

国家电网公司



STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

特高压直流输电技术

研究成果专辑

(2011年)

主 编 刘振亚



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

TM726
1032



NUAA2014022725

TM726
1032-1

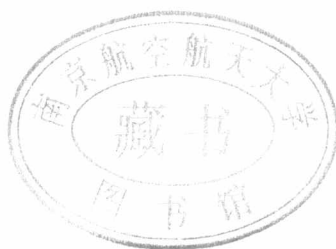
特高压 直流 输电技术

研究成果专辑

(2011年)

主 编 刘振亚

副主编 舒印彪 郑宝森



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

2014022725

内 容 提 要

本书是国家电网公司对 2011 年特高压直流输电工程建设情况和特高压直流输电技术成果的全面回顾和总结,可帮助读者全面了解国家电网公司 2011 年特高压直流输电技术研究取得的成果和特高压直流输电技术的发展历程。

本书共分 8 章,第 1 章简要回顾了国家电网公司 2011 年在特高压直流输电建设方面的工作,概述了 2011 年特高压直流输电工程技术研究取得的主要成果;第 2 章为 $\pm 1100\text{kV}$ 特高压直流输电技术前期论证;第 3 章为 $\pm 1100\text{kV}$ 特高压直流关键技术研究;第 4 章为 $\pm 1100\text{kV}$ 特高压直流设备技术规范研究;第 5 章为换流变压器现场组装技术研究;第 6 章为大规格角钢在特高压直流输电线路工程中的应用研究;第 7 章为 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电线路同塔双回技术研究;第 8 章为 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电线路极间距优化研究。

本书可供从事特高压直流输电技术设计、研究、工程建设方面的技术人员和相关管理人员使用,也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

特高压直流输电技术研究成果专辑. 2011 年 / 刘振亚主编. —北京: 中国电力出版社, 2013.11

ISBN 978-7-5123-4309-2

I. ①特… II. ①刘… III. ①特高压输电—直流输电—输电技术—研究 IV. ①TM726.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 071036 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 11 月第一版 2013 年 11 月北京第一次印刷

880 毫米 $\times$ 1230 毫米 16 开本 23.25 印张 448 千字

印数 0001—1000 册 定价 110.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

编写人员名单

主 编	刘振亚						
副 主 编	舒印彪	郑宝森					
成 员	李文毅	刘泽洪	郭剑波	高理迎	丁永福	刘开俊	
	种芝艺	马为民					
编写组组长	刘泽洪	丁永福	高理迎	种芝艺			
编写组副组长	王祖力	余 军	孙 涛	郭贤珊	黄 勇	但 刚	
编写组成员	张 进	赵江涛	郝 鑫	胡志义	王 洪	李 彪	
	张友富	蒋维勇	杨一鸣	张 涛	张 蕾	曹燕明	
	聂定珍	周 静	余世峰	付 颖	吴方劼	李璟延	
	张宗鑫	申笑林	赵 铮	张翠霞	朱艺颖	廖蔚明	
	鞠 勇	王相中	董占明	孙优良	李 博	祁 明	
	赵勇进	巩跟盼	官 澜	齐立忠	陈大斌	王虎长	
	王学明	杨 艺	吴海洋	杨靖波	邢海军	张刘春	
	丁玉剑	鞠 勇	李 健	刘文勋	冯 衡	秦 博	
	李 晋	李本良	陆家榆	王 辉			

前 言

±800kV 级直流输电工程是目前世界上电压等级最高的直流输电工程，国外虽曾进行过一些研究，但无实际工程运行经验。为攻克±800kV 级直流输电工程关键技术，国家电网公司于 2005 年初启动了特高压直流输电工程关键技术研究 and 可行性研究，组织电力系统各科研、咨询、设计单位和相关高等院校，开展了直流输电系统电磁环境、过电压与绝缘配合、外绝缘特性、特高压直流换流器接线方式等关键技术的研究，取得了丰硕的研究成果，为输电线路设计、换流站设计、主要设备设计和制造提供了技术依据。

