

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

(2006年)

主 编 刘振亚



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

# 特高压 直流 输电技术

---

## 研究成果专辑

(2006年)

主 编 刘振亚  
副主编 舒印彪



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://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)》之后,对2006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4章,第1章对2006年特高压直流工作进行了简要介绍,回顾了特高压直流示范工程的论证与决策过程,概括了特高压直流示范工程的系统研究、成套与工程设计、功能规范书和设备规范、关键技术研究 and 专题研究的主要过程,对主要研究成果进行了简要阐述;第2章重点介绍了特高压直流示范工程功能规范,并对换流阀、换流变压器、平波电抗器、直流场设备、控制保护等主要设备技术规范进行了介绍;第3章介绍了换流站设计的初步成果,对特高压换流站的系统接入条件、换流站平面布置、阀厅设计、交直流场设计、站用电源、水源和送端三个换流站共用接地极等设计方案分别进行了介绍;第4章介绍了特高压直流关键技术研究 and 专题研究的成果,并简要介绍了特高压直流的技术标准编制情况和特高压直流基地的规划设计情况。

本书可供从事特高压直流输电设计、研究、工程建设方面的技术人员使用,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. 2006年 / 刘振亚主编. —北京:  
中国电力出版社, 2008

ISBN 978-7-5083-7801-5

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 133189 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9月第一版 2008年9月北京第一次印刷

880毫米×1230毫米 16开本 41.5印张 802千字

印数 0001—3000册 定价 150.00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 | 刘本粹 | 于 刚 | 孙 昕 | 张启平 | 赵庆波 |  |
|           | 张 贺 | 刘泽洪 | 丁 扬 | 张文亮 | 陈维江 |  |
|           | 常 浩 |     |     |     |     |  |
| 编 写 组 组 长 | 孙 昕 | 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 | 赵太平 | 黄 勇 | 丁一工 |  |
|           | 马为民 | 陶 瑜 | 郑 劲 | 石 岩 | 胡文华 |  |
|           | 王代荣 | 曾 静 | 袁智勇 | 申卫华 | 陈 东 |  |
|           | 史大军 | 黎 岚 | 王海林 | 徐昌云 | 卢敬军 |  |
|           | 钟 山 | 朱 青 | 李亚曦 | 周德才 | 吴怡敏 |  |
|           | 徐小丽 | 丁晓飞 | 聂 伟 | 王黎彦 | 钟伟华 |  |
|           | 曾连生 | 李亚男 | 杨一鸣 | 张 民 | 孙中明 |  |
|           | 张庆宝 | 谭海龙 | 刘 熙 | 钟伟华 | 魏德军 |  |
|           | 曹燕明 | 刘宝宏 | 杨志栋 | 马玉龙 | 周 静 |  |
|           | 李光范 | 周沛洪 | 范建斌 | 王 帅 | 乔振宇 |  |

# 前 言

建设特高压电网,实施“一特三大”发展战略,是保证国家能源安全的必然要求,是建设资源节约型、环境友好型社会和创新型国家的重要举措,是落实科学发展观的具体体现,具有重大而深远的历史意义。特高压输电具备超远距离、超大容量、低损耗的送电能力,能够提高资源的开发和利用效率,缓解环保压力,节约宝贵的土地资源,具有显著的经济效益和社会效益,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。2005年2月,国家发改委下发了《关于开展百万伏级交流、 $\pm 800\text{kV}$ 级直流输电技术前期研究工作的通知》(发改办能源〔2005〕282号)。经过一年多的研究论证,2006年8月9日,特高压交流试验示范工程正式获得核准,标志着我国特高压工程正式进入了实施阶段, $\pm 800\text{kV}$ 级直流输电技术前期研究也取得了巨大进展。

