

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

(2007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

(2007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）》和《特高压直流输电技术研究成果专辑（2006 年）》之后，对 2007 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的劳动和智慧的结晶。

本书共分 6 章，第 1 章对 2007 年特高压直流工作进行了介绍，对主要成果进行了简要概述；第 2 章介绍了特高压直流工程设计方案，对成套设计技术方案、换流站设计和大跨越设计做了重点介绍；第 3 章介绍了特高压直流输电设备技术方案，包括晶闸管换流阀、交流滤波器、直流滤波器和控制保护；第 4 章介绍了特高压直流输电技术专题，包括特高压直流输电关键技术、换流站技术和输电线路技术；第 5 章和第 6 章分别对特高压直流试验基地和特高压直流设备监造做了介绍。

本书可供从事高压直流输电设计、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. 2007 年 / 刘振亚主编. —北京：
中国电力出版社，2008

ISBN 978-7-5083-8109-1

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（2008）第 178035 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>）

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 12 月第一版 2008 年 12 月北京第一次印刷

880 毫米×1230 毫米 16 开本 19.5 印张 374 千字 2 插页

印数 0001—3000 册 定价 80.00 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



STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

编写人员名单

主 编	刘振亚					
副 主 编	舒印彪					
编委会成员	孙 昕	赵庆波	郭剑波	陈维江	张 贺	刘泽洪
	丁 扬	于 刚	张文亮	卜凡强	张运洲	李文毅
编写组组长	孙 昕	陈维江	刘泽洪	丁 扬		
编写组副组长	高理迎	王怡萍	余 军			
编写组成员	郭贤珊	卢理成	赵大平	丁一工	黄 勇	李安伟
	乔振宇	张 进	王 洪	谢帮华	马为民	石 岩
	殷威扬	聂定珍	胡文华	王代荣	丁晓飞	薛春林
	李 翔	李勇伟	魏其巍	杨一鸣	孙中明	李亚男
	张 民	刘宝宏	曹燕明	印永华	蒋卫平	张翠霞
	吴娅妮	周沛洪	修木洪	陆家榆	鞠 勇	宿志一
	孙昭英	范建斌	谷 琛	张燕秉	俞敦耀	夏 雪
	郑 劲	张小武	周 康	李永双	陈 光	李新年
	周 军	殷 禹	廖蔚明	李庆峰	朱永平	张芳杰
	吴 静	张子富	王景朝	樊宝珍	于永清	李光范
	陶 瑜	李喜来	杜澍春	崔 翔	万宝全	

前 言

特高压输电在减少输电损耗、节约线路走廊占地、提高输送容量、节省工程投资等方面具有显著优势。发展特高压输电技术，建设特高压电网，有利于促进大煤电、大水电、大核电和大型可再生能源基地的集约化开发，优化能源生产和消费布局；有利于降低电网建设成本，节约土地资源；有利于提高电网运行效率，促进资源节约和环境友好型社会建设。发展特高压电网，是国家电网公司贯彻落实科学发展观的有力举措，对于加快发展现代能源产业和综合运输体系、保障国民经济长期健康发展意义重大，具有显著的经济效益和社会效益。发展特高压电网，符合我国国情和国家能源发展战略，得到了党和国家领导人及政府主管部门的高度重视和支持，并且已将发展特高压输电纳入《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）》。2007年4月，向家坝—上海±800kV特高压直流示范工程（简称特高压直流示范工程）正式获得核准，标志着我国特高压工程全面进入实施阶段。

2007年，国家电网公司组织国内外知名设备制造商、咨询公司，国内各建设单位、科研院所、高校针对±800kV特高压直流输电技术的系统研究、成套设计、换流站设计、输电线路设计等方面的重大问题开展了卓有成效的工作，取得了丰硕成果。在此基础上，国家电网公司多次组织专家召开技术研讨会、设计方案评审会，通过深入细致的研究、科学严谨的论证，结合工程实际，确定了工程技术方案，2007年11月工程成套

