

特高压输电技术

TEGAOYA
SHUDIAN
JISHU

主编 杨 力



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

特高压输电技术



主编 杨 力
参编 吴 强 廖 萍 杜印官
主审 汤晓青



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

特高压电网指的是以 1000kV 输电网为骨干网架,由超高压输电网、高压输电网,以及特高压直流输电、高压直流输电和配电网构成的分层、分区、结构清晰的现代化大电网。本书主要向广大读者介绍特高压相关知识和一些典型示范工程。

本书共 4 章。主要内容有特高压技术概述、高压直流输电、特高压交流输电、特高压输电工程介绍。本书介绍了特高压输电技术的现状及发展趋势,高压直流输电相关知识及其设备,特高压交流输电和特高压直流输电相关知识及其设备,最后介绍了国内外特高压直流和特高压交流输电示范工程。

本书可以作为对特高压技术感兴趣读者的普及读物,也可以作为电力职业院校的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

特高压输电技术 / 杨力主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2011.5
ISBN 978-7-5084-8582-9

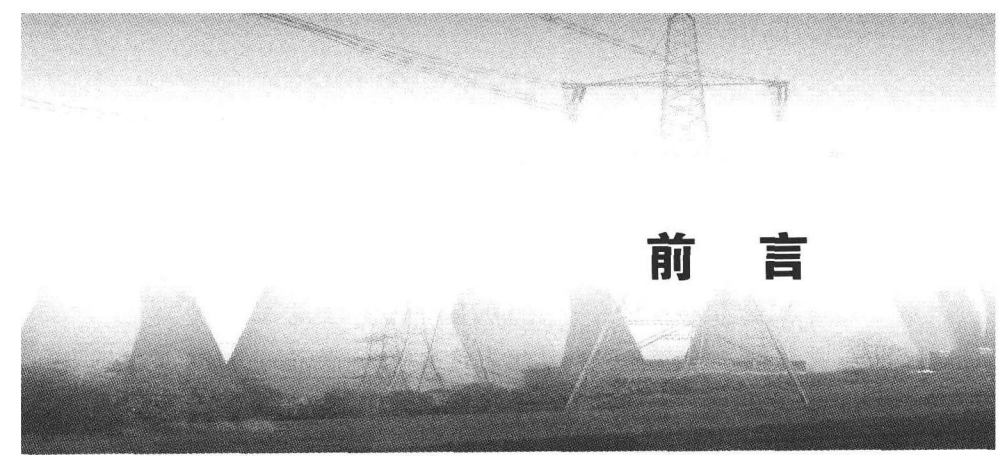
I. ①特… II. ①杨… III. ①特高压输电 IV.
①TM723

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第080631号

书 名	特高压输电技术
作 者	杨力 主编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (营销中心) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	140mm×203mm 32开本 4.375印张 118千字
版 次	2011年5月第1版 2011年5月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	18.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



前 言

电力工程是 21 世纪对人类社会生活影响最大的工程之一，电力技术的发展对城乡人民的生产和生活具有重大的影响，电力工业是关系国计民生的基础产业。特高压输电作为 21 世纪电网输电技术最新成果，在国外电网建设中方兴未艾，国家电网公司在落实科学发展观，贯彻国家能源政策过程中，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，满足我国经济社会发展的用电需求。

近年来，在政府部门的统一协调下，国家电网公司与电工装备制造企业、高等院校、科研机构、学会协会等方面通力合作，借鉴国外先进经验，攻克了一个又一个工程技术难题，全力推进特高压试验示范工程建设。2008 年 9 月 26 日，建成投运第一条 750kV 输电示范工程（官亭—兰州东）。2006 年 7 月，开工建设 1000kV 晋东南—南阳—荆门试验示范工程，在经过系统调试考核后，于 2009 年 1 月 6 日正式投入运行，标志着我国特

高压输电技术实现了重大突破。 $\pm 800\text{kV}$ 级的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。国家电网公司从 2005 年初启动 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电工程关键技术和可行性研究，组织电力系统各相关单位进行了一系列研究、攻关，取得了丰硕成果；2007 年 6 月，特高压直流试验基地试验线段全线带电，一次成功升压到 $\pm 800\text{kV}$ ；2010 年 7 月 8 日，向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电示范工程竣工投产。该工程是我国自主研发、自主设计和自主建设的，是世界上电压等级最高、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。

