

“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

科研攻关卷

国家电网公司 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

“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

科研攻关卷

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《科研攻关卷》,共7章,具体内容包括工程前期的特高压直流输电技术、特高压直流输电技术研究的内容、特高压直流输电技术研究规划与组织、特高压直流输电技术研究成果、特高压试验研究设施建设及试验验证、特高压技术研究主要成果、重大创新。

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. 科研攻关卷/国家电网公司组编. —北京: 中国电力出版社, 2014.7

ISBN 978-7-5123-3585-1

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 237553 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

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 23.25 印张 358 千字
定价 115.00 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±800kV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±800kV特高压直流输电 示范工程 科研攻关卷》

编写工作组

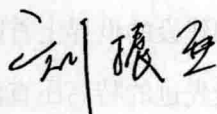
组 长	刘泽洪			
副组长	高理迎	丁永福	种芝艺	吕 健
	滕乐天	周 宏	李明节	王玉玲
	常 浩	娄殿强	郑福生	印永华
	吴维宁	马为民		
成 员	修 建	卢理成	李 博	李光范
	郭 强	陆家榆	张翠霞	廖蔚明
	孙 麟	杨万开	朱艺颖	李庆峰
	石 岩	朱艳君	李勇伟	孟 轩
	董晓辉	刘海波	王健一	程涣超
	郭小江	鞠 勇	葛 栋	刘宝宏
	张 民	李 斌	周 康	邓长红
	李晓军	高学斌	谢 莉	王景朝
	汤 浩	丁玉剑		

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±800kV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。希望这套书的出版，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。



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》，本丛书共计八卷，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 特高压直流输电技术研究状况

第一节 国外开展的研究及应用 / 2

第二节 我国特高压直流输电前期研究状况 / 4

5

第二章 特高压直流输电技术研究的内容

第一节 特高压直流输电技术需求 / 6

第二节 特高压直流输电技术难点 / 11

第三节 特高压直流输电技术创新 / 13

15

第三章 特高压直流输电技术研究规划及组织

第一节 科研布局策划及规划制定 / 16

第二节 科研攻关的组织及管理 / 18

第三节 重大试验设施建设 / 31

第四节 特高压直流输电技术标准化 / 34

第四章 特高压直流输电技术研究成果

- 第一节 系统研究 / 37
- 第二节 绝缘配合与外绝缘特性 / 71
- 第三节 电磁环境 / 94
- 第四节 换流站成套设计及工程设计研究 / 121
- 第五节 输电线路设计 / 161
- 第六节 主设备关键技术研究 / 182
- 第七节 工程施工 / 217
- 第八节 设备试验及系统调试 / 233
- 第九节 运行检修 / 239

第五章 特高压试验研究设施建设及试验验证

- 第一节 特高压直流试验基地 / 251
- 第二节 西藏高海拔试验基地 / 261
- 第三节 国家电网仿真中心 / 266
- 第四节 特高压杆塔试验基地 / 271
- 第五节 特高压直流输电工程成套设计研发中心 / 276

第六章 特高压技术研究主要结论

- 第一节 系统研究 / 283
- 第二节 直流系统主回路 / 284
- 第三节 换流站无功设备配置方案 / 286
- 第四节 过电压与绝缘配合 / 287
- 第五节 电磁环境 / 291
- 第六节 设备型式及参数 / 294
- 第七节 换流站布置 / 304

309 ▶ 第七章 重大创新

316 ▶ 附录 A 项目清单

323 ▶ 附录 B 形成标准清单

327 ▶ 附录 C 专利清单

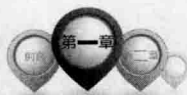
342 ▶ 附录 D 专著

343 ▶ 附录 E 论文



特高压直流输电技术 研究状况

第一章



在中国 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程建设之前, 世界上投入商业运行的最高电压等级的直流输电工程是于 1986 年投入运行的巴西伊泰普 $\pm 600\text{kV}$ 直流工程。国际大电网会议组织(简称 CIGRE)与美国电气和电子工程师学会(简称 IEEE)等组织曾对 $\pm 600\text{kV}$ 以上电压的直流输电工程建设的可行性进行过研究, 但是未曾有工程实践。虽然前苏联曾于 20 世纪 80 年代启动了 $\pm 750\text{kV}$ 直流输电工程建设, 研制了换流变压器、平波电抗器及换流阀等并建设了输电线路, 但是因前苏联的解体及经济严重下滑等原因, 工程未能完工并投入商业运行。