设计和换流站工程初步设计通过评审。2007 年 5 月，特高压直流示范工程奠基仪式在上海举行。6 月，国家电网公司特高压工程建设工作会议首次召开，标志着指挥统一、运行高效的特高压工程建设三级管理体系初步构建。12 月，国家电网公司在四川宜宾隆重举行特高压直流示范工程开工仪式，标志着我国特高压电网建设又迈出新的、重要的一步。

为及时总结 2007 年特高压输电技术工作取得的成果，国家电网公司组织相关科研、设计、咨询和高校等单位编写《特高压直流输电技术研究成果专辑（2007 年）》。本书是对 2007 年特高压直流示范工程建设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的劳动和智慧的结晶。本书可以帮助电力系统技术人员全面了解目前特高压直流输电工程的进展情况、技术方案、设计方案和关键技术研究成果，全面了解特高压直流输电技术的发展历程；可以为今后的技术研究、工程建设等方面的工作提供开拓性思路。

本书第 1 章简要回顾了国家电网公司 2007 年在特高压直流输电工程方面的工作，概述了 2007 年特高压直流输电工程所取得的主要成果；第 2 章介绍了特高压直流示范工程成套设计、换流站设计和大跨越设计等内容；第 3 章介绍了特高压直流示范工程晶闸管换流阀、交流滤波器、直流滤波器和控制保护等设备技术方案；第 4 章介绍了部分特高压直流输电关键技术研究成果，展现了特高压直流输电技术研究的渐进过程；第 5 章对特高压直流试验基地建设做了介绍；第 6 章介绍了特高压直流设备监造工作。

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，并藉此向本书编辑出版提供支持、帮助的单位和个人致谢！

国家电网公司

2008 年 9 月

目 录

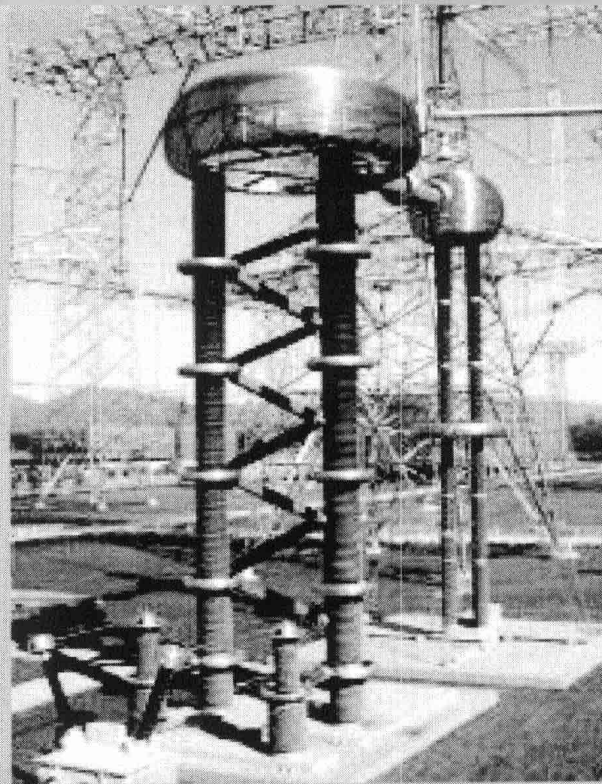
前言

第 1 章 概论	1
第 1 节 2007 年特高压直流工作回顾	2
第 2 节 2007 年特高压直流输电主要成果概述	7
第 2 章 特高压直流工程设计方案	13
第 1 节 成套设计技术方案	14
第 2 节 换流站设计	34
第 3 节 大跨越设计	58
第 3 章 特高压直流输电设备技术方案	66
第 1 节 晶闸管换流阀	67
第 2 节 交流滤波器	80
第 3 节 直流滤波器	88
第 4 节 控制保护	103
第 4 章 特高压直流输电技术专题	109
第 1 节 特高压直流输电关键技术	110
课题 1 优化特高压输送容量研究	110
课题 2 $\pm 800\text{kV}$ 级直流系统与送受端交流系统相互 影响研究	122
课题 3 $\pm 800\text{kV}$ 级直流工程过电压及绝缘配合的研究	129
课题 4 $\pm 800\text{kV}$ 级直流工程电磁环境的研究	152

