

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

(2013~2014年)

国家电网公司 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

特高压 直流 输电技术

研究成果专辑

(2013~2014年)

国家电网公司 组编

 中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是国家电网公司对 2013~2014 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 2013~2014 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 5 章,第 1 章简要回顾了国家电网公司 2013~2014 年在特高压直流输电建设方面的工作,概述了 2013~2014 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 $\pm 800\text{kV}/8000\text{MW}$ 特高压直流工程技术研究;第 3 章为网侧接入电压提升技术研究;第 4 章为特高压直流容量提升技术研究;第 5 章为 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电技术提升研究。

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. 2013~2014 年 / 国家电网公司组编.
北京: 中国电力出版社, 2015.8
ISBN 978-7-5123-7866-7

I. ①特… II. ②国… 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 (2015) 第 126337 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

*

2015 年 8 月第一版 2015 年 8 月北京第一次印刷

880 毫米 $\times$ 1230 毫米 16 开本 26.5 印张 509 千字 1 插页

定价 150.00 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					
编委会成员	刘泽洪	伍 莹	赵庆波	王益民	丁广鑫	郭剑波
	刘开俊	肖世杰	梁政平			
编写组组长	刘泽洪	丁永福	蓝 海	高理迎	种芝艺	余 军
编写组副组长	王祖力	郭贤珊	黄 勇	宋胜利	孙 涛	但 刚
	文卫兵	马为民	李 正			
编写组成员	张燕秉	张 进	王 庆	丁一工	卢理成	赵大平
	吴 萍	丁赞成	周立宪	孟华伟	吴自强	鲁 俊
	朱 聪	郑 劲	张 贇	肖 鲲	张 宇	雷学义
	卢 贺	刘昭伟	姜 辉	邓 黎	贾小铁	陈秀娟
	肖 宾	朱艺颖	杨万开	董 鹏	孙 娜	王华伟
	朱宽军	夏拥军	刘 肿	牛海军	张翠霞	王微微
	印永华	李振强	司佳钧	刘 臻	江 明	丁玉剑
	雷兴列	刘 彬	曾南超	张刘春	席永平	谢 梁
	刘胜春	胡春华	王明新	蒲 莹	刘心旸	杨 媛

赵 峥	张宗鑫	申笑林	郗 鑫	聂定珍	杨一鸣
张 涛	李亚男	杜晓磊	李俊霖	付 颖	厉 璇
邹 欣	钟西岳	常 伟	薛 勤	赵雪灵	吕文娟
李学鹏	魏文彬	赵晓辉	贾 鹏	马 亮	吴小东
周 挺	吴海洋	曾 静	柯 嘉	王佑军	许 斌
戚 乐	高培国	高福军	简翔浩	董占明	朱 斌
刘 宁	马元社	刘 虹	娄彦涛	王 涛	帅远明
韩国辉	吴军辉	王相中	柴影辉	程铁汉	闻 政
李 志	张友鹏	孙珂珂	礼建石	孔玉辉	汤广福
周建辉	贺之渊	王华峰	查鲲鹏	高 冲	潘 艳
范彩云	刘 堃	肖 晋	韩书谟	徐光辉	常林晶
钟建英	仝永刚	姚永其	张月华	张 猛	胡 宾

前 言

特高压直流输电技术是目前世界上最先进的输电技术,具有超远距离、超大容量、低损耗等特点。国家电网公司实施“一特四大”发展战略,加快发展特高压电网,促进大煤电、大水电、大核电和大型可再生能源基地建设,对于保障能源安全、防治大气污染、解决电网安全问题、促进经济增长都具有重要意义。