自 2010 年 7 月 8 日，我国自主研发、设计和建设的向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程（简称向上工程）成功投入运行后，锦屏—苏南、溪洛渡—浙西、哈密—郑州等特高压直流输电工程陆续开工建设，这标志着±800kV 特高压直流输电技术得到了广泛地认可和全面推广应用。

为进一步发展特高压直流输电技术，充分发挥特高压直流输电经济合理、环境友好的技术优势，2011 年，国家电网公司着手开展±1000kV 及以上直流输电关键电压等级论证、过电压与绝缘配合、外绝缘等关键技术研究，制订并发布了±1100kV 特高压直流输电设备技术规范；针对±1100kV 特高压直流换流变压器运输问题，开展了换流变压器现场组装研究。同时，开展了大角钢应用、特高压直流同塔双回技术方案、极间距优化等±800kV 特高压直流输电技术深化研究。

为了及时总结特高压直流输电技术成果，国家电网公司组

织相关单位，自 2005 年起按年度编写出版《特高压直流输电技术研究成果专辑》。本书为《特高压直流输电技术研究成果专辑（2011 年）》，系统介绍了 2011 年度完成的研究成果，共分为 8 章：第 1 章主要回顾了 2011 年特高压直流输电工程建设工作情况，概述了 2011 年取得的主要研究成果；第 2 章给出了 $\pm 1100\text{kV}$ 特高压直流输电技术前期论证；第 3 章给出了过电压与绝缘配合、外绝缘和电磁环境研究；第 4 章给出了换流变压器、换流阀、直流场设备等 $\pm 1100\text{kV}$ 特高压直流设备技术规范研究；第 5 章论述了换流变压器现场组装技术；第 6 章为大规格角钢在特高压直流线路工程中的应用研究；第 7 章给出了 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电线路同塔双回技术研究；第 8 章给出了 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电线路极间距优化研究。本书可帮助读者全面了解 2011 年特高压直流输电技术研究取得的科研和建设成果。

2011 年，广大的特高压直流输电工程科研及建设工作者全力以赴、通力合作，克服了重重困难，取得了丰硕的研究成果，圆满完成了特高压直流输电技术既定科研任务，为特高压电网的多元化发展和后续特高压直流输电工程的成功建设及运行，积累了宝贵建设经验，作出了巨大的贡献。在此向广大特高压直流输电工程建设者表示崇高的敬意。同时一并对参与本书编写及为本书的编辑出版提供支持和帮助的单位和个人表示衷心的感谢！

