

“十二五”国家重点图书出版规划项目



国家电网公司
电力科技著作出版项目

向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压 直流输电示范工程

综合卷

国家电网公司 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压 直流输电示范工程

综合卷

国家电网公司 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

《向家坝—上海±800kV特高压直流输电示范工程》共有八卷，分别为《综合卷》《科研攻关卷》《工程设计卷》《设备研制卷》《施工卷》《调试试验卷》《生产运行卷》和《环境保护卷》。本丛书是国家电网公司对向家坝—上海±800kV特高压直流输电示范工程建设情况的全面回顾和总结，通过系统、翔实的记录，全面反映了工程建设全过程及其建设特点。

本卷为《综合卷》，共七章，内容包括工程背景，工程概述，关键技术研究，关键设备研制，工程设计，建设、调试和试运行，工程验收与成果，同时还收录了大事记、重要文件、参建单位名录作为附录供读者使用参考。

本丛书可供输变电工程相关科研设计单位、大专院校、咨询单位和设备制造厂家的工程技术人员和管理人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

向家坝—上海±800kV特高压直流输电示范工程. 综合卷/国家电网公司组编. —北京: 中国电力出版社, 2014. 7

ISBN 978-7-5123-3934-7

I. ①向… II. ①国… III. ①特高压输电—直流输电线路—电力工程—中国 IV. ①TM726.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第000165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>)

北京盛通印刷股份有限公司

各地新华书店经销

*

2014年7月第一版 2014年7月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 16印张 247千字

定价 160.00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

《向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电示范工程》

编 委 会

主 任 刘振亚

副主任 舒印彪 郑宝森

成 员 张丽英 孙 昕 张文亮 张启平

李文毅 余卫国 伍 萱 梁旭明

赵庆波 王益民 丁广鑫 刘泽洪

陈晓林 李 凯 张智刚 丁 扬

叶廷路 肖安全 刘建明 郭剑波

刘开俊 肖世杰

《向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电
示范工程 综合卷》
编写工作组

组 长 刘泽洪

副组长 高理迎 丁永福 种芝艺 吕 健

滕乐天 周 宏 李明节 王玉玲

常 浩 娄殿强 郑福生 印永华

吴维宁 马为民

成 员 郭贤珊 袁其龙 刘宝宏 赵江涛

张志军 黄 勇 卢理成 赵太平

宋胜利 张 进 张卫东 姬大潜

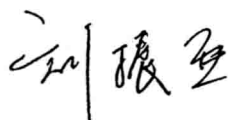
邰 鑫

序

向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电示范工程是我国自主设计、研发和建设的世界上首回电压等级最高、输送容量最大、输送距离最远、技术最先进的特高压直流输电工程，该工程在世界范围内率先实现了直流输电电压和电流的双提升、输送容量和输送距离的双突破，是我国能源领域取得的世界级创新成果，代表当今世界高压直流输电技术的最高水平。该工程是国家电网公司贯彻落实科学发展观，实施“一特四大”战略、推动我国能源布局在更大范围统筹平衡，转变我国电力发展方式的关键工程。该工程于2010年7月成功实现双极投运，额定输送容量达到640万kW，线路全长1891km，可将西南水电输送至华东负荷中心，工程对于构建现代能源综合运输体系、实现能源资源的大范围优化配置、促进区域经济协调发展具有重要作用。

通过该工程的建设，首次实现了特高压直流输电系统的自主设计、自主研发、自主建设和自主调试运行。在世界上首次成功研制出电压等级最高的换流变压器（800kV）、容量最大的单12脉动换流阀（160万kW）以及平波电抗器、穿墙套管等直流设备，提高了我国电网发展自主创新能力和电工装备制造核心竞争力。

为全面介绍工程建设取得的管理创新成果和技术创新成果，国家电网公司组织编写了《向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电示范工程》，对工程可行性研究、建设管理、科技创新、成套设计、设备研制、施工建设、环境保护、验收调试、生产运行等工作进行了系统总结。希望此套书的出版，为我国特高压直流输电工程建设提供有益的借鉴和帮助，为加快转变电力发展方式，服务经济社会发展发挥积极的促进作用。

Handwritten signature in black ink, appearing to read '刘张' (Liu Zhang).

