

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

(2008年)

主 编 刘振亚



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

特高压 直流输电技术

研究成果专辑

(2008年)

主 编 刘振亚

副主编 舒印彪



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是国家电网公司继《特高压直流输电技术研究成果专辑(2005年)》、《特高压直流输电技术研究成果专辑(2006年)》和《特高压直流输电技术研究成果专辑(2007年)》之后,对2008年特高压直流示范工程建设情况和特高压直流输电技术研究成果的全面回顾和总结,是参与特高压直流输电技术研究、特高压直流示范工程建设的全体人员劳动和智慧的结晶。

本书共分7章,第1章对2008年特高压直流工程建设工作进行了介绍,对主要研究成果进行了简要概述;第2章为 $\pm 800\text{kV}$ 、6400MW级特高压直流输电工程设计优化;第3章为 $\pm 800\text{kV}$ 、6400MW级特高压直流工程关键设备研制;第4章为特高压直流工程施工、运行技术研究;第5章为 $\pm 800\text{kV}$ 、7200MW级特高压直流输电工程设计技术研究;第6章为特高压直流设备监造技术方案;第7章为特高压直流输电技术标准。

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. 2008年 / 刘振亚主编. —北京: 中国电力出版社, 2009

ISBN 978-7-5083-9318-6

I. 特… II. 刘… III. 高电压-直流-输电技术-研究 IV. TM726.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 143181 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009年9月第一版 2009年9月北京第一次印刷

880毫米 $\times$ 1230毫米 16开本 22.375印张 430千字 2插页

印数 0001—2000册 定价 140.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

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

前 言

我国一次能源分布与生产力布局很不均衡,煤炭、水能以及可大规模开发利用的陆地风能和太阳能资源主要集中在西部和北部地区,能源消费需求则主要集中在经济较为发达的中东部地区。随着经济社会不断发展和电力需求不断增长,我国东西部之间的电力传输压力越来越大。特高压输电具有输电容量大、距离远、效率高、损耗低等优势,发展特高压输电技术,建设特高压电网,有利于促进大水电、大煤电、大核电和大型可再生能源基地的集约化开发,实现更大范围的资源优化配置。发展特高压输电已被纳入《中华人民共和国国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》和《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》,是国家能源发展战略的重要组成部分。

国家电网公司全力推进特高压输电技术研究和工程建设。2008年,向家坝—上海±800kV特高压直流输电示范工程(简称特高压直流示范工程或向—上工程)全线开工并快速推进,锦屏—苏南±800kV特高压直流输电工程(简称锦—苏工程)于2008年11月获得国家发改委的核准,进入正式实施阶段。

2008年,国家电网公司组织科研、设计、制造、建设和运行等单位,在±800kV、6400MW特高压直流工程系统研究、设计优化、关键设备研制、施工及运行技术研究等方面开展了大量卓有成效的工作,取得了丰硕成果。2008年1月、5月和7月,先后三次组织召开设计联络会,优化了设计方案;8月完成了6英寸晶闸管元件的型式试验,12月,世界上首台800kV

特高压换流变压器通过了全部的型式试验，重大技术和主设备研制全面突破；开展了特高压直流工程施工工艺创新技术研究。在国家电网公司的直接策划和积极推动下，新的 TC115 高压直流输电技术委员会于 2008 年 8 月成立，秘书处设在国家电网公司。

±800kV、7200MW 锦屏—苏南特高压直流输电工程在输送容量、设备制造、运输安装及外部条件等方面，比以往工程面临更大技术难度。通过深入开展设计研究，确定了输送容量提升后的工程技术路线和关键设备技术方案；2008 年 7 月，一般线路与大跨越工程初步设计通过评审；9 月，换流站工程成套设计通过评审，初步设计基本完成；6 月，设备采购方案获得国家发改委的批复，目前已完成三轮竞争性谈判，基本锁定了直流设备的技术方案。

为及时总结特高压直流输电技术研究工作取得的成果，国家电网公司组织相关科研、设计、咨询和高等院校等单位，按年度编写出版《特高压直流输电技术研究成果专辑》。本书是国家电网公司继《特高压直流输电技术研究成果专辑》2005 年版、2006 年版和 2007 年版之后，对 2008 年特高压直流输电技术研究成果的全面回顾和总结，凝聚着各级领导和工作人员的汗水，是参与特高压输电技术研究和工程建设全体人员劳动和智慧的结晶。本书可以帮助读者全面了解国家电网公司 2008 年度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。

