直流输电从系统研究到成套设计、从工程设计到设备制造已全面实现了国产化，标志着我国的直流输电工程建设进入一个全新的发展时期。为顺应这一新形势的要求，中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司在总结多年来大量工程设计实践经验的基础上，编纂了《高压直流输电设计手册》。

在编纂过程中，编写组依托多年以来在直流输电领域工程设计经验的积淀，基于对直流输电设计标准体系的系统化研究和多项国家标准、电力行业标准主持编制的经验，将直流输电技术与工程设计应用紧密结合，力求采辑精华，注重实用性，兼顾先进性，并与国家现行技术政策及规程规范保持协调一致，在一定程度上体现了直流输电技术的发展和最新科研成果以及新设备、新材料的应用。同时均衡把握理论性与实践性的篇幅比重，理论性内容尽量简明扼要起引导和铺垫作用，实践性内容体现工程实际应用，辅以设计常用的技术方案、计算公式、数据资料、图表曲线及工程实例和算例，期望对设计人员有较好的指导和参考作用。

本手册作为国内高压直流输电设计领域第一本综合性手册类工具书，系统地介绍了高压直流输电工程各相关专业的设计内容和设计方法，涵盖电流源型两端换流站和背靠背换流站、直流输电线路、直流接地极及接地极引线的设计，对电压源型直流换流站和多端直流换流站的设计也有一定程度的涉及。同时为突出重点，本手册内容主要针对高压直流输电工程中有关直流部分的设计，与交流变电站和交流输电线路设计相同的内容原则上不涉及。

手册共分 39 章，其主要内容有：高压直流输电设计技术概论、高压直流输电系统性能、电力系统方案论证及其对直流输电工程的要求、直流输电系统电磁环境、换流站电气主接线、主回路参数计算、交流滤波器设计、直流滤波器设计、换流站电力线载波干扰和无线电干扰、换流站过电压保护与绝缘配合、暂态过电流计算、换流站电气设备选择、换流站电气布置、换流站站用电系统、换流站控制系统、高压直流输电系统保护、换流站二次辅助系统、换流站二次回路设计及布置、换流站通信设计、换流站总图设计、换流站建（构）筑物设计、换流站供水及消防、换流站阀冷却系统、换流站供暖通风及空调、换流站噪声控制、接地极及其

引线设计、高压直流输电系统试验、电压源型直流输电系统、多端直流输电系统、直流输电系统损耗、高压直流输电系统可靠性、直流线路电磁环境、直流线路导地线选择、直流线路绝缘配合、直流线路防雷设计、直流线路对地及交叉跨越、对有线和无线通信设施的影响及防护和直流线路杆塔设计等。所述内容不涉及设计单位相关专业的任何设计分工。

手册第一、二、五~九、十一~十五、二十七、二十九~三十二章由曾静组织编写，由谢国恩和梁言桥审校；第三、四章由陈凌云编写，林廷卫审校；第十、二十章由杜明军组织编写，由谢国恩和林廷卫审校；第十六~十九、二十八章由张巧玲组织编写，由谢国恩和梁言桥审校；第二十一~二十六章由吴必华组织编写，陈一军审校；第三十三~三十九章由赵全江组织编写，吴庆华和王钢审校。全书由李苇和彭开军统稿校对，由谢国恩总审定。

在本手册编写过程中，得到了中国南方电网有限责任公司专家委员会主任委员、中国工程院院士李立浯和国家电网原网联直流工程咨询公司经理、国内知名直流输电技术专家陶瑜的大力支持，同时还得到了国网北京经济技术研究院和南方电网科学研究院的大力协助，在此一并表示深深的谢意。编写组还要对书中所列参考文献的作者表示感谢。

除高压直流输电的设计内容之外，本手册还涉及直流输电理论、技术以及设备、试验等相关内容，涉及面较广，且资料、数据、图表、公式曲线数量较大，同时由于直流输电技术发展较快，新型设备的应用亦不断出现，加之编写人员水平有限，难免出现谬误及不妥之处，恳请高压直流输电行业的读者将发现的问题和错误及时反馈给编写组，以便再版时修正。