2014年3月

前言

向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电示范工程（简称向上工程）是我国能源领域取得的世界级创新成果，代表了当今世界直流输电技术的最高水平，为了更加全面、系统地对向上工程进行总结，国家电网公司组织编写了《向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电示范工程》，本书共计八卷，包括《综合卷》《科研攻关卷》《工程设计卷》《设备研制卷》《施工卷》《调试试验卷》《生产运行卷》和《环境保护卷》。该丛书系统地总结了向上工程在决策、管理、建设、科研、设计以及设备制造等各方面的经验与成果，为今后的特高压直流输电工程实施提供有益参考。

编者力求全面、清晰地反映向上工程全貌，但书中的疏忽和遗漏在所难免，敬请各位读者批评指正。

编写工作组

2014年2月

目 录

序

前言

1

第一章 工程背景

第一节 世界直流输电发展概况/2

第二节 中国特高压直流输电论证/6

16

第二章 工程概述

第一节 工程特点/17

第二节 建设规模/19

第三节 建设管理/23

第四节 建设成就/30

32

第三章 关键技术研究

第一节 特高压直流输电技术研究框架/33

第二节 试验研究体系建设/35

第三节 关键技术研究成果/50

82

第四章 关键设备研制

第一节 概述/83

第二节 关键设备/86

110

第五章 工程设计

第一节 系统研究与成套设计/112

- 第二节 换流站工程设计/121
- 第三节 直流输电线路设计/133
- 第四节 接地极及接地极线路设计/144
- 第五节 通信工程设计/146
- 第六节 主要设计指标/147

153 ▶ 第六章 建设、调试和试运行

- 第一节 现场建设/154
- 第二节 调试试验/168
- 第三节 运行维护/174

180 ▶ 第七章 工程验收与成果

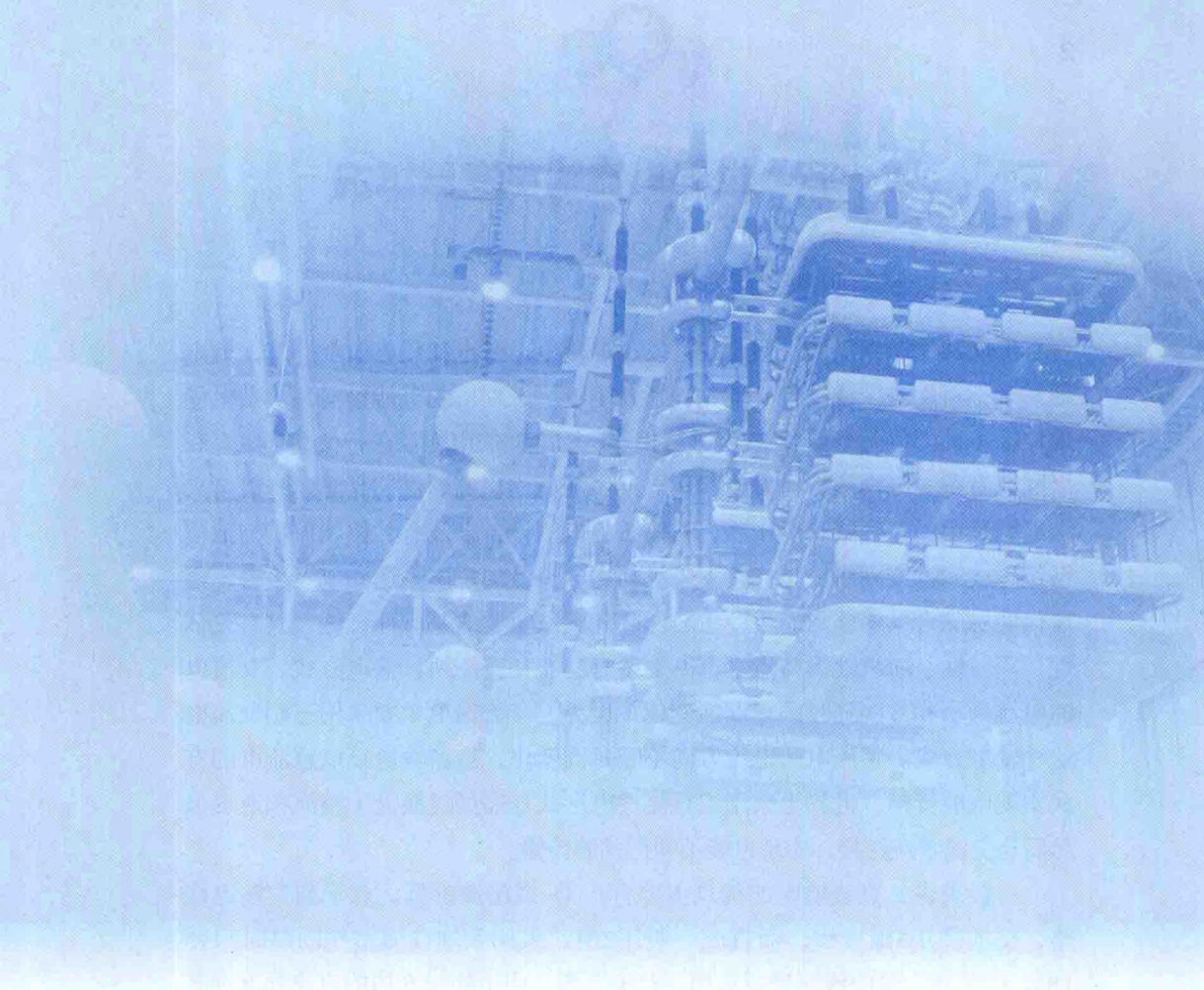
- 第一节 竣工验收/181
- 第二节 专项验收/184
- 第三节 工程创优/190
- 第四节 总体验收/191