课题 5	±800kV 直流输电工程高海拔外绝缘特性的研究	163
课题 6	±800kV 级直流工程高海拔设备电晕特性研究	169
第 2 节	特高压直流输电换流站技术	178
课题 1	换流站噪声控制研究	178
课题 2	直流系统谐振抑制方案比较	189
课题 3	特高压直流系统谐波特性及标准的研究	196
第 3 节	特高压直流输电线路技术	205
课题 1	±800kV 级直流系统输电线路设计技术原则的研究	205
课题 2	±800kV 直流输电线路路径方案的研究	218
课题 3	与特高压直流平行架设的交流线路对特高压直流的影响及抑制 措施研究	223
课题 4	±800kV/7 200MW 直流输电线路采用不同极导线时的电磁环境 比较分析	238
课题 5	±800kV 级直流系统外绝缘及绝缘子选型的研究	250
课题 6	±800kV 级直流工程带电作业间隙及带电作业安全防护的研究	257
课题 7	±800kV 级直流工程对地及交叉跨越间隙的研究	264
课题 8	±800kV 级直流工程杆塔方案与荷载的研究	270
课题 9	±800kV 级直流多分裂间隔棒及挂线金具研究	277
第 5 章	特高压直流试验基地	284
第 6 章	特高压直流设备监造	297

2007

特高压直流输电技术研究成果专辑



第 1 章

概 论



第1节 2007年特高压直流工作回顾

2007年,国家电网公司积极稳妥地推进特高压直流输电工程建设,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,遵循建立“两个体系”^①、坚持“两个三结合”^②、实现“两个创新”^③的原则。充分发挥集团化运作的优势,调动公司系统各单位、工程参建单位及所属省公司的积极性,发挥专家委员会对关键技术问题和重大方案的咨询把关作用。坚持把安全可靠作为首要原则,深入研究科研、设计、设备研制等环节的关键技术,注重借鉴国外先进经验,对各项技术方案反复论证,采取有效措施防范风险,确保安全可靠。在科研课题、工程设计、招标采购、工程建设和国际技术交流与合作等方面开展了卓有成效的工作,取得了丰硕的成果。截至2007年底,向家坝—上海±800kV特高压直流输电示范工程换流站成套设计和工程设计全部完成、输电线路设计稳步推进,工程建设全面展开;锦屏—苏南±800kV特高压直流输电工程前期专题评估、成套设计与工程设计工作全面开展,用地预审得到国土资源部批复,环境影响评价、水土保持等报告通过评审。

1 科研课题

2007年,国家电网公司对科研项目进行全过程跟踪、监督、协调、检查,确保各科研课题研究进展的可控、在控、能控;积极组织专题研讨会、课题评审会,解决影响工程设计的关键技术问题,验收科研课题32项;加快特高压直流试验基地建设,为科研课题创造良好的环境。

2月,国家电网公司对“±800kV级直流工程过电压及绝缘配合的研究”、“±800kV级直流系统主设备规范的研究”、“±800kV级直流系统无功控制方案的研究”、“±800kV级直流系统主回路接线方式及运行方式的研究”和“±800kV级直流系统成套设计的研究”等六个课题进行了验收。3月,国家电网公司在北京召开向家坝—上海特高压直流输电工程换流站站址污秽调查项目验收评审会,对污秽调查实测结果进行了专家验收评审。6月,国家电网公司完成了特高压直流工程四个相关接地极技术

① 建立指挥统一、运作高效的建设管理组织体系,建立科学严谨的工程建设管理制度体系。

② 关键技术与工程应用实施三结合:关键技术研究实行自主创新和国外咨询相结合、关键技术研究成果实行专项审查和公司级审查相结合、关键技术与设计专题研究相结合。设备研制引进三结合机制:设备研制咨询和监造注重国内和国外相结合、驻厂监造与专家组重点检查相结合、全过程监造与关键点监督见证相结合。