编 者

2017 年 12 月

目 录

序
前言

第一章 高压直流输电设计技术概论	1
第一节 直流输电的系统构成、技术特点及应用	1
一、直流输电的系统构成	1
二、直流输电技术的特点	4
三、直流输电技术的应用	5
第二节 直流输电技术发展	7
一、国外直流输电发展	7
二、国内直流输电发展	8
三、国内已投运的直流输电工程	10
四、国内在建直流输电工程	13
第三节 直流输电工程设计主要内容	13
参考文献	15
第二章 高压直流输电系统性能	16
第一节 高压直流输电系统的稳态性能	16
一、直流输电系统额定值	16
二、直流输电系统运行方式	17
三、直流输电系统稳态运行特性及控制方式	18
四、直流输电系统无功功率补偿	22
五、直流输电系统交流侧滤波	22
六、直流输电系统直流侧滤波	23
七、直流输电系统可听噪声	23
八、直流输电系统损耗	23
九、直流输电系统可靠性	24
十、直流偏磁	25
第二节 高压直流输电系统的故障	25
一、换流器故障	25
二、换流站直流配电装置及接地极故障	26
三、换流站交流侧故障	26
四、直流线路故障	27
第三节 高压直流输电系统的动态性能	27
一、直流系统的响应	27
二、换流器在交流系统故障期间的运行	31
三、直流输电回路谐振	31
四、直流输电系统调制	31
五、直流输电系统引起的次同步振荡	32
参考文献	32
第三章 电力系统方案论证	33
第一节 电力系统方案论证主要内容及基本原则	33
一、电力系统方案论证的主要内容	33
二、电力系统方案论证的基本原则	33
第二节 高压直流输电工程建设必要性	33
一、输电方式选择	33
二、直流输电工程在系统中的地位和作用	34
三、直流输电工程建设时机	34
第三节 高压直流输电工程系统方案	34
一、输电容量	34
二、输电电压等级	35
三、直流输电工程的起落点选择	37
四、送受端换流站接入系统方案设计	37
第四节 高压直流输电线路导线截面选择	38
一、导线截面选择的主要原则和思路	38
二、导线载流量及经济电流密度	38
三、输电损耗	40
四、经济比较	40
第四章 电力系统对直流输电工程的要求	42
第一节 电气计算	42
一、潮流计算	42
二、稳定计算	42
三、短路电流计算	42
四、短路比	43
第二节 直流系统运行方式	43
一、直流系统运行接线方式	43
二、直流系统运行工作方式	44
三、孤岛运行方式	45
第三节 换流站无功配置	45
一、无功配置原则	45
二、换流站无功消耗	46
三、交流系统无功支持能力	47
四、换流站无功分组容量	47
五、换流站无功平衡与无功配置方案	48

第四节 交流系统谐波阻抗计算分析	49	第三节 直流侧接线	73
一、交流系统谐波阻抗概述	49	一、一般要求	73
二、谐波阻抗模型	50	二、整流站直流侧接线	73
三、运行方式选择	50	三、逆变站直流侧接线	76
四、谐波阻抗计算结果	50	四、融冰接线	76
第五节 次同步振荡及自励磁	51	第四节 交流侧接线	79
一、换流站近区机组次同步振荡	51	一、一般要求	79
二、换流站近区机组自励磁	52	二、交流配电装置接线	79
第六节 交流系统内过电压和潜供电流计算	53	三、交流滤波器区接线	80
一、内过电压和潜供电流计算概述	53	第五节 直流换流站电气主接线示例	82
二、工频过电压	53	参考文献	82
三、谐振过电压	54	第七章 主回路参数计算	83
四、操作过电压	54	第一节 主回路参数计算目的及计算流程	83
五、潜供电流和恢复电压	55	一、主回路参数计算目的	83
第七节 多馈入直流输电	56	二、主回路参数计算流程	83
第八节 直流系统调制功能	56	三、电气量符号及定义	83
一、直流系统调制功能概述	56	第二节 环境条件和系统数据	84
二、功率调制功能	57	一、环境条件	84
三、频率控制功能	57	二、交流系统数据	84
四、电压控制功能	57	三、直流系统条件	84
五、多回直流协调控制	57	第三节 主回路参数计算方法	86
参考文献	57	一、直流电压计算	86
第五章 直流输电系统电磁环境	58	二、直流电压差计算	87
第一节 换流站的电磁环境	58	三、相对感性和阻性压降计算	87
一、电场	58	四、换相角计算	87
二、磁场	59	五、无功功率消耗计算	88
三、通信干扰	59	六、阀侧电压和电流计算	88
四、可听噪声	59	七、换流变压器额定容量计算	88
五、换流变压器直流偏磁	59	八、换流变压器短路阻抗	88
第二节 换流站的电磁兼容防护	60	九、换流变压器变比和分接开关计算	88
一、传导防护设计	60	第四节 直流系统运行特性计算	89
二、辐射防护设计	60	一、运行特性参数	89
参考文献	62	二、运行特性参数输出结果	89
第六章 换流站电气主接线	63	三、运行特性的计算手段	89
第一节 换流站电气主接线的设计原则	63	第五节 直流主回路参数计算工程算例	91
一、电气主接线的构成	63	一、计算条件	91
二、电气主接线的设计依据	63	二、直流系统主回路参数计算	92
三、电气主接线的设计要求	64	三、运行特性计算	95
第二节 换流器单元接线	65	参考文献	96
一、一般要求	65	第八章 交流滤波器设计	97
二、每极单 12 脉动换流器单元接线	66	第一节 交流侧谐波分析	97
三、每极双 12 脉动换流器单元串联接线	68	一、交流侧谐波来源	97
四、每极双 12 脉动换流器单元并联接线	70	二、交流侧谐波的危害	97
五、背靠背换流器单元接线	72	三、换流器产生的谐波计算	97