国家电网公司

2013 年 7 月

目 录

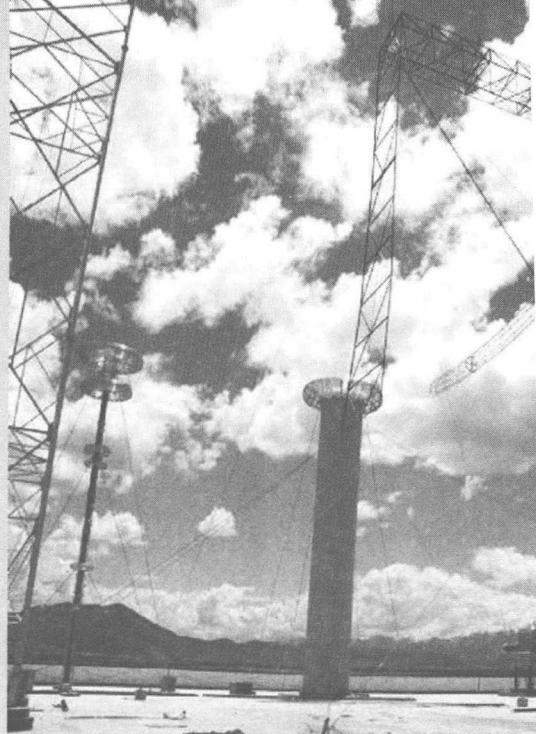
前言

第 1 章 绪论	1
第 1 节 2011 年特高压直流输电工程建设工作回顾	2
第 2 节 2011 年特高压直流输电技术主要研究成果概述	4
第 2 章 $\pm 1100\text{kV}$ 特高压直流输电技术前期论证	6
第 1 节 直流系统研究及换流站成套概念设计	7
第 2 节 关键设备可行性研究	20
第 3 节 换流站概念设计	44
第 4 节 直流输电线路概念设计	51
第 5 节 1000kV 及以上电压等级输电技术可行性分析	61
第 3 章 $\pm 1100\text{kV}$ 特高压直流关键技术研究	63
第 1 节 $\pm 1100\text{kV}$ 直流系统过电压与绝缘配合的研究	64
第 2 节 直流系统外绝缘研究	75
第 3 节 直流输电线路电磁环境研究	85
第 4 章 $\pm 1100\text{kV}$ 特高压直流设备技术规范研究	94
第 1 节 工程概况及使用条件	95
第 2 节 换流变压器	100
第 3 节 换流阀	127
第 4 节 穿墙套管	151

第5节	平波电抗器	155
第6节	旁路开关	162
第7节	直流极线高压隔离开关、接地开关	167
第8节	直流极线避雷器	169
第9节	800kV 交流滤波器小组断路器	172
第5章	换流变压器现场组装技术研究	178
第1节	现场组装厂房及工艺研究	179
第2节	油箱现场制造研究	188
第3节	组装物料运输及存储研究	196
第4节	现场检修研究	205
第5节	现场组装试验技术研究	213
第6章	大规格角钢在特高压直流输电线路工程中的应用研究	231
第1节	输电铁塔采用大规格角钢的技术优势	232
第2节	大规格角钢输电铁塔的加工制造	241
第3节	大规格角钢铁塔设计	250
第4节	大规格角钢真型塔试验	260
第5节	大规格角钢技术经济性分析	273
第7章	$\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电线路同塔双回技术研究	282
第1节	过电压与绝缘配合研究	283
第2节	外绝缘研究	293
第3节	电磁环境研究	299
第4节	设计方案研究	318
第8章	$\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电线路极间距优化研究	339
第1节	极间距控制因素分析研究	340
第2节	设计方案研究	353

2011

特高压直流输电技术研究成果专辑



第 1 章

绪 论



第1节 2011年特高压直流输电工程建设工作回顾

2011年,在国家电网公司党组的正确领导下,围绕直流输电工程建设重点工作,深入落实以集团化为核心的“四化”工作要求,强化自主创新,加强统筹策划,管理水平、创新能力和发展质量稳步提升,各项建设任务全面完成,各方面工作取得了显著成绩。

1 在建工程迅速推进

锦屏—苏南 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程(简称锦苏工程)裕隆换流站和同里换流站设计基本完成,施工图交付接近尾声。两种自主研制换流阀、平波电抗器均已通过型式试验,其他型式的换流阀正在进行型式试验;裕隆换流站共有9台低端换流变压器已通过型式试验或出厂试验,同里换流站低端换流变压器型式试验正在进行;裕隆换流站直流控制保护设备开始交付现场,两端交流设备交付基本完成。现场主控楼完成建筑施工,低端阀厅主体结构完成;交流滤波器设备安装基本完成,裕隆换流站GIS安装完成。锦苏工程全线铁塔已组立完成,全面进入架线阶段。