本书第 1 章简要回顾了国家电网公司 2008 年在特高压直流输电方面的工作，概述了 2008 年特高压直流工程取得的主要成果；第 2 章介绍了向—上工程在换流站和线路优化设计、线路融冰技术和线路防覆冰能力设计研究等内容，第 3 章主要介绍了向—上工程的 6 英寸晶闸管、换流变压器、换流阀等设备研制方面的内容，第 4 章主要介绍了直流工程换流站及线路施工和直流工程运行方面的内容，第 5 章介绍了锦—苏工程主要技术方案研究等内容，第 6 章介绍了特高压直流设备的监造实践，第 7 章介绍了特高压直流输电技术标准。

一年来，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

2009 年 9 月

目 录

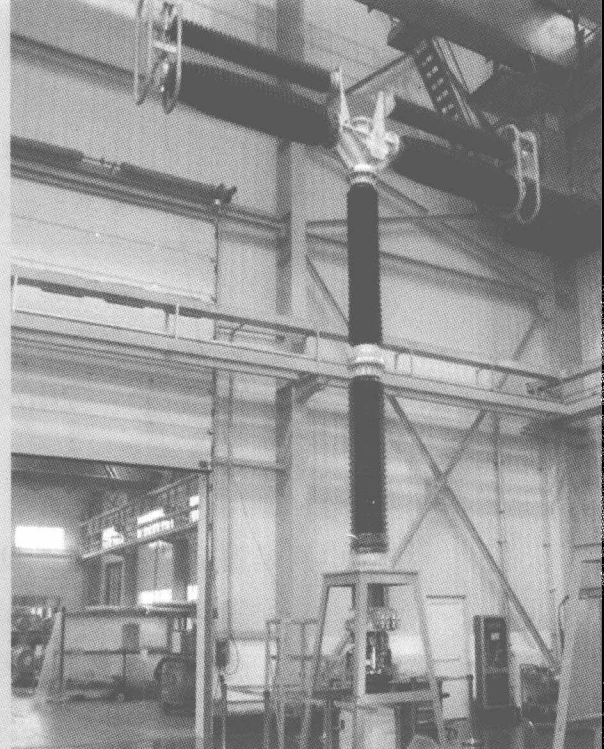
前言

第 1 章 概论	1
第 1 节 2008 年特高压直流工程建设工作回顾	2
第 2 节 2008 年特高压直流输电技术主要研究成果概述	4
第 2 章 $\pm 800\text{kV}$ 、6400MW 级特高压直流输电工程设计	
优化	22
第 1 节 特高压直流示范工程系统研究	23
第 2 节 特高压直流换流站阀厅优化研究	34
第 3 节 直流接地极跨步电压限值研究	53
第 4 节 接地极线路导线优化设计研究	60
第 5 节 特高压直流工程融冰技术方案研究	66
第 6 节 特高压直流输电线路提高防覆冰能力设计研究	76
第 7 节 特高压直流输电线路工程优化设计	83
第 3 章 $\pm 800\text{kV}$ 、6400MW 级特高压直流工程关键	
设备研制	99
第 1 节 6 英寸晶闸管研制及试验	100
第 2 节 换流阀研制及试验	109
第 3 节 换流变压器研制及试验	125
第 4 节 平波电抗器研制及试验	136
第 5 节 控制保护研制及试验	146
第 6 节 直流场设备研制	151

第7节	交流滤波器研制	162
第8节	交流开关设备研制及试验	170
第9节	直流场支柱绝缘子选型研究	176
第4章	特高压直流工程施工、运行技术研究	183
第1节	换流站施工技术研究	184
第2节	特高压直流线路铁塔组立与架线施工工艺研究	202
第3节	特高压直流工程运行技术研究	206
第5章	±800kV、7200MW级特高压直流输电工程设计技术研究	221
第1节	主接线及主回路参数研究	222
第2节	换流站无功配置方案	235
第3节	换流站绝缘配合研究	243
第4节	换流站初步设计研究	252
第5节	换流站主设备方案研究	258
第6节	控制保护技术研究	270
第7节	直流滤波器研究	276
第8节	交流滤波器研究	288
第9节	线路路径方案研究	296
第10节	锦—苏工程一般线路设计研究	301
第11节	锦—苏工程大跨越设计研究	310
第12节	大截面导线应用研究	321
第6章	特高压直流设备监造技术方案	327
第7章	特高压直流输电技术标准	337