2013~2014年,特高压进入全面提速、大规模建设的新阶段。哈密南—郑州 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程、溪洛渡左岸—浙江金华 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程相继建成投运,灵州—绍兴 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程开工建设。同时,为落实西部大开发战略,将西部煤炭、风能资源优势转化成经济优势,缓解湖南地区能源供需矛盾,满足湖南地区电力需求,酒泉—湖南 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程于2014年开展了工程初步设计。在“十二五”及“十三五”期间,国家电网公司将规划和建设多回 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程,特高压直流进入规模建设阶段,建设要求更高、责任更大、任务更艰巨。列入国家大气污染防治计划的锡盟—泰州、上海庙—山东、晋北—南京工程将加快推进,计划2017年全部建成投运。由此,特高压直流工程进入大规模建设阶段,工程技术的持续创新也迎来新的巨大挑战:交流侧接入电压、输送容量不断提升,交流侧分层接入500kV/1000kV电网、特高压直流换流站与交流变电站一体化建设等。

为及时总结特高压直流输电技术研究工作取得的成果,优

化工程技术应用，应对特高压直流规模化建设的需要，国家电网公司组织相关科研、设计等单位编写《特高压直流输电技术研究成果专辑（2013～2014年）》，对2013～2014年特高压直流输电技术研究成果进行全面回顾和总结。专辑凝聚着各级领导和工作人员的汗水，是参与特高压直流输电技术研究的全体人员的劳动和智慧结晶。

本专辑系统介绍了2013～2014年度特高压直流输电关键技术和主要设备自主化研制方案，共组织编写了39篇专题论文，对研究成果进行了逐一、详尽地论述。概论部分回顾了2013～2014年特高压直流输电工程建设和技术研究的总体情况，对主要成果作了简述；其中本书第2章主要阐述 $\pm 800\text{kV}$ 、8000MW特高压直流工程技术研究；第3章重点介绍网侧接入电压提升技术研究；第4章介绍了特高压直流容量提升技术研究；第5章介绍了 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电技术完善提升研究。本书不仅可供读者全面了解2013～2014年度特高压直流输电技术研究取得的成果和进展情况，同时还为今后特高压直流建设提供了统一的基础条件和数据平台。

两年来，特高压输电技术研究的参与者付出了辛勤的劳动，换来了累累硕果，承担研究任务的单位全力以赴，克服重重困难，圆满完成了既定的研究任务，在此表示衷心感谢，并藉此向为本书编辑出版提供支持和帮助的单位和个人致谢！