四、实际谐波电流的选取	101
第二节 交流滤波器滤波原理	101
一、交流滤波性能指标	101
二、交流滤波器滤波原理	102
三、交流滤波器类型	103
四、滤波器形式选择原则	106
五、实际工程交流滤波器形式选择	107
第三节 交流滤波器的计算	107
一、设计思路和流程	107
二、设计输入条件	108
三、滤波性能计算	108
四、稳态定值计算	110
五、暂态定值计算	111
第四节 交流滤波器设计实例	113
一、计算软件界面	113
二、计算条件	114
三、设计过程	117
四、性能计算结果	121
五、定值计算结果	121
参考文献	124
第九章 直流滤波器设计	125
第一节 设计一般要求	125
一、直流滤波器的作用	125
二、感应噪声及其抑制	125
第二节 噪声干扰电压及其等效干扰电流的取值	126
一、直流滤波器设计判据	126
二、直流滤波器性能指标计算原则	127
三、直流输电线路谐波电流对公众电话音频干扰的分析	127
四、高压直流工程直流滤波器性能指标及通信干扰情况	128
五、 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流工程直流滤波器性能指标	128
第三节 直流侧谐波分析	129
一、特征谐波	129
二、非特征谐波	130
三、实际谐波电压的选取	130
第四节 直流滤波器设计	130
一、直流滤波器选型	130
二、典型直流工程直流滤波器配置方案	133
三、直流滤波器性能计算	133
四、直流滤波器定值计算	134
五、直流滤波系统构成	136
第五节 直流滤波器设计实例	139

一、计算条件	139
二、计算软件界面	140
三、满足性能要求的配置方案	142
四、稳态定值计算结果	143
五、暂态定值计算结果	145
参考文献	146
第十章 换流站电力线载波干扰和无线电干扰	147
第一节 换流站高频噪声的影响和限值	147
一、换流站高频噪声对载波通信和无线电通信的影响	147
二、换流站 PLCI 和 RI 限值	148
第二节 换流站 PLCI 和 RI 计算	148
一、计算模型	148
二、噪声源	149
三、仿真计算	150
第三节 PLC 和 RI 噪声的抑制	151
一、PLC 和 RI 噪声干扰的抑制措施	151
二、交流线路 PLC 噪声衰减计算	152
三、PLC 噪声测量实例	154
四、PLC 和 RI 噪声滤波器配置原则	158
第四节 PLC 和 RI 噪声滤波器设计	159
一、PLC 和 RI 噪声滤波器典型型式	159
二、PLC 和 RI 噪声滤波器设计基本步骤	159
三、PLC 和 RI 噪声滤波器降噪性能仿真计算	160
四、PLC 和 RI 噪声滤波器典型案例	161
参考文献	162
第十一章 换流站过电压保护与绝缘配合	163
第一节 过电压与绝缘配合研究的目的和方法	163
一、过电压与绝缘配合研究的主要内容和目的	163
二、过电压与绝缘配合研究的方法和步骤	163
第二节 内部过电压保护	164
一、暂时过电压	164
二、操作过电压	164
三、陡波前过电压	165
第三节 雷电过电压保护	166
一、直击雷保护	166
二、雷电侵入波保护	170
第四节 换流站的绝缘配合	172
一、换流站避雷器配置及参数初选	172
二、换流站过电压研究	179
三、换流站主要设备绝缘水平的确定	181

