

特高压直流输电技术丛书

特高压 直流输电理论

刘振亚 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

特高压直流输电技术丛书

特高压 直流输电理论

刘振亚 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本套丛书针对特高压直流输电技术特点,根据我国特高压直流输电工程设计、建设和运行经验,介绍了2005年以来我国特高压直流输电关键技术的研究成果,对我国建设特高压电网、促进电网现代化建设和保证电网的安全稳定运行具有深远意义。本套丛书将介绍七个方面的研究成果。本书为《特高压直流输电理论》,是其中一本。

本书共分7章。主要内容有国内外直流输电的概况、高压直流输电换流器的工作原理、直流输电的稳态特性、直流输电的控制与保护、直流输电的谐波特性、高压直流输电换流站、直流输电接地极及其线路。

本书可供从事特高压直流输电运行、维护、检修等工作的技术人员学习和使用,也可作为对其他相关人员进行培训的教材,还可作为大专院校相关专业的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

特高压直流输电理论/刘振亚主编. —北京:中国电力出版社, 2009

(特高压直流输电技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 5083 - 8273 - 9

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205909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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009年3月第一版 2009年3月北京第一次印刷
710毫米×980毫米 16开本 13.25印张 163千字
印数0001—3000册 定价27.00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

《特高压直流输电技术丛书》

编 委 会

- 主 编：刘振亚
- 副 主 编：祝新民 陈进行 郑宝森 陈月明
舒印彪 曹志安 栾 军 李汝革
- 编委会成员：孙 昕 赵庆波 许世辉 张文亮
崔吉峰 李文毅 刘开俊 陈维江
刘泽洪
- 编写组组长：许世辉
- 副 组 长：张文亮 方国元 于永清 马家斌
李光范 范建斌 宿志一 陆家榆
王景朝 汤广福
- 成 员：李同生 张翠霞 廖蔚明 李庆峰
周 军 殷 禹 葛 栋 高海峰
丁玉剑 谷 琛 李金忠 陈立栋
李 鹏 鞠 勇 郭 剑 薛辰东
魏晓光 蒋卫平 吴娅妮 朱艺颖
鲁先龙 杨靖波 万建成 樊宝珍
刘胜春 朱宽军 缪 谦 于钦刚
陈 新 鞠宇平 江振宇 曹爱民

电力工业是关系国计民生的基础产业，改革开放30年来，电力工业走过了一条辉煌的改革发展之路，电力结构不断优化，电力工业装备和技术水平已跻身世界大国行列。国家电网公司在认真分析我国电力工业和电网发展现状及趋势的基础上，提出了加快建设由百万伏级交流和 $\pm 800\text{kV}$ 级直流系统构成的特高压电网的发展目标，这是落实科学发展观，贯彻国家能源政策，确保电力工业全面、协调、可持续发展的重大举措，必将有利于实现更大范围的资源优化配置，对满足未来我国经济社会发展的用电需求，具有重大的政治意义、经济意义和技术创新意义。特高压在中国的实现，将成为中国电力发展的重要里程碑。

特高压直流输电具备超远距离、超大容量、低损耗的送电能力，且调节灵活，更适合于大型水、火电基地向远方负荷中心送电，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。国家能源领导小组办公室将特高压输电工作列为能源工作的重点，要求科学论证，做好特高压输电试验示范工程建设和设备国产化方案，为特高压电网的规划建设指明了方向。2005年2月16日，国家发展和改革委员会下发了《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）。2005年12月22日，经国务院批准，国家发展和改革委员会下发的发改能源〔2005〕2730

号文中，明确指出金沙江一期电站送出输电方案初定采用3回 $\pm 800\text{kV}$ 、6400MW的直流输电方案，标志着特高压直流输电工程进入实质性阶段。

$\pm 800\text{kV}$ 级直流输电工程，是目前世界上电压等级最高的直流输电工程，国外虽曾进行过一些研究，但无实际工程运行经验。为解决 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电工程关键技术问题，国家电网公司于2005年初启动了特高压直流输电工程关键技术研究 and 可行性研究，组织电力系统各科研、咨询、设计单位和高等院校，开展了直流输电系统电磁环境、过电压及绝缘配合、外绝缘特性、特高压直流换流器接线方式等问题的研究，已取得了丰硕成果，为输电线路、换流站设计、主要设备设计和制造提供了技术依据。为使工程建立在更可靠的科学试验的基础上，2006年1月19日，国家电网公司向中国电力科学研究院发出了《关于下达特高压直流试验基地建设任务的通知》，同年8月10日，特高压直流试验基地在北京市中关村科技园区的昌平园区奠基。2007年6月28日，特高压直流试验基地试验线段全线带电，一次性成功升压至 $\pm 800\text{kV}$ ，紧接着户外冲击试验场等试验装置相继建成，并投入使用，标志着中国在特高压直流输电试验能力和试验技术方面达到了国际领先地位。