2 开工项目基本就绪

溪洛渡—浙西 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程(简称溪浙工程)、哈密南—郑州 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程(简称哈郑工程)已完成了换流站预成套和预初步设计,三通一平已完成施工图设计,交、直流主设备采购技术规范编制基本完成,目前正在根据新的800万kW的可研方案进行调整,预计2013年1月初全部完成。双龙换流站大件道路改造施工正在进行;双龙换流站和武义换流站场平正在进行进场前的开工准备。哈密换流站进站道路施工基本完成,哈密换流站和郑州换流站场平施工正在招标。高岭换流站扩建工程完成预成套和预初步设计并通过评审,主设备采购招标正在进行,现场已经开工建设。哈郑工程完成预初步设计评审,溪浙工程完成预初步设计,开展外业终勘工作。

3 国产化取得重大进展

以锦苏工程为依托,大力推进特高压直流设备国产化进程,实现了直流场设备中方总包、以国内为主的供货方式;低端换流变压器实现国内自主设计、自主供货,送

端 400kV 和 200kV 换流变压器均已通过型式试验考核, 高端换流变压器进口比例减少; 两种自主化换流阀首次实现工程试用, 目前均已通过型式试验考核。溪浙工程在此基础上进一步推动国产化工作, 制定了直流场设备取消总包以进一步降低进口设备比例、换流变压器不再进行整机进口的公开招标采购方案。

4 技术水平持续提升

一是深入推进 $\pm 1100\text{kV}$ 直流输电技术研发。完成空气间隙放电和污秽外绝缘特性等关键技术研究, 正式发布设备研制技术规范, 组织厂家完成换流变压器、穿墙套管等样机设计, 启动关键组部件制造; 大力推进换流变压器现场组装研究, 制订组装原则和详细组装方案, 组织国内外厂家和科研单位细化工程实施方案。

二是开展柔性直流输电技术研究。深入调研柔性直流技术, 全面分析柔性直流的技术经济优势以及国产化情况, 结合公司直流输电发展需求, 提出柔性直流输电工程建设策略和研发建议。

三是结合工程特点开展设计优化。持续优化换流站平面布置方案, 提出了改进型“田”字形的交流滤波器布置方案和更为紧凑的换流区域设计原则; 哈密换流站采用风冷结合水冷的阀冷却方案及设备防风沙设计, 有效解决了当地缺水、风沙大等自然条件的制约; 线路工程进一步优化了合成绝缘子的串长和最小极间距离, 全面推广应用大规格角钢, 对西北地区大风区开展 V 型串挂点优化和 Y 型串研究。

同时, 深入落实公司《关于进一步提高工程建设安全质量和工艺水平的决定》要求, 按照主要建构筑物 60 年、主要一次设备 40 年、主要二次设备 20 年的使用寿命目标, 大力推行工程全寿命周期管理理念, 组织设计、设备等工程建设主要环节系统梳理影响工程寿命和质量的设备、材料、工艺等关键点, 在设计方案和设备采购要求中落实反事故措施和质量提升要求, 避免片面追求基建成本最低倾向; 深入推行程序化工作流程、标准化设计模块、通用化设备接口、典型化施工工艺, 科学提高工程建设各个环节的工作效率和质量水平。组织编制国家电网公司直流输电线路工程提升建设质量实施指导意见。

5 工程建管模式进一步优化

根据公司“三集五大”体系建设的思路, 着眼于进一步强化属地公司的作用和进一步发挥直属单位专业化优势, 对换流站建设管理实施了一系列创新性的举措。换流站属地电力公司在承担原有的前期专题评估、征地拆迁、三通一平和地方关系协调等工作任务基础上, 选择浙江和辽宁省电力公司作为试点, 承担溪浙工程受端武义换流站和高岭换流站扩建工程的现场建设管理。为此, 有针对性地组织开展了各种形式的



直流技术培训和建设管理培训,提升两个省公司的专业化建管能力。

国家电网公司直流建设分公司一方面继续发挥其换流站建设管理方面的专业优势,负责哈密、郑州、溪洛渡等换流站的建管;另一方面进一步发挥其直流输电方面的技术优势,负责成套设计、直流设备监造、控制保护 FST 试验和现场分系统调试工作。