目前，特高压技术相关书籍已经出版很多，但普遍存在理论叙述较多、专业性强的特点，同时，对具体特高压技术示范工程介绍较少；由此，对特高压技术感兴趣的广大读者迫切需要一本通俗易懂、图文并茂的普及性读物，本书就是基于这一要求来编写的。本书首先介绍特高压技术在国内外发展状态，特高压交流输电、特高压直流输电基本特性和性能特点；然后介绍了高压直流输电技术和特高压交流输电技术基本知识，最后介绍了近年来国内外特高压典型示范工程实例。全书选取了 100 余幅现场拍摄的特高压线路、器件的珍贵图片，增加了本书的可读性。

本书由四川电力职业技术学院杨力副教授主编，吴强、廖萍、杜印官参编，汤晓青副教授承担了本书的审稿工作。其中，杨力编写了第 1 章，杜印官编写了第 2

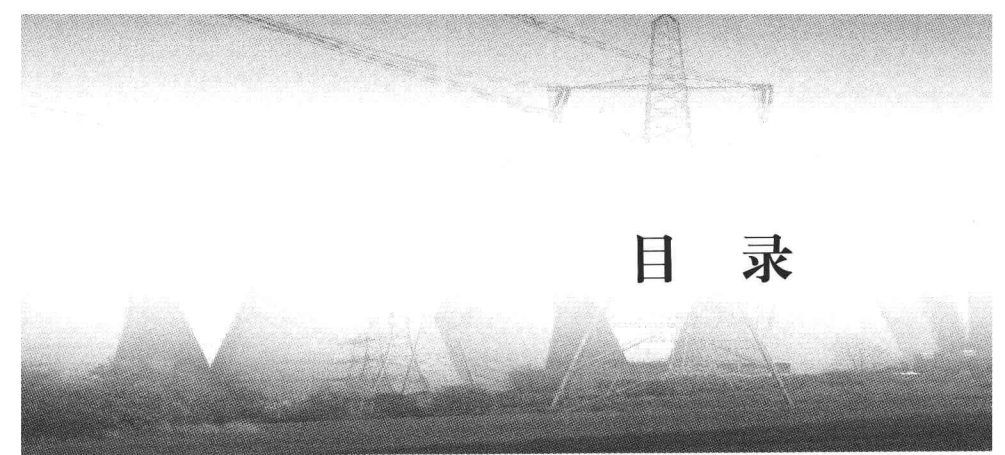
章，吴强编写了第3章，廖萍编写了第4章；杨力完成了全书的统稿工作。

本书的出版得到了四川省电力公司科技经费专项资助。

由于编者知识水平的不足，书中难免存在的不妥之处，恳请读者批评指正。

编者

2011年4月



目 录

前言

第 1 章 特高压技术概述	1
1.1 特高压输电发展概况	1
1.2 特高压直流输电系统的结构和特点	9
1.3 特高压交流输电基本特性及技术特点	15
第 2 章 高压直流输电	24
2.1 直流输电的结构和特点	24
2.2 直流输电中的换流技术	33
2.3 直流输电的应用和工程类型	39
2.4 特高压直流输电设备	43
2.5 直流输电的接地问题	52
2.6 高压直流输电运行和控制方式	56
2.7 直流输电的过电压和绝缘配合	65
第 3 章 特高压交流输电	70
3.1 特高压交流输电概述	70
3.2 特高压交流输电发展现状	72
3.3 特高压交流输电设备	76
第 4 章 特高压输电工程介绍	95
4.1 国外特高压直流输电工程介绍	95

4.2 国外特高压交流输电工程介绍	97
4.3 中国特高压直流输电工程介绍	100
4.4 中国特高压交流输电工程介绍	117
参考文献	132

第 1 章 特高压技术概述

1.1 特高压输电发展概况

1.1.1 电网的功能及发展

1. 电网的基本功能

电网是将各种类型的发电厂（站）的电力输送到电力用户的电力传输网络，它由升压变电站、降压变电站及其相连的输电线路，相关的保护控制及通信系统组成。电网一般分为输电网和配电网。所有输变电设备连接起来构成输电网，所有配变电设备连接起来构成配电网。输电网和配电网统称为电网。发电厂、输电网、配电网和用电设备连接起来组成为一个集成的整体，称为电力系统。图 1.1 所示为电力系统结构图。

