

“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

设备研制卷

国家电网公司 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

向家坝—上海 ±800kV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 978-7-5123-3912-5



9 787512 339125 >

定价: 138.00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

设备研制卷

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《设备研制卷》,共十四章,具体内容包括特高压设备研制、6英寸晶闸管、换流阀、换流变压器、控制保护系统、平波电抗器、直流场设备、滤波器设备、交流场设备、导线与地线、直流线路绝缘子、直流线路铁塔、金具及其他、设备质量监督。

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. 设备研制卷/国家电网公司组编. —北京:中国电力出版社, 2014.7

ISBN 978-7-5123-3912-5

I. ①向… II. ①国… III. ①特高压输电—直流输电线路—电气工程—工程设备—中国 IV. ①TM726.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第000229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 27.5印张 427千字

定价 138.00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 设备研制卷》

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 张 进 孙立时 郑 劲 张志军

刘 宁 王英杰 张 建 王相中

陈兴刚 杨中利 董占明 张庆武

张 靖 严 兵 张月华 王 楠

王学军 张振乾 曹燕明 项英桐

王 洪 高海峰 邓 桃 邢海军

耿景都 万建成 刘 臻 刘英志

聂任员 牛海军 冷跃春 郝世芳

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 特高压设备研制

第一节 特高压设备需求与特点 / 2

第二节 研制思路与目标 / 3

第三节 设备特性研究 / 5

第四节 创新成果 / 47

49 第二章 6 英寸晶闸管

第一节 设计研究 / 50

第二节 工艺制造 / 61

第三节 试验 / 66

第四节 创新成果 / 68

71 第三章 换流阀

第一节 设计研究 / 72

第二节 工艺制造 / 106

第三节 试验 / 110

第四节 创新成果 / 117

119 ▶ 第四章 换流变压器

第一节 设计研究 / 121

第二节 工艺制造 / 136

第三节 试验 / 139

第四节 创新成果 / 144

147 ▶ 第五章 控制保护系统

第一节 设计研究 / 148

第二节 工艺制造 / 176

第三节 调试试验 / 178

第四节 技术创新 / 181

183 ▶ 第六章 平波电抗器

第一节 设计研究 / 184

第二节 工艺制造 / 194

第三节 试验 / 196

第四节 创新成果 / 197

199 ▶ 第七章 直流场设备

第一节 直流断路器 / 200

第二节 直流隔离开关与接地开关 / 204

第三节 直流测量装置 / 208

第四节 直流穿墙套管 / 213

第五节 直流避雷器 / 216

第六节 创新成果 / 220

222

第八章 滤波器设备