2006年,国家电网公司组织各相关单位就 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电的关键技术研究、系统成套设计、功能规范书和设备技术规范书编制,换流站设计、输电线路路径方案选择等重大问题开展了卓有成效的工作,取得了丰硕成果。国家电网公司组织各方力量,全面开展并完成了向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流示范工程的前期工作,并向国家发改委上报了特高压直流换流站设备采购方案,为项目核准奠定了坚实的基础。国家电网公司、中国机械行业联合会、中国电机工程学会联合在北京成功举办了2006特高压输电技术国际会议,进一步加强

国际合作和技术交流，使发展特高压输电技术在国内外形成了广泛共识，极大地推动了特高压输电技术的发展。2006 年特高压直流输电技术标准编制取得了初步成果，制定并发布了 7 项企业标准，特高压直流试验基地完成了规划设计，并开工建设。

为及时总结特高压输电技术研究工作取得的成果，国家电网公司计划组织相关科研、设计、咨询和高等院校等单位编写《特高压交流输电技术研究成果专辑》和《特高压直流输电技术成果专辑》，按照年度出版。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）》之后，对 2006 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，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、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。

本书第 1 章首先对 2006 年特高压直流工作进行了简要介绍，回顾了特高压直流示范工程的论证与决策过程，概括了特高压直流示范工程的系统研究、成套与工程设计、功能规范书和设备规范、关键技术研究 and 专题研究的主要过程，对主要研究成果进行简要阐述；第 2 章重点介绍特高压直流示范工程功能规范，并对换流阀、换流变压器、平波电抗器、直流场设备、控制保护等主要设备技术规范进行了介绍；第 3 章介绍了换流站设计的初步成果，对特高压换流站的系统接入条件、换流站平面布置、阀厅设计、交直流场设计、站用电源、水源和送端三个换流站共用接地极等设计方案分别进行了介绍；第 4 章介绍了特高压直流关键技术研究 and 专题研究的成果，并简要介绍了特高压直流的技术标准编制情况和特高压直流基地的规划设计情况。本书从便于读者使用的角度出发，在相关章节按课题和设备组织内容，每个课题和设备的内容相对独立。