输电设备主要有输电线、杆塔、绝缘子串、架空地线等。变

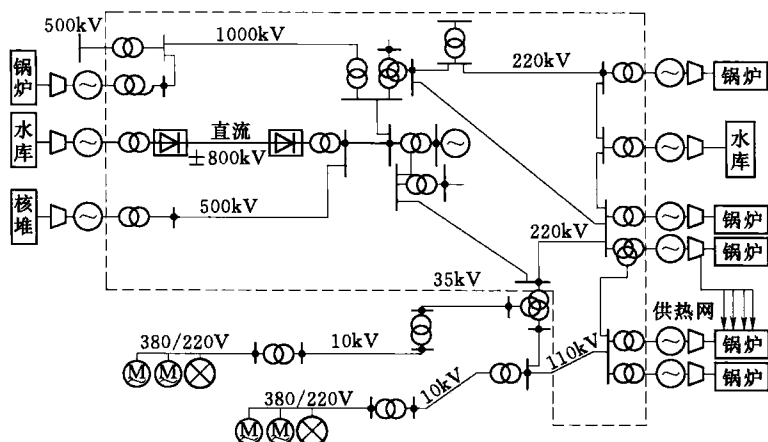


图 1.1 电力系统结构图（虚框中为输电网）



电站内有变压器、电抗器（用于 330kV 以上的输电线路）、断路器、隔离开关、避雷器、电压互感器、电流互感器、母线等一次设备和确保安全、可靠输电的继电保护、监测和控制装置等二次设备。输电网一次设备和相关的二次设备的协调配合，是实现电力系统安全稳定运行，避免连锁事故发生，防止大面积停电的重要保证。

电网的基本功能是传输电能，通过电网将发电机组发出的电力输送到电力用户，或实现地区间、区域间的电能传输。对电网传输电能的基本要求是在安全、可靠、高效率、低损耗输电的基础上保证电网电压、频率、波形等相关的电能质量指标合格。

由于电能不能大规模储存，因此电力系统必须时刻保持电力供需平衡，否则将危及电力系统的稳定和安全。

大型、特大型发电机的利用和大容量、特大容量发电厂的建设，将产生更大规模经济效益。它们通过输电网可实现区域互联，在更大范围内进行电力的经济调度。

由于各区域电力资源的不平衡，输电的联网功能，特别是采用比区域骨干电网更高一级电压的输电联网已变得特别重要。它提供更充裕的互联，促进有效竞争的电力市场稳健发展，图 1.2 所示为输电网实景图。

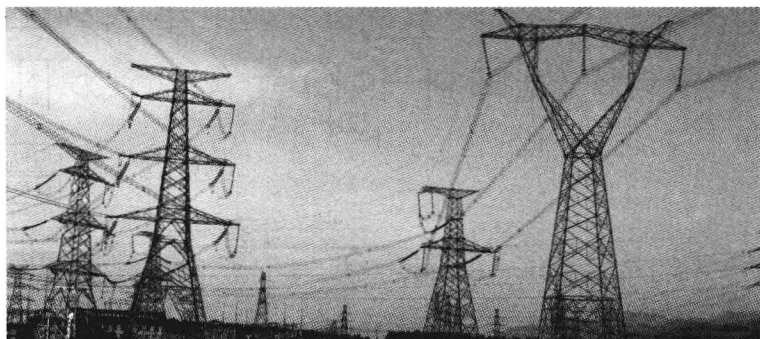


图 1.2 输电网实景图



2. 电网的发展

电力的广泛应用，电力需求的不断增加，推动电力技术日益向高电压、大机组、大电网发展，向电力规模经济发展。电力工业按生产和消费过程可分为发电、输电、配电和用电 4 个环节。输电通常指的是将发电厂或发电基地（包括若干电厂）发出的电力输送到消费电能的地区（又称负荷中心），或者将一个电网的电力输送到另一个电网，实现电网互联，构成互联电网。

随着电网技术的不断进步，输电容量和输电距离的不断增加，电网电压等级不断提高。电网电压从最初的 13.8kV，逐步发展到高压 35kV、66kV、110kV 和 220kV。1908 年，美国建成了 110kV 输电线路，1923 年，建成第一条 230kV 线路并投入运行。

进入 20 世纪 50 年代后，输电线路电压等级迅速向超高压 330kV、345kV、400kV、500kV、735kV、750kV、765kV 发展。瑞典于 1952 年建成世界上第一条 380kV 超高压线路。美国于 1954 年建成第一条 345kV 线路，1969 年又建成 765kV 线路。前苏联 1956 年建成 400kV 线路，1967 年建成 750kV 线路。最早建设 750kV 线路的是加拿大，于 1965 年建成 735kV 线路。1964 年，前苏联将 400kV 输电线路改造升压为 500kV 线路，接着美国于 1964 年建成投运 500kV 线路。在发达的欧美国家，500kV 线路发展比较慢，在超高压输电方面，主要发展 345kV、380kV 和 750kV 级的输电线路。