2008

特高压直流输电技术研究成果专辑



第 1 章

概 论



第 1 节 2008 年特高压直流工程建设工作回顾

电网是重要的能源基础设施，电网发展与能源发展紧密相连。要解决好电网发展问题，必须将其纳入能源发展的全局来考虑。为满足我国经济社会持续发展的用电需求，国家电网公司以科学发展观为指导，深入分析面临的形势，准确把握国家能源状况和企业实际，遵循电网发展规律，提出了“一特四大”战略，就是以大型能源基地为依托，建设由 1000kV 交流、 $\pm 800\text{kV}$ 与 $\pm 1000\text{kV}$ 直流构成的特高压骨干网架和各级电网协调发展的统一坚强智能电网，实施大规模、远距离、高效率输电，促进大煤电、大水电、大核电、大型可再生能源基地的集约化开发，大范围优化配置能源资源，保证电力的长期稳定供应。实施“一特四大”战略的核心是建设特高压电网，推进电网发展方式转变，推动电网科学发展，进而促进我国电力工业和能源事业的科学发展。

2008 年以来，国家电网公司在向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 、6400MW 特高压直流输电示范工程设计优化、关键设备研制、施工及运行技术研究，以及锦屏—苏南 $\pm 800\text{kV}$ 、7200MW 特高压直流输电工程设计和设备技术方案研究等方面开展了大量工作，取得了丰硕成果，对特高压直流输电技术发展和特高压工程建设具有重要意义。

1 向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电示范工程建设全面快速推进

向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电示范工程是世界直流输电技术发展的重大创新工程，承担着金沙江下游向家坝、溪洛渡水电站西电东送任务，确保工程成功建设，意义重大，影响深远。2008 年，向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流示范工程在工程设计、设备研制、科研创新、现场施工和配套工程建设各方面全面推进，取得了阶段性的成果。

一是设计工作深入推进。建立健全了贯穿设备研制、成套设计、工程设计三位一体、循环互动的组织体系，多次组织召开设计联络会和协调会，工程设计有序推进。7 月线路工程初步设计通过评审，年内线路终勘定位完成。换流站和线路施工图交付满足现场施工要求，线路塔图全部交付。二是设备研制取得重大进展。强力推进关键设备研制，换流阀第一阶段试验顺利完成，800kV 和 600kV 换流变压器成功通过型式试验。干式平波电抗器、6 英寸晶闸管均通过型式试验，直流场设备完成带电考核，控制保护设备开始系统联调，交流设备全部通过型式试验。完成了 4 基真型塔试验，验

证了特高压直流工程的杆塔设计。三是科研创新取得突出成果。大量关键技术研究成果成功应用于工程设计,有效节省了工程投资。制定并颁布了 20 多项技术标准,申报了 120 多项国家专利。积极推动直流输电国际标准化工作,国际电工委员会成立了高压直流输电新技术委员会(TC115),并将秘书处设在中国国家电网公司。四是现场建设全面超越里程碑计划。复龙、奉贤换流站现场施工安全质量情况良好,换流站建筑物全面封顶。线路大跨越 11 月开工,一般线路 12 月全线开工。五是配套工程建设协同推进。两端换流站站外电源、奉贤站进站道路建成并投入使用,大件运输道路和码头、站外水源等其他辅助工程建设进展顺利,通信工程完成概念设计,送端配套 500kV 交流工程设计已经启动。

2 锦屏—苏南±800kV 特高压直流输电工程建设进展顺利

锦屏—苏南±800kV 特高压直流输电工程是雅砻江流域梯级水电站的配套送出工程,是国家电网规划建设“十一五”特高压交直流输电通道的重要组成部分。雅砻江位于四川西部,是金沙江的最大支流,锦屏一级(6×60 万 kW)、二级(8×60 万 kW)和官地(4×60 万 kW)水电站为雅砻江下游梯级的大型水电基地,总装机 1080 万 kW,是川电外送的一组重要依托电源。锦屏一级、二级水电站已分别于 2006 年 12 月、2008 年 11 月成功截流,预计 2012 年 8 月首台机组投产发电。为充分发挥特高压直流输电工程远距离、大容量、低损耗的技术优势,节约宝贵的土地资源,满足东部地区持续增长的用电需求,促进东西西部地区协调发展,进一步提升我国电工装备制造业的自主创新能力,促进我国电网技术升级和电力工业的可持续发展,结合向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程建设经验,经过深入研究,国家电网公司确定锦—苏工程采用±800kV、7200MW 特高压直流输电技术方案。