国家电网公司运行分公司进一步加大换流站建设的参与程度,更好地发挥监督、建议和配合作用。线路工程建设采取“总部统筹组织,省公司属地化管理与直属公司专业化指导相结合”的管理模式:属地省电力公司作为线路工程建设管理单位,负责直流输电线路工程现场建设管理工作,承担现场安全、质量、进度、投资控制责任及属地赔偿、协调等责任;国家电网公司直流建设分公司作为总部层面的专业管理公司,负责创优、安全文明施工等总体策划及中间检查工作;承担部分施工创新相关科研项目并在施工标准化、机械化等新技术推广方面提供技术支持;牵头组织开展全线业务指导与培训、质量工艺统一、流动红旗创建、安全质量检查、档案管理验收归档工作。

6 建设资源逐步充实

结合实际工程建设,采用“多引入、重合作、促竞争”的方式提前进行资源培育。

一是引入省设计院参与换流站设计,发挥省院属地优势结合地方特点开展设计工作,提高整体设计能力;线路工程采用联合设计模式,发挥属地设计单位优势,共享设计经验,统一设计原则,有效提升设计质量。

二是鼓励采用分包方式引入更多的设计、监理和施工队伍,加强培训,开展传、帮、带。

三是鼓励更多的设备厂家参与竞争,加快装备升级和产能提升,加快国产化进程。

四是充分加强国内和国际科研合作,提升整体研发和应用水平。

第2节 2011年特高压直流输电技术主要研究成果概述

2011年特高压直流输电技术研究成果主要为 $\pm 1100\text{kV}$ 特高压直流输电技术前期论证、过电压与绝缘配合等关键技术研究、设备技术规范编制、换流变压器现场组装研究、特高压直流输电线路大角钢技术、 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电线路同塔双回、 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电铁塔极间距优化研究等,共分为8章。

第2章首先针对 ± 1000 、 ± 1100 、 $\pm 1200\text{kV}$ 三个电压等级开展主回路参数计算,提出了各电压等级不同接线方案的主设备参数。接下来针对直流输电系统的关键设备进

行了参数设计的讨论,并从设备研制角度论证各电压等级输电系统的可行性。结合 $\pm 1100\text{kV}$ 直流系统主回路参数、过电压和绝缘配合、无功补偿与交流滤波器设计、直流滤波器设计等成套设计研究成果,对换流站电气接线、电气设备选择、电气布置、站用电系统等方面进行设计和研究。给出了 $\pm 1000\text{kV}$ 及以上电压等级直流输电线路的导线选择、绝缘配合、绝缘子串和金具选择、对地距离和走廊宽度、杆塔及基础等关键技术的设计研究。提出了更高电压等级选择影响因素、限制以及分析。

第3章 $\pm 1100\text{kV}$ 特高压直流系统过电压水平设备的绝缘水平是制约设备制造和大件运输的关键因素,而外绝缘特性和直流输电线路电磁环境指标直接关系到换流站和线路的设计尺寸,乃至整个工程的造价和系统的安全运行。本章针对 $\pm 1100\text{kV}$ 直流系统过电压与绝缘配合研究、直流系统外绝缘研究和直流输电线路电磁环境等关键技术,给出了三方面深入细致的研究,得出经济合理和安全可靠的性能指标,以指导工程的设计、建设和运行。

第4章以准东送出 $\pm 1100\text{kV}$ 特高压直流输电工程为依托,在正式发布的设备技术规范的基础上,总结了2011年国家电网公司 $\pm 1100\text{kV}$ 特高压直流设备规范取得的成果,给出了 $\pm 1100\text{kV}$ 特高压直流输电工程概况及设备使用条件,展示了设备规范的研究结果。

