

“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

调试试验卷

国家电网公司 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电示范工程

- 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
- 环境保护卷



关注我,关注更多好书

ISBN 978-7-5123-3584-4



9 787512 335844 >

定价: 60.00元

上架建议: 电力工程/输配电

“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

调试试验卷

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《调试试验卷》,共九章,具体内容包括工程概述、工程调试的组织管理、工程调试概况、控制保护联调试验、设备特殊试验、分系统调试、站系统调试、系统调试和调试技术创新。

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. 调试试验卷 / 国家电网公司组编. —北京: 中国电力出版社, 2014.7

ISBN 978-7-5123-3584-4

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第237564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 11.75印张 178千字

定价 60.00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 莹 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 调试试验卷》

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 宋胜利 黄 杰 白光亚 张 诚

李 勇 杨万开 刘 耀 庞广亨

马玉龙 石 岩 王海猷 杨 勇

李凤岐 康 健 汪 涛 邓万婷

吴云飞 陈 隽 蔡成良 李凯宇

聂鸿宇 刘 凡 冯 运 陈洪波

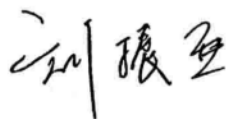
苏明虹 王之浩 周行星 鲍 伟

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。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '刘张' (Liu Zhang), written in a cursive style.

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 工程概述

第一节 工程概况 / 2

第二节 工程特点 / 7

10

第二章 工程调试的组织管理

18

第三章 工程调试概况

第一节 工程调试的内容 / 19

第二节 工程调试的作用 / 25

30

第四章 控制保护联调试验

第一节 概述 / 31

第二节 控制保护联调试验项目 / 32

第三节 小结 / 50

53

第五章 设备特殊试验

76 ▶ 第六章 分系统调试

87 ▶ 第七章 站系统调试

- 第一节 交流场带电试验 / 88
- 第二节 交流滤波器组及并联电容器组充电/断电试验 / 93
- 第三节 500kV 站用变压器投切试验 / 94
- 第四节 换流器不带电顺序操作试验 / 95
- 第五节 最后跳闸试验 / 97
- 第六节 换流变压器带换流器投切及带电试验 / 98
- 第七节 开路试验 / 99
- 第八节 二次设备抗干扰试验 / 100
- 第九节 调试中解决的主要问题 / 100

103 ▶ 第八章 系统调试

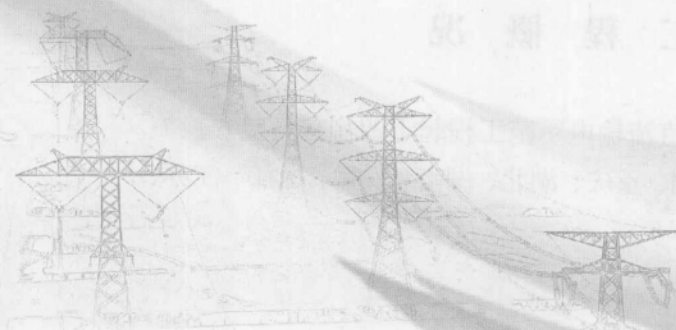
- 第一节 系统计算分析 / 105
- 第二节 系统调试方案编制 / 115
- 第三节 系统调试实施计划 / 123
- 第四节 现场系统调试 / 124
- 第五节 交直流人工接地故障试验 / 134
- 第六节 系统调试单项测试 / 136
- 第七节 系统调试结论 / 141
- 第八节 解决的主要技术问题 / 142
- 第九节 小结 / 165

166 ▶ 第九章 调试技术创新

- 第一节 技术创新 / 167
- 第二节 制定调试技术规范 / 171

工程概述

第一章





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）由我国自主研发、自主设计和自主建设，是目前世界上运行电压等级最高、输送容量最大、送电距离最远、技术水平最先进的直流输电工程，是我国能源领域取得的世界级创新成果，代表了当今世界高压直流输电技术的最高水平。

向上工程于 2007 年 4 月 26 日获国家发展和改革委员会正式核准，2007 年 12 月 21 日换流站工程开工建设，2008 年 12 月 18 日线路工程开工建设，2009 年 11 月 13 日线路工程全线架通，2009 年 12 月 26 日实现全线 800kV 带电，2010 年 4 月 24 日双极低端送电成功，2010 年 4 月 28 日单极全压送电成功，2010 年 6 月 25 日双极全压送电成功，2010 年 7 月 8 日工程投入试运行。