国家电网公司

2015年4月

目 录

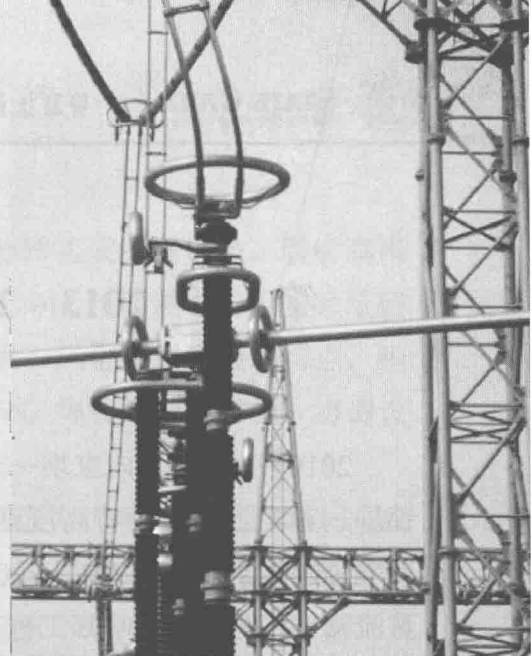
前言

第 1 章 概论	1
第 1 节 2013 ~ 2014 年特高压直流输电工程工作回顾	2
第 2 节 2013 ~ 2014 年特高压直流输电技术主要研究成果概述	4
第 2 章 $\pm 800\text{kV}/8000\text{MW}$ 特高压直流工程技术研究	15
第 1 节 $\pm 800\text{kV}$ 换流站通用设计与通用设备编订	16
第 2 节 $\pm 800\text{kV}$ 换流变压器自主化研制	29
第 3 节 $\pm 400\text{kV}$ 直流穿墙套管自主化研制	36
第 4 节 换流变压器阀侧套管自主化研制	45
第 5 节 $\pm 800\text{kV}/5000\text{A}$ 换流阀自主化研制	55
第 6 节 哈密南换流站西门子技术换流阀改造	65
第 7 节 直流转换开关自主化研制	73
第 8 节 $\pm 800\text{kV}$ 换流站阀厅金具研制	83
第 9 节 $75\text{mH}/5000\text{A}$ 平波电抗器研制	92
第 10 节 降低换流站运行损耗研究	100
第 11 节 接地极线路绝缘配合优化研究	103
第 12 节 接地极设计方法及其标准修订	114
第 3 章 网侧接入电压提升技术研究	123
第 1 节 网侧 750kV 换流站换流区域过电压与空气间隙研究	124

第2节	网侧 750kV 特高压换流站区域布置研究	139
第3节	网侧 750kV 特高压换流站关键设备研制	150
第4节	网侧分层接入 500/1000kV 电网特高压直流主回路关键参数研究	165
第5节	网侧分层接入 500/1000kV 电网特高压直流系统过电压与绝缘配合研究	174
第6节	网侧分层接入 500/1000kV 电网特高压直流系统控制保护技术方案研究	186
第7节	网侧 1000kV 换流站交流侧过电压和空气间隙研究	196
第8节	网侧分层接入 500/1000kV 电网特高压换流站 1000kV 相关区域布置研究	207
第9节	网侧分层接入 500/1000kV 阀厅概念设计	225
第10节	网侧接入 1000kV 电网 $\pm 800\text{kV}/10\,000\text{MW}$ 特高压直流工程换流变压器方案研究	243
第4章	特高压直流容量提升技术研究	256
第1节	$\pm 800\text{kV}$ 6250A 大电流晶闸管和换流阀技术方案研究	257
第2节	直流开关设备提高通流能力技术研究	267
第3节	直流通流回路温升限值和技术解决措施研究	274
第4节	换流变压器现场组装设计方案	285
第5节	1250mm ² 级大截面导线研发	295
第6节	1250mm ² 级大截面导线配套金具及相关技术研究	311
第7节	1250mm ² 级大截面导线施工技术研究及机具研制	321
第5章	$\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电技术提升研究	332
第1节	直流输电引起的变压器直流偏磁及其治理措施研究	333
第2节	金华换流站直流偏磁装置保护误动分析	340
第3节	特高压直流线路过电压和绝缘配合研究	346
第4节	特高压直流输电工程融冰方式控制保护策略及试验分析	359
第5节	特高压直流中性线母线开关重合保护误动分析	372
第6节	复合材料转动横担应用研究	380
第7节	V 串伸入塔身的研究	388
第8节	超长距电力通信塔内光中继技术应用研究	398
第9节	相干光传输技术在电力系统领域的应用研究	404
第10节	直流旁路开关自主化研制	407

2013~2014

特高压直流输电技术研究成果专辑



第 1 章

概 论



第1节 2013~2014年特高压直流输电工程工作回顾

2010~2012年,向家坝—上海±800kV特高压直流输电示范工程(简称向上工程)、锦屏—苏南±800kV特高压直流输电工程(简称锦苏工程)相继成功投运,额定输送功率分别达到640万kW、720万kW。2013~2014年,哈密南—郑州±800kV特高压直流输电工程(简称哈郑工程)、溪洛渡左岸—浙江金华±800kV特高压直流输电工程(简称溪浙工程)相继投运,灵州—绍兴±800kV特高压直流输电工程(简称灵绍工程)获得核准并全面开工建设。同时,积极推进酒泉—湖南±800kV特高压直流输电工程(简称酒湖工程)以及上海庙—山东、锡盟—泰州、晋北—南京±800kV特高压直流输电工程(简称“三直”工程)前期工作;特高压直流工程标准化研究稳步开展,关键技术深化研究取得重要成果,特高压直流设备国产化研制取得重大突破,特高压直流输电技术进入加快推广应用的新阶段,特高压直流工程由技术创新转入工程规模建设阶段。