为了更好地培养特高压电网工程所需人才，推动特高压电网建设的进程，国家电网公司组织参与特高压直流输电工程建设的专家和技术人员，编写了《特高压直流输电技术丛书》，包括《特高压直流输电理论》《特高压直流输电工程电磁环境》《特高压直流外绝缘技术》《特高压直流输电系统过电压及绝缘配合》《特高压直流电气设备》《特高压直流输电线路维护与检测》和《特高压直流输电线路》共七册。丛书总结了国内各直流输电工程设计、建设和运行经验及2005年以来特高压直流输电科研和试验成果，凝聚了我国电力科技工作者的集体智慧。

本套丛书可作为从事特高压电网直流输电理论研究、科研试验、规划设计、设备制造、施工建设、运行维护等工作的技术人员的培训教材，也可为高等院校师生了解最前沿的特高压直流输电技术提供参考，还可供关心我国特高压输电事业的各界人士借鉴。

特高压输电是当今世界最先进的送电技术，随着特高压电网在中国的建设，我们仍会面临新的课题和大量工作。本书仅是我国特高压输电技术科研人员实践的总结，旨在为工程技术人员今后开展相关工作提供指导和借鉴，书中不足之处，敬请读者指正。

编者

2009年3月

目录

特高压直流输电理论

前言

绪论 1

第一章 概述 9

- 第一节 直流输电发展概况 9
- 第二节 直流输电系统的结构 18
- 第三节 直流输电的特点 26
- 第四节 直流输电的应用 29
- 第五节 特高压直流输电 33

第二章 高压直流输电换流器的工作原理 37

- 第一节 6 脉动整流器工作原理 37
- 第二节 6 脉动逆变器工作原理 45
- 第三节 12 脉动换流器 51

第三章 直流输电的稳态特性 57

- 第一节 直流输电额定值 57
- 第二节 直流输电最小输送功率 59
- 第三节 直流输电过负荷 60
- 第四节 直流输电降压运行 64

第五节	直流输电功率反送	66
第六节	直流输电稳态运行特性	70
第七节	直流输电工程运行方式	83
第八节	直流输电系统损耗	90

第四章 直流输电的控制与保护

第一节	概述	97
第二节	换流器的控制	100
第三节	直流系统的控制	110
第四节	直流输电系统控制保护装置	127
第五节	控制系统的分层结构	132

第五章 直流输电的谐波特性

第一节	换流器交流侧的特征谐波电流	138
第二节	换流站直流侧的特征谐波电压	142
第三节	换流站的非特征谐波	144
第四节	谐波的抑制	147

第六章 高压直流输电换流站

第一节	换流站概述	160
第二节	换流站主接线	161

第七章 直流输电接地极及其线路

第一节	对接地极的要求	172
-----	---------------	-----

第二节	接地极型式及其布置	177
第三节	接地极材料	181
第四节	导流系统及辅助设施	187
第五节	直流接地极引线	189
附录 A 国外已运行的直流工程		193
参考文献		197
后记		198

绪 论

一、直流输电的发展概况

世界上最早的直流输电是用直流发电机直接向直流负荷供电。1882年,法国物理学家德普勒用装设在米斯巴赫煤矿中的直流发电机,以1.5~2.0kV电压,沿着57km的电报线路,把电力送到在慕尼黑举办的国际展览会上,完成了有史以来的第一次直流输电试验。1912年采用直流发电机串联的方法,将直流输电的电压、功率和距离分别提高到125kV、20MW和225km。由于直流电源和负荷均采用串联方法,运行方式复杂,可靠性差,因此直流输电在当时没有得到进一步的发展。随着三相交流发电机、感应电动机和变压器的迅速发展,直流输电很快被交流输电所取代。直到20世纪50年代大功率汞弧阀的问世,直流输电技术才真正在工程中得到应用。但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,使直流输电的发展仍然受到限制。从1954年瑞典投入世界上第一个工业性直流输电工程起,到1977年最后一个采用汞弧阀的直流工程建成止,世界上也仅有12项采用汞弧阀的直流工程投入运行。20世纪70年代以后,电力电子技术和微电子技术迅速发展,高压大功率晶闸管、微机控制和保护、光电传输技术、水冷技术、氧化锌避雷器等新技术,在直流输电工程中得到了广泛的应用,促使直流输电技术得到了较快的发展。1954~2000年,全世界投入运行的高压直流输电工程总数近100个,总容量超过70000MW。其中 $\pm 450 \sim \pm 600$ kV直流输电工程有20多条。直流输电工程输送容量的年平均增长率,在1960~1975年为460MW/年,1976~1980年为1500MW/年,1981~1998年为2096MW/年,2000年后