四、避雷器配置方案及参数实例	182
第五节 换流站外绝缘	189
一、换流站空气净距计算	189
二、换流站直流爬电比距确定	192
三、海拔修正	194
第六节 计算实例	197
一、 $\pm 500\text{kV}$ 换流站典型工程过电压及绝缘配合计算	197
二、 $\pm 800\text{kV}$ 换流站典型工程过电压及绝缘配合计算	200
三、背靠背换流站典型工程过电压及绝缘配合计算	205
参考文献	208
第十二章 暂态过电流计算	209
第一节 每极单 12 脉动换流器接线暂态过电流分析	209
一、故障类型	209
二、不同故障下暂态过电流计算方法	210
第二节 每极双 12 脉动换流器及背靠背换流器接线暂态过电流分析	216
一、每极双 12 脉动换流器接线暂态过电流分析	216
二、背靠背换流器接线暂态过电流分析	217
第三节 暂态过电流计算算例	218
一、算例概述	218
二、详细计算	219
第四节 暂态过电流仿真结果	224
第十三章 换流站电气设备选择	226
第一节 设备选择的一般要求	226
一、总的原则	226
二、技术条件	226
三、环境条件	226
第二节 换流阀	227
一、换流阀性能要求	227
二、换流阀型式选择	229
三、换流阀其他要求	232
第三节 换流变压器	232
一、一般要求	232
二、换流变压器型式选择	233
三、换流变压器参数选择	233
第四节 平波电抗器	235
一、平波电抗器的配置	235
二、平波电抗器型式选择	236
三、平波电抗器参数选择	237

第五节 开关设备	238
一、直流转换开关	238
二、直流旁路开关	240
三、直流隔离开关	241
四、交流断路器	243
第六节 直流测量装置	244
一、直流电流测量装置	244
二、直流电压测量装置	247
第七节 穿墙套管及绝缘子	248
一、型式选择	248
二、参数选择	248
参考文献	249
第十四章 换流站电气布置	250
第一节 设计原则与要求及换流站布置区域划分	250
一、总的原则与要求	250
二、换流站布置区域划分	250
第二节 换流区布置	251
一、设计原则	251
二、两端直流输电系统换流站换流区布置	251
三、背靠背换流站换流区布置	264
第三节 阀厅电气布置	266
一、设计原则	266
二、采用二重阀的阀厅电气布置	267
三、采用四重阀的阀厅电气布置	275
四、背靠背换流站阀厅电气布置	281
第四节 直流配电装置布置	287
一、设计原则	287
二、每极单 12 脉动换流器的双极系统换流站直流配电装置	287
三、每极双 12 脉动换流器串联的双极系统换流站直流配电装置	289
四、户内直流配电装置	293
第五节 交流配电装置布置	295
一、设计原则	295
二、屋外 HGIS 布置	296
三、屋外 GIS 布置	296
四、屋内 GIS 布置	301
五、换流变压器进线回路 PLC 设备的布置	302
第六节 交流滤波器区布置	304
一、设计原则	304
二、交流滤波器区大组布置	304
三、交流滤波器区小组布置	308