1 哈郑工程、溪浙工程建成投运

在深入研究特高压直流输电的关键技术研究、系统成套设计的基础上,国家电网公司坚持“科研为先导、设计为龙头、设备为关键、建设为基础”的方针,严密组织、精心策划、科学管理、自主研发设计和建设的哈郑工程、溪浙工程分别于2014年1月、2014年7月相继成功投运,额定输送功率达到800万kW。溪浙工程在世界上首次实现单回直流工程800万kW连续运行和840万kW过负荷输电运行,创造了超大容量直流输电的新纪录。

2 灵绍工程开工建设

2013年,结合灵绍工程的建设要求,国家电网公司重点组织开展了工程的系统研究、成套和工程设计,制定了网侧接入750kV交流电网的主要技术方案,积极开展关键技术研究、工程专题研究,确定了工程建设的一系列重大技术原则。针对灵绍工程的技术要求,开展了网侧750kV换流变压器、换流阀、75mH/5000A平波电抗器、750kV交流滤波器断路器等关键设备研制。2014年,灵绍工程获得核准,完成了初步设计和设备采购,并开工建设。

3 酒湖和“三直”工程前期研究

为落实西部大开发战略,将西部煤炭、风能资源优势转化成经济优势,缓解湖南地区能源供需矛盾,满足湖南地区电力需求,酒湖工程于2014年开展了工程的系统研究、成套和工程初步设计,基于网侧接入750kV交流电网、风电外送等技术特点,积极开展工程专题研究和网侧750kV换流变压器、SVC/SVG等关键设备研制,协调设计、建设单位商定了初步设计方案。

2014年,国家电网公司根据《国家能源局关于加快推进大气污染防治行动计划12条重点输电通道建设的通知》(国能电力〔2014〕212号),启动了锡盟—泰州、上海庙—山东、晋北—南京±800kV特高压直流输电工程的前期建设。

晋北—南京直流工程对于促进山西地区经济社会发展,推动山西煤电基地发展,缓解江苏地区能源供需矛盾,满足江苏地区电力需求及经济发展具有重要意义。近期重点组织开展了工程的系统研究、成套和工程设计,制定了工程专题研究和主要技术方案,确定了工程建设重要技术原则。

进一步发挥直流工程远距离、大容量输电的技术优势,提高工程建设和运行的经济性,促进交直流特高压电网协调发展,加快建设“强交强直”电网是现实的选择。基于现有800kV/8000MW特高压直流现有主要技术和设备,国家电网公司于2014年提出在锡盟—泰州、上海庙—山东直流工程中,进一步提升±800kV特高压直流输电工程输送容量到10000MW,逆变侧将分层接入交流电网,即高端换流变压器接入500kV交流电网,低端换流变压器接入1000kV特高压交流电网。特高压直流输电工程分层接入500kV/1000kV不同电压等级交流电网,有助于优化电网结构、均衡潮流分布和电力流向,有助于更大直流功率的合理分散消纳,提高1000kV交流电网的利用效率;可以改善故障情况下的功率平衡,提高受端电网安全稳定水平,为直流大规模接入提供坚强支撑,具有重要的意义。

4 关键技术深化研究取得重要成果

针对锡盟—泰州、上海庙—山东直流工程,国家电网公司重点组织开展了工程系统研究、成套和工程设计,制定了分层接入500kV/1000kV不同电压等级交流电网和直流电流由5000A提升到6250A的主要技术方案,开展了网侧分层接入500/1000kV电网特高压直流主回路和参数、直流系统过电压与绝缘配合、直流系统控制保护技术方案、交流侧过电压和空气间隙、1000kV相关区域布置、阀厅概念设计和换流变压器设计方案等;针对直流电流提升至6250A后的导体发热、外绝缘和设备机械稳定性问题等技术难点,重点研究了提升通流能力技术要求及设备解决方案,包括大电流晶闸管和换流阀技术方案,直流开关设备提高通流能力技术,直流通流回路温升限值和技