③ 积极开展工程管理体制和手段创新、大力开展建设实施阶段的技术创新。

研究课题验收。根据中国电力科学研究院的研究结论,在金沙江送端3个换流站共用接地极情况下3回特高压直流输电送出工程均可在各种工况下独立安全运行,无相互影响。国网电力科学研究院(原国网武汉高压研究院)根据工程备选极址深层电阻率测量结果,对共用接地极的各种工程设计进行了校核和优化。8月,国家电网公司主持召开特高压直流工程关键科研课题验收会,课题包括“ $\pm 800\text{kV}$ 直流输电系统单极运行对交流系统影响”、“ $\pm 800\text{kV}$ 级直流系统与送受端交流系统相互影响的研究”、“ $\pm 800\text{kV}$ 级直流工程电磁环境的研究”、“ $\pm 800\text{kV}$ 级直流系统导线截面及其分裂形式的研究”。12月7日,国家电网公司委托国网直流工程建设有限公司开展锦屏换流站站址区域污秽试验研究工作,拟定在西昌220kV变电站内建立一座污秽试验站。12月29日,国家电网公司在北京组织召开《 $\pm 800\text{kV}$ 换流站用直流隔离开关与接地开关技术规范》企业标准评审会。该标准按照此次评审会意见修改完善后,已具备报批条件。

6月,国家电网公司特高压直流试验基地试验线段全线带电;9月,双回直流线段升压至 $\pm 1200\text{kV}$ 并稳定运行。

2 工程设计

2007年,国家电网公司以建设“安全可靠、自主创新、经济合理、环境友好、国际一流的优质精品工程”为总体原则,针对特高压直流工程的需求,总结以往国内外直流工程经验,大力开展设计创新。依托工程可研、前期科研与咨询研究成果,多次组织设计联络会、研讨会、评审会,充分发挥特高压直流工作组的作用,全面推进工程成套设计、换流站设计、线路设计等工作,为实现工程建设目标奠定了坚实的基础。

2.1 换流站方面

1月11日,国家电网公司组织召开向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电示范工程成套设计技术支持启动会,正式启动特高压直流工程成套设计技术支持工作。1月16日,国家电网公司组织召开向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电示范工程换流站平面布置优化技术研讨会,对换流站平面布置中面对面布置的高、低端换流变压器安装时序、原则进行了讨论,确定了先低端、后高端、不预留运输通道的原则,节约了换流站占地。6月,国家电网公司在北京组织召开向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电示范工程技术方案评审会,对特高压直流示范工程成套设计和设备技术方案进行了认真讨论和评审,对特高压直流主回路参数选择、主要设备技术方案进行了充分讨论,明确了有关技术方案。7月,国家电网公司委托中国电力工程顾问集团公司在北京组织召开奉贤换流站征地范围图、进站道路施工图预审查会。8月,国家电网公司组



织锦屏换流站大件运输公路方案路径实地考察。9月18日,国家电网公司组织召开特高压直流换流站噪声水平评价审查。会议认为在主要噪声源采取适当的控制措施后,向家坝—上海、锦屏—苏南特高压直流输电工程的换流站场界噪声和敏感点噪声均能达到国家环保总局批准的换流站噪声要求指标,满足工程建设的需要。9月18~28日,国家电网公司组织召开向家坝—上海特高压直流输电示范工程成套设计工作会议,此次会议标志着特高压直流换流站联合设计工作步入实质性阶段。9月20日,国家电网公司组织召开特高压直流示范工程换流站直流场支柱绝缘子设计选型会议。会议推荐户外直流场支柱绝缘子采用瓷涂防污闪涂料的型式,在满足机械强度和制造能力的前提下,绝缘子爬电比距不小于45mm/kV。10月,国家电网公司委托中国电力工程顾问集团公司完成换流站交流主接线和站用电配置方案审查,确定了交流系统设备主要技术参数、站用电设备参数及选型。11月12日,中国电力工程顾问集团公司在北京组织会议对奉贤换流站送出系统配套工程专题研究进行审查,决定采纳华东电力设计院推荐的本期按照3回出线至500kV南汇变电站的一点接入方案考虑,远期根据电源电网规划建设的情况,可调整至500kV三林变电站、南汇变电站各2回共4回出线的两点接入方案。11月17日,国家电网公司在北京组织召开向家坝—上海±800kV特高压直流示范工程成套设计评审会议。会议充分肯定了成套设计的研究成果,并形成了审查意见。11月19日,国家电网公司在上海组织召开特高压直流示范工程换流站和接地极初步设计审查会议。本次会议讨论并通过了特高压直流示范工程换流站和接地极的设计方案,并对下阶段设计工作提出了具体要求。