196 ▶ 附录 A 大事记

200 ▶ 附录 B 重要文件

243 ▶ 附录 C 参建单位名录

245 ▶ 参考文献



工程背景

第一章





第一节 世界直流输电发展概况

一、直流输电的定义与特点

电能从生产到消费一般要经过发电、输电、配电和用电四个环节，输电通常是指将发电厂或发电基地（包括若干电厂）发出的电能输送到消费电能的地区（又称负荷中心），或者进行相邻电网之间的电能互送，使其形成互联电网或者统一电网，保持发电和用电或者两电网之间的供需平衡。一般意义上电网是由输电线路和变压器、断路器等电气设备以及有关控制保护与通信系统构成的物理网络，是连接发电机与用电设备的电能输送和配置平台，是现代能源综合运输体系的重要组成部分和国家重要的基础性设施，具有整体性、同时性、随机性等特点。电网主要有交流和直流两种输电方式。交流电的电流大小和方向随时间周期性变化，世界上交流输电主要采用三相交流电这种输电方式。直流电的电流方向不随时间变化，直流输电是以直流电的方式实现电能传输，世界上采用的直流输电形式均需经过换流（整流和逆变），然后与交流系统连接，实现电能不同形式的传输。

一般来讲，直流输电的优点主要有：① 线路造价低。对于架空输电线路，交流需用3根导线，而直流一般用2根，采用大地或海水作回路时只要1根，能节省大量的线路建设费用。对于电缆，由于绝缘介质的直流强度远高于交流强度，如通常的油浸纸电缆，直流的允许工作电压约为交流的3倍，直流电缆的投资少得多。② 输电损耗小。直流架空输电线只用2根，导线电阻损耗比交流输电小；而且直流输电没有感抗和容抗的无功损耗；没有集肤效应，导线的截面利用充分。另外，直流架空线路的“空间电荷效应”使其电晕损耗和无线电干扰都比交流线路小。③ 无系统同步稳定问题。在一定输电电压下，交流输电输送功率和距离受到网络结构和参数的限制，还须采取提高稳定的措施，增加了费用。而用直流输电系统连接两个交流系统，由于直流线路没有电抗则不存在两端需要同步运行的问题，无需采取提高稳定的措施，也不增加费用。因此，直流输电的输送容量和距离不受同步运行稳定性的限制，还可连接两个不同频率的系统，实现非同期联网，提高系统的稳定性。④ 控制灵活快速。直流输电通过可控硅换流器能快速调整有功功率，实