术解决措施,换流变压器现场组装设计方案,以及 1250mm^2 级大截面导线、配套金具、配套施工技术及机具研制。

5 特高压直流设备国产化研制取得重大突破

$\pm 800\text{kV}$ 换流变压器、直流套管、 $\pm 800\text{kV}/5000\text{A}$ 换流阀、直流转换开关、 $\pm 800\text{kV}$ 阀厅金具、 $75\text{mH}/5000\text{A}$ 平波电抗器等设备实现自主化或国产化研制。通过关键技术研发攻关,基本掌握了特高压换流站设备的核心技术,打破了国外企业对设备主要组部件的技术垄断,提高了设备通流能力,使特高压换流站设备国产化研制再上新台阶,促进了国内直流设备制造的技术升级和跨越式发展。

6 特高压直流工程标准化稳步开展

为及时总结特高压输电技术研究工作取得的成果,优化提高特高压直流输电技术,应对 $\pm 800\text{kV}$ 、 8000MW 直流输电技术进入规模化应用阶段的需要,国家电网公司组织相关科研、设计等单位于2013年编制发布了《 $\pm 800\text{kV}$ 换流站分册通用设计》、《 $\pm 800\text{kV}$ 输电线路分册通用设计》、《 $\pm 800\text{kV}$ 输电线路金具分册通用设计》、《 $\pm 800\text{kV}$ 换流站通用设备》,并在国家电网公司系统推广应用。

第2节 2013~2014年特高压直流 输电技术主要研究成果概述

2013~2014年,国家电网公司根据电网规划及建设需要,在特高压直流 $\pm 800\text{kV}$ 输电技术方面有计划的开展了一系列课题研究,主要内容包括 $\pm 800\text{kV}/8000\text{MW}$ 特高压直流工程技术标准化和主要设备自主化研制,网侧电压提升和交流侧采用分层接入方案,特高压直流输送容量提升,直流偏磁治理,大截面导线的应用以及通信新技术等。研究成果为后续特高压直流工程的全面设计优化和建设实施奠定了坚实基础。

1 $\pm 800\text{kV}/8000\text{MW}$ 特高压直流工程技术研究

1.1 $\pm 800\text{kV}$ 换流站通用设计与通用设备编订

依托哈郑工程、溪浙工程,针对额定电压为 $\pm 800\text{kV}$ 、额定输送功率为 8000MW 、接入交流 500kV 系统的特高压直流输电工程换流站设备,包括换流变压器、换流阀、平波电抗器等,编制形成了特高压换流站通用设备,规范了设备分类,全面统一了设备技术参数、电气一次接口、电气二次接口和土建接口,为后续 $\pm 800\text{kV}/8000\text{MW}$ 特

高压直流输电工程的设备研制、成套设计和工程设计的标准化建设提供参考。

1.2 $\pm 800\text{kV}$ 换流变压器自主化研制

根据溪浙工程换流变压器的参数要求,通过对特高压直流输电工程用 $\pm 800\text{kV}$ 高端换流变压器关键技术科研攻关,解决了换流变压器的电磁场分析,绕组布置方式、绝缘结构优化、阀侧出线装置国产化等技术难点,基本掌握了高端换流变压器的核心技术,并于2014年首次完成 $\pm 800\text{kV}$ 换流变压器国产化样机制造,其各项主要性能指标达到同类产品先进水平,为特高压换流变压器的全面国产化打下了坚实的基础。