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

2007 年 9 月

# 目 录

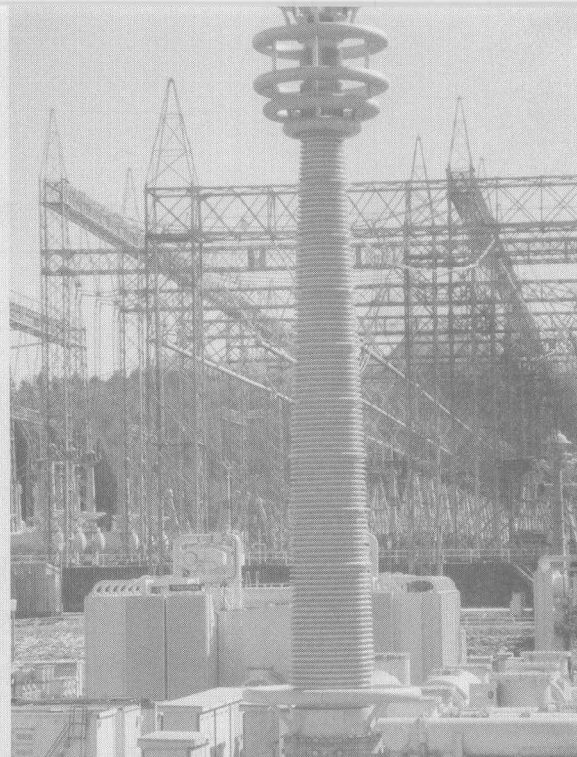
## 前言

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 第 1 章 概论                   | 1   |
| 第 1 节 2006 年特高压直流工作回顾      | 2   |
| 第 2 节 特高压直流示范工程的论证与决策      | 3   |
| 第 3 节 2006 年特高压直流主要研究成果概要  | 7   |
| 第 2 章 特高压直流示范工程功能规范和设备技术规范 | 22  |
| 第 1 节 功能规范                 | 23  |
| 第 2 节 晶闸管换流阀技术规范           | 136 |
| 第 3 节 换流变压器技术规范            | 154 |
| 第 4 节 干式平波电抗器技术规范          | 176 |
| 第 5 节 直流场技术规范              | 181 |
| 第 6 节 交流滤波器技术规范            | 235 |
| 第 7 节 直流滤波器技术规范            | 249 |
| 第 8 节 直流控制保护系统技术规范         | 257 |
| 第 3 章 特高压直流示范工程工程设计        | 310 |
| 第 1 节 换流站接入系统研究            | 311 |
| 第 2 节 换流站平面布置研究及设计         | 332 |
| 第 3 节 换流站交流系统平面布置设计        | 355 |
| 第 4 节 阀厅设计                 | 361 |
| 第 5 节 换流站直流场设计             | 396 |
| 第 6 节 送端三个换流站共用接地极研究及设计    | 411 |

|        |                                 |     |
|--------|---------------------------------|-----|
| 第 7 节  | 换流站站用电、水源设计 .....               | 430 |
| 第 4 章  | 特高压直流示范工程关键技术及专题研究 .....        | 443 |
| 第 1 节  | 构建“强直强交”电网的必要性 .....            | 444 |
| 第 2 节  | 特高压直流标准化研究 .....                | 449 |
| 第 3 节  | 特高压直流试验基地规划及设计方案 .....          | 456 |
| 第 4 节  | 换流站噪声控制研究 .....                 | 463 |
| 第 5 节  | 直流系统主回路参数 .....                 | 469 |
| 第 6 节  | 特高压直流孤岛运行方式研究 .....             | 484 |
| 第 7 节  | 换流站无功配置优化和交流滤波器设计研究 .....       | 492 |
| 第 8 节  | 复龙换流站无功补偿研究 .....               | 522 |
| 第 9 节  | 华东侧换流站无功补偿研究 .....              | 536 |
| 第 10 节 | 过电压及绝缘配合研究 .....                | 545 |
| 第 11 节 | 换流站现场污秽测量及仿真预测研究 .....          | 556 |
| 第 12 节 | 户外直流场和直流绝缘子选型研究 .....           | 562 |
| 第 13 节 | 直流滤波器研究 .....                   | 570 |
| 第 14 节 | PLC/RI 滤波器方案的优化 .....           | 587 |
| 第 15 节 | 直流控制保护系统研究 .....                | 592 |
| 第 16 节 | 特高压直流控制策略实时数字仿真 (RTDS) 研究 ..... | 633 |
| 第 17 节 | 直流系统可靠性指标和提高可靠性措施的研究 .....      | 646 |

2006

特高压直流输电技术研究成果专辑



## 第 1 章

## 概 论



## 第 1 节 2006 年特高压直流工作回顾

2006 年是“十一五”的开局之年，是特高压直流示范工程由技术研究全面转向工程建设的关键一年。按照特高压电网的发展规划和示范工程的建设需要，国家电网公司坚持以集团化运作抓工程推进、集约化协调抓工程组织、精益化管理创精品工程、标准化建设构技术管理体系，同时坚持“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”、坚持“两个三结合”、实现“两个创新”的原则，严密组织、精心策划，严格要求、科学管理，精心设计、精心施工，真抓实干、勇于创新，抓实、抓细、抓好特高压直流示范工程建设的全过程管理。2006 年，国家电网公司组织各相关单位就特高压直流输电的关键技术研究、系统成套设计、功能规范书和设备技术规范书编制，换流站设计、输电线路路径方案选择等重大问题开展了卓有成效的工作。发布了特高压直流系统功能规范和设备技术规范，启动了换流站设计工作，换流站预初步设计通过审查，向国家发改委上报了特高压直流换流站设备采购方案；完成了换流站工程建设的设计和监理招标，工程形象进度良好。