2.2 线路方面

1月,国家电网公司组织完成向家坝—上海特高压直流输电线路路径方案调研,了解了向家坝—上海、锦屏—苏南±800kV特高压直流输电线路南、北路径方案的技术特点以及初步造价分析。1月底,召开西南水电外送特高压输电走廊统筹规划和特高压直流输电工程路径优化设计汇报会,确定向家坝—上海、锦屏—苏南±800kV特高压直流输电线路采用大北(武汉南)路径通道。2月,国家电网公司委托西南电力设计院、西北电力设计院、中南电力设计院、华东电力设计院四家单位开展向家坝—上海、锦屏—苏南±800kV特高压直流输电线路预选线工作,3月,国家电网公司启动向家坝—上海、锦屏—苏南±800kV特高压直流输电线路预选线工作。4月,国家电网公司组织召开特高压直流线路安徽段长江大跨越工程选址研讨会,会议明确向家坝—上海、锦屏—苏南两回特高压直流输电线路工程跨越点方案选择。6月,中国电力工程顾问集团公司组织召开向家坝—上海、锦屏—苏南特高压直流输电工程初设选线及复龙换流站平面布置方案和征地范围审查会。会议确认了两回特高压直流输电线路推荐路径方案的合理性,会议还对复龙换流站平面布置和征地范围进行了评审,明确

了总布置、竖向设计、地基处理等方面的设计方案。7 月，国家电网公司在北京组织召开向家坝—上海、锦屏—苏南±800kV 特高压直流输电线路工程初步设计工作大纲、设计专题研究大纲评审会。会议讨论并通过了两回特高压直流输电线路初步设计组织原则、初步设计工作大纲以及设计专题研究大纲。12 月 11 日，国家电网公司在北京组织召开向家坝—上海、锦屏—苏南±800kV 特高压直流输电线路工程初步设计启动会，正式启动了特高压直流输电线路工程的初步设计工作。12 月 13 日，国家电网公司会同中国电力工程顾问集团公司在北京组织召开向家坝—上海、锦屏—苏南±800kV 特高压直流输电线路长江大跨越工程试桩方案评审会议。会议基本同意各设计院试桩大纲提出的方案，并对试桩大纲提出了补充意见和建议。

3 招标采购

2007 年，国家电网公司以“安全可靠、自主创新、激励竞争、经济合理”为原则，坚持公平、公正、公开，规范招标采购程序，坚持以我为主、自主创新的国产化路线，力求通过示范工程实践，全面掌握±800kV 特高压直流输电系统研究、成套设计、工程设计、设备制造、施工安装与调试运行技术，确保后续工程有可靠的国内供货能力。