向上工程在 $\pm 500\text{kV}$ 超高压直流输电工程的基础上，在世界范围内率先实现了直流输电电压和电流的双提升，输电容量和送电距离的双突破，它的成功建设和投入运行，标志着中国国家电网全面进入特高压交直流混合电网时代。向上工程投运后，每年可向上海输送 320 亿 kWh 的清洁电能，可节省原煤 1500 万 t ，减排二氧化碳超过 3000 万 t 。

向上工程承担着金沙江下游大型水电基地“西电东送”任务，确保工程成功建设，意义重大，影响深远。一是将实现向家坝等水电的安全可靠送出，促进西南地区资源优势转化为经济优势；二是将提供清洁高效的能源，服务华东特别是上海地区经济社会发展，是电力工业落实科学发展观，推进节能减排，建设资源节约型、环境友好型社会的具体实践；三是将进一步提高我国输变电设备自主创新和制造能力，推动直流设备制造技术实现新发展，促进研制 6 英寸晶闸管、 $\pm 800\text{kV}$ 大容量换流变压器、 $\pm 800\text{kV}$ 直流平波电抗器等关键设备，显著提升自主研发和设备国产化能力，为今后我国大型水、火电基地的电力送出奠定基础；四是将进一步提升我国电力行业的整体技术水平和综合实力，推动直流输电技术实现新的跨越。

第一节 工程概况

向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电示范工程起于四川宜宾复龙换流站，止于上海奉贤换流站，途经四川、重庆、湖北、湖南、安徽、浙江、江苏、

上海 8 省(市), 直流线路全长 1891km。工程额定电压 $\pm 800\text{kV}$, 额定电流 4000A, 额定输送功率 640 万 kW。

1. 复龙换流站及接地极

复龙换流站为向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电示范工程的送端站, 是向家坝水电外送的大型枢纽换流站, 坐落于四川省宜宾市宜宾县复龙镇马林村。复龙换流站全景如图 1-1 所示。

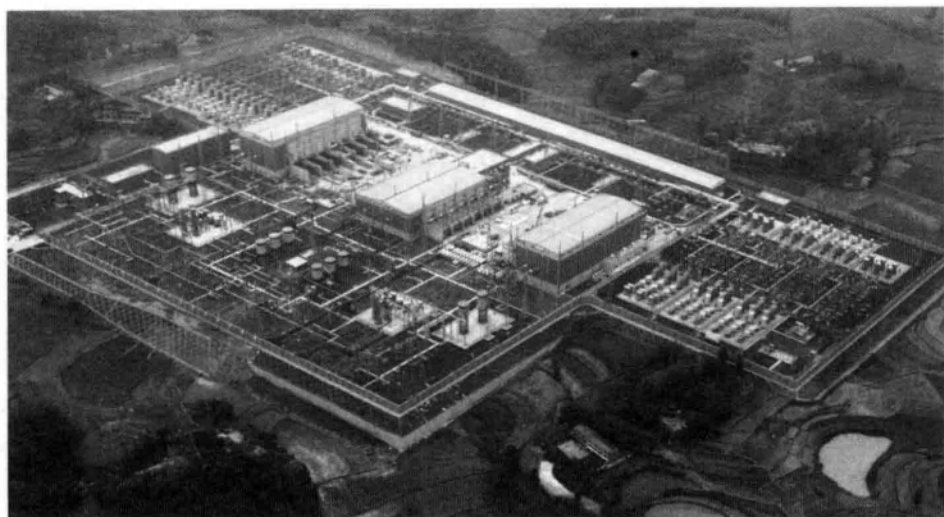
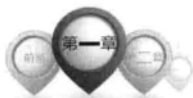


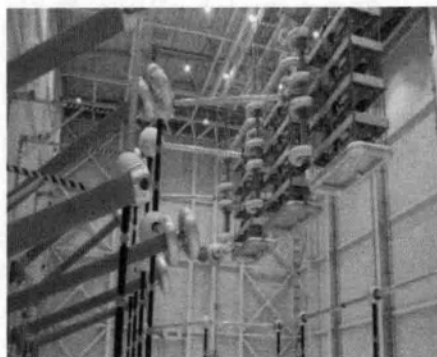
图 1-1 复龙换流站全景图

复龙换流站 500kV 交流场采用双母 3/2 接线方式, 为 GIS 设备, 共计 9 个完整串和 1 个不完整串, 远期 10 回 500kV 交流出线, 其中本期 9 回; 交流滤波器共计 4 大组 14 小组, 单组额定容量均为 220Mvar, 合计 3080Mvar; 高压并联电抗器 1 组, 额定容量为 180Mvar; 站用电系统采用 3 回配置, 分别取自站内 500kV GIS 2 号母线、交流滤波器 63 号母线和站外 110kV 普安变电站 35kV 出线。