1.3 $\pm 400\text{kV}$ 直流穿墙套管国产化研制

通过对绝缘结构、机械结构设计和空心复合绝缘子、超长导电杆等关键零部件的制造工艺及穿墙套管装配工艺进行研究,自主研发制造了 $\pm 400\text{kV}$ 直流穿墙套管样机并完成型式试验。穿墙套管各项性能指标满足要求,设计及制造体系完善,具备工程应用条件。

1.4 换流变压器阀侧套管自主化研制

高压直流套管是换流变压器的关键组部件,是我国高压直流工程建设的“瓶颈”。国内套管制造企业特变电工沈变和西安西电高压套管有限公司自主研发完成 ± 200 、 ± 400 、 $\pm 600\text{kV}$ 和 $\pm 800\text{kV}$ 直流套管试制,掌握了高压直流套管制造核心技术,并分别建立了高压直流套管生产基地,具备了批量生产能力。依托锦苏工程、哈郑工程,对工程中应用的两种技术方案换流变压器阀侧套管进行了阐述和分析,提出了换流变压器阀侧直流套管电场计算,关键结构设计、试验,现场安装工艺及工程应用的结果。

1.5 $\pm 800\text{kV}/5000\text{A}$ 换流阀自主化研制

以哈郑工程为对象阐述并解决了 $\pm 800\text{kV}/5000\text{A}$ 换流阀产品研制、试验检测、系统集成和工程应用技术等关键问题,研究了大截面高功率晶闸管反向恢复电荷大造成的换相过冲抑制问题,通过换流阀底屏蔽环流、大电流下母排温升和接头发热的研究,完善了特高压换流阀在极恶劣电场、磁场、温度场条件下的防火设计。同时,结合哈郑工程研究了高温干旱地区兆瓦级热源的高效散热和试验电流提升引起的阀组间电压均衡控制、变压器直流偏磁抑制等技术难题,取得了系列创新成果。

1.6 哈密南换流站西门子技术换流阀改造

在哈郑工程中发现采用西门子技术路线的换流阀存在换流阀触发监测板(TFM板)运行温度偏高、充电后检测不稳定、逆变运行时常发生换相失败和因阻尼电阻冷却容量偏小,内冷水低流量保护动作时间过短,与冷却泵启动特性和站用电备自投切换时间匹配困难等问题。经过充分的技术调研和论证,采用中电普瑞电力工程有限公司A5000换流阀技术对西门子换流阀进行模块和阀塔的结构改造设计、电气设计校核以



及换流阀控制系统设计等技术改造,降低了哈密南换流站换流阀触发监测板运行温度,提高了充电检测稳定性,增强了逆变运行抵抗换相失败能力,延长了内冷水低流量保护动作时间,解决了与冷却泵启动特性、站用电备自投切换时间匹配困难等问题,达到了改造预期目的。自投入运行以来,各项技术指标均满足要求,换流阀运行平稳,提高了直流系统的运行可靠性。

1.7 直流转换开关自主化研制

通过对电流自激振荡及过零开断技术、电弧电压对直流电流转换影响、气流场及转换回路设计、避雷器参数配置等关键技术研究,掌握直流转换开关核心技术,成功研制出具有完全自主知识产权的转换电流达 5100A 的直流转换开关,并通过了型式试验,转换能力和通流能力均高于标准要求,具备工程应用条件。

1.8 $\pm 800\text{kV}$ 换流站阀厅金具研制

$\pm 800\text{kV}$ 特高压换流站阀厅金具是目前运行电压最高,承载电流能力要求最强的阀厅金具,通过对其分析、设计、试制和试验,在借鉴国外金具设计经验的同时,掌握了阀厅金具的设计和制造方法,研制出适合 $\pm 800\text{kV}$ 换流站运行的阀厅金具。阀厅金具已在溪浙工程金华换流站挂网运行,状况良好。