现“潮流翻转”(功率流动方向的改变),在正常时能保证稳定输出,在事故情况下可实现健全系统对故障系统的紧急支援,也能实现振荡阻尼和次同步振荡的抑制。在交直流线路并列运行时,如果交流线路发生短路,可短暂增大直流输送功率以减少发电机转子加速度,提高系统的稳定性。⑤ 没有电容充电电流。直流线路稳态时无电容电流,沿线电压分布平稳,无空载、轻载时交流长线受端及中部发生电压异常升高的现象,也不需要并联电抗器补偿。⑥ 能充分利用线路走廊。按同电压500kV考虑,一条直流输电线路的走廊宽度约46m,一条交流线路走廊宽度约50m,而前者输送容量为后者的3倍左右,即直流输电效率约为交流输电的3倍。

但是,直流输电存在以下不足:① 换流设备较昂贵。在输送相同容量时,直流线路单位长度的造价比交流低;而直流输电两端换流站设备造价比交流变电站贵很多,这就引起了所谓的“等价距离”问题。② 消耗无功功率多。一般每端换流站消耗无功功率为输送功率的40%~60%,需要配置大量无功补偿设备。③ 产生谐波影响。换流器在交流和直流侧都产生谐波电压和谐波电流,使电容器和发电机过热、换流器的控制不稳定,对通信系统产生干扰。④ 缺乏直流开关。直流无波形过零点,灭弧比较困难。目前通过换流器的控制脉冲信号闭锁,只能起到部分开关功能的作用。⑤ 不能用变压器来改变直流电压。直流输电的电压只能在设计之初确定,中间不能通过变压器改变电压。所以直流输电主要用于远距离大容量输电、交流系统之间异步互联和海底电缆送电等。⑥ 常规直流输电工程需要依靠坚强的交流电网才能安全可靠运行。

二、直流输电技术的发展历程

电力技术的发展是从直流电开始的,一直以来,直流输电的发展与换流技术(特别是高电压、大功率换流设备)的发展有非常密切的关系。随着电力技术的发展,直流输电电压已由最初的 $\pm 1.5 \sim \pm 2\text{kV}$ 逐步发展到 $\pm 800\text{kV}$,并正在开展 $\pm 1100\text{kV}$ 及以上直流输电技术的研究。

围绕换流技术的发展,直流输电的发展经历了汞弧阀换流时期、晶闸管换流时期及新型半导体换流时期。由于汞弧阀制造技术复杂、价格昂贵、逆弧故障率高、可靠性较低、运行维护不便,使直流输电的应用和发展受到



限制。20世纪70年代,随着电力电子技术和微电子技术的迅速发展,出现了高压大功率晶闸管,晶闸管换流阀在直流输电工程中开始应用,并成为直流输电技术的主流,截至2010年底,世界上采用晶闸管阀的工程共有51个。进入20世纪90年代以后,新型金属氧化物半导体器件——绝缘栅双极晶体管(IGBT)研制成功并首先在工业驱动装置上得到推广应用,但由于目前IGBT单个元件的功率小、损耗大,尚不宜应用于大型直流输电工程。

中国高压直流起步较晚,但发展很快,现已成为世界上投运工程最多、技术水平最先进的国家。截至2010年底,已经投运的 $\pm 500\text{kV}$ 及以上高压直流工程有14个,其中背靠背工程3个, $\pm 500\text{kV}$ 工程9个, $\pm 660\text{kV}$ 工程1个, $\pm 800\text{kV}$ 工程2个。1977年建成31kV直流输电工业试验电缆线路。1986年建成的舟山跨海输电工程,电压 $\pm 100\text{kV}$,功率50MW。葛洲坝—南桥直流输电线路全长1045.6km,电压 $\pm 500\text{kV}$,输电容量1200MW,1989年投入运行。三峡—常州 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电工程,全长890km,输电容量3000MW,2003年投入运行。三峡—广东 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电工程,全长940km,输电容量3000MW,2004年投入运行。宁东—山东 $\pm 660\text{kV}$ 直流输电工程,线路全长1335km,输电容量4000MW,2010年实现单机投运。实现单极投运,2010年投运的中国向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 、6400MW特高压直流输电示范工程、云南—广东 $\pm 800\text{kV}$ 、5000MW特高压直流输电示范工程是目前世界上投入运行电压等级最高的直流输电工程。