第一节 国外开展的研究及应用

一、苏联的 $\pm 750\text{kV}$ 直流输电工程

1977 年, 苏联为了将埃基巴斯图兹火电基地的电力送往欧洲部分的负荷中心, 决定采用 1 回 1150kV 的特高压交流线路和 1 回 $\pm 750\text{kV}$ 直流线路的送出方案, 其中直流输电距离 2414km , 输送容量 6000MW , 采用每极 12 个脉动换流器并联。该工程于 1980 年开始建设, 1983 年结合 $\pm 750\text{kV}$ 工程建设, 研制了 14 相 320MVA 、 $\pm 400/500\text{kV}$ 换流变压器, 14 相 320MVA 、 $\pm 750/500\text{kV}$ 换流变压器和 8 台 1200A 、 $\pm 750\text{kV}$ 平波电抗器。对高端换流变压器进行了短路试验, 将换流变压器、平波电抗器与换流阀连接在系统上进行了调试性试验; 针对 $\pm 750\text{kV}$ 架空线路进行了绝缘结构电气强度的研究, 包括各种导线结构的对地距离、各种绝缘子串及各种导线对不同塔头结构的空气间隙以及线路绝缘子的选型等。由于资金严重不足、苏联解体和电力需求下降等原因, 该工程在已经建设了 900km 以上线路、换流站正在施工的情况下暂停。

二、美国和加拿大的特高压直流输电技术研究

美国的特高压直流输电技术研究始于 20 世纪 70 年代, 主要由美国电力科学研究院(简称 EPRI)利用试验基地进行电磁环境、外绝缘、换流技术等方面的研究。1977~1984 年, EPRI 针对 $\pm 600 \sim \pm 1200\text{kV}$ 电压等级直流输电的可

行性及相关技术进行了研究。1977~1988年,在美国能源部的支持下开展了高压直流对环境的影响、高压直流套管的验证性试验、高压直流绝缘子和套管的污秽试验、交直流同走廊对环境的影响等研究工作。1982年2月和1985年2月,EPRI先后发表了《 $\pm 600\text{kV}$ 高压直流输电线路设计参考手册》和《 600kV 以上电压的高压直流换流站技术报告》,引起国际电力业界的重视,其研究内容也被引用到CIGRE相关工作组的文件之中。

加拿大于20世纪70年代后半期开始从事特高压直流输电技术的研究,主要由魁北克水电局研究院(简称IREQ)利用试验线段和电晕笼等进行电晕损耗、无线电干扰、可听噪声等电磁环境方面的试验研究,同时利用高压试验大厅进行了外绝缘、污秽等方面的研究。

三、CIGRE 特高压直流输电技术研究报告

CIGRE与IEEE针对 $\pm 800\text{kV}$ 等较高电压等级高压直流输电技术进行了相关研究。CIGRE WG14.32工作组于2002年提出的《 $\pm 600\text{kV}$ 以上高压直流换流站技术报告》认为 $\pm 800\text{kV}$ 高压直流输电是可行的。该报告还针对 $\pm 800\text{kV}$ 、 5000MW 高压直流输电工程的技术规范提出了相关建议,认为基于每极2个12脉动换流器串联的接线方案, $\pm 800\text{kV}$ 直流换流站的预期绝缘水平建议值如表1-1所示。