第七节 电气总平面布置	313	一、系统构成	354
一、两端高压直流输电系统换流站电气		二、系统功能	356
总平面布置	313	三、通信及接口	359
二、背靠背换流站换流区域布置	313	第三节 极和换流器控制系统	360
第十五章 换流站站用电系统	320	一、基本控制策略	360
第一节 站用电系统接线	320	二、系统构成	361
一、站用电系统接线原则	320	三、系统功能	366
二、站用电源引接方式	320	四、直流远动系统	375
三、站用电电压等级及中性点接地方式	321	五、通信及接口	379
四、站用电接线	321	第四节 站控系统	381
五、站用电负荷	322	一、系统构成	381
六、站用电负荷供电方式	325	二、功能配置	383
七、检修供电网络	333	三、通信及接口	384
八、工程实例	333	第五节 换流阀的触发控制系统	385
第二节 站用电系统设备选择	335	一、系统构成	385
一、站用电负荷统计及计算	335	二、功能配置	386
二、站用变压器选择	335	三、通信及接口	387
三、其他设备选择	338	第六节 工程实例	388
四、工程实例	339	参考文献	393
第三节 站用电气设备布置	341	第十七章 高压直流输电系统保护	394
一、布置原则	341	第一节 高压直流输电系统保护特点及要求	394
二、站用变压器的布置	341	一、直流系统保护特点	394
三、站用配电装置的布置	342	二、直流系统保护通用要求	395
四、工程实例	342	三、直流系统保护分区	396
第四节 站用电二次系统	345	四、直流系统保护动作出口	399
一、站用电控制系统	345	第二节 直流保护	400
二、继电保护	346	一、直流保护配置	400
三、备用电源自动投入	347	二、直流保护整定计算	410
第五节 新能源在站用电中的应用前景	349	三、装置及外部接口	412
一、概述	349	四、工程实例	413
二、太阳能光伏发电	349	第三节 换流变压器保护	416
三、太阳能光伏发电在换流站中的应用及		一、换流变压器保护配置	416
展望	350	二、换流变压器保护整定计算	421
参考文献	351	三、装置及外部接口	424
第十六章 换流站控制系统	352	四、工程实例	425
第一节 总体设计要求	352	第四节 直流滤波器保护	425
一、系统分层	352	一、直流滤波器保护配置	425
二、冗余要求	352	二、直流滤波器保护整定计算	429
三、性能要求	352	三、装置及外部接口	430
四、控制系统与保护配合要求	353	四、工程实例	431
五、控制系统与换流阀配合要求	353	第五节 交流滤波器及无功补偿电容器保护	432
六、不同技术路线对控制系统的影响及		一、交流滤波器及无功补偿电容器保护	
要求	353	配置	432
第二节 运行人员控制系统	354	二、交流滤波器及无功补偿电容器保护整定	

计算	438	七、通信及接口	485
三、装置及外部接口	439	第七节 图像监视及安全警卫系统	485
四、工程实例	440	一、监控范围	485
第六节 直流系统暂态故障录波	440	二、系统功能	485
一、直流系统暂态故障录波配置	440	三、系统设计	486
二、直流系统暂态故障录波装置技术要求	442	四、设备配置	488
三、直流系统暂态故障录波装置录波信号	443	五、设备布置及安装	491
四、装置及外部接口	444	第八节 设备状态监测系统	492
第七节 直流线路故障定位及监测	444	一、设备状态监测系统功能要求	492
一、直流线路故障定位系统	444	二、设备状态监测对象及参量	492
二、接地极线路故障监测系统	445	三、系统设备配置	493
参考文献	446	四、通信及接口	494
第十八章 换流站二次辅助系统	447	五、工程实例	495
第一节 站用直流电源系统	447	第十九章 换流站二次回路设计及布置	496
一、系统配置及接线	447	第一节 直流系统测量装置	496
二、负荷统计及设备选择	454	一、一般要求	496
三、监测、监控及信号	455	二、直流系统测量装置配置	496
四、通信及接口	457	三、直流系统测量装置的选用要求	500
第二节 交流不间断电源系统	457	四、工程实例	506
一、系统配置及接线	457	第二节 二次接线	510
二、负荷统计及设备选择	459	一、断路器及隔离开关二次接线	510
三、监测及信号	461	二、换流变压器二次接线	514
四、通信及接口	462	三、选相控制器配置及二次接线	517
第三节 阀冷却控制保护系统	462	四、控制电缆和控制光缆选择	519
一、系统构成	462	五、二次接地及抗干扰要求	520
二、阀冷却控制系统功能	463	第三节 二次设备布置	521
三、阀冷却保护系统功能	467	一、一般要求	521
四、设备配置及接口方案	468	二、控制楼二次设备布置	522
第四节 谐波监视系统	471	三、就地继电器小室布置	527
一、系统配置	472	四、直流及交流不间断电源设备布置	528
二、系统功能	473	第二十章 换流站通信设计	530
三、装置及外部接口	473	第一节 换流站业务信息种类及传输要求	530
第五节 全站时间同步系统	473	一、常规电网生产、调度及管理业务信息	530
一、系统结构	473	二、直流输电系统专有业务信息	531
二、系统功能	475	第二节 业务信息对传输通道及接口的要求	531
三、二次设备的时间同步要求	476	一、换流站至调度端的系统调度信息	531
四、工程实例	476	二、换流站与换流站的站间信息	531
第六节 火灾自动报警系统	476	三、换流站与变电站的站间信息	531
一、探测范围及区域划分	476	四、换流站图像监视信息	531
二、系统设计	478	五、换流站站内通信信息	531
三、火灾探测器的选择	483	第三节 换流站站间业务信息通道组织	532
四、系统设备的设置	483	一、电力系统主要通信方式	532
五、系统布线	484	二、光纤通道组织基本原则	532
六、系统供电	485	三、通道建设及带宽的选择原则	532