3.1 设备招标

2 月，向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程换流站设备招标采购方案获得国家发改委批复。4 月，向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程换流站设备招标采购文件发布仪式在北京举行。5~7 月，国家电网公司先后组织 3 轮向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程换流站设备竞争性报价与谈判以及最后报价动员会议。7 月，国家电网公司组织召开 6 英寸晶闸管协调会，针对 6 英寸晶闸管元件价格偏高的问题与供货厂家进行协商讨论，并提出了有利于厂家的支付方式，使 6 英寸晶闸管元件的报价更为合理。8 月，国家电网公司举行向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程直流设备国际公开招标开标仪式。9 月，国家电网公司向国家发改委行文汇报特高压直流示范工程换流站直流设备采购工作的具体过程和推荐供货方案，并就设备国产化方案进行了特别说明。10 月，国家电网公司发布向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程换流站常规交流设备采购招标公告，标志着特高压直流示范工程换流站交流设备采购工作全面展开。11 月，向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程直流设备采购方案正式获得国家发改委同意。随即，国家电网公司正式拉开直流设备采购合同谈判的序幕。谈判历时一个月，涉及特高压换流站所有直流设备采购，包括换流变压器、换流阀、平波电抗器、直流场设备和控制保护设备等。12 月，国家电网公司分别与成套设计单位和 8 家设备制造企业签署向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程主设备合同，标志着特高压直流示范工程设备研制



生产进入全面实施阶段。同月，500kV 交流设备采购工作完成开标和评审。

3.2 设计施工招标

6 月，复龙换流站大件道路和场平施工招标工作全面展开。8 月，国家电网公司确定复龙换流站场平和大件道路施工中标单位；同月，向家坝—上海和锦屏—苏南特高压直流输电线路大跨越工程勘察设计及设计监理招标发布招标公告并开始发售招标文件。11 月，两回特高压直流输电线路大跨越设计招标中标单位确定；复龙、奉贤换流站桩基和土建，奉贤换流站进站道路施工招标正式发布招标公告。12 月，国家电网公司招投标管理中心发布锦屏—苏南特高压直流输电工程换流站及接地极的勘测设计招标文件。

4 工程建设

特高压直流输电工程建设任务重、技术新、难度大、挑战性强。2007 年，国家电网公司按照集团化运作、集约化发展、精细化管理的思路，建立了指挥统一、运作高效的建设管理组织体系和科学严谨的工程建设管理制度体系，全力推进特高压直流工程建设。

4 月，国家发改委印发关于向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程核准的批复文件（发改能源〔2007〕871 号）。5 月，向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程奠基仪式在上海奉贤换流站站址举行。6 月，国家电网公司召开首次特高压工程建设工作会议。会议印发了特高压交直流建设管理纲要，标志着指挥统一、运作高效的特高压建设三级管理体系初步构建。10 月，特高压直流示范工程复龙换流站场平顺利进场。12 月，国家电网公司在四川省宜宾市举行向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程开工仪式。这是目前开工建设的世界电压等级最高、输送距离最远、容量最大的直流输电工程，是继特高压交流试验示范工程全线开工建设，稳步推进之后，我国电力工业发展史上具有重要里程碑意义的又一件大事，标志着我国特高压电网建设又迈出重要的一步。

5 国际交流

由国际电工委员会和国际大电网会议联合主办，由国家电网公司、IEC 中国国家委员会、CIGRE 中国国家委员会和中国电力企业联合会等四家单位联合承办的 2007 年特高压国际标准研讨会于 7 月 18～21 日在北京举行。特高压国际标准研讨会在中国召开是国际电工最高技术组织对国家电网公司发展特高压输电技术战略决策的肯定和支持。制定特高压标准，必将推进我国电力设备的科技创新，加速与国际水平接轨，进一步提升国内装备制造业的能力和水平。

第 2 节 2007 年特高压直流输电主要成果概述

向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程是世界上第一个±800kV、7000MW 级特高压直流输电工程，首次采用额定电流为 4kA 的 6 英寸晶闸管。锦屏—苏南特高压直流工程是世界首个±800kV、7200MW、线路长度超过 2000km 的特高压直流输电工程，首次采用额定电流为 4.5kA 的 6 英寸晶闸管。