发展特高压输电技术、建设特高压试验示范工程，将开创世界电网发展新纪元，具有重大的社会影响和深远的历史意义。我国的特高压输电发展规划在国内外引起了高度关注。根据国务院关于发展特高压输电技术的指示精神，国家电网公司组织各方力量，对特高压直流输电技术进行了深入研究和系统论证，全面完成了向家坝—上海±800kV 特高压直流示范工程的前期工作。为了进一步加强国际合作和技术交流，推动特高压输电技术的发展，国家电网公司、中国机械行业联合会、中国电机工程学会联合在北京举办了 2006 特高压输电技术国际会议，会议取得了巨大成功，发展特高压输电技术在国内外形成了广泛共识。

2006 年，针对向家坝—上海±800kV 特高压直流示范工程的具体要求，国家电网公司重点组织开展了示范工程的系统研究、成套和工程设计，制定了示范工程的主要技术方案和技术指标，确定了换流站交直流系统主接线和主要设备技术参数，正式发布了示范工程的功能规范书和设备技术规范书，具备了工程系统成套设计和设备招标条件。积极开展关键技术和工程专题研究，确定了特高压直流示范工程建设的一系列重大技术原则。2006 年特高压直流输电技术标准编制取得了初步成果，制定并发布了七项企业标准，特高压直流试验基地完成了规划设计，并开工建设。

经过 2005 年以来的技术研究和项目可行性研究论证，基本确定了特高压直流示范

工程技术方案和建设规模,在此基础上完成了换流站工程设计和建设监理招标工作,确定了换流站工程设计和建设监理单位,目前各单位已经按照工程进度要求开展相应工作,换流站预初步设计方案已通过审查。通过招标,两端换流站均由两家单位承担设计和建设监理工作,既可以有效保证工程质量,又扩大了今后特高压工程设计和监理服务队伍。

通过集团化运作,发挥公司系统资源优势,国家电网公司委托四川省电力公司、湖南省电力公司、江苏省电力公司、浙江省电力公司和上海市电力公司开展向家坝—上海±800kV 特高压直流示范工程建设用地有关工作,与四川省电力公司和上海市电力公司达成征地委托协议,正式启动工程征地准备工作。

按照可行性研究结论,向家坝—上海±800kV 特高压直流示范工程线路长度约2000km,通过大北、大南方案的比选研究,确定了采用大北路径方案,缩短了线路长度约100km。计划2007年完成特高压直流示范工程输电线路的路径方案的评审工作,并开展输电线路大跨越和一般线路设计工作。

## 第2节 特高压直流示范工程的论证与决策

建设特高压直流示范工程,将西部洁净水电送往东部负荷中心,是发挥西部资源优势 and 东部经济优势,推动经济社会和谐发展、科学发展的具体实践,是提升我国电力工业技术水平,增强装备制造业核心竞争力,建设资源节约型、环境友好型社会和创新型国家的重要举措。

向家坝—上海±800kV 特高压直流示范工程的决策经历了系统、广泛、深入的论证过程,履行了规范的核准程序。

### 1 深入研究,广泛讨论

向家坝—上海±800kV 特高压直流示范工程是金沙江水电开发外送的重要组成部分。该工程经历了长期、系统的研究论证,并在国内外开展了广泛、深入的讨论,达成了广泛的共识,充分体现了科学态度和民主精神。

金沙江流域水电外送输电系统的规划论证工作始于1996年,随着电网技术发展,先后提出交流500、1150kV和直流±500、±600、±750、±800kV等多个输电方案,开展了四轮规划论证工作,深入分析了电力市场、输电技术、站址、线路路径、工程造价等问题,经多方案综合比较,最终确定采用3回±800kV输电方案,将西南水电



直送长三角电力负荷中心。

按照《国家发改委办公厅关于开展百万伏级交流、 $\pm 800$  千伏级直流输电技术前期研究工作的通知》（发改办能源〔2005〕282 号）的要求，国家电网公司组织有关设计、科研单位开展了溪洛渡、向家坝水电站采用  $\pm 800\text{kV}$  特高压直流外送方案的可研设计。各设计、科研单位团结协作，历时近一年，先后完成了电力系统、选站选线、换流站设计、线路设计、投资估算、经济评价、环境影响评价、水土保持方案等专题报告，取得国土资源部、国家环保总局、水利部等部门的批复文件，以及中国电力工程顾问集团公司的评审咨询意见。