三、特高压直流输电研究情况

从20世纪60年代末和70年代初,随着晶闸管换流阀在直流输电工程中的应用,美国、苏联、巴西、加拿大、南非等国考虑到特大容量、超远距离输电的潜在需求,相继启动了特高压直流输电技术的研究工作。国际大电网会议组织(CIGRE)、电气电子工程师学会(IEEE)、美国电力科学研究院(EPRI)、巴西电力能源研究中心(CEPEL)、加拿大魁北克电力研究所(IREQ)、瑞典ABB公司等科研机构 and 制造厂商,在特高压直流输电技术系统分析、环境影响、绝缘特性和工程可行性研究等方面开展了大量卓有成效的工作。研究表明:在1000~3000km的距离输送大量的电力,从经济和环境角度考虑,高于 $\pm 600\text{kV}$ 的特高压直流是优选的输电方式; $\pm 800\text{kV}$ 特高压

直流输电系统的设计、建设和运行在技术上是完全可行的,但应开展一些工程研究以进一步优化系统的性能和经济指标;基于目前的技术及可预见的发展, $\pm 1100\text{kV}$ 的特高压直流输电系统在理论上也是可行的,但必须进行大量研究、开发工作;目前看来,发展 $\pm 1200\text{kV}$ 以上直流输电技术难度较大,需要有重大技术突破,才有可能进行较为经济的设计。基于以上研究结果,一直以来,国际工业界和学术界对特高压直流输电技术的研究均主要将工作集中在 $\pm 800 \sim \pm 1200\text{kV}$ 这一电压等级区段。

1977年,为将埃基巴斯图兹火电基地的 20GW 电力送往欧洲的负荷中心,苏联决定采用1回 1150kV 的特高压交流线路和1回 $\pm 750\text{kV}$ 直流的送出方案,其中 $\pm 750\text{kV}$ 直流输电工程送电距离约 2414km ,输送容量 6000MW ,采用每极2个12脉动换流器并联的设计方案。该工程早在1980年就开始建设,后由于资金严重不足、苏联解体和电力需求下降等原因,在已经建设了 900km 以上线路、换流站正在施工的情况下工程终止。该工程是特高压直流输电技术在世界上的重要实践,有力支撑了 $\pm 800\text{kV}$ 级特高压直流输电在技术上和工程应用上可行的结论。

1988~1994年,为了开发亚马逊河的水利资源,巴西电力研究中心和ABB公司组织了包括 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电技术的研究工作,后因工程停止而终止。目前,巴西又将亚马逊河的水力资源开发列入议事日程,准备恢复特高压直流输电技术的研究工作。

印度东部电能资源丰富,而西部地区较为匮乏,印度西部地区多年来负荷峰值需求超过供应能力,且负荷每年保持 $8\% \sim 9\%$ 的速度增长。印度政府积极推进其各流域超过 50000MW 的水电开发工作,已建成Rihand—Dadri、Talcher—Kolar、Chandrapur—Padghe等多条 $\pm 500\text{kV}$ 高压直流输电工程,并开始了 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程的规划和工程建设实施工作。南非在总结 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电技术前期研究的基础上,已将建设 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电系统列入电力发展规划中。



第二节 中国特高压直流输电论证

一、特高压输电技术的论证

特高压输电是世界输变电技术的制高点。20世纪60年代,国际上一些发达国家掀起了世界范围内的特高压输电技术研究热潮,建成并投运了一些特高压试验站和输电工程,但在此后,由于经济、政治等诸多原因,特别是经济增长放缓的影响,国际特高压输电的发展陷于停滞状态。中国的特高压技术研究起步较晚,20世纪80年代才开始特高压输电技术研究。