由于特高压直流输电工程在世界上尚无先例，系统复杂、技术难度大、挑战性强，为了实现安全可靠、自主创新、经济合理、环境友好、国际一流优质精品工程的建设目标，为工程建设提供技术支撑，2005 年和 2006 年，国家电网公司共下达工程关键技术研究课题和工程单项研究专题 76 项，涉及系统研究、工程设计、工程建设、设备制造和运行等各个环节，截至 2007 年底，共验收课题 39 项。

2007 年，国家电网公司重点组织各相关单位进一步深入研究、优化特高压直流输电工程设计，确定了换流站总体技术方案，完成了向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程成套设计、换流站初步设计；积极开展输电线路技术专题研究，确定了一系列重大技术方案，为工程建设提供了技术支撑；快速推进特高压直流试验基地建设、特高压直流设备监造等工作，为设备研发制造提供了坚强保障。

1 向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程设计

1.1 成套设计技术方案

成套设计技术方案全面地总结了特高压直流输电技术研究成果，确定了工程总体技术方案。

(1) 特高压直流示范工程直流系统电气主接线。向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程直流系统包括 2 个完整单极，每极采用“400kV+400kV”的 2 个 12 脉动换流器串联组成。换流阀采用 6 英寸晶闸管元件，换流变压器采用型式为单相双绕组。每个 12 脉动换流器都配置一组并联旁路开关。直流系统采用干式平波电抗器，每极每端共 4 台，极线和中性线各配置 2 台。

(2) 主回路参数。特高压直流示范工程直流整流侧额定触发角 $15^\circ \pm 2.5^\circ$ ，逆变侧额定熄弧角 17° 。复龙换流站换流变压器额定容量 321.1MVA，分接开关挡位数 +23/-5，每挡分接头 1.25%，额定分接的短路阻抗 18%；奉贤换流站换流变压器，额定容量 297.1MVA，分接开关挡位数 +22/-6，每挡分接头 1.25%，额定分接的短路阻



抗 16.7%。每侧每极平波电抗器电感值为 300mH, 单台电感值为 75mH。

(3) 换流站无功补偿与无功平衡。送端复龙换流站配置 4 大组 14 小组交流滤波器/并联电容器, 分组容量为 220Mvar。其中交流滤波器 9 小组, 分别为 4 组 BP11/13 滤波器, 4 组 HP24/36 滤波器和 1 组 HP3 滤波器。装设一组 180Mvar 的高压电抗器, 纳入换流站无功控制。受端奉贤换流站配置 4 大组 15 小组交流滤波器/并联电容器, 其中 8 组 HP12/24 滤波器, 滤波器小组容量 260Mvar, 并联电容器小组容量 238Mvar。

(4) 交、直流滤波器设计。送端复龙换流站采用 4 组 BP11/BP13、4 组 HP24/36、1 组 HP3 交流滤波器, 受端奉贤换流站采用 8 组 HP12/24 的交流滤波器方案。通过技术研究和试验, 确定特高压直流输电示范工程双极运行时等效干扰电流值不大于 3000mA, 单极运行时等效干扰电流不大于 6000mA。直流滤波器的配置方案为每站每极一个三调谐 2/12/40 滤波器, 配置带电投切的隔离开关。采取并联滤波的方法抑制 100Hz 谐振, 与直流滤波器合并设计; 采取串联阻断滤波的方法抑制 50Hz 谐振, 在送端复龙换流站每极中性母线各装设一台 50Hz 串联阻断滤波器。

(5) 直流场外绝缘设计。推荐采用户外场、瓷绝缘子涂防污闪涂料方案, 瓷绝缘子涂防污闪涂料后爬电比距可相应减小。支柱绝缘子的机械性能, 抗弯强度不小于 10kN; 建议爬电比距不小于 45mm/kV, 如机械强度满足要求, 可考虑采用 50mm/kV 爬电比距。