20 世纪 60 年代末，美国、前苏联、意大利、日本、加拿大、巴西等国开始进行 1100kV 和 1500kV 特高压输电技术和特高压输电工程可行性的研究。1985 年，前苏联第一条电压为 1150kV 特高压输电线路建成投运，一直运行到 1989 年。1988 年，日本开始建设 1000kV 特高压输电线路，于 1999 年建成两条共长约 430km 的线路，降压到 500kV 运行。

从 1882 年在上海创办中国第一家公用电业公司——上海电气公司算起，中国电力工业至今已经走过近 120 年的历程。1949



年前, 中国电力工业输电线路建设比较迟缓, 输电电压按具体工程决定, 因而, 电压等级繁多。1908 年, 建成 22kV 石龙坝水电站至昆明线路; 1921 年, 建成 33kV 石景山电厂至北京城的线路; 1933 年, 建成抚顺电厂的 44kV 出线; 1934 年, 建成 66kV 延边至老头沟线路; 1935 年, 建成抚顺电厂至鞍山的 154kV 线路; 1943 年, 建成 110kV 镜泊湖水电站至延边线路。

新中国成立前, 中国电网受国外电力公司控制和影响, 电压等级比较混乱, 到 1949 年后才按电网发展统一输电电压, 逐渐形成经济合理的输电电压系列。1952 年, 中国以自己的技术建设了 110kV 输电线路, 逐渐形成京津唐 110kV 输电网。

1954 年, 建成丰满至李石寨 220kV 输电线, 以后继续建设辽宁电厂至李石寨、阜新电厂至青堆子等 220kV 线路, 迅速形成东北电网 220kV 骨干网架。1972 年, 建成 330kV 刘家峡至关中输电线路, 全长 534km, 以后逐渐形成西北电网 330kV 骨干网架。1981 年, 建成 500kV 姚孟至武昌输电线路, 全长 595km。为适应葛洲坝水电站送出工程的需要, 1983 年又建成葛武和葛双两回 500kV 线路, 开始形成华中电网 500kV 骨干网架。中国在逐渐形成 330kV 和 500kV 区域输电骨干网架的同时, 于 20 世纪 80 年代初开始了 330kV 和 500kV 以上更高输电电压等级的论证。20 世纪 90 年代, 针对输电工程需要, 继续进行了特高压输电和 750kV 输电可行性研究, 建立特高压试验基地, 开展特高压技术试验研究, 图 1.3 所示为武汉特高压试验基地。

进入 21 世纪后, 中国开始规划发展和设计建设 1000kV 特高压交流输电系统和 ± 800 kV 特高压直流输电系统。2008 年 9 月 26 日, 建成投运第一条 750kV 输电

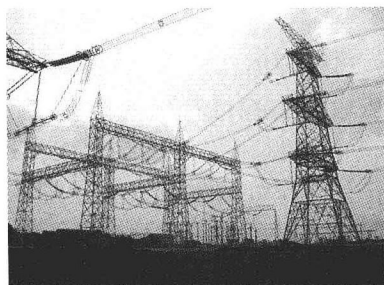


图 1.3 武汉特高压试验基地



示范工程（官亭—兰州东）。2006 年 7 月，开工建设 1000kV 晋东南—南阳—荆门试验示范工程，在经过系统调试考核后，于 2009 年 1 月 6 日正式投入运行，图 1.4 所示为该特高压交流输电线路跨越黄河图。2010 年 7 月 8 日，向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程竣工投产。该工程是中国自主研发、自主设计和自主建设的，是世界上电压等级最高、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，图 1.5 所示为该工程输电线路图。