1.9 75mH/5000A 平波电抗器研制

灵绍工程绍兴换流站平波电抗器采用单台 75mH、“2+2”(极线侧 2 台、中性线侧 2 台)串联布置方式。75mH 平波电抗器是目前国内电压等级最高、电流最大、容量最大、体积最大、重量最重的电抗器。通过对电场、磁场和抗震性能仿真计算,确定了线圈结构、支撑结构,研制新型防雨降噪及防鸟害装置,研发制造的 75mH/5000A 平波电抗器样机已于 2014 年完成了全部试验,满足温升、绝缘等要求。

1.10 降低换流站运行损耗研究

依托灵绍工程,初步确定了换流阀、换流变压器、平波电抗器等主要设备降损措施。通过系统优化、设备创新和设计改进等综合措施,灵绍工程在换流变压器、换流阀、平波电抗器、交流滤波器、辅助系统及建筑物等方面运行损耗,较已投运的哈郑工程均有所降低。换流站工程总损耗约为 12.3 万 kW,占额定输送容量的 1.54%;线路工程总损耗约 40.27 万 kW,占额定输送容量的 5.04%。

1.11 接地极线路绝缘配合优化研究

灵州换流站—平凉台接地极线路存在交流线路和直流接地极线路相互影响的问题。通过研究直流接地极线路与 35kV 交流线路同杆共架对直流、交流系统和直流接地极线路与 330kV 交流线路同走廊架设对直流接地极线路安全运行的影响,确定了接地极线路的绝缘配合设计以及接地极线路的参数选取、杆塔设计方案、绝缘子的选型和安装。

1.12 接地极设计方法及其标准修订

通过哈郑工程、溪浙工程实践,以及对灵绍工程、酒湖工程接地极选址经验的总结,开展了接地极设计优化研究,以及 DL/T 5224—2014《高压直流输电大地返回系统设计技术规范》的编制,同时,对深层土壤结构参数对于直流电流分布以及地表电位分布产生影响、垂直型接地极能缓解地电流对环境的影响、紧凑型接地极能改善接地极跨步电压以及新型接地极设计方案进行了研究。

2 网侧接入电压提升技术研究

2.1 网侧 750kV 换流站换流区域过电压与空气间隙研究

基于灵绍工程设计需求,对相间最小空气间隙距离 A_2 值和巡视走道的空气间隙距离的选取方法和优化取值进行了专题研究,通过额定电压 600kV 的交流母线避雷器进行绝缘配合研究,得出相间空气间隙距离 A_2 的初步选取结果为 6.5~7.0m, 750kV 交流母线操作过电压一般不超过 1.65p.u. (1077kV), A_2 值可以从 6.5m 降至 5.9m。同时,考虑国内高性能避雷器的制造水平、工频过电压水平,避雷器额定电压可适当降低, A_2 值可相应从 6.5m 降至 6.1m 和 5.8m,推荐阀厅巡视走道的空气间隙 50%冲击放电电压计算公式取 5 个标偏,即 5σ 。推荐灵州站和绍兴站高端阀厅的阀塔对巡视走道的最小空气间隙距离分别为 8m 和 7m。

2.2 网侧 750kV 特高压换流站区域布置研究

依托灵州换流站工程,针对交流网侧电压采用 750kV,研究换流区域和交流滤波器场区域布置方案,确定了换流区域推荐采用“背靠背”布置方案,换流变压器组装场地主要由 750kV 汇流跨线空气间隙以及换流变压器组装尺寸决定,该区域尺寸为 310.2m×136m,同时,针对 750kV GIS 的布置特点,结合平面布置特点,将滤波器进线从母线上部跨越改为从 SC 滤波器组进线跨越方式,避免了滤波器母线不同回路跨越的问题,同时兼顾了占地面积和经济性,推荐交流滤波器场采用新的改进型“田”字形布置。