根据初步设计方案,锦屏—苏南±800kV 特高压直流输电工程额定输送容量 7200MW,最大连续输送功率 7600MW,线路总长约 2095km,将首次应用 $6\times 900\text{mm}^2$ 大截面导线。工程起于四川西昌裕隆换流站,途经四川、云南、重庆、湖南、湖北、浙江、安徽、江苏八省市。

锦屏—苏南±800kV 特高压直流输电工程 2008 年上半年取得所有支持性文件,2008 年 2 月正式上报核准请示。2008 年 11 月,工程获得国家发展和改革委员会正式核准[《国家发展改革委关于四川锦屏至江苏苏南±800 千伏特高压直流输电工程换流站及部分输电线路项目核准的批复》(发改能源[2008]3071 号)]。除四川、云南省内的线路和接地极工程外均获得核准。2008 年 6 月工程换流站设备采购方案获得国家发改委批复。工程通过螺髻山电力走廊方案已通过建设部专家评审,12 月 17 日国家住房和城乡建设部正式回函四川省建设厅,原则同意将螺髻山电力通道纳入邛海—螺



髻山风景名胜区总体规划。

目前,工程建设进展顺利。一是确定了容量提升后的工程技术方案。研究确定了 $\pm 800\text{kV}$ 、7200MW 级特高压直流工程技术路线和关键设备技术方案,完成 900mm^2 大截面导线论证,制造及展放技术研究取得突破性进展,具备工程应用条件。二是初步设计基本完成。2008 年 3 月,换流站工程功能规范书和预初步设计通过评审,9 月成套设计通过评审,初步设计已基本完成。大跨越和一般线路工程初步设计 7 月通过评审。三是设备采购全面启动。2008 年 6 月换流站设备采购方案获得国家发改委批复,随后发布了招标文件,目前已经完成了三轮竞争性谈判,技术方案基本确定。四是现场建设有序展开。4 月审定两端换流站征地红线图,征地工作正在有序进行。目前,同里换流站进站道路、试桩和场平施工已完成,裕隆换流站三通一平施工进度顺利。线路通道清理有序推进,大跨越基础施工与向一上工程同步进行。

第 2 节 2008 年特高压直流输电技术主要研究成果概述

2008 年,向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电示范工程设计工作在 2007 年确定成套设计和工程初步设计方案的基础上,分别在 1 月、5 月和 7 月组织召开了三次向一上工程换流站设计联络会,多次召开设计协调会,结合设备研制和施工图设计深入优化设计专题研究,积极协调各设计单位之间的配合和接口,解决了一系列工程建设技术难题,取得了一系列成果并成功应用到工程中,大大提高了工程的可靠性和经济性。

2008 年,特高压直流输电示范工程关键设备研制工作全面展开,全面确定了 $\pm 800\text{kV}$ 、6400MW 特高压直流工程用 6 英寸晶闸管,800kV 换流阀、换流变压器、平波电抗器、直流场、直流控制保护等所有设备设计方案;除送端换流站 800kV 换流阀、换流变压器外,完成 6 英寸晶闸管、800kV 换流阀、换流变压器、平波电抗器、直流场、直流控制保护、交流 GIS 和滤波器等设备的研制任务。结合工程建设,国家电网公司还开展了工程施工、运行等方面的研究,为特高压直流示范工程建设和运行作好准备。

锦—苏工程在明确额定功率 7200MW、最大连续输送功率提高至 7600MW 技术方案后,国家电网公司组织相关单位对输送容量提升后的技术方案进行了全面梳理,结合工程送端换流站的高海拔、高地震烈度及苛刻的换流站大件运输条件,全面开展了工程技术方案研究和工程设计工作,通过优化设备技术参数和工程设计,全面确定了

±800kV、7200MW 特高压直流输电工程的主接线及主回路参数、过电压与绝缘配合方案、关键设备技术方案、无功配置方案等，为工程设备研制和工程建设打下了良好基础。