2004 年以来，国家电网公司组织国内权威的专业机构、高等院校等进行联合攻关。参加研究的单位包括国务院发展研究中心、中国国际工程咨询公司、中国机械工业联合会、中国电机工程学会、中国电力科学研究院、国网武汉高压研究院、国网北京电力建设研究院、北京网联直流工程技术有限公司、清华大学、华北电力大学等。据不完全统计，2000 多人直接参与和承担了研究咨询工作，其中，院士 30 多人，教授及教授级高工 300 多人，高级工程师及博士 800 多人，工程师等专业技术人员超过 1000 人。经各单位共同努力，完成专题研究 32 项，成功解决了电压等级和输送容量的选择、过电压及绝缘配合、外绝缘及电晕特性、各种空气间隙确定及绝缘子选型、主设备规范、电磁环境以及各种设计规定等问题。

国家发改委在建设特高压直流输电示范工程的问题上，保持了科学、严谨的态度，民主、求实的作风，多次组织召开专家座谈会，多方征询意见。在积极听取各界不同观点的基础上，综合分析，保证决策的科学性、民主性。

国家电网公司在组织论证过程中，建立了顾问咨询机制，成立了由 9 名院士和 4 名资深专家组成的顾问小组，并邀请其他资深电力专家和设备制造专家，参与相关项目的验收和评审，保证了各项研究工作的质量。

研究论证期间，国家电网公司、中国机械联合会、中国电机工程学会等单位多次召开研讨会，组织国内行业专家座谈，集思广益，有效地推动了技术研究和工程论证工作。

中国工程院组织 32 位院士及 11 名相关专家组成“特高压咨询课题组”，提出了《关于我国特高压输电研究与工程建设的咨询意见》。认为  $\pm 800\text{kV}$  直流输电在技术上没有不可逾越的困难。咨询意见还明确指出，特高压输电技术在我国有广阔的工程应用前景，应该加快特高压输电研究和工程应用的步伐。

特高压直流输电技术及向家坝—上海  $\pm 800\text{kV}$  特高压直流示范工程的论证过程中，国内外学术界、有关企业开展了多层次的国际交流，充分借鉴国际经验，在国际国内取得了广泛共识。

2005 年国家电网公司先后组织开展了 9 次大规模的国际技术交流活动, 2005~2006 年度, 中国电机工程学会连续举办两届“特高压技术国际研讨会”, 在特高压技术的基础理论、关键技术、工程应用等方面进行了充分的国际交流。

2006 年 11 月 28~29 日, 2006 特高压输电技术国际会议在北京顺利召开。来自世界 19 个国家和地区的电力企业、科研院所、高等院校、电力设备制造业及相关行业的 350 多位代表参加了会议。大会充分肯定了我国在特高压领域所做的努力和取得的成绩, 大会指出: 特高压输电技术是世界输电技术发展的重要方向, 当前已进入工程应用阶段; 中国 $\pm 800\text{kV}$  特高压直流试验示范工程, 不仅对于中国, 而且对于世界许多国家和地区都具有重要意义。

## 2 特高压直流工程建设方案技术可行, 安全可靠, 经济合理

金沙江流域水力资源富集, 约占全国可开发水能资源的 1/5。东部地区经济发达, 人口密集, 用电负荷大, 而资源贫乏, 接受外来电力的空间大, 面临环保问题突出, 是消纳我国西南水电最重要的市场。

经反复论证, 溪洛渡、向家坝水电送往华东地区, 可以促进西部地区将资源优势转化为经济优势, 有效保障沿海经济发达地区的可持续发展, 减少全国南北能源交叉输送, 促进全国资源优化配置, 减轻环境压力。