的增长率更大。

我国从 20 世纪 60 年代开始对直流输电进行试验室研究, 1977 年在上海利用杨树浦发电厂到九龙变电所之间报废的交流电缆, 建成了国内第一个采用 6 脉动换流器的 31kV、150A、4.65MW、8.6km 的直流输电试验工程。1987 年全部采用国内技术的舟山直流输电工程投入运行, 从此直流输电在我国得到了应用和发展, 到 2007 年我国已有 10 项直流输电工程投入运行, 包括 $\pm 500\text{kV}$ 葛洲坝—南桥、天生桥—广东、三峡—常州、三峡—广东、三峡—上海、贵州—广东 1 回和 2 回等工程, 总的输送容量超过 18 000MW。从 2002 ~ 2007 年, 为配合三峡和云贵电力送出, 平均一年建成一个 3000MW 的大容量、远距离直流输电工程, 使我国已成为世界上直流输电容量最大、发展最快的国家。

100 多年交、直流输电发展的历史表明, 从总的输电容量看, 直流输电所占份额远小于交流输电, 但由于直流输电独特的优点 (利用其迅速而精确的调节性能可以提高与之并联的交流线路的稳定性和传输容量、将其作为大区电网间的联络线能提高互联系统运行的可靠性和灵活性等), 克服了交流输电的缺点, 因此, 出现了今天交、直流输电相辅相成、共同发展的局面。而且, 为了实现更大容量、更远距离的电力传输, 我国正在向着特高压交、直流输电方向前进。

国家电网公司在认真分析我国电力工业和电网的现状与发展趋势的基础上, 提出了加快建设由百万伏级交流和 $\pm 800\text{kV}$ 级直流系统构成的特高压电网的发展目标, 是落实科学发展观, 贯彻国家能源政策, 确保电力工业全面、协调、可持续发展的重大举措, 有利于实现更大范围的资源优化配置, 满足未来我国经济社会发展的用电需求, 具有重大的政治意义、经济意义和技术创新意义。

为实现西南水电以及大型火电基地电力送出, 正在建设的特高压直流输电工程有: $\pm 800\text{kV}$ 云南—广东直流输电工程, 额定容量 5000MW, 输电距离 1400km; $\pm 800\text{kV}$ 向家坝—上海直流输电工程, 额

定容量 6400MW, 输电距离约 2000km。这两个工程均计划于 2009 年建成第 1 极, 2010 年全部建成。 $\pm 800\text{kV}$ 锦屏—苏南直流输电工程, 额定容量 7200MW, 输电距离约 2100km, 计划 2012 年建成投运。 $\pm 800\text{kV}$ 、7200MW、2100km 的直流输电工程, 是当今世界上电压最高、输送容量最大和输电距离最远的直流输电工程。这些工程建成投产后, 我国将成为世界上直流输电电压最高的国家。

二、特高压直流输电关键技术

从 20 世纪 70 年代初期开始, 美国、苏联、巴西、加拿大、南非等国考虑到特大容量、超远距离输电的需求, 在进行特高压交流输电研究的同时, 也启动了特高压直流输电的研究工作。CIGRE、IEEE、美国 EPRI、巴西 CEPEL、加拿大 IREQ、瑞典 ABB 等科研机构和制造厂商, 在特高压直流输电关键技术研究、系统分析、环境影响研究、绝缘特性研究和工程可行性研究等方面取得了大量的成果, 其主要结论有:

(1) 在 1400 ~ 3000km 的距离输送大量的电力, 从经济和环境等角度考虑, 高于 $\pm 660\text{kV}$ 的特高压直流是优选的输电方式。

(2) $\pm 800\text{kV}$ 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。

(3) 基于目前的技术及可预见的发展, $\pm 1000\text{kV}$ 的高压直流输电系统在理论上是可行的, 但必须进行大量研究、开发工作。

(4) 目前看来, 发展 $\pm 1200\text{kV}$ 直流输电系统是不切合实际的, 即便将来通过大量深入细致的研究工作会有更好的设计, 但仍然需要有重大技术突破, 才有可能进行较为经济的设计, 前景难以预测。

以上说明, $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电技术已具备工程应用的基本条件, 目前可以制造出 $\pm 800\text{kV}$ 直流所需的所有设备, $\pm 800\text{kV}$ 直流输电技术用于实际工程是完全可行的。苏联曾规划建设从埃基巴斯图兹到唐波夫的 $\pm 750\text{kV}$ 、输送功率 6000MW、输送距离 2400km 的直流工程,