四、光纤纤芯的选择原则	532	第二节 消防	633
五、光纤通信中继站的设置原则	532	一、建筑物消防	633
六、换流站站间通道组织的实现方式	533	二、换流变压器及油浸式平波电抗器消防	634
七、直流输电工程通道建设及组织方案示意图	533	第二十四章 换流站阀冷却系统	638
第四节 直流远动通道传输时延计算	533	第一节 系统设计	638
第五节 站内通信及辅助设施	534	一、阀冷却系统功能及分类	638
一、系统调度交换机及行政交换机	534	二、阀内冷却系统	638
二、电力综合数据网及电力调度数据网	534	三、阀外冷却系统	640
三、广播系统	535	第二节 阀冷却设备	644
四、会议电视系统	535	一、阀内冷却设备	644
五、通信用房	535	二、阀外冷却设备	645
六、通信电源	535	第三节 设备及水管布置	650
七、综合布线	535	一、阀内冷却设备及水管布置	650
八、动力和环境监测系统	535	二、阀外冷却设备及水管布置	652
第二十一章 换流站总图设计	536	第二十五章 换流站供暖通风及空调	657
第一节 站址选择及总体规划	536	第一节 阀厅供暖通风及空调	657
一、站址选择	536	一、室内环境标准	657
二、总体规划	544	二、供暖设计	657
第二节 总平面及竖向布置	544	三、通风设计	658
一、总平面布置	544	四、空调设计	659
二、竖向布置	548	五、防火及排烟设计	663
第三节 道路及广场	550	第二节 控制楼供暖通风及空调	663
一、道路	550	一、室内环境标准	663
二、站区广场	553	二、供暖设计	664
第二十二章 换流站建(构)筑物设计	554	三、通风设计	664
第一节 阀厅设计	554	四、空调设计	667
一、一般说明	554	五、防火及排烟设计	676
二、建筑设计	555	六、空调集中监控系统	676
三、结构设计	581	第三节 换流站其他建筑物供暖通风及空调	677
第二节 控制楼设计	595	一、户内直流场供暖通风及空调	677
一、一般说明	595	二、换流变压器隔声罩通风	677
二、建筑设计	595	第二十六章 换流站噪声控制	678
三、结构设计	608	第一节 概述	678
第三节 其他建(构)筑物设计	613	一、噪声	678
一、户内直流场	613	二、声学基础知识	678
二、综合楼	621	三、噪声控制原则	680
三、换流变压器及油浸式平波电抗器基础	623	四、噪声控制主要内容	680
四、搬运轨道基础	624	第二节 噪声控制标准	680
第二十三章 换流站供水及消防	627	一、环境噪声控制标准	680
第一节 供水	627	二、站界噪声排放限值	681
一、换流站用水	627	三、工作场所噪声控制标准	681
二、供水水源	628	四、噪声监测要求	681
三、给水系统	629	第三节 设备噪声源	683
		一、换流变压器	683