溪洛渡、向家坝水电站装机容量为 1860 万 kW, 与东部地区的距离约 2000km, 采用特高压直流输电技术是远距离、大容量送电的客观要求。

早在 1994 年, 国际大电网会议 (CIGRE) 第 38 工作组就发布了“特高压技术”报告, 对当时几个国家特高压输电技术的研究水平进行了总结, 指出特高压输电没有不可逾越的技术障碍。

通过近年的工程研究和实践, 解决了送出方案研究、电磁环境影响、交直流输电等价距离、交直流相互作用、主接线与布置、过电压及绝缘配合和大件运输等问题, 研制出了特高压换流变压器、平波电抗器、6 英寸晶闸管、特高压复合绝缘子、特高压直流穿墙套管等设备。所有这些实践表明, 特高压输电技术是完全可行的。

$\pm 800\text{kV}$  特高压直流输电示范工程是目前世界上输送容量最大、送电距离最远、技术最先进的高压直流输电系统。工程采用的电触发 6 英寸晶闸管换流阀、800kV 大容量换流变压器、800kV 直流平波电抗器等设备的研制属世界首次, 代表了世界高压直流输电技术的最高水平。建设该工程, 将取得一大批国际领先的科技成果, 在国际高压直流输电领域占据领先地位。特高压直流示范工程还是国内设备自主创新的重要依托工程, 通过该工程, 可极大提升国内电工装备行业的国际竞争力。

直流系统送电至受端, 需通过交流电网向负荷供电, 其稳定性很大程度上取决于



受端交流电网的强度。通过研究表明,2011 年底向家坝—上海特高压直流系统双极投产时,受端系统已足够坚强,当特高压直流系统单极跳闸或双极跳闸时,受端系统电压和频率均可以控制在允许水平内;同时,受端系统对直流系统运行影响不大,交流系统发生扰动时,不会引起直流系统停运,电网可以安全稳定运行。

我国电网的规划设计及运行控制是严格按照《电力系统安全稳定导则》的相关规定执行的。向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$  特高压直流工程经过严格计算分析和详细深入的论证,系统网架结构符合《电力系统安全稳定导则》的要求。在系统发生大扰动时,不会影响系统的正常稳定运行;发生严重故障时,也可以保证系统稳定运行;即使是在发生战争或者自然灾害等可能导致大面积停电的情况下,也可以依靠预防大面积停电的第三道防线,将损失降到最低。

向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$  特高压直流示范工程与同容量 $\pm 500\text{kV}$  直流输电工程相比,工程造价降低了 8%,节省投资约 16 亿元。

向家坝水电站全部机组投运后,每年向华东地区输送约 250 亿 kWh 水电,每年可节约燃煤超过 1000 万 t。根据国家统计局 2005 年发布的上海地区单位 GDP 电耗指标(1007.2kWh/万元)估算,该工程输送电量每年可产生 GDP 约 2500 亿元。此外,该工程即使在前述较低电价水平条件下,仍可以在 13 年内(含建设期)收回投资,并实现国有资产的保值增值。

环境容量空间是我国电力工业发展面临的首要环境问题。向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$  特高压直流示范工程将 640 万 kW 清洁水电输送到人口密集、环境压力大的经济发达地区,可以替代 6 台百万级的超大规模火电机组,从而有效降低该地区的燃煤排放,缓解地区环境压力。 $\pm 800\text{kV}$ 、640 万 kW 直流输电方案与 $\pm 600\text{kV}$  级方案相比,向家坝、溪洛渡水电外送输电线路从 5 回减少到 3 回,节约两条输电走廊,节省约 1/4 的土地资源。采用特高压直流,大大提高单位走廊的输送能力,减少通道、山口和跨越点资源的占用,节约宝贵的土地资源,是通过技术进步显著降低工程投资和资源消耗的典范。

因此,向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$  特高压直流示范工程具有良好的经济和社会效益。

### 3 项目决策规范

在向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$  特高压直流示范工程前期工作中,按国家有关规定要求,国家电网公司委托具有资质且设计经验丰富的咨询研究单位开展了规划和可行性研究工作,完成了电力系统、选站选线、换流站设计、线路设计、经济评价等报告,并经过了独立的中介机构组织的专家评审,保证了方案的科学性和合理性。