第5章针对 $\pm 1100\text{kV}$ 换流变压器电压等级高、容量大、难以运输的问题,提出了换流变压器现场组装技术。主要包括研究现场组装厂房及工艺研究、油箱现场制造研究、组装物料运输及存储研究、现场检修研究、现场组装试验技术研究5个方面。为 $\pm 1100\text{kV}$ 直流输电工程中换流变压器现场组装提供了技术参考,填补了我国在换流变压器现场组装方面的空白。

第6章针对 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电工程杆塔荷载特点,分析了大规格角钢的技术特点和优势,提出在特高压直流输电工程中研究和应用大规格角钢。开展了大规格角钢的技术参数、承载能力、设计技术、加工制造等关键课题研究,并进行了工程塔型的真型试验研究和验证。

第7章针对西北电力外送在河西走廊地区通道资源进展的问题,对 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电线路按同塔双回架设方式的主要技术问题:电磁环境、过电压和绝缘配合、空气间隙放电特性、防雷保护、工程设计方案及投资分析开展了研究,为 $\pm 800\text{kV}$ 同塔双回直流输电线路的工程实施奠定了基础。

第8章针对新建的 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电线路采用更大截面导线并减小了绝缘长度等因素,对极间距进行了优化。以溪浙工程为背景,综合考虑电磁环境、空气间隙和绝缘子长度,给出 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电线路采用 $6\times 900\text{mm}^2$ 导线并优化绝缘长度后在不同海拔下的极间距优化成果,并根据优化成果给出工程设计方案及经济性分析。



2011

特高压直流输电技术研究成果专辑

第 2 章

$\pm 1100\text{kV}$ 特高压直流输电 技术前期论证

发展 $\pm 1000\text{kV}$ 及以上特高压直流输电技术能够进一步增大特高压直流输电的经济输电距离,进一步提升特高压直流输电工程的输送能力,进一步发挥特高压电网在大范围、大规模、高效率优化配置能源资源,促进可再生能源开发利用等方面的重要作用,对于保障国家能源安全、优化国家能源结构、促进世界能源格局优化具有重大意义。

本章就更高电压等级直流输电可行性进行了以下专题研究。第1节针对 ± 1000 、 ± 1100 、 $\pm 1200\text{kV}$ 三个电压等级开展主回路参数计算,提出了各电压等级不同接线方案的主设备参数。接下来针对直流输电系统的关键设备进行了参数设计的讨论,并从设备研制角度论证各电压等级输电系统的可行性。第3节结合 $\pm 1100\text{kV}$ 直流系统主回路参数、过电压和绝缘配合、无功补偿与交流滤波器设计、直流滤波器设计等成套设计研究成果,对换流站电气接线、电气设备选择、电气布置、站用电系统等方面进行设计和研究。第4节则开展了 $\pm 1000\text{kV}$ 及以上电压等级直流输电线路的导线选择、绝缘配合、绝缘子串和金具选择、对地距离和走廊宽度、杆塔及基础等关键技术的设计研究。第5节对各电压等级特高压直流输电技术进行了分析和总结,研究结论可供工程设计、工程实施和运行等参考。

第1节 直流系统研究及换流站成套概念设计

1 概述

在大容量、大电流的高压直流输电系统中,换流站主接线方案对于整个直流输电工程实施的难度、可靠性水平、对交流系统的影响等都具有重要意义,是工程设计研究的基础,也是整体技术解决方案和技术路线的重要体现。换流站主接线方案的核心问题是决定换流站主要设备的具体配置,需要从技术方案的可行性方面进行研究论证。

$\pm 1000\text{kV}$ 及以上直流系统的研究考虑 ± 1000 、 ± 1100 、 $\pm 1200\text{kV}$ 三个电压等级,为了给下一步的绝缘配合、主设备概念设计等提供输入条件,要首先针对每个电压等级开展主回路参数计算,以提出各电压等级不同接线方案的主设备参数。