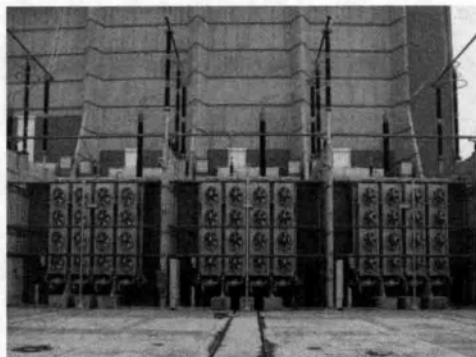
复龙换流站直流系统设备全部为国内首台首套。换流阀 [见图 1-2 (a)] 采用的是 6 英寸电触发晶闸管, 由西安西电电力系统有限公司制造; 换流变压器 [见图 1-2 (b)] 采用油浸式单相双绕组型式, 单台容量均为 321.1MVA, 共计 24+4 台, 由西安西电变压器有限责任公司、保定天威保变电气股份有限



公司、SIEMENS 公司三家分别制造；直流场阀厅穿墙套管采用充 SF_6 气体设计，每极 $\pm 800\text{kV}$ 套管 1 台、 $\pm 400\text{kV}$ 套管 2 台、中性线套管 1 台；直流场平波电抗器采用干式设计，每极极母线、中性线各串联 2 台，单台额定电感 75mH ，均为北京电力设备总厂生产；每个阀组并联一台单相旁路开关；在双极中性线上还各串联有 1 台阻波器，阻波器电感为 75mH ；在每极各并联有一组 $2/12/24$ 三调谐直流滤波器。直流控制保护系统采用 DCC800 控制保护系统。



(a)



(b)

图 1-2 复龙换流站换流阀和换流变压器

(a) 换流阀；(b) 换流变压器

复龙换流站接地极与拟建设的溪洛渡左岸换流站采用共用接地极设计，位于四川省宜宾市兴文县共乐镇，距复龙换流站直线距离约为 72km ，距溪洛渡左岸换流站直线距离约为 80km 。

2. 奉贤换流站及接地极

奉贤换流站是向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电示范工程的受端换流站，换流站位于上海市奉贤区四团镇横桥村。奉贤换流站全景如图 1-3 所示。

奉贤换流站 500kV 交流场采用双母 $3/2$ 接线方式，为 GIS 设备，共计 6 个完整串，本期交流出线 3 回至远东变电站，远期交流出线 4 回，分别为 2 回至远东变电站，2 回至三林变电站。交流滤波器并联电容器共计 4 大组 14 小组，交流滤波器共 8 小组，单组额定容量均为 238Mvar ，并联电容器 6 组，合