2.3 网侧 750kV 特高压换流站关键设备研制

依托灵绍工程,组织科研、设计单位、设备厂家进行了专项研究,深入分析了交流侧接入 750kV 的换流变压器、GIS、断路器、交流滤波器等设备的电场、力学等计算和结构设计方案,攻克了绝缘水平升高、开关开断容量增加、设备尺寸增大导致的抗震性能要求提高等问题,完成了设备的研发,初步掌握了接入交流 750kV 的特高压直流设备设计与制造技术,为工程顺利实施奠定坚实的基础。

2.4 网侧分层接入 500/1000kV 电网特高压直流主回路和参数研究

由于锡盟—泰州直流输电工程容量提升和分层接入的特殊背景,导致主回路设计



与常规工程相比,在直流主回路研究方面既沿袭了原有的主回路计算方法,同时在换流变压器阻抗选择、降压配合方式等方面又深入分析了一系列新产生的问题。以锡盟—泰州直流输电工程的交流系统条件和直流系统性能要求为基础,对工程主回路参数进行设计,提出换流阀、换流变压器等关键主设备的基本参数,为特高压直流工程后续各项研究的顺利开展提供技术支撑。通过研究,提出了送端及受端高压阀组和低压阀组换流变压器阻抗推荐取值范围,选定了送、受端的高、低压端换流变压器短路阻抗和工程过负荷水平为 1.2p.u./3s 和 1.05p.u./2h 。同时,综合考虑系统影响、换流阀及换流变压器的制造难度,确定采用高、低压端采取均衡降压 80% 的降压运行方式。

2.5 网侧分层接入 500/1000kV 电网特高压直流系统过电压与绝缘配合研究

基于上海庙—山东、锡盟—泰州工程受端换流站分层接入 500/1000kV 交流电网,研究分层接入对直流系统绝缘配合的影响、直流系统过电压的仿真计算、交流 1000kV 系统绝缘水平与直流侧绝缘水平之间的相互协调,提出分层接入 500/1000kV 电网换流站直流侧各关键点的过电压保护水平和设备的绝缘水平,对设备的研制开发提供了依据。考虑到受端分层接入两个不同的交流系统,导致 400kV 中点的运行电压不再是幅值为 400kV 的纯直流,而是幅值为 430kV 的叠加一定含谐波分量的运行电压,且受端换流站 400kV 中点的运行电压受直流线路长度的影响也有一定的提高。此外,随着线路长度及换流变压器漏抗的增加,还使受端换流站的空载直流电压 U_{dio} 升高。经计算分析,确定了避雷器的参数,选用阀避雷器额定电压为 207.6kV (均方根值),MH 避雷器额定电压为 836kV, CBH 避雷器额定电压为 1120kV,提出高端 Yy 换流变压器及极母线阀侧处操作冲击绝缘水平为 1675kV,雷电冲击绝缘水平为 1870kV;平波电抗器线路侧额定操作冲击耐受水平仍为 1600kV,雷电冲击绝缘水平为 1800kV。通过直流系统过电压仿真计算证明了绝缘配合的设计是合理的。

2.6 网侧分层接入 500/1000kV 电网特高压直流系统控制保护技术方案研究

特高压直流分层接入 500kV/1000kV 交流系统对直流控制保护的要求决定了直流控制保护系统的分层结构和功能配置。在分析了在受端分层接入功率正送和功率反送运行下直流控制策略的差异,提出了适用于正、反送运行方式的直流控制策略。送端换流站高低压换流器接入同一交流电网,宜采用以往工程成熟的控制策略。受端换流站接入不同电压等级的交流电网,高、低压换流器可独立控制,但应具备高、压换流器之间电压平衡控制功能,以确保高、压换流器直流电压相同;通过研究提出了阀组间电压平衡运行协调控制的原理和实现方法,对于送端换流站可通过设置阀组平衡控制环节实现,受端换流站通过阀组分接头控制实现。基于受端换流站高、低压换流器分别接入 500kV/1000kV 两个不同交流系统,直流控制对两个交流系统实现独立的无功控制,提出了分层接入直流系统直流保护的分区和配置。考虑到受端交流系统分层