二、电抗器	683	五、其他参数	725
三、电容器	684	六、数据处理	725
四、空气冷却器噪声	684	第五节 接地极主要材料	727
五、其他噪声源	684	一、馈电元件材料	727
六、声源的典型声功率级和频谱特性	685	二、活性填充材料	730
第四节 噪声预测	686	三、实际工程应用技术	731
一、预测软件	686	第六节 接地极设计	731
二、预测模型	686	一、接地极类型及其选择	731
三、预测方法	687	二、接地极布置形状及其选择	732
四、预测内容	691	三、电极形状的优化	735
五、预测结果	691	四、接地极临界尺寸	736
第五节 噪声控制措施	692	五、接地极埋深	738
一、站址选择及总平面布置	692	六、导流系统	739
二、噪声源控制	693	七、辅助设施	741
三、控制传播途径	694	八、计算示例	742
四、接收者的听力保护	699	第七节 特殊型接地极设计	743
第六节 常用声学材料和工程实例	699	一、目的与概念	743
一、常用声学材料的规格及性能要求	699	二、共用接地极(址)	744
二、换流站噪声预测及控制方案实例	701	三、紧凑型接地极	746
第二十七章 接地极及其引线设计	705	四、分体式接地极	750
第一节 概述	705	五、垂直型接地极	751
一、接地极的作用	705	第八节 接地极电流对周边设施的影响	755
二、接地极运行特性	706	一、对电力系统的影响	755
三、对接地极引线的要求	706	二、对埋地金属构件的影响	760
四、大地回线运行方式的优缺点及设计要点	707	三、对铁路系统的影响	767
第二节 设计技术条件	707	第九节 接地极恒定电流场及温升计算	767
一、系统条件	707	一、恒定电流场计算方法	767
二、腐蚀寿命	708	二、温升计算方法	774
三、最大允许跨步电位差	709	三、ETTG 软件功能简介	778
四、最高允许温升	711	第十节 接地极引线设计	780
五、溢流密度	712	一、导电线截面选择	780
六、临界接地电阻	712	二、绝缘配合	782
七、电磁环境	713	三、绝缘子串设计	788
第三节 接地极址选择	713	四、其他特殊设计要求	788
一、对极址的一般要求	713	参考文献	789
二、极址选择一般工作流程	714	第二十八章 高压直流输电系统试验	790
三、规划选址	714	第一节 功能试验和动态性能试验	790
四、工程选址	718	一、功能试验(FPT)	790
第四节 极址参数测量与勘探	720	二、动态性能试验(DPT)	791
一、大地(土壤)电阻率	721	三、试验系统	792
二、土壤热容率、热导率	724	第二节 设备试验	793
三、地形图	724	第三节 分系统试验	793
四、基岩埋深图	724	一、一次设备分系统试验	793
		二、二次设备分系统调试	795

三、辅助设备分系统调试·····	796	第八节 控制保护·····	834
第四节 站系统试验·····	797	一、电压源型直流控制保护技术特点·····	834
一、试验目的·····	797	二、电压源型直流控制系统·····	835
二、试验内容·····	797	三、电压源型直流保护系统·····	840
第五节 端对端系统试验·····	799	第九节 发展与展望·····	845
一、试验目的·····	799	参考文献·····	845
二、试验内容·····	799	第三十章 多端直流输电系统 ·····	846
参考文献·····	801	第一节 概述·····	846
第二十九章 电压源型直流输电系统 ·····	802	一、技术特点·····	846
第一节 概述·····	802	二、发展概况·····	846
一、技术特点·····	802	三、接线方式及比较·····	846
二、应用领域·····	803	第二节 并联电流源型多端直流输电系统·····	848
三、技术路线·····	806	一、典型工程系统接线·····	848
第二节 运行特性·····	809	二、控制系统·····	850
一、伏安特性·····	809	三、保护系统·····	851
二、功率特性·····	810	第三节 并联电压源型多端直流输电系统·····	852
三、谐波特性·····	811	一、典型工程·····	852
第三节 电气主接线·····	812	二、控制系统·····	852
一、系统接线方式·····	813	三、保护系统·····	856
二、交流侧接线·····	814	第四节 关键技术及展望·····	856
三、直流侧接线·····	815	一、关键技术·····	856
四、直流系统接地方式·····	815	二、展望·····	857
第四节 主回路参数计算·····	816	参考文献·····	858
一、子模块数量确定·····	817	第三十一章 直流输电系统损耗 ·····	859
二、子模块电容器电容值确定·····	818	第一节 换流站的损耗·····	859
三、出口连接电抗值·····	819	一、换流站损耗分类及计算条件·····	859
四、联接变压器变比·····	820	二、换流站损耗的确定·····	859
五、联接变压器分接开关·····	820	第二节 直流线路损耗·····	864
六、功率运行范围复核·····	821	一、电阻损失·····	864
七、启动电阻·····	821	二、电晕损失·····	864
八、直流电抗器·····	823	三、直流线路电能损失分析·····	865
第五节 过电压与绝缘配合·····	823	四、算例·····	866
一、考虑的过电压类型·····	823	第三节 接地极系统损耗·····	866
二、避雷器配置原则及类型·····	824	一、接地极线路损耗·····	866
第六节 主设备选型·····	825	二、接地极损耗·····	867
一、换流阀·····	826	参考文献·····	868
二、联接变压器·····	829	第三十二章 高压直流输电系统可靠性 ·····	869
三、桥臂电抗器·····	829	第一节 可靠性评价指标·····	869
四、启动电阻器·····	830	一、术语定义·····	869
五、直流电抗器·····	830	二、评价指标·····	871
六、测量装置·····	830	三、设计目标·····	871
第七节 典型布置·····	830	第二节 可靠性评估方法·····	871
一、换流站布置基本特点·····	830	一、高压直流输电系统子系统划分·····	872
二、换流站典型布置型式·····	830	二、可靠性评估方法简介·····	872