所有设备都已通过了型式试验，并已建成 1090km 线路，但最终停止了建设。虽然他们的研究成果、设计、设备制造、线路等的建设经验，可供我们建设 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程参考，但至今没有特高压直流输电系统的实际运行经验。我国 $\pm 800\text{kV}$ 高压直流输电工程途经高海拔、重污秽、覆冰、高地震烈度地区，为实现 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程，对线路电磁环境、过电压与绝缘配合、高海拔地区空气间隙外绝缘特性、绝缘子污闪特性、换流站接线方式、主设备技术规范、大件运输等关键技术问题，还需结合我国的实际情况进一步进行研究。

国家电网公司十分重视特高压直流输电工程关键技术问题的研究，要求“加强组织协调，整合国家电网公司的科研和技术资源，发挥大学和科研院所的作用，集中优势力量，完善特高压输电技术实验基地，对重大工程技术问题进行攻关”。自 2005 年开始，国家电网公司即组织有关科研、设计单位和高等院校，密切结合特高压直流在中国应用的实际情况，对特高压直流输电技术的关键技术问题展开研究，为了使研究成果得到试验验证，国家电网公司又在北京建成了特高压直流试验基地，并在西藏建设了高海拔直流试验基地。前者已于 2007 年 5 月投入使用，后者于 2008 年建成，从此，我国具备了进行 $\pm 1000\text{kV}$ 及以下特高压直流输电工程在不同海拔高度下的电磁环境、空气间隙放电特性、绝缘子污秽放电特性、直流避雷器等设备关键技术的试验研究能力，其试验功能达到了世界领先水平。经过参研人员几年的努力，对 $\pm 800\text{kV}$ 高压直流输电工程关键技术问题的研究已取得了一系列具有创新性的重大成果，为工程建设打下了基础。其主要研究成果有：

(1) 特高压直流输电电压等级研究。针对金沙江流域水能资源丰富，下游乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝四个电站总装机容量将达 38GW。一期溪洛渡、向家坝电站总装机容量 18.6GW，送电容量大，输电距离远，对特高压直流送出电压等级进行技术经济比较分析的结果表明： $\pm 800\text{kV}$ 直流和 $\pm 660\text{kV}$ 直流的等价输电经济距离约 1400km。从有效送

电距离、经济输电容量、充分利用送受端有限的线路走廊和接地极资源等各个角度出发,溪洛渡、向家坝电站采用3回 $\pm 800\text{kV}$ 、6400MW双极直流送出的方案经济优势明显。从长远看,考虑到金沙江二期、锦屏一二级电站等西部特大型电站远距离外送的通道需求,采用 $\pm 800\text{kV}$ 、7200MW特高压直流输电方案节省投资的效果更大。预计从“十二五”开始,西南水电和西藏水电外送需要特高压直流约16~17回。

(2) $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流换流站主接线研究。主接线应考虑换流设备的提供能力、运行的可靠性和灵活性。研究表明,每极采用1个12脉动换流器,投资最少,但换流变压器的容量远远超过目前设备的制造能力,且其尺寸和重量超过铁路和公路运输的限值,当单换流阀或变压器故障时,都将造成特高压直流单极停运,损失的输送容量达到3600MW,对两侧的交流系统造成的冲击和影响都会比较大。每极采用2个换流器串联的接线方式,虽然设备数量比单换流器方案增加了一倍,换流站占地、造价等也相应上升,但单台换流器容量下降了一半,有利于设备的制造和运输。由于每个12脉动换流器作为基本换流单元均可以独立运行,当换流阀或换流变压器故障时,可以只停运一个换流单元,损失的直流功率只有1800MW,对两端的交流系统冲击和影响也比较小,是切实可行的技术方案。

研究结果还表明,在每极采用2个换流器串联的接线方式中,以两个电压相等($400\text{kV}+400\text{kV}$)的换流器串联的方式,其技术经济性能更佳。与采用两个电压不等($300\text{kV}+500\text{kV}$ 或 $200\text{kV}+600\text{kV}$)的换流器串联相比,有利于解决换流变压器的设计制造困难,除高端换流变压器阀侧高压侧套管运行电压相同外,其他换流变压器阀侧套管的运行电压都较低,对相应的换流变压器阀侧绝缘结构设计和套管选用及避雷器配置有利;换流变压器分接开关电流较小,高端换流变压器和低端换流变压器分接开关可以统一设计,工厂制造成本较低;高端换流阀和低端换流阀可采用相同的水冷系统,可减少备用。尤为突出的是采用两个电压