在向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$  特高压直流示范工程技术设计文件基础上,国家电网公

司委托权威研究单位开展了工程环境影响评价、水土保持等方案研究，并向有关部门提交了专题报告，取得了国土资源部、国家环保总局、水利部等部门的批复文件。依照国家有关规定要求，国家电网公司合法获得了全部支撑文件，工程具备申请国家有关部门核准要求。

国家发改委在向家坝—上海±800kV 特高压直流示范工程的核准过程中，认真核实申报材料，以大量、翔实的专业研究论证成果为依据，全面听取各方意见，综合分析，谨慎决策，于2007年4月正式核准该工程。该工程核准过程完全符合我国基本建设项目核准制的工作程序。

### 第3节 2006年特高压直流主要研究成果概要

向家坝—上海±800kV 特高压直流示范工程是金沙江流域向家坝、溪洛渡水电站的配套送出工程，电压等级最高、输送容量最大、送电距离最远，是引领世界直流输电技术创新工程，承担着验证特高压直流输电技术的优越性，为后续工程建设提供技术储备的重要功能。

工程新建±800kV 换流站两座，起点四川复龙换流站，落点上海奉贤换流站。采用双极、每极2个12脉动换流器串联接线，电压配置为“400kV+400kV”。采用6英寸晶闸管换流阀，每换流器容量达175万kW。送端复龙换流站装设28台容量为321MVA的换流变压器，本期500kV出线9回，远期10回；受端奉贤换流站装设28台容量为297MVA的换流变压器，本期500kV出线3回，远期4回。新建±800kV 直流输电线路1回，途经四川、重庆、湖南、湖北、安徽、浙江、江苏、上海八省市，全长约2000km。工程额定输送功率640万kW，最大连续输送功率700万kW，动态投资约180亿元。

向家坝—上海±800kV 特高压直流示范工程系统复杂、技术水平高、设备研制难度大。为实现安全可靠、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，国家电网公司积极稳妥地推进了工程建设的各项准备工作，系统深入地开展相关研究工作。2006年重点开展了系统研究、成套设计、工程设计、关键技术与工程专题研究以及与设备招标紧密相关的重大技术方案的分析对比和研究等工作。主要完成了以下研究：

(1) 交流系统和直流系统的边界条件设计和优化。确定了送端孤岛运行条件、无功交换和电压波动条件、频率控制条件等。



(2) 提升输送容量研究。通过改善冷却设计等较小代价的挖潜措施,把最大连续输送容量提升到 700 万 kW 水平。

(3) 站用电源方案比较。确定了具有高可靠性和经济性的站内主力电源方案,可有效避免常规工程中出现的站用电问题导致双极闭锁事故。

(4) 户外/户外直流场方案比较。通过采用自行研制的污秽测量站,精确测定站区污秽水平,使户外直流场成为可行方案,可节约投资 0.8 亿元。

(5) 直流支柱绝缘子选型比较。推荐采用瓷涂 RTV 方案,技术成熟,可靠性高,节约设备造价。

(6) 直流滤波器的优化研究。基于多次现场实地试验和测量,优化设计后的直流滤波器可以节约一半的投资,节约费用 0.5 亿元。

(7) 换流变的噪声治理研究。研究提出 8 种治理措施,最后选定一种效果好、维护方便、工程实施简单的方案。

(8) 换流站的优化布置设计。通过精细策划施工工序,减少约 18 亩占地,减少了 GIS 管线长度,节约了大量的混凝土工程量。

(9) 共用接地极的研究。通过测量深层土壤电阻率,推荐送端采用共享接地极,为本工程节约 0.5 亿元费用。

(10) 优化直流输电线路路径,采用“大北方案”,减少约 100km 线路,可节约 1.8 亿元投资,同时运行费用也将显著降低。

为了最大限度地引入竞争,确保工程的安全可靠、经济合理,先按照两种技术体系分别开展了系统研究和成套设计工作、换流站的初步平面布置设计等。目的是在直流设备合同谈判的过程中,基本完成系统研究和成套设计工作;在合同签订之时,即可获得最终的征地红线图,为工程尽快开工建设做好准备。