(6) 控制保护系统。直流双极/极/换流器控制和直流保护系统主机采用实时操作系统 (RTOS), 站控系统主机采用裁剪 Windows XP+实时操作系统。直流控制保护系统共用双重化的站 LAN 网, 直流双极/极/换流器控制和直流保护系统与站控系统之间的实时信号交换基于实时的站 CAN 网。换流站运行人员控制系统的服务器采用 Unix 操作系统。交、直流控制系统均采用完全双重化冗余方案。直流系统保护、换流变压器保护采取三取二逻辑。交流系统、交流滤波器采用双重化保护。

1.2 换流站设计

换流站设计根据成套设计确定的总体技术方案, 完成电气一次部分、电气二次部分、土建部分、水工及消防、噪声治理和主要技术经济指标等工作, 指导施工建设, 主要设计方案如下:

(1) 电气一次部分。

1) 送端复龙换流站 500kV 交流滤波器大组采用单母线接线。各滤波器大组作为一个元件分别接入 500kV 交流开关场; 1 台站用降压变压器和 1 组高压电抗器接到其中 2 组 500kV 滤波器母线上。500kV 交流开关场采用 3/2 断路器接线。远景 10 回 500kV 出线、4 回换流变压器进线、4 回大组交流滤波器进线共 18 个元件组成 9 个完整串,

另1台站用变压器接入母线；本期9回500kV出线、4回换流变压器进线、4回大组交流滤波器进线共17个元件组成8个完整串和1个不完整串。500kV GIS设备按9个完整串配置。500kV串内设备按4000A额定电流设计，GIS母线通流容量按6000A设计。

2) 受端奉贤换流站 500kV 交流滤波器大组采用单母线接线，各滤波器大组作为一个元件分别接入500kV交流开关场；1台站用降压变压器接到其中1组500kV滤波器母线上。500kV交流开关场采用3/2断路器接线。远景4回500kV出线、4回换流变压器进线、4回大组交流滤波器进线共12个元件组成6个完整串，另1台站用变压器接入母线；本期3回500kV出线、4回换流变压器进线、4回大组交流滤波器进线共11个元件组成5个完整串和1个不完整串。500kV GIS设备按6个完整串配置。500kV串内设备除到三林的两串按6000A额定电流设计外，其余串都按4000A设计，GIS母线通流容量按6000A设计。

(2) 配电装置及总平面布置。复龙换流站500kV交流配电装置采用户内GIS，换流变压器、阀厅和控制楼布置在站区中部；±800kV采用户外直流场；4大组交流滤波器采用“田”字形集中布置，通过GIS分支母线引接进串；交流保护采用下放布置。全站布置方正、紧凑，呈“凸”形布置，占地较小，换流站内分区明确，布局合理。奉贤换流站500kV交流配电装置采用户内GIS，换流变压器、阀厅和控制楼布置在站区中部，阀厅、换流变压器区域采用每极2个阀厅面对面布置，换流变压器紧靠阀厅的布置方式；800kV直流场为户外布置；4大组交流滤波器采用“田”字形集中布置，通过GIS分支母线引接进串；交流保护采用下放布置。全站布置方正、紧凑，占地较小，换流站内分区明确，布局合理。

(3) 电气二次部分。根据复龙换流站规模和接线情况，相应配置了18面500kV交流线路分相电流差动保护柜、27面断路器保护柜、4面母线保护柜、10面交流故障录波器柜、2面直流故障录波器柜、2面500kV线路行波测距装置、1套直流线路故障定位装置、1套保护及故障信息管理子站，以及1套功角测量装置。根据奉贤换流站交流场的布置和出线情况，相应配置了6面500kV交流线路分相电流差动保护柜、18面断路器保护柜、4面母线保护柜、7面交流故障录波器柜、1套保护及故障信息管理子站，以及1套功角测量装置。

1.3 线路路径方案

综合考虑西南水电外送的要求，针对±800kV特高压直流输电技术特点，按照路径方案优化选择的原则和技术要求，通过图上选线、现场踏勘，提出了优化的路径方案。通过对大南方案、大北方案的综合比选，推荐±800kV向家坝—上海和锦屏—苏南特高压直流输电线路采用大北方案。优化后的大北方案较大南方案缩短线路长度约