相等的换流器串联的方式，运行方式灵活多样，在功率正送和功率反送的情况下，可以实现完整双极或单极运行方式、3/4 双极或单极运行方式、1/2 双极或单极运行方式，并且利用不同的换流器可组合成 49 种直流输电运行方式，可根据系统的要求灵活选择，以达到最经济运行的效果。

(3) $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电电磁环境影响研究。研究或试验表明，在 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电线路中，选择 $6 \times 720\text{mm}^2$ 导线，分裂间距取 45cm ，当海拔高度大于 2600m 后，选择 $6 \times 800\text{mm}^2$ 导线，分裂间距取 45cm ，极导线对地最小高度取 18m ，可以将直流输电线路的噪声、无线电干扰、地面合成电场强度、离子电流密度等限制到我国现在运行的 $\pm 500\text{kV}$ 高压直流输电线路的水平，完全满足电磁环境限值要求。

(4) 过电压与绝缘配合研究。对于特高压直流输电系统，由于长空气绝缘的饱和、高海拔和电气设备制造上的因素，给过电压和绝缘配合提出更高的要求。研究结果表明：将平波电抗器平均分置于极线和中性母线的布置方式，可以抑制并降低换流变压器阀侧高压端、直流阀顶、极线及平波电抗器两端等处的过电压幅值，有利于降低换流站高压端设备的绝缘水平。特高压直流输电线路中部过电压水平较高，如按线路全长 2071km 计算，过电压可达 1512kV ，如按调整后的线路长度 1935km 计算，过电压可达 1395kV 。鉴于其线路很长，建议根据沿线过电压幅值分段确定线路的绝缘水平，使其技术经济上更合理。最终确定了直流极线雷电和操作冲击绝缘水平推荐值为 1950kV 和 1600kV 。

(5) 污秽外绝缘研究。直流设备积污比交流的严重，输电线路及换流站污秽外绝缘的设计是否合理、正确，是特高压直流成败的关键。研究或试验表明， $\pm 800\text{kV}$ 直流输电线路在采用 I 形串和 V 形串时，对于一般地区，以盐密为 $0.05\text{mg}/\text{cm}^2$ 计，所需 I 形和 V 形单串钟罩形绝缘子片数应分别不少于 65 片和 56 片。在盐密超过 $0.1\text{mg}/\text{cm}^2$ 以上的污秽地区建议采用复合绝缘子，采用 V 形串时，在盐密为 $0.1\text{mg}/\text{cm}^2$ 时

所需复合绝缘子的长度约 10m。换流站处于轻污区时，直流开关场支柱瓷绝缘子爬电比距应不小于 52mm/kV，污秽偏重时应尽可能使直流开关场设备外绝缘合成化（如使用硅橡胶合成套管、瓷表面喷涂 RTV 等），或采用户内直流开关场。

(6) 空气绝缘研究。由于空气间隙的放电电压在更高的操作过电压下呈现饱和特性，因此 $\pm 800\text{kV}$ 特高压下的外绝缘问题是关系到系统可靠运行的重要问题。根据过电压研究和空气间隙放电特性试验研究结果，确定 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电工程 V 形绝缘子串直线杆塔最小空气间隙距离，在线路过电压为 1512kV、海拔高度为 1000m 及以下时应不小于 6.1m。

以上关键技术问题的研究结果将直接应用于工程建设，确保特高压直流输电工程的可靠性、先进性、经济性目标的顺利实现。现在向家坝—上海的 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电工程建设正在按计划进行，世界上第一个 $\pm 800\text{kV}$ 直流工程将于 2009 年在中国建成。

为了使电力系统职工和广大关心特高压直流输电技术的各界人士了解我国直流输电的过去、现在和将来，我们根据国内各直流输电工程设计、建设和运行经验及 2005 年以来特高压直流输电科研和试验成果，编写出这套特高压直流输电技术丛书，它包括《特高压直流输电理论》、《特高压直流输电工程电磁环境》、《特高压直流外绝缘技术》、《特高压直流输电系统过电压及绝缘配合》、《特高压直流电气设备》、《特高压直流输电线路维护与检测》和《特高压直流输电线路》共七个分册。

本书为《特高压直流输电理论》，共分七章。第一章主要介绍国内外直流输电系统发展的概况，直流系统的基本结构、特点及其应用，我国发展特高压直流输电的必要性和开展特高压直流输电研究已具备的条件。第二章为高压直流输电换流器的工作原理。换流器是实现交、直流转换的关键设备，本章介绍直流工程普遍采用的 6 脉动和 12 脉动