表 1-1

 $\pm 800\text{kV}$ 直流换流站的预期绝缘水平建议值

kV

母线类型 \ 项目	雷电冲击水平	操作冲击水平
直流母线	2000	1625
平波电抗器	1450	—
六脉动桥母线	1400	1350

CIGRE的相关研究结论及建议对于我国 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程设计与建设具有一定的参考意义,但不能照搬,其原因在于:①其结论并未在实际工程中得到检验;②我国的工程输电容量已超过了CIGRE建议的上限值,相应提出了更高的要求;③我国工程面临着高海拔、重污秽等特殊条件,



将大量使用合成绝缘子, 其外绝缘等方面的结论并不适用; ④ 我国工程电磁环境及设备制造方面的要求与限制条件也不尽相同。

四、印度的 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电工程规划

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 $50\,000\text{MW}$ 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 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电工程的规划。

第二节 我国特高压直流输电前期研究状况

通过三峡工程及贵州—广东、天生桥—广州等 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电工程建设, 我国已成为直流输电大国。依托国内直流工程建设, 结合我国特点, 国内电力工程科研及设计单位在系统控制策略、过电压抑制、绝缘配合、电磁环境、成套设计等方面开展了广泛深入的研究, 形成了较为完善的技术体系和规程规范。国内制造企业通过自主创新、技术引进、技术合作等形式, 掌握了 $\pm 500\text{kV}$ 换流变压器和平波电抗器设计制造、5 英寸 3000A 换流阀设计制造以及直流系统控制保护等技术, 为 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程设计与建设积累了坚实的技术储备。

2005 年, 我国的高压直流试验能力勉强满足 $\pm 600\text{kV}$ 等级研发需要。建设世界上电压等级最高的 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程, 面临着许多重大技术难关, 一系列课题亟待研究解决。如针对我国气候和环境的特殊性, 线路电晕特性和电磁环境影响以及高海拔、覆冰、重污秽等恶劣自然条件下的外绝缘特性等都需要进行深入的试验研究。现有的试验能力远远不能满足要求, 需要建设必要的试验研究设施。



特高压直流输电技术 研究的内容

第二章





第一节 特高压直流输电技术需求

我国高压直流输电系统电压等级从 $\pm 500\text{kV}$ 提高到 $\pm 800\text{kV}$ 特高压等级, 输送功率从 3000MW 提高到 6400MW , 是世界上电压等级最高和输送功率最大的直流输电工程, 对系统稳定性、绝缘配合、换流站布置和设备性能等提出了更高的要求。直流系统一次设备, 如换流变压器、穿墙套管、干式平波电抗器和大尺寸晶闸管等设备的研制将面临更大的难度, 必须进行重大创新。因此, 迫切需要解决一系列的特高压直流技术问题。

一、系统研究

为了实现设计通用化、设备标准化, 提高投资效率, 需要在已有电压等级的基础上, 论证引入新电压等级、建立直流输电电压等级序列的必要性, 提出直流序列各电压等级的基本参数及经济输电距离, 并根据研究成果对我国直流输电规划进行优化调整。

由于特高压直流输送容量大, 对送端电源汇集和受端电力疏散的要求高, 需要考虑用更高的交流网侧电压接入系统以保证系统安全。为此, 需要依托我国直流设备厂家的制造和研发水平, 结合我国的电网规划和直流序列研究成果, 对各直流电压等级工程接入 330 、 500 、 750kV 和 1000kV 等交流电压等级的不同组合方案的技术可行性和工程经济性进行研究, 优化直流工程网侧电压。

特高压直流输电工程具有输电距离长、输送功率大的特点, 交直流系统相互作用对系统安全稳定特性有较大影响。为确保特高压电网和金沙江水电送出系统规划方案的可行性, 有必要采用离线仿真及数模混合式电力系统实时仿真等多种手段, 从多个角度对特高压直流接入系统的安全稳定特性和控制策略进行专题研究, 重点研究华东直流多馈入系统的运行特性, 川渝送端交直流并列运行的特性以及西电东送交流通道故障对系统的影响; 研究特高压直流换流站落点集中对电网输电能力的影响等。同时要制订换流站无功设备配置的具体方案和无功功率的控制策略, 保证在各种运行条件下维持换流站无功功率的平衡。