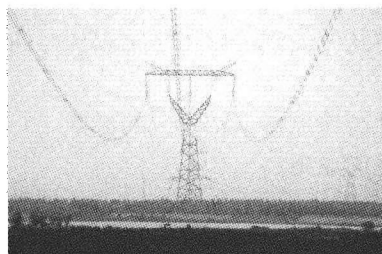


图 1.4 1000kV 特高压交流输电
线路跨越黄河

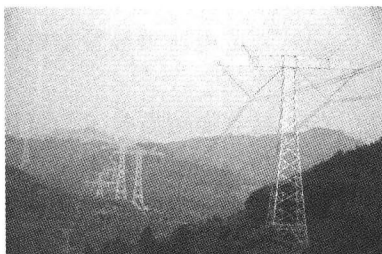


图 1.5 向家坝—上海±800kV
直流输电线路

1.1.2 特高压电网

电网发展的历史表明：相邻两个电压等级的极差，在一倍以上才是经济合理的。前苏联 1150kV 输电线路运行表明：特高压输电技术和设备经过多年的研究和开发，已经达到实际运行的特高压输电工程的要求，因此，研究和建设由特高压交、直流输电线路组成的合理的电网结构，成为世界各国国家大电网发展趋势。

1. 特高压电压等级选择的原则

电网新的更高电压等级的选择是一个长期电力发展规划问题。输电电网新的更高电压等级系指在现有电网之上覆盖一个新的更高电压输电网的电压标称值。新的更高电压等级应满足投入之后 20~30 年大功率输电的需求。因此，超高压—特高压电压等级的选择应从一个国家未来电网发展及管理体制进行规划和决



策，不能仅根据 1~2 项具体工程的需要做出决策。

超高压—特高压电压等级的决策应从现有超高压电网出发，面向未来的输电需求进行综合分析。分析时，应遵循以下基本原则：

(1) 与所覆盖的地理区域范围、电力系统的规模相匹配的原则。

(2) 与现有超高压电压等级的经济合理配合的原则。

(3) 与电网的平均输电容量（能力）和输电距离相适应的原则。

(4) 新的电压等级输变电设备从开发到可以用于工程的时间相协调的原则。

(5) 特高压输电技术的可用性与输电需求相统一的原则。

(6) 与新的发电技术相互促进的原则。

根据未来输电需求预测，需要更高电压仅作为 1~2 项远距离输电工程的电压，包括特高压交流和特高压直流，则可以考虑按经济成本进行不同方案比较，以最经济方案和技术的可行性决定输电工程的电压等级。

2. 确定特高压电压等级的方法

确定特高压电压等级，一般按未来 20~30 年输电网不同的平均输送容量和不同的平均输电距离的要求，以 1~2 个电压等级进行输电能力分析，得出不同方案的每千瓦电力的输电成本曲线，以各成本曲线的经济平衡点或平衡区决定更高电压标称值。

经过大量的分析，普遍认为超高压电网更高一级电压标称值应高出现有电网最高电压 1 倍及以上。这样，输电容量可提高 4 倍以上，不仅可与现有电网电压配合，而且为今后新的更高电压的发展留有合理的配合空间，能做到简化网络结构，减少重复容量，容易进行潮流控制，减少线路损耗，有利于电网安全运行。

研究表明：500kV 电网按 1.5~1.6 倍选用 750kV（或 765kV）为更高电压等级是不可取的，因为对短距离输电而言，750kV 输电不如 500kV 合理，而对远距离输电，750kV 不如



1000kV 好，因此在 500kV 输电以上的特高压电压等级应该选择 1000kV。

1.1.3 特高压电网发展历程

随着用电负荷日益快速增长和远距离、大容量输电需求的增加，发电技术和输电技术日新月异。在 20 世纪 60~70 年代，大型和特大型发电机组不断投入运行，大容量火电厂、水电厂和核电厂不断建设和运行。美国于 1950~1970 年末共建成容量超过 2000MW 的发电厂将近 60 座；仅 255 台额定容量为 600MW 及更大的汽轮发电机组就占矿物燃料和核燃料发电总容量的 47%；1954~1969 年，属于公用事业投资的火力发电厂容量从 67957MW 增长到 209950MW，而发电厂的数目却从 703 个减至 656 个。

大容量发电厂的建设增加了对大容量输电的要求。发达国家的输电网从 20 世纪 50 年代在以高压电网为主的基础上，逐渐形成 330kV、345kV 以及 500kV 超高压输电网。前苏联、美国和加拿大等国逐渐建成了 750kV 和 765kV 等电压等级的电压最高的超高压输电网。

同时，高压、超高压输电线路和变电站的数目越来越多，环境问题变得日益突出，特别是输变电用地的约束条件将限制超高压输电的发展。大容量输电将实现规模经济，减少线损，避免输电设备的重复容量，确保电力系统可靠性，使输电线路土地占用降至最小。特高压输电被认为是提高线路输电能力的主要途径。美国电力公司（AEP），美国邦纳维尔电力公司（BPA 电力公司），日本东京电力公司，前苏联、意大利和巴西等国的电力公司，于 20 世纪 60 年代末或 70 年代初按电力发展需要开始进行特高压可行性研究。在广泛、深入的调查和研究的基础上，先后提出了特高压输电的发展规划和初期特高压输变电工程的预期目标和进度。