第一节 滤波器整体设计研究 / 223

第二节 滤波器电容器 / 224

第三节 滤波器电抗器 / 247

第四节 滤波器电阻器 / 270

277

第九章 交流场设备

第一节 设计研究 / 278

第二节 工艺制造 / 288

第三节 试验 / 289

第四节 创新成果 / 293

294

第十章 导线与地线

第一节 技术条件 / 295

第二节 设计研究 / 295

第三节 物料供应与制造 / 301

第四节 导线与地线型式试验 / 304

第五节 技术参数及特点 / 305

第六节 创新成果 / 324

325

第十一章 直流线路绝缘子

第一节 技术条件 / 326

第二节 设计研究 / 327

第三节 物料供应与制造 / 331

第四节 试验 / 336

第五节 创新成果 / 343

344 ▶ 第十二章 直流线路铁塔

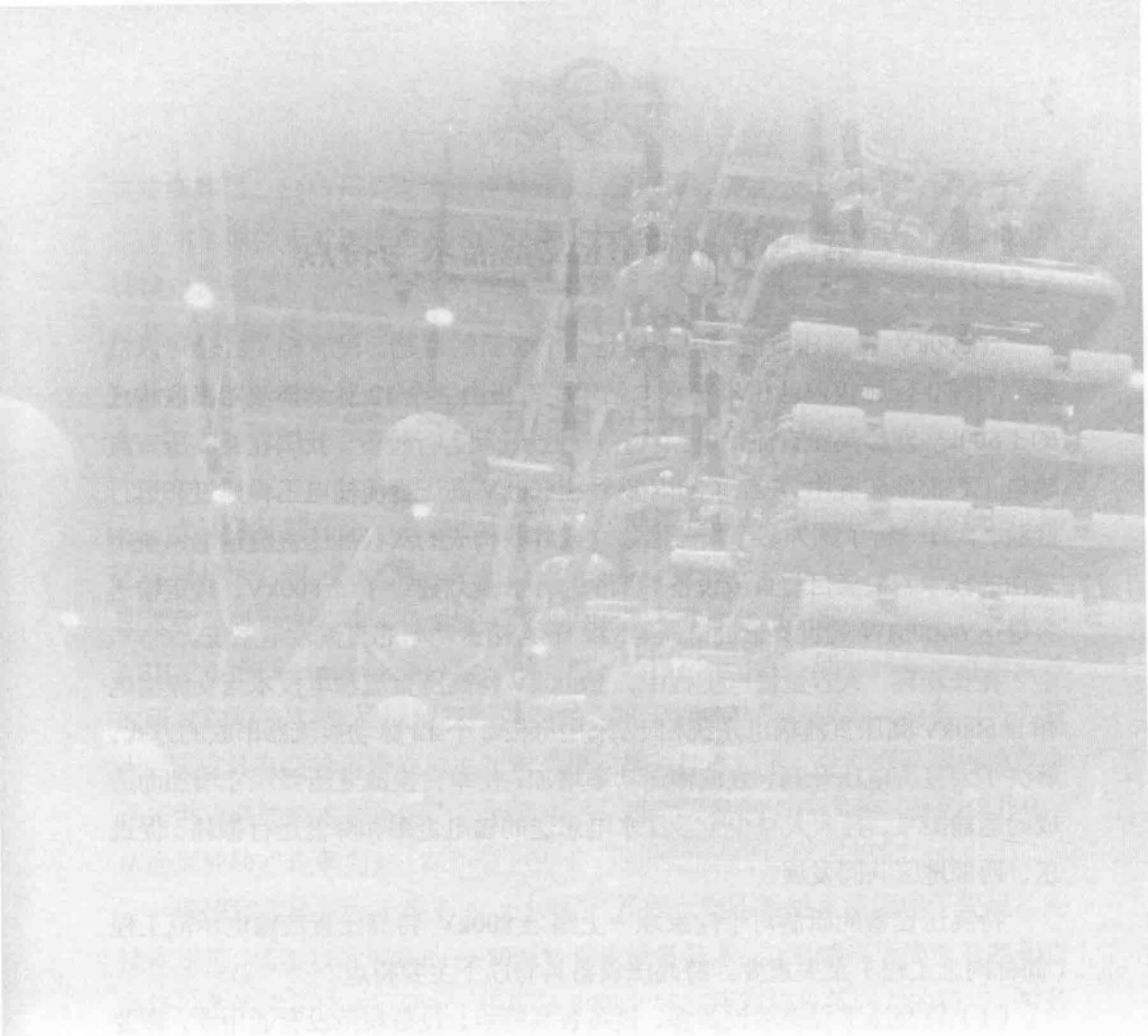
- 第一节 技术条件 / 345
- 第二节 设计研究 / 345
- 第三节 物料供应与制造 / 351
- 第四节 真型试验 / 356
- 第五节 创新成果 / 360

362 ▶ 第十三章 金具及其他

- 第一节 技术条件 / 363
- 第二节 设计研究 / 364
- 第三节 物料供应与制造 / 368
- 第四节 试验与检验 / 381
- 第五节 创新成果 / 382

383 ▶ 第十四章 设备质量监督

- 第一节 直流设备监造 / 384
- 第二节 交流场设备监造 / 403
- 第三节 线路材料监造 / 407



特高压设备研制

第一章





第一节 特高压设备需求与特点

$\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程是一个崭新的课题,没有相关经验可以借鉴。目前,国外仅巴西伊泰普水电站建成每极由 2 个 12 脉动换流器串联构成的 $\pm 600\text{kV}$ 双极高压直流输电系统,并经过长期运行检验。我国在特高压直流输电工程前期研究中,总结了国内多个 $\pm 500\text{kV}$ 高压直流输电工程建设和运行经验,认真分析了国外多个换流器串联或并联构成的双极高压直流输电系统所采用的技术,根据目前直流设备的制造水平,规划建设了 $\pm 800\text{kV}$ 、额定输送容量达 6400MW 的世界最高电压等级、最大输送功率的直流输电系统。

在长距离、大容量输电工程中, $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电技术与交流输电和 $\pm 500\text{kV}$ 高压直流输电系统相比,采用每极 2 个 12 脉动换流器串联的方式,解决了因直流电压升高、直流输送功率增加,使单台换流变压器尺寸增加而造成的运输困难,且大大减少金沙江水电东送的输电走廊和降低运行损耗,促进东、西部地区共同发展。

特高压设备的研制对于向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电示范工程(简称向上工程)至关重要。特高压设备具有以下主要特点。

(1) 特高压工程牵涉设备多,设备各具特点,设备规范没有通用性,需要集中来自各专业的专家参与研究工作。很多设备都是世界首次进行研制,没有太多的工程经验可以借鉴,需要很多单位联合起来进行多次沟通,优化设计方案。

(2) 设备绝缘水平高、单台设备容量大、制造难度大。设备研制首先要确定各个设备合理的绝缘水平。绝缘水平太高会加大设备设计、制造难度,增加工程投资;绝缘水平太低又会带来设备的安全运行问题。换流变压器单台重量世界最大、运输困难,故对其外形和重量控制至关重要。换流变压器等设备内部结构复杂,具有电场集中等特点,为了保证设备在较短的工期内实现安全可靠的安装和运行,需要多次论证设计方案,反复优化。