1 ±800kV、6400MW 级特高压直流输电工程设计优化

2008 年，向家坝—上海±800kV、6400MW 特高压直流输电示范工程建设快速推进，结合设备研制和施工图设计，在工程潮流及稳定、次同步谐振、工频过电压、直流系统动态性能分析、紧急功率控制、受端直流多馈入等方面深入进行了系统研究，在换流站平面布置、换流区域与直流场优化设计、主要设备设计参数最终确认、控制保护系统结构设计及优化等方面开展了多次联合设计，并在特高压直流工程融冰方案设计、接地极跨步电压、接地极导线选型、线路防覆冰等方面开展了专题设计工作，取得了一系列成果。

(1) 在系统研究方面。在全网数据准备工作基础上，完成了系统潮流及稳定研究、工频过电压研究、受端直流多馈入研究、次同步振荡扫描研究、紧急功率控制的研究、直流系统动态性能研究。

(2) 线路工程设计方面，科学落实电网设计新标准和差异化设计要求，合理确定设计冰厚，积极应用大截面导线和钢管塔，推广应用岩石锚杆基础等节约和环保型新技术。

(3) 换流站设计方面，吸取年初严重冰雪灾害的教训，提出并优化了特高压直流融冰技术方案，并以极低的代价在工程中实施，大大提高了工程的可靠性。

(4) 深入开展接地极的跨步电压研究和直流线路等效干扰电流研究，为应用新的接地极跨步电压设计标准和直流滤波器设计标准提供了科学有力的依据，仅本工程就节省投资近两亿元。深入研究接地极对临近交流线路杆塔的影响，优化了接地极选址条件，为后续工程建设开创了良好条件。

(5) 优化换流站大件运输码头、水源和桩基设计方案，大大提高了特高压直流工程的先进性和经济性。

通过大力开展技术创新和设计优化，节省了大量的工程投资，换流站综合单价比同类工程降低 16% 以上。目前，换流站土建施工图全部完成，满足现场施工进度要求。

1.1 特高压直流示范工程系统研究

在全网数据的基础上，在工程潮流及稳定、次同步谐振、工频过电压、直流系统动态性能分析、紧急功率控制、受端直流多馈入等方面深入进行了系统研究。对所有故障的时域仿真表明，受端上海系统的电气联系紧密、暂态稳定水平较高，在 2015 年所有运行方式下，系统能够在各种故障下保持暂态稳定且系统振荡能够很快被阻尼；



而送端四川电网的阻尼情况较差,需要在工程中考虑阻尼控制器以增强系统的稳定性。计算结果表明,各种运行方式下两端换流站的工频过电压水平均满足功能规范书的规定,其中复龙换流站最大的过电压水平为 1.218 倍,奉贤换流站最大的工频过电压水平为 1.16 倍,均低于 1.3 倍的限制要求。在上海地区电网内有华新换流站、奉贤换流站、南桥换流站和枫泾换流站 4 个换流站,满负荷情况下共向上海电网输入 13600MW 的功率。且上海电网电气联系紧密,一旦交流系统发生故障,会影响到馈入的 4 个换流站,引起换相失败。通过对包含 4 个直流系统的等值网络进行了建模和仿真研究表明,不论在扰动中还是扰动后的恢复过程中,研究的 4 个直流系统均具有安全、稳定的恢复特性。研究表明,送受端机组发生次同步振荡的风险很低,无需开展进一步的研究。向家坝—上海直流的动态性能研究表明,直流采用设计的控制保护系统可以实现安全运行,并且具有令人满意的性能及稳定性。

1.2 特高压直流换流站阀厅优化研究

特高压直流工程阀厅的换流容量、体积、高度和跨度远大于常规直流工程,对其工艺布置、暖通、电气连接和建筑设计开展深入研究有着十分重要的意义。向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程阀厅由国内自主设计,在总结常规直流工程阀厅设计的基础上,通过大力开展自主创新,在总体布置优化、阀厅内部电气布置优化及阀厅土建优化等方面开展深入研究,在阀厅所有主设备的参数及外形尺寸等确定的基础上,经过多次优化,确定了最终设计方案。