计 3746Mvar；站用电系统采用三回配置，分别取自站内 500kV GIS 母线、交流滤波器大组母线和站外 35kV 变电站。

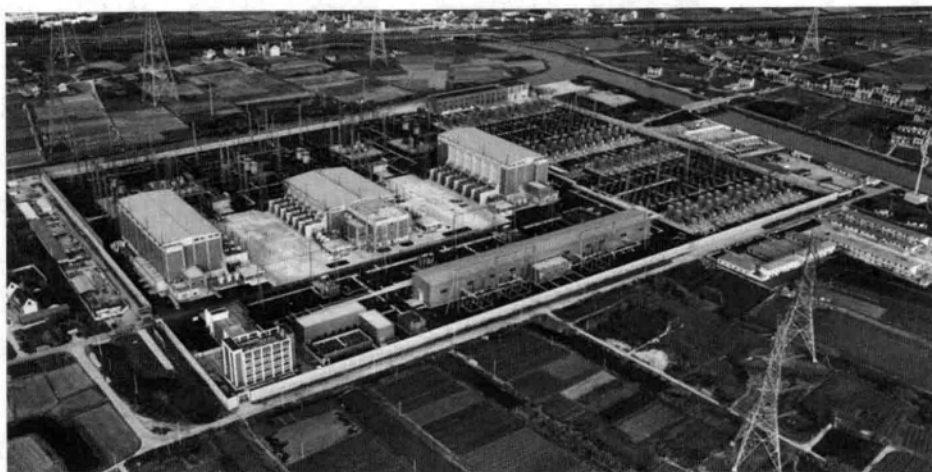


图 1-3 奉贤换流站全景图

奉贤换流站换流阀采用 6 英寸电触发晶闸管，由许继集团有限公司制造；换流变压器采用油浸式单相双绕组型式，单台容量均为 297.1MVA，共计 24+4 台，由特变电工沈阳变压器集团有限公司和 ABB 公司制造；直流场阀厅穿墙套管采用充 SF₆ 气体设计，每极±800kV 套管 1 台、±400kV 套管 2 台、中性线套管 1 台；直流场平波电抗器采用干式设计，每极极母线、中性线各串联 2 台，单台额定电感 75mH，均为北京电力设备总厂生产；每个阀组并联 1 台单相旁路开关；在双极中性线上各串联有 1 台阻波器，阻波器电感为 75mH；在每极各并联有一组 2/12/24 三调谐直流滤波器。

奉贤换流站接地极为廊下镇接地极，距奉贤换流站距离为 97.108km。奉贤换流站至南雉鸡村之间 81.719km 采用与本工程直流线路同杆架设，其余段单独架设。

3. ±800kV 直流输电线路

全线双极单回路架设，途经四川、重庆、湖北、湖南、安徽、浙江、江苏、上海等 8 省（直辖市）56 个县（市）级行政区，4 次跨越长江，线路设计全长 1907km。其中，四川段 187.275km、重庆段 286.900km、湖北段 491.201km、



湖南段 255.092km、安徽段 385.402km、浙江段 156.378km、江苏段 22.143km、上海段 106.140km。直流线路地形复杂，西高东低，途经重冰区、采空区、重污区、山火易发区、微气象区、自然保护区、易受外力破坏区、林区等，运行环境复杂。

基础采用岩石嵌固式基础、掏挖式基础、现浇阶梯基础、柔性大板基础、斜柱插入式基础、灌注桩基础、联合基础、群锚岩石基础、直锚岩石基础 9 类型式；铁塔采用干字型塔，主材采用 Q420 高强度钢。平均塔呼高 65m、重 62t。

一般线路 20mm 及以下冰区采用 $6 \times \text{ASCR}-720/50$ 型钢芯铝绞线，30mm 及以上冰区采用 $\text{AACSR}-720/50$ 钢芯铝合金绞线。线路采用了大吨位、大盘径、大结构的盘式绝缘子及超长复合绝缘子、新型金具、铝管式刚性跳线等新材料。

线路四次跨越长江，自西向东分别为杨家厂、胡家滩、扎营港和新吉阳大跨越，均采用耐一直一直一耐跨越方式。大跨越导线采用 4 分裂 $\text{AACSR/EST}-640/290$ 特强钢芯高强铝合金绞线，一根地线采用 $\text{JLB14}-340$ 铝包钢地线，另一根地线采用 $\text{OPGW}-350$ 。±800kV 典型塔和扎营港大跨越塔如图 1-4 所示。

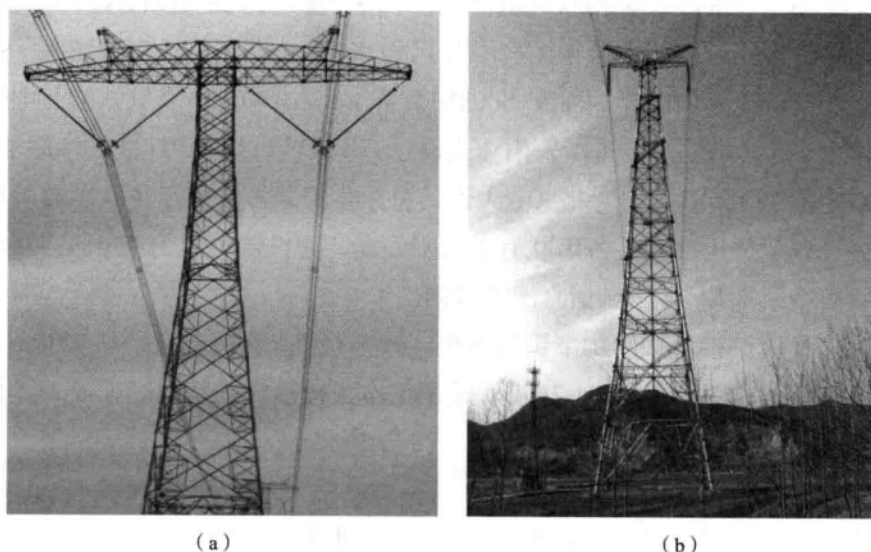


图 1-4 ±800kV 典型塔和扎营港大跨越塔

(a) ±800kV 典型塔；(b) 扎营港大跨越塔