第三节 提高直流输电系统的可靠性措施	873	一、导线选择原则	930
一、直流输电系统设计的要求	873	二、导线选择流程	930
二、影响直流输电系统可靠性的主要因素	873	三、常用导线型式分类及用途	930
三、提高直流输电系统可靠性的主要措施	875	第二节 导线截面	934
第四节 部分直流输电系统可靠性指标统计表	877	一、电流密度	934
参考文献	881	二、经济电流密度	934
第三十三章 直流线路电磁环境	882	三、允许载流量	935
第一节 电晕	882	第三节 导线电磁环境	936
一、电晕现象	882	一、电磁环境限值	936
二、起晕电场强度	882	二、电磁环境计算	936
三、导线表面电场强度计算	883	三、电磁环境对导线外径的要求	936
四、电晕损失	887	第四节 电线机械性能	937
五、算例	891	一、设计安全系数	937
第二节 电场效应	891	二、铝部应力	937
一、电场效应原理及特点	891	三、弧垂特性	938
二、人在直流输电线路下的感受	892	四、悬点应力和允许高差	939
三、合成电场与离子流密度的限值	893	五、风偏特性	939
四、合成电场与离子流密度测量	893	六、荷载特性	939
五、合成电场强度与离子流密度计算方法	894	第五节 地线选择	939
六、算例	898	一、地线型式	939
七、典型单回双极直流线路的合成电场与离子流密度	899	二、地线机械性能	940
第三节 无线电干扰	909	三、地线表面电场强度	940
一、无线电干扰的形成机理与特性	909	四、耐雷性能	941
二、无线电干扰的计量和测量	911	五、地线热稳定要求	941
三、无线电干扰的限值	911	第六节 经济性比较	944
四、无线电干扰的预估	912	一、初期投资	944
五、典型单回双极直流线路的无线电干扰	913	二、损耗及运行维护费用	945
六、算例	917	三、资金的时间价值	945
第四节 可听噪声	918	四、全寿命周期经济性比较方法	946
一、可听噪声产生机理与特性	918	五、算例	947
二、可听噪声的计量和测量	919	第七节 导地线资料	948
三、可听噪声限值	920	一、说明	948
四、可听噪声的预估方法	920	二、钢芯铝绞线	950
五、典型直流线路的可听噪声	921	三、钢绞线	956
六、算例	925	四、铝合金绞线	956
第五节 磁场	926	五、铝包钢绞线	958
一、磁场限值	926	六、钢芯铝合金绞线	960
二、直流线路磁场的计算	926	七、铝合金芯铝绞线	962
第六节 相关标准	927	八、铝包钢芯铝绞线	964
一、国外无线电干扰限值标准	927	参考文献	967
二、国外可听噪声限值标准	928	第三十五章 直流线路绝缘配合	968
参考文献	928	第一节 直流线路绝缘配合特点	968
第三十四章 直流线路导地线选择	930	一、直流线路绝缘子的积污特性	968
第一节 导线选择	930	二、直流线路绝缘子的污闪特性	968