特高压直流示范工程不论是送端复龙站还是受端奉贤站,最终采用的都是二重阀+单相双绕组变压器的配置形式,即每站两极 4 个阀厅(包括高、低端阀厅),每个阀厅里都是 6 台换流变压器对应 6 组阀塔。考虑换流变压器、阀塔布置及直流穿墙套管出线方向等因素,最终采用的是每极高、低端阀厅面对面布置,2 个低端阀厅相邻背靠背布置的形式。紧靠 2 个高端阀厅各设 1 个辅控楼,楼内设置高端阀厅阀内冷设备间和 400V 低压配电室,有效减小相关管道、导线长度,功能分区明确。高压阀厅外的辅控楼侧专门设置一个楼梯间,从楼梯间向上可达高压阀厅的巡视走道入口,便于运行人员直接从阀厅外部进入高压阀厅的巡视走道,避免了在阀厅内部布置楼梯。低端阀厅的室外空调机布置在低端阀厅的屋顶上,室内空调设备布置在低端阀厅侧的主控楼内。两个低端阀厅的空调设备相互独立,运行时互不影响。

通过深入研究,在实际设备尺寸的基础上,对阀厅阀塔、换流变压器及防火墙、穿墙套管、金具和管母、接地开关等进行了优化布置和设计,根据过电压和绝缘配合水平、阀厅环境条件,优化了阀厅空气净距及总体尺寸。

与常规的换流站建筑设计相比,由于特高压直流工程阀厅体积的增加,以及抗震、防火、防台风和屏蔽要求的提高,因此,阀厅的建筑设计必须具有良好的屏蔽性能、

密封性能、保温性能。

对于阀厅土建设计,在结构上来说,根据高低端阀厅的体积、高度和防火要求,低端阀厅采用单层钢结构、混凝土剪力墙结构组成的混合结构体系;两个阀厅中间支撑结构为混凝土防火墙。高端阀厅采用单层钢结构框架体系;防火墙为现浇混凝土墙板型式,取代了初步设计时拟采用的框架填充墙型式,具有更好的抗震性能;并对阀厅空调通风系统、消防及火灾探测系统、屏蔽及接地系统进行了设计优化。

1.3 直流接地极跨步电压限值研究

向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程送端侧采用共用接地极设计,由于共用接地极入地电流大,极址面积受限,设计难度大,工程投资巨大。跨步电压限值是接地极设计的重要依据。根据技术经济比较,在成本与安全裕度之间协调,合理选取跨步电压的设计限值,对于保证人员安全和降低工程造价有着重要的意义。

最大跨步电压与接地极入地电流、地表土壤电阻率成正比,与电极直径、埋深成反比,同时地面电位和跨步电压随距接地极的距离增加是逐步减小的。通过开展人体样本试验,获取了大量数据,经过统计分析,得到研究结论:建议人体电阻取值为1400Ω,感知直流电流取5.35mA。此时地面最大允许跨步电压可按下列公式计算

$$E=7.49+0.032\rho_s \text{ (V/m)}$$

式中 ρ_s ——表层土壤电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$ 。

跨步电压取值试验数据表明:针对我国人群实际情况和接地极运行特点,提出的上述适合我国国情的跨步电压限值是安全的,工程应用是可行的。向一上工程两端接地极设计应用了本研究成果,在共用接地极的参数满足系统安全运行要求的情况下,节省了工程投资,减小了占地面积。跨步电压取值试验数据表明,该工程采用本成果是安全的,工程应用是可行的。

1.4 接地极线路导线优化设计研究

对于特高压直流输电工程,由于特高压直流工程每极采用两个换流器串联接线方式,单极运行时间较短,绝大多数时间为双极平衡运行,而且运行期间接地极线路上电压很低,电磁环境影响很小。接地极线路导线原设计方案为 $2 \times 4 \times \text{LGJ}-400/35$,导线截面大,投资高。如果研究采用更加经济而又满足运行技术要求的设计方案,将极大提高工程经济性和合理性,为后续工程设计创造更加良好的条件提供好的借鉴,通过深入研究分析,提出了示范工程新的接地极导线选型推荐方案,推荐示范工程采用 $2 \times 2 \times \text{NRLH60G/G1A}-500/45$ 导线。采用新的导线方案后,对两站的中性母线直流避雷器、MRTB、NBS和NBGS开关都没有影响,但对GRTS开关的转换电流能力的要求提高了,如保持技术规范书中GRTS开关最大电力转换能力不变,则建议在进行转换操作时,采用类似MRTB转换时相似的窗口方式,将直流系统功率调整至6600MW



以下即可满足开关转换能力的要求,对于额定输出功率 6400MW 的系统而言,可以满足运行需要。对于后续额定输送功率 7200MW 的锦—苏工程而言,完全可以通过适当提高 GRTS 的技术参数,以满足系统优化设计的需要。