## 1 特高压直流示范工程功能规范和设备技术规范编制

### 1.1 规范书编制支持课题研究

为配合特高压直流示范工程功能规范和设备技术规范的编制工作,国家电网公司共下达了 7 项支撑功能规范和设备技术规范编制的研究课题。

- (1)  $\pm 800\text{kV}$  直流系统工程规范框架研究。
- (2)  $\pm 800\text{kV}$  直流系统用主设备规范研究。
- (3)  $\pm 800\text{kV}$  直流工程无功控制方案的研究。
- (4)  $\pm 800\text{kV}$  直流系统成套设计的研究。
- (5)  $\pm 800\text{kV}$  直流工程主回路接线方式与运行方式的研究。
- (6)  $\pm 800\text{kV}$  直流系统用主设备试验规范研究。

### (7) $\pm 800\text{kV}$ 直流系统谐波标准研究。

目前7项研究任务已经完成,其主要结果已经应用到规范书中。

## 1.2 特高压直流示范工程规范书的编制

2006年4月20~21日,国家电网公司组织有关单位和专家,在北京召开了向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流示范工程功能规范书编制原则讨论会。会议对7项支撑功能规范书的编制原则和一些具体技术问题进行了详细的讨论。

2006年5月30日,国家电网公司发布了特高压直流系统功能规范和设备技术规范,包括换流阀、换流变压器等十二种设备的技术参数及技术规范,形成了 $\pm 800\text{kV}$ 级直流输电系统换流变压器、油浸式平波电抗器、干式平波电抗器、穿墙套管等四个国家电网公司企业标准的初稿。通过对特高压直流输电系统进行概念设计,对过电压与绝缘配合、外绝缘设计、换流变压器、换流阀、滤波器等设备参数进行计算研究,初步确定了针对金沙江电力外送的 $\pm 800\text{kV}$ 级直流输电系统功能规范和主设备技术规范,在遵循特高压直流工作组关于原绝缘配合不变的原则下,提出了新的更高绝缘裕度要求。特高压直流输电系统功能规范和设备技术规范的发布有力地推动了各个厂家的设备研发进程。

2006年7月14日,国家电网公司组织召开了编制向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流示范工程换流站设备招标采购文件商务部分的工作会议,启动了特高压直流示范工程换流站主设备招标采购商务文件的编制工作。商务标书编制以设备采购为中心,完善商务标书和采购范围接口,保证商务文件与技术的吻合,吸取了三峡、灵宝、贵广2回等常规直流工程建设的先进经验,在考虑国内设备制造技术现状的情况下兼顾外方技术支持。

2006年7月28日,国家电网公司组织相关单位和专家召开了特高压干式平波电抗器技术研讨会,参加单位有各个平波电抗器制造厂家和中国电力科学研究院、国网武汉高压研究院、湖北省电力试验研究院和华东电力试验研究院等单位的专家。会议确定在新的采购规范中,干式平波电抗器的要求和参数修改为针对75mH电抗器;极线和中性线75mH线圈将采用同样的设计,在组合时其接线方式和位置可任意互换;会议还讨论研究了平波电抗器支撑绝缘子选型、支撑结构以及风速、温升等问题。

2006年9月20日、26日,国家电网公司组织中外设备制造厂家及有关专家审查了各个设备厂家就规范书提出的特高压直流换流站设计及设备建议方案。会议主要就国内换流阀、换流变压器、平波电抗器的制造厂家的制造设计方案,以及ABB公司、SIEMENS公司的换流站设计及设备制造研发的情况进行了审查。会议对系统单线图、绝缘配合、换流站布置、控制保护分层的问题,以及穿墙套管、变压器套管、直流避雷器、直流分压器、旁路开关等关键设备的开发情况进行了充分讨论;会议还