$\pm 1000\text{kV}$ 及以上的各电压等级的换流站主接线方案如表1所示。



表 1 ±1000kV 以上的各电压等级的换流器主接线方案

电压等级 (kV)	方案 1: 2 个换流器串联	方案 2: 3 个换流器串联
±1000	500kV+500kV	333kV+333kV+333kV
±1100	550kV+550kV	367kV+367kV+367kV
±1200	600kV+600kV	400kV+400kV+200kV

在换流站主接线方案研究中，重点对方案 1 和方案 2 进行论证。换流站主接线方式选择比较时需要综合考虑的主要因素有：

- (1) 12 脉动换流器单阀的设计制造水平。
- (2) 单台换流变压器的制造容量和运输限制。
- (3) 对两侧交流系统的影响。
- (4) 直流输电系统的可靠性和可用率。
- (5) 换流站占地、布置及投资等。

参考±800kV 直流输电工程的成功经验，无论采取每极 2 组 12 脉动换流器串联方案还是每极 3 组 12 脉动换流器串联方案，换流器的电压分配方式最好采用平均分配。

1000kV 及以上直流系统的额定直流电流按 4750A 考虑，考虑投入备用冷却设备后，在高温环温下，直流系统的最大电流达到 5000A。本阶段主回路计算仅考虑直流系统双极运行方式。1000kV 及以上直流额定输送功率如下：1000kV 直流，额定输送功率为 9500MW；1100kV 直流，额定输送功率为 10 450MW；1200kV 直流，额定输送功率为 11 400MW。

两端换流站接入交流系统的电压如表 2 所示。

表 2 两端换流站接入交流系统的电压

换 流 站	送端 (kV)	受端 (kV)
额定运行电压	530	515
最高稳态运行电压	550	550
最低稳态运行电压	500	500
最高极端电压	550	550
最低极端电压	475	475

两端换流站交流母线的最大三相短路容量按 500kV 开关的开断能力选取，为 57 288MVA（63kA）。最小三相短路容量按有效短路比不低于 3.0 考虑。

下面给出了测量误差、控制参数等重要的计算条件。

设计计算的最大误差如表 3 所示。

表 3 设计计算最大误差

参数	描 述	误差
d_x	正常直流电压运行范围内换流变压器相对感性压降的最大制造公差 (Δd_x)	$+5\%d_{xN}$ $-7\%d_{xN}$
U_d	测量误差	$\pm 1.0\%U_{dN}$
I_d	测量误差	$\pm 0.3\%I_{dN}$
γ	测量误差	$\pm 1.0^\circ$
α	测量误差	$\pm 0.5^\circ$
U_{di0}	电容分压式电压互感器的测量误差	$\pm 1.0\%U_{di0N}$

控制系统的参数值如表 4 所示。

表 4 控制系统的参数值

参数	描 述	范围值
α_N	额定触发角	15°
$\Delta\alpha$	稳态控制范围	$\pm 2.5^\circ$
$\alpha_{\min}$	控制系统的最小限制角	5°
γ_N	额定熄弧角	17°
$\Delta U_{d(R,I)}$	分接头变化一档对应的整流侧直流电压变化范围	$\pm 1.25\%U_{dRN}/2$

直流电阻对换流器额定容量有直接影响。在主电路参数计算中采用的最大、额定、最小直流电阻如表 5 所示。

表 5 直 流 电 阻

本技术专题采用	电阻 (Ω)		
	最小值	额定值	最大值
直流输电线路电阻 (R_b)	10.0	10.0	—
接地电阻 (R_c+R_g)	0.0	2.53	3.5

换流站的相对阻性压降和换流阀前向压降的取值如表 6 所示。

表 6 换流站的相对阻性压降和换流阀前向压降的取值

d_r	0.3%
U_T	0.6kV

2 ±1000kV 特高压直流换流器接线方案

2.1 500kV+500kV 方案

500kV+500kV 主回路接线示意图如图 1 所示。