1. 美国特高压电网

美国 BPA 电力公司于 1970 年制订规划，拟用 1100kV 远距



离输电线路，将喀斯喀特山脉东部煤矿区的坑口发电厂群的电力输送到西部用电负荷中心，输送容量为 $8000 \sim 10000 \text{ MW}$ 。经论证，采用特高压输电可减少线路走廊用地，降低电网工程的造价，同时减少电网网损，并妥善解决了大型和特大型机组和发电厂故障引起的系统稳定性问题。

BPA 电力公司当时计划于 1995 年建成第一条 1100 kV 线路，输送功率 6000 MW ，经过 5 年后可能再建一条线路。

美国电力公司（AEP）为了减少输电线路走廊用地和应对环境问题，提升 765 kV 输电能力，曾规划在已有的 765 kV 电网之上叠加 1500 kV 特高压骨干电网。

2. 前苏联特高压电网

前苏联于 20 世纪 70 年代进行规划，在西伯利亚地区的坎斯克建设火力发电厂群。同时建设起于坎斯克经由伊塔特、巴尔淖尔到哈萨克斯坦的科克切塔夫、库斯坦奈，然后到乌拉尔的车里雅宾斯克的 1150 kV 输电线路，全长 2500 km ，将西伯利亚丰富的煤电和水电电力输送到前苏联的乌拉尔和其他欧洲部分的用电负荷中心。这条 1150 kV 输电线路同时还是前苏联西伯利亚—哈萨克斯坦—乌拉尔 3 个联合电力系统的联络线。已建成埃基巴斯到科克切塔夫 500 km 和科克切塔夫到库斯坦奈 400 km 线路（在哈萨克斯坦境内）。

3. 日本特高压电网

日本于 20 世纪 70 年代开始规划，80 年代初开始特高压技术研究，建设东西和南北两条 1000 kV 输电主干线将位于东部太平洋沿岸的装机容量分别为 4700 MW 和 4400 MW 的福岛第一和第二核电站，装机容量为 8120 MW 的柏崎核电站的电力输送到东京湾的负荷中心。两条线全长 487.2 km ，已全部建成，计划输送电力 10000 MW 以上。未来特高压输电系统功能将归结为：解决现有 500 kV 系统的稳定问题；解决 500 kV 系统东部日益增长的短路电流问题；为解决未来远距离传送电力的稳定问题奠定基础。



4. 中国特高压电网

中国从 20 世纪 80 年代末开始对特高压电网的规划和设备的制造进行研究。进入 21 世纪后,中国加快了特高压输电设备、电网研究和工程建设。2005 年 9 月 26 日,第一条 750kV 输电试验线路(官亭—兰州东)示范工程投运。2006 年 12 月,云南—广东±800kV 特高压直流输电示范工程开工建设,并于 2010 年 6 月 18 日,通过验收正式投入运行,该工程输电距离 1373km,额定电压±800kV,额定容量 500 万 kW,这是迄今世界电压等级最高的直流输电项目。2007 年 6 月,中国第一条 1000kV 交流输电线路,即晋东南—南阳—荆门 1000kV 特高压交流试验示范工程开工建设,2009 年 1 月 6 日,该工程经过系统调试后投入运行。

1.2 特高压直流输电系统的结构和特点

1.2.1 特高压直流输电的系统构成

±600kV (1200kV) 以上电压的直流输电在绝缘、电晕水平等方面与特高压交流输电大体相当,称为特高压直流输电(UHVDC)。目前,±800kV 直流输电是技术上可行的输电技术。特高压直流输电工程主要采用±800kV 特高压直流输电。向家坝—上海±800kV 直流输电工程是中国在建的容量最大的特高压直流工程。该工程额定功率 6400MW,额定电流 4000A,额定电压±800kV,送端位于四川省宜宾市西南 15km 的向家坝,受端位于上海市奉贤区的陆家宅村,直流线路长 1916km,直流输电导线截面采用 ACSR-6×720mm²。每极采用两组额定运行电压为 400kV 的 12 脉动换流器串联,12 脉动换流器两端通过隔离开关连接直流旁路断路器。

1.2.2 特高压直流输电接线和运行方式

特高压直流输电采用如图 1.6 所示的接线方式。通过旁路断