1.5 特高压直流工程融冰技术方案研究

特高压直流输电工程输送容量大,送电距离远,为了进一步提高特高压直流输电工程的可靠性,增强工程抵御严重冰雪灾害的能力,发挥特高压直流工程每极两个换流器串联的优势,国家电网公司特高压建设部组织开展了特高压直流输电工程融冰技术方案研究,提出了充分利用特高压直流工程每极两个换流器串联特点的阻冰、融冰技术方案,并应用于向一上工程设计。

利用特高压直流工程输送容量大,主接线采用双极、每站每极两个换流器串联的特点,在预知天气将出现冰雪天气时,首先采用单极、单换流器金属回线运行方式,这样即使在枯水季节,也可以在输送功率不大的情况下将输送电流提高至 4000A 左右,可以有效防止输电线路结冰,称之为“阻冰”运行方式。

在输电线路已经出现结冰,需要尽快将冰融化情况时,将极 1 和极 2 的低端换流器退出运行,然后将双极的高端 12 脉动阀组并联运行,直流线路上通过电流可以达到 8kA,可以在 5h 左右融化掉输电线路上的冰。并联运行的两个换流器中额定电流为 4kA,满足换流器的设计要求,直流系统的运行方式相当于单极 400kV 金属回路运行,没有提高其他直流回路设备的技术要求。这种方式称为“融冰”运行方式。

1.6 特高压直流输电线路提高防覆冰能力设计研究

向家坝—上海±800kV 特高压直流输电线路的路径,受电网规划、沿线气象条件、交通、地形、地质情况、地方规划、军事设施、矿产资源、自然保护区、风景名胜区、文物古迹等影响,须经过高山和重覆冰地区,由于重冰区线路冰荷载大,具有特殊的静、动态特性,运行维护困难等特点,在设计中应特别重视,并研究采取相应的加强措施。

输电线路覆冰厚度的确定和冰区划分是工程设计的重点,通过细化冰区设防分级,在原设计规程基础上增加 15mm 中冰区设计条件,并明确相应设计原则和措施。地线覆冰厚度宜比导线增加 5mm,增加地线和地线支架抗冰能力。轻、中、重冰区耐张段长度一般不宜大于 10、5、3km。当耐张段长度较长时,应考虑防串倒措施,在高差或档距相差悬殊的山区或重冰区等运行条件较差的地段,耐张段长度应适当缩短。大跨越线路、跨越主干铁路、高速公路等重要设施的跨越采用独立耐张段。

重冰区线路绝缘子推荐选用盘形绝缘子,绝缘子串片数不仅要满足覆冰耐压要求,同时还应满足未覆冰时相应污区绝缘子选择的要求。考虑到±800kV 特高压直流线路的重要性,±800kV 特高压直流杆塔结构重要性系数取 1.1。

1.7 特高压直流输电线路工程优化设计

随着向家坝—上海特高压直流线路工程设计工作的深入，科研和设计单位结合施工图阶段的实际条件，进一步结合工程实际开展了设计优化工作。

综合考虑无线电干扰、可听噪声和地面合成场强的要求，最终设计确定的导线方案为 $6 \times \text{LGJ}-720/50$ ，双极线路极间距为 22m，最小导线对地高度为 18m。2007 年 6 月，中国电力科学研究院以同样技术方案建成了试验线段，通过长时间试验观测，结果表明无线电干扰水平约为 50dB，可听噪声水平约为 41dB (A)，合成场强大多数时间小于 30kV/m，满足电磁环境限值要求。电晕限制条件是地线直径选择的控制因素，另外考虑更好的耐腐蚀性，以及耐雷击断股要求单丝直径不小于 3mm，最终选择采用直径为 17mm 的 JLB20A-180 铝包钢线，另一根地线采用具有类似特性的 OPGW。

为简化金具形式，利用关键技术研究成果，对金具进行了统一标准化设计，形成了标准化系列，共包括 32 大类，129 个型号的金具。

导线对地和交叉跨越距离，是线路设计的基本原则之一，对于标准轨、窄轨和电气化铁路，直流 $\pm 800\text{kV}$ 线路不应小于 21.5m，对于输电线路跨越拟建铁路处，有铁路架桥机作业情况发生时，为保证架桥机上铁路工作人员的安全，直流 $\pm 800\text{kV}$ 导线至轨顶的垂直距离不应小于 24.0m。当输电线路与铁路平行接近时，杆塔外缘至轨道中心的水平距离不小于塔高加 3.1m。跨越铁路时采用独立耐张段，跨越档导线、地线不得设有任何接头。跨越时，交叉角不应小于 45° 。