(3) 设备繁杂、有多家供应商参与新产品的研制。设备包括 6 英寸晶闸管元件及换流器、换流变压器、直流穿墙套管、交/直流滤波器、平波电抗器、

直流断路器、隔离开关与快速接地开关、避雷器、控制保护和测量设备等。

(4) 很多先进技术得到应用,如 6 英寸晶闸管换流阀的应用,高达 4500A 转换电流隔离开关的研制,3 调谐滤波器技术等的应用,为满足单极双 12 脉动换流器串联运行特点开发的新一代控制保护技术等。

第二节 研制思路与目标

$\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程是目前世界上首次应用的电压等级最高、输送容量最大、输送距离最长的直流输电工程。在设备制造上,国外没有成熟的技术和成果可以借鉴。必须组织强有力的技术专家队伍,在与国际大公司(如 ABB 公司和 Siemens 公司)合作的同时,开展自主攻关。通过特高压直流设备的研发和制造实践,可以使我国供应商掌握 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流设备的核心技术,形成具有原始创新性自主知识产权的相关技术标准,全面提升国内输变电设备供应商的技术创新能力和制造水平,推动设备制造技术和试验的标准化,从而形成核心竞争力。

调研和收集国际上现有的 $\pm 500\text{kV}$ 及以上电压等级直流输电工程设备的技术规范,借鉴较为成熟的 $\pm 500\text{kV}$ 直流设备技术,针对特高压换流设备和直流场设备的适用性进行研究;根据 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流设备研发的特点,对科研课题相关内容进行了较大的调整和补充,增加了 $\pm 800\text{kV}$ 换流阀厅基本接线及布置、换流阀技术参数、6 英寸晶闸管技术参数、换流阀绝缘试验、换流阀的试验项目和要求等。根据科研成果确定 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流工程接线方式和系统参数,通过与高端技术联合设计和自主创新思路,从设计原理着手,研究特高压直流设备的核心技术,完善、优化和确定特高压主设备的技术参数、性能要求、结构要求、试验方法等,开发具有全新高端技术的 $\pm 800\text{kV}$ 特高压设备。

研究特高压换流阀、传感器、干式平波电抗器、接地极、直流滤波器、换流变压器、交流滤波器、直流穿墙套管、直流断路器和隔离开关设备、直流避雷器、直流信号传感器以及直流 PLC/RI 滤波器的技术特点,关键技术包括绝缘特点、规范、设计难点、试验考核方法创新等。

在进行调研、系统研究和仿真分析的基础上,分析与 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流



输电系统中换流变压器制造密切相关的技术要点、关键部件。结合现有变压器实际制造水平,充分考虑换流变压器过负荷运行、耐短路与电压冲击能力等实际需要后,着重研究温升限制、短路阻抗、绝缘水平及试验(包括例行试验与型式试验)等。

对换流变压器的主要技术参数都作了较详细的规定。其中,针对现有系统中换流变压器过负荷能力不足的问题,强调要求换流变压器具有一定温升裕度。针对换流变压器大件运输和现有制造能力限制的问题,研究特高压直流输电系统中换流变压器阀侧套管的部分绝缘试验,在保证系统和设备安全的前提下适当降低的可能性。加强试验考核,防止换流变压器在换流运行时匝间或换位导线间故障,抑制换流变压器油流带电以及 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电系统中的谐波对换流变压器温升、噪声等数据的不利影响。

2009 年,多次赴德国、瑞典进行换流变压器、换流阀等关键设备设计审查、监造、关键工艺处理见证、型式试验见证和关键技术问题处理方案等深层次技术交流合作,进行运行技术交流与培训。2010 年,赴德国进行设备后期工艺处理、绝缘材料处理等方面的技术确认和交流,见证设备出厂试验。

针对实际系统中平波电抗器的过负荷能力不足,要求平波电抗器具有一定温升裕度。针对平波电抗器现有制造能力限制的问题,研究特高压直流输电工程用平波电抗器穿墙套管的结构要求、绝缘试验电压,以及户外直流场中穿墙套管爬距要求等,力求尽可能在保证系统和设备安全的前提下适当降低造价。此外,加强考核 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电系统中的谐波对平波电抗器温升、损耗和噪声等数据的影响。

针对特高压直流输电的特点,研究交、直流滤波器,测量装置,接地等技术,综合研究各种设计方案和路线,结合成套设计研究结论,优化设备参数和性能,提出较为合理的设备设计、安装方案等。为了考核设备的设计性能,针对不同设备,参照国际标准、国家标准和行业标准制订切实可行的试验方案。

以中国西电电气股份有限公司(简称中国西电)、许继集团有限公司(简称许继)、西安电力电子技术研究所、中国南车股份有限公司(简称中国南车)为主的换流阀及其关键元器件供应商,以西安西电变压器有限责任公司(简称西变)、保定天威保变电气股份有限公司(简称保变)、特变电工沈阳变压器集