发展特高压输电是一项复杂的系统工程,涉及系统研究、技术开发、工程设计、设备制造、系统集成、建设施工、运行管理等多个方面,应结合我国的国情,科学稳妥地开展特高压输电的研究工作,深入论证特高压输电的技术可行性、设备可靠性、系统安全性、环境友好性以及工程的经济合理性。

2004年底,自国家电网公司提出建设以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展的坚强国家电网的战略目标以来,特高压工作一直得到党中央、国务院的高度重视。2005年2月,国家发展改革委印发了发改办能源〔2005〕282号《关于开展百万伏级交流、 ± 80 万伏级直流输电技术研究工作的通知》,全面启动了特高压工程的前期研究工作。3月,国务院发出国阅〔2005〕21号《听取国家电网公司关于发展特高压电网工作汇报的会议纪要》,同意启动发展特高压电网的工作。6月,国务院总理温家宝主持能源领导小组第一次会议,在2005年、2006年能源工作要点中,明确提出制定好特高压输变电试验示范线路建设和输变电设备国产化等方案。2005年9月,在西北750kV交流输电工程投运仪式上,曾培炎副总理要求,要加快电网建设,继续推进西电东送、南北互济,积极探索特高压输电方式。按照国家的统一部署和安排,国家电网公司遵循“科学论证、示范先行、自主创新、扎实推进”的基本原则,积极稳妥地开展了特高压输电前期研究的论证工作。

2004年12月,国家电网公司正式成立了特高压试验示范工程建设领导小组,统筹协调有关工作。2005年1月,成立了由电力系统和电工设备制造行业的院士和资深专家组成的特高压试验示范工程建设专家顾问组,负责对特高压的重大问题和关键技术进行研究和咨询;将国内外的科研、设计单位和有

经验的制造厂商联合起来,组成特高压直流工作组,对特高压直流输电关键技术和关键设备进行系统研究。在特高压试验示范工程领导小组的直接领导下,组织联合系统内外科研院所、设计单位、制造企业、大专院校、行业协会以及其他组织机构,采取调研考察、专题研究和技术交流等方式,在我国近20年特高压输电研究的基础上,通过充分调研并吸纳国外特高压输电研究和试验成果,重点对特高压输电关键技术、国内特高压设备开发与制造能力、特高压经济性、特高压网架发展规划展望等方面进行了深入研究和论证。

对于新电压等级输电技术的开发和应用,国家电网公司在前期研究过程中始终坚持重大问题科学决策、民主决策和依法决策的方针,积极与国家发展改革委等政府有关部门进行沟通,委托中国工程院、国务院发展研究中心等权威机构进行研究,广泛开展国际技术交流,充分听取各方意见,确保了前期论证系统全面、科学严谨、过程民主、人员广泛、程序严格,最终发展特高压输电得到了政府支持,社会各界达成广泛共识。

1. 国家发展改革委组织的特高压论证会议

2005年6月21~23日,国家发展改革委在北戴河主持召开了特高压输电技术研讨会,国土资源部、铁道部、交通部、原国家环保总局、国家电力监管委员会、中国机械工业联合会(简称中机联)、中国电机工程学会、国家电网公司、中国南方电网公司、中国国际工程咨询公司及清华大学等来自政府机构、电网企业、制造厂商、科研机构 and 高等院校的130多位代表参加了会议。会议就特高压系统、规划、技术经济、设备及其国产化能力等方面分四组进行深入讨论,集中讨论了特高压电网技术安全、市场必要性和环境保护等多个方面问题。参加会议的各部门就发展特高压输电和建设试验示范的必要性达成共识,并对国家电网公司的特高压输电工作表示认可。会议达成三点基本共识:①我国发展特高压输电技术是非常必要的。建设特高压电网是符合我国能源资源分布和生产力布局特点的输电发展必然趋势,是解决短路电流超标和输电走廊紧张等问题的有效手段,可以大幅提升我国电力工业的技术水平和电工装备制造工业的核心竞争力,必将抢占世界电力工业、装备制造业的制高点,增强国家的科技创新实力。②建设示范工程是发展特高压输电技术的关键,应当尽快启动。建设试验示范工程将为全面掌握和推广应用特高压输电技术奠定基础,为研制和考核特高压设备提供必要条件,是积极稳