对于本工程的直线塔、直线转角塔及干字型耐张杆塔的设计，在线路经过房屋特别密集的区域时，局部使用 F 型塔，可以压缩走廊宽度，减少民房和工厂的拆迁，极导线垂直排列 $\pm 800\text{kV}$ 直流线路的走廊宽度与极导线水平排列 $\pm 800\text{kV}$ 直流线路的相比 (76m) 减小约 36m。无论轻、中冰还是重冰区，直线塔均采用 V 串挂线方式。当转角度数较小时，采用分体式耐张塔，可以消除断线及不均匀冰下的扭矩作用，可使塔重降低，转角度数较大时，仍然采用传统整体式干字塔。

钢管塔的受力、塔重、变形、外观等均优于角钢塔，但在运输、加工、组装上则不如角钢塔，特别对于山区线路，人力运输存在很大的问题。本工程上海区段线路具有风速高、荷载大（直流线路与接地极线路同塔架设）、人口相对密集、运输条件较好的特点，结合考虑钢管塔外形美观、风压体型系数小等优势，推荐该区段采用钢管塔。为减少铁塔耗钢，本工程推荐采用 Q420 高强钢。

2 $\pm 800\text{kV}$ 、6400MW 级特高压直流工程关键设备研制

国家电网公司坚决贯彻国家发展和改革委员会的批复文件精神，支持国内制造企业求创新、谋发展的诉求，在全部 6 个标包中，除第六标中的直流场设备外，全部面



向国内企业进行采购谈判工作,使国内企业在自主创新、掌握核心技术、形成自主知识产权方面占据主导地位。通过合理有效的采购策略,本工程实现了以较小的市场获得了世界上最先进的技术,而且通过优化方案,实现了两种技术的融合,增强了市场竞争性。既保证了技术的可靠性,又最大限度地发挥了国内厂家的自主创新能力。通过工程实践,国内企业将能全面掌握特高压直流工程换流阀、换流变压器、平波电抗器和控制保护制造等设备的制造技术和成套设计技术,有效地发挥了依托重点工程振兴国内装备制造业的作用,既确保了设备的可靠性和研制进程,又为工程安全、可靠投运奠定良好的基础。

向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程主设备除直流场设备和部分高端换流变压器由国外制造外,其他全部由内资企业制造。国内变压器、换流阀、控制保护和成套设计等行业的重点骨干企业都参与了示范工程的设备供货和技术服务,西安电力电子所还承担了6英寸晶闸管的供货任务。示范工程具体中标情况如下:

(1) 系统研究与成套设计。由北京网联直流工程技术有限公司牵头,联合西安高压电器研究所等单位承担。

(2) 换流阀。送端复龙换流站(包1)供货商为西安电力机械制造公司,受端奉贤换流站(包2)供货商为许继集团有限责任公司。

(3) 控制保护。送端复龙换流站(包1)供货商为南京南瑞继保有限公司,受端奉贤换流站(包2)供货商为许继集团有限责任公司。

(4) 换流变压器。送端复龙换流站(包1)供货商为西安电力机械制造公司、保定天威保变电气股份有限公司和SIEMENS公司。受端奉贤换流站(包2)供货商为特变电工沈阳变压器集团有限公司和ABB公司。

(5) 平波电抗器。供货商为北京电力设备总厂。

(6) 直流场设备。供货商为ABB公司,其他交流设备面向国内招标,全部由国内企业供货。

为积极推进特高压直流输电技术的国产化水平,国家电网公司采取了以下措施。一是依托特高压专家委员会和特高压直流工作组,充分发挥国家电网公司和中国机械联合会的协调作用,为制造厂家提供强有力的技术支持。二是坚持设备监造“三结合”,即坚持国内监造与国外监造相结合、驻厂监造与专家检查相结合、全程监造与关键点监督见证相结合,严把设计校核、工厂监造和试验见证关,确保设备研制成功。三是充分发挥国家电网公司特高压技术研究和直流运行经验丰富的优势,充分发挥特高压试验基地的作用,为制造厂家提供最大的技术服务。四是积极创造条件,安排样品在特高压直流试验基地带电试运行,或安排中间产品挂网试运行。

自2007年12月主要设备合同签署以来,国家电网公司始